



**KREN RAYLARINI TAŞIYAN KİRİŞLERİN  
STATİK VE DİNAMİK YÜKLEME ETKİSİ  
ALTINDA YANAL STABİLİTE  
DAVRANIŞLARININ NÜMERİK VE ANALİTİK  
OLARAK İNCELENMESİ**

**2023  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**Beyazıd ERER**

**Tez Danışmanı  
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Fethi ERTENLİ**

**KREN RAYLARINI TAŞIYAN KİRİŞLERİN STATİK VE DİNAMİK  
YÜKLEME ETKİSİ ALTINDA YANAL STABİLİTE DAVRANIŞLARININ  
NÜMERİK VE ANALİTİK OLARAK İNCELENMESİ**

**Beyazıd ERER**

**Tez Danışmanı**

**Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Fethi ERTENLİ**

**T.C.**

**Karabük Üniversitesi**

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK**

**Temmuz 2023**

Beyazıd ERER tarafından hazırlanan “KREN RAYLARINI TAŞIYAN KİRİŞLERİN STATİK VE DİNAMİK YÜKLEME ETKİSİ ALTINDA YANAL STABİLİTE DAVRANIŞLARININ NÜMERİK VE ANALİTİK OLARAK İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Fethi ERTENLİ .....  
Tez Danışmanı, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 14/07/2023

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu) İmzası

Başkan : Prof. Dr. İlker KALKAN (KKÜ) (Online)

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Fethi ERTENLİ (KBÜ) .....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Haşim KISA (KBÜ) .....

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Müslüm KUZU .....  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü



*“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*

Beyazid ERER

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### KREN RAYLARINI TAŞIYAN KİRİŞLERİN STATİK VE DİNAMİK YÜKLEME ETKİSİ ALTINDA YANAL STABİLİTE DAVRANIŞLARININ NÜMERİK VE ANALİTİK OLARAK İNCELENMESİ

Beyazıd ERER

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Fethi ERTENLİ

Temmuz 2023, 112 sayfa

Ülke ekonomilerine önemli katkıları olan ağır sanayi hızlı bir şekilde büyümeye devam etmektedir. Büyüyen ve teknolojik olarak da gelişen endüstrilerde birçok alanda krenler yatay ve düşey taşımada sıklıkla tercih edilmektedir. Kullanılan birçok tip kren olmasına rağmen köprü tipi gezer krenlerin İnşaat Mühendisliği literatürü için yeri oldukça önemlidir. Bunun sebebi yapılara entegre olmaları ve işletme faaliyetleri sırasında hareket ettikleri rayların yapısal bir eleman olan kirişlerle taşınmasıdır. Krenlerin işletme faaliyetlerini yürüttükleri sanayi yapılarında, yürütülen endüstriyel faaliyetler sebebiyle istenilen açıklıklar çok fazla olmaktadır. Açıklıkların artması kren yürüme yolu kirişlerine olan tesiri arttırmakta ve bu sebeple yüksek kirişler teşkil edilmektedir. Bu durum, kren yürüme yollarının; yüksekliği fazla, kesit standartlarının dışında imal edilen kirişlerden teşkil edilmesine sebep olmaktadır. Bu durumdan yola çıkılarak gövde narinlikleri yüksek ve başlıkları kompakt (gövde kesitinde buruşma

oluşması muhtemel) enkesitlere sahip kirişler, kren yürüme yolu kirişi olarak modellenerek statik ve dinamik (kren işletme faaliyetleri esnasında ortaya çıkardığı frenaj vb.) etkiler altında analizler gerçekleştirilmiştir.

Ayrıca buruşma ihtimalinin düşük olduğu tıknaz bir kesite sahip kiriş üzerinde de benzer analizler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda kren yürüme yolu kirişlerinin yanal burulmalı/buruşmalı burkulma kapasiteleri karşılaştırılarak dinamik etkilerin kesit gövdesinin narinleşmesi ve flanşların kompaktlaşması doğrultusunda yanal burulmalı/buruşmalı burkulma kapasitesini ne oranda etkilediğinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

Sonlu elemanlar programı Abaqus CAE kullanılarak çelik Amerikan W profillerin yanal burulmalı burkulma davranışları tespit edilmiştir. Plastik analiz yapılan kirişler bir tarafı sabit bir tarafı eksenine paralel yönde harekete müsaade edecek şekilde basit mesnetli olarak teşkil edilmiştir. Yükleme, kirişlerin üst başlığından kiriş eksenine dik olacak şekilde sonlu eleman ağı üzerindeki düğüm noktalarına düşey ve üst başlık yan yüzeyinden kiriş düşey eksenine dik olarak etkilmiştir.

Yapılan çalışma neticesinde düzenli artış gösteren tekrarlı çevrimsel yüklemelerin ve kiriş zayıf eksenine dik etkiyen yatay yüklerin I kesitli çelik kirişlerde yanal burulmalı burkulma performansını düşürdüğü ve gövde kestinde buruşmalar oluşturduğu görülmüştür. Bunların yanı sıra ani olarak etkiyen yüklemelerde, statik ve/veya daha uzun süreli dinamik yüklemelere göre çok daha büyük dayanımların olduğu görülmüştür. Ayrıca Türkiye Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapımına Dair Esaslar yönetmeliğinin önerdiği denklemler kullanılarak yapılan analitik çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar sonlu elemanlar analizi sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Uygulanan her yükleme prosedürü için yönetmelik çözümlerinin aşırı emniyetli tarafta kaldığı görülmüştür.

**Anahtar Sözcükler :** Çelik kirişler, Kren yürüme yolu kirişleri, Kirişlerde burkulma davranışı, Yanal burulmalı burkulma, Yanal buruşmalı burkulma.

**Bilim Kodu :** 91103

## **ABSTRACT**

**M. Sc. Thesis**

### **NUMERICAL AND ANALYTICAL INVESTIGATION OF LATERAL STABILITY BEHAVIORS OF CRANE RUNWAY BEAMS UNDER THE EFFECT OF STATIC AND DYNAMIC LOADING**

**Beyazıt ERER**

**Karabük University  
Institute of Graduate Programs  
Department of Civil Engineering**

**Thesis Advisor:**

**Assist. Prof. Dr. Mehmet Fethi ERTENLİ**

**July 2023, 112 pages**

Heavy industry, which has important contributions to the country's economy, continues to grow rapidly. Cranes are frequently preferred for horizontal and vertical transportation in many areas in growing and technologically developing industries. Although there are many types of cranes used, bridge type overhead cranes have a very important place in the Civil Engineering literature. The reason for this is that they are integrated into the structures and the rails on which they move during operating activities are carried by beams, which are a structural element. In the industrial structures where the cranes carry out their operating activities, the desired openings are very high due to the industrial activities carried out. The increase in the openings increases the effect on the crane runway beams and therefore high beams are formed. This situation, the crane runways; It causes the beams to be formed from beams that are high in height and manufactured outside the section standards. Based on this

situation, beams with high body slenderness and compact heads (with possible wrinkling in the body section) cross-sections were modeled as crane runway beams, and analyzes were carried out under static and dynamic effects (braking caused by crane operation activities, etc.).

In addition, similar analyzes were performed on a chunky cross-section beam with a low probability of wrinkling. In line with the data obtained, it is aimed to determine how much the dynamic effects affect the lateral torsion/wrinkling buckling capacity of the lateral torsional/wrinkled buckling capacities of the crane runway beams in the direction of the slenderness of the section body and the compaction of the flanges.

Lateral torsional buckling behavior of steel American W profiles was determined using the finite element program Abaqus CAE. The beams for which plastic analysis was performed were formed as simply supported, with one fixed side and one side allowing movement in the direction parallel to its axis. The loading was applied vertically to the nodal points on the finite element mesh from the top head of the beams perpendicular to the beam axis, and perpendicular to the beam vertical axis from the top header side surface.

As a result of the study, it has been observed that regular increasing cyclic loading and horizontal loads acting perpendicular to the weak axis of the beam reduce the lateral torsional buckling performance of I-section steel beams and create creases in the body cut. In addition, it has been observed that much greater strengths are formed in suddenly acting loads than in static and/or longer-term dynamic loads. In addition, the results obtained within the scope of the analytical study using the equations proposed by the Turkish Steel Structures Design, Calculation and Construction Regulations were compared with the results of the finite element analysis. It has been observed that the regulation solutions for each applied loading procedure remain on the extremely safe side.

**Keywords** : Steel beam, Crane runway girders, Buckling behaviour of steel beams, Lateral torsional buckling, Lateral distortional buckling.

**Science Code** : 91103

## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araőtırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıőmamı bilimsel temeller ışığında őekillendiren sayın hocam Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Fethi ERTENLİ'ye teşekkürlerimi sunarım.

Tez alıőması boyunca hangi konuda olursa olsun hiçbir şekilde yardımlarını esirgemeyen, Karabük Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Dr. Öğr. Üyesi Cihan MIZRAK ve Karabük Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Haőım KISA'ya teşekkür ederim. Ayrıca yüksek lisans tez sınavı jürisine katılarak beni onurlandıran Sayın Prof. Dr. İlker KALKAN hocama teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitim sürecinde desteklerini esirgemeyen Sayın Mehmet Gökhan KARABACAK'a ve KARDEMİR A.Ő. ailesine teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans öğrenimimin başlangıcında danışmanlığımı üstlenip bana desteklerini esirgemeyen merhum hocam Prof. Dr. Ahmet Necati YELGİN'i de rahmetle anıyorum.

Yüksek lisans hayatım boyunca yanımda olan başta; babam Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Mustafa ERER, sevgili annem Aslı ERER ve sevgili eşim Hasibe ERER olmak üzere bütün aileme hiçbir yardımcı esirgemedен yanımda oldukları için tüm kalbimle sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xviii
BÖLÜM 1 .....	1
GİRİŞ .....	1
1.1. ÇALIŞMA KONUSU İLE İLGİLİ LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	3
1.2. TRANSPORT VE TAŞIMA TEKNİĞİ.....	15
1.2.1. Krenler.....	17
1.2.1.1. Portal Krenler.....	17
1.2.1.2. Köprülü Krenler.....	18
1.3. ÇALIŞMANIN AMACI VE YÖNTEMİ.....	21
BÖLÜM 2 .....	22
KİRİŞLERDE BURKULMA DAVRANIŞLARI .....	22
2.1. YANAL BURULMALI BURKULMA .....	22
2.1.1. Elastik Yanal Burulmalı Burkulma .....	26
2.1.2. Elastik Olmayan Yanal Burulmalı Burkulma.....	33
2.2. YANAL BURUŞMALI BURKULMA (YBŞB) .....	35
2.2.1. Elastik Yanal Buruşmalı Burkulma.....	35
2.2.2. Elastik Olmayan Yanal Buruşmalı Burkulma .....	39
2.3. YÖNETMELİKLER BAZINDA BURKULMA DAVRANIŞI .....	42
BÖLÜM 3 .....	47

	<b><u>Sayfa</u></b>
NÜMERİK ÇALIŞMA .....	47
3.1. SONLU ELEMENLAR METODU .....	47
3.2. SONLU ELEMEN MODELİNİN DOĞRULANMASI.....	48
3.3. ÇALIŞMA KAPSAMINDA ELE ALINAN KESİTLER.....	51
3.4. SONLU ELEMEN MODELİNİN OLUŞTURULMASI.....	53
3.4.1. Sonlu Eleman Boyutunun Belirlenmesi .....	54
3.4.2. Malzeme Modelinin Oluşturulması .....	55
3.4.3. Analiz Adımının Tanımlanması .....	56
3.4.3.1. Mesnet Koşullarının Tanımlanması .....	57
3.4.3.2. Yükleme Koşullarının Tanımlanması .....	59
3.5. SONLU ELEMENLAR ANALİZİ SONUÇLARININ ELDE EDİLMESİ ..	64
3.5.1. Kirişlerin Yük/Deplasman Grafikleri .....	66
BÖLÜM 4 .....	76
ANALİTİK ÇALIŞMA.....	76
BÖLÜM 5 .....	79
SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	79
KAYNAKLAR .....	82
EK AÇIKLAMALAR A. NÜMERİK ÇALIŞMA SONUÇ GRAFİKLERİ .....	87
ÖZGEÇMİŞ .....	112

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 1.1. Çift simetri eksenli çelik I kesitli kirişin burkulma davranışları; (a) Yanal Burulmalı Burkulma (b) Yanal Buruşmalı Burkulma (c) Lokal Burkulma.....	4
Şekil 1.2. Çalışma kapsamında kullanılan kiriş kesitleri; (a) Çift simetri eksenli kesit (b) Tek simetri eksenli kesit (c) Çift simetri eksenli kesit ve flanş uçlarına dikme eklenerek oluşturulan tek simetri eksenli kesit .....	4
Şekil 1.3. Çalışmada kullanılan negatif moment diyagramları; (a) Yükleme 1 (b) Yükleme 2 (c) Yükleme 3.....	5
Şekil 1.4. Çelik-beton kompozit kirişlerde negatif moment altında stabilite modları; (a) Sınırlandırılmış YBB davranışı (b) Flanş lokal burkulma (FLB) davranışı (C) YBB ve FLB bileşik davranışı.....	6
Şekil 1.5. Beton döşeme ile elastik olarak sınırlandırılan kirişin burkulma modları; (a) Çelik-beton kompozit kiriş, (b) döşeme tarafından sağlanan dönme kısıtlamasını modelleyen sürekli yaylar, (c) gövde yerel burkulması (d) tek eğrili yanal buruşmalı burkulma (e) çift eğrili yanal buruşmalı burkulma .....	7
Şekil 1.6. Monoray vinç kirişi.....	8
Şekil 1.7. Kiriş burkulma modları; (a) Lokal burkulma (b) Elastik burulmalı burkulma (c) Yanal buruşmalı burkulma.....	9
Şekil 1.8. Çelik kiriş kesitleri; (a) Boşluklu başlığa sahip kiriş kesiti (b) LiteSteel kirişi .....	10
Şekil 1.9. Basit mesnetli, doğrusal halatlar ile öngerme uygulanan çelik I kiriş .....	11
Şekil 1.10. Alveol kiriş üretim süreci; (a) I kesitli profil (b) Sinüsoidal gövde kesimi (c) Kesim sonrası iki parçanın kaynaklanacak şekilde üst üste getirilmesi (d) Alveol kesitli kiriş. ....	12
Şekil 1.11. Sinüzoidal web açıklığı ile I-kirişte yanal burulmalı burkulma davranışı.....	13
Şekil 1.12. Güçlendirilmiş ISBM 500 kirişi tipik kesiti. ....	14
Şekil 1.13. Antik Yunan medeniyetinde icat edilen ilk vinçlerden bir tanesi.....	16
Şekil 1.14. Portal kren.....	17
Şekil 1.15. Portal kren şeması.....	18
Şekil 1.16. Köprülü kren .....	19
Şekil 1.17. Köprülü kren türleri .....	20
Şekil 1.18. Köprülü kren şeması .....	20

Şekil 2.1. Eğilme durumu; (a) Eğilme kuvveti (b) Eğilme momenti (c) Eğilme momentinin kesit üzerinde gösterimi.....	22
Şekil 2.2. I Kesitli bir kirişin YBB davranışının kesit görünüşü ile deforme olmuş hali.....	23
Şekil 2.3. Kiriş davranışının kirişin yanal yönde desteklenmemiş açıklığına göre değişimi.....	24
Şekil 2.4. I kesitli bir kirişin sabit moment altındaki davranışı; (a) Yükleme öncesi en ve boy kesit (b) Yükleme sonrası en kesit; (c) boy kesit görünüşü ....	26
Şekil 2.5. $\theta$ açısı kadar dönen asal eksenler üzerindeki moment bileşenleri. ....	27
Şekil 2.6. Burkulma davranışı öncesi ve sonrası akma durumu. ....	34
Şekil 2.7. Yükleme ve yüklemenin kaldırılması durumunda oluşan gerilme-birim şekil değiştirme grafiği. ....	35
Şekil 2.8. Yanal buruşmalı burkulma.....	41
Şekil 2.9. Basınç başlığının yanal olarak serbest uzunluğuna göre karakteristik eğilme momentinin değişimi.....	44
Şekil 3.1. Deney düzeneği.....	49
Şekil 3.2. Doğrulama çalışması sonlu eleman modeli. ....	50
Şekil 3.3. Doğrulama çalışması sonlu eleman analizi sonucunda ortaya çıkan davranış. ....	50
Şekil 3.4. Deneysel çalışma (a) ve sonlu eleman analiz sonucunda (b) oluşan davranış görsellerinin karşılaştırılması. ....	50
Şekil 3.5. Kiriş kesit ölçülerini gösteren şematik çizim.....	51
Şekil 3.6. C3D8R sonlu elemanı teorik şekli .....	54
Şekil 3.7. Sonlu eleman boyutuna bağlı olarak gerilme değişimi.....	55
Şekil 3.8. W44x262 Kirişinin sonlu eleman ağına bölünmüş hali.....	55
Şekil 3.9. Elastik-Tam Plastik malzeme grafiği.....	56
Şekil 3.10. W44x262 kesitli kiriş uçlarında mesnetlenen bölgeler; (a) Hareketli mesnet, (b) Sabit mesnet.....	57
Şekil 3.11. W44x262 kesitli kiriş hareketli mesnet koşulları.....	58
Şekil 3.12. W44x262 kesitli kiriş sabit mesnet koşulları. ....	59
Şekil 3.13. W44x262 kesitli kiriş için mesnetlerde “Coupling Constraint” ataması. ....	59
Şekil 3.14. SAC yükleme protokolü dönüş açısı-çevrim sayısı grafiği [55].....	62
Şekil 3.15. Düşey yükleme durumu; (a) Yükün etkitildiği nokta (b) Yükün nokta ile bağlandığı yüzey. ....	63
Şekil 3.16. Yatay yüklemenin uygulandığı nokta. ....	64
Şekil 3.17. W40x183 kesitli kirişin standart düşey yükleme altındaki davranışı. ....	64

Şekil 3.18. W40x183 kesitli kirişin standart düşey ve yatay yükleme altındaki davranışı.....	65
Şekil 3.19. W40x183 kesitli kirişin SAC yükleme protokolü altındaki davranışı. ....	65
Şekil 3.20. W40x183 kesitli kirişin SAC yükleme protokolü ve yatay yük altındaki davranışı.....	65
Şekil 3.21. I. Yükleme prosedürü altında W44x262 enkesitli kirişin, “ <i>Dynamic Explicit</i> ” ve “ <i>Static General</i> ” analizlerinin Düşey Yük/ Düşey Deplasman grafiği.....	66
Şekil 3.22. I. Yükleme prosedürü altında W44x262 enkesitli kirişin, “ <i>Dynamic Explicit</i> ” ve “ <i>Static General</i> ” analizlerinin Düşey Yük/ Yatay Deplasman grafiği.....	67
Şekil 3.23. I ve III yükleme prosedürleri altında W44x262 kesitli kirişin Düşey Yük/Yatay Deplasman eğrileri. ....	68
Şekil 3.24. I ve III yükleme prosedürleri altında W44x262 kesitli kirişin Düşey Yük/Düşey Deplasman eğrileri.....	69
Şekil 3.25. II ve IV yükleme prosedürleri altında W44x262 kesitli kirişin Düşey Yük/Düşey Deplasman eğrileri.....	70
Şekil 3.26. II ve IV yükleme prosedürleri altında W44x262 kesitli kirişin Düşey Yük/Yatay Deplasman eğrileri. ....	70
Şekil 3.27. I ve II yükleme prosedürleri altında W44x262 kesitli kirişin Düşey Yük/Düşey Deplasman eğrileri.....	71
Şekil 3.28. I ve II yükleme prosedürleri altında W44x262 kesitli kirişin Düşey Yük/Yatay Deplasman eğrileri. ....	71
Şekil 3.29. III ve IV yükleme prosedürleri altında W44x262 kesitli kirişin Düşey Yük/Düşey Deplasman eğrileri.....	72
Şekil 3.30. III ve IV yükleme prosedürleri altında W44x262 kesitli kirişin Düşey Yük/Yatay Deplasman eğrileri. ....	72
Şekil Ek A.1. I ve III yükleme prosedürleri altında W33x130 kesitli kirişin Düşey Yük/Düşey Deplasman eğrileri.....	88
Şekil Ek A.2. I ve III yükleme prosedürleri altında W33x130 kesitli kirişin Düşey Yük/Yatay Deplasman eğrileri .....	88
Şekil Ek A.3. II ve IV yükleme prosedürleri altında W33x130 kesitli kirişin Düşey Yük/Düşey Deplasman eğrileri.....	89
Şekil Ek A.4. II ve IV yükleme prosedürleri altında W33x130 kesitli kirişin Düşey Yük/Yatay Deplasman eğrileri. ....	89
Şekil Ek A.5. I ve II yükleme prosedürleri altında W33x130 kesitli kirişin Düşey Yük/Düşey Deplasman eğrileri.....	90
Şekil Ek A.6. I ve II yükleme prosedürleri altında W33x130 kesitli kirişin Düşey Yük/Yatay Deplasman eğrileri. ....	90

Şekil Ek A.7.	III ve IV yükleme prosedürleri altında W33x130 kesitli kirişin Düşey Yük/Düşey Deplasman eğrileri. ....	91
Şekil Ek A.8.	III ve IV yükleme prosedürleri altında W33x130 kesitli kirişin Düşey Yük/Yatay Deplasman eğrileri. ....	91
Şekil Ek A.9.	I ve III yükleme prosedürleri altında W36x135 kesitli kirişin Düşey Yük/Düşey Deplasman eğrileri. ....	92
Şekil Ek A.10.	I ve III yükleme prosedürleri altında W36x135 kesitli kirişin Düşey Yük/Yatay Deplasman eğrileri ....	92
Şekil Ek A.11.	II ve IV yükleme prosedürleri altında W36x135 kesitli kirişin Düşey Yük/Düşey Deplasman eğrileri. ....	93
Şekil Ek A.12.	II ve IV yükleme prosedürleri altında W36x135 kesitli kirişin Düşey Yük/Yatay Deplasman eğrileri. ....	93
Şekil Ek A.13.	I ve II yükleme prosedürleri altında W36x135 kesitli kirişin Düşey Yük/Düşey Deplasman eğrileri. ....	94
Şekil Ek A.14.	I ve II yükleme prosedürleri altında W36x135 kesitli kirişin Düşey Yük/Yatay Deplasman eğrileri. ....	94
Şekil Ek A.15.	III ve IV yükleme prosedürleri altında W36x135 kesitli kirişin Düşey Yük/Düşey Deplasman eğrileri. ....	95
Şekil Ek A.16.	III ve IV yükleme prosedürleri altında W36x135 kesitli kirişin Düşey Yük/Yatay Deplasman eğrileri. ....	95
Şekil Ek A.17.	I ve III yükleme prosedürleri altında W36x150 kesitli kirişin Düşey Yük/Düşey Deplasman eğrileri. ....	96
Şekil Ek A.18.	I ve III yükleme prosedürleri altında W36x150 kesitli kirişin Düşey Yük/Yatay Deplasman eğrileri ....	96
Şekil Ek A.19.	II ve IV yükleme prosedürleri altında W36x150 kesitli kirişin Düşey Yük/Düşey Deplasman eğrileri. ....	97
Şekil Ek A.20.	II ve IV yükleme prosedürleri altında W36x150 kesitli kirişin Düşey Yük/Yatay Deplasman eğrileri. ....	97
Şekil Ek A.21.	I ve II yükleme prosedürleri altında W36x150 kesitli kirişin Düşey Yük/Düşey Deplasman eğrileri. ....	98
Şekil Ek A.22.	I ve II yükleme prosedürleri altında W36x150 kesitli kirişin Düşey Yük/Yatay Deplasman eğrileri. ....	98
Şekil Ek A.23.	III ve IV yükleme prosedürleri altında W36x150 kesitli kirişin Düşey Yük/Düşey Deplasman eğrileri. ....	99
Şekil Ek A.24.	III ve IV yükleme prosedürleri altında W36x150 kesitli kirişin Düşey Yük/Yatay Deplasman eğrileri. ....	99
Şekil Ek A.25.	I ve III yükleme prosedürleri altında W40x167 kesitli kirişin Düşey Yük/Düşey Deplasman eğrileri. ....	100

Şekil Ek A.26. I ve III yükleme prosedürleri altında W40x167 kesitli kirişin Düşey Yük/Yatay Deplasman eğrileri .....	100
Şekil Ek A.27. II ve IV yükleme prosedürleri altında W40x167 kesitli kirişin Düşey Yük/Düşey Deplasman eğrileri. ....	101
Şekil Ek A.28. II ve IV yükleme prosedürleri altında W40x167 kesitli kirişin Düşey Yük/Yatay Deplasman eğrileri. ....	101
Şekil Ek A.29. I ve II yükleme prosedürleri altında W40x167 kesitli kirişin Düşey Yük/Düşey Deplasman eğrileri. ....	102
Şekil Ek A.30. I ve II yükleme prosedürleri altında W40x167 kesitli kirişin Düşey Yük/Yatay Deplasman eğrileri. ....	102
Şekil Ek A.31. III ve IV yükleme prosedürleri altında W40x167 kesitli kirişin Düşey Yük/Düşey Deplasman eğrileri. ....	103
Şekil Ek A.32. III ve IV yükleme prosedürleri altında W40x167 kesitli kirişin Düşey Yük/Yatay Deplasman eğrileri. ....	103
Şekil Ek A.33. I ve III yükleme prosedürleri altında W40x183 kesitli kirişin Düşey Yük/Düşey Deplasman eğrileri. ....	104
Şekil Ek A.34. I ve III yükleme prosedürleri altında W40x183 kesitli kirişin Düşey Yük/Yatay Deplasman eğrileri .....	104
Şekil Ek A.35. II ve IV yükleme prosedürleri altında W40x183 kesitli kirişin Düşey Yük/Düşey Deplasman eğrileri. ....	105
Şekil Ek A.36. II ve IV yükleme prosedürleri altında W40x183 kesitli kirişin Düşey Yük/Yatay Deplasman eğrileri. ....	105
Şekil Ek A.37. I ve II yükleme prosedürleri altında W40x183 kesitli kirişin Düşey Yük/Düşey Deplasman eğrileri. ....	106
Şekil Ek A.38. I ve II yükleme prosedürleri altında W40x183 kesitli kirişin Düşey Yük/Yatay Deplasman eğrileri. ....	106
Şekil Ek A.39. III ve IV yükleme prosedürleri altında W40x183 kesitli kirişin Düşey Yük/Düşey Deplasman eğrileri. ....	107
Şekil Ek A.40. III ve IV yükleme prosedürleri altında W40x183 kesitli kirişin Düşey Yük/Yatay Deplasman eğrileri. ....	107
Şekil Ek A.42. I ve III yükleme prosedürleri altında W44x230 kesitli kirişin Düşey Yük/Yatay Deplasman eğrileri .....	108
Şekil Ek A.43. II ve IV yükleme prosedürleri altında W44x230 kesitli kirişin Düşey Yük/Düşey Deplasman eğrileri. ....	109
Şekil Ek A.44. II ve IV yükleme prosedürleri altında W44x230 kesitli kirişin Düşey Yük/Yatay Deplasman eğrileri. ....	109
Şekil Ek A.45. I ve II yükleme prosedürleri altında W44x230 kesitli kirişin Düşey Yük/Düşey Deplasman eğrileri. ....	110

**Sayfa**

Şekil Ek A.46. I ve II yükleme prosedürleri altında W44x230 kesitli kirişin Düşey Yük/Yatay Deplasman eğrileri. ....	110
Şekil Ek A.47. III ve IV yükleme prosedürleri altında W44x230 kesitli kirişin Düşey Yük/Düşey Deplasman eğrileri. ....	111
Şekil Ek A.48. III ve IV yükleme prosedürleri altında W44x230 kesitli kirişin Düşey Yük/Yatay Deplasman eğrileri. ....	111



## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

Çizelge 2.1. ÇYTHYEDY Tablo 5.1B: Eğilme Momentinin Basınç Bileşeni Etkisindeki Enkesit Parçaları için Genişlik/Kalınlık Oranları (Rijitleştirilmemiş enkesitler için).....	43
Çizelge 3.1. SEM çalışması sonuçları ile Wang vd. [40] deneysel sonuçlarının karşılaştırılması.....	49
Çizelge 3.2. Çalışma kapsamında seçilen kesitlerin geometrik ölçüleri .....	52
Çizelge 3.3. Çalışma kapsamında seçilen kesitlerin mukavemet özellikleri. ....	52
Çizelge 3.4. ÇYTHYEDY Tablo 5.1B'ye göre başlık narinlik durumları. ....	52
Çizelge 3.5. ÇYTHYEDY Tablo 5.1B'ye göre gövde narinlik durumları.....	53
Çizelge 3.6. Kesitlerin burkulma davranışı bölgeleri sınır uzunlukları.....	53
Çizelge 3.7. SAC yükleme protokolü.....	62
Çizelge 3.8. Hesaplanan düşey yük ve yatay yük değerleri. ....	63
Çizelge 3.9. I ve III yükleme prosedürlerinin uygulandığı analiz sonuçlarının karşılaştırılması.....	73
Çizelge 3.10. I ve II yükleme prosedürlerinin uygulandığı analiz sonuçlarının karşılaştırılması.....	74
Çizelge 3.11. III ve IV yükleme prosedürlerinin uygulandığı analiz sonuçlarının karşılaştırılması.....	74
Çizelge 3.12. II ve IV yükleme prosedürlerinin uygulandığı analiz sonuçlarının karşılaştırılması.....	74
Çizelge 4.1. ÇYTHYEDY koşullarına göre kirişlerin eğilme dayanımları.....	77
Çizelge 4.2. Analitik çalışma ile nümerik çalışma sonuçları.....	77
Çizelge 4.3. Elastik burkulma sonuçları ile nümerik çalışma sonuçlarının karşılaştırılması.....	77

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

- $b_f$  : Başlık genişliği.
- $C_b$  : Yanal burulmalı burkulma sınır durumunda moment düzeltme katsayısı.
- $C_w$  : Çarpılma sabiti.
- $E$  : Yapısal çelik elastisite modülü (200,000 MPa).
- $EI_{we}$  : Azaltılmış çarpılma rijitliği.
- $F_y$  : Yapısal çelik karakteristik akma gerilmesi.
- $GJ_e$  : Azaltılmış burulma rijitliği.
- $GJ_f$  : Başlık kesiti burulma rijitliği.
- $h$  : Kiriş derinliği.
- $h_o$  : Enkesit başlıklarının ağırlık merkezleri arasındaki uzaklık.
- $I_y$  : y eksenine etrafında atalet momenti.
- $i_{ts}$  : Etkin atalet yarıçapı.
- $i_y$  : y eksenine göre atalet yarıçapı.
- $J$  : Burulma sabiti.
- $L_b$  : Elemanın yanal olarak desteklenmeyen uzunluğu.
- $L_p$  : Akma sınır durumu için yanal olarak desteklenmeyen sınır uzunluğu.
- $L_r$  : Elastik olmayan yanal burulmalı burkulma sınır uzunluğu.
- $M_{crb}$  : Yanal burulmalı burkulma sınır durumunda kesit kritik momenti.
- $M_{ib}$  : Elastik olmayan yanal burulmalı burkulma momenti.
- $M_n$  : Karakteristik eğilme momenti dayanımı.
- $M_p$  : Plastik eğilme momenti dayanımı.
- $M_y$  : Kesit akma momenti dayanımı.
- $P_n$  : 3 eksenli eğilme durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımına ulaştıracak kuvvet büyüklüğü.

- $P_p$  : 3 eksenli eğilme durumunda plastik eğilme momenti dayanımına ulaştıracak kuvvet büyüklüğü.
- S355 : Karakteristik akma dayanımı 355 MPa olan yapısal çelik malzemesi.
- $t_w$  : Gövde kesiti kalınlığı.
- $t_f$  : Başlık kalınlığı.
- $W_{ex}$  : x eksenli etrafında elastik mukavemet momenti.
- $W_{px}$  : Kuvvetli eksen etrafındaki plastik mukavemet momenti.
- $h/t_w$  : Gövde narinliği.
- $2b_f/t_f$  : Başlık narinliği.
- $a_m$  : Moment düzeltme faktörü.
- $\beta_m$  : Yanal yönde desteklenmemiş serbest açıklığın uç momentlere oranı.
- E : Birim şekil değiştirme.
- $\nu$  : Yapısal çelik poisson oranı

## KISALTMALAR

- ANSYS : Swanson Analysis Systems (Swanson Analiz Sistemleri)
- AISC : American Institute of Steel Construction (Amerikan Çelik Yapı Enstitüsü)
- AS4100 : Australian Standard 4100 (Avustralya Çelik Yapılar Yönetmeliği)
- ÇYTHYEDY : Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik
- DIN : Deutch Industrie Normen (Alman Endüstri Normları)
- EN3 : Eurocode 3 (Avrupa Yapısal Tasarım Yönetmeliği)
- GKT : Genelleştirilmiş Kiriş Teorisi
- LSK : LiteSteel Kirişi
- SAC : Structural Assessment Committee (Yapısal Değerlendirme Komitesi)
- YBB : Yanal Burulmalı Burkulma Davranışı
- YBŞB : Yanal Buruşmalı Burkulma Davranışı
- YMÇ : Yüksek Mukavemetli Çelik

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Ülkemizde ağır sanayi hol yapıları, imalathane, depo, stok alanları, atölye vb. yapılarda işletme esnasında taşıma faaliyetleri, köprülü tip gezer krenlerle sağlanmaktadır. Bu tarz yapıların tasarımları, inşaat mühendisliği açısından, içerisinde bulundurduğu özel makine ve ekipman gibi öğelerin de dikkate alınmasını gerektirdiğinden spesifik bir hal almaktadır. Endüstriyel alanlarda kullanılan yapıların spesifik boyut kazanmasındaki en önemli parçalardan bir tanesi de yapı taşıyıcı sistemine doğrudan etki eden gezer köprülü krenlerdir. Gezer köprülü krenler, tek açıklıklı olandan çok açıklıklı olana kadar her türlü endüstri yapısında taşıyıcı sisteme eklenmekte ve tasarımı başka noktalara getirmektedir.

Gezer köprülü krenlerin kullanıldığı yapılar, betonarme veya çelik konstrüksiyon taşıyıcı sisteme sahip olabilir. Taşıyıcı sistem malzeme türünden bağımsız olarak yürüme yolu kirişleri için genellikle standart haddelenmiş profil kesitlerinin kullanıldığı çelik konstrüksiyonlar tercih edilmektedir. Gezer köprülü tip krenlerin yürüme yolu kirişlerine, krenin çalışması esnasında, dinamik olarak tekerlek ve eksantrik yatay yükler etki ettiğinden dolayı iki eksenli eğilme ve burulma etkilerine maruz kalmaktadır. Bahsi geçen yüklemeler dolayısıyla kren yürüme yolu kirişleri yanal burulmalı/buruşmalı burkulma etkisine maruz kalabilir. Bu nedenle gezer köprülü tip krenlerin yürüme yolu kirişlerinin boyutlandırılmasında genellikle etkin kesit tesiri olarak yanal burulmalı burkulma dikkate alınmaktadır. Geçmişten bugüne yapılan tasarımlarda, kren yürüme yolu kirişlerinin yerel burkulma ve stabilite problemlerine maruz kalmaması için birtakım önlemler geliştirilmiştir. Fakat haddelenmiş standart profil kesitlerinin kullanılması durumunda, profil üst flanşının gerekli yanal mukavemeti, hafif boyutlu ve orta açıklıklı krenler için bile genellikle yeterli gelmemektedir [1].

Maali vd. [2]'e göre, I enkesitli hadde profiller için elde edilen yanal burulmalı burkulma (YBB) kapasitesi, gezer köprülü krenler için bir yürüme yolu kirişinin tasarımında büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle mühendisler, köprülü tip gezer kren yükleri altında her zaman bu kirişlerin optimum tasarımını düşünmelidir. Yapılan literatür çalışmaları sonucunda, çelik kren yürüme yolu kirişlerinin, krenin çalışması esnasında ortaya çıkan eksantrik yükler ile burulmaya maruz kalmasının en çok karşılaşılan ve üzerine çalışılan problem olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte Trahair'in [3] çalışmasında burulma davranışının neden olduğu kesit dönmesinin ilave gerilmelere neden olduğu ve YBB'ye karşı elamanın direncinin azaldığını göstermiştir.

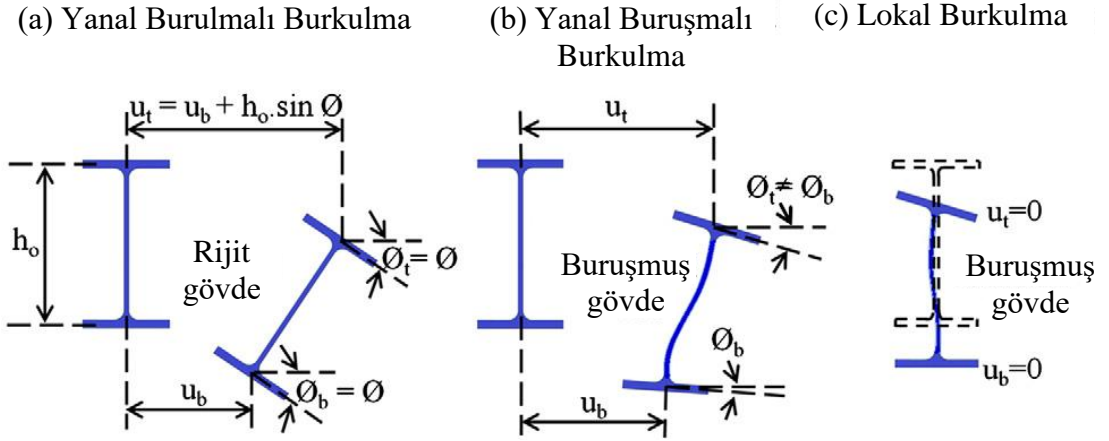
Musilek [4] tarafından yapılan çalışmada; köprülü tip gezer vinç yapılarında karşılaşılan en sık problemin, deprem kuvveti söz konusu olmasa bile kren hareketi esnasında meydana gelen yatay burkulma kuvveti olduğu belirtilmiştir. Bu kuvvetler, vincin eğilmesi, hızlanması veya frenlenmesinden kaynaklanabilmektedir. Hem fiziksel modele hem de kuvvetlerin büyüklüğüne göre değişen bu yatay yüklerin belirlenmesi için çeşitli metodların bulunduğu açıklanmaktadır. Tasarımda geçmişte kullanılan yöntemlerin ampirik temellere ve deneyimlere dayandığı yapılan araştırmalarda görülmüştür. Bu kuvvetlerin belirlenmesindeki temel problemin, bu yatay kuvvetlerin büyüklüğünü etkileyen çok sayıda faktör olması olduğu açıklanmaktadır. Ayrıca bu faktörlerin tanımlanmasının ve ölçülmesinin zorluğu tasarımda karşılaşılan başka bir sorun olmaktadır. Musilek [5], başka bir çalışmasında, geçmişte kullanılan yöntemlerle günümüzde kullanılan yöntemlerin dinamik modellerle karşılaştırılmasını gerçekleştirmiştir.

Literatürde kren yürüme yolu kirişlerinin YBB davranışı üzerine yapılmış çalışmaların sınırlı sayıda olduğu görülmektedir. Ayrıca araştırmacıların genellikle çelik kirişlerin YBB davranışı üzerine odaklandıkları görülmüştür.

## 1.1. ÇALIŞMA KONUSU İLE İLGİLİ LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

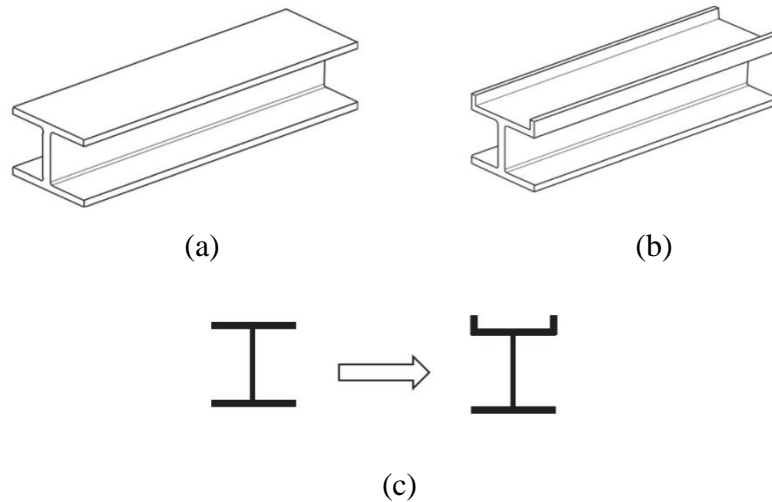
Eurocode 3'ün 1.1. bölümü; serbest kirişlerin alternatif tasarım yaklaşımlarının yanı sıra yanal burulmalı burkulma tasarımının değerlendirilmesine de önemli değişiklikler getirmiştir. Ayrıca, Eurocode 3; Bölüm 1-1 için ulusal olarak belirlenmiş parametreler oluşturulmasının bir sebebi de etkin göçme davranışının yanal burulma burkulma olması durumunda eğilme davranışı için de belli güvenlik katsayılarının tanımlanmasının gerekli hale gelmesidir. Rebelo vd. [6] tarafından yapılan çalışmada, belirtilen davranış altında kirişlerin tasarım metodolojisini açıklanmış ve oluşturulan Sonlu Elemanlar Modeli ile nümerik çalışma yapılmıştır. Daha sonra, alternatif tasarım formüllerinin doğruluğunu değerlendirmek için EN 1990-Ek D ile kıyaslanılmışlardır. Tüm bu çalışmaların sonucunda; çeşitli kiriş geometrileri ve yükleme durumlarında EN 1990'a uygun olarak çeşitli yöntemler için güvenlik faktörü önerisi sunmuşlardır [6].

Çift simetri eksenine sahip çelik I kesit kirişleri ile yapılan çalışmada, burkulma momenti altında gövde buruşmalarının yanal buruşmalı burkulma davranışına etkisi araştırılmıştır. Elastik ve inelastik burkulma davranışları için de uygulanabilecek bir analitik burkulma momenti ifadeleri geliştirilmiştir. Geliştirilen bu ifadeler, gövde buruşmalarının I kesitli çelik kirişlerin burulma ve burkulma rijitlikleri üzerindeki etkilerini de hesaba katmaktadır. Nümerik çalışmalar sonucunda önerilen ifadeler ile standartlarda yer alan bağıntılar karşılaştırıldığında; kalın başlıklı ince gövdeli çelik I enkesitli kirişlerin burkulma momentlerinin sayısal sonuçları standartlarda yer alan ifadeler ile yakın bir uyum içinde tahminler sağlamaktadır. Son olarak, yapısal çelik tasarım standartlarındaki yanal buruşmalı burkulma sınır şartlarının, gövde buruşmasına eğilimli I- enkesitli kirişler için genel olarak fazla güvenli sonuçlar sağladığı bulunmuştur [7].



Şekil 1.1. Çift simetri eksenli çelik I kesitli kirişin burkulma davranışları; (a) Yanal Burulmalı Burkulma (b) Yanal Buruşmalı Burkulma (c) Lokal Burkulma [7].

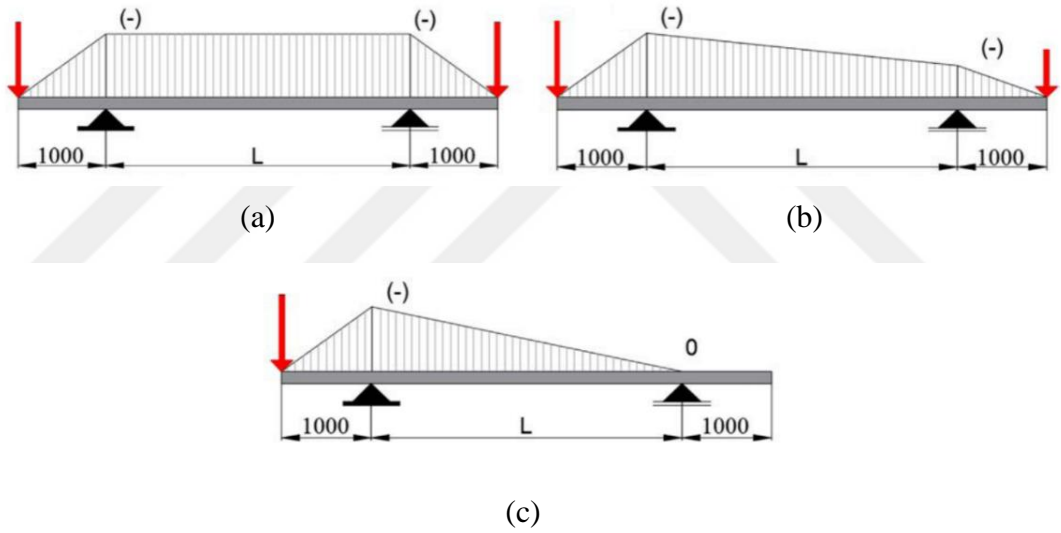
Mudenda ve Zingoni'nin [8] yaygın olarak çift simetri eksenine sahip çelik I kesitli hadde profillerinin YBB davranışıyla ilgili çalıştıkları gözlemlemiştir. Ayrıca tek simetri eksenli bir çelik kiriş üzerinde YBB davranışını açıklamayı amaçlamışlardır. Standart I kesitli bir profil kesitinin üst flanş uçlarına birer dikme ekleyerek oluşturdukları kesit geometrisi üzerinde sonlu elemanlar modelleri ile analizler gerçekleştirmişlerdir.



Şekil 1.2. Çalışma kapsamında kullanılan kiriş kesitleri; (a) Çift simetri eksenli kesit (b) Tek simetri eksenli kesit (c) Çift simetri eksenli kesit ve flanş uçlarına dikme eklenerek oluşturulan tek simetri eksenli kesit [8].

Yapılan çalışmalar; farklı açıklıklar ve çeşitli dikme yükseklikleri ile gerçekleştirilmiştir. Flanş uçlarına eklenen dikmelerin, kesit kritik burkulma momentini arttırdığı ancak bu artışın dikme yüksekliği ile ters orantılı olarak azaldığı görülmüştür. Flanş uçlarına eklenen dikmelerin yükseklikleri, ağırlık merkezinin konumunu değiştirmekte ve kayma merkezinin ağırlık merkezine göre göreceli bir konuma gelmesini sağlamaktadır. Kayma merkezi ile ağırlık merkezinin göreceli konumunun, dikme yüksekliğinin doğru ayarlanması ile mukavemet kazancı üzerinde bir miktar etkisi olduğu gösterilmiştir [8].

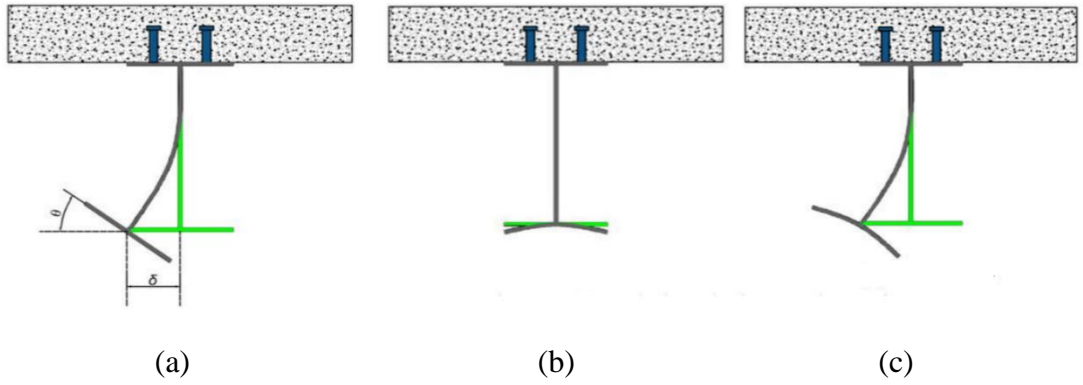
Çelik-beton kompozit kirişler, negatif momente maruz kaldıklarında sınırlandırılmış YBB, yerel burkulma veya bu etkilerin bileşkesi nedeniyle deformasyona uğrayabilir.



Şekil 1.3. Çalışmada kullanılan negatif moment diyagramları; (a) Yükleme 1 (b) Yükleme 2 (c) Yükleme 3 [9].

Sınırlandırılmış YBB, elemanın burkulma davranışı sırasında, üst veya alt başlıklarından bir tanesinin dönmeye karşı mesnetli; diğerinin ise serbest olması durumunda serbest olan kesit flanşının deplase olup döndüğü ve gövdenin deforme olduğu bir stabilite davranışıdır. Bu davranışı ele alan tasarım standartları, kısmi mesnetli kirişler için, gelenekselleşmiş YBB teorilerini veya U-Frame modelini kullanmaktadır. Yapılan çalışmada ABAQUS sonlu elemanlar yazılımı ile çelik-beton kompozit döşeme kirişlerinin negatif moment etkisi altındaki davranışları incelenmiştir.

Bu çalışma, ABAQUS yazılımı ile doğrusal olmayan sayısal analizlerin gerçekleştirilmesi yoluyla, üst başlıkları stud çivisi vasıtasıyla betonarme plağa bağlanmış ve bu sebeple negatif moment etkisi altındaki çelik-beton kompozit kirişlerin mukavemetini araştırmaktadır. Çelik profil kesiti, boyuna takviye oranı, serbest uzunluk, gövde takviyelerinin varlığı ve açıklık boyunca negatif moment dağılımı gibi çeşitli parametrelerin etkileri analiz edilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmanın sonuçları tasarım standartları ve analitik yöntemlerle karşılaştırılmıştır.



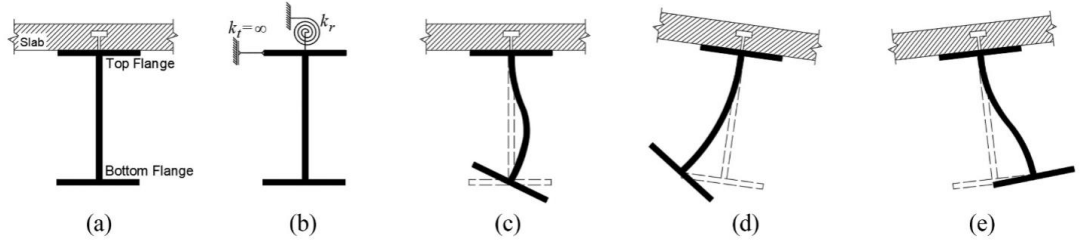
Şekil 1.4. Çelik-beton kompozit kirişlerde negatif moment altında stabilite modları; (a) Sınırlanmış YBB davranışı (b) Flanş lokal burkulma (FLB) davranışı (c) YBB ve FLB bileşik davranışı [9].

Rossi vd. [9] çalışmalarında, enine kesit ve gövde berkitmelerinin YBB dayanımını en çok etkileyen parametreler olduğunu gözlemlemiştir. Tasarım standartları veya U Frame gibi analitik yöntemlerin verdiği sonuçların fazla ihtiyatlı olduğu kanısına varılmıştır [9]

Wang vd. [10], yaptıkları sistematik deneysel çalışmada; YBB davranışı göstereceğini düşündükleri, çeşitli kısıtlama koşullarına sahip, yüksek mukavemetli S690 kaynaklı I-kesitlerinden oluşan toplam on sekiz basit mesnetli kirişin yapısal davranışını incelemiştir. Bu kirişlerin gerçekleştirilen deneyler sırasında gösterdikleri deformasyon özellikleri, kritik göçme durumları ve moment dayanımları sunulmuş ve tartışılmıştır. S690 kaynağı ile oluşturulan yapma I kesit profillerinin, S355 malzemesinden üretilen I kesitli profillere benzer bir şekilde davrandığını gözlemlemiştir. Deneylerde kullanılan kirişlerin YBB davranışı EN 1993-1-1 tasarım standardına göre hesaplanan değerlerle karşılaştırıldığında; mekanik

özellikler, geometrik boyutlar ve tutma koşulları bakımından tasarım standardı EN 1993-1-1'in çok güvenli tarafta kaldığını göstermişlerdir. Yapılan deneysel araştırma, EN 1993-1-1 tasarım standardındaki tasarım kurallarının yapısal verimliliği iyileştirecek şekilde gözden geçirilmesi gerektiğini göstermiştir [10].

Araujo vd. [11], düzgün yayılı negatif eğilme etkisi altında, beton döşeme ile elastik olarak sınırlanan basit mesnetli kompozit döşeme I-kesitli çelik kirişlerinin yanal buruşmalı burkulma davranışının, kinematik ve mekanik olgularını incelemişlerdir. Elde ettikleri bulguları ise araştırma konusu kirişlerin yanal buruşmalı burkulma dayanımlarını hesaplamak ve analitik formüller türetmek için kullanmışlardır. Çalışma, deplasman/dönme kısıtlamalarını içeren deformasyon modlarını kullanarak burkulma analizleri yapmak amacıyla Genelleştirilmiş Kiriş Teorisi (GKT) yaklaşımına dayandırılmış ve böylece birkaç deformasyon modu sonucunda doğru burkulma sonuçları elde edilmiştir [11].

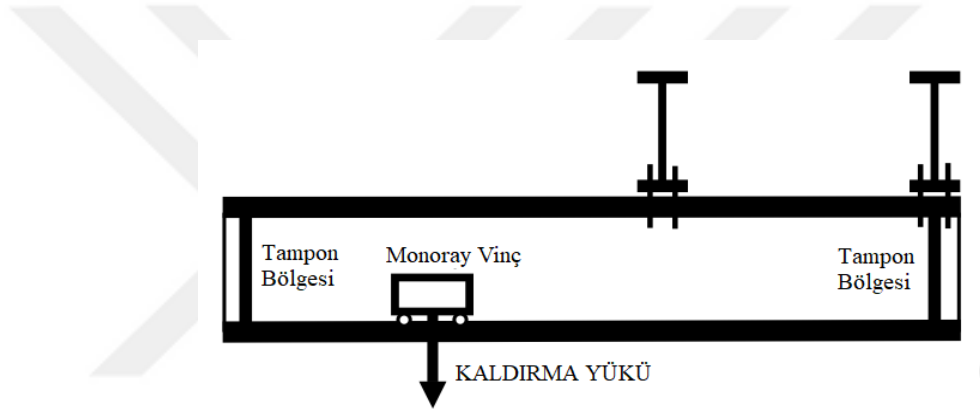


Şekil 1.5. Beton döşeme ile elastik olarak sınırlandırılan kirişin burkulma modları; (a) Çelik-beton kompozit kiriş, (b) döşeme tarafından sağlanan dönme kısıtlamasını modelleyen sürekli yaylar, (c) gövde yerel burkulması (d) tek eğrili yanal buruşmalı burkulma (e) çift eğrili yanal buruşmalı burkulma [11].

Lebastard vd. [12] tarafından yapılan çalışmada, bir kirişin yanal-burulmalı burkulması için kritik eğilme momentinin mesnetlerde uygulanan eğilme rijitliğini artıran durumları da hesaba katarak değerlendirilmesi için analitik formülasyonlar önerilmiştir. Teorik olarak burulma dönüşleri için diferansiyel denklemlerden sonsuz güç serileri elde edilmiştir. Daha sonra kesitin başlangıç formu, deplasman ve dönüş alanları için tek veya birkaç temel fonksiyon kullanılarak deforme olmuş şekle yaklaştırılmıştır. Daha sonra enerji yöntemi, çeşitli yükleme koşullarına maruz kalan kirişlerin kritik eğilme momentinin yaklaşık ifadelerini (sabit/doğrusal eğilme

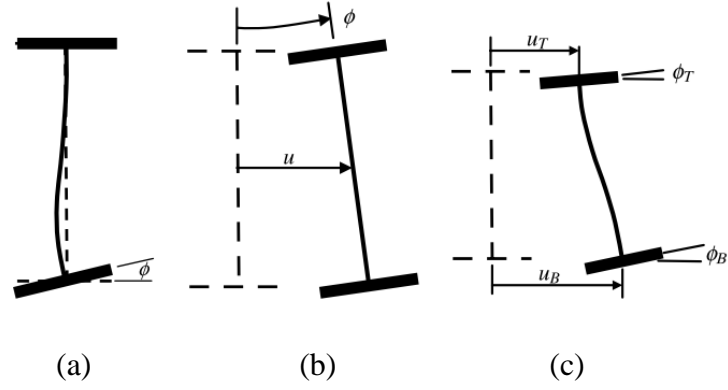
momenti dağılımları, açıklık ortası noktasal enine kuvvet veya düzgün yayılı yük vb.) elde etmek için kullanılmıştır. Mesnet bölgelerinde eğilme kısıtlaması olan kirişlerin sonlu eleman analizleri, ANSYS'de oluşturulan bir katı model ve LBeamN yazılımında geliştirilen bir kiriş eleman modeli dikkate alınarak yapılmıştır [12].

Monoray vinç yolu olarak kullanılan ve sarkan mesnet görevindeki elemanlar vasıtasıyla sabitlenen çelik I kesitli kirişlerin elastik yanal buruşmalı burkulma davranışı ve bu davranışın tasarım dayanımlarına etkisinin incelendiği çalışmada, ince gövdeli ve orta uzunlukta açıklığa sahip kirişin gövde buruşmasına uğraması elastik burkulma direncini düşürdüğü görülmüştür.



Şekil 1.6. Monoray vinç kirişi[13].

Çalışma prensibinden dolayı alt flanşından yüklemeye maruz kalan monoray kirişinin serbest bölgedeki elastik yanal buruşmalı burkulma davranışı sonlu elemanlar yazılımı ile incelenmiş olup flanş genişliği/flanş kalınlığı oranı azaldıkça kirişte meydana gelen yanal buruşmalı burkulma momenti/elastik burkulma momenti oranı önemli ölçüde azaldığı ancak gövde derinliği/gövde kalınlığı oranı ile elde edilen değişimin çok az olduğu görülmüştür. Özellikle düşük flanş genişliği/flanş kalınlığı oranında kesiti tam plastik hale getiren moment değerine genellikle yanal buruşmalı burkulma davranışından önce ulaşılmıştır. Kesit aralıkları, narinlikler, açıklık oranları ve burulma kısıtlama rijitlikleri parametrelerine göre elastik yanal buruşmalı burkulma momentlerini tahmin eden güvenli yaklaşımlar geliştirilmiştir. Monoray kirişlerinin, yanal buruşmalı burkulma davranışına yönelik bir yöntem önerilmiş ve bir örnekle gösterilmiştir [13].

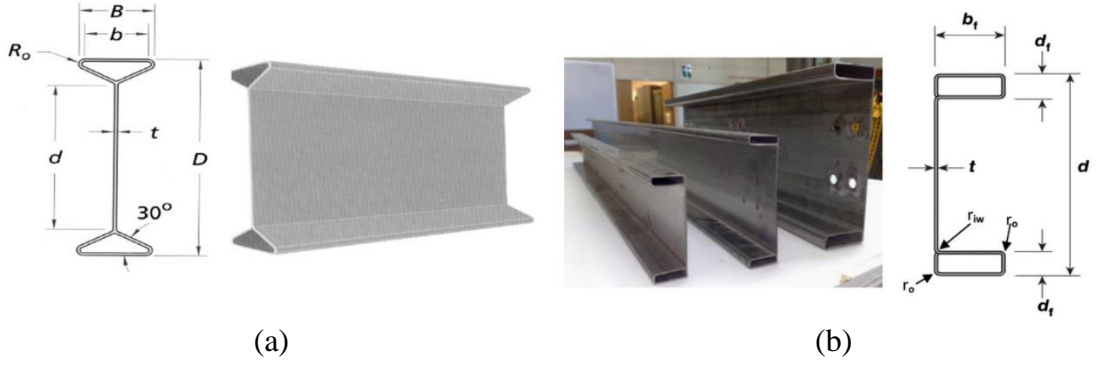


Şekil 1.7. Kiriş burkulma modları; (a) Lokal burkulma (b) Elastik burulmalı burkulma (c) Yanal buruşmalı burkulma [13].

Trahair [14] çalışmasında, tek açıklıklı çelik monoray I-kirişlerin elastik yanal buruşmalı burkulma davranışı ve bu davranışın tasarım dayanımları üzerindeki etkisini incelemiş ve ince gövdeye sahip orta uzunluktaki bir kirişin gövde buruşması nedeniyle kirişin elastik burkulma dayanımının düştüğünü gözlemlemiştir. Sonlu elemanlar yazılımı ile gerçekleştirdiği çalışmasında dayanımın alt flans ekseninden tekil yüklere maruz basit mesnetli kirişlerin, üniform eğilmeye maruz kirişlere göre daha yüksek, kesme merkezinden tekil yüklere maruz kirişler için ise daha düşük olduğunu görmüştür.

Alt başlıktan mesnetlenmemiş ve bu bölgeden yüke maruz kalan kirişlerde, burkulma momenti dayanımında çok önemli azalmalar olduğunu ancak mesnetlerde rijit gövde takviyeleri yapıldığında bu dayanımların arttığını tespit etmiştir. Böylelikle yanal buruşmalı burkulmaya karşı çelik kirişlerin tasarımında kullanılmak üzere bir yöntem önermiş ve bunun kullanımını bir örnekle göstermiştir [14].

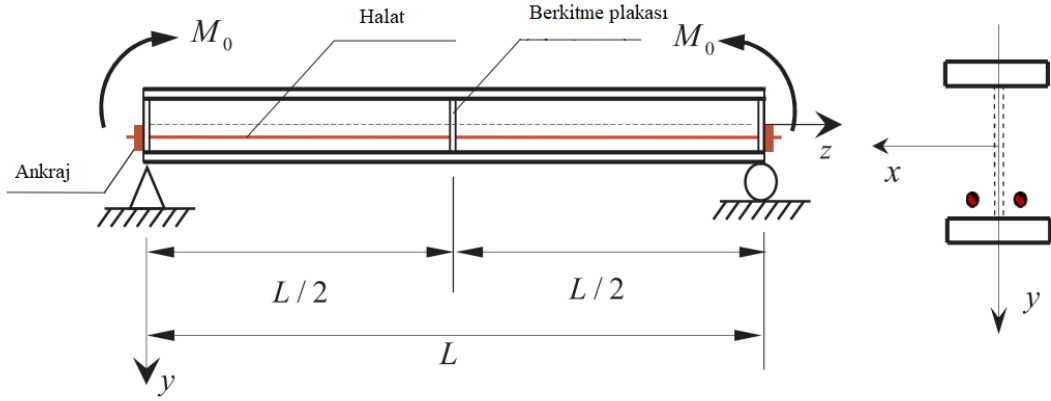
OneSteel Australian Tube Mills tarafından geliştirilen yeni bir kesit olan Lite Steel kirişi (LSK), içi boş başlığa sahip bir U kesitidir. Burulmaya dayanıklı dikdörtgen içi boş başlık ve nispeten ince bir gövdeden oluşan yeni bir kesit geometrisine sahiptir.



Şekil 1.8. Çelik kiriş kesitleri; (a) Boşluklu başlığa sahip kiriş kesiti (b) LiteSteel kirişi [15].

LSK, yapılarda genellikle eğilme elemanı olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu sebeple, LSK kesitli eğilme elemanları, yanal buruşmalı burkulma etkisine de maruz kalmaktadır. Bu nedenle gerçekleştirilen çalışmada, LSK eğilme elemanlarının davranışını ve mukavemetini araştırmak için 50'den fazla yanal burkulma testi içeren deneysel bir çalışma yapılmıştır. Çalışmada, açıklıkları 1200 ile 4000 mm arasında değişen mevcut 13 LSK elemanlarının çeyrek noktalı yükleme ile deneyleri yapılmıştır. Deneysel sonuçlar, Avustralya soğuk şekillendirilmiş çelik yapılar standardındaki tasarım kuralları sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Tasarım standardı ile deneysel çalışmaların örtüştüğü görülmüştür [15]

Öngerilmeli çelik I-kirişlerin yanal burulmalı burkulmasına (YBB) ilişkin analitik bir çözüm bulmak amacıyla çalışma yapan Zhang W [16], doğrusal halatlara sahip öngerilmeli simetrik ve asimetrik çelik I-kirişlerin, eşit uç momentler altında elastik YBB performansını incelemiştir.



Şekil 1.9. Basit mesnetli, doğrusal halatlar ile öngerme uygulanan çelik I kiriş [16]

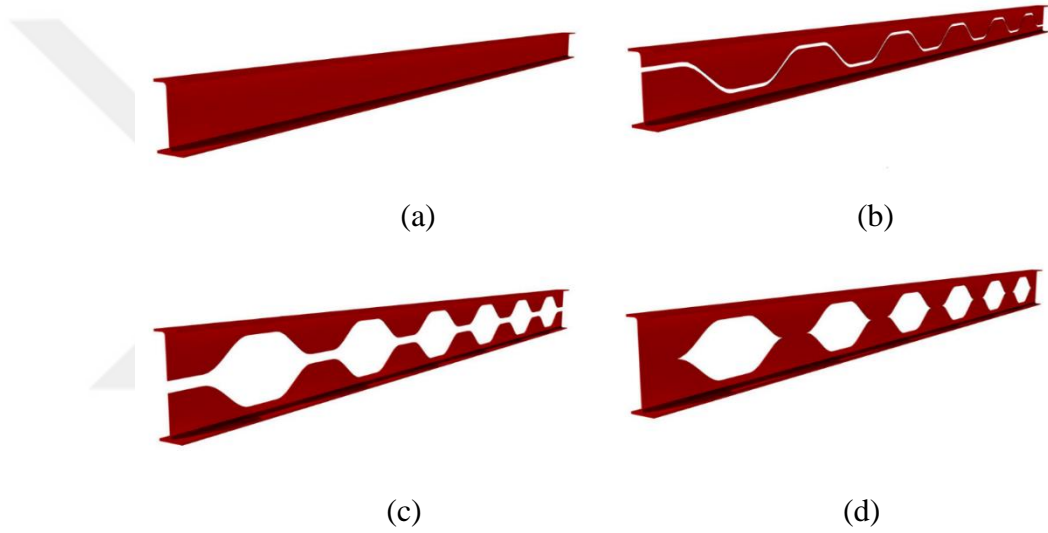
İlk olarak basitleştirilmiş bir mekanik model ortaya koymuş, ardından Euler-Beam modeli ve Kirchhoff-Plate modeline dayalı olarak, gerinim enerjisi denklemini ve öngerilmeli çelik I-kirişin potansiyel enerjisini ayrıntılı olarak türetmiştir. Daha sonra sınır koşulları ile birlikte toplam potansiyel enerji ve diferansiyel denge denklemlerini elde etmiştir. Bütün bu işlemlerin sonucunda, öngerilmeli I kirişlerin simetrik ve asimetric elastik YBB davranışının ilk defa analitik çözümlerini ve kritik momentin analitik çözümünün doğruluğu elde etmiştir. Öngerilmeli I-kirişin simetrik burkulmasını, ANSYS Sonlu elemanlar yazılımını kullanarak simüle edilmiş modeller üzerinden doğrulamıştır [16].

EN 1993-1-1, S460 çelik malzemesine kadar kolonlar, kirişler ve kiriş-kolon birleşimleri için tasarım kurallarını tanımlamaktadır. EN 1993-1-12 ise EN 1993-1-1 standardına ek olarak, S500 çeliğinden S700 çeliğine kadar olan çelik sınıfları için yapı elemanlarının tasarım kurallarını tanımlamaktadır. Tankova T. vd [17]'e göre, son araştırmalar, yüksek mukavemetli çelik (YMÇ) elemanların, genellikle iyileştirilmiş malzeme özelliklerine ilişkin geliştirilmiş burkulma eğrileri kullanılarak tasarlanabileceğini göstermiştir.

YMÇ ile teşkil edilen kirişlerin davranışı üzerine geniş çapta inceleme yapılmadığı görülmüştür. EN 1993-1-1 standardında yer alan kirişlerin yanal burulmalı burkulmasına ilişkin kurallar, çelik kalitesine bağlı olmaksızın; geleneksel mukavemetli çelik veya YMÇ ile teşkil edilen kirişler arasında ayırım yapmamaktadır.

Tespit edilen eksikliklere ilişkin yapılan araştırma, 12 tam ölçekli test ile artık gerilme ölçümlerinin yapıldığı ileri sayısal modellerin oluşturulduğu ve analitik türevleri kapsayan deneysel bir çalışmadır. Deneysel, farklı çelik kalitelerine sahip kirişlerin, kaynaklı ve sıcak haddelenmiş kesitleri üzerinde, çift ve tek simetri eksenine sahip kesitlerin yanı sıra kesit çelik sınıflarındaki varyasyonları kapsamaktadır [17].

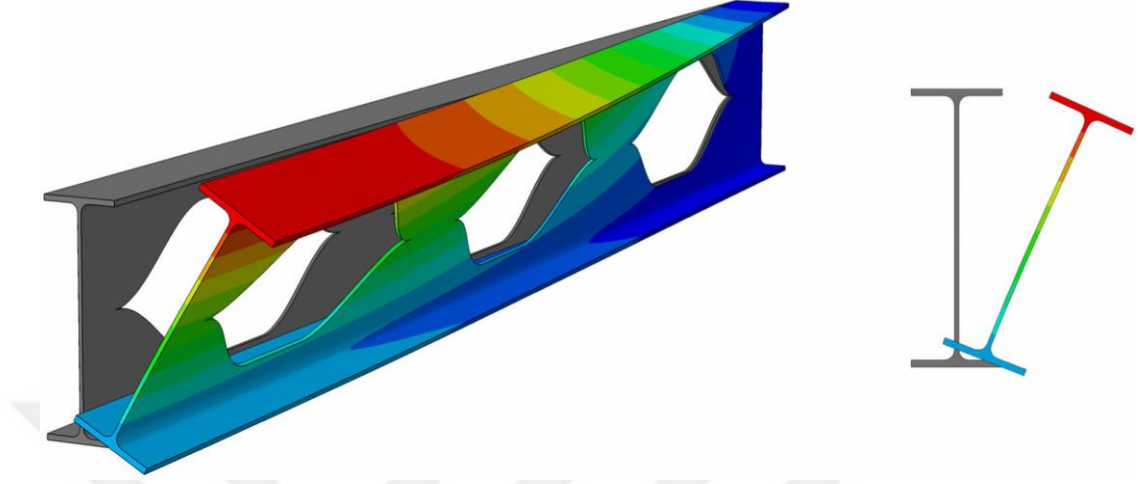
Sinüzoidal gövde boşluklu kirişler, tek gövde kesiminden üretilen alveolar kirişlerdir. Bu, daha yüksek I-kesitlerinin üretilmesine ve üretilmeden önceki I-kesitlere kıyasla daha iyi bir dayanım/ağırlık oranına olanak sunmaktadır.



Şekil 1.10. Alveol kiriş üretim süreci; (a) I kesitli profil (b) Sinüsoidal gövde kesimi (c) Kesim sonrası iki parçanın kaynaklanacak şekilde üst üste getirilmesi (d) Alveol kesitli kiriş.

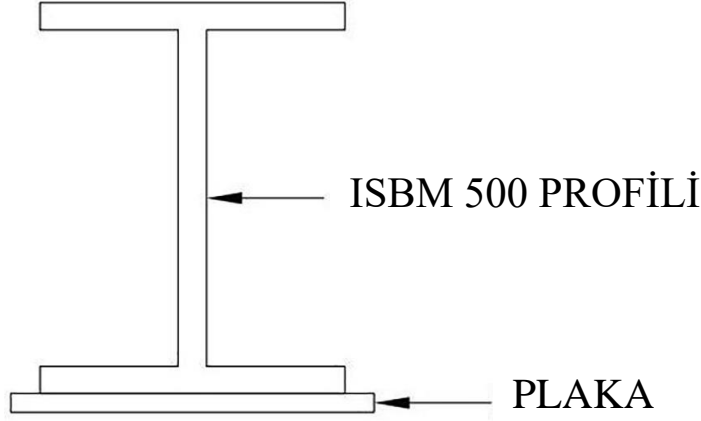
Literatürde, bu I-kesit tipi hakkında, özellikle stabilite ve YBB davranışlarıyla ilgili çok az çalışma vardır. Sinüzoidal gövde boşluğuna sahip alveolar kirişlerin davranışını anlamak adına, artık gerilmeler ve geometrik şekiller gibi başlangıç kusurları dikkate alınarak uzunlukları 6 m ile 32 m arasında değişen, IPE tipi 10 adet I kesit ile sonlu elemanlar yazılımı olan ABAQUS programında sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Analitik standartların yanı sıra tasarım standartlarının (AISC; Eurocode 3 ve AS4100) yeterliliği değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar sayesinde, geleneksel çift-T yaklaşımına alternatif olarak sinüzoidal gövde boşluklu alveolar kirişlerde elastik kritik momentin hesaplanması için kullanılan farklı yöntemlerde ortaya çıkan davranış analiz etmek mümkün olmuştur. Ayrıca mühendislik projelerinde en yaygın

olarak tercih edilen kesit tipi olmasına rağmen üst başlığa uygulanan hesaplama işlemlerinde AISC-360 standardının güvensiz olduğu görülmüştür.[18]



Şekil 1.11. Sinüzoidal web açıklığı ile I-kirişte yanal burulmalı burkulma davranışı [18].

Sıcak haddelenmiş çelik I kirişin yanal burulmalı burkulma davranışının tespiti için yapılan sayısal çalışmada kiriş kesiti alt başlıkta çelik plaka kullanılarak güçlendirilerek ABAQUS sonlu elemanlar yazılımı ile doğrusal ve doğrusal olmayan bir dizi analitik çalışma yapılmıştır. Bu analiz için ISMB500 kesiti kaynaklı bağlantı ile güçlendirilmiş ve güçlendirmede kullanılan çelik plakanın kalınlığı değiştirilerek çalışma gerçekleştirilmiştir. Araştırmalar, güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş I kesitli kirişlerin nihai dayanımları ve bu dayanımlardaki sapma oranlarının tespitine yöneliktir. Güçlendirilmiş çelik I kirişin yük taşıma kapasitesi güçlendirilmemiş duruma göre %6 ila %22 arasında önemli ölçüde artırmıştır. Artan yük taşıma kapasitesi yüzdesinin levhanın kalınlığına bağlı olduğu görülmüştür [19].



Şekil 1.12. Güçlendirilmiş ISBM 500 kirişi tipik kesiti [19].

İnşaat sektöründe çelik malzemesi birçok avantajından (esneklik, korozyon direnci ve hafiflik vb.) dolayı kullanılmaktadır. Gövde açılımlı I-kesitli çelik kirişler, tipik çelik kirişlerden daha kapsamlı bir uygulama yelpazesine sahiptir. Gövde açılımlı kirişler yapısal stabiliteyi iyileştirir ve bu sayede çelik yapılarda kullanılma olanağı oluşur. Literatürde, gövde boşluklu kirişlerin göçmesinde yanal buruşmalı burkulmanın başlıca sebep olduğunu gösterir çalışmalara rastlanmıştır. Jasir ve Raj [20], yaptıkları çalışmada ABAQUS sonlu elemanlar yazılımını kullanarak sayısal bir model ile eksantrik yüklemenin, gövde boşluklarının bölünmesi ve gövdedeki düşey rijitlik plakası altında yanal buruşmalı burkulma göçmesi üzerindeki etkisini değerlendirmişlerdir. Eksantrik yükleme taşıma kapasitesini %5 azaltmasına karşın gövde boşluğunun geri eklenmesi taşıma kapasitesini %7 artırmıştır. Gövdeye eklenen düşey berkitme plakalarının yük taşıma kapasitesinde önemli artışlara neden olduğu görülmüştür. Bu da gövde boşluklu kirişlerin yanal buruşmalı burkulmasının azalmasına yardımcı olmuştur [20].

Gövde buruşması davranışını içeren yanal burulma burkulmasına maruz kalan hücresel boşluklu çelik kirişlerin nihai kapasitesinin değerlendirilmesi adına yapılan çalışmaların seyrek olduğu görülmüştür. Bu tür elemanların YBB kapasitesini tahmin etmek için kesin bir formül yoktur. Moghbeli ve Sharifi yaptıkları çalışmada, doğrusal olmayan sonlu eleman analizi ve kapsamlı simülasyonlar ile (660 numune üzerinde), hücresel boşluklu çelik kirişlerin yanal buruşmalı burkulma modu incelenmiştir. YBB kapasitesini etkileyebileceği düşünülen 8 parametrenin etkisi ilk önce gen ifade

programlama daha sonra doğrusal olmayan çoklu regresyon algoritmaları ile modellenerek göçme momenti kapasitesinin ölçülebilmesi için formüller elde etmeyi amaçlamışlardır. Önerilen formüller ile AS4100, EC3 ve AISC tasarım standartlarının hesaplamaları arasında bir karşılaştırma yapılmıştır. Önerilen formüllerin mühendisler tarafından kullanılabilir kadar kesin ve uygulanabilir olduğu gösterilmiştir [21].

Xiong G. vd. yaptıkları araştırma sonucunda, yüksek mukavemetli çeliğin dünya çapında yaygın olarak kullanılmasına rağmen yüksek mukavemetli çeliklerin burkulma davranışının çelik kirişler üzerinde hem deneysel testler hem de sayısal simülasyonlar yoluyla henüz sistematik olarak araştırılmadığını tespit etmişlerdir. Yapılan çalışmada Q690 çelik malzemesinden, kaynaklı olarak teşkil edilen kirişlerin YBB dayanımının, deneysel ve sayısal bir çalışmasını sunmuşlardır. Çift simetri eksenine ve farklı yükseklik-genişlik oranlarına sahip 8 kiriş test etmişlerdir. Çalışmanın sayısal kısmı ise bahse konu kirişlerin önkusurlarıyla birlikte tanımlanarak ABAQUS sonlu elemanlar yazılımı aracıyla analizi yapılarak gerçekleştirilmiştir. Farklı standartlardaki tasarım sonuçları, deney bulguları ve analiz sonuçları karşılaştırıldığında; tasarım standartlarının fazla güvenli sonuçlar verdiği kanısına varılmıştır [22].

## **1.2. TRANSPORT VE TAŞIMA TEKNİĞİ**

İnsanoğlu var olduğundan beri, herhangi bir amaçla, herhangi bir yükün bir noktadan diğerine taşınması her zaman bir iş olmuştur. Bu işi daha kolay ve verimli olarak nasıl yapılabileceği ise her zaman bir arayış sebebi olmuştur. Sürükleyerek, iterek, beden gücü ile kaldırarak veya birlikte hareket ederek bir şekilde bu işi yapma yoluna gitmişlerdir [23]. Taşıma tekniği, geçmişe bakıldığında iki farklı zaman diliminde ele alınması gereken bir husustur; 20. yy. sonrası ve öncesi. Bahsedildiği gibi çok eski zamanlarda ilkel olarak birçok yol geliştirilmeye çalışılmıştır. Taşıma sistemleri adına, mekanik anlamda konstrüksiyon yapısına sahip krenler ilk olarak milattan önce 6. yy'de Antik Yunan medeniyetinde icat edilmiştir.



Şekil 1.13. Antik Yunan medeniyetinde icat edilen ilk vinçlerden bir tanesi [24].

Krenler ilk ortaya çıktığı yıllarda antik yapıların inşaatında kullanılmışlardır. Zamanla insanoğlunun ihtiyaçlarının değişmesi sonucunda 20. yy itibariyle mekanizasyon gelişmeleri yaşanmıştır. Mekanik taşıma sistemleri 1940'lı yıllara kadar devam etmiştir. Teknoloji ve mühendislik alanında yaşanan gelişmeler, insanoğlunu otomasyon barındıran transport makinelerinin yapımına yöneltmiştir. Günümüzde ise her türlü endüstri alanında tamamen otomatikleşmiş transport makineleri kullanılmaktadır [25].

Üretim, inşaat, atölye, liman vb. endüstriyel alanlarda gerekli girdi malzemelerinin bünyesine taşınması, bu malzemelerin yapılacak işe uygun birimlere taşınması, ürünlerin depolama alanlarına taşınması, depolama alanlarından ürünlerin dışarıya dağıtılması veya üretim sonucu ortaya çıkan atıkların gerekli yerlere ulaştırılması gibi birçok işlemde sistematik olarak işleyen taşıma sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır [23]. Bu doğrultuda ağır sanayi hol yapılarında kullanılan araçlardan bir tanesi de gezer tip köprülü krenlerdir. Bu krenler hakkında ilerleyen bölümlerde daha detaylı bilgiye yer verilmiştir.

### 1.2.1. Krenler

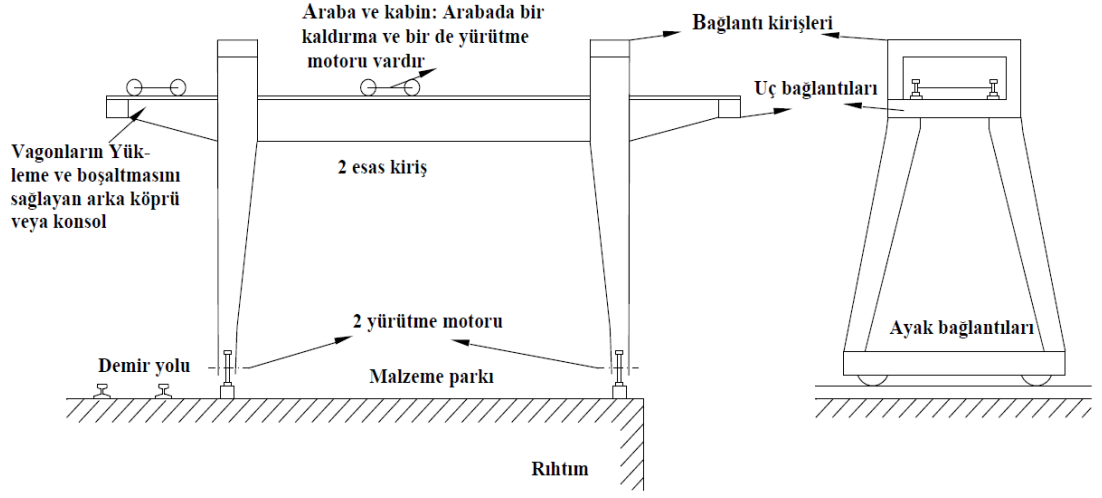
Krenleri ele alan standartlardan bir tanesi DIN 15001'e göre krenler, bir taşıma elemanına asılı olan yükü kaldıran ve çeşitli yönlerde hareket ettiren kaldırma ve taşıma makineleridir. Krenleri örneklemek gerekirse; köprülü krenler, portal krenler, döner krenler ve kablolu krenlerden bahsedilebilir [26].

#### 1.2.1.1. Portal Krenler

Zemine montajı yapılan raylar üzerinde, çelik konstrüksiyon ayaklar vasıtasıyla yükselen ve bu ayaklar arasında bulunan köprü konstrüksiyonu ile sistemi oluşturulan krenlerdir. Portal krenler genellikle kapalı hollerin dışında geniş alanlarda kullanılırlar. Portal krenler, "liman vinçleri" veya "sehpalı vinçler" veya "ayaklı vinçler" olarak da anılırlar. Limanlar, tersaneler, fabrika istif alanları ve depolar gibi açık alanlarda kullanılırlar. Yük taşıma kapasiteleri 800 tona, açıklıkları ise 120 metreye kadar çıkabilmektedir [26].



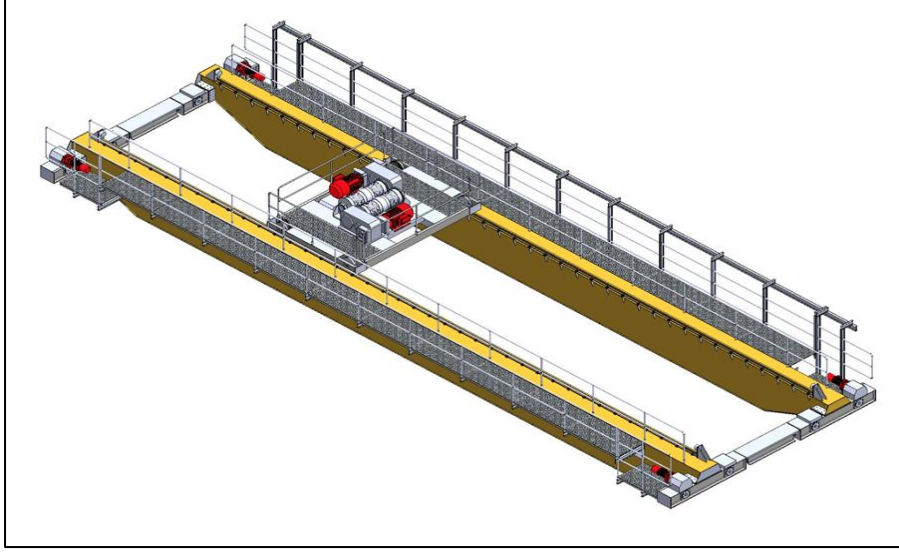
Şekil 1.14. Portal kren [27].



Şekil 1.15. Portal kren şeması [25].

### 1.2.1.2. Köprülü Krenler

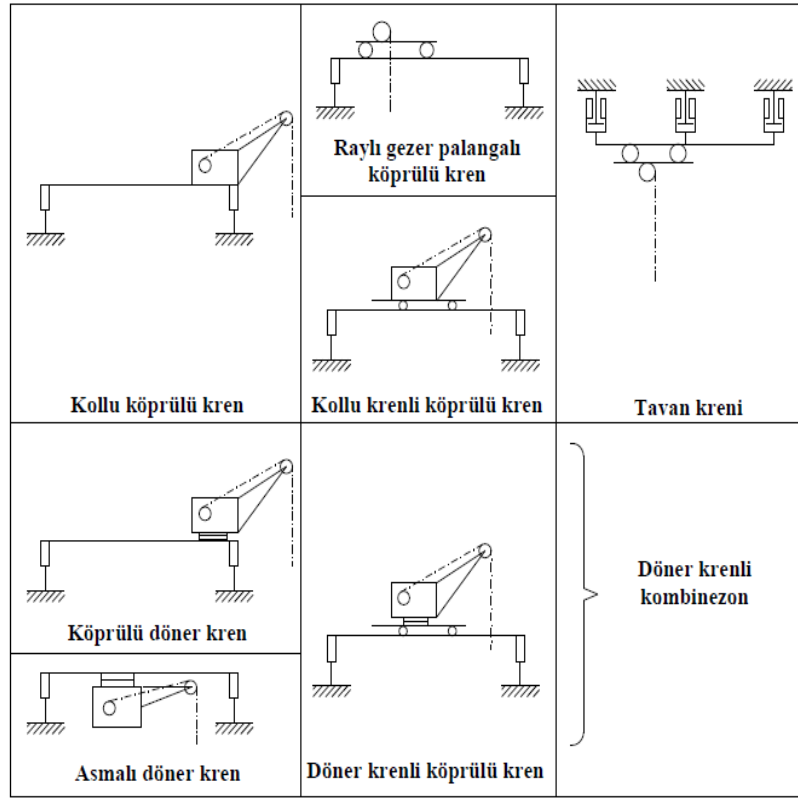
Köprülü krenler, çelik konstrüksiyon yapılarında, kren çalışmasına müsade edecek en yüksek kota yerleştirilen yürüme yolu kirişleri üzerine monte edilen raylarda hareket ederek taşıma işlemini gerçekleştiren köprü konstrüksiyonlarından ibaret krenlerdir. Yarı ağır veya ağır endüstride faaliyet gösteren bütün tesislerde çalışma kapasitelerine göre tek veya çift kirişli olarak kullanılırlar. Tek kirişten oluşan köprülü krenler genellikle 5 ton kapasiteli ve 18 m köprü açıklığı ile sınırlıdır. Çift kirişli köprüden oluşan krenlerin kapasiteleri ise köprü açıklığına da bağlı olarak 185 tonlara kadar çıkabilir. Taşıma işlemi çift kiriş üzerinde hareket eden araba ile sağlanır. Kumanda ile uzaktan veya vinç gövdesinde bulunan operatör kabini içinden yönetilebilirler.



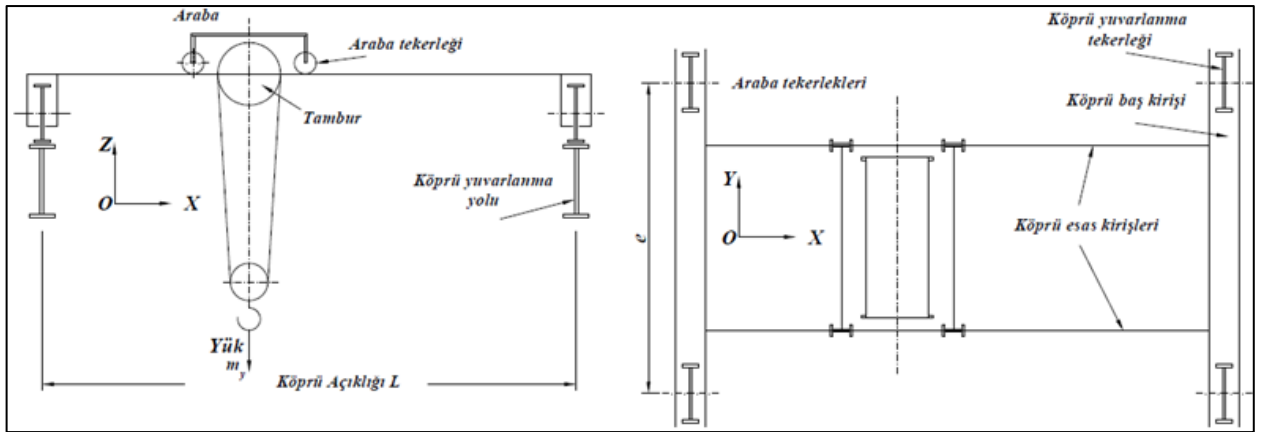
Şekil 1.16. Köprülü kren [28].

Köprülü krenler, taşıma faaliyetini gerçekleştirirken Şekil 1.16'da görüldüğü üzere şu hareketler beklenmektedir [25];

- $O_x$  eksenini doğrultusunda yatay hareket, yani köprü konstrüksiyonu üzerinde bulunan arabanın yaptığı öteleme hareketi,
- $O_y$  eksenini doğrultusunda yatay hareket, yani köprünün gövdesiyle birlikte yaptığı öteleme hareketi,
- $O_z$  eksenini doğrultusunda düşey hareket, yani kaldırma ve indirme hareketi.



Şekil 1.17. Köprülü kren türleri [25].



Şekil 1.18. Köprülü kren şeması [25].

### 1.3. ÇALIŞMANIN AMACI VE YÖNTEMİ

Endüstri devrimi ile beraber ülke ekonomilerinin en önemli kaynağı sanayi sektörü haline gelmiştir. Özellikle ağır sanayinin önemli bir parçası olan demir-çelik sektörü de bu anlamda önemli bir paya sahiptir. Demir-çelik endüstrisi gibi büyük çaplı faaliyet gösteren sanayilerde üretim hızını arttırmak için yatayda ve düşeyde taşıma, bakım-onarım işlerini kolaylaştırmak gibi çeşitli nedenlerle krenler sıklıkla tercih edilmektedir. Krenlerin kullanıldıkları amaçlar doğrultusunda farklı tipleri bulunmaktadır. Endüstriyel yapılarda, işletme esas faaliyetlerini yürütmek adına genellikle büyük ve ağır tonajlı malzemelerin taşınması için kullanılan boyut ve güç olarak daha büyük olan köprü tip krenler kullanılmaktadır. Köprü tip krenlerin sanayi endüstrisinde yerini almasıyla beraber inşaat mühendisliği literatüründe de yer bulmaya başlamış ve araştırmalar sonucunda da görüldüğü üzere kren yürüme yollarının en büyük sorunu olan burulma ve yanal burulmalı/buruşmalı burkulma üzerine eleman bazında deneysel ve teorik birçok çalışma yürütülmeye başlanmıştır. Yapılan bu çalışmalardan ilham alınarak ülkemizde oldukça fazla bulunan köprülü tip gezer krenlerin raylarının mesnetlendiği çelik konstrüksiyon kren yürüme yollarının eğilme ve burulma mukavemetinin gerekli emniyette sağlanırken daha ekonomik olarak nasıl teşkil edilebileceği noktasında bir araştırma yapılması gerektiği kararına varılmıştır.

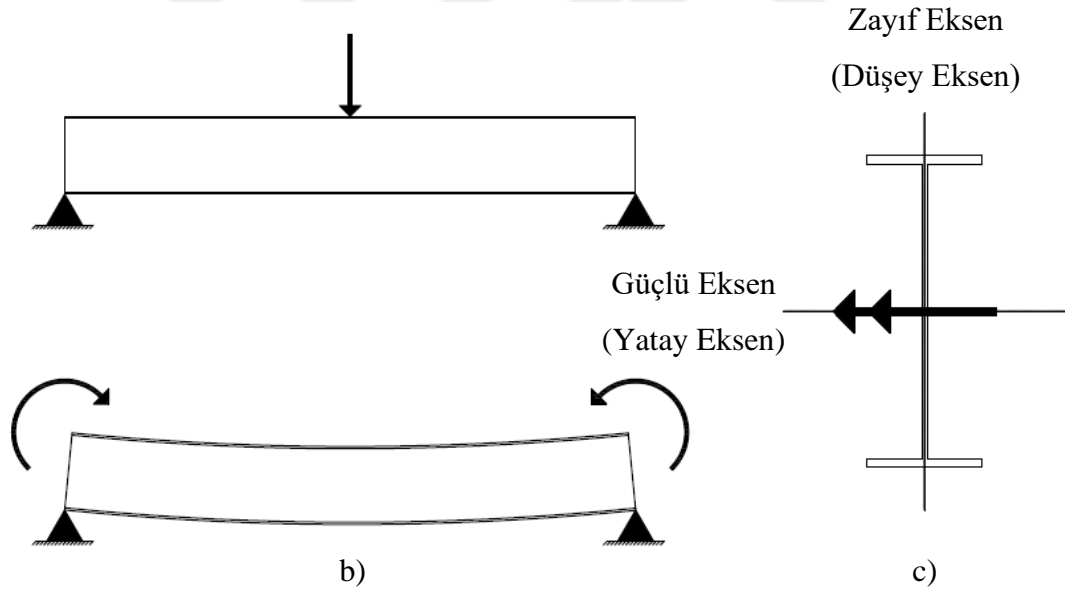
Bu çalışma için kullanılan yöntemde gövde narinlikleri yüksek ve başlıkları kompakt olan gövde kesitinde buruşma oluşması muhtemel enkesitlere sahip kirişler, kren yürüme yolu kirişi olarak modellenmiş, statik ve dinamik (kren'in çalışması esnasında ortaya çıkardığı demeraj, frenaj vb.) etkiler dikkate alınarak analizler gerçekleştirilmiştir. Karşılaştırma yapmak amacıyla buruşma ihtimalinin düşük olduğu tıknaz kesite sahip kiriş kesitleri üzerinde de benzer analizler gerçekleştirilmiş, elde edilen veriler sonuçlar ve tartışma kısmında değerlendirilmiştir.

## BÖLÜM 2

### KİRİŞLERDE BURKULMA DAVRANIŞLARI

#### 2.1. YANAL BURULMALI BURKULMA

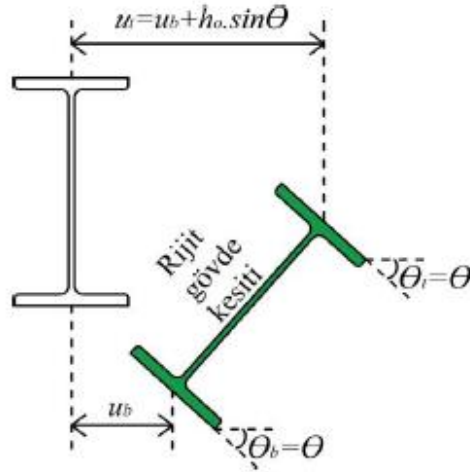
Kirişler, yapı taşıyıcı sisteminde, döşeme elemanlarından aktarılan düşey yükleri taşımak ve kolonlara bu yükleri aktarmak üzere teşkil edilen elemanlardır. Yapı taşıyıcı sistemindeki görevleri gereği genellikle düşey yüklere maruz kaldıklarından dolayı kesitleri düşey yöndeki ataleti daha güçlü olacak şekilde tasarlanır. Bu durum kirişlerin, güçlü eksenini (yatay eksen) etrafında eğilmeye zorlanması davranışını ortaya çıkartır.



Şekil 2.1. Eğilme durumu; (a) Eğilme kuvveti (b) Eğilme momenti (c) Eğilme momentinin kesit üzerinde gösterimi.

Eğilme davranışını gösteren bir kirişin zayıf eksenini (düşey eksen) etrafındaki dönüşünü engelleyecek bir önlem alınmadıysa yani kiriş yanal olarak tutulmuş değilse bu durumda kiriş eğilme davranışını gerçekleştirirken zayıf eksen etrafında dönüş gerçekleştirir. Bu bileşik etkiye yani güçlü eksen etrafındaki eğilme ve zayıf eksen etrafındaki dönüş sonucunda, “Yanal Burulmalı Burkulma (YBB)” davranışı ortaya çıkar.

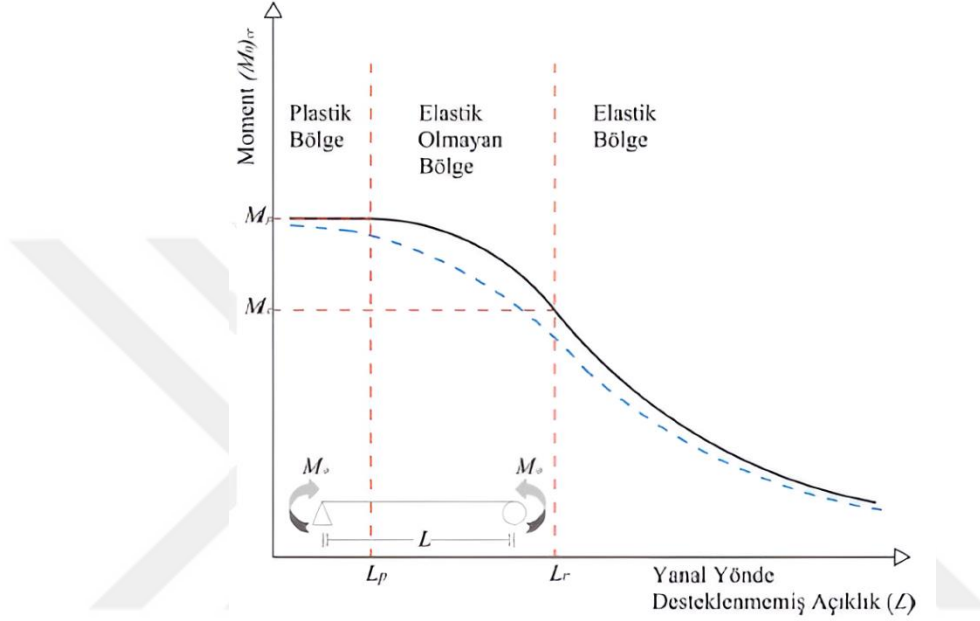
Daha teknik bir tanımla “YBB”, asal eksenleri etrafında eğilmeye maruz kalmış serbest bir kirişin, üst başlığında basınç gerilmeleri, alt başlığında ise çekme gerilmeleri oluşmasıyla kararsız durumda kalarak zayıf eksen etrafında dönüş gerçekleştirir ve yanal olarak deplase olmasıdır [6].



Şekil 2.2. I Kesitli bir kirişin YBB davranışının kesit görünüşü ile deforme olmuş hali [29].

Yanal deplasman ve dönüşün bileşik etkisi olarak gözlemlenen bu şekil değiştirmeler yapı kullanılabilirliği için bir sınır durumdur. Yanal burulmalı burkulma, yanal harekete serbest açıklığı kısaltacak şekilde yerleştirilen mesnetlerle veya burulma rijitliği yüksek kesitlerin kullanımıyla önlenir. Yanal burkulma dayanımını etkileyen en önemli değişkenler, yanal mesnetler arasındaki mesafe ve enkesit geometrisidir. Yükün şekli ve yeri, yapının sınır koşulları, malzeme özellikleri, artık gerilmeler, geometrik önkusurlar ve enkesitteki süreksizlikler de yanal burulma dayanımını etkilemektedir.

Çelik kirişlerde YBB davranışı üç bölgede incelenmektedir; plastik, elastik olmayan ve elastik bölge. Elemanın eğilme davranışı altında yanal olarak tutulu olmayan serbest açıklığı; elastik, elastik olmayan veya plastik burkulma davranışını belirlemektedir. Moment taşıma kapasitesinin yanal yönde kirişin serbest açıklığına göre değişimi Şekil 2.3'te gösterilmiştir [29].



Şekil 2.3. Kiriş davranışının kirişin yanal yönde desteklenmemiş açıklığına göre değişimi [29].

Şekilde görülen kalın çizgi, kusursuz geometrideki basit mesnetli kiriş için kritik yük değerlerini; kesikli çizgi ise kirişte var olan geometrik ön kusurun var olması ile ortaya çıkan davranışı temsil etmektedir. Bu davranış üç bölgede incelenebilir.

- Özellikle yanal yönde serbest boyu uzun kirişlerde etkin olan, elastik burkulma,
- Kirişte belli bölgelerde akma sınır durumuna ulaşıldığı ve stabilite kayıplarının görüldüğü inelastik burkulma,
- Elemanın plastik moment kapasitesine ulaştıktan sonra burkulmanın gerçekleştiği plastik burkulma.

Türkiye Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapımına Dair Esaslar (ÇYTHYEDY) yönetmeliği [30], YBB davranışının, elemanın yanal olarak desteklenmeyen uzunluğuna ( $L_b$ ) göre hesaplanan elastik, inelastik ve plastik bölge sınır uzunluklarını ( $L_p$  ve  $L_r$ ) tanımlamaktadır. Bu sınır uzunlukların çift simetri eksenli I kesitler için hesaplandığı formüller 2.1 ve 2.2 eşitlikleri ile gösterilmektedir.

$$L_p = 1,76i_y \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (2.1)$$

$$L_r = 1,95i_{ts} \frac{E}{0,7F_y} \sqrt{\frac{Jc}{W_{ex}h_o} + \sqrt{\left(\frac{Jc}{W_{ex}h_o}\right)^2 + 6,76 \left(\frac{0,7F_y}{E}\right)^2}} \quad (2.2)$$

Bu ifadelerde yer alan “c” katsayısını, I enkesitli elemanlar için “1” olarak tanımlayan ÇYTHYEDY,  $i_{ts}$ , “etkin atalet yarıçapı”nı aşağıda yer alan 2.3 eşitliği ile tanımlamaktadır;

$$i_{ts}^2 = \frac{\sqrt{I_y C_w}}{W_{ex}} \quad (2.3)$$

1.1, 1.2 ve 1.3 eşitliklerinde yer alan;

$F_y$  : Yapısal çelik karakteristik akma gerilmesini,

$W_{ex}$  : x ekseninde etrafında elastik mukavemet momentini,

$E$  : Yapısal çelik elastisite modülünü (200000 MPa),

$I_y$  : y ekseninde etrafında atalet momentini,

$L_p$  : Akma sınır durumu için yanal olarak desteklenmeyen sınır uzunluğunu,

$L_r$  : Elastik olmayan yanal burulmalı burkulma sınır uzunluğunu,

$i_y$  : y eksenine göre atalet yarıçapını,

$i_{ts}$  : Etkin atalet yarıçapını,

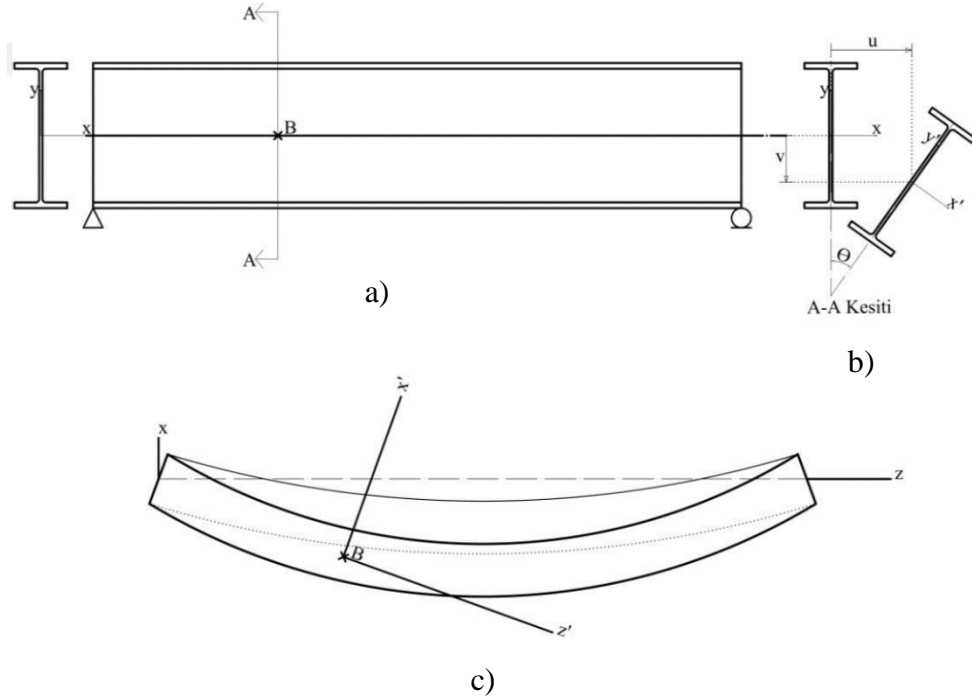
$J$  : Burulma sabitini,

$C_w$  : Çarpılma sabitini,

$h_o$  : Enkesit başlıklarının ağırlık merkezleri arasındaki uzaklığı ifade etmektedir.

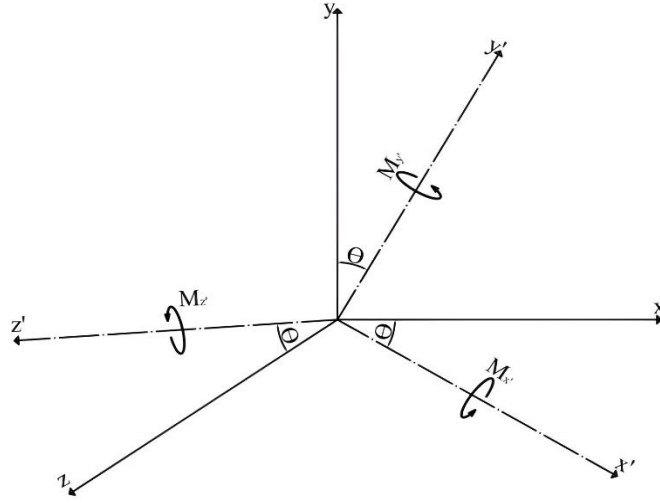
### 2.1.1. Elastik Yanal Burulmalı Burkulma

Geometrik kusuru olmayan ve teoriye göre en doğru nokta olan gövde düzleminde yükleme yapılan ideal durumda stabilite kaybının başladığı sınır yük değeri, elastik burkulma yüküdür [31]. Şekil 2.4'te, kuvvetli eksenini etrafında düzgün yayılı moment etkisinde, çift simetri eksenli I kesite sahip, yanal yönde desteklenmemiş uzunluğu  $L$  olan mesnet bölgelerinde ise yanal hareketi tutulu çelik kiriş gösterilmiştir.



Şekil 2.4. I kesitli bir kirişin sabit moment altındaki davranışı; (a) Yükleme öncesi en ve boy kesit (b) Yükleme sonrası en kesit; (c) boy kesit görünüşü [29]

Yukarıdaki şekilde de görüldüğü üzere kiriş sabit moment ( $M_0$ ) altında eğilmeye maruz kalarak burkulma davranışı göstermektedir. Kiriş kesitinin yükleme öncesi asal eksenleri  $x$ ,  $y$  ve  $z$  iken yükleme sonrasında  $\theta$  açısı kadar dönerek kesitin asal eksenleri  $x'$ ,  $y'$  ve  $z'$  olmuştur. Bu durumda Şekil 2.5'te gösterilen  $M'_x$ ,  $M'_y$  ve  $M'_z$  moment bileşenleri oluşmaktadır.



Şekil 2.5.  $\theta$  açısı kadar dönen asal eksenler üzerindeki moment bileşenleri.

Şekil 2.5'ten de görüldüğü üzere kiriş,  $x' - z'$  ve  $y' - z'$  düzlemlerinde eğilmeye;  $z'$  eksenini etrafında da dönmeye maruz kalmaktadır.

2.4, 2.5, 2.6 ve 2.7 eşitliklerinde çift simetri eksensli bir I kesitli kirişin burulma davranışı tanımlanmıştır [32];

$$EI_x \frac{d^2v}{dz^2} = M_{x,F} = M_0 \quad (2.4)$$

$$EI_y \frac{d^2u}{dz^2} = M_{y,F} = M_0 \theta \quad (2.5)$$

$$M_{z,F} = GJ \frac{d\theta}{dz} - EC_w \frac{d^3\theta}{dz^3} \quad (2.6)$$

$$M_{z,F} = - \frac{du}{dz} M_0 \quad (2.7)$$

$M_0$  değeri, kirişe açıklığı boyunca uygulanan sabir bir momenti ifade ettiğinden 2.7 denklemindeki burulma bileşeni  $M_z$  'nin değeri yerine yazıldığında kirişin burulma davranışını veren 2.8 denklemi elde edilir.

$$- \frac{du}{dz} M_0 = GJ \frac{d\theta}{dz} - EC_w \frac{d^3\theta}{dz^3} \quad (2.8)$$

Eşitlik 3.4 ve 3.5'te ötelenme ve dönme deformasyonlarının çok küçük olduğu varsayılarak durum incelendiğinde dönüş sonrası oluşan eksen takımına göre atalet momenti değerleri  $I'_x$  ve  $I'_y$  ifadeleri, kesitin dönüş gerçekleşmeden önceki eksen takımına göre atalet momenti değerlerine ( $I_x$  ve  $I_y$ ) eşit olarak kabul edilebilir. Bu durumda,  $I_x$  değerinin  $I_y$  değerinden çok daha büyük olduğu söylenebilir. Bu durumda kesitin gerçekleştirdiği yanal deplasman ( $u$ ); sehim ( $v$ ) ve dönme açısı ( $\theta$ ) ifadelerinden bağımsızdır. Kesitin yapacağı sehim ( $v$ ), burulma sırasında oluşan dönme miktarını ( $\theta$ ) etkilemez. Eşitlik 3.8'in  $z$ 'ye göre türevi alındığında Eşitlik 3.9 elde edilir.

$$-\frac{d^2u}{dz^2}M_0 = GJ\frac{d^2\theta}{dz^2} - EC_w\frac{d^4\theta}{dz^4} \quad (2.9)$$

2.5 denklemindeki  $\frac{d^2u}{dz^2} = \frac{M_0\theta}{EI_y}$  ifadesi, 2.9 denkleminde yerine yazılırsa dönme açısı  $\theta$  için diferansiyel denklem 2.10 elde edilir;

$$EC_w\frac{d^4\theta}{dz^4} - GJ\frac{d^2\theta}{dz^2} - \frac{M_0^2\theta}{EI_y} = 0 \quad (2.10)$$

2.10 denkleminin çözümlenmesinde kullanılmak üzere  $\alpha$  ve  $\beta$  değişkenlerini elde etmek üzere 2.10 denkleminde yer alan ifadeler  $EI_w$ ' ye bölünür.

$$2\alpha = \frac{GJ}{EI_w} \quad (2.11)$$

$$\beta = \frac{M_0^2}{E^2I_wI_y} \quad (2.12)$$

Bu durumda 2.10 denklemini, 2.13 denklemine dönüşmektedir.

$$\frac{d^4\theta}{dz^4} - 2\alpha\frac{d^2\theta}{dz^2} - \beta\theta = 0 \quad (2.13)$$

$\theta$  ifadesi için denklem 2.14'teki tahmin yapılarak denklem 2.13'te yerine konular ardından ikinci ve dördüncü dereceden türevleri alınarak;

$$\theta = Ae^{mz} \quad (2.14)$$

$$\frac{d^2\theta}{dz^2} = A m^2 e^{mz} \quad (2.15)$$

$$\frac{d^4\theta}{dz^4} = A m^4 e^{mz} \quad (2.16)$$

$$Ae^{mz} = (m^4 - 2\alpha m^2 - \beta) = 0 \quad (2.17)$$

Elde edilen 2.17 denkleminde yer alan ifadelerden;  $e^{mz}$  ve burulma gözlemlenen bir elemandaki A değerinin sıfıra eşit olması mümkün olmadığından 2.17 denkleminde yer alan  $(m^4 - 2\alpha m^2 - \beta)$  ifade sıfıra eşit olmalıdır. (A değerinin sıfır olması elemanda burkulma olmadığını gösterdiğinden aranan çözüm değildir.)

$$(m^4 - 2\alpha m^2 - \beta) = 0 \quad (2.18)$$

$$m^2 = \alpha \pm \sqrt{\beta + \alpha^2} \quad (2.19)$$

$$m = \pm \sqrt{\alpha \pm \sqrt{\beta + \alpha^2}} \quad (2.20)$$

$\sqrt{\beta + \alpha^2}$  ifadesinin  $\alpha$  değerinden büyük olacağı aşikardır. Bu sebeple 2.20 denklemindeki  $m$  ifadesinin iki reel ve iki kompleks bileşeni olacağı görülmektedir.

$$n^2 = \alpha \pm \sqrt{\beta + \alpha^2} \quad (\text{Reel kökler}) \quad (2.21)$$

$$q^2 = -\alpha \pm \sqrt{\beta + \alpha^2} \quad (\text{Kompleks kökler}) \quad (2.22)$$

$m$  ifadesi için elde edilen 4 adet kök değeri kullanılarak 2.14, 2.15 ve 2.16 denklemlerinden elemanın eğilme açısı ifadesi  $\theta$ , 2.23 denklemindeki gibi elde edilir.

$$\theta = A_1 e^{nz} + A_2 e^{-nz} + A_3 e^{iqz} + A_4 e^{-iqz} \quad (2.23)$$

Matematik teorilerine göre karmaşık üstel fonksiyonların, trigonometrik fonksiyon olarak ifade edilebildiği bilinmektedir. Bu durumda 2.24 ve 2.25 denklemleri aşağıdaki gibi elde edilecektir.

$$e^{iqz} = \cos qz + i \sin qz \quad (2.24)$$

$$e^{-iqz} = \cos qz - i \sin qz \quad (2.25)$$

2.24 ve 2.25 denklemleri kullanılarak  $A_3$  ve  $A_4$  sabitleri sırasıyla  $(A_3 + A_4)$  ve  $(A_3 i + A_4 i)$  şeklinde yeniden tanımlanırsa denklem 2.26 elde edilecektir.

$$\theta = A_1 e^{nz} + A_2 e^{-nz} + A_3 \cos qz + A_4 \sin qz \quad (2.26)$$

$A_1$  ve  $A_4$  sabitleri, uç mesnet koşulları ile elde edilebilir. Basit burulmanın gerçekleştiği durumda eleman uçlarında burulma değeri sıfır olacaktır ancak çarpılmanın serbest bırakıldığı mesnet koşulları için,

$$\theta = 0 \quad , \quad \frac{d^2\theta}{dz^2} = 0$$

olarak elde edilir.  $\theta = 0$  için  $z = 0$  eşitliği denklem 2.26'da yerine konulursa 2.27 denklemini elde edilir.

$$0 = A_1 + A_2 + A_3 \quad (2.27)$$

Ayrıca,  $d^2\theta/dz^2 = 0$  için  $z = 0$  eşitliği denklem 2.26'da yerine konulursa 2.28 denklemini elde edilir.

$$0 = A_1 n^2 + A_2 n^2 - A_3 q^2 \quad (2.28)$$

Denklem 2.27' deki ifadeler  $n^2$  ile çarpılıp 3.28 denkleminde çıkarıldığında denklem 2.29 elde edilir.

$$0 = A_3(q^2 + n^2) \quad (2.29)$$

Bu ifadedeki  $q^2 + n^2$  ifadesi sıfırdan farklı bir değer alacağından dolayı  $A_3 = 0$  olarak elde edilir. Bu durumda  $A_3$ 'ün değeri denklem 2.27'de yerine yazılırsa 2.30 denklemi elde edilir.

$$A_1 = -A_2 \quad (2.30)$$

2.30 denklemindeki ilişki 2.26 denkleminde yerine yazılırsa,

$$\theta = A_1(e^{nz} - e^{-nz}) + A_4 \sin qz \quad (2.31)$$

$$\theta = 2A_1 \sinh nz + A_4 \sin qz \quad (2.32)$$

Denklem 2.32'de  $Z = L$  için  $\theta = 0$  yerine yazılırsa denklem 2.33 elde edilir.

$$0 = 2A_1 \sinh nL + A_4 \sin qL \quad (2.33)$$

Denklem 2.33'de  $Z = L$  için  $d^2\theta/dz^2 = 0$  yerine yazılırsa denklem 2.34 elde edilir.

$$\theta = 2A_1 n^2 \sinh nL + A_4 q^2 \sin qL \quad (2.34)$$

Denklem 2.33,  $q^2$  ile çarpılır ve denklem 2.34 ile toplanırsa 2.35 denklemi elde edilir.

$$2A_1(n^2 + q^2) \sinh nL = 0 \quad (2.35)$$

Denklem 2.35'te yer alan ifadelerden sadece  $n$  ifadesi 0 olursa 0'a eşit olabilir.  $n$  ifadesinin 0 olması durumunda ise  $(n^2 + q^2)$  ifadesi sıfır olamayacağından dolayı  $A_1$  değeri 0 olacaktır.

Yapılan işlemler sonucunda  $A_1 = -A_2 = 0$  eşitliği elde edildiğine göre dönme açısı  $\theta$  2.36 denklemindeki gibi elde edilebilir.

$$\theta = A_4 \sin qL = 0 \quad (2.36)$$

Yanal burulmalı burkulma durumunun bulunduğu elemanlar için  $A_4$  değeri de 0 olamaz. Bu sebeple  $\sin qL$  değeri 0 olmalıdır. Böylece  $N$  herhangi bir tamsayı olmak koşulu ile denklem 2.37 elde edilir.

$$qL = N\pi \quad (2.37)$$

Denklem 2.37' den burkulma koşulunun tanımı elde edilir.

$$q = \frac{N\pi}{L} \quad (2.38)$$

$N = 1$  olması durumu temel burkulma şeklini ifade etmektedir. 2.38 denklemindeki eşitliği sağlayan  $M_0$  değeri kritik moment olarak ifade edilmektedir. Burada  $q$  değişkeninin değeri denklem 2.22' de yerine konulduğunda 2.39 denklemini elde edilir.

$$q = \sqrt{-a + \sqrt{\beta + a^2}} = \frac{\pi}{L} \quad (2.39)$$

Denklem 2.39' da eşitliğin her iki tarafının karesi alınır,  $a$  ve  $\beta$  değişkenlerinin denklem 2.11 ve 2.12'deki tanımları yerine yazılırsa,

$$-\frac{GJ}{2EI_w} + \sqrt{\frac{M_0^2}{E^2 I_w I_y} + \left(\frac{GJ}{2EI_w}\right)^2} = \frac{\pi^2}{L^2} \quad (2.40)$$

denklemleri elde edilir.

Denklem 2.40,  $M_0 = M_{cr}$  için çözümlenirse;

$$M_{cr}^2 = E^2 I_w I_y \left[ \left( \frac{\pi^2}{L^2} + \frac{GJ}{2EI_w} \right)^2 - \left( \frac{GJ}{2EI_w} \right)^2 \right] \quad (2.41)$$

$$M_{cr} = \sqrt{\frac{\pi^2 EI_y GJ}{L^2} + \frac{\pi^2 E^4}{L^4} I_w I_y} \quad (2.42)$$

Denklem 2.42'de  $\pi/L$  değeri karekök dışına alınırsa denklem sadeleşir ve 2.43 denklemleri elde edilir.

$$M_{cr} = \frac{\pi}{L} \sqrt{EI_y GJ + \frac{\pi^2 E^4}{L^2} I_w I_y} \quad (2.43)$$

Yanal yönde mesnetlenmemiş  $L$  açıklığı boyunca, gövde düzleminden etkiyen sabit moment altında çift simetri eksenli I kesitli bir kiriş elemanın, elastik yanal burulmalı burkulma dayanımını ifade eden eşitlik en nihayetinde denklem 2.43 ile elde edilmiştir.

### 2.1.2. Elastik Olmayan Yanal Burulmalı Burkulma

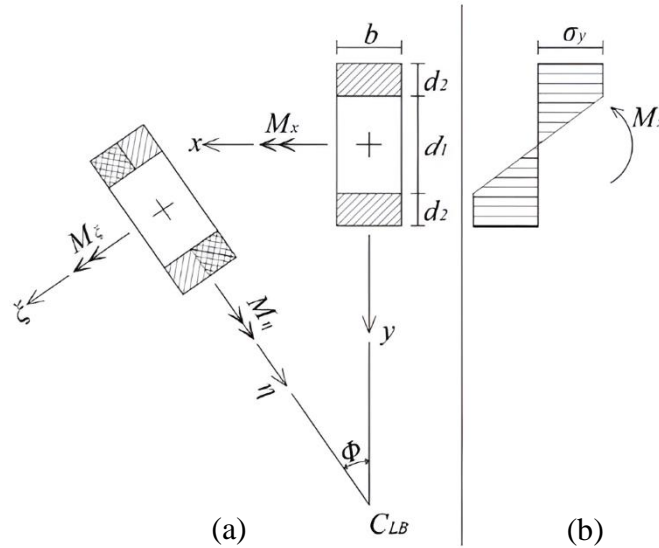
Eleman eğilme zorlanması altında iken açıklanan YBB davranışını göstereceği esnada YBB meydana gelmeden önce kiriş elemanının tarafsız eksene göre en çok zorlanan liflerinin uğradığı deformasyon ( $\varepsilon$ ), kiriş elemanının teşkil edildiği malzeme için tanımlanmış karakteristik akma birim şekil değiştirme ( $\varepsilon_y$ ) değerini aştığı burkulma davranışına Elastik Olmayan Yanal Burulmalı Burkulma adı verilir. Elastik YBB durumunda elde edilen formüller, elastik olmayan YBB durumu için geçerliliğini yitirecektir [29].

Elastik davranışın dışına çıktığı için malzemenin elastisite modülüne bağlı ifade edilen burkulma rijitliği azalır ve elemanın burkulma dayanımında düşüş gözlemlenir. Kiriş elemanın davranış sırasında talep ettiği birim deformasyon ne kadar fazla olursa kesitin, burkulma davranış türleri ile ilgili hesaplanan narinlik oranları o kadar düşük olmalıdır. Malzemede akmanın gerçekleşmesi durumunda elastik burkulma momenti dayanımını belirleyen parametreler;

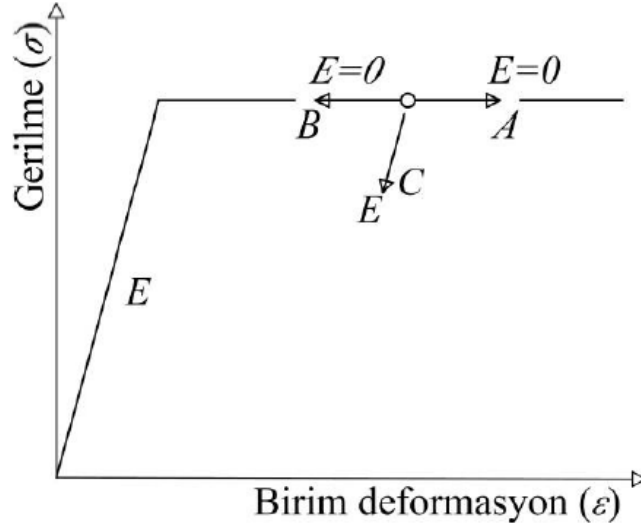
- y eksenine (güçlü eksene) göre eğilme rijitliği ( $B_y$ ),
- Çarpılma rijitliği ( $I_w$ ),
- St. Venant burulma sabiti ( $J$ ),

azalacağından dolayı kesitin davranışı elastik olmayan bölgeye geçtiğinden yanıl burulmalı burkulmaya uğrama ihtimali, elastik bölgedekinden daha fazladır [33].

Başlangıç anında dönme açısı sıfır ( $\theta = 0$ ) ve Şekil 2.6'da verilen gerilme-birim deformasyon eğrisine sahip malzemenen yapıldığı varsayılan dikdörtgen kesitli kirişin, şekil 2.6 (a)'da kesit çizimi verilmiştir. Bu kiriş sabit bir  $M_x$  momentine maruz kalması durumunda enkesit düzleminde oluşacak gerilme dağılımı şekil 2.6(b)'da verilmiştir.



Şekil 2.6. Burkulma davranışı öncesi ve sonrası akma durumu.



Şekil 2.7. Yükleme ve yüklemenin kaldırılması durumunda oluşan gerilme-birim şekil değiştirme grafiği.

## 2.2.YANAL BURUŞMALI BURKULMA (YBŞB)

Düşey yüklemeler altında eğilmeye çalışan bir kiriş kesitinin başlıklarının yeterli dayanımı gösterebilecek kadar kalın olduğu durumlarda gövde narinliği ön plana çıkar. Kesitlerde gövde narinliği etkin olduğunda gövdede lokal burkulmalar meydana gelir ve rijitliğini kaybeder. Bu durum gövde buruşmalarını ortaya çıkartır. Kiriş yüklemesi esnasında ortaya çıkan lokal gövde burkulmaları ile yanal burulmalı burkulma davranışlarının yarı dalga boyu terimleri aynı olduğunda elemanın göçme tipi YBŞB olarak gözlenmektedir [34].

YBŞB davranışı, kiriş kesitinde meydana gelen gövde lokal burkulmaları ve yanal deplasmanlardan dolayı ortaya çıkan deformasyonlardır. Literatürde yerini YBŞB olarak alan bu göçme şekli YBB ve gövde lokal burkulmalarının bileşik etkisi olarak tanımlanmaktadır.

### 2.2.1. Elastik Yanal Buruşmalı Burkulma

Günümüzde gelişmeye devam eden sonlu elemanlar metodunu kullanan yapısal analiz programları sayesinde yapı elemanlarının ve hatta yapıların tamamının yükler

altındaki gösterdiği davranışın ve hatta bu davranışlara karşı dayanımlarının tespitine kadar birçok analiz yapılabilmektedir. Bu olanakların kullanılabilir hale geldiği yıllara kadar ise YBŞB davranışını açıklığa kavuşturacak netlikte çalışmalar yapılamamıştır. Bu sebeple, YBB ve lokal burkulma davranışlarının literatür bakımında mazisi daha eski iken YBŞB literatürde son 50 yıl civarında geliştirilmeye başlanmış bir konudur [29]. 1976 yılında Cheung'un [35] yapmış olduğu çalışmalar neticesinde yazdığı kitapta önerilen ince gövde kesitine sahip orta uzunlukta açıklıklı kirişler için yarı analitik sonlu şerit yöntemi Hancock [36] tarafından 1978 yılında açıklanmıştır. Hancock [36], önerdiği bağıntılar için bir şart koşturmuştur. Bu şart, açıklanan yöntemin, sabit eğilme altında basit mesnetli tek tip elemanlara uygulanabilmesidir.

Pi ve Trahair [37], yaptıkları çalışmada, elastik YBŞB momentini ( $M_{ed}$ ) aşağıda yer alan denklem 2.44 ile hesaplamışlardır.

$$M_{ed} = \frac{C\pi}{L} \sqrt{EI_y G_e (1 + W^2)} \quad (2.44)$$

Denklem 2.44'te yer alan  $W$  ifadesi Denklem 2.45'te yer alan eşitlik kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$W = \frac{\pi}{L} \sqrt{\frac{EI_{we}}{GJ_e}} \quad (2.45)$$

Denklem 2.45'te yer alan;

$GJ_e$  : Azaltılmış burulma rijitliği,  
 $EI_{we}$  : Azaltılmış çarpılma rijitliği,  
değerlerini ifade etmektedir.

Azaltılmış burulma rijitliği ifadesi ( $GJ_e$ ), yapılan çalışmada [38] , Pi ve Trahair [39]'ın çalışması referans gösterilerek çift simetri eksenli I kesitli kirişler için denklem 2.46'daki gibi açıklanmıştır.

$$GJ_e = \frac{(2GJ_f)(12D_wL^2/\pi^2h)}{(2GJ_f)+(12D_wL^2/\pi^2h)} \quad (2.46)$$

Eşitlik 2.46' da yer alan;

$GJ_f$  : Başlık kesiti burulma rijitliğini,

$h$  : Kiriş derinliğini,

$t_w$  : Gövde kesiti kalınlığını,

$E$  : Çeliğin elastisite modülünü,

$\nu$  : Çeliğin poisson oranını,

ifade etmektedir. Denklem 2.46'da yer alan  $D_w$  ifadesi Denklem 2.47'den hesaplanmaktadır.

$$D_w = \frac{Et_w^3}{12(1-\nu^2)} \quad (2.47)$$

Denklem 2.46, kesitin gövde ve başlık kalınlıkları için hesaplanan narinlik oranlarına göre Denklem 2.48' deki şekliyle de yazılabilir.

$$GJ_e = \frac{t_f^4}{\frac{3}{4b_f/2t_f} + \frac{1}{E} + \frac{\pi^2(1-\nu^2)h}{t_w} \frac{(2t_f)^2}{t_w} \frac{1}{(L/t_f)^2}} \quad (2.48)$$

Denklem 2.48'de;

$b_f$  : Başlık genişliğini,

$t_f$  : Başlık kalınlığını,

ifade etmektedir.

Denklem 2.48'den görüldüğü üzere azaltılmış burulma rijitliği ( $GJ_e$ ) değerini artıran 3 durum vardır;

- Gövde narinliği ( $h/t_w$ ) oranının azalması
- Başlık ve gövde kalınlığı ( $t_f/t_w$ ) oranının azalması,

- Başlık narinliği ( $2b_f/t_f$ ) oranının artması.

Yine aynı şekilde Pi ve Trahair [39] çalışması referans alınarak yapılan çalışmada [38], çift simetri eksenli I kesitli kiriş elemanların azaltılmış çarpılma rijitliği ( $EI_{we}$ ) değerinin denklem 2.49'dan hesaplandığı belirtilmiştir.

$$EI_{we} = \frac{EI_w}{1+r_f^3(d/12L)(1+b_f/d)} \quad (2.49)$$

Denklem 2.49'da yer alan  $r_w$  ifadesi  $r_w = \min(t_f/t_w, 2)$ 'dir.  $r_w$  ifadesi denklem 2.49'da yerine yazıldığında denklem 2.50'deki şekliyle yazılabilir.

$$\frac{EI_{we}}{EI_w} = \frac{1}{1+\frac{1}{12}\left(\frac{h}{t_w}\right)\frac{1}{(L/t_w)}\left[\left(\frac{t_f}{t_w}\right)^3 + \frac{GJ_f}{GJ_w}\right]} \quad (2.50)$$

Denlem 2.50'de,  $EI_{we}/EI_w$  oranı yani gövde buruşmalarından kaynaklanan çarpılma rijitliğindeki azalma ifadesinin,

- Gövde narinliği ( $h/t_w$ )
- Başlık kesiti kalınlığının gövde kesiti kalınlığına oranı ( $t_f/t_w$ ),
- Başlık burulma rijitliğinin gövde burulma rijitliğine oranı ( $GJ_f/GJ_w$ ),

ifadeleri küçük değerlere yaklaştıkça, artarak bire yaklaştığını göstermektedir. Avustralya'da kullanılmakta olan AS4100 [40] çelik yapılar yönetmeliğinde, çelik bir kirişin elastik ve elastik olmayan bölgedeki burkulma dayanımı Denklem 2.51'de gösterildiği şekilde basit bir eğri ile tanımlanmaktadır.

$$M_{crb} = 0.6M_p \left[ \sqrt{\lambda_b^4 + 3} - \lambda_b^2 \right] \leq M_p \quad (2.51)$$

Denklem 2.51' de yer alan  $\lambda_b$  ifadesi YBB faktörü olarak tanımlanmaktadır ve  $\lambda_b = \sqrt{M_y/M_{eb}}$  eşitliği ile hesaplanmaktadır. Denklem 2.51'de yer alan;

$M_{crb}$  : YBB sınır durumundaki kritik momenti,

$M_y$  : Kesitin akma momentini,

$M_p$  : Kesitin plastik momentini,

ifade etmektedir.

Bradford [34], yaptığı çalışmalar ve incelediği araştırmalar sonucunda, YBŞB dayanımı ile YBŞB faktörü ( $\lambda_d$ ) arasındaki ilişkinin, YBB dayanımı ile YBB faktörü arasındaki ilişkiye çok benzer olduğunu belirtmiştir.

Kalkan ve Büyükkaragöz [38], yaptıkları çalışmada, Bradford[34]'un çalışmasını da baz alarak AS4100 yönetmeliğinde yer alan denklem 2.51 eşitliğini, gövde buruşmalarının sebep olduğu burulma ve çarpılma rijitliği dayanımlarındaki azalmayı da dikkate alan denklem 2.52'deki eşitliği önermiştir.

$$M_{crd} = 0.6M_p \left[ \sqrt{\lambda_d^4 + 3} - \lambda_d^2 \right] \leq M_p \quad (2.52)$$

Burada  $M_{crd}$ ; YBŞB sınır durumunda kesitin kritik moment değerini ifade etmektedir. Denklem 2.52'de yer alan  $\lambda_b$  ifadesi, YBŞB faktörü olarak tanımlanmaktadır ve  $\lambda_b = \sqrt{M_y/M_{eb}}$  eşitliği ile hesaplanmaktadır.

### 2.2.2. Elastik Olmayan Yanal Buruşmalı Burkulma

Elastik olmayan davranış, burkulma davranışı esnasında kesitin akma göstermesi sonucunda ortaya çıkar. Narin gövde kesitli ve/veya kompakt başlıklı kiriş elemanlarda, YBB davranışı görüldüğü sırada gövdede oluşan lokal burkulmalar birlikte etkileşime girerek kiriş gövdesinde akma sınır durumunun aşılmasına ve gövde üzerinde buruşma davranışına neden olabilmektedir. Kesitin YBŞB davranışı göstermesinde akma durumunun çok önemli bir yeri vardır. Bu da gösteriyor ki elemanın YBŞB davranışı göstermesi ihtimali, elastik olmayan davranışın gözlemlendiği bölgede, elastik bölgedekinden daha yüksektir.

Nethercot ve Trahair [41]'in yaptıkları çalışma ile Bradford [42]'in yaptığı çalışmada elemanın YBB davranışı için var olan dayanım, elastik burkulma ve akma kavramları arasındaki etkileşimlerin, YBŞB davranışı için farklı olup olmadığını incelemiştir. Bradford [43], yaptığı başka bir çalışmada, enerji yöntemini kullanarak tek simetri eksenine sahip kiriş elemanlar üzerinde inelastik YBŞB davranışını incelemiştir. Kiriş boyunun azalması ile elastik buruşmalı burkulma ve yanal burkulma çözümlerinin birbiriyle uyumsuz bir hal aldığını belirtmiştir.

Nethercot ve Trahair [41]'in elastik olmayan YBB davranışı için kritik burkulma dayanımının hesaplanmasında kullanılmak üzere önerdiği denklem 2.53, 2.54 ve 2.55 eşitliklerini baz alarak Kalkan ve Büyükkaragöz [38], çalışmalarında; elastik olmayan bölgede YBŞB davranışının, kesitte ortaya çıkan akma nedeniyle, kesit burulma ( $GJ$ ) ve çarpılma ( $EI_w$ ) rijitlikleri yerine azaltılmış burulma ( $GJ_e$ ) ve çarpılma ( $EI_{we}$ ) rijitliklerinin kullanıldığı denklem 2.56 ve 2.57'yi önermişlerdir. Azaltılmış burulma ( $GJ_e$ ) ve çarpılma ( $EI_{we}$ ) rijitlikleri sırasıyla denklem 2.48 ve 2.49'dan hesaplanmaktadır.

$$M_{ib} = M_p \left[ 0.7 + \frac{0.3 \left[ 1 - 0.7 \frac{M_p}{a_m M_{ob}} \right]}{0.61 - 0.3 \beta_m + 0.07 \beta_m^2} \right] \leq \min(a_m M_{ob}, M_p) \quad (2.53)$$

Denklem 2.53'te;

$M_{ib}$  : Elastik olmayan YBB momentini,

$\beta_m$  : Yanal yönde desteklenmemiş serbest açıklığın uç momentlere oranını,

$a_m$  : moment düzeltme faktörünü,

ifade etmektedir.

$$a_m = 1.75 + 1.05 \beta_m + 0.3 \beta_m^2 \leq 2.56 \quad (2.54)$$

Denklem 2.53'te yer alan  $M_{ob}$  değeri, yanal yönde desteklenmemiş serbest açıklıkta elemana etkiyen sabit eğilme momenti durumunda referans YBB momenti değerini ifade etmektedir ve denklem 2.55'ten hesaplanmaktadır.

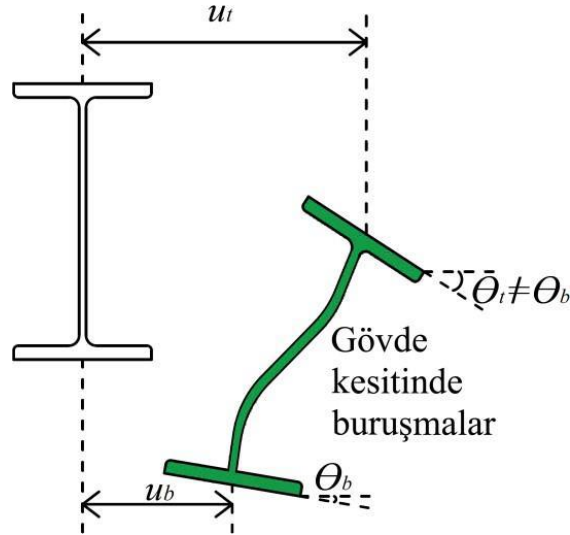
$$M_{ob} = \frac{\pi}{L_b} \sqrt{EI_y \left( GJ + \frac{\pi^2 EI_w}{L_b^2} \right)} \quad (2.55)$$

Kalkan ve Büyükkaragöz [38], inelastik YBŞB davranışı için azaltılmış burulma ( $GJ_e$ ) ve çarpılma ( $EI_{we}$ ) rijitliklerini kullanarak denklem 2.56 ve 2.57'yi önermektedir.

$$M_{id} = M_p \left[ 0.7 + \frac{0.3 \left[ 1 - 0.7 \frac{M_p}{a_m M_{od}} \right]}{0.61 - 0.3 \beta_m + 0.07 \beta_m^2} \right] \leq \min(a_m M_{od}, M_p) \quad (2.56)$$

$$M_{od} = \frac{\pi}{L_b} \sqrt{EI_y \left( GJ_e + \frac{\pi^2 EI_w}{L_b^2} \right)} \quad (2.57)$$

Yanal buruşmalı burkulma davranışını, kullanılan kesitin gövde narinliği büyük oranda etkilemektedir. Kuvvetli başlık/narin gövde yapılı en kesitlerde kirişin yanal deformasyonu YBB ve lokal burkulmaların beraber oluşmasına ve böylece YBŞB durumunun ortaya çıkmasına neden olabilmektedir. Şekil 2.8'de YBŞB davranışı kesit düzleminde gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Yanal buruşmalı burkulma [44].

### 2.3. YÖNETMELİKLER BAZINDA BURKULMA DAVRANIŞI

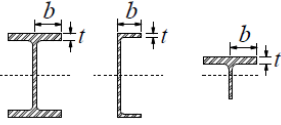
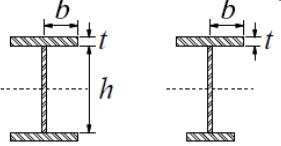
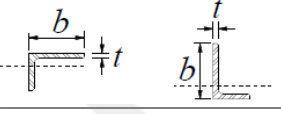
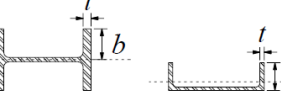
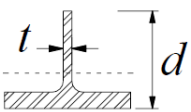
Dünya üzerinde çelik yapıların inşaa edildiği her ülkede bir yönetmelik veya şartname kullanılmaktadır. Bunlar ülkelere ait olabildiği gibi uluslararası geçerliliği olan yönetmelik, standart ve/veya şartnameler de olabilir. Yeri geldiğinde uluslararası geçerliliği bulunan yönetmeliklere, yeri geldiğinde yerel yönetmeliklere göre yapıların tasarımı gerçekleştirilebilir. Ülkemizde 2016 yılında yürürlüğe giren Türkiye Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapımına Dair Esaslar (ÇYTHYEDY) yönetmeliğinin çoğu kısmı Amerikan Çelik Yapı Tasarım Şartnamesinden (AISC 360-16) alınmıştır. Bu yönetmelikte yer alan yanal burulmalı burkulma tasarım koşulları literatürde yapılan çalışmalar ışığında hazırlanmıştır. Farklı sünelik koşullarına göre farklı tipte kesitler için YBB davranışına açıklık getirilen ÇYTHYEDY’de yanal buruşmalı burkulma davranışının yeteri kadar yer almadığı görülmektedir.

Önceki bölümlerdeki teorik yaklaşımların sonuçlarında elde edilen bağıntılardan da görüldüğü üzere YBŞB davranışının görülmesindeki en büyük etkenlerden birisi gövde narinliğidir. ÇYTHYEDY’de YBŞB ile ilgili yeterli tanımlar bulunmasa da bu çalışmada ÇYTHYEDY yönetmeliğinde yer alan kesitlerin, narinlik/kompaktlık tanımlarına değinilmesinin gerekliliği düşünülmüştür.

ÇYTHYEDY’de [30], eğilme momenti etkisi altında kesitlerin sınır durumlarını sınıflandırdığı 12 başlık bulunmaktadır. Tez konusu, güçlü eksen etrafında eğilmeye maruz kalan çift simetri eksenine sahip kompakt olacak şekilde seçilmiş I-Enkesitli elemanları içerdiğinden dolayı bu 12 başlık içerisinde sadece; “ÇYTHYEDY Bölüm 9.2: Kuvvetli Eksenleri Etrafında Eğilme Etkisindeki Kompakt U-Enkesitli ve Çift Simetri Eksenli Kompakt I-Enkesitli Elemanlar” bölümü incelenecektir.

I-Enkesitli elemanların eğilme momenti etkisinde burkulma davranışını inceleyen bölümlerden önce bu bölümlerde işlem yaparken kesitleri sınıflandıracığımız “ÇYTHYEDY Tablo 5.1B – Eğilme Momentinin Basınç Bileşeni Etkisindeki Enkesit Parçaları için Genişlik/Kalınlık Oranları” tablosunun rijitleştirilmemiş elemanlar için olan kısmı, Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1. ÇYTHYEDY Tablo 5.1B: Eğilme Momentinin Basınç Bileşeni Etkisindeki Enkesit Parçaları için Genişlik/Kalınlık Oranları (Rijitleştirilmemiş enkesitler için) [30].

Durum	Tanım	Genişlik/Kalınlık Oranı, $\lambda$	Genişlik/Kalınlık Oranı Sınır Değerleri		Enkesit	
			$\lambda_p$ (kompakt t/kompakt olmayan)	$\lambda_r$ (kompakt t olmayan/narin)		
10	Hadde I-profiller, U-profiller ve T-enkesitli eleman başlıkları	b/t	$0.38 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.00 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$		
Rijitleştirilmemiş Enkesit Parçaları	11	Tek ve çift simetri eksenli yapma I-enkesitli eleman başlıkları	b/t	$0.38 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$0.95 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	12	Tek korniyer kolları	b/t	$0.54 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$0.91 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	13	Zayıf eksen etrafında eğilme etkisinde tüm I-enkesitli elemanlar ve U-enkesitli profiller	b/t	$0.38 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.03 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	14	T-enkesitli eleman gövdeleri	b/t	$0.84 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.08 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	

ÇYTHYEDY, eğilme etkisindeki kompakt I-Enkesitli elemanlar için 2 sınır durum belirlemiştir;

- Akma Sınır Durumu,
- Yanal Burulmalı Burkulma Sınır Durumu.

Akma sınır durumu için elemanın karakteristik eğilme momenti dayanımı  $M_n$  kontrolü denklem 2.58 ile tanımlanmıştır.

$$M_n = M_p = F_y W_{px} \quad (2.58)$$

Denklem 2.58'de;

$M_n$  : Karakteristik eğilme momenti dayanımını,

$M_p$  : Plastik eğilme momenti dayanımını,

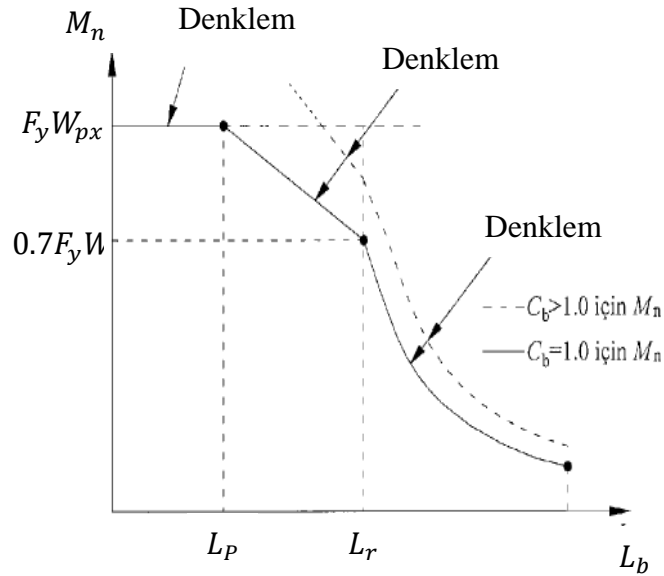
$F_y$  : Yapısal çelik karakteristik akma gerilmesini,

$W_{px}$  : Kuvvetli eksenetrafindaki plastik mukavemet momentini,

ifade etmektedir.

Yanal burulmalı burkulma (YBB) sınır durumu ise 3 farklı eğilme momenti tanımıyla açıklanmıştır. Elemanın basınç başlığının yanal olarak serbest uzunluğu  $L_b$ 'nin hesaplanacak değerine göre YBB davranışının bulunacağı bölge ve buna bağlı olarak da  $M_n$  değerinin hesabının değişeceği ifade edilmektedir.

Basınç başlığının yanal olarak serbest uzunluğu  $L_b$ 'nin değişimine göre  $M_n$  değerinin hesaplanacağı bağıntılar Şekil 2.9'da gösterilmiştir.



Şekil 2.9. Basınç başlığının yanal olarak serbest uzunluğuna göre karakteristik eğilme momentinin değişimi [30].

Şekil 2.9’da yer alan;

$L_p$  : Akma sınır durumu için yanal olarak desteklenmeyen sınır uzunluğu,

$L_r$  : Elastik olmayan YBB durumu için sınır uzunluğu,

$C_b$  : YBB durumunda moment düzeltme katsayısını,  
ifade etmektedir.

ÇYTHYEDY, eğilme momenti etkisindeki elemanlarda YBB davranışının görülmesi durumunda, yanal olarak desteklenmemiş uzunluk boyunca moment dağılımının olumlu etkisini azaltmak için kullanılan katsayıyı, *moment düzeltme katsayısı* ( $C_b$ ) olarak tanımlamıştır. Üniform yayılı moment için  $C_b$  değeri 1 olarak hesaplanmaktadır. Ayrıca yükleme koşulları altında ekstra güvenli tarafta kalmak için de  $C_b$  ‘nin 1 alınması yolu izlenebilir.  $C_b$  ifadesi denklem 2.59 ile hesaplanmaktadır.

$$C_b = \frac{12.5M_{maks}}{2.5M_{maks} + 3M_A + 4M_B + 3M_C} \quad (2.59)$$

Denklem 2.59 eşitliğinde;

$M_{maks}$  : Kirişin yanal yönde desteklenmemiş serbest açıklığı boyunca en büyük eğilme momentinin mutlak değeri,

$M_A$  : Kirişin yanal yönde desteklenmemiş serbest açıklığının 1/4 noktasındaki eğilme momentinin mutlak değeri,

$M_B$  : Kirişin yanal yönde desteklenmemiş serbest açıklığının 1/2 noktasındaki eğilme momentinin mutlak değeri,

$M_C$  : Kirişin yanal yönde desteklenmemiş serbest açıklığının 3/4 noktasındaki eğilme momentinin mutlak değeri,  
olarak tanımlanmıştır.

Şekil 2.9’a göre kesitin YBB davranış bölgelerinin sınırlarını belirleyen  $L_p$  ve  $L_r$  değerleri denklem 2.60 ve 2.61 ile hesaplanacaktır.

$$L_p = 1.76i_y \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (2.60)$$

$$L_r = 1.76i_{ts} \frac{E}{0.7F_y} \sqrt{\frac{Jc}{W_{ex}h_o} + \sqrt{\left(\frac{Jc}{W_{ex}h_o}\right)^2 + 6.76 \left(\frac{0.7F_y}{E}\right)^2}} \quad (2.61)$$

Denklem 2.61’de yer alan  $c$  katsayısı çift simetri eksenli I-enkesitlerde 1 alınacaktır. Eşitlikte yer alan bir diğer çarpan;  $i_{ts}$  ifadesi kesitin *etkin atalet yarıçapını* ifade etmektedir. Etkin atalet yarıçapı  $i_{ts}$  denklem 2.62 ile hesaplanmaktadır.

$$i_{ts} = \sqrt{\frac{\sqrt{I_y C_w}}{W_{ex}}} \quad (2.62)$$

Şekil 2.9’a göre kesitin eğilme momenti dayanımı  $M_n$  için farklı hesaplamalar önerilmiştir. Bu durumda elemanın yanal olarak desteklenmemiş boyu  $L_b$  bağlı olarak;

- $L_b \leq L_p$  ise YBB sınır durumu gözönüne alınmayacak ve eğilme momenti dayanımı, kesit için kullanılan karakteristik eğilme momenti dayanımı  $M_n$ , denklem 2.58,
- $L_p \leq L_b \leq L_r$  durumunda ise kesitin karakteristik eğilme momenti dayanımı denklem 2.63,

$$M_n = C_b \left[ M_p - (M_p - 0.7F_y W_{px}) \left( \frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right] \leq M_p \quad (2.63)$$

- $L_r \leq L_b$  durumunda ise kesitin karakteristik eğilme momenti dayanımı denklem 2.64,

$$M_n = F_{cr} W_{ex} \leq M_p \quad (2.64)$$

eşitlikleri ile hesaplanacaktır.

Denklem 2.64’de yer alan  $F_{cr}$  ifadesi *kritik gerilme* olarak tanımlanmış olup Denklem 2.65 ile hesaplanacaktır.

$$F_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E}{\left(\frac{L_b}{i_{ts}}\right)^2} \sqrt{1 + 0.078 \frac{Jc}{W_{ex}h_o} \left(\frac{L_b}{i_{ts}}\right)^2} \quad (2.65)$$

## BÖLÜM 3

### NÜMERİK ÇALIŞMA

#### 3.1. SONLU ELEMANLAR METODU

Sonlu elemanlar yöntemi, problem alanını daha küçük, sonlu boyutlu elemanlara bölerek karmaşık mühendislik problemlerini çözmek için kullanılan sayısal bir tekniktir. Her öge ayrı ayrı analiz edilir ve toplu davranışları, genel sistem yanıtının bir tahminini sağlar [45]. Sonlu elemanlar metodunun temel ilkesi, problem alanını, birbirine bağlı elemanlardan oluşan bir ağ halinde ayırıklaştırmayı içermektedir. Her bir elemanın davranışı, tipik olarak süreklilik mekaniği veya yapısal analiz ilkelerinden türetilen bir dizi denklemlerle tanımlanmaktadır. Bu eleman denklemleri birleştirilerek, istenilen çözümü elde etmek için çözülebilen bir cebirsel denklem sistemi oluşturulur [46].

Sonlu elemanlar metodu, problem alanının geometrisini ve davranışını temsil etmek için farklı tipte elemanlar kullanır. Yaygın olarak kullanılan elemanlar, tek boyutlu çubuk elemanlar (frame), iki boyutlu kabuk elemanlar (shell) ve üç boyutlu katı model (solid) öğeleri içermektedir. Her eleman, kendi sınırları içinde çözüme yaklaşmak için özel şekil fonksiyonlarına ve enterpolasyon tekniklerine sahiptir [47]. Sonlu elemanlar metodunda uygun bir ağın oluşturulması önemli bir adımdır. Problem alanı, bir elemanlar ağına bölünmüştür ve elemanların köşelerine düğümler yerleştirilmiştir. Ağ yoğunluğu ve eleman tipi seçimi, analizin doğruluğunu ve verimliliğini etkiler. Bu nedenle modele özgü optimum sonlu eleman ağı boyutunun belirlenmesi için sonlu eleman ağı yakınsama çalışması (mesh convergence) yapılmalıdır. Problemin karmaşıklığına ve istenen doğruluğa bağlı olarak yapılandırılmış, yapılandırılmamış ve uyarlanabilir ağ oluşturma gibi çeşitli teknikler kullanılmaktadır [48].

Ağ oluşturulduktan sonra, problemi temsil eden denklem sistemi yinelemeli olarak çözülür. Bu, yer değiştirmeler, kuvvetler veya kısıtlamalar gibi uygun sınır koşullarının uygulanmasını ve ortaya çıkan denklem sisteminin çözülmesini içermektedir. Çözümü elde etmek için doğrudan çözümler veya yinelemeli teknikler gibi sayısal yöntemler kullanılır [49]. Sonuç olarak sonlu elemanlar metodu; karmaşık yapısal, mekanik ve akışkanlar dinamiği problemlerini analiz etmek ve çözmek için çeşitli mühendislik disiplinlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Sonlu elemanlar metodu çelik kiriş analizleri için kirişin modellenmesini, uygun sınır koşullarının ve yüklerin uygulanmasını ve kirişin yapısal davranışını belirlemek amacıyla tepkisinin analiz edilmesinde kullanılmaktadır.

### **3.2. SONLU ELEMAN MODELİNİN DOĞRULANMASI**

Çalışmada gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizlerinin verdiği sonuçların pratikte ortaya çıkacak sonuçlar ile arasındaki değişimin gösterildiği bir doğrulama çalışmasının tez kapsamında gerçekleştirilmesi gerektiği düşünülmüştür. Bu bağlamda Yuanqing Wang vd. [50] yaptıkları çalışmada, hazırlanan deney düzeneği ile I-enkesitli kirişlerin YBB davranışlarını incelemiştir. Çalışma kapsamında, çelik çift simetri eksenli I-enkesitli kirişler üzerinde 4 noktalı eğilme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yuanqing Wang vd.[50], oluşturduğu deney düzeneğinde çift simetri eksenli I-enkesitli kiriş deney elemanlarına; üst başlıktan 2 farklı noktadan tekil yükleme uygulamıştır. Deney düzeneği, Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Deney düzeneği [50].

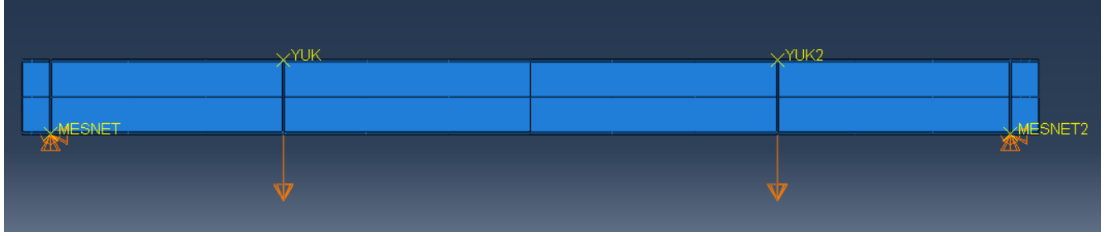
YBB davranışının incelenmesinin, sonlu elemanlar yöntemi ile doğrulanması amacıyla yapılan çalışma sonucu elde edilen nümerik sonuçların, Wang vd. [50]'nin yaptıkları deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılması Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. SEM çalışması sonuçları ile Wang vd. [40] deneysel sonuçlarının karşılaştırılması [50].

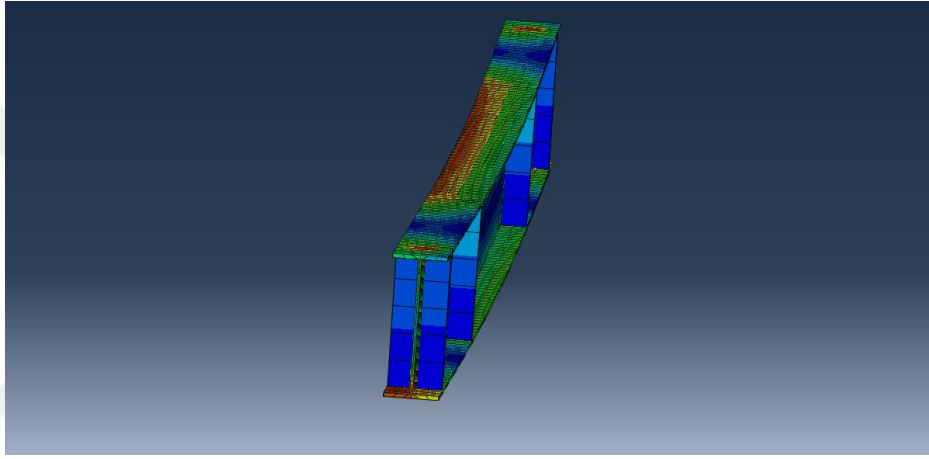
Kesit Adı	Uzunluk (mm)	Açıklık (mm)	Ön Kusur (mm)	$M_{deneysel}$ (kNm)	$M_{SEM}$ (kNm)	$\frac{M_{deneysel}}{M_{SEM}}$
<b>E1-100-266-1</b>	3599	3400	0.65	75.92	92.27	0.82
<b>E1-100-266-2</b>	3298.5	3100	0.06	88.76	93.11	0.95
<b>E1-100-266-3</b>	2999	2800	0.34	88.21	97.56	0.90
<b>E1-100-266-4</b>	2405	2200	1.72	86.94	91.61	0.95
<b>E1-100-266-5</b>	2200	2000	0.89	93.45	94.78	0.98
<b>E1-100-266-6</b>	1997.5	1800	1.08	93.46	99.18	0.94

Tez çalışması kapsamında doğrulama çalışması için seçilen deney çalışmasında kullanılan elemanların elastik YBB sınır uzunluğu ( $L_r$ ) 2586 mm olarak hesaplanmıştır. Bu durumda yapılan doğrulama çalışmasında E1-100-266-(1-3) elastik YBB, E1-100-266-(4-6) numunelerinin ise elastik olmayan YBB davranışları için değerlendirilecektir.

Oluşturulan sonlu elemanlar modeli Şekil 3.2’de, analiz sonucunda ortaya çıkan davranış Şekil 3.3’te verilmiştir.

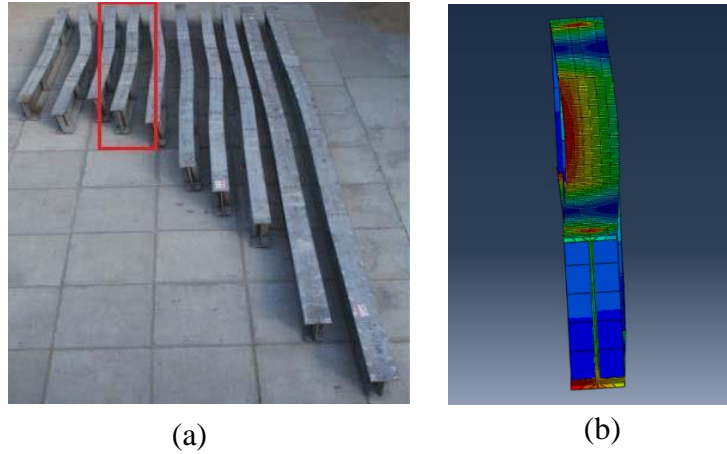


Şekil 3.2. Doğrulama çalışması sonlu eleman modeli.



Şekil 3.3. Doğrulama çalışması sonlu eleman analizi sonucunda ortaya çıkan davranış.

Yapılan deney çalışması ile gerçekleştirilen sonlu eleman analizi sonucunda ortaya çıkan davranış görsellerinin karşılaştırılması Şekil 3.4’te verilmiştir.



Şekil 3.4. Deneysel çalışma (a) ve sonlu eleman analizi sonucunda (b) oluşan davranış görsellerinin karşılaştırılması.

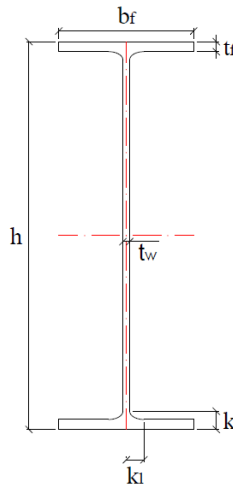
Şekil 3.4 (a) ve Şekil 3.4 (b) incelendiğinde deneysel davranış ile sonlu eleman analizi davranışının görsel olarak da birbirine yakın olduğu görülmektedir. Her iki davranışta da üst başlığın yanal yönde ötelendiği görülmektedir.

Sonlu elemanlar analizi sonuçları ile deney çalışması sonucunda kuvvetlerin karşılaştırılması Çizelge 3.2’de, yatay ve düşey deplasman değerlerinin karşılaştırılması ise Çizelge 3.3’te verilmiştir.

Yapılan çalışmalar neticesinde; sonlu elemanlar modelinin verdiği sonuçlar ile deneylerden elde edilen sonuçların, mevcut literatür ile yüksek bir oranda örtüştüğü görülmüştür. Yapılan karşılaştırma sonucunda, elastik YBB davranışı için %6.56 standart sapma ile %89 yakınsama olduğu görülmüştür. Elastik olmayan YBB davranışı için ise %2.08 standart sapma ile %95 yakınsama olduğu görülmüştür.

### 3.3. ÇALIŞMA KAPSAMINDA ELE ALINAN KESİTLER

Çalışma kapsamında, Amerikan Çelik Yapılar Enstitüsü [51] yönetmeliklerinde ilgili ölçü ve parametreleri tanımlanan 7 adet “W” kesit kiriş incelenmiştir. Kirişlerin geometrik boyutları Çizelge 3.2’te, ilgili ölçülerin kesit üzerindeki şematik gösterimi ise Şekil 3.3’te verilmiştir.



Şekil 3.5. Kiriş kesit ölçülerini gösteren şematik çizim.

Çizelge 3.2. Çalışma kapsamında seçilen kesitlerin geometrik ölçüleri [30].

<b>KESİT</b>	<b><i>h</i></b> <b>(mm)</b>	<b><i>b<sub>f</sub></i></b> <b>(mm)</b>	<b><i>t<sub>f</sub></i></b> <b>(mm)</b>	<b><i>t<sub>w</sub></i></b> <b>(mm)</b>	<b><i>k</i></b> <b>(mm)</b>	<b><i>k<sub>1</sub></i></b> <b>(mm)</b>	<b><i>A</i></b> <b>(mm<sup>2</sup>)</b>
<b>W33x130</b>	841	292	21.7	14.7	39.6	38.1	24.7x10 <sup>3</sup>
<b>W36x135</b>	904	305	20.1	15.2	39.1	38.1	25.7x10 <sup>3</sup>
<b>W36x150</b>	912	305	23.9	15.9	42.9	38.1	28.6x10 <sup>3</sup>
<b>W40x167</b>	980	300	29.2	16.5	56.1	39.7	31.8x10 <sup>3</sup>
<b>W40x183</b>	991	300	30.5	16.5	60.5	39.7	34.4x10 <sup>3</sup>
<b>W44x230</b>	1090	401	31	18	51.1	39.7	43.7x10 <sup>3</sup>
<b>W44x262</b>	1100	401	36.1	19.9	55.9	41.3	49.8x10 <sup>3</sup>

Çalışma kapsamında kullanılan kesitlerin mukavemet özellikleri Çizelge 3.5'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. Çalışma kapsamında seçilen kesitlerin mukavemet özellikleri [30].

<b>KESİT</b>	<b><i>I<sub>y</sub></i></b> <b>(mm<sup>4</sup>)</b>	<b><i>W<sub>ex</sub></i></b> <b>(mm<sup>3</sup>)</b>	<b><i>W<sub>px</sub></i></b> <b>(mm<sup>3</sup>)</b>	<b><i>J</i></b> <b>(mm<sup>4</sup>)</b>	<b><i>C<sub>w</sub></i></b> <b>(mm<sup>6</sup>)</b>	<b>Narinlik Oranı</b>	
						<b><i>b<sub>f</sub>/2t<sub>f</sub></i></b>	<b><i>h/t<sub>w</sub></i></b>
<b>W33x130</b>	90.70x10 <sup>6</sup>	6.65x10 <sup>6</sup>	7.65x10 <sup>6</sup>	3.07x10 <sup>6</sup>	15.20x10 <sup>12</sup>	6.73	51.7
<b>W36x135</b>	93.70x10 <sup>6</sup>	7.19x10 <sup>6</sup>	8.34x10 <sup>6</sup>	2.91x10 <sup>6</sup>	18.30x10 <sup>12</sup>	7.56	54.1
<b>W36x150</b>	112x10 <sup>6</sup>	8.26x10 <sup>6</sup>	9.52x10 <sup>6</sup>	4.20x10 <sup>6</sup>	22.10x10 <sup>12</sup>	6.37	51.9
<b>W40x167</b>	118x10 <sup>6</sup>	9.83x10 <sup>6</sup>	11.40x10 <sup>6</sup>	5.83x10 <sup>6</sup>	26.80x10 <sup>12</sup>	5.76	52.6
<b>W40x183</b>	138x10 <sup>6</sup>	11.10x10 <sup>6</sup>	12.70x10 <sup>6</sup>	8.03x10 <sup>6</sup>	31.70x10 <sup>12</sup>	4.92	52.6
<b>W44x230</b>	331x10 <sup>6</sup>	15.90x10 <sup>6</sup>	18.00x10 <sup>6</sup>	10.40x10 <sup>6</sup>	92.90x10 <sup>12</sup>	6.45	54.8
<b>W44x262</b>	384x10 <sup>6</sup>	18.20x10 <sup>6</sup>	20.80x10 <sup>6</sup>	15.50x10 <sup>6</sup>	109x10 <sup>12</sup>	5.57	49.6

Kesitlerin başlıkları bakımından kompak/kompakt olmayan/narin sınıflandırılması Çizelge 3.4'te, gövde bakımından sınıflandırılması ise Çizelge 3.5'te verilmiştir.

Çizelge 3.4. ÇYTHYEDY Tablo 5.1B'ye göre başlık narinlik durumları.

<b>KESİT</b>	<b>b(b<sub>f</sub> /2)</b> <b>(mm)</b>	<b>t<sub>f</sub></b> <b>(mm)</b>	<b>b/t<sub>f</sub></b>	<b>λ<sub>p</sub></b>	<b>λ<sub>r</sub></b>	<b>Kesit</b>	<b>Başlıklarının</b>
						<b>Kompaklık</b>	<b>Durumları</b>
<b>33x130</b>	146.00	21.70	6.73	9.02	23.74	Kompakt Kesit	
<b>W36x135</b>	152.50	20.10	7.59	9.02	23.74	Kompakt Kesit	
<b>W36x150</b>	152.50	23.90	6.38	9.02	23.74	Kompakt Kesit	
<b>W40x167</b>	150.00	29.20	5.14	9.02	23.74	Kompakt Kesit	
<b>W40x183</b>	150.00	30.50	4.92	9.02	23.74	Kompakt Kesit	
<b>W44x230</b>	200.50	31.00	6.47	9.02	23.74	Kompakt Kesit	
<b>W44x262</b>	200.50	36.10	5.55	9.02	23.74	Kompakt Kesit	

Çizelge 3.5. ÇYTHYEDY Tablo 5.1B'ye göre gövde narinlik durumları.

<i>KESİT</i>	<i>h</i> (mm)	<i>t<sub>w</sub></i> (mm)	<i>h/t<sub>w</sub></i>	$\lambda_p$	$\lambda_r$	<i>Kesit Gövdelerinin</i> <i>Kompaktlık</i> <i>Durumları</i>
<b>W33x130</b>	841.00	14.70	57.211	89.246	135.293	Kompakt Kesit
<b>W36x135</b>	904.00	15.20	59.474	89.246	135.293	Kompakt Kesit
<b>W36x150</b>	912.00	15.90	57.358	89.246	135.293	Kompakt Kesit
<b>W40x167</b>	980.00	16.50	59.394	89.246	135.293	Kompakt Kesit
<b>W40x183</b>	991.00	16.50	60.061	89.246	135.293	Kompakt Kesit
<b>W44x230</b>	1090.00	18.00	60.556	89.246	135.293	Kompakt Kesit
<b>W44x262</b>	1100.00	19.90	55.276	89.246	135.293	Kompakt Kesit

Denklem 2.60 ve Denklem 2.61 eşitlikleri ile kesitin yanal olarak desteklenmeyen boyuna göre burkulma davranışı bölgeleri için sınır uzunlukları; tez kapsamında seçilen yapısal çelik (elastisite modülü 200 GPa) malzemesi S355 baz alınarak hesaplanmış olup kesit boyuna göre burkulma davranışı bölgesi Çizelge 3.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 3.6. Kesitlerin burkulma davranışı bölgeleri sınır uzunlukları.

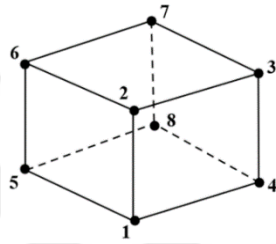
<i>KESİT</i>	<i>L</i> (mm)	<i>Narinlik Oranı</i>		<i>L<sub>p</sub></i> (mm)	<i>L<sub>r</sub></i> (mm)	<i>Burkulma</i> <i>Davranışı Bölgesi</i>
		<i>b<sub>f</sub>/2t<sub>f</sub></i>	<i>h/t<sub>w</sub></i>			
<b>W33x130</b>	15240	6.73	51.7	2535.72	7269.60	Elastik
<b>W36x135</b>	15240	7.56	54.1	2527.37	7264.94	Elastik
<b>W36x150</b>	15240	6.37	51.9	2619.27	7560.87	Elastik
<b>W40x167</b>	15240	5.76	52.6	2548.25	7426.30	Elastik
<b>W40x183</b>	15240	4.92	52.6	2640.16	7729.03	Elastik
<b>W44x230</b>	15240	6.45	54.8	3638.57	10301.57	Elastik
<b>W44x262</b>	15240	5.57	49.6	3680.35	10691.74	Elastik

### 3.4. SONLU ELEMAN MODELİNİN OLUŞTURULMASI

Çalışmanın bu kısmında, analizlerin gerçekleştirildiği ABAQUS sonlu elemanlar paket programında oluşturulan nümerik model açıklanmıştır.

### 3.4.1. Sonlu Eleman Boyutunun Belirlenmesi

Analizi gerçekleştirilen kirişlerin sonlu elemanlar modeli; çubuk (frame), kabuk (shell) ve katı (solid) olarak oluşturulabilmektedir. Bu tez kapsamında ele alınan elemanlar katı model (solid) olarak oluşturulmuştur. ABAQUS programının kütüphanesinde bulunan mesh tiplerinden C3D8R kullanılarak gerçekleştirilen analizler için sonlu eleman boyutu yakınsama çalışması yapılmış ve boyutu belirlenmiştir. Şekil 3.6’da C3D8R elemanının teorik şekli verilmiştir.



C: Süreklilik

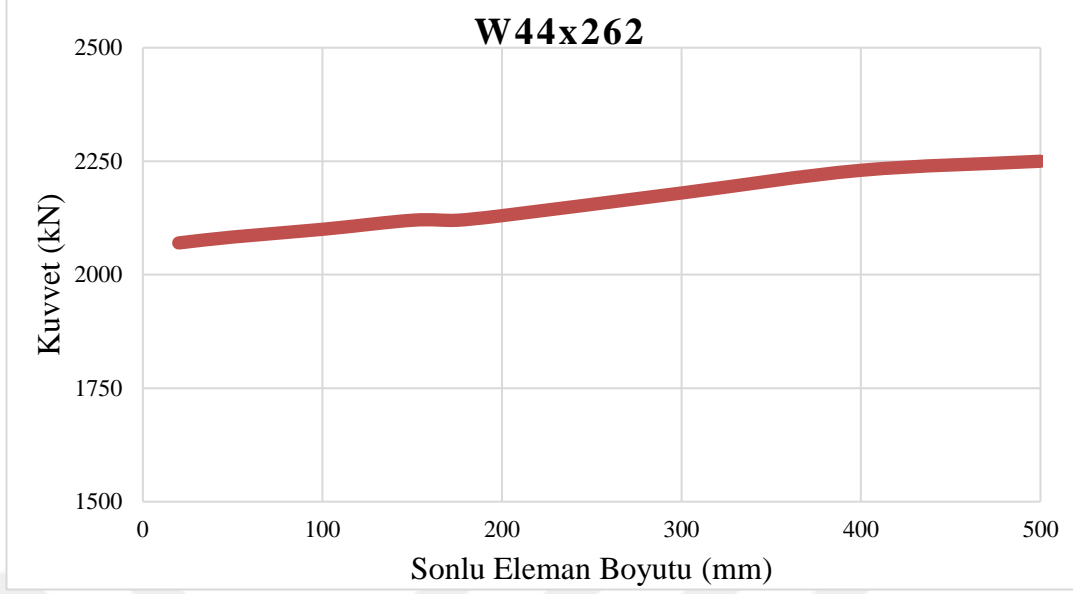
3D: 3 Boyutlu

8: Eleman köşe nokta sayısı

R: Azaltılmış entegrasyon

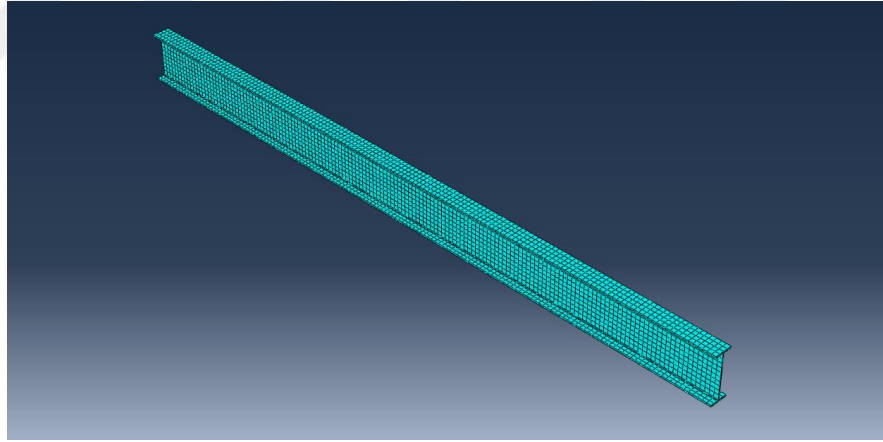
Şekil 3.6. C3D8R sonlu elemanı teorik şekli [52].

Sonlu eleman ağı boyutunun tayini için bir dizi “*mesh convergence (mesh yakınsama)*” çalışması yapılmıştır. Bu kapsamda seçilen W44x262 kesitinden müteşekkil 15.24 m uzunluğundaki eleman 20-50-100-150-175-200-250-300-400-500 mm boyutlarında ayrı ayrı sonlu eleman ağına bölünmüş 10 farklı analiz gerçekleştirilmiştir. Aynı yükleme altında ulaşılan kuvvet değerlerine ilişkin grafik Şekil 3.7’de verilmiştir. Eğri incelendiğinde sonlu eleman ağı boyutunun 20 mm ile 200 mm arasında kuvvet değerlerinin birbirine yakınsadığı görülmektedir. Bu kapsamda bilgisayar performansı da göz önünde bulundurularak optimum sonlu eleman ağı boyutu 100 mm olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.7. Sonlu eleman boyutuna bağlı olarak gerilme değişimi.

Çalışmada kullanılan ABAQUS modelinde, kiriş elemanın sonlu eleman ağı oluşturulmuş hali Şekil 3.8’de verilmiştir.



Şekil 3.8. W44x262 Kirişinin sonlu eleman ağına bölünmüş hali

### 3.4.2. Malzeme Modelinin Oluşturulması

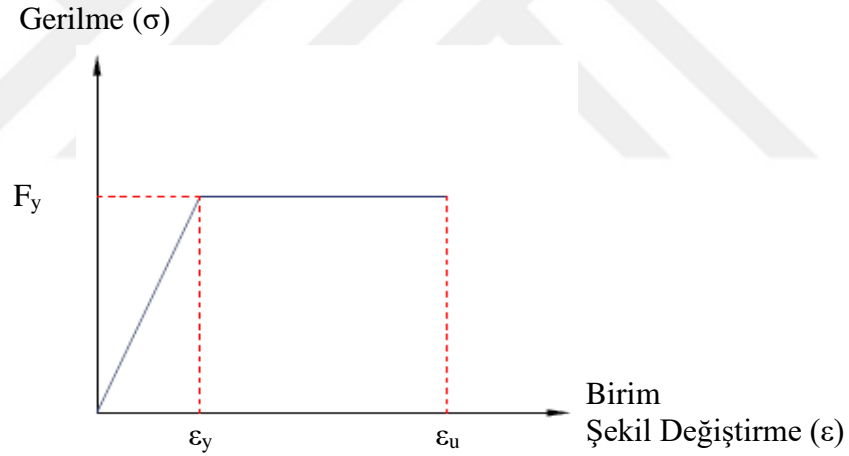
Çalışma kapsamında incelenen kirişlerin sıcak haddelenmiş çelik profillerden seçilmiş olması sebebiyle “ÇYTHYEDY Bölüm 2.1.1: Yapısal Çelik Malzeme Özellikleri” [30] bölümünde özellikleri tanımlanan malzemelerden S355 çeliği seçilmiştir.

ABAQUS paket programında yer alan “*Material*” sekmesinden gerekli bilgiler tanımlanmış ve her bir kiriş kesiti için aynı özelliklerde modele atanmıştır. Oluşturulan malzeme modelinde çelik malzemesinin özellikleri;

Elastisite Modülü “ <i>E</i> ”	: 200 GPa
Poisson Oranı “ <i>v</i> ”	: 0.3
Çelik Akma Dayanımı “ <i>F<sub>y</sub></i> ”	: 355 MPa

olarak tanımlanmıştır.

S355 çeliği sonlu elemanlar yazılımında, çift eğrilikli, elastik-tam plastik malzeme modeli olarak tanımlanmıştır. Malzeme modeli için tanımlanan grafik, Şekil 3.9’da verilmiştir.



Şekil 3.9. Elastik-Tam Plastik malzeme grafiği.

### 3.4.3. Analiz Adımının Tanımlanması

ABAQUS sonlu elemanlar analiz programında birçok mühendislik dalının araştırma konusuna uygun analiz türleri yer almaktadır. Bu çalışma kapsamında ele alınan elemanların dinamik olarak yüklenmesi durumunda YBB-YBŞB incelenmesine odaklanıldığından analiz adımı kısmında; “*Static General*” ve “*Dynamic Explicit*” analiz adımları kullanılmıştır.

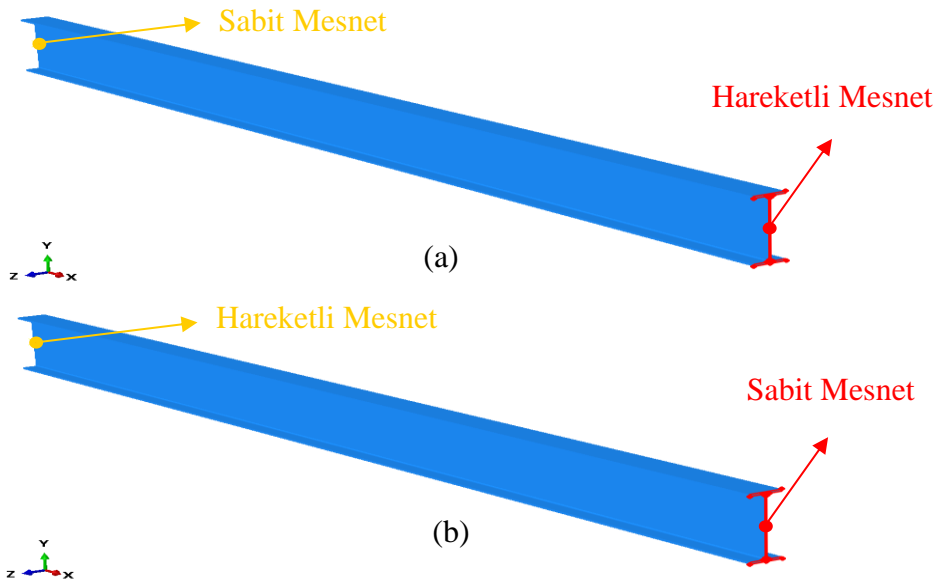
Bölüm 3.4.3.1 ve Bölüm 3.4.3.2’de analiz adımının içeriğini oluşturan yükleme ve mesnet koşulları ile bunun model içinde nasıl tanımlandığı anlatılmıştır.

### 3.4.3.1. Mesnet Koşullarının Tanımlanması

Tez çalışması, kren yürüme yolu kirişlerine odaklandığından söz konusu elemanların uygulamada yapıldığı şekliyle basit mesnet koşulları sonlu elemanlar modeli için de benimsenmiştir. Kirişin bir ucu global eksen takımına göre her 3 yönde de yer değiştirmeye tutulu iken dönüşleri engellenmemiştir. Diğer ucunda ise kiriş eksenine paralel yönde yer değiştirme serbest olacak şekilde diğer 2 yönde yer değiştirme tutulmuş ve yine dönüşler serbest bırakılmıştır.

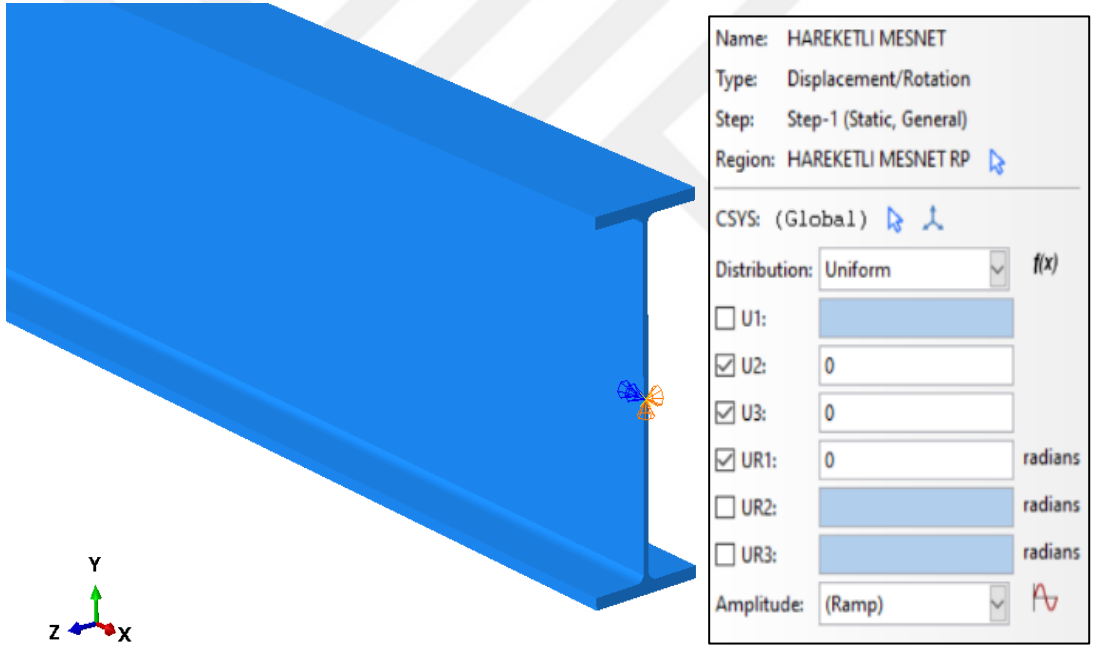
Kirişlerin her iki ucunda da kiriş enkesitine dik ve zayıf eksene paralel yönde yer değiştirme ve dönüşler tutularak incelenen kirişlerin realitedeki yanal tutulu mesnet şartı modellenmeye çalışılmıştır.

Şekil 3.10’da kirişlerin her iki ucundaki mesnet koşullarının tanımlanma şekli gösterilmiştir.

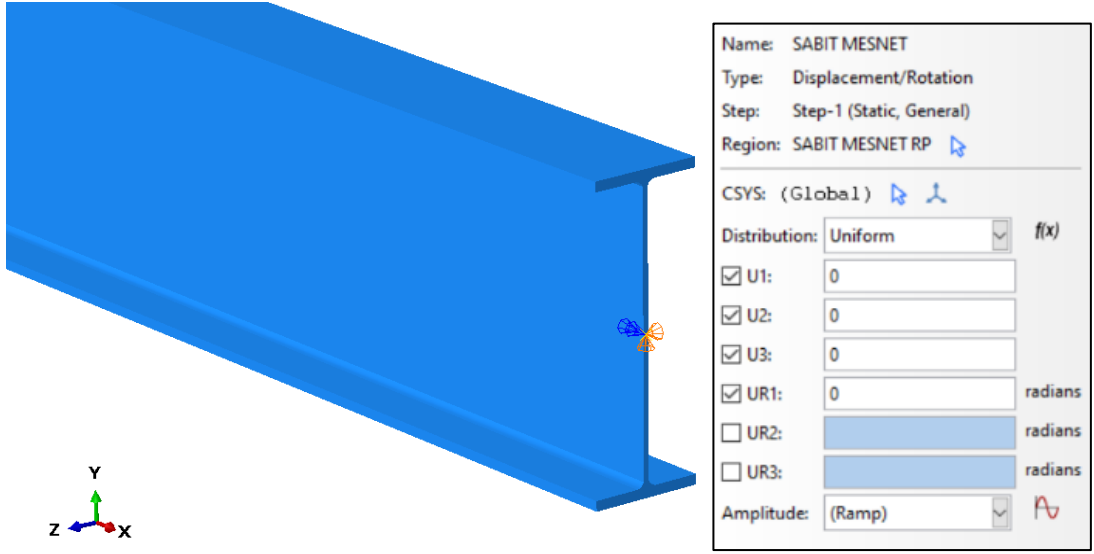


Şekil 3.10. W44x262 kesitli kiriş uçlarında mesnetlenen bölgeler; (a) Hareketli mesnet, (b) Sabit mesnet

Tez kapsamında yükleme ve mesnet koşullarının tamamı, ABAQUS yazılımında belirlenen herhangi bir noktadan seçilen herhangi bir yüzeye bütün etkileri olduğu gibi aktarmaya yarayan “*Coupling Constraint*” fonksiyonu kullanılarak yapılmıştır. Şekil 3.10’da görülen ve kesit geometri merkezine konumlandırılan “*HAREKETLİ MESNET*” ve “*SABİT MESNET*” olarak isimlendirilen referans noktalarının kırmızı ile boyanmış yüzeylere “*Coupling Constraint*” ile bağlanması suretiyle mesnet bölgeleri oluşturulmuştur. Bu sebeple sadece “*HAREKETLİ MESNET*” ve “*SABİT MESNET*” noktalarına mesnet koşulları tanımlanmış ve ABAQUS yazılımı bunları tanımlanan yüzeylere etkitmiştir. Şekil 3.11’de hareketli mesnet koşulları, Şekil 3.12’de ise sabit mesnet koşulları gösterilmiştir.

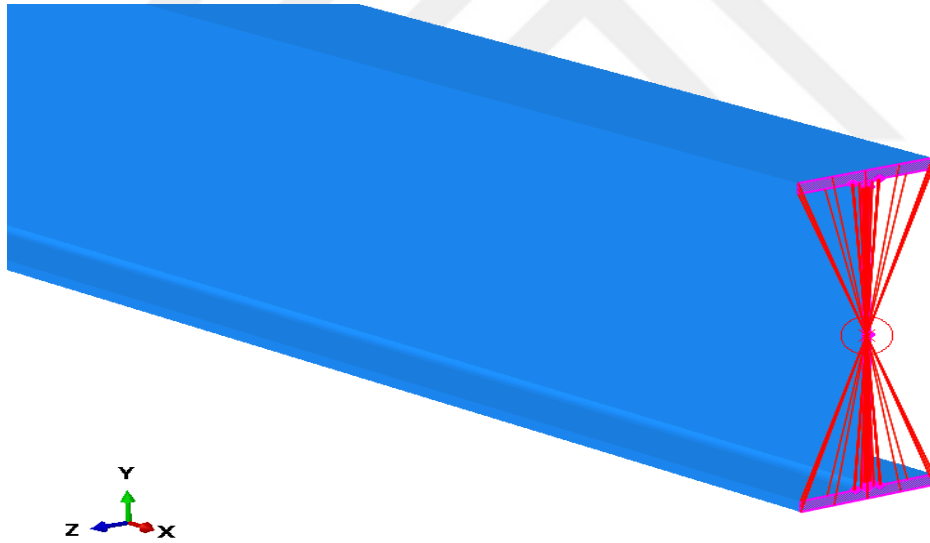


Şekil 3.11. W44x262 kesitli kiriş hareketli mesnet koşulları.



Şekil 3.12. W44x262 kesitli kiriş sabit mesnet koşulları.

Mesnetlerin “*Coupling Constraint*” ataması Şekil 3.13’te gösterilmiştir.



Şekil 3.13. W44x262 kesitli kiriş için mesnetlerde “*Coupling Constraint*” ataması.

### 3.4.3.2. Yükleme Koşullarının Tanımlanması

Mesnet koşullarını tanımlarken yapıldığı gibi yükleme koşulları tanımlanırken de “*Coupling Constraint*” özelliği kullanılmıştır. Özgen ve Bayramoğlu [53]’nun Kren Yollarının Tasarımı adlı kitabında, düşey yükün kren yürüme yolu kirişine aktarıldığı yüzeyin büyüklüğü ray yüksekliğine bağlı olarak hesaplanmıştır. Ayrıca kren

arabasının frenaj/demeraj hareketleri esnasında ortaya çıkan yatay yükü, kren rayının mesnetlendiği kiriş üst flanşının düşey yüzeyininin orta noktasından kesite etkitilmesini önerilmiştir.

Kren yürüme yolu kirişlerinin tasarımı için ülkemizde özel olarak bir tasarım standardı bulunmamaktadır. Bu kapsamda tasarım mühendisleri kiriş davranışını ele alarak ÇYTHYEDY yönetmeliğinden faydalanmaktadır. Evrensel olarak kabul görmüş Kanada Çelik Yapılar Yönetmeliği'nin kren yürüme yolu kirişleri spesifikasyonunda [54] bulunan tasarıma esas yükler incelenmiştir. Buna göre kren yürüme yolu kirişlerinde tasarıma esas yükler olarak;

- Düşey Yükler : Kren kontrüksiyonu ve taşıma kapasitesi,  
Yatay İtme : Krenin görevi icabı yükü taşıyan arabanın frenaj ve demeraj hareketleri sebebiyle yürüme yolu kirişinde ortaya çıkan yatay kuvvet,  
Çekiş Etkisi : Kren köprüsünün hareketinden dolayı yürüme yolu kirişinin uzun yönüne paralel ortaya çıkan atalet kuvveti,  
Tampon Etkisi : Kren yürüme yolu kirişinin üzerinde bulunan tamponlara çarpılması sonucunda ortaya çıkan uzun yöne paralel kuvvet,  
Titreşimler : Kren tekerleği veya kren rayının önkusurlu olmasından dolayı hareket esnasında ortaya çıkan titreşimlerden kaynaklı kuvvet,

olarak öngörülmektedir. Bu yüklerin tamamına ek olarak uzun vadede incelenmesi gereken kren servis ömrü boyunca tekrar tekrar yükleme gerçekleşeceğinden dolayı yorulma durumunun da tasarımda ayrıca değerlendirilmesi gereken bir durum olduğu Kanada Çelik Yapılar Yönetmeliği'nin kren yürüme yolu kirişleri için yayınlanan spesifikasyonunda belirtilmiştir [54].

Kiriş YBB davranışı üzerinde dinamik etkilerin ortaya çıkması ve statik durumlarla karşılaştırılabilmesi amacıyla 4 ayrı yükleme prosedürü işletilmiştir. Bunlar;

- Kren düşey yüklerinin, krenin sabit ivmeli hareketi sırasında ideal koşullarda kren yürüme yolu kirişine aktarılması,

- Kren düşey yüklerinin, krenin sabit ivmeli hareketi sırasında ideal koşullarda kren yürüme yolu kirişine aktarılırken aynı süre içerisinde kren arabasının maksimum ivme değeriyle frenaj yapması durumunda ortaya çıkan yatay yük etkisi,
- Kren düşey yük etkisinin, SAC (Structural Assessment Committee) yükleme protokolü ile tekrarlı-çevrimsel olarak yükleme etkisi,
- Kren düşey yük etkisinin SAC yükleme protokolü ile tekrarlı-çevrimsel olarak yükleme etkisi sırasında kren arabasının frenaj yapması durumunda ortaya çıkan yatay yük etkisidir.

I. ve II. yükleme prosedürleri kullanılarak “*Static General*” ve “*Dynamic Explicit*” analiz olmak üzere toplamda 4 farklı, III. ve IV. yükleme prosedürleri için ise “*Static General*” analizler gerçekleştirilmiştir. Statik yüklemeler, sabit veya durağan yükleri ifade etmektedir, dinamik yüklemeler ise genellikle hareketli veya değişen yüklerin etkisini araştırmak için kullanılmaktadır.

Çalışmanın genelinde ise bütün kesitlere, I ve II yükleme prosedürleri kullanılarak 14 adet “*Dynamic Explicit*” analiz; I, II, III ve IV yükleme prosedürleri kullanılarak 28 adet “*Static General*” analiz olmak üzere toplamda 42 adet analiz yapılmıştır.

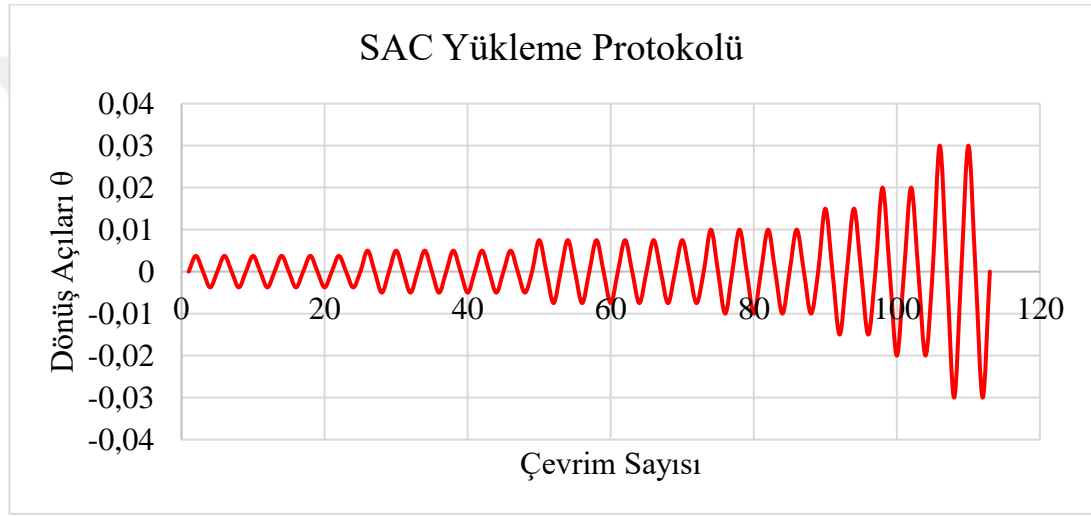
III. ve IV. yükleme prosedürlerinde yer alan SAC yükleme protokolünün içeriği Çizelge 3.5’te bahse konu yükleme protokolünün grafiğe dökülmüş hali ise Şekil 3.12’de verilmiştir.

Bu kapsamda SAC yükleme protokolünde belirtilen dönüş açılarının kiriş açıklığının ortasında oluşturduğu deplasman değerleri ABAQUS yazılımında “Amplitude” olarak tanımlanmıştır. Çizelge 3.6. ve Şekil 3.14’te görüldüğü üzere yükleme protokolü içeriğinde bulunan dönüş açlarına karşılık gelen deplasman değerleri de çevrim sayıları kadar tekrarlanarak etiketlenmiştir.

Çizelge 3.7. SAC yükleme protokolü [55].

Yükleme Adımı	Dönüş Açıları	Çevrim Sayısı
1	0.00375	6
2	0.005	6
3	0.0075	6
4	0.01	4
5	0.015	2
6	0.02	2
7	0.03	2

7. adımdan sonra dönüş açıları ( $\theta$ ) 0.01 arttırılarak 2 çevrim olacak şekilde uygulanacaktır.



Şekil 3.14. SAC yükleme protokolü dönüş açısı-çevrim sayısı grafiği [55].

I. ve II. yükleme prosedürlerinde kullanılan düşey yük değeri; krenin servis yükleri altındaki davranışının daha iyi simüle etmek adına (kren arabasının kren yürüme yolu kirişine yaklaşması durumunda reaksiyonlarda artış söz konusu olacağından) SAP2000 yazılımında ön analizler yapılmıştır. Bu SAP2000 modelinden hesaplanan teker reaksiyonları ABAQUS sonlu elemanlar yazılımında düşey yük olarak tanımlanmıştır.

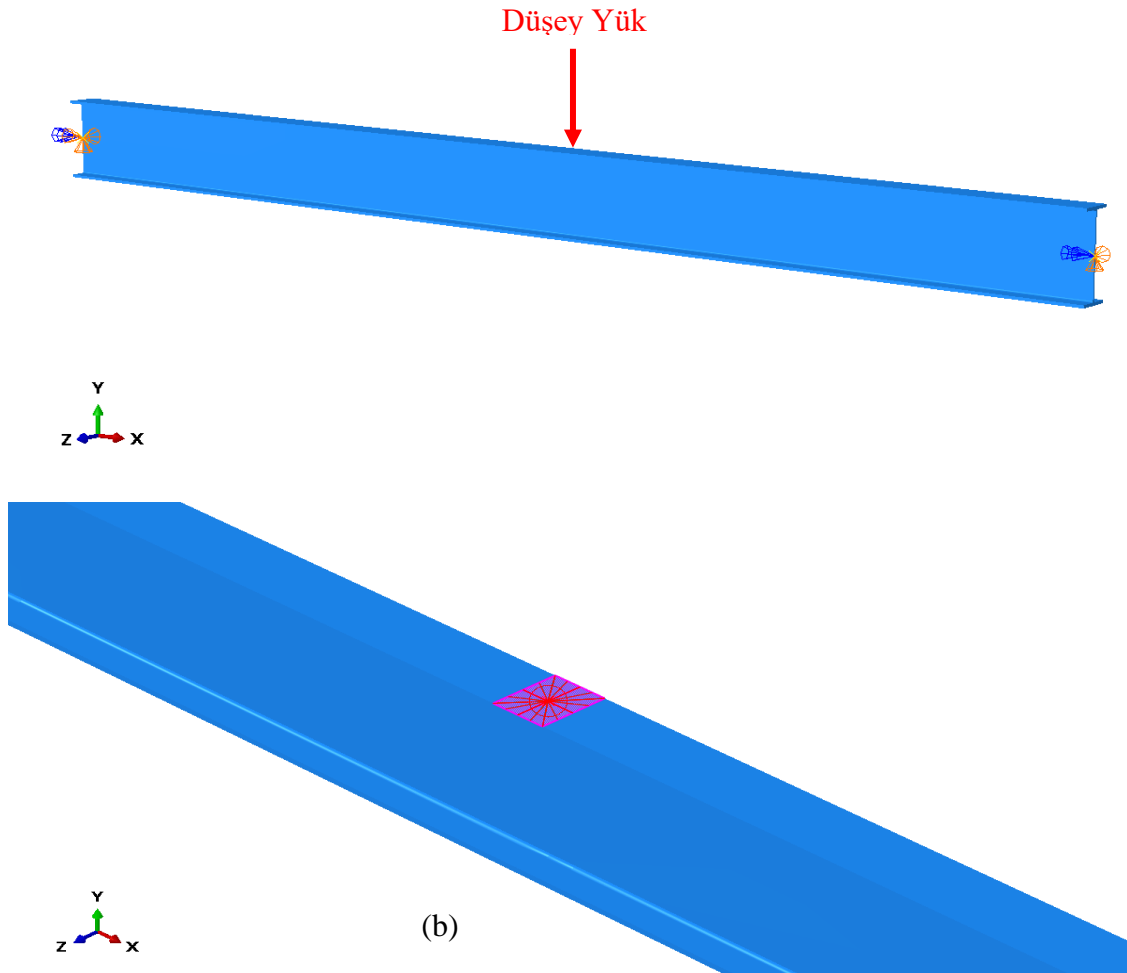
II. ve IV. yükleme prosedürlerinde kullanılan yatay yükler vinç tekerlerinin yuvarlanma hareketi esas alınarak Serway Fizik [56] kitabı “Bölüm 11: Yuvarlanma Hareketi ve Açısal Momentum”dan yararlanılarak krenin frenaj etkisinde ortaya çıkardığı düşünülen yatay atalet kuvveti hesaplanmıştır.

Hesaplanan düşey ve yatay yükler Çizelge 3.8’de verilmiştir.

Çizelge 3.8. Hesaplanan düşey yük ve yatay yük değerleri.

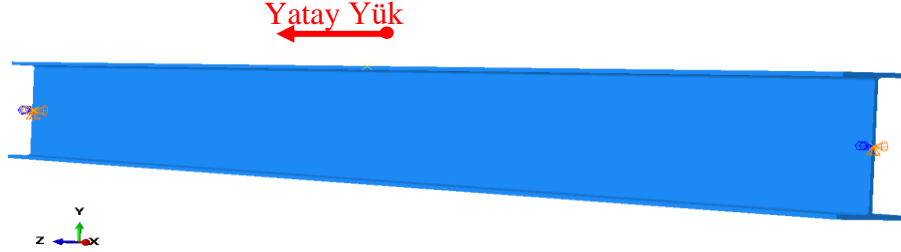
Düşey Yük (En Büyük Teker Reaksiyonu) (kN)	Yatay Yük (kN)
2364.38	263.89

Yukarıda ifade edilen yükleme tekniklerinin ve yapılan yük analizlerinin ardından ABAQUS sonlu elemanlar yazılımına yüklemeler tanımlanmıştır. Düşey yüklemelerin tamamı açıklık ortasında belirlenen “DUSEY YUK” noktasından “Coupling Constraint” ile bağlanan yüzeye deplasman kontrollü, yatay yüklemeler ise üst flanşın düşey yüzeyinin ortasından belirlenen “YATAY YUK” noktasına yük kontrollü olarak etkilmiştir. Şekil 3.15’de düşey yükün kirişlere etkilmesi işlemi gösterilmiştir.



Şekil 3.15. Düşey yükleme durumu; (a) Yükün etkilildiği nokta (b) Yükün nokta ile bağlandığı yüzey.

Yatay yükün kiriş üst flanşının düşey yüzeyinin orta noktasından kirişe etkilmesi işlemi Şekil 3.16’da gösterilmiştir.

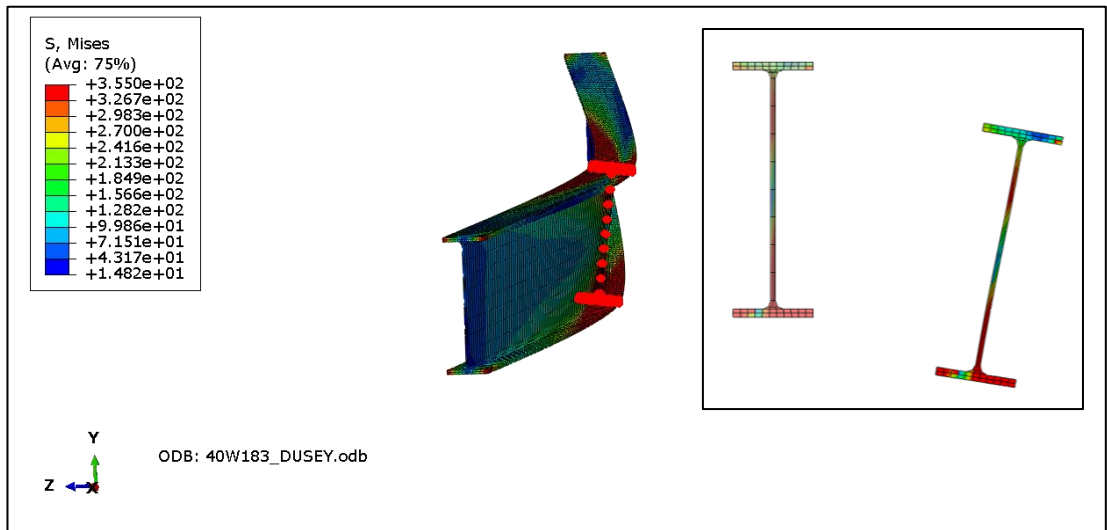


Şekil 3.16. Yatay yüklemenin uygulandığı nokta.

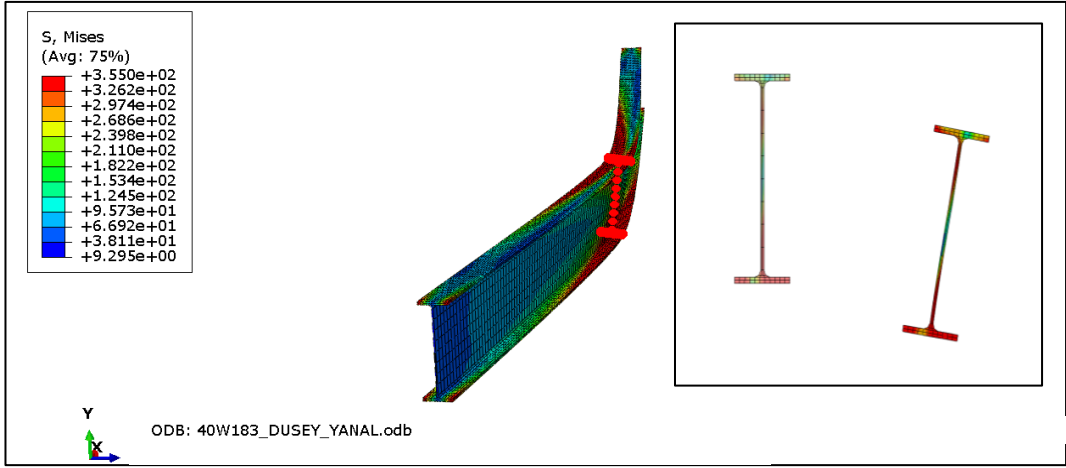
### 3.5. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ SONUÇLARININ ELDE EDİLMESİ

Yapılan çalışmada, AISC Çelik Yapılar Yönetmeliği [51] kapsamında yer alan 7 adet “W” kesit için 42 adet analiz gerçekleştirilmiştir. Analizlerde kullanılan yükleme durumlarına göre yük taşıma kapasitesinin karşılaştırılabilmesi için “Düşey Yük-Düşey Deplasman” ve “Düşey Yük-Yatay Deplasman” eğrileri elde edilmiştir.

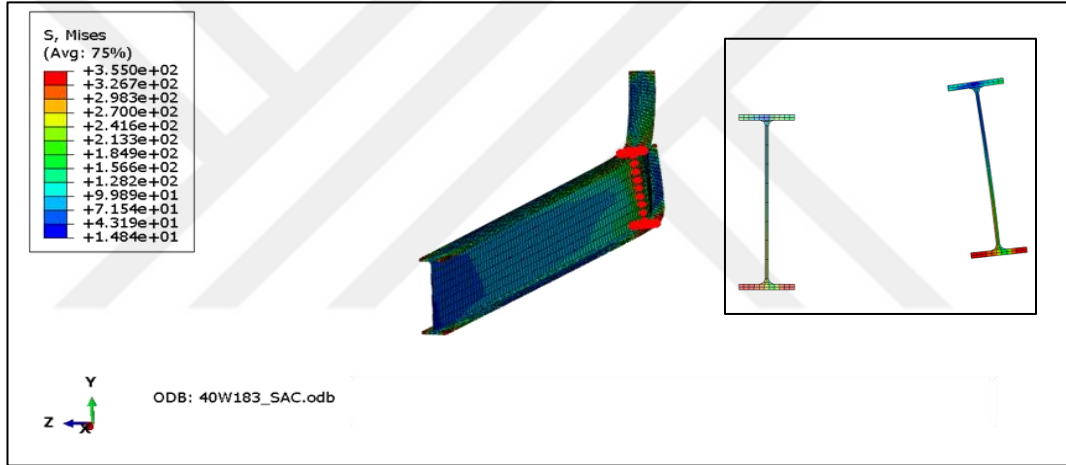
W40x183 kesitli kirişin yüklemeler sonucunda ortaya çıkan YBB/YBŞB davranışı Şekil 3.17-Şekil 3.20’de gösterilmiştir.



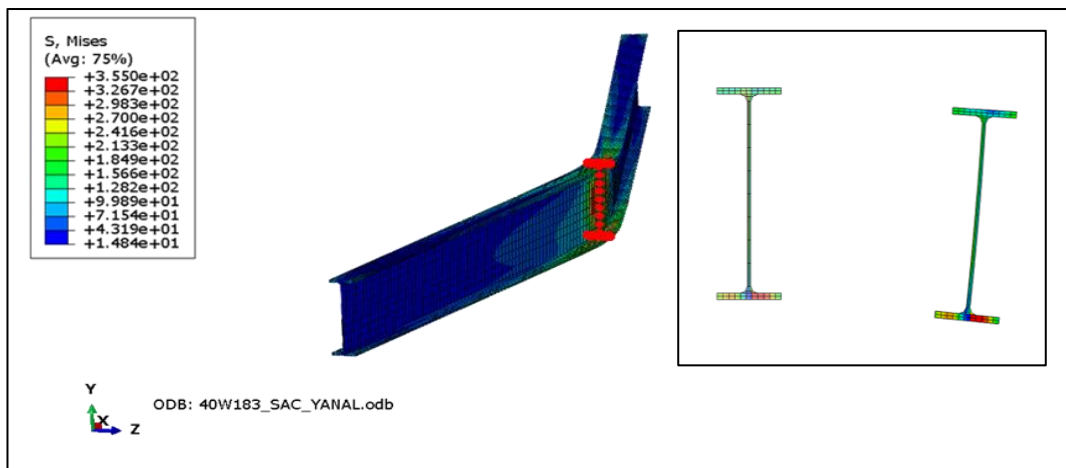
Şekil 3.17. W40x183 kesitli kirişin standart düşey yükleme altındaki davranışı.



Şekil 3.18. W40x183 kesitli kirişin standart düşey ve yatay yükleme altındaki davranışı.



Şekil 3.19. W40x183 kesitli kirişin SAC yükleme protokolü altındaki davranışı.

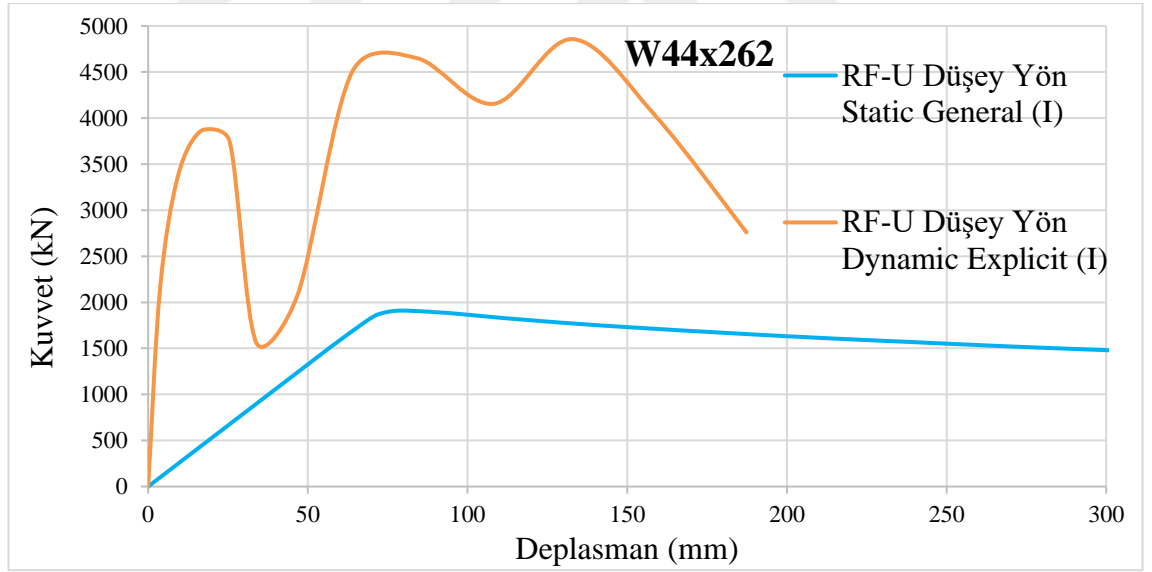


Şekil 3.20. W40x183 kesitli kirişin SAC yükleme protokolü ve yatay yük altındaki davranışı.

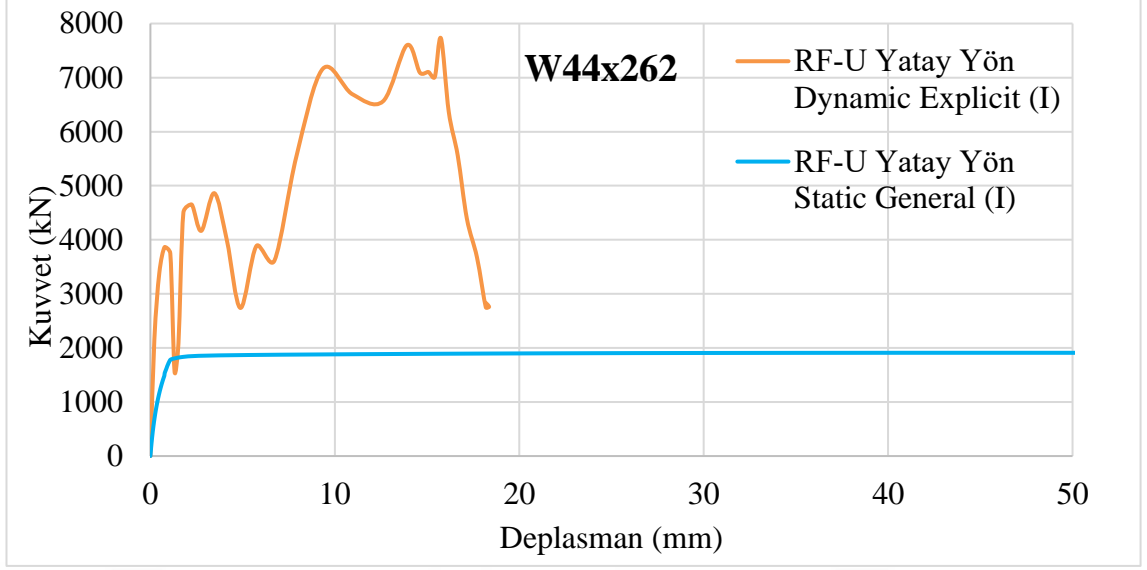
Kirişlerin davranışları incelendiğinde açıklık ortasındaki kesitin üst başlık ve alt başlığındaki dönme değerlerinin birbirinden farklı olduğu ayrıca gövde kesitinin doğrusal formunun bozulduğu görülmektedir. Bu kapsamda kirişte gövde buruşmalarının ortaya çıktığı anlaşılmaktadır.

### 3.5.1. Kirişlerin Yük/Deplasman Grafikleri

ABAQUS sonlu elemanlar yazılımı ile gerçekleştirilen analizlerin sonuçları grafiğe dökülmüş ve incelenmek üzere hazırlanmıştır. Bu grafikler, tüm kesitler için oluşturulmuş ve Bölüm 5’te sonuçlar değerlendirilmiştir. Bu kapsamda öncelikle “*Dynamic Explicit*” analizler gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.21 ve Şekil 3.22’de W44x262 kesitli kirişe ait I. yükleme prosedürü altında gerçekleştirilen “*Dynamic Explicit*” ve “*Static General*” analizlerinin “*Düşey Yük/Düşey Deplasman*” ile “*Düşey Yük/Yatay Deplasman*” grafikleri verilmiştir.



Şekil 3.21. I. Yükleme prosedürü altında W44x262 enkesitli kirişin, “*Dynamic Explicit*” ve “*Static General*” analizlerinin Düşey Yük/ Düşey Deplasman grafiği.



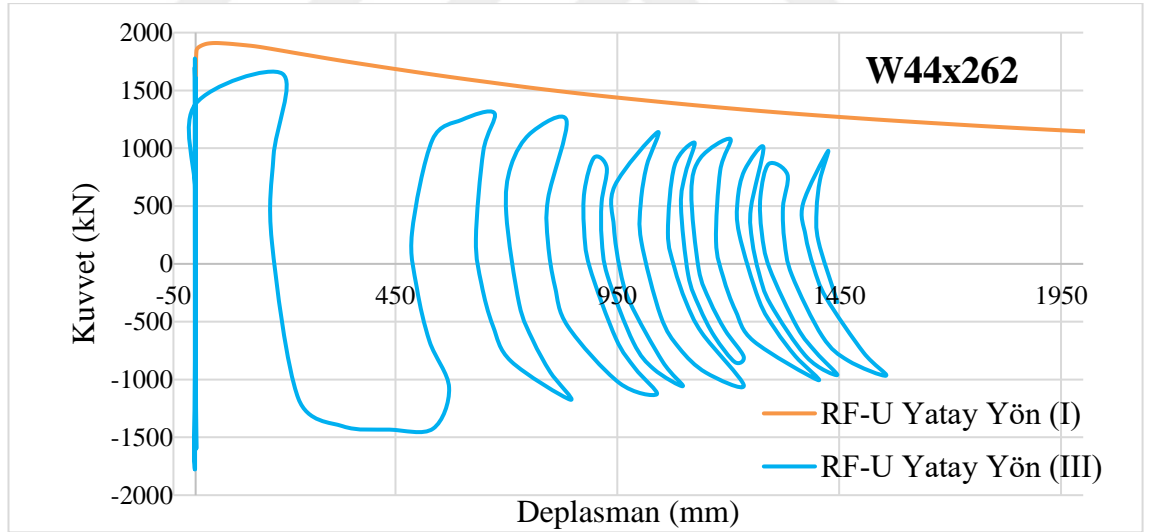
Şekil 3.22. I. Yükleme prosedürü altında W44x262 enkesitli kirişin, “*Dynamic Explicit*” ve “*Static General*” analizlerinin Düşey Yük/ Yatay Deplasman grafiği.

Şekil 3.21 ve Şekil 3.22’de yer alan grafik incelendiğinde; “*Dynamic Explicit*” analizlerde karşılaşılan ve elemanların kısa zaman aralığında ani olarak eğilme davranışına zorlanması durumunda uzun süreli dinamik yüklemeler ve/veya statik yükleme durumuna göre çok daha yüksek dayanım ortaya çıkardığı görülmektedir. Literatüre bakıldığında, bu davranışın birçok sebebi olabileceği ifade edilmektedir. Kısa zaman aralıklarında şiddetli bir şekilde elemana etkiyen yüklerin etkisi, eleman üzerinde beklenmedik gerilme ve deformasyonlara sebep olabilir. Bu durumda elemanın maruz kaldığı yükleme hızının önemi ortaya çıkmaktadır. Yükleme hızının, eleman malzemesinin davranışını etkileyebileceği, elemanın ani kabul edilebilecek bir yüklemeye maruz kalması durumunda malzemenin gerilme dalgalanmalarına daha hızlı tepki vermesi ve daha yüksek gerilme değerlerine dayanmasına neden olabileceği; statik yükleme durumunda ise gerilme yayılımı daha yavaş olduğundan daha düşük gerilme değerleri ortaya çıkabileceği anlaşılmaktadır. Bu durumun da malzemenin deformasyonunu etkileyerek dinamik yükleme sonuçlarının daha büyük çıkmasına neden olabileceği belirtilmektedir. [57].

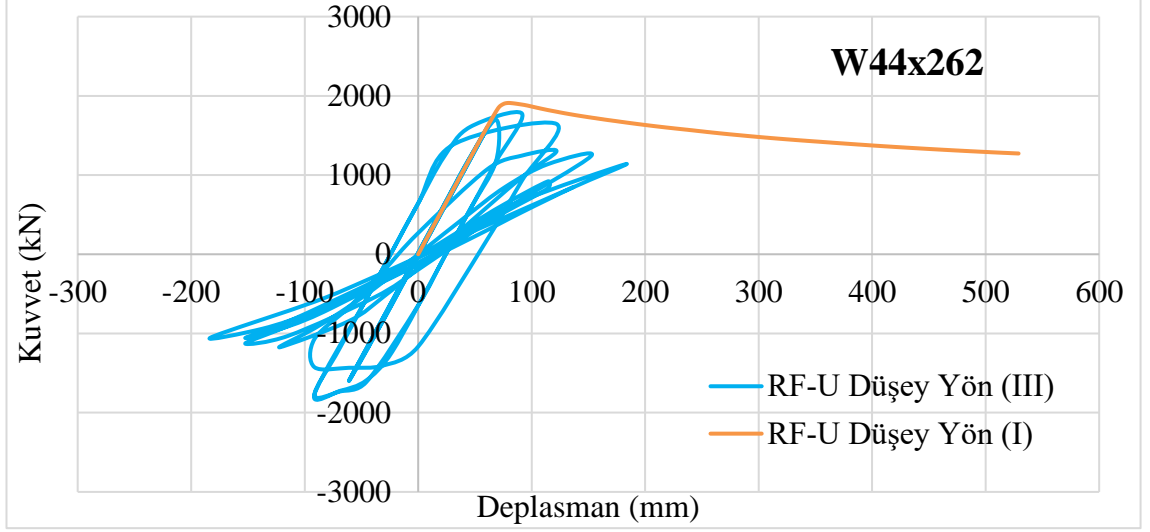
Dinamik yüklemelerin sonuçlarının statik veya daha uzun zamana yayılmış dinamik yüklemelere göre daha büyük çıkmasının bir başka sebebi de elemana uygulanan yükleme frekansı olabilmektedir. Elemanın rezonansa girmesi durumunda uygulanan küçük bir yük bile büyük tesirlere sebep olabilir ve eleman daha büyük dayanımlar göstererek deforme olabilir [58].

Bu faktörlerin yanı sıra; analiz yöntemleri, kullanılan modelleme teknikleri veya malzeme özellikleri gibi diğer değişkenler de dinamik ve statik yükleme sonuçlarının farklılıklarını etkileyebilir. Sonuç olarak dinamik yükleme sonuçlarının statik yükleme sonuçlarından daha büyük çıkmasının nedeni yapı üzerindeki zamana bağlı yükleme etkisi, yükleme hızı ve rezonans etkisi gibi faktörlere bağlı olabilir.

Şekil 3.23-Şekil 3.30'da W44x262 kesitli kirişe ait Düşey Yük/Düşey Deplasman ve Düşey Yük/Yatay Deplasman grafikleri verilmiştir.



Şekil 3.23. I ve III yükleme prosedürleri altında W44x262 kesitli kirişin Düşey Yük/Yatay Deplasman eğrileri.



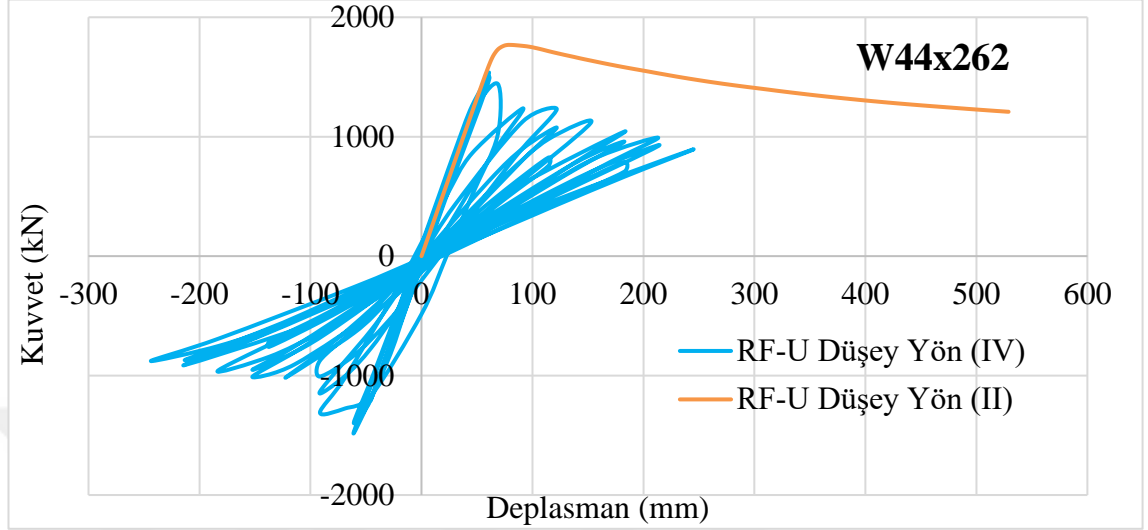
Şekil 3.24. I ve III yükleme prosedürleri altında W44x262 kesitli kirişin Düşey Yük/Düşey Deplasman eğrileri.

Şekil 3.23 ve Şekil 3.24 incelendiğinde; tek yönlü statik yükleme altındaki davranışa (I no'lu yükleme prosedürü) göre, dinamik etkiyi dikkate almak adına uygulanan tersinir tekrarlı yükleme protokolü (III no'lu yükleme prosedürü) altında taşıma gücünün %6.96 daha düşük olduğu görülmektedir. Bu duruma çevrimsel yükleme altında elemanın yorulmasının etken olduğu düşünülmektedir.

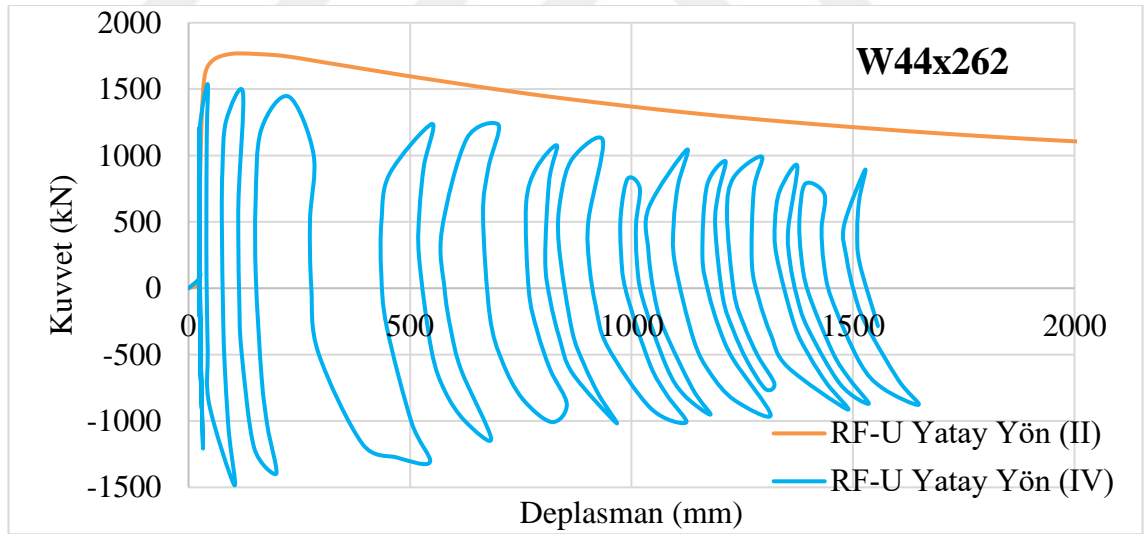
Sürekli olarak etkileyen tersinir tekrarlı yüklerin etkisi altında malzemede yorulma etkisinin gerçekleşmesi beklenen bir durumdur. Çelik kirişlerde yorulma etkisi, tekrarlayan yüklerin uzun süre boyunca uygulanması sonucunda meydana gelen bir olay olduğu bilinmektedir. Yorulma etkisi elemanın karakteristik malzeme dayanım sınırlarına ulaşmadan deformasyona uğramasına sebep olur [59]. Yorulma etkisi, çelik yapı elemanlarında özellikle dinamik yüklerin etkisi altındaki kren yürüme yolu kirişleri gibi tekrarlı yüklemelere maruz kalan elemanlar için incelenmesi gereken bir etkidir. Malzeme yorulma durumuna ulaştığında, statik yükleme dayanımından daha düşük bir dayanım sergileyebilir.

Kren, işletme faaliyetleri sırasında yürüme yolu kirişinin boyuna doğrultusunda hareket etmektedir. Fakat kren üzerinde bulunan yükün taşınmasını sağlayan kren arabası kiriş enkesitine dik doğrultuda hareket etmektedir. Bu durum kren arabasının frenaj/demeraj davranışları esnasında kiriş enkesitine dik yönde bir yatay kuvvet

ortaya çıkarmaktadır. Bu yükleme durumunun göz önünde bulundurulması adına II ve IV no'lu yükleme prosedürleri tanımlanmıştır.



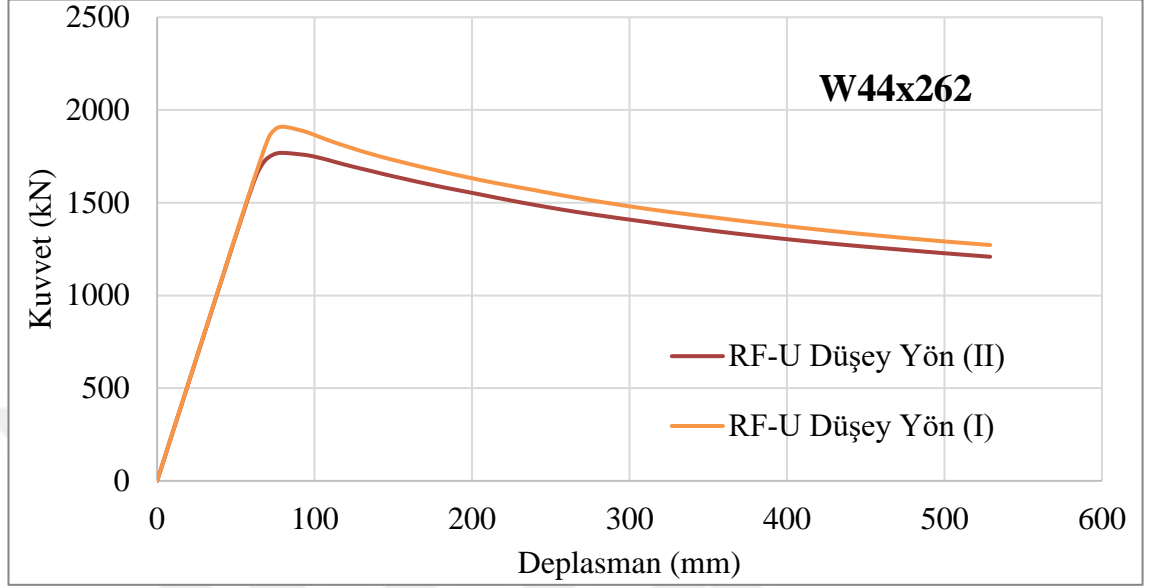
Şekil 3.25. II ve IV yükleme prosedürleri altında W44x262 kesitli kirişin Düşey Yük/Düşey Deplasman eğrileri.



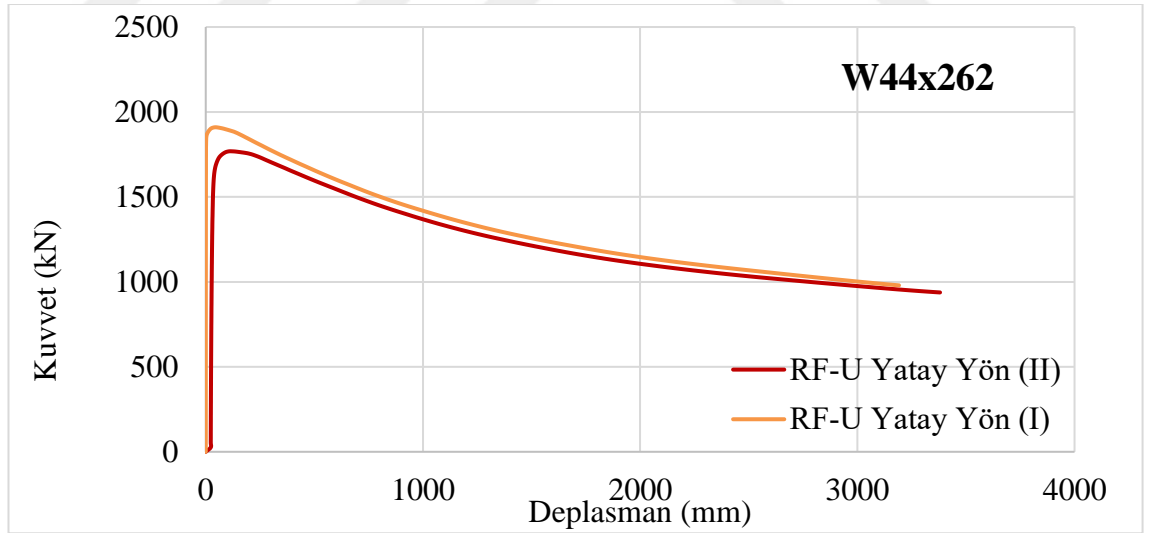
Şekil 3.26. II ve IV yükleme prosedürleri altında W44x262 kesitli kirişin Düşey Yük/Yatay Deplasman eğrileri.

Şekil 3.25 ve Şekil 3.26 incelendiğinde; tek yönlü statik yükleme altında frenaj etkisinden oluşan yatay atalet kuvvetinin de dikkate alındığı duruma (II no'lu yükleme prosedürü) göre, dinamik etkiyi dikkate almak adına uygulanan tersinir tekrarlı yükleme protokolü ve frenaj etkisinden oluşan yatay atalet kuvvetinin etkidiği

durumda (IV no'lu yükleme prosedürü) taşıma gücünün %13.07 daha düşük olduğu görülmektedir.



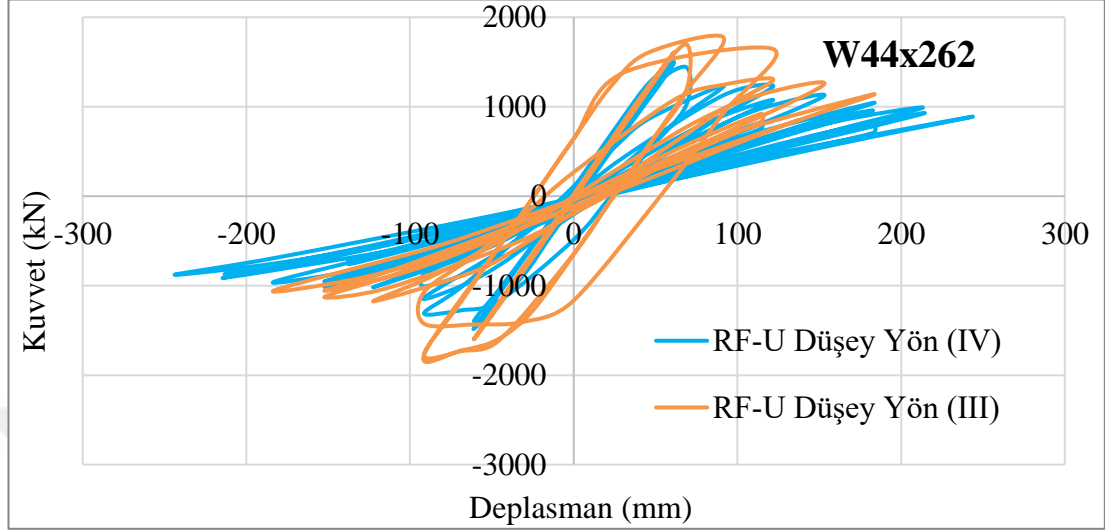
Şekil 3.27. I ve II yükleme prosedürleri altında W44x262 kesitli kirişin Düşey Yük/Düşey Deplasman eğrileri.



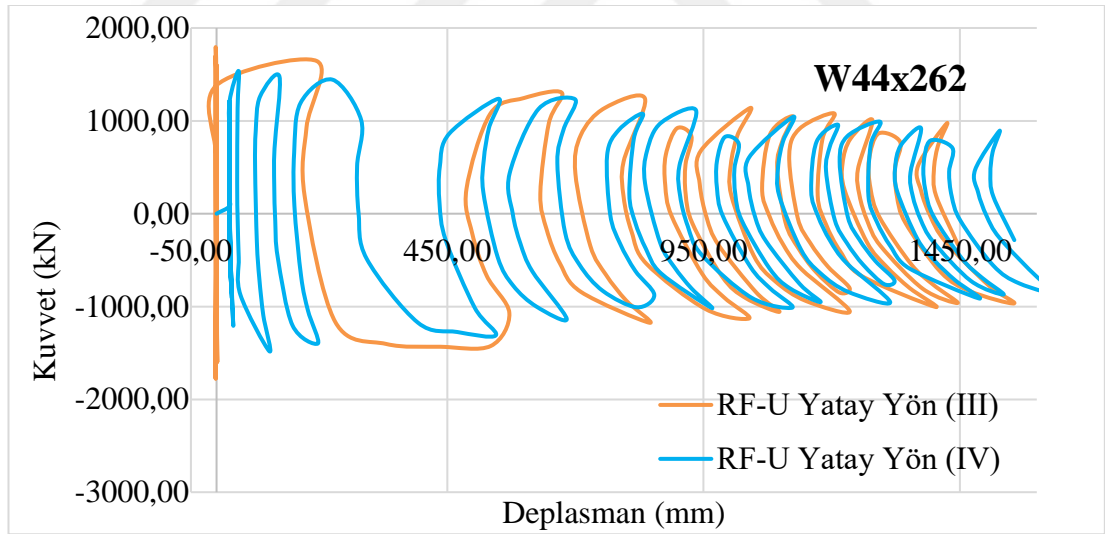
Şekil 3.28. I ve II yükleme prosedürleri altında W44x262 kesitli kirişin Düşey Yük/Yatay Deplasman eğrileri.

Şekil 3.27 ve Şekil 3.28 incelendiğinde; tek yönlü statik yükleme altındaki davranışa (I no'lu yükleme prosedürü) göre, kren frenaj etkisini dikkate almak adına uygulanan tek yönlü statik yükleme ve frenaj etkisinden oluşan yatay atalet kuvvetinin etkidiği

durumda (II no'lu yükleme prosedürü) taşıma gücünün %7.50 daha düşük olduğu görülmektedir.



Şekil 3.29. III ve IV yükleme prosedürleri altında W44x262 kesitli kirişin Düşey Yük/Düşey Deplasman eğrileri.



Şekil 3.30. III ve IV yükleme prosedürleri altında W44x262 kesitli kirişin Düşey Yük/Yatay Deplasman eğrileri.

Şekil 3.29 ve Şekil 3.30 incelendiğinde; dinamik etkiyi dikkate almak adına uygulanan tersinir tekrarlı yükleme protokolü davranışına (III no'lu yükleme prosedürü) göre, dinamik etkiyi dikkate almak adına uygulanan tersinir tekrarlı yükleme protokolü ve frenaj etkisinden oluşan yatay atalet kuvvetinin etkidiği durumda (IV no'lu yükleme prosedürü) taşıma gücünün %13.45 daha düşük olduğu görülmektedir.

Elemanı güçlü eksen etrafında eğilmeye zorlayan bir yükleme gerçekleştiği esnada zayıf eksen doğrultusunda bir yük etkimesi durumunda taşıma kapasitesinde düşüş olduğu görülmüştür. Güçlü eksenleri etrafında eğilmeye zorlanan kirişe aynı anda zayıf eksen doğrultusunda da yük etkidiği durumda; kirişin zayıf eksenleri, kirişin kesitine göre daha düşük moment direncine sahip olduğundan bu eksen doğrultusunda uygulanan yükler, kirişin stabilitesinin daha kolay bozulmasına ve zayıf yönde gerilmelerin artmasına neden olur. Yükün etkisiyle gerilme değerleri ve dolayısıyla stabilite bozulmaları zayıf eksen yönünde arttıkça, kirişin düşey yöndeki rijitlik değerini azalttığı ve kiriş dayanımının daha düşük değerlere gerilemesine neden olduğu düşünülmektedir.

Tez çalışması kapsamında incelenen diğer kiriş kesitlerinin grafikleri EK1’de verilmiştir.

Analiz sonuçlarından elde edilen grafiklere ek olarak çalışma kapsamında ele alınan kesitlerin yükleme prosedürlerine göre kaybettikleri dayanım kayıpları Çizelge 3.9-Çizelge 3.12’te verilmiştir.

Çizelge 3.9. I ve III yükleme prosedürlerinin uygulandığı analiz sonuçlarının karşılaştırılması.

<i><b>KESİT</b></i>	<i><b>P<sub>I</sub></b></i> <i><b>(kN)</b></i>	<i><b>P<sub>III</sub></b></i> <i><b>(kN)</b></i>	<i><b>P<sub>III</sub>/P<sub>I</sub></b></i>	<i><b>Kapasite</b></i> <i><b>Değişimi (%)</b></i>
<b>33W130</b>	626,66	489,07	0,78	-22%
<b>36W135</b>	678,96	537,70	0,79	-21%
<b>36W150</b>	774,17	631,19	0,82	-18%
<b>40W167</b>	885,98	727,09	0,82	-18%
<b>40W183</b>	980,02	825,28	0,84	-16%
<b>44W230</b>	1185,22	1165,07	0,98	-2%
<b>44W262</b>	1909,99	1768,83	0,93	-7%

Çizelge 3.10. I ve II yükleme prosedürlerinin uygulandığı analiz sonuçlarının karşılaştırılması.

<b>KESİT</b>	<b><math>P_I</math> (kN)</b>	<b><math>P_{II}</math> (kN)</b>	<b><math>P_{II}/P_I</math></b>	<b>Kapasite Değişimi (%)</b>
<b>33W130</b>	626,66	579,81	0,93	-7%
<b>36W135</b>	678,96	626,13	0,92	-8%
<b>36W150</b>	774,17	714,93	0,92	-8%
<b>40W167</b>	885,98	840,28	0,95	-5%
<b>40W183</b>	980,02	934,49	0,95	-5%
<b>44W230</b>	1185,22	1175,39	0,99	-1%
<b>44W262</b>	1909,99	1776,14	0,93	-7%

Çizelge 3.11. III ve IV yükleme prosedürlerinin uygulandığı analiz sonuçlarının karşılaştırılması.

<b>KESİT</b>	<b><math>P_{III}</math> (kN)</b>	<b><math>P_{IV}</math> (kN)</b>	<b><math>P_{IV}/P_{III}</math></b>	<b>Kapasite Değişimi (%)</b>
<b>33W130</b>	626,66	420,05	0,67	-33%
<b>36W135</b>	678,96	457,18	0,67	-33%
<b>36W150</b>	774,17	559,23	0,72	-28%
<b>40W167</b>	885,98	688,06	0,78	-22%
<b>40W183</b>	980,02	802,56	0,82	-18%
<b>44W230</b>	1185,22	1057,94	0,89	-11%
<b>44W262</b>	1909,99	1537,57	0,81	-19%

Çizelge 3.12. II ve IV yükleme prosedürlerinin uygulandığı analiz sonuçlarının karşılaştırılması.

<b>KESİT</b>	<b><math>P_{II}</math> (kN)</b>	<b><math>P_{IV}</math> (kN)</b>	<b><math>P_{IV}/P_{III}</math></b>	<b>Kapasite Değişimi (%)</b>
<b>33W130</b>	579,81	420,05	0,72	-28%
<b>36W135</b>	626,13	457,18	0,73	-27%
<b>36W150</b>	714,93	559,23	0,78	-22%
<b>40W167</b>	840,28	688,06	0,82	-18%
<b>40W183</b>	934,49	802,56	0,86	-14%
<b>44W230</b>	1175,39	1057,94	0,90	-10%
<b>44W262</b>	1776,14	1537,57	0,87	-13%

İncelenen grafiklerin ardından oluşturulan tablolardan da görülmektedir ki;

- I (standart düşey yükleme) ile III (SAC yükleme protokolü) durumları arasındaki dayanım değişimi %7,49 standart sapma ile ortalama %14,86,
- I (standart düşey yükleme) ile II (standart düşey ve yatay yükleme) durumları arasındaki dayanım değişimi %2,48 standart sapma ile ortalama %5,86,
- III (SAC yükleme protokolü) ile IV (SAC yükleme protokolü ve yatay yükleme) durumları arasındaki dayanım değişimi %8,26 standart sapma ile ortalama %23,43,
- II (standart düşey ve yatay yükleme) ile IV (SAC yükleme protokolü ve yatay yükleme) durumları arasındaki dayanım değişimi %7,03 standart sapma ile ortalama %18,86,

olarak hesaplanmıştır. Çizelge 3.9-Çizelge 3.12 göstermektedir ki eğilmeye zorlanan bir kiriş için en olumsuz koşul; beklenildiği şekilde güçlü eksen doğrultusunda tersinir tekrarlı yükleme altındayken zayıf eksenden uygulanan yatay yük etkisi olmuştur.

## BÖLÜM 4

### ANALİTİK ÇALIŞMA

ABAQUS sonlu elemanlar yazılımı ile gerçekleştirilen nümerik çalışma sonuçlarının kiriş davranışlarını karşılaştırarak kendi içinde değerlendirilmesinin yanı sıra Türkiye Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapımına Dair Esaslar (ÇYTHYEDY) yönetmeliği [30] koşullarına göre de bir kıyaslama yapılması gerektiği düşünülmüştür. Yapılan çalışmada seçilen Amerikan “W” kesitli kirişlerin plastik, elastik olmayan ve elastik davranışını belirleyen sınır uzunluklar;  $L_p$  ve  $L_r$  tez kapsamında Çizelge 3.5’te verilmiştir.

Çizelge 3.5’ten de görüldüğü üzere ele alınan kirişlerin tamamının yanal olarak desteklenmeyen uzunluğu ( $L_b = 15240 \text{ mm}$ ), elastik burkulma sınır uzunluğu  $L_r$ ’den büyük seçilmiştir. Bu nedenle kiriş kapasitesini sınırlandıran burkulma modu elastik YBB davranışı olmaktadır. Bu durumda kesitler için elastik YBB kapasitesini belirleyen moment değeri ( $M_n$ ) Bölüm 2.3’te bahsedilen Denklem 2.64’ten hesaplanmıştır. Ayrıca tez kapsamında ele alınan kiriş kesitlerinin plastik kapasitelerinden ne oranda kayıp yaşadıklarını görmek adına her bir kesit için plastik moment ( $M_p$ ) kapasiteleri de hesaplanmıştır ve Çizelge 4.1’de sunulmuştur.

Hesaplanan  $M_n$  ve  $M_p$  değerlerinden, kiriş ortasından yükleme durumunda 15240 mm boyundaki kirişler için  $M_n$  ve  $M_p$  momentlerini oluşturacak tekil kuvvet değerleri  $P_n$  ve  $P_p$  elde edilmiş ve Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. ÇYTHYEDY koşullarına göre kirişlerin eğilme dayanımları.

<b>KESİT</b>	<b>L</b> (mm)	<b>F<sub>cr</sub></b> (MPa)	<b>W<sub>ex</sub></b> (mm <sup>3</sup> )	<b>M<sub>p</sub></b> (kNmm)	<b>P<sub>p</sub></b> (kN)	<b>M<sub>n</sub></b> (kNmm)	<b>P<sub>n</sub></b> (kN)
<b>W33x130</b>	15240	69.30	7.65x10 <sup>6</sup>	27.16x10 <sup>5</sup>	710	5.30x10 <sup>5</sup>	140
<b>W36x135</b>	15240	65.85	8.34x10 <sup>6</sup>	29.61x10 <sup>5</sup>	770	5.49x10 <sup>5</sup>	144
<b>W36x150</b>	15240	73.20	9.52x10 <sup>6</sup>	33.79 x10 <sup>5</sup>	880	6.97x10 <sup>5</sup>	182
<b>W40x167</b>	15240	72.24	11.4x10 <sup>6</sup>	40.47 x10 <sup>5</sup>	1060	8.24x10 <sup>5</sup>	216
<b>W40x183</b>	15240	80.20	12.7x10 <sup>6</sup>	45.08 x10 <sup>5</sup>	1180	10.19x10 <sup>5</sup>	267
<b>W44x230</b>	15240	117.40	18x10 <sup>6</sup>	63.90 x10 <sup>5</sup>	1680	21.13x10 <sup>5</sup>	554
<b>W44x262</b>	15240	126.37	20.8x10 <sup>6</sup>	73.84 x10 <sup>5</sup>	1940	26.28x10 <sup>5</sup>	690

Yapılan analitik hesaplamaların ve nümerik çalışmanın sonuçları Çizelge 4.2’de, tez kapsamında incelenen kirişlerin yönetmelik koşullarına göre elastik burkulma davranış bölgesinde olmasından dolayı karakteristik elastik YBB dayanımı (P<sub>n</sub>) hesabı sonuçlarının nümerik çalışma sonuçları ile karşılaştırılması Çizelge 4.3’te verilmiştir.

Çizelge 4.2. Analitik çalışma ile nümerik çalışma sonuçları.

<b>KESİT</b>	<b>P<sub>I</sub></b> (kN)	<b>P<sub>II</sub></b> (kN)	<b>P<sub>III</sub></b> (kN)	<b>P<sub>IV</sub></b> (kN)	<b>P<sub>p</sub></b> (kN)	<b>P<sub>n</sub></b> (kN)
<b>33W130</b>	626,66	489,07	579,81	420,05	712,80	139,15
<b>36W135</b>	678,96	537,70	626,13	457,18	777,09	144,15
<b>36W150</b>	774,17	631,19	714,93	559,25	887,03	182,91
<b>40W167</b>	885,98	727,09	840,28	688,06	1062,20	216,16
<b>40W183</b>	980,02	825,28	934,49	802,56	1183,33	267,33
<b>44W230</b>	1185,22	1165,07	1175,39	1057,94	1677,17	554,63
<b>44W262</b>	1909,99	1768,83	1776,14	1537,57	1938,06	689,92

Çizelge 4.3. Elastik burkulma sonuçları ile nümerik çalışma sonuçlarının karşılaştırılması.

<b>KESİT</b>	<b>P<sub>I</sub>/P<sub>n</sub></b>	<b>P<sub>II</sub>/P<sub>n</sub></b>	<b>P<sub>III</sub>/P<sub>n</sub></b>	<b>P<sub>IV</sub>/P<sub>n</sub></b>
<b>33W130</b>	4,504	3,515	4,167	3,019
<b>36W135</b>	4,710	3,730	4,344	3,172
<b>36W150</b>	4,232	3,451	3,909	3,057
<b>40W167</b>	4,099	3,364	3,887	3,183
<b>40W183</b>	3,666	3,087	3,496	3,002
<b>44W230</b>	2,137	2,101	2,119	1,907
<b>44W262</b>	0,985	0,913	0,917	0,793

Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3 incelendiğinde, kren kirişlerinin dizaynında, ÇYTHYEDY tarafından önerilen kiriş tasarım koşulları kullanılması durumunda, dinamik veya statik etki farketmeksizin yönetmeliğin emniyetli tarafta kaldığı görülmektedir.



## BÖLÜM 5

### SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Kren raylarını taşıdığı varsayılan ve dinamik durumlar gerçekleştiğinde yanal stabilite davranışları incelenen çift simetri eksenli çelik I enkesitli kirişlerin eğilme etkisi altında burulma davranışının taşıma kapasitesine etkisi araştırılan bu çalışma kapsamında; AISC [51] standardında yer alan gövde narinlik oranı büyük olan 7 adet çift simetri eksenine sahip I-enkesitli Amerikan “W” profil kiriş ile 42 adet 3 noktalı eğilme analizi yapılmıştır. Bu analizler, ABAQUS sonlu elemanlar yazılımı ile gerçekleştirilmiştir.

Her kiriş için tek yönlü statik düşey yükleme (I no’lu yükleme prosedürü), tek yönlü statik düşey yükleme ve kren frenaj etkisi olarak hesap edilen yatay yük (II no’lu yükleme prosedürü), dinamik etkiyi temsil etmesi adına SAC [55] yükleme protokolünde karşılık gelen deplasman kontrollü yükleme (III no’lu yükleme prosedürü), SAC [55] yükleme protokolü ve krenin frenaj etkisi olarak hesap edilen yatay yük (IV no’lu yükleme prosedürü) kirişlere etkilerek her kiriş için 6’şar farklı analiz yapılmıştır. Çalışmanın doğrusal olmayan analiz prensibiyle gerçekleştirilmesinden ve davranışı tam anlamıyla göz önüne sermesi istendiğinden dolayı, kirişlere açıklık ortasından ve kesit düşey eksenine dik doğrultuda L/1000 oranında yatay geometrik önkusur tanımlanmıştır.

Analiz edilen her bir kirişin gövde kesitinin doğrusal formunun bozulması sebebiyle gövde buruşmalarının ortaya çıktığı görülmüştür. Kirişlerin göçme modunun yanal burulmalı burkulma olarak değil yanal buruşmalı burkulma olarak gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

Kesitler için yapılan her analiz için düşey yük/düşey deplasman ve düşey yük/yatay deplasman arasındaki ilişkiyi gösteren grafikleri elde edilmiş ve taşıma

kapasitelerindeki değişimler bu grafiklerden okunmuştur. Örneęin; bu kapsamda W44x262 kirişi için sadece düşey yükün etkisi ele alındığında tek yönlü statik yükleme (I no'lu yükleme prosedürü) ile tersinir tekrarlı yükleme (III no'lu yükleme prosedürü) durumları arasında %7 mertebesinde bir dayanım kaybı olduğu görülmüştür. Tersinir tekrarlı yükleme prosedürü, tek yönlü statik yükleme prosedürüne göre daha düşük taşıma gücü göstermiştir. Bu dayanım kaybında, sürekli olarak etkiyen tersinir tekrarlı yüklerin etkisi altında malzemede ortaya çıkan yorulmanın etkili olduğu değerlendirilmektedir. Çelik kirişlerde yorulma etkisinin, tekrarlanır yüklerin uzun süre boyunca uygulanması sonucunda meydana gelen bir olay olduğu bilinmektedir. Yorulma etkisi, çelik yapı elemanlarında özellikle dinamik yüklerin etkisi altındaki kren yürüme yolu kirişleri gibi tekrarlı yüklemelere maruz kalan elemanlar için incelenmesi gereken bir etkidir. Malzeme yorulma durumuna ulaştığında, statik yükleme dayanımından daha düşük bir dayanım sergilemektedir.

Kren arabasının frenaj etkisini incelemek adına yatay yükleri de içeren II ve IV no'lu yükleme prosedürlerinin incelendiği analiz sonuçlarında; çevrimsel yükleme ile birlikte yatay yük bulunması durumunda ortaya çıkan taşıma gücünün, tek yönlü statik yükleme ile birlikte yatay yük olması durumunda ortaya çıkan taşıma gücüne göre %18 daha düşük olduğu sonucu elde edilmiştir. Güçlü ekseni etrafında eğilmeye zorlanan bir kiriş elemanında aynı anda zayıf eksen doğrultusunda da bir yük etkimesi durumunda taşıma kapasitesinde yine bir düşüş olduğu görülmüştür. Yükün etkisiyle gerilme değerleri ve dolayısıyla stabilite bozulmaları zayıf eksen yönünde arttıkça, kirişin düşey yöndeki rijitlik değerini azalttığı ve kiriş dayanımının daha düşük değerlere gerilemesine neden olduğu değerlendirilmektedir.

Kren yürüme yolu kirişlerinin servis ömrü boyunca yoğunlukla maruz kaldığı dinamik etki ve yanal yük etkisinin bir arada olduğu durumda kapasite kaybının oldukça arttığı gözlemlenmiştir. Bu durumun kren yürüme yolu kirişlerinin tasarımında dikkate alınması gerektiği düşünülmektedir. Ülkemizde kren yürüme yolu kirişlerinin tasarımına ilişkin özel bir şartname bulunmaması sebebiyle genel olarak çelik yapıların tasarımında kullanılan ÇYTHYEDY yönetmeliğinde kiriş tasarımı için önerilen denklemler baz alınarak ayrıca hesap yapılmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Yönetmelik sonuçları ile sonlu elemanlar analizi sonuçları

karşılaştırıldığında; tez kapsamında ele alınan 4 farklı yükleme prosedürüne karşı yönetmelik sonuçlarının aşırı emniyetli tarafta kaldığı görülmüştür.

Tez kapsamında ani yükleme durumunun göz önüne alındığı “*Dynamic Explicit*” analizlerde, elemanların ani olarak eğilme davranışına zorlanması durumunda; statik ve/veya uzun periyotlu dinamik yükleme durumlarına göre çok daha yüksek dayanım ortaya çıkardığı görülmüştür. Bu duruma, kısa zaman aralıklarında şiddetli bir şekilde elemana etkiyen yüklerin eleman üzerinde beklenmedik gerilme ve deformasyonlara sebep olmasının neden olduğu değerlendirilmektedir. Ayrıca elemanın maruz kaldığı yükleme hızının da önemi bu durumda ortaya çıkmaktadır. Yükleme hızı, eleman malzemesinin davranışını etkileyebilir. Eleman, ani kabul edilebilecek bir yüklemeye maruz kaldığında malzemenin gerilme dalgalanmalarına daha hızlı tepki vermesi dolayısıyla elemanın daha yüksek gerilme değerlerine ulaşmasına; buna karşın statik yükleme durumunda gerilme yayılımının çok daha yavaş gerçekleşmesinin elemanda daha düşük gerilme değerlerinin ortaya çıkmasına sebep olduğu kanaatine varılmaktadır. Bu kapsamda “*Dynamic Explicit*” analiz malzemenin deformasyonunu etkileyerek dinamik yükleme sonuçlarının daha büyük çıkmasına neden olmaktadır. Literatür incelendiğinde dinamik yükleme sonuçlarının statik veya daha uzun zamana yayılmış dinamik yüklemelere göre daha büyük çıkmasının bir başka sebebinin de elemana uygulanan yükleme frekansının olabileceği belirtilmektedir. Eleman rezonansa girmesi durumunda, uygulanan küçük bir yükte dahi daha büyük dayanımlar göstererek deforme olabilir.

Ayrıca yapılan literatür çalışmasında kren yürüme yolu kirişlerinin yanal burulmalı/buruşmalı burkulma davranışı üzerine yapılmış çalışmaların sayısının az olduğu; araştırmacıların, spesifik olarak vinç yürüme yolu kirişlerine odaklanmak yerine daha üst bir başlık olan çelik kirişlerin yanal burulmalı/buruşmalı burkulma davranışı üzerine odaklandıkları görülmüştür. Bu nedenle literatürde kren yürüme yolu kirişlerinin davranışlarını inceleyen çalışmaların yaygınlaşması gerektiği düşünülmektedir. Ender olarak incelenen konu üzerinde yapılan bu tez çalışmasının literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir ayrıca gelecek çalışmalara dair bir öneri niteliği taşımaktadır.

## KAYNAKLAR

1. Dürr, A. and Walter, S., "Zum Biegedrillknicken von Kranbahnträgern aus winkelveerärkten Walzprofilen", *Stahlbau*, 86 (8): 729–735 (2017).
2. Maali, M., Aydin, A. C., and Sađirođlu, M., "Investigation of innovative steel runway beam in industrial building", *Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences*, 40 (7): 2239–2251 (2015).
3. Trahair, N. S., "Limit States Design of Crane Runway Girders", *Engineering Structures*, 240 (January): (2021).
4. Musilek, J., "Horizontal Forces on Crane Runway Caused by Skewing of the Crane", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 471 (5): (2019).
5. Musilek, J., "Dynamical Model for Determination of Horizontal Forces on Crane Runway during Motion of the Crane", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 603 (5): (2019).
6. Rebelo, C., Lopes, N., Simđes da Silva, L., Nethercot, D., and Vila Real, P. M. M., "Statistical Evaluation of The Lateral-Torsional Buckling Resistance of Steel I-Beams, Part 1: Variability of the Eurocode 3 Resistance Model", *Journal of Constructional Steel Research*, 65 (4): 818–831 (2009).
7. Kalkan, I. and Buyukkaragoz, A., "A Numerical and Analytical Study on Distortional Buckling of Doubly-Symmetric Steel I-Beams", *Journal of Constructional Steel Research*, 70: 289–297 (2012).
8. Mudenda, K. and Zingoni, A., "Lateral-Torsional Buckling Behavior of Hot-Rolled Steel Beams with Flange Upstands", *Journal of Constructional Steel Research*, 144: 53–64 (2018).
9. Rossi, A., Nicoletti, R. S., de Souza, A. S. C., and Martins, C. H., "Numerical Assessment of Lateral Distortional Buckling In Steel-Concrete Composite Beams", *Journal of Constructional Steel Research*, 172: (2020).
10. Wang, K., Xiao, M., Chung, K. F., and Nethercot, D. A., "Lateral torsional buckling of partially restrained beams of high strength S690 welded I-sections", *Journal of Constructional Steel Research*, 184: (2021).
11. Araujo, H. F., Andrade, C. M., Basaglia, C., and Camotim, D., "Lateral-Distortional Buckling of Steel-Concrete Composite Beams: Kinematics, constrained-mode GBT and analytical formulae", *Journal of Constructional Steel Research*, 192: (2022).

12. Lebastard, M., Couchaux, M., Santana, M. V. B., Bureau, A., and Hjiáj, M., "Elastic Lateral-Torsional Buckling of Beams With Warping Restraints At Supports", *Journal of Constructional Steel Research*, 197: (2022).
13. Trahair, N. S., "Distortional Buckling of Overhanging Monorails", *Engineering Structures*, 32 (4): 982–987 (2010).
14. Trahair, N. S., "Lateral-Distortional Buckling of Monorails", *Engineering Structures*, 31 (12): 2873–2879 (2009).
15. Anapayan, T., Mahendran, M., and Mahaarachchi, D., "Lateral Distortional Buckling Tests of a New Hollow Flange Channel Beam", *Thin-Walled Structures*, 49 (1): 13–25 (2011).
16. Zhang, W. F., "Symmetric and Antisymmetric Lateral–Torsional Buckling of Prestressed Steel I-Beams", *Thin-Walled Structures*, 122: 463–479 (2018).
17. Tankova, T., Rodrigues, F., Leitão, C., Martins, C., and Simões da Silva, L., "Lateral-Torsional Buckling of High Strength Steel Beams: Experimental Resistance", *Thin-Walled Structures*, 164: (2021).
18. de Carvalho, A. S., Rossi, A., and Martins, C. H., "Assessment of Lateral–Torsional Buckling in Steel I-Beams with Sinusoidal Web Openings", *Thin-Walled Structures*, 175: (2022).
19. Ranjithkumar, M., Usha Priya, B. T., and Punitha Kumar, A., "Lateral Torsional Buckling of Steel Beams Strengthened by Steel Plate", (2021).
20. Muhammed Jasir, T. and Raj, M. P., "Numerical Investigation on Behaviour of Castellated Steel Beam in Lateral Distortional Buckling", *Materials Today: Proceedings*, 65: 3874–3880 (2022).
21. Moghbeli, A. and Sharifi, Y., "New Predictive Equations for Lateral-Distortional Buckling Capacity Assessment of Cellular Steel Beams", *Structures*, 29: 911–923 (2021).
22. Xiong, G., Feng, Y., Peng, Q., Kang, S. B., Zhang, Y., and Fan, Y. L., "Lateral-Torsional Buckling Behaviour of 690 MPa High Strength Steel Beams", *Structures*, 33: 3999–4010 (2021).
23. Kural, S., "Kren Kirişlerinin Hareketli Yük Altındaki Dinamik Davranışlarının İncelenmesi", (2018).
24. "Antik Teknoloji; Unutulmuş Başarılar – Arkeo|284|", <https://arkeo284.wordpress.com/2016/12/21/antik-teknoloji/> (2023).
25. Esen, İ., "Hareketli Yükler Altındaki Köprülü Kren Kirişlerinin Dinamik (Mukavemet) Analizi", *İstanbul Teknik Üniversitesi Doktora Tezi*, (2009).
26. Erdöl, T., "Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Portal Vinç Tasarımı, Analizi ve Kutu Kiriş En İyileşmesi", (2007).

27. "Portal Vinçler", <https://www.vemakvinc.com.tr/sayfalar/portal-vinçler/22> (2023).
28. "Çift Kiriş Gezer Köprülü Vinçler - Çandıroğlu Vinç Makina, Portal Vinç, Çift Kirişli Vinç, Vinç İmalat, Köprülü Vinç", <https://candiroglumakina.com.tr/cift-kiris-gezer-koprulu-vinçler/> (2023).
29. Mehmet Fethi Ertenli, "Yanal Buruşmalı Burkulmaya Maruz Kalan Çift Simetri Eksenli I-Enkesitli Çelik Kirişlerin Elastik ve Plastik Burkulma Boyu Limitlerinin Belirlenmesi", (2021).
30. "Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapımına Daire Esaslar", Türkiye, (2018).
31. Stephen P. Timoshenko and James M. Gere, "Theory of Elastic Stability", New York, (1961).
32. Salmon, C. G., Johnson, J. E., and Malhas, F. A., "Steel Structures Design and Behavior", (2009).
33. Galambos, T. V. (Theodore V. ), "Structural Members and Frames", *Dover Publications*, (1968).
34. Bradford, M. A., "Lateral-Distortional Buckling of Steel I-Section Members", *Journal of Constructional Steel Research*, 23 (1–3): 97–116 (1992).
35. Cheung, Y. K., "Finite Strip Method in Structural Analysis", *Pergamon Press*, 232 (1976).
36. Hancock, G., "Local Distortional and Lateral Buckling of I-Beams", *Journal of The Structural Division*, (1978).
37. Pi, Y.-L. and Trahair, N. S., "Distortion and Warping at Beam Supports", *Journal of Structural Engineering*, 126 (11): (2000).
38. Kalkan, I. and Buyukkaragoz, A., "A numerical and analytical study on distortional buckling of doubly-symmetric steel I-beams", *Journal Of Constructional Steel Research*, 70: 289–297 (2012).
39. Pi, Y. L. and Trahair, N. S., "Distortion and Warping at Beam Supports", *Research Report - University of Sydney, Department of Civil Engineering*, (790): 1–34 (1999).
40. Standards Association of Australia., "AS4100 Steel Structures", *The Association*, 200 (1998).
41. Nethercot, D. A. and Trahair, N. S., "Inelastic Lateral Buckling of Determinate Beams", *Journal of The Structural Division*, 102 (ST4): (1976).
42. Bradford, M. A., "Inelastic Buckling of Tapered Monosymmetric I-Beams", (1989).

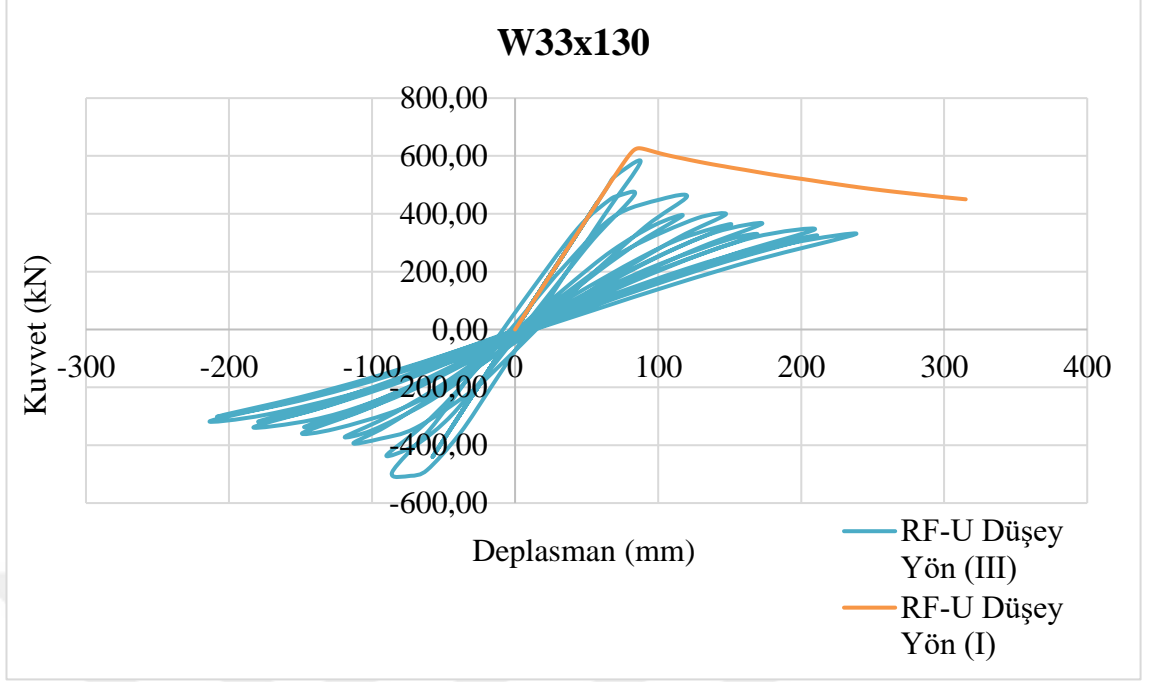
43. Bradford, M. A., "Buckling Strength of Deformable Monosymmetric I-Beams", (1988).
44. Ertenli, M. F., Kalkan, I. ve Büyükkaragöz, A., "Gövde Buruşmalarının Elastik Olmayan Yanal Burkulma Sınır Uzunluğuna Etkisi", *Journal of Polytechnic*, 1–1 (2021).
45. Klaus-Jürgen Bathe, "Finite Element Procedures", (2006).
46. Zienkiewicz, O., Taylor, R., and Zhu, J. Z., "The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals: Seventh Edition", *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals: Seventh Edition*, 1–714 (2013).
47. J. N. Reddy, "Introduction to the Finite Element Method", *McGraw-Hill Education*, (2019).
48. Liu, G. R. and Quek, S. S., "The Finite Element Method: A Practical Course: Second Edition", *The Finite Element Method: A Practical Course: Second Edition*, 1–433 (2013).
49. Thomas J. R. Hughes, "The Finite Element Method: Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis", Dover Publications, (2000).
50. Y. Wang, L. Yang, B. Gao, Y. Shi, H. Yuan, Experimental study of lateral-torsional buckling behavior of stainless steel welded I-section beams, *Int. J. Steel Struct.*, 2014.
51. American Institute of Steel Construction, "Steel Construction Manual 15th Edition", (2017).
52. Arulanandam, P. M., Sivasubramnaian, M. V. R., Chellapandian, M., Murali, G., and Vatin, N. I., "Analytical and Numerical Investigation of the Behavior of Engineered Cementitious Composite Members Under Shear Loads", *Materials*, 15 (13): (2022).
53. Alpay Özgen ve Güliz Bayramoğlu, "Kren Yollarının Tasarımı", *Birsen Yayınevi*, 209 (2013).
54. MacCrimmon, R. A., "Crane-Supporting Steel Structures: Design Guide", *Canadian Institute of Steel Construction*, (2009).
55. Hutchinson, T. C., Zhang, J., and Eva, C., "Development of a Drift Protocol for Seismic Performance Evaluation Considering a Damage Index Concept", *Earthquake Spectra*, 27 (4): 1049–1076 (2011).
56. Raymond A. Serway, Robert J. Beichner, and John W. Jevett, Jr., "Serway Physics 1".
57. Chopra, A. K., "Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering", [*Pearson Education India*], 912 (2007).

58. Clough, R. W. and Penzien, J., "Dynamics of Structures", (2003).
59. James M. Gere and Barry J. Goodno, "Mechanics of Material", (2011).

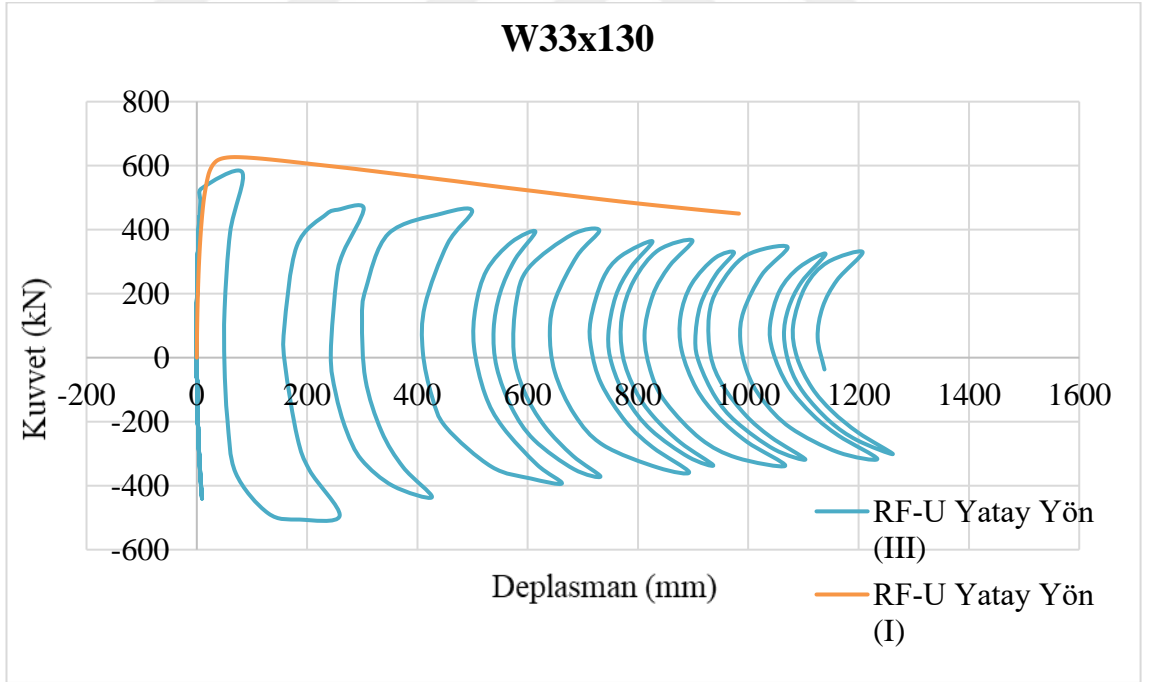


**EK AÇIKLAMALAR A.**

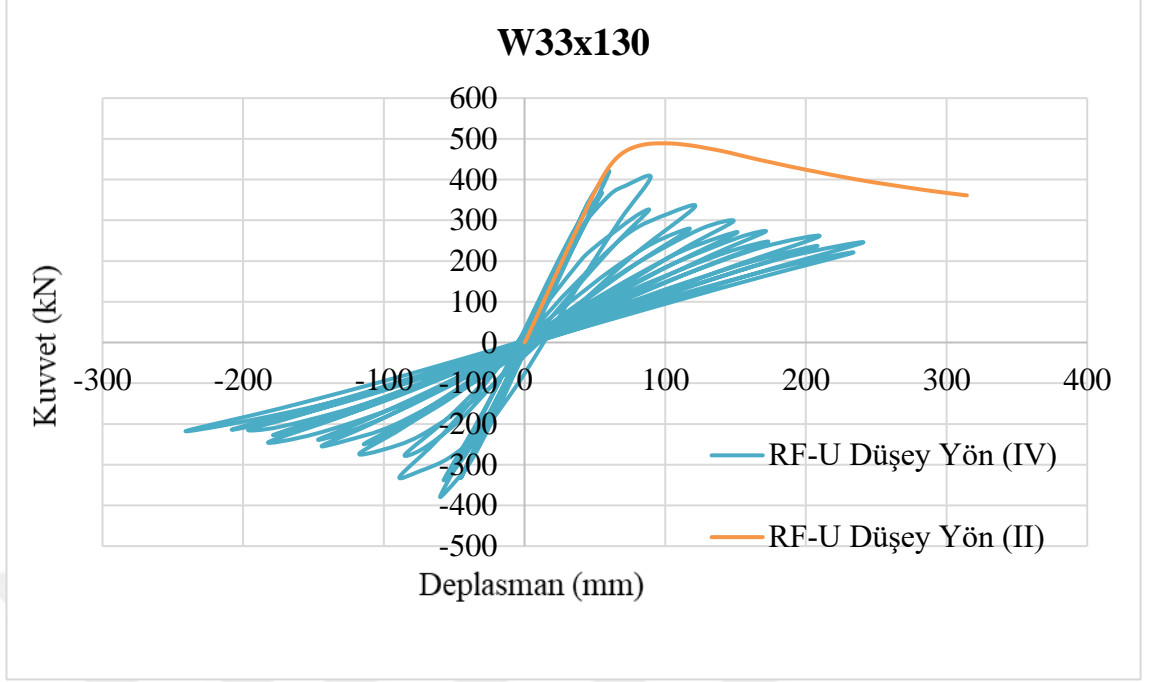
**NÜMERİK ÇALIŞMA SONUÇ GRAFİKLERİ**



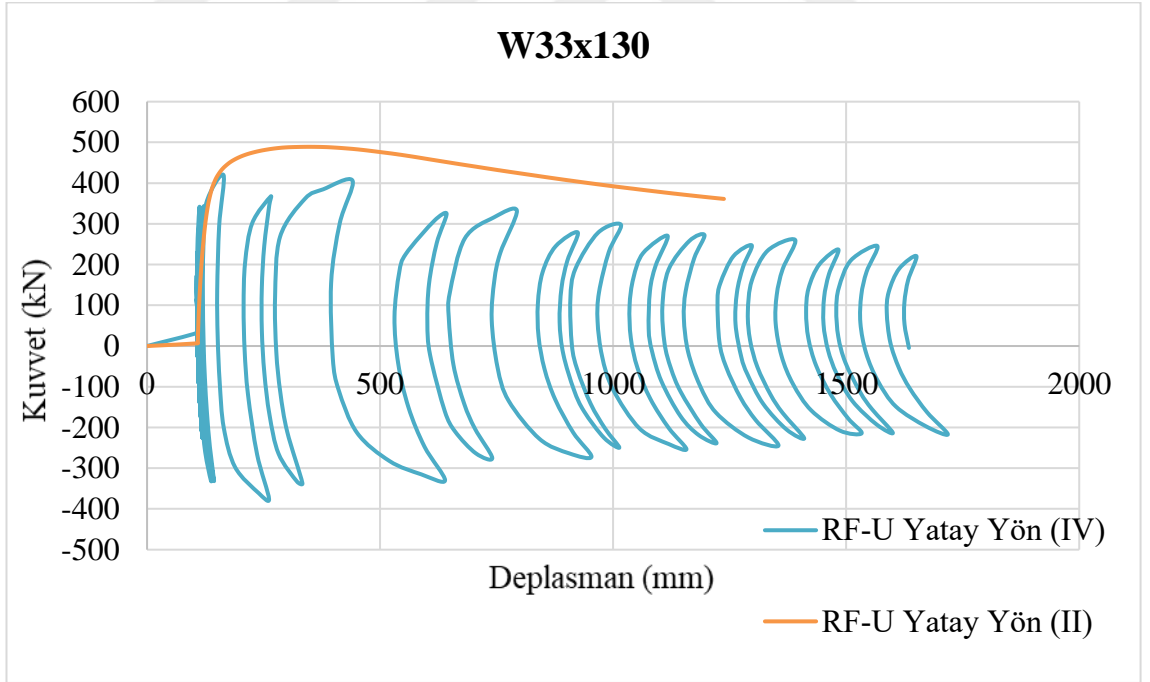
Şekil Ek A.1. I ve III yükleme prosedürleri altında W33x130 kesitli kirişin Düşey Yük/Düşey Deplasman eğrileri.



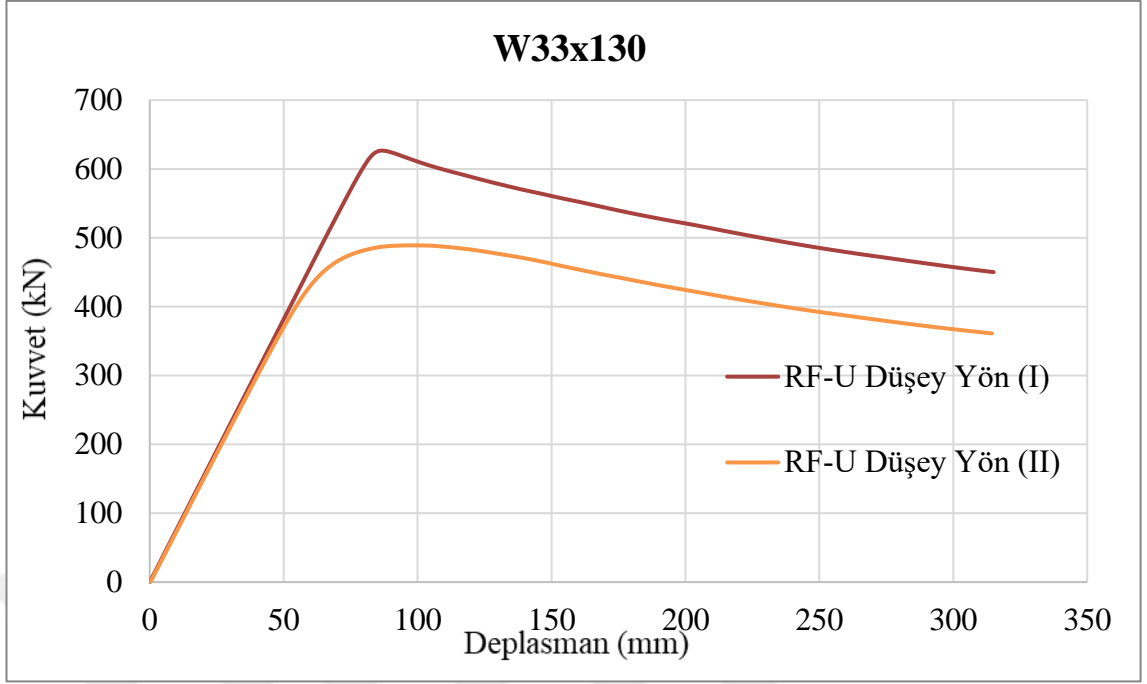
Şekil Ek A.2. I ve III yükleme prosedürleri altında W33x130 kesitli kirişin Düşey Yük/Yatay Deplasman eğrileri



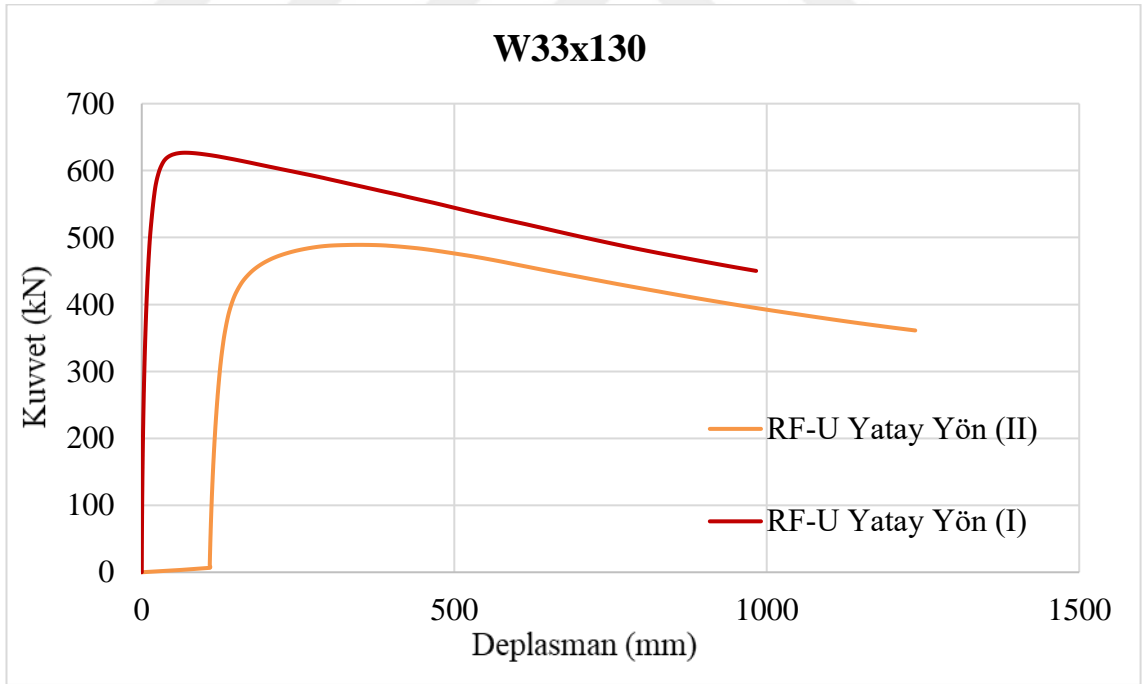
Şekil Ek A.3. II ve IV yükleme prosedürleri altında W33x130 kesitli kirişin Düşey Yük/Düşey Deplasman eğrileri.



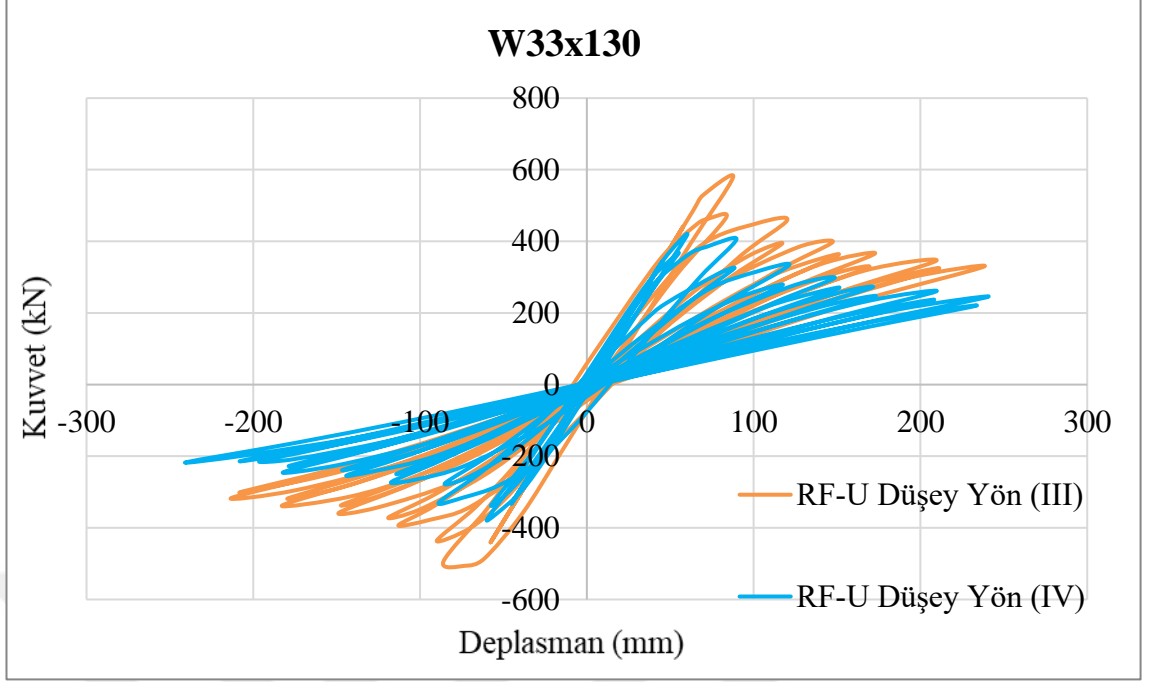
Şekil Ek A.4. II ve IV yükleme prosedürleri altında W33x130 kesitli kirişin Düşey Yük/Yatay Deplasman eğrileri.



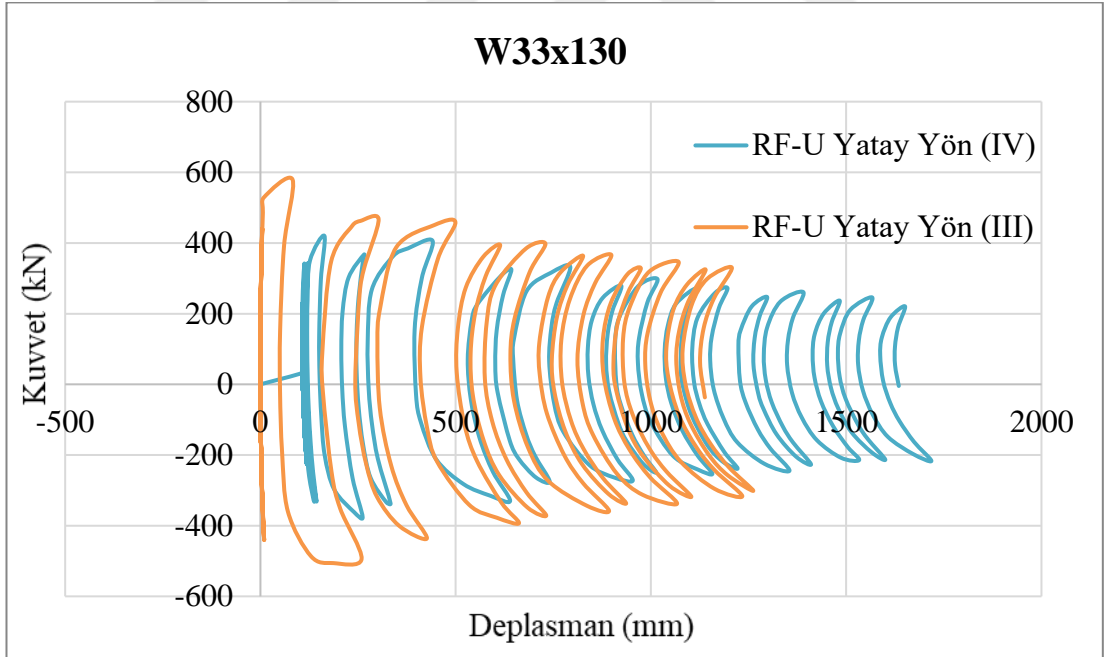
Şekil Ek A.5. I ve II yükleme prosedürleri altında W33x130 kesitli kirişin Düşey Yük/Düşey Deplasman eğrileri.



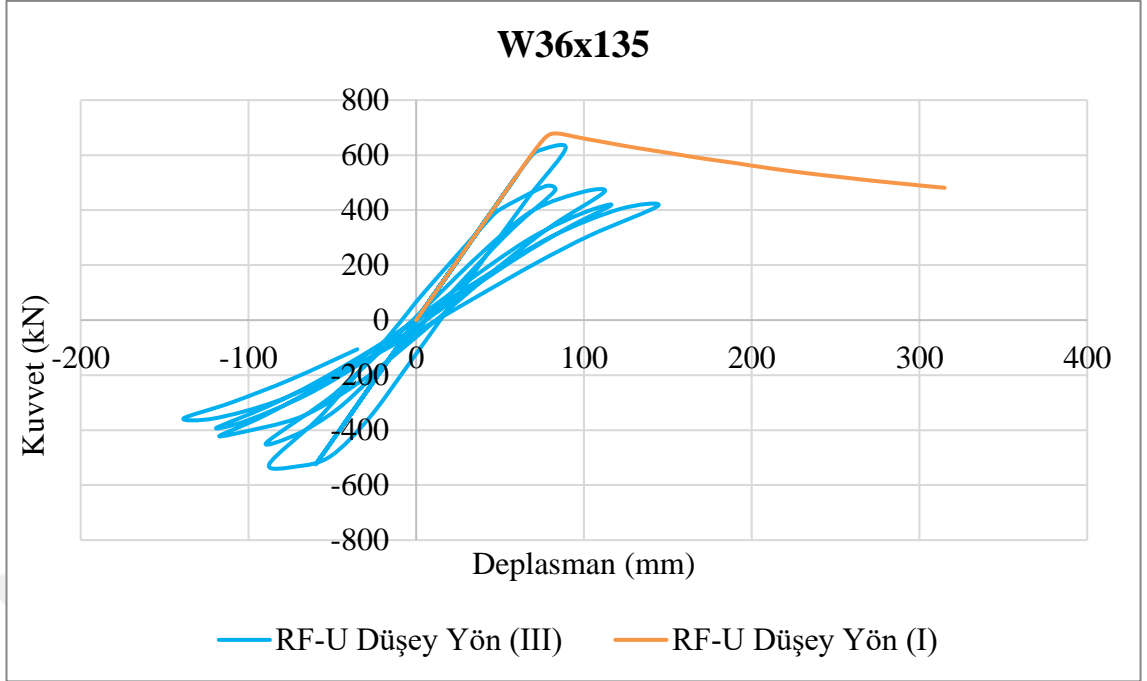
Şekil Ek A.6. I ve II yükleme prosedürleri altında W33x130 kesitli kirişin Düşey Yük/Yatay Deplasman eğrileri.



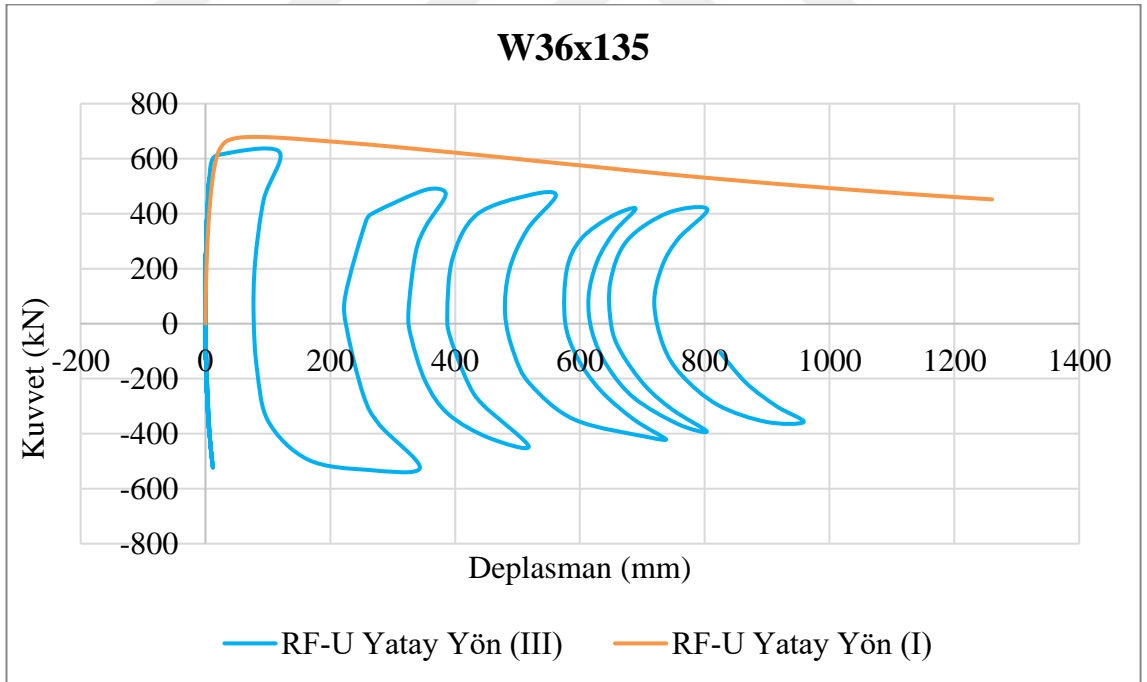
Şekil Ek A.7. III ve IV yükleme prosedürleri altında W33x130 kesitli kirişin Düşey Yük/Düşey Deplasman eğrileri.



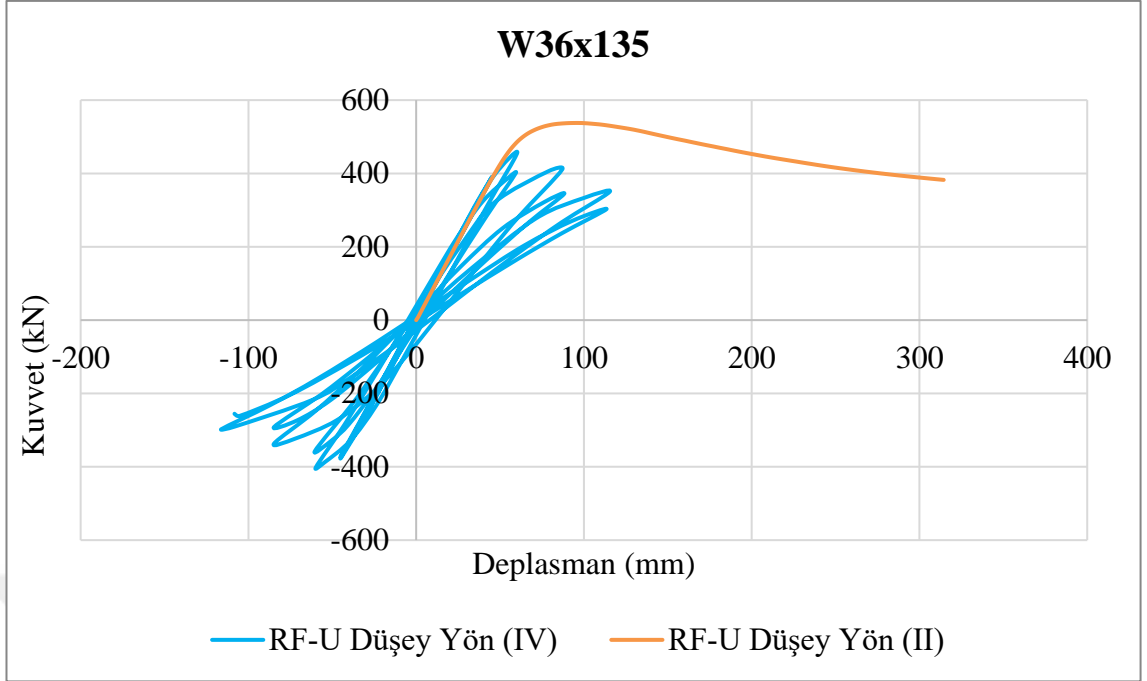
Şekil Ek A.8. III ve IV yükleme prosedürleri altında W33x130 kesitli kirişin Düşey Yük/Yatay Deplasman eğrileri.



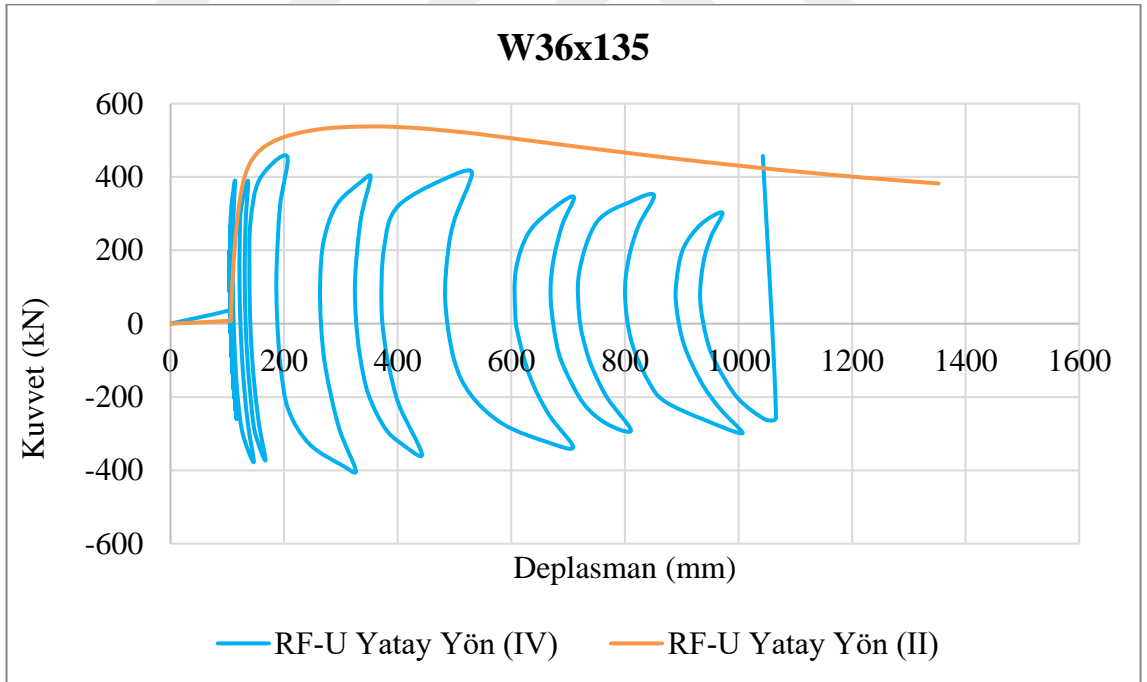
Şekil Ek A.9. I ve III yükleme prosedürleri altında W36x135 kesitli kirişin Düşey Yük/Düşey Deplasman eğrileri.



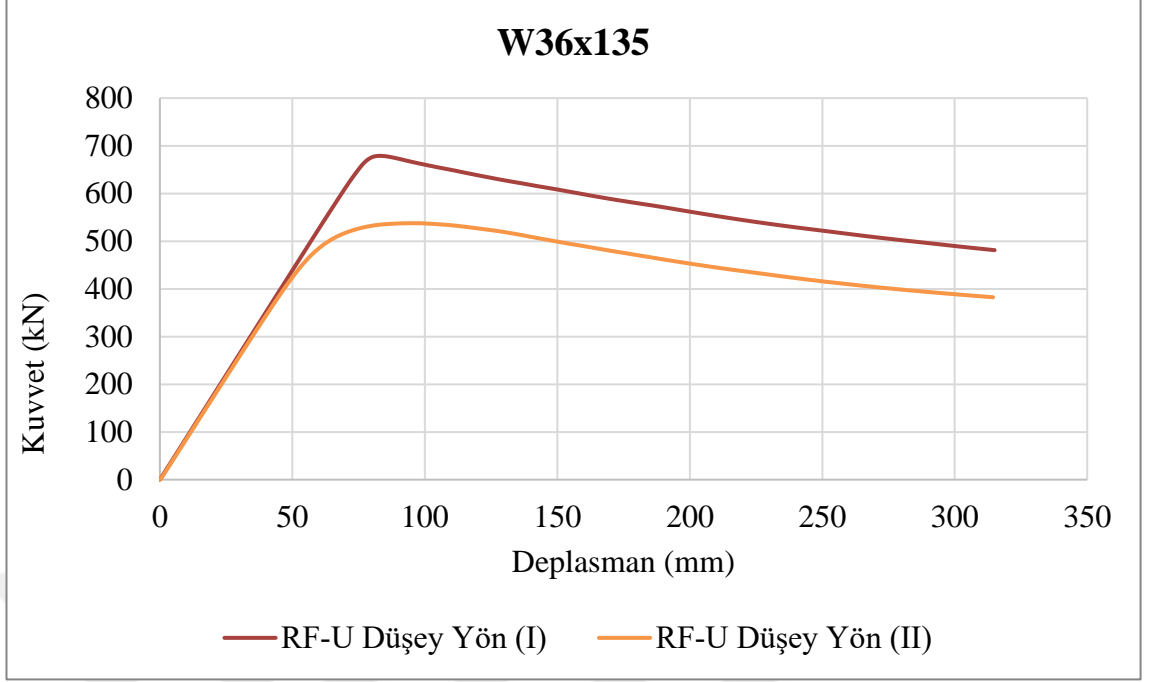
Şekil Ek A.10. I ve III yükleme prosedürleri altında W36x135 kesitli kirişin Düşey Yük/Yatay Deplasman eğrileri



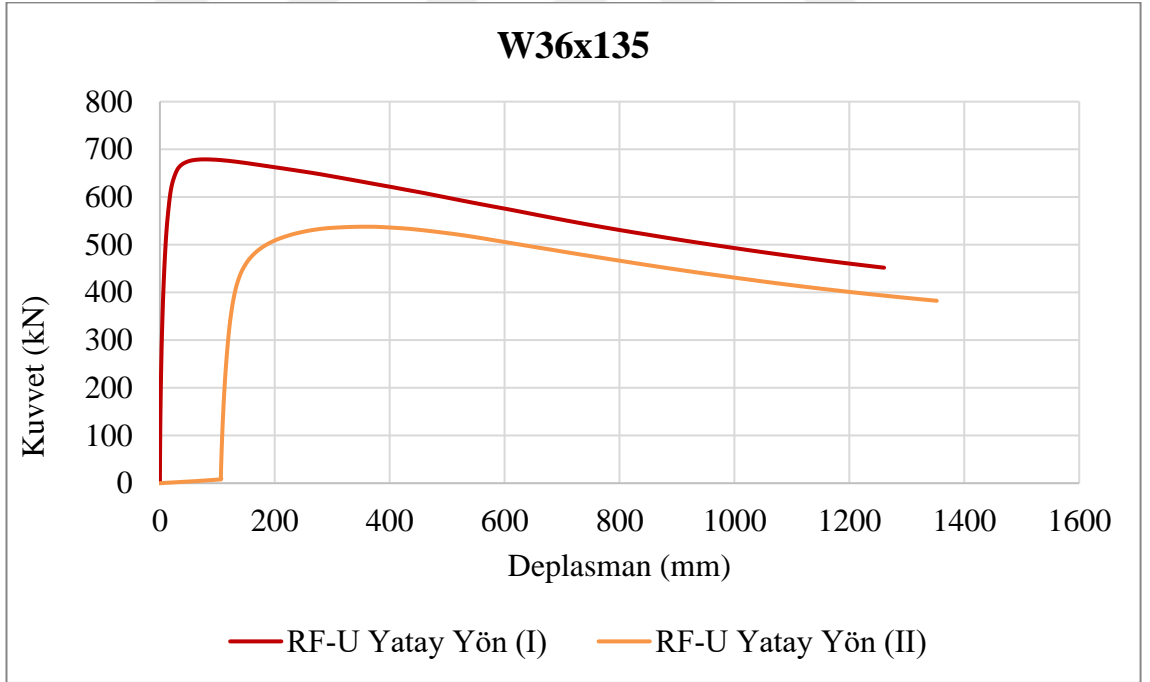
Şekil Ek A.11. II ve IV yükleme prosedürleri altında W36x135 kesitli kirişin Düşey Yük/Düşey Deplasman eğrileri.



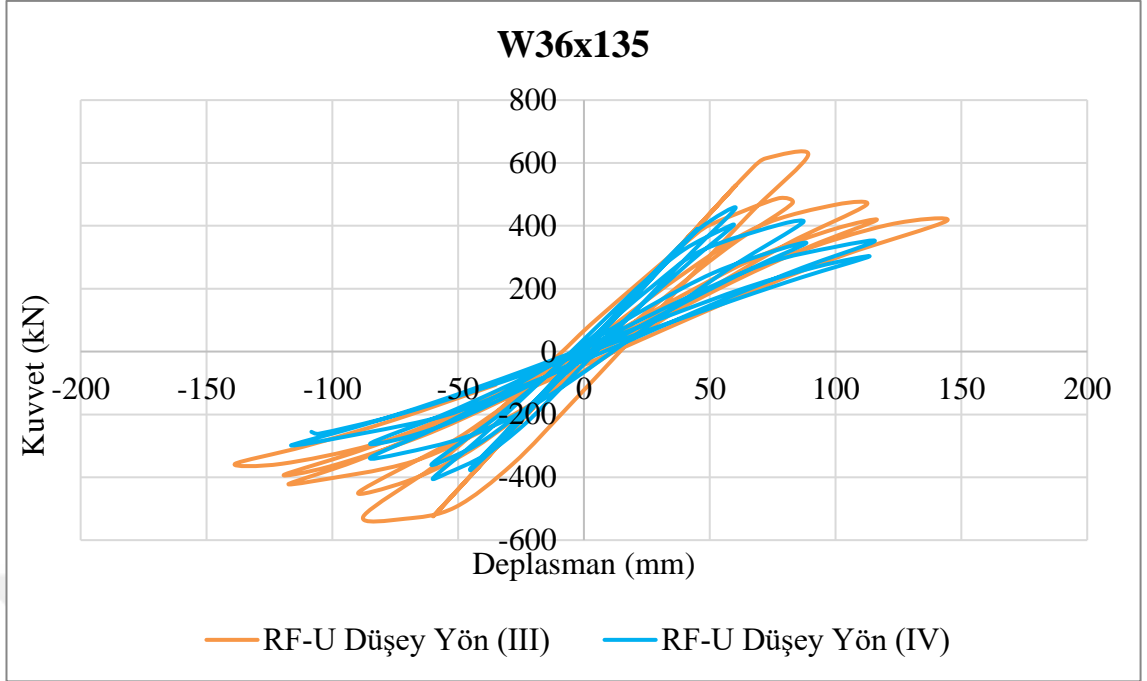
Şekil Ek A.12. II ve IV yükleme prosedürleri altında W36x135 kesitli kirişin Düşey Yük/Yatay Deplasman eğrileri.



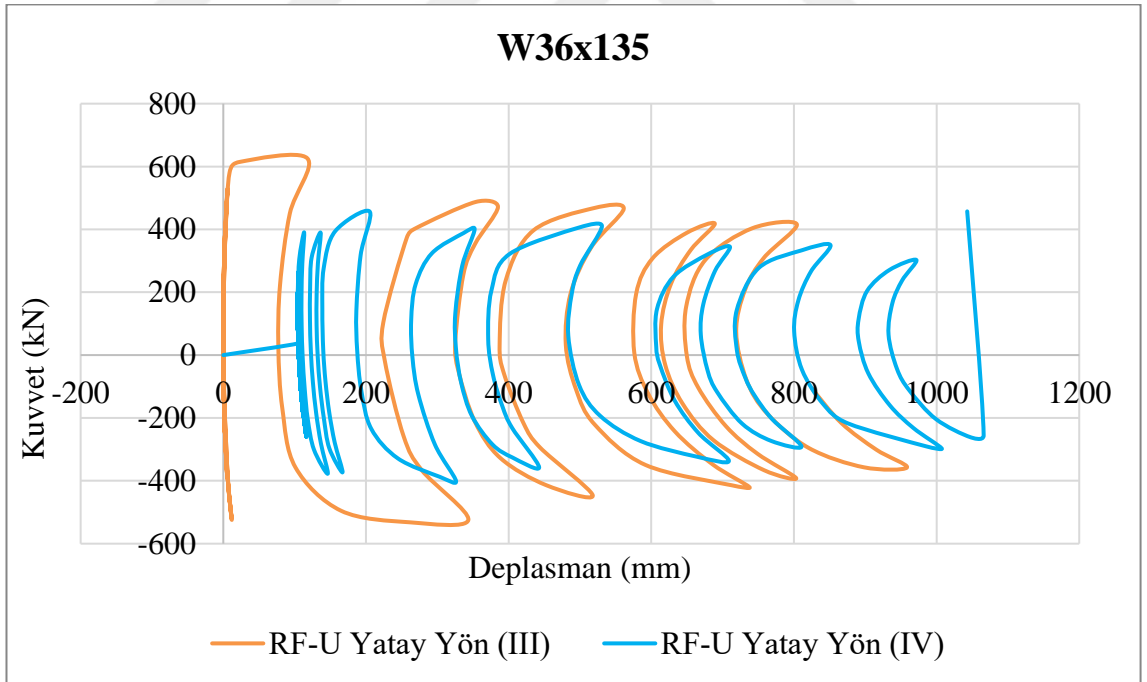
Şekil Ek A.13. I ve II yükleme prosedürleri altında W36x135 kesitli kirişin Düşey Yük/Düşey Deplasman eğrileri.



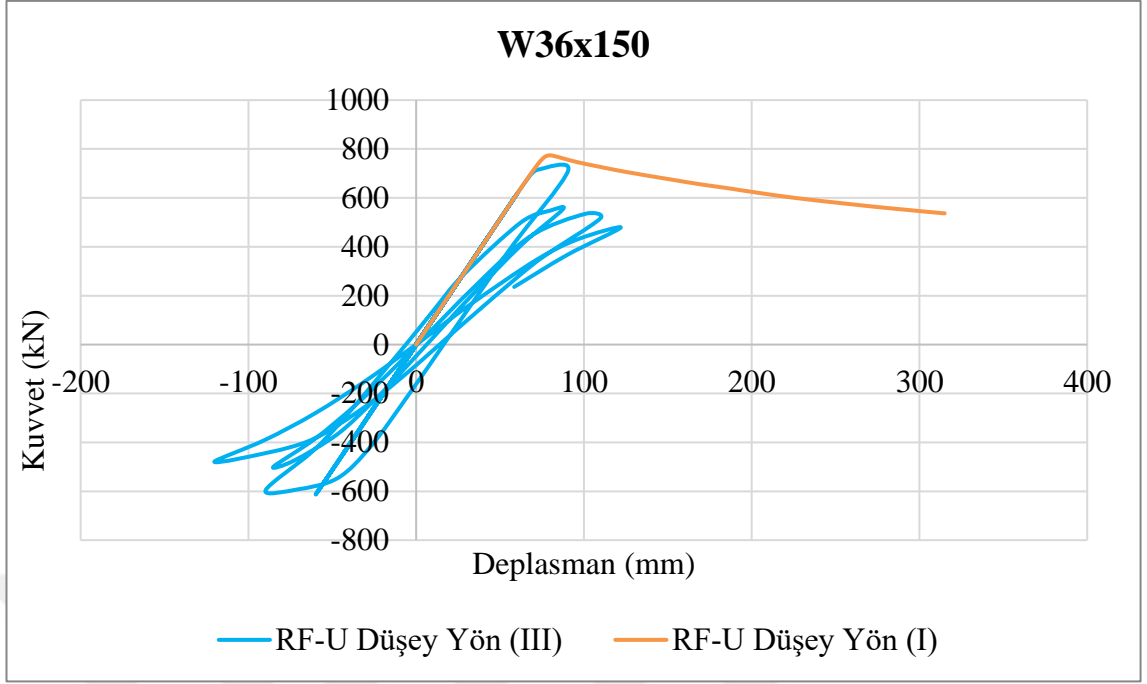
Şekil Ek A.14. I ve II yükleme prosedürleri altında W36x135 kesitli kirişin Düşey Yük/Yatay Deplasman eğrileri.



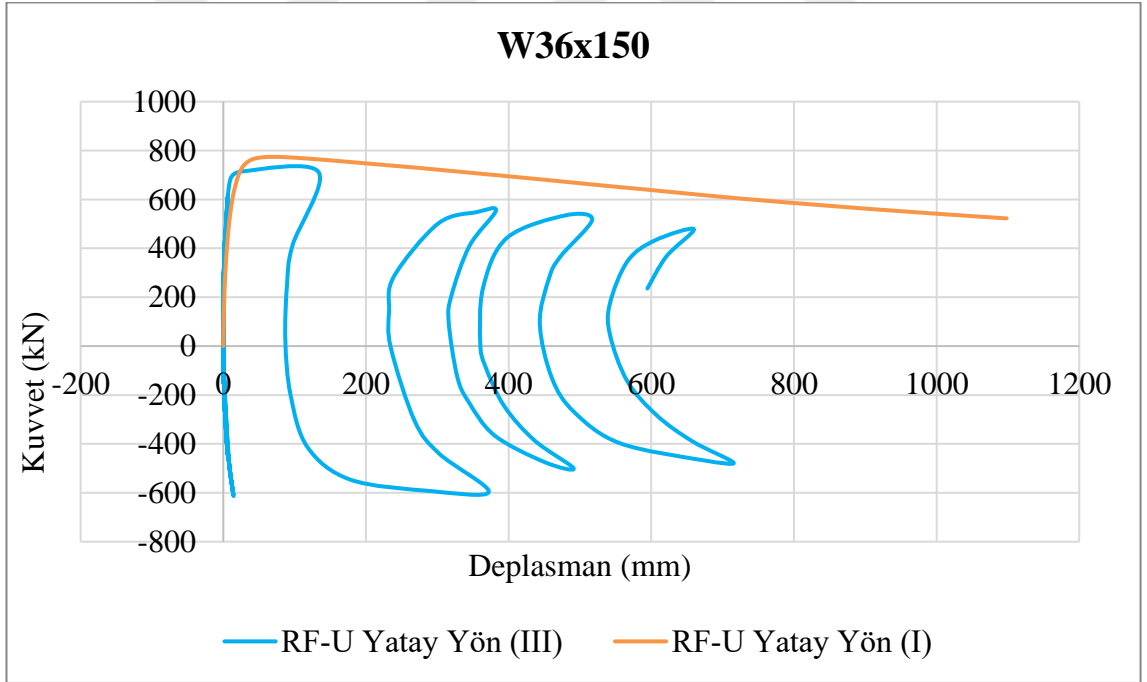
Şekil Ek A.15. III ve IV yükleme prosedürleri altında W36x135 kesitli kirişin Düşey Yük/Düşey Deplasman eğrileri.



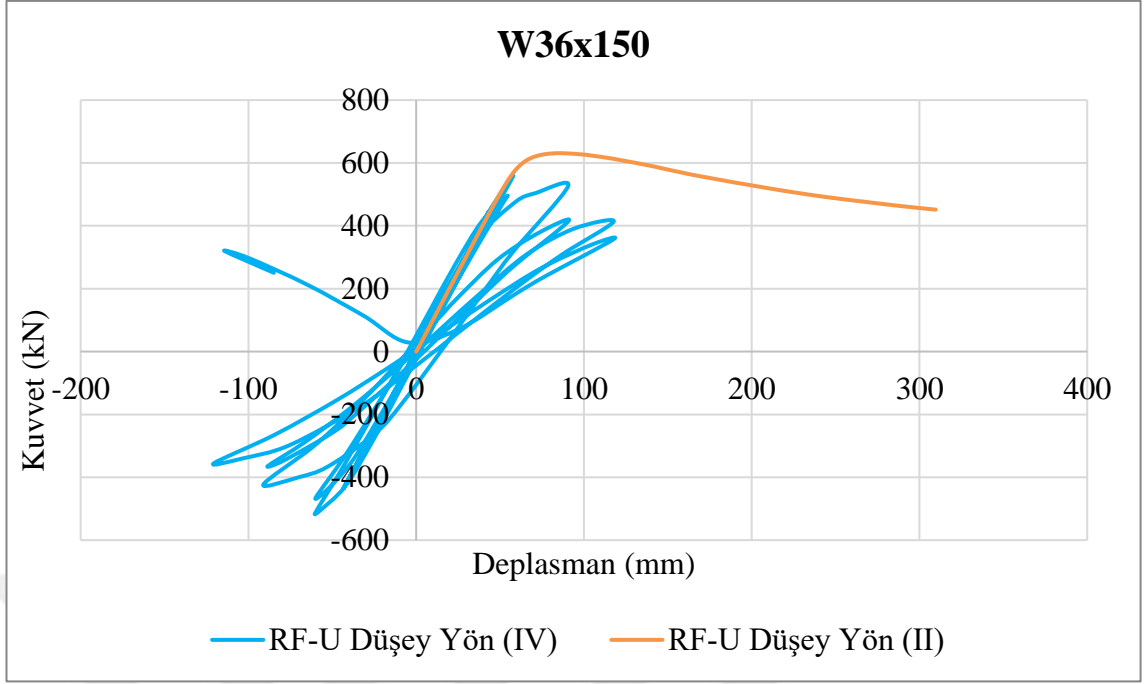
Şekil Ek A.16. III ve IV yükleme prosedürleri altında W36x135 kesitli kirişin Düşey Yük/Yatay Deplasman eğrileri.



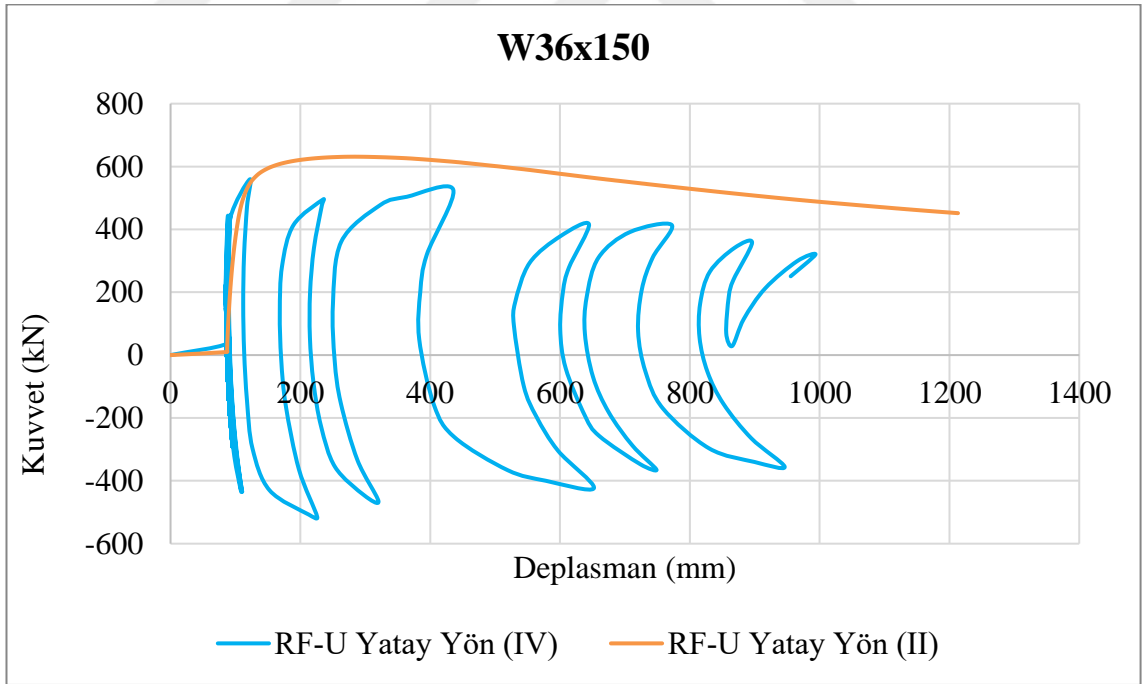
Şekil Ek A.17. I ve III yükleme prosedürleri altında W36x150 kesitli kirişin Düşey Yük/Düşey Deplasman eğrileri.



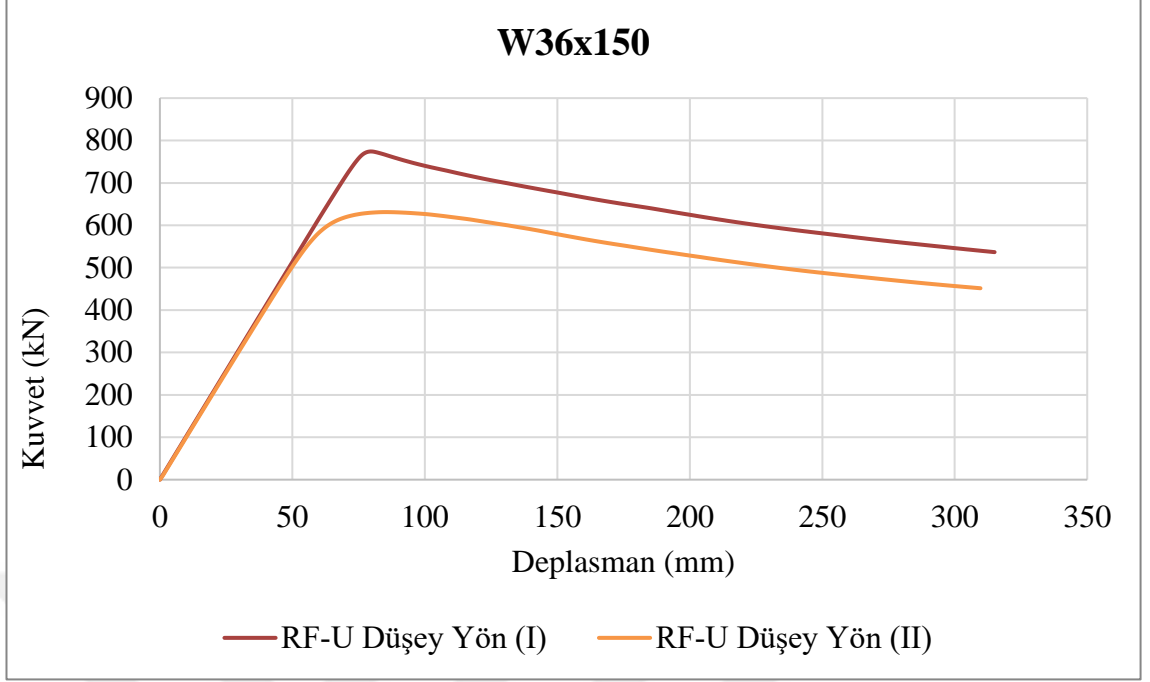
Şekil Ek A.18. I ve III yükleme prosedürleri altında W36x150 kesitli kirişin Düşey Yük/Yatay Deplasman eğrileri



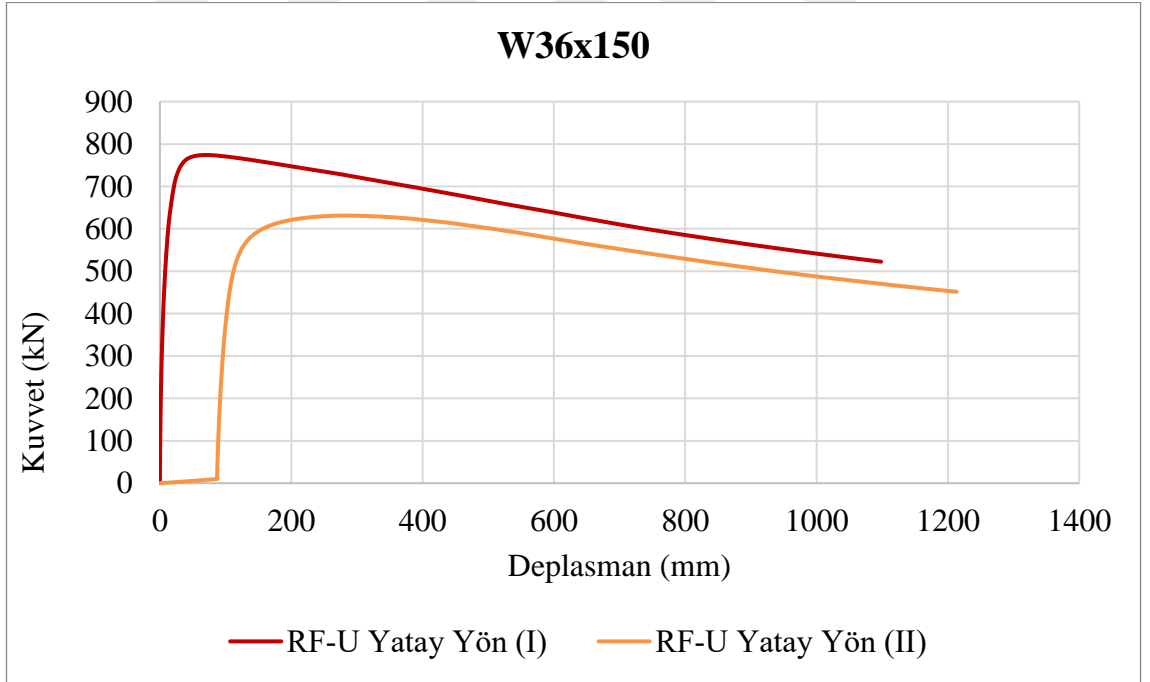
Şekil Ek A.19. II ve IV yükleme prosedürleri altında W36x150 kesitli kirişin Düşey Yük/Düşey Deplasman eğrileri.



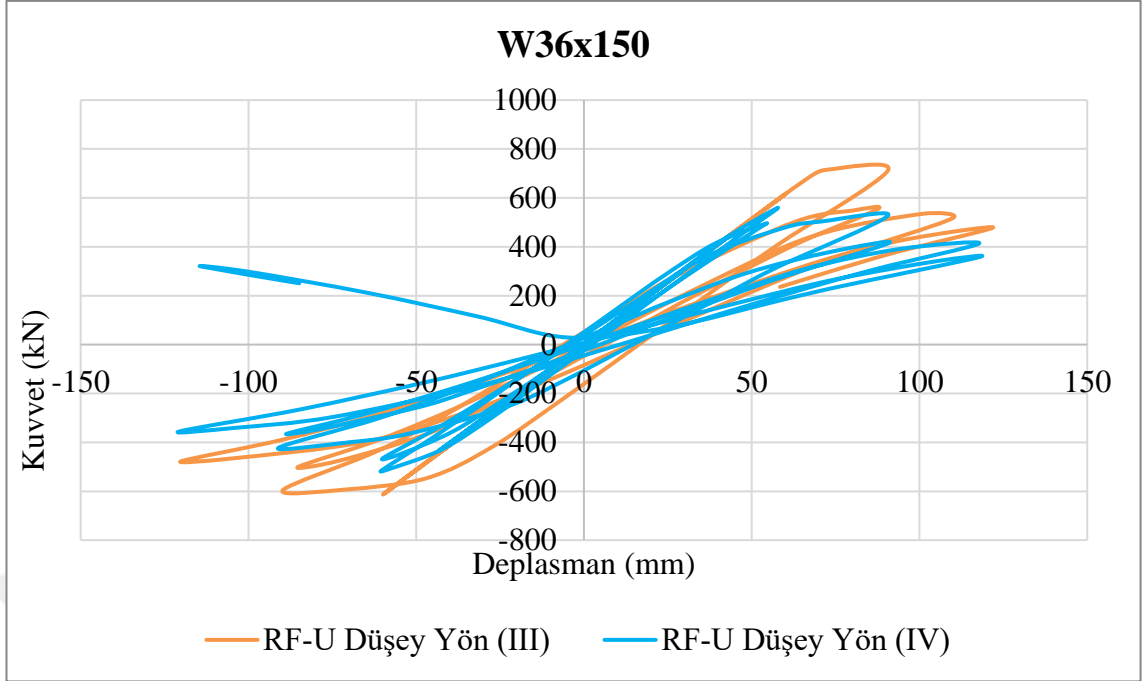
Şekil Ek A.20. II ve IV yükleme prosedürleri altında W36x150 kesitli kirişin Düşey Yük/Yatay Deplasman eğrileri.



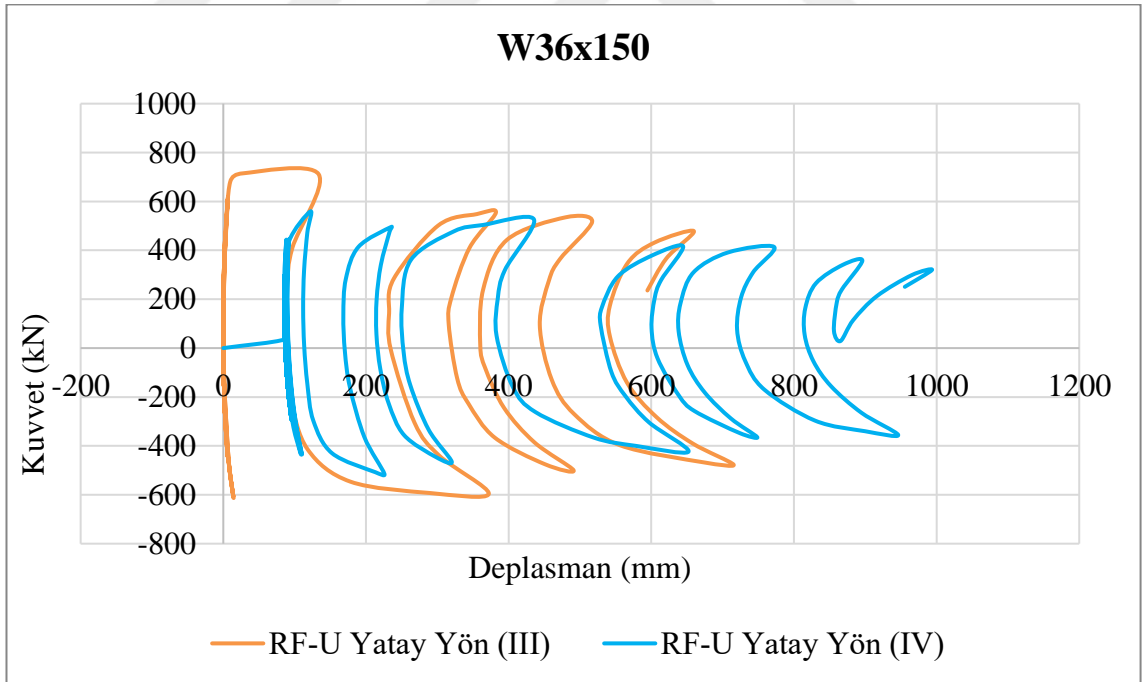
Şekil Ek A.21. I ve II yükleme prosedürleri altında W36x150 kesitli kirişin Düşey Yük/Düşey Deplasman eğrileri.



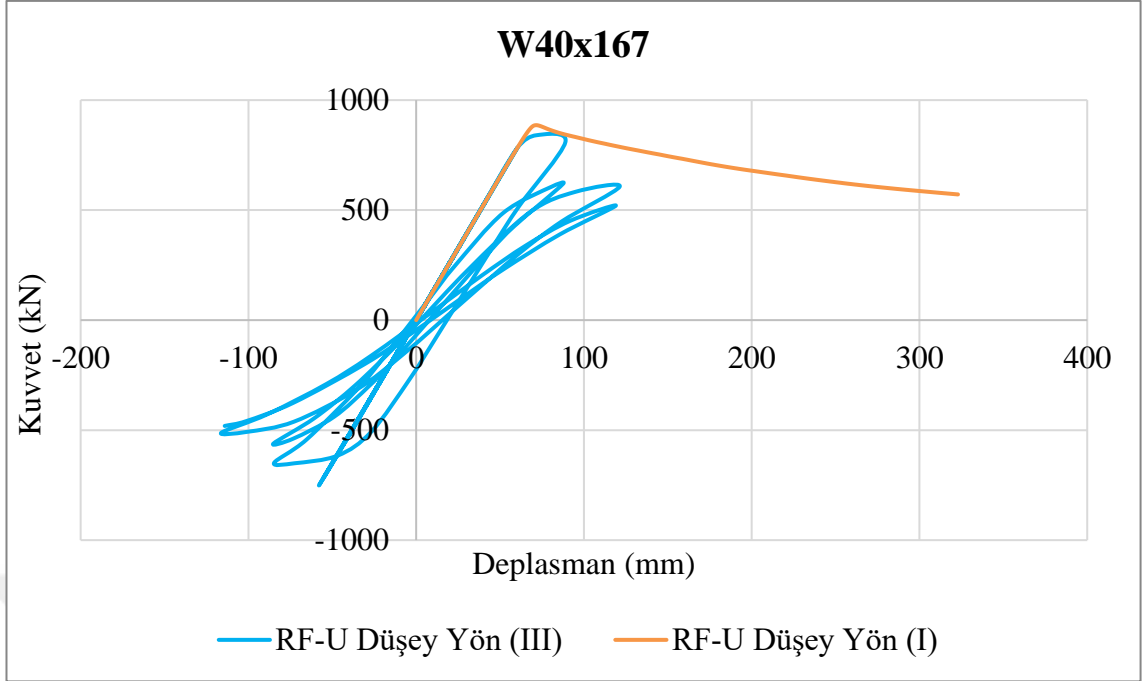
Şekil Ek A.22. I ve II yükleme prosedürleri altında W36x150 kesitli kirişin Düşey Yük/Yatay Deplasman eğrileri.



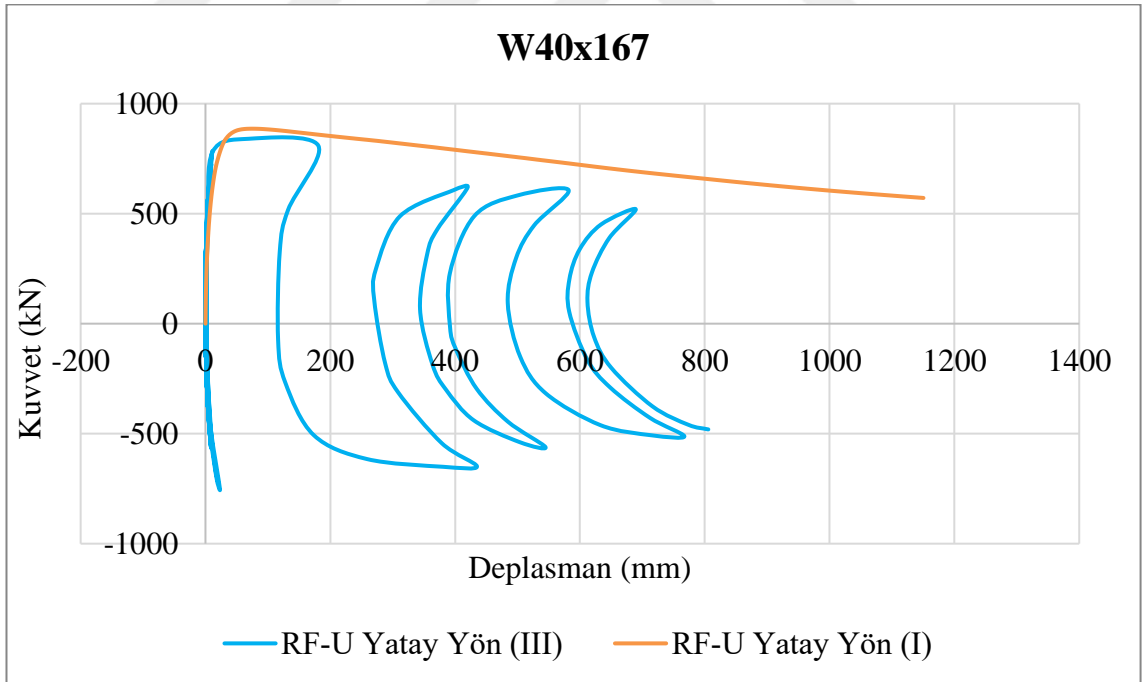
Şekil Ek A.23. III ve IV yükleme prosedürleri altında W36x150 kesitli kirişin Düşey Yük/Düşey Deplasman eğrileri.



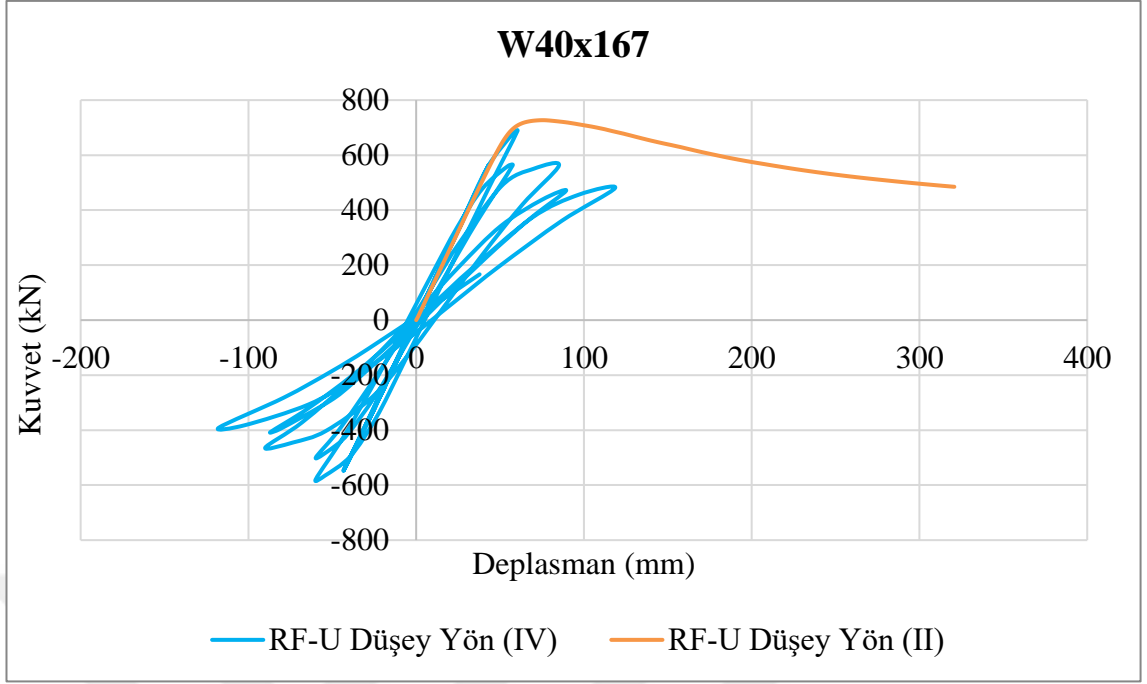
Şekil Ek A.24. III ve IV yükleme prosedürleri altında W36x150 kesitli kirişin Düşey Yük/Yatay Deplasman eğrileri.



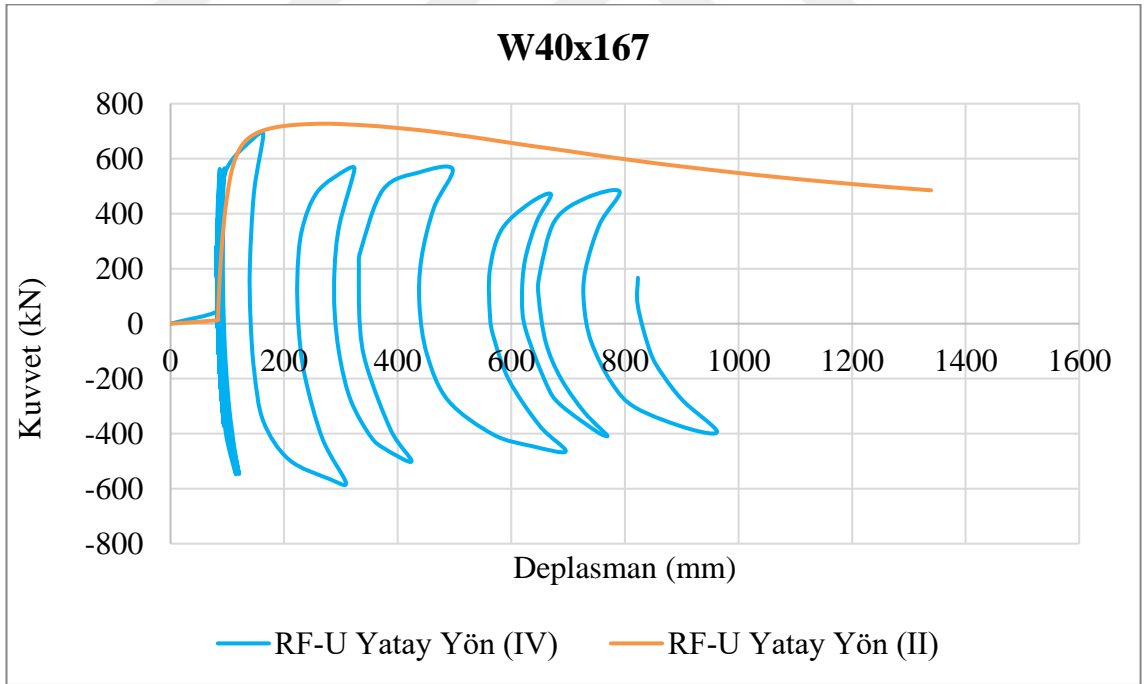
Şekil Ek A.25. I ve III yükleme prosedürleri altında W40x167 kesitli kirişin Düşey Yük/Düşey Deplasman eğrileri.



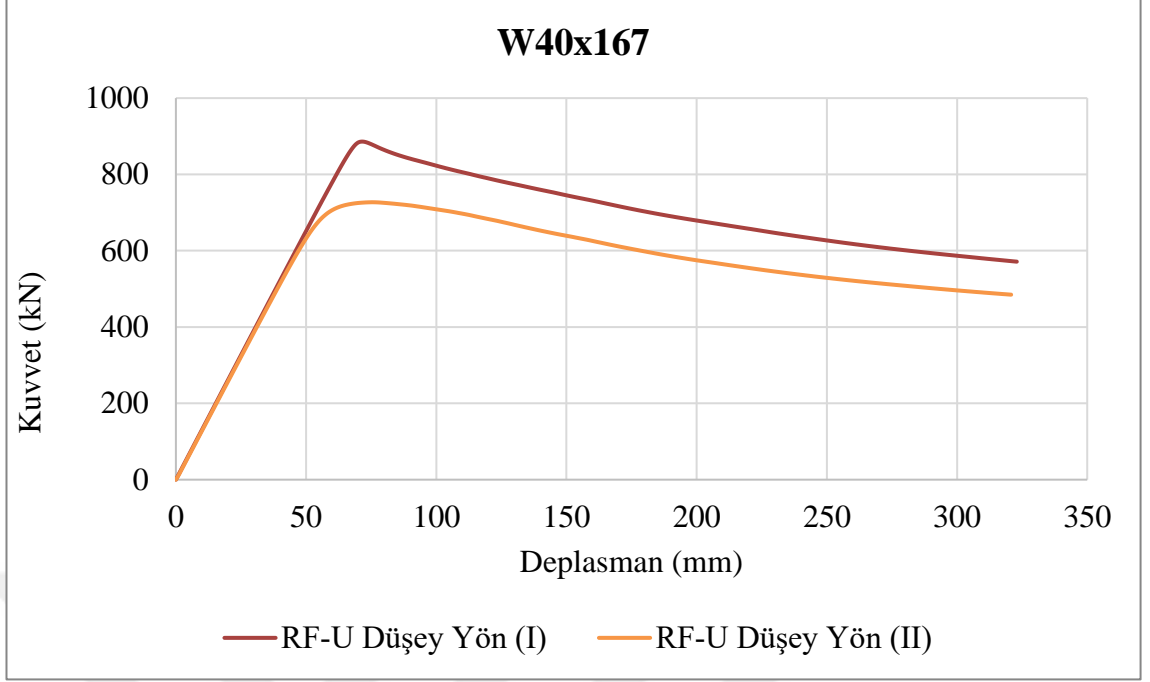
Şekil Ek A.26. I ve III yükleme prosedürleri altında W40x167 kesitli kirişin Düşey Yük/Yatay Deplasman eğrileri



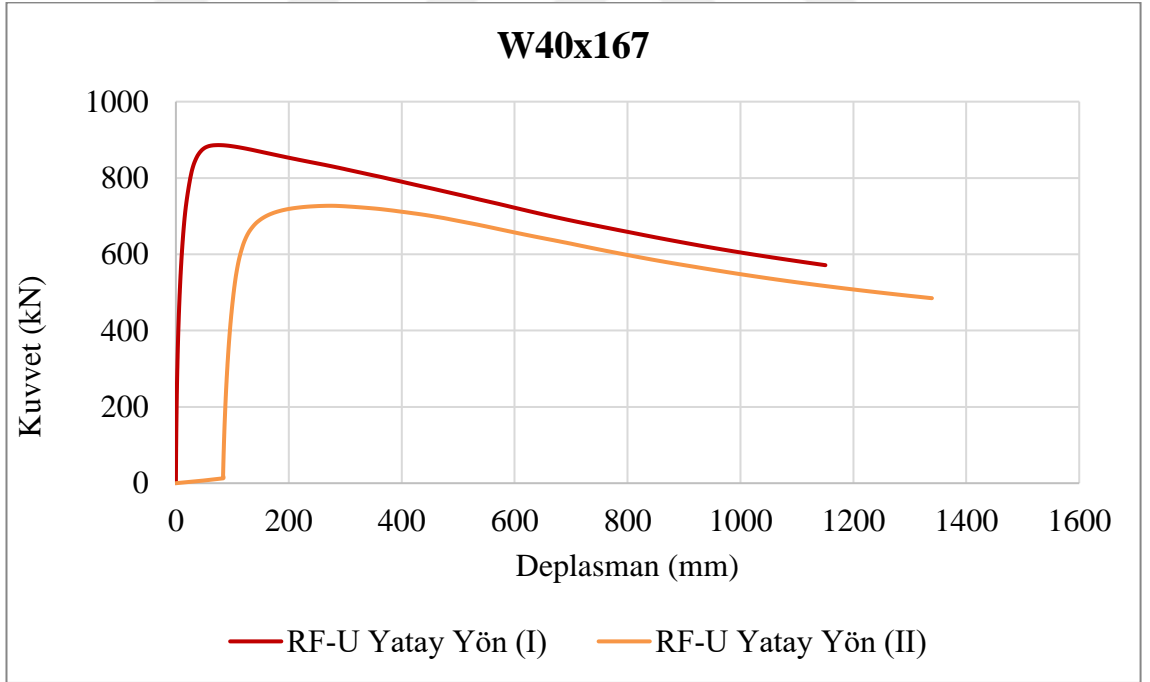
Şekil Ek A.27. II ve IV yükleme prosedürleri altında W40x167 kesitli kirişin Düşey Yük/Düşey Deplasman eğrileri.



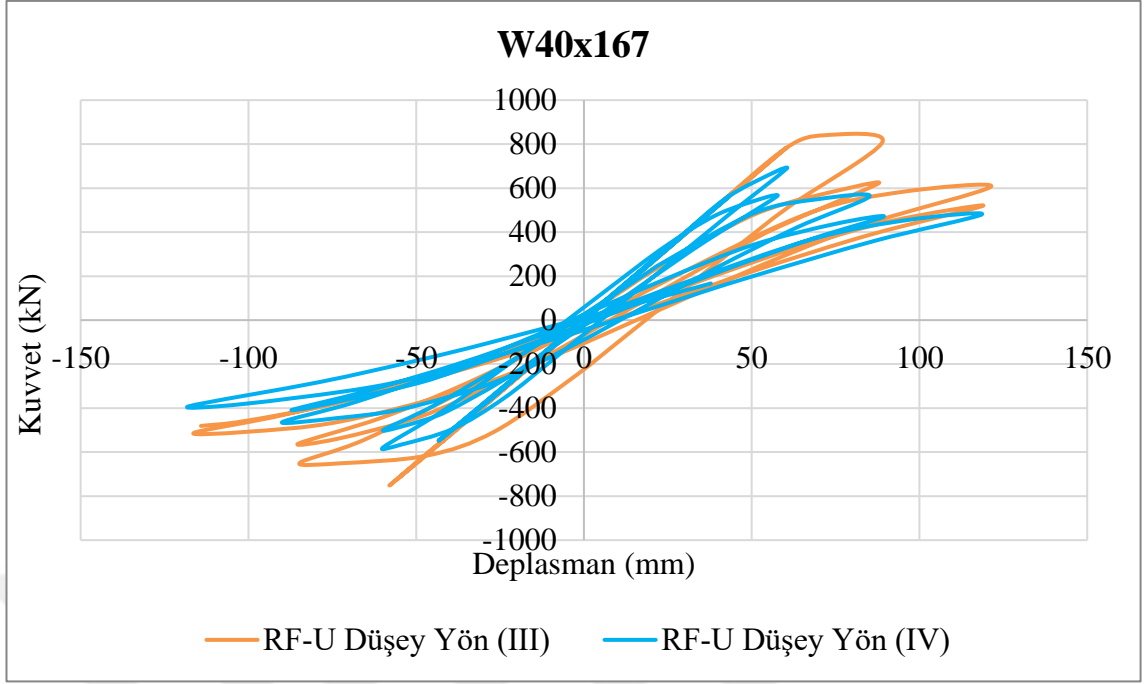
Şekil Ek A.28. II ve IV yükleme prosedürleri altında W40x167 kesitli kirişin Düşey Yük/Yatay Deplasman eğrileri.



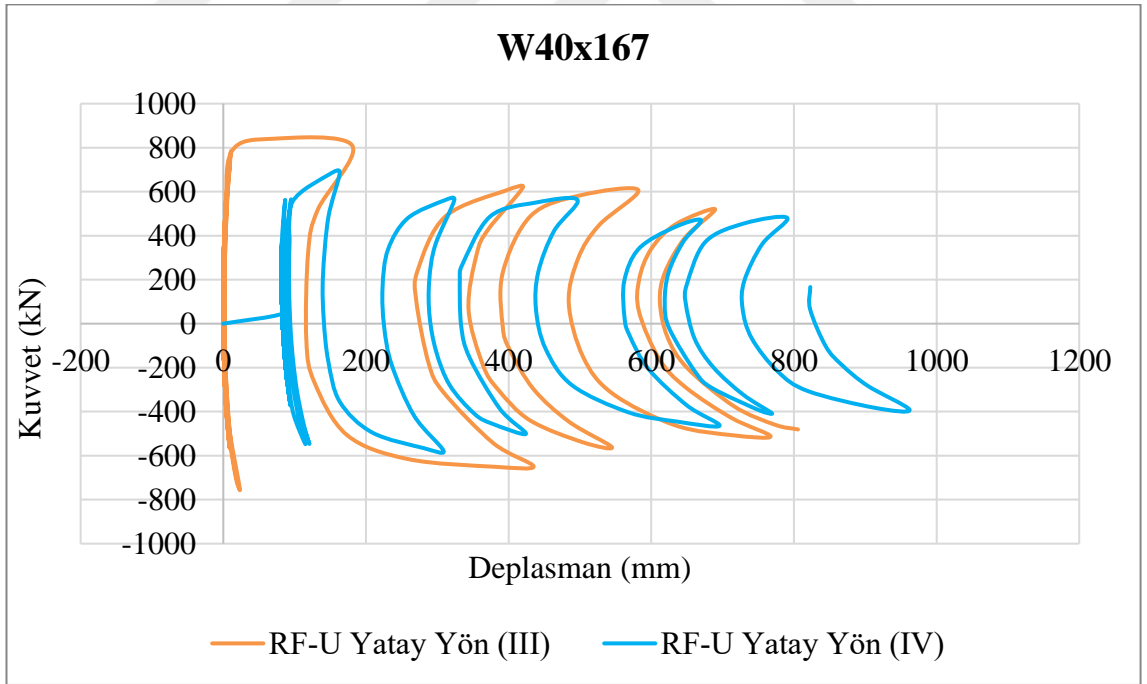
Şekil Ek A.29. I ve II yükleme prosedürleri altında W40x167 kesitli kirişin Düşey Yük/Düşey Deplasman eğrileri.



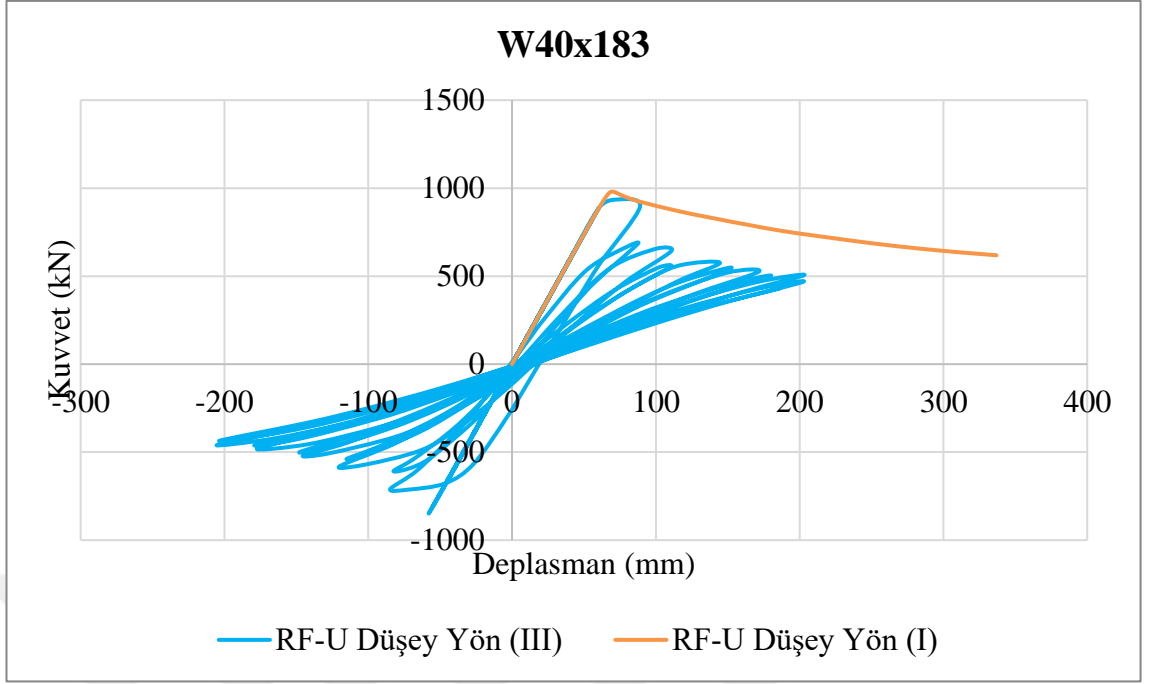
Şekil Ek A.30. I ve II yükleme prosedürleri altında W40x167 kesitli kirişin Düşey Yük/Yatay Deplasman eğrileri.



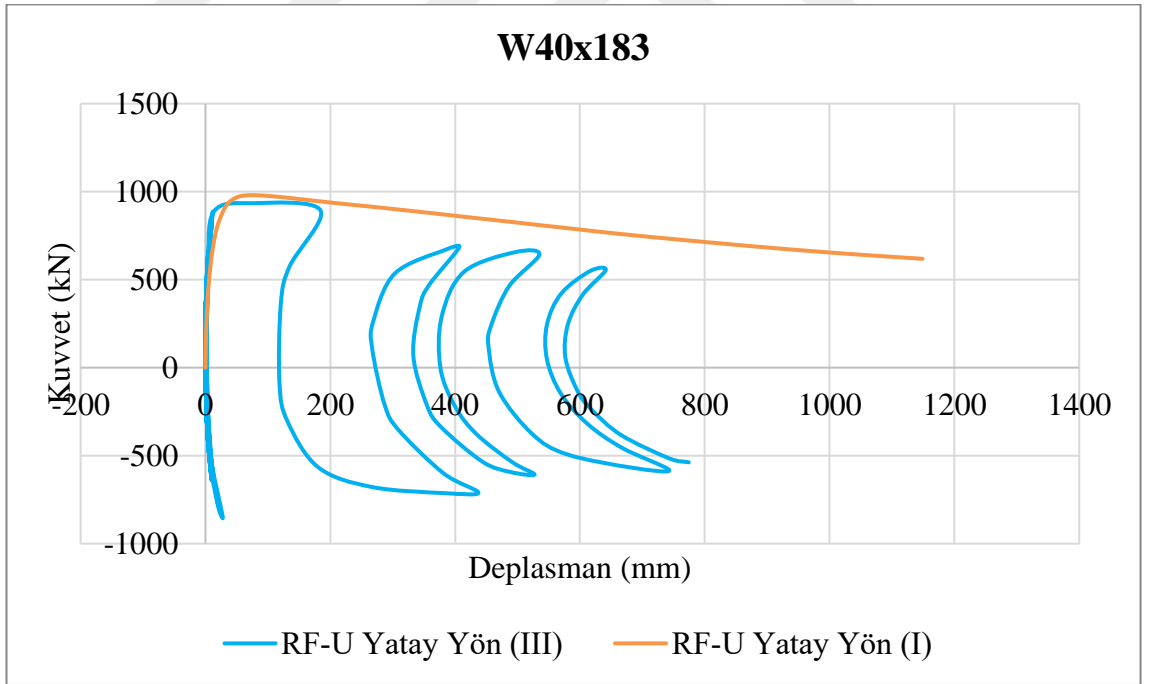
Şekil Ek A.31. III ve IV yükleme prosedürleri altında W40x167 kesitli kirişin Düşey Yük/Düşey Deplasman eğrileri.



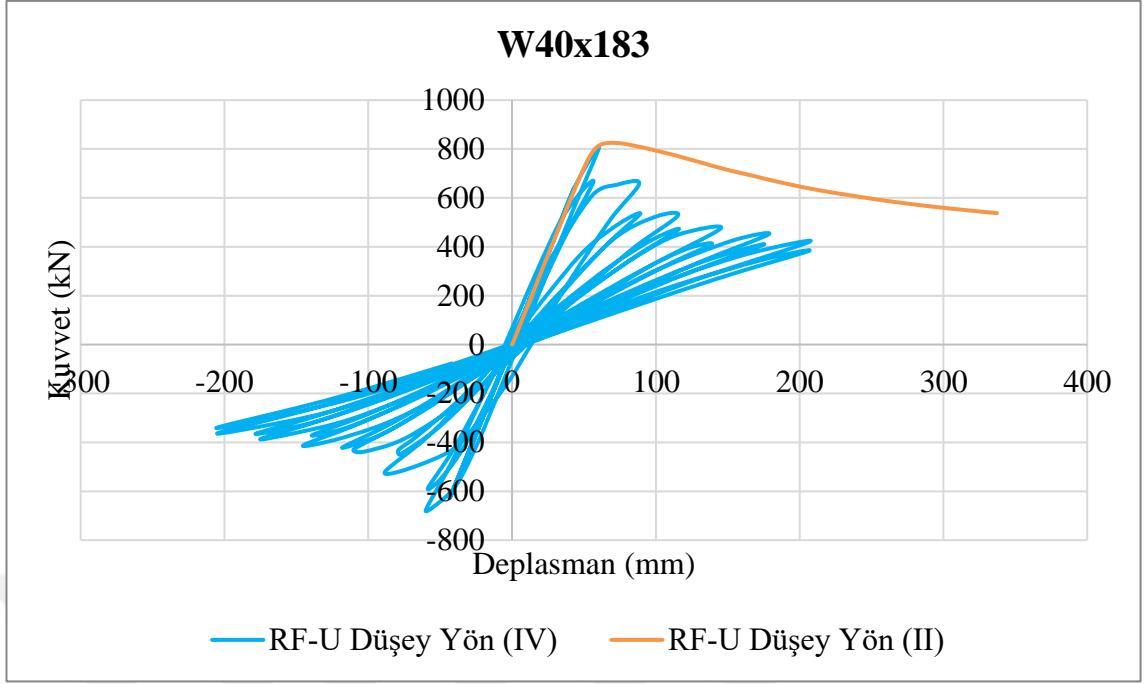
Şekil Ek A.32 III ve IV yükleme prosedürleri altında W40x167 kesitli kirişin Düşey Yük/Yatay Deplasman eğrileri.



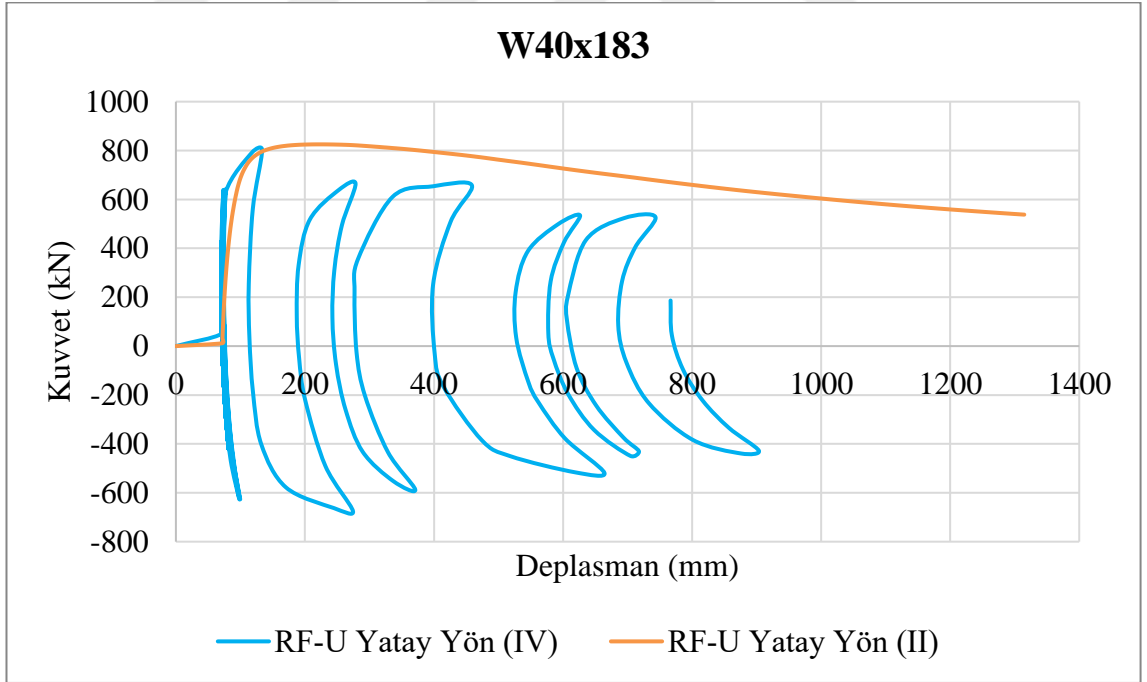
Şekil Ek A.33. I ve III yükleme prosedürleri altında W40x183 kesitli kirişin Düşey Yük/Düşey Deplasman eğrileri.



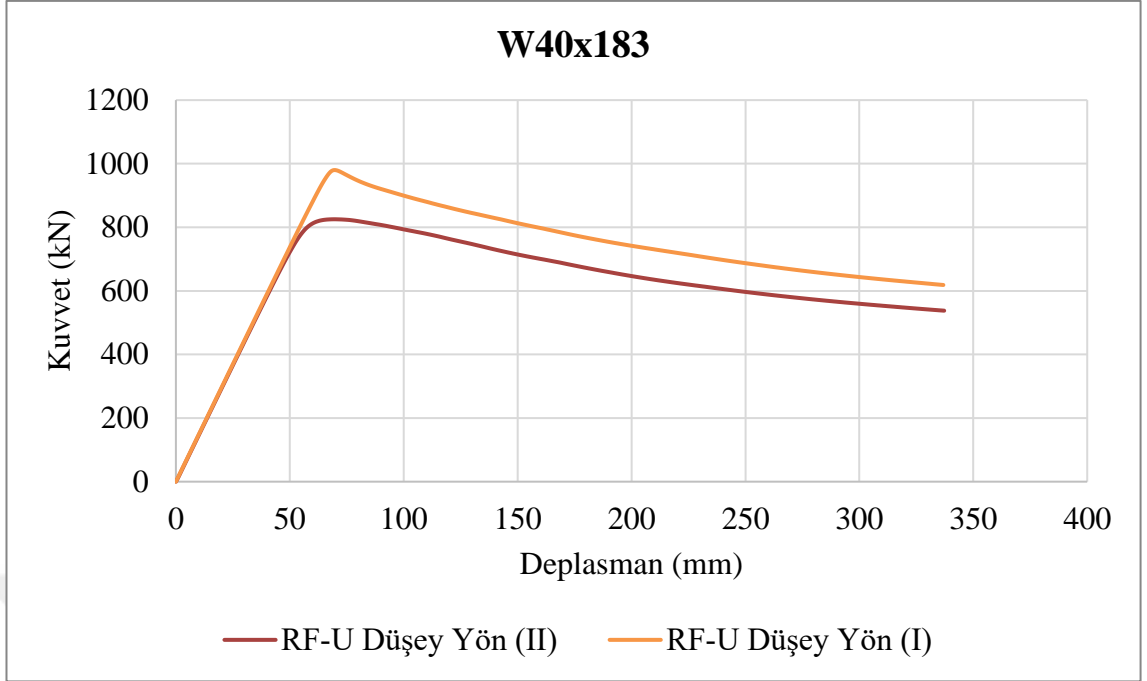
Şekil Ek A.34. I ve III yükleme prosedürleri altında W40x183 kesitli kirişin Düşey Yük/Yatay Deplasman eğrileri



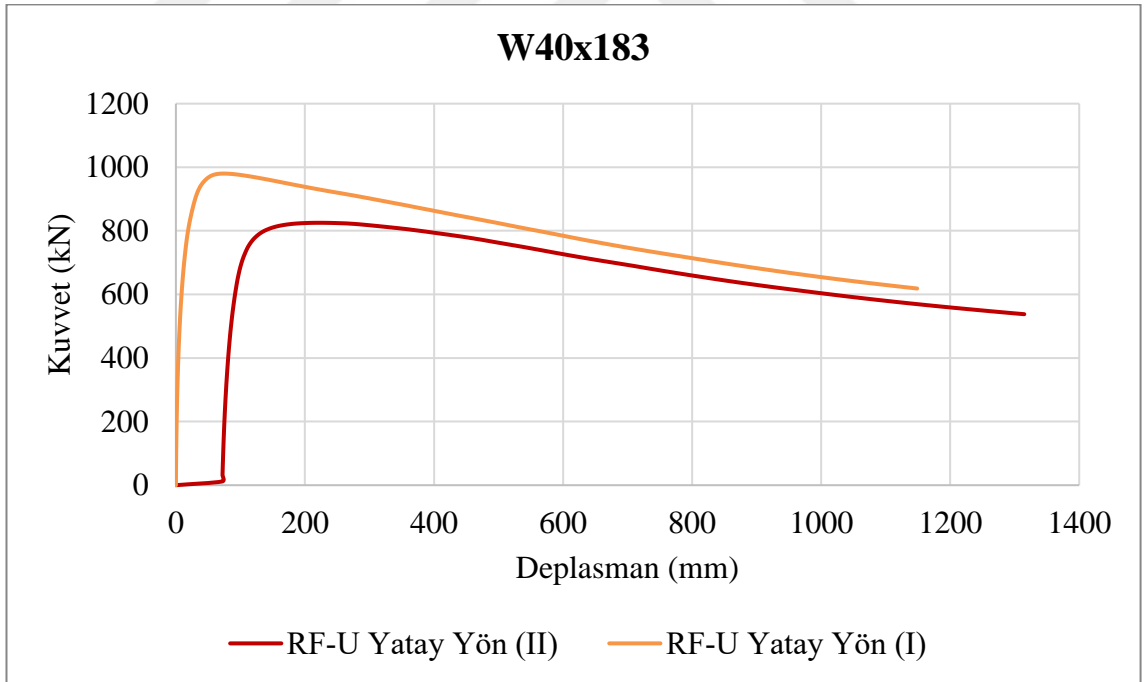
Şekil Ek A.35. II ve IV yükleme prosedürleri altında W40x183 kesitli kirişin Düşey Yük/Düşey Deplasman eğrileri.



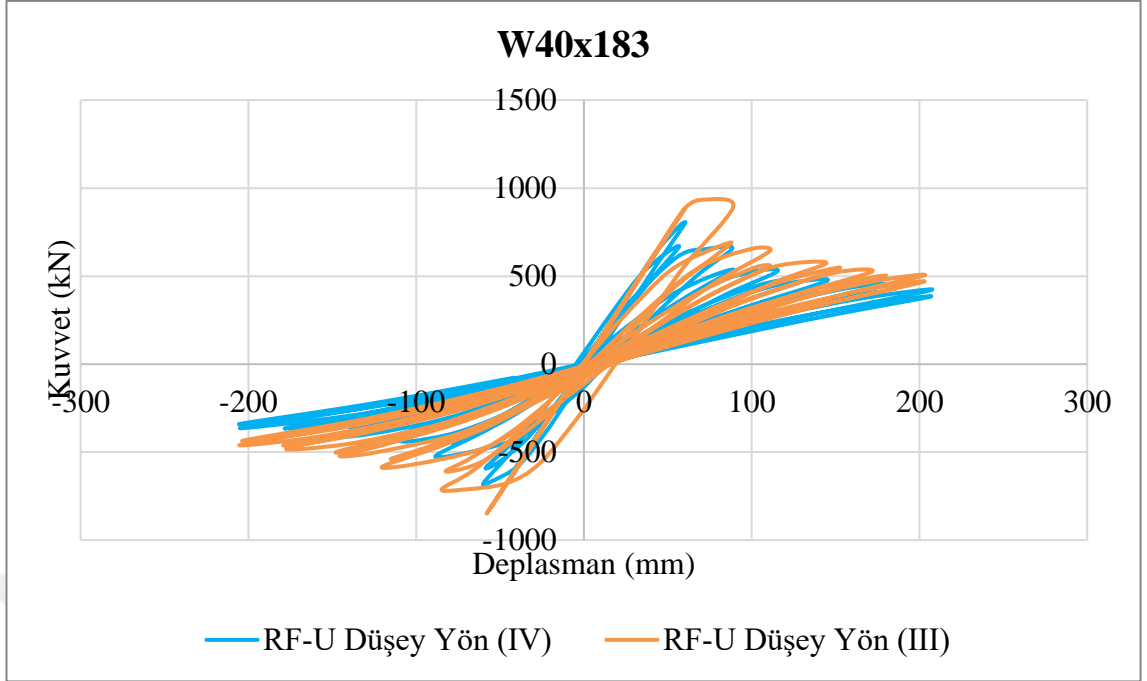
Şekil Ek A.36. II ve IV yükleme prosedürleri altında W40x183 kesitli kirişin Düşey Yük/Yatay Deplasman eğrileri.



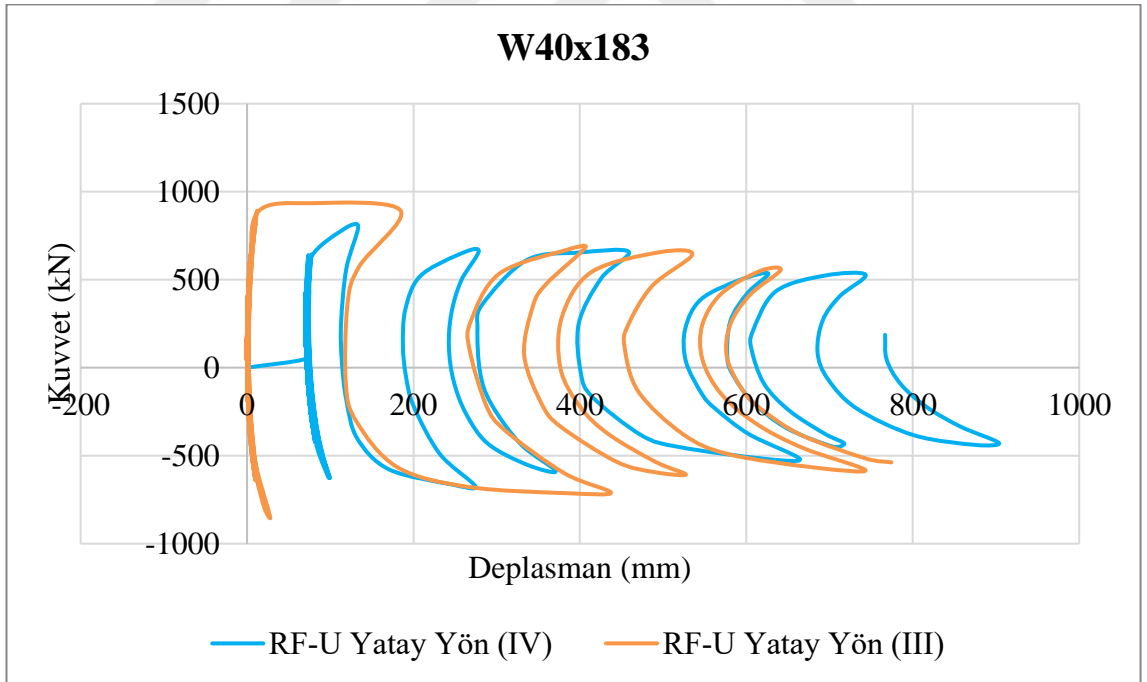
Şekil Ek A.37. I ve II yükleme prosedürleri altında W40x183 kesitli kirişin Düşey Yük/Düşey Deplasman eğrileri.



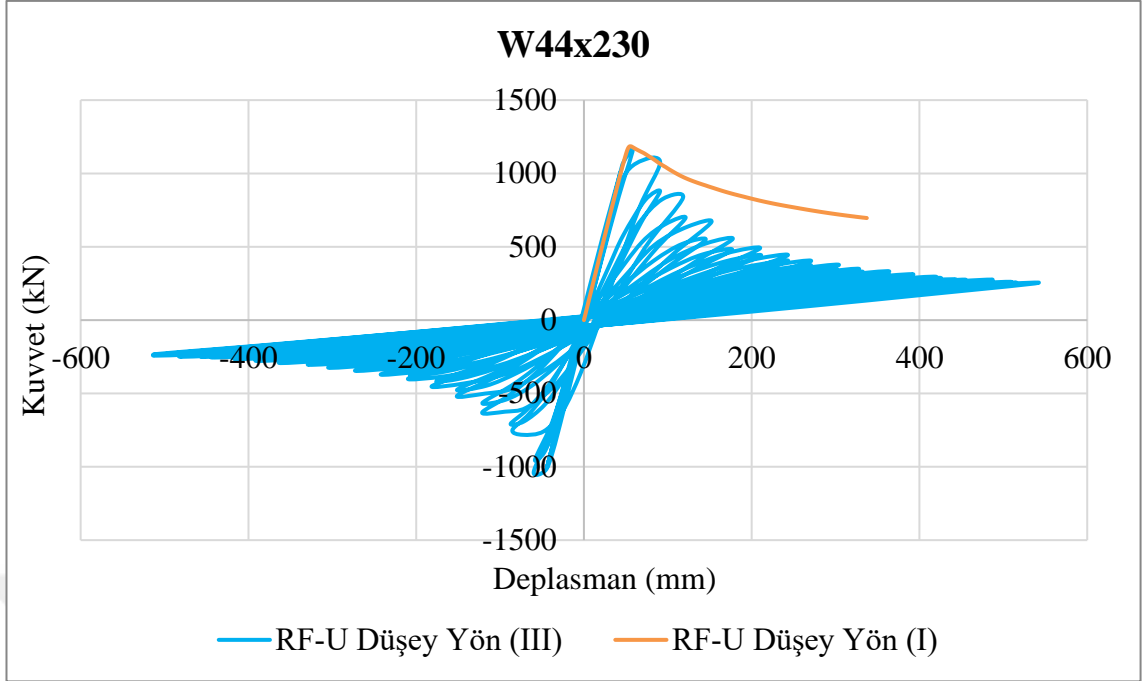
Şekil Ek A.38. I ve II yükleme prosedürleri altında W40x183 kesitli kirişin Düşey Yük/Yatay Deplasman eğrileri.



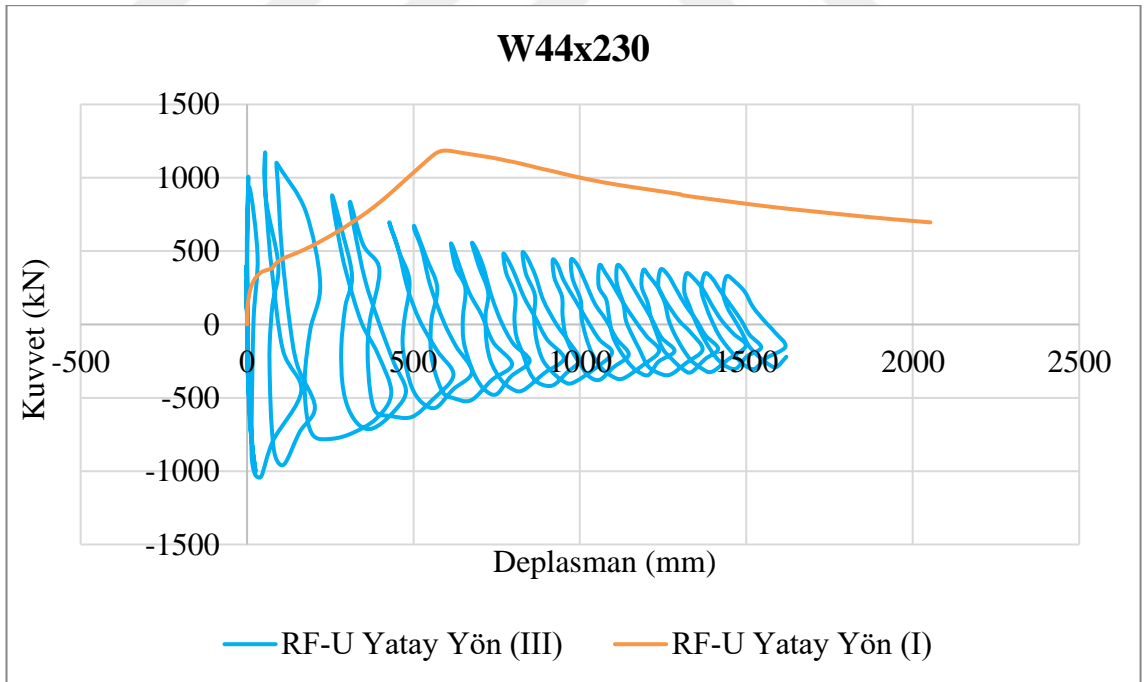
Şekil Ek A.39. III ve IV yükleme prosedürleri altında W40x183 kesitli kirişin Düşey Yük/Düşey Deplasman eğrileri.



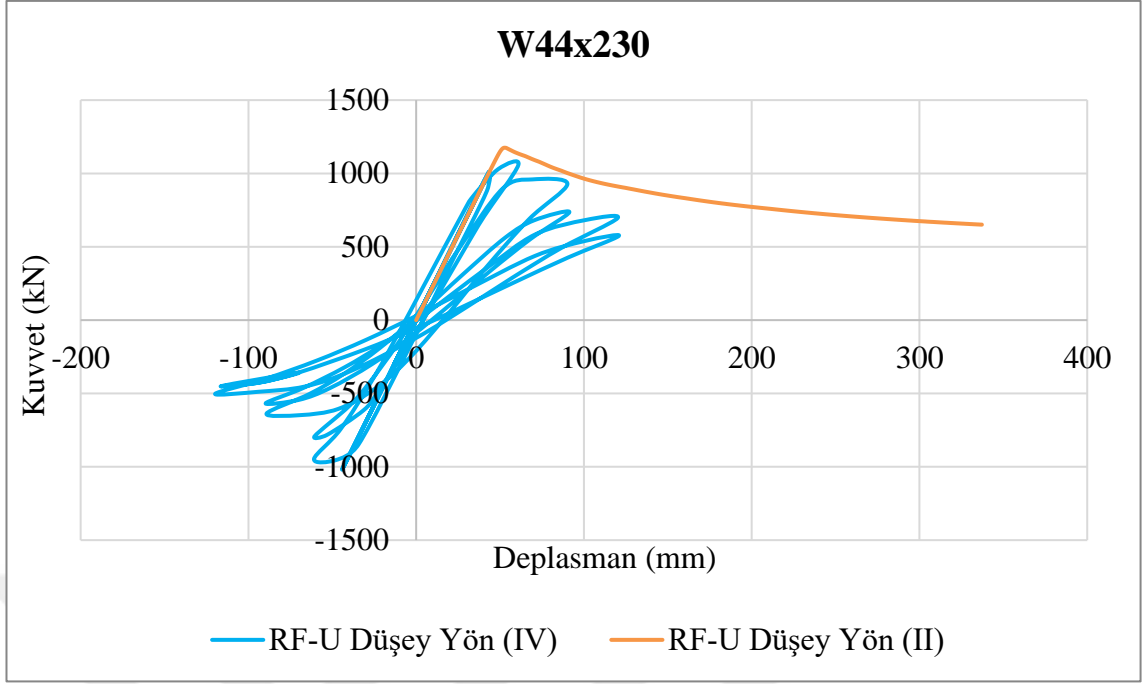
Şekil Ek A.40. III ve IV yükleme prosedürleri altında W40x183 kesitli kirişin Düşey Yük/Yatay Deplasman eğrileri.



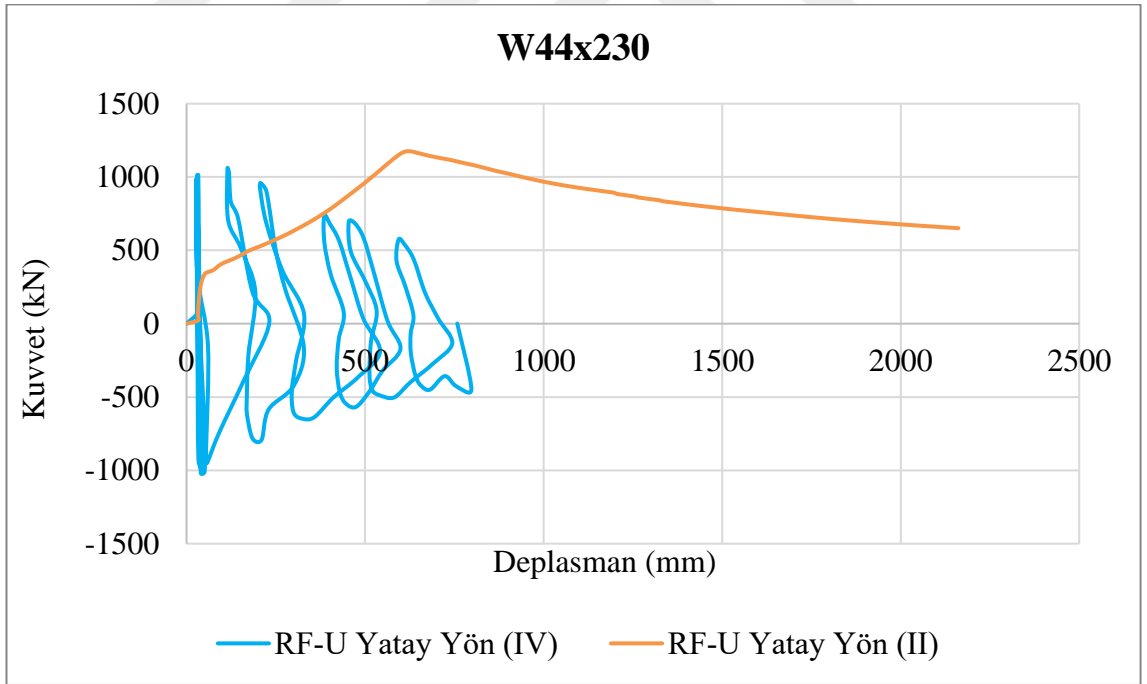
Şekil Ek A.41. I ve III yükleme prosedürleri altında W44x230 kesitli kirişin Düşey Yük/Düşey Deplasman eğrileri.



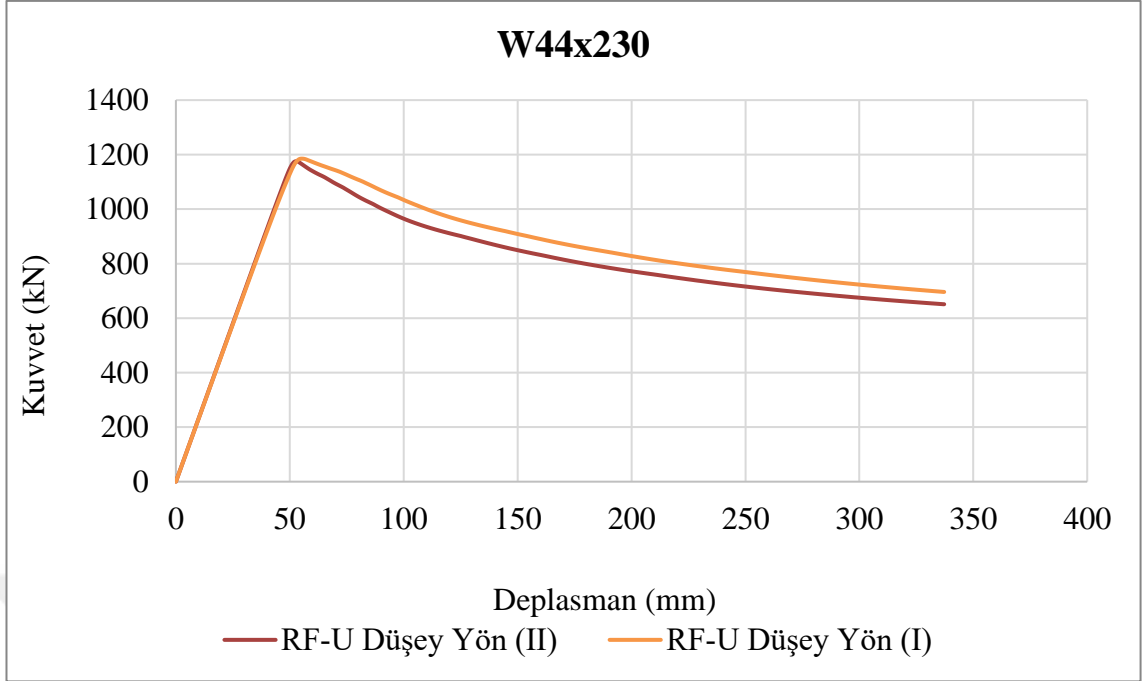
Şekil Ek A.42. I ve III yükleme prosedürleri altında W44x230 kesitli kirişin Düşey Yük/Yatay Deplasman eğrileri



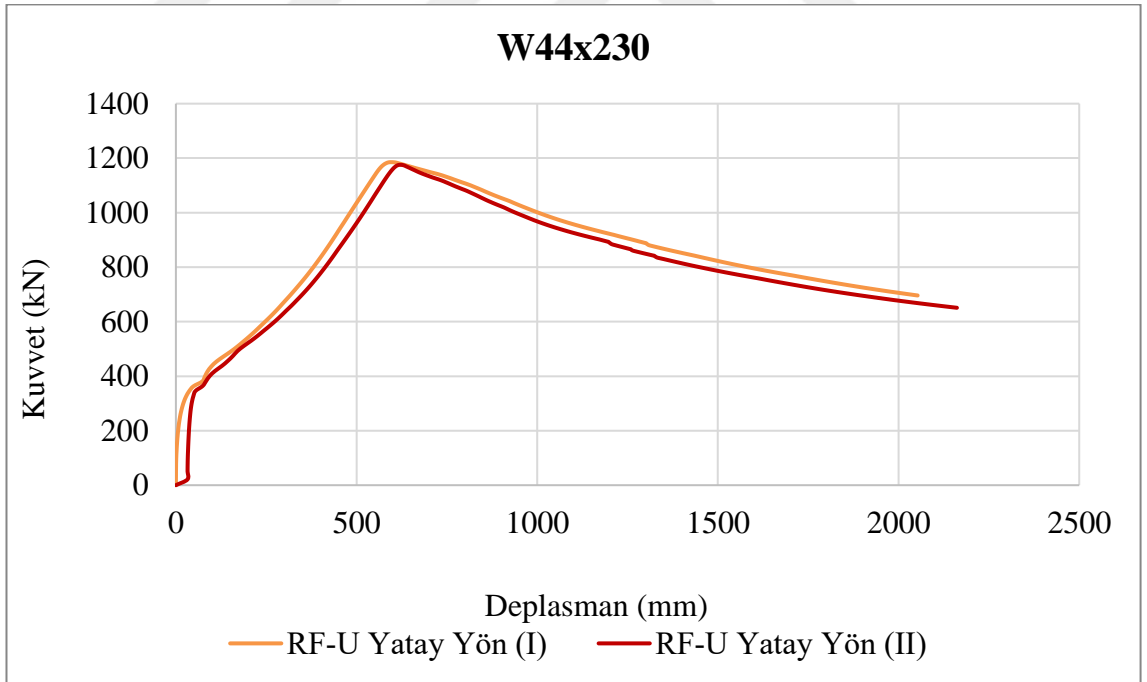
Şekil Ek A.43. II ve IV yükleme prosedürleri altında W44x230 kesitli kirişin Düşey Yük/Düşey Deplasman eğrileri.



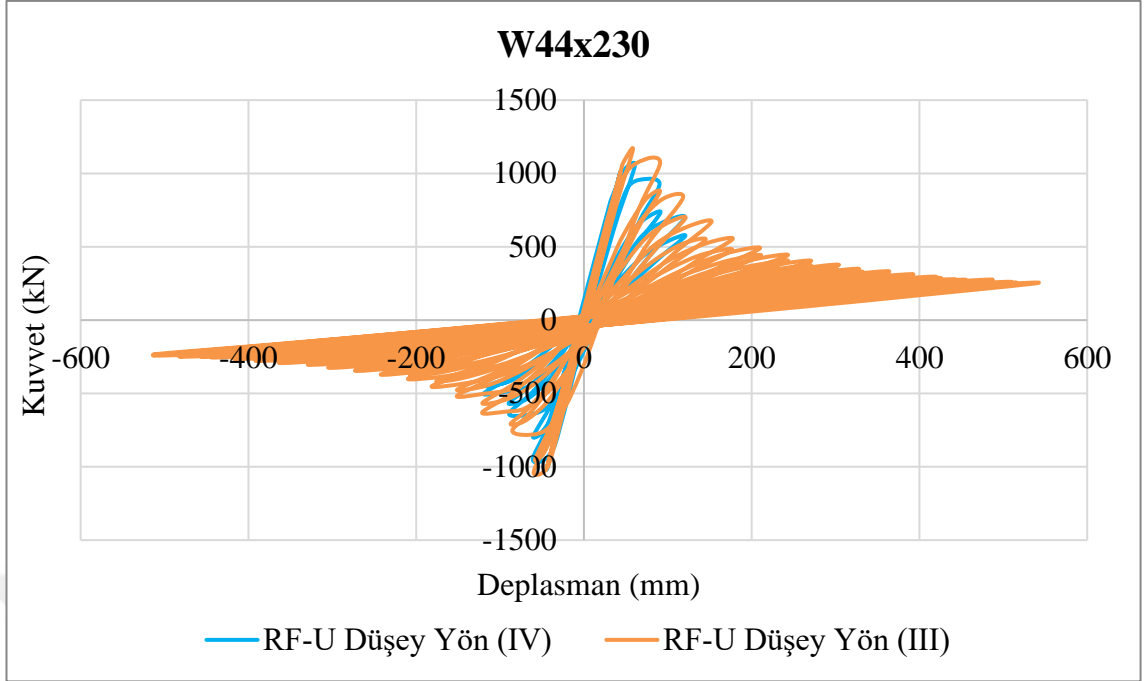
Şekil Ek A.44. II ve IV yükleme prosedürleri altında W44x230 kesitli kirişin Düşey Yük/Yatay Deplasman eğrileri.



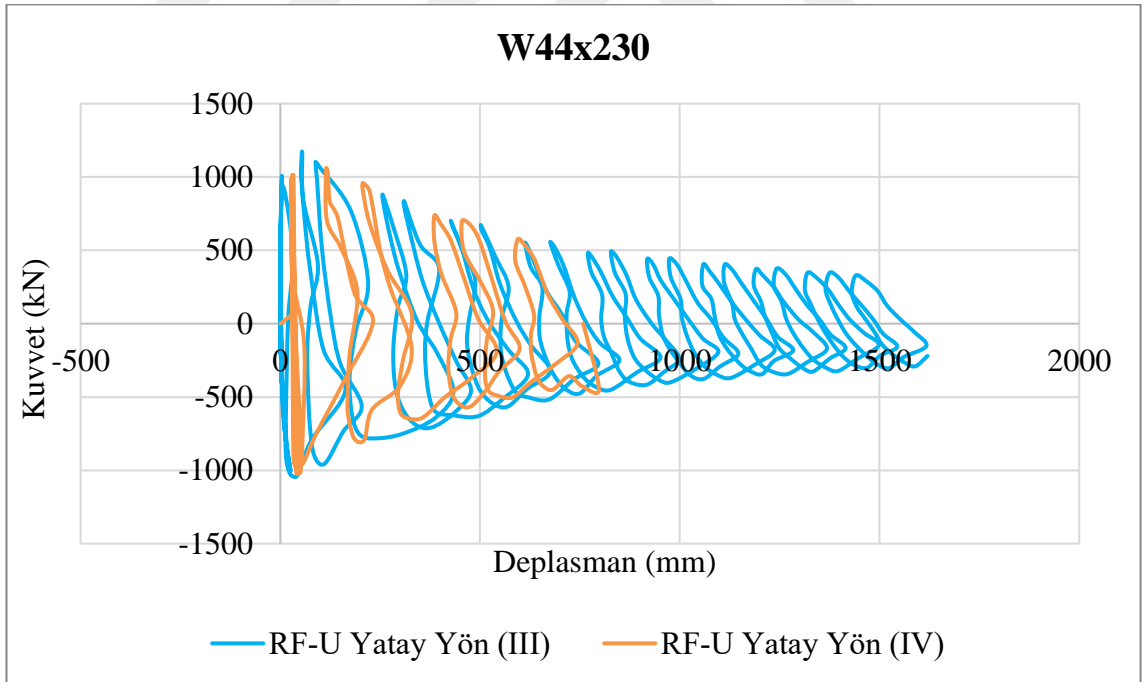
Şekil Ek A.45. I ve II yükleme prosedürleri altında W44x230 kesitli kirişin Düşey Yük/Düşey Deplasman eğrileri.



Şekil Ek A.46. I ve II yükleme prosedürleri altında W44x230 kesitli kirişin Düşey Yük/Yatay Deplasman eğrileri.



Şekil Ek A.47. III ve IV yükleme prosedürleri altında W44x230 kesitli kirişin Düşey Yük/Düşey Deplasman eğrileri.



Şekil Ek A.48. III ve IV yükleme prosedürleri altında W44x230 kesitli kirişin Düşey Yük/Yatay Deplasman eğrileri.

## ÖZGEÇMİŞ

Beyazıd ERER, ilk ve orta öğrenimini Karabük'te tamamladı. Karabük Anadolu Öğretmen Lisesi'nden mezun oldu. 2015 yılında Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde öğrenime başlayıp 2019 yılında iyi derece ile mezun oldu. 2019 yılında KARDEMİR A.Ş. Demir Çelik Fabrikası'nda İnşaat ve Çelik Konstrüksiyon Etüd Proje Mühendisi unvanıyla göreve başladı. Eş zamanlı olarak 2019 yılında Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda başlamış olduğu yüksek lisans programını 2023 yılında tamamladı. 16.07.2023 tarihinde hayatını Hasibe ERER ile birleştiren Beyazıd ERER, KARDEMİR A.Ş. Demir Çelik Fabrikası'nda İnşaat ve Çelik Konstrüksiyon Etüd Proje Mühendisi olarak çalışmaya devam etmektedir.