



**UPE ÇELİK KONSOL KİRİŞLERİN YANAL BURULMALI
BURKULMASININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

Hüseyin Erdem EROĞLU

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

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

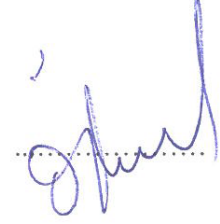
TEMMUZ 2019

Hüseyin Erdem EROĞLU tarafından hazırlanan “UPE ÇELİK KONSOL KİRİŞLERİN YANAL BURULMALI BURKULMASININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK 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: Doç. Dr. Mehmet BARAN

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi

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



Üye: Dr. Öğretim Üyesi Yağmur KOPRAMAN

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

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



Tez Savunma Tarihi: 24/07/2019

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.

Hüseyin Erdem EROĞLU
24/07/2019

UPE ÇELİK KONSOL KİRİŞLERİN YANAL BURULMALI BURKULMASININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Hüseyin Erdem EROĞLU

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2019

ÖZET

İnce cidarlı çelik yapı elemanları çekme ve basınç gibi eksenel yüklemelere karşı yüksek mukavemete sahip olduğu için günümüz yapı tekniğinde tercih edilir olmakta ve yapılarda sıkça kullanılmaktadır. Fakat bu elemanlar (I, U, H vs.) genelde çok düşük burulma rijitliğine sahip oldukları için önemli stabilite problemleri ile karşı karşıya kalmaktadırlar. Yanal burulmalı burkulma durumu çelik yapı kirişlerinin önemli stabilite problemlerinden biridir ve genellikle burulma veya yatay hareket yapması engellenmemiş ince cidarlı elemanlarda meydana gelmektedir. Kuvvetli eksen etrafında eğilmeye maruz kalan çelik kirişler, uygulanan yükün kritik değere ulaşması ile birlikte yanal olarak bükülerek düzleminin dışında bir hareket sergileyebilirler. Yanal burulmalı burkulma stabilite problemi, burulma veya yanal burkulma sertliğinden çok daha büyük bir düzlem içi burkulma sertliğine sahip çelik kiriş elemanlarda aniden ortaya çıkar. İnce cidara sahip çelik kiriş elemanlarında yanal burulmalı burkulma göçme mekanizması istenmeyen ve aniden meydana gelen bir stabilite problemi haline gelip, bu konuda günümüze kadar son derece sınırlı sayıda çalışma gerçekleştirilmiştir. Yapılan literatür taraması sonucunda çelik yapı tasarımlarında kullanılan UPE tür profiller için yanal burulmalı burkulma stabilite bozulması üzerine yapılan kapsamlı deneysel bir çalışmanın olmadığı görülmüştür. Bu nedenle deneysel bir çalışma yapılması planlanmış ve 9 adet UPE80 konsol kiriş deney numunesi serbest ucundan monotonik bir şekilde artan düşey tekil yükleme altında test edilmiştir. Yüklemeler serbest uçtan olmak üzere alt başlık, üst başlık ve gövdeden yapılmıştır. Testler sonucunda deney elemanlarının maksimum taşıma gücü, maksimum düşey ve yatay deplasman değerleri, maksimum uç nokta burulma açısı değerleri hesaplanmıştır.

Bilim Kodu : 91103
Anahtar Kelimeler : UPE çelik konsol kiriş, burulmalı burkulma, yanal burulmalı burkulma, stabilite problemi
Sayfa Adedi : 69
Danışman : Prof. Dr. Özgür ANIL

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF LATERAL TORSIONAL BUCKLING OF
CANTILEVER STEEL UPE BEAMS

(M. Sc. Thesis)

Hüseyin Erdem EROĞLU

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2019

ABSTRACT

Since thin-walled steel construction elements have high strength against axial loads such as tensile and pressure, they are preferred in today's building technique and are frequently used in structures. However, these elements (I, U, H, etc.) generally have very low torsional stiffness and therefore face significant stability problems. Lateral torsion buckling is one of the major stability problems of steel structure beams and occurs in thin-walled elements, which are generally not prevented from torsion or horizontal movement. The steel beams subjected to bending around the strong axis may exhibit a movement outside the plane laterally with the load being reached to the critical value. The lateral torsion buckling stability problem occurs suddenly in steel beam elements with a plane bending stiffness much greater than the torsion or lateral buckling stiffness. The lateral torsion buckling failure mechanism in the steel beam elements with thin wall has become an undesirable and suddenly occurring stability problem and a very limited number of studies have been carried out to this day. As a result of the literature review, it was observed that there was no comprehensive experimental study for lateral torsional sprain stability deterioration for UPE type profiles used in steel structure designs. Therefore, an experimental study was planned and 9 UPE80 cantilever beam test specimens were tested in a monotonically increased vertical single load from the free end. Downloads are made from the lower end, upper header and body, from the free end. As a result of the tests, the maximum bearing power, maximum vertical and horizontal displacement values, maximum end point torsion angle values of the test elements were calculated.

Science Code : 91103

Key Words : UPE steel cantilever beam, torsional buckling, lateral torsional buckling, stability problem

Page Number : 69

Supervisor : Prof. Dr. Özgür ANIL

TEŞEKKÜR

Öncelikle hayatımda attığım her adımda arkamda duran, maddi ve manevi desteklerini benden hiçbir zaman esirgemeyen, bu günlere gelmemin en büyük sebebi olan aileme gönülden sevgilerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimim boyunca derslerimde ve tez çalışmamda bana danışmanlık eden; engin tecrübesini, bilgisini ve deneyimlerini paylaşmaktan hiçbir zaman kaçınmayan, kendisinin danışman öğrencisi olmaktan son derece mutlu ve onurlu olduğum saygıdeğer hocam Prof. Dr. Özgür ANIL'a teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Tez çalışması deneysel çalışmalar süresince laboratuvar çalışmalarında bana yardımcı olan Sayın Dr. Öğr. Üyesi Yağmur KOPRAMAN, Arş. Gör. Anıl ÖZDEMİR ve Arş. Gör. Coşkun ÇAKMAK'a teşekkürlerimi sunar son olarak da tez çalışma arkadaşlarım Ahmet Lokman DEMİRHAN ve Okay Erkan MUTLU'ya da 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 TARAMASI	5
3. YANAL BURULMALI BURKULMA.....	13
3.1. Burulma ve Yanal Burkulma	14
3.2. Yanal Burkulma Hesabı.....	15
3.3. Tekil Yük Etkisindeki Konsol Kirişin Yanal Burkulma Hesabı.....	17
3.4. Tekil Yük Etkisindeki Konsol Kirişte Elastik Eğri Denkleminin Elde Edilmesi	19
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	23
4.1. Deney Elemanları	23
4.2. Deney Düzeneği ve Ölçüm Sisteminin Tanıtılması.....	26
4.2.1. Test cihazı	27
4.2.2. Load cell.....	28
4.2.3. LVDT (Linear Variable Differential Transformer).....	29
4.2.4. Açıkölçer (Accelerometer / Tiltmeter).....	30
4.2.5. Hidrolik pompa	31
4.2.6. Veri toplama.....	31

	Sayfa
4.2.7. Ankastre mesnet	32
4.2.8. Yükleme aparatı	32
4.2.9. Kupon testi cihazı.....	34
4.3. Deney Elemanlarının Mekanik Özellikleri.....	35
5. DENEYLER	37
5.1. Deney Elemanı-1	38
5.2. Deney Elemanı-2	40
5.3. Deney Elemanı-3	42
5.4. Deney Elemanı-4	44
5.5. Deney Elemanı-5	46
5.6. Deney Elemanı-6	48
5.7. Deney Elemanı-7	50
5.8. Deney Elemanı-8	52
5.9. Deney Elemanı-9	54
6. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ	57
6.1. Konsol Boyuna Bağlı Olarak Deney Sonuçlarının Yorumlanması	58
6.2. Yükleme Noktasına Bağlı Olarak Deney Sonuçlarının Yorumlanması	59
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	63
7.1. Öneriler	66
KAYNAKLAR	67
ÖZGEÇMİŞ	69

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. ξ , η ve ζ eksenleri ile x, y ve z eksenleri arasındaki ilişki	16
Çizelge 4.1. Kesit özellikleri.....	23
Çizelge 4.2. Hazırlanan numuneler.....	25
Çizelge 4.3. Numunelerin mekanik özellikleri	36
Çizelge 6.1. Deney sonuçları	57
Çizelge 6.2. Kiriş boyunca maksimum burulma açıları değişimi	58
Çizelge 7.1. Konsol boyundaki değişime bağlı olarak deney sonuçlarındaki artış oranları.....	65
Çizelge 7.2. Kesme kuvvetinin uygulanma noktasına göre deney sonuçları.....	65
Çizelge 7.3. Kesme kuvvetinin uygulanma noktasındaki değişime bağlı olarak deney sonuçlarındaki artış oranları	66

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Konsol kirişte yanal burkulma hali.....	14
Şekil 3.2. Yanal burkulma hali a) yan görünüş, b) üst görünüş, c) m-m kesiti	15
Şekil 3.3. U kesitli konsol kiriş için yanal burkulma hali.....	17
Şekil 3.4. Tekil yüklü konsol kirişlerde m değerleri.....	18
Şekil 3.5. Tekil yüklemeye maruz konsol kiriş.....	19
Şekil 3.6. Tekil yüklemeye maruz konsol kiriş deforme olmuş hal.....	20
Şekil 4.1. UPE 80 profil kesit detayları	24
Şekil 4.2. Üst başlık yükleme aparatı detayı.....	25
Şekil 4.3. Alt başlık yükleme aparatı detayı	26
Şekil 4.4. Profilin gövde detayı.....	26
Şekil 4.5. Test cihazı.....	27
Şekil 4.6. Açılı ölçerlerin deney numuneleri üzerindeki konumları	31
Şekil 4.7. Yükleme aparatı detayı.....	33
Şekil 4.8. Kupon numune detayı.....	35
Şekil 4.9. Kupon numunesi gerilme-birim şekil değiştirme grafiği.....	36
Şekil 5.1. Deney elemanı 1 için yük - düşey deplasman grafiği.....	39
Şekil 5.2. Deney elemanı 1 için yük - yatay deplasman grafiği	39
Şekil 5.3. Deney elemanı 1 için yük – burulma açısı grafiği.....	40
Şekil 5.4. Deney elemanı 2 için yük - düşey deplasman grafiği.....	41
Şekil 5.5. Deney elemanı 2 için yük - yatay deplasman grafiği	41
Şekil 5.6. Deney elemanı 2 için yük – burulma açısı grafiği.....	42
Şekil 5.7. Deney elemanı 3 için yük - düşey deplasman grafiği.....	43
Şekil 5.8. Deney elemanı 3 için yük - yatay deplasman grafiği	43
Şekil 5.9. Deney elemanı 3 için yük – burulma açısı grafiği.....	44
Şekil 5.10. Deney elemanı 4 için yük - düşey deplasman grafiği.....	45

Şekil	Sayfa
Şekil 5.11. Deney elemanı 4 için yük - yatay deplasman grafiği	45
Şekil 5.12. Deney elemanı 4 için yük – burulma açısı grafiği	46
Şekil 5.13. Deney elemanı 5 için yük - düşey deplasman grafiği	47
Şekil 5.14. Deney elemanı 5 için yük - yatay deplasman grafiği	47
Şekil 5.15. Deney elemanı 5 için yük – burulma açısı grafiği	48
Şekil 5.16. Deney elemanı 6 için yük - düşey deplasman grafiği	49
Şekil 5.17. Deney elemanı 6 için yük - yatay deplasman grafiği	49
Şekil 5.18. Deney elemanı 6 için yük – burulma açısı grafiği	50
Şekil 5.19. Deney elemanı 7 için yük - düşey deplasman grafiği	51
Şekil 5.20. Deney elemanı 7 için yük - yatay deplasman grafiği	51
Şekil 5.21. Deney elemanı 7 için yük – burulma açısı grafiği	52
Şekil 5.22. Deney elemanı 8 için yük - düşey deplasman grafiği	53
Şekil 5.23. Deney elemanı 8 için yük - yatay deplasman grafiği	53
Şekil 5.24. Deney elemanı 8 için yük – burulma açısı grafiği	54
Şekil 5.25. Deney elemanı 9 için yük - düşey deplasman grafiği	55
Şekil 5.26. Deney elemanı 9 için yük-yatay deplasman grafiği	55
Şekil 5.27. Deney elemanı 9 için yük – burulma açısı grafiği	56

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 1.1. İnce cidarlı taşıyıcı elemanların yapı mühendisliğinde kullanımı.....	1
Resim 1.2. Yanal burulmalı burkulma hali.....	2
Resim 1.3. Yanal burulmalı burkulma deforme olmuş kiriş.....	2
Resim 3.1. Yanal burulmalı burkulma davranışı.....	13
Resim 4.1. Test cihazı.....	28
Resim 4.2. Load cell.....	29
Resim 4.3. Düşey deplasman için kullanılan LVDT ölçüm cihazı.....	29
Resim 4.4. Yatay deplasman için kullanılan LVDT ölçüm cihazı.....	30
Resim 4.5. Sensebox7001 açı ölçer.....	30
Resim 4.6. Hidrolik pompa.....	31
Resim 4.7. Veri toplama cihazı.....	32
Resim 4.8. Ankastre mesnet detayı.....	32
Resim 4.9. Yükleme aparatı ile alt başlık, üst başlık ve gövdeden yapılan yükleme detayları.....	34
Resim 4.10. Kupon test cihazı.....	35
Resim 5.1. Yükleme yapılmaya hazır örnek bir numune için deney düzeneği.....	37
Resim 5.2. Deney elemanı-1 için deforme olmuş ve olmamış hal.....	38
Resim 5.3. Deney elemanı-2 için deforme olmuş ve olmamış hal.....	40
Resim 5.4. Deney elemanı-3 için deforme olmuş ve olmamış hal.....	42
Resim 5.5. Deney elemanı-4 için deforme olmuş ve olmamış hal.....	44
Resim 5.6. Deney elemanı-5 için deforme olmuş ve olmamış hal.....	46
Resim 5.7. Deney elemanı-6 için deforme olmuş ve olmamış hal.....	48
Resim 5.8. Deney elemanı-7 için deforme olmuş ve olmamış hal.....	50
Resim 5.9. Deney elemanı-8 için deforme olmuş ve olmamış hal.....	52
Resim 5.10. Deney elemanı-9 için deforme olmuş ve olmamış hal.....	54

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
$\frac{d^n}{dz^n}, u^n$	n. dereceden türev
A	Kesit Alanı
cm	Santimetre
C_w	Çarpılma Katsayısı
E	Elastisite modülü
G	Kayma modülü
h	Kesit yüksekliği
h_i	Kesitin başlık harici yüksekliği
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
J	Kesitin kutupsal atalet momenti
L	Kiriş boyu
m	Metre
M	Moment
mm	Milimetre
MPa	Megapascal
M_x	Kuvvetli eksen etrafındaki eğilme momenti
M_y	Zayıf eksen etrafındaki eğilme momenti
M_z	Burulma momenti
M_ξ	Burulmuş kesitteki etrafındaki burulma momenti
M_η	Burulmuş kesitte zayıf eksen eğilme momenti
M_ξ	Burulmuş kesitte kuvvetli eksen eğilme momenti
P	Kirişin ucuna etki eden tekil yük
P_{kr}	Kritik yanal burulmalı burkulma yükü
r	Kesitin köşe açısı

Simgeler**Açıklamalar**

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

Kısaltmalar**Açıklamalar****LVDT**

Linear Variable Differential Transformers

TS

Türk Standartları

1. GİRİŞ

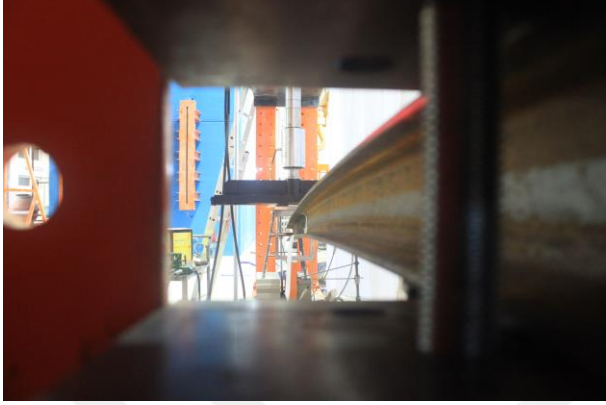
İnce cidarlı elemanlar günümüz yapı tekniğinde kullanımı oldukça yaygın olan yapı elemanlarıdır. Bu elemanların mühendislik uygulamalarında kullanımının ekonomikliğe yaptığı katkısı sebebiyle diğer yapı elemanlarına göre önemli ölçüde avantaj sağlayabilmektedir. Çelik taşıyıcı elemanlar, gövde ve baş kısımları farklı boyutlarda ayrı birer plak olarak imal edilir. İmal edilen bu çelik malzemeler haddeleme işleminden geçerek yüksek mukavemete sahip, içi boş ve farklı kesit özelliklerine sahip (UPE, IPE, I, T, L vb.) ince cidarlı profillere dönüştürülür. Bu elemanların içi boş olması sebebiyle diğer yapı elemanlarına göre daha hafif ve ekonomik olabilmektedir. Çelik taşıyıcı elemanları ekonomik kılan bir diğer etken ise çekme ve basınç gibi aksenal kuvvetlere karşı eşit mukavemete sahip olmasıdır. İnce cidarlı çelik elemanların yapı mühendisliği, gemi mühendisliği, uçak mühendisliği, makine mühendisliği gibi alanlarda kullanımı oldukça yaygındır. Yapı mühendisliğinde daha çok endüstriyel sanayi yapıları, gökdelenler, konsol yapılar, kubbeler, çelik çatılar gibi yapı sistemlerinde kullanılmaktadır. Bu gibi avantajların yanı sıra çelikten üretilmiş ince cidarlı elemanlar yanal burulmalı burkulma stabilite problemi gibi önemli bir problemle karşı karşıya kalabilmektedir.



Resim 1.1. İnce cidarlı taşıyıcı elemanların yapı mühendisliğinde kullanımı

Yanal burulmalı burkulma stabilite problemi genellikle burulma veya yatay hareketi engellenmemiş ince cidarlı kirişlerde meydana gelir. İnce cidarlı bir kirişe kesit düzleminde düşey yük veya eğilme momenti uygulandığında, yük belli bir değer altında kaldığı müddetçe, sistemde sadece düşey yer değiştirmeler meydana gelir ve kesit gövdesi düzleminden sapmaz. Uygulanan yük kritik değere ulaştığında ise, sistemde yanal yer değiştirme hareketi başlarken kesitler çubuk eksenine etrafında dönmeye başlar. Bu durumda sistemin stabilitesi bozulur ve sistemin stabilitesini bozan bu yüke kritik yanal burkulma

yükü denilmektedir. Resim 1.2’de kritik yanar burkulma yüküne ulaşmış örnek bir numune verilmiştir.



Resim 1.2. Yanal burulmalı burkulma hali

Kirişin yanar burkulma davranışında eğilme ile birlikte burulma stabilite problemi de oluşmaktadır. Aşağıda yanar burulmalı burkulma stabilite probleminden dolayı deforme olmuş bir kiriş eleman örneği verilmiştir (Resim 1.3). Yanal burkulma stabilite problemi genellikle yükleme belli bir kritik değeri aştığında meydana gelir. Yükleme kritik değere ulaşmadığı sürece elemanda sadece eğilme oluşur. Ayrıca, yanar burkulma göçme mekanizması genellikle narin kirişlerde karşılaşılan ve aniden meydana gelen önemli bir stabilite problemidir.



Resim 1.3. Yanal burulmalı burkulma deforme olmuş kiriş

Yanal burkulma davranışının teorik esasları geçen yüzyılın başında ortaya çıkmıştır. Günümüzde, gelişmiş bilgisayar teknolojisi ile yanar burulmalı burkulma davranışı ve nedenleri daha sağlıklı bir şekilde incelenebilmiştir. Kirişlerin sınır şartları, uygulanan

yükler, yüklerin çeşitleri ve hangi noktadan uygulandığı yanal burulmalı burkulma davranışını belirlemektedir. Yapılan literatür taramalarının sonucunda bu konudaki çalışmalarda daha çok simetrik kesite sahip IPE türündeki çelik kirişlerin incelendiği, UPE tipi bir yönde simetrik olmayan kesite sahip kirişlerin yanal burulmalı burkulma (stabilite bozulması) için yapılan kapsamlı bir çalışmanın olmadığı görülmüştür. Bu çalışmada mekanik özelliklerinin 5 farklı profilden alınan ve çekme deneyine tabi tutulmasıyla elde edilen UPE80 kesitli çelik numuneler üzerinde deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Test cihazı üzerine kurulan konsol bir sistemde, serbest ucunda tekil yük olan 2250 mm, 2500 mm ve 2750 mm uzunluklarına sahip 9 adet numune üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneylerin sonucunda ise maksimum taşıma gücü, maksimum düşey ve yatay deplasman değerleri, konsol kirişin üç farklı noktasından alınan burulma açısı değerleri elde edilmiştir.



2. LİTERATÜR TARAMASI

Bu bölümde yapılan deneysel çalışma ile benzerlik gösteren yanal burulmalı burkulma hali üzerine daha önce yapılmış deneysel veya analitik çalışmalar hakkında bilgiler verilmektedir.

Attard (1985), kirişlerin yanal burulmalı burkulması üzerine sonlu elemanlar yöntemini kullanarak çalışma yapmıştır. Çalışmada, açık kesitli ve ince cidarlı elastik kirişlere sabit statik yükleme yapmış ve kirişlerin yanal burulmalı burkulmasını hesaplamak için iki adet formülasyon elde etmiştir. Elde edilen iki formülasyonda klasik çözümler ve deneylerden elde edilen sonuçlar ile doğrulanmıştır [1].

Shu ve Fan (1988), basit mesnetli, tek ve çift simetriye sahip yanal ve burulmalı destekli kirişlerin burkulmasını incelemiştir. Çalışmanın sonucunda burkulma momenti ve destek rijitliği arasındaki ilişki ve desteğin kritik rijitliği için bir formül sunmuşlardır [2].

Valentino ve Trahair (1998), elastik yanal burkulmayı engelleyici burulma destekleri üzerine çalışma yapmışlardır. İki ucu basit mesnetli bir elemanda moment, eleman boyunca düzgün yayılı yük ve eksenel yük durumları için incelemeler yapılmış ve eleman tasarımı için yaklaşık durumları incelemiştir [3].

Lee vd. (2002), kompozit malzemeden yapılmış I kesitli kirişlerin yanal burkulması üzerine çalışma yapmışlardır. Uygulanan yükün büyüklüğü, kiriş üzerinde uygulandığı yeri ve lif açısının kompozit eleman üzerindeki burkulma yükü ve momentine etkisi araştırılmıştır. Çalışmanın sonucunda kompozit I kesitli kirişler için yanal burkulma yükünü ve momentini hesaplayabilen tek boyutlu bir sonlu eleman modelini oluşturmuşlardır [4].

Qiao, Zou ve Davalos (2003), FRP ile güçlendirilmiş kompozit I kesitli konsol kirişlerin yanal burulmalı burkulması üzerine deneysel ve analitik çalışmalar yapmışlardır. Deneyler dört farklı tip kesit üzerinde yapılmış ve açıklıkları farklı olan numunelerin serbest ucundan yükleme yapılmıştır. Kesitin geometrik merkezinden, bir yükleme platformu üzerine kademeli bir şekilde ağırlık ekleyerek elemanların kritik yanal burulmalı burkulma yüklerini tespit etmişler ve kompozit I kesitli konsol kirişler için basitleştirilmiş formüller

elde etmişlerdir. Önerilen analitik yöntemden elde edilen sonuçlar, deneylerden elde edilen sonuçlar ve kesitin geometrik merkezinden yüklenen konsol I kirişler için elde edilen basitleştirilmiş formüller arasında bir uyum olduğu gözlenmiştir [5].

Shan ve Qiao (2005), FRP kompozit U kesitli konsol kirişlerin yanal burulmalı burkulması üzerine analitik ve deneysel bir çalışma yapmışlardır. Deneyler üç farklı tip kesit ve farklı açıklıklara sahip numuneler üzerinde yapılmış ve deneylerden elde edilen sonuçlar ile analitik sonuçlar karşılaştırılmıştır. Yanal burulmalı burkulma durumunda fiber malzemesinin ve fiber malzeme yoğunluğunun etkilerini görmek için parametrik bir çalışma yapılmıştır. FRP kompozit U kesitli konsol kirişlerin yanal burulmalı burkulma yükünü tahmin etmek için analitik çözümler sunmuşlar ve sade tasarım denklemleri üretmişlerdir [6].

Chu vd. (2005), soğuk hadde işlemi görmüş çelik kirişlerde yanal desteklerin, yanal burulmalı burkulma davranışına etkisini incelemişlerdir. Kiriş üzerinde belirli aralıklarla konulmuş eğilmeyi önleyici destek çubuklarının bulunduğu ve bulunmadığı durumlarda yanal kısıtlamaların etkisi farklı sınır şartları ve yükleme şekillerine sahip kirişler için yanal burulmalı burkulma durumu enerji yöntemi kullanılarak analitik olarak araştırılmıştır. Çalışmada sonuç olarak yanal desteğin Z-aşık kirişinin yanal burulmalı burkulma kritik yükünü arttırdığı, eğilmeyi önleyici destek çubuklarının bulunmasını ve bulunmasını yükün yeri ve sınır şartları tarafından engellenebileceği belirtilmiştir. Basit mesnetli kirişler için artışın yavaş olduğu, ankastre mesnetli kirişler için belirgin bir artış olduğunu gözlemlemişler ve yanal kısıtlayıcıların kritik yük üzerindeki etkisinin eğilmeyi önleyici kirişler yardımı ile azaltılabileceği sonucunu elde etmişlerdir [7].

Güneş vd. (2005), ince cidarlı yapı elemanlarında yanal burkulma kritik yükü hesabı üzerine bir inceleme yapmışlardır. Çalışma iki bölümden oluşmakta olup, ince cidarlı yapı elemanlarında bir stabilite problemi olan yanal burkulma davranışını incelemişlerdir. Çalışmanın birinci bölümü yanal burkulma stabilite probleminin teorik esaslarına değinilmiş, ikinci bölümünde ise eşdeğer çerçeve sistem elemanları ile modelleme yöntemine göre yanal burkulma problemi incelenmiştir. Çalışmada sayısal sonuçlar analitik sonuçlar ile kıyaslanmıştır [8].

Aydın ve Doğan (2006), eğilme zorlaması altında bulunan çelik korniyerlerin elastik, tam plastik ve yanal burulmalı burkulma dayanımları üzerine çalışma yapmışlardır. Çelik korniyerlerin eğilme dayanımlarının; korniyer kesitlerinin lokal olarak burkulma dayanımları, tam plastik moment kapasiteleri ve yanal burkulmaya ait taşıma kapasitelerinin göz önünde bulundurulmasıyla saptanabileceğini belirtmişlerdir. Çalışmada minör atalet eksenini etrafındaki momentin en fazla majör eksen etrafındaki momente eşit veya daha küçük olduğu kabulü yapılmak sureti ile iki eksenli eğilmesi etkisindeki korniyerlerin eğilmenin asal eksenlerdeki bileşenlerinin değişik oranları için elastik ve tam plastik analizleri ve minör eksene dik yanal burulma burkulmaları incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlar kullanılarak LRFD kuralları esas alınmak sureti ile yeni bir tasarım önerisinde bulunmuşlardır [9].

Samanta ve Kumar (2008), tek ekseninde simetrik, yanal ötelenmeleri kirişin farklı noktalarından tutulmuş, I kesitli konsol kirişi 3 farklı yükleme durumuna göre incelemiş ve yanal burulmalı burkulma dayanımlarını gözlemlemişlerdir. Çalışmayı ABAQUS yazılım programı kullanarak yapmışlardır. I kesitlerin iki ekseninde simetrik olmama sebebi alt ve üst başlık boyutlarının farklı olmasından dolayıdır. Kirişin serbest ucunda tekil yük, kiriş boyunca düzgün yayılı yük ve kiriş boyunca sabit moment olmak üzere kirişe üç farklı yükleme uygulamışlardır. Serbest uca tekil yük ve düzgün yayılı yük kirişin alt başlık ve üst başlıklarından etki ettirilmiştir. Çalışma kirişlerin, üst başlık, alt başlık ve her iki başlığının kiriş elemanı boyunca yanal ötelenmelerinin tutulu olduğu halleri kapsamaktadır. Alt başlıkları geniş olan konsol I kirişlerde, üst başlığa kirişin serbest ucunda tekil yük, kiriş boyunca düzgün yayılı yük veya kiriş boyunca sabit moment etki etmesi halinde üst başlığın ötelenmelerinin tutulu olmasının sonuca etki ettiği saptanmıştır. Geniş üst başlığı olan kiriş kesitleri için ise alt başlıktan tutulu olmasının etkili olduğu gözlenmiştir. Alt başlık ve üst başlık boyutlarının farklı olduğu kesitlere sahip kirişlerde, yüklemenin alt başlığa etki ettirilmesi durumunda herhangi bir yanal desteğin konumunun yanal burulmalı burkulma dayanımına etkisinin olmadığını tespit etmişlerdir [10].

Younes vd. (2009), I kesitli kirişlerde gövde ile başlık arasına yapılmış kaynakların yanal burulmalı burkulma durumuna etkisini incelemişlerdir. Deneyler, inşaat çeliğinden yapılmış elastik olmayan I kesitli on dokuz adet kiriş üzerinde yapılmış ve kirişlerin başlangıçtaki eğrilik seviyeleri kontrol edilerek dikkatli bir şekilde üretimleri yapılmıştır. Her kiriş için en üst kenarından iki yük uygulama noktasına sahip ve yapılan aynı tür

yüklemeler için beş gruba ayrılarak deneyler yapılmıştır. Çalışmanın sonucunda, bağlantı levhalarının iki yanında köşe kaynağına sahip eşdeğer kirişlere göre, bağlantı levhalarının bir yanında köşe kaynağına sahip kirişlerin daha güçlü olduğu gözlenmiştir [11].

Zdenek Kala (2013), sıcakta hadde işlemi görmüş, basit mesnetli ve rastgele kusura sahip çelik I kirişlerin elastik yanal burulmalı burkulması üzerine çalışma yapmıştır. Güçlü eksen etrafında basit eğilmeye maruz bırakılmış I kirişlerin yanal burulmalı burkulma problemi üzerine analitik bir çalışma yapılmış ve zayıf eksen burulma denklemleri dikkate alınarak analiz edilmiştir. Kiriş uzunluğunun yük taşıma kapasitesinin ortalama değerine ve standart sapmasına etkisi incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda, kirişlerin yük taşıma kapasitelerini azaltabilen hem geometrik hem de malzemede birçok iç kusura sahip olabileceği gözlenmiş ve belirtilen kusurların kiriş uzunluğunu belirlemede etkisinin maksimum olduğu belirtilmiştir [12].

Wei-bin Yuan, Boksun Kim, Chang-yi Chen (2013), gövdesi konik ve değişken kesitli çelik konsol kirişlerin yanal burulmalı burkulması üzerine çalışma yapmışlardır. Çalışma, serbest uçta tekil yük veya kiriş boyunca düzgün yayılı yükleme yapılarak analitik bir model üzerinde yapılmıştır. Analitik çözümleri doğrulamak için ANSYS yazılımı üzerinde sonlu elemanlar metodu kullanılmış ve sonucunda analitik ve sayısal çözümler arasında çok yakın sonuçlar elde edilmiştir. Mevcut analitik çözümler kullanılarak, düzgün yayılı yük ve serbest uçtan yapılan tekil yüklemenin burkulmaya etkisi araştırılmış ve kesit ebatlarının kritik burkulma yükü üzerindeki etkisi üzerine parametrik bir çalışma yapılmıştır. Çalışmanın sonucunda değişken kesitli kirişlerin, kirişin başlık genişliğine bağlı olarak kritik yanal burulmalı burkulma yükünü arttırabileceği veya azaltabileceği gözlenmiştir. Geniş başlıklı kirişlerde (Genişlik/Derinlik=0.96) değişken kesitin kritik burkulma yükünü %2 oranında arttırdığı buna karşılık dar başlıklı bir kirişlerde ise (Genişlik/Derinlik=0.19) değişken kesitin kritik burkulma yükünü serbest uçta tekil yükleme için %10 ve düzgün yayılı yükleme için %6 azalttığı elde edilmiştir [13].

Özbaşaran (2013), çelik I kesitli konsol kirişlerin yanal burulmalı burkulmasını deneysel ve analitik olarak incelemiştir. Çalışmasında farklı yük kombinasyonlarını kullanarak numunenin kritik yanal burulmalı burkulma yükünü hesaplamayı amaçlamıştır. Enerji Yöntemi ile diferansiyel bir denklem geliştirmiş ve kritik elastik yanal burulmalı burkulma momentini ABAQUS yazılımı ile de kontrolünü sağlamıştır. Sonucunda denklem

takımlarının birbirine uyduğunu gözlemlemiştir. Boyutları üçer adet 1 m, 2 m ve 3 m olan toplam 9 adet IPE100 kesitli numune üzerinde deneysel çalışma gerçekleştirilmiş ve kiritik yanal burulmalı burkulma yükü her bir numune için hesaplanmıştır. Enerji yöntemi ile geliştirmiş olduğu tasarım denklemi ve deneylerden elde ettiği sonuçların örtüştüğünü gözlemlemiştir. Çalışmanın sonucunda ise I kesitli konsol kirişler için elastik, elasto-plastik ve plastik yanal burulmalı burkulma moment değerini hesaplayabilen bir tasarım prosedürü ortaya koymuş ve bu prosedür ile kesitin üst başlık, alt başlık ve kesme merkezinden yapılan yükleme hallerini de kapsamayı mümkün kılmıştır [14].

Sherif A. İbrahim, Abdelrahim K. Dessouki, Seham A. El-Sa'eed (2014), çelik I kirişlerin yanal burulmalı burkulma ve güçlendirme teknikleri üzerine çalışma yapmışlardır. Çalışma altı adet tam ölçekli çelik kiriş üzerinde deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Analitik çalışma sonlu eleman modeli üzerinden yapılmış ve elde edilen sonuçlar deneysel testlerden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Deney sonuçları, deliklerden meydana gelen elastik olmayan burkulma yükündeki azalmanın deliksiz kirişlere göre burkulma kapasitesinin %60'ından fazlasına ulaşabileceğini göstermiştir. Çelik başlı kirişler için on iki sonlu eleman modelinden oluşan bir grup araştırılmıştır. Farklı geometrik parametrelere sahip flanş tam ve flanş kesikli modeller arasında bir karşılaştırma yapılmış ve sonlu eleman sonuçları başlık uzunluğunun ve derinliğinin yanal burulmalı burkulma kapasitesi üzerinde önemli bir etkisinin olduğunu göstermiştir. Çalışmanın sonucunda yatay veya düşey doğrultuda takviye elemanları ile güçlendirilmiş delikli kirişlerden elde edilen sonuçlara dayanarak; delik derinliğinin kiriş derinliğine oranı $(dc/D) > 0.25$ olmasının, flanşın kesik bölgesindeki hem yatay hem de düşey takviye elemanlarının bölgesel gövde burkulmasını önlemek için gerekli olduğu belirtilmiştir [15].

H.Ozbasaran, R.Aydin, M.Dogan (2015), konsol I kirişlerin yanal burulmalı burkulması üzerine alternatif bir tasarım prosedürü ortaya koymuşlardır. Çalışma, kritik yüklerin ve tasarım momentlerinin hesabını basitleştirecek bir alternatif tasarımı ortaya koymayı hedeflemiştir. Çalışmanın birinci bölümünde elastik kritik yanal burulmalı burkulma yükünü bulmak için kapalı formda denklem önerilmiştir. Kapalı formda önerilen bu denklemin doğruluğu sonlu eleman analizi kullanılarak ABAQUS yazılımı üzerinde yapılmıştır. İkinci bölümde IPE100 kesitten yapılmış konsol kirişler üzerinde deneysel bir çalışma yürütülmüştür. Deneylerde kirişin çarpılma modu ve yükü elde edilmiş ve analitik çalışmadan elde edilen veriler ile kıyaslanmıştır. Elastik burkulma, elastik olmayan

burkulma ve tam plastik burkulma mukavemeti göz önünde bulundurulmuş konsol I kirişler için bir tasarım prosedürü ortaya koyulmuştur. Bu tasarım prosedürü için hesaplanan tasarım momentleri Eurocode 3-2005 ve AISC 360-10 ile ayrı ayrı hesaplanarak karşılaştırılmış ve sonuçların birbirine çok yakın olduğu gözlenmiştir [16].

Rebekka Winkler, Rolf Kindmann, Markus Knobloch (2016), çelik kirişlerin yanal burulmalı burkulmasının yapısal sistemlere etkisini incelemiştir. Çalışma konsol ve iki açıklıklı çelik kirişler üzerinde analitik olarak yapılmıştır. Bu kirişlerdeki yük-deformasyon eğrileri, kesitin plastikleşmesi, nihai kapasitesi, yapısal tasarım için basitleştirilmiş kiriş modeli ile karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonucunda yapısal sistemin çelik kirişlerin yanal burulmalı burkulma davranışını önemli ölçüde etkilediği belirtilmiştir [17].

Nicholas Trahair (2016), yanal burkulma için burulma denklemleri üzerine bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışma üzerinde düzgün yayılı yük bulunan basit mesnetli kirişler üzerinde yapılmış ve elastik yanal burulmalı burkulma stabilite problemini çözmek için dört farklı metot kullanılmıştır. Bu metotlardan iki tanesinde, diferansiyel denklemleri kullanarak sayısal çözümler yapılmıştır. Bu sayısal çözümler sonlu integraller yöntemini temel alan bir bilgisayar yazılımı kullanılarak veya el ile çözümler yapılarak gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemler, iki diferansiyel burulma denklemi için de farklı çözümler üretmiştir. Çalışmada kullanılan diğer iki yöntem enerji denklemleri üzerine dayanmaktadır. Bu yöntemlerden birincisinde el hesabı kullanılmış, diğerinde ise sonlu elemanlar programını kullanan bir bilgisayar yazılımı kullanılmıştır. Yapılan çalışmanın sonucunda bu dört yöntemden elde edilen sonuçların birbirine çok yakınsadığını gözlemlemiş ve daha önce kullanılan burulma diferansiyel denklemlerinin hatalı olduğu sonucuna varmıştır [18].

Trayana Tankova, Joao Pedro Martins, Luis Simoes da Silva, Liliana Marques, Helder D. Craveiro, Aldina Santiago (2017), değişken I kesitli çelik kirişlerin yanal burulmalı burkulma davranışını deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada değişken kesitli çelik elemanlar üzerinde geneli kapsayan bir değerlendirme yapılmış ve gelişmiş bir sayısal modelin kalibrasyonu için her deneyden elde edilen sonuçlar özetlenmiştir [19].

Miroslav Bajer, Jan Barnat, Jiri Pijak (2017), yanal burulmalı burkulma üzerine deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar, sayısal ve numerik çalışmalar sonucu elde edilen veriler ile kıyaslanmıştır. Numuneler tek simetri eksenine sahip veya asimetric olan en kesitlerden oluşmakta olup, bu kesitlerde meydana gelecek yanal burulmalı burkulma davranış farkını gözlemlemeyi hedeflemişlerdir. Farklı en kesitlere sahip numuneler 3000 mm uzunluğa sahip olup, numune üzerinde 4 farklı noktadan burkulma açıları ölçülmüştür. Deneylerde kullanılan numuneler S235'den yapılmış çelik malzemeler olup numuneler üzerinde laboratuvarında yapılmış testler sonucunda akma dayanımının $F_y=327$ MPa ve nihai dayanımının $F_u=458$ MPa olduğunu gözlemlemişlerdir. Çalışmada, simetric olmayan en kesite sahip kirişlerde yanal burulmalı burkulma kararlılığını tanımlama hedeflenmiştir [20].

Phe Van Pham, Magdi Mohareb, Amir Fam (2017), GFRP plakası ile güçlendirilmiş çelik kirişlerin yanal burulmalı burkulması üzerine çalışma yapmışlardır. Çalışmada cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) plakası ile güçlendirilmiş geniş flanşlı çelik elemanların yanal burulmalı burkulması üzerine analitik bir çalışma yapılmıştır. Problemin çözümü için iki sonlu eleman modeli ve bir dizi formülasyon geliştirilmiştir. Birinci eleman 2 düğüm ve 16 burulma serbestlik derecesine sahipken ikinci eleman 3 düğüm noktası ve 14 burulma serbestlik derecesine sahiptir. Çalışmada, kiriş-kolonlar için elastik burkulma etkileşim diyagramları geliştirilmiş ve güçlendirilmemiş kirişlerin etkileşim diyagramları ile kıyaslama yapılmıştır. Çalışmanın sonucunda, GFRP ile güçlendirilmiş kiriş-kolonların burkulma analizi için bir kayma deforme edilebilir kiriş teorisini geliştirmişlerdir [21].

Wen-Fu Zhang (2017), simetric ve simetric olmayan ön germeli çelik I kirişlerin yanal burulmalı burkulması üzerine çalışma yapmıştır. Ön germeli çelik I kirişlerin yanal burulmalı burkulması üzerine analitik bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmada, doğrusal tendonlara sahip öngermeli I kirişlere eşit uç momentler uygulanmıştır. İlk olarak basitleştirilmiş mekanik bir model ortaya atılmıştır. İkinci olarak ise Euler Kiriş Modeli ve Kirchoff Plaka Modeline dayanarak gerilim enerji denkleminin yanı sıra ön germeli çelik I kirişin potansiyel enerji denklemi ayrıntılı bir şekilde çıkarılmıştır. Daha sonra sınır koşulları ile birlikte toplam potansiyel denklemi ve diferansiyel denge denklemleri elde edilmiştir. Simetric ve simetric olmayan ön gerilmeli I kirişlerde yanal burulmalı burkulma üzerine ilk defa çalışma gerçekleştirilmiş ve çalışmanın sonucunda kritik burkulma

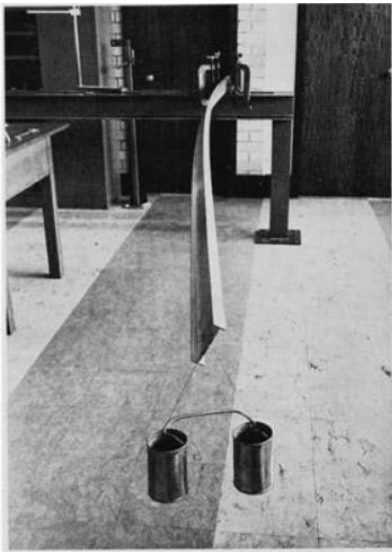
momentinin analitik çözümünün doğruluğu ANSYS sonlu eleman programı kullanılarak teyit edilmiştir [22].

Kenny Mudenda, Alphose Zingoni (2017), sıcakta haddelenmiş çelik kirişlerin yanal burulmalı burkulma davranışını kapsamlı bir şekilde incelemiştir. Çalışmalar monosimetrik ve simetrik olmayan geometrik kesite sahip elemanlar üzerinde ve sonlu elemanlar modeli kullanılarak yapılmıştır. Açıklıkları farklı olan ve farklı yükseklikte flanş sahip elemanların davranışlarını incelemiştir. Flanşların kritik burkulma momentini arttırdığı fakat bu artışın flanş yüksekliğinin artışı ile azaldığını gözlemlemiştir. Ayrıca, bu davranışın, flanş yüksekliklerindeki değişime bağlı olarak kesitteki kesme merkezinin geometrik ağırlık merkezine olan uzaklığından etkilenebileceği ortaya koyulmuştur. Çalışmanın sonucunda kesme merkezi ve geometrik merkez arasındaki yakınlık durumunun kesitin mukavemet direnci üzerinde etkisi olduğu belirtilmiştir [23].

3. YANAL BURULMALI BURKULMA

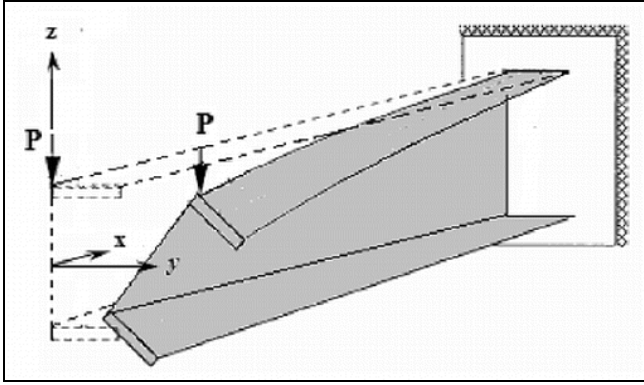
İnce cidarlı elemanlar günümüz yapı tekniğinde oldukça sık kullanılan ve kullanım alanının giderek genişlediği yapı elemanlarıdır. Bu elemanlar belirli standartlara göre, kenarları ve köşeleri boyunca birleştirilmiş, kalınlığı diğer kesitlerdeki yönlerle karşılaştırıldığında oldukça ince plaklardan yapılırlar. İnce cidarlı bu yapı elemanlarının çekme ve basınç mukavemetleri eşit olduğundan dolayı yapı tasarımında diğer tasarım elemanlarına göre daha ekonomik kullanım sağlayabilirler.

Yanal burulmalı burkulma stabilite problemi genellikle bu ince cidarlı elemanlarda meydana gelmektedir. Kirişler düşey yüklemeye maruz kaldıkları durumlarda, ekonomik olarak kullanılabilmesi için genellikle kuvvetli asal eksenleri etrafında eğilme etkisinde olacak şekilde tasarlanırlar. Eğilme etkisindeki elemanlarda da kesitin belirli bir bölgesi basınç etkisinde bulunduğu için stabilite yani kararlılık problemi söz konusu olabilmektedir. Özellikle büyük burulma rijitliğini karşılayacak şekilde tasarlanmamış veya yatay hareketi engellenmemiş ince cidarlı elemanlarda yanal burkulma gibi stabilite yani kararlılık problemi söz konusu olabilmekte ve bu stabilite problemi tasarım aşamasında göz önüne alınması gerekli olmaktadır. Resim 3.1’de yanal burulmalı burkulma durumuna ulaşmış bir I profil görülmektedir.



Resim 3.1. Yanal burulmalı burkulma davranışı

İnce cidara sahip bir kirişe düşey düzlem doğrultusunda bir yük veya eğilme momenti uygulandığında, uygulanan yük kritik değer altında kaldığı müddetçe elemanda sadece düşey yer değiştirmeler meydana gelmektedir. Uygulanan yük kritik burkulma yüküne ulaştığında sistemde var olan kararlılık bozulacak, kuvvetli eksen etrafında eğilme hareketi yapmaya başlayan kirişin alt ve üst başlıklarında farklı yönlü gerilmeler oluşacaktır. Örneğin üst başlıkta basınç gerilmesi birikmesi olurken alt başlıkta bir bölgede ise çekme gerilmesinin yoğunlaşması sonucunda burkulma ve düzlem dışına doğru yatay hareketin meydana geldiği gözlemlenecektir. Sistemin stabilitesini bozan bu yük kritik yanal burkulma yükü olarak adlandırılmaktadır. Yanal burkulma hali kirişin farklı düzlemlerinde meydana gelen eğilme, burulma ve çarpılma etkisinin bileşkesinden oluşan bir stabilite problemi.



Şekil 3.1. Konsol kirişte yanal burkulma hali

Yanal burulmalı burkulma dayanımı başta en kesit yetersizliği olmak üzere, geometrik kusurlar, malzeme kusurları, sınır şartları, malzemenin mekanik ve fiziksel özelliklerine bağlı olmaktadır. Kiriş üzerinde yanal hareketi kısıtlayacak mesnetlerle veya burulma rijitliği yüksek kesitlerin kullanılmasıyla yanal burulmalı burkulma problemi önlenir. Bu çalışmada ince cidarlı çelik UPE profillerin yanal burulmalı burkulma durumu deneysel olarak incelenmiştir.

3.1. Burulma ve Yanal Burkulma

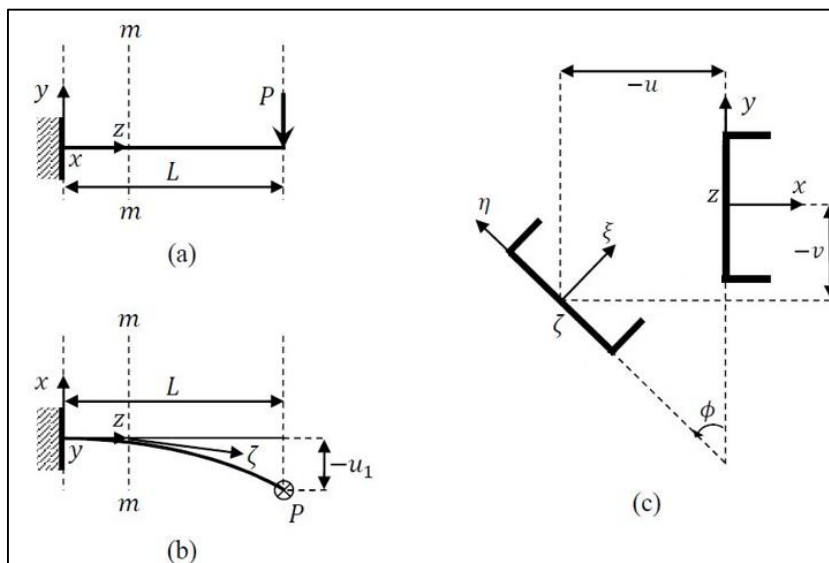
İnce cidarlı elemanlar genelde çok düşük burulma rijitliğine sahiptirler ve bu elemanlarda burulma ve eğilme birlikte etki ettiği durumda kayma merkezi ile ağırlık merkezi üst üste gelmez. Enine yükleme yapılan kirişlerde yük kritik yükü aştığında basınç bölgesi yanal burkulma yapmak isterken çekme bölgesi kararlı durumdadır ve düzgün kalmaya çalışır.

Sistemin bu kararsız duruma geçişi kesitin burulmasıyla gerçekleşmektedir ve kiriş gövde düzleminde saparak dönmeye başlamaktadır. Bu durumda elemanda “Yanal Burulmalı Burkulma” davranışı meydana gelecek ve dik kesitin düzlemsel konumunu koruyamamasından kaynaklanan kesit çarpılması oluşacaktır.

Yanal burkulma davranışı üzerine yapılan ilk teorik çalışmalar geçmiş yüzyılın başlarında yapılmış ancak günümüzde ANSYS, ABAQUS gibi analiz programları vasıtası ile çok daha sağlıklı bir şekilde incelenebilmektedir. Bu analiz programlarına paralel olarak ortaya çıkan sonlu elemanlar, sınır elemanlar, sonlu farklar gibi sayısal hesap yöntemleri, analitik çözümün mümkün olmadığı durumlarda büyük avantaj sağlamaktadır.

3.2. Yanal Burkulma Hesabı

İnce cidarlı çelik kirişler, kesit gövdelerine dik doğrultuda belirli aralıklarla desteklenmelidir. Yeterli desteklenmenin yapılmadığı kirişlerde, gövde doğrultusundaki yükün kritik yanal burulmalı burkulma yüküne ulaşması durumunda, kirişin kararsız duruma geçişi ancak kesitin burulmasıyla gerçekleşebilir. Bu burulma akma başlamadan gerçekleşeceğinden davranış elastik olmaktadır. Elastik yanal burulmalı burkulma olayına ait diferansiyel denklemlerle ortaya konan kritik elastik dayanım ifadesi bütün yanal burulmalı burkulma durumları için temel oluşturmaktadır.



Şekil 3.2. Yanal burkulma hali a) yan görünüş, b) üst görünüş, c) m-m kesiti

Şekil 3.2’de çelik I kirişin yanal burkulma durumunda dönme ve yer değiştirmeleri semboller ile gösterilmiştir. Elemanın x, y ve z eksen takımları burkulmadan önceki konumunu belirtir. Yanal burkulma durumunda kesit z eksen düzleminde, Φ açısı kadar döner. Dönme hareketinden dolayı meydana gelen yeni konumda asal eksenler ξ ve η ile çubuğun elastik eğrisinin teğet doğrultusu ζ ile gösterilmiştir. Kesit merkezinin x ve y eksenlerindeki yer değiştirme bileşenleri ise u ve v’dir. u, v ve Φ küçük değerlere sahip olduklarından dolayı yüksek mertebeden terimler ihmal edilerek ξ , η ve ζ ile x, y ve z koordinatları için dönüşüm değerleri Çizelge 3.1 de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. ξ , η ve ζ eksenleri ile x, y ve z eksenleri arasındaki ilişki

Eksenler	x	y	z
ξ	1	Φ	-du/dz
η	- Φ	1	-dv/dz
ζ	du/dz	dv/dz	1

Şekil 3.2. dikkate alındığında xz düzlemindeki eğrilik d^2u / dz^2 ve yz düzlemindeki eğrilik ise d^2v / dz^2 olarak ifade edilir. $\xi\zeta$ ve $\eta\zeta$ düzlemleri için de çok küçük dönmelerde aynı eğrilik durumu geçerlidir. Tüm bunlar göz önüne alındığında kirişte meydana gelen yer değiştirme ve dönmeler için oluşturulan diferansiyel denklemler (3.1) - (3.3)’de verilmiştir.

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

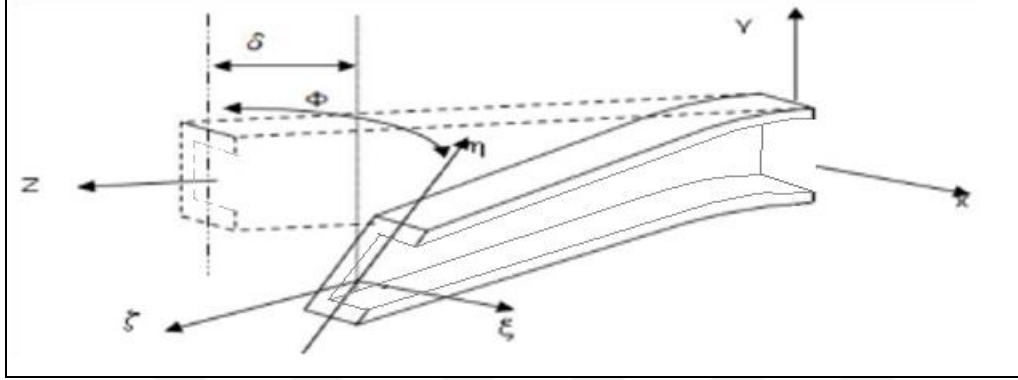
$$EI_{\xi} \frac{d^2v}{dz^2} = -M_{\xi} \quad (3.2)$$

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

(3.1) - (3.3) denklemleri bir kirişin yanal burkulma davranışını temsil eden temel denklemlerdir. Bu denklemlerde gösterilen E malzemenin elastisite modülü G ise kayma modülü olmak üzere, M_{η} ve M_{ξ} sırasıyla η ve ξ eksenleri etrafındaki eğilme momentleri; M_{ζ} , ζ eksen etrafındaki burulma momenti; I_{η} ve I_{ξ} sırasıyla η ve ξ eksenlerine göre atalet

momentleri; J kutupsal (burulma) atalet momenti ve Γ ise kesitin çarpılması ile ilgili bir büyüklüktür.

3.3. Tekil Yük Etkisindeki Konsol Kirişin Yanal Burkulma Hesabı



Şekil 3.3. U kesitli konsol kiriş için yanal burkulma hali

Şekil 3.3'deki konsol kirişin serbest ucundan P kuvveti uygulansın. Uygulanan P kuvveti kirişte düşey deformasyona sebep olacak ancak kritik değere ulaştığında kirişte yanal burkulma meydana gelecektir. Kirişte, bu yanal burkulmayı meydana getiren kritik yanal burkulma durumu için (3.1) - (3.3) denklemleri kullanılır. P kuvvetinden dolayı x , y ve z eksenlerinde meydana gelecek momentler (3.4) - (3.6) denklemlerinde verilmektedir.

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

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

$$M_z = P(-\delta + u) \quad (3.6)$$

Burada δ kirişin serbest ucunun yatay deformasyonunu göstermektedir. (3.4) - (3.6) arasındaki moment ifadeleri, Tablo 1.1 kullanılarak ξ , η ve ζ eksenlerine göre moment değerleri hesaplandığında denklemler (3.7) - (3.9) da gösterildiği gibidir.

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

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

$$M_z = P(l - z) \frac{du}{dz} - P(\delta - u) \quad (3.9)$$

(3.7) - (3.9) denklemleri (3.1) - (3.3) denklemlerinde yerlerine konulduğunda aşağıda gösterilen diferansiyel denklemler elde edilmektedir.

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

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

$$E\Gamma \frac{d^3\Phi}{dz^3} - GJ \frac{d\Phi}{dz} + P(l - z) \frac{du}{dz} - P(\delta - u) = 0 \quad (3.12)$$

(3.12) denkleminin z 'ye göre türevi alınıp (3.11) denkleminden d^2u / dz^2 ifadesi çekildiğinde burulma açısı Φ (3.13) denklemiyle elde edilir.

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

(3.13) eşitliği üzerinde kiriş uç noktalarındaki sınır şartları uygulanarak kritik burkulma yükü şöyle hesaplanabilir.

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

(3.14) denkleminde m kesitin çarpılma rijitliği, kiriş uzunluğu ve burulma rijitliğine bağlı olan bir katsayıyı ifade etmektedir. Farklı kesit ve kiriş boyları için m değerlerini gösteren Çizelge 3.2'de gösterildiği gibidir.

Şekil 3.4. Tekil yüklü konsol kirişlerde m değerleri

$\frac{l^2 GJ}{E\Gamma}$	0.1	1	2	4	8	16	32	40
m	44.30	15.70	12.20	9.76	8.03	6.73	5.87	5.64

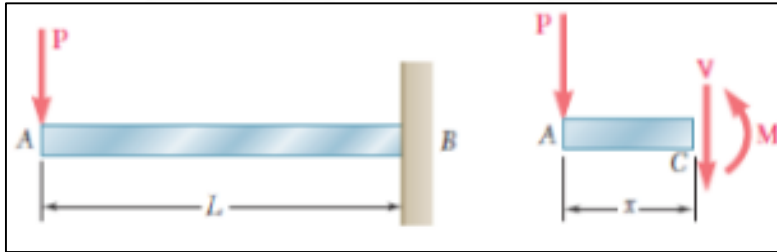
Hesaplanan denklemlerde, P yükü konsol kirişin serbest ucundan ve kesitin ağırlık merkezinden uygulanmıştır. P yükü kesit merkezinin a kadar mesafesinden uygulanırsa, kritik yanal burkulma yükünün hesabı (3.15) denkleminde hesaplanır.

$$P_{kr} = \frac{m}{l^2} \sqrt{EI_\eta GJ} \left(1 - \frac{a}{l} \sqrt{\frac{EI_\eta}{GJ}}\right) \quad (3.15)$$

Denklemden a'nın işareti kesit merkezinden yukarıda ise pozitif, aşağıda ise negatiftir. (3.15) denkleminde görüleceği üzere P yükü kesit merkezinin yukarısından uygulandığında kritik yanal burkulma yükü azalır, kesit merkezinin aşağısından uygulandığında ise artmaktadır.

3.4. Tekil Yük Etkisindeki Konsol Kirişte Elastik Eğri Denkleminin Elde Edilmesi

Bu bölümde serbest ucunda P tekil yüküne sahip konsol kiriş için elastik eğri denklemi ve dönme açısı formülleri çıkarılarak 3.3. bölümünde diferansiyel denklemlerle hesaplanan P_{kr} denklemi ile karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır.



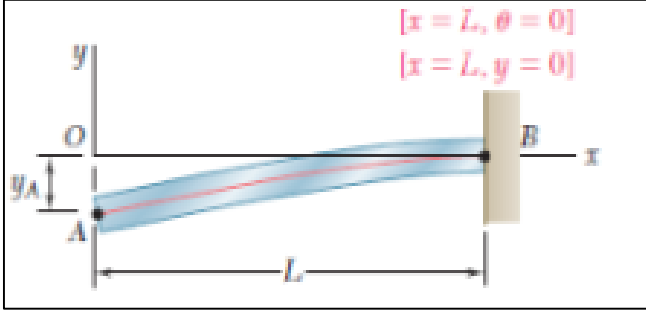
Şekil 3.5. Tekil yüklemeye maruz konsol kiriş

$$M = -P_x \quad (3.16)$$

$$EI \frac{d^2y}{dx^2} = -P_x \quad (3.17)$$

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M(x)}{EI} \quad (3.18)$$

Konsol kiriş üzerinde x kadar mesafede meydana gelecek moment değeri (3.16) verildiği gibidir.



Şekil 3.6. Tekil yüklemeye maruz konsol kiriş deforme olmuş hal

$$EI \frac{dy}{dx} = -\frac{1}{2}Px^2 + C_1 \quad (3.19)$$

$$\theta = \frac{dy}{dx} = 0 \quad (X = L \text{ iken})$$

$$0 = -\frac{1}{2}PL^2 + C_1 \text{ buradan; } C_1 = \frac{1}{2}PL^2 \quad (3.20)$$

Elde edilen C_1 değeri (3.19) denkleminde yerine koyulduğunda;

$$EI \frac{dy}{dx} = -\frac{1}{2}Px^2 + \frac{1}{2}PL^2 \quad (3.21)$$

$$EIy = -\frac{1}{6}Px^3 + \frac{1}{2}PL^2x + C_2 \quad (3.22)$$

$X = L, Y = 0$ iken

$$0 = -\frac{1}{6}PL^3 + \frac{1}{2}PL^2 + C_2 \text{ buradan; } C_2 = -\frac{1}{3}PL^3 \quad (3.23)$$

Elde edilen C_2 değeri (3.22) denkleminde yerine koyulduğunda;

$$EIy = -\frac{1}{6}Px^3 + \frac{1}{2}PL^2x - \frac{1}{3}PL^3 \quad (3.24)$$

$$y = \frac{P}{6EI}(-x^3 + 3L^2x - 2L^3) \quad (3.25)$$

Elde edilen bu diferansiyel denklemler üzerinde $x = 0$ noktasında (deformasyonun maksimum olduğu nokta) elastik eğri denklemi ve dönme açısı değerleri (3.26)'da verildiği gibi elde edilir.

$$y_A = -\frac{PL^3}{3EI} \quad , \quad \theta_A = \left(\frac{dy}{dx}\right) = \frac{PL^2}{2EI} \quad (3.26)$$

Serbest uçtan yapılan tekil yükleme sonrası düşey yönde maksimum deformasyona karşılık gelen elastik eğri denklemi ve dönme açısı formülleri (3.26)'da verildiği gibidir. Ancak elde edilen bu formüller ile sadece eğilme etkisinde olan bir kirişin deformasyon değerleri elde edilebilir. Yapılan bu çalışmada yanal burulmalı burkulma hali üzerine meydana gelecek deformasyon hesabı için (3.26)'da ortaya konulmuş denklemlerin kullanılması sağlıklı sonuçlar vermemektedir. Bunun sebebi yanal burulmalı burkulma davranışının eğilmenin yanı sıra burulma ve çarpılma etkisine de maruz kalması ve 2 ekseninde deformasyon bir ekseninde dönme hareketi meydana gelmesidir.



4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde deneysel çalışma esnasında kullanılan deney elemanlarının mekanik ve fiziksel özellikleri, deney düzenek ve ölçüm sistemleri, aletlerin çalışma mekanizmaları detaylı bir şekilde anlatılacaktır.

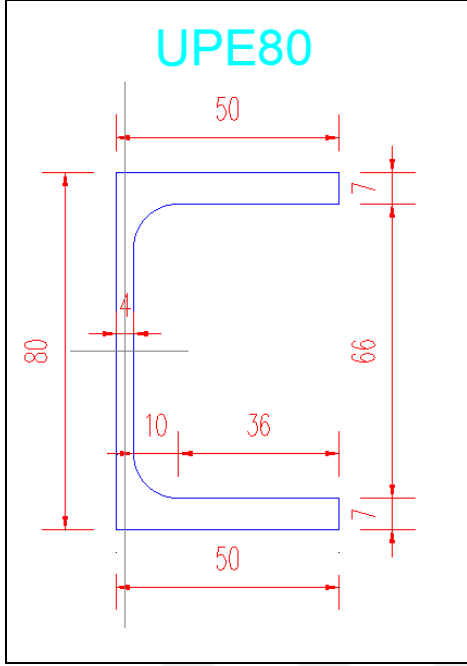
4.1. Deney Elemanları

Deneysel çalışmalar için UPE tipi çelik profiller seçilmiş ve elastik yanal burulmalı burkulma hareketinin incelenebilmesi için 9 adet profil kullanılmıştır. Kullanılan UPE80 profillerin kesit özellikleri Çizelge 4.1’de kesit boyutları ise Şekil 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Kesit özellikleri

Kesit Özellikleri		
UPE80		
A	1010	mm ²
E	200000	N/mm ²
σ_a	425	N/mm ²
I_x	$107,2 \times 10^4$	mm ⁴
I_y	$25,41 \times 10^4$	mm ⁴
W_{xx}	$26,8 \times 10^3$	mm ³
W_{yy}	$7,98 \times 10^3$	mm ³
h	80	mm
b	50	mm
t_w	4	mm
t_f	7	mm
R	10	mm
h_i	66	mm

Çizelgede 4.1’de verilen A profilin en kesit alanını, E elastisite modülünü, σ_a akma dayanımını, I_x kesitin x eksenine göre atalet momentini, I_y kesitin y eksenine göre atalet momentini, W_{xx} kesitin x eksenine göre elastik mukavemet momentini, W_{yy} kesitin y eksenine göre elastik mukavemet momentini, h profilin yüksekliğini, b başlık genişliğini, t_w kesitin gövde kalınlığını, t_f kesitin başlık kalınlığını, r iç bükey yarıçapını ve h_i kesitin başlık hariç yüksekliğini göstermektedir.



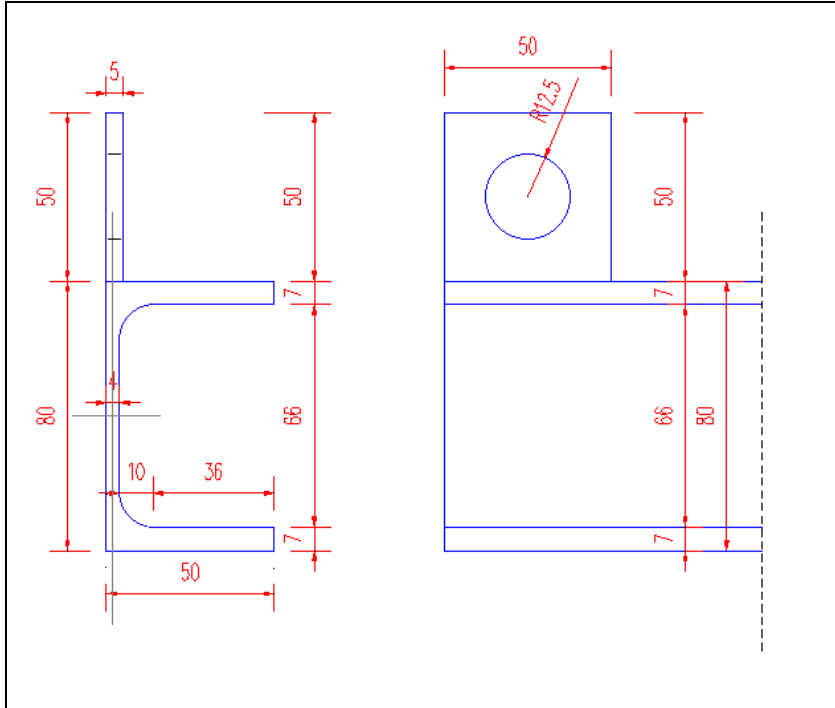
Şekil 4.1. UPE 80 profil kesit detayları

Çalışma, düzlem dışı burulmalı burkulma stabilite probleminin incelenebilmesi için konsol kiriş düzeneği üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmadaki değişkenler ankastre mesnetli çelik konsol kirişin net açıklığı ve konsol kiriş serbest ucuna etkiyen kesme kuvvetinin kesit üzerindeki uygulanma noktasıdır. Çalışmalar için 2750 mm, 2500 mm ve 2250 mm uzunluğunda 3 farklı boyda UPE80 çelik profil kullanılmıştır. Bu farklı boylardaki numunelere serbest uç noktasından üst başlık, alt başlık ve gövde olmak üzere 3 farklı yükleme konumundan yükleme yapılacak şekilde ilave parçalar kaynatılmış olup, bu farklı yük konumlarına göre de kritik yanal burulmalı burkulma davranışlarının hangi seviyelerde kaldığı gözlenmiştir. Yükleme hidrolik pompa yardımıyla el ile yapılmış olup monotonik olarak arttırılan tekil yükleme vasıtasıyla yanal burulmalı burkulma göçme mekanizması oluşuncaya kadar devam edilmiştir. Çizelge 4.2’de hazırlanmış olan numunelerin özellikleri verilmiştir.

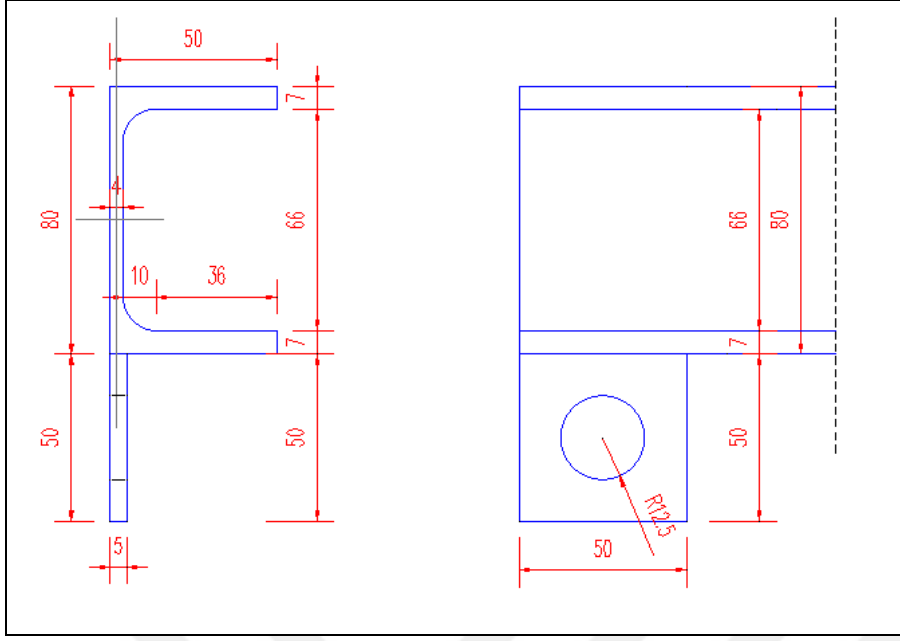
Çizelge 4.2. Hazırlanan numuneler

Numune No	Profil Kesiti	Uzunluk (mm)	Yükleme Konumu
1	UPE80	2750	Alt Başlık
2	UPE80	2750	Gövde
3	UPE80	2750	Üst Başlık
4	UPE80	2500	Alt Başlık
5	UPE80	2500	Gövde
6	UPE80	2500	Üst Başlık
7	UPE80	2250	Alt Başlık
8	UPE80	2250	Gövde
9	UPE80	2250	Üst Başlık

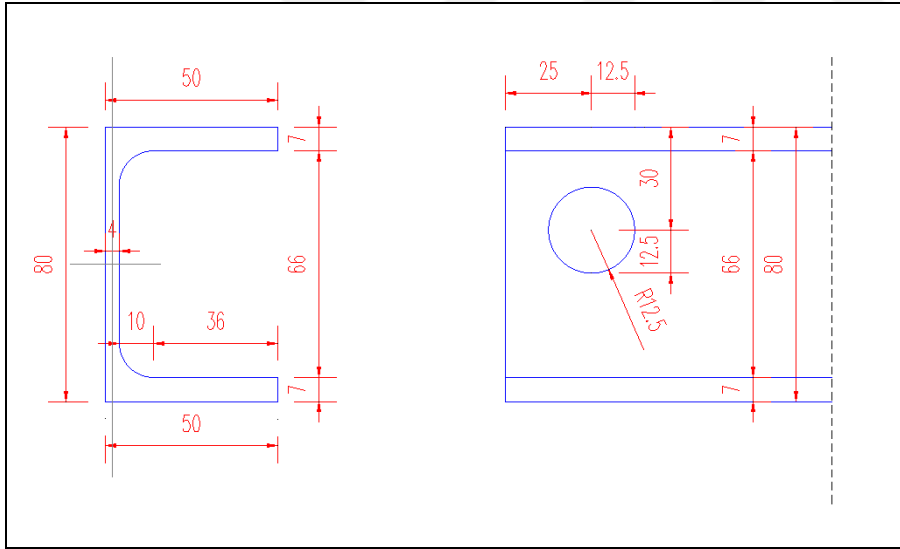
Deneysel çalışmalar esnasında UPE80 profiline üst başlık, alt başlık ve profilin gövdesinden aksenal yüklemeler yapılmıştır. Üst başlık ve alt başlıktan yükleme yapılabilmesi için ilave plakalar kaynatılmış ve detayları Şekil 4.2. ve 4.3’de gösterilmiştir. Gövdeden yapılan yüklemelerde ise yükleme aparatındaki milin rahatça geçerek profilde meydana gelecek yanal burkulma ve burulma hareketine herhangi bir engel teşkil etmeyecek ebatta delikler açılmış ve detayları Şekil 4.4’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Üst başlık yükleme aparatı detayı



Şekil 4.3. Alt başlık yükleme aparatı detayı



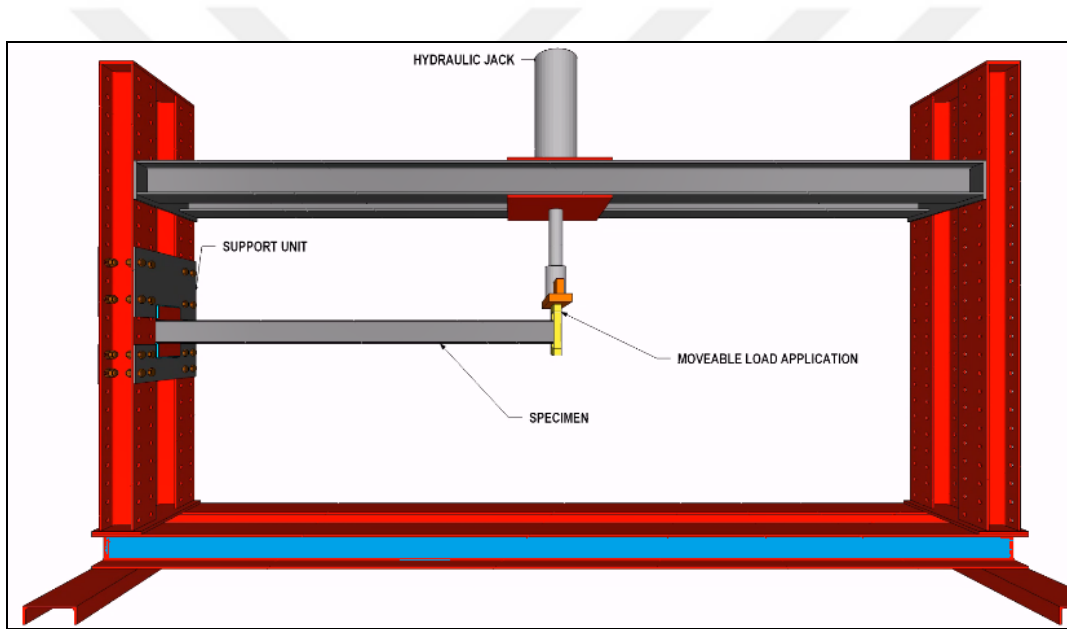
Şekil 4.4. Profilin gövde detayı

4.2. Deney Düzeneği ve Ölçüm Sisteminin Tanıtılması

Bu bölümde deneysel çalışmalarda kullanılan deney düzeneği ve çalışma süresince kullanılan malzemelerin mekanik ve fiziksel özelliklerine detaylı bir şekilde değinilmiştir.

4.2.1. Test cihazı

Test cihazı HEB220 çelik profillerden oluşan, deney profillerinin bir ucunda ankastre, diğer ucunda serbest bir şekilde kalabildiği, elemanların alt başlık, üst başlık ve profilin gövdesinden yükün etki ettirilebileceği yükleme aparatı ve üstünde hidrolik pompa yardımıyla yükü deney profillerine uygulayabildiğimiz bir mekanizmaya sahip yükleme çerçevesidir. Hidrolik pompa ile yükleme yapılan deney numunelerinden alınan veriler bilgisayar ortamına aktarılarak sonuçlar dijital ortamda düzenlenmiştir. Test cihazı üzerinde konsol kiriş detayı ve yükleme için yapılan değişiklikler Şekil 4.5’de, deneylerde kullanılan test cihazı Resim 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.5. Test cihazı



Resim 4.1. Test cihazı

4.2.2. Load cell

Elemanlara uygulanan yüklemenin şiddetini ölçmek için 1000 kN basınç, 400 kN çekme kuvvetine kadar yükleme verisi toplayabilme özelliğine sahip TML firmasının ürettiği Load Cell kullanılmıştır. Alüminyum alaşımından yapılmış olan Load Cell, uzama ölçer tabanlı dönüştürücüler olup sistemin ya da yapının statik veya dinamik mukavemetinin analiz edilmesinde kullanılan elektronik yapıdır. Yük hücresi (Loadcell) üzerine uygulanan fiziksel kuvveti algılayarak elektrik sinyali olarak kontrol indikatörüne iletir. İndikatörler loadcell ölçümleri için çevirici görevi yapmaktadır ve ölçülen yükü dijital ortama aktarırlar.



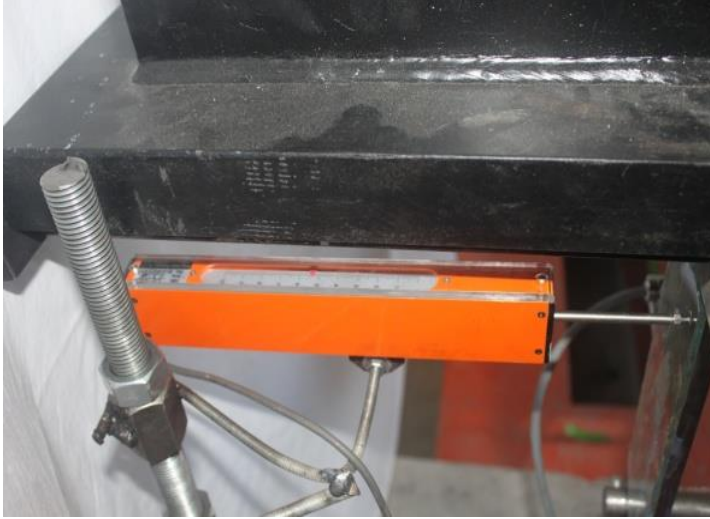
Resim 4.2. Load cell

4.2.3. LVDT (Linear Variable Differential Transformer)

Deney numunelerinde serbest uçta meydana gelen yatay ve düşey deplasmanlar için TML firması tarafından üretilen 2 çeşit LVDT cihazı kullanılmıştır. Düşey deplasmanların lm için Resim 4.3' de gösterilen ve 200mm'e kadar ölçüm yapabilen LVDT, yatay deplasmanların lm için ise Resim 4.4' de gösterilen 100mm'e kadar ölçüm yapabilen LVDT hassas ölçüm cihazları kullanılmıştır.



Resim 4.3. Düşey deplasman için kullanılan LVDT lm cihazı



Resim 4.4. Yatay deplasman için kullanılan LVDT ölçüm cihazı

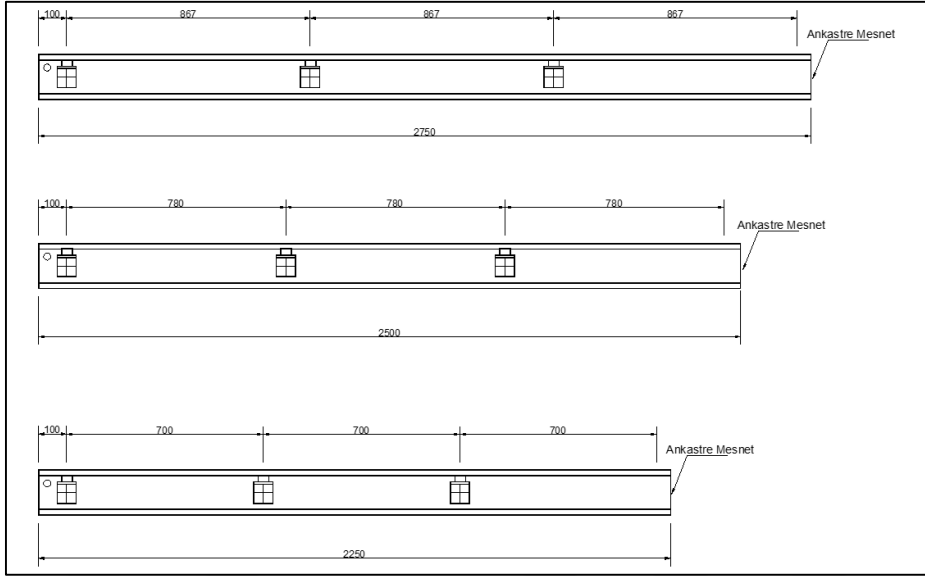
4.2.4. Açı ölçer (Accelerometer / Tiltmeter)

Deney elemanlarının burulma hareketinden dolayı meydana gelecek burulma açılarını ölçmek için ± 2 g'den ± 400 g'ye kadar maksimum ivme ölçüm aralığına ve 0-4000 Hz'e kadar geniş çalışma aralığına sahip SENSEBOX7001 model açı ölçer aparatları kullanılmıştır (Resim 4.5).



Resim 4.5. Sensebox7001 açı ölçer

Bu açı ölçerler Şekil 4.6' da gösterildiği üzere deney numunelerine kirişin serbest ucu, ortası ve konsol bağlantı detayına yakın mesafesi olmak üzere 3 farklı noktadan Pattex marka çift taraflı bant ile yapıştırılmış ve yükleme boyunca elde edilen ölçümleri dijital ortama sağlıklı bir şekilde aktarmıştır.



Şekil 4.6. Açı ölçerlerin deney numuneleri üzerindeki konumları

4.2.5. Hidrolik pompa

Yüklemeler SIMPLEX firması tarafından üretilen P300D model hidrolik yağ ile çalışan hidrolik pompa kullanılarak el ile yapılmıştır. SIMPLEX marka bu pompa 690 bar'a kadar basınç uygulayabilmektedir (Resim 4.6.).



Resim 4.6. Hidrolik pompa

4.2.6. Veri toplama

Veri toplama işlemi teknik destek grubu tarafından üretilen TESTBOX1001 model veri toplama cihazı ile yapılmıştır. TESTBOX1001'in temel fonksiyonu; sensörlerden gelen, yavaş değişen (statik/yarı statik) sinyallerin dijital veriye çevrilerek bilgisayar ortamına aktarılmasıdır. 16 bit ölçüm çözünürlüğüne sahip ve saniyede 8 örneğe kadar veri

toplayabilen bu cihaz ile yatay ve düşey deplasman, açısal dönme verileri toplanarak dijital ortama aktarımı sağlanmıştır (Resim 4.7.).



Resim 4.7. Veri toplama cihazı

4.2.7. Ankastre mesnet

Test cihazında profili ankastre mesnetlemek için, iki adet st37 malzeme UPE270 profil ve iki adet 250x680x10 mm boyutunda plaka kullanılmıştır. Profiller ve plakalara 8 adet 20 mm çapında delikler açılmış ve çapı 20 mm olan M20 bulonlarla sıkıştırılarak profilde meydana gelebilecek dönme ve ötelenme hareketleri engellenmiştir (Resim 4.8).

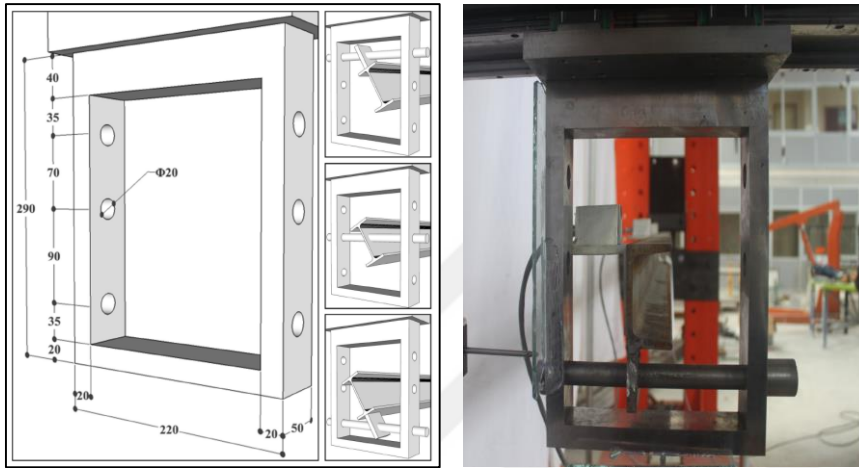


Resim 4.8. Ankastre mesnet detayı

4.2.8. Yükleme aparatı

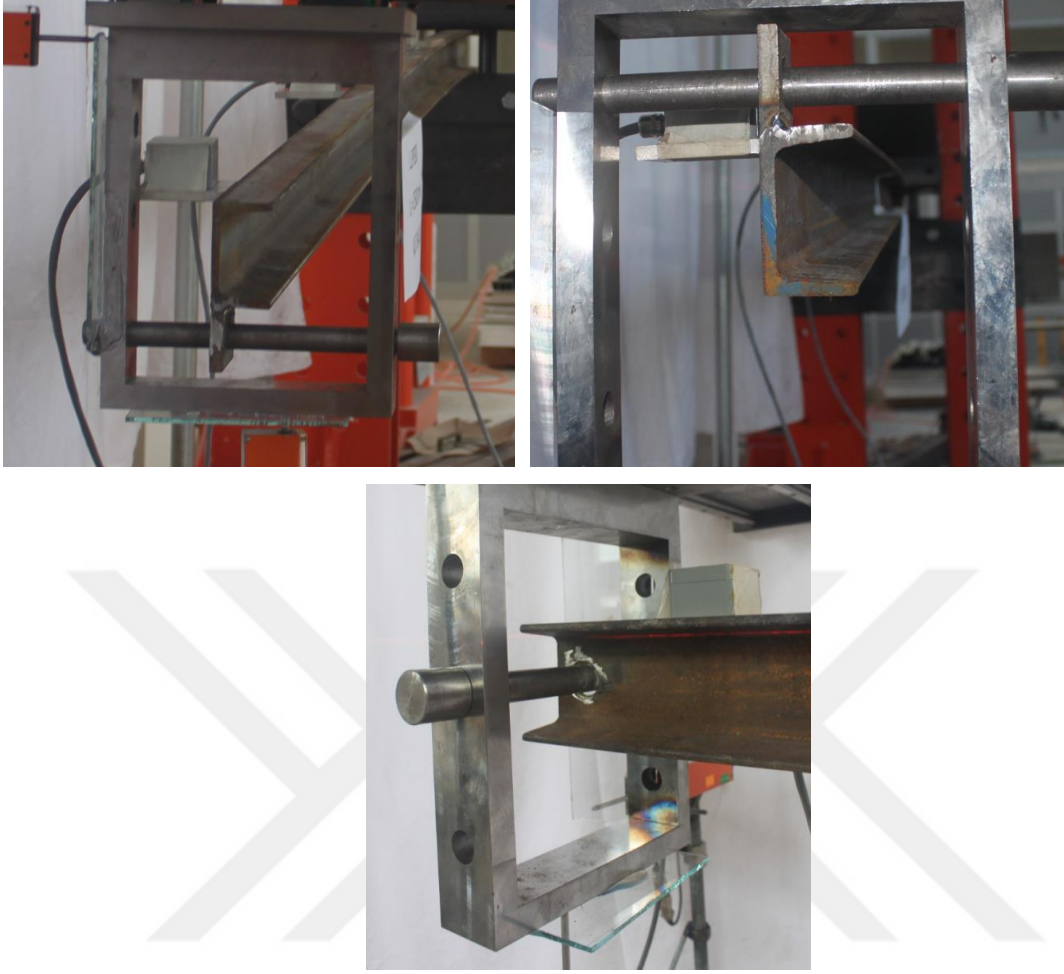
Deney numunelerinin serbest ucuna uygulanan kesme kuvvetinin kiriş üzerinde istenilen noktaya uygulanabilmesine ve kirişte meydana gelen düşey deformasyon, yatay deformasyon ve burulma hareketine engel olmayacak şekilde yükleme olanağı sağlayan

özel bir yükleme aparatı tasarlanmıştır. Böylece kirişin serbest ucunda meydana gelen yatay, düşey ve dönme deformasyonları devam ederken kiriş istenilen noktadan yüklemeye devam edilebilmiş ve yanal burulmalı burkulma hareketi gözlenmiştir. Yükleme aparatı üzerinde 20 mm çapında 3'er adet karşılıklı olmak üzere toplamda 6 adet delik açılmış ve deney numunelerine aktarılacak olan yük bu karşılıklı deliklerden geçebilen 17 mm çapında bir bulon ile yapılmıştır. Aparatın detaylı görünümü Şekil 4.7' de gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Yükleme aparatı detayı

Deney numunelerine alt başlık ve üst başlıktan yükleme yapılabilmesi için numunelerin serbest uçlarından 50x50x5 mm boyutlarındaki levhalar kaynatılmıştır. Gövdeden yapılan yükleme için ise profilin gövdesinden delik açılmıştır. Bu levhalarda ve profilde açılan delikler yükleme aparatında yer alan milin rahatça geçerek deney numunelerinin serbestçe burulma hareketini yapmasına izin verecek genişliktedir (Resim 4.9).



Resim 4.9. Yükleme aparatı ile alt başlık, üst başlık ve gövdeden yapılan yükleme detayları

4.2.9. Kupon testi cihazı

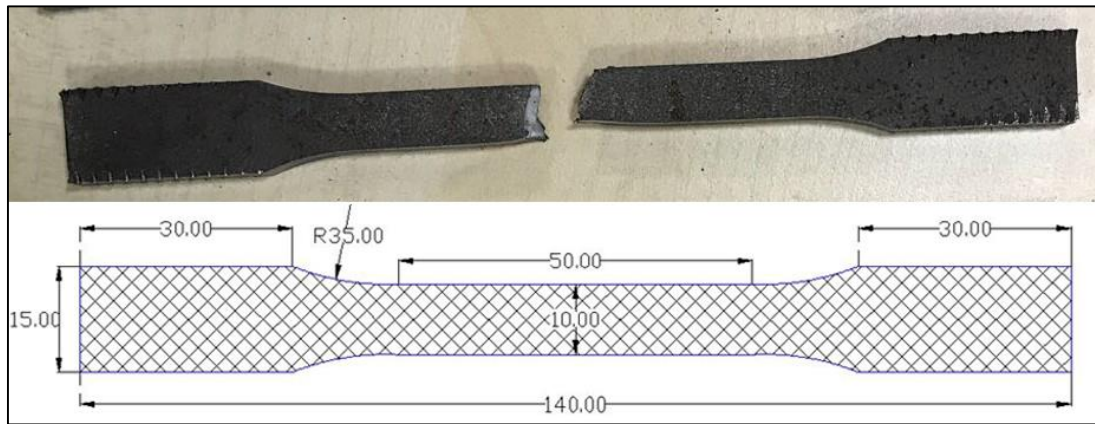
Deneysel çalışmalarda kullanılan UPE80 kesitli numunelerin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla, Yüksel Kaya Makina firması tarafından üretilen kupon test cihazı kullanılarak (Resim 4.10), her biri farklı deney elemanından alınan 5 adet parça üzerinde çekme deneyi yapılmıştır. Çekme deneyleri ile her bir numune için gerilme-birim şekil değiştirme diyagramları elde edilmiştir.



Resim 4.10. Kupon test cihazı

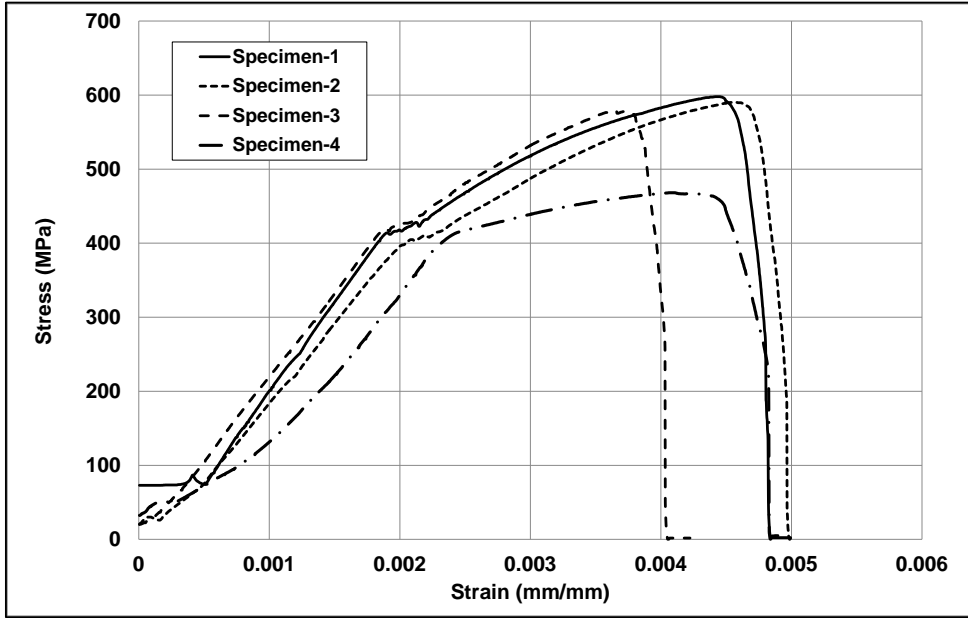
4.3. Deney Elemanlarının Mekanik Özellikleri

Deney elemanlarının mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla deney aletleri bölümünde detaylı bir şekilde tanımı yapılmış olan kupon test cihazı kullanılmıştır. 5 farklı deney elemanından plazma kesim yöntemi kullanılarak alınan kupon numuneleri üzerinde bilgisayar kontrollü ve yükleme hızı kontrol edilebilen bir eksenel çekme düzeneği ile çekme testi yapılmış ve bu test sonucunda elemanların gerilme – birim şekil değiştirme grafikleri elde edilmiştir. Ayrıca numunelerin mekanik özellikleri TS EN ISO6892-1 koduna göre belirlenmiştir. Elemanlardan alınan kupon numunesi boyutlarıyla birlikte şekil 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4.8. Kupon numune detayı

Çekme testine tabi tutulan kupon numunelerinden bir tanesinin gerilme – şekil değiştirme grafiği şekil 4.9’da gösterilmektedir. Grafikte Stress, gerilme değerini, Strain ise şekil değiştirme değerini vermektedir.



Şekil 4.9. Kupon numunesi gerilme-birim şekil değiştirme grafiği

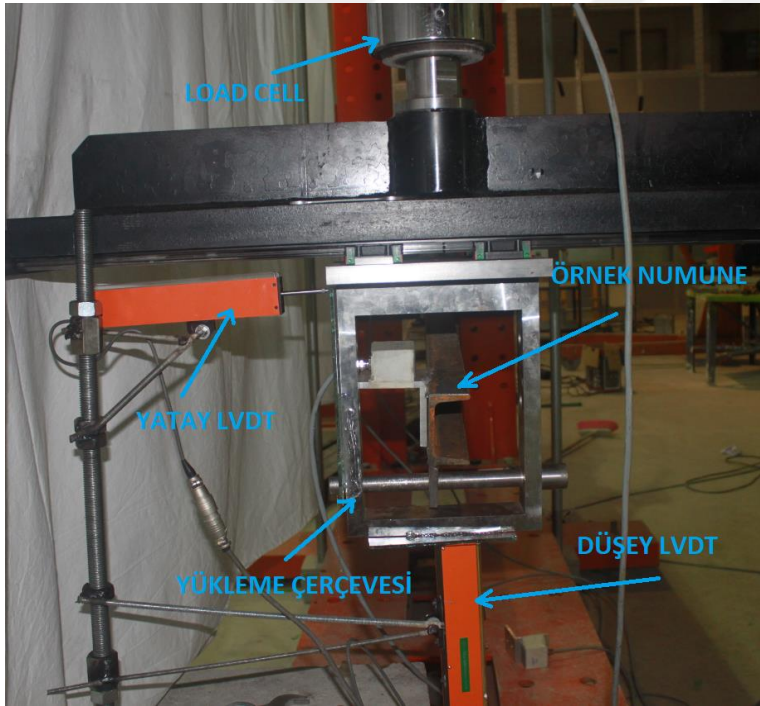
Çekme deneyine tabi tutulan deney numunelerinin mekanik malzeme özelliklerinin ortalama değerleri hesaplanarak Çizelge 4.3’de verilmiştir. σ_y malzemenin akma gerilmesini, E elastisite modülünü, σ_u ise kopma gerilmesini göstermektedir.

Çizelge 4.3. Numunelerin mekanik özellikleri

Mekanik Özellikler	Değer
(σ_y) - Akma Gerilmesi (Mpa)	425
(σ_u) - Kopma Gerilmesi (Mpa)	590
E - Elastisite Modülü (Gpa)	171
Akma Birim Deformasyonu (mm/mm)	0,004485
Kopma Birim Deformasyonu (mm/mm)	0,1035

5. DENEYLER

Bu bölümde yapılmış olan her bir numune için fotoğraflar, deneyler ile ilgili sonuçlar ve detaylı bilgiler verilmiştir. Deneyler UPE80 kesitli 9 adet numune ile gerçekleştirilmiş olup, numune boyutları 3 adet $L=2250$ mm, 3 adet $L=2500$ mm ve 3 adet $L=2750$ mm şeklinde hazırlanmıştır. Yüklemeler alt başlık, üst başlık ve profilin gövdesi olmak üzere 3 farklı noktadan serbest uçta monotonik artan tekil yük şeklinde gerçekleştirilmiştir. Mekanik özellikleri kupon testleri ile belirlenen deney numuneleri yükleme çerçevesine yerleştirilerek elemanların serbest uçlarından yükleme yapılan numunelerin tekil yük etkisindeki davranışları incelenmiş ve deneylerde yük hücresinden profile aktarılan artan yük ile birlikte serbest uçtaki yanal ve düşey deformasyonlar ve üç farklı noktadaki burulma açısı değerlendirilmek üzere kaydedilmiştir. Bu bölümde her bir numune için deneylerden elde edilen sonuçlar verilmiştir.



Resim 5.1. Yükleme yapılmaya hazır örnek bir numune için deney düzeneği

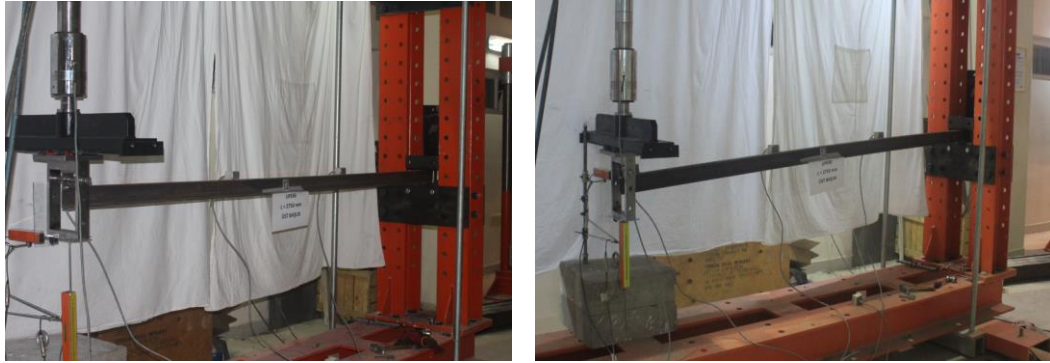
Yükleme yapılmaya hazır örnek bir deney numunesinin yükleme çerçevesine yerleştirilmiş hali ve detayları Resim 5.1’de verildiği gibidir.

Çizelge 5.1. Deney Elemanlarının Özellikleri

Deney Elemanı	Kesit	Uzunluk (mm)	Yük Konumu
1	UPE80	2750	Üst Başlık
2	UPE80	2500	Üst Başlık
3	UPE80	2250	Üst Başlık
4	UPE80	2750	Alt Başlık
5	UPE80	2500	Alt Başlık
6	UPE80	2250	Alt Başlık
7	UPE80	2750	Gövde
8	UPE80	2500	Gövde
9	UPE80	2250	Gövde

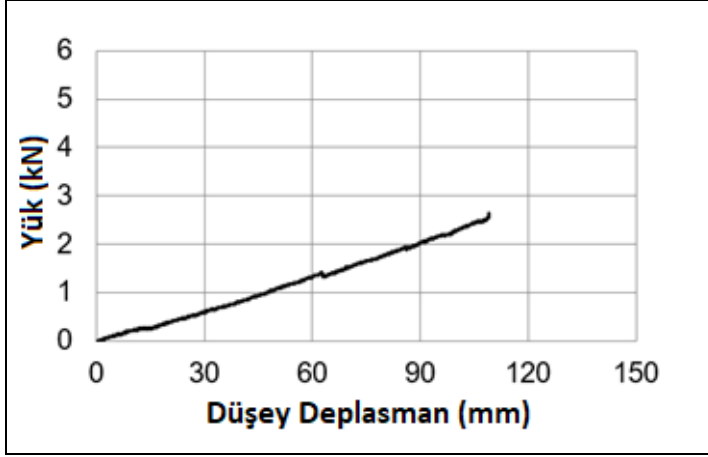
5.1. Deney Elemanı-1

Deney elemanı 1 için UPE 80, L=2750 mm uzunluğuna sahip ve mekanik özellikleri kupon deneyi ile belirlenmiş olan numune kullanılmıştır. Yükleme üst başlıktan kaynatılmış olan ilave plaka yardımı ile hidrolik pompa kullanılarak elle yapılmış olup, profilin yük uygulanmamış hali ve yükleme yapıldıktan sonra numunenin deforme olmuş hali Resim 5.2’de gösterilmektedir.

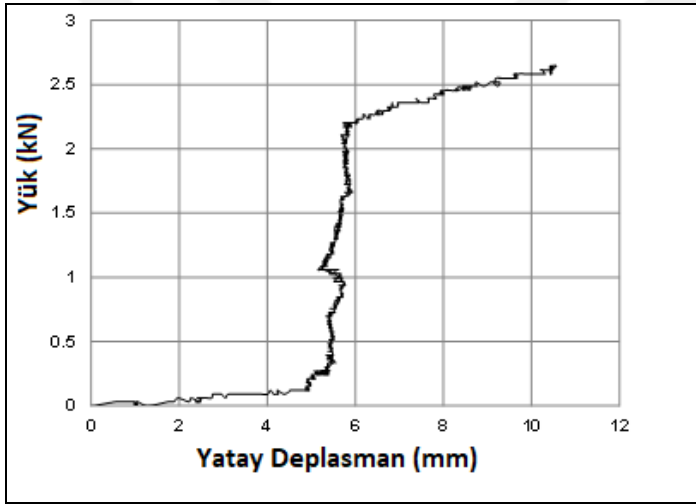


Resim 5.2. Deney elemanı-1 için deforme olmuş ve olmamış hal

Yükleme hidrolik pompa kullanılarak el ile yapılmış ve artan yük ile birlikte yükün şiddeti, serbest uçtaki yatay ve düşey deformasyonlar ve burulma açı değerleri hesaplanarak grafiğe dökülmüştür. Profilin yük-yatay deformasyon grafiği şekil 5.1’de, yük-düşey deformasyon grafiği şekil 5.2’de, üç farklı noktadan alınan dönme açıları değerleri ise yük ile grafiğe dökülerek şekil 5.3’de gösterilmektedir.

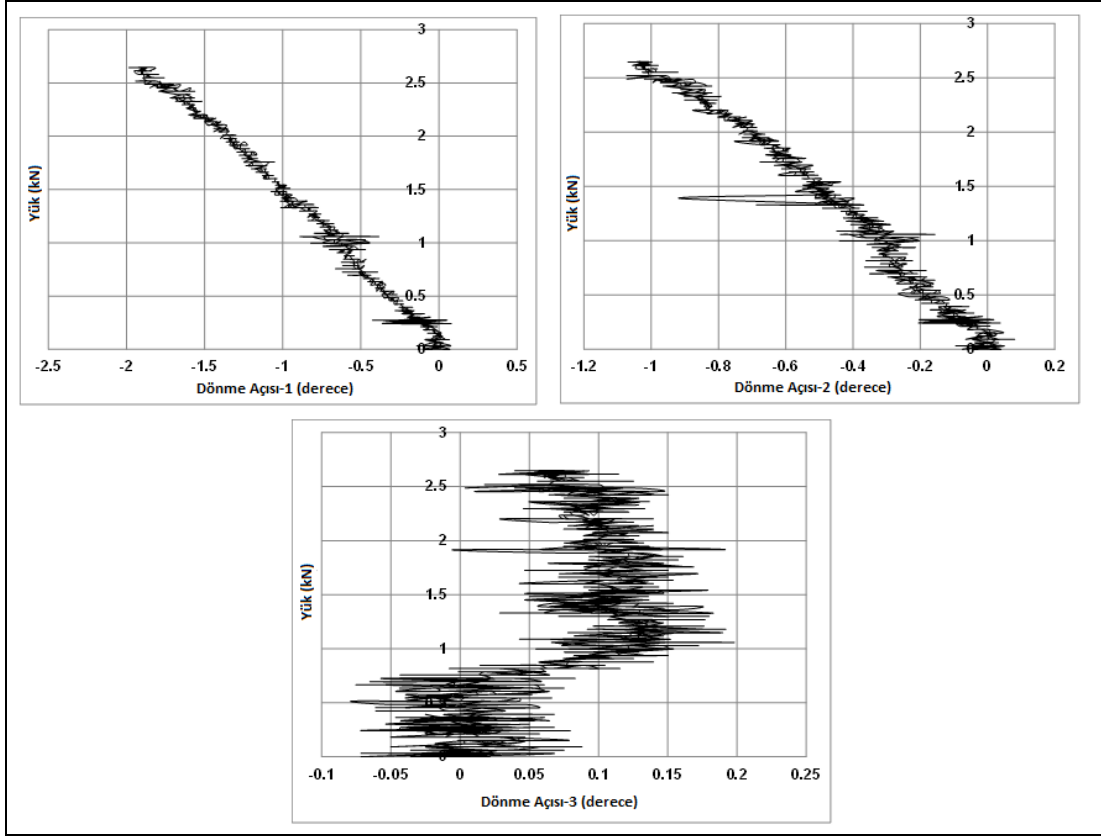


Şekil 5.1. Deney elemanı 1 için yük - düşey deplasman grafiği



Şekil 5.2. Deney elemanı 1 için yük - yatay deplasman grafiği

Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de düşey eksen serbest uçtaki yükün şiddetini, yatay eksen ise serbest uça meydana gelen çökmeyi göstermektedir.



Şekil 5.3. Deney elemanı 1 için yük – burulma açısı grafiği

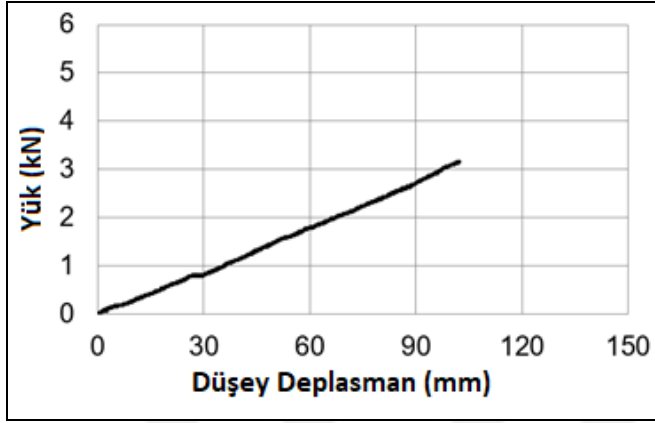
5.2. Deney Elemanı-2

Deney elemanı 2 için UPE 80, $L=2500\text{mm}$ uzunluğuna sahip ve mekanik özellikleri kupon deneyi ile belirlenmiş olan numune kullanılmıştır. Yükleme üst başlıktan kaynatılmış olan ilave plaka yardımı ile hidrolik pompa kullanılarak elle yapılmış olup, profilin yük uygulanmamış hali ve yükleme yapıldıktan sonra numunenin deforme olmuş hali Resim 5.3’de gösterilmektedir.

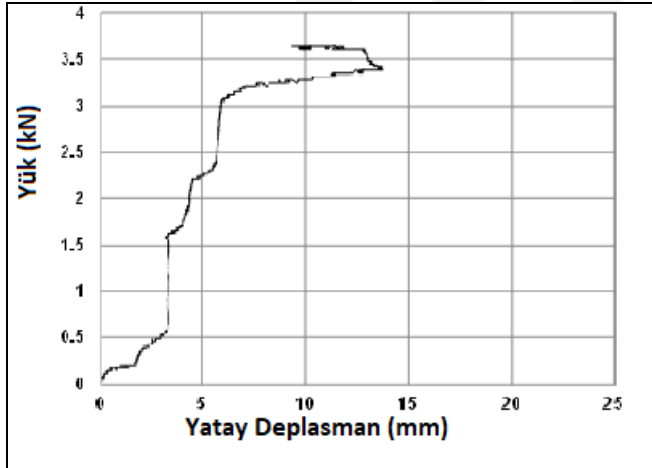


Resim 5.3. Deney elemanı-2 için deforme olmuş ve olmamış hal

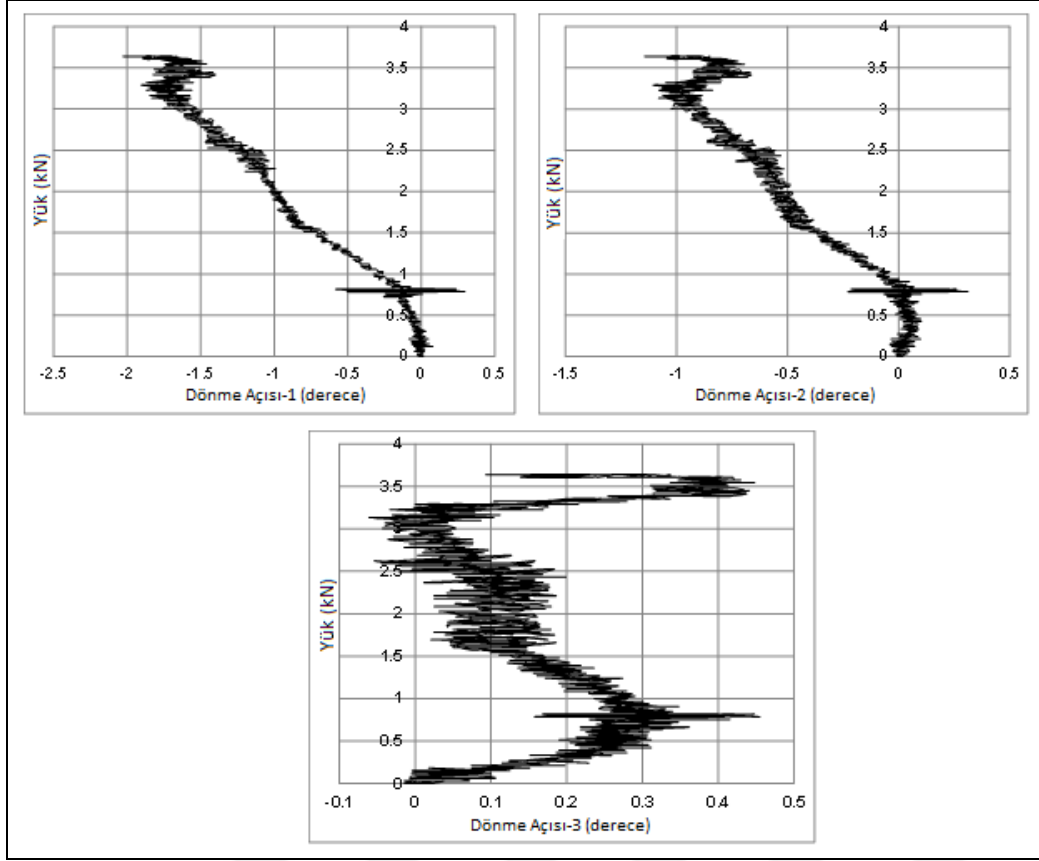
Profilin yük-yatay deformasyon grafiği Şekil 5.4'de, yük-düşey deformasyon grafiği Şekil 5.5'de, üç farklı noktadan alınan dönme açılıarı değerleri ise yük ile grafiğe dökülerek Şekil 5.6'da gösterilmektedir.



Şekil 5.4. Deney elemanı 2 için yük - düşey deplasman grafiği



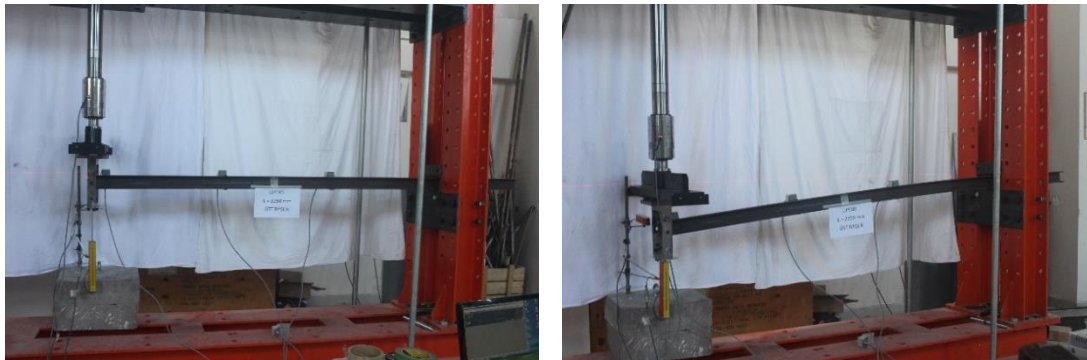
Şekil 5.5. Deney elemanı 2 için yük - yatay deplasman grafiği



Şekil 5.6. Deney elemanı 2 için yük – burulma açısı grafiği

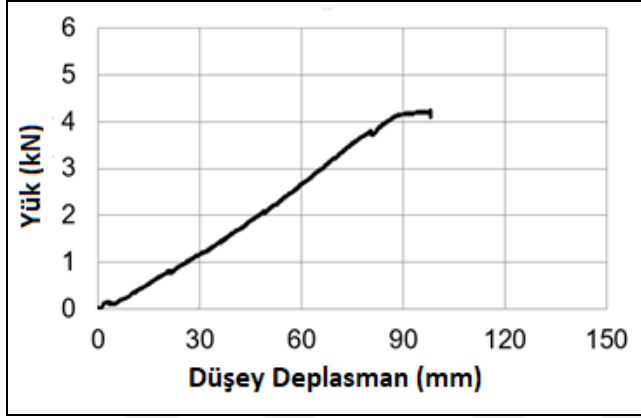
5.3. Deney Elemanı-3

Deney elemanı 3 için $L=2250\text{mm}$ uzunluğuna sahip ve mekanik özellikleri kupon deneyi ile belirlenmiş olan numune kullanılmıştır. Yükleme üst başlıktan kaynatılmış olan ilave plaka yardımı ile hidrolik pompa kullanılarak elle yapılmış olup, profilin yük uygulanmamış hali ve yükleme yapıldıktan sonra numunenin deforme olmuş hali Resim 5.4’de gösterilmektedir.

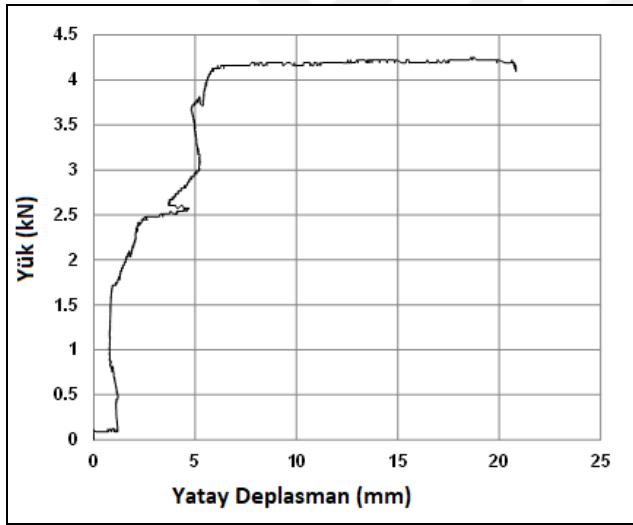


Resim 5.4. Deney elemanı-3 için deforme olmuş ve olmamış hal

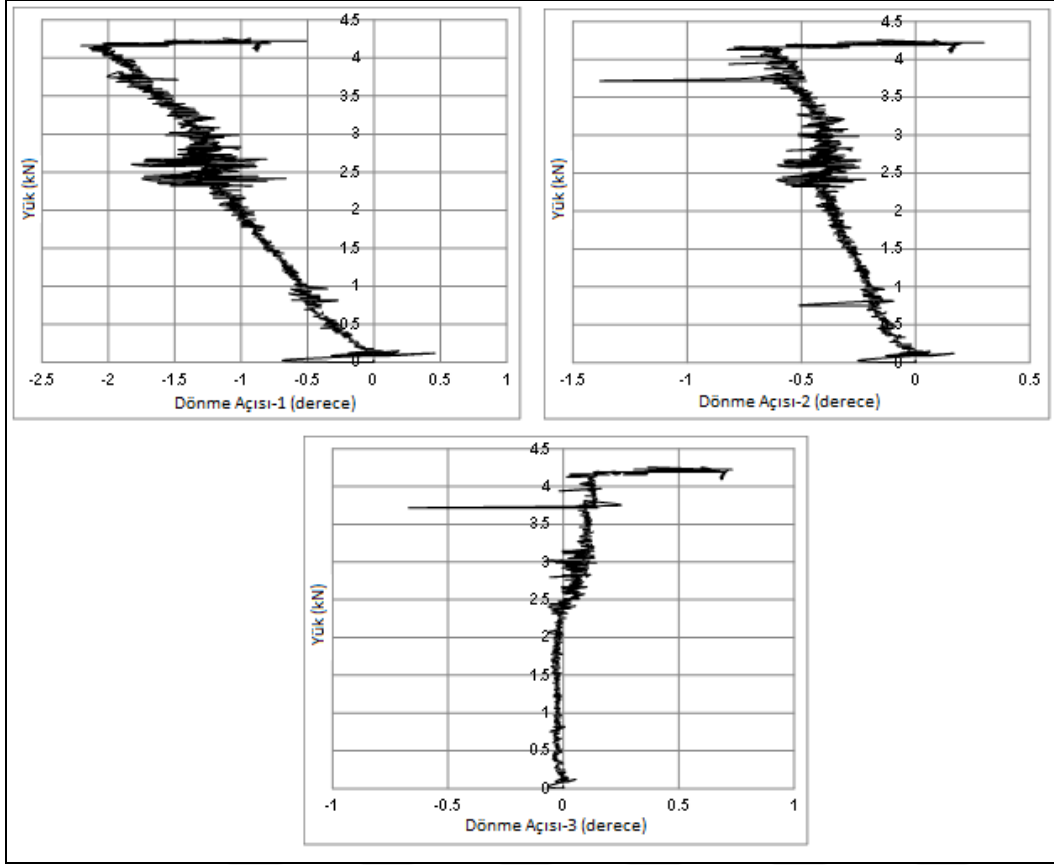
Profilin yük-yatay deformasyon grafiği Şekil 5.7’de, yük-düşey deformasyon grafiği Şekil 5.8’de, üç farklı noktadan alınan dönme açılarını değerleri ise yük ile grafiğe dökülerek Şekil 5.9’da gösterilmektedir.



Şekil 5.7. Deney elemanı 3 için yük - düşey deplasman grafiği



Şekil 5.8. Deney elemanı 3 için yük - yatay deplasman grafiği



Şekil 5.9. Deney elemanı 3 için yük – burulma açısı grafiği

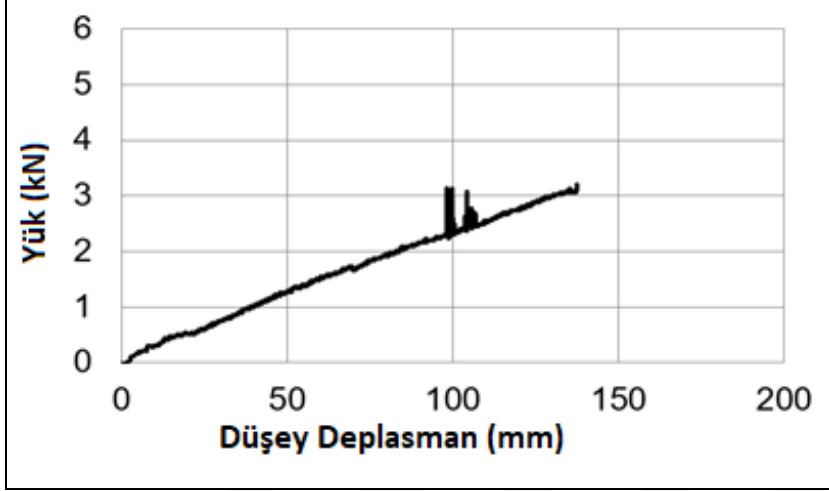
5.4. Deney Elemanı-4

Deney elemanı 4 için $L=2750\text{mm}$ uzunluğuna sahip ve mekanik özellikleri kupon deneyi ile belirlenmiş olan numune kullanılmıştır. Yükleme alt başlıktan kaynatılmış olan ilave plaka yardımı ile hidrolik pompa kullanılarak elle yapılmış olup, profilin yük uygulanmamış hali ve yükleme yapıldıktan sonra numunenin deforme olmuş hali Resim 5.5’de gösterilmektedir.

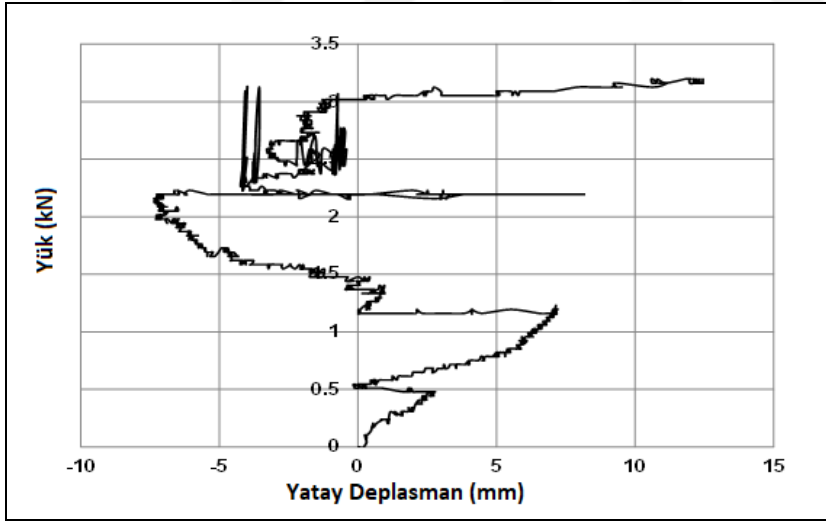


Resim 5.5. Deney elemanı-4 için deforme olmuş ve olmamış hal

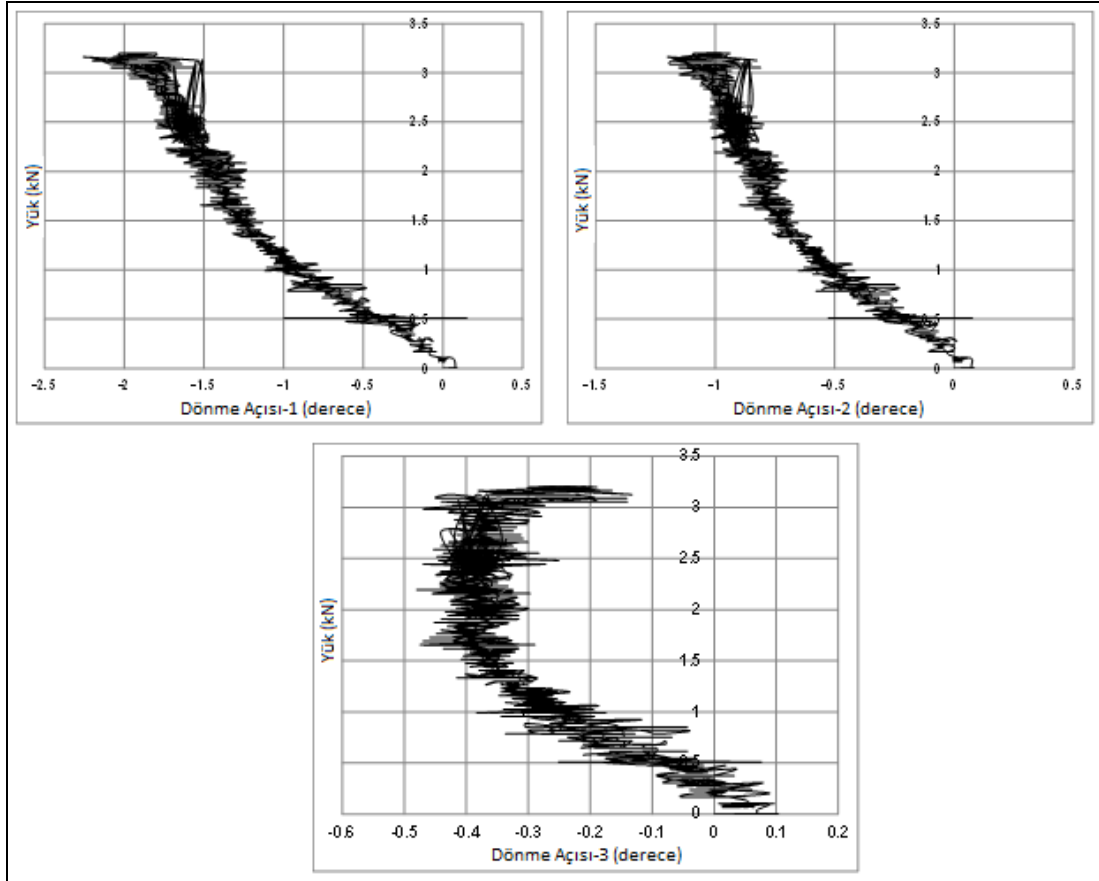
Profilin yük-yatay deformasyon grafiği Şekil 5.10'da, yük-düşey deformasyon grafiği Şekil 5.11'de, üç farklı noktadan alınan dönme açılarları değerleri ise yük ile grafiğe dökülerek Şekil 5.12'de gösterilmektedir.



Şekil 5.10. Deney elemanı 4 için yük - düşey deplasman grafiği



Şekil 5.11. Deney elemanı 4 için yük - yatay deplasman grafiği



Şekil 5.12. Deney elemanı 4 için yük – burulma açısı grafiği

5.5. Deney Elemanı-5

Deney elemanı 5 için $L=2500\text{mm}$ uzunluğuna sahip ve mekanik özellikleri kupon deneyi ile belirlenmiş olan numune kullanılmıştır. Yükleme alt başlıktan kaynatılmış olan ilave plaka yardımı ile hidrolik pompa kullanılarak elle yapılmış olup, profilin yük uygulanmamış hali ve yükleme yapıldıktan sonra numunenin deforme olmuş hali Resim 5.6'da gösterilmektedir.

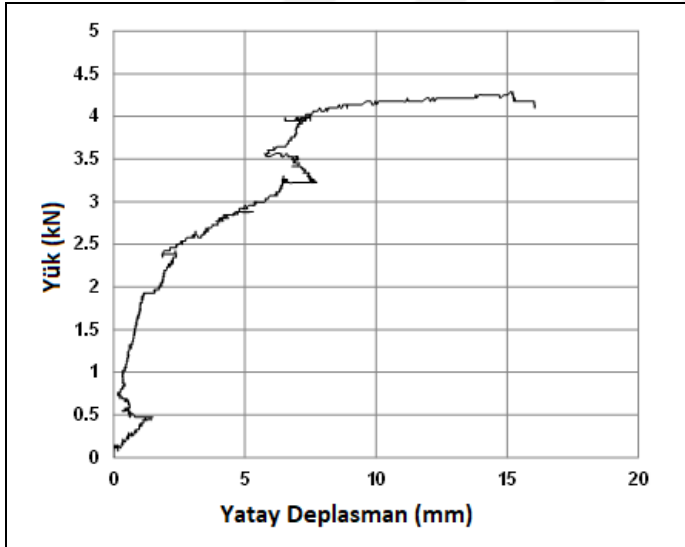


Resim 5.6. Deney elemanı-5 için deforme olmuş ve olmamış hal

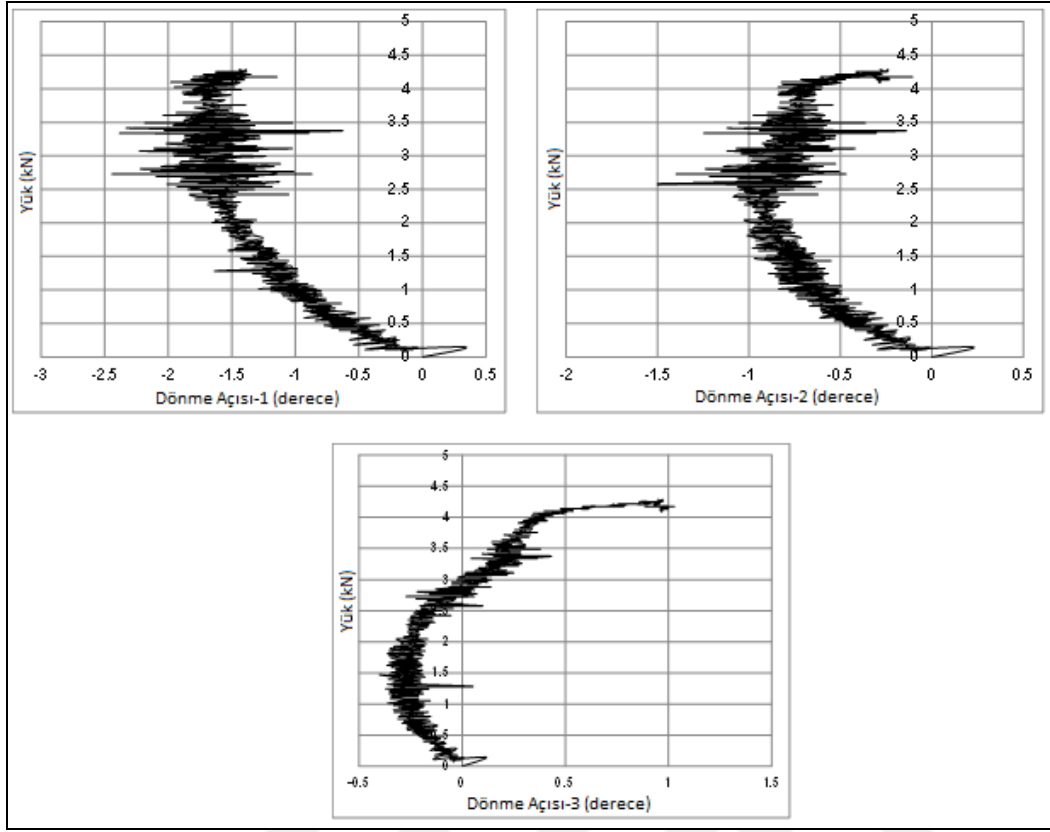
Profilin yük-yatay deformasyon grafiği Şekil 5.13'de, yük-düşey deformasyon grafiği Şekil 5.14'de, üç farklı noktadan alınan dönme açılarları değerleri ise yük ile grafiğe dökülerek Şekil 5.15'de gösterilmektedir.



Şekil 5.13. Deney elemanı 5 için yük - düşey deplasman grafiği



Şekil 5.14. Deney elemanı 5 için yük - yatay deplasman grafiği



Şekil 5.15. Deney elemanı 5 için yük – burulma açısı grafiği

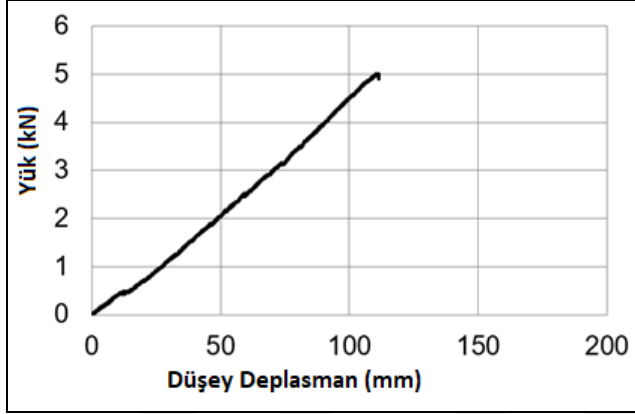
5.6. Deney Elemanı-6

Deney elemanı 6 için $L=2250\text{mm}$ uzunluğuna sahip ve mekanik özellikleri kupon deneyi ile belirlenmiş olan numune kullanılmıştır. Yükleme alt başlıktan kaynatılmış olan ilave plaka yardımı ile hidrolik pompa kullanılarak elle yapılmış olup, profilin yük uygulanmamış hali ve yükleme yapıldıktan sonra numunenin deforme olmuş hali Resim 5.7’de gösterilmektedir.

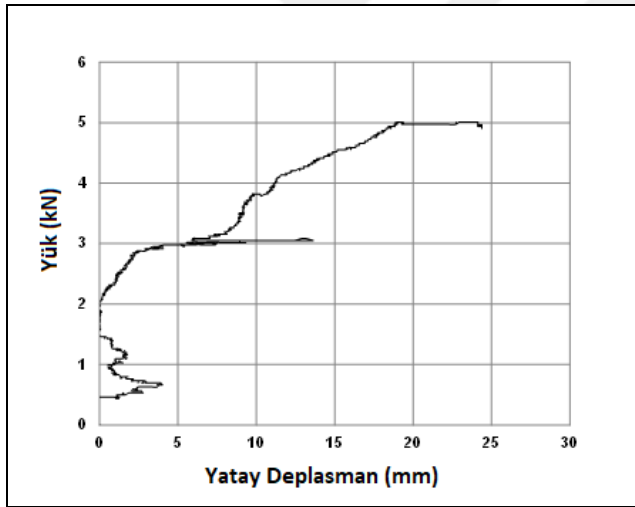


Resim 5.7. Deney elemanı-6 için deforme olmuş ve olmamış hal

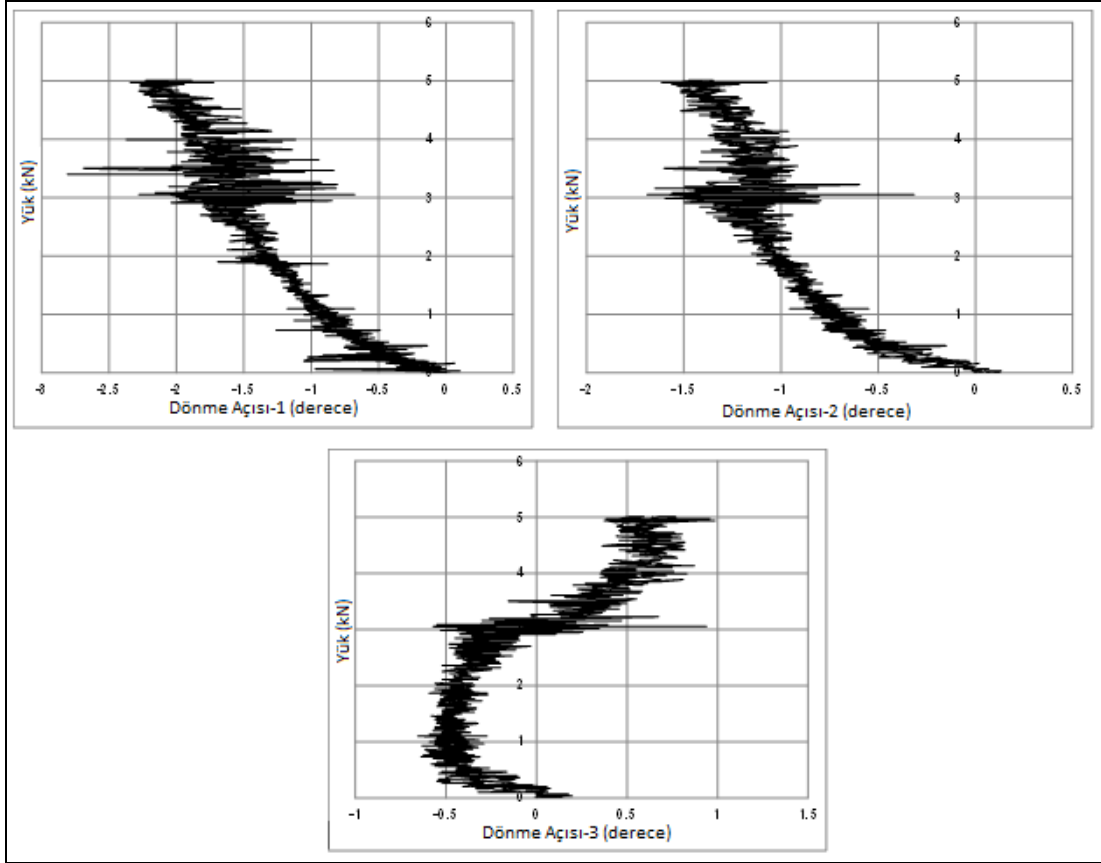
Profilin yük-yatay deformasyon grafiği Şekil 5.16'da, yük-düşey deformasyon grafiği Şekil 5.17'de, üç farklı noktadan alınan dönme açları değerleri ise yük ile grafiğe dökülerek Şekil 5.18'de gösterilmektedir.



Şekil 5.16. Deney elemanı 6 için yük - düşey deplasman grafiği



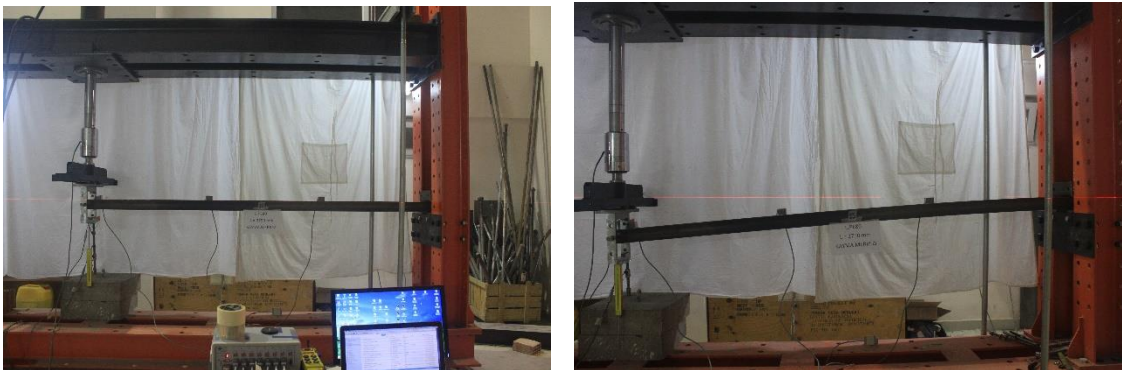
Şekil 5.17. Deney elemanı 6 için yük - yatay deplasman grafiği



Şekil 5.18. Deney elemanı 6 için yük – burulma açısı grafiği

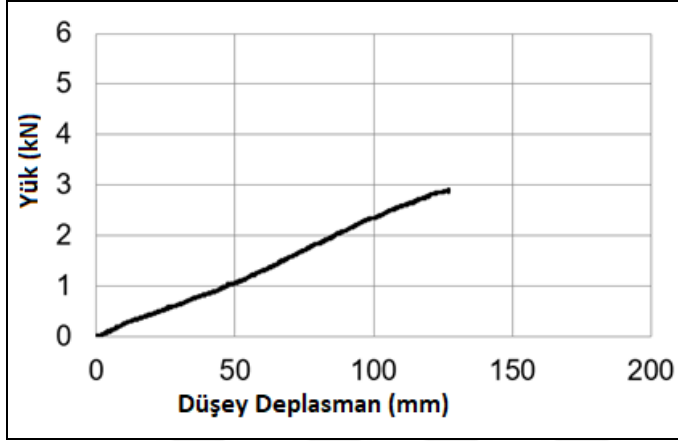
5.7. Deney Elemanı-7

Deney elemanı 7 için $L=2750\text{mm}$ uzunluğuna sahip ve mekanik özellikleri kupon deneyi ile belirlenmiş olan numune kullanılmıştır. Yükleme profilin gövdesinden ve milin rahatça geçebileceği büyüklükte delik açılıp, hidrolik pompa kullanılarak elle yapılmış olup, profilin yük uygulanmamış hali ve yükleme yapıldıktan sonra numunenin deforme olmuş hali Resim 5.8’de gösterilmektedir.

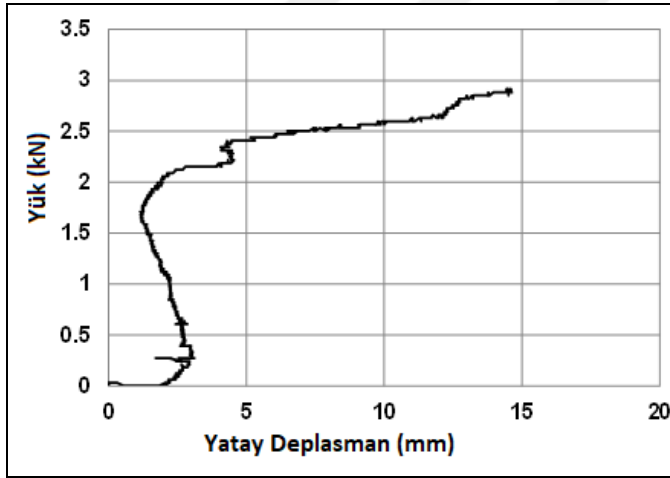


Resim 5.8. Deney elemanı-7 için deforme olmuş ve olmamış hal

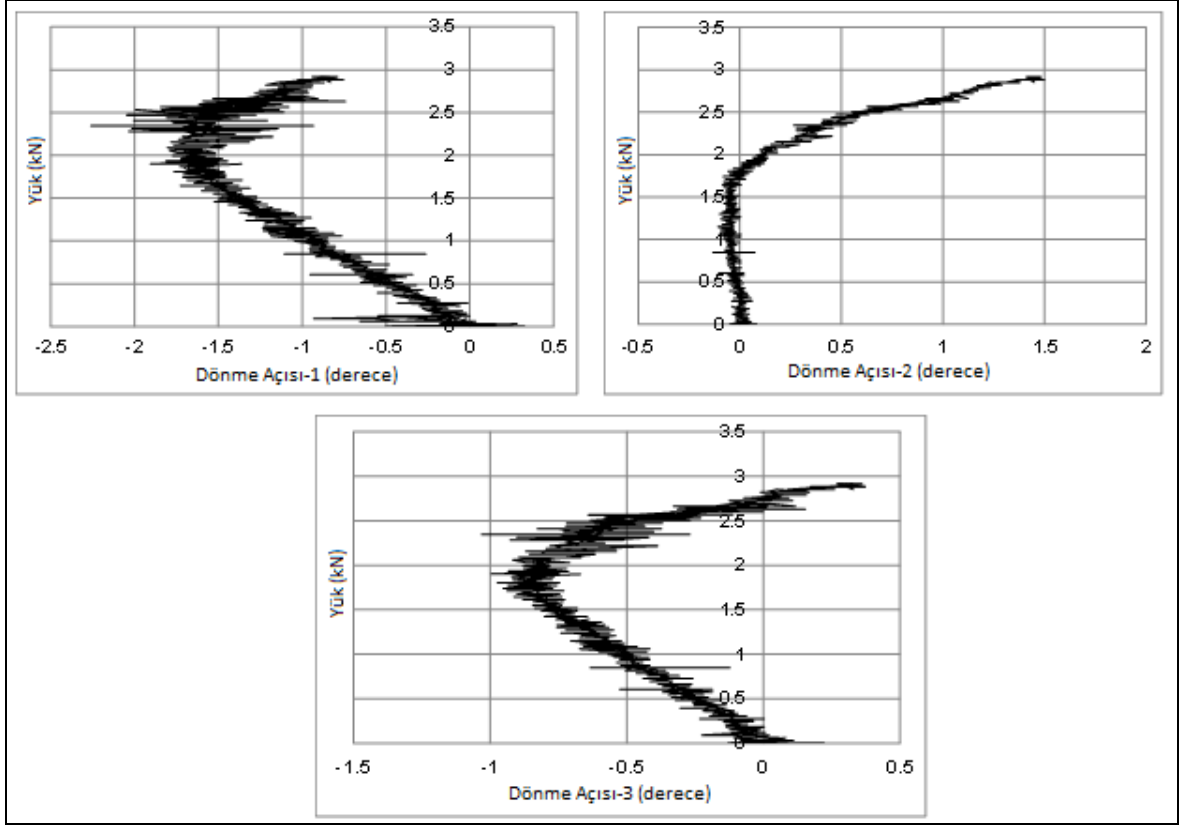
Profilin yük-yatay deformasyon grafiği Şekil 5.19'da, yük-düşey deformasyon grafiği Şekil 5.20'de, üç farklı noktadan alınan dönme açılarları değerleri ise yük ile grafiğe dökülerek Şekil 5.21'de gösterilmektedir.



Şekil 5.19. Deney elemanı 7 için yük - düşey deplasman grafiği



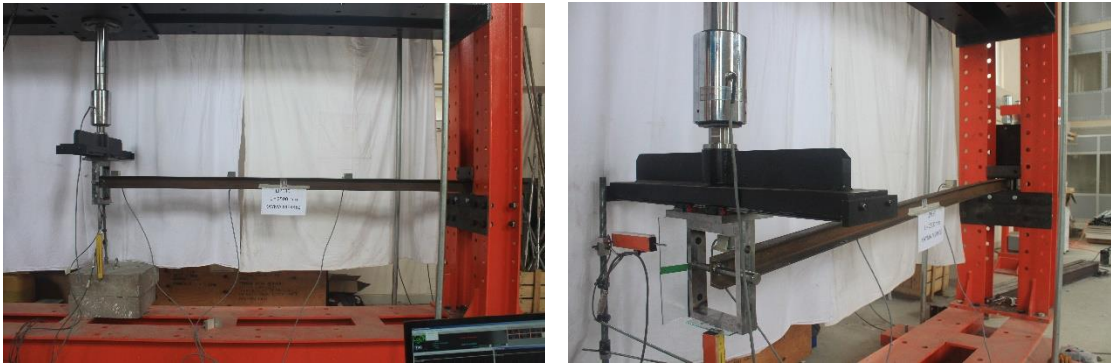
Şekil 5.20. Deney elemanı 7 için yük - yatay deplasman grafiği



Şekil 5.21. Deney elemanı 7 için yük – burulma açısı grafiği

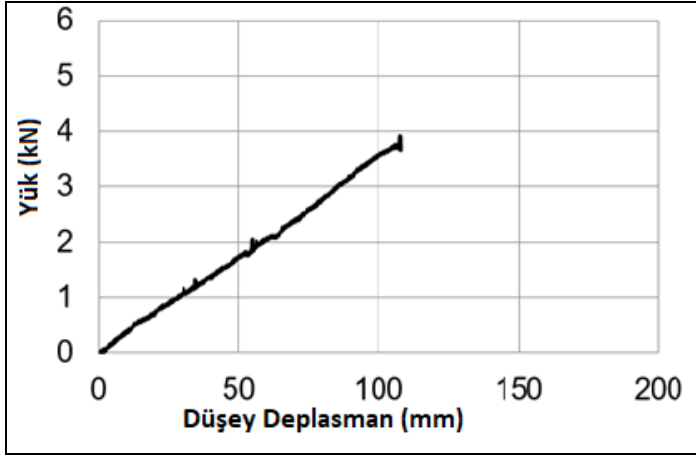
5.8. Deney Elemanı-8

Deney elemanı 8 için $L=2500\text{mm}$ uzunluğuna sahip ve mekanik özellikleri kupon deneyi ile belirlenmiş olan numune kullanılmıştır. Yükleme profilin gövdesinden ve milin rahatça geçebileceği büyüklükte delik açılıp, hidrolik pompa kullanılarak elle yapılmış olup, profilin yük uygulanmamış hali ve yükleme yapıldıktan sonra numunenin deforme olmuş hali Resim 5.9’da gösterilmektedir.

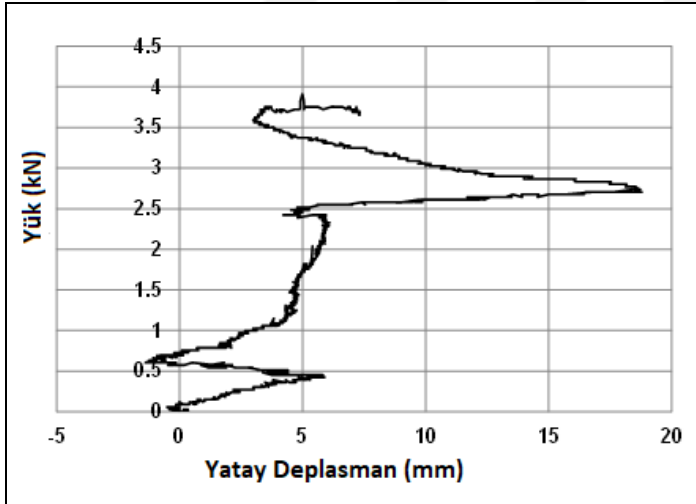


Resim 5.9. Deney elemanı-8 için deforme olmuş ve olmamış hal

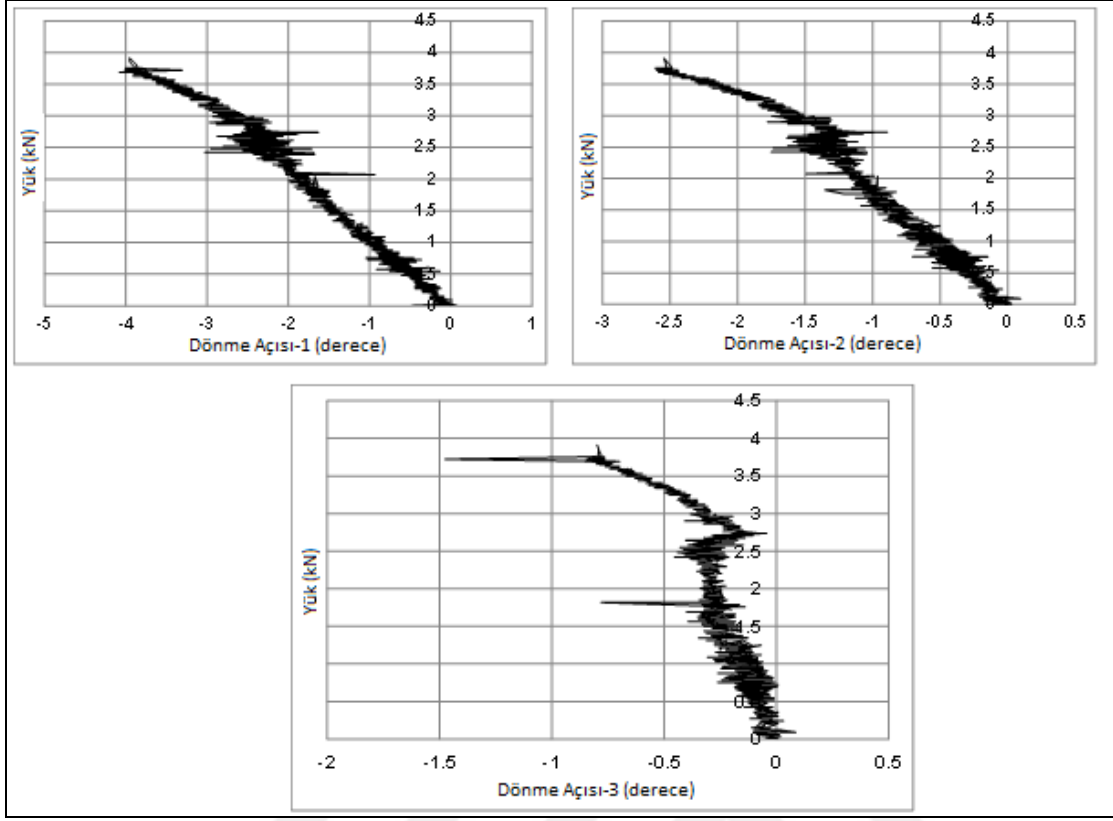
Profilin yük-yatay deformasyon grafiği şekil 5.22’de, yük-düşey deformasyon grafiği şekil 5.23’de, üç farklı noktadan alınan dönme açıları değerleri ise yük ile grafiğe dökülerek şekil 5.24’de gösterilmektedir.



Şekil 5.22. Deney elemanı 8 için yük - düşey deplasman grafiği



Şekil 5.23. Deney elemanı 8 için yük - yatay deplasman grafiği



Şekil 5.24. Deney elemanı 8 için yük – burulma açısı grafiği

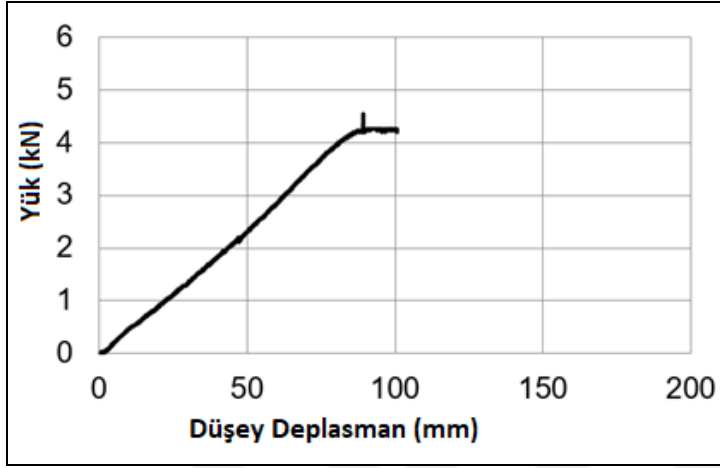
5.9. Deney Elemanı-9

Deney elemanı 9 için L=2250mm uzunluğuna sahip ve mekanik özellikleri kupon deneyi ile belirlenmiş olan numune kullanılmıştır. Yükleme profilin gövdesinden ve milin rahatça geçebileceği büyüklükte delik açılıp, hidrolik pompa kullanılarak elle yapılmış olup, profilin yük uygulanmamış hali ve yükleme yapıldıktan sonra numunenin deforme olmuş hali Resim 5.10'da gösterilmektedir.

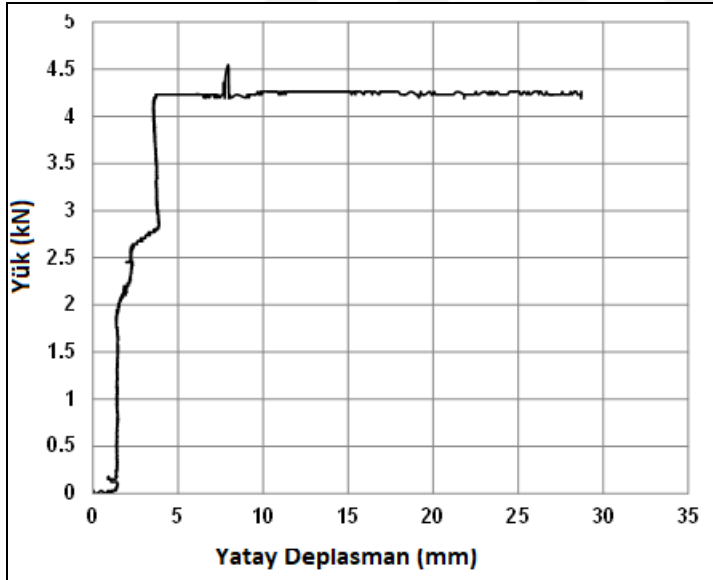


Resim 5.10. Deney elemanı-9 için deforme olmuş ve olmamış hal

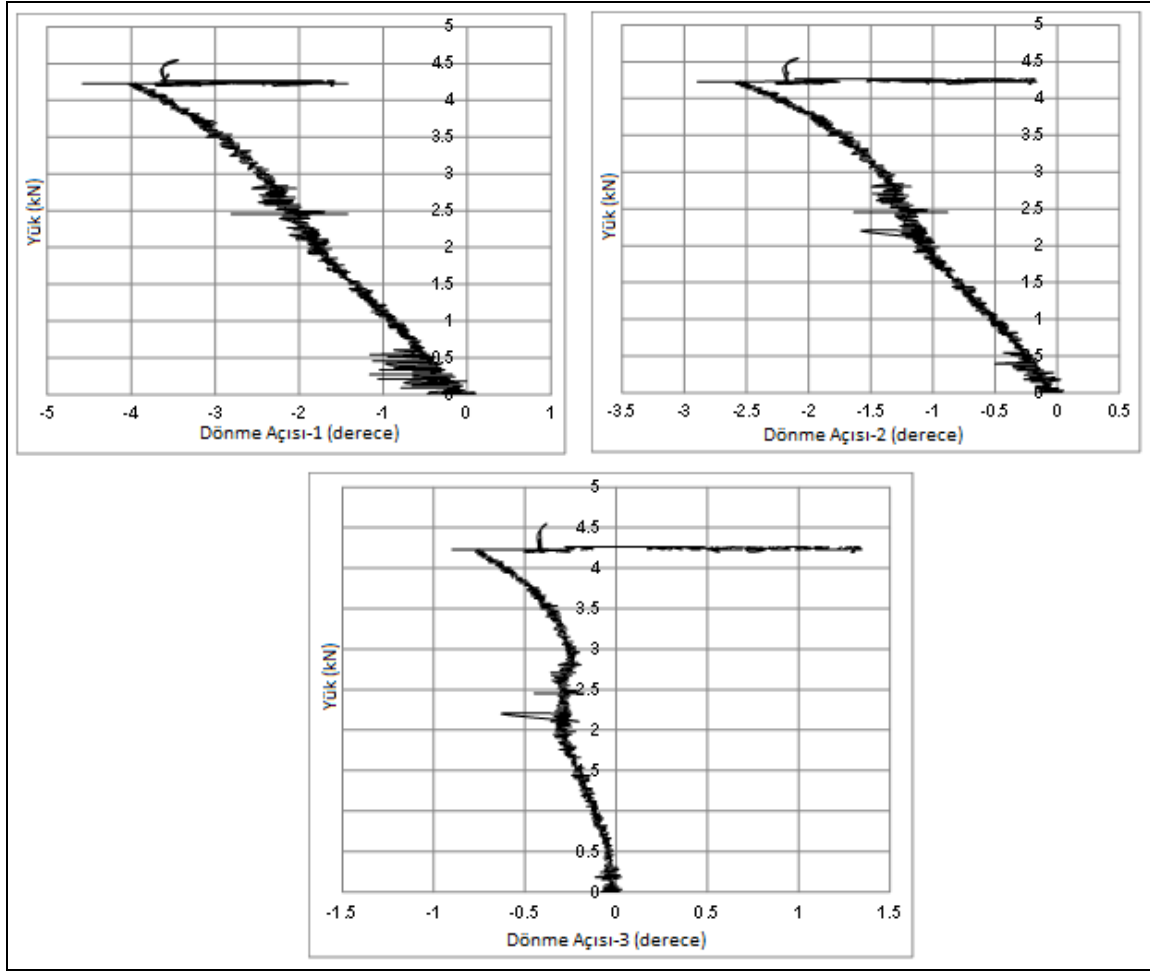
Profilin yük-yatay deformasyon grafiği Şekil 5.25'de, yük-düşey deformasyon grafiği Şekil 5.26'da, üç farklı noktadan alınan dönme açılarları değerleri ise yük ile grafiğe dökülerek Şekil 5.27'de gösterilmektedir.



Şekil 5.25. Deney elemanı 9 için yük - düşey deplasman grafiği



Şekil 5.26. Deney elemanı 9 için yük-yatay deplasman grafiği



Şekil 5.27. Deney elemanı 9 için yük – burulma açısı grafiği

6. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde yapılan deneylerin ve deneyler sonucunda elde edilen verilerin değerlendirilmesi yapılmıştır. Deneyler 3 adet 2250mm, 3 adet 2500mm ve 3 adet 2750mm uzunluğuna sahip toplam 9 adet UPE80 çelik profil üzerinde gerçekleştirilmiştir. Yükleme konsol kirişin serbest ucundan yapılmış olup değişen parametrelerden bir tanesi profilin üst başlık, alt başlık ve gövdesinden yükleme yapılması olmuştur. Yanal burulmalı burkulma dayanımı için araştırılan diğer parametre ise konsol boyudur. Deneylere UPE80 ince cidarlı çelik konsol kirişlerin yatay burulmalı burkulma göçme mekanizması oluşup kirişlerin stabilitelerini kaybettikleri ana kadar devam edilmiş ve elde edilen sonuçlar analitik ortama aktarılmıştır.

Yapılan deneyler neticesinde 5. bölümde detaylı bir şekilde verilen kesme kuvveti – konsol serbest ucunda oluşan yatay deplasman, kesme kuvveti – konsol serbest ucunda oluşan düşey deplasman ve kesme kuvveti – konsol serbest ucunda oluşan dönme açısı grafikleri elde edilmiştir. Burulma açısı ölçülürken konsol serbest ucunda oluşan dönmeler hariç 2 farklı noktadan daha burulma açısı değerleri ölçülmüştür. Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlar Çizelge 6.1 ve Çizelge 6.2’de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Deney sonuçları

Elem. No	Kesit	Yük Konumu	Uzunluk (mm)	Maksimum Taşıma Gücü (kN)	Maksimum Deplasman (mm)		Maksimum Konsol Ucu Burulma Açısı (derece)	Maks. Yükte Rijitlik (kN/mm)	Enerji Tüketim Kapasitesi (kN-mm)
					Düşey	Yatay			
1	UPE80	Üst Başlık	2750	2,65	109,1	10,56	2,061	0,0243	138,07
2	UPE80	Üst Başlık	2500	3,16	102,2	13,38	2,142	0,0309	156,46
3	UPE80	Üst Başlık	2250	4,26	98	20,83	2,632	0,0435	219,94
4	UPE80	Alt Başlık	2750	3,2	137,5	12,44	2,397	0,0233	220,1
5	UPE80	Alt Başlık	2500	4,29	128,8	16,06	2,751	0,0333	260,94
6	UPE80	Alt Başlık	2250	5,01	111,6	24,38	3,117	0,0449	266,72
7	UPE80	Gövde	2750	2,92	127,1	14,61	2,586	0,023	182,17
8	UPE80	Gövde	2500	3,91	107,8	18,79	4,157	0,0363	200,14
9	UPE80	Gövde	2250	4,55	100,8	28,72	4,685	0,0451	237,87

Çizelge 6.2. Kiriş boyunca maksimum burulma açıları değişimi

Eleman No	Profil Kesiti	Uzunluk (mm)	Yükleme Konumu	Burulma Açıları (derece)		
				1	2	3
1	UPE80	2750	Üst Başlık	2.061	1.151	0.276
2	UPE80	2500	Üst Başlık	2.142	1.392	0.516
3	UPE80	2250	Üst Başlık	2.632	1.678	1.392
4	UPE80	2750	Alt Başlık	2.397	1.281	0.584
5	UPE80	2500	Alt Başlık	2.751	1.730	1.429
6	UPE80	2250	Alt Başlık	3.117	1.977	1.641
7	UPE80	2750	Gövde	2.586	1.633	1.404
8	UPE80	2500	Gövde	4.157	2.708	1.561
9	UPE80	2250	Gövde	4.685	2.945	2.245

Çizelge 6.1’de yük konumu ve konsol kiriş boyuna bağlı olarak deneylerin sonucunda elde edilmiş olan elemanların 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 6.2’de ise kiriş boyunca ölçümü alınan 3 farklı noktadaki burulma açısı değerleri gösterilmiştir.

UPE 80 çelik konsol kirişler üzerinde yapılan deneylerde araştırılan ilk değişken konsol kiriş uzunluğudur. 3 farklı konsol kiriş boyu üzerinde gerçekleştirilen deneyler sonucunda kirişlerin boyları kısaldıkça konsol kirişlerin maksimum taşıma gücü değerlerinin önemli ölçüde arttığı gözlenmiştir. Konsol kirişlerin uç noktalarına uygulanan kesme kuvveti etkisi ile meydana gelen yatay deplasman değerlerinin ve konsol ucunda ölçülen maksimum burulma açısı değerlerinin de artış gösterdiği gözlenmiştir. Ancak UPE80 çelik konsol kirişlerin uzunluğu azalırken düşey deplasman değerlerinde azalma meydana geldiği gözlenmiştir. Elde edilen bu davranış trendi UPE80 çelik profil kirişlere alt başlık, üst başlık ve gövdeden yapılan 3 farklı yüklenme durumu için de benzer olduğu görülmüştür.

6.1. Konsol Boyuna Bağlı Olarak Deney Sonuçlarının Yorumlanması

Kesit üzerindeki her üç yüklenme noktası içinde UPE80 çelik konsol kirişlerin boyu 2750 mm’den 2500 mm’ye düştüğünde maksimum taşıma gücü değerleri ortalama %29, 2500 mm’den 2250 mm’ye düştüğünde ise ortalama olarak %23 oranında artış göstermiştir.

UPE80 çelik konsol kirişin serbest ucundan alınan maksimum düşey deplasman değerleri konsol boyunun 2750 mm'den 2500 mm'ye düşmesiyle ortalama %10, 2500 mm'den 2250 mm'ye düştüğünde ise ortalama %9 oranında azalım göstermiştir. Bu durum alt başlık, üst başlık ve gövdeden olmak üzere 3 durum içinde benzer sonuçlar vermiştir.

UPE80 çelik konsol kirişin serbest ucundan alınan maksimum yatay deplasman değerlerinde ise konsol boyunun 2750 mm'den 2500 mm'ye düşmesiyle ortalama %28, 2500 mm'den 2250 mm'ye düşmesiyle ortalama %53 oranında artış göstermiştir. Bu durum alt başlık, üst başlık ve gövdeden olmak üzere 3 durum içinde benzer sonuçlar vermiştir.

İnce cidarlı UPE80 çelik konsol kirişlerin kesme kuvvetinin uygulandığı serbest konsol ucundan ölçülen maksimum burulma açısı değerleri de çelik kirişlerin boyları kısaltıkça artış göstermiş ve her üç yükleme noktası için de konsol boyunun 2750 mm'den 2500 mm'ye düşmesiyle ortalama %26, kiriş boylarının 2500 mm'den 2250 mm'ye düşmesiyle ortalama %16 oranında artış göstermiştir.

6.2. Yükleme Noktasına Bağlı Olarak Deney Sonuçlarının Yorumlanması

Deneysel çalışmada incelen bir diğer parametre ise konsol kiriş üzerinde serbest uçtan yapılan yüklenme noktasının yeridir. Alt başlık, üst başlık ve gövdeden olmak üzere üç farklı noktadan yükleme yapılmış ve elde edilen sonuçlar bu bölümde yorumlanmıştır.

İnce cidarlı UPE80 çelik konsol kirişlerin maksimum taşıma gücü değerleri kesme kuvvetinin uygulanma noktasından etkilenmiştir. Deneysel programda yer alan deney elemanları içerisinde en büyük maksimum taşıma gücü değerlerini kesme kuvvetinin UPE80 çelik profilin alt başlığına uygulandığı deney elemanlarında gözlemlendiği belirlenmiştir. Kesme kuvvetinin UPE80 çelik konsol kirişlerin alt başlığına uygulandığı deney elemanları, yüklemenin kesit gövdesine uygulandığı deney elemanlarından ortalama %10 daha fazla maksimum taşıma gücü kapasitesine ulaşmıştır. Kesme kuvvetinin UPE80 çelik konsol kirişlerin kesit gövdesine uygulandığı deney elemanları, yüklemenin üst başlığa uygulandığı deney elemanlarından ise ortalama %14 daha fazla maksimum taşıma gücü değerleri sergilemişlerdir.

Deneysel çalışmada en büyük düşey deplasman değerlerini yüklemenin kesit alt başlığına uygulandığı deney elemanlarında gözlemlendiği görülmüştür. Kesme kuvveti alt başlığına

etkitilen deney elemanları, yüklemenin kesit gövdesi üzerine etkitildiği deney elemanlarından ortalama 13% daha fazla maksimum konsol ucu düşey deplasman değerleri sergilemişlerdir. Kesme kuvveti kesit üzerinde gövdeye etkileyen çelik konsol kirişlerin ucundan ölçülen maksimum düşey deplasman değerlerinin ise, yüklemenin kesit üzerinde üst başlığa etkitilen deney elemanlarından ortalama 8% daha büyük olduğu belirlenmiştir.

UPE80 çelik konsol kiriş 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 etkilediği deney elemanlarından ölçülen maksimum yatay deplasman değerleri, yüklemenin alt başlığa etkitildiği deney elemanlarından ortalama 17% daha büyük elde edilmiştir. Yüklemenin kesit üzerinde alt başlığa etkilediği deney elemanlarından ölçülen maksimum yatay deplasman değerleri yüklemenin üst kesit başlığına yapıldığı çelik kirişlerden ortalama 18% daha fazladır.

Aynı davranış trendi çelik konsol kirişlerin ucundan ölçülen maksimum burulma açısı değerleri için de gözlenmiştir. Deneysel seride en büyük konsol ucu burulma açısı değerleri yüklemenin kiriş gövdesine uygulandığı deney elemanlarında meydana geldiği görülmüştür. Kesme kuvvetinin çelik konsol kirişlerin gövdesine etkitildiği deney elemanlarından ölçülen maksimum konsol ucu burulma açıları, yüklemenin kesit üzerinde alt başlığa etkitilen deney elemanlarından ortalama 36% oranında çok daha büyük elde edilmiştir. Konsol kiriş uç noktasından ölçülen maksimum burulma açısı değerleri yüklemenin kiriş alt başlığına etkimesi durumunda, yüklemenin kiriş üst başlığına etkitildiği deney elemanlarına göre ortalama 21% daha büyük ölçüldüğü belirlenmiştir. Deney elemanlarında meydana gelen burulma açıları 4.69° ile 2.06° arasında değişim göstermiş ve çelik konsol kirişlerin uç noktasında ortalama 2.95° maksimum burulma açısı değerleri meydana gelmiştir.

Ayrıca, Çelik 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 doğrunun eğimi hesaplanarak elde edilmiştir. Hesaplanan rijitlik değerleri incelendiğinde çelik konsol kirişlerin boyları kısaltıldıkça rijitlik değerlerinin de artış gösterdiği görülmektedir. İnce cıdarlı UPE80 çelik

konsol kirişlerin boyu 2750 mm'den 2500 mm'ye azaldığında maksimum taşıma gücü için hesaplanan rijilik değerlerinin ortalama 43% oranında, konsol boyu 2500 mm'den 2250 mm değerine düştüğünde ise ortalama 33% oranında artış gösterdiği hesaplanmıştır.

UPE80 çelik 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 tüketilen enerji kapasitesi değerleri incelendiğinde UPE80 çelik konsol kiriş boyu azaldıkça enerji tüketim kapasitesi değerlerinin de arttığı görülmüştür. İnce cıdarlı UPE80 çelik konsol kiriş deney elemanlarının boyları 2750 mm'den 2500 mm değerine azaldığında enerji tüketim kapasitesi değerlerinin ortalama 14%, kiriş boyları 2500 mm'den 2250 mm'ye düştüğünde ise ortalama 21% oranında artış gösterdiği hesaplanmıştır. Deneysel çalışma kapsamında en büyük enerji tüketim kapasitesi değerlerini kiriş kesiti üzerinde alt başlıktan yüklenen deney elemanlarının sergilediği belirlenmiştir. Kiriş kesiti üzerinde alt başlıktan kesme kuvveti ile yüklenen çelik konsol kiriş deney elemanları, kesit üzerinde gövdeden yüklenen deney elemanlarından ortalama 21% daha büyük enerji tüketim kapasitesi değerlerine sahiptir. Kesit üzerinde gövdeden yük uygulanan çelik konsol kirişler ise üst başlıktan yüklenerek test edilen kirişlerden ortalama 23% oranında daha fazla enerji tüketim kapasitesi sergilemişlerdir. Deneysel çalışmada daha fazla düşey deplasman yaparak kesit üzerinde alt başlıktan yüklenen ince cıdarlı UPE80 çelik konsol kiriş deney elemanları daha fazla enerji tüketim kapasitesi değerleri sergilemişlerdir.



7. SONUÇ VE ÖNERİLER

İnce cidarlı çelik yapı elemanlarının günümüz inşaat dünyasında kullanım alanı bir hayli fazladır. Bu elemanlar betonarme gibi diğer yapı elemanlarına kıyasla daha hafif sonuçlar verebilmekte ve ekonomikliğe katkısı nedeniyle tercih edilebilir olmaktadır. İnce cidarlı bu yapı elemanları üzerinde karşılaşılabilecek önemli bir problem yanal burulmalı burkulma (stabilite bozulması) problemidir. Ancak bilgisayar teknolojisinin de hızla ilerlemesiyle birlikte yanal burulmalı burkulma davranışının analitik ve nümerik analizleri daha sağlıklı bir şekilde elde edilip incelenebilmektedir. Yapılan literatür taraması çalışmalarının sonucunda UPE tipi çelik profiller için yanal burkulma üzerine yapılmış detaylı bir çalışmanın bulunmadığı görülmüştür. Bu nedenle boyutları 2250 mm, 2500 mm ve 2750 mm olan 9 adet UPE80 profil üzerinde deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. 3 farklı uzunlukta konsol kiriş, kesit üzerinde 3 farklı noktadan konsol ucuna uygulanan kesme kuvveti etkisinde LTB göçme mekanizması meydana gelene kadar monotonik olarak artan yükleme etkisinde test edilmiş, kirişlerin limit burkulma yükleri, konsol ucu düşey, yatay deplasmanları ve maksimum burulma açısı değerleri ölçülerek yorumlanmıştır. Ayrıca deneysel çalışma sonucunda elde edilen kesme kuvveti-konsol ucu düşey deplasman grafikleri kullanılarak hesaplanan rijitlik ve enerji tüketim değerleri de incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

Çalışmada değişen parametreler:

1. Konsol Kiriş Boyu
 2. Kesme Kuvveti Uygulama Noktası
- İnce cidarlı UPE80 çelik konsol kirişlerin boyları kısaltıldıkça konsol kirişlerin maksimum taşıma gücü değerlerinin arttığı, konsol kirişlerin uç noktalarına uygulanan kesme kuvveti etkisi ile meydana gelen yatay deplasmanların ve konsol ucundan ölçülen maksimum burulma açısı değerlerinin de artış gösterdiği, düşey konsol uç deplasmanı değerlerinin ise azalım gösterdiği belirlenmiştir.
 - Deneysel programda yer alan deney elemanları içerisinde en büyük maksimum taşıma gücü değerlerini kesme kuvvetinin UPE80 çelik profilin alt başlığına uygulandığı deney elemanlarında gözlendiği belirlenmiştir. Kesme kuvvetinin UPE çelik konsol kirişlerin alt başlığına uygulandığı deney elemanları, yüklemenin kesit gövdesine uygulandığı

deney elemanlarından ortalama 10% daha fazla maksimum taşıma gücü kapasitesine ulaşmıştır. Kesme kuvvetinin UPE çelik konsol kirişlerin gövdesine uygulandığı deney elemanları, yüklemenin kesit üst başlığına uygulandığı deney elemanlarından ise ortalama 14% daha fazla maksimum taşıma gücü değerleri sergilemişlerdir.

- UPE çelik konsol kiriş deney elemanlarında meydana gelen burulma açıları 4.69° ile 2.06° arasında değişim göstermiş ve çelik konsol kirişlerin uç noktasında ortalama 2.95° maksimum burulma açısı değerleri meydana gelmiştir.
- Hesaplanan rijitlik değerleri incelendiğinde çelik konsol kirişlerin boyları kıaldıkça rijitlik değerlerinin de artış gösterdiği görülmektedir.
- Deneysel çalışmada maksimum taşıma gücünde en büyük rijitlik değerlerini çelik kiriş kesiti üzerinde gövdeden yüklenen deney elemanlarının sergilediği belirlenmiştir.
- Deney elemanlarına uygulanan kesme kuvveti etkisiyle tüketilen enerji kapasitesi değerleri incelendiğinde çelik konsol kiriş boyu azaldıkça enerji tüketim kapasitesi değerlerinin arttığı görülmüştür.
- Deneysel çalışma kapsamında en büyük enerji tüketim kapasitesi değerlerini kiriş kesiti üzerinde alt başlıktan yüklenen deney elemanlarının sergilediği belirlenmiştir.
- Deneysel çalışmada daha fazla düşey deplasman yaparak göçmeye ulaşan kesit üzerinde alt başlıktan yüklenen çelik konsol kiriş deney elemanları daha fazla enerji tüketim kapasitesi değerleri sergilemişlerdir.

Konsol boyundaki değişime bağlı olarak deney sonuçlarındaki artış oranları çizelge 7.1, kesme kuvvetinin uygulanma noktasına göre deney sonuçları çizelge 7.2, kesme kuvvetinin uygulanma noktasındaki değişime bağlı olarak deney sonuçlarında meydana gelen artış oranları çizelge 7.3'de verildiği gibidir.

Çizelge 7.1. Konsol boyundaki değişime bağlı olarak deney sonuçlarındaki artış oranları

Deney Sonuçları	Konsol Boyundaki Değişim (mm)	Ortalama Artış-Azalış Oranı
Maksimum Taşıma Gücü	2750 --> 2500	29%
	2500 --> 2250	23%
Maksimum Düşey Deplasman	2750 --> 2500	-10%
	2500 --> 2250	-9%
Maksimum Yatay Deplasman	2750 --> 2500	28%
	2500 --> 2250	53%
Maksimum Burulma Açısı Değerleri	2750 --> 2500	26%
	2500 --> 2250	16%
Rijitlik Değerleri	2750 --> 2500	43%
	2500 --> 2250	33%
Enerji Tüketim Kapasitesi	2750 --> 2500	14%
	2500 --> 2250	21%

Çizelge 7.2. Kesme kuvvetinin uygulanma noktasına göre deney sonuçları

Deney Sonuçları	Kesme Kuvvetinin Yeri
En büyük maksimum taşıma gücü değerleri	Alt başlıktan yapılan yükleme
En büyük düşey deplasman değerleri	Alt başlıktan yapılan yükleme
En büyük yatay deplasman değerleri	Alt başlıktan yapılan yükleme
En büyük konsol ucu burulma açısı değerleri	Kiriş gövdesinden yapılan yükleme
Maksimum taşıma gücünde en büyük rijitlik değerleri	Kiriş gövdesinden yapılan yükleme
En büyük enerji tüketim kapasitesi değerleri	Alt başlıktan yapılan yükleme

Çizelge 7.3. Kesme kuvvetinin uygulanma noktasındaki değişime bağlı olarak deney sonuçlarındaki artış oranları

Deney Sonuçları	Kesme Kuvvetinin Yeri	Artış Oranı
Maksimum Taşıma Gücü	Gövde--> Alt Başlık	10%
	Üst Başlık --> Gövde	14%
Maksimum Düşey Deplasman	Gövde --> Alt Başlık	13%
	Üst Başlık --> Gövde	8%
Maksimum Yatay Deplasman	Alt Başlık --> Gövde	17%
	Üst Başlık --> Alt Başlık	18%
Maksimum Burulma Açısı Değerleri	Gövde --> Alt Başlık	36%
	Üst Başlık --> Alt Başlık	21%
Enerji Tüketim Kapasitesi	Gövde --> Alt Başlık	21%
	Üst Başlık --> Gövde	23%

7.1. Öneriler

Yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar neticesinde, aşağıdaki öneriler sunulabilir.

Yapılan deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar neticesinde, ince cidarlı elemanlar için yanal burulmalı burkulma stabilite probleminin tasarım aşamasında dikkate alınması gerektiği ve büyük burulma rijitliğini karşılayacak şekilde tasarlanması veya yanal hareketi önleyen elastik mesnetlerle rijitliklerinin atırılması gerektiği böylece sistemin stabilitesini kaybetmemiş olacağı sonucuna varılmıştır.

Yanal burulmalı burkulma üzerine yapılacak olan deneysel çalışmalarda tek eksenli simetrik olan UPE tipi profiller için serbest uçtan yapılan tekil yüklemelerde monotonik artan kesme kuvvetine karşılık olarak düşey deformasyon değerlerinin yüksek olmasından dolayı (2750mm alt başlıktan yüklenen deney numunesinde 3,2 kN yüke karşılık 137,2mm deformasyon gibi) düşey yönde ölçülebilecek deformasyon değeri çok kısıtlı olmakta elemanlar kiritk değere ulaşmayabilmektedir. Bu sebepten ötürü konsol kiriş boyunun daha kısa tutularak monotonik artan yüklemeye altında kritik yüke ulaşmasının daha sağlıklı gerçekleşebileceği önerilebilir.

KAYNAKLAR

1. Attard, M. M. (1985). Lateral buckling analysis of beams by the FEM. *Computer And Structure*, 23(2), 217-231.
2. Shu, T. G. and Fan, C. S. (1988). Buckling of laterally and torsionally braced beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 11, 41-55.
3. Valentino, J. and Trahair, N. S. (1998). Torsional restraint against elastic lateral buckling. *Journal of Structural Engineering*, 124, 1217-1225.
4. Lee, J., Kim, S. E. and Hong, K. (2002). Lateral buckling of I-Section composite beams. *Engineering Structures*, 24, 955-964.
5. Qiao, P., Zou, G. and Davalos, J. F. (2003). Flexural-torsional buckling of fiber-reinforced plastic composite cantilever I-beams. *Composite Structures*, 60, 205-217.
6. Shan, L. and Qiao, P. (2005). Flexural-torsional buckling of fiber-reinforced plastic composite open channel beams. *Composite Structures*, 48, 211-224.
7. Chu, X. T., Rickard, Y. and Li, L. Y. (2005). Influence of lateral restraint on lateral torsional buckling of cold-formed steel purlins. *Thin-Walled Structures*, 43, 800-810.
8. Güneş, B., Bilgen, Y., Çelik, T., Damcı, E. ve Öztörün, N. M. (2005). *İnce cidarlı yapı elemanlarında yanıl burkulma kritik yükü hesabı için farklı bir yöntem*. II. Mühendislik Bilimleri Genç Araştırmacılar Kongresi, İstanbul.
9. Aydın, M. R., ve Doğan, M. (2006). Eğilme zorlaması altında bulunan çelik korniyerlerin elastik, tam plastik ve yanıl burulma burkulmalı dayanımları. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 19, 84-112.
10. Samanta, A. and Kumar, A. (2008). Distortional buckling in braced-cantilever I-beams. *Thin-Walled Structures*, 46, 637-645.
11. Younes, R. M., Abu-Farsakh, G. and Hunati, Y. M. (2009). Effect of welding on lateral-torsional buckling resistance of I-shaped built-up steel. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 4(3), 295-313.
12. Kala, Z. (2013). Elastic lateral torsional buckling of simply supported hot-rolled steel I-beams with random imperfections. *Procedia Engineering*, 57, 504-514.
13. Yuan, W., Kim, B. and Chen, C. (2013). Lateral torsional buckling of steel web tapered tee-section cantilevers. *Journal of Constructional Steel Research*, 87, 31-37.
14. Özbaşaran, H. (2013). *Çelik I Kesitli Konsol Kirişlerin Yanıl Burulmalı Burkulmasının Deneysel ve Analitik Olarak İncelenmesi*, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 107-118.
15. İbrahim, S. A., Dessouki, A. K. and El-Sa'eed S. A. (2014). Lateral buckling behavior and strengthening techniques of coped steel I-beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 108, 11-22.

16. Özbaşaran, H., Aydın, R. and Dogan, M. (2015). An alternative design procedure for lateral-torsional buckling of cantilever I-beams. *Thin-Walled Structures*, 90, 235-242.
17. Winkler, R., Kindmann, R. and Knobloch, M. (2016). Lateral torsional buckling behavior of steel beams - on the influence of the structural system. *Structures*, 11, 178-188.
18. Trahair, N. (2016). Torsion equations for lateral buckling. *Engineering Structures*, 128, 161-165.
19. Tankova, T., Martins, J. P., Silva, L. S., Marques, L., Craveiro, H. D. and Santiago, A. (2017). Experimental lateral-torsional buckling behavior of web tapered I-section steel beams. *Engineering Structures*, 168, 355-370.
20. Bajer, M., Barnat, J., and Pijak, J. (2017). Lateral torsional buckling of selected cross-section types. *Procedia Engineering*, 190, 106-110.
21. Pham, P. V., Mohareb, M. and Fam, A. (2017). Lateral torsional buckling of STEEL beams strengthened with GFRP plate. *Thin-Walled Structures*, 131, 55-57.
22. Zang, W. F. (2017). Symmetric and antisymmetric lateral-torsional buckling of prestressed steel I-beams. *Thin-Walled Structures*, 122, 463-479.
23. Mudenda, K. and Zingoni, A. (2017). Lateral-torsional buckling behavior of hot-rolled steel beams with flange upstands. *Journal of Constructional Steel Research*, 144, 53-64.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : EROĞLU, Hüseyin Erdem
 Uyuğu : .T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 28.08.1991 - Ordu
 Medeni hali : Bekâr
 Telefon : 0 (538) 300 42 00
 e-mail : hn.erdemeroğlu@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi / İnşaat Mühendisliği	Devam Ediyor
Lisans	Karadeniz Teknik Üniversitesi / İnşaat Mühendisliği	2014
Lise	Perşembe Anadolu Lisesi	2009

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2018-Halen	Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı	İnşaat Mühendisi
2014-2015	Gen Mühendislik Ltd. A.Ş.	Statik Tasarım Müh.

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Eroğlu, H. E. (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

-



GAZİ GELECEKTİR..