



**IPE ÇELİK KONSOL KİRİŞLERİN YANAL BURULMALI
BURKULMASININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ VE ENERJİ
YÖNTEMLERİ İLE ANALİTİK HESABI**

Ahmet Lokman DEMİRHAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

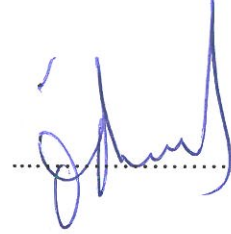
Şubat 2019

Ahmet Lokman DEMİRHAN tarafından hazırlanan “İPE ÇELİK KONSOL KİRİŞLERİN YANAL BURULMALI BURKULMASININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ VE ENERJİ YÖNTEMLERİ İLE ANALİTİK” adlı tez çalışması aşağıdaki jüritarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Ana Bilim DalındaYÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman:Prof. Dr. Özgür ANIL

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.



Başkan:Prof. Dr. Kurtuluş SOYLUK

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.



Üye:Doç. Dr. Mehmet BARAN

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.



TezSavunmaTarihi: 21/02/2019

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....
Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Ahmet Lokman DEMİRHAN

21/02/2019

İPE ÇELİK KONSOL KİRİŞLERİN YANAL BURULMALI BURKULMASININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ VE ENERJİ YÖNTEMLERİ İLE ANALİTİK

HESABI

(Yüksek Lisans Tezi)

Ahmet Lokman DEMİRHAN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Şubat 2019

ÖZET

İnce cidarlı çelik yapı elemanları günümüz tekniğinde çokça kullanılan yapı elemanlarıdır. Fakat bu elemanlar (I, H vs.) genelde çok düşük burulma rijitliğine sahip olmalarından dolayı önemli stabilite problemlerine sebep olabilmektedirler. Yanal burkulma genellikle burulma veya yatay hareket yapması engellenmemiş ince cidarlı elemanlarda meydana gelmektedir. Yanal burulmalı burkulma, sistemin kuvvetli asal eksene göre eğilme kuvveti altında, zayıf ekseni doğrultusunda yer değiştirme ve dönmesine sebep olan yükün, kirişin farklı düzlemlerinde meydana gelecek eğilme, burulma ve çarpılma etkisinin bileşkesinden meydana gelen bir davranış olarak ifade edilmektedir. Yapılan literatür taraması sonucunda çelik yapılarda yangın olarak kullanılan IPE tür profiller için yanal burulmalı burkulma stabilite bozulması için yapılan kapsamlı deneysel bir çalışmanın olmadığı görülmüştür. Bu nedenle deneysel bir çalışma planlanmış ve çalışma kapsamında farklı boylardaki 9 adet IPE160 konsol kiriş deney elemanı, üst başlık, alt başlık ve kayma merkezinden uygulanmak üzere monotonik artan düşey tekil yükleme etkisi altında laboratuvar ortamında test edilmiştir. Testler sonucunda deney elemanlarının maksimum taşıma gücü, maksimum düşey ve yatay deplasman değerleri, maksimum konsol ucu burulma açısı değerleri, maksimum yük düzeyindeki rijitlik ve enerji tüketim kapasiteleri hesaplanmıştır. Deneysel çalışmanın yanı sıra, kirişin kritik elastik yanal burulma burkulma yükünü hesaplamak için eşsiz bir kapalı-form analitik formülasyon oluşturulmuştur. Analitik çalışmalardan elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmış ve ne ölçüde başarılı sonuçlar elde edilebildiği yorumlanmıştır.

Bilim Kodu : 91103
Anahtar Kelimeler : IPE çelik konsol kiriş, yanal burulmalı burkulma, stabilite, enerji metodu
Sayfa Adedi : 71
Danışman : Prof. Dr. Özgür ANIL

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF LATERAL TORSIONAL BUCKLING OF
CANTILEVER STEEL IPE BEAMS AND ANALYTICAL CALCULATION USING
WITH ENERGY APPROACH

(M.Sc. Thesis)

Ahmet Lokman DEMİRHAN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

February 2019

ABSTRACT

Structural steel profiles with thin wall thickness are widely used structural components in steel constructions nowadays. However, as these components generally have little torsional rigidity, they may create stability problems. Lateral buckling mostly occurs because of the components with thin wall thickness whose ability of torsion and lateral movement is not prevented. Lateral torsional buckling is defined as the combination of displacement and twisting of the system from the strong axis to weak axis and bending, torsion, distortion effects on the different locations of the beam due to the bending load in major axis. After literature research, it is seen there is no comprehensive experimental study about stability losses due to lateral torsional buckling for IPE type steel sections which are widely used in steel structures. Therefore, an experimental study is planned and within the scope of this study, 9 samples of IPE160 steel section with different lengths are prepared as cantilever beams. In laboratory conditions, test is conducted with monolithically increasing vertical point loads which are applied to upper flange, lower flange and shear center of the samples. After the tests, maximum load carrying capacity, maximum vertical and horizontal deflections, maximum end point torsion angle, the rigidity on maximum load level and energy absorption capacities of the samples are calculated. Besides the experimental study, a unique closed-form analytic method for calculation of critical elastic lateral torsional buckling load is developed. The results obtained from analytical studies are compared with the results of experimental studies so the success level of these works is discussed.

Science Code : 91103

Key Words : IPE steel cantilever beam, lateral torsional buckling, stability, energy approach

Page Number : 71

Supervisor : Prof. Dr. Özgür ANIL

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca ve tez çalışmam sürecinde kıymetli zamanını ayıran, bilgi ve tecrübesiyle her türlü desteği sağlayan, değerli hocam ve danışmanım Sayın Prof. Dr. Özgür ANIL'a teşekkür ederim.

Tez çalışmamın şekillenmesinde yardımlarını ve bilgilerini esirgemeyen Erkan Okay MUTLU ve Hüseyin Erdem EROĞLU kardeşlerime, tez çalışmam süresince verdiği destekten ötürü Sayın Arş. Gör. Dr. Tolga YILMAZ hocama, deneysel çalışmalarımı gerçekleştirdiğim süre zarfında bana büyük yardımları dokunan Sayın Arş. Gör. Anıl ÖZDEMİR ve Arş. Gör. Coşkun ÇAKMAK'a canı gönülden teşekkür ederim. Ayrıca, bu süreçte desteğini gördüğüm Alptuğ ÖZTÜRK, Mehmet ÖZYAMAN ve diğer mesai arkadaşlarıma da teşekkürü bir borç bilirim.

Yapmış olduğum çalışmalar sırasında, kendilerine çoğu zaman vakit ayıramadığım, nice cefamı çektikleri halde hiçbir fedakârlıktan kaçınmayan aileme ve eşime teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	5
3. YANAL BURULMALI BURKULMA.....	13
3.1. Tekil Yük Etkisindeki Konsol Kirişin Yanal Burulmalı Burkulması.....	16
4. KONSOL KİRİŞLER İÇİN ENERJİ YÖNTEMİ İLE ANALİTİK HESABI	19
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	23
5.1. Deney Elemanı	23
5.2. Deney Düzeneği ve Ölçüm Sisteminin Tanıtılması	26
5.2.1. Test cihazı	26
5.2.2. Load Cell.....	27
5.2.3. LVDT (Linear Variable Differential Transformer)	28
5.2.4. Açık ölçek (Accelerometer/Tiltmeter).....	29
5.2.5. Hidrolik pompa	29
5.2.6. Veri toplama sistemi (Data Logger).....	30
5.2.7. Ankastre mesnet.....	30
5.2.8. Yükleme aparatı	31

	Sayfa
5.2.9. Kupon testi cihazı.....	32
5.3. Deney Elemanlarının Mekanik Özellikleri.....	33
6. DENEYLER	35
6.1. IPE 160 Üst Başlık L=2750 mm	35
6.2. IPE 160 Üst Başlık L=2500 mm	37
6.3. IPE 160 Üst Başlık L=2250 mm	39
6.4. IPE 160 Alt Başlık L=2750 mm.....	41
6.5. IPE 160 Alt Başlık L=2500 mm.....	43
6.6. IPE 160 Alt Başlık L=2250 mm.....	45
6.7. IPE 160 Kayma Merkezi L=2750 mm	47
6.8. IPE 160 Kayma Merkezi L=2500 mm	49
6.9. IPE 160 Kayma Merkezi L=2250 mm	51
7. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ	55
8. DENEY SONUÇLARININ ANALİTİK ÇÖZÜMLE KARŞILAŞTIRILMASI	61
9. SONUÇ VE ÖNERİLER	65
KAYNAKLAR	69
ÖZGEÇMİŞ	71

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Doğrultu kosinüsleri	16
Çizelge 3.2. Tekil yüklü konsol kiriş için m değerleri.....	18
Çizelge 5.1. Hazırlanan numuneler.....	23
Çizelge 5.2. Kesit özellikleri.....	24
Çizelge 5.3. IPE160 profil malzeme modeli özellikleri.....	34
Çizelge 7.1. Deney sonuçları	55
Çizelge 7.2. Kiriş boyunca maksimum burulma açıları değişimi.....	56
Çizelge 8.1. Elastik yanal burulmalı burkulma yüklerinin karşılaştırılması.....	64
Çizelge 9.1. Konsol boyundaki değişim oranları.....	66
Çizelge 9.2. Kesme kuvvetinin yerine göre değişim oranları	67

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Yanal burulmalı burkulma dayanımının serbest açıklıkla ilişkisi	14
Şekil 3.2. Ucunda tekil yük bulunan I kesitli konsol bir kirişin yanal burulmalı burkulma hali a) yan görünüş b) üst görünüş c) m-m kesiti	15
Şekil 4.1. Ucunda tekil yük bulunan I kesitli konsol bir kirişin yanal burulmalı burkulma hali a) yan görünüş b) a-a kesiti	19
Şekil 5.1. Kesit boyutları	24
Şekil 5.2. Üst başlık	25
Şekil 5.3. Alt başlık.....	25
Şekil 5.4. Kayma merkezi.....	26
Şekil 5.5. Test cihazında yapılan değişiklikler	27
Şekil 5.6. Yükleme aparatı.....	31
Şekil 5.7. Kupon numunesi.....	33
Şekil 5.8. Kupon numunesine ait gerilme – birim şekil değiştirme grafiği	33
Şekil 6.1. 1 numaralı numune için yük - düşey deplasman grafiği.....	36
Şekil 6.2. 1 numaralı numune için yük - yatay deplasman grafiği	36
Şekil 6.3. 1 numaralı numune için yük – burulma açısı grafiği	37
Şekil 6.4. 2 numaralı numune için yük - düşey deplasman grafiği.....	38
Şekil 6.5. 2 numaralı numune için yük - yatay deplasman grafiği	38
Şekil 6.6. 2 numaralı numune için yük – burulma açısı grafiği.....	39
Şekil 6.7. 3 numaralı numune için yük - düşey deplasman grafiği.....	40
Şekil 6.8. 3 numaralı numune için yük - yatay deplasman grafiği	40
Şekil 6.9. 3 numaralı numune için yük – burulma açısı grafiği.....	41
Şekil 6.10. 4 numaralı numune için yük - düşey deplasman grafiği.....	42
Şekil 6.11. 4 numaralı numune için yük - yatay deplasman grafiği	42
Şekil 6.12. 4 numaralı numune için yük – burulma açısı grafiği.....	43
Şekil 6.13. 5 numaralı numune için yük - düşey deplasman grafiği.....	44

Şekil	Sayfa
Şekil 6.14. 5 numaralı numune için yük - yatay deplasman grafiği	44
Şekil 6.15. 5 numaralı numune için yük – burulma açısı grafiği	45
Şekil 6.16. 6 numaralı numune için yük - düşey deplasman grafiği	46
Şekil 6.17. 6 numaralı numune için yük - yatay deplasman grafiği	46
Şekil 6.18. 6 numaralı numune için yük – burulma açısı grafiği	47
Şekil 6.19. 7 numaralı numune için yük - düşey deplasman grafiği	48
Şekil 6.20. 7 numaralı numune için yük - yatay deplasman grafiği	48
Şekil 6.21. 7 numaralı numune için yük – burulma açısı grafiği	49
Şekil 6.22. 8 numaralı numune için yük - düşey deplasman grafiği	50
Şekil 6.23. 8 numaralı numune için yük - yatay deplasman grafiği	50
Şekil 6.24. 8 numaralı numune için yük – burulma açısı grafiği	51
Şekil 6.25. 9 numaralı numune için yük - düşey deplasman grafiği	52
Şekil 6.26. 9 numaralı numune için yük - yatay deplasman grafiği	52
Şekil 6.27. 9 numaralı numune için yük – burulma açısı grafiği	53
Şekil 8.1. Deney sonuçları ile analitik sonuçların yük - düşey deplasman karşılaştırma grafiği	63

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 1.1. Yanal burulmalı burkulma davranışı	2
Resim 3.1. Yanal burulmalı burkulma hali	14
Resim 5.1. Test cihazı	27
Resim 5.2. Load cell	28
Resim 5.3. Yatay LVDT (a) ve Düşey LVDT (b)	28
Resim 5.4. SENSEBOX7001 açı ölçer	29
Resim 5.5. SIMPLEX P300D hidrolik pompa.....	29
Resim 5.6. TESTBOX1001 veri toplama sistemi	30
Resim 5.7. Ankastre mesnet.....	30
Resim 5.8. Kararlı ve burulmuş haller	32
Resim 5.9. Kupon test cihazı	32
Resim 6.1. 1 numaralı numune üst başlık L=2750 mm	35
Resim 6.2. 2 numaralı numune üst başlık L=2500 mm	38
Resim 6.3. 3 numaralı numune üst başlık L=2250 mm	40
Resim 6.4. 4 numaralı numune alt başlık L=2750 mm.....	42
Resim 6.5. 5 numaralı numune alt başlık L=2500 mm.....	44
Resim 6.6. 6 numaralı numune alt başlık L=2250 mm.....	46
Resim 6.7. 7 numaralı numune kayma merkezi L=2750 mm.....	48
Resim 6.8. 8 numaralı numune kayma merkezi L=2500 mm.....	50
Resim 6.9. 9 numaralı numune kayma merkezi L=2250 mm.....	52
Resim 8.1. Wolfram mathematica programına ait arayüz	61

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
A	Kesit Alanı
cm	Santimetre
C_w	Çarpılma Katsayısı
$\frac{d^n}{dz^n}, u^n$	n. dereceden türev
E	Elastisite modülü
G	Kayma modülü
J	Kesitin kutupsal atalet momenti
I_x	x eksenine göre atalet momenti
I_y	y eksenine göre atalet momenti
I_η	η eksenine göre atalet momenti
I_ξ	ξ eksenine göre atalet momenti
L	Kiriş boyu
M	Moment
M_x	Kuvvetli eksen etrafındaki eğilme momenti
M_y	Zayıf eksen etrafındaki eğilme momenti
M_z	Burulma momenti
M_ξ	Burulmuş kesitte kuvvetli eksen eğilme momenti
M_η	Burulmuş kesitte zayıf eksen eğilme momenti
M_ζ	Burulmuş kesitteki etrafındaki burulma momenti
P	Kirişin ucuna etki eden tekil yük
P_{kr}	Kritik yanal burulmalı burkulma yükü
r	Kesitin köşe açısı
h	Kesit yüksekliği
h_i	Kesitin başlık harici yüksekliği
tw	Kesitin gövde kalınlığı
tf	Kesitin başlık kalınlığı
u	Yatay yer değiştirme miktarı

Simgeler**Açıklamalar**

u	Yatay yer değıştirme miktarı
u₁	Eleman ucunda kuvvetli eksenindeki şekil değıştirme
v	Düşey yer değıştirme miktarı
W_{xx}	Kesitin x eksenine göre elastik mukavemet momenti
W_{yy}	Kesitin y eksenine göre elastik mukavemet momenti
m	Metre
mm	Milimetre
MPa	Megapascal
x	Kesitin kuvvetli eksenı
y	Kesitin zayıf eksenı
z	Konsol kirişte, mesnetten uca doğru koordinat
δ	Serbest uçta kuvvetli eksene dik çökme
ε	Birim şekil değıştirme
ζ	Burulmuş kesitte, mesnetten uca doğru koordinat
η	Burulmuş kesitte, kesitin zayıf eksenı
ξ	Burulmuş kesitte, kesitin kuvvetli eksenı
σ_a	Basınç başlığının akma gerilmesi
σ_y	Malzemenin akma gerilmesi
σ_u	Malzemenin kopma gerilmesi
σ_{kr}	Kritik gerilmesi
Φ	Burulma Açısı
ψ	Konsol kirişin narinliği

Kısaltmalar**Açıklamalar**

LVDT	Linear Variable Differential Transformers
TS	Türk Standartları

1. GİRİŞ

Günümüz dünyasında mimari kaygılardan ötürü mühendisliğin sınırlarını zorlayan birçok istek ortaya çıkmıştır. Yapı mühendisleri için büyük açıklıkların daha narin kesitlerle geçilmek istenmesi de bu isteklerden biridir. Özellikle çelik yapılarda ince cidarlı çelik yapı elemanlarının (I, IPE, H, T, U, L vs.) kullanılması zorunluluğunu ortaya çıkarmıştır. Elemanların hem yükseklik problemlerinin olmaması hem de ekonomik olmaları bu kesitlerin kullanılmasını gerektirmektedir. Ayrıca, çeliğin basınç ve çekme mukavemet değerlerinin birbirlerine çok yakın olması, betonarme ve ahşaba göre çeliğin kullanımını artırmıştır. Fakat bu elemanlar genelde çok düşük burulma rijitliğine sahip olmalarından dolayı önemli stabilite problemlerine sebep olabilmektedirler.

İnce cidarlı çelik elemanların farklı mühendislik alanlarında kullanım yerleri birkaç örnekle sunulmuştur:

- i. Yapı mühendisliğinde: Gökdelenler, konsol yapılar, kubbeler, içme suyu boruları,
- ii. Gemi mühendisliği: Gemilerin iç ve gövde kısımlarında, basınç kapları,
- iii. Uçak mühendisliği: Uçak kanatlarının kaplanması ve gövdelerinde, uzay gemileri, füzeler,
- iv. Makine mühendisliğinde: Araçların gövde, şasi ve kaporta kısımlarında, kompozit basınç tüplerinin imalatında, , makine imalatında vb.

İnce cidarlı çelik vb. yüksek mukavemete sahip metallerin ve alaşımların, günümüz mühendislik uygulamalarında kullanılması, elastik kararsızlığı önemli hale getirmiştir. Bu sebeple günümüzde yapı elemanlarının stabilite kaybını engellemek için çalışmalar yapılmaktadır (Timoshenko, 1963).

Yapı elemanlarının boyutlandırılmasında üç temel karakteristik bulunmaktadır. Bunlar, mukavemet, rijitlik (buna bağlı olarak deformasyon) ve stabiledir. Stabilite de kritik parametreler diğerlerinden farklıdır. Akmada ve kopmada sistemdeki gerilmeler belirli bir değeri aşmışsa, 'sistemde emniyet kalmamıştır' denir. Bu tip problemlere gerilme problemi denir. Burkulmada ise bir denge problemi söz konusudur. Söz konusu olan bu denge problemi, daha önce bahsi geçen elastik kararsızlık durumu olarak ifade edilebilir. Bu denge durumunda, sistem kararlı olmadığından, oluşabilecek en küçük bir farklılık sistemde büyük şekil değiştirmelere sebep olabilir. Bu da sistemin tekrar ilk konumuna

gelmesini imkânsızlaştırır. Sistem, çeliğin dayanımını aşan gerilmeler sebebiyle değil, bu şekil değiştirmelerle beraber, narin ve ince cidarlı yapı elemanlarının yetersiz elastik stabilitesinden dolayı göçer (Timoshenko, 1963). Eğer ince cidarlı elemanlar büyük burulma rijitliğini karşılayacak şekilde tasarlanır veya yanal yer değiştirmeye izin vermeyecek elastik mesnetlerle rijitlikleri artırılır ise sistem stabilitesini kaybetmemiş olacak yani yanal burkulma olayı gerçekleşmemiş olacaktır.

Yanal burkulma genellikle burulma veya yatay hareket yapması engellenmemiş ince cidarlı elemanlarda meydana gelmektedir. İnce cidarlı bir kirişe düşey düzlemde bir yük veya eğilme momenti uygulandığında, yük kritik değerin altında kaldığı müddetçe, sistemde sadece düşey yer değiştirmeler meydana gelir. Yüklemin şiddeti belirli bir seviyeye ulaştığında, sistemde yanal yer değiştirmeler meydana gelecek ve kendi ekseninde dönmenin oluşması ile sistemin kararlı hali bozulacaktır. Sistemin stabilitesini bozan bu yüke “kritik yanal burkulma yükü” denmektedir. Yanal burulmalı burkulma, sistemin kuvvetli asal eksene göre eğilme kuvveti altında, zayıf eksen doğrultusunda yer değiştirme ve dönmesine sebep olan yükün, kirişin farklı düzlemlerinde meydana gelecek eğilme, burulma ve çarpılma etkisinin bileşkesinden meydana gelen bir davranış olarak ifade edilebilmektedir. Burkulma dayanımı kesit özelliklerine, kirişin sınır şartlarına, malzeme kusurlarına, kullanılan desteklere, elemandaki geometrik kusurlara ve yükün uygulama şekline bağlı olarak farklı davranışlar sergilemektedir.



Resim 1.1. Yanal burulmalı burkulma davranışı

Günümüz şartlarında bilgisayar teknolojisinin gelişmesi ile de yanal burulmalı burkulma davranışının deneysel, analitik ve nümerik analizlerinin hesapları daha sağlıklı bir şekilde incelenebilmektedir. Bunun neticesinde yapılan literatür taramalarının sonucunda çelik

yapılarda yaygın olarak kullanılan IPE tür profiller için yanal burulmalı burkulma (stabilite bozulması) için yapılan kapsamlı deneysel bir çalışmanın olmadığı görülmüştür. Bu nedenle deneysel bir çalışma planlanmış ve çalışma kapsamında 2750, 2500 ve 2250 mm olmak üzere üç farklı uzunlukta her birinden üçer adet toplamda 9 adet IPE160 konsol kiriş deney elemanı, üst başlık, alt başlık ve kayma merkezinden uygulanmak üzere monotonik artan düşey tekil yükleme etkisi altında laboratuvar ortamında test edilmiştir. Testler sonucunda deney elemanlarının maksimum taşıma gücü, maksimum düşey ve yatay deplasman değerleri, maksimum konsol ucu burulma açısı değerleri, maksimum yük düzeyindeki rijitlik ve enerji tüketim kapasiteleri hesaplanmıştır. Ayrıca elemanların mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla 5 adet kupon çıkartılmış ve kuponlar üzerinde çekme deneyi yapılmıştır. Deneysel çalışmanın yanı sıra, kirişin kritik elastik yanal burulma burkulma yükünü hesaplamak için eşsiz bir kapalı-form analitik formülasyon oluşturulmuştur. Analitik çalışmalardan elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmış ve ne ölçüde başarılı sonuçlar elde edilebildiği yorumlanmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde deneysel çalışma ile benzerlik gösteren yanal burulma burkulma halinin incelendiği geçmişteki çalışmaların kısaca özetleri ve elde edilen sonuçlar hakkında bilgiler verilecektir. Yapılan çalışmaların hemen hemen tamamında deneysel ve teorik olmak üzere tek enkesitli eğilme elemanlarının farklı mesnet şartlarında yanal burulmalı burkulma durumları incelenmiştir.

Emrem (1978), sürekli kirişlerde yanal burkulma problemleri ile ilgili çalışmıştır. Bu çalışmada çatal mesnetli, çift simetrik-I kesitli, farklı açıklık ve üniform yayılı yüklü iki açıklıklı birçok kirişin stabilite problemlerini incelemiştir. Ayrıca kiriş üst başlığının, kiriş boyunca dönme ve yanal harekete karşı sürekli ve elastik olarak tutulmuş olması hali göz önüne alınmıştır. Mütemadi kirişlerde yanal stabilitesi probleminin incelenmesinde şimdiye kadar iki yöntemin kullanıldığı ve bu yöntemlerin uzun zaman aldığı ve yorucu olduğu sonucuna varmış. Problemi basit kirişe indirgeme sonucu ortaya çıkacak hataları azaltan bir metodun oluşturulduğundan bahis etmiştir [1].

Ings ve Trahair (1984), bu çalışmada yanal hareketi tutulmuş çatı aşıklarının yanal burulmalı burkulmasını incelemişlerdir. Üst başlıkları yanal yer değiştirmeye karşı tutulmuş çatı aşıklarının elastik yanal burkulması için bir model oluşturmuşlar, aşık sistemi sonlu eleman modeline dayalı bilgisayar programı yardımı ile analiz edilmiş ve elastik burkulma yüküne ait maksimum moment sonuçları grafik şeklinde sunulmuştur. Kullanılan yöntemin çatı aşıklarının tasarımında yanal burulmalı burkulma kritik yükünü azalttığı sonucuna varılmıştır [2].

Attard (1985), kirişlerin burulmalı burkulma yükünü sonlu elemanlar yöntemiyle hesaplamaya çalışmıştır. Çalışmasında, sabit statik yüklerle yüklenmiş ince cidarlı elastik kesitli kirişlerin, yanal burulmalı burkulmasını hesaplamak için iki farklı formül elde edilmiş, her iki formülde teorik çözümlerle ve deneylerle karşılaştırılmış ve sonuçların yakınsadığı sonucuna varılmıştır [3].

Galambos ve Xykis (1991), kirişlerin yanal destekler ile desteklendiği çelik sistemlerin stabiliteye etkisini incelemişlerdir. Çalışmalarında esnek olmayan iki elemanın analitik çalışmasının sonuçlarını deneysel çalışmalarla karşılaştırmışlardır. İki ve üç destekli

elemanlarda oluşturulan sonlu eleman modelini tekil elemanlar içinde oluşturmuşlar, sisteme ait elastik burkulma dayanımı araştırmışlardır [4].

- Sistemin uçlarındaki mesnet koşulları burkulma dayanımını istenilen ölçüde etkilememektedir.
- Seçilen elemanlarının eğilme rijitliği burkulma dayanımını önemli ölçüde etkilemektedir.
- Kirişin üstten tutulma durumu çok az da olsa burkulma dayanımını azaltmaktadır.
- Teorik çalışmalar ile elde edilen sonuçlar deneysel çalışmaya göre daha düşük sonuç vermiştir.
- Çapraz elemanların burkulma dayanımı yatay elemanlara göre daha etkilidir.

Emrem (2005), sürekli kirişlerde yanal stabilite ile ilgili çalışmıştır. Bu çalışmada çatal mesnetli, çift simetrik-I kesitli sürekli kirişlerde çatı örtü malzemesinin yanal burkulma tehlikesine karşı tutucu tesiri araştırılmıştır. Konuyu belli bir kapsamda tutabilmek amacıyla, uygulamada üç eşit açıklıklı ve simetrik düzgün yayılı yükü bulunan bir kiriş göz önüne alınmıştır. Kiriş üst başlığının açıklıkları boyunca yanal harekete karşı sürekli ve elastik olarak tutulduğu (çatı örtü malzemesinin tesiri) varsayılmıştır. Sonuçta çift simetrik-I kesitli sürekli kirişlerde, çatı örtü malzemesinin, yanal burkulma tehlikesine karşı etkili bir önlem olacağı sonucu ortaya çıkmıştır [5].

Aydın ve Doğan (2006), çelik korniyerlerin eğilme dayanımları tam plastik moment kapasitesi, korniyer kesitlerinin lokal burkulma dayanımları ve yanal burulma burkulmasına ait taşıma kapasiteleri göz önüne alınarak saptanabileceğini söylemişlerdir. Korniyerler genellikle kollarına paralel olan geometrik eksenler doğrultusunda uygulanan dış yüklerin etkisi altında bulundukları, bu dış yüklerin tek eksenli olabileceği gibi, yanal yer değiştirmenin önlenmesi halinde iki eksenli de olabileceğini de söylemişlerdir. Her iki durumda da asal eksenlere göre iki eksenli eğilme durumu meydana gelip, iki eksenli eğilmede en büyük momentin hangi kritik kesit noktasında meydana geleceğinin saptanamayacağı belirtilmiştir. Bütün özel noktaların kontrolü gerekeceği, ayrıca yönetmeliklerde korniyer kesitlerinin tam plastik moment kapasiteleri hesaba katılarak tasarımın gerçekleştirileceğini belirtmişlerdir. Bu durum tam plastik moment kapasitesinin ilk akma momentinin hangi oranda artırılarak elde edilebileceği sorununu ortaya çıkarmıştır. Korniyerlerin narin kesitteki yapısal elemanlar oldukları için sadece elastik ve plastik moment değerlerine göre tasarlanamayacağı ayrıca yanal burulma burkulmaları ve

lokal burkulma durumlarının da tasarımıda göz önüne alınması gerektiği belirtilmiştir.. Sonuç olarak çalışmada elastik momentlerin asal eksenlerdeki bileşenlerinin oranlarının +1.00 ile -1.00 arasındaki değişimleri için ilk akma momenti, tam plastik momentler arasındaki karşılıklı etkileşim diyagramları ve aynı oranlara ait plastik momentler, küçük eksene dik burkulma hali için kritik burkulma momentleri boyutsuz katsayılar yardımı ile elde edilerek, korniyerlerin iki eksenli eğilme haline ait yeni bir tasarım önerisinde bulunmuşlardır [6].

Yogev, Bucher ve Rubin (2007), bu çalışmasında dikdörtgen kesitli konsol kirişlerde dinamik yanal burulmalı burkulma etkilerini incelemişlerdir. Konsol bir çelik kirişin ucuna yer çekimi doğrultusunda bir ağırlık asılmış ve bu düzeneği düzenli olarak düşey yönde hareket ettiren bir sistem sayesinde değişik genlik ve frekanstaki titreşimlerin yanal burulmalı burkulmaya sebep olabileceği araştırılmıştır [7].

Samanta ve Kumar (2008), tek eksen göre simetrik-I kesitli, yanal yer değiştirmesi farklı şekillerde tutulmuş I kesitli konsol kirişlerin yanal burulmalı burkulma dayanımlarını üç farklı yükleme durumu için incelemişlerdir. I kesitlerin tek eksene göre simetrik olmasının sebebi alt ve üst başlıklarının farklı boyutlu olmasından kaynaklanmaktadır. Yükleme tipleri; serbest uçta tekil yük, kiriş boyunca düzgün yayılı yük ve kiriş boyunca sabit moment olarak belirlenmiştir. İlk iki yükleme tipinde, yükün üst ve alt başlıktan etki etmesi durumları göz önüne alınmıştır. Çalışma kirişlerin, üst, alt ve her iki başlığının yanal yer değiştirmesinin eleman boyunca tutulu olması hallerini kapsamaktadır. ABAQUS yazılımı kullanılarak yürütülen çalışmada, büyük alt başlıkları olan I konsol kirişlerde (T ve ters T kesitli kirişler hariç) üst başlığa serbest uçta tekil yük, düzgün yayılı yük ya da kiriş boyunca sabit moment etki etmesi durumlarında üst başlığın tutulu olmasının sonuca etkili olduğu saptanmıştır. Benzer şekilde geniş üst başlığı olan kiriş kesitleri için de alt başlığın tutulu olmasının etkili olduğu görülmüştür. Yükün alt başlığa etki etmesi durumunda herhangi bir türdeki yanal desteğin konumunun, tek eksene göre simetrik kesitlerde (Ters T kesitli konsollar hariç) yanal burulmalı burkulma dayanımına bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir [8].

Pınarbaşı (2011), bu çalışmasında Varyasyonel İterasyon Metodu'nu(VIM), dar dikdörtgen kesitli konsol kirişlerin yanal burulmalı burkulmasının hesabında bu metodun kullanımını araştırmıştır. Çalışmada, yanal olarak desteklenmemiş bir yönündeki ataleti

diğer yönündeki ataletine göre çok büyük olan kirişler ile çok uzun konsol kirişlerin tasarım kontrolünde yanal burulmalı burkulma hesaplarında yaklaşık çözümlerin kesin çözümlere yakınlığını görmek için, her algoritma için 17 yineleme gerçekleştirilmiş ve ilk 3 mod için kritik yükler tespit edilmiştir. Analiz sonuçları, tüm iterasyon algoritmalarının çalışılan tüm problemlerde tam olarak aynı sonuçları verdiğini göstermektedir [9].

Kala (2013), bu çalışmasında basit mesnetli sıcak haddelenmiş I kesitli kirişin kuvvetli eksenindeki eğilmesinin yanal burkulması problemi ile ilgilenmektedir. Stabilité problemi olan bir kirişin zayıf eksen eğilmesi ve burulma denklemleri de düşünülerek analiz edilmiştir. Mükemmel düzlükte kirişler ile kusurlu üretilen kirişler deneye tabi tutulmuş, doğrusal olmayan stabilite modeline göre matematiksel çözümler çıkarılmıştır. Kirişlerdeki rastgele kusurlara bilgisayardaki deneylerde de dikkat edilmiştir. İlk kusurların modellenmesi Latin Hiperküp numunelendirilmesi metoduna göre gerçekleştirilmiştir. Kusurların çoğunluğunun istatistiksel özellikleri deneysel araştırmada da bulunmuştur. Yük taşıma kapasitesinin ortalama değer ve standart sapmasında kiriş uzunluğunun etkisi analiz edilmiş, tarama temelli hassasiyet analizi metodu uygulanmıştır. Sonuç olarak üretimdeki kusurların yanal burkulma kapasitesini önemli ölçüde etkilediği sonucuna varmıştır [10].

Yuan, Kim ve Chen (2013), bu makalede gittikçe küçülen gövdeye sahip çelik T profilili konsolun düzgün yayılı yük altında veya uç noktada noktasal yük altında yanal burulmalı burkulma davranışını tanımlayan bir analitik model sunulmuştur. Mevcut analitik çözümleri teyit etmek için ANSYS programı kullanılarak sonlu eleman analizi ayrıca sunulmuştur. Analitik ve numerik çözümler arasında iyi bir uyuşma olduğu gösterilmiştir. Mevcut analitik çözümler kullanılarak, noktasal ve düzgün yayılı yük altında burkulma incelenmiş ve kritik burkulma yüklerinde kesit boyutlarının etkisinin incelenmesi için parametrik çalışma yapılmıştır. Gövde değişiminin, kritik yanal burulmalı burkulma yükünü kirişin başlık genişliğine bağlı olarak artırabilir veya azaltabilir olduğu bulunmuştur. Geniş başlığa sahip bir kiriş (genişlik/derinlik= 0,96) için kritik burkulma yükü gövde incelmesi ile %2 oranında arttığı, diğer yandan dar başlıklı bir kiriş (genişlik/derinlik=0,19) için gövde incelmesi burkulma yükünü noktasal uç yüklemesi için ve düzgün yayılı yük için sırasıyla %10 ve %6 oranında düşürdüğü sonucuna varılmıştır [11].

Özbaşaran (2013), Bu çalışmada, I kesitli konsol kirişlerin kritik yanal burulmalı burkulma yükünün farklı yük kombinasyonları için bulunabilmesi amaç edinilmiştir. Bu amaçla analitik ve deneysel çalışmalar yapılmıştır. Yanal burulmalı burkulma davranışının Enerji Yöntemi ile diferansiyel denklemi geliştirilmiştir. Bu denklem ile hesaplanan elastik kritik yanal burulmalı burkulma momenti sonuçları ABAQUS yazılımı ile de kontrol edilmiş, denklem takımları ile örtüştüğü görülmüştür. Deneyler 1 m, 2 m ve 3 m boyundaki IPE100 kesitli numuneler üzerinde deneyler yapılmıştır. Serbest ucundan tekil yük etki eden konsol kiriş şeklinde düzenlenmiş 9 adet IPE100 kesitli elemanın kritik yanal burulmalı burkulma yükleri tespit edilmiştir. Deneylerde elde edilen sonuçlar ile geliştirilen tasarım denkleminin sonuçları örtüşmüş olup deneylerin sonuçları ABAQUS yazılımı ile de örtüştüğü görülmüştür. Deneyler ve analitik çalışmaların sonucunda, I kesitli konsol kirişlerin elastik, elasto-plastik ve plastik yanal burulmalı burkulma momenti değerlerini hesaplamayı mümkün kılan bir tasarım prosedürü ifade edilmiştir. Bu tasarım prosedürü kesitin üst başlık, alt başlık ve kesme merkezinden yüklenmesi özel hallerini kapsamaktadır. Verilen tasarım prosedürü ile hesaplanan moment değerleri uluslararası yönetmelikler olan AISC360-10 ve EC3 yönetmelikleri ile de karşılaştırılmış ve yorumları yapılmıştır [12].

Ghafoori ve Motavalli (2014), bu makalelerinde normal modül (NM) karbon fiber destekli polimer (CFRP) katmanlarla güçlendirilmiş çelik kirişlerin yanal burulmalı burkulması (LTB) deneysel olarak ve sayısal olarak incelenmiştir.. Bir tanesi güçlendirilmemiş referans kiriş olmak üzere toplamda 7 çelik kiriş istatistiksel olarak göçme durumuna kadar test edilmiştir. Çelik kirişler bağlı veya bağırsız CFRP katmanları ile güçlendirilmiştir. CFRP katmanları ile %0, %20 ve %40 ön basınç seviyeleriyle güçlendirilen her bir tip için 3 çelik kiriş hazırlanmış ve test edilmiştir. Doğrusal elastik davranış üzerinde çeşitli güçlendirme durumlarının etkileri ve desteklenmiş kirişlerin burkulma dayanımı incelenmiştir. Test sonuçları şunu göstermiştir ki; CFRP katmanları kullanılarak çelik kirişlerin güçlendirilmesi, referans kirişle karşılaştırıldığında hem bağlı hem de bağırsız sistemde elastik dayanımı neredeyse aynı miktarda artırmıştır. CFRP katmanlarının ön gerilmesi, desteklenmiş kirişlerin elastik dayanımında neredeyse hiçbir etkiye sahip olmadığı, ancak sona doğru burkulma kapasitesini etkilemektedir. Desteklenmiş kirişlerde yüksek ön gerilme her zaman yüksek burkulma dayanımı anlamına gelmemektedir. Testlerin çoğunda, bağırsız CFRP katmanları ile güçlendirilen numuneler, bağlı CFRP katmanları ile güçlendirilen numunelere göre az daha yüksek kapasiteye sahip olmuşlardır.

Bağlı numunelerin hazırlanması bağısız numunelere göre iki kat zaman almıştır. Ön germeli bağlı ve bağısız katmanlı desteklenmiş kirişlerin sonlu eleman modeli üretilmiştir. Sonlu eleman modelinden elde edilen sonuçlarla deneyden elde edilen sonuçlar kıyaslanmıştır [13].

Kalkan vd. (2015), bu çalışmada, sonlu elemanlar programı ile modellenen kirişlerin nümerik analizi sonucu elde edilen burkulma yükleri, farklı çelik yönetmeliklerinde (AISC-LRFD, AS 4100, Eurocode 3) sunulan formüller ile geçmiş çalışmalarda geliştirilmiş analitik formüllerden elde edilen kritik yük değerleri ile karşılaştırılarak, yanal burulmalı burkulma için önerilen formüllerin nümerik sonuçlarla uyumu incelenmiştir. Ayrıca, gövde boşluklarının da etkisi ile petek kirişlerde ortaya çıkabilecek gövde buruşması riskinin, burkulma yükü değerlerini hangi ölçüde azalttığı ve formüllerin bu azalmayı yansıtıp yansıtamadığı da araştırılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda, 114 adet I kesitli hücreli boşluklu çelik kirişler üzerinde yapılan çalışmalarda nümerik analizinden elde edilen kritik yük değerlerinin analitik değerlerin altında kaldığı görülmüştür. Göz önüne alınan yönetmelikler arasında nümerik değerlere en yakın sonuçlar ise Eurocode 3 yönetmeliğinde sunulan formüllerden elde edilmiştir. Böylece bu çalışma yerel burkulmaların yapısal hesaplarda dikkate alınmasının gerekliliğini ortaya koyarak daha güvenli tarafta kalacak şekilde tasarım yapılmasına olanak sağlamaktadır. Aynı şekilde nümerik analiz değerlerinin literatürdeki buruşma etkisini göz önüne alan çalışmalardan hesaplanan kritik yük değerlerinin oldukça altında kaldığı sonucu elde edilmiştir [14].

İbrahim vd. (2015), bu makalede, uçları basit mesnetli, başlıkları kesilmiş kirişlerin elastik olmayan yanal burulmalı burkulmasının deneysel çalışması sunulmuştur. 6 adet tam ölçekli başlığı kesilmiş çelik I kiriş testi yapılmıştır. Test parametreleri, başlık kesiklik uzunluğunun kiriş derinliğine oranı ve başlık kesiklik derinliğinin kiriş derinliğine oranı olarak sunulmuştur. Deneysel testlerin sonuçları sonlu eleman analizi modelinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Test sonuçları şunu göstermiştir ki, başlığın kesilmesinden dolayı elastik olmayan burkulma kapasitesindeki azalma kesik olmayan kirişinkine göre %60 daha fazladır. Kesik başlıklar için 12 adet sonlu eleman modeli incelenmiş ve kesilmemiş model ile çeşitli geometrik boyutlarda kesilmiş model karşılaştırılmıştır. Kesik bölgesinde berkitme plakası olan kesikli kirişlerin sayısal çalışması da bu makalede mevcuttur. Kesik bölgelerinde yatay ve dikey berkitme plakaları ile güçlendirilen kesikli kirişlerde incelenmiş ve kesik derinliğinin kiriş derinliğine oranı

$(dc/D) > 0,25$ olan kirişlerin kesik bölgede yerel gövde burulmasını engellemek için hem yatay hem de dikey berkitme plakaları ile güçlendirilmeleri gerektiği sonucuna varılmıştır [15].

De'nan, Nazri ve Hashim (2017), bu makalede, Lusas yazılımı kullanılarak sonlu eleman analizi ile I kirişin ağ açıklığı ile ağzı açılmamış hallerinin yanal burulma burkulma davranışını araştırılmıştır. Analiz, iki açıklık arasındaki mesafe, çeşitli şekillerde kesitler ve web açılış boyutlarında çok çeşitli pratik mesafeleri dikkate almaktadır. Analiz sonuçları, ağ açıklığının büyüklüğünün burkulma momenti direncine biraz etki ettiğini göstermektedir. Ayrıca, optimum boyut ve açıklık şekillerini bulmak için beş şekil ve 1.1 m kesit uzunluğundaki üç delik açılmıştır. Burkulma momentinin yüksek değerleri nedeniyle 0.6D ve 0.7D ile karşılaştırıldığında optimum boyutun 0.5D olduğu sonucuna varılmıştır. Bu çalışmanın neticesinde model 2, en iyi model olarak sınıflandırılmıştır. Çünkü burkulma momenti değeri, model 1'den daha yüksektir. Açılma sayısı daha az olduğunda, burkulma momentlerinin daha yüksek olduğu anlamına gelir. Model 1 için, 1,1 metrelik uzunluk boyunca 7 açıklık vardır. Ancak, model 2 için 1,1 metrelik bir açıklıkta 5 açıklık vardır. Bu nedenle, ara-çap oranı (S / D_o), her bir modelin yanal burulma burkulmasını önemli ölçüde etkilemiştir. C-altıgenin, diğer ağ açıklık şekillerine kıyasla en yüksek burkulma momentine sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Bunun yanı sıra, açılış açıklığının, kare açıklık gibi büyüklükte büyüdüğü zaman, burkulma momenti değerlerinde farklılıklar azalmıştır. Ancak, ağ açıklığı olmayan I-demeti, C-altıgene kıyasla en yüksek burkulma momenti direncine sahip olduğu tespit edilmiştir [16].

Yılmaz ve Kırac (2017), bu çalışmalarında, basitçe desteklenen Avrupa IPE ve IPN kirişlerinin kritik yanal burulma burkulma yükünü hesaplamak için kullanılabilecek benzersiz bir uygun denklem sunmayı amaçlamaktadır. İlk önce, monosimetrik kesitli kirişlerin yanal burkulma davranışını tanımlamak için analitik bir model tanıtılmıştır. Analitik model birinci dereceden eğilme dağılımı, yükün yükseklik seviyesi ve kesitin monosimetri özelliğini içerir. Daha sonra boyutsuz katsayılarla basitleştirilmiş bir denklem oluşturmak için analitik çözümler kullanılarak parametrik çalışma yapılmıştır. IPE ve IPN kirişlerinin ince cidarlı elemanlarda burulma ve yükleme konumlarının yanal burulma burkulma davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Önerilen çözümler, ince cidarlı kabuk elemanlarının ve çarpılmış kiriş elemanlarının kullanıldığı sonlu eleman simülasyonları ile karşılaştırılmıştır. Analitik, parametrik ve sayısal çözümler arasında iyi bir uyum olduğu

gösterilmiştir. Avrupa IPE ve IPN kirişlerinin yanal burulma burkulma yükünün, sunulan denklemle belirlenebileceği ve tasarım işlemlerinde güvenle kullanılabilceği tespit edilmiştir [17].

Özbaşaran (2018), Bu çalışmasında, metaheuristik algoritmalarından biri ile gerilme, doğrusal olmayan sapma ve küresel burkulma kısıtlamaları altında prizmatik I seksiyonel kiriş-kolonlarının optimal tasarımı gösterilmekte ve değişken kesitli optimizasyon sonuçları üzerindeki etkisi tartışılmaktadır. Dört farklı optimizasyon çeşidi tanıtılmış ve yapısal malzeme ekonomisine sıcak haddelenmiş bölümler yerine optimize edilmiş şekiller kullanılmasının katkısı sayısal örneklerle gösterilmiştir. Optimizasyonun, sıcak haddelenmiş kesitlere göre %23'e kadar daha hafif çözümlere yol açabileceği ve mühendislik açısından uygun bir şekilde verimli çift-simetrik I kesit tasarımlarının (kullanılan malzeme miktarı cinsinden) elde edilebileceği gösterilmiştir [18].

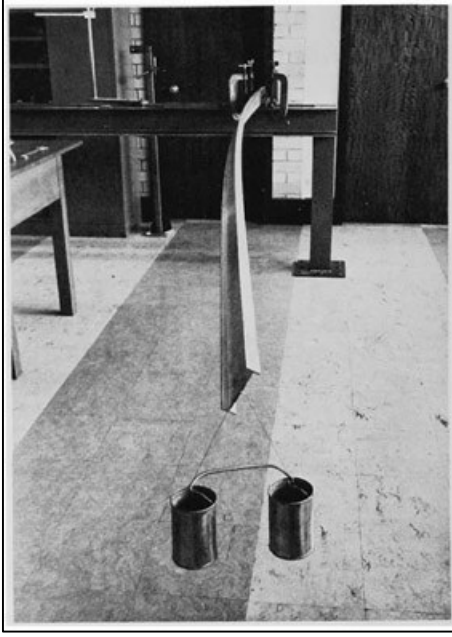
3. YANAL BURULMALI BURKULMA

İnce cidarlı çelik yapı elemanları günümüz tekniğinde çokça kullanılan yapı elemanlarıdır. Fakat bu elemanlar (I, H vs.) genelde çok düşük burulma rijitliğine sahip olmalarından dolayı önemli stabilite problemlerine sebep olabilmektedirler. Özel durumlar haricinde kutu kesitli bir eğilme elemanı için burkulma problemi oluşmamaktadır. İnce cidarlı elemanlar büyük burulma rijitliğini karşılayacak şekilde tasarlanabilmekte veya yanal yer değiştirmeye izin vermeyecek elastik mesnetlerle rijitlikleri artırılabilirler.

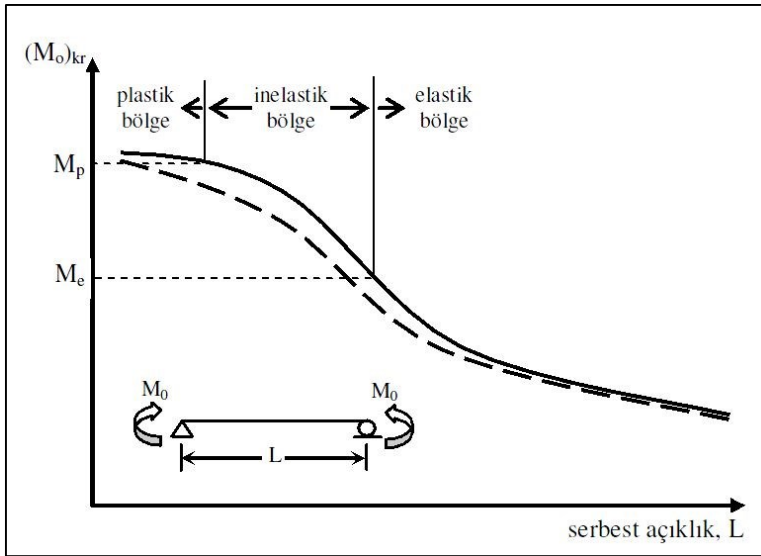
Yanal burkulma genellikle burulma veya yatay hareket yapması engellenmemiş ince cidarlı elemanlarda meydana gelmektedir. İnce cidarlı bir kirişe düşey düzlemde bir yük veya eğilme momenti uygulandığında, yük kritik değerin altında kaldığı müddetçe, sistemde sadece düşey yer değiştirmeler meydana gelir. Yüklemin şiddeti belirli bir seviyeye ulaştığında, sistemde yanal yer değiştirmeler meydana gelecek ve kendi ekseninde dönmenin oluşması ile sistemin kararlı hali bozulacaktır. Sistemin stabilitesini bozan bu yüke “kritik yanal burkulma yükü” denmektedir. Yanal burulmalı burkulma, sistemin kuvvetli asal eksene göre eğilme kuvveti altında, zayıf eksen doğrultusunda yer değiştirme ve dönmesine sebep olan yükün, kirişin farklı düzlemlerinde meydana gelecek eğilme, burulma ve çarpılma etkisinin bileşkesinden meydana gelen bir davranış olarak ifade edilebilir. Resim 3.1’de yanal burulmalı burkulma davranışına ulaşmış bir çelik I kesitli konsol kiriş profili görülmektedir.

Yanal burulmalı burkulma davranışının mesnetler arası uzunluk olan L ’ye göre değişimi Şekil 3.1’de grafiksel olarak verilmiştir. Şekilde kesikli çizgi, kesitte geometrik bir ön kusur olduğu durumu ifade etmek içindir. Kalın çizgi ise kusursuz geometrideki basit mesnetli kiriş için kritik yük değerlerini göstermektedir. Bu kirişin davranışı üç bölgede incelenebilmektedir.

- i. Burkulmanın plastik momentten sonra gerçekleşeceği kadar kısa kirişlerde görülen plastik burkulma,
- ii. Kirişin en azından bir kısmının akma gerilmesine ulaştığında stabilite kaybının görüldüğü elasto-plastik (inelastik) burkulma,
- iii. Uzun kirişlerde meydana gelen elastik burkulma.



Resim 3.1. Yanal burulmalı burkulma hali

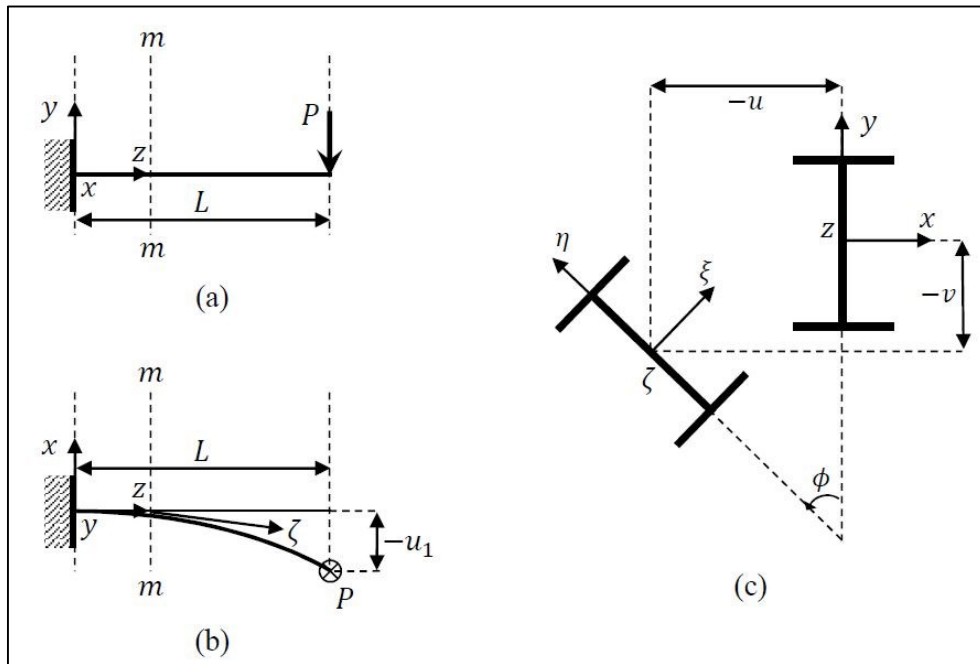


Şekil 3.1. Yanal burulmalı burkulma dayanımının serbest açıklıkla ilişkisi

Yanal burkulma davranışı ile ilgili teorik esasları içeren ilk çalışmalar geçen yüzyılın başlarında ortaya konulmuş, dikdörtgen kesitler için (Prandtl, 1899) ve (Michell, 1899), I kesitli elemanlar için de (Timoshenko, 1910) tarafından gerçekleştirilmiştir. 20. yüzyılın ortalarında ise (Winter, 1943) ve (Galambos, 1963) farklı kesitler için çalışmalar yapmışlardır. Günümüz şartlarında bilgisayar teknolojisinin gelişmesi ile yanal burkulma davranışı ve sebepleri daha sağlıklı bir şekilde incelenebilmektedir. Burkulma dayanımı kesit özelliklerine, kirişin sınır şartlarına, malzeme kusurlarına, kullanılan desteklere,

elemandaki geometrik kusurlara ve yükün uygulama şekline bağlı olarak farklı davranışlar sergilemektedir.

Yanal burulmalı burkulma analizi için yapılan bu çalışmada, yanal olarak tutulu olmayan uzunluğun fazla olması kesitte akma başlamadan stabilite problemlerine sebep olacağından davranış elastik olmaktadır. Elastik yanal burulmalı burkulma olayına ait diferansiyel denklemlerle türetilen kritik elastik dayanım ifadesi tüm yanal burulmalı burkulma durumları için temel oluşturmaktadır.



Şekil 3.2. Ucunda tekil yük bulunan I kesitli konsol bir kirişin yanal burulmalı burkulma hali a) yan görünüş b) üst görünüş c) m-m kesiti

Şekil 3.2’de ucunda tekil yük bulunan bir kirişin yanal burulmalı burkulmasının incelenmesinde kullanılan eksen doğrultuları gösterilmiştir. x , y ve z eksen doğrultusu burkulmadan önceki konumu belirtmektedir. L konsol boyunu, P ucuna etki eden tekil yükü göstermektedir. Kesit merkezinin x ve y yönlerindeki yer değiştirme bileşenleri u ve v ’dir. Kesitin z eksen etrafında dönme açısı Φ ’dir. Yanal burkulma sırasında kesit Φ burulma açısı kadar dönmektedir. Bu yeni konumda asal eksenler ξ ve η ile, kirişin elastik eğrisinin teğeti doğrultusu ζ ile gösterilmiştir. u , v ve Φ ’nin küçük oluşlarından dolayı yüksek mertebeden terimler ihmal edilerek ξ , η ve ζ ile x , y ve z koordinatları arasındaki dönüşüm Çizelge 3.1’de yapılmıştır (Timoshenko and Gere, 1961).

Çizelge 3.1. Doğrultu kosinüsleri

Eksenler	x	y	z
ξ	1	Φ	$-\frac{du}{dz}$
η	$-\Phi$	1	$-\frac{dv}{dz}$
ζ	$\frac{du}{dz}$	$\frac{dv}{dz}$	1

Şekil 3.2 dikkatle incelendiğinde xz ve yz düzlemlerindeki eğrilikler, çökmenin ikinci dereceden türevi, o eksen etrafındaki eğilme momentinin yine o eksen doğrultusundaki eğilme rijitliğine bölümü ile $\frac{d^2u}{dz^2}$ ve $\frac{d^2v}{dz^2}$ olarak ifade edilirler. Çok küçük dönmeler için bu eğrilikler $\xi\xi$ ve $\eta\xi$ düzlemleri için de geçerlidir. Kirişte meydana gelen dönme ve yer değiştirmeler için diferansiyel denklemler (3.1), (3.2) ve (3.3) denklemlerinde gösterilmiştir.

$$EI_{\eta} \frac{d^2u}{dz^2} = M_{\eta} \quad (3.1)$$

$$EI_{\xi} \frac{d^2v}{dz^2} = -M_{\xi} \quad (3.2)$$

$$GJ \frac{d\Phi}{dz} - EC_w \frac{d^3\Phi}{dz^3} = M_{\zeta} \quad (3.3)$$

Yukarıdaki denklemlerde E elastisite modülünü, G kayma modülünü; I_{η} ve I_{ξ} sırasıyla η ve ξ eksenlerine göre atalet momentlerini; M_{η} ve M_{ξ} sırasıyla η ve ξ eksenleri etrafındaki eğilme momentlerini; M_{ζ} ise ζ eksen etrafındaki burulma momentini; J kesitin kutupsal (burulma) atalet momenti ve C_w ise kesitin çarpılma katsayısıdır. Denklemler yanal burulmalı burkulma durumları için temel oluşturmaktadır (Timoshenko, 1961).

3.1. Tekil Yük Etkisindeki Konsol Kirişin Yanal Burulmalı Burkulması

Şekil 3.2’de ucunda tekil bir P yükü bulunan bir kirişin yanal burulmalı burkulmasının incelenmesinde P kuvveti kritik bir değere ulaştığında sistemde yanal burkulma oluşacaktır. Kirişin m-m kesitinde burkulmamış düzlem için aşağıdaki ifadeler yazılabilir;

$$M_x = -P(L - z) \quad (3.4)$$

$$M_y = 0 \quad (3.5)$$

$$M_z = -P(u_1 - u) \quad (3.6)$$

Burada u_1 ifadesi kirişin ucunda oluşan yatay yer değiştirmedir. M_x , M_y ve M_z ise sırasıyla x , y ve z eksenleri etrafında oluşan eğilme momentleridir. Çizelge 3.1 yardımıyla ξ , η ve ζ eksenlerine göre (3.7), (3.8) ve (3.9) denklemleri yazılabilir.

$$M_\xi = -P(L - z) \quad (3.7)$$

$$M_\eta = -P\Phi(L - z) \quad (3.8)$$

$$M_\zeta = P(L - z) \frac{du}{dz} - P(u_1 - u) \quad (3.9)$$

Denklem (3.7), (3.8) ve (3.9)'da elde edilen momentler Denklem (3.1), (3.2) ve (3.3)'de yerlerine konulursa aşağıdaki diferansiyel denklemler elde edilir (Timoshenko, 1961).

$$EI_\xi \frac{d^2v}{dz^2} - [-P(L - z)] = 0 \quad (3.10)$$

$$EI_\eta \frac{d^2u}{dz^2} - [-P\Phi(L - z)] = 0 \quad (3.11)$$

$$GJ \frac{d\Phi}{dz} - EC_W \frac{d^3\Phi}{dz^3} - \left[P(L - z) \frac{du}{dz} - P(u_1 - u) \right] = 0 \quad (3.12)$$

Denklem (3.12) z 'ye göre türevi alınır (3.11) den $\frac{d^2u}{dz^2}$ ifadesi çekilirse , burulma açısı Φ için (3.13) denklemi elde edilir.

$$EC_W \frac{d^4\Phi}{dz^4} - GJ \frac{d^2\Phi}{dz^2} - \frac{P^2}{EI_\eta} (L - z)^2 \Phi = 0 \quad (3.13)$$

Denklem (3.13) eşitliği kiriş uç sınır şartları kullanılarak çözülürse kritik burkulma yükü hesaplanır (Timoshenko, 1961).

$$P_{kr} = \frac{m}{L^2} \sqrt{EI_\eta G} \quad (3.14)$$

Buradan aşağıdaki en büyük eğilme gerilmesi,

$$\sigma_{kr} = P_{kr} L \frac{h}{2I_x} \quad (3.15)$$

Buradaki m değeri tekil yüklü konsol kirişler için çarpılma rijitliği, burulma rijitliği ve kirişin boyuna bağlı bir katsayıdır. Çizelge 3.2’de değişik kesit ve kiriş boyları için m değerleri verilmiştir (Timoshenko, 1961).

Çizelge 3.2. Tekil yüklü konsol kiriş için m değerleri

$\frac{L^2 GJ}{E C_W}$	0.1	1	2	4	8	16	32	40
m	44,30	15,70	12,20	9,76	8,03	6,73	5,87	6,64

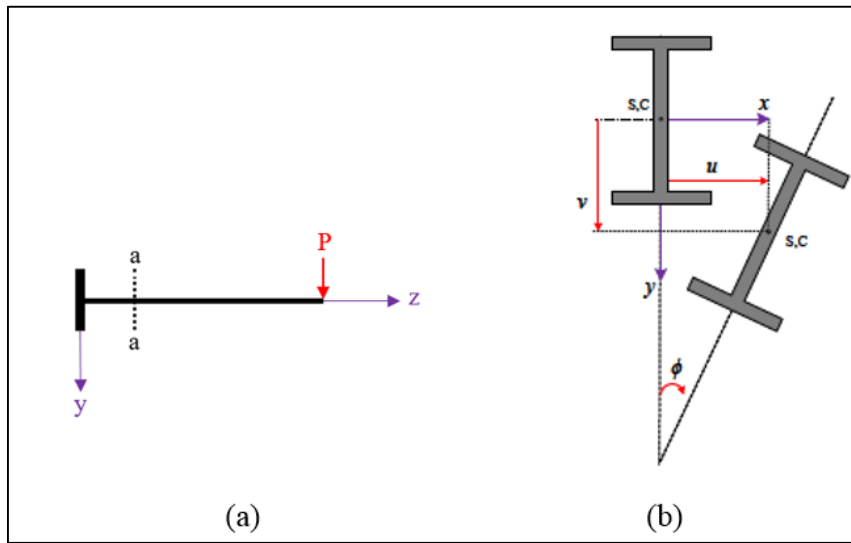
Bulunan denklemlerde P yükü konsol kirişin uç noktasının kesitinin merkezinden uygulanmaktaydı. Konsolun ucuna uygulanan P kritik yükü kesit merkezinden değil de a kadar mesafeden uygulanırsa yanal burkulma yükü denklem (3.16)’da ifade edildiği gibi hesaplanır.

$$P_{kr} = \frac{m}{L^2} \sqrt{EI_\eta GJ} \left(1 - \frac{a}{L} \sqrt{\frac{EI_\eta}{GJ}} \right) \quad (3.16)$$

Denklemdaki a ’nın işareti kesit merkezinden yukarıda pozitif, aşağıda ise negatiftir. Denklemden anlaşılacağı üzere P yükü kesit merkezinin yukarısından uygulandığında yanal burulmalı burkulma yükü azalmakta, kesit merkezinden aşağısından uygulandığı zaman ise artmaktadır.

4. KONSOL KİRİŞLER İÇİN ENERJİ YÖNTEMİ İLE ANALİTİK HESABI

Konsol kirişinin yanal burulmalı burkulması iki aşamadan oluşur. İlk olarak, konsol kiriş ana eksenini etrafında bükülür ve daha sonra yana doğru bükülmeye başlayan sisteme etki eden yüklerin büyüklüğü kritik bir düzeye ulaştığında bükülerek burkulur. Şekil 4.1’de konsolun ucunda enlemesine hareket eden konsantre bir tekil kuvvete maruz bırakılan çift simetrik I kesitli bir konsol kirişinin yanal burulmalı burkulmasını göstermektedir.



Şekil 4.1. Ucunda tekil yük bulunan I kesitli konsol bir kirişin yanal burulmalı burkulma hali a) yan görünüş b) a-a kesiti

Şekil 4.1’de L konsol boyunu, P ucuna etki eden tekil yükü göstermektedir. S ve C sırasıyla kesme merkezini ve ağırlık merkezini göstermektedir. u kayma merkezinin yanal yer değiştirmesini, v kayma merkezinin düşey yer değiştirmesini, Φ ise burulma açısını ifade etmektedir.

Konsol kirişte yanal burkulma, çarpılma, ve burulma nedeniyle depolanan gerilme enerjisi aşağıdaki denklem (4.1) ile hesaplanabilir.

$$U = \frac{1}{2} \int_0^L EI_y \left(\frac{d^2 u}{dz^2} \right)^2 dz + \frac{1}{2} \int_0^L EC_w \left(\frac{d^2 \Phi}{dz^2} \right)^2 dz + \frac{1}{2} \int_0^L GJ \left(\frac{d\Phi}{dz} \right)^2 dz \quad (4.1)$$

Yukarıdaki denklemde E elastisite modülünü, G kayma modülünü, I_y zayıf eksen etrafındaki atalet momentini, J kesitin kutupsal (burulma) atalet momentini ve C_w ise kesitin çarpılma katsayısıdır.

Enine kuvvetler tarafından yapılan dış iş denklem (4.2)'de gösterilmiştir.

$$V = \frac{1}{2} \int_0^L 2M_x \Phi \left(\frac{d^2 u}{dz^2} \right) dz + \frac{1}{2} \sum P H_p \Phi_p^2 + \frac{1}{2} \int_0^L q H_q \Phi^2 dz \quad (4.2)$$

Denklemde M_x güçlü eksen etrafındaki eğilme momentidir. Denklemde ikinci ve üçüncü terimler sırasıyla, (P) kesme merkezinin dışında hareket eden konsantre yükü, (q) ise düzgün yayılı yükü ifade etmektedir. Bu işler, kesit döndükçe yüklerin uygulama noktaları ile kayma merkezi arasındaki mesafenin değişmesinden kaynaklanmaktadır. H_p ve H_q , sırasıyla kayma merkezinden ölçülen konsantre yükü ve düzgün yayılı yüklerin hareket noktasının dikey mesafesidir. Φ_p ise konsantre yükün uygulandığı noktada burulma açısıdır. Denklem (4.2)'de H_p ve H_q , kayma merkezinin altına etki eden yükler için pozitifdir.

Kesitin düzleminde rijit olduğunu varsayan Vlassov'un modeli kullanılarak, kesitin bozulma deformasyonu yoktur ve kesitin ortalama yüzeyindeki kayma deformasyonu önemsizdir.

Şekil 4.1'de verilen konsol kirişin toplam potansiyel enerjisi ($\Pi=U+V$), hafifçe bükülmüş bir biçimde ön burkulma sapmalarını dikkate almadan denklem (4.3)'de gösterildiği şekilde yazılabilir.

$$\begin{aligned} \Pi = & \frac{1}{2} \int_0^L E I_y \left(\frac{d^2 u}{dz^2} \right)^2 dz + \frac{1}{2} \int_0^L E C_w \left(\frac{d^2 \Phi}{dz^2} \right)^2 dz + \frac{1}{2} \int_0^L G J \left(\frac{d\Phi}{dz} \right)^2 dz \\ & + \frac{1}{2} \int_0^L 2M_x \Phi \left(\frac{d^2 u}{dz^2} \right) dz + \frac{1}{2} \sum P H_p \Phi_p^2 + \frac{1}{2} \int_0^L q H_q \Phi^2 dz \end{aligned} \quad (4.3)$$

Enerji yöntemi, yanal burkulma sırasında depolanan ilave gerilme enerjisi ile uygulanan kuvvetler tarafından yapılan ek iş arasındaki eşitliği temel almaktadır. Bu yöntemde yanal

burulmalı burkulma yükü, uç koşulları sağlayan ve enerji denkleminde gerçek yer değiştirme değerlerine karşılık gelen bir yer değiştirme fonksiyonunun kullanılmasıyla elde edilir. Yanal burulmalı burkulma meydana geldiğinde, kesme merkezinden tanımlanan kirişin yanal yer değiştirmesinin ve kesitin dönme açısının aşağıdaki şekilde açıklanacağını varsayalım:

$$u = \sum_{i=1}^n A_i \left(\frac{z}{L}\right)^{i+1} \quad (4.4)$$

$$\phi = \sum_{i=1}^n B_i \left(\frac{z}{L}\right)^{i+1} \quad (4.5)$$

Buradaki A_i ve B_i ise yer değiştirme genlikleridir. Denklem (4.4) ve (4.5)'de varsayılan yer değiştirme işlevlerinin, sabit desteklerde sınır koşullarını ($u=\phi=0$ ve $du/dz=d\phi/dz=0$) sağlamaktadır. Konsol kirişin diğer ucu serbesttir, bu nedenle, u , ϕ , du/dz ve $d\phi/dz$ $z=L$ 'de serbest kalmaktadır.

Varsayılan olarak eğilmiş şekillerin Denklem (4.3)'de ikame edilmesi ile, toplam potansiyel enerji elde edilir:

$$\Pi = U + V = f(A_1, A_2, A_3 \dots, A_n, B_1, B_2, B_3 \dots, B_n) \quad (4.6)$$

Fonksiyondaki f 'nin işlevi A_i ve B_i parametrelerinin ikinci dereceden bir şeklidir. Bir ekstremum prensibine dayanan Ritz yöntemi, eğilmiş şekillere göre potansiyel enerjinin en aza indirilmesini gerektirir. Böylece yer değiştirme genlikleri bakımından toplam potansiyelin kısmi türevlerini alarak:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial A_i} = 0 \text{ for } i = 1, 2 \dots n \quad (4.7)$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial B_i} = 0 \text{ for } i = 1, 2 \dots n \quad (4.8)$$

Denklem (4.7) ve (4.8)'de bir $2n$ homojen lineer denklem sistemini temin eder ve cebirsel denklemler kümesi aşağıdaki matris formunda ifade edilebilir.

$$[K]_{2n \times 2n} \{d\}_{2n \times 1} = \{0\}_{2n \times 1} \quad (4.9)$$

Buradaki K katsayılı matris ve $\{d\} = \{A_1, A_2, A_3 \dots, A_n, B_1, B_2, B_3 \dots, B_n\}^T$. K katsayısı matrisinin determinantı önemsiz olmayan bir çözüm için ise ortadan kaybolur.

$$\det [K]_{2n \times 2n} = 0 \quad (4.10)$$

Denklem (4.10)'da en küçük kök kritik burkulma momentini veya yükünü veren $2n$ 'lik güç dizisine yol açar [19].

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

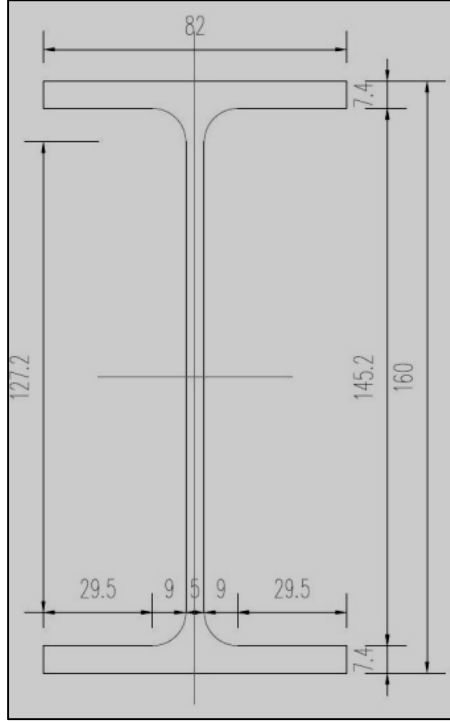
5.1. Deney Elemanı

Deneysel çalışma kapsamında IPE tipi çelik profiller içerisinde en yaygın olarak kullanılan IPE160 çelik profil türü deney elemanlarının üretiminde kullanılmak üzere seçilmiştir. Düzlem dışı burulmalı burkulma göçme mekanizmasının incelenmesi için konsol kiriş deney elemanları üretilmiştir. IPE160 kesitli, ankastre mesnetli çelik konsol kiriş deney elemanları konsol ucuna monotonik olarak artırılarak uygulanan tekil yükleme etkisi altında burulmalı yanal burkulma göçme mekanizması meydana gelene kadar yüklenmiştir. Deneysel çalışmada incelenen değişkenler ankastre mesnetli çelik konsol kirişin net açıklığı ve konsol kiriş serbest ucuna etkiyen kesme kuvvetinin kesit üzerindeki uygulanma noktasıdır. Deneysel çalışmalar için IPE160 kesitli çelik profilden 2750 mm, 2500 mm ve 2250 mm uzunluğunda 3 farklı boyda numune hazırlanmıştır. Yapılacak olan deney elemanlarının boyutlarının bu ölçülerde olmasına karar verilmesindeki sebep, 2750 mm boyutundaki elemanın serbest ucundan uygulanan yükten dolayı elastik davranış sergilemesi, 2500 mm elemanın elasto-plastik davranış sergilemesi ve 2250 mm boyutundaki elemanın ise plastik davranış sergilemeleri olacaktır. Ayrıca farklı boydaki her numune için uç noktasından üst başlık, alt başlık ve kayma merkezi olmak üzere 3 farklı yükleme konumundan yükleme yapılacak şekilde elemanlara ilave parçalar kaynatılmış olup farklı yük konumlarına göre elemanların kritik yanal burulmalı burkulma davranışlarının hangi seviyelerde kaldığı tespit edilmiştir. Numunelerin özellikleri Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Hazırlanan numuneler

Eleman No	Kesit	Uzunluk (mm)	Yük Konumu
1	IPE160	2750	Üst Başlık
2	IPE160	2500	Üst Başlık
3	IPE160	2250	Üst Başlık
4	IPE160	2750	Alt Başlık
5	IPE160	2500	Alt Başlık
6	IPE160	2250	Alt Başlık
7	IPE160	2750	Kayma Merkezi
8	IPE160	2500	Kayma Merkezi
9	IPE160	2250	Kayma Merkezi

Deneysel çalışmalarda kullanılan IPE160 profiline ait kesit boyutları Şekil 5.1’de, kesit özellikleri Çizelge 5.2’de ölçüleri milimetre(mm) cinsinden verilmiştir.

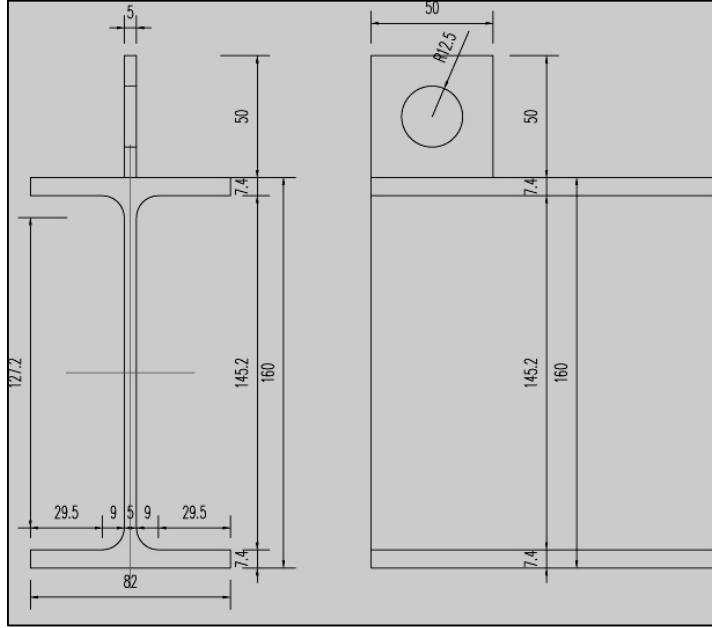


Şekil 5.1. Kesit boyutları

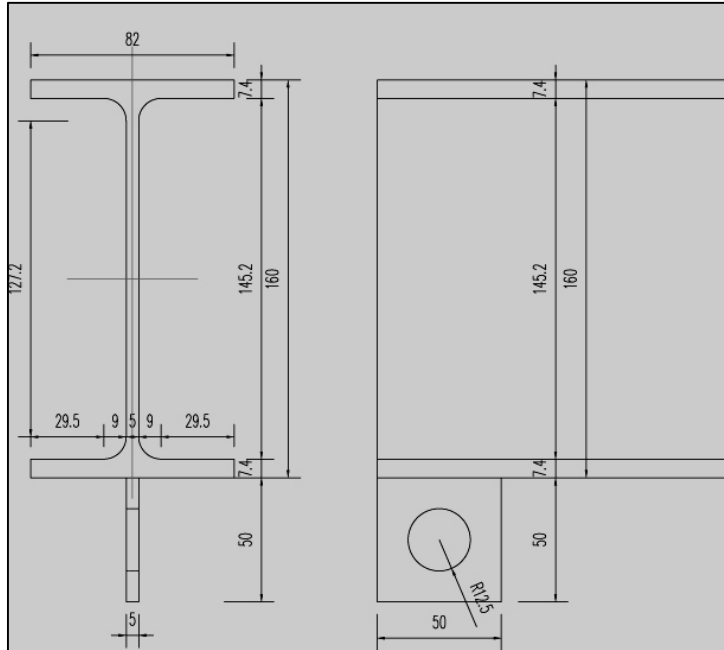
Çizelge 5.2. Kesit özellikleri

KESİT ÖZELİKLERİ		
IPE 160		
A	2010	mm ²
E	200000	N/mm ²
σ_a	310	N/mm ²
I _x	869,3x10 ⁴	mm ⁴
I _y	68,31x10 ⁴	mm ⁴
W _{xx}	108,7x10 ³	mm ³
W _{yy}	16,66x10 ³	mm ³
h	160	mm
b	82	mm
tw	5	mm
tf	7,4	mm
r	9	mm
h _i	145,2	mm

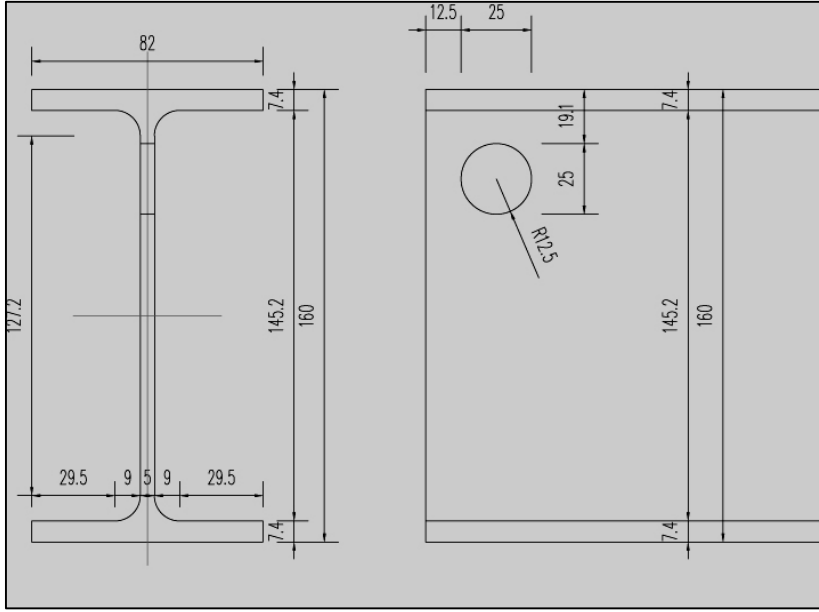
Deneysel çalışmalarda kullanılan IPE160 profiline sonradan ilave edilmiş 50x50x5mm boyutlarında parça ilave çizimleri üst başlık Şekil 5.2’de, alt başlık Şekil 5.3’de, kayma merkezi Şekil 5.4’de verilmiştir. Bu levha üzerinde yükleme aparatındaki milin rahatlıkla geçip elemanın burulmasına imkan verecek genişlikte bir delik açılmıştır.



Şekil 5.2. Üst başlık



Şekil 5.3. Alt başlık



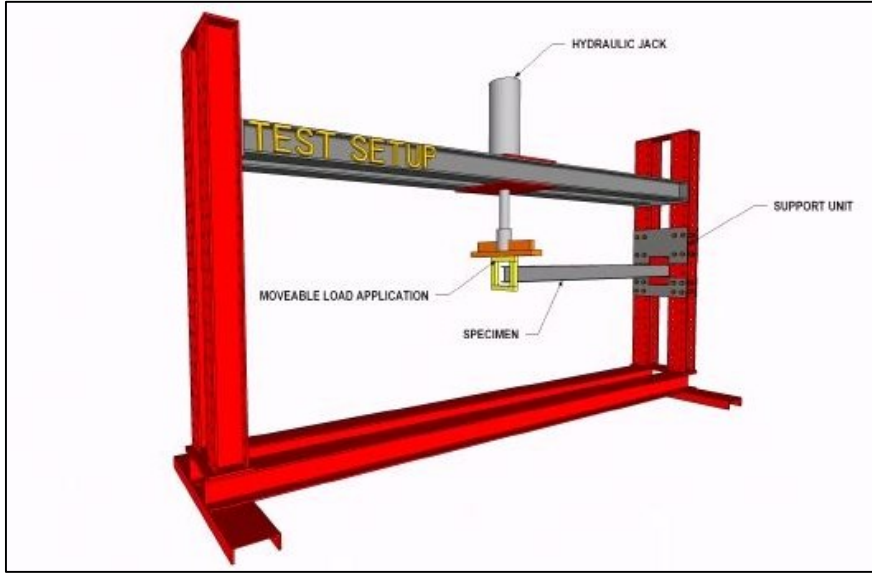
Şekil 5.4. Kayma merkezi

5.2. Deney Düzenegi ve Ölçüm Sisteminin Tanıtılması

Deneysel çalışmalar kapsamında deney sırasında kullanılan mekanik parçalar ve özelliklerine bu kısımda değinilmiştir. Sırasıyla test cihazı, load cell, LVDT (Linear Variable Differential Transformer), açı ölçer (Accelerometer/Tiltmeter), simplex firmasının ürettiği hidrolik pompa, veri toplama cihazı, elemanların mesnetlenmesi için oluşturulmuş ankastre mesnet, yükleme aparatı ve elemanların mekanik özelliklerini belirlemek için kupon test cihazı kullanılmıştır. Kullanılan aletler aşağıda sırasıyla tanıtılmıştır.

5.2.1. Test cihazı

Söz edilen test cihazı 500 kN kapasiteye sahip HEB220 çelik profillerden yapılmış bir ucu ankastre, diğer ucu serbest bir şekilde hareket edebilme yeteneğine sahip, elemanların üst, alt ve kayma merkezlerinden yükü etki ettirebileceği yükleme aparatı ve üstünde hidrolik pompa yardımıyla kuvvet uygulayan mekanizma bulunmaktadır. Test cihazında yapılan değişiklikler Şekil 5.5’de, deneyler sırasında kullanılan test cihazı Resim 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.5. Test cihazında yapılan değişiklikler



Resim 5.1. Test cihazı

5.2.2. Load Cell

Etki ettirilen yüklemenin şiddetini ölçmek için basınçta 1000 kN, çekmede 400 kN yüke kadar olan kuvvetleri güvenle veri toplama sistemine aktarabilir yetenektedir (Resim 5.2).



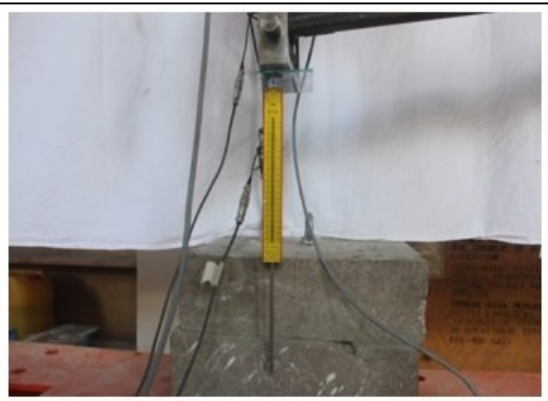
Resim 5.2. Load cell

5.2.3. LVDT (Linear Variable Differential Transformer)

Deney elemanlarının serbest ucunda yatay ve düşey deplasmanları ölçmek için TML firmasının ürettiği Resim 5.3’de görüldüğü üzere 100 mm LVDT (a) ve 200 mm LVDT (b) ile hassas okumalar veri toplama cihazına aktarılmıştır.



(a)



(b)

Resim 5.3. Yatay LVDT (a) ve Düşey LVDT (b)

5.2.4. Açı ölçer (Accelerometer/Tiltmeter)

Deney elemanlarının farklı 3 noktasından burulma açısını ölçmek için SENSEBOX7001 model açı ölçer kullanılmıştır(Resim 5.4). ± 2 g'den ± 400 g'ye kadar maksimum ivme ölçüm aralığı ve 0-4000 Hz'e kadar geniş çalışma aralığı ile tasarlanmıştır.



Resim 5.4. SENSEBOX7001 açı ölçer

5.2.5. Hidrolik pompa

Yüklemeler SIMPLEX firmasının ürettiği P300D model hidrolik pompa ile yapılmıştır. Hidrolik yağ ile çalışan bu pompa 690 bar'a kadar basınç uygulayabilmektedir (Resim 5.5).



Resim 5.5. SIMPLEX P300D hidrolik pompa

5.2.6. Veri toplama sistemi (Data Logger)

Veri aktarımı teknik destek grubunun ürettiği TESTBOX1001 model genel amaçlı yarı-statik veri toplama cihazı ile yapılmıştır(Resim 5.6). 16 bit ölçüm çözünürlüğüne sahip, düşük gürültülü yüksek ölçüm performansı için tasarlanmış ve kanal başına saniyede 8 örneğe kadar veri toplayabilen TESTBOX1001 veri toplama sisteminin temel fonksiyonu sensörlerden gelen, yavaş değişen (statik/yarı statik) sinyallerin dijital veriye çevrilerek bilgisayar ortamına aktarılmasıdır.



Resim 5.6. TESTBOX1001 veri toplama sistemi

5.2.7. Ankastre mesnet

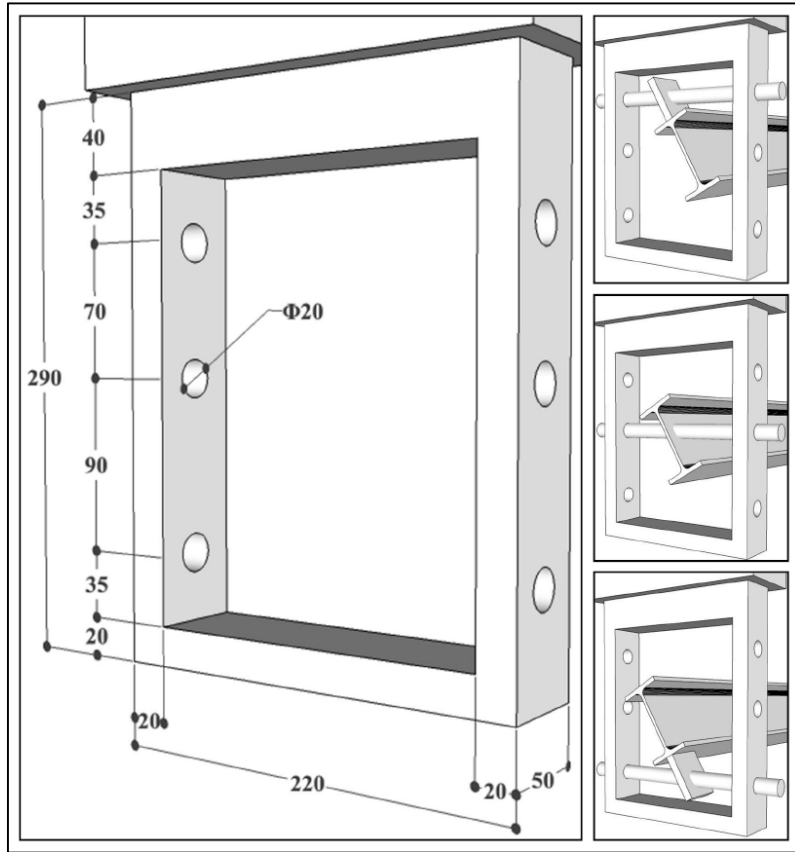
Test cihazına eklenen mesnet iki adet 250x680x10 mm boyutunda plaka, iki adet UPE270 profiline 8 adet 20 mm çapında delik açılmış ve 20 mm çapında gijonlarla sıkıştırılarak bu noktanın dönmesi ve ötelenmesi engellenmiştir(Resim 5.7).



Resim 5.7. Ankastre mesnet

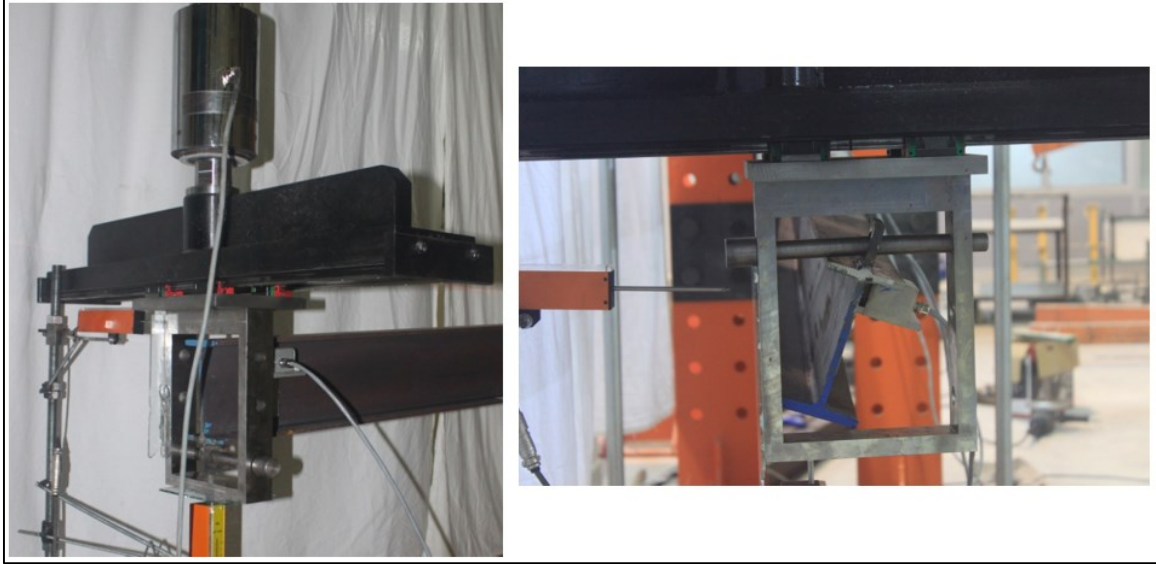
5.2.8. Yükleme aparatı

Çelik konsol kiriş deney elemanlarının serbest ucuna uygulanan kesme kuvveti etkisi ile kirişte meydana gelecek yanal burulmalı burkulma göçme mekanizması esnasında konsol ucuna kesme kuvvetinin kiriş üzerinde istenilen noktaya uygulanabilmesi için yatayda ve düşeyde hareket edebilen ve kirişte burulma meydana gelirken de yüklemeye devam edilebilmesine olanak sağlayan özel bir yükleme aparatı tasarlanmıştır. Bu sayede kirişte konsol ucunda meydana gelen yatay ve düşey deplasman ile burulmadan dolayı oluşan dönme deformasyonları meydana gelirken kirişe istenilen noktadan yükleme uygulanmaya devam edilmiştir. Yükleme aparatına üç farklı noktadan 6 adet 20 mm çapında delikler açılmış, bu delikler üst başlık, alt başlık ve kayma merkezlerinden uygulanan yükte deney elemanının aparatın içinde serbestçe dönebilmesi ve burulabilmesine imkan verecek şekilde tasarlanmıştır. Şekil 5.6’da aparatın ölçüleri mm olarak verilmiştir.



Şekil 5.6. Yükleme aparatı

Şekil 5.6’da verilen yükleme aparatı ile elemanlara kaynatılan 50x50x5 mm boyutundaki levhaların içinden yükleme aparatındaki milin rahatlıkla geçip elemanın burulmasına imkan verecek genişlikte bir delik açılmıştır(Resim 5.8).



Resim 5.8. Kararlı ve burulmuş haller

5.2.9. Kupon testi cihazı

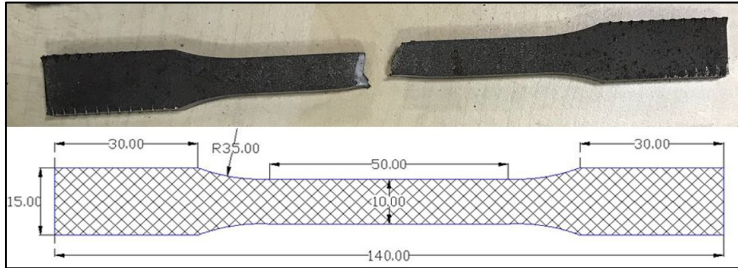
Deneysel çalışmalarda kullanılan IPE160 çelik profilinin mekanik özelliklerini tayin etmek amacıyla malzemelerden kesilip alınan 5 adet numune üzerinde deney yapılmıştır. Bu numuneler YÜKSEL KAYA MAKİNA firmasının üretmiş olduğu kupon test cihazında test edilmiştir(Resim 5.7).



Resim 5.9. Kupon test cihazı

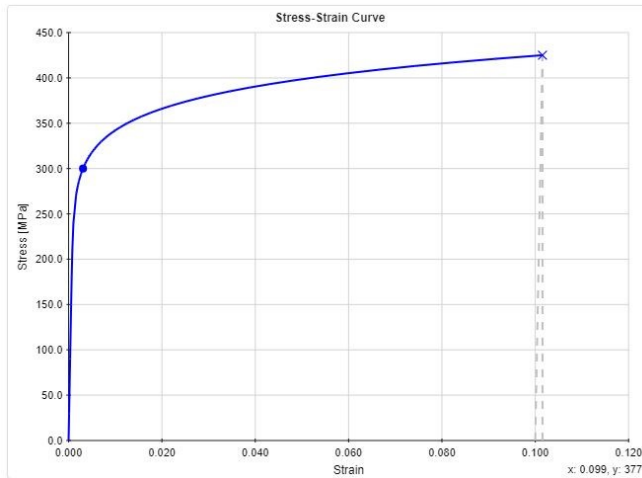
5.3. Deney Elemanlarının Mekanik Özellikleri

Deney elemanlarından plazma kesim yöntemiyle kesilip alınan 5 adet kupon numuneleri çekme deneyine tabi tutulmuştur. Numunelerin mekanik özellikleri TS EN ISO6892-1 koduna göre belirlenmiştir. Bilgisayar kontrollü, yükleme hızı kontrol edilebilen bir eksenel çekme test düzeneği ile profiller çekme testine tabi tutulmuş olup deney sonucunda elemanlara ait gerilme - birim şekil değiştirme grafikleri elde edilmiştir. Şekil 5.7’de kupon numunesi boyutlarıyla birlikte verilmiştir. Şekildeki ölçüler milimetre(mm) cinsindendir.



Şekil 5.7. Kupon numunesi

Elemanların mekanik özelliklerini belirlemek için teste tabi tutulan elemanların gerilme – birim şekil değiştirme grafiklerinden örnek olarak bir tanesi Şekil 5.8’de gösterilmektedir. Grafik üzerinde gösterilen Stress, gerilme, Strain, şekil değiştirme değerlerini vermektedir.



Şekil 5.8. Kupon numunesine ait gerilme – birim şekil değiştirme grafiği

Çekme deneyine tabi tutulan deney numunelerinin mekanik malzeme özelliklerinin ortalama değerleri Çizelge 5.3’de verilmiştir.

Çizelge 5.3. IPE160 profil malzeme modeli özellikleri

Açıklama	Değer
(σ_y) - Akma Gerilmesi (MPa)	310
Akma Birim Deformasyonu (mm/mm)	0,003091
(σ_u) - Kopma Gerilmesi (MPa)	430
Kopma Birim Deformasyonu (mm/mm)	0,1015
(E) - Elastisite Modülü (GPa)	152

Çizelge 5.3’de verilen σ_y , malzemenin akma gerilmesini, σ_u , kopma gerilmesini, E ise elastisite modülünü göstermektedir.

6. DENEYLER

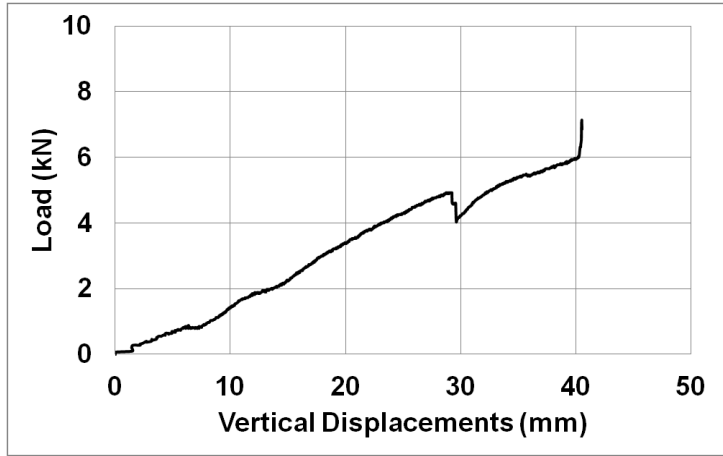
Bu bölümde tez kapsamında yapılan deneylerin fotoğrafları, deneyler ile ilgili sonuçlar ve bilgiler verilecektir. Deneyisel çalışmalar kapsamında IPE160 kesitli çelik profilden 2750 mm, 2500 mm ve 2250 mm uzunluğunda 3 farklı boyda numune hazırlanmış olup, farklı boydaki her numune için serbest uç noktasından üst başlık, alt başlık ve kayma merkezi olmak üzere 3 farklı yükleme konumundan yükleme yapılmış olup toplamda 9 numune üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Yapılan bu deneylere ait veriler aşağı kısımda başlıklar halinde sunulmuştur. Her numuneye ait deney fotoğrafları, düşey - yatay deplasmanlar ve üç farklı noktaya ait burulma açıları verilmiştir.

6.1. IPE 160 Üst Başlık L=2750 mm

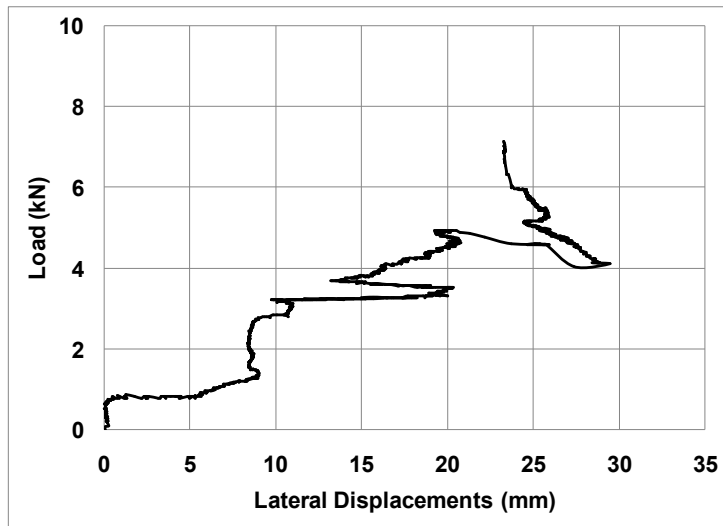
IPE160 kesitli çelik profilden 2750 mm boyundaki ilk deney elemanına ait deney fotoğrafı Resim 6.1'de verilmiştir. Şekil 6.1'de 1 numaralı numune için yük-düşey deplasman grafiğini, Şekil 6.2'de 1 numaralı numune için yük - yatay deplasman grafiğini, Şekil 6.3'de 1 numaralı numune için yük - burulma açısı grafiklerini ifade etmektedir.



Resim 6.1. 1 numaralı numune üst başlık L=2750 mm

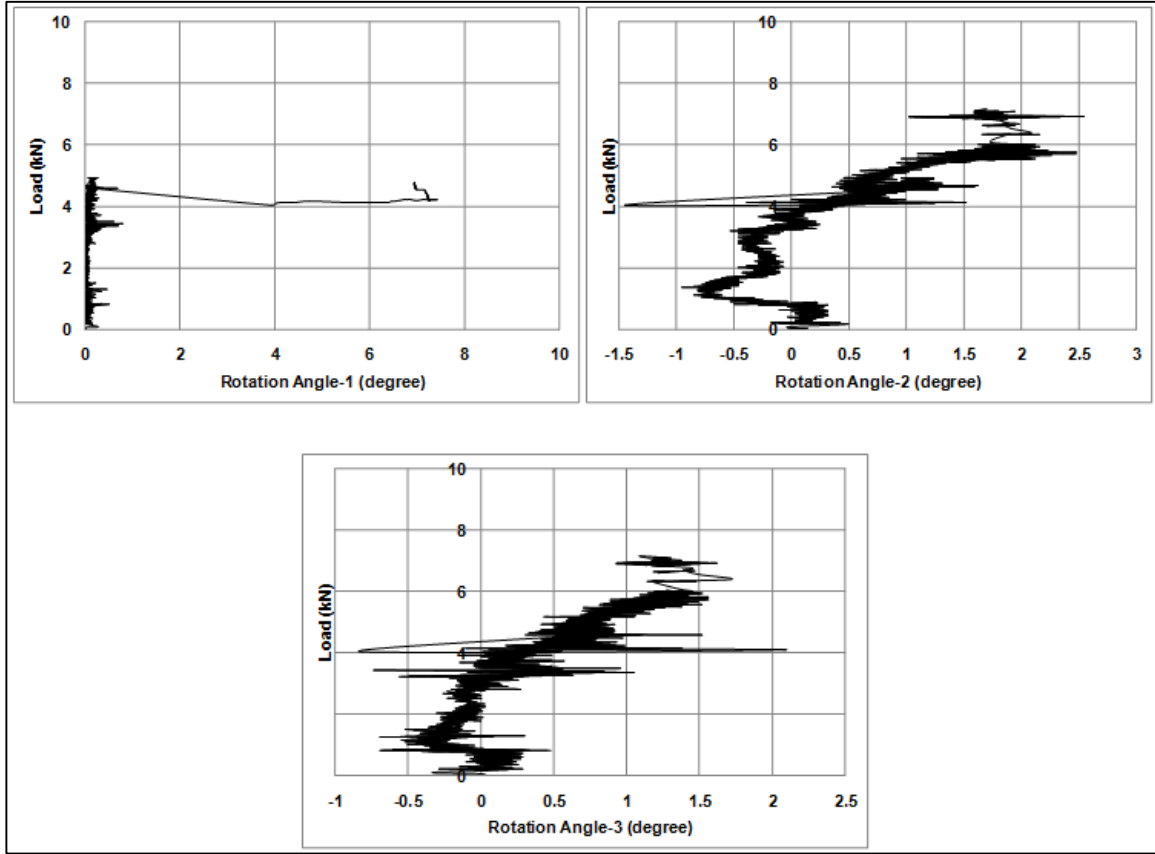


Şekil 6.1. 1 numaralı numune için yük - düşey deplasman grafiği



Şekil 6.2. 1 numaralı numune için yük - yatay deplasman grafiği

Şekil 6.1 ve Şekil 6.2’de yatay eksen serbest uçtaki çökmeyi, düşey eksen ise serbest uçtaki yükü göstermektedir.

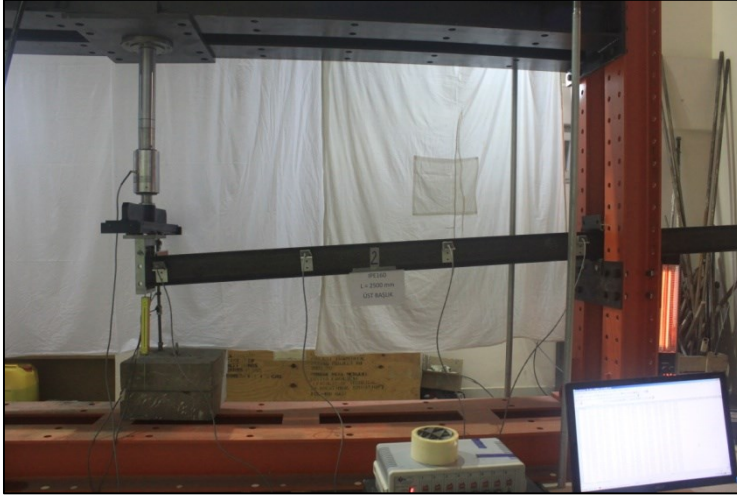


Şekil 6.3. 1 numaralı numune için yük – burulma açısı grafiği

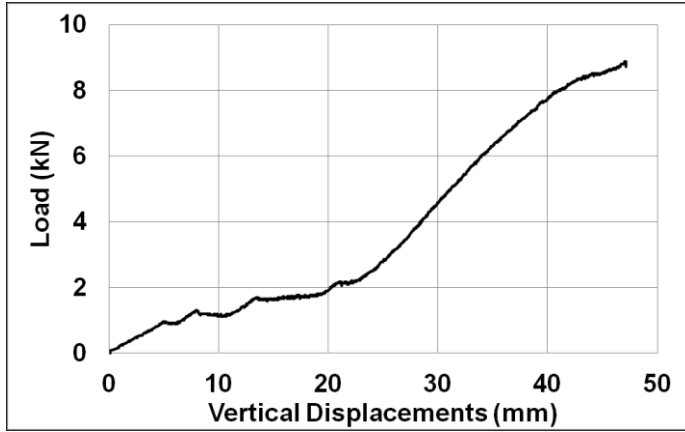
Şekil 6.3’de yatay eksen serbest uçtaki burulma açısını, düşey eksen ise serbest uçtaki yükü göstermektedir. Grafiklerde burulma açısının işaretinin negatif değerlere geçtiği görülmektedir. Açıölçer deney elemanının serbest ucundan bakıldığında saat yönünü pozitif, saat yönünün tersini negatif ölçecek şekilde bağlanmıştır.

6.2. IPE 160 Üst Başlık L=2500 mm

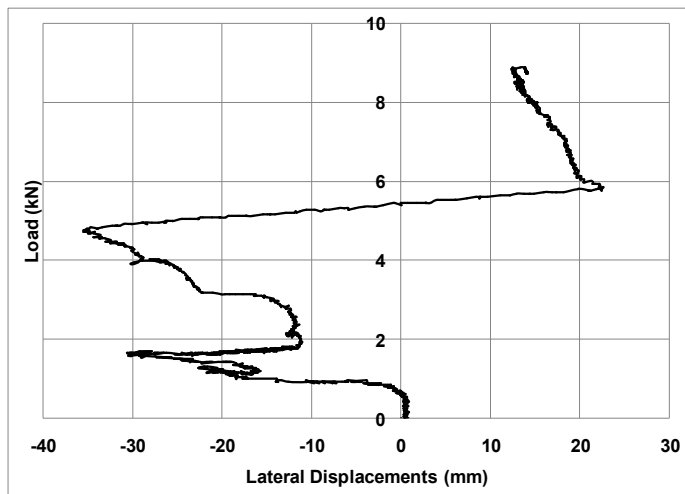
IPE160 kesitli çelik profilden 2500 mm boyundaki ikinci deney elemanına ait deney fotoğrafı Resim 6.2’de verilmiştir. Şekil 6.4’de 2 numaralı numune için yük-düşey deplasman grafiğini, Şekil 6.5’de 2 numaralı numune için yük - yatay deplasman grafiğini, Şekil 6.6’da 2 numaralı numune için yük - burulma açısı grafiklerini ifade etmektedir.



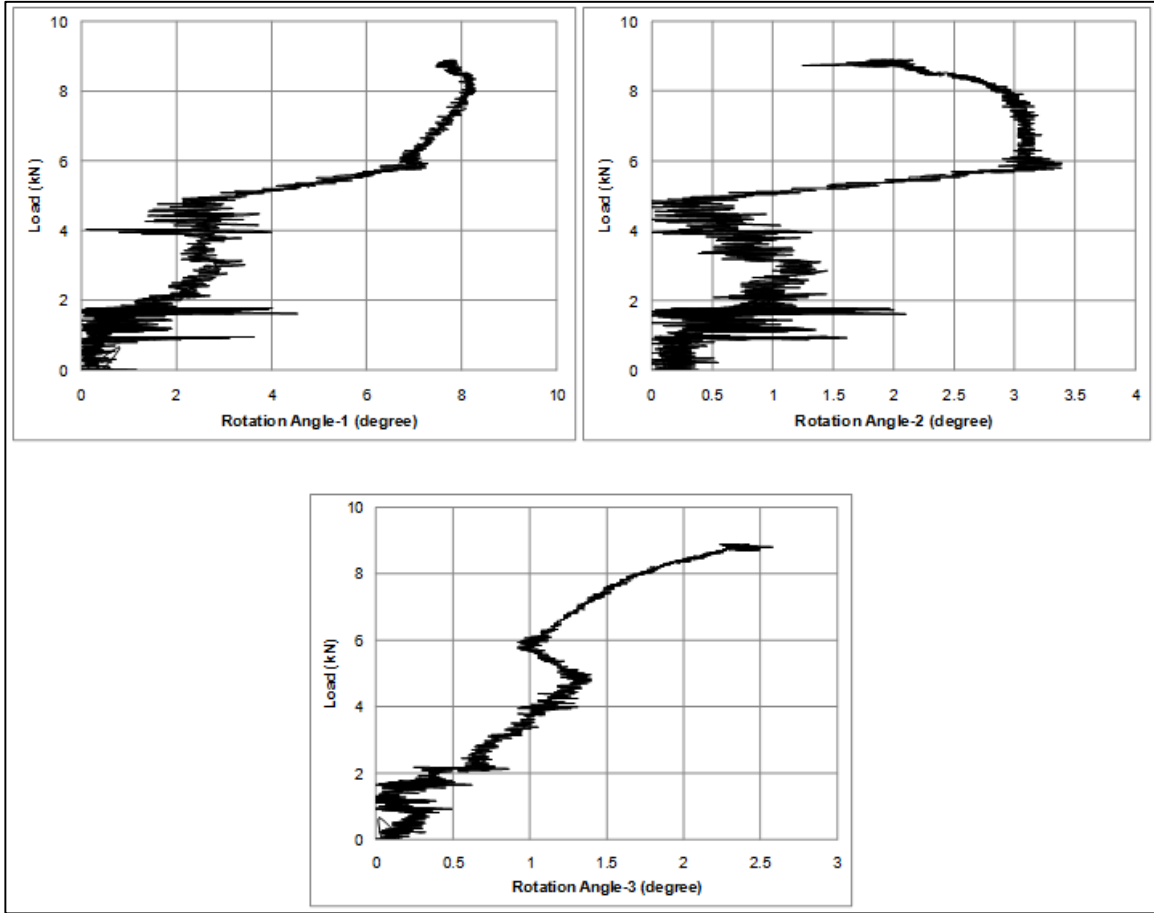
Resim 6.2. 2 numaralı numune üst başlık L=2500 mm



Şekil 6.4. 2 numaralı numune için yük - düşey deplasman grafiği



Şekil 6.5. 2 numaralı numune için yük - yatay deplasman grafiği



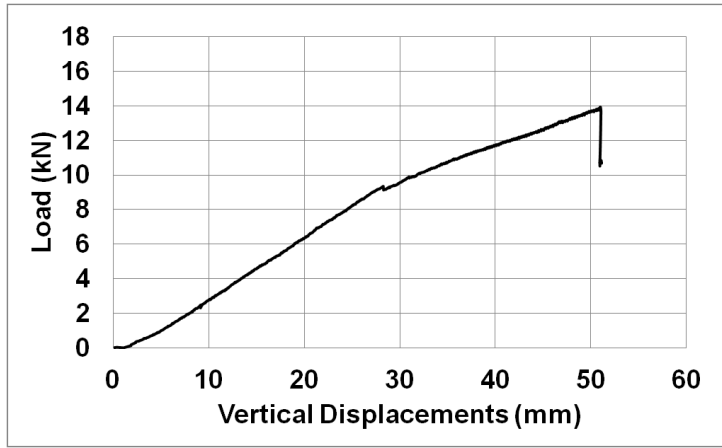
Şekil 6.6. 2 numaralı numune için yük – burulma açısı grafiği

6.3. IPE 160 Üst Başlık L=2250 mm

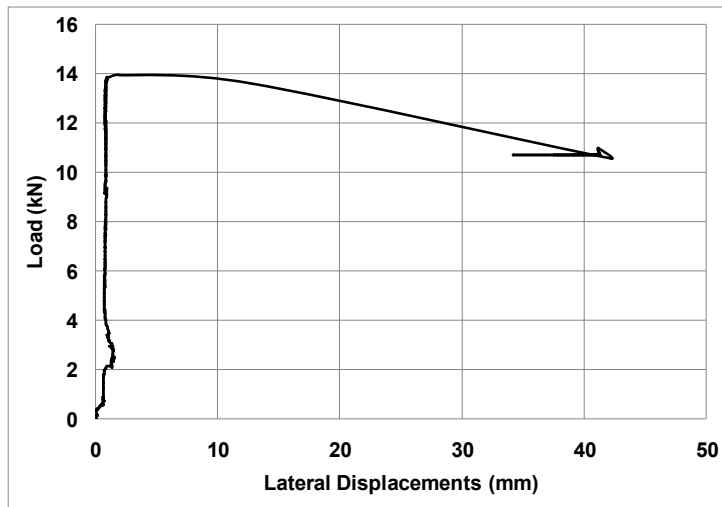
IPE160 kesitli çelik profilden 2250 mm boyundaki üçüncü deney elemanına ait deney fotoğrafı Resim 6.3’de verilmiştir. Şekil 6.7’de 3 numaralı numune için yük-düşey deplasman grafiğini, Şekil 6.8’de 3 numaralı numune için yük - yatay deplasman grafiğini, Şekil 6.9’da 3 numaralı numune için yük - burulma açısı grafiklerini ifade etmektedir.



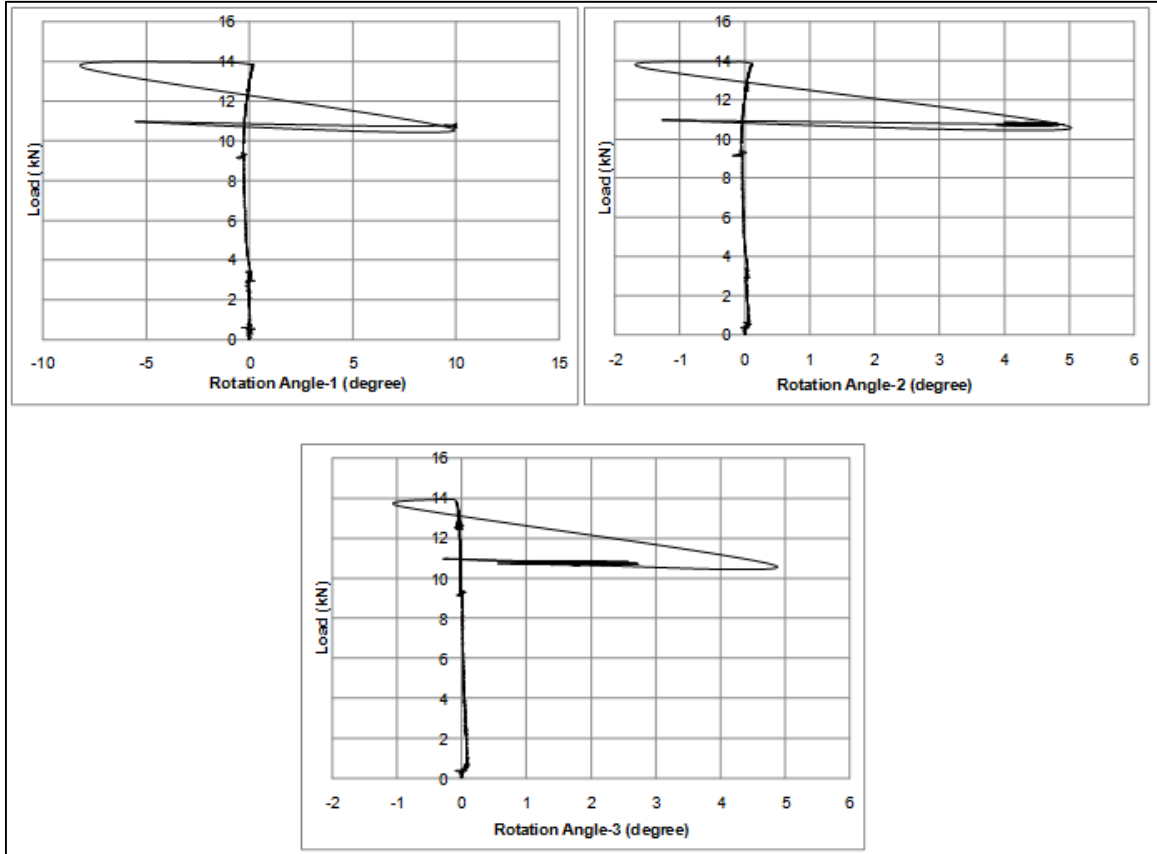
Resim 6.3. 3 numaralı numune üst başlık $L=2250$ mm



Şekil 6.7. 3 numaralı numune için yük - düşey deplasman grafiği



Şekil 6.8. 3 numaralı numune için yük - yatay deplasman grafiği



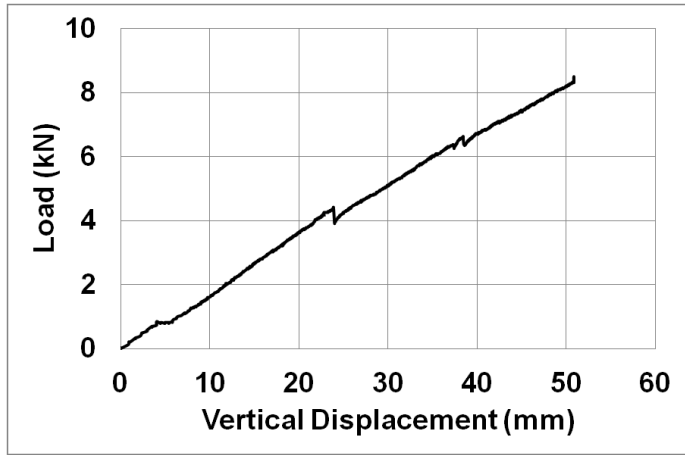
Şekil 6.9. 3 numaralı numune için yük – burulma açısı grafiği

6.4. IPE 160 Alt Başlık L=2750 mm

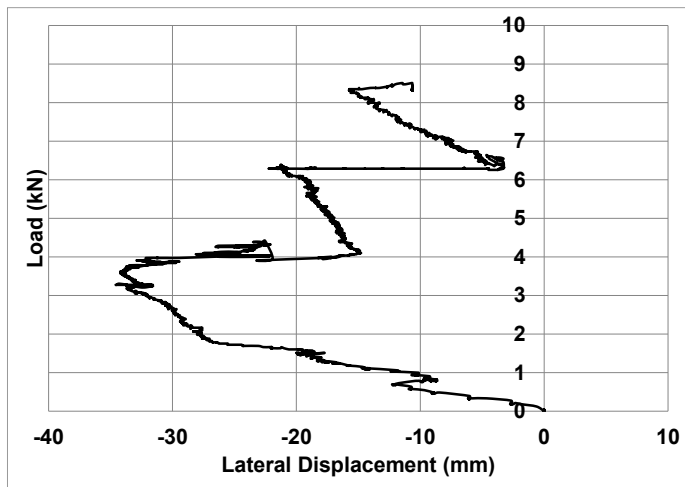
IPE160 kesitli çelik profilden 2750 mm boyundaki dördüncü deney elemanına ait deney fotoğrafı Resim 6.4’de verilmiştir. Şekil 6.10’de 4 numaralı numune için yük-düşey deplasman grafiğini, Şekil 6.11’de 4 numaralı numune için yük - yatay deplasman grafiğini, Şekil 6.12’de 4 numaralı numune için yük - burulma açısı grafiklerini ifade etmektedir.



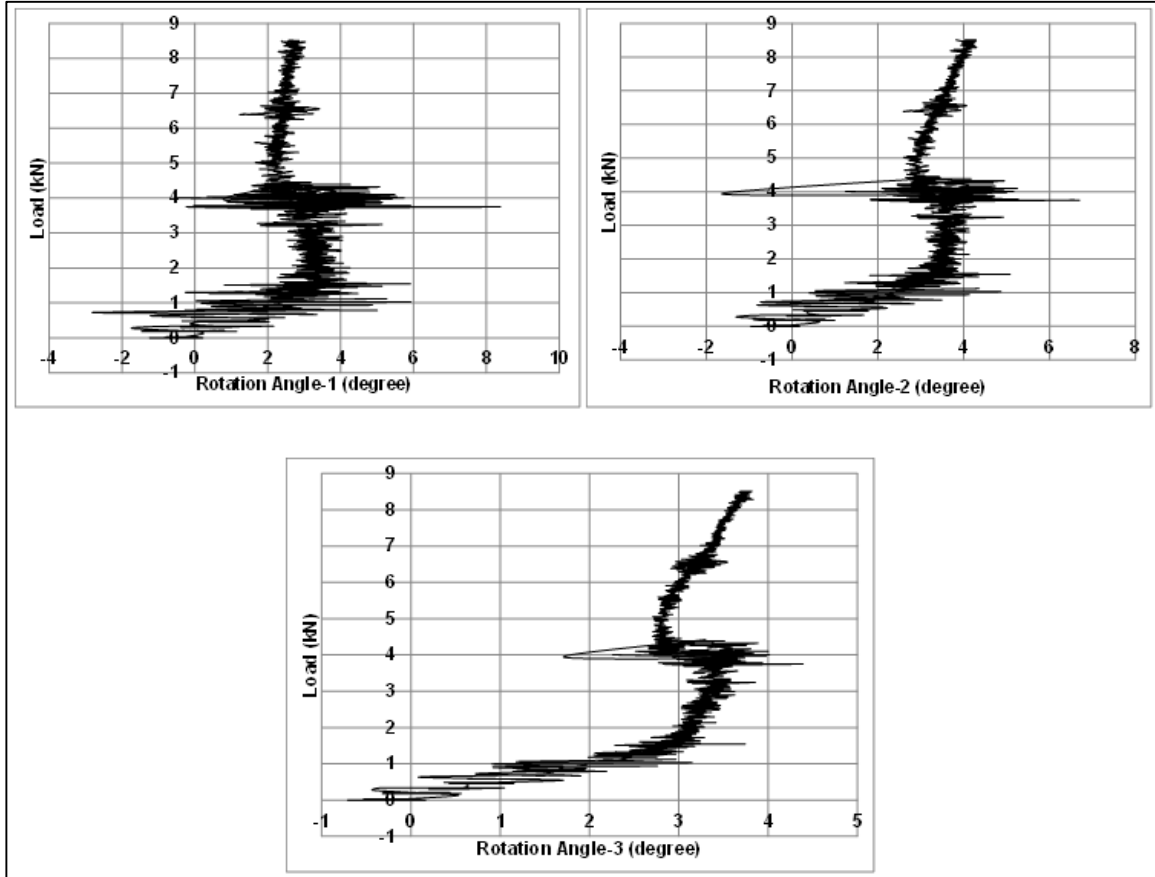
Resim 6.4. 4 numaralı numune alt başlık $L=2750$ mm



Şekil 6.10. 4 numaralı numune için yük - düşey deplasman grafiği



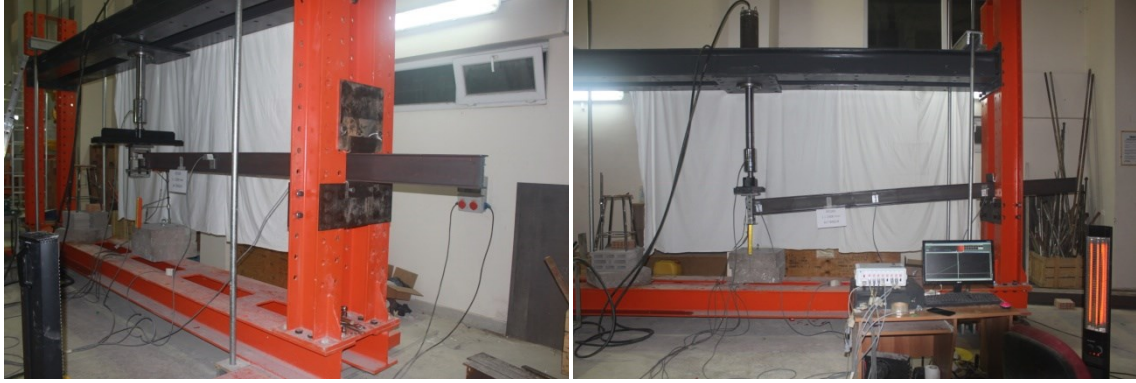
Şekil 6.11. 4 numaralı numune için yük - yatay deplasman grafiği



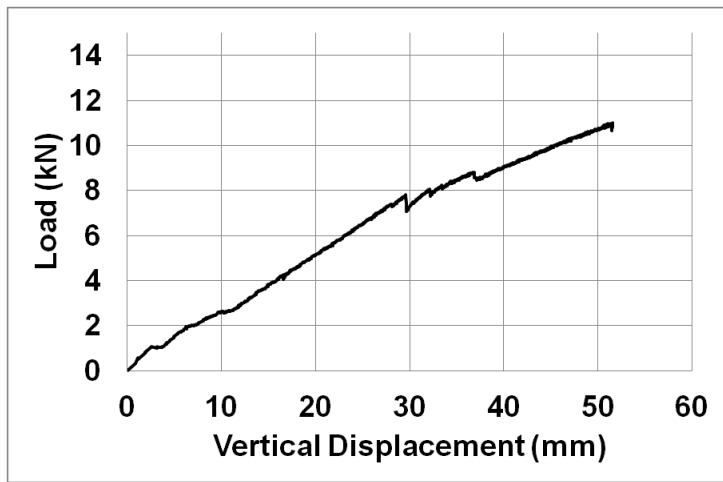
Şekil 6.12. 4 numaralı numune için yük – burulma açısı grafiği

6.5. IPE 160 Alt Başlık L=2500 mm

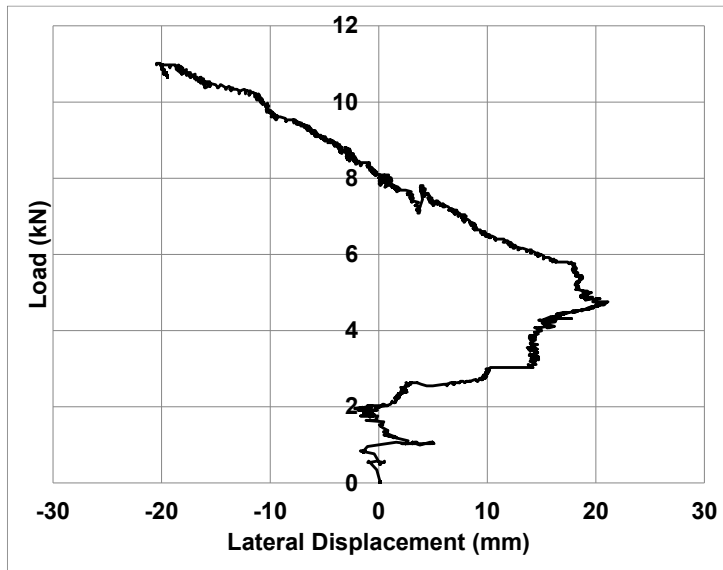
IPE160 kesitli çelik profilden 2500 mm boyundaki beşinci deney elemanına ait deney fotoğrafı Resim 6.5’de verilmiştir. Şekil 6.13’de 5 numaralı numune için yük-düşey deplasman grafiğini, Şekil 6.14’de 5 numaralı numune için yük - yatay deplasman grafiğini, Şekil 6.15’de 5 numaralı numune için yük - burulma açısı grafiklerini ifade etmektedir.



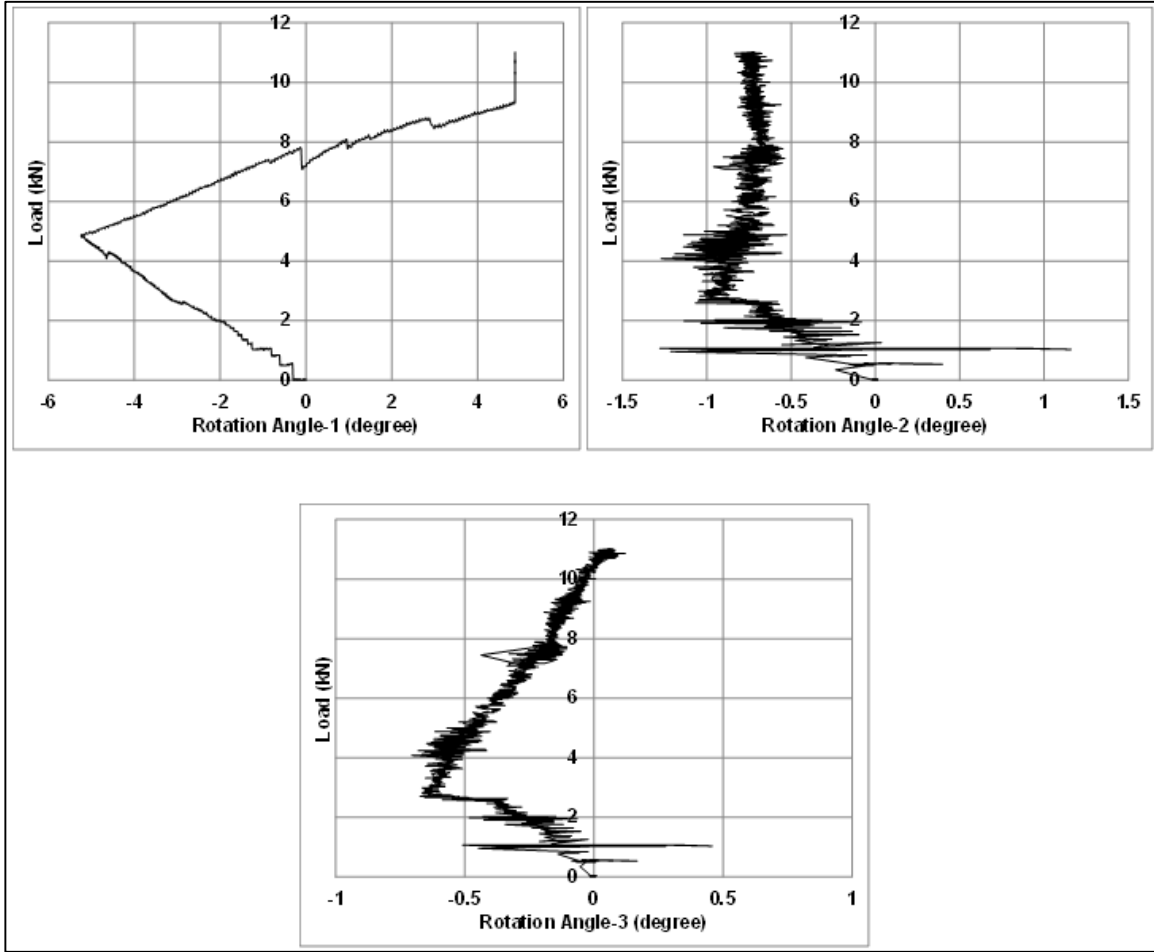
Resim 6.5. 5 numaralı numune alt başlık $L=2500$ mm



Şekil 6.13. 5 numaralı numune için yük - düşey deplasman grafiği



Şekil 6.14. 5 numaralı numune için yük - yatay deplasman grafiği



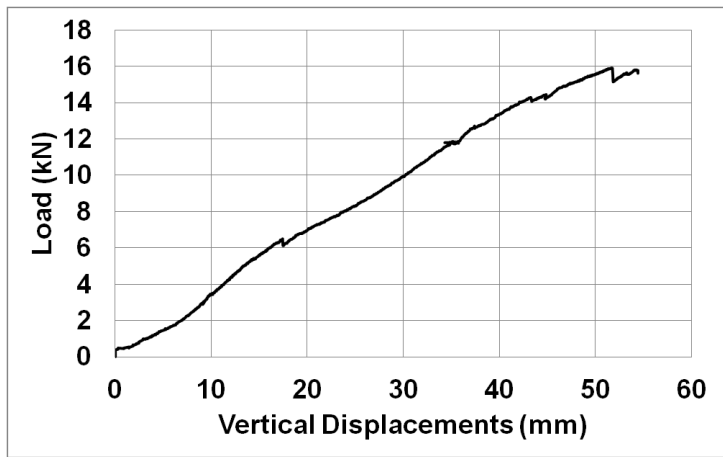
Şekil 6.15. 5 numaralı numune için yük – burulma açısı grafiği

6.6. IPE 160 Alt Başlık L=2250 mm

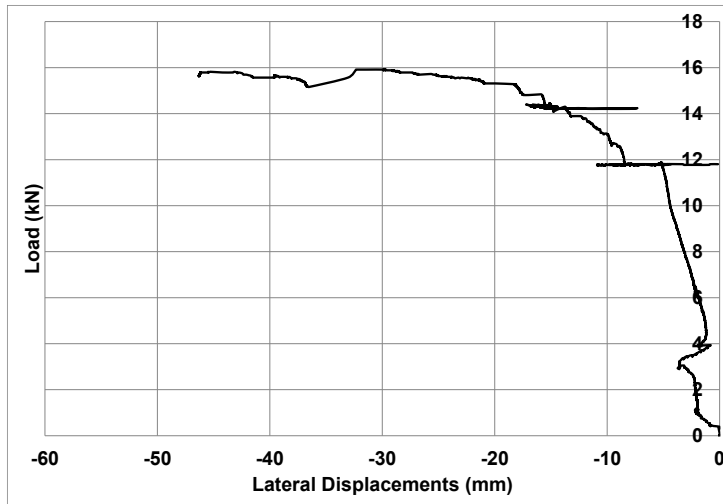
IPE160 kesitli çelik profilden 2250 mm boyundaki altıncı deney elemanına ait deney fotoğrafı Resim 6.6'de verilmiştir. Şekil 6.16'de 6 numaralı numune için yük-düşey deplasman grafiğini, Şekil 6.17'de 6 numaralı numune için yük - yatay deplasman grafiğini, Şekil 6.18'de 6 numaralı numune için yük - burulma açısı grafiklerini ifade etmektedir.



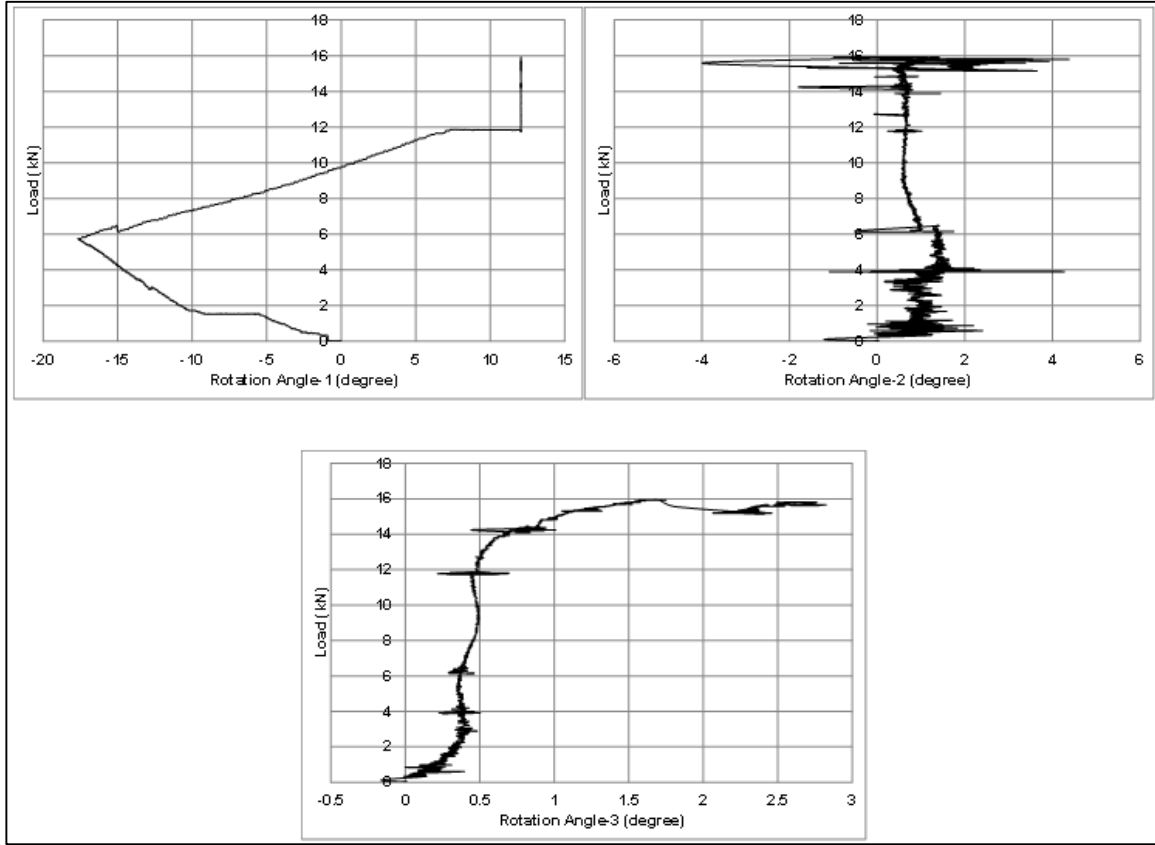
Resim 6.6. 6 numaralı numune alt başlık $L=2250$ mm



Şekil 6.16. 6 numaralı numune için yük - düşey deplasman grafiği



Şekil 6.17. 6 numaralı numune için yük - yatay deplasman grafiği



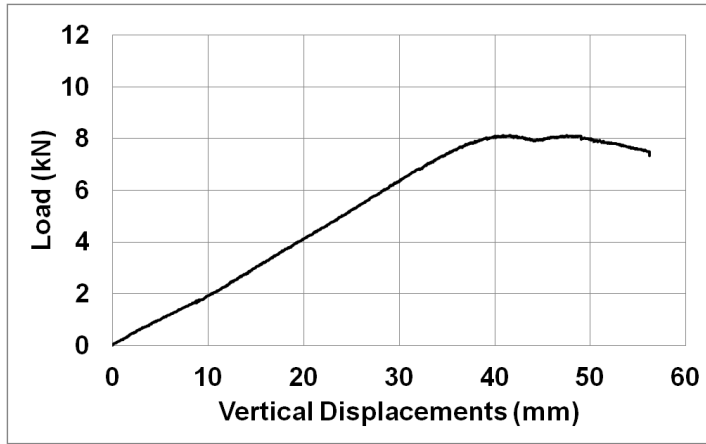
Şekil 6.18. 6 numaralı numune için yük – burulma açısı grafiği

6.7. IPE 160 Kayma Merkezi L=2750 mm

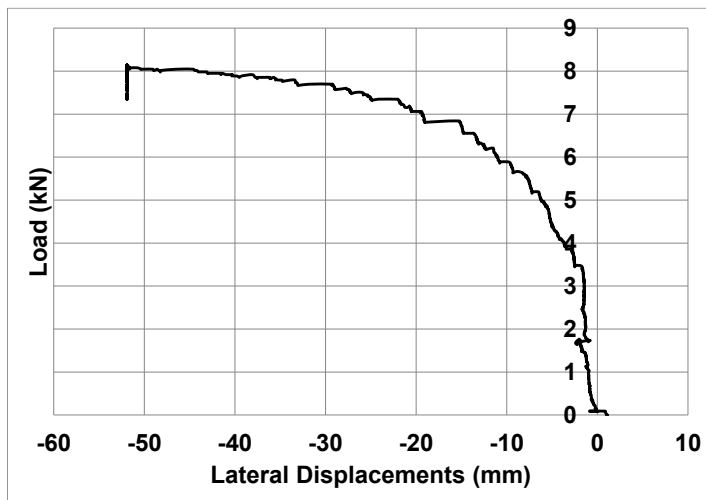
IPE160 kesitli çelik profilden 2750 mm boyundaki yedinci deney elemanına ait deney fotoğrafı Resim 6.7’de verilmiştir. Şekil 6.19’de 7 numaralı numune için yük-düşey deplasman grafiğini, Şekil 6.20’de 7 numaralı numune için yük - yatay deplasman grafiğini, Şekil 6.21’de 7 numaralı numune için yük - burulma açısı grafiklerini ifade etmektedir.



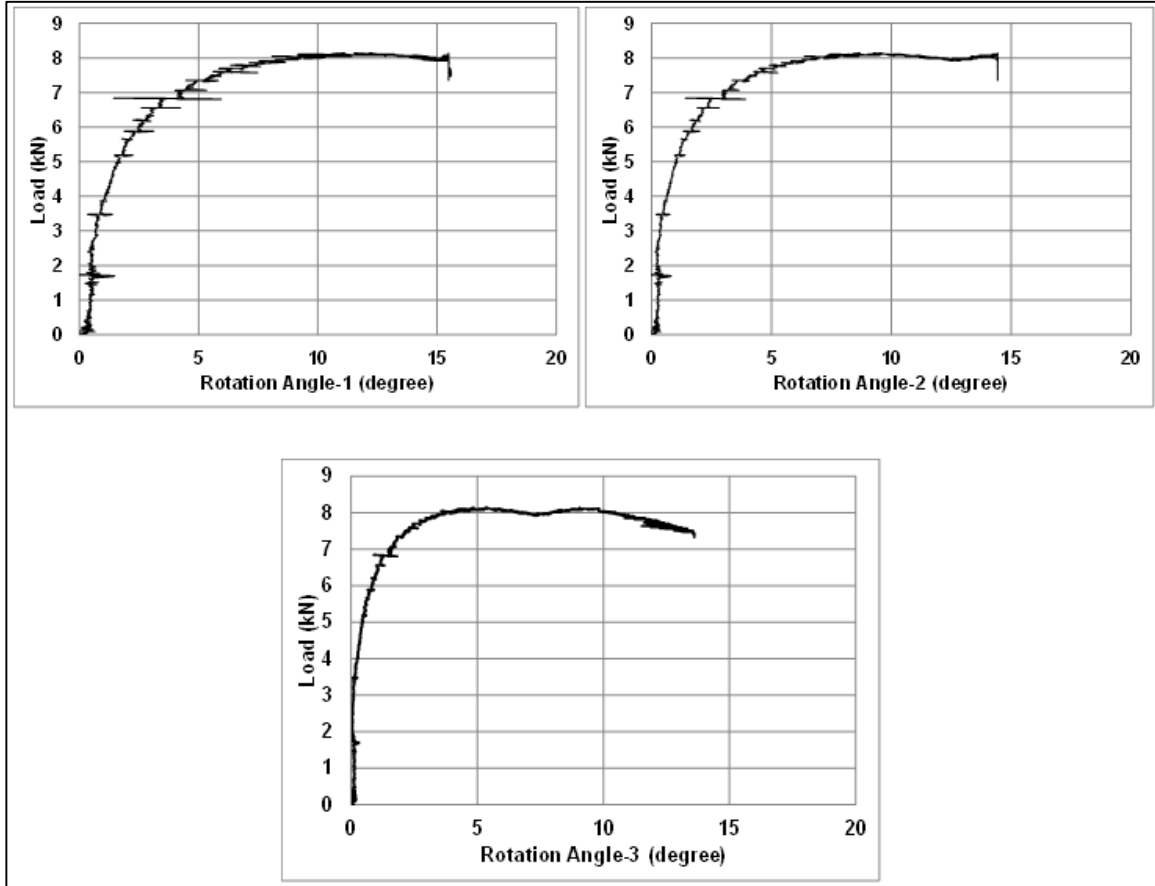
Resim 6.7. 7 numaralı numune kayma merkezi $L=2750$ mm



Şekil 6.19. 7 numaralı numune için yük - düşey deplasman grafiği



Şekil 6.20. 7 numaralı numune için yük - yatay deplasman grafiği



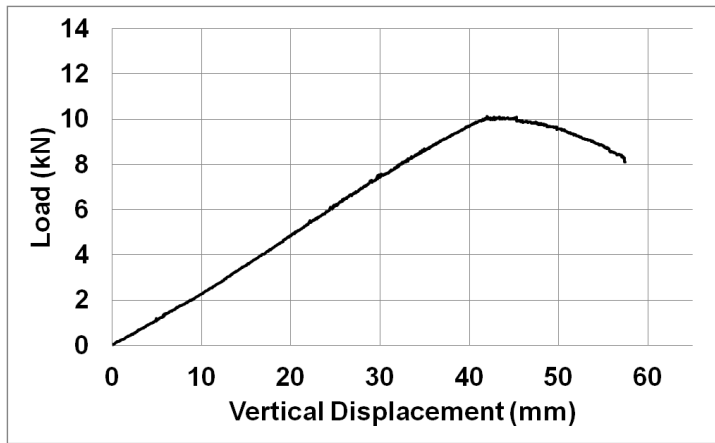
Şekil 6.21. 7 numaralı numune için yük – burulma açısı grafiği

6.8. IPE 160 Kayma Merkezi L=2500 mm

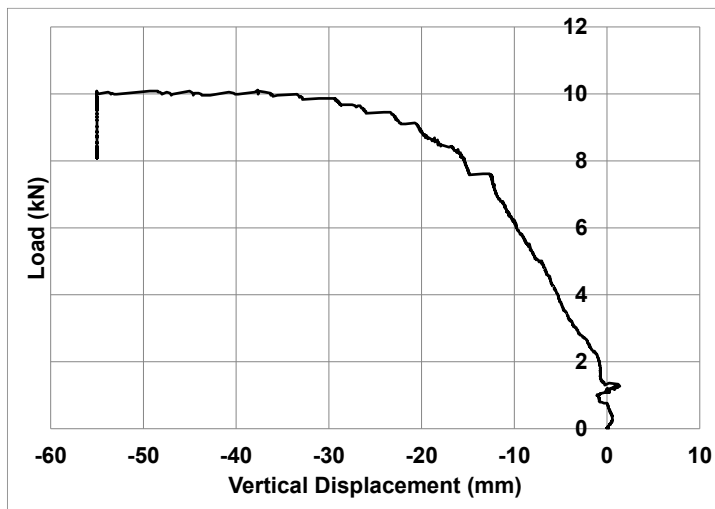
IPE160 kesitli çelik profilden 2500 mm boyundaki sekizinci deney elemanına ait deney fotoğrafı Resim 6.8’de verilmiştir. Şekil 6.22’de 8 numaralı numune için yük-düşey deplasman grafiğini, Şekil 6.23’de 8 numaralı numune için yük - yatay deplasman grafiğini, Şekil 6.24’de 8 numaralı numune için yük - burulma açısı grafiklerini ifade etmektedir.



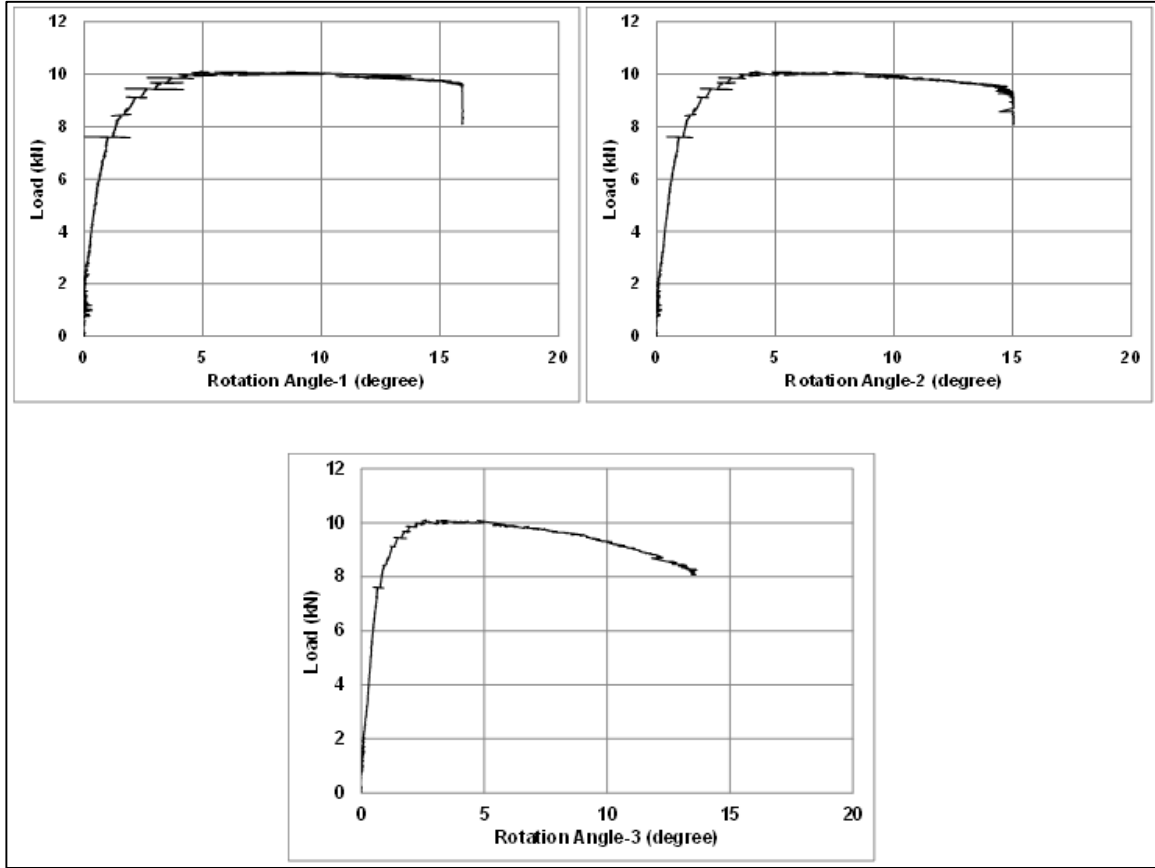
Resim 6.8. 8 numaralı numune kayma merkezi $L=2500$ mm



Şekil 6.22. 8 numaralı numune için yük - düşey deplasman grafiği



Şekil 6.23. 8 numaralı numune için yük - yatay deplasman grafiği



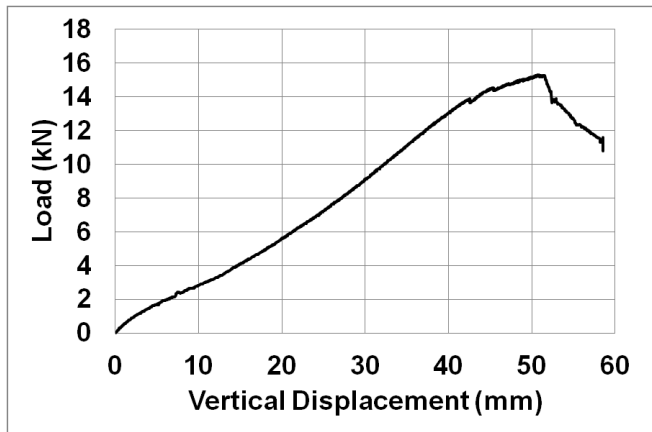
Şekil 6.24. 8 numaralı numune için yük – burulma açısı grafiği

6.9. IPE 160 Kayma Merkezi L=2250 mm

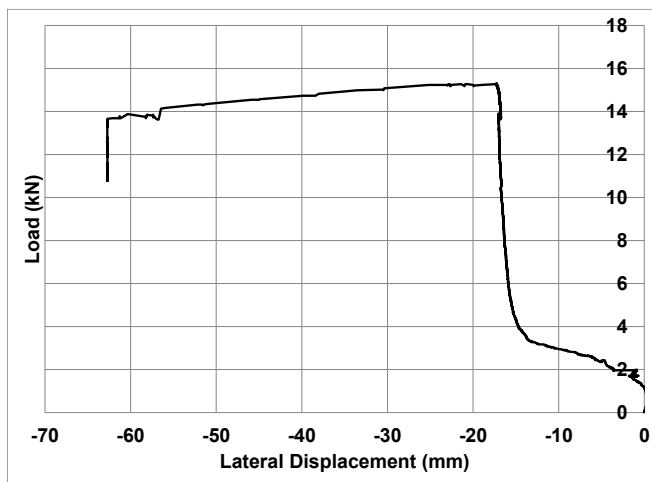
IPE160 kesitli çelik profilden 2250 mm boyundaki dokuzuncu deney elemanına ait deney fotoğrafı Resim 6.9’de verilmiştir. Şekil 6.25’de 9 numaralı numune için yük-düşey deplasman grafiğini, Şekil 6.26’de 9 numaralı numune için yük - yatay deplasman grafiğini, Şekil 6.27’de 9 numaralı numune için yük - burulma açısı grafiklerini ifade etmektedir.



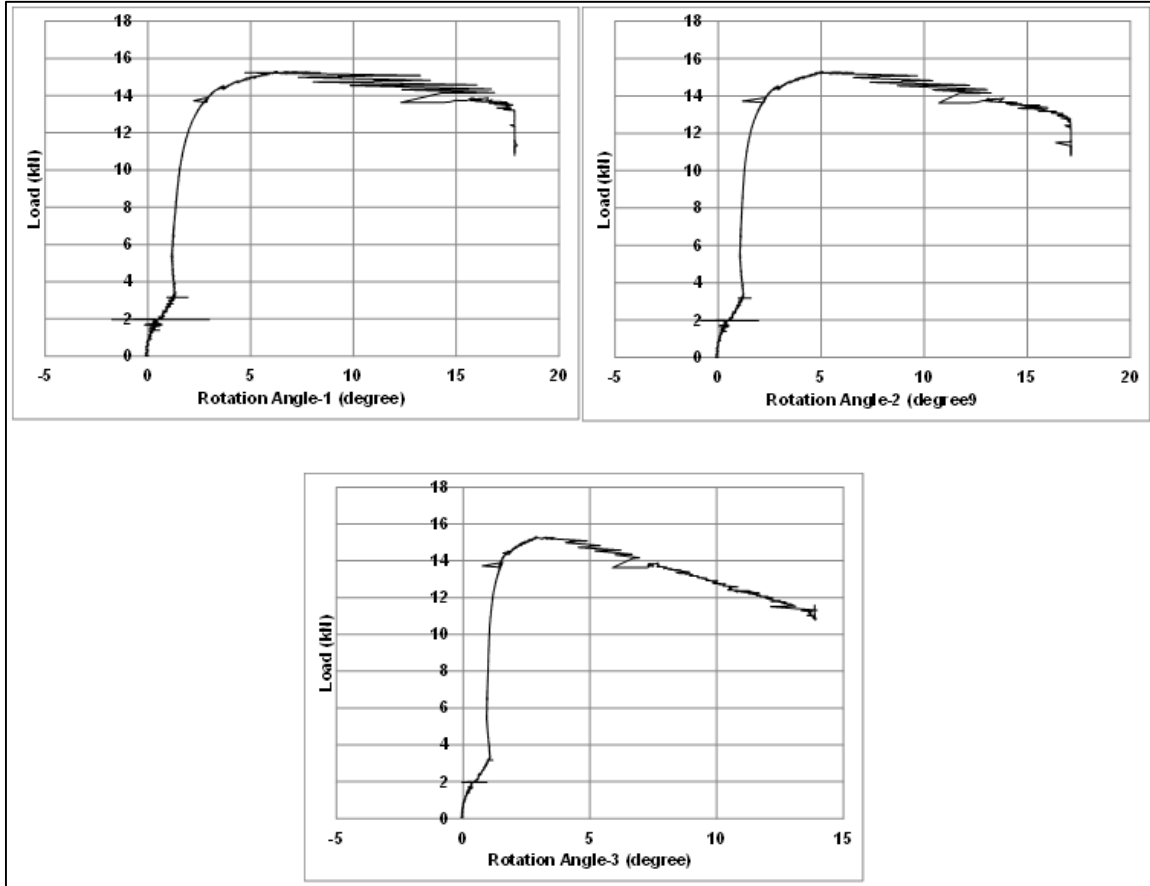
Resim 6.9. 9 numaralı numune kayma merkezi $L=2250$ mm



Şekil 6.25. 9 numaralı numune için yük - düşey deplasman grafiği



Şekil 6.26. 9 numaralı numune için yük - yatay deplasman grafiği



Şekil 6.27. 9 numaralı numune için yük – burulma açısı grafiği

7. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde yapılan testlerin sonucunda elde edilen veriler neticesinde sonuç çıkartılacak ve deneylerin değerlendirilmesi yapılacaktır. Deneysel çalışma kapsamında değişkenler olarak, IPE160 çelik konsol kirişlere uygulanan kesme kuvvetinin profil kesiti üzerindeki lokasyonu ve konsol kiriş boyu seçilmiştir. Üç farklı yükleme uygulama noktası ve 3 farklı konsol kiriş açıklığı olmak üzere toplamda dokuz çelik kiriş deney elemanı test edilmiştir. Testlere IPE160 çelik konsol kiriş deney elemanlarında yatay burulmalı burkulma göçme mekanizması oluşup, kirişler göçene ve stabilitelelerini kaybedene kadar devam edilmiştir.

Deneyler sonucunda konsol kirişlere uygulanan kesme kuvveti-konsol uç düşey deplasmanı, kesme kuvveti-konsol uç yatay deplasmanı ve kesme kuvveti-konsol ucu dönme açısı grafikleri elde edilmiş olup, 6. bölümde deney aşamaları kısmında verilmiştir. Ayrıca çelik konsol kiriş deney elemanları üzerinden uç noktaya ek olarak 2 farklı noktadan daha burulma açısı ölçümü alınmıştır. Testler sonucunda elde edilen sonuçlar Çizelge 7.1. ve Çizelge 7.2’de sunulmuştur. Çizelge 7.1’de testlerden elde edilen deney elemanlarının maksimum taşıma gücü, maksimum düşey ve yatay deplasman değerleri, maksimum konsol ucu burulma açısı değerleri, maksimum yük düzeyindeki rijitlik ve enerji tüketim kapasiteleri verilmiştir.

Çizelge 7.1. Deney sonuçları

Eleman No	Kesit	Uzunluk (mm)	Yük Konumu	Maksimum Taşıma Gücü (kN)	Maksimum Deplasman (mm)		Maksimum Konsol Ucu Burulma Açısı (derece)	Maksimum Yükte Rijitlik (kN/mm)	Enerji Tüketim Kapasitesi (kN-mm)
					Düşey	Yatay			
1	IPE160	2750	Üst Başlık	7,15	40,53	29,45	7,423	0,176	129,95
2	IPE160	2500	Üst Başlık	8,89	47,16	35,49	8,294	0,189	183,18
3	IPE160	2250	Üst Başlık	13,94	51,11	42,19	10,069	0,273	372,44
4	IPE160	2750	Alt Başlık	8,51	50,87	34,59	8,365	0,167	220,95
5	IPE160	2500	Alt Başlık	11,02	51,51	41,59	10,115	0,214	327,74
6	IPE160	2250	Alt Başlık	15,92	54,42	46,31	12,064	0,293	459,88
7	IPE160	2750	Kayma Mrkz	8,14	56,21	51,92	15,605	0,077	279,09
8	IPE160	2500	Kayma Mrkz	10,12	57,40	55,06	15,999	0,084	354,46
9	IPE160	2250	Kayma Mrkz	15,30	58,54	62,74	17,980	0,091	506,45

Çizelge 7.2’de ise kiriş boyunca ölçüm alınan 3 noktadaki maksimum burulma açılarının değerleri sunulmuştur.

Çizelge 7.2. Kiriş boyunca maksimum burulma açıları değişimi

Eleman No	Kesit	Uzunluk (mm)	Yük Konumu	Burulma Açıları (derece)		
				1	2	3
1	IPE160	2750	Üst Başlık	7,423	2,545	2,091
2	IPE160	2500	Üst Başlık	8,294	3,384	2,578
3	IPE160	2250	Üst Başlık	10,069	5,036	4,883
4	IPE160	2750	Alt Başlık	8,365	6,688	4,383
5	IPE160	2500	Alt Başlık	10,115	2,439	1,164
6	IPE160	2250	Alt Başlık	12,064	4,341	2,826
7	IPE160	2750	Kayma Merkezi	15,605	14,444	13,603
8	IPE160	2500	Kayma Merkezi	15,999	15,048	13,654
9	IPE160	2250	Kayma Merkezi	17,980	17,146	13,971

Deneysel çalışma kapsamında etkileri araştırılan değişkenlerden birincisi çelik konsol kiriş uzunluğudur. Deneysel çalışmada 2750, 2500 ve 2250 mm olmak üzere üç farklı uzunlukta çelik konsol kiriş deney elemanı test edilmiştir. Deneysel sonuçlar incelendiğinde IPE160 çelik konsol kirişlerin boyları kısaldıkça konsol kirişlerin maksimum taşıma gücü değerlerinin önemli oranda arttığı, konsol kirişlerin uç noktalarına uygulanan kesme kuvveti etkisi ile meydana gelen düşey ve yatay deplasmanların ve konsol ucunda ölçülen maksimum burulma açısı değerlerinin de artış gösterdiği belirlenmiştir. Bu davranış şekli çelik kiriş kesiti üzerinde kesme kuvvetinin uygulanma noktası değişim gösteren her üç seride de benzer şekilde meydana gelmiştir.

Her üç yükleme noktası içinde IPE160 çelik konsol kirişlerin boyu 2750 mm'den 2500 mm'ye azaldığında maksimum taşıma gücü değerleri ortalama 26%, 2500 mm'den 2250 mm'ye azaldığında ise ortalama 51% oranında artış göstermiştir.

IPE160 çelik konsol kirişlerin yüklemenin uygulandığı serbest konsol ucundan ölçülen maksimum düşey deplasman değerleri her üç yükleme noktası içinde kiriş açıklığı 2750 mm'den 2500 mm'ye azaldığında ortalama 7%, 2500 mm'den 2250 mm'ye azalım gösterdiğinde ise ortalama 5% oranında artış göstermiştir.

IPE160 çelik konsol kirişlerin yüklemenin uygulandığı serbest konsol ucundan ölçülen maksimum yatay deplasman değerlerinde de aynı davranış şekli gözlemlenmiş, her üç yükleme noktası içinde kiriş boyları 2750 mm'den 2500 mm değerine düştüğünde

maksimum yatay deplasman değerleri ortalama 16%, 2500 mm'den 2250 mm'ye azaldığında ise ortalama 15% oranında artış meydana gelmiştir.

IPE160 elik kirişlerin kesme kuvvetinin uygulandığı serbest konsol ucundan ölçülen maksimum burulma açısı değerleri de elik kirişlerin boyları kısaltıldıkça artış göstermiştir. Her üç yükleme noktası içinde konsol kiriş boyları 2750 mm'den 2500 mm'ye azaldığında konsol ucu maksimum burulma açısı değerleri ortalama 12%, kiriş boyları 2500 mm'den 2250 mm'ye düştüğünde ise ortalama 18% oranında artmıştır.

IPE160 elik konsol kiriş deney elemanlarının rijitlik değerleri, maksimum taşıma gücüne ulaştıkları nokta için hesaplanmıştır. Bu nokta için rijitlik değerleri kesme kuvveti-düşey konsol ucu deplasmanı grafikleri kullanılarak maksimum taşıma gücüne ulaşılan noktayı yük-deplasman grafiğinin başlangıç noktasına bağlayan noktanın eğimi hesaplanarak elde edilmiştir.

IPE160 elik konsol kirişlerin boyu 2750 mm'den 2500 mm'ye azaldığında maksimum taşıma gücü için hesaplanan rijilik değerlerinin ortalama 16% oranında, konsol boyu 2500 mm'den 2250 mm değerine düştüğünde ise ortalama 35% oranında artış gösterdiği hesaplanmıştır. Hesaplanan rijitlik değerleri incelendiğinde elik konsol kirişlerin boyları kısaltıldıkça rijitlik değerlerinin de artış gösterdiği görülmektedir.

IPE160 elik konsol kiriş deney elemanlarının enerji tüketim kapasitesi değerleri kesme kuvveti-konsol ucu düşey deplasman grafiklerinin altında kalan alanlar hesaplanarak elde edilmiştir. Deney elemanlarına uygulanan kesme kuvveti etkisiyle tketlenen enerji kapasitesi değerleri incelendiğinde elik konsol kiriş boyu azaldıkça enerji tüketim kapasitesi değerlerinin önemli oranlarda arttığı görülmüştür.

IPE160 elik konsol kiriş deney elemanlarının boyları 2750 mm'den 2500 mm değerine azaldığında enerji tüketim kapasitesi değerlerinin ortalama 37%, kiriş boyları 2500 mm'den 2250 mm'ye düştüğünde ise ortalama 55% gibi önemli bir oranda artış gösterdiği hesaplanmıştır.

Deneyssel çalışmada incelenen ikinci değişken konsol ucuna uygulanan kesme kuvvetinin IPE160 elik kiriş kesitindeki yeridir. Deneyssel çalışmada kesme kuvveti IPE160 elik

kirişlerin kesiti üzerinde üst başlığa, alt başlığa ve gövde üzerine olmak üzere üç farklı noktadan uygulanmıştır.

Çelik konsol kirişlerin maksimum taşıma gücü değerleri kesme kuvvetinin uygulanma noktasından etkilenmiştir. Deneysel çalışmada yer alan deney elemanları içerisinde en büyük maksimum taşıma gücü değerlerini kesme kuvvetinin IPE160 çelik profilin alt başlığına uygulandığı deney elemanlarında gözlemlendiği belirlenmiştir. Kesme kuvvetinin IPE160 çelik konsol kirişlerin alt başlığına uygulandığı deney elemanları, yüklemenin kesit üst başlığına uygulandığı deney elemanlarından ortalama 19% daha fazla maksimum taşıma gücü kapasitesine ulaşmıştır. Kesme kuvvetinin IPE160 çelik konsol kirişlerin alt başlığına uygulandığı deney elemanları, yüklemenin kesit gövdesine uygulandığı deney elemanlarından ise ortalama 6% daha fazla maksimum taşıma gücü değerleri sergilemişlerdir.

Deneysel çalışmada en büyük düşey deplasman değerlerini yüklemenin kesit üzerinde kesit gövdesine uygulandığı deney elemanlarında gözlemlendiği görülmüştür. Kesme kuvveti kesit üzerinde gövde üzerine etkitilen deney elemanları yüklemenin alt başlığa etkitildiği deney elemanlarından ortalama 10% daha fazla maksimum konsol ucu düşey deplasmanı değerleri sergilemiştir. Kesme kuvveti kesit üzerinde alt başlığa etkiyen çelik konsol kirişlerin ucundan ölçülen maksimum düşey deplasman değerlerinin yüklemenin kesit üzerinde üst başlığa etkitilen deney elemanlarından ortalama 14% daha büyük olduğu belirlenmiştir.

IPE160 çelik konsol kirişlerinin uç noktasından ölçülen maksimum yatay deplasman değerleri deney serisi içerisinde kesme kuvvetinin kesit gövdesi üzerine etkimesi durumunda en büyük değerlerde ölçülmüştür. Yüklemenin kesit üzerinde gövdeye etkidiği deney elemanlarından ölçülen maksimum yatay deplasman değerleri, yüklemenin alt başlığa etkitildiği deney elemanlarından ortalama 39% daha büyük elde edilmiştir. Yüklemenin kesit üzerinde alt başlığa etkidiği deney elemanlarından ölçülen maksimum yatay deplasman değerleri yüklemenin üst kesit başlığına yapıldığı çelik kirişlerden ortalama 15% daha fazladır.

IPE160 çelik konsol kirişlerinin uç noktasından ölçülen maksimum burulma açısı değerleri için de aynı davranış şekli gözlenmiştir. Deneysel seride en büyük konsol ucu burulma

açısı değerleri yüklemenin kesit üzerinde gövdesine uygulandığı deney elemanlarında meydana geldiği görülmüştür. Kesme kuvvetinin çelik konsol kirişlerin gövdesine etkitildiği deney elemanlarından ölçülen maksimum konsol ucu burulma açıları, yüklemenin kesit alt başlığa etkitilen deney elemanlarından ortalama 65% oranında çok daha büyük elde edilmiştir. Konsol kiriş uç noktasından ölçülen maksimum burulma açısı değerleri yüklemenin kesit üzerinde alt başlığına etkimesi durumunda, yüklemenin kesit üst başlığına etkitildiği deney elemanlarına göre ortalama 18% daha büyük ölçüldüğü belirlenmiştir. Deney elemanlarında meydana gelen burulma açıları 7.42° ile 17.98° arasında değişim göstermiş ve çelik konsol kirişlerin uç noktasında ortalama 11.77° gibi oldukça büyük maksimum burulma açısı değerleri meydana gelmiştir.

Deneyisel çalışmada maksimum taşıma gücünde en büyük rijitlik değerlerini çelik kiriş kesiti üzerinde gövdeden yüklenen deney elemanlarının sergilediği belirlenmiştir.

Deneyisel çalışma kapsamında en büyük enerji tüketim kapasitesi değerlerini kiriş kesiti üzerinde gövdeden yüklenen deney elemanlarının sergilediği belirlenmiştir. Kiriş kesiti üzerinde gövdeden kesme kuvveti ile yüklenen çelik konsol kiriş deney elemanları, kesit üzerinde alt başlıktan yüklenen deney elemanlarından ortalama 15% daha büyük enerji tüketim kapasitesi değerlerine sahiptir. Kesit üzerinde alt başlıktan yük uygulanan çelik konsol kirişler ise üst başlıktan yüklenerek test edilen kirişlerden ortalama 57% gibi büyük bir oranda daha fazla enerji tüketim kapasitesi sergilemişlerdir.

Deneyisel çalışmada çok daha fazla düşey ve yatay deplasman yaparak, çok daha fazla burulma açısı sergileyen kesit üzerinde gövdeden yüklenen çelik konsol kiriş deney elemanları daha fazla enerji tüketim kapasitesi sergilemişlerdir.

8. DENEY SONUÇLARININ ANALİTİK ÇÖZÜMLE KARŞILAŞTIRILMASI

Bu çalışmada deneysel çalışmanın yanı sıra, çift simetrik I kesitli konsol kirişlerin kritik elastik yanal burulmalı burkulma yükünü hesaplamak için kapalı-form analitik formülasyon oluşturulmuştur. İnelastik yanal burulmalı burkulma yükünü veren analitik bir yöntem için mümkün olmamaktadır. Bundan dolayı sadece elastik kritik yanal burulmalı burkulma yükleri ile bir karşılaştırılma yapılmıştır. Enerji yönteminin üzerinde bu derece durulmasının sebebi ise yükün kayma merkezi haricinde kesitin farklı konumlarında da dikkate alınabilmesi ve parametrik bir denklem sunabilmesidir.

Bölüm 4’de enerji yönteminden elde edilen denklem, Şekil 8.1’de görüldüğü üzere Wolfram Mathematica 11.3 programında girilmiş, dokuz numune için ayrı ayrı elastik kritik yanal burulmalı burkulma yükleri hesaplanmıştır.

```

Clear["Global`*"];
LTB[l_, e_, ypr_] := Module[{n},
  g = e / (2 * (1 + 0.3));
  Iy = 683000;
  J = 360000;
  Cw = 3960000000;
  h = 160;
  sInt[f_, {z_, z2_, z2_, n_}] := Module[{i}, Simplify[Sum[ $\frac{z2 - z1}{6 + n} * \left( (f /. z \rightarrow i) + 4 * \left( f /. z \rightarrow \left( i + \frac{z2 - z1}{2 + n} \right) \right) + \left( f /. z \rightarrow \left( i + \frac{z2 - z1}{n} \right) \right) \right)$ ], {i, z1, z2 -  $\frac{z2 - z1}{n}$ ,  $\frac{z2 - z1}{n}$ }}];

ht = Switch[ypr,
  -1, -h / 2,
  0, 0,
  1, h / 2
];

phi =  $\frac{z^2 k_1}{l^2} + \frac{z^3 k_2}{l^3} + \frac{z^4 k_3}{l^4} + \frac{z^5 k_4}{l^5} + \frac{z^6 k_5}{l^6}$ ;
u =  $\frac{z^3 k_6}{l^3} + \frac{z^4 k_7}{l^4} + \frac{z^5 k_8}{l^5} + \frac{z^6 k_9}{l^6}$ ;
phiL = k1 + k2 + k3 + k4 + k5;
phiL =  $\frac{k_1}{4} + \frac{k_2}{8} + \frac{k_3}{16} + \frac{k_4}{32} + \frac{k_5}{64}$ ;

n = 0.5 * sInt[C * Iy * (D[u, {z, 2}])^2, {z, 0, l, 50}] + 0.5 * sInt[C * Cw * (D[phi, {z, 2}])^2, {z, 0, l, 50}] + 0.5 * sInt[g * J * (D[phi, {z, 1}])^2, {z, 0, l, 50}] + 0.5 * sInt[2 * (p * z - p * l) * phi * D[u, {z, 2}], {z, 0, l, 50}] + 0.5 * p * ht * phiL^2;

dMat = ConstantArray[0, {10, 10}];
Do[dMat[[i, j]] = Coefficient[D[n, {k1, 1}], k1], {i, 1, 10}, {j, 1, 10}];

pCr = Min[p /. NSolve[{Det[dMat] == 0, p >= 0}, p, Reals]];

{pCr}
]

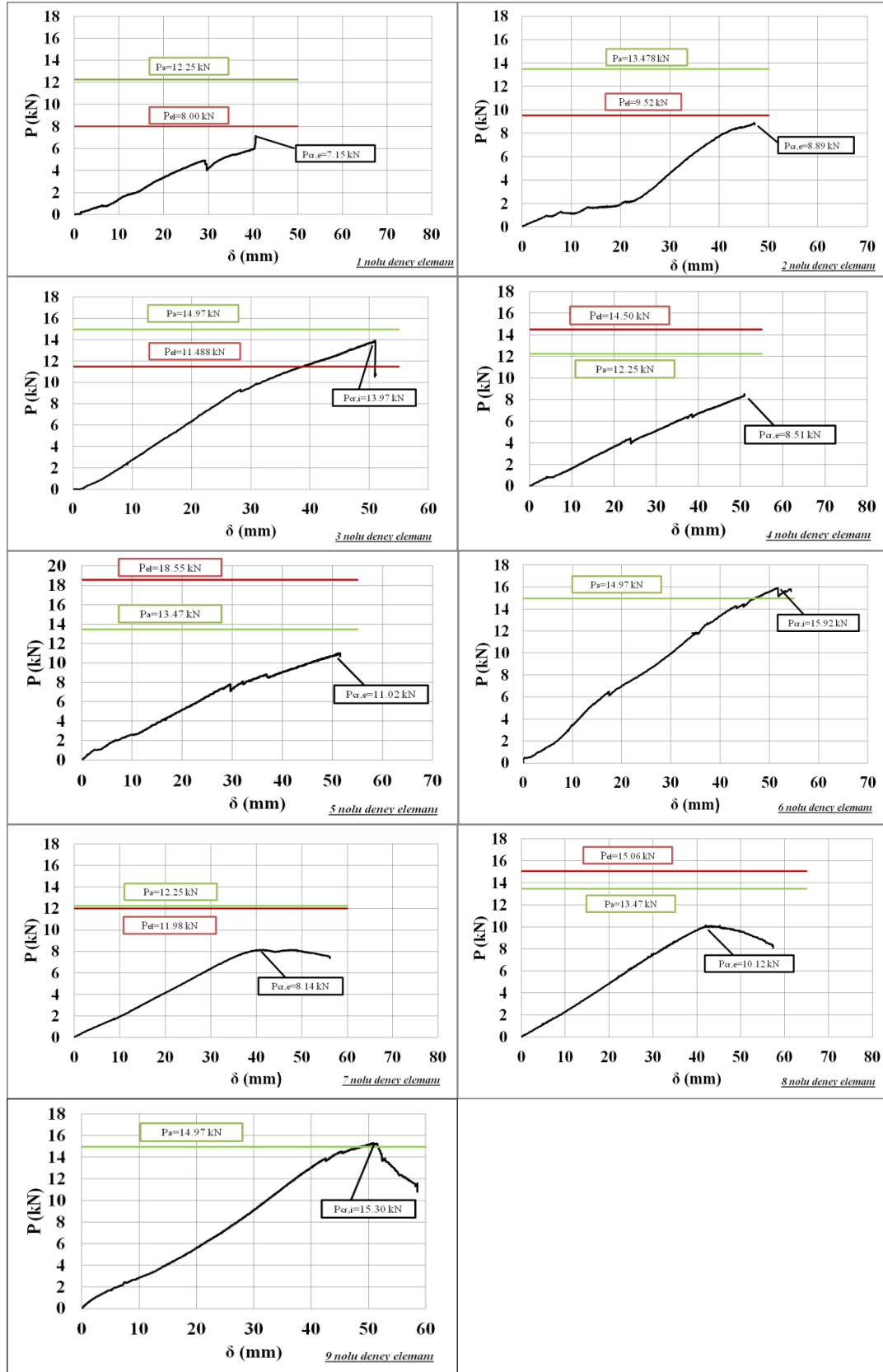
a = TableForm[
  {
    {"Specimen", "L", "Position", "Buckling Load"},
    {1, 2750, "üst baslık", LTB[2750, 152000, -1]},
    {2, 2500, "üst baslık", LTB[2500, 152000, -1]},
    {3, 2250, "üst baslık", LTB[2250, 152000, -1]},
    {4, 2750, "alt baslık", LTB[2750, 152000, 1]},
    {5, 2500, "alt baslık", LTB[2500, 152000, 1]},
    {6, 2250, "alt baslık", LTB[2250, 152000, 1]},
    {7, 2750, "kesme merkezi", LTB[2750, 152000, 0]},
    {8, 2500, "kesme merkezi", LTB[2500, 152000, 0]},
    {9, 2250, "kesme merkezi", LTB[2250, 152000, 0]}
  }
];

```

Resim 8.1. Wolfram mathematica programına ait arayüz

Aşağıdaki şekillerde üç farklı yükleme uygulama noktası ve üç farklı konsol kiriş açıklığı olmak üzere toplamda dokuz çelik kiriş deney elemanının analitik sonuçlardan elde edilen değerler ile karşılaştırması verilmiştir. Şekillerde düşey eksen konsolun ucuna etki eden

yükü (P), yatay eksen serbest uçtaki deplasmanı (δ), P_a akma yükü sınırını, P_{el} analitik hesap sonucu bulunan elastik burkulma yükünü, $P_{cr,e}$ elastik kritik yanal burulmalı burkulma yükünü, $P_{cr,i}$ ise inelastik kritik yanal burulmalı burkulma yükünü ifade etmektedir.



Şekil 8.1. Deney sonuçları ile analitik sonuçların yük - düşey deplasman karşılaştırma grafiği

Deneylerden elde edilen sonuçlar tablo halinde Çizelge 8.1’de özetlenmiştir. Çizelgede DNY sütunları, deney sonuçlarını, ENR sütunları, enerji yönteminden elde edilen sonuçları ifade etmektedir.

Çizelge 8.1. Elastik yanal burulmalı burkulma yüklerinin karşılaştırılması

Eleman No	Kesit	Uzunluk (mm)	Yük Konumu	Burkulma Türü	P _{cr} (kN)	
					DNY	ENR
1	IPE160	2750	Üst Başlık	Elastik	7,15	8,00
2	IPE160	2500	Üst Başlık	Elastik	8,89	9,52
3	IPE160	2250	Üst Başlık	İnelastik	13,94	-
4	IPE160	2750	Alt Başlık	Elastik	8,51	14,50
5	IPE160	2500	Alt Başlık	Elastik	11,02	18,55
6	IPE160	2250	Alt Başlık	İnelastik	15,92	-
7	IPE160	2750	Kayma Merkezi	Elastik	8,14	11,98
8	IPE160	2500	Kayma Merkezi	Elastik	10,12	15,06
9	IPE160	2250	Kayma Merkezi	İnelastik	15,30	-

Deneyssel çalışma kapsamında etkileri araştırılan değişkenlerden birincisi çelik konsol kiriş uzunluğu, ikinci değişken ise konsol ucuna uygulanan kesme kuvvetinin IPE160 çelik kiriş kesitindeki yeri olarak ifade edilmiştir.

Birinci değişkenin yorumlanmasında Çizelge 8.1’de özetlendiği üzere eleman uzunlukları arttıkça davranışın elastik olduğu ve enerji yöntemindeki sonuçlara yaklaştığı anlaşılmaktadır. İkinci değişkenin anlaşılabilmesi için, Bölüm 3’de, denklem (3.16)’da anlatıldığı üzere P yükü kesit merkezinin yukarisından uygulandığında yanal burulmalı burkulma yükü azalmakta, kesit merkezinin aşağısından uygulandığı zaman ise artmaktadır. Çizelge 8.1’e deney sütununa bakılacak olursa P yükü kayma merkezinden üst başlığa doğru gittikçe yanal burulmalı burkulma yükü azalmakta, kayma merkezinden alt başlığa doğru gittikçe ise burkulma yükü artmaktadır. Enerji yönteminden elde edilen sonuçlarda da aynı davranış şekli görülmüştür. Ayrıca enerji sütununda üst başlıktan yapılan yükleme durumu sonuçları, alt başlık ve kayma merkezine göre deney sonuçlarına daha yakın sonuçlar verdiği anlaşılmıştır.

9. SONUÇ VE ÖNERİLER

Günümüz şartlarında bilgisayar teknolojisinin gelişmesi ile yanal burulmalı burkulma davranışının deneysel, analitik ve nümerik analizlerinin hesapları daha sağlıklı bir şekilde incelenebilmektedir. Bunun neticesinde yapılan literatür taramalarının sonucunda çelik yapılarda yangın olarak kullanılan IPE tür profiller için yanal burulmalı burkulma (stabilite bozulması) için yapılan kapsamlı deneysel bir çalışmanın olmadığı görülmüştür. Bu nedenle deneysel bir çalışma planlanmış ve çalışma kapsamında 2750, 2500 ve 2250 mm olmak üzere üç farklı uzunlukta her birinden üçer adet toplamda 9 adet IPE160 konsol kiriş deney elemanı, üst başlık, alt başlık ve kayma merkezinden uygulanmak üzere monotonik artan düşey tekil yükleme etkisi altında laboratuvar ortamında test edilmiştir. Testler sonucunda deney elemanlarının maksimum taşıma gücü, maksimum düşey ve yatay deplasman değerleri, maksimum konsol ucu burulma açısı değerleri, maksimum yük düzeyindeki rijitlik ve enerji tüketim kapasiteleri hesaplanmıştır. Deneysel çalışmanın yanı sıra, kirişin kritik elastik yanal burulma burkulma yükünü hesaplamak için eşsiz bir kapalı-form analitik formülasyon oluşturulmuştur. Analitik çalışmalardan elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmış ve ne derecede başarılı sonuçlar elde edilebildiği yorumlanmıştır.

Hem deneysel hem de analitik çalışmada üzerinde durulmuş olan değişkenler, ankastre mesnetli çelik konsol kirişin net açıklığı ve konsol kiriş serbest ucuna etkiyen kesme kuvvetinin kesit üzerindeki uygulanma noktası olmuştur.

Yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar maddeler halinde sunulmuştur.

- Deneysel sonuçlar incelendiğinde konsol kirişlerin boyları kısaldıkça konsol kirişlerin maksimum taşıma gücü değerlerinin önemli oranda arttığı, konsol kirişlerin uç noktalarına uygulanan kesme kuvveti etkisi ile meydana gelen düşey ve yatay deplasmanların ve konsol ucunda ölçülen maksimum burulma açısı değerlerinin de artış gösterdiği belirlenmiştir. Bu davranış şekli çelik kiriş kesiti üzerinde kesme kuvvetinin uygulanma noktası değişim gösteren her üç seride de benzer şekilde meydana gelmiştir. Çizelge 9.1’de elemanların konsol boyundaki değişim oranları verilmiştir.

Çizelge 9.1. Konsol boyundaki değişim oranları

Deney Sonuçları	Konsol Boyundaki Değişim(mm)	Ortalama Artış
Maksimum Taşıma Gücü	2750-2500	26%
	2500-2250	51%
Maksimum Düşey Deplasman	2750-2500	7%
	2500-2250	5%
Maksimum Yatay Deplasman	2750-2500	16%
	2500-2250	15%
Maksimum Burulma Açısı	2750-2500	12%
	2500-2250	18%
Rijitlik Değerleri	2750-2500	16%
	2500-2250	35%
Enerji Tüketim Kapasitesi	2750-2500	37%
	2500-2250	55%

- Deneyisel çalışmada en büyük maksimum taşıma gücü değerlerini kesme kuvvetinin çelik profilin alt başlığına uygulandığı deney elemanlarında gözlemlendiği belirlenmiştir.
- Deneyisel çalışmada en büyük düşey deplasman değerlerini yüklemenin kesit üzerinde kesit gövdesine uygulandığı deney elemanlarında gözlemlendiği görülmüştür.
- Deneyisel çalışmada konsol kirişlerinin uç noktasından ölçülen maksimum yatay deplasman değerleri deney serisi içerisinde kesme kuvvetinin kesit gövdesi üzerine etkimesi durumunda en büyük değerlerde ölçülmüştür.
- Deneyisel çalışmada en büyük konsol ucu burulma açısı değerleri yüklemenin kesit üzerinde gövdesine uygulandığı deney elemanlarında meydana geldiği görülmüştür.
- Deneyisel çalışmada maksimum taşıma gücünde en büyük rijitlik değerlerini çelik kiriş kesiti üzerinde gövdeden yüklenen deney elemanlarının sergilediği belirlenmiştir.
- Deneyisel çalışmada en büyük enerji tüketim kapasitesi değerlerini kiriş kesiti üzerinde gövdeden yüklenen deney elemanlarının sergilediği belirlenmiştir. Çizelge 9.2’de elemanlara uygulanan kesme kuvvetinin çelik kesiti üzerindeki konumuna göre değişim oranları verilmiştir.

Çizelge 9.2. Kesme kuvvetinin yerine göre değişim oranları

Deney Sonuçları	Kesme Kuvvetinin Yeri	Ortalama Artış
Maksimum Taşıma Gücü	Alt Başlık-Üst Başlık	19%
	Alt Başlık-Kayma Mrkz	6%
Maksimum Düşey Deplasman	Kayma Mrkz-Alt Başlık	10%
	Alt Başlık-Üst Başlık	14%
Maksimum Yatay Deplasman	Kayma Mrkz-Alt Başlık	39%
	Alt Başlık-Üst Başlık	15%
Maksimum Burulma Açısı	Kayma Mrkz-Alt Başlık	65%
	Alt Başlık-Üst Başlık	18%
Enerji Tüketim Kapasitesi	Kayma Mrkz-Alt Başlık	15%
	Alt Başlık-Üst Başlık	57%

- Deneysel sonuçlar incelendiğinde konsol kirişlerin boyları kısaldıkça, elastik davranıştan inelastik(plastik) davranışa doğru bir tavır sergilemeleri olmuştur.
- Üzerinde durulmuş iki değişkende de analitik sonuçlar ile deney sonuçlarının yakınsadığı sonucuna ulaşılmıştır. Bunun neticesinde yanal burulmalı burkulma problemi olan her eleman için deneysel bir çalışma yapmak mümkün olmamaktadır. Hızlı ve güvenilirliği belirlenmiş bir metod olan enerji yöntemiyle hesapların kontrolü mümkün olmaktadır.

Yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar neticesinde, aşağıdaki öneriler sunulabilir.

- Eğer ince cidarlı elemanlar büyük burulma rijitliğini karşılayacak şekilde tasarlanır veya yanal yer değiştirmeye izin vermeyecek elastik mesnetlerle rijitlikleri artırılır ise sistem stabilitesini kaybetmemiş olacak yani yanal burkulma olayı gerçekleşmemiş olacaktır.
- Enerji yöntemi kullanılarak inelastik yanal burulmalı burkulma yükünü veren bir formülasyon çalışması yapılabilir.

KAYNAKLAR

1. Emrem, T. (1978, 25-27 Ekim). *Sürekli kirişlerin boyutlandırılmasında yanal burkulma problemi*. Türkiye İnşaat Mühendisliği 7. Teknik Kongresinde sunuldu, Trabzon.
2. Ings, N. L., ve Trahair, S. (1984). Lateral buckling of restraint roof purlins. *Thin-Walled Structures*, 2, 285-306.
3. Attard, M. M. (1985). Lateral buckling analysis of beams by the FEM. *Computer And Structure*, 23, 2, 217-231.
4. Galambos, T. V., ve Xykis, C. (1991). The effect of lateral bracing on the stability of steel trusses. *Journal of Construction Steel Research*, 20, 251-258.
5. Emrem, T. (2005). Sürekli Kirişlerde Yanal Stabilité. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 2, 436, 24-27.
6. Aydın, M. R., ve Doğan, M. (2006). Eğilme zorlaması altında bulunan çelik korniyerlerin elastik, tam plastik ve yanal burulma burkulmalı dayanımları. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 84-112.
7. Yögev, O., Bucher, I., ve Rubin, M. B. (2007). Dynamic lateral torsional post-buckling of a beam mass system: Experiments. *Journal of Sound and Vibration*, 299, 1049-1073.
8. Samanta, A., ve Kumar, A. (2008). Distortional buckling in braced-cantilever I-beams. *Thin-Walled Structures*, 46, 637-645.
9. Pınarbaşı, S. (2011). Lateral torsional buckling of rectangular beams using variational iteration method. *Scientific Research and Essays*, 6, 6, 1445-1457.
10. Kala, Z. (2013). Elastic lateral torsional buckling of simply supported hot-rolled steel I-beams with random imperfections. *Procedia Engineering*, 57, 504-514.
11. Yuan, W., Kim, B., ve Chen, C. (2013). Lateral torsional buckling of steel web tapered tee-section cantilevers. *Journal of Constructional Steel Research*, 87, 31-37.
12. Özbaşaran, H. (2013). *Çelik I Kesitli Konsol Kirişlerin Yanal Burulmalı Burkulmasının DeneySEL ve Analitik Olarak İncelenmesi*, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 107-118.
13. Ghafoori, E., ve Motavalli, M. (2014). Lateral torsional buckling of steel I-beams retrofitted by bonded and un-bonded CFRP laminates with different pre-stress levels: Experimental and numerical study. *Construction and Building Materials*, 76, 194-206.

14. Kalkan İ., Ertenli M. F., ve Baş S. (2015). *Petek Kirişlerde Yanal Stabilite Sorununun İncelenmesi ve Karşılaştırmalı Sonuçlar*. 6. Çelik Yapılar Sempozyumu, Eskişehir.
15. Ibrahim, S. A., Dessouki, A. K., ve El-Sa'eed, S. A. (2015). Lateral buckling behavior and strengthening techniques of coped steel I-beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 108, 11-22.
16. Denan, F., Nazri, F. M., ve Hashim, N. S. (2017). Finite element analysis on lateral torsional buckling behaviour of I-beam with web opening. *Engineering Heritage Journal / Galeri Warisan Kejuruteraan*, 1(2), 19-22.
17. Yilmaz, T., ve Kirac, N. (2017). Analytical and parametric investigations on lateral torsional buckling of european IPE and IPN beams. *International Journal of Steel Structures*, 17(2), 695-709.
18. Ozbasaran, H. (2018). Optimal design of I-section beam-columns with stress, non-linear deflection and stability constraints. *Engineering Structures*, 171, 385-394.
19. Wang, C. M., ve Kitipornchai, S. (1986). On stability of monosymmetric cantilevers. *Engineering Structures*, 8(3), 169-180.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : DEMİRHAN, Ahmet Lokman
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 13.12.1990, Ankara
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (544) 405 74 05
 e-mail : ahmetlokman007@hotmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi / İnşaat Mühendisliği	Devam Ediyor
Lisans	Kocaeli Üniversitesi / İnşaat Mühendisliği	2014
Lise	Mehmetçik Lisesi	2007

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2017-Halen	Yüksek Proje	Statik Tasarım Mühendisi
2014-2015	ByTeknik Proje	Statik Tasarım Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Demirhan, A. L. (2018, 26-29 April). *Experimental and Numerical Investigation of Lateral Torsional Buckling Behavior of IPE and UPE Steel Beam*. International Congress on Engineering And Life Science, Kastamonu.

Hobiler

Kitap Okumak, Masa Tenisi, Yüzme, Futbol



GAZİ GELECEKTİR..