



**YAPISAL AHŞAP I-KİRİŞLERİN ÇELİK
TAKVİYELER İLE GÜÇLENDİRİLMESİ:
DENEYSEL ANALİZ VE PERFORMANS
DEĞERLENDİRMESİ**

Sena ASLAN

Yüksek Lisans Tezi

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

2025

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ERZURUM TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



YAPISAL AHŞAP I-KİRİŞLERİN ÇELİK TAKVİYELER İLE
GÜÇLENDİRİLMESİ: DENEYSEL ANALİZ VE PERFORMANS
DEĞERLENDİRMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sena ASLAN

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Muhammed GÜRBÜZ

İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Casim YAZICI

ERZURUM, 2025

T.C.
ERZURUM TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TEZ KABUL VE ONAY TUTANAĞI

**YAPISAL AHŞAP I-KİRİŞLERİN ÇELİK TAKVİYELER İLE
GÜÇLENDİRİLMESİ: DENEYSEL ANALİZ VE PERFORMANS
DEĞERLENDİRMESİ**

Dr. Öğr. Üyesi Muhammed GÜRBÜZ danışmanlığında ve Dr. Öğr. Üyesi Casim YAZICI eş danışmanlığında Sena ASLAN tarafından hazırlanan bu çalışma 30.10.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **Oy birliği ile (5/5)** kabul edilmiştir.

Danışman:	Dr. Öğr. Üyesi Muhammed GÜRBÜZ <i>Erzurum Teknik Üniversitesi</i>	<i>İmza</i>
İkinci Danışman:	Dr. Öğr. Üyesi Casim YAZICI <i>Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi</i>	<i>İmza</i>
Üye:	Prof. Dr. Mehmet Fatih ÖZKAL <i>Erzurum Teknik Üniversitesi</i>	<i>İmza</i>
Üye:	Doç. Dr. Dilek OKUYUCU <i>Erzurum Teknik Üniversitesi</i>	<i>İmza</i>
Üye:	Doç. Dr. İrfan KOCAMAN <i>Atatürk Üniversitesi</i>	<i>İmza</i>

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum.

Prof. Dr. İlker KAZAZ
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 124M717 numaralı proje ile desteklenmiştir.

ÜRETKEN YAPAY ZEKÂ VE ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki tüm bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etik ilkelere uygun davrandığımı ve tezin hazırlanması sürecinde üretken yapay zekâ programlarından, içeriğin ve sonuçların özgünlük sorumluluğunun tarafıma ait olması ve çalışmanın bilimsel niteliğini etkilemeyecek düzeyde, yalnızca yardımcı bir araç olarak sınırlı düzeyde destek alındığını beyan ederim.

30.10.2025

İmzası

Sena ASLAN

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezimin oluşmasına en büyük katkıyı sağlayan, hiçbir konuda yardımını esirgemeyen, çalışmamın her aşamasında değerli vaktini, tecrübelerini, bilgi ve birikimlerini benimle paylaşarak beni cesaretlendiren danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Muhammed GÜRBÜZ'e en içten saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

Tezin deneysel çalışmaları sürecindeki yardımları ve kıymetli önerilerinden dolayı Dr. Öğr. Üyesi Casim YAZICI ve Doç. Dr. İrfan KOCAMAN'a çok teşekkür ederim. Bu çalışma 219M403 kodlu TÜBİTAK 1001 projesinden sağlanan düzenekle yapılmıştır. Deney sürecinde laboratuvar ve teknik konulardaki destekleri için kıymetli Doç. Dr. Dilek OKUYUCU ve Arş. Gör. Burak GEDİK'e teşekkür ederim. Çalışmama sunduğu değerli katkılardan dolayı Prof. Dr. Mehmet Fatih ÖZKAL'a da ayrıca teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 124M717 numaralı proje ile desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Hayatımın her döneminde yanımda olan, destekleriyle başarılarımı temellendiren, bu günlere gelmemi sağlayan bütün ailem başta olmak üzere babam İLYAS ASLAN'a ve annem Gülperi ASLAN'a teşekkürü borç bilirim. Bu süreçte bana göstermiş oldukları sabır, hoşgörü ve desteklerinden dolayı kardeşlerim Mısra ASLAN, Ahsen ASLAN ve Eymen ASLAN'a sevgilerimi ve teşekkürlerimi sunarım.

Sena ASLAN

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YAPISAL AHŞAP I KİRİŞLERİN ÇELİK TAKVİYELER İLE GÜÇLENDİRİLMESİ: DENEYSEL ANALİZ VE PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ

Sena ASLAN

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Muhammed GÜRBÜZ

İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Casim YAZICI

Ekolojik açıdan sürdürülebilir ve yenilenebilir bir kaynak niteliği taşıyan ahşap, tarihsel süreçte kullanılan en eski yapı malzemelerinden biridir. Günümüzde alternatif yapı bileşenlerine kıyasla daha düşük karbon ayak izine sahip olması, ahşabın modern inşaat sektöründeki öncelikli tercih sebebi haline gelmesini sağlamıştır. Söz konusu bu kullanım yaygınlığı, ahşabın yapısal performansının artırılmasına yönelik çalışmaları da beraberinde getirmiştir. Literatür incelendiğinde, bu alandaki araştırmaların büyük ölçüde polimer kompozit uygulamalara, özellikle de karbon fiber takviyeli polimerlere (CFRP) odaklandığı görülmektedir. Buna karşın, çelik güçlendirme konfigürasyonlarının yapısal performansa etkileri literatürde nispeten daha sınırlı sayıda araştırmaya konu olmuştur. Mevcut literatürdeki bu boşluktan hareketle hazırlanan bu çalışma kapsamında; Ardanuç ladininden üretilen I-kesitli ahşap kirişler üzerinde dört farklı yenilikçi çelik güçlendirme konfigürasyonu ele alınmış ve bu sistemlerin yapısal performansa etkileri deneysel olarak analiz edilmiştir.

Yürütülen deneysel çalışmalar neticesinde; farklı çelik güçlendirme konfigürasyonlarının, kirişlerin mekanik davranışları ve hasar mekanizmaları üzerindeki belirleyici etkisi saptanmıştır. Elde edilen veriler ışığında, dikey tij takviye (RB) sisteminin en kapsamlı ve dengeli yapısal iyileşmeyi sağladığı görülmüştür. Söz konusu konfigürasyon; rijitliği yaklaşık %138, maksimum yük kapasitesini %28 ve enerji emilimini ise %45 oranında artırarak diğer yöntemler arasında öne çıkmıştır. Bununla birlikte, tüm gruplar üzerinde gerçekleştirilen detaylı hasar analizleri, güçlendirilmiş ahşap kirişlerin karakteristik zayıf noktasını da ortaya koymuştur. Bu bağlamda; süreksiz gövde ek yerlerinin varlığı, yapısal hasarı tetikleyen ve sistemin nihai kapasitesine ulaşmasında belirleyici olan temel unsur olarak kaydedilmiştir.

Çalışmada, başta dikey tij takviye sistemi olmak üzere farklı çelik elemanların ahşap kirişlerin güçlendirilmesinde etkin bir yöntem olduğu saptanmış; ancak güçlendirme performansının ahşap kalitesine doğrudan bağımlı olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Ahşap I kiriş, hasar modu, deneysel davranış, çelik güçlendirme, davranış iyileştirmesi

ABSTRACT

MASTER'S THESIS

STRENGTHENING OF STRUCTURAL TIMBER I-BEAMS WITH STEEL ELEMENTS: EXPERIMENTAL ANALYSIS AND PERFORMANCE EVALUATION

Sena ASLAN

Erzurum Technical University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Muhammed GÜRBÜZ

Co-Supervisor: Assist. Prof. Dr. Casim YAZICI

Timber which is an ecologically sustainable and renewable resource, is one of the oldest construction materials used throughout history. Nowadays, timber has become a preferred choice in the modern construction sector due to its lower carbon footprint relative to alternative building components. This widespread use has also led to research aimed at enhancing the structural performance of timber. Research on the strengthening of timber beams has predominantly focused on polymer composite applications, particularly carbon fiber-reinforced polymers (CFRP). However, the effects of steel reinforcement configurations on the structural performance of timber beam have not been sufficiently investigated in the literature. In response to this gap in the existing literature, this study; I-section timber beams produced from Ardanuç spruce has been experimentally examined through of four innovative steel reinforcement configurations and their effects on the structural performance of timber beams.

As a result of the experimental studies conducted, it was observed that different steel reinforcement configurations have a decisive effect on the mechanical behavior and damage mechanisms of the beams. The results demonstrated that the rod-based (RB) reinforcement provided the most comprehensive and balanced. This configuration showed the best performance among other methods, significantly increasing stiffness by approximately 138%, maximum load by 28%, and energy absorption by 45%. However detailed analyses conducted on all groups also highlight the characteristic weak point of reinforced timber beams. In this context; the presence of discontinuous web joint has been noted as a key element that triggers structural damage and decisive in the system's attainment of its ultimate capacity.

The study concludes that while discrete steel elements, particularly the rod system, offer a highly effective means of reinforcing timber beams, their performance is intrinsically linked to the quality of the base material.

Keywords: Timber I beam, failure mode, experimental behavior, steel reinforcement, improved behavior

İÇİNDEKİLER

ÜRETKEN YAPAY ZEKÂ VE ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI	i
TEŞEKKÜR	ii
ÖZET.....	iii
İÇİNDEKİLER	v
TABLolar DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ	x
1.GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı ve Önemi.....	3
1.2. Tezin Kapsamı.....	3
1.3. Hipotez	4
2. KAYNAK ÖZETLERİ	5
3. MALZEMELERİN GENEL ÖZELLİKLERİ.....	18
3.1. Ahşap.....	18
3.1.1. Ahşapların Sınıflandırılması.....	20
3.1.2. Ahşap Malzemenin Kusurları.....	22
3.1.4. Ahşap Yapılar ve Tarihçesi	23
3.1.5. Ahşap Yapıların Avantajları ve Dezavantajları.....	24
3.1.6. Ahşabın Özellikleri.....	26
3.1.7. Ahşabın Kimyasal Özellikleri	26
3.1.8. Ahşabın Fiziksel Özellikleri	26
3.1.8.1. Ahşap Malzemedeki Nem Oranı	26
3.1.8.2. Ahşap Malzemenin Birim Hacim Ağırlığı	27
3.1.8.3. Ahşabın Isı Özellikleri.....	27
3.1.8.4. Ahşabın Sertlik Özelliği	27
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	28
4.1. Materyal.....	28
4.2. Yöntem	30
4.3. DeneySEL Hazırlık ve Güçlendirme Detayları	33
5. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	41
5.1. Göçme Modları.....	41

5.2. Elastisite Modülü.....	49
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	50
KAYNAKÇA	59
EKLER.....	65
EK-1A. CB01 numunesi için yük-deplasman eğrisi ve hasar mekanizmaları	65
EK-1A. CB03 numunesi için yük-deplasman eğrisi ve hasar mekanizmaları	66
EK-1A. CB04 numunesi için yük-deplasman eğrisi ve hasar mekanizmaları	67
EK-1B. AB01 numunesi için yük-deplasman eğrisi ve hasar mekanizmaları	68
EK-1B. AB03 numunesi için yük-deplasman eğrisi ve hasar mekanizmaları	69
EK-1C. BP01 numunesi için yük-deplasman eğrisi ve hasar mekanizmaları.....	70
EK-1C. BP03 numunesi için yük-deplasman eğrisi ve hasar mekanizmaları.....	71
EK-1D. EP02 numunesi için yük-deplasman eğrisi ve hasar mekanizmaları.....	72
EK-1D. EP03 numunesi için yük-deplasman eğrisi ve hasar mekanizmaları.....	73
EK-1E. RB01 numunesi için yük-deplasman eğrisi ve hasar mekanizmaları.....	74
EK-1E. RB03 numunesi için yük-deplasman eğrisi ve hasar mekanizmaları.....	75
EK-2A. Başlangıç elastik bölge ve doğrusal uyumu gösteren AB grubu numunelerinin rijitlik grafiği	76
EK-2B. Başlangıç elastik bölge ve doğrusal uyumu gösteren BP grubu numunelerinin rijitlik grafiği	77
EK-2C. Başlangıç elastik bölge ve doğrusal uyumu gösteren EP grubu numunelerinin rijitlik grafiği.....	78
EK-2D. Başlangıç elastik bölge ve doğrusal uyumu gösteren RB grubu numunelerinin rijitlik grafiği	79
EK-2E. Başlangıç elastik bölge ve doğrusal uyumu gösteren CB grubu numunelerinin rijitlik grafiği	80
EK-3A. AB grubu numunelerinin %60, %65 ve %70 P_{max} tepe sonrası entegrasyon eşiği enerji soğurma grafikleri	81
EK-3B. BP grubu numunelerinin %60, %65 ve %70 P_{max} tepe sonrası entegrasyon eşiği enerji soğurma grafikleri	82
EK-3C. EP grubu numunelerinin %60, %65 ve %70 P_{max} tepe sonrası entegrasyon eşiği enerji soğurma grafikleri	83
EK-3D. RB grubu numunelerinin %60, %65 ve %70 P_{max} tepe sonrası entegrasyon eşiği enerji soğurma grafikleri	84

EK-3E. CB grubu numunelerinin %60, %65 ve %70 $P_{\max}$ tepe sonrası entegrasyon eşiği enerji soğurma grafikleri	85
---	----



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 2.1. Literatür araştırması	9
Tablo 3.1. Ahşap malzemenin diğer yapı malzemeleriyle taşıma gücü karşılaştırması (Saral, 2016)	19
Tablo 3.2. Masif ahşap malzemenin emniyet gerilmeleri (Yüncüler, 2019).....	21
Tablo 3.3. Ahşap malzemenin kusurları (Okka, 2020)	22
Tablo 4.1. Çalışmada kullanılan malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri (Okka, 2020).....	30
Tablo 4.2. Güçlendirilen ahşap kirişlerin kodlaması.....	34
Tablo 6.1. Yapısal değerlendirme sonuçları.....	54

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Literatürde ahşap kirişlerin güçlendirilmesi için kullanılan malzemeler	8
Şekil 2.2. Farklı güçlendirme tekniklerini karşılaştırma durumuna göre çalışmaların dağılımı	8
Şekil 4.1. Ahşap malzeme gövde kesit detay çizimi.....	29
Şekil 4.2. Deney düzeneğinin şematik çizimi	31
Şekil 4.3. Deney düzeneğindeki veri ölçüm noktaları detaylı şematik çizimi.....	32
Şekil 4.4. Deney düzeneği çerçeve sistemi ve veri ölçüm noktaları.....	33
Şekil 4.5. Taban plakası konfigürasyonu detay çizimi (Ölçüler mm cinsindendir).....	35
Şekil 4.6. Başlık plakası konfigürasyonu detay çizimi (Ölçüler mm cinsindendir)	36
Şekil 4.7. Korniyerli güçlendirme konfigürasyonu detay çizimi (Ölçüler mm cinsindendir)	37
Şekil 4.8. Tijli güçlendirme konfigürasyonu detay çizimi (Ölçüler mm cinsindendir) ..	38
Şekil 4.9. Ahşap I-kiriş numunelerinin her bir güçlendirme grubuna ait deney öncesi genel görünümü ve gövde ek birleşim yerinin gösterilmesi.....	40
Şekil 5.1. CB02 kontrol numunesi için yük-deplasman eğrisi ve hasar mekanizmaları	42
Şekil 5.2. AB02 numunesi için yük-deplasman eğrisi ve hasar mekanizmaları.....	44
Şekil 5.3. BP02 numunesi için yük-deplasman eğrisi ve hasar mekanizmaları	45
Şekil 5.4. EP01 numunesi için yük-deplasman eğrisi ve hasar mekanizmaları.....	47
Şekil 5.5. RB02 numunesi için yük-deplasman eğrisi ve hasar mekanizmaları	48
Şekil 6.1. Korniyer takviyeli (AB) ve taban plaka takviyeli (BP) güçlendirme grubunun kontrol gurubuna göre karşılaştırmalı yük-deplasman eğrileri.....	52
Şekil 6.2. Başlık plaka takviyeli (EP) ve tij takviyeli (RB) güçlendirme grubunun kontrol gurubuna göre karşılaştırmalı yük-deplasman eğrileri.....	53
Şekil 6.3. Başlangıç elastik bölge ve doğrusal uyumu gösteren örnek numune rijitlik grafiği.....	54
Şekil 6.4. Her bir güçlendirme grubu için temel parametrelerin karşılaştırılması.....	56
Şekil 6.5. Güçlendirmelerin temel yapısal özelliklere göre sayısal analizi	57

KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

AB01	Korniyer ile güçlendirilen kiriş numune 1
AB02	Korniyer ile güçlendirilen kiriş numune 2
AB03	Korniyer ile güçlendirilen kiriş numune 3
BP01	Taban plaka ile güçlendirilen kiriş numune 1
BP02	Taban plaka ile güçlendirilen kiriş numune 2
BP03	Taban plak ile güçlendirilen kiriş numune 3
CB01	Güçlendirilmemiş kiriş numune 1
CB02	Güçlendirilmemiş kiriş numune 2
CB03	Güçlendirilmemiş kiriş numune 3
CFRP	Karbon Fiber Takviyeli Polimer
CF	Karbon Fiber
CFS	Soğuk Şekillendirilmiş Çelik
CLT	Çapraz Lamine Ahşap
cm	Santimetre
EP01	Başlık plaka ile güçlendirilen kiriş numune 1
EP02	Başlık plaka ile güçlendirilen kiriş numune 2
EP03	Başlık plaka ile güçlendirilen kiriş numune 3
EN 338	Yapısal Ahşap Dayanım Sınıfları Standardı
FEA	Sonlu Elemanlar Analizi
FRP	Elyaf Takviyeli Polimer
g	Gram
GFRP	Cam Elyaf Takviyeli Polimer
GF	Cam Fiber
HFRP	Hibrit Elyaf Takviyeli Polimer
HN 200	200 mm kesit yüksekliğine sahip H profil
HRB400	400 MPa Akma dayanımlı sıcak haddelenmiş nervürlü donatı
IPE 160	160 mm kesit yüksekliğine sahip paralel başlıklı I Profil
kgf	Kilogram-Kuvvet
kN	Kilonewton
LVDT	Deplasman ölçer
LVL	Lamine Kaplama Kereste

m	Metre
mm	Milimetre
ml	Mililitre
MPa	Megapascal
N	Newton
RB01	Tij ile güçlendirilen kiriş 1. numune
RB02	Tij ile güçlendirilen kiriş 2. numune
RB03	Tij ile güçlendirilen kiriş 3. numune
S275	Minimum akma dayanımı 275 MPa olan yapısal çelik
S355	Minimum akma dayanımı 355 MPa olan yapısal çelik
S235	Minimum akma dayanımı 235 MPa olan yapısal çelik
I	I-profil kesitli kiriş
T	T-profil kesiti
H	H-profil kesiti
$\sigma_{b,em}$	Basınç emniyet gerilmesi
$\sigma_{ç,em}$	Çekme emniyet gerilmesi
P_{max}	Maksimum yük

1.GİRİŞ

Yapı tasarımında çevresel sürdürülebilirlik; yapının tasarım sürecinden başlayarak inşası, kullanımı ve yıkımına kadar olan tüm aşamaları içerir. Yapılar, yaşam döngüleri boyunca enerji tüketimi ve çevreye verdikleri zarar açısından önemli bir etkiye sahiptir. Bu nedenle, çevresel etkileri minimuma indirmek ve insan sağlığına uygun ortamlar oluşturmak, sürdürülebilir bir yapı tasarımı için kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda, çevreye duyarlı yapı tasarımında malzeme seçimi büyük bir rol oynar. Ekolojik tasarım ölçütlerine uyan ve çevre dostu malzemelerin kullanılması, günümüzde artık bir tercih değil zorunluluk haline gelmiştir (Tavşan vd., 2022). Ahşap, yapı tasarımında kullanılan en eski yapı malzemelerinden birisi olmakla birlikte üretilebilir hammaddeye sahip, doğal, düşük karbon salınımı olan çevre dostu bir malzemedir.

Kolay işlenebilmesi, ekonomik ve ihtiyaca cevap veren esnek bir yapıya sahip olması (Tavşan vd., 2022), hafif olması taşıma ve montaj süreçlerini kolaylaştırırken, doğru şekilde işlendiğinde yüksek mukavemet sağlaması, doğal bir yalıtım malzemesi olması ve enerji tasarrufu sağlaması, ahşap malzeme kullanımının önemini gösterir (Görgün, 2012).

Ahşap malzemenin bu nitelikli özelliklerinin yanı sıra taşıyıcılığını etkileyen ahşabın doğal bir malzeme olmasından kaynaklanan doğası gereği sahip olduğu özellikleri taşıyıcı sistemlerdeki kullanımını zorlaştırmakta ve yapısal performansını artırmaya yönelik müdahaleleri de kaçınılmaz hale getirmektedir. Ahşap yapıların çeşitli yöntemlerle güçlendirilerek servis ömrünün uzatılması sürdürülebilir yapı malzemesi kullanımının yaygınlaştırılması için kritik bir önem taşımaktadır.

Ahşabın doğal bir malzeme olması nedeniyle kendi özgü özelliklerinin standart bir şekilde belirlenmesi mümkün değildir. Çalışılan ahşap malzemenin nem oranı ve lif yapısındaki farklılıklar veya budaklar, yarıklar gibi kusurlarının var olması ahşap malzemenin mekanik özelliklerinin istenen sonucu vermemesine sebep olmaktadır. Ahşabın yapısında doğal olarak bulunan kusurların yanı sıra yapısal performansına doğrudan etkileyebilen uygulama sürecindeki hatalardan kaynaklı çeşitli sorunlarda görülebilmektedir. Uygulama sırasında ahşap elemanların birleştirilmesindeki yüzey hazırlığı, kullanılan yapıştırıcı türü, cinsi, miktarı gibi bu önemli koşullar dikkatle değerlendirilmelidir (Çankal, 2021; Özaslan, 2024).

Ahşabın kullanımı yapı tasarımında sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada oldukça önemlidir. Bu nedenle yapı tasarımında çevresel sürdürülebilirliği sağlamak ve gelecek nesillere daha sağlıklı bir çevre bırakmak için yapısal ahşap elemanların kullanılması büyük önem taşır.

Ahşap elemanların güçlendirilmesi, yapının güvenliğini sağlamak adına önemli bir adım olarak görülmektedir. Doğru güçlendirme yöntemleri, yapıların deprem gibi dinamik etkiler karşısında dayanıklılığını artırır, yapıların ömrünü uzatarak hammadde tüketimini ve enerji kullanımını azaltır, buna bağlı olarak doğal kaynakların korunmasına katkıda bulunur. Ayrıca kültürel ve tarihi mirasın korunarak geleceğe güvenle aktarılmasına yardımcı olur. Ahşap yapıların söz konusu üstünlüklerinin değerlendirilebilir olması için hem malzemenin doğasından hem de uygulama sürecindeki hatalardan kaynaklı çeşitli sorunların göz önünde bulundurulması gerekir. Nitekim ahşabın dayanımında yüksek rol oynayan bu sorunların malzemeyi hangi oranda ve mekanik performansını nasıl etkilediğini tespit edilmesi kolay değildir.

Bu çalışma kapsamında, Doğu Karadeniz bölgesine özgü Ardanuç ladininden imal edilen I-kesitli ahşap kirişlerin taşıma kapasitelerini ve yapısal davranışlarını artırmaya yönelik yenilikçi güçlendirme yöntemleri geliştirilmiştir. Çalışmanın temel motivasyonu olan sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda; I-kirişlerin gövde bileşenlerinde ahşap endüstrisinin yan ürünleri (atık malzemeler) kullanılarak çevresel bir katma değer hedeflenmiştir. Ancak, atık malzemelerin bu şekilde değerlendirilmesi, kiriş gövdelerinde 'süreksiz ek birleşim yerlerinin' oluşmasını zorunlu kılmıştır. Yapısal bir zayıflık teşkil eden bu süreksizlikleri gidermek ve kirişin bütüncül bir performans sergilemesini sağlamak amacıyla önerilen güçlendirme stratejileri deneysel olarak test edilmiştir. Böylece, hem endüstriyel atıkların yapısal bir bileşene dönüştürülmesi sağlanmış hem de bu süreçte ortaya çıkan teknik dezavantajlar yenilikçi güçlendirme yöntemleriyle kompanse edilmiştir.

Literatürde daha çok lifli polimer (FRP) malzemelerle gerçekleştirilen ahşap güçlendirme tekniklerine karşın, bu çalışma literatürde daha az kullanılan çelik elemanlarla güçlendirme yöntemlerine ve bu farklı çelik güçlendirme yöntemlerinin karşılaştırılmasına odaklanmıştır. Dört farklı güçlendirme konfigürasyonu incelenmiştir.

Bu kapsamda uygun olarak hazırlanan kiriş test numuneleri üzerinde göçme mekanizmaları analiz edilmiş, farklı çelik güçlendirme konfigürasyonlarının yapısal performansa olan etkileri değerlendirilmiştir. Her bir güçlendirme detayı kiriş üzerindeki genel yapısal performansları incelemek için deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçların ahşap yapı malzemeleri ve güçlendirme tekniklerinde araştırmalar yapılmasına yol gösterici olması hedeflenmiştir.

1.1. Tezin Amacı ve Önemi

Bu çalışmanın amacı, Ardanuç ladininden üretilmiş I-ahşap kiriş elemanlarının farklı çelik güçlendirme konfigürasyonlarının kirişlerin davranışları üzerindeki etkilerinin araştırılmasıdır. İlgili çalışma literatürde önemli bir boşluğu doldurarak sektörel uygulamalara ışık tutacak deneysel veriler sunmuştur. Çalışma sonuçlarının, mühendislik uygulamalarında ahşap yapı malzemelerinin daha geniş bir kullanım alanı bulmasını destekleyip hem ekonomik hem de çevresel faydalar sunarak genel tasarım anlayışına katkı sağlaması hedeflenmiştir. Bu doğrultuda çalışmadan elde edilen sonuçların; endüstriyel uygulamalarda oldukça yaygın olarak kullanılan ahşap kirişlerin geliştirilmesine olanak tanıyacağı öngörülmektedir. Bu nedenle çalışma, sonraki çalışmalar için de bir referans niteliği taşıyabilecektir. Öyle ki çalışma sonunda ahşap kirişlerin davranışlarının geliştirilmesi için önerilecek farklı yöntemler bu alanda ahşap bina tasarım yönetmelikleri için önemli bir veri kaynağı olacağı öngörülmüştür.

1.2. Tezin Kapsamı

Bu çalışma kapsamında, Doğu Karadeniz bölgesinde bulunan Ardanuç ladininden üretilmiş I-kesit ahşap kiriş elemanların baskın hasar modları belirlenerek literatürde bulunmayan dört farklı güçlendirme konfigürasyonu önerilmektedir. Çalışmada gerçekleştirilecek deneyler doğrultusunda, ahşap kirişlerin davranışının iyileştirilmesi ve geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bu sayede ahşap kirişlerin ömrü uzatılarak hem ekonomik hem de aynı zamanda ekolojik fayda sunması öngörülmüştür.

Literatürde ele alınan önceki çalışmalarda ahşap kirişlerin güçlendirilmesiyle ilgili yapılan araştırmaların çoğunlukla polimer kompozit malzemelere odaklandığı, çelik malzeme kullanımının ve özellikle farklı çelik güçlendirme yöntemlerinin karşılaştırmalı analizinin yetersiz kaldığı görülmüştür. Geçmiş çalışmalarda çelik güçlendirme konfigürasyonlarının üzerine yeterli çalışmaların yapılmaması ahşap kiriş güçlendirme

yöntemlerinde sınırlılıklar yaratmaktadır. İlgili çalışmada ahşap kirişlerin çelik malzeme ile güçlendirilmesinde henüz detaylı incelenmemiş birleşimler araştırılmış, dört farklı güçlendirme konfigürasyonu önerilmiştir.

1.3. Hipotez

Ardanuç ladininden imal edilen I-kesitli ahşap kirişlerin yapısal davranışlarını ve taşıma kapasitelerini optimize etmek, bu çalışmanın temel odak noktasını oluşturmaktadır. Sürdürülebilirlik ilkeleri çerçevesinde, kirişlerin gövde bileşenlerinde ahşap endüstrisinin yan ürünlerinin kullanılması, tasarımda yapısal süreksizliklere yol açan ek birleşim yerlerinin varlığını beraberinde getirmiştir. Önerilen dört farklı yenilikçi çelik güçlendirme konfigürasyonunun, söz konusu süreksizliklerden kaynaklanan mekanik zayıflıkları gidereceği ve sistemin bütüncül bir performans sergilemesini sağlayacağı öngörülmektedir. Bu doğrultuda, geliştirilen takviye stratejilerinin yalnızca taşıma kapasitesini artırmakla kalmayacağı; aynı zamanda rijitlik ve enerji emilim kapasitesini yükselterek, atık malzemelerin katma değeri yüksek, dayanıklı ve uzun ömürlü yapı elemanlarına dönüştürülmesine olanak tanıyacağı değerlendirilmektedir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Ahşap yapı malzemesinin yüksek mukavemet göstermesi, sağlıklı ve doğal olmasının yanında yenilenebilir kaynaklardan elde edilmesi, çevre dostu olması gibi birçok yararlı özelliklerinden dolayı yapılarda taşıyıcı sistemi oluşturan malzeme olarak tercih edilebilir. Bununla birlikte ahşap malzemenin kendine özgü fiziksel ve mekanik özellikleri taşıyıcı sistemlerde tek başına kullanımını sınırlandırarak genellikle çeşitli takviyelerle birlikte uygulanmaktadır. Ahşap yapılarda doğru güçlendirme yöntemleri, yapıların deprem gibi etkiler karşısında dayanıklılığını artırarak yapıların ömrünü uzatır.

İlgili çalışmada, ahşap yapıların çeşitli güçlendirme teknikleri üzerinde literatürdeki önemli bulgular ve önceki araştırmalar sistematik bir şekilde gözden geçirilmiştir. Yapısal ahşap elemanların güçlendirilmesi üzerinde yoğunlaşan pek çok güncel tez, makale taranarak ahşap yapıların çeşitli güçlendirme tekniklerine dair bilgiler toplanmıştır. Literatürde ahşap kirişlerin güçlendirilmesi alanında yapılan araştırmaların çoğunlukla polimer kompozit uygulamalara özellikle karbon fiber takviyeli polimerler (CFRP), cam elyaf takviyeli polimerler (GFRP) ve elyaf takviyeli polimerlere (FRP) odaklandığı görülmektedir.

Güncel literatürde sarıçam ve ladin ağaçlarından elde edilen kirişler, karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) kompozit malzemelerle güçlendirilerek ahşap kirişlerin titreşim ve statik özellikleri açıklanmıştır. Kirişler üzerinde CFRP'nin bütün güçlendirme şekillerinde iyi performans gösterdiği görülmüştür (Sunar, 2018). Çankal (2021) çalışmasında, ahşap kompozit malzemesi olan lamine ahşap kirişlerin lifli polimerlerle güçlendirilmesini incelemektedir. Bu çalışmada sayısal yöntemler kullanılarak lamine ahşap kirişlerin mekanik özellikleri ve dayanıklılığı analiz edilmiştir. Okka (2020)'nın çalışmasında çam solid, çam ekli, ladin solid, ladin ekli ve ladin karışık ekli kiriş ahşap elemanların yük altındaki dayanımı test edilerek sonuçlara göre hangi ahşap elemanın daha dayanıklı olduğu belirlenmiştir. Çalışmada ladin solid kirişin diğer güçlendirme türlerine göre daha iyi dayanıma sahip olmasıyla birlikte ladin eklerin her durumda çam eklere göre daha yüksek dayanım gösterdiği görülmüştür. Farklı bir çalışmada ise Atmaca (2005) laminasyonlu ahşap kirişlerin çeşitli yapılarda kullanımı ve laminasyon tekniğini açıklamıştır. Kim & Harries (2010) tarafından yapılan çalışmada karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) kompozitlerle güçlendirilmiş ahşap kirişlerin davranışını tahmin etmek için modelleme çalışması yapılmıştır. FEA tahminleri, kirişlerin yük taşıma kapasitesinde

%10'dan az bir hataya sahip olarak deneysel verilerle oldukça uyumlu olduğunu, dışarıdan yapıştırılmış CFRP kompozitlerin hasarlı ahşap kirişlerin enerji emme kapasitesini önemli ölçüde iyileştirdiği görülmüştür. Borri & Corradi (2011) aynı yıl yaptıkları çalışmada yüksek mukavemetli çelik kordon lifler kullanılarak ahşap kiriş elemanların çekme bölgelerine yapıştırılan çelik fiberlerle güçlendirilmesi üzerine deneysel bir çalışma yapmıştır. Bu güçlendirmenin cam veya karbon lifle yapılan güçlendirme yöntemlerine göre etkili olduğunu, eğilme sertliğinde ve taşıma kapasitesinde önemli artış sağladığını göstermiştir. Yang vd. (2013) araştırmasında Karbon fiber (CF), cam fiber (GF) ve yüksek dayanımlı cam fiber güçlendirme malzemesi seçilerek FRP ve HFRP ile güçlendirilen kirişlerin kırılma modları ve kırılma mekanizmaları incelenmiştir. FRP ve HFRP ile güçlendirmenin kirişlerin moment kapasitesini, HFRP ile güçlendirmenin ise kirişlerin sünekliğini de etkili bir şekilde artırdığı sonucuna ulaşırken çalışma güçlendirilen kirişlerin nihai moment kapasitesini tahmin etmek için bir hesaplama modeli oluşturmuştur. Gómez vd. (2019) yaptıkları karşılaştırmalı çalışmada normal karbon elyaf, yüksek elastik modüllü karbon elyaf, cam elyaf, bazalt elyaf olmak üzere dört çeşit tek yönlü elyaf (FRP) ve metalik elyaf kullanılarak güçlendirilmiş ahşap kirişlerin eğilme davranışı inceleyerek bazalt ve cam elyaflardan yapılan güçlendirmelerin daha iyi sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur. Patalas vd. (2023) yine polimer kompozit uygulamalar için yaptıkları çalışmada elyaf takviyeli polimerlerle (FRP) güçlendirilmiş bükülmüş kereste kirişleri çalışarak bükülmüş ahşap kirişlerin deneysel testlerini tanımlamak için sayısal analizin uygulanabilirliğini değerlendirmiş ve çalışmada kerestelerin hasar modlarının doğrusal olmayan analitik modellerin uygulanabilirliğini sınırladığı görülmüştür. Mathuros vd. (2024) polimer kompozitlerle ilgili araştırmalarında eğilmeye maruz bırakılan GFRP çubuklarla güçlendirilmiş ahşap kirişlerin deneysel bir araştırmasını yapmıştır. GFRP ile güçlendirilmiş kirişler yük taşıma kapasitesinde, enerji emiliminde ve maksimum yükte önemli oranda artışı göstermiştir.

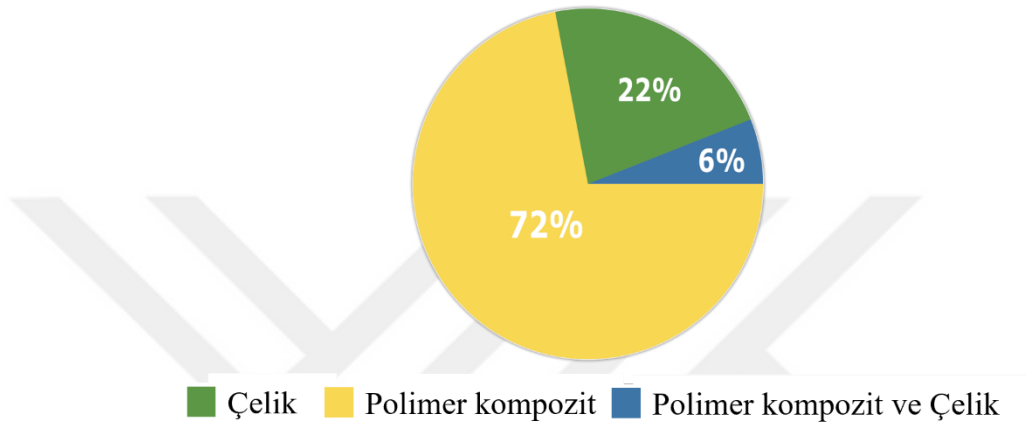
Literatürde yer alan bu gibi birçok çalışma gösteriyor ki, ahşap yapı güçlendirme tekniklerinde çelik takviye uygulamaları polimer kompozit malzemelere kıyasla daha az kullanılmaktadır. Çelik profiller, plaka, çubuk ya da tijler kullanılarak yapısal performansın iyileştirilmesi mümkün olmakla birlikte, mevcut literatürde bu yöntemin farklı konfigürasyonlarının sistematik olarak incelendiği çalışmalar oldukça sınırlıdır. Bu

durum, elik takviyeli güçlendirme yöntemlerinin mevcut olan literatürde yeterince değerlendirilmediğini açıkça ortaya koymaktadır.

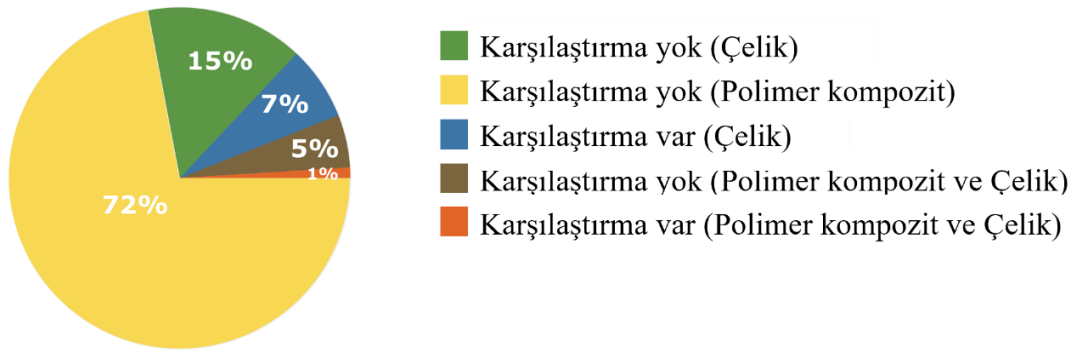
Saral (2016) güçlendirme konusunu ele alarak kirişlerin, elik bazlı farklı malzemeler olan yumuşak inşaat demiri ve ankraj tijlerinin ilerine yerleştirilerek performansların kirişler üzerindeki etkisini araştırmıştır. Deneylerde donatı nervürleri tutkal ile aderansı yeterli şekilde sağlamadığı, tij gibi dişli bir malzeme kullanımının tercih edilmesi gerektiğini gözlemlemiştir. Çalışmada ahşap malzemenin budaklarının taşıma gücünü olumsuz etkilediği görülmüştür. Gul vd. (2024) soğuk şekillendirilmiş elik CFS kesitler kullanarak yapıştırılmış lamine ahşap (glulam) kirişlerin güçlendirilmesini çalışmıştır. CFS kesitlerinin glulam kiriş performansını önemli ölçüde artırması çalışmanın sonuçlarından biri olmuştur. Cao vd. (2023) tarafından ortaya konulan çalışmada ise karbon fiber takviyeli polimer ve elik şerit ile takviye edilmiş yapıştırılmış lamine ahşap kiriş incelenmiştir. Vaka çalışmasına göre yapıştırılmış lamine kereste kirişler için elik veya karbon fiber takviyeli polimer şeritlerin belirli bir oranda yapıldığında takviyenin faydalı olduğunu görülmüştür. Wdowiak-Postulak (2023) yine aynı yıl yapıştırılmış lamine ve masif İşkandinav ladin kirişlerin çekme bölgelerinde tüm uzunlukları boyunca n gerilimli elik, bazalt ve cam çubuklarla güçlendirme çalışmıştır. n gerilimli çelikle glendirilmenin lamine kirişlerde yük taşıma kapasitesi ve sertliği diğer iki takviyeye göre belirli oranda artırdığı sonucuna ulaşılmıştır. Cao vd. (2023) ve Wdowiak-Postulak (2023)'ın çalışmaları kompozit ve elik malzemelerin birlikte kullanıldığı hibrit çözümlerdir. Bu polimer ve elik malzemenin birlikte kullanıldığı hibrit yaklaşımda elik takviyeli güçlendirme yöntemlerinde olduğu gibi sınırlı sayıda örnekle literatürde yer almaktadır. Bu kapsamlı literatür taramasında ahşap yapılarda güçlendirme çalışmalarının büyük çoğunluğunda farklı güçlendirme yöntemlerinin karşılaştırılmadığı görülmüştür. elik takviye kullanılarak yapılan benzer özelliklerdeki güçlendirme yöntemlerinin birbiriyle karşılaştırmalı analizine de literatürde yeterince yer verilmediği sonucuna varılmıştır.

Bu bağlamda, literatürde elik takviyeli güçlendirme uygulamalarının hem sayıca az olması hem de güçlendirme yöntemlerinin birbiriyle karşılaştırmalı analizinin sınırlı olması ahşap yapıların güçlendirilmesinde önemli bir boşluk olarak öne çıkmaktadır. Çalışma; ahşap I-kirişlerin daha önce literatürde yer almayan dört farklı elik güçlendirilme konfigürasyonu ele alınarak bu alanda eksiklikleri gidermeyi, elik takviyeler kullanarak güçlendirme stratejilerine yeni bir bakış açısı kazandırmayı ve bu

sayede literatüre özgün ve yenilikçi katkılar sağlamayı amaçlamıştır. Bu kapsamda araştırma literatürdeki önemli bir boşluğu hedef almıştır. Başta çelik malzeme kullanarak farklı güçlendirme yöntemlerinin karşılaştırılması olmak üzere henüz detaylı incelenmemiş birleşimlerin araştırılmasının bilimsel çalışmalar için yeni bir perspektif sunacağı düşünülmektedir. Tablo 2.1’ de incelenen akademik çalışmaların özet tablosu yer almaktadır. Şekil 2.1 ve Şekil 2.2’de literatürde ele alınan akademik çalışma konularının yüzde dağılımlarını gösteren grafikler sunulmuştur.



Şekil 2.1. Literatürde ahşap kirişlerin güçlendirilmesi için kullanılan malzemeler



Şekil 2.2. Farklı güçlendirme tekniklerini karşılaştırma durumuna göre çalışmaların dağılımı

İlgili tez için derlenen bu literatür çalışmasına göre elde edilen verilerden hazırlanan Şekil 2.1 grafiğine bakıldığında taranan makalelerde kullanılan güçlendirme materyallerinin %22'si çelik malzeme, %72'si polimer kompozit malzeme ve %6'sı polimer kompozit ve çelik malzeme kombinasyonudur. Bu durumda çelik malzeme kullanımı polimer malzemelere göre oldukça az incelenmiştir. Şekil 2.2 grafiğinden görüldüğü üzere ise yapılan çalışmaların büyük çoğunluğu (%72) farklı güçlendirme

yöntemlerini karşılaştırmamaktadır. Çalışmaların sadece %7'si çelik malzeme kullanarak farklı güçlendirme yöntemlerini karşılaştırmaktadır. Bu grafikten anlaşılacağı üzere literatürde çelik malzeme kullanılarak yapılan ve benzer özellikleri taşıyan güçlendirme yöntemlerinin karşılaştırmalı analizi yetersiz kalmıştır.

Tablo 2.1. Literatür araştırması

Çalışmanın Yazarı ve Yılı	Güçlendirmede hangi malzeme kullanılmış?	Karşılaştırmalı çalışma mı?	Çalışmamıza benzer veya farklı yönleri neler?
Triantafillou (1997)	Polimer kompozit malzeme	Hayır	Güçlendirme çelik elemanlarla yapılmamıştır.
Davis (1997)	Çelik Malzeme	Hayır	Kiriş ucuna kiriş boyunca yerleştirilen çelik çubuklar ahşap epoksi reçine ile yapıştırılmıştır.
Claissse & Davis (1998)	Polimer kompozit malzeme	Hayır	Güçlendirme çelik elemanlarla yapılmamıştır.
Chi-Jen (1999)	Polimer kompozit malzeme	Hayır	Güçlendirme çelik elemanlarla yapılmamıştır.
Ogawa (2000)	Polimer kompozit malzeme	Hayır	Güçlendirme çelik elemanlarla yapılmamıştır.
Schnerch vd. (2005)	Polimer kompozit malzeme	Hayır	Güçlendirme çelik elemanlarla yapılmamıştır.
Borri vd. (2005)	Polimer kompozit malzeme	Hayır	Güçlendirme çelik elemanlarla yapılmamıştır.
Dempsey & Scott (2006)	Polimer kompozit malzeme	Hayır	Güçlendirme çelik elemanlarla yapılmamıştır.
Moayyed & Taheri (2010)	Polimer kompozit malzeme	Hayır	Güçlendirme çelik elemanlarla yapılmamıştır.
Kim & Harries (2010)	Polimer kompozit malzeme	Hayır	Güçlendirme çelik elemanlarla yapılmamıştır.

Tablo 2.1. Literatür araştırması (devamı)

Çalışmanın Yazarı ve Yılı	Güçlendirmede hangi malzeme kullanılmış?	Karşılaştırmalı çalışma mı?	Çalışmamıza benzer veya farklı yönleri neler?
Borri & Corradi (2011)	Çelik Malzeme	Hayır	Çelik halatlar epoksi reçine ile ahşap kiriş yüzeyine yapıştırılmıştır.
Gentry (2011)	Polimer kompozit malzeme	Hayır	Güçlendirme çelik elemanlarla yapılmamıştır.
Valipour & Crews (2011)	Polimer kompozit malzeme	Hayır	Güçlendirme çelik elemanlarla yapılmamıştır.
De Luca & Marano (2012)	Çelik Malzeme	Hayır	Çapı 10 mm olan çelik çubuklar 2100 mm uzunluğunda kesilerek yapıştırıcı ile kiriş boyunca açılan kanallara yerleştirilerek kirişlere bağlanmıştır.
Motlagh vd. (2012)	Polimer kompozit malzeme	Hayır	Güçlendirme çelik elemanlarla yapılmamıştır.
de la Rosa García vd. (2013)	Polimer kompozit malzeme	Hayır	Güçlendirme çelik elemanlarla yapılmamıştır.
Yang vd. (2013)	Polimer kompozit malzeme	Hayır	Güçlendirme çelik elemanlarla yapılmamıştır.
Jasieńko & Nowak (2014)	Çelik Malzeme	Evet	Ahşap eleman örneklerini güçlendirmek için 2, 3 ve 4 mm kalınlığında çelik levhalar kullanılmış.
Y.-F. Li vd. (2014)	Polimer kompozit malzeme	Hayır	Güçlendirme çelik elemanlarla yapılmamıştır.

Tablo 2.1. Literatür araştırması (devamı)

Çalışmanın Yazarı ve Yılı	Güçlendirmede hangi malzeme kullanılmış?	Karşılaştırmalı çalışma mı?	Çalışmamıza benzer veya farklı yönleri neler?
D'Ambrisi vd. (2014)	Polimer kompozit malzeme	Hayır	Güçlendirme çelik elemanlarla yapılmamıştır.
Khelifa & Celzard (2014)	Polimer kompozit malzeme	Hayır	Güçlendirme çelik elemanlarla yapılmamıştır.
Khelifa vd. (2015)	Polimer kompozit malzeme	Hayır	Güçlendirme çelik elemanlarla yapılmamıştır.
Saral (2016)	Çelik Malzeme	Evet	8 mm çaplı donatı ve tijler elemanının numunelere açılan kanallara giriş numunesi boyunca yerleştirilmiştir.
Sunar (2018)	Polimer kompozit malzeme	Hayır	Güçlendirme çelik elemanlarla yapılmamıştır.
Tran vd. (2018)	Çelik Malzeme	Hayır	Kereste-çelik hibrit numunenin imalatında çelik I-profil kullanılmıştır. LVL panel ile I çelik birleşimi her 250 mm'de bir 16 mm çaplı çelik cıvatarla sağlanmıştır.
Hoseinpour vd. (2018)	Polimer kompozit malzeme	Hayır	Güçlendirme çelik elemanlarla yapılmamıştır.

Tablo 2.1. Literatür araştırması (devamı)

Çalışmanın Yazarı ve Yılı	Güçlendirmede hangi malzeme kullanılmış?	Karşılaştırmalı çalışma mı?	Çalışmamıza benzer veya farklı yönleri neler?
Gómez vd. (2019)	Polimer kompozit malzeme	Hayır	Güçlendirme çelik elemanlarla yapılmamıştır.
Ghanbari- Ghazijahani vd. (2020)	Polimer kompozit ve Çelik malzeme	Evet	I-kirişler başlık-gövde birleşimi kiriş boyunca 20x20x3 mm boyutlarında dört çelik köşebent ve başlık gövde birleşimi kiriş boyunca 6.25x6.25 mm boyutlarında çelik çubuk ile güçlendirilmiştir.
Shekarchi vd. (2020)	Polimer kompozit malzeme	Hayır	Güçlendirme çelik elemanlarla yapılmamıştır.
Ling vd. (2020)	Polimer kompozit malzeme	Hayır	Güçlendirme çelik elemanlarla yapılmamıştır.
Çankal (2021)	Polimer kompozit malzeme	Hayır	Güçlendirme çelik elemanlarla yapılmamıştır.
Yeboah & Gkantou (2021)	Polimer kompozit malzeme	Hayır	Güçlendirme çelik elemanlarla yapılmamıştır.
Corradi vd. (2021)	Polimer kompozit malzeme	Hayır	Güçlendirme çelik elemanlarla yapılmamıştır.
Al-Fasih vd. (2021)	Polimer kompozit malzeme	Hayır	Güçlendirme çelik elemanlarla yapılmamıştır.
Bhat (2021)	Polimer kompozit malzeme	Hayır	Güçlendirme çelik elemanlarla yapılmamıştır.

Tablo 2.1. Literatür araştırması (devamı)

Çalışmanın Yazarı ve Yılı	Güçlendirmede hangi malzeme kullanılmış?	Karşılaştırmalı çalışma mı?	Çalışmamıza benzer veya farklı yönleri neler?
Hadigheh vd. (2021)	Polimer kompozit ve Çelik malzeme	Hayır	Çelik levhayı; CFRP levhalarla ve çelik vidaları CFRP donatı çubuklarıyla doğrudan karşılaştırılmıştır.
Chen vd. (2021)	Polimer kompozit malzeme	Hayır	Güçlendirme çelik elemanlarla yapılmamıştır.
Halicka & Ślósarz (2021)	Polimer kompozit malzeme	Hayır	Güçlendirme çelik elemanlarla yapılmamıştır.
Chen, Wei, Zhao, vd. (2022)	Polimer kompozit malzeme	Hayır	Güçlendirme çelik elemanlarla yapılmamıştır.
Karimi- Nobandegani & Valipour (2022)	Çelik Malzeme	Hayır	8 mm ve 12 mm çaplı vidalar kullanarak her 300 mm de bir kiriş boyunca yerleştirilmiştir.
Goodwin vd. (2022)	Polimer kompozit malzeme	Hayır	Güçlendirme çelik elemanlarla yapılmamıştır.
Halicka & Ślósarz (2022)	Polimer kompozit malzeme	Hayır	Güçlendirme çelik elemanlarla yapılmamıştır.

Tablo 2.1. Literatür araştırması (devamı)

Çalışmanın Yazarı ve Yılı	Güçlendirmede hangi malzeme kullanılmış?	Karşılaştırmalı çalışma mı?	Çalışmamıza benzer veya farklı yönleri neler?
Chen, Wei, Ding, vd. (2022)	Polimer kompozit malzeme	Hayır	Güçlendirme çelik elemanlarla yapılmamıştır.
C. Zhang vd. (2022)	Polimer kompozit malzeme	Hayır	Güçlendirme çelik elemanlarla yapılmamıştır.
Jurkiewicz vd. (2022)	Çelik Malzeme	Evet	İki ahşap kiriş, çelik kirişin gövdesine ve flanşlarına bağlanmıştır. IPE 160 S275 I ve T çelik profiller kullanılmıştır.
Tian vd. (2023)	Çelik Malzeme	Hayır	Sırasıyla 12, 16 ve 20 mm çapındaki HRB400 çelik çubuklar; kirişlerin alt yüzeyine açılan kanallara kiriş boyunca, alt yüzeyden takviye çubuğunun merkezine, uzaklığı her zaman 10 mm olacak şekilde yerleştirilmiştir.
Wdowiak-Postulak (2023)	Polimer kompozit ve Çelik malzeme	Hayır	10 mm çapındaki ön gerilimli çelik çubuklar kirişlerin iki yan ve alt yüzeylerinde kiriş boyunca açılan 14 mm kanallara yerleştirilmiştir.

Tablo 2.1. Literatür araştırması (devamı)

Çalışmanın Yazarı ve Yılı	Güçlendirmede hangi malzeme kullanılmış?	Karşılaştırmalı çalışma mı?	Çalışmamıza benzer veya farklı yönleri neler?
Zhao vd. (2023)	Çelik Malzeme	Hayır	Kereste levhaların kalınlığı ve genişliği sırasıyla 80 ve 250 mm'dir. H-çeliğin üst flanşına hibrit ankrajlı vidalarla ahşap levha birleştirilmiştir.
Patalas vd. (2023)	Polimer kompozit malzeme	Hayır	Güçlendirme çelik elemanlarla yapılmamıştır.
H. Li vd. (2023)	Çelik Malzeme	Hayır	Dört farklı uzunluklardaki ahşap numunelere, sıcak haddelenmiş düz yuvarlak çubuktan yapılmış 12 mm çaplı çelik dübeller tüm kiriş boyunca eşit aralıklarla (150 mm de bir) dikey olarak yerleştirilmiştir.
Cao vd. (2023)	Polimer kompozit ve Çelik malzeme	Hayır	Ahşap kiriş uçlarına ahşabın her iki yüzüne 50x20x10 mm boyutlarında S355 çelik plaka yerleştirilmiştir.

Tablo 2.1. Literatür araştırması (devamı)

Çalışmanın Yazarı ve Yılı	Güçlendirmede hangi malzeme kullanılmış?	Karşılaştırmalı çalışma mı?	Çalışmamıza benzer veya farklı yönleri neler?
H. Zhang vd. (2023)	Polimer kompozit malzeme	Hayır	Güçlendirme çelik elemanlarla yapılmamıştır.
Wen & Xiao (2023)	Polimer kompozit malzeme	Hayır	Güçlendirme çelik elemanlarla yapılmamıştır.
Melinda vd. (2024)	Polimer kompozit malzeme	Hayır	Güçlendirme çelik elemanlarla yapılmamıştır.
Mathuros vd. (2024)	Polimer kompozit malzeme	Hayır	Güçlendirme çelik elemanlarla yapılmamıştır.
Stucki vd. (2024)	Polimer kompozit malzeme	Hayır	Güçlendirme çelik elemanlarla yapılmamıştır.
Mei vd. (2024)	Çelik Malzeme	Hayır	Ahşap numuneler kullanılmıştır. Glulam kirişin alt kısmına çelik çubuklar yerleştirilmiştir.
Zheng & Zhou (2024)	Polimer kompozit malzeme	Hayır	Güçlendirme çelik elemanlarla yapılmamıştır.
Mercimek vd. (2024)	Polimer kompozit malzeme	Hayır	Güçlendirme çelik elemanlarla yapılmamıştır.

Tablo 2.1. Literatür araştırması (devamı)

Çalışmanın Yazarı ve Yılı	Güçlendirmede hangi malzeme kullanılmış?	Karşılaştırmalı çalışma mı?	Çalışmamıza benzer veya farklı yönleri neler?
Gul vd. (2024)	Çelik Malzeme	Evet	Dört adet kerestenin epoksi reçine kullanılarak birbirine bağlanmasıyla bir glulam kiriş oluşturulmuştur. Mekanik bağlayıcı olarak vidalar ve çelik kayışlar kullanılmıştır. Vidalar tek bir sıra halinde 100 mm aralıklarla düzenlenmiştir. Çelik şeritler ise kirişi 130 mm aralıklarla çevrelemiştir.

3. MALZEMELERİN GENEL ÖZELLİKLERİ

3.1. Ahşap

Ahşap, ağaçtan elde edilen doğal bir yapı malzemesidir. Lifli, heterojen (iç yapısı eşit bir şekilde dağılmamış) ve anizotrop (bir noktasındaki özellikleri yönler göre değişiklik gösterebilen) yapıya sahip olan çeşitli ağaç türlerinden elde edilebilen ahşap, türüne göre farklı renk, doku ve sertlik özelliklerine sahiptir. Ahşap bu farklı özelliklerini, elde edildikleri ağaçların yaşamları boyunca çeşitli etkenlerle karşılaşarak her birinin kendine has özellikler geliştirip eşsiz bir yapıya kavuşmuş olmasına borçludur. Gelecekte de her ağaç ve ondan elde edilen her ahşap malzeme; bu farklılıkları ve özellikleriyle benzersiz olmaya devam edecektir (Saral, 2016).

Ahşap yapıların özelliklerini tam olarak kavrayabilmek için öncelikle ahşabın fiziksel özellikleri incelenmeli; kullanılan ahşabın türü, yapısı ve kimyasal özellikleri hakkında bilgi sahibi olunmalıdır. Bu unsurlar, ahşabın performansını ve dayanıklılığını anlama açısından kritik bir rol oynar (Yüncüler, 2019).

Ahşabın yoğunluğu çelik ve betona göre oldukça düşük olmasına rağmen, taşıma gücü yüksektir. Düşük yoğunluğa ve yüksek taşıma kapasitesine sahip bir yapı malzemesi kullanıldığında, yapılara etki eden deprem kuvvetleri de daha az olur. Ayrıca, düşük yoğunluk ahşabın işlenebilirliğini kolaylaştırarak şekil verme konusunda avantaj sağlar. Bu özellikler, ahşabı mühendislik ve mimarlık alanında tercih edilen bir malzeme yapar (Çankal, 2021). Tablo 3.1 de ahşap malzemenin diğer yapı malzemeleriyle taşıma gücü karşılaştırması verilmiştir.

Ahşap malzemenin yangına karşı dayanıklılığı da yüksektir. Örneğin, Türkçü'ye göre, ahşap malzemenin saatte yanma hızı yaklaşık 5 cm olarak bilinmektedir. Bu benzersizlik çerçevesinde, ahşap malzemenin kusurları da kendine özgüdür. Bu kusurlar; çatlaklar ve fissürler, budaklar, ahşap malzemenin çalışması, urlar, eksantrik öz, çok özlülük, yapraklanma, reçine keseleri ve dış etkenlerden kaynaklanan problemler olarak sıralanabilir. Bölüm 3.1.2 de ahşap malzemenin kusurlarına ayrıntılı olarak değinilmiştir.

Ahşabın yerini çelik, beton metal, plastik, gibi malzemeler almış olsa da insanlığın var olmasından bu zamana kadar kullanılan en eski yapı malzemelerinden biri olan ahşabın iyi bir yalıtım sağlaması, doğal ve estetik görünümü hem erişiminin hem de işlenmesinin kolay olması, yenilenebilir kaynaklardan elde edilmesi, çevre dostu olması ve malzemede birkaç lifin kopmasıyla ortaya çıkan sesle tehlikeyi öngörmesi gibi özellikleri onu her zaman tercih edilen bir yapı malzemesi haline getirmiştir. (Okka, 2020; Saral, 2016).

Tablo 3.1. Ahşap malzemenin diğer yapı malzemeleriyle taşıma gücü karşılaştırması
(Saral, 2016)

Malzeme Türü	Beton (C30)	Çelik (S500a)	Ahşap (1.Sınıf Meşe)
Birim Hacim Ağırlık (kgf/m ³)	2.500	7.850	800
Basınç Emniyet Gerilmesi ($\sigma_{b,em}$)(MPa)	50	500	11
Çekme Emniyet Gerilmesi ($\sigma_{ç,em}$)(MPa)	2,5	500	12
B.H.A(çelik)/B.H.A(malzeme)			
* $\sigma_{b,em}$ (malzeme)	0,628	1	1,35
(MPa x kgf/m ³ / kgf/m ³)			
B.H.A(çelik)/B.H.A(malzeme)			
* $\sigma_{ç,em}$ (malzeme)	0,314	1	1,472
(MPa x kgf/m ³ / kgf/m ³)			

3.1.1. Ahşapların Sınıflandırılması

Yapısal olarak kullanılan ahşap için iğne yapraklı; sedir, çam, selvi, köknar ağaç türleri ve geniş yapraklı; ceviz, kayın, meşe, kavak ağaç türleri kullanılmaktadır. İğne yapraklı ağaçlardan çam, bünyesindeki kusurlar dikkate alınarak üç sınıfa ayrılır. Sınıf numarası arttıkça, budak, lif eğikliği, kesit düzensizliği ve çatlaklar gibi kusurların arttığı, buna bağlı olarak da emniyet gerilmelerinin azaldığı kabul edilmiştir.(Yüncüler, 2019).

Ülkemizde iğne yapraklı ağaçlar, geniş yapraklı ağaçlar, sert ağaçlar, yumuşak ağaçlar olarak veya dayanım kalitelerine göre 1, 2, 3. sınıf olarak sınıflandırılan ahşabın; yurtdışında-özellikle Avrupa ülkelerinde- çekme, basınç, gerilme değerlerine göre sınıflandırıldığı görülmüştür. Geniş yapraklı ağaçlar, sert, ağır ve yüksek mukavemete sahip ağaçlardır. Bu tür ağaçlardan elde edilen ahşaplar, genellikle yapı sektöründe pek tercih edilmez; daha çok mobilya, araç ve gereç üretiminde kullanılırlar. Ancak, meşe bu grubun istisnalarından biridir ve yapı alanında da kullanılabilir. Kavak ise hızlı yenilenebilir özelliği sayesinde betonarme yapılarda kalıp gibi yardımcı eleman olarak kullanılmıştır. Bu ağaçlar, genellikle sert ağaç (hardwood) olarak adlandırılır. İğne yapraklı ağaçların odunu genellikle daha yumuşak, işlenmesi daha kolay, ucuz ve hızlı yenilenebilir özelliklere sahip olduğu için yapı sektöründe daha sık tercih edilir. Reçineli türler genellikle dış mekanlarda kullanılırken, reçinesiz türler iç mekanlarda yaygın olarak kullanılır. Ülkemizde bu gruptan en sık kullanılan ağaçlardan biri sarıçamdır (Saral, 2016). Eurocode 5 sınıflandırmasındaki EN 338'e göre ahşap malzeme mekanik özellikleri C ve D olarak iki grup ve 20 sınıfa ayrılır. Çam, köknar, ladin, sedir gibi ağaçların bulunduğu yumuşak ağaç grubu C grubu olarak adlandırılır.(Yüncüler, 2019)

Bu çalışma kapsamında ise performans artışı sağlamak amacıyla seçilen ağaç türü Ardanuç ladinidir. Tablo 3.2'de masif ahşap malzemenin emniyet gerilmeleri (kgf/cm²) yönünden sınıflandırılması verilmiştir.

Tablo 3.2. Masif ahşap malzemenin emniyet gerilmeleri (Yüncüler, 2019)

Gerilme Türü	Notasyon	Ahşap Malzemenin Cins ve Sınıfına Göre Gerilme Değerleri (kgf/cm ²)			
		İğne Yapraklı Ağaç Sınıfları			Meşe ve Kayın
		I	II	III	
Eğilme	σ_{eem}	130	100	70	110
Liflere paralel çekme	$\sigma_{\text{çem}} //$	105	85	0	110
Liflere paralel basınç	$\sigma_{bem} //$	110	85	60	100
Liflere dik basınç	$\sigma_{bem} \perp$	20	20	20	30
Makaslama	τ_{em}	9	9	9	10

Ahşap malzemenin emniyet gerilmelerini veren tabloya bakıldığında ahşabın türünün, sınıfının ve liflerin yönünün, malzemenin gerilme değerlerini etkileyen faktörler olduğu anlaşılmaktadır. Ahşabın çekme veya basınçta liflere paralel yöndeki basınç dayanımının, liflere dik yöndeki basınç dayanımına göre her ağaç türünde oldukça yüksek olduğu görülmüştür. (Tablo 3.2.)

3.1.2. Ahşap Malzemenin Kusurları

Ahşap malzeme daha önce de belirtildiği gibi doğal malzeme olmasından kaynaklı, bu doğal ortamın bir gerekliliği olan don, kuraklık, arazi eğimi, ağacın güneşlenme durumu ve hâkim rüzgâr gibi koşullardan etkilenmesinden dolayı farklı kusurlar içerir. Tablo 3.3.' te başlıca kusurlar özetlenmiştir.

Tablo 3.3. Ahşap malzemenin kusurları (Okka, 2020)

Kusurlar	
Budaklar	Ağaçların gövdesindeki izdüşümlerdir ve genellikle dairesel şekillerde bulunur. Budakların merkezindeki mukavemet yüksekken, çevresindeki mukavemet daha düşüktür, bu da ahşapta süreksizliklere neden olabilir. Yük altında, ilk çatlaklar budağın sınırlarında oluşur.
Oluklu gövde	Ağacın kökünün dışarıda kalmasından kaynaklanan kusur ağacın şeklinin için dairesel olmasını engeller ve ağaç sarfiyatını da artırır. Ağaç kesilip ahşap kesitler gövdeden parçalara ayrıldığında, kesitler düzensiz bir şekilde çalışır.
Kaçık öz	Ağaç özünün tam ortada bulunmaması kaçık öz olarak bilinir. Kerestenin hazırlanmasında öz odun yerleşimi önemlidir.
Yalancı öz odun	Farklı çeşit ağaçlarda başka renklerle gözlemlenen kusurdur. Bu kusur ağacın dayanıklılığında bir problem oluşturmaz fakat bu odunlara emprenye işlemi sırasında emdirilme işleminin yapılmasını zorlaştırır.
Reçine keseleri	Ağacın içerisine girmiş olan parazitlerin yol açtığı zarara karşı ağacın kendisini korumaya aldığı önlemdir. Ağacın şekil verme ve kesme işlemini zorlaştırmaktadır.

Ahşabın malzeme kalitesini etkileyen birçok doğal kusurların bilinmesi; ahşap seçiminin ve ahşabın taşıyıcı sistemlerdeki davranışının yorumlanması adına önemli olmuştur. Ahşabın en bilindik kusuru olan budaklar lif yapısını değiştirerek mekanik özelliklerini etkileyebilir. Budakların yoğunluğunun, cinsinin ve yönünün ahşabın yapısını etkilemesi ahşabın davranışı için dikkat edilmesi gereken bir nokta haline gelmiştir. Doğal ahşap malzemenin budak, oluklu gövde, kaçık öz, yalancı öz odun, reçine kesesi gibi Tablo 3.3 'de açıklanan kusurları ahşabın işlenebilirliğine etki ederek malzemenin dayanımını ve kalitesini etkilediği görülmüştür.

3.1.4. Ahşap Yapılar ve Tarihçesi

Ahşap, yapı malzemesi olarak beton ve çelikten çok daha önce kullanılmaya başlanmıştır. İnsanlar, ilk çağlardan itibaren barınma ihtiyaçlarını karşılamak için ağaç kovuklarını tercih etmiş, teknolojinin ilerlemesiyle birlikte ahşabı daha işlevsel bir yapı malzemesi olarak kullanmaya devam etmişlerdir. Pekin'de bulunan "Yasak Şehir," dünyanın en büyük, en eski ve en iyi korunmuş ahşap yapılar topluluğuna ev sahipliği yapmaktadır. Ayrıca, dünyanın en eski ve hala sağlam durumda olan ahşap mezar odası da Türkiye'de yer almaktadır. MÖ 740 yılında Frigler döneminde inşa edilen Gordion Tümülsü' nün, mezar odası, ağaç tomruklarla yapılmıştır. Orta Asya'da göçebe ve yarı göçebe bir yaşam süren Türklerin, barınma ihtiyaçlarını karşılamak için kullandıkları çadırların iskeletlerinin de ahşaptan yapıldığı bilinmektedir (Yüncüler, 2019).

Ahşap, tarihin başlangıcında basit barınaklar ve küçük açıklıkların geçilmesi amacıyla kullanılmaya başlanmış, günümüzde ise köprüler ve çok katlı binalar gibi karmaşık yapıların inşasında kendine yer bulmaya devam etmiştir. Teknoloji ve bilgi birikimi arttıkça ahşap da gelişmiş, ahşap mühendisliğinin ilerlemesiyle teknoloji ve bilim de önemli adımlar kaydetmiştir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan çeşitli kafes sistemlerinin ilk örneklerinin ahşapla yapılmış olması buna güzel bir örnektir. Ahşabın diğer yapı malzemelerinden farklı ve özel bir yere sahip olmasının temel nedeni, onun kendine özgü yapısal özellikleridir. Ahşap yapıların tarihsel gelişimi, beş ana dönemde incelenebilir. Bu dönemler, ahşap inşaat yöntemlerindeki ilerlemeler ve tarihsel dönüm noktaları göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. İlk dönemde daha çok ilkel sığınaklar, barınaklar ve köprüler gibi basit yapılar öne çıkarken, bu dönemin sonlarına doğru askeri ve bayındırlık amaçlı ahşap kullanımı dikkat çeker. Ahşap, günümüzde betonarme ve çeliğe güçlü bir alternatif olarak köprüler ve binalarda yaygın şekilde

kullanılmaktadır. Ayrıca ahşap-çelik ve beton-ahşap gibi karma sistemler de önem kazanmıştır. Ahşap inşaat yöntemleri, teknoloji ve endüstri olanakları sayesinde çeşitlilik göstermektedir. Günümüzde, etkileyici ahşap köprüler ve binaların birçok örneği bulunmaktadır. Ancak tarihsel geçmişi ve potansiyeli göz önünde bulundurulduğunda, ahşabın halen yeterince popüler olmadığı söylenebilir. Ahşap, betonarme ve çelik gibi diğer malzemelere kıyasla yönetmeliklerde daha sınırlı bir yere sahiptir (Çelik & Şakar, 2022)

3.1.5. Ahşap Yapıların Avantajları ve Dezavantajları

Dayanıklı ve ekonomik yapılar inşa edebilmek için önce ahşabın avantaj ve dezavantajlarını bilmek önemlidir. Doğal ahşabın eşsiz nitelikleri, yapıların estetik değerini artırmakla kalmaz, aynı zamanda sürdürülebilir bir yapı malzemesi olarak da öne çıkar. Kolay işlenebilir olması, ekonomikliği ve esnek yapısı sayesinde ahşap, çevre dostu bir inşaat malzemesi olarak kabul görmektedir (Tavşan vd., 2022).

Hafifliği, taşıma ve montaj işlemlerini kolaylaştırırken, uygun şekilde işlendiğinde yüksek dayanıklılık gösterir. Doğal bir yalıtım malzemesi olarak enerji verimliliği sağlayarak çevresel etkileri azaltması açısından da önemli bir rol oynar. Bu özellikler, ahşabı yapı tasarımında ideal bir tercih yapar. Ahşap kullanımı, sadece yapısal avantajlar sunmaz aynı zamanda sürdürülebilir inşaat uygulamalarına katkıda bulunur ve gelecekte daha yaşanabilir bir çevreyi amaçlar. Ekolojik açıdan ahşabın tercih edilmesinin başlıca nedenleri şöyle sıralanabilir (Görgün, 2012):

- Ormandan elde edilen yenilenebilir bir kaynak olan ahşabın elde edilirken büyük işlemlere ve fazla enerji kullanımına gerek duyulmaması,
- Ahşabın diğer yapı malzemelerine göre hafif olması ile işlenmesi ve taşınmasında daha az enerji gerektirmesi,
- Ahşabın işlenmesi, inşası ve montajı sırasında çevreye zararlı atıklar oluşmaması ve atmosfere zararlı gazlar bırakmaması,
- İyi yalıtım özellikleri sayesinde yakıt tasarrufu sağlayarak enerji verimliliğini artırması,
- Atıklarının geri dönüştürülebilir olması, çevreye zarar vermemesi ve çevre dostu bir malzeme olması,

Yukarıda verilen bilgilere ilave olarak ahşap malzemenin yapı malzemesi olarak tercih edilme nedenleri şu şekilde sıralanabilir:

- Ahşap, düşük yoğunluğa sahip yüksek dirençli bir malzemedir. Diğer yapı malzemeleriyle karşılaştırıldığında aynı dirence sahip olan beton, çelik vb. daha ağırdır.
- Düşük ısı iletkenliği ve düşük termik genişmesiyle yapıda yakıt tasarrufu sağlar. Bu özelliği yangına karşı da dayanıklılığını artırır.
- Ses iletkenliği liflere dik yönde nispeten düşük, paralel yönde yüksek değerler gösterir
- Kuru halde elektriği kötü iletir.
- Kimyasal maddelere karşı dayanıklıdır.
- Ahşabın yenilenebilen, geri dönüşümlü ve doğal bir malzeme olması mevcut orman kaynaklarını tehdit etmemektedir.

Kolay işlenir, kolay birleştirilir; çivi, vida ve bulon tutma özellikleri iyidir. Ahşabın montaj kolaylığı esnek bir şekilde tasarım yapılmasını sağlamaktadır.

- Sökülebilir olması belli bir kayıpla farklı yapılarda yeniden kullanılabilir.
- Tadilat sırasında fazla kir oluşmaz, ucuz ve kolay bir şekilde onarım yapılabilir.
- Malzemede birkaç lifin kopmasıyla oluşan ses, tehlikeyi önceden haber vererek uyarı sağlar.
- Temini kolaydır.

Sonuç olarak ahşabın, taşıma gücünün yüksek olması, hafif olması ve basit birleşim detaylarına sahip olması onu tercih edilebilir avantajlı bir yapı malzemesi yapmaktadır. Ahşap yapıların dezavantajları ise şunlardır (Görgün, 2012):

- Ahşap kullanılırken kurutulmuş olmasına dikkat edilmelidir. Suya ve neme karşı dayanıksız olan ahşap korunmadığı zaman bünyesine kolayca su alarak emer daha sonra şişer ve suyu kuruduktan sonra büzülerek çatlak oluşmasına sebebiyet verir.
- Ahşap homojen olmayan anizotrop bir malzemedir bu nedenle her nokta ve yönde statik özellikleri farklılık gösterir. Lifli yapıdan oluşan ahşap malzemenin özellikleri lif yönüne bağlı olarak değişir bu nedenle hesap

yaparken buna dikkat edilmelidir. Lif doğrultusunda basınç ve çekme dayanımı yüksek diğer yönlerde daha düşüktür.

- Ahşapta çatlaklar, budaklar lifli yapısı nedeniyle ahşap kesite aynı oranda dağılmamıştır.
- Ahşabın bozulmasına ve çürümesine neden olan ahşap kurtları, böcekler, mantarlar ve bakterilerden korunmak için uygun yöntemlerin kullanılması gerekmektedir.
- Ahşabın ses yalıtımı zayıftır.
- Ahşap malzemenin yangın dayanımı yüksek olmasına rağmen kolay bir şekilde tutuşur. (Çalışkan vd., 2019)

3.1.6. Ahşabın Özellikleri

Ahşabın fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri, yapı açısından büyük bir önem taşır. Ahşap yapıların özelliklerinin değerlendirilmesi ve bu özelliklere göre en uygun güçlendirme yönteminin belirlenmesi için bu özelliklerin bilinmesi gerekmektedir.

3.1.7. Ahşabın Kimyasal Özellikleri

Ahşap, lifli ve homojen olmayan yapısıyla, lif doğrultusunda farklı özellikler sergileyen anizotropik ve organik bir malzemedir. Doğal bir madde olduğundan, ahşabın kimyasal özellikleri, nem, toprak, hava ve biyolojik faktörler gibi çevresel koşullara göre değişmektedir. Ahşapta bulunan selüloz, eğilme ve çekme dayanımını belirlerken, basınç dayanımını ise lignin maddesi sağlamaktadır.(Çankal, 2021).

3.1.8. Ahşabın Fiziksel Özellikleri

3.1.8.1. Ahşap Malzemedeki Nem Oranı

Ahşap malzemede bulunan nem miktarı, malzemenin pek çok özelliğini etkiler. İdeal seviyede bir nem oranı, ahşabın çeşitli parametrelerini doğrudan değiştirebilir. Nem oranı arttıkça, ahşabın mukavemeti azalır; ancak nem miktarı %30'u aştığında mukavemet sabit kalır ve bu değer, ahşabın dayanıklılığı açısından sınır kabul edilir. Ahşabın kullanım alanlarını kısıtlayan önemli nedenlerden biri, su veya su buharı ile temas ettiğinde fiziksel ve kimyasal özelliklerinde meydana gelen değişikliklerdir. Ahşapta hacimsel farklılıklara yol açan rutubet, mekanik özelliklerde değişikliklere sebep

olur ve malzemenin ömrünü önemli ölçüde kısaltır. Özellikle, %0 nem oranıyla tamamen kuru durum ile lif doygunluk noktası olan %30 nem oranı arasında hacimsel değişiklikler görülmüştür (Çalışkan vd., 2019).

3.1.8.2. Ahşap Malzemenin Birim Hacim Ağırlığı

Ahşabın birim hacim ağırlığı, nem içeriği ile doğrudan ilişkili bir özelliktir. %15 nem oranına sahip ahşabın birim hacim ağırlığı, ağaç türüne bağlı olarak 0.98 kN/m³ ile 1.47 kN/m³ arasında değişiklik gösterir. Birim hacim ağırlığı yüksek olan ahşap, işlenmesi zor olsa da dayanıklılık ve mukavemet açısından daha üstün özelliklere sahiptir (Sunar, 2018).

3.1.8.3. Ahşabın Isı Özellikleri

Ahşabın hafif ve gözenekli yapısı, ısıyı iyi bir şekilde depolamasına olanak tanır. İçeriğindeki selüloz, ısı iletimine karşı direnç gösteren bir malzemedir. Ahşabın ısı özellikleri, türüne ve içerdiği nem miktarına bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Malzemenin ısıl iletkenlik katsayısının oldukça düşük olması, onu iyi bir yalıtım malzemesi haline getirir ve bu nedenle ahşap her zaman yapı sektöründe sıklıkla tercih edilmiştir (Çankal, 2021).

3.1.8.4. Ahşabın Sertlik Özelliği

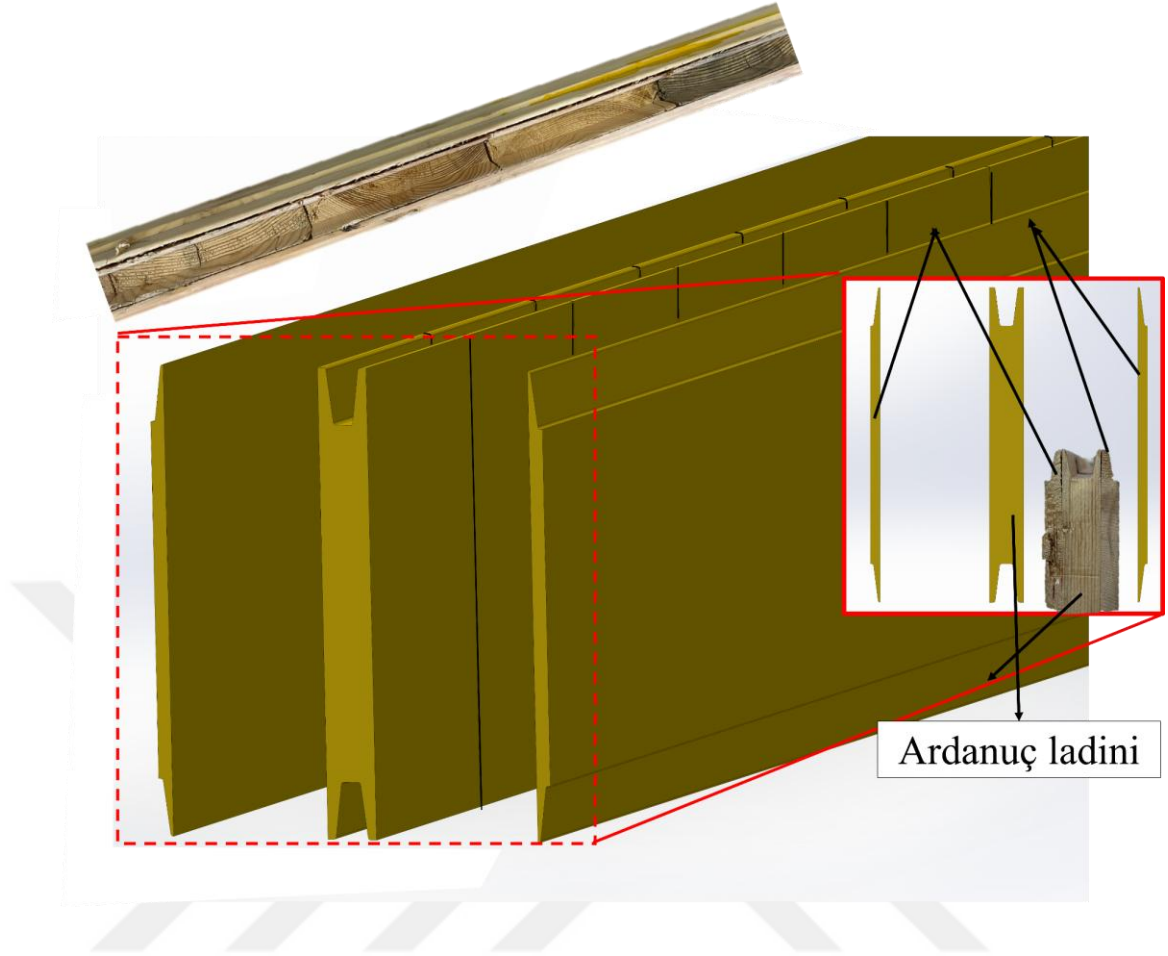
Ahşap malzemede sertlik; kesilme ve işlenme esnasında ahşabın gösterdiği direnç olarak adlandırılır. Sertlik; malzemenin nem oranı, türü ve iç yapısının yoğunluğuyla doğru orantılı olarak artar. Malzemede nem oranı yükseldikçe sertlik azalır, kuru durumdaki bir ağaçta ise sertlik derecesi en yüksek seviyede olmuştur (Çalışkan vd., 2019).

4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. Materyal

Bu çalışmada Doğu Karadeniz bölgesinde bulunan yerel kaynaklardan temin edilen Ardanuç ladininden üretilen ahşap I-kirişler kullanılmıştır. Türkiye ormancılığının önemli bir kısmını oluşturan Doğu ladini (*Picea orientalis* (L.) Link.), yayılış alanları, büyüme özellikleri ve yarattıkları ekonomik değerle ülkemizin en önemli orman ağacı türüdür (Kahriman vd., 2023). Ardanuç ladini, özellikle bölgesel olarak yeteri kadar bulunması yapı uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmesi ile dikkat çeker. Ladin ağaç türünün düşük özgül ağırlığa sahip olması özellikle hafif yapısal elemanlarda kullanılmasına imkân tanımaktadır. Malzemenin eğilme dayanımının yapısal elemanların taşıma kapasitesi üzerinde etkili olmasının bir sonucu olarak ladinin bükülmeye karşı oldukça dirençli olduğu görülmektedir. Çalışmada seçilen Ardanuç ladini özellikle eğilme etkisinin önemli olduğu kiriş elemanlarında etkin bir şekilde kullanılabilen bir malzeme olmasını sağlar. Yine malzemenin elastisite modülü ladinin orta rijitlikte bir ahşap türü olduğunu ve yük altında belirli bir elastik deformasyon kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir. Ardanuç ladininin hafif olması, eğilme etkisine karşı etkin bir dayanım göstermesi ve yeterli rijitlikte olmasını sağlayan mekanik ve fiziksel özellikleri I-kiriş gibi taşıyıcı elemanlara uygun olarak seçilmesini sağlamıştır.

Bu çalışmada Ardanuç ladininden imal edilmiş kiriş numuneler 80 mm başlık genişliği, 40 mm başlık kalınlığı ve 200 mm yüksekliğe sahip olacak şekilde toplam kirişlerin uzunluğu 3000 mm olarak üretilmiştir. Kiriş numuneler başlıklar yek pare ahşaptan, gövde ise lamineden oluşmaktadır. Malzeme gövdesi; iç katman ve sağ-sol dış kabuklar olmak üzere üç katmandan oluşan bir yapıya sahiptir. Şekil 4.1'deki ahşap malzemenin gövde kesit detayında ahşap gövdenin üç ayrı katmanın birleşmesiyle oluşan kiriş boyunca devam eden yapısı gösterilmiştir. Çalışmada ahşap endüstrisinde kullanılmayan ya da atık olarak değerlendirilen malzemelerden üretilen üç katmanlı kiriş gövdesi kullanılmıştır. Bu şekilde yüksek mukavemetli, hafif ve etkin maliyet çözümlü malzeme kullanımı sağlanmıştır.



Şekil 4.1. Ahşap malzeme gövde kesit detay çizimi

Numunelerde başlıklar ile gövdenin tamamen daha iyi yapışması adına deniz tutkalı kullanılmıştır. Literatürde daha önce ele alınmamış yenilikçi yaklaşımlar içeren dört farklı güçlendirme incelenmesi için laboratuvar ortamında 16 adet Ardanuç Ladininden üretilen ahşap I-kiriş test numunesi hazırlanmıştır. Numune kirişlerin farklı konfigürasyonlar kullanılarak güçlendirilmesinde düz çelik levhalar, L-köşebentler ve tij formundaki S235 kalite çelik takviye elemanları kullanılmıştır. Güçlendirme için seçilen çelik elemanlarının yüksek çekme dayanımı ile güçlendirmeye katkı sağlaması ve kirişlerin yük taşıma kapasitesini artırması istenmiştir. Çelik takviye elemanları, kiriş gövdesine ve başlıklarına 4 milimetre çapında ve 30 milimetre uzunluğunda vida mekanik bağlantı elemanı ile yük iletim verimliliğini artırarak birleştirilmiştir.

Tablo 4.1. Çalışmada kullanılan malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri (Okka, 2020)

Malzeme	Birim Ağırlık (g/cm³)	Basınç Dayanımı (N/mm²)	Elastisite Modülü (N/mm²)
Ardanuç Ladini	0,43	31,1	8.300
Çelik (S235)	7,85	360- 510	210.000

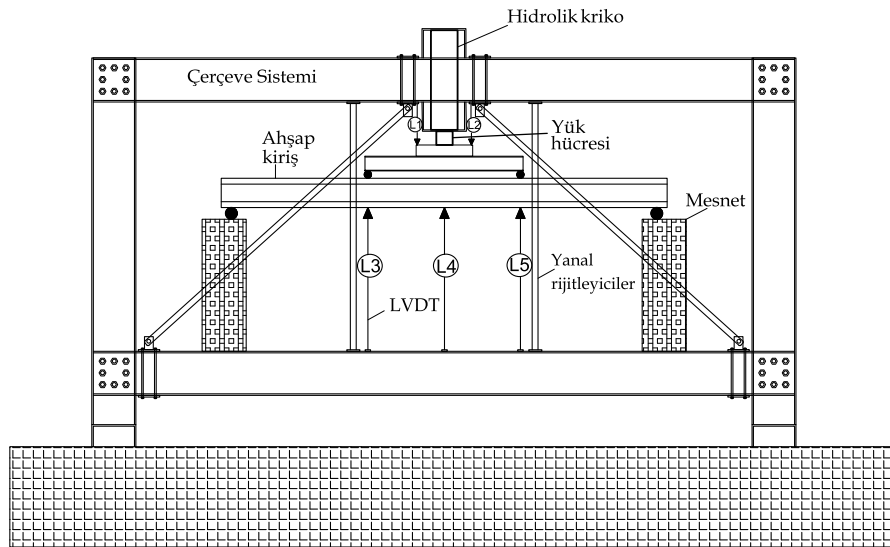
Bu çalışmada kullanılan Ardanuç Ladini ve S235 çelik malzemenin temel mekanik ve fiziksel özellikleri karşılaştırmalı olarak Tablo 4.1’de verilmiştir. Çalışmada poliüretan esaslı, tek bileşenli, hızlı kürlenene, yüksek su direnci ve güçlü yapışma performansına sahip bir ahşap yapıştırıcısı olarak deniz tutkalı kullanılmıştır. Deniz tutkalı; beton, metal ve polistiren köpük gibi malzemeleri ahşaba yapıştırmanın yanı sıra ahşabı ahşaba yapıştırmak için uygundur ve tekne ya da mobilya üretimi gibi su geçirmezlik gerektiren uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. Yapıştırıcı, yüksek yapışma gücü, hızlı kürlenmesi (24 saatte tam kürlenme), nem ve kimyasallara karşı dayanıklılığı ile öne çıkar. Ürünün yoğunluğu 1.15 g/ml’dir. Uygulamadan sonra genişleterek boşlukları doldurur ve optimum yapışma için en az iki dakika preslenmelidir.

4.2. Yöntem

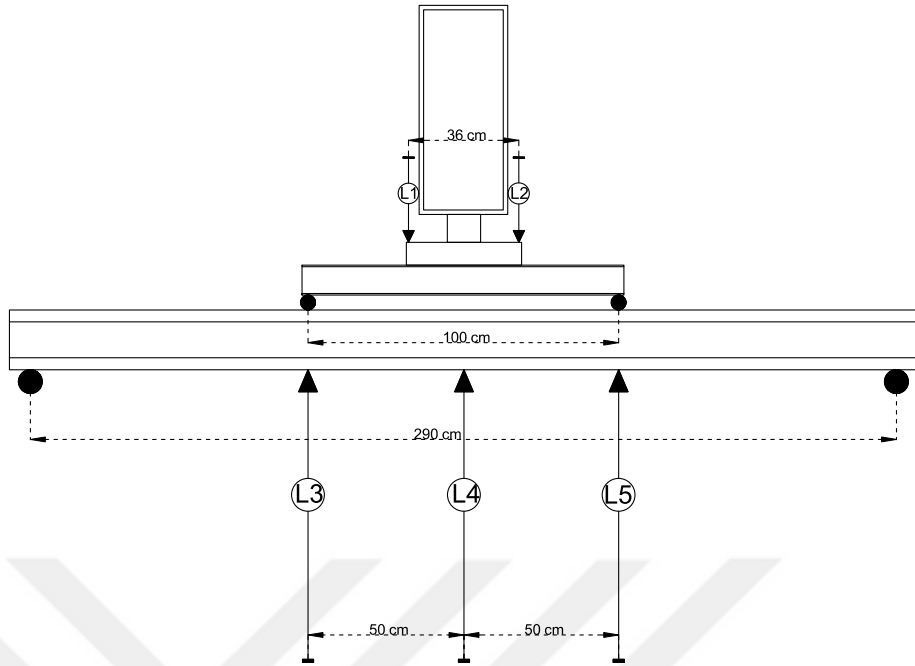
Çalışmada kullanılan yükleme protokolü, kademeli olarak artan yükler ile kirişlerin davranışını belirlemiş, veri kayıt yöntemiyle yer değiştirme ve gerinim ölçümleri sürekli olarak kaydedilmiştir. Güçlendirme konfigürasyonları, kirişin mekanik davranışlarını iyileştiren her bir takviye yönteminin etkilerini belirlemek amacıyla detaylı olarak uygulanmıştır.

Bu çalışmada deneyler, dört noktalı eğilme testi prensiplerine uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Ahşap kirişlerin mekanik davranışını değerlendirmek için dört noktalı deney düzeneğinde, hidrolik piston ile yükleme yapılmış uygulanan kuvvet yük hücresi ile ölçülmüştür. Kirişin farklı noktalarındaki yer değiştirmeler deplasman ölçerler (LVDT) ile kaydedilmiştir. Deney test düzeneği, kirişlerin üzerine iki destek ve iki yük uygulama noktasına sahiptir. Kiriş numunesine uygulanan kuvvet, iki uygulama noktası arasında sabit bir eğilme momenti oluşturur. Bu düzeneğin amacı, uygulanan yüklerin etkisini inceleyerek kirişlerin eğilme ya da yer değiştirme gibi mekanik davranışlarını izlemek ve buna bağlı olarak kirişlerin yük taşıma kapasitelerinin belirlenmesidir.

Test düzeneğinde kullanılan ölçüm cihazları arasında her bir yükleme noktasındaki uygulanan kuvvetin hassas bir şekilde ölçülmesini sağlayan yük hücresi ve kirişlerdeki yer değiştirmeyi izlemek için kiriş elemanlarının belli noktalarına yerleştirilen deplasman ölçer sensörler (LVDT) bulunmaktadır. Deney düzeneğindeki veri toplama sistemi bu ölçüm cihazlarından gelen verileri anlık olarak sürekli kaydedip dijital ortamda depolayarak istenilen verilerini doğru bir şekilde analiz edilmesini sağlamıştır. Şekil 4.2. ve Şekil 4.3.'de deney düzeneğinin şematik çizimi ve veri ölçüm noktalarının detayları gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Deney düzeneğinin şematik çizimi



Şekil 4.3. Deney düzeneğindeki veri ölçüm noktaları detaylı şematik çizimi

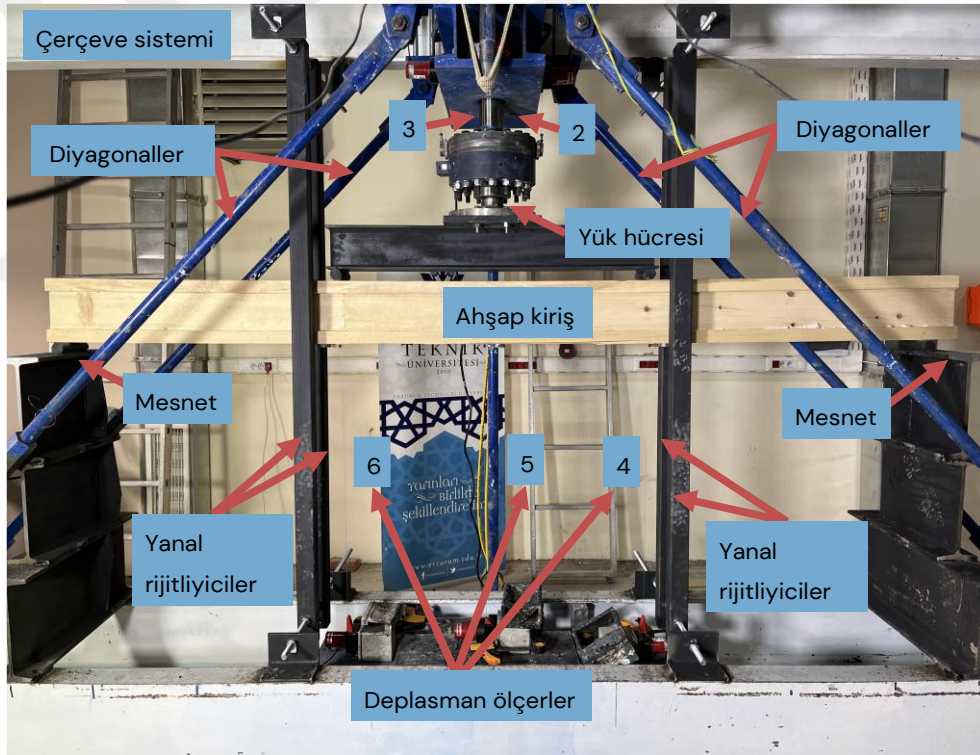
Çalışmada, test prosedürü kapsamında ölçüm doğruluğunu artırmak amacıyla belirlene standart ölçülerde hazırlanan güçlendirilmiş ahşap I-kiriş numuneler, destekler ve yük uygulama noktaları arasındaki mesafeye dikkat edilerek eşit bir şekilde yerleştirilmiştir. Yükleme noktalarına yerleştirilen numune kirişlerin yüzeyleri kontrolleri yapılmış ve yükleme sabit bir hızla uygulanmıştır. Bu testler her bir kiriş numunesine sistematik olarak bu protokole uygun sürekli ve kontrollü bir şekilde artan yükler ile yapılmıştır. Yük, her kiriş için sıfır yük durumundaki başlangıç noktasından düzenli bir şekilde kirişin maksimum taşıma kapasitesine kadar artırılmıştır. Her düzenli artış sırasındaki kirişin yer değiştirmesi dikkatli bir şekilde gözlemlenmiştir. Numuneler, maksimum yük taşıma kapasitesine ulaştığında veya belirgin hasar oluştuğunda testler sonlandırılmıştır.

Veri kayıt yöntemi, her bir numune testi sırasında sürekli ve dijital ortamda anlık veri toplama ile gerçekleştirilmiştir. Tüm deneyler, çevresel koşulların sabit tutulduğu bir laboratuvar ortamında yapılmıştır. Dört noktalı eğilme test deneyinden elde edilen bu veriler kullanılarak kirişlerin hasar mekanizmaları gözlemlenmiştir ve ilgili güçlendirme yöntemlerinin etkinliğini belirleyerek karşılaştırmalı analizlerine katkı sağlamıştır. Önerilen güçlendirme konfigürasyonları kirişlere uygulanmış her bir yöntem için 3 adet olmak üzere 4x3 (12 adet) güçlendirilmiş numuneler hazırlanmıştır. Bu proje kapsamında

gerçekleştirilen deneysel çalışmalar, Ardanuç ladininden üretilen ahşap I-kiriş numunelerinin farklı çelik güçlendirme konfigürasyonunun taşıma kapasitesine etkilerini ortaya koyarak göçme modlarının belirlenmesi yapısal mühendislik açısından önemli sonuçlar sağlaması öngörülmüştür. Elde edilen deneysel veriler, mühendislik tasarım süreçlerine katkı sağlayarak, ahşap kirişlerin çelik takviyelerle güçlendirilmesi için kullanılabilecek yeni veriler sunmuştur.

4.3. Deneysel Hazırlık ve Güçlendirme Detayları

Ardanuç ladininden üretilen 3000 mm uzunluğunda kiriş numuneler temin edilmiş deney için hazır hale getirilmiştir. Dört noktalı eğilme testleri için deney düzeneği çerçeve sistemi oluşturulmuş ve veri ölçüm noktalarının yerleri belirlenmiştir. Deney esnasında çerçeve sisteminin genel görünüşü Şekil 4.4.'teki gibi görülmektedir.



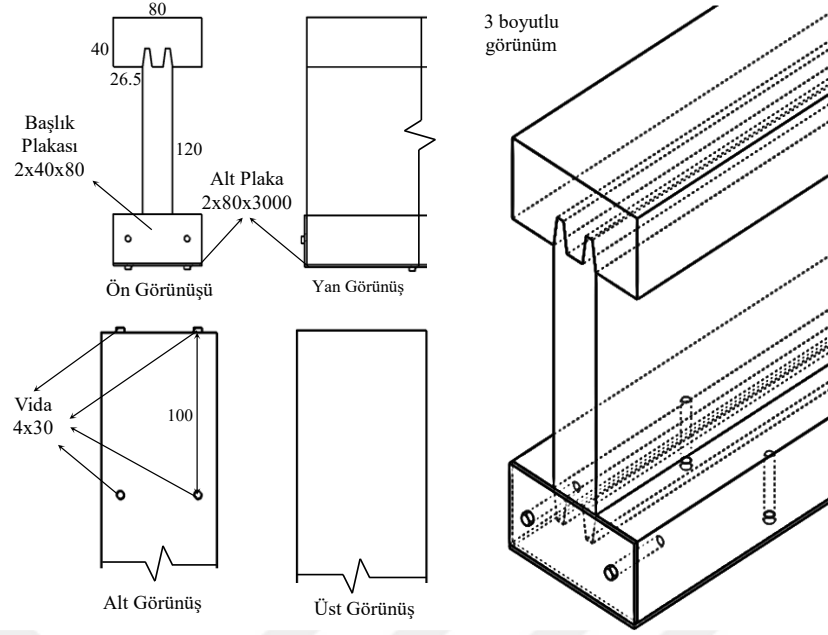
Şekil 4.4. Deney düzeneği çerçeve sistemi ve veri ölçüm noktaları

Bu çalışmada her bir güçlendirme yöntemi, kirişlerin yük taşıma kapasitesini artırmayı ve deformasyonunu azaltmayı hedeflemiştir. Uygulanan güçlendirme yöntemleri; taban ve başlıkta çelik plaka kullanımı, başlık ve gövde bağlantısında L-köşebent korniye takviye uygulaması ve kiriş boyunca belirli aralıklarla uygulanan dikey dişli tij takviyeleri içermektedir. Deneyler yapılmadan önce güçlendirilmiş ahşap kiriş

numunelerin kiriş tipolojisini basit bir şekilde göstermek amacıyla dört farklı güçlendirme konfigürasyonu için her gruba Tablo 4.2.'de gösterildiği gibi numune kodları verilmiştir. Numune kodlamada, CB: Güçlendirilmemiş kontrol kirişleri, AB: Korniyer takviyesi ile güçlendirilen kirişler, BP: Taban plaka takviyesi ile güçlendirilen kirişler, EP: Başlık plaka takviyesi ile güçlendirilen kirişler ve RB: Dikey dişli tij takviyesi ile güçlendirilen kirişleri temsil etmektedir.

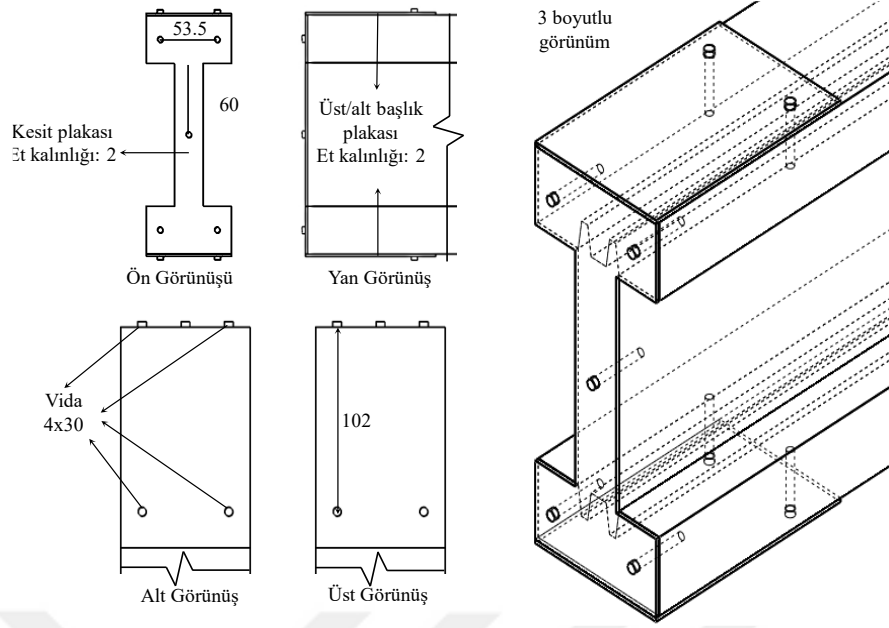
Tablo 4.2. Güçlendirilen ahşap kirişlerin kodlaması

Konfigürasyon	Numune 1	Numune 2	Numune 3	Numune 4
Kontrol Kiriş	CB-01	CB-02	CB-03	CB-04
Korniyerli Kiriş	AB-01	AB-02	AB-03	—
Taban Plakalı Kiriş	BP-01	BP-02	BP-03	—
Başlık Plakalı Kiriş	EP-01	EP-02	EP-03	—
Tijli Kiriş	RB-01	RB-02	RB-03	—



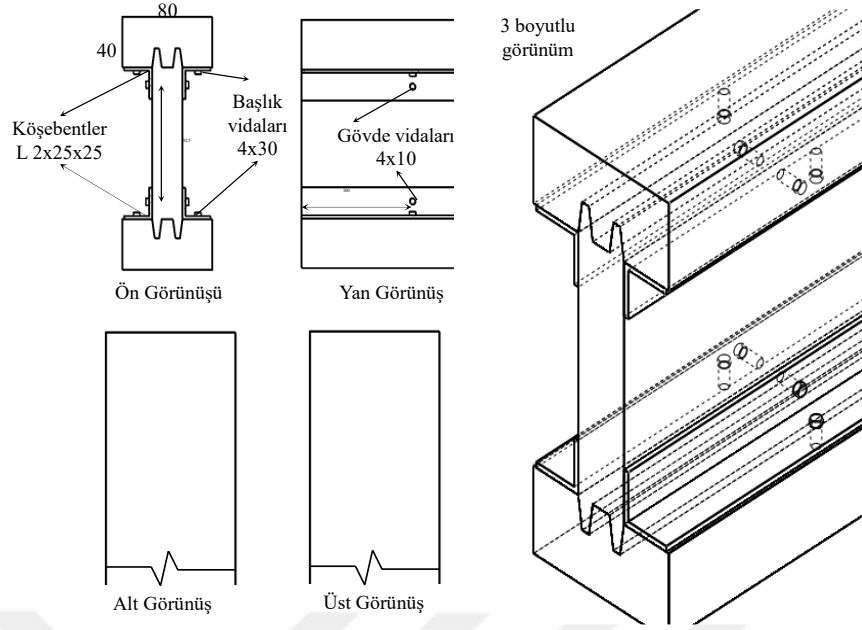
Şekil 4.5. Taban plakası konfigürasyonu detay çizimi

Çelik takviye ile güçlendirme konfigürasyonunun ilki olan taban plaka takviyesi kullanılan ahşap I-kiriş konfigürasyonunda numunenin güçlendirilmesi alt yüzeylerine yerleştirilen çelik levhalarla yapılmıştır. Uygulanan güçlendirmede 2x40x80 mm boyutlarında başlık plakası ve 2x80x3000 mm boyutlarında alt plaka kullanılmıştır. Başlık plakası, çelik ve ahşap bileşenler arasında yük aktarımını sağlamak için uygun boyutlu vidalar kullanılarak mekanik olarak ahşaba sabitlenmiştir. Bu konfigürasyon, eğilme sırasında kirişin alt lifindeki çekme gerilimlerini etkisiz hale getirmek, böylece eğilme çatlaklarının başlangıcını geciktirmek ve nihai yük kapasitesini artırmak için tasarlanmıştır. Ayrıntılı geometrik ölçümler mm cinsinden aşağıda Şekil 4.5.'te sunulmaktadır.



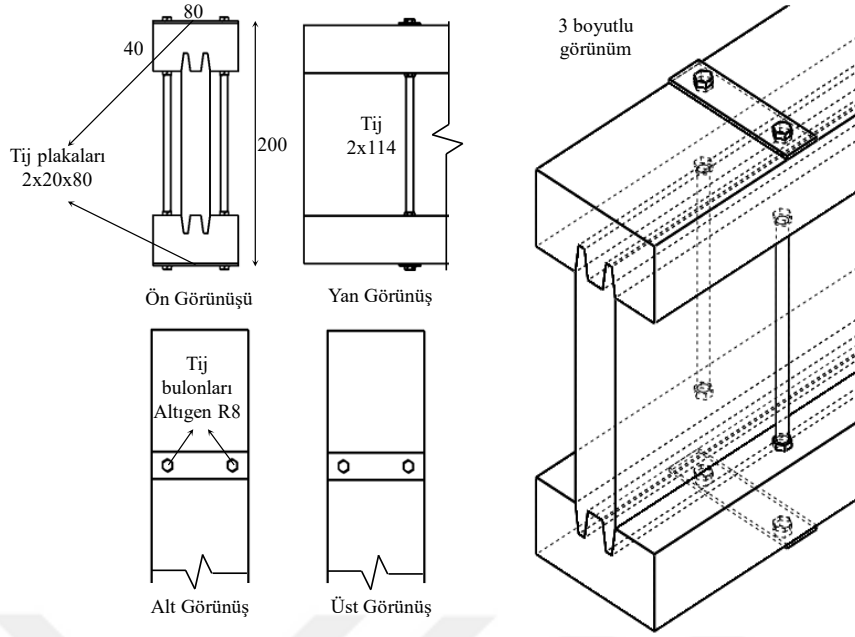
Şekil 4.6. Başlık plakası konfigürasyonu detay çizimi

Uygulanan çelik takviye ile güçlendirme konfigürasyonunun ikincisi olan başlık plakalı kiriş konfigürasyonunda kiriş başlıkları en kesitte çelik levhalar ile güçlendirilmiştir. Çelik levhalar, uygun mekanik bağlantı elemanları ile ahşap yüzeylere sabitlenmiştir. Bu konfigürasyonda başlık ile gövde arasındaki ayrılmanın büyük yükler altında meydana gelme olasılığının en yüksek olduğu kiriş uçlarının güçlendirmesine odaklanılmıştır. Bu güçlendirme konfigürasyonunda, öncelikli amaç kirişlerin kiriş uçlarında başlık-gövde ayrılmalarının önüne geçilmesiyle kirişlerin yapısal bütünlüğünü ve yük taşıma kapasitesini artırmaktır. Şekil 4.6.'da başlık plaka takviyesinin ayrıntılı konfigürasyonunda geometrik ölçümler mm cinsinden gösterilmektedir.



Şekil 4.7. Korniyerli güçlendirme konfigürasyonu detay çizimi

Üçüncü olarak korniyerle kiriş güçlendirmesinde başlık-gövde birleşimi 2x25x25 mm boyutlarında L-köşebent uygulaması ile sağlanmıştır. Kirişlerin yan yüzeylerine kirişin uzun eksenine boyunca simetrik olarak yerleştirilen dört adet L-köşebentler ile kiriş genelinde başlık-gövde birleşim bütünlüğünün yitirilmesini engellemek istenmiştir. Bu güçlendirme yöntemi, özellikle kesme ve eğilme etkisi altındaki yüklemelerde başlık ve gövde arasında bölgesel ayrılmayı ve kaymayı önlemek, böylece kirişin yapısal sürekliliğini ve karmaşık gerilme durumlarına karşı direncini artırmak için tasarlanmıştır. Ayrıntılı geometrik ölçümler mm cinsinden Şekil 4.7.'de verilmiştir.



Şekil 4.8. Tijli güçlendirme konfigürasyonu detay çizimi

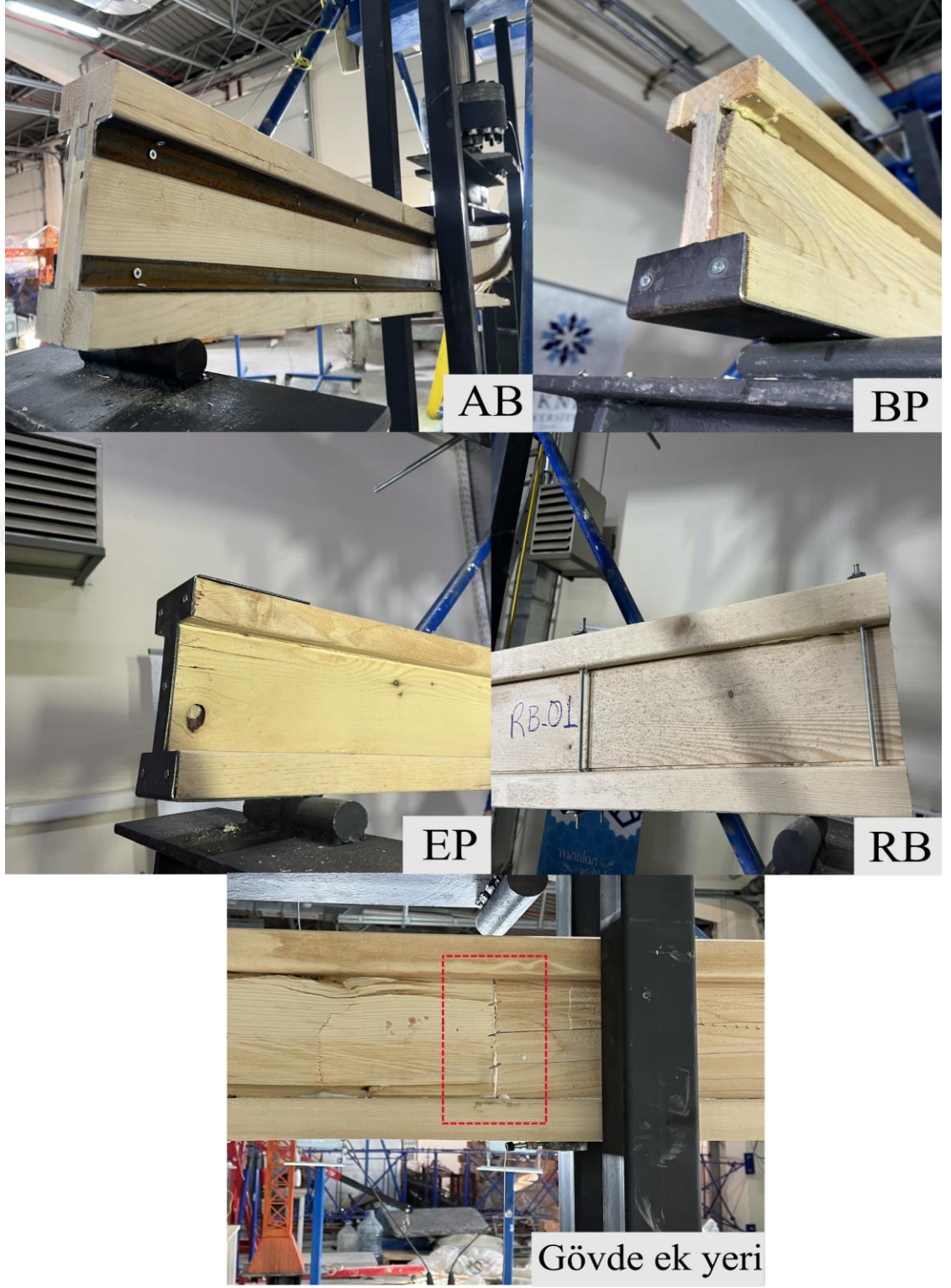
Son olarak başlıklar arası bütünlük 2x114 mm boyutlarında çelik tijler ile sağlanarak kiriş uzunluğu boyunca her 400 mm de bir kullanılan dikey takviye elemanlarından oluşan tij konfigürasyon sistemi oluşturulmuştur. Bu çubuklar altıgen cıvatalar kullanılarak sabitlenmiş ve kirişin derinliği boyunca uzanarak üst ve alt başlıkları etkili bir şekilde birbirine bağlamıştır. Dikey tij sistemi, eğilme bölgesindeki çatlakların gelişmesini ve yayılmasını sınırlamak ve yükleme altında başlıklar ile gövde arasında ayrılmayı önlemek için tasarlanmıştır. Bu konfigürasyon kesitin bütünlüğünü koruyarak hem artan yük kapasitesine hem de sünekliğin iyileştirilmesine katkıda bulunmuştur. Şekil 4.8.'de tijli takviyenin ayrıntılı konfigürasyonunda geometrik ölçümler mm cinsinden verilmiştir.

Deney düzeneğinde, ahşap kirişlerin mekanik davranışını değerlendirmek için hidrolik piston ile uygulanan kuvvet, yük hücresi ile ölçülmüş ve deplasman ölçerler (LVDT) ile kirişin farklı noktalarındaki yer değiştirmeler kaydedilmiştir. Bu ölçümler kullanılarak kirişlerin yük taşıma kapasitesini ve hasar davranışını analiz edilmesine yardımcı olacak kuvvet-deplasman grafikleri oluşturularak kirişlerin rijitliği, dayanımı ve enerji yutma kapasiteleri belirlenmiştir.

Tüm konfigürasyonlarda, çelik güçlendirme elemanları yüksek çekme dayanımları ve ahşap malzemeye uyumlulukları nedeniyle seçilmiş ve yük aktarım verimliliğini en üst düzeye çıkarmak için mekanik bağlantı elemanları kullanılarak monte edilmiştir. Teknik çizimler, her güçlendirme elemanının detaylı yerleşimini, boyutlarını ve takviyeli kirişlerin genel montajını göstermektedir.

Bu güçlendirme stratejileri, özellikle göçme modlarına, yük kapasitesine ve deformasyon özelliklerine dikkat edilerek ahşap I-kirişlerinin mekanik davranışını iyileştirmedeki etkinliğini belirlemek için sistematik olarak değerlendirilmiştir. Şekil 4.9.'da laboratuvar ortamında hazırlanan ahşap I-kiriş numunelerinin bir genel görünümü verilmiştir. Tüm numunelerde, Şekil 4.9. 'da gösterildiği gibi ahşap kiriş numunelerinde süreksiz bir şekilde bulunan, deniz tutkalıyla yapıştırılmış bir gövde eki yer almaktadır.





Şekil 4.9. Ahşap I-kiriş numunelerinin her bir güçlendirme grubuna ait deney öncesi genel görünümü ve gövde ek birleşim yerinin gösterilmesi

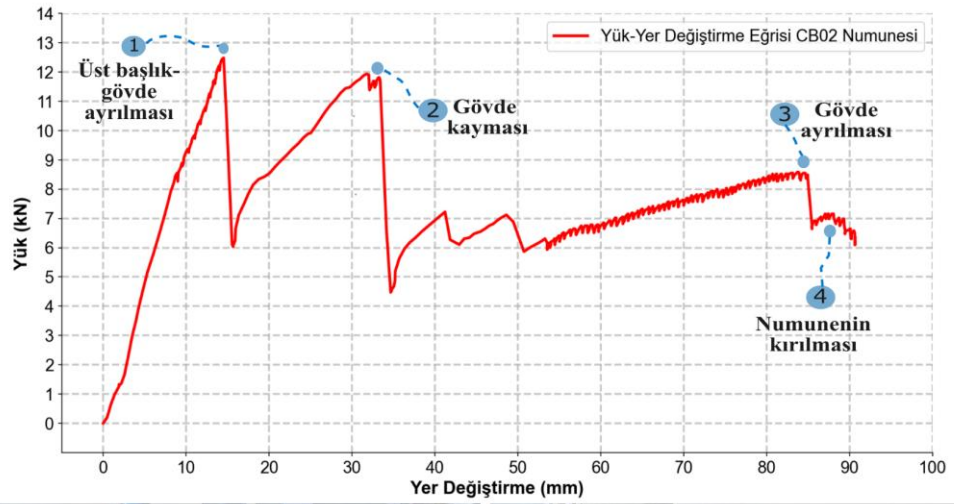
5. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu bölüm Ardanuç ladininden üretilen ahşap I-kirişlerinde gözlemlenen mekanik performans ve göçme mekanizmalarının kapsamlı bir analizini sunmaktadır. 16 numune çelik takviye ile güçlendirilmiş ahşap kiriş konfigürasyonlarının davranışını, mekanik performansını ve hasar mekanizmalarını değerlendirmek amacıyla deneysel testlere tabi tutulmuştur. Deneysel program, bir kontrol grubu ve her biri kirişlerde belirli yapısal zayıf noktaları ele almak üzere tasarlanmış yenilikçi konfigürasyonlarla güçlendirilmiş üç grup kirişi kapsamaktadır. Deney sırasında konfigürasyonlarda meydana gelen farklı hasar mekanizmalarının incelenmesi, çelik takviye ile güçlendirilmiş ahşap kirişlerin tasarım ve performansına yönelik önemli veriler sağlamaktadır. Çelik takviye ile güçlendirilmiş ahşap kirişlerde oluşan göçme modları dikkatlice gözlemlenmiştir. Her numune, belirli göçme türlerini ve kritik noktaları tespit edebilmek için detaylı olarak takip edilmiş ve sonuçlar; yük-deformasyon davranışı, göçme modları ve her bir güçlendirme stratejisinin göreceli etkinliği açısından tartışılmıştır.

5.1. Göçme Modları

Kritik olarak, tekil bir yapısal göçme eşiği veya belirli bir sınır durumunu önceden tanımlamak yerine, deneysel kirişler tamamen parçalanana ve herhangi bir şekilde yük taşımayı bırakana kadar ölçümlerin devam etmesi sağlanmıştır. Bu kapsamlı yaklaşım, herhangi bir artık dayanım, göçme olaylarının sırası ve nihai göçme modları dahil olmak üzere pik sonrası davranışın tüm spektrumunu yakalamak için bilinçli bir şekilde seçilmiştir. Bu tür ayrıntılı gözlem, kirişin tepkisinin basit elastik sınırların dışında ayrıntılı bir şekilde anlaşılması için önemlidir ki bu durum da bize yapısal dayanıklılığı ve araştırılan güçlendirme stratejilerinin değerlendirmek için önemli veriler sağlamıştır.

CB koduyla gösterilen ve kontrol grubu olarak kullanılan güçlendirilmemiş ahşap kiriş numunelerde genellikle yükleme devam ettikçe, kirişin maksimum yük taşıma kapasitesine ulaştığında kırılmanın üst veya alt başlık bölümlerinde başladığı gözlemlenmiştir. Şekil 5.1.'de gösterilen numunenin yük- yer değiştirme grafiğine bakıldığında üst başlık kırılmasından sonra, kirişler nihai mukavemetlerinde ani bir kayıp yaşamıştır. Bu nihai kapasite kaybına rağmen, numunelerin yük kaldıramayacakları noktaya kadar yük taşıma kapasitelerinin önemli bir kısmını koruduğu gözlemlenmiştir.

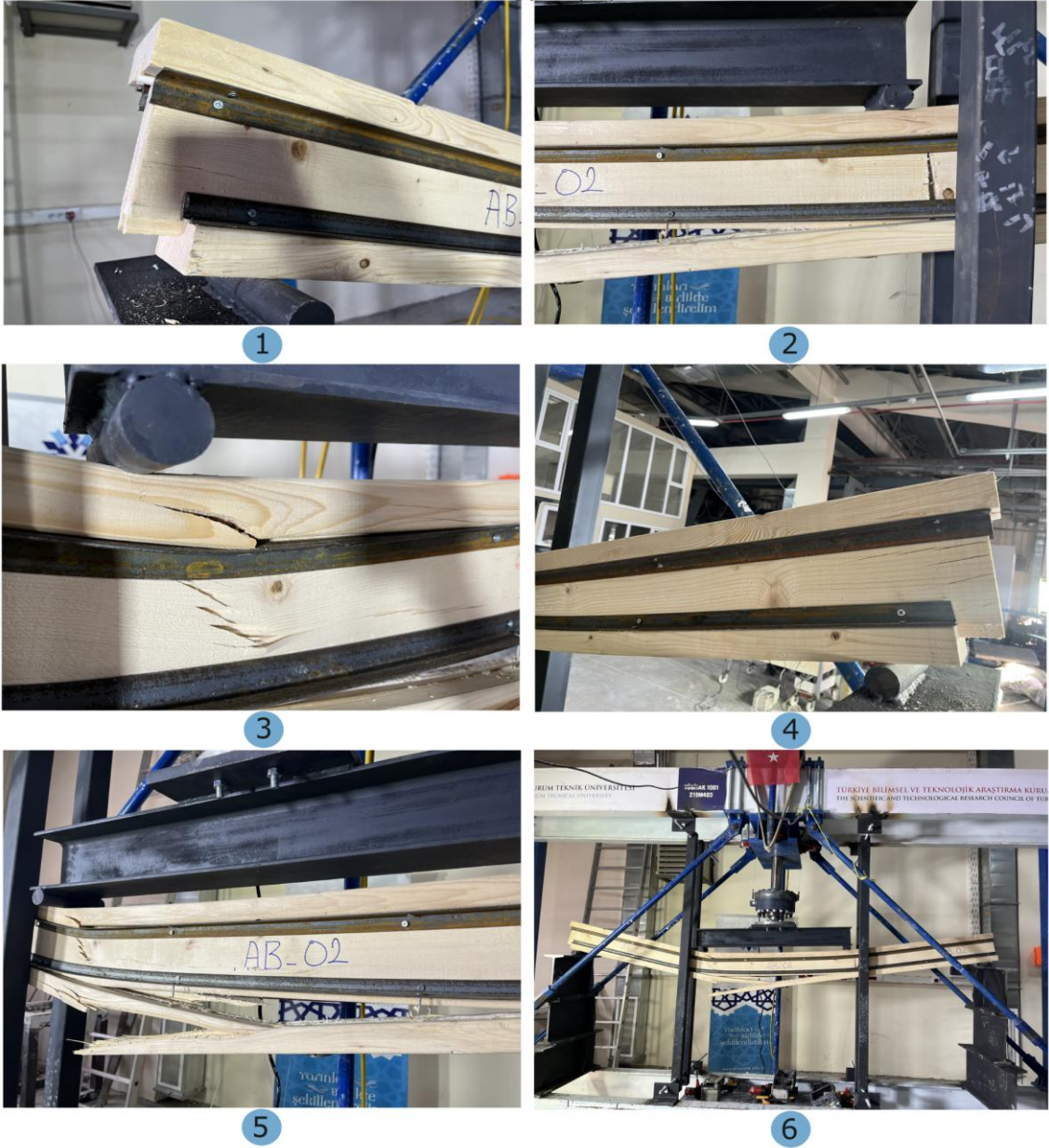
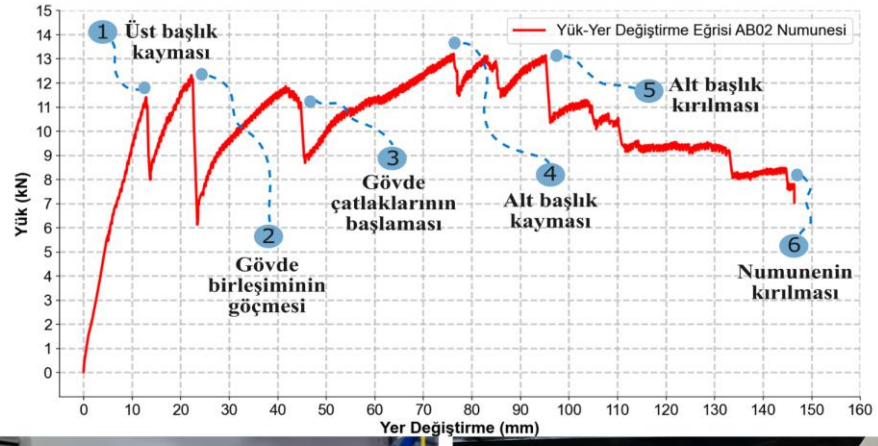


Şekil 5.1. CB02 kontrol numunesi için yük-deplasman eğrisi ve hasar mekanizmaları
(CB kontrol numunelerinin tamamı için bkz. Ek-1A)

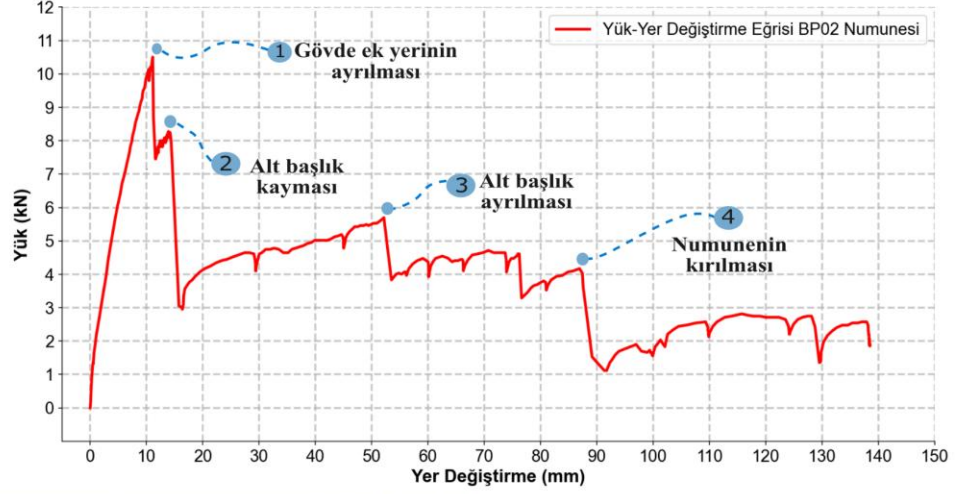
Korniyer ile güçlendirilen AB kodlu numunelerin yükleme altında davranışı ve farklı hasar mekanizmaları ayrıntılı bir şekilde incelendiğinde başlık kaymasının ardından gövde ayrılmasının ve buna eşlik eden başlıkların tamamen kırılması belirgin şekilde

gözlemlenmiştir. AB numunelerine ait yük-yer değiştirme grafiklerinin tamamı ve hasar mekanizmaları Ek-1B’de verilmiştir. Numuneler artan yer değiştirmeye rağmen aniden çökmemiş ancak yük taşımaya devam etmiştir. Kiriş numunelerindeki tüm deformasyonlar zamanla ilerlemiş ve sistem belirli bir süre daha yük taşımıştır. Deplasman artmasına rağmen sistemin tamamen göçmesinin gecikmesi sünek bir davranış gibi gözükse de taşıma kapasitesi sınırlı kalmış bu durumda başlık ve gövde birleşimlerindeki kritik bölgelerin korniyer kullanılarak güçlendirilmesi yönteminin istenilen etkiyi sağlamadığını göstermiştir. Şekil 5.2.’ de AB02 numunesi için verilmiş olan yük-deplasman eğrisi ve hasar mekanizmaları bu gözlemi destekler niteliktedir. Bu davranış ahşabın doğal bir malzeme olmasından kaynaklanan doğası gereği sahip olduğu düzensizlik, ahşap liflerin yönüne, yoğunluğuna, nem oranına ve kullanılan deniz tutkalının etkisine kadar birçok değişkene bağlı olduğu göstermiştir.

Taban plakası kullanılarak güçlendirilen BP olarak kodlanan konfigürasyonda Şekil 5.3. detaylı bir şekilde incelendiğinde genel olarak göçme mekanizmasının ilk gövde de başladığını ve bu hasarı numune başlığının izlediği görülmüştür. Öncelikle hasar mekanizmasının gövde ek birleşim yerinde meydana gelmesi ek birleşim yerinin zayıf nokta oluşturarak yük altında hasar alan ilk bölge olduğunu göstermiştir. Ahşap malzemedeki ek birleşim yerleri malzeme sürekliliğini bozmuş ve böylece numunenin performansını sınırlayan bir faktör haline gelmiştir. Bu beklenmeyen davranışın birkaç faktörden etkilendiği düşünülmüştür: gövde ek yeri birleşiminin yapıstırıcı uygulamasının yeterince dikkatli bir şekilde yapılmamış olması, ek yerinin yük aktarımındaki sürekliliğe engel olması, ek yerinin mesnet yakınlarına denk gelmiş olmasıyla daha çabuk hasar alması. Numunede gözlemlenen bir diğer hasar, alt başlığın gövdeden kayarak taban plakasının başlıklardan ayrılmasına neden olduğu ve bunun da takviye plakasının etkinliğini kaybettiğini göstermiştir. Bu da gösteriyor ki yapılan plaka güçlendirilmesi beklenildiği gibi yük taşıma kapasitesini artırmamıştır. Son olarak alt başlığın gövdeden tamamen ayrılması ve beraberinde numunenin tamamen kırılması şeklindeki hasar mekanizmasına bakıldığında önerilen taban plakası güçlendirme yönteminin gövde ve başlık bağlantı bölgelerinde beklenen yapısal iyileşmeyi sunmadığı görülmüştür. BP numunelerine ait grafikler ayrıntılı olarak Ek-1C’de mevcuttur.



Şekil 5.2. AB02 numunesi için yük-deplasman eğrisi ve hasar mekanizmaları

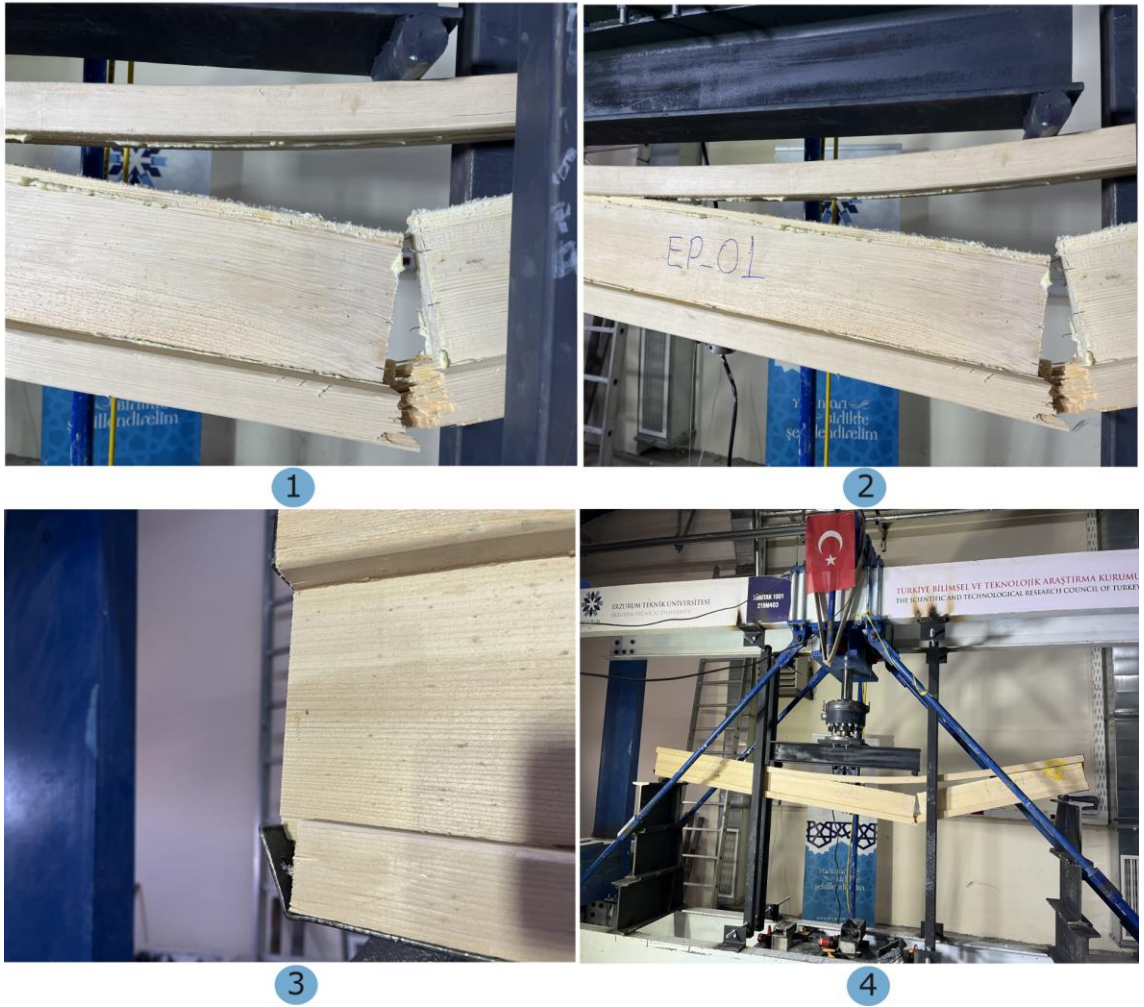
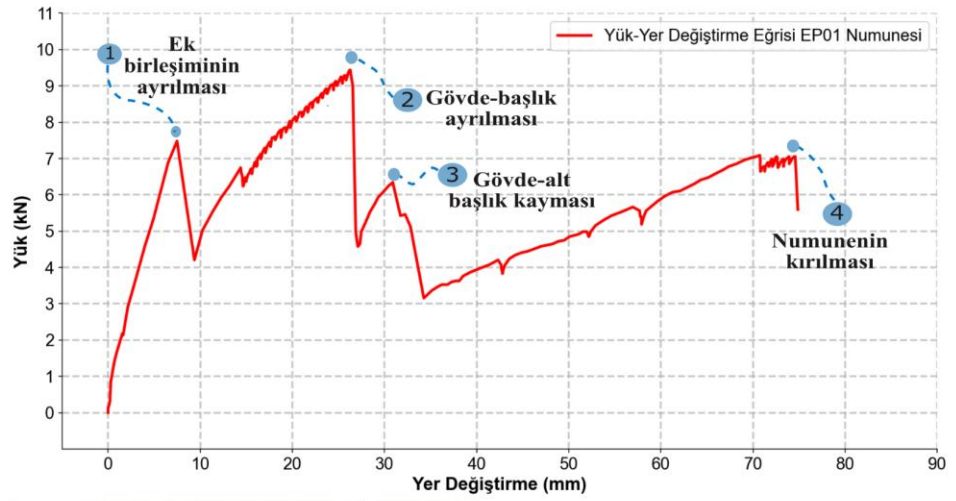


Şekil 5.3. BP02 numunesi için yük-deplasman eğrisi ve hasar mekanizmaları

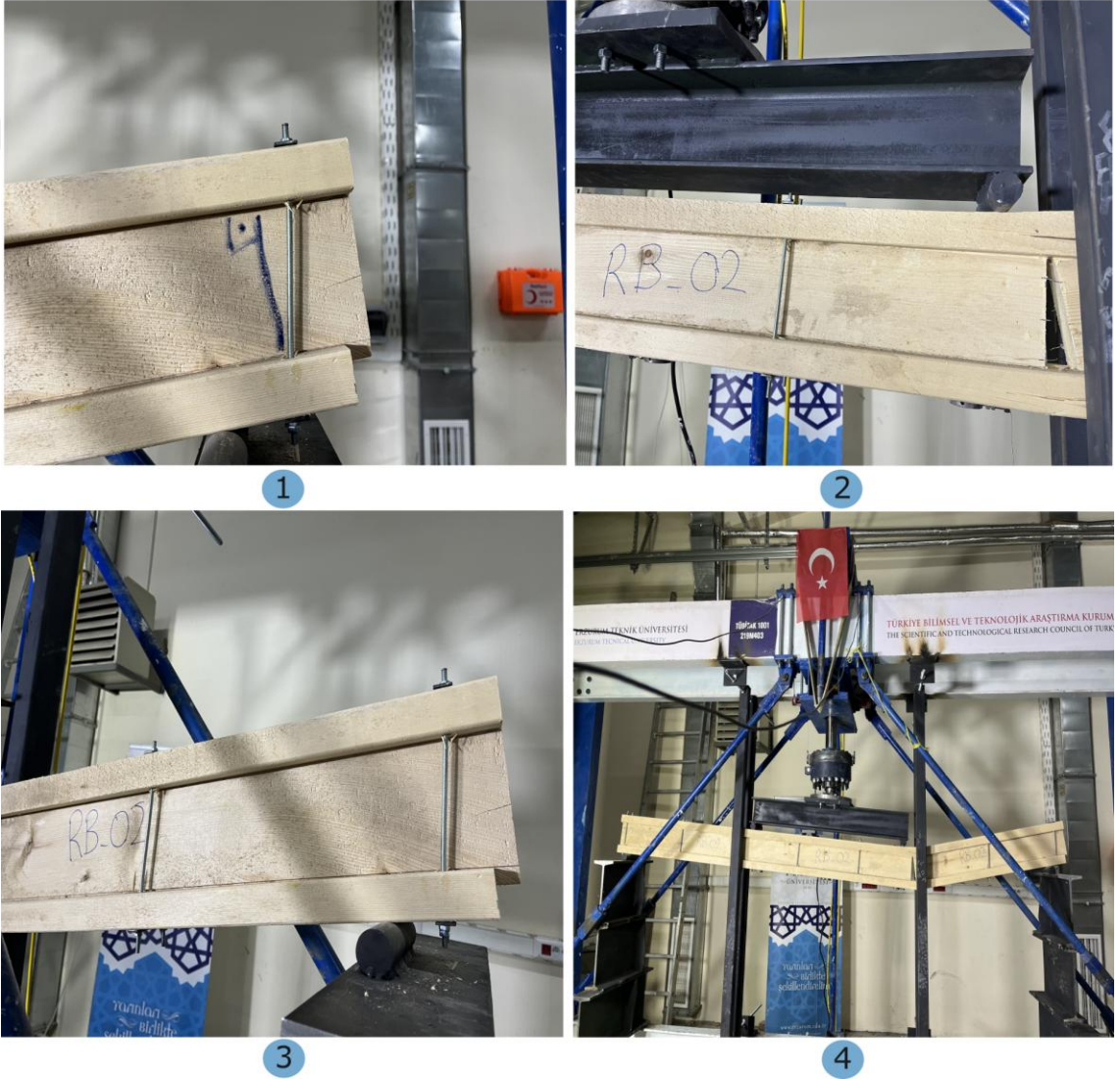
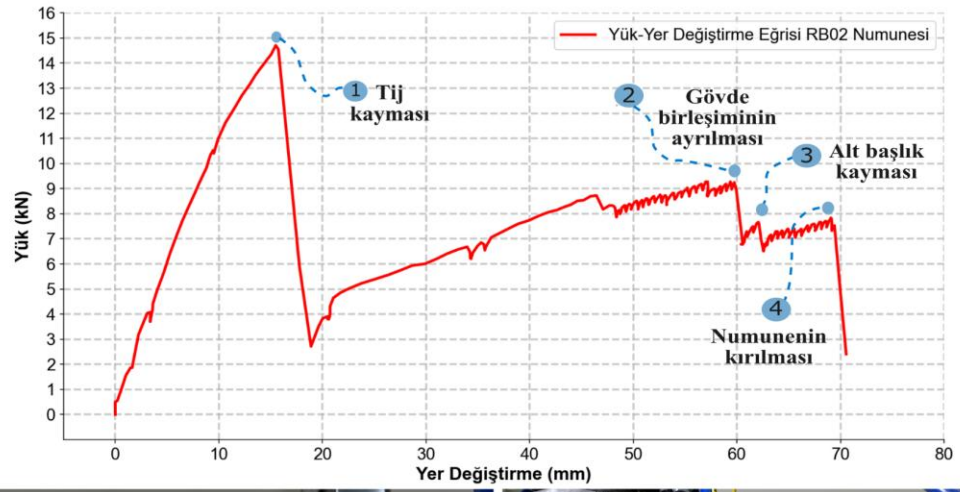
EP şeklinde adlandırılan başlık plaka ile güçlendirilen kirişler için genel olarak gözlemlenen başlık gövde ayrılmalarının başlık kayması şeklinde meydana gelmesiyle önerilen güçlendirme yönteminin hedeflenen tasarım kriterini karşılamadığı görülmüştür. Numunedeki hasar süreci, başlığın gövde ek yeri birleşiminden ayrılmasıyla başlamıştır

(Şekil 5.4.). Bu gözlem, gövde ekinin önceki numunedeki bulgulara benzer şekilde davrandığını göstermiştir. Daha sonra gövdenin üst başlıktan ayrılarak alt başlığın kaymasının gerçekleşmesiyle numunenin tamamen kırıldığı görülmüştür. Ek-1D’de EP numunelerine ait yük-yer değiştirme grafikleri ve hasar mekanizmaları ayrıntılı olarak incelendiğinde hasar mekanizma adımları ilerledikçe gövde ile başlığın birlikte çalışmadığını ortaya çıkarmıştır. Bu şekilde bir hasarın uygulanan başlık plakası güçlendirmesinin önemli bir etkisinin olmadığı sonucuna varmamıza yol açmıştır. Güçlendirme yöntemin numunenin başlık bağlantılarını daha dayanıklı hale getirmediği görülmüştür.

RB olarak belirlenmiş dişli tij çubuklarla güçlendirilen son kiriş konfigürasyonunda yük deformasyonu ve hasar mekanizmalarının ayrıntılı analiz edildiğinde herhangi bir göçme gerçekleşmeden önce dişli tij çubukların kaydığı ve bu numune grubunun en yüksek ortalama maksimum yük taşıma kapasitesine sahip olduğu görülmüştür (Şekil 5.5). Önerilen güçlendirme yöntemindeki dişli tij çubukların başlık ile gövde arasındaki yük aktarımını kolaylaştırdığı, yük giderek artmasına rağmen numunede tam göçme gözlenmediği ve gövde ek birleşim yeri tamamen ayrılmadığı görülmüştür. Dişli tij çubuklar, diğer numunelerin aksine, gövde ek birleşim yerinin ayrılmasını engellemiştir. Gövde ek birleşim yeri, kırılma sırasında kırılıp yerinden oynamasına rağmen, dişli tij çubuklar tamamen ayrılmasını önlemiştir. Ek-1E’de RB numunelerine ait yük-yer değiştirme grafikleri ve hasar mekanizmaları ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Kiriş numunelerinde dişli tij çubukların eğilmeye maruz kaldığı görülmüştür. Dişli tij çubuklar, numunelerde kesme kuvvetlerine direnerek diyagonal destek elemanları gibi davranmıştır. Diğer güçlendirme konfigürasyonlarıyla karşılaştırıldığında, tij takviyeli ahşap kiriş güçlendirme konfigürasyonunun performans kriterleri açısından önemli bir iyileştirme sağladığı görülmüştür.



Şekil 5.4. EP01 numunesi için yük-deplasman eğrisi ve hasar mekanizmaları



Şekil 5.5. RB02 numunesi için yük-deplasman eğrisi ve hasar mekanizmaları

Önerilen dört güçlendirme yönteminden elde edilen deneysel verilere dayanarak, birden fazla faktörün etkisi nedeniyle istenen performans seviyelerinin tam olarak elde edilemediği sonucuna varılmıştır. Güçlendirme elemanları ile kirişin başlık ve gövde arasındaki bağlantı noktalarının yeterince dikkatli tasarlanmamasıyla ahşabın doğal özellikleri uygulama kaynaklı hatalarla birleşince önerilen güçlendirme yöntemlerinin performansını olumsuz yönde etkilediği belirlenmiştir.

5.2. Elastisite Modülü

Yük altındaki basit kirişlerde moment ve sehîm hesabı için önemli bir parametre olan Elastisite modülünün bilinmesi gerekir. Standart dört noktalı eğilmeye deneyine maruz bırakılan bir kiriş için Elastisite modülü aşağıdaki formüle göre hesaplanmıştır. Çalışmada yapılan hesaplamalara göre elde edilen Elastisite modülü sonuçları Tablo 6.1’de verilmiştir.

$$E = \frac{Pa}{24uI} (3L^2 - 4a^2) \quad (1)$$

Burada; P: yük (N), u: açıklık ortası sehîm (mm), a: mesnet ile en yakın tekil yük arasındaki mesafe (mm), L: kiriş açıklığı (mm) I: Atalet momenti (mm⁴) olarak kullanılır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma, yerel kaynaklı Ardanuç ladininden üretilen ahşap I-kirişlerinin yapısal performansını artırmak amacıyla dört farklı çelik esaslı güçlendirme konfigürasyonlarının detaylı bir şekilde değerlendirmesini sunmuştur.

Çalışmanın deneysel bulguları, iki katmanlı bir ana sonuç ortaya koymaktadır. İlk olarak, tüm numunelerde imalat kaynaklı zayıf bir gövde ek birleşiminin varlığına rağmen, dikey tij (RB) takviyesinin, kontrol grubuna kıyasla yük taşıma kapasitesi, rijitlik ve enerji emiliminde istatistiksel olarak anlamlı ve üstün bir iyileştirme sağladığı net bir şekilde kanıtlanmıştır. İkinci olarak, diğer güçlendirme stratejilerinin performansının bu imalat kusuru tarafından maskelenmiş veya sınırlandırılmış olması, ahşap yapıların güçlendirilmesinde malzeme kalitesi ve birleşim detayı tasarımının, uygulanan güçlendirme tekniğinin kendisi kadar, hatta daha da önemli olabileceğini göstermektedir. Elde edilen deneysel bulgular belirli stratejilerin, özellikle tij çubuk takviyesinin (RB) önemli iyileştirmeler sağlayabileceğini gösterirken, bütün performanslarda büyük değişkenlik dikkat çekici olmuştur ve bu performanslar görünüşe göre ahşap numunelerinin doğal özellikleri ve üretim kalitesinden etkilenmiştir.

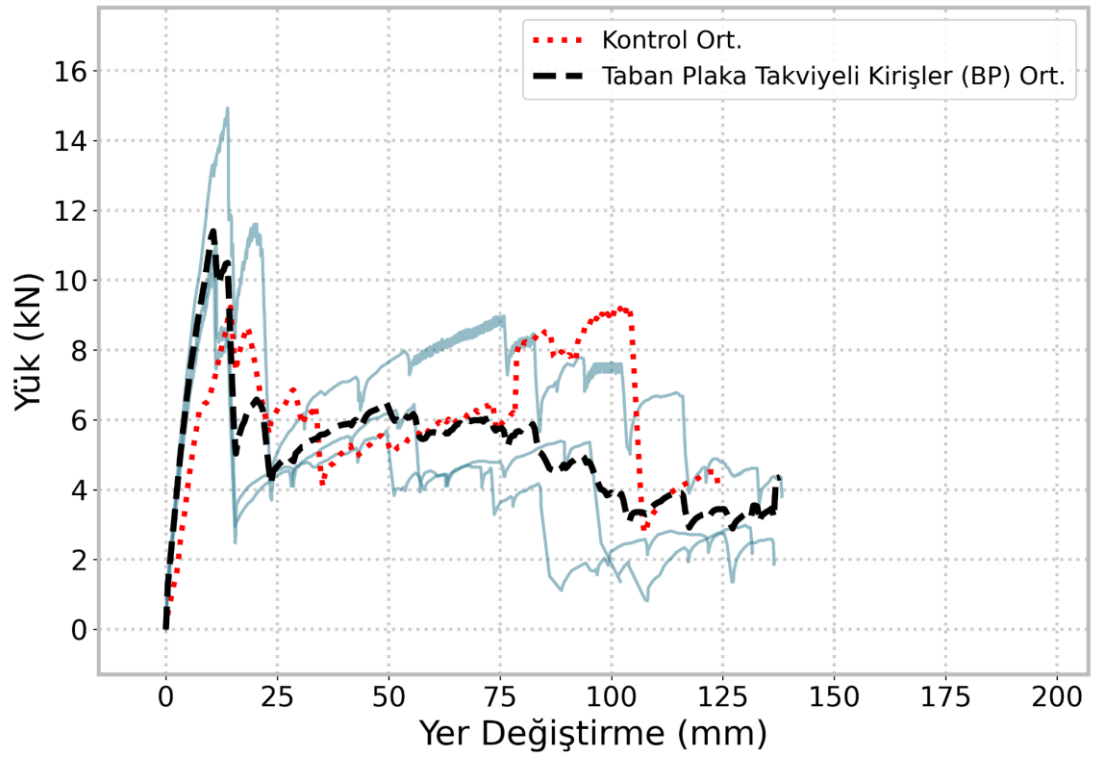
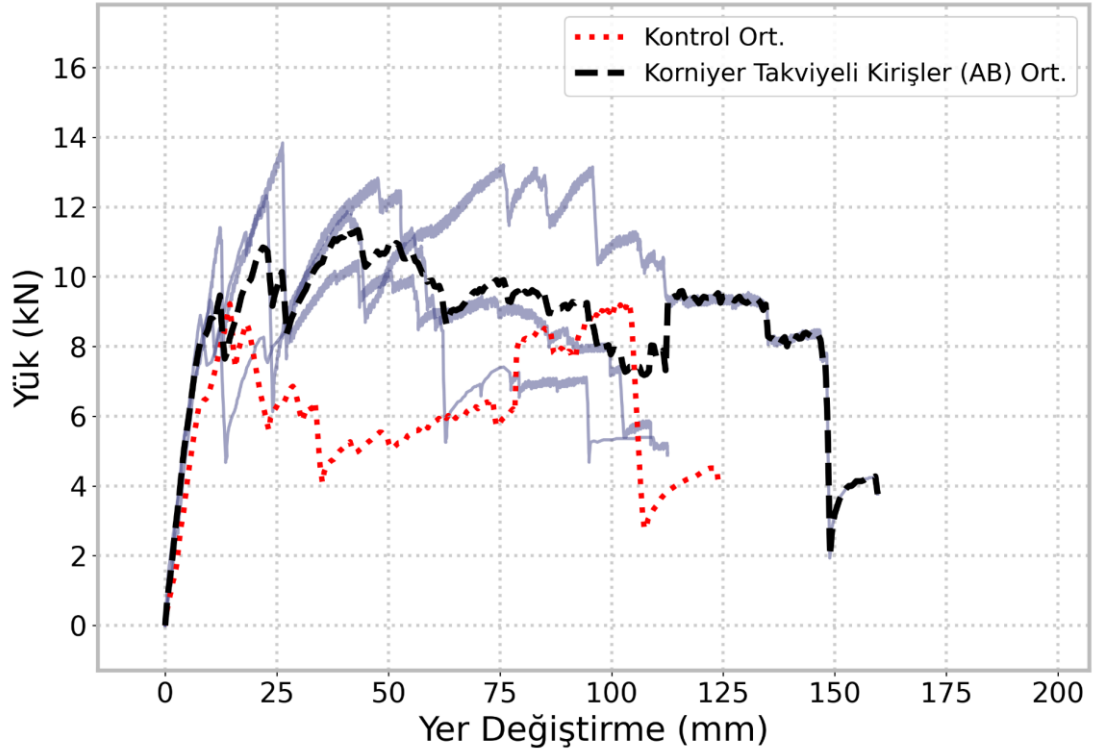
Deneysel bulgular aynı zamanda kontrol grubundaki numunelerin göçme modlarının birbirinden farklı davranış sergilediğini göstermiştir. Buna karşın güçlendirilen kiriş gruplarının her biri kendi içinde birbirine benzer davranış ortaya koymuştur. Bu şekilde uygulanan dört farklı güçlendirmenin, her grubun kendi içinde göçme modlarının kararlı davranış göstermesine katkı sağladığı anlaşılmıştır.

Şekil 6.1. ve Şekil 6.2’de her bir takviye türünün yük-yer değiştirme davranışlarının kontrol gurubuna göre karşılaştırmalı analizi verilmiştir. Kontrol kirişleri (CB), genel olarak en pik yüke ulaştıktan sonra kiriş başlıklarında kırılma gözlemlense de bir miktar daha artık yük taşıma kapasitesini tuttuğu görülmüştür. Buna karşılık, tij ile güçlendirilen (RB) kirişler, en yüksek ortalama maksimum yüke ulaşarak ve daha kontrollü devam eden bir göçme sergileyerek belirgin şekilde üstün bir performans göstermiştir. Diğer güçlendirme yöntemleri daha belirsiz sonuçlar vermiştir. Örneğin, Korniyer ile güçlendirme (AB), enerji emilimini artırırken, yük kapasitesinde orantılı bir artış sağlamamıştır.

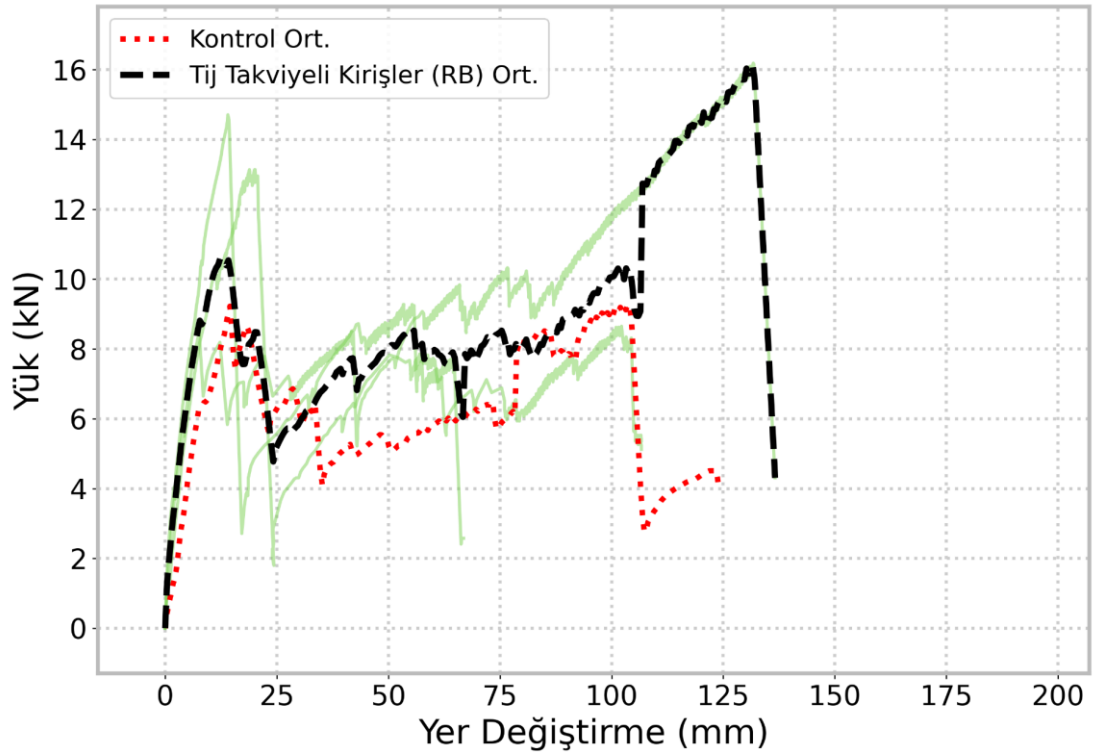
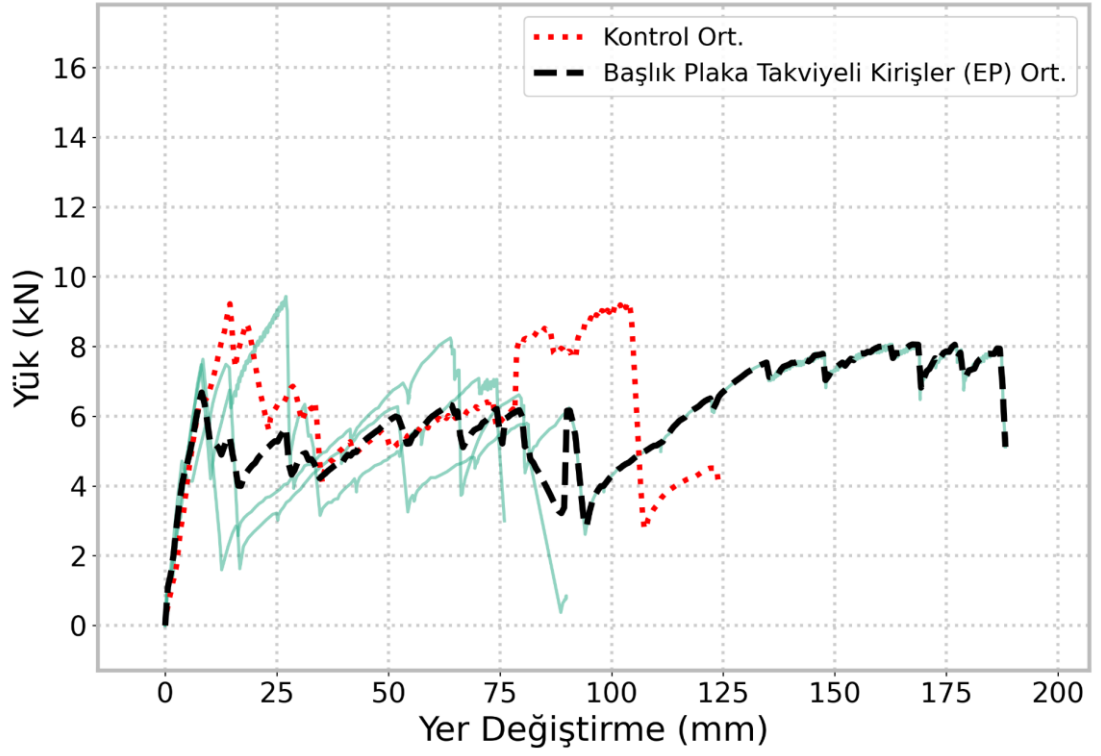
Başlık plaka ile güçlendirilen (EP) grubunun performansı özellikle açıklayıcı olmuştur: kontrol grubunun maksimum yük kapasitesini geçememesi ve hatta altında kalması, güçlendirmenin zayıflıkların üstesinden gelemediğini ve hatta önceden var olan zayıflıkları da kötüleştirmiş olabileceğini güçlü bir şekilde göstermektedir. Tüm gruptaki önemli performans farklılığı, homojen olmayan ahşap malzeme özelliklerinin ve ahşap malzemenin imalat tutarsızlıklarının etkisine işaret etmektedir. Özellikle I-kirişler endüstriyel olarak üretilmeyip yerel üreticilerden temin edildiğinden, iki gövde bölümünün bağlandığı süreksiz bir gövde ek birleşim yerinin varlığı muhtemelen kritik bir zayıflık noktası yaratmıştır. Bu kusurlu bağlantı ilk olarak hasarı başlatan olarak etki ettiği güçlendirme tekniklerinin de gerçek potansiyelini güçlü bir şekilde maskeleyiği görünmüştür.

Yapısal performans, tepe yük, başlangıç rijitliği ve enerji soğurma kullanılarak nicelleştirilmiştir. Başlangıç rijitliği (kN/mm), yük-yer değiştirme eğrisinin yükselen kolunda, numunenin tepe yükünün (P_{max}) %10-%40'ı arasındaki orantılı bölgede sıradan en küçük kareler yöntemiyle tahmin edilmiştir. Bu yöntem, çok düşük yüklerdeki oturma etkilerinin etkisini en aza indirir ve doğrusal olmayan davranıştan kaçınarak gruplar arasında bire bir karşılaştırılabilirlik sağlar. Rastgele seçilen bir numune için rijitlik hesabı Şekil 6.3'te verilmiştir. (Her bir numuneye ait rijitlik hesabı için bkz. Ek-2).

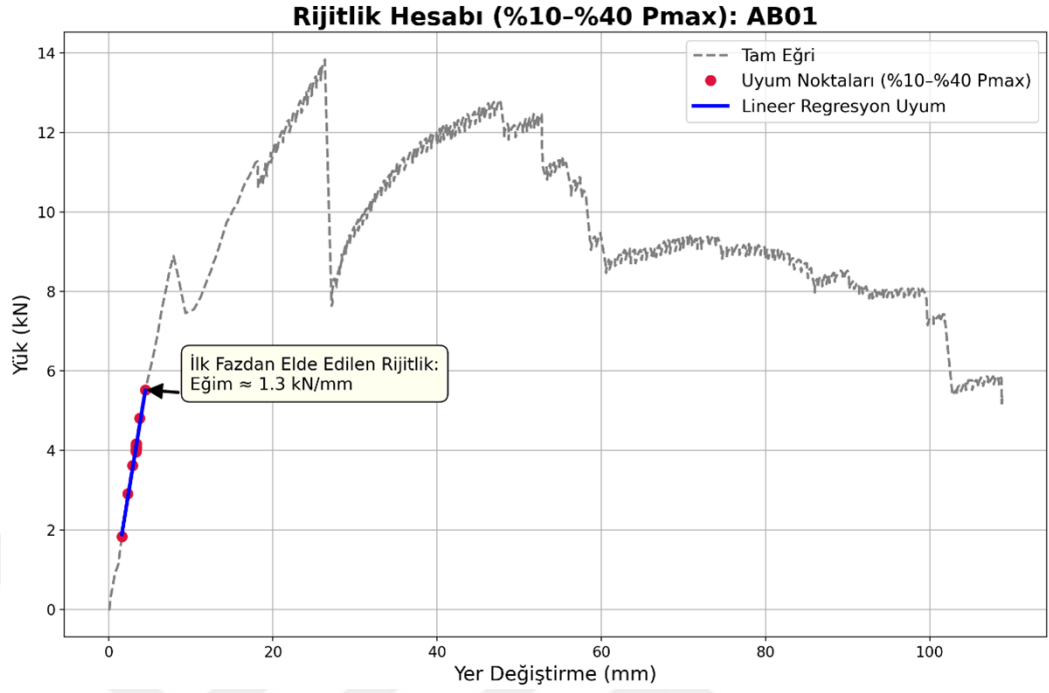
Enerji soğurma (kN·mm), yük-yer değiştirme eğrisi altındaki alanın trapez entegrasyonu ile elde edilmiştir. Malzeme sisteminin ahşap olması ve tepe sonrası tepkisinin genellikle belirgin yumuşama ile düzensiz kuyruk davranışı sergilemesi nedeniyle, çelik veya betonarme çalışmalarında kimi zaman kullanılan %80· P_{max} tepe sonrası kesimi benimsenmemiştir. Çalışmada birincil metrik olarak P_{max} entegrasyonu raporlanmış; ayrıca tepe sonrası entegrasyon eşiği %60, %65 ve %70 P_{max} seçenekleriyle duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan incelemede, özellikle %65 P_{max} civarının ahşap malzemeye özgü yumuşama davranışını daha gerçekçi yansıttığını ve sonuçların makul eşik varyasyonlarına karşı sağlam kaldığı gözlemlenmiştir. Çalışmada incelenen her bir numuneye ait enerji soğurma grafikleri için bkz. Ek-3. Yapılan hesaplamalara ait nicel sonuçlar Tablo 6.1'de sunulmuştur.



Şekil 6.1. Korniyer takviyeli (AB) ve taban plaka takviyeli (BP) güçlendirme grubunun kontrol gurubuna göre karşılaştırmalı yük-deplasman eğrileri



Şekil 6.2. Başlık plaka takviyeli (EP) ve tij takviyeli (RB) güçlendirme grubunun kontrol gurubuna göre karşılaştırmalı yük-deplasman eğrileri



Şekil 6.3. Başlangıç elastik bölge ve doğrusal uyumu gösteren örnek numune rijitlik grafiği

Tablo 6.1. Yapısal değerlendirme sonuçları

Grup	Maks. Yük Ort. (kN)	Rijitlik Ort. (kN/mm)	Enerji Ort. (kN.mm)	Elastisite Modülü Ort. (MPa)
Başlık Plaka (EP)	8,39	1,00	652,52	11.857,63
Kontrol (CB)	11,43	0,78	594,41	16.355,12
Korniyer (AB)	12,50	1,18	1.133,07	19.779,33
Taban Plaka (BP)	12,14	1,54	704,63	21.684,97
Tij (RB)	14,68	1,84	860,88	17.189,58

Kiriş gruplarını dört temel yapısal bileşen göre karşılaştıran Tablo 6.1. 'de görüldüğü üzere maksimum yük ortalaması, diğer gruplara göre en yüksek tij ile güçlendirilen numune grubunda kaydedilmiştir. Başlık plaka grubu ise maksimum ortalama yük değerinde kontrol grubunun altında kalmıştır. Ortalama rijitlik değerlerine bakıldığında ise 1.84 kN/mm ile en yüksek rijitlik değerine sahip olan grubun tij ile güçlendirilen grup olduğu görülmüştür. Güçlendirme gruplarının hepsi ortalama enerji sönmüleme değerinde kontrol grubuna kıyasla iyi bir performans göstermiştir.

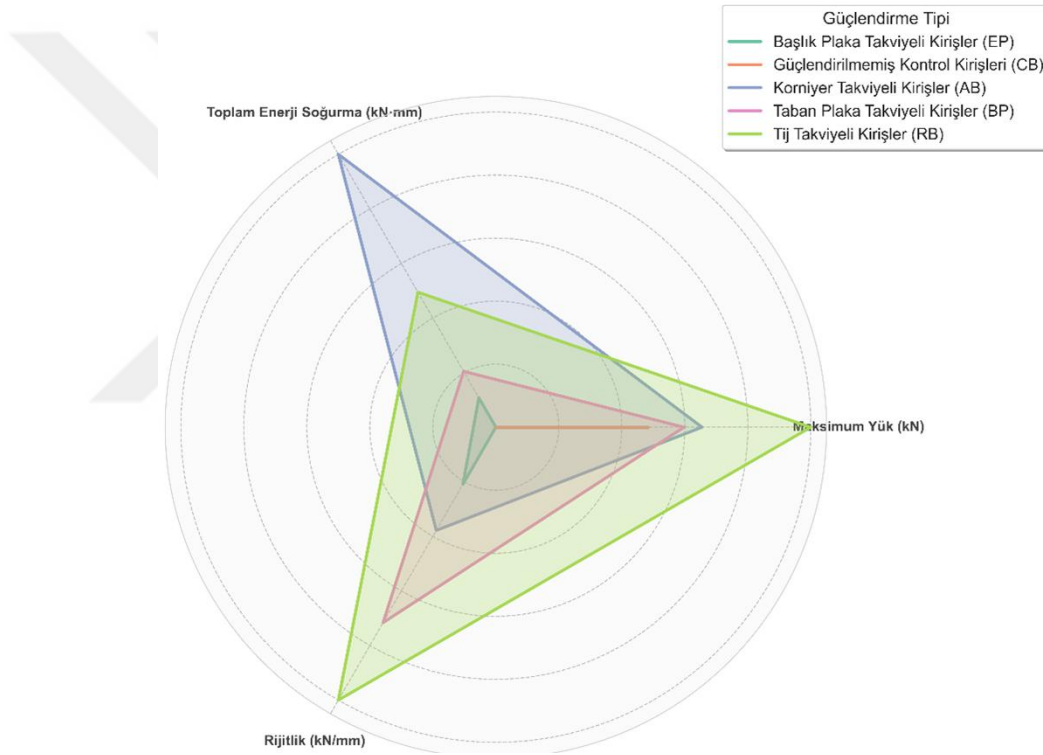
Çalışmada deneysel testlerden elde edilen her bir numuneden alınan verilerle Elastisite modülü hesabı yapılmıştır. Deney esnasında L4 deplasman ölçerlerinden alınan açıklık ortası sehim verileri kullanılarak yük yer değiştirme eğrisinin lineer kısmında tepe yükünün (P_{max}) %10-%40'ı arasındaki bölgede en küçük kareler yöntemi ile eğim hesabı için doğrusal regresyon analizi uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre çalışmada kullanılan Ardanuç ladininin ortalama 8.300 MPa değerine sahip olduğu referans alındığında uygulanan tüm güçlendirme gruplarında elastisite modülünde belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Taban plaka takviyesi elastisite modülünde diğer güçlendirme yöntemlerine göre daha yüksek-yaklaşık 2,5 katlık- bir artış sağlamıştır. Bu duruma kıyasla başlık plaka takviyeli güçlendirmenin ise elastisite modülünde yaklaşık iki kat artış sağlasa da karşılaştırılan diğer tüm yapısal bileşenlerde olduğu gibi elastisite modülü değerinde de daha düşük kaldığı görülmüştür.

Şekil 6.4'teki, maksimum yük, rijitlik ve toplam enerji emilimini bütünsel olarak değerlendiren radar grafiğiyle karşılaştırmalı performans daha da aydınlatılmıştır. Grafik farklı güçlendirme konfigürasyonları üzerinde birden çok parametreyi bir arada göreceli olarak karşılaştırmayı sağlamıştır. Merkeze yakın alanlar grafik üzerinde daha düşük performans gösterirken merkezden uzaklaşan alanlar daha yüksek performans temsil etmektedir. Kontrol numuneleri toplam enerji soğurma ve rijitlik metriklerinde diğer numuneneler göre iyi bir performans göstermediği için temsil ettiği alan merkez noktası olarak kabul edilmiştir. Grafik tartışmasız bir şekilde Tij (RB) konfigürasyonunu en dengeli ve etkili çözüm olarak konumlar ki bu konumlandırma da üç metriğin hepsinde önemli kazanımlar olduğunu gösterir. Bu, sadece nihai mukavemeti değil, aynı zamanda kirişin rijitliğini ve enerji soğurma yeteneğini de geliştiren kapsamlı bir yapısal iyileştirme olduğunu göstermektedir.

Diğer taraftan ilk hasar sonrası, sınırlıda olsa yük taşıma kapasitesinin devam ettiren Korniyerli (AB) güçlendirme yöntemi, öncelikle enerji emiliminde asimetrik

dağılan bir iyileşme göstermektedir. Başlık plaka (EP) konfigürasyonunun performansının maksimum yük ve rijitlik metriklerinde çarpıcı bir şekilde kontrol grubunun temel çizgisinin altına çekilmesi de radar grafiğinde görselleştirilmiştir.

Sayısal olarak, performans iyileştirme grafiği (Şekil 6.5.) bu gözlemleri doğrulamaktadır. Grafik, dört güçlendirme türü için kontrol grubuna göre temel yapısal özelliklerde; maksimum yük, toplam enerji emilimi ve rijitlikte yüzdelik değişimi göstermektedir.

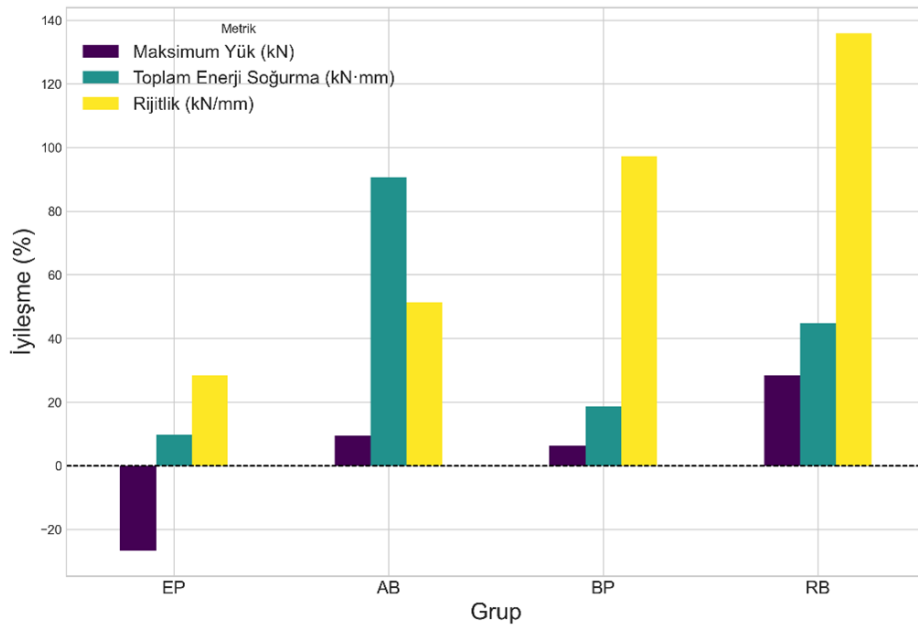


Şekil 6.4. Her bir güçlendirme grubu için temel parametrelerin karşılaştırılması

Tij Çubuk (RB) güçlendirmesi, rijitlikte yaklaşık %140'lık bir artışla, toplam enerji emiliminde %45'lik bir iyileştirmeye ve maksimum yükte %28'lik önemli bir kazançla en etkileyici sonuçları vermiştir. Taban Plaka (BP) konfigürasyonu da yük kapasitesine ve enerji emilimine katkısı tutarlı olmasına rağmen rijitlikte dikkate değer bir artış sağlamıştır (yaklaşık %98). Başlık Plaka (EP) kirişleri için maksimum yükte yaklaşık %25'lik negatif iyileştirme çalışma için kritik bir bulgu olma özelliğini gösterir.

Bu çalışma, ilk yüklemeden son kırılmaya kadar bütün hasar sürecini deneysel bir program aracılığıyla belgelendiren bu araştırma farklı güçlendirme konfigürasyonlarının ahşabın karmaşık mekanizmasıyla nasıl etkileşime girdiğini incelikli bir şekilde anlaşılmasını sağlamıştır.

Sonuç olarak bu çalışma ahşap I-kirişlerinin yapısal davranışını iyileştirmek için farklı çelik güçlendirme sistemlerinin kayda değer potansiyelini başarılı bir şekilde göstermiştir. Bu potansiyelin en net kanıtı, yük kapasitesi, rijitlik ve enerji emiliminde önemli iyileştirmeler sağlayan Tij esaslı (RB) sistemin, test edilen yöntemler arasında açık ara en etkili çözüm olarak öne çıkmasıdır. Bununla birlikte, özellikle Başlık Plaka (EP) sisteminin zayıf performansı gibi bulgular, güçlendirmenin başarısının sadece uygulanan tekniğe değil, aynı zamanda temel malzemenin ve imalatın kalitesine de sıkı sıkıya bağlı olduğunu göstermiştir.



Şekil 6.5. Güçlendirmelerin temel yapısal özelliklere göre sayısal analizi

Nitekim, bu çalışmanın en kritik bulgularından biri, test edilen güçlendirme stratejilerinin performansının, numunelerdeki bir imalat detayı olan süreksiz gövde ek birleşimi tarafından önemli ölçüde domine edilmiş olmasıdır. Temel mühendislik prensiplerine göre birleşimlerin, birleştirdiği elemanlardan daha dayanımlı olması hedeflenirken, göçme modlarının neredeyse tamamının bu ek yerinde başlaması,

birleşimin kirişin diğer kısımlarından daha düşük bir dayanıma sahip olduğunu ve adeta ‘yapısal bir sigorta’ gibi davrandığını kanıtlamıştır.

Bu durum, bir metodolojik sınırlama olmasının ötesinde, ahşap yapı mühendisliği için temel bir sonucu ortaya koymaktadır: En gelişmiş ve etkili güçlendirme tekniği dahi, yapısal bütünlüğü bozan zayıf bir birleşim detayı varlığında potansiyelini tam olarak sergileyemez. Bu bağlamda, RB konfigürasyonunun üstün performansı, sadece kendi içsel etkinliğine değil, aynı zamanda bu temel zayıflığı bir dereceye kadar geciktirme veya engelleme kabiliyetine de bağlanabilir.

Bu nedenle, araştırmanın nihai mesajı, planlanan güçlendirme karşılaştırmasının ötesine geçmektedir: Ahşap elemanların güçlendirilmesinde başarının anahtarı, öncelikle birleşim tasarımı ve imalat kalitesinin güvence altına alınmasıdır. Gelecekteki çalışmalar, bu maskeleyici etkiyi ortadan kaldırmak için RB sistemi gibi optimize edilmiş stratejileri yüksek kaliteli üretim standartlarına sahip numunelerle birleştirerek, bu yöntemlerin gerçek potansiyelini tam olarak ortaya çıkarmayı hedeflemelidir.

KAYNAKÇA

- Al-Fasih, M. Y. M., Mokhtar, N. I., Ahmad, Y., Ibrahim, I. S. Bin, & Hassan, S. A. (2021). Shear performance of strengthened timber beam with intermittent GFRP strips. *Construction and Building Materials*, 312, 125394. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125394>
- Bhat, J. A. (2021). Effect of CFRP-Reinforcement variation on the strength parameters of different timber beams. *Materials Today: Proceedings*, 44, 2785-2791. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.783>
- Borri, A., & Corradi, M. (2011). Strengthening of timber beams with high strength steel cords. *Composites Part B: Engineering*, 42(6), 1480-1491. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.04.051>
- Borri, A., Corradi, M., & Grazini, A. (2005). A method for flexural reinforcement of old wood beams with CFRP materials. *Composites Part B: Engineering*, 36(2), 143-153. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2004.04.013>
- Cao, A. S., Grönquist, P., & Frangi, A. (2023). Catenary action in strip-reinforced wood and timber beams. *Construction and Building Materials*, 385, 131422. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131422>
- Chen, S., Wei, Y., Ding, M., Zhao, K., & Zheng, K. (2022). Combinatorial design and flexural behavior of laminated bamboo-timber composite beams. *Thin-Walled Structures*, 181, 109993. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.109993>
- Chen, S., Wei, Y., Peng, D., Zhao, K., & Hu, Y. (2021). Experimental investigation of timber beams strengthened by bamboo scrimber with anchorage structure. *Structures*, 33, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.04.038>
- Chen, S., Wei, Y., Zhao, K., Dong, F., & Huang, L. (2022). Experimental investigation on the flexural behavior of laminated bamboo-timber I-beams. *Journal of Building Engineering*, 46, 103651. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103651>
- Chi-Jen, C. (1999). Mechanical behavior of fiber glass reinforced timber joints. *World Conference On Timber Engineering WCTE*. <https://doi.org/10.5075/epfl-thesis-1940>
- Claisse, P. A., & Davis, T. J. (1998). High performance jointing systems for timber. *Construction and Building Materials*, 12(8), 415-425. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(98\)00031-2](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(98)00031-2)
- Corradi, M., Mouli Vemury, C., Edmondson, V., Poologanathan, K., & Nagaratnam, B. (2021). Local FRP reinforcement of existing timber beams. *Composite Structures*, 258, 113363. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113363>
- Çalışkan, Ö., Meriç, E., & Yüncüler, M. (2019). Ahşap ve Ahşap Yapıların Dünyü, Bugünü ve Yarını. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 6(1), 109-118. <https://doi.org/10.35193/bseufbd.531012>
- Çankal, D. (2021). *Lamine ahşap kirişlerin lifli polimerlerle güçlendirilmesinin sayısal yöntemlerle incelenmesi* [Yüksek lisans tezi]. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

- Çelik, H. K., & Şakar, G. (2022). Geçmişin ve Geleceğin Yapı Malzemesi Olarak Ahşap: Yapı Mühendisliği Çerçevesinde Bir İnceleme. *European Journal of Science and Technology*. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1108072>
- D'Ambrisi, A., Focacci, F., & Luciano, R. (2014). Experimental investigation on flexural behavior of timber beams repaired with CFRP plates. *Composite Structures*, 108, 720-728. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.10.005>
- Davis, G. (1997). The performance of adhesive systems for structural timbers. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 17(3), 247-255. [https://doi.org/10.1016/S0143-7496\(97\)00010-9](https://doi.org/10.1016/S0143-7496(97)00010-9)
- de la Rosa García, P., Escamilla, A. C., & Nieves González García, M. (2013). Bending reinforcement of timber beams with composite carbon fiber and basalt fiber materials. *Composites Part B: Engineering*, 55, 528-536. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.07.016>
- De Luca, V., & Marano, C. (2012). Prestressed glulam timbers reinforced with steel bars. *Construction and Building Materials*, 30, 206-217. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.016>
- Dempsey, D. D., & Scott, D. W. (2006). Wood Members Strengthened with Mechanically Fastened FRP Strips. *Journal of Composites for Construction*, 10(5), 392-398. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2006\)10:5\(392\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2006)10:5(392))
- Gentry, T. R. (2011). Performance of Glued-Laminated Timbers with FRP Shear and Flexural Reinforcement. *Journal of Composites for Construction*, 15(5), 861-870. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000206](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000206)
- Ghanbari-Ghazijahani, T., Russo, T., & Valipour, H. R. (2020). Lightweight timber I-beams reinforced by composite materials. *Composite Structures*, 233, 111579. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111579>
- Gómez, E. P., González, M. N., Hosokawa, K., & Cobo, A. (2019). Experimental study of the flexural behavior of timber beams reinforced with different kinds of FRP and metallic fibers. *Composite Structures*, 213, 308-316. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.01.099>
- Goodwin, J., Woods, J. E., & Hout, N. A. (2022). Assessing the structural behaviour of glued-laminated timber beams using distributed strain sensing. *Construction and Building Materials*, 325, 126844. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126844>
- Görgün, H. V. (2012). *Ahşap kirişlerde eğilme direnci ve elastikiyet modülünün tahribatsız ve tahribatlı test yöntemleri ile belirlenmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Gul, M., Waseem, S. A., & Bhat, J. A. (2024). Experimental investigation on strengthening of glulam timber beams using cold-formed steel sections. *Structures*, 66, 106767. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106767>
- Hadigheh, S. A., McDougall, R., Wiseman, C., & Reid, L. (2021). Evaluation of composite action in cross laminated timber-concrete composite beams with CFRP reinforcing bar and plate connectors using Digital Image Correlation (DIC). *Engineering Structures*, 232, 111791. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111791>

- Halicka, A., & Ślósarz, S. (2021). Strengthening of timber beams with pretensioned CFRP strips. *Structures*, 34, 2912-2921. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.09.055>
- Halicka, A., & Ślósarz, S. (2022). Analysis of behavior and failure modes of timber beams prestressed with CFRP strips. *Composite Structures*, 301, 116171. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116171>
- Hoseinpour, H., Valluzzi, M. R., Garbin, E., & Panizza, M. (2018). Analytical investigation of timber beams strengthened with composite materials. *Construction and Building Materials*, 191, 1242-1251. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.014>
- Jasieńko, J., & Nowak, T. P. (2014). Solid timber beams strengthened with steel plates – Experimental studies. *Construction and Building Materials*, 63, 81-88. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.020>
- Jurkiewicz, B., Durif, S., Bouchair, A., & Grazide, C. (2022). Experimental and analytical study of hybrid steel-timber beams in bending. *Structures*, 39, 1231-1248. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.03.055>
- Kahriman, A., Çakır, C. Y., & Şahin, A. (2023). Artvin Ardanuç yöresi Doğu Karadeniz göknarı - Doğu ladini karışık meşcereleri için hacim denklemleri. *Turkish Journal of Forestry | Türkiye Ormancılık Dergisi*, 24(1), 1-10. <https://doi.org/10.18182/tjf.612822>
- Karimi-Nobandegani, A., & Valipour, H. (2022). Effect of web openings on timber composite beams: Testing and analytical modelling. *Engineering Structures*, 256, 114064. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114064>
- Khelifa, M., Auchet, S., Méausoone, P.-J., & Celzard, A. (2015). Finite element analysis of flexural strengthening of timber beams with Carbon Fibre-Reinforced Polymers. *Engineering Structures*, 101, 364-375. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.07.046>
- Khelifa, M., & Celzard, A. (2014). Numerical analysis of flexural strengthening of timber beams reinforced with CFRP strips. *Composite Structures*, 111, 393-400. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.01.011>
- Kim, Y. J., & Harries, K. A. (2010). Modeling of timber beams strengthened with various CFRP composites. *Engineering Structures*, 32(10), 3225-3234. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.06.011>
- Li, H., Wei, Y., Yan, L., Semple, K. E., & Dai, C. (2023). Structural behavior of steel dowel-reinforced cross-laminated bamboo and timber beams. *Composite Structures*, 318, 117111. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117111>
- Li, Y.-F., Tsai, M.-J., Wei, T.-F., & Wang, W.-C. (2014). A study on wood beams strengthened by FRP composite materials. *Construction and Building Materials*, 62, 118-125. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.03.036>
- Ling, Z., Liu, W., & Shao, J. (2020). Experimental and theoretical investigation on shear behaviour of small-scale timber beams strengthened with Fiber-Reinforced Polymer composites. *Composite Structures*, 240, 111989. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.111989>
- Mathuros, A., Thongchom, C., Van Hong Bui, L., & Jongvivatsakul, P. (2024). Monotonic and cyclic flexural performance of timber beams strengthened with

- glass fiber-reinforced polymer rods using near-surface mounted technique. *Structures*, 65, 106729. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106729>
- Mei, L., Ren, J., Lin, X., Wu, M., Guo, N., Yang, W., & Sheng, Y. (2024). Analytical model for prestressed glulam beams reinforced with unbonded steel bars. *Engineering Structures*, 307, 117862. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.117862>
- Melinda, A. P., Higuchi, S., Yoresta, F. S., Yamazaki, Y., Nhut, P. V., Nuryanti, P., & Matsumoto, Y. (2024). Bending performance of laminated veneer lumber timber beams strengthened in the compression side with near-surface mounted CFRP plates. *Case Studies in Construction Materials*, 21, e03418. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03418>
- Mercimek, Ö., Ghoroubi, R., Akkaya, S. T., Türer, A., Anıl, Ö., & İşleyen, Ü. K. (2024). Flexural behavior of finger joint connected glulam wooden beams strengthened with CFRP strips. *Structures*, 66, 106853. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106853>
- Moayyed, M. Y., & Taheri, F. (2010). Creep response of glulam reinforced by a novel pre-stressed FRP-wood composite system. *1th World Conference on Timber Engineering 2010, WCTE 2010*, 601-609.
- Motlagh, B., Gholipour, Y., & G.H, E. (2012). Experimental Investigation On Mechanical Properties Of Old Wood Members Reinforced With Frp Composite. *Wood Research*, 57(2), 285-296.
- Ogawa, H. (2000). Architectural application of carbon fibers. *Carbon*, 38(2), 211-226. [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(99\)00146-3](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(99)00146-3)
- Okka, M. (2020). *Ahşap giriş elemanlarının deneysel olarak dayanımlarının belirlenmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Özaslan, M. (2024). *Farklı geometrik ön kusur şekillerinin ahşap kirişlerin yanal burulmalı burkulma davranışları üzerindeki etkileri* [Yüksek lisans tezi]. Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Patalas, F., Brol, J., & Nowak, T. P. (2023). Numerical analysis, experimental tests and non-linear analytical models in the study of bent timber beams reinforced with FRP strips. *Construction and Building Materials*, 399, 132531. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132531>
- Saral, Ö. F. (2016). *Çelik Çubuk Takviyeli Ahşap Kirişlerin Taşıyıcı Performansının Deneysel Ve Analitik Yöntemle İncelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Schnerch, D., Dawood, M., & Rizkalla, S. (2005). Strengthening steel-concrete composite bridges with high modulus carbon fiber reinforced polymer (CFRP) laminates. *Proceedings of the Third International Conference on Composites in Construction*.
- Shekarchi, M., Vatani Oskouei, A., & Raftery, G. M. (2020). Flexural behavior of timber beams strengthened with pultruded glass fiber reinforced polymer profiles. *Composite Structures*, 241, 112062. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112062>
- Stucki, S., Kelch, S., Mamie, T., Burckhardt, U., Grönquist, P., Elsener, R., Schubert, M., Frangi, A., & Burgert, I. (2024). High-performance timber-concrete-composites

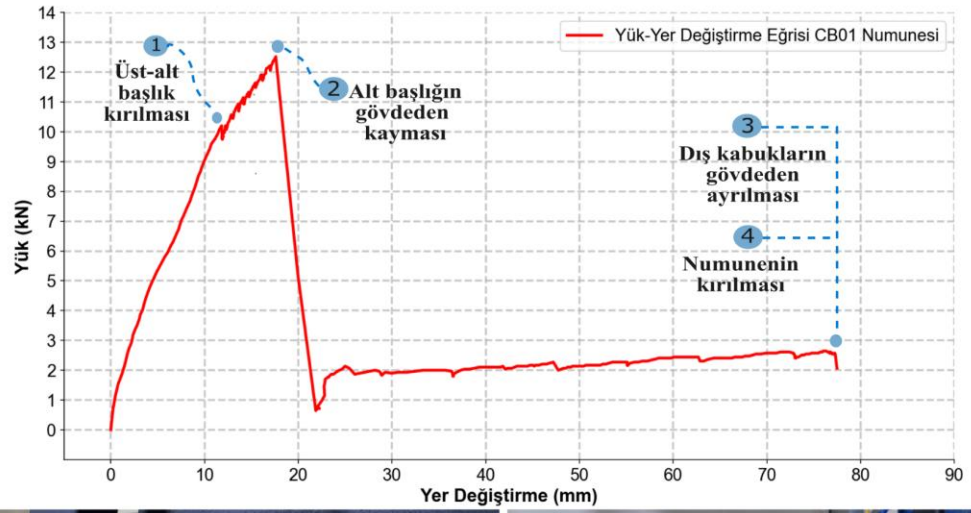
- with polymer concrete and beech wood. *Construction and Building Materials*, 411, 134069. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134069>
- Sunar, N. (2018). *Kompozit Malzemelerle Güçlendirilen Ahşap Kirişlerin Titreşim Özelliklerinin İncelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Tavşan, C., Şahiner Tufan, A., & Tavşan, F. (2022). Ekolojik Malzeme Olan Ahşapla Yapılan Çok Katlı Yapılar. *Kocaeli Üniversitesi Mimarlık ve Yaşam Dergisi*, 7(1), 291-309. <https://doi.org/10.26835/my.1018854>
- Tian, Y., Li, H., Chen, B., Lorenzo, R., & Ashraf, M. (2023). Experimental and theoretical investigation of prestressed-steel-reinforced laminated bamboo lumber beams. *Structures*, 47, 434-448. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.10.135>
- Tran, T.-T., Thi, V.-D., Khelifa, M., Oudjene, M., & Rogaume, Y. (2018). A constitutive numerical modelling of hybrid-based timber beams with partial composite action. *Construction and Building Materials*, 178, 462-472. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.080>
- Triantafillou, T. C. (1997). Shear Reinforcement of Wood Using FRP Materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 9(2), 65-69. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1997\)9:2\(65\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1997)9:2(65))
- Valipour, H. R., & Crews, K. (2011). Efficient finite element modelling of timber beams strengthened with bonded fibre reinforced polymers. *Construction and Building Materials*, 25(8), 3291-3300. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.017>
- Wdowiak-Postulak, A. (2023). Numerical, theoretical and experimental models of the static performance of timber beams reinforced with steel, basalt and glass prestressed bars. *Composite Structures*, 305, 116479. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116479>
- Wen, J., & Xiao, Y. (2023). The flexural behavior of cross laminated bamboo and timber (CLBT) and cross laminated timber (CLT) beams. *Construction and Building Materials*, 408, 133739. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133739>
- Yang, Y., Liu, J., & Xiong, G. (2013). Flexural behavior of wood beams strengthened with HFRP. *Construction and Building Materials*, 43, 118-124. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.029>
- Yeboah, D., & Gkantou, M. (2021). Investigation of flexural behaviour of structural timber beams strengthened with NSM basalt and glass FRP bars. *Structures*, 33, 390-405. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.04.044>
- Yüncüler, M. (2019). *TS 647 ve Avrupa Ahşap Yapı Standardı Eurocode 5'in Örneklerle Karşılaştırılması* [Yüksek Lisans Tezi]. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Zhang, C., Chun, Q., Wang, H., Lin, Y., & Shi, J. (2022). Experimental study on the flexural behaviour of timber beams strengthened with high ductility and low cost hybrid fibre sheets. *Construction and Building Materials*, 322, 126514. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126514>
- Zhang, H., Shen, M., Deng, Y., Andras, P., Sukontasukkul, P., Yuen, T. Y. P., Tang, Y., Wong, S. H. F., Limkatanyu, S., Singleton, I., & Hansapinyo, C. (2023). A new concept of bio-based prestress technology with experimental Proof-of-Concept on Bamboo-Timber composite beams. *Construction and Building Materials*, 402, 132991. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132991>

- Zhao, Y., Yuan, Y., Wang, C.-L., & Meng, S. (2023). Experimental and finite element analysis of flexural performance of steel-timber composite beams connected by hybrid-anchored screws. *Engineering Structures*, 292, 116503. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116503>
- Zheng, Y., & Zhou, C. (2024). Axial compressive properties of intermediately slender circular ancient timber columns reinforced with high-performance bamboo-based composites. *Structures*, 65, 106720. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106720>



EKLER

EK-1A. CB01 numunesi için yük-deplasman eğrisi ve hasar mekanizmaları



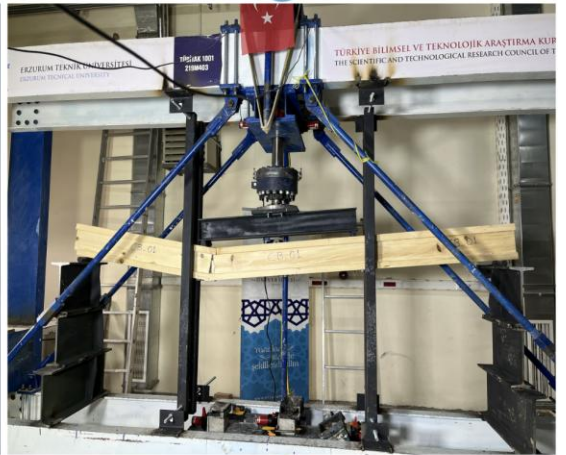
1



2

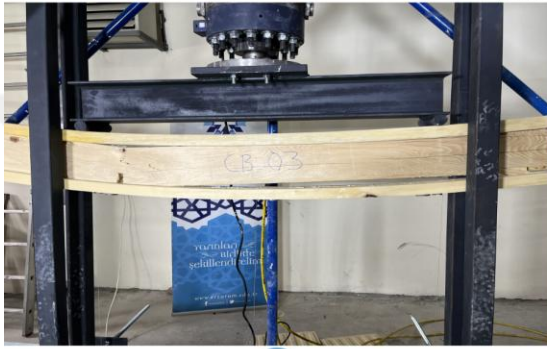
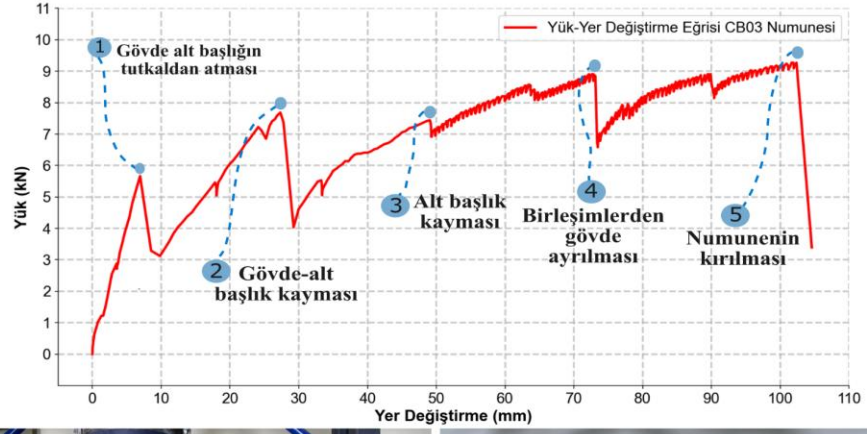


3



4

EK-1A. CB03 numunesi için yük-deplasman eğrisi ve hasar mekanizmaları



1



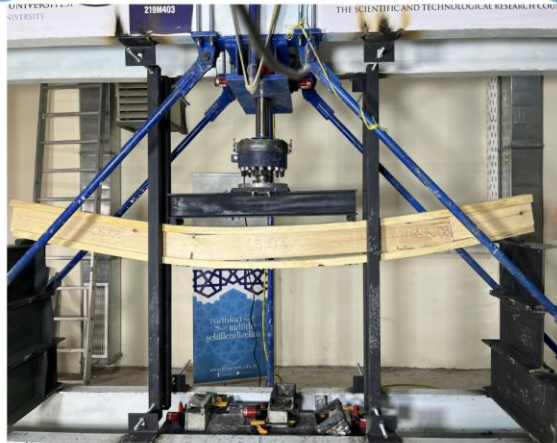
2



3

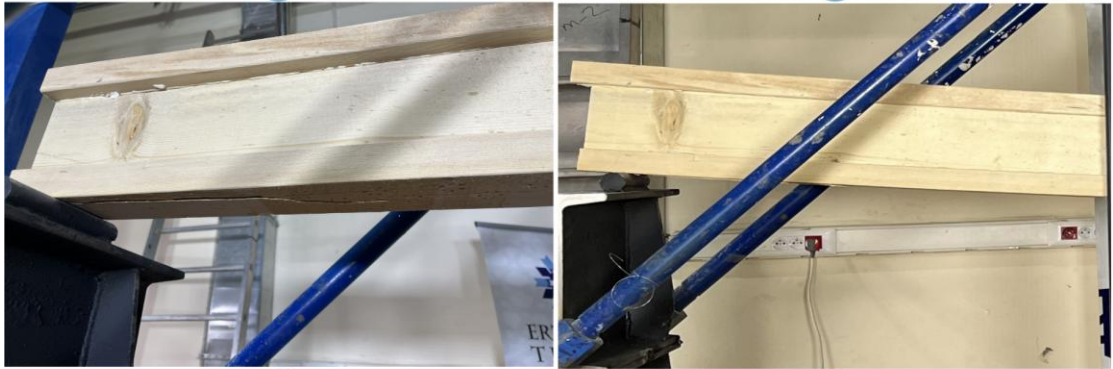
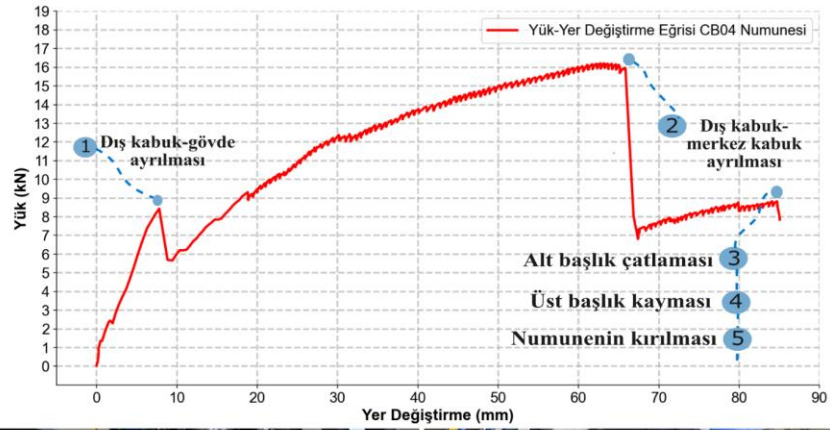


4

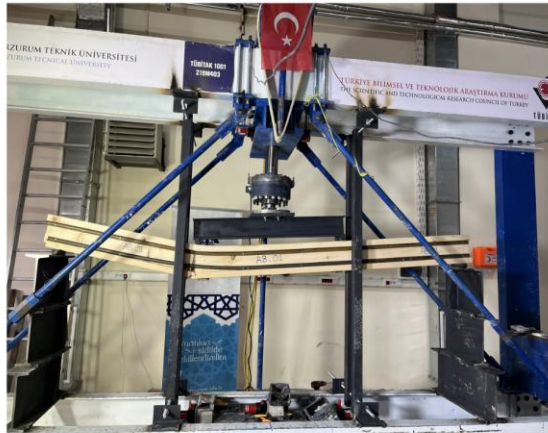
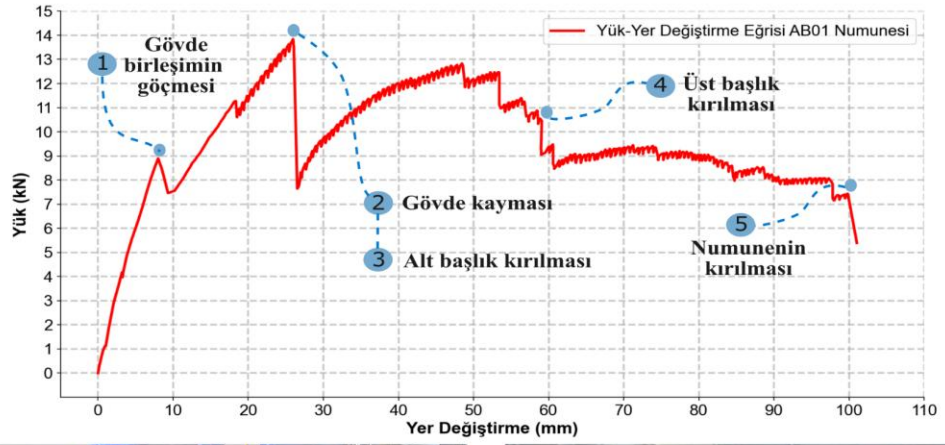


5

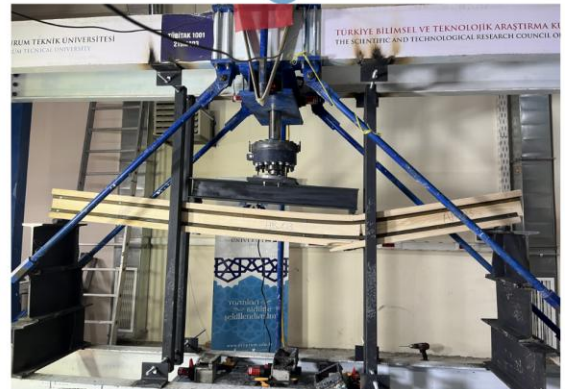
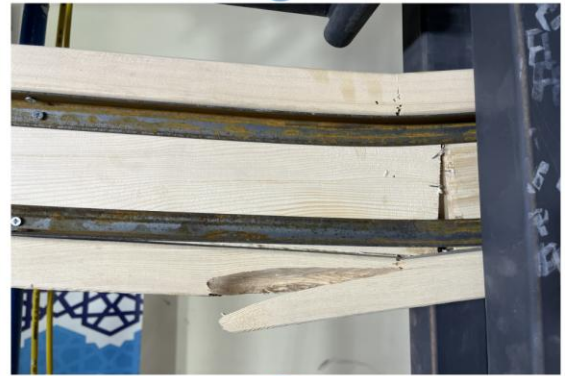
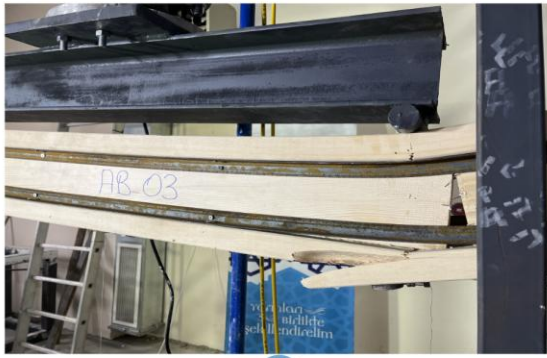
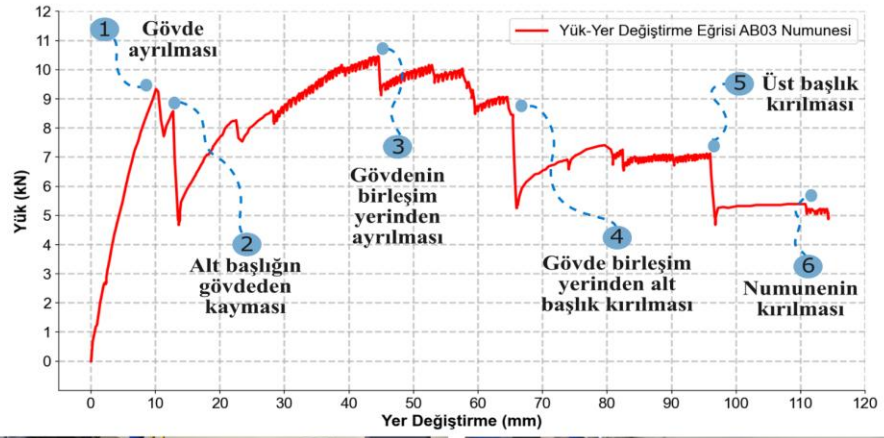
EK-1A. CB04 numunesi için yük-deplasman eğrisi ve hasar mekanizmaları



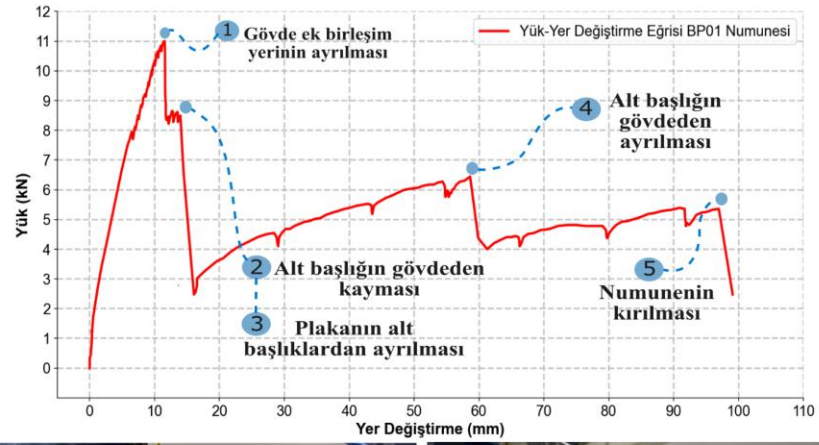
EK-1B. AB01 numunesi için yük-deplasman eğrisi ve hasar mekanizmaları



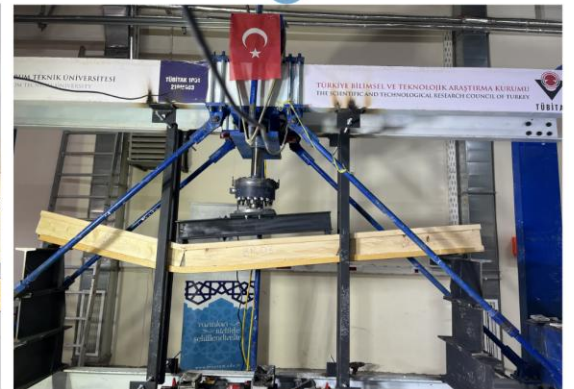
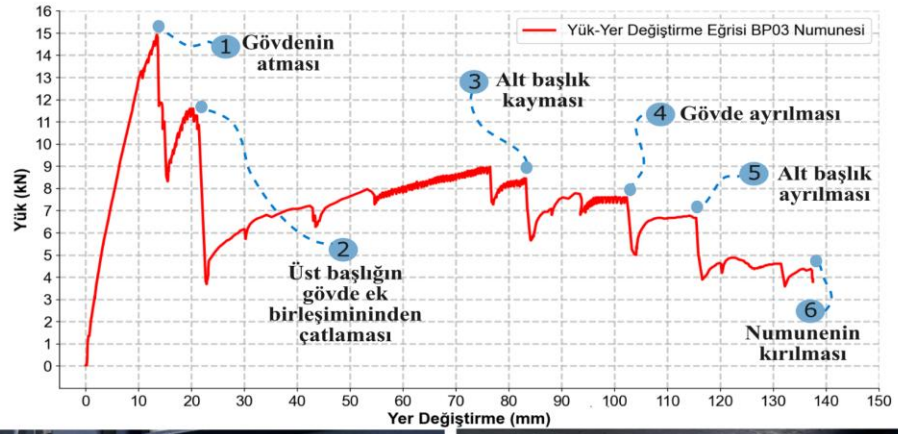
EK-1B. AB03 numunesi için yük-deplasman eğrisi ve hasar mekanizmaları



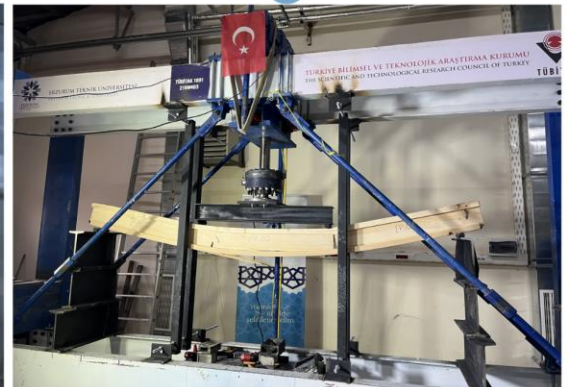
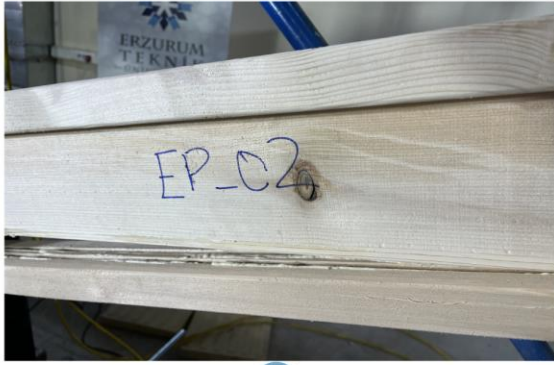
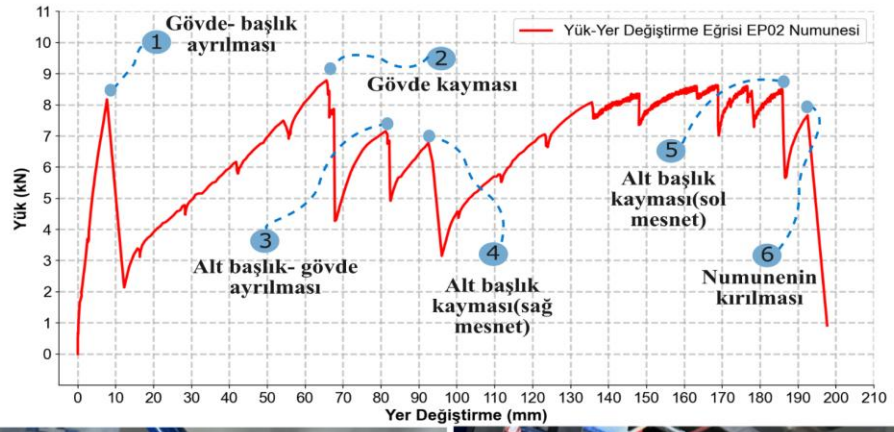
EK-1C. BP01 numunesi için yük-deplasman eğrisi ve hasar mekanizmaları



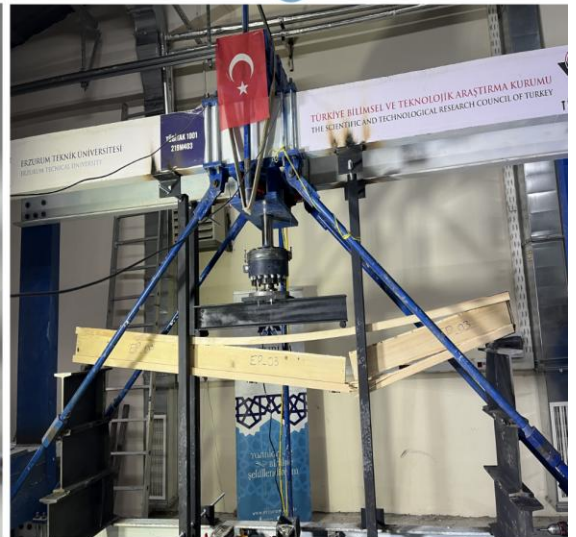
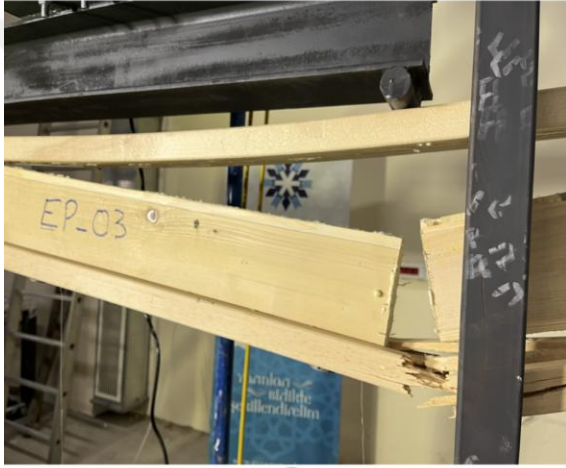
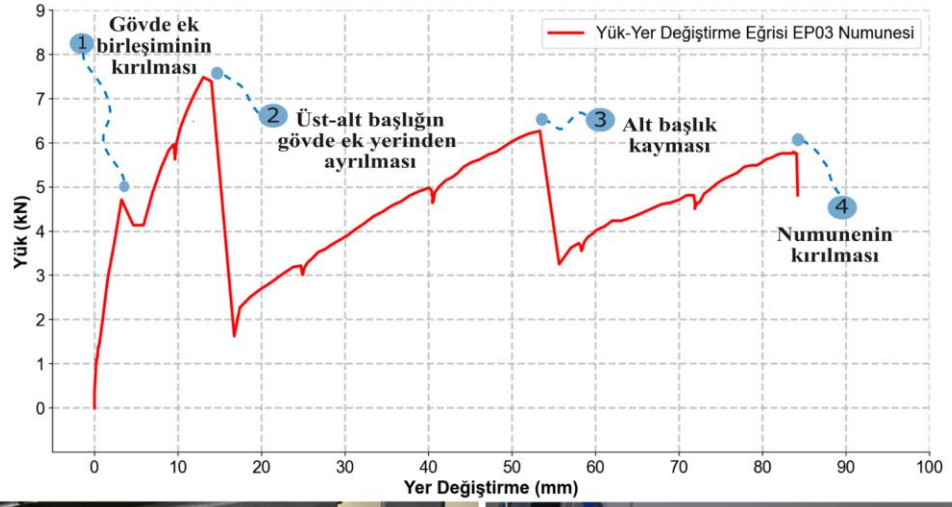
EK-1C. BP03 numunesi için yük-deplasman eğrisi ve hasar mekanizmaları



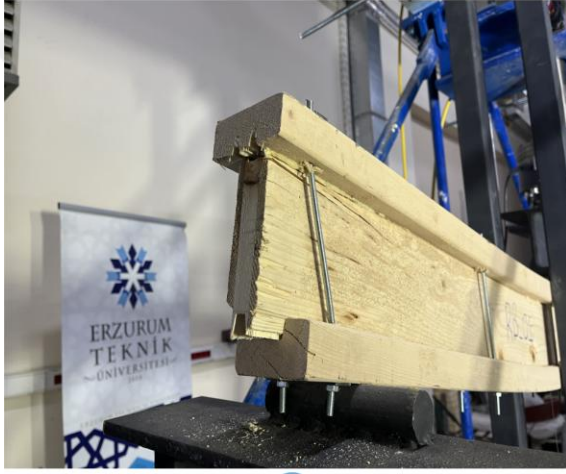
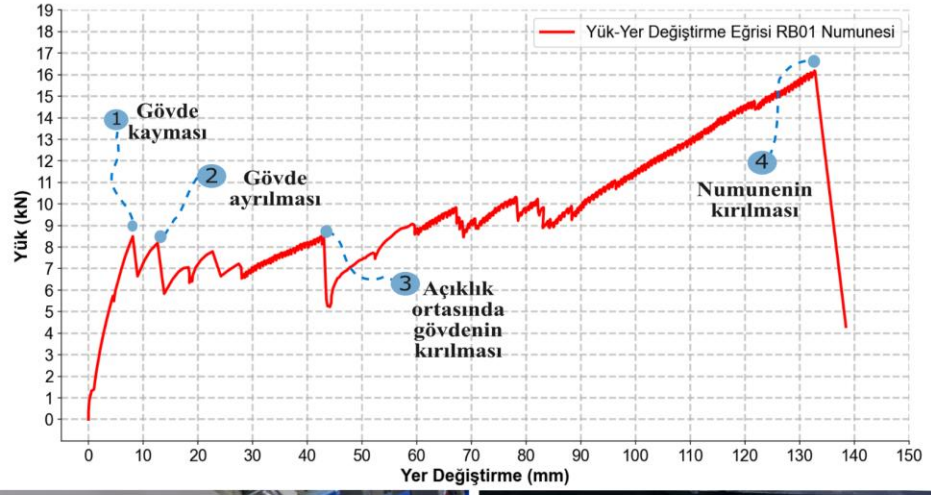
EK-1D. EP02 numunesi için yük-deplasman eğrisi ve hasar mekanizmaları



EK-1D. EP03 numunesi için yük-deplasman eğrisi ve hasar mekanizmaları



EK-1E. RB01 numunesi için yük-deplasman eğrisi ve hasar mekanizmaları



1



2

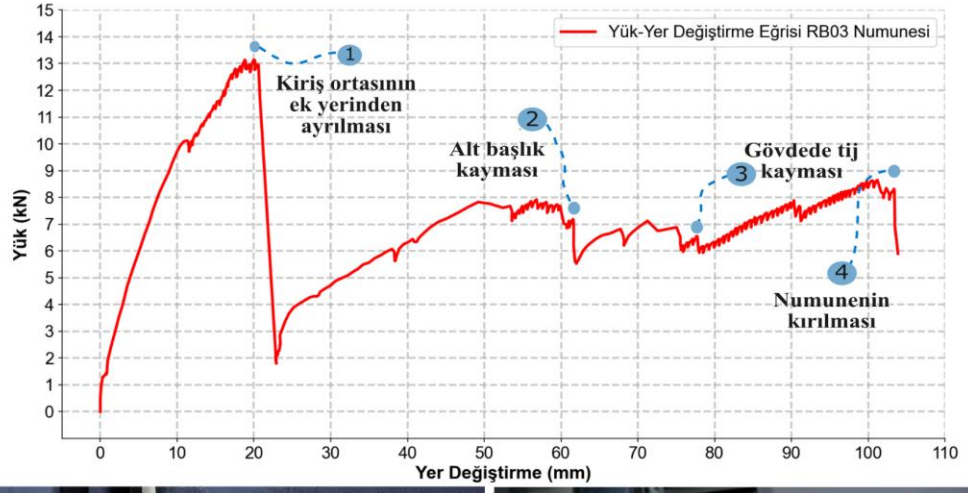


3



4

EK-1E. RB03 numunesi için yük-deplasman eğrisi ve hasar mekanizmaları



1



2

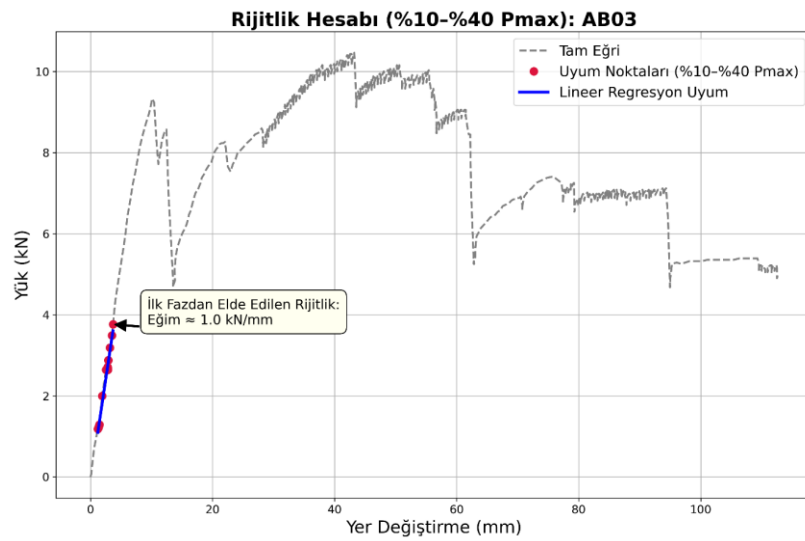
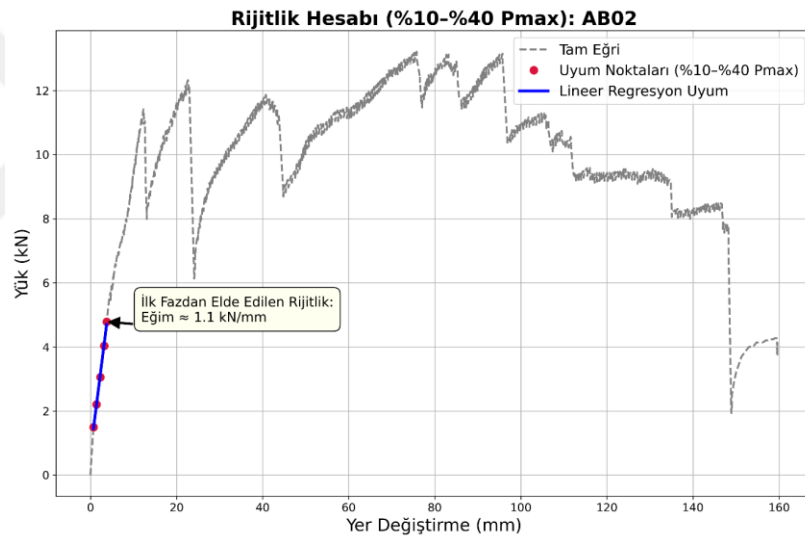
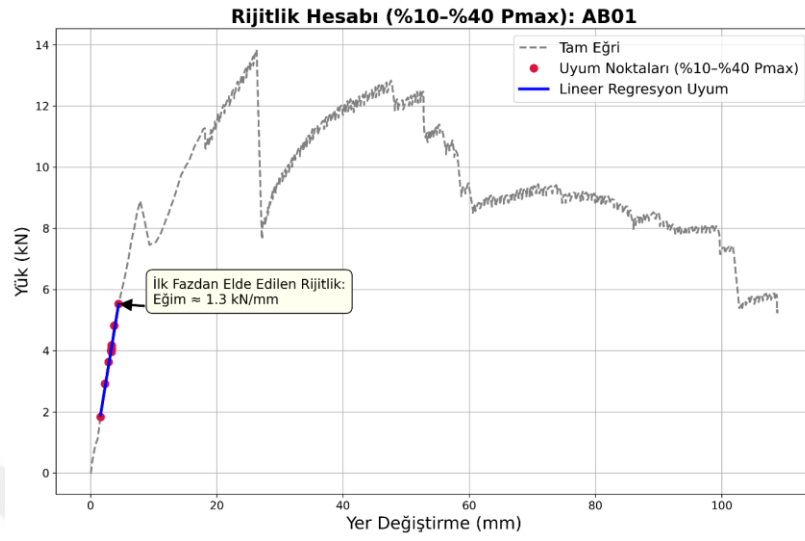


3

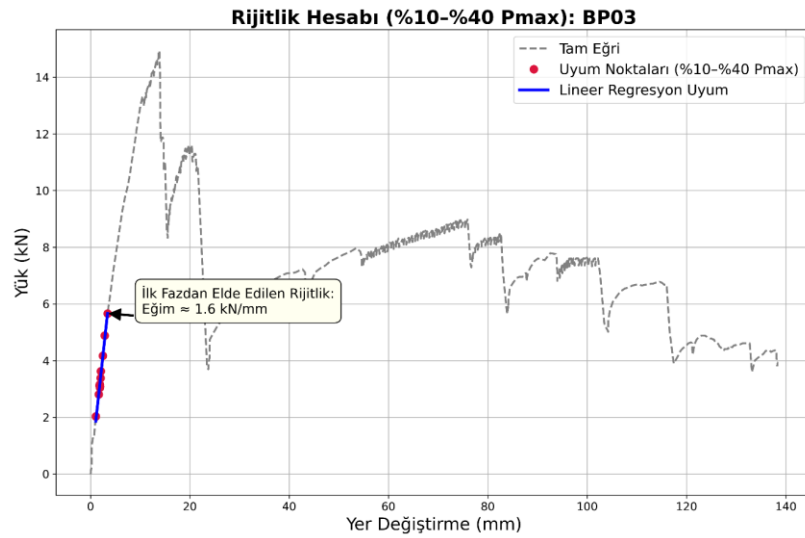
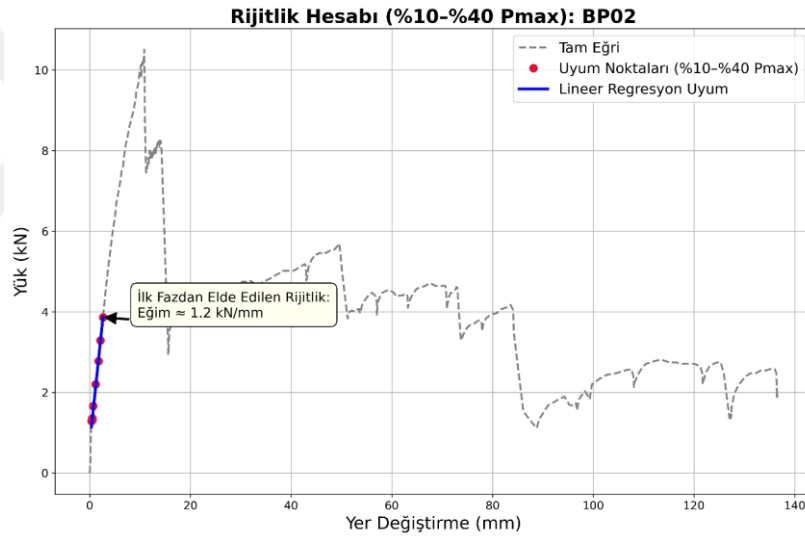
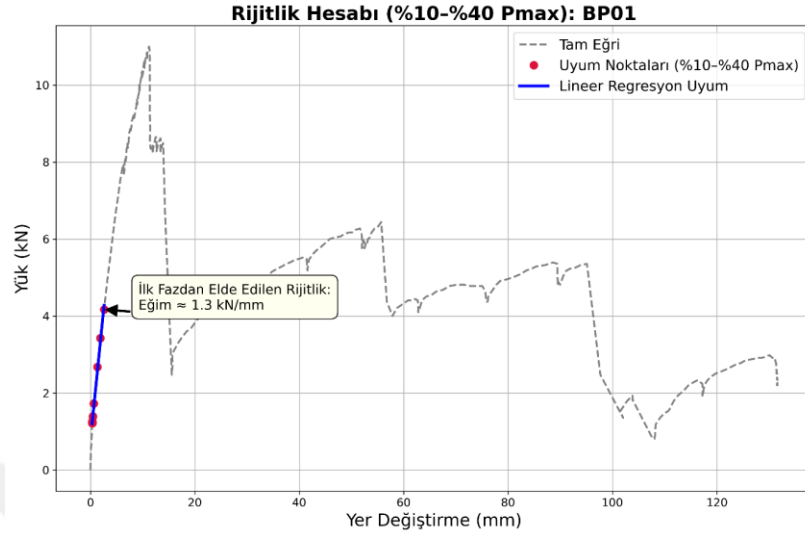


4

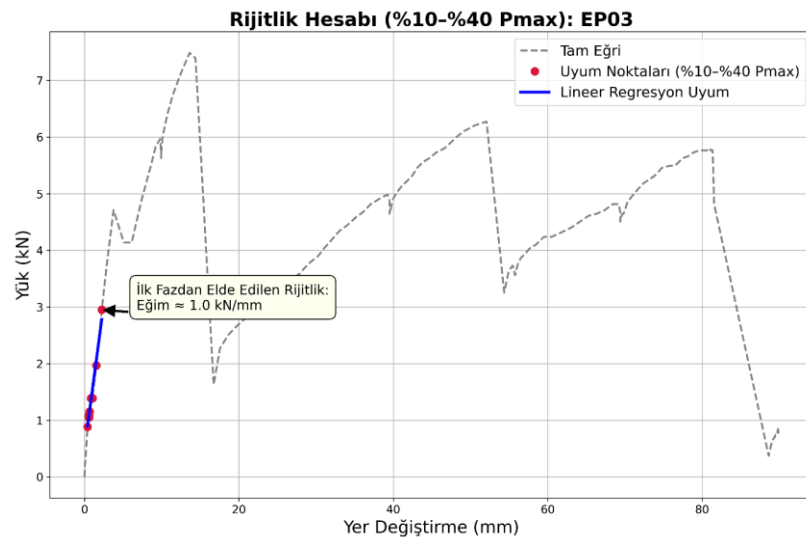
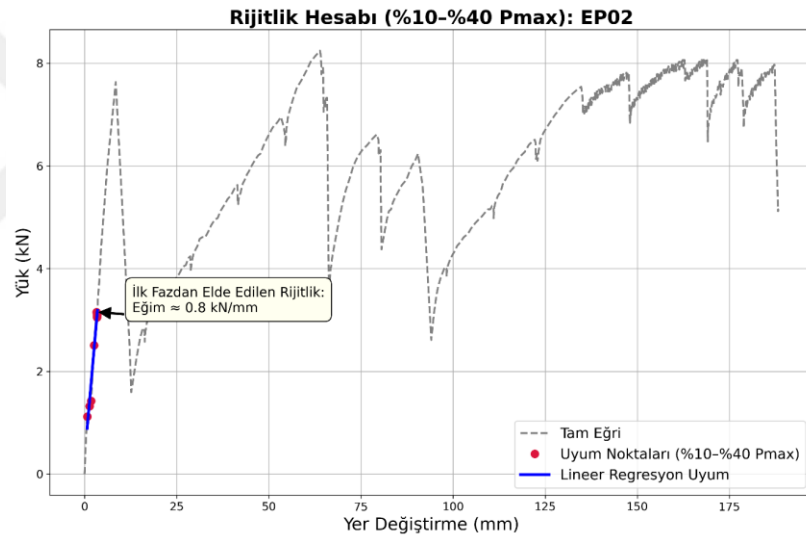
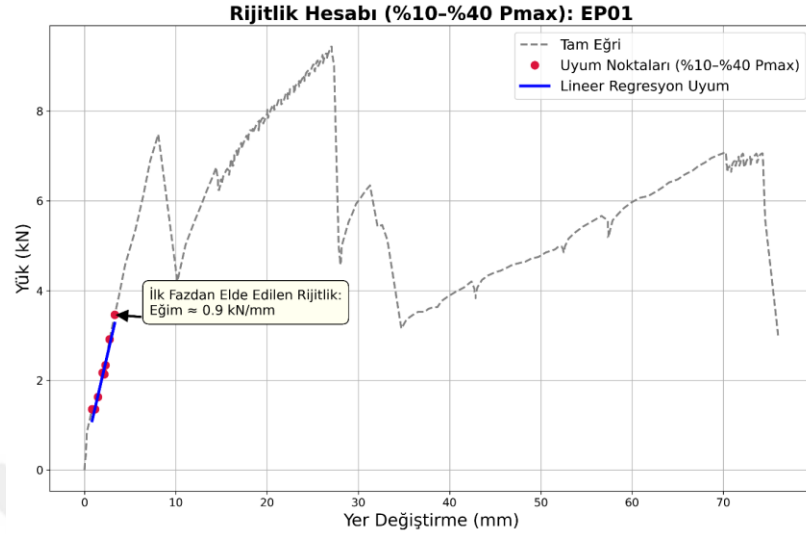
EK-2A. Başlangıç elastik bölge ve doğrusal uyumu gösteren AB grubu numunelerinin rijitlik grafiği



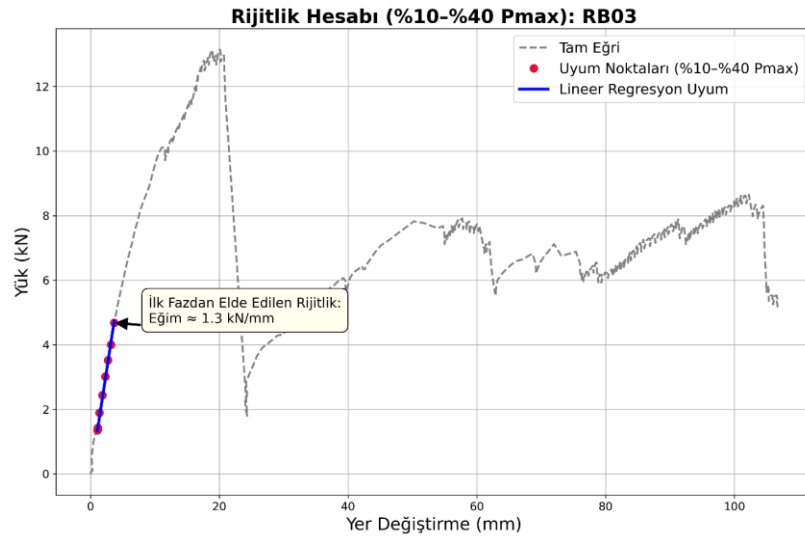
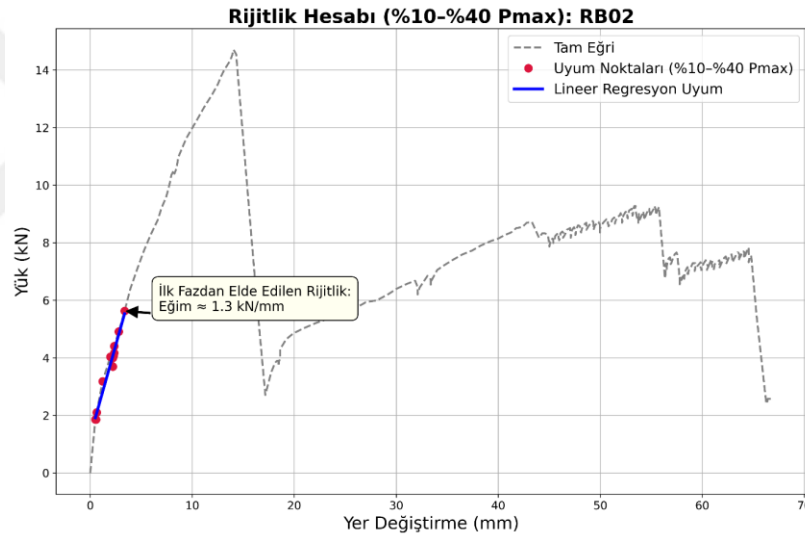
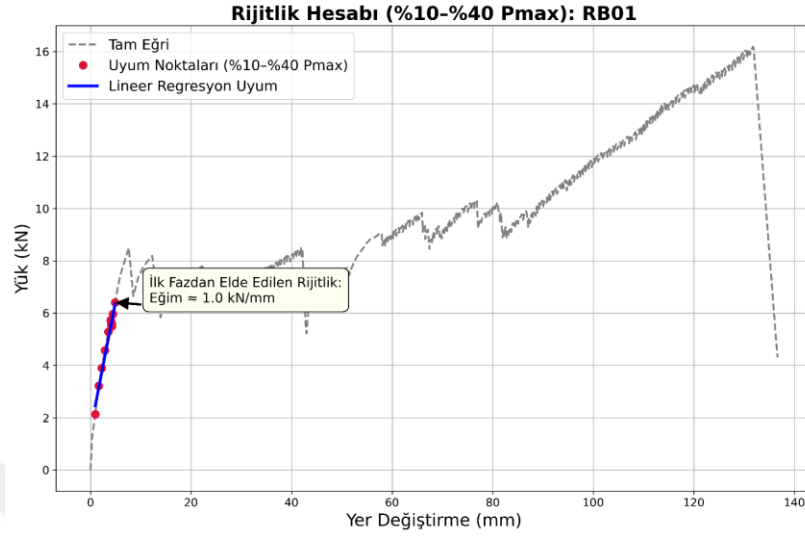
EK-2B. Başlangıç elastik bölge ve doğrusal uyumu gösteren BP grubu numunelerinin rijitlik grafiği



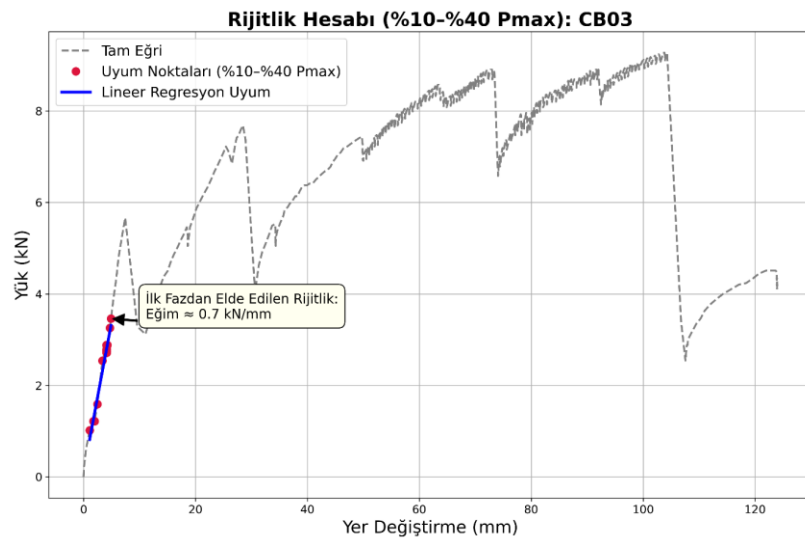
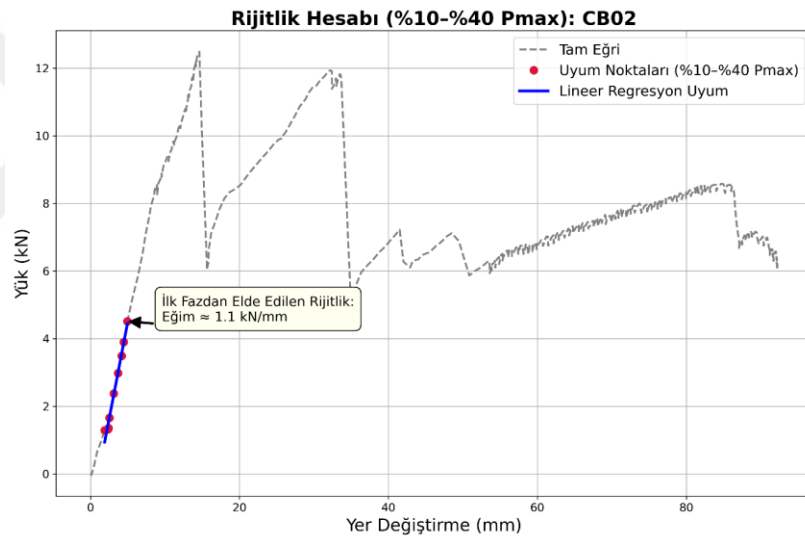
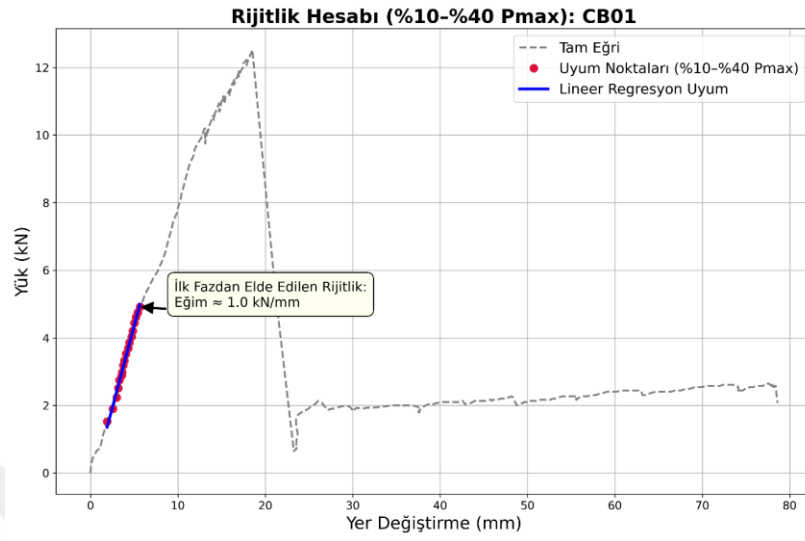
EK-2C. Başlangıç elastik bölge ve doğrusal uyumu gösteren EP grubu numunelerinin rijitlik grafiği



EK-2D. Başlangıç elastik bölge ve doğrusal uyumu gösteren RB grubu numunelerinin rijitlik grafiği

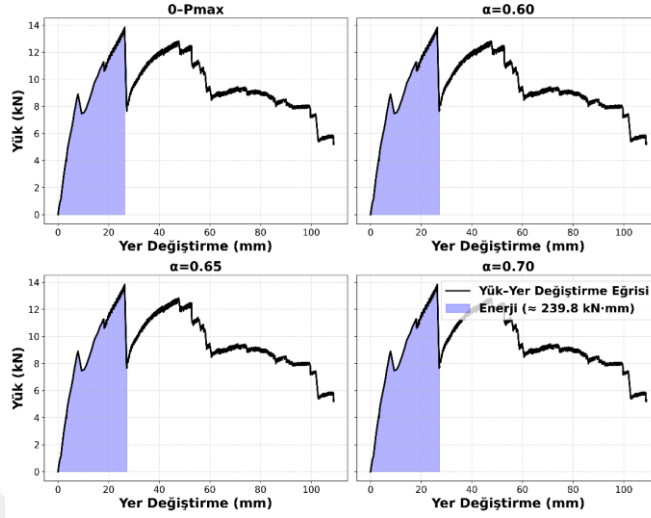


EK-2E. Başlangıç elastik bölge ve doğrusal uyumu gösteren CB grubu numunelerinin rijitlik grafiği

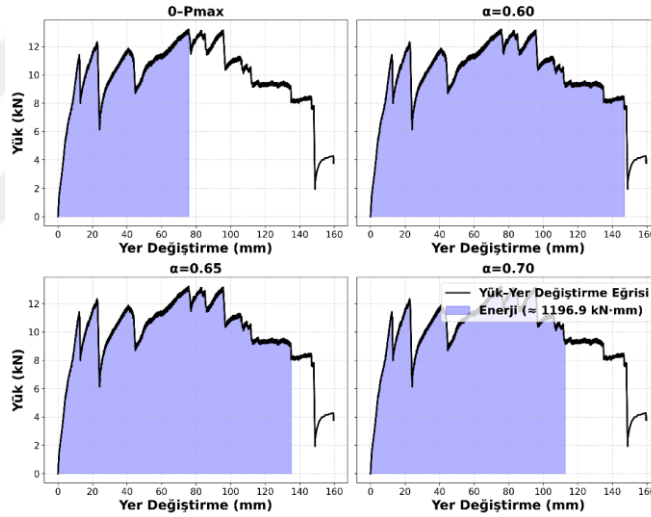


EK-3A. AB grubu numunelerinin %60, %65 ve %70 P_{max} tepe sonrası entegrasyon eşiği enerji soğurma grafikleri

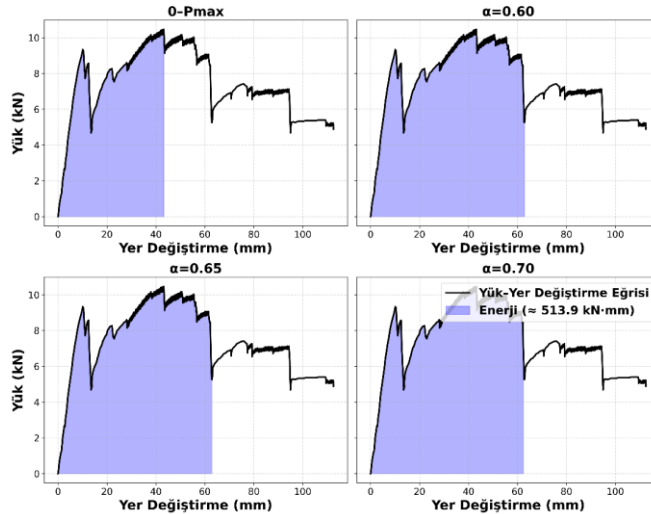
Enerji Yöntem Karşılaştırması: AB01



Enerji Yöntem Karşılaştırması: AB02

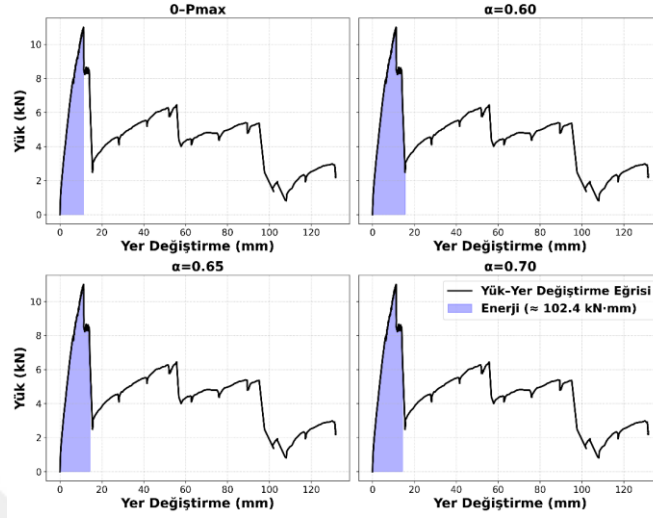


Enerji Yöntem Karşılaştırması: AB03

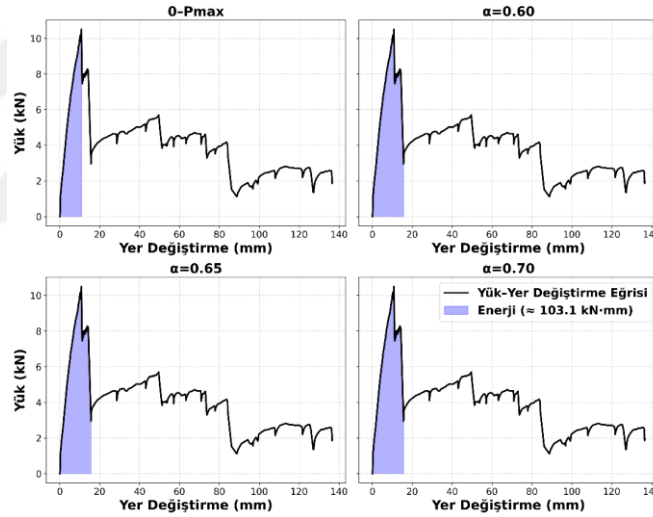


EK-3B. BP grubu numunelerinin %60, %65 ve %70 P_{max} tepe sonrası entegrasyon eşiği enerji soğurma grafikleri

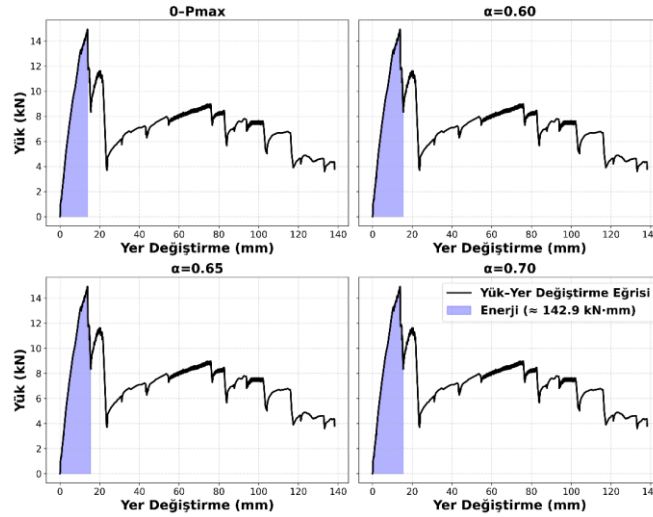
Enerji Yöntem Karşılaştırması: BP01



Enerji Yöntem Karşılaştırması: BP02

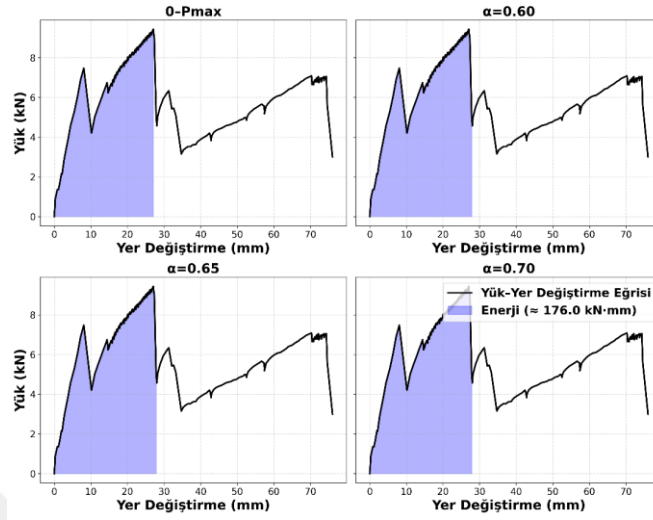


Enerji Yöntem Karşılaştırması: BP03

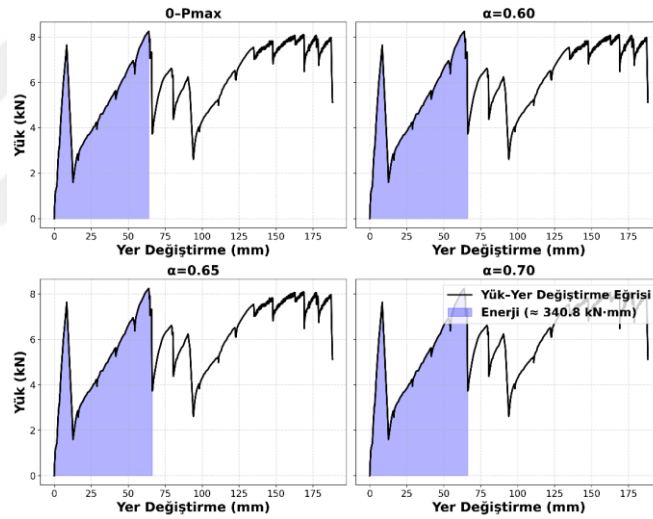


EK-3C. EP grubu numunelerinin %60, %65 ve %70 P_{max} tepe sonrası entegrasyon eşiği enerji soğurma grafikleri

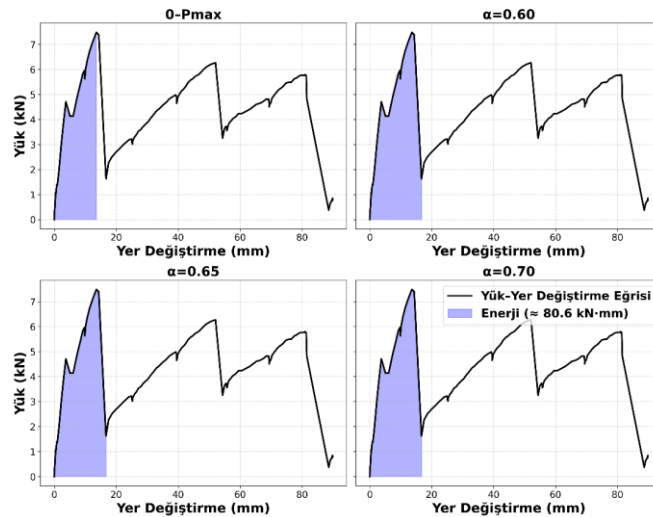
Enerji Yöntem Karşılaştırması: EP01



Enerji Yöntem Karşılaştırması: EP02

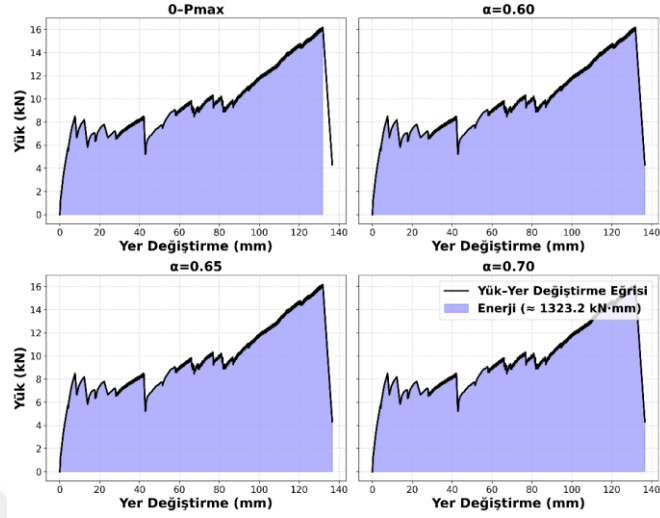


Enerji Yöntem Karşılaştırması: EP03

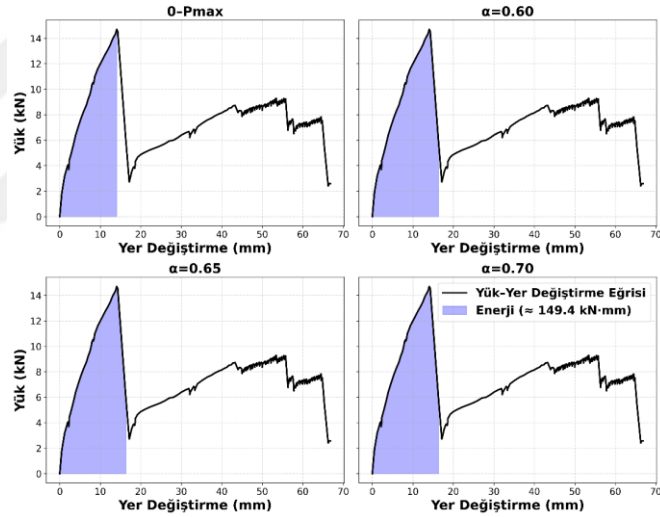


EK-3D. RB grubu numunelerinin %60, %65 ve %70 P_{max} tepe sonrası entegrasyon eşiği enerji soğurma grafikleri

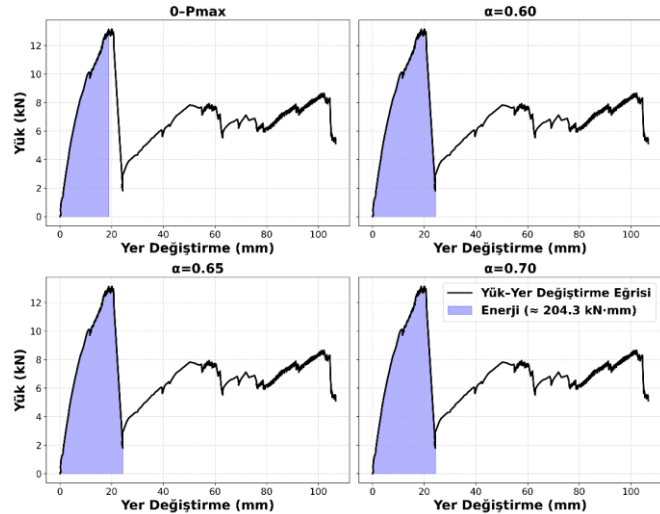
Enerji Yöntem Karşılaştırması: RB01



Enerji Yöntem Karşılaştırması: RB02

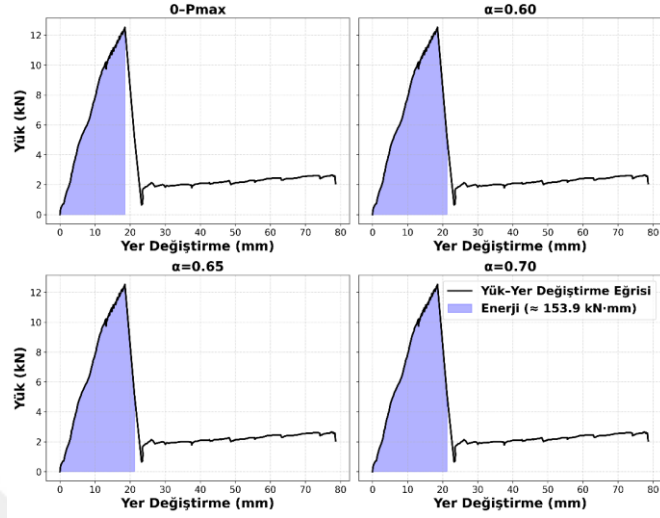


Enerji Yöntem Karşılaştırması: RB03

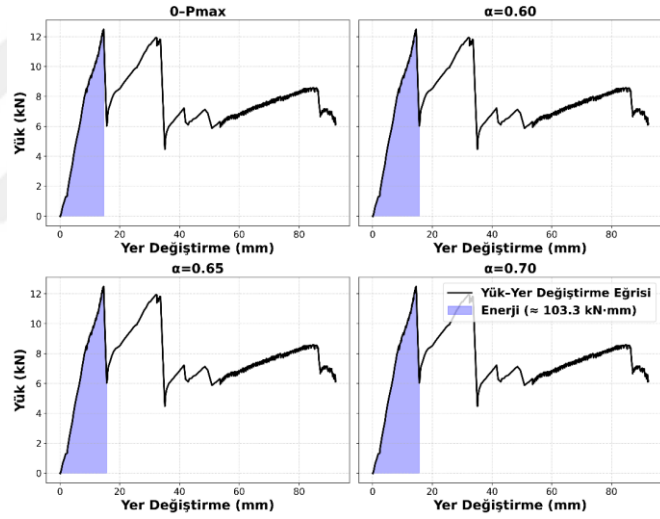


EK-3E. CB grubu numunelerinin %60, %65 ve %70 P_{max} tepe sonrası entegrasyon eşiği enerji soğurma grafikleri

Enerji Yöntem Karşılaştırması: CB01



Enerji Yöntem Karşılaştırması: CB02



Enerji Yöntem Karşılaştırması: CB03

