

**LİNEER EYLEYİCİLERDE KULLANILAN SİLİNDİRİK  
BORULARIN BURKULMA DAVRANIŞLARININ  
İNCELENMESİ**

**Fatih DEMİR**



T.C.  
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**LİNEER EYLEYİCİLERDE KULLANILAN SİLİNDİRİK BORULARIN  
BURKULMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

Fatih DEMİR  
0000-0002-6607-2731

Prof. Dr. Ali DURMUŞ  
(Danışman)  
0000-0003-2487-7344

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2021  
**Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ ONAYI

Fatih DEMİR tarafından hazırlanan “LİNEER EYLEYİCİLERDE KULLANILAN SİLİNDİRİK BORULARIN BURKULMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman** : Prof. Dr. Ali DURMUŞ

**Başkan** : Prof. Dr. Ali DURMUŞ  
0000-0003-2487-7344  
Bursa Uludağ Üniversitesi,  
Mühendislik Fakültesi,  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı  
İmza

**Üye** : Doç. Dr. Murat Reis  
0000-0001-5853-488X  
Bursa Uludağ Üniversitesi,  
Mühendislik Fakültesi,  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı  
İmza

**Üye** : Dr. Öğr. Üyesi Mümin TUTAR  
0000-0002-7286-3433  
Milli Savunma Üniversitesi,  
Hava Astsubay Meslek Yüksek Okulu,  
Teknoloji Bilimleri Bölümü  
İmza

**Yukarıdaki sonucu onaylarım**

**Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN**  
**Enstitü Müdürü**

.././.....

**Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;**

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

**beyan ederim.**

**09/12/2021**

**Fatih DEMİR**

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### LİNEER EYLEYİCİLERDE KULLANILAN SİLİNDİRİK BORULARIN BURKULMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

**Fatih DEMİR**

Bursa Uludağ Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Prof. Dr. Ali DURMUŞ

Günümüzde otomotiv sektörü başta olmak üzere birçok alanda gazlı ve yaylı piston sistemleri kullanılmaktadır. Hassas ve yüksek kapasiteli üretim noktasında bu sistemler istenilen verimi sağlayamamaktadır. Otomasyon sistemlerinin gelişimiyle birlikte gazlı ve yaylı piston gruplarının yerine, daha verimli ve hareket kontrolü sağlayabilecek elektrikli eyleyiciler tercih edilmeye başlanmıştır. Bu çalışmada eyleyici sistemlerde kullanılan boru profil milinin burkulma davranışı üzerine çalışılmıştır. Elektrikli silindirik eyleyici sistemlerde ürün hareketine bağlı olarak uygulanan bası yükünün, SAE 304 ve AL 6082 malzeme için boru profil milinin üzerindeki burkulma davranışları incelenmiştir. Kritik burkulma yükünün hesaplanması için Rayleigh Oranı metoduyla teorik çözüm elde edilmiş ve deneysel verilerle teorik sonuçlar desteklenmiştir. Deneysel verileri elde etmek adına uygun test düzeneği hazırlanmış,  $L_k=0,7 L$  ve  $L_k= L$  mesnetlenme durumları için farklı malzeme türü, değişken cidar kalınlığı ve farklı boru boylarına bağlı olarak kritik burkulma yükleri hesaplanmıştır. Rayleigh Oranı metoduyla elde edilen teorik çözüm AL6082 malzemesinin  $L_k=0,7 L$  mesnetlenme durumu için çözümlenmiş ve aynı ürünün deneysel sonuçları ile kıyaslanmıştır. Deneysel veriler sonucunda elde edilen kritik yükler incelendiğinde AL 6082 malzemesinden imal edilmiş Ø20x2 boyutlarında boru profilinin kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Elektrikli lineer eyleyici, bagaj kapağı, burkulma, Rayleigh Oranı, burkulma deneyi

**2021, x + 83 sayfa.**

## **ABSTRACT**

MSc Thesis

### **INVESTIGATION OF THE BUCKLING BEHAVIOR OF CYLINDRICAL PIPES USED IN LINEAR ACTUATORS**

**Fatih DEMİR**

Bursa Uludağ University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Mechanical Engineering

**Supervisor:** Prof. Dr. Ali DURMUŞ

Today, gas and spring piston systems are used in many fields, especially in the automotive sector. These systems cannot provide the desired efficiency at the sensitive and high-capacity production. Electric actuators that can provide more efficient and motion control have started to be preferred instead of gas and spring piston groups after the development of automation systems. We study the buckling behaviour of the pipe profile shaft used in actuator systems in this thesis. In electric cylindrical actuator systems, the buckling behaviour of the compressive load applied due to the product movement on the pipe profile shaft for SAE 304 and AL 6082 material are investigated. The theoretical solutions are obtained with the Rayleigh Ratio method and the theoretical results are supported by the experimental data to calculate the critical buckling load. In order to obtain the experimental data, a suitable test setup is prepared and critical buckling loads are calculated for  $L_k=0.7 L$  and  $L_k= L$  support conditions, depending on different material types, variable wall thickness and different pipe lengths. The theoretical solution obtained by the Rayleigh Ratio method is solved for the  $L_k=0.7 L$  support condition of AL6082 material and the results are compared with the experimental results of the same product. When the critical loads obtained as a result of the experimental data are examined, it is concluded that the pipe profile of  $\text{Ø}20 \times 2$  dimensions made of AL 6082 material could be used.

**Key words:** Electric linear actuator, tailgate, buckling, Rayleigh Ratio, buckling test

**2021, x + 83 pages.**

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenim sırasında ve tez çalışmalarım boyunca gösterdiği destek ve yardımlardan dolayı değerli hocam Prof. Dr. Ali DURMUŞ'a, teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmada firma imkanlarını sunan ve yardımlarını esirgemeyen Destek Otomotiv Yan Sanayi ve Tic. A.Ő. şirketinin değerli Yönetim Kurulu Bők. Vekili Makine Yüksek Mühendisi Sabahattin ÖZKAN, Yönetim Kurulu Üyesi Makine Yüksek Mühendisi Emel TAŐYAKAN'a, Ar-Ge bölümü mesai arkadaşlarıma, desteklerinden dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Bursa Kalıp Merkez Metal Form Makina San. ve Tic. A.Ő. şirketinin laboratuvar imkanlarını sunan ve yardımlarını esirgemeyen Teknik Müdür Gürkan CERRAHOĞLUN'a desteklerinden dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Her zaman olduğu gibi bu süreçte de desteklerini hissettiğim DEMİR ailesine içten teşekkürlerimi sunarım.

Fatih DEMİR  
09/12/2021

## İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
1. GİRİŞ.....	11
2. KURAMSAL BİLGİLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	13
3. MATERYAL VE METOD.....	17
3.1. Elektrikli Eyleyicinin Çalışma Prensibi.....	17
3.2 Elektrikli Eyleyicinin Kullanım Yeri ve Önemi.....	19
3.3 Burkulma.....	21
3.3.1 Euler-Johnson Yöntemiyle Kritik Burkulma Yüğü İncelemesi.....	21
3.3.2 Elastik Stabilite.....	25
3.3.3 Elastik Stabilite Yöntemleri.....	25
3.3.4 Burkulma Hesaplamalarında Enerji Yöntemleri.....	26
3.4 Boyutlandırma ve Malzeme.....	27
3.5 Kütle Hesabı.....	30
3.6 Hesaplamalar.....	30
3.6.1 Rayleigh Oranı ile Kritik Burkulma Yüğüünün Hesaplanması.....	30
3.7 Deneysel Çalışma.....	34
3.7.1 Deney Düzenegi.....	34
3.7.2 Numune Hazırlama.....	35
3.7.2.1 Sertlik Ölçümü.....	35
3.7.2.2 Spektral Analiz.....	36
3.7.2.3 Çekme Deneyi.....	36
3.7.2.3 Burkulma Test Numunesi Hazırlama.....	39
3.7.2.4 Test Sonrasında Ölçüm.....	43
3.7.3 Burkulma Deneyi.....	44
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	46
4.1 $L_k=0,7 L$ Mesnetlenme için Deney Sonuçları.....	46
4.2 $L_k= L$ Mesnetlenme için Deney Sonuçları.....	65
4.3 Rayleigh Oranı Sonuçları.....	86
5. SONUÇ.....	87
ÖZGEÇMİŞ.....	92



## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
$R_e$	Akma dayanımı (MPa)
$A$	Alan ( $\text{mm}^2$ )
$I$	Alan atalet momenti ( $\text{mm}^4$ )
$F_p$	Basınç kuvveti (N)
$\sigma_b$	Basma gerilmesi (MPa)
$\sigma_{br}$	Burkulma gerilmesi (MPa)
$F_{br}$	Burkulma kuvveti (N)
$R_m$	Çekme dayanımı (MPa)
$D$	Dış çap (mm)
$L_1$	Diş boyu (mm)
$M_1, M_2$	Diş Tanımı
$E$	Elastisite modülü ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )
$s$	Emniyet katsayısı
$L_k$	Eşdeğer burkulma boyu (mm)
$\sigma$	Gerilme (MPa)
$\varepsilon$	Gerinim
$L_o$	İlk boy (mm)
$d$	İç çap (mm)
$i$	Jirasyon yarıçapı
$P_{kr}$	Kritik burkulma kuvveti (N)
$\lambda_{kr}$	Kritik narinlik katsayısı
$F$	Kuvvet (N)
$n$	Mesnet sayısı
$l$	Mil uzunluğu (mm)
$\lambda$	Narinlik katsayısı
$L_4$	Numune boyu (mm)
$P$	Normal kuvvet (N)
$P$	Özgül kütle ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
$K$	Polinom kökü
$\nu$	Possion oranı
$L_s$	Son boy (mm)
$\rho$	Yer çekimi ivmesi ( $\text{m}/\text{s}^2$ )

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
3D	Three Dimensions/Üç boyutlu
CNC	Computer Numeric Control/Bilgisayarlı Sayısal Kontrol
SAE	Society of Automotive Engineers/ Otomotiv Mühendisleri Topluluğu
ESE	Elektrikli Silindirik Eyleyici
IP	Ingress Protection/Koruma Sınıfı
DC	Direct Current/Doğru Akım

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Şekil 3.1. Elektrikli eyleyicinin çalışma mekanizmasının şematik gösterimi.....	17
Şekil 3.2. Konnektör, kontrol kutusu ve kumanda mekanizması.....	17
Şekil 3.3. Planet redükörlü DC motor .....	18
Şekil 3.4. Destek Amortisör ESE-35-150-IP66 modeli .....	18
Şekil 3.5. Linak hastane yatağı .....	19
Şekil 3.6 Boru profil milinin 3D görüntüsü .....	22
Şekil 3.7. Çeşitli çubuklarda mesnetlenme durumu ve etkili burkulma boyu .....	23
Şekil 3.8. Denge konumları a) Kararlı denge konumu, b) Kararsız denge konumu, c) Tarafsız denge konumu .....	25
Şekil 3.9. Elektrikli eyleyici de kullanılan boru profil milin geometrisi .....	28
Şekil 3.10. Test cihazı a) Zwick Roell Z250, b) INSTRON 5582 test cihazı.....	34
Şekil 3.11. Rockwell B cihazıyla sertlik ölçümü a) SAE 304 malzeme, b) AL 6082 malzeme.....	35
Şekil 3.12. SAE 304 ve AL 6082 çekme test numuneleri.....	37
Şekil 3.13. SAE 304 Çekme deneyi .....	37
Şekil 3.14. AL 6082 Çekme deneyi .....	38
Şekil 3.15. Çekme deneyi sonrası görüntü. a) SAE 304 malzeme, b) AL 6082 malzeme .....	38
Şekil 3. 16. Boru profil milinin kesit gösterimi .....	39
Şekil 3.17. Bağlantı aparatları. a) Ankastr aparatı, b) Mafsallama aparatı, c) Ön başlık aparatı, d) Bağlantı pimi .....	42
Şekil 3.18. İki ucundan mafsallı çubuk için yükleme durumu .....	43
Şekil 3.19. CNC video ölçüm sistemi .....	43
Şekil 3.20. Test öncesi görüntü a) $L_k=0,7$ l mesnetlenme durumu, b) $L_k=L$ mesnetlenme durumu .....	45
Şekil 4.1 $L_k=0,7$ L mesnetlenme durumunda numunelerin yükleme sonrası görüntüleri a) N.11 numunesi, b) N.12 numunesi ve c) N.13 numunesi.....	46
Şekil 4. 2. $L_k=0,7$ L mesnetlenme için N.1 <sub>Ort.</sub> kritik kuvvet-yer değiştirme grafiği.....	47
Şekil 4.3. $L_k=0,7$ L mesnetlenme durumunda numunelerin yükleme sonrası görüntüleri a) N.21 numunesi, b) N.22 numunesi ve c) N.23 numunesi.....	48
Şekil 4. 4. $L_k=0,7$ L mesnetlenme için N.2 <sub>Ort.</sub> kritik kuvvet-yer değiştirme grafiği.....	49
Şekil 4.5. $L_k=0,7$ L mesnetlenme durumunda numunelerin yükleme sonrası görüntüleri a) N.31 numunesi, b) N.32 numunesi ve c) N.33 numunesi.....	50
Şekil 4. 6 . $L_k=0,7$ L mesnetlenme için N.3 <sub>Ort.</sub> kritik kuvvet-yer değiştirme grafiği .....	51
Şekil 4.7. $L_k=0,7$ L mesnetlenme durumunda numunelerin yükleme sonrası görüntüleri a) N.41 numunesi, b) N.42 numunesi ve c) N.43 numunesi.....	52
Şekil 4. 8. $L_k=0,7$ L mesnetlenme için N.4 <sub>Ort.</sub> kritik kuvvet-yer değiştirme grafiği.....	53
Şekil 4.9. $L_k=0,7$ L mesnetlenme durumunda numunelerin yükleme sonrası görüntüleri a) N.51 numunesi, b) N.52 numunesi ve c) N.53 numunesi.....	54
Şekil 4. 10. $L_k=0,7$ L mesnetlenme için N.5 <sub>Ort.</sub> kritik kuvvet-yer değiştirme grafiği.....	55
Şekil 4.11. $L_k=0,7$ L mesnetlenme durumunda numunelerin yükleme sonrası görüntüleri a) N.61 numunesi, b) N.62 numunesi .....	56
Şekil 4.12. $L_k=0,7$ L mesnetlenme durumunda numunelerin yükleme sonrası görüntüleri a) N.71 numunesi, b) N.72 numunesi ve c) N.73 numunesi.....	57
Şekil 4. 13. $L_k=0,7$ L mesnetlenme için N.7 <sub>Ort.</sub> kritik kuvvet-yer değiştirme grafiği ....	58

Şekil 4.14. $L_k=0,7 L$ mesnetlenme durumunda numunelerin yükleme sonrası görüntüleri a) N.81 numunesi, b) N.82 numunesi ve c) N.83 numunesi.....	59
Şekil 4. 15. $L_k=0,7 L$ mesnetlenme için N.8 Ort. kritik kuvvet-yer değiştirme grafiği ....	60
Şekil 4.16. $L_k=0,7 L$ mesnetlenme durumunda numunelerin test sonrası görüntüleri a) N.1, b) N.2, c) N.3, ç) N.4, d) N.5, e) N.6, f) N.7 ve g) N.8 .....	62
Şekil 4.17. $L_k=0,7 L$ mesnetlenme durumunda numunelerin görüntüleri a) N.1, b) N.2, c) N.3, ç) N.4, d) N.5, e) N.6, f) N.7 ve g) N.8.....	62
Şekil 4. 18. $L_k=0,7 L$ mesnetlenme için N.1, N.2, N.3, N.4, N.5, N.7 ve N.8 ortalama kritik kuvvet-yer değiştirme grafikleri .....	63
Şekil 4.19. $L_k= L$ mesnetlenme durumunda numunelerin yükleme sonrası görüntüleri a) N.11 numunesi, b) N.12 numunesi ve c) N.13 numunesi.....	65
Şekil 4. 20. $L_k= L$ mesnetlenme için N.1Ort. kritik kuvvet-yer değiştirme grafiği.....	66
Şekil 4.21. $L_k= L$ mesnetlenme durumunda numunelerin yükleme sonrası görüntüleri a) N.21 numunesi, b) N.22 numunesi ve c) N.23 numunesi.....	67
Şekil 4. 22. $L_k= L$ mesnetlenme için N.2 Ort. kritik kuvvet-yer değiştirme grafiği .....	68
Şekil 4.23. $L_k= L$ mesnetlenme durumunda numunelerin yükleme sonrası görüntüleri a) N.31 numunesi, b) N.32 numunesi ve c) N.33 numunesi.....	69
Şekil 4. 24. $L_k= L$ mesnetlenme için N.3 Ort. kritik kuvvet-yer değiştirme grafiği .....	70
Şekil 4.25. $L_k= L$ mesnetlenme durumunda numunelerin yükleme sonrası görüntüleri a) N.41 numunesi, b) N.42 numunesi ve c) N.43 numunesi.....	71
Şekil 4. 26. $L_k= L$ mesnetlenme için N.4 Ort. kritik kuvvet-yer değiştirme grafiği .....	72
Şekil 4.27. $L_k= L$ mesnetlenme durumunda numunelerin yükleme sonrası görüntüleri a) N.51 numunesi, b) N.52 numunesi ve c) N.53 numunesi.....	73
Şekil 4. 28. $L_k= L$ mesnetlenme için N.5 Ort. kritik kuvvet-yer değiştirme grafiği .....	74
Şekil 4.29. $L_k= L$ mesnetlenme durumunda N.61 numunesinin yükleme sonrası görüntüsü .....	75
Şekil 4.30. $L_k= L$ mesnetlenme durumunda numunelerin yükleme sonrası görüntüleri a) N.71 numunesi, b) N.72 numunesi ve c) N.73 numunesi.....	76
Şekil 4. 31. $L_k= L$ mesnetlenme için N.7 Ort. kritik kuvvet-yer değiştirme grafiği .....	77
Şekil 4.32. $L_k= L$ mesnetlenme durumunda numunelerin yükleme sonrası görüntüleri a) N.81 numunesi, b) N.82 numunesi ve c) N.83 numunesi.....	78
Şekil 4. 33. $L_k= L$ mesnetlenme için N.8 Ort. kritik kuvvet-yer değiştirme grafiği.....	79
Şekil 4.34. $L_k= L$ mesnetlenme durumunda numunelerin test sonrası görüntüleri a) N.1, b) N.2, c) N.3, ç) N.4, d) N.5, e) N.6, f) N.7 ve g) N.8 .....	81
Şekil 4.35. $L_k= L$ mesnetlenme durumunda numunelerin görüntüleri a) N.1, b) N.2, c) N.3, ç) N.4, d) N.5, e) N.7 ve f) N.8.....	82
Şekil 4.36. $L_k= L$ mesnetlenme için N.1, N.2, N.3, N.4, N.5, N.7 ve N.8 ortalama kritik kuvvet-yer değiştirme grafikleri .....	82

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Çizelge 3.1. Elektrikli eyleyicinin sektörel kullanım alanları.....	20
Çizelge 3.2. SAE 304 ve AL 6082 malzemelerinin fiziksel ve mekanik özellikleri .....	29
Çizelge 3.3. AL 6082'in kimyasal kompozisyonu.....	29
Çizelge 3.4. SAE 304'in kimyasal kompozisyonu .....	30
Çizelge 3.5. SAE 304 ve AL 6082 boru malzemelerin çekme deneyi rapor sonuçları....	39
Çizelge 3. 6. Boru profil millerin kesit boyut ölçümleri .....	40
Çizelge 4.1. $L_k=0,7 L$ mesnetlenme için N.11, N.12, N.13 ve N.1 <sub>ort.</sub> numunelerinin kuvvet- yer değiştirme değerleri .....	47
Çizelge 4.2. $L_k=0,7 L$ mesnetlenme durumunda N.11, N.12 ve N.13 numunelerinin ölçüm sonucu .....	48
Çizelge 4.3. $L_k=0,7 L$ mesnetlenme için N.21, N.22, N.23 ve N.1 <sub>ort.</sub> numunelerinin kuvvet-yer değiştirme değerleri.....	49
Çizelge 4.4. $L_k=0,7 L$ mesnetlenme durumunda N.21, N.22 ve N.23 numunelerinin öl- çüm sonucu .....	50
Çizelge 4. 5. $L_k=0,7 L$ mesnetlenme durumunda N.31, N.32, N.33 ve N.3 <sub>ort.</sub> numunele- rinin kuvvet- yer değiştirme değerleri .....	51
Çizelge 4.6. $L_k=0,7 L$ mesnetlenme durumunda N.31, N.32 ve N.33 numunelerinin öl- çüm sonucu .....	52
Çizelge 4.7. $L_k=0,7 L$ mesnetlenme durumunda N.41, N.42, N.43 ve N.4 <sub>ort.</sub> numuneleri- nin kuvvet-yer değiştirme değerleri.....	53
Çizelge 4.8. $L_k=0,7 L$ mesnetlenme durumunda N.41, N.42 ve N.43 numunelerinin öl- çüm sonucu .....	54
Çizelge 4. 9 . $L_k=0,7 L$ mesnetlenme durumunda N.51, N.52, N.53 ve N.5 <sub>ort.</sub> numunele- lerinin kuvvet- yer değiştirme değerleri .....	55
Çizelge 4.10. $L_k=0,7 L$ mesnetlenme durumunda N.51, N.52 ve N.53 numunelerinin öl- çüm sonucu .....	56
Çizelge 4.11. $L_k=0,7 L$ mesnetlenme durumunda N.61, N.62 ve N.6 <sub>ort.</sub> numunelerinin kuvvet- yer değiştirme değerleri.....	57
Çizelge 4. 12 $L_k=0,7 L$ mesnetlenme durumunda N.71, N.72, N.7.3 ve N.7 <sub>ort.</sub> numunele- lerinin kuvvet-yer değiştirme değerleri .....	58
Çizelge 4.13. $L_k=0,7 L$ mesnetlenme durumunda N.71, N.72 ve N.73 numunelerinin öl- çüm sonucu .....	59
Çizelge 4. 14 $L_k=0,7 L$ mesnetlenme durumunda N.81, N.82, N.83 ve N.8 <sub>ort.</sub> numunele- rinin kuvvet-yer değiştirme değerleri .....	60
Çizelge 4. 15. $L_k=0,7 L$ mesnetlenme durumunda N.81, N.82, ve N.83 numunelerinin öl- çüm sonucu .....	61
Çizelge 4. 16. $L_k=0,7 L$ mesnetlenme için N.1, N.2, N.3, N.4, N.5, N.6, N.7 ve N.8 numunelerinin ortalama kuvvet-yer değiştirme değerleri .....	64
Çizelge 4.17. $L_k=0,7 L$ mesnetlenme durumunda N.1, N.2, N.3, N.4, N.5, N.7 ve N.8 numunelerinin ölçüm sonucu.....	65
Çizelge 4.18. $L_k= L$ mesnetlenme durumunda N.11, N.12, N.13 numunelerinin ortalama yer değiştirme-kuvvet değerleri.....	66
Çizelge 4.19. $L_k= L$ mesnetlenme durumunda N.11, N.12 ve N.13 numunelerinin ölçüm sonucu .....	67
Çizelge 4.20. $L_k= L$ mesnetlenme durumunda N.21, N.22, N.23 ve N.2 <sub>ort.</sub> numunelerinin kuvvet-yer değiştirme değerleri.....	68

Çizelge 4.21. $L_k = L$ mesnetlenme durumunda N.21, N.22 ve N.23 numunelerinin ölçüm sonucu.....	69
Çizelge 4.22. $L_k = L$ mesnetlenme durumunda N.31, N.32, N.33 ve N.3 <sub>ort.</sub> numunelerinin kuvvet-yer değiştirme değerleri.....	70
Çizelge 4.23. $L_k = L$ mesnetlenme durumunda N.31, N.32 ve N.33 numunelerinin ölçüm sonucu.....	71
Çizelge 4.24. $L_k = L$ mesnetlenme durumunda N.41, N.42, N.43 ve N.4 <sub>ort.</sub> numunelerinin kuvvet-yer değiştirme değerleri.....	72
Çizelge 4.25. $L_k = L$ mesnetlenme durumunda N.41, N.42 ve N.43 numunelerinin ölçüm sonucu.....	73
Çizelge 4.26. $L_k = L$ mesnetlenme durumunda N.51, N.52, N.53 ve N.5 <sub>ort.</sub> numunelerinin kuvvet-yer değiştirme değerleri.....	74
Çizelge 4.27. $L_k = L$ mesnetlenme durumunda N.51, N.52 ve N.53 numunelerinin ölçüm sonucu.....	75
Çizelge 4.28. $L_k = L$ mesnetlenme durumunda N.61 ve N.62 numunelerinin ortalama yer değiştirme-kuvvet değerleri.....	76
Çizelge 4.29. $L_k = L$ mesnetlenme durumunda N.71, N.72, N.73 ve N.7 <sub>ort.</sub> numunelerinin kuvvet-yer değiştirme değerleri.....	77
Çizelge 4.30. $L_k = L$ mesnetlenme durumunda N.71, N.72 ve N.73 numunelerinin ölçüm sonucu.....	78
Çizelge 4. 31. $L_k = L$ mesnetlenme durumunda N.81, N.82, N.83 ve N.8 <sub>ort.</sub> numunelerinin kuvvet-yer değiştirme değerleri.....	79
Çizelge 4.32. $L_k = L$ mesnetlenme durumunda N.81, N.82 ve N.83 numunelerinin ölçüm sonucu.....	80
Çizelge 4. 33. $L_k = L$ mesnetlenme için N.1, N.2, N.3, N.4, N.5, N.6, N.7 ve N.8 numunelerinin ortalama kuvvet- yer değiştirme değerleri.....	83
Çizelge 4.34. $L_k = L$ mesnetlenme durumunda N.1, N.2, N.3, N.4, N.5, N.7 ve N.8 numunelerinin ölçüm sonucu.....	84
Çizelge 4. 35. $L_k = 0,7 L$ ve $L_k = L$ mesnetlenme durumunda kritik yük değerleri.....	84
Çizelge 4.36. P ve K değerlerine bağlı $P_{kr}$ burkulma yükü.....	86

## 1. GİRİŞ

Otomotiv sektöründe, Karbondioksit salınımının temel kaynağı olan fosil yakıt tüketiminin yerine hemen hemen her alanda elektrik enerjisine bağlı dönüşüm sistemlerinin yer aldığı görülmektedir. Fosil yakıt tüketen araçların yerini elektrikli araçlar hızla almaya başlamış olsa da elektrikli araçların yaygınlaşmasında maliyet, pazar fiyatları ve ağırlık-mesafe gibi problemler mevcuttur. Elektrikli araçların gelişimiyle otomasyon sistemleri, otomotiv elektroniği, gelişmiş algılayıcılar, kontrol birimleri, güç elektroniği devreleri, eyleyiciler ve bunlarla bütünleşmiş mekanik hareket sistemlerinde gelişim görülmektedir. Araç içi otomasyon ve ergonomide gelişim gösteren sistemlerden bir tanesi de bagaj kapaklarındaki, kullanım kolaylığı sağlayan doğrusal silindirik eyleyici sistemdir.

Günümüzde, otomobillerde yaygın olarak bagaj sistemlerini açmak için yüksek gaz basınçlı pistonlar kullanılmaktadır. Gaz basınçlı pistonlar yerine kullanım kolaylığı sağlamak amacıyla doğrusal silindirik eyleyiciler tercih edilmektedir. Bagaj ağırlıklarını dengeleyen pistonların bagaj kapatılırken veya açılırken elleri dolu kullanıcılar için sorun teşkil etmesi, eğimli yolda bagaj kapağının zor kapanması veya istediğiniz yüksekliğe açılmasının ayarlanamaması gibi temel problemler gaz basınçlı pistonlar yerine elektrikli eyleyicilerin tercih edilmesine sebep olmuştur. Doğrusal eyleyicilerin avantajları arasında bakım gerektirmemesi, montajı, çalıştırılma kolaylığı ve geleneksel lift sistemlerine göre hidrolik sıvı ve gaz kaçağı gibi problemlere sahip olmamaları da söylenebilir. Doğrusal silindirik eyleyici, elektronik algılayıcılar vasıtasıyla veya bir buton yardımıyla el kuvvetine ihtiyaç duymadan bagaj kapağını kolayca açabilmektedir.

Bu tez çalışmasında eyleyici sistemlerinin çalışma koşulları incelenip sistemde kullanılan boru profil milinin davranışına bağlı olarak iki farklı malzeme için kritik burkulma yükü altında malzeme karşılaştırılması yapılmıştır. Otomobillerde büyük oranda kullanılan çeliklerin dayanımlarının yüksek olmasına karşın, yoğunluklarının da yüksek olması ve yük hafifletme için alüminyum gibi düşük yoğunluktaki alternatif malzemeleri gündeme getirmiştir. Boru profil mil malzemesinin gerilme ve kararlılık yönleri incelenerek bası yükü altında SAE 304 ve AL 6082 malzemelerinden optimum değerler elde edilmeye

alışılmıştır. Sistemde kuvveti ilk karşılayan kısım olan boru profil milin burkulmaya uğrayacağı öngörülerek çalışmalar yürütülmüştür. Boru profil milinin burkulma dayanımı incelenirken SAE 304 ve AL 6082 malzemeleri üzerindeki yoğunluk- dayanım ilişkisine bağlı Rayleigh Oranı ve deneysel yöntem kullanılarak kritik yük değerleri elde edilmiştir. Bu sonuçlar neticesinde AL 6082 malzemelerin teorik ve deneysel yöntemlerindeki hesaplamalar kıyaslanmıştır.  $L_k=0,7 L$  ve  $L_k= L$  mesnetlenme durumları için farklı malzeme türü, değişken cidar kalınlığı ve farklı boru boyutlarına bağlı olarak kritik burkulma yükleri hesaplanmıştır.



## 2. KURAMSAL BİLGİLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

Tez çalışması kapsamında yapılan literatür araştırması aşağıda özetlenmiştir.

İlk elektrikli motor patentinin yaklaşık bir asır yıl önce ABD’de alındığı bilinmektedir. Elektrikli motor çalışmalarının bu patentle birlikte başladığı belirtilmiştir. Diğer bir önemli adım ise 1937 yılında Kemper tarafında manyetik etkiye sahip elektrikli motor çalışması ile literatüre kazandırılmıştır. 1945 yılında hava taşıtları için lineer elektrikli motorun geliştirilmesi ile birlikte elektrikli motor çalışmaları hız kazanmış, 1970-1980 yıllarında üst seviyede çalışmalar yapılmaya başlanmıştır (Boldea ve Nasar, 1999).

Endüstriyel alanda aktif olarak kullanılan ilk elektrikli eyleyiciyi Linak firması üretmiştir. LA30 adlı tarım makinelerinin çeşitli uygulamalarında kullanılan elektrikli eyleyici sistemi, fiziksel engelli bir kişi için elektrikli sandalye sistemlerinin fonksiyonlarını geliştirmek adına dönüştürülmüştür. Endüstriyel anlamda elektrikli eyleyiciler için ilk bilimsel patent çalışması da Jensen ve arkadaşlarının sahibi olduğu Linak Firması tarafından yapılmıştır (Anonim, 2019). Linak firmasına ait patent başvuruları incelendiğinde 1983-05-12 tarihinde Linearmotor ismiyle DK497581A başvuru numarasına ait ilk endüstriyel anlamda patent başvurusuna rastlanmaktadır (Denmark Patent No: DK497581A, 1983).

Yunusov ve ark. (2020) bir lineer elektrikli aktüatörü hidroteknik yapılanmalar içerisinde incelemiş ve sistemin genel matematiksel modeli üzerine çalışmıştır. İlgili modelin diğer modellerden üstün kılan tarafları hem teorik hem de deneysel sonuçlarla desteklenmesidir. Makalenin son kısmında deneysel ve matematiksel modelin karşılaştırması yapılmıştır. Yapılan karşılaştırmalar doğrultusunda elektrikli aktüatörlerde hidroteknik yapıların bulunmasının verimliliği arttırdığı sonucuna varılmıştır.

Bohlooly ve Mirzavand (2015) yüzeye montelenmiş gömülü bir piezoelektrik aktüatörü için kompozit plakaların mekanik, termal, elektriksel ve birleşik yüklere maruz kalması sonucunda ortaya çıkan burkulma ve burkulma sonrası davranışları incelemiştir. Von-

Karmanın doğrusal olmayan kinematik ilişkilere ve lamine plaka teorisine dayanan bu çalışmada Galerkin prosedörü uygulanarak lineer olmayan denge yolları için kapalı form ifadeleri elde edilmiş ve denklemler çözülmüştür. Düzlem içi sıkıştırma yüklemesinin etkileri, sıcaklık bağımlılığı, elektriksel yükleme, yerleştirme konfigürasyonu ve geometrik kusur proje içerisinde sınır koşullarını oluşturmuştur. Burkulma analizi birçok farklı özellik açısından incelenmiş, sonuçlar literatürdeki diğer sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Durmaz (2011), değişik mesnetleme koşulları altında, eksantrik yüklü korniyerler ile geometri ve malzeme bakımından kirişlerin doğrusal olmayan burkulma davranışı altındaki yük taşıma kapasitelerini tahmin etmeye yarayan etkili ve güvenilir sonlu elemanlar modeli oluşturmuştur. Bu modelde burkulma davranışları izlenmiş ve deneysel veriler ile sonlu elemanlar analizinin sonuçları karşılaştırılmıştır. Burkulma öncesine ve sonrasına ait yük deformasyon eğrilerinin hesaplanması için Newton-Raphson ve Lagrangian formülasyonu kullanmıştır. Kirişlerde burkulma etkisiyle oluşan yer değiştirmeler incelenmiştir.

Zhang ve ark. (2019), petrol boru hatlarında yanal burkulmayı etkileyen faktörleri araştırarak, boru yapısı ve boru üstündeki kritik kuvvetler üzerine araştırmalar yapmışlardır. Araştırma kapsamında bir deney düzeneği hazırlanmış ve ilgili deney sonlu elemanlar yöntemiyle çözülmüştür. İç ve dış boruların kuvveti, zemin etkileşimi derivasyon metodu kullanılarak teorik bir yöntem ile çözümlenmiştir. Elde edilen sonuçları karşılaştırabilmek için deneysel çalışmalar yapılmış ve elde edilen çözümler karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur.

Potuk (2019), kolon-kiriş yapılarının burkulma davranışlarını cidar kalınlığı, narinlik oranı, malzeme yapısı gibi parametreler altında incelemiş, sonlu elemanlar metodu kullanarak burkulma analizlerini doğrusal analiz yöntemini kullanarak çözümlenmiştir. Alüminyum 6061 alaşım, dairesel kesitli kısa ve uzun çubuklara deneysel çalışmalar yapılmış, eksenal ve yanal burkulma değerleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlarda simetrik değerler elde edemeyen Potuk, kolon kirişlerdeki noktasal hataların burkulmaya etkisini ortaya çıkarmıştır. Teorik çalışmalar doğrultusunda elde edilen numerik ve

analitik yöntem sonuçlarını deneysel verilerle tablo ve grafikler aracılığıyla karşılaştırmalı olarak sunmuştur.

Ayhan (2007), çelik yapı tasarım standartlarında önemli bir kontrol parametresi olan yanal burulmalı burkulma davranışlarını TS 648 ve DIN 4114 yönetmeliklerinde yer alan emniyet gerilmeleri ile karşılaştırmak üzere beş farklı kesit modeli oluşturmuştur. Bir kompakt olmayan ve diğerleri kompakt sınırdaki kiriş modelleri sonlu elemanlar yöntemiyle basit mesnetli şekilde lineer olmayan durumlarda incelemiştir. Burulmalı burkulma davranışına etki eden çok sayıda değişken için deney sonuçları tespit edilmiş ve elde edilen standartlardan çok daha farklı sonuçların da elde edilebileceği ortaya konulmuştur. Bu şekilde yönetmelikte yer alan yanal burkulma ifadelerinin konservatifliğinin belirlendiği ifade edilmiştir.

Türkmen (1995), çelik ve alüminyum çubuklarda burkulmayı incelemiş, değişik boyutlarda üç çelik çubuk kullanarak, bunlardan birisini sabit diğerlerini hareket edecek şekilde mesnetlenmiştir. Yükleme her bir çubuk için farklı olacak şekilde eksantrik olarak sağlı sollu yüklemeye tabi tutulmuştur. Buna ek olarak boyutları farklı 6 alüminyum çubuk üzerinde deney yapılmış ve kritik yüklemeler ölçülmüştür. Elde edilen veriler Euler ve Southwell tahminleriyle karşılaştırılmış, elde edilen sonuçların oldukça yakın olduğu tespit edilmiştir.

Sampaio ve Hundhasen (1997), eğimli bir kiriş kolonunun burkulma davranışını incelemek adına enerji yöntemini kullanarak bir diferansiyel denklem oluşturmuştur. Geometrik ve fiziksel parametreleri boyutsuz uzunluk parametrelerine indirgeyen bir yaklaşım ile nümerik çözümler yapılmıştır. Genelleştirilmiş hipergeometrik fonksiyonlar kullanılarak kesin bir çözüm yöntemi üretilmiştir. Elde edilen nümerik çözüm yönteminin sondaj boruları ve boru sistemlerinin burkulma davranışlarının belirlenmesi konusunda kullanışlı bir çözüm yöntemi olduğu tespit edilmiştir.

Senthilkumar ve ark. (2011), sondaj borularının uzaması durumunda değişen basınç ve sıcaklık koşullarının burkulma davranışlarını etkilemesi üzerine burkulma davranışının ne yönde değiştüğünü tespit edebilmek adına bir test düzeneği geliştirilmesi üzerine çalışmıştır. Bu kapsamda yanıl burkulma analizleri üzerine araştırmalar yapılmış ve literatüre yeni bir test sistemi kazandırılmıştır. ‘‘Monash Advance Pipe Testing System’’ adında bir test metodunun geliştirilmesini konu alan yayında eksenel burkulma tepkilerinin araştırılması ve elde edilen sonuçların test yöntemlerine göre karşılaştırılması yapılmıştır.

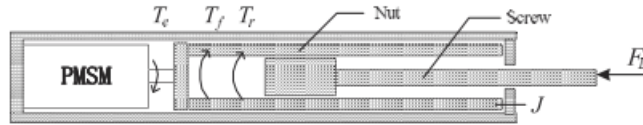
Sakurai (2015), alüminyum borularda cidar kalınlığı ve buna bağlı yarıçap uzunluklarının değiştirilmesi ile yarı statik test şartlarında yağlama işlemi yapılmadan boru yüzeyindeki burkulma davranışını incelemiştir. Bası yükü altında mesnetlenme koşullarından bağımsız olarak borudaki ezilme ve burkulma sonucunda absorbe edilen enerjinin burkulma davranışı üzerine yaptığı etki araştırılmıştır. Geliştirilen sistemlerin elektrikli araçlarda kullanılan alüminyum boru profilleri için uygulanabilir olduğu saptanmıştır.

Bu tezde lineer elektrikli eyleyicilerde kullanılan boruların belirli bir yük altında burkulma davranışı; mesnetlenme durumları, cidar kalınlıkları, malzeme türleri ve boru boyutlarına bağlı olarak incelenmiştir. İncelenen sistem Rayleigh Oranı metoduyla matematiksel olarak çözülmüş ve AL 6082 için sonuçlar çıkarılmıştır. Deneysel verilerde tüm değişkenler farklı varyasyonlarda incelenmiş, matematiksel modelde kullanılan parametrelerden çıkan sonuçlar ile deneysel veriler karşılaştırılmıştır. Matematiksel çözüm ve deney sonuçları doğrultusunda burkulma davranışı en verimli olan boyut, cidar kalınlığı ve malzeme türü ortaya çıkarılmıştır.

### 3. MATERYAL VE METOD

#### 3.1. Elektrikli Eyleyicinin Çalışma Prensibi

Doğrusal elektrikli eyleyici, elektrik motoru, planet dişli kutusu, vidalı mil-somun ve birçok standart makine elemanından oluşan elektromekanik sistemdir (Ruiz-Rojas ve ark., 2008). Temel çalışma prensibi elektrik enerjisinden alınan gücü motor vasıtası ile mekanik enerjiye çevirerek kuvvet oluşturmaktır. Şekil 3.1’de şematik gösterimi bulunan elektrikli eyleyici, motorun dönme hareketini vidalı mil ve somun yardımıyla iki yönde basma ve çekme hareketine yani doğrusal harekete dönüştürerek kuvvet oluşturan üründür.



**Şekil 3.1.** Elektrikli eyleyicinin çalışma mekanizmasının şematik gösterimi (Hao ve ark., 2013)

Elektrikli eyleyiciye elektriksel güç aktarımı Şekil 3.2’de belirtilen konnektörler, fişler veya kablolar tarafından sağlanabilmektedir. Tasarıma bağlı olarak eyleyici 12 V, 24 V, 36 V veya 220 V elektrik bağlantısına uygun sistemlerde çalışabilmektedir (Philatenkov ve ark., 2020). Doğrusal elektrikli eyleyicilerin hareketini sağlayan motorun yön kontrollerini yapabilmek için ilave kontrol kutusu ve kumanda mekanizmaları kullanılmaktadır. Kontrol kutuları kullanılacakları alanlara bağlı olarak araçlara, ev sistemlerine, endüstriyel birçok sektöre entegre olarak ve senkron şekilde çalışabilmesini sağlamaktadırlar (Anonim 2018).



**Şekil 3.2.** Konnektör, kontrol kutusu ve kumanda mekanizması (Anonim 2018)

Elektriksel gücü mekanik güce çevirmek için DC motorlar kullanılmaktadır. DC motorların avantajları yüksek tork, seri hızlanma ve yavaşlama, geniş tork-devir kontrol aralığı sağlamaktır (Al-Naib, 2019). DC motorlara ilave olarak motor miline bağlı Şekil 3.3’de gösterilen planet redüktörlü motorlar da kullanılabilir. Planet dişli motor sistemleri, DC motorlu sistemlere kıyasla yüksek tork ve çevrim oranı, yüksek hassasiyet, daha sessiz çalışması gibi avantajlara sahiptir (Anonim,2016).



**Şekil 3.3.** Planet redükörlü DC motor (Anonim, 2016)

Şekil 3.4’de verilen elektrikli eyleyici üzerinde özelliklerinin belirtilmesi için etiket tanımlanmıştır. ESE-35-150-IP66 etiketinde belirtilen özellikler sırasıyla büyük boru çapı ( $\text{Ø}35$ ), kurs mesafesi (150), koruma sınıfı (IP66) gibi özellik tanımlamaları içermektedir. Doğrusal elektrikli eyleyici özelliklerini tanımlayıcı bazı temel kriterlerde şunlardır; basma ve çekme kuvveti (N), yük taşıma kapasitesi (N), çalışma kursu (mm), çalışma hızı (mm/s), çalışma voltajı (V), görev döngüsü (duty cycle) ve koruma (IP) sınıflandırmasıdır (Philatenkov ve ark, 2020).



**Şekil 3.4.** Destek Amortisör ESE-35-150-IP66 modeli

### 3.2 Elektrikli Eyleyicinin Kullanım Yeri ve Önemi

Elektrikli eyleyiciler gündelik hayatta oldukça geniş kullanım alanına sahiptirler. İlk elektrikli eyleyici ürünlerinin çıktığı dönemlerde tarımla başlayan kullanım alanları, gittikçe çoğalarak inşaat ve iş makinelerindeki kullanılan hidrolik ve pnömatik sistemlerin yerini de aldığını görülmektedir. Elektrik enerjisinin maliyeti hidrolik ve pnömatik güce göre daha düşüktür. Hassas alanlarda kullanılabilir kadar temiz olması, küçük ve hafif olması gibi avantajlara sahiptirler. Gelişmiş kontrol edilebilirlik sayesinde özel uygulamalarda geniş kullanım alanları sağlamaktadır. Ürün kompakt tasarım, kolay kurulum, DC motorla birlikte çalışan enkoder sayesinde ayarlanabilir başlangıç ve durdurma rampası, ayarlanabilir akım sınırı, ısı koruması gibi birçok avantaj da sağlamaktadır. Detaylı bakım istemeyen bu ürünler uzun ömürlü olabilmektedir (Akın, 2016).

Elektrikli eyleyiciler sağlık sektöründe Şekil 3.5’de belirtilen hastahane yataklarında, ameliyat masalarında, tıpta, tıbbi mobilyalarda, evlerimizdeki koltuklarda, ayarlanabilir masalarda, mutfak eşyalarında, ofislerde, fabrikalarda, iş yerlerinde, televizyon antenin konumlandırılmasında, rampaları hareket ettirmede, takım tezgâhlarında ve mobilyalara hareket kazandırmada kullanılır (Philatenkov ve ark, 2020).



Şekil 3.5. Linak hastane yatağı (Anonim, 2017)

Elektrikli eyleyicinin sektörel bazda kullanım alanları mobilya, sağlık, sanayi ve denizcilik ana başlıkları halinde Çizelge 3.1’de belirtilmiştir.

**Çizelge 3.1.** Elektrikli eyleyicinin sektörel kullanım alanları (Anonim, 2018)

<b>SANAYİ TARIM VE DENİZCİLİK</b>	<b>Araç Liftleri</b>	Engelliler için araçlar			
	<b>Çiftçilik</b>	Havalandırma sistemleri	İklim kontrol	Tahıl işleme	Yemleme otomasyonu
	<b>Denizcilik</b>	Yatlar			
	<b>Dış Mekân Ekipmanları</b>	Çim biçme makineleri			
	<b>Endüstriyel Otomasyon</b>	Çubuk sürücüler	Yiyecek ve içecek otomasyonu	Otomatik yönlendirmeli araçlar	Paketleme makineleri
	<b>Enerji</b>	Güneş takip uygulamaları	Pelet kazanı	Rüzgâr enerjisi	
	<b>İnşaat</b>	Tekerlekli yükleyici			
	<b>Pergola &amp; Tente</b>	Panjurlar	Pergolalar		
	<b>Tarım Makineleri</b>	Balya makineleri ve yem hasat makineleri	Traktörler ve biçerdöverler	Püskürtücüler	Serpme makineleri
	<b>Valfler</b>	Atık su arıtma			
<b>SAĞLIK</b>	<b>Bakım</b>	Bakımevi tipi hasta bakım yatakları	Ev tipi hasta bakım yatakları	Hasta taşıma liftleri	Tekerlekli sandalyeler
	<b>Hastane</b>	Hastane yatakları	X-ray ekipmanları	Operasyon masa ve sandalyeleri	
	<b>Tedavi</b>	Dişçi koltukları	Tedavi muayene koltukları	Tedavi masaları	
<b>MOBİLYALAR</b>	<b>Mağaza Teşhir</b>	Satış tezgahları			
	<b>Masalar</b>	Endüstriyel çalışma masaları	Ofis masaları	Teknik çalışma alanları	
	<b>Monitör Liftleri</b>	Ekran ve monitor stantları	TV liftleri		
	<b>Mutfaklar</b>	Ayarlanabilir tezgahlar	Davlumbazlar	Dolaplar	Mutfak masaları
	<b>Konfor Mobilyaları</b>	Konfor yatakları	Ayarlanabilen yatar koltuklar		



### 3.3 Burkulma

Uzunluğu kesit alanına göre büyük olan yapı elemanları basıya zorlandığında burkulma gerilmeleri oluşmaktadır (Şekercioğlu, 2015). Cisimler mekaniğinde bası yükü altında denge durumunda bulunan yapılar için iki durum incelenir. Birinci durum gerilmelerden meydana gelmektedir ve gerilme problemi olarak nitelendirilir. En büyük gerilme altındaki malzemenin kritik burkulma yükü hesaplamasıyla ve malzemenin akma sınırı kıyaslamasıyla yapının güvenlik katsayısı tespiti yapılarak gerilme problemi çözümüne ulaşılmaktadır. İkinci durumda ise denge konumu kararlılığı yönünden incelenmektedir ve stabilite problemi olarak nitelendirilmektedir. Yüksek mukavemetli yapıların kullanımı yapıyı narin bir hale getirdiğinden dolayı stabilite yüksek önem kazanmıştır. Uzun ve narin bir çubukla stabilite öncelikle bir problem olduğu halde kısa ve bodur çubuklarda basınçtan dolayı ezilme ilk düşünülmesi gereken durumdur. Çubuğun boyu kısaltıldıkça gerilme değerleri düşünülmesi gereklidir. Burkulma problemlerini çözerken genel kriterlerimiz yapıyı gerilme ve stabilite yönünden güvenli hale getirmektir (Bakioğlu, 2009).

Sonuç olarak aksenal yüklenmiş yapı ya burkulacaktır ya da ezilecektir veya ikisi bir arada oluşabilecektir. Hasarın türünün belirlenmesi yapının narinliğine (inceliğine) bağlıdır. İnce ve uzun parçalar burkulurken, kısa ve kalın parçalar ezilir ve kırılarak hasara uğrar. Aksenal yüklemeler altındaki boru yapılarının davranışları seçilen kesit geometrisine, narinlik oranına ve kullanılan malzemeye bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Potuk, 2019).

#### 3.3.1 Euler-Johson Yöntemiyle Kritik Burkulma Yüğü İncelemesi

Boru profil miline uygulanan kuvvetin oluşturduğu burkulma davranışları için Euler-Johnson eşitlikleri ve burkulma deneylerinde kullanılacak olan Euler mesnetlenme durumları incelenmiştir. Gerilmeler elastik sınırı aştığında Euler formülü hatalı sonuçlar verdiği için kullanılmamaktadır. Bağıntılar çevresinde kısa çubukta ve elastik bölgenin geçerli olduğu durumlarda Johnson eşitliği üzerinden çalışmalara devam edilebilmektedir. Johnson eşitliğine göre Euler bağıntısı malzemenin akma sınırının

yarısına kadar geçerlidir. Bu açıklamalar neticesinde çubuk boyutu seçiminde denklem basamakları takip edilerek kritik narinlik katsayı belirlenir ve böylelikle Euler-Johnson eşitlikleri arasından seçim yapılması sağlanmaktadır (Şekercioğlu, 2015).

Atalet momentinin (I) kesit alanına (A) bölünerek kök içine alınmasıyla elde edilen jirasyon yarıçapı;

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (3.1)$$

olarak hesaplanır.

Dış çapı (D), iç çapı (d) olan boru profil mili için atalet momenti;

$$I = \frac{\pi}{64} (D^4 - d^4) \quad (3.2)$$

Boyutsal ölçüleri tanımlanmış olan profil milinin kesit alanı;

$$A = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \quad (3.3)$$

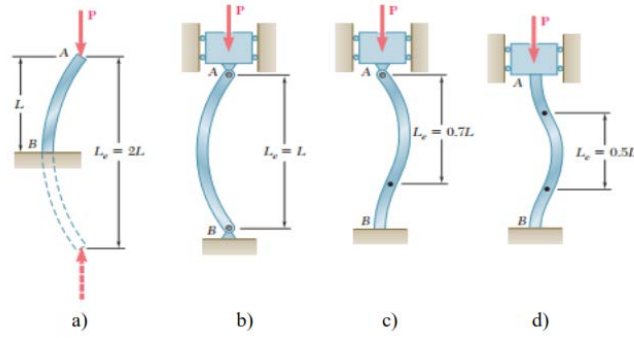
Boru profil milinin elektrikli eyleyici üzerinde montajlanmış durumu Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Boru profil miline üst kısmından uygulanan bası kuvvetini aksenal yönde ileten ve dönmesini engelleyen başlık parçası bulunmaktadır. Basma ve çekme yönlerindeki hareketlere doğrusallık sağlayan alt kısımdaki boğaz yatağı Şekil 3.6'da belirtilmiştir. Boru profil milinin, sistem ile bağlantısını sağlayan trapez somun parçası yine Şekil 3.6'da belirtilmiştir. Yukarıda bahsi geçen hareket ve montaj biçimleri incelendiğinde mesnetlenme şartları belirlenebilmektedir.



**Şekil 3.6** Boru profil milinin 3D görüntüsü

Boru profil milinin yukarıda belirtilen tanımlamalar neticesinde kritik burkulma boyları Şekil 3.7'deki mesnetlenme durumlarına uygulanabilmektedir. Mesnetlenme durumları  $L_k=2L$  için bir ucu sabit diğer ucu serbest çubuk,  $L_k=L$  için iki ucu pimlenmiş çubuk,  $L_k=0,7L$  için bir ucu pimlenmiş diğer ucu sabit çubuk,  $L_k=0,5L$  için iki ucu sabit çubuğun burkulma boylarını ifade etmektedir (Beer, 2011).

Boru profil mili için eşdeğer burkulma boyu kabulünde  $L_k=0,7L$  mesnetlenme durumunda alt mesnet noktası için dönme ve öteleme sabit, üst mesnet noktasında ise dönme serbest öteleme sabit alınması gereklidir.  $L_k=L$  durumunda alt ve üst mesnet noktasında dönme serbest öteleme sabit alınması gereklidir. Euler mesnetlenme durumları bölüm 4.1 ve bölüm 4.2'de deneylerin oluşturulmasında yararlanılacaktır.



**Şekil 3.7.** Çeşitli çubuklarda mesnetlenme durumu ve etkili burkulma boyu (Beer, 2011)

Eşdeğer burkulma boyu Şekil 3.7-c'de gösterildiği üzere Denklem 3.4'de kabulü;

$$L_k = 0,7 L \quad (3.4)$$

Narinlik katsayısı;

$$\lambda = \frac{L_k}{i} \quad (3.5)$$

Kritik narinlik katsayısı;

$$\lambda_{kr} = \sqrt{\frac{E \times \pi^2}{\frac{R_e}{2}}} \quad (3.6)$$

Bu eşitlikler neticesinde malzeme akma sınırı ( $R_e$ ) ve kritik narinlik ( $\lambda_{kr}$ ) katsayısının Euler veya Johnson eşitliği incelenmesi konusunda yardımcı olmaktadır (Denklem 3.6). Narinlik ve kritik narinlik sayıları kıyaslandığında  $\lambda > \lambda_{kr}$  olursa uzun çubuk,  $\lambda_{kr} > \lambda > 30$  olursa orta çubuk,  $\lambda < 30$  olursa kısa çubuk kabul edilmektedir. Uzun çubuklar için Euler eşitliği, kısa çubuk ve orta çubuklar için Johnson eşitliği kullanılmaktadır. Aşağıdaki hesaplamalarda  $\lambda < 30$  olduğundan dolayı kısa çubuk kabulü yapılarak Johnson eşitliği kullanılabilir. Kısa çubuk, boyu kenar ölçüsünün 10 katından fazla olmayan çubuklardır. Kısa çubuklarda bulunan burkulma gerilmesi akma sınırına yakın sonuç vermektedir

Johson yöntemiyle elde edilen burkulma gerilmesini ( $\sigma_{br}$ ), akma sınırı ( $R_e$ ), elastisite modülü ( $E$ ) ve narinlik katsayısına ( $\lambda$ ) bağlı Denklem 3.7’de ifade edilmiştir.

$$\sigma_{br} = R_e - \left( \frac{R_e}{2\pi} \right)^2 \times \frac{\lambda^2}{E} \quad (3.7)$$

Boru profilinin yüzey alanına uygulanan kuvvete ( $F_p$ ) bağlı basma gerilmesi Denklem 3.8’deki ifade ile bulunabilir;

$$\sigma_b = \frac{F_p \times 4}{\pi \times (D^2 - d^2)} \quad (3.8)$$

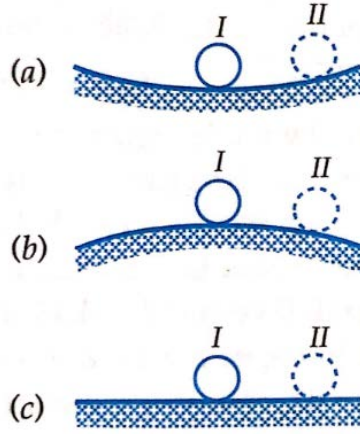
Burkulma gerilmesinin ( $\sigma_{br}$ ) basma gerilmesine ( $\sigma_b$ ) oranı olarak tanımlanan emniyet katsayısı Denklem 3.9’da ifade edilen gerilmelerin oranları ile bulunabilir;

$$s = \frac{\sigma_{br}}{\sigma_b} \quad (3.9)$$

Yukarıda bahsi geçen durumlar neticesinde boru profil milinde elastik bölge davranışları için Denklem 3.7’deki Johnson yöntemi kullanılarak kritik burkulma gerilmesi incelenebilmektedir (Şekercioğlu,2015).

### 3.3.2 Elastik Stabilite

Elastik stabilite denge konumundaki sistemin kararlılığının incelenmesidir. Sistem stabilite problemi yönünden incelendiğinde dış etkiler ortadan kalktıktan sonra hareket yapısındaki değişiklik temel kriter olarak değerlendirilmektedir. Sistem kararlı yapıya sahip değilse çok küçük etkiler de bile geri dönmeyebilir ve çökebilmektedir. Sisteme uygulanan yük etkileri ortadan kalktıktan sonra denge konumuna geliyorsa Şekil 3.8-a'daki gibi kararlı denge konumdadır. Etkiler ortadan kalktıktan sistem denge konuma gelmiyorsa Şekil 3.8-b'deki gibi kararsız denge konumudur. Denge konumuna tekrar geri dönmez ama ondan da uzaklaşmaz ise Şekil 3.8-c'deki gibi tarafsız denge konumunu ifade etmektedir (İnan, 2018).



**Şekil 3.8.** Denge konumları a) Kararlı denge konumu, b) Kararsız denge konumu, c) Tarafsız denge konumu (İnan, 2018)

Burkulma probleminde P yükü ortadan kalktıktan sonra sistem eski haline dönmeyebilir. P yükü çok büyük veya çubuğun narin olması durumunda kararlılık sorgulanmalıdır. Kararlı durumdaki  $P_k$  yükü bulduktan sonra malzeme kesit-cidar kalınlığında değişim yapılarak böylece optimum değer elde edilmiş olacaktır (Bakioğlu, 2009).

### 3.3.3 Elastik Stabilite Yöntemleri

Stabilite yöntemi dinamik, statik ve enerji yöntemleri olarak üç kısımda incelenmektedir. Stabilite yöntemi dinamik yöntemle incelendiğinde sistem denge konumundan küçük bir ayrılma yaptırılarak sistemin hareketi incelenmektedir. Denge konumu etrafında titreşim

hareketi yaparsa kararlı, yapmaz ise kararsız denge durumudur. Genel bir yöntem olup uygulaması zordur. Statik yöntemle incelediğimizde denge konumu yanında ikinci bir denge konumu olup olmadığına bakılmaktadır. İkinci denge konumu var ise bir denge konumu farksız denge konumu olup kararlı durum ile kararsız durum arasında limit hali olmaktadır. Statik yöntem çok sık uygulanır fakat genel bir yöntem değildir. Enerji yöntemleri, sistemin sahip olduğu potansiyel enerjinin en büyük ve en küçük durumlarına göre seçilmektedir. Bu yöntem genel olamamakla birlikte konservatif sistemlere uygulanabilmektedir (Bakioğlu, 2009).

Bu tez çalışmasında sistemin sahip olduğu potansiyel enerjinin minimum olmasından dolayı konum kararlılığı belirlenirken enerji yöntemleri ilkesi kullanılmıştır. Böylelikle “Sistem hangi kritik yük ( $P_k$ ) altında kararlıdır?” sorusuna cevap aranmıştır-. Boru profil probleminde teorik olarak kritik yük elde ederken enerji yöntemleri ilkesinden olan Rayleigh Oranına göre çözümler elde edilmeye çalışılmıştır.

### **3.3.4 Burkulma Hesaplamalarında Enerji Yöntemleri**

Enerji metotları elastik kararlılık ve kritik yüklerin elde edilmesi problemlerinde denge denklemleri yaklaşımlarına göre çok daha kolay çözümler sunarlar. Enerji yöntemi çubuğun denge konumu kararlılığına çözüm elde etmeye çalışırken enerji yöntemine dayanan kriterleri incelemektedir. Boru profil yapı elemanına aksenal bası yüklemesi şeklinde kuvvet uygulanır ise aksenal yer değiştirmeden dolayı bası yüklemesi iş yapmış olmaktadır. Boru profil milinde eğilme ve kısalma nedeniyle gerinim enerjisinin depolanmasını sağlanmaktadır. Daha önceden de bilindiği üzere yapılan iş her zaman için enerjideki değişime eşittir (Potuk, 2019).

Enerji yöntemi kullanılarak stabilite problemi genel bir tarzda incelenebilir. Konservatif ve lineer elastik cisimlerde dengenin kararlılığını belirleyen bir kriter tanımlanır. Stabilite kriterini oluşturmak için “sistemin toplam potansiyeli” olarak bilinen,  $\Pi$  fonksiyonu tanımlanır. Bu fonksiyon, sistemin  $U$  iç potansiyel enerjisi (elastik enerji) ile sisteme etkiyen dış kuvvetlerin  $\Omega$  potansiyel enerjisinin toplamına eşittir.

$$\Pi = U + \Omega \quad (3.10)$$

İhmal edilebilecek mertebedeki bir sabiti hesaba katmazsak  $\Omega = -W_E$ ; kuvvetlerin uygulanması sırasındaki sistemin kaybettiği potansiyel enerji miktarı, dış kuvvetlerin sistem üzerinde yaptığı işe eşittir. Denklem 3.10'daki denklem aşağıdaki şekilde yazılır:

$$\Pi = U - W_e \quad (3.11)$$

Klasik mekanikten bilindiği gibi, dengede olan bir sistemin  $\Pi$  potansiyeli kararlı olmalıdır; yani  $\Pi$  varyasyonu sıfıra eşit olmalıdır.

$$\delta\Pi = \delta U - \delta W_e = 0 \quad (3.12)$$

yani  $\Pi$ 'nin bağlı olduğu bağımsız değişkene göre türevi sıfır olmalıdır. Dengenin stabilitesi hakkında fikir sahibi olabilmek için  $\Delta\Pi$  değişim ifadesinin

$$\Delta\Pi = \delta\Pi + \frac{1}{2!}\delta^2\Pi + \frac{1}{3!}\delta^3\Pi + \dots \quad (3.13)$$

Sıfırdan farklı ilk teriminin işaretine bakılır. Lineer elastik sistemlerde ikinci terimin işaretini incelemek yeterlidir. Denklem 3.12'den stabilite kriteri belirlenir; şöyleki,

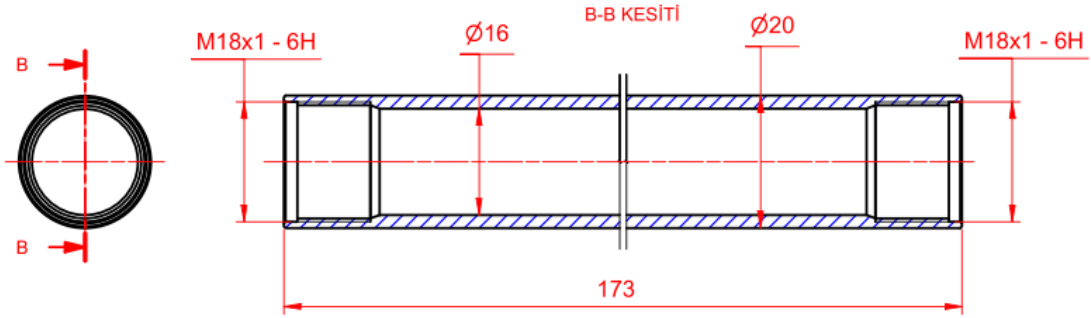
$$\begin{aligned} \delta^2\Pi > 0, & \text{ Kararlı bir denge} \\ \delta^2\Pi < 0 & \text{ Kararsız bir denge} \\ \delta^2 & = 0 \text{ Tarafsız bir denge} \end{aligned} \quad (3.14)$$

konumunu verir (Popov, 1990; İnan, 2018).

### 3.4 Boyutlandırma ve Malzeme

Teorik hesaplama ve deneysel yöntemlerde ana kriterlerden biri boru profil milinin geometrisi ve malzeme kriteridir. Tez çalışmasında geometri kriteri Inventör programının 3D ortamından faydalanarak oluşturulmuştur. Bu program kullanılarak Şekil 3.9'da görüldüğü 2B teknik resim ve boyutlandırma kriterleri oluşturulmuştur. Şekilde

bahsedilen geometriye sahip dış çapı 20 mm, iç çap 16 mm, boy (l) 173 mm ve M18x1-6H boyutları referans numune ölçüleridir. Deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere Çizelge 3.6’da bahsedilen iç çap, boy ve dış formuna bağlı geometriler tanımlanmıştır. Böylelikle her iki mesnetlenme durumu için altı adet farklı geometriye sahip numuneler oluşturulmuştur. Teorik hesaplamalarda ise işlem kolaylığı sağlaması amacıyla dış geometrileri ihmal edilmiş malzeme geometrisi kullanılmıştır.



**Şekil 3.9.** Elektrikli eyleyici de kullanılan boru profil milin geometrisi

Yapı olarak kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri her yönde ve noktada aynı olduğu varsayılarak tez çalışmasında homojen ve izotropik kabulü yapılmıştır. Homojen kabulü ve elastik davranış için malzemenin genel özelliklerinden elastisite modülü, kayma modülü, poisson oranı ve özkütle tanımlanmalıdır. Doğrusal bölge için, kayma gerilmesi ile kayma şekil değiştirmesi arasındaki oran olan kayma modülü  $G$ , elastisite modülü ve poisson oranına bağlı olarak, Denklem 3.15’deki gibi ifade edilebilir.

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (3.15)$$

Yapılışının basit olması ve malzemeye hasar vermemesi nedeniyle malzeme üzerinde yapılan mekanik deneylerden biri sertlik deneyidir. Ayrıca, bir malzemenin sertliği ile diğer mekanik özellikleri arasında paralel bir ilişki de bulunmaktadır. Sertlik ölçümü sayesinde malzeme hakkında fikir edinilebilmektedir. Örneğin çeliklerde, çekme mukavemeti sertlik değeri ile orantılıdır. Dolayısıyla yapılan basit bir sertlik deneyi



sonucunda o malzemenin mukavemet değerleri hakkında da fikir elde edilebilir (Şekercioğlu, 2018). Bölüm 3.7.2.1’de sertlik ölçümünden detaylı bir şekilde bahsedilmiştir. Boru profil milinin SAE 304 ve AL 6082 malzemelerinin fiziksel ve mekanik özellik karşılaştırması Çizelge 3.2’de belirtilmiştir.

**Çizelge 3.2.** SAE 304 ve AL 6082 malzemelerinin fiziksel ve mekanik özellikleri

<b>Mekanik ve Fiziksel Özellikler</b>	<b>SAE 304</b>	<b>SAE 304 (Ölçülen)</b>	<b>AL 6082</b>	<b>AL 6082 (Ölçülen)</b>
Özkütle $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	8000	-	2700	-
Elastisite Modülü E (MPa)	193000	-	70000	-
Possion Oranı $\nu$	0,29	-	0,33	-
Akma Dayanımı R <sub>e</sub> (MPa)	210	173	103	117
Çekme Dayanımı R <sub>m</sub> (MPa)	564	624	310	336
Sertlik (HRB)	88	89	64 (HB)	27

Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kimyasal bileşenleri içeren EN 573-3 standart tında yer alan EN AW AL 6082 malzemelerin kimyasal kompozisyonları Çizelge 3.3’de belirtilmiştir. Spektral test ölçüm yöntemiyle elde edilen malzeme kimyasal kompozisyonlarına ilişkin açıklama deney hazırlama bölümünde 3.7.2.2’de detaylı şekilde paylaşılmıştır. Aşağıdaki AL 6082 malzemelerin EN573-3 alüminyum ve alüminyum alaşım standardı, tedarikçi sertifikası ve spektral test ölçümü sonucunda elde edilen kimyasal bileşenlerin karşılaştırılması paylaşılmıştır.

**Çizelge 3.3.** AL 6082’in kimyasal kompozisyonu

<b>Kaynak</b>	<b>Al</b>	<b>Cr</b>	<b>Cu</b>	<b>Fe</b>	<b>Mg</b>	<b>Mn</b>	<b>Si</b>	<b>Ti</b>	<b>Zn</b>
<b>Literatür</b>	97,73	Max:0,25	Max;0,1	Max:0,5	0,45-0,9	0,4-1,0	0,7-1,3	Max;0,1	Max;0,2
<b>Sertifika</b>	96,15	0,21	0,096	0,43	0,86	0,94	1,18	0,02	0,11
<b>Ölçülen</b>	95,37	0,038	0,0379	0,344	0,6	0,069	1,27	0,0426	0,178

SAE 304 malzemelerin kimyasal kompozisyon içerikleri EN-1.4301 standardında belirtilmiştir. Tedarikçiden alınan malzeme sertifikası ve EN-1.4301 paslanmaz çelik standardı Çizelge 3.4’de belirtilmiştir.

**Çizelge 3.4.** SAE 304’in kimyasal kompozisyonu

<b>Kaynak</b>	<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>
<b>Literatür</b>	Max;0,08	Max;0,75	Max;2	0,05	Max;0,015	17-19,5	8-10,5
<b>Sertifika</b>	0,019	0,37	1,31	0,04	0,005	18,39	8,04

### **3.5 Kütle Hesabı**

Bu bölümde burkulma davranışları incelenecek SAE 304 ve AL 6082 malzemelerin kütleleri incelenmek istenmiştir. Kütle hesaplaması için geometriye ve malzemelerin öz kütlelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Çizelge 3.2’de SAE 304 ve AL 6082 özgül kütleleri paylaşılmıştır. İnvantör programı yardımıyla tasarlanan boru profil millerinin kütleleri, özgül kütlelerinden yola çıkılarak 145,578 g ve 49,132 g olarak bulunmuştur. SAE 304 ve AL 6082 malzemeler kütle bakımından incelendiğinde 96,4 g fark olduğu gözlenmiştir.

### **3.6 Hesaplamalar**

#### **3.6.1 Rayleigh Oranı ile Kritik Burkulma Yükünün Hesaplanması**

Enerji yöntemleri, çubuğun denge konumunun kararlılığını enerji kavramına dayanan kriterler ile incelenmektedir. Sistem içindeki toplam enerji değişimden faydalanılarak sonuçlar elde edilebilmektedir. Denge konumunda toplam potansiyel enerjinin sıfır olma şartından sisteme ait kritik burkulma değeri bulunabilmektedir. Enerji denkleminde normal kuvvet (P) ve kritik burkulma kuvveti ( $P_{kr}$ ) değerinin eşit olması halini göz önüne alan kritik değer  $P = P_{kr}$  olacağından aşağıdaki Rayleigh Oranı bağıntısı ile elde edilebilmektedir (İnan, 2018).

$$P_k = \frac{\int_0^l EJ \left( \frac{d^2v}{dz^2} \right) \cdot dz}{\int_0^l \left( \frac{dv}{dz} \right)^2 \cdot dz} \quad (3.16)$$

Kritik yükü hesaplayabilmek için elastik eğriyi bilmek gerekir fakat bu ise çok zordur. Gerçek elastik eğri yerine bazı sınır şartlarını sağlayan çökme ve dönme şartlarını uygun bir eğri kullanıldığından,  $P_{kr}$  yerine yaklaşık bir  $(P_{kr})^*$  değeri elde edilir. Bu yaklaşık  $P_{kr}$  değeri en küçük burkulma yükünden daima büyüktür, yani  $(P_{kr})^* \geq P_{kr}$  dir. Seçilen yaklaşık eğri sınır şartları ne kadar fazla ise o kadar iyi sonuç vermektedir. (Bakioğlu, 2009).

Yukarı bahsi geçen açıklamalar neticesinde Denklem 3.16'da verilen Rayleigh Oranı eşitliğinden, sınır şartları ve yükleme koşul kabulleri yapılarak denklemler elde edilmek amaçlanmıştır.  $L_k=0,7 L$  mesnetlenme koşulunda üst montaj noktasında mafsal mesnet, alt montaj noktasında ise ankastre mesnetlenme kabulleri aşağıdaki gibidir.

$$v(l) = v''(l) = 0 \text{ (Mafsal mesnetlenme)}$$

$$v(0) = v'(0) = 0 \text{ (Ankastre mesnetlenme)}$$

Sınır şartları ve yükleme koşullarına göre Rayleigh oranı farklılık göstermektedir. Rayleigh oranı genel denkleminin 4. Mertebeden adi lineer diferansiyel açılımı aşağıdaki Denklem 3.17'de belirtilmiştir.

$$EJ \left( \frac{d^4v}{dz^4} \right) + P \left( \frac{d^2v}{dz^2} \right) = 0 \quad (3.17)$$

Diferansiyel denkleminin kökleri aşağıdaki Denklem 3.18'in çözümünden elde edilebilmektedir.

$$EJm^4 + Pm^2 = 0 \quad (3.18)$$

Denklem 3.19 çözümlendiğinde çift katlı kök ve iki adet sanal kök elde edilmiştir.

$$m = 0 \text{ (çift katlı kök) ve } m = \pm i \sqrt{\frac{P}{EJ}} = \pm Ki$$

Denklem 3.18'deki diferansiyel denklemin çözüm kümesinden aşağıdaki denklemler elde edilmiştir.

$$v = C_1 e^{0z} + C_2 z e^{0z} + C_3 \cos(Kz) + C_4 \sin(Kz) \quad (3.19)$$

$$v' = C_2 - C_3 K \sin(Kz) + C_4 K \cos(Kz) \quad (3.20)$$

$$v'' = -K^2(C_3 \cos(Kz) + C_4 \sin(Kz)) \quad (3.21)$$

$L_k = 0,7$  L mesnetlenme sınır şartlarında Denklem 3.19, Denklem 3.20 ve Denklem 3.21'deki denklemler kullanılarak  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  ve  $C_4$  sabit sayı değerleri aşağıda belirlenmiştir.

$z = 0$  için  $v(0) = 0$  olmak üzere;

$$\begin{aligned} 0 &= C_1 + C_2 \cdot 0 + C_3 + C_4 \cdot 0 \\ &= C_1 + C_3 \end{aligned} \quad (3.22)$$

$z = 0$  için  $v'(0) = 0$  olmak üzere;

$$0 = C_2 + KC_4 \quad (3.23)$$

$z = l$  için  $v(l) = 0$  olmak üzere;

$$0 = C_1 + C_2 l + C_3 \cos(Kl) + C_4 \sin(Kl) \quad (3.24)$$

$z = l$  için  $v''(l) = 0$  olmak üzere;

$$0 = -K^2 C_3 \cos(Kl) - K^2 C_4 \sin(Kl) \quad (3.25)$$

Denklem 3.22, Denklem 3.23, Denklem 3.24 ve Denklem 3.25'deki denklemler sadeleşmiş biçimde aşağıda belirtilmiştir.

$$C_1 + C_3 = 0 \quad (\text{I}) \quad (3.26)$$

$$C_2 + KC_4 = 0 \quad (\text{II}) \quad (3.27)$$

$$C_1 + C_2l + C_3 \cos(Kl) + C_4 \sin(Kl) = 0 \quad (\text{III}) \quad (3.28)$$

$$C_3 + C_4 \tan(Kl) = 0 \quad (\text{IV}) \quad (3.29)$$

Denklem 3.26, Denklem 3.27, Denklem 3.28 ve Denklem 3.29'den elde edilen  $C_2$  değerleri diferansiyel denklemde yerine yazıldığında;

$$v = \left[ -\frac{C_2}{K} \tan(Kl) \right] + C_2 z + \left[ \frac{C_2}{K} \tan(Kl) \cos(Kz) \right] + \left[ \frac{-C_2}{K} \sin(Kz) \right] \quad (3.30)$$

$$v' = C_2 [1 - \tan(Kl) \sin(Kz) - \cos(Kz)] \quad (3.31)$$

$$v'' = C_2 [-K \tan(Kl) \cos(Kz) + K \cdot \sin(Kz)] = C_2 \cdot K [\sin(Kz) - \tan(Kl) \cos(Kz)] \quad (3.32)$$

Denklem 3.17'deki Rayleigh Oranı eşitliğinde Denklem 3.30, Denklem 3.31, Denklem 3.32'deki ifadeler yerine yazıldığında Denklem 3.33'deki kritik burkulma kuvvet denklemini elde edilmiştir.

$$P_k = EJK^2 \frac{-\frac{\tan(Kl)}{2K} + \frac{l}{2} - \frac{\sin(2Kl)}{4K} + \tan^2(Kl) \left( \frac{l}{2} + \frac{\sin(2Kl)}{4K} \right) + \frac{\tan(Kl) \cos(2Kl)}{2K}}{l + \tan^2(Kl) \left( \frac{l}{2} - \frac{\sin(2Kl)}{4K} \right) + \frac{2 \tan(Kl)}{K} \cos(Kl) + \left( \frac{l}{2} + \frac{\sin(2Kl)}{4K} \right) - \frac{2}{K} \sin(Kl) - \frac{\tan(Kl)}{2K} \cos(2Kl) - \left[ \frac{2 \tan(Kl)}{K} - \frac{\tan(Kl)}{2K} \right]} \quad (3.33)$$

### 3.7 Deneysel Çalışma

Bu bölümde AL 6082 ve SAE 304 malzemelerden oluşan farklı boyutsal yapıdaki boru profil milinin kritik burkulma yükleri deneysel olarak ölçülmüştür. Kritik yük değerleri elde edilmeden önce deneysel verilerin alt yapısını oluşturmak için malzemenin mekanik, kimyasal, mukavemet özellikleri ölçüm yöntemleriyle elde edilip tedarikçi sertifikalarıyla doğruluğu sağlanmıştır. Malzeme deneyleriyle elde edilen veriler üzerinden burkulma testi aşamasında malzeme davranışı hakkında fikir oluşması sağlamıştır. Deneysel verilerden elde ettiğimiz kritik yük değerleri teorik hesaplamalarla karşılaştırılarak boru profil millerinin burkulma yapıları incelenmiştir.

#### 3.7.1 Deney Düzenegi

Deney numunelerinin kritik yük değerlerini tespit edebilmek için firmanın test laboratuvarı bünyesinde bulunan Zwick Roell Z250 deney düzenegi kullanılmıştır. Şekil 3.10-a'daki fotoğraflarda gösterilmiştir. Çift kolonlu, kolonlar arası boşluk 610 mm, test uzunluğu 768mm, 0,0005-600 mm/dak'lık çene hızları çalışma aralığında test cihazıyla 250 kN kapasiteye kadar değer ölçümü yapılabilmektedir. Tutucuların üst kısmında bulunan yük hücresi (load cell) sayesinde kuvvet elektrik sinyaline dönüştürülmektedir. Yük hücresi ile toplanan veriler bilgisayara aktarılarak kuvvet-yer değiştirme grafikleri alınabilmektedir. Tez kapsamında malzemelerin mekanik özellikleri hakkında detaylı bilgi sahibi olmak için paydaş firmalarla ortak çalışma yapılarak Şekil 3.10-b'de ki INSTRON 5582 test cihazında 15 mm/dak test hızında mukavemet özellikleri incelenmiştir.



(a)

(b)

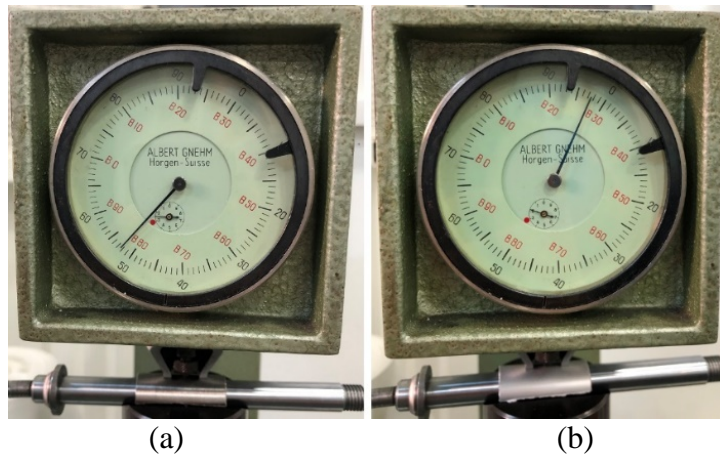
Şekil 3.10. Test cihazı a) Zwick Roell Z250, b) INSTRON 5582 test cihazı

### 3.7.2 Numune Hazırlama

Burkulma deney numunesi hazırlama aşamasında mesnetlenme şekli, malzeme ve deney tesisatı uygun hale getirilmelidir. Numunelerin kullanım yeri bize mesnetlenme durumu hakkında, malzeme bilgisi malzemelerin davranışı, deney tesisatı ise nasıl uygulanması gerektiği hakkında yardımcı olmaktadır. Hesaplamalar bölümünde mesnetlenme durumu hakkında detaylı bilgi paylaşılmıştır. SAE 304 ve AL 6082 malzemelerinin burkulma testine tabi tutulmadan önce malzeme hakkında net bilgi elde edebilmek için malzemelerin sertlik ölçümleri, kimyasal ve fiziksel testleri yapılmıştır. Malzeme bilgisi hakkında tedarikçilerden elde edilen malzeme sertifikası ve ölçüm sonuçları detaylı bir şekilde gösterilmiştir (Çizelge 3.2).

#### 3.7.2.1 Sertlik Ölçümü

SAE 304 ve AL 6082 malzemelerinin sertlik ölçümleri Gnehm Horgen G-100 test cihazı ile HRB olarak ölçülmüştür. Rockwell B sertlik ölçümü için numuneler testere yardımıyla orta kısımdan kesilmiştir. Kesiti alınan numuneler ölçüm sırasında yüzeye tam baskı oluşturması için borunun iç kısmı mil ile desteklenerek oda sıcaklığında (20°) her numune için iki kere ölçüm yapılmıştır. Sertlik ölçüm yöntemleri sonucunda aşağıda Şekil 3.11-a görüldüğü üzere SAE 304 malzeme 89 HRB, Şekil 3.11-b'de ise AL 6082 malzeme 27 HRB olarak ölçülmüştür.



**Şekil 3.11.** Rockwell B cihazıyla sertlik ölçümü a) SAE 304 malzeme, b) AL 6082 malzeme

### 3.7.2.2 Spektral Analiz

Malzemeler için önemli kriter olan Spektral analiz ölçüm yöntemleri malzemelerin kimyasal kompozisyonu hakkında en net fikir veren test yöntemlerinden biridir. Malzemelerin yakılırken buharlaştırılması sırasında yaydığı ışınım esnasında açığa çıkan renklerden kimyasal yapının, ışık şiddetinden ise miktarını algılamasıyla malzemelerin kimyasal yapılarını çözümleme yöntemidir (Anonim, 2017). Bu yöntem kullanılarak malzemelerin kimyasal bileşenleri hakkında fikir elde edilmiş ve böylece Al 6082 ve SAE 304 malzemelerin standardına uygunluk kontrolü sağlanmıştır. Çizelge 3.3 ve Çizelge 3.4'de paylaşılan test raporlarında malzemelerin kimyasal kompozisyonları oransal olarak belirtilmiştir.

### 3.7.2.3 Çekme Deneyi

Malzeme özelliklerini anlayabilmek için yapılan mekanik testlerden biriside çekme deneyidir. Malzemelerin statik yük altındaki elastik ve plastik davranışlarını belirlemek için boru profil mil parçasına aksenal ve değişken kuvvetler uygulayarak uzama miktarlarının kaydedilmesiyle elde edilmektedir (Şekercioğlu, 2018). Malzemelerin akma ve çekme noktaları hakkında detaylı bilgi sahibi olmak için paydaş firmalarla ortak çalışma yapılarak INSTRON 5582 çekme test cihazında mukavemet özellikleri incelenmiştir (Çizelge 3.5).

Çekme deneyi yapılmadan önce numuneler test cihazına uygun hale getirilmiştir. SAE 304 malzemenin çekme numunesi hazırlığı aşamasında dış çap 20 iken test cihazı bağlantı çenelerine uygun hale getirilmesi için dış çap  $\varnothing 18,65$  düşürülmüştür. İki çene arasında işaretleme mesafesini ayarlayabilmek için boy 320 mm getirilmiştir. Sabit alt çene ve hareketli üst çeneden boru profil mili sabitlenmesi ve çenelere temas noktalarında profil üzerine baskıyı azaltmak için  $\varnothing 16 \times 60$  mm ölçülerinde dolu malzemedan Şekil 3.12'de belirtildiği üzere miller hazırlanmıştır.





**Şekil 3.12.** SAE 304 ve AL 6082 çekme test numuneleri

Dolu miller boru profil millerinin iç kısımlarına montajlanmıştır. Boru profil milleri çeneler arasına eksenecek biçimde olması sağlanarak alt ve üst çenelere sabitleme yapılmıştır. Boru profil millerinin çekme yükü altındaki malzeme uzamaları ekstansometre cihazıyla ölçülmüştür. Şekil 3.13’de belirtildiği üzere uzama mesafesi 80 mm ve daralma mesafesi 20 mm olacak biçimde beyaz kalemle işaretlenmiştir. Numuneler gittikçe artan bir kuvvetle çekilmeye başlayınca beyaz ile işaretlenmiş çizgilerde boy bölgesinde uzamalar çap bölgelerinde daralma gerçekleşerek kopuncaya kadar yük uygulanmıştır. SAE 304 malzemenin Şekil 3.13’de belirtildiği üzere çekme deneyi öncesi ve deney sonrasında kopma gerçekleştiği andaki fotoğrafları paylaşılmıştır.



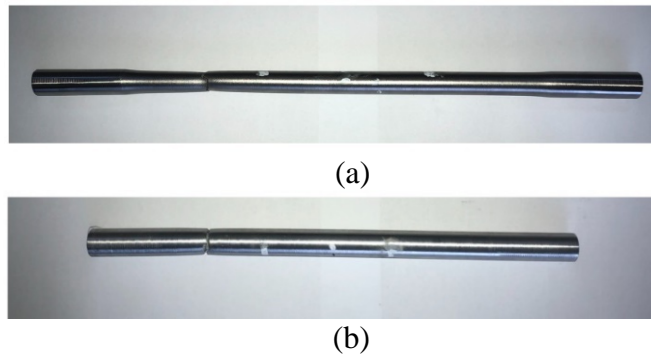
**Şekil 3.13.** SAE 304 Çekme deneyi

AL 6082 malzemenin çekme numunesi hazırlığı aşamasında dış çap 20 iken test cihazı bağlantı noktalarındaki çenelere uygun hale getirilebilmesi için dış çap 18,57 ölçüsüne düşürülmüştür. İki çene arasında işaretleme mesafesi ayarlayabilmek için boy 310 mm getirilmiştir. Sabit alt çene ve hareketli üst çeneden boru profil mili sabitlenmesi ve çenelere temas noktalarında profil üzerine baskıyı azaltmak için Ø16x60 mm ölçülerinde dolu malzemedan Şekil 3.12’de belirtildiği üzere miller hazırlanmıştır. AL 6082 malzemenin Şekil 3.14’de belirtildiği üzere çekme deneyi öncesi ve deney sonrasında kopma gerçekleştiği andaki fotoğrafları paylaşılmıştır.



**Şekil 3.14.** AL 6082 Çekme deneyi

Çekme deneyi öncesinde aynı boyda olmalarına rağmen deney sonrasında Şekil 3.15’de belirtildiği üzere SAE 304 malzemenin uzaması AL 6082 malzemenin uzamasına kıyasla daha yüksek çıkmıştır. SAE 304 malzemenin sünekliliği AL 6082 malzemesine göre yüksek çıkmıştır.



**Şekil 3.15.** Çekme deneyi sonrası görüntü. a) SAE 304 malzeme, b) AL 6082 malzeme

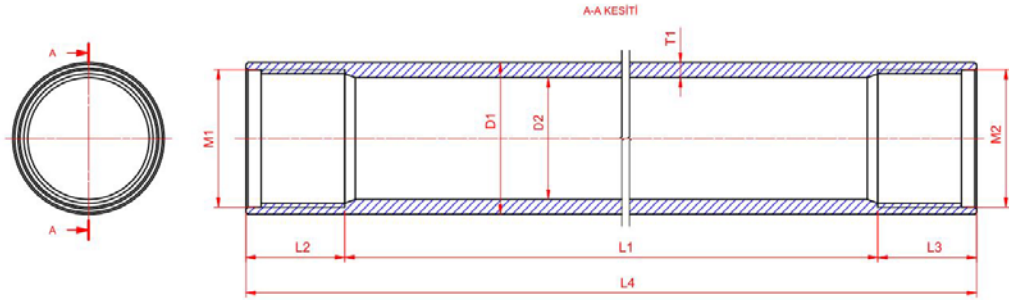
SAE 304 malzemenin akma dayanımı 173 MPa ve AL 6082 malzemenin 117 MPa olduğu tespit edilmiştir. SAE 304 malzemenin çekme dayanımı 624 MPa ve AL 6082 malzemenin çekme dayanımı 336 MPa olarak elde edilmiştir. INSTRON 5582 test cihazından alınan raporlarda akma dayanımı, çekme dayanımı ve kopma boyları Çizelge 3.5’de paylaşılmıştır.

**Çizelge 3.5.** SAE 304 ve AL 6082 boru malzemelerin çekme deneyi rapor sonuçları

Malzeme	Akma Dayanımı (Rp0.2) (N/mm <sup>2</sup> )	Çekme Dayanımı (Rm) (N/mm <sup>2</sup> )
SAE 304	173	624
AL 6082	117	336

### 3.7.2.3 Burkulma Test Numunesi Hazırlama

Burkulma numunesi hazırlama aşamasında malzeme ve geometrisi temel kriter oluşturmaktadır. Tedarikçilerden alınan malzeme sertifikaları, sertlik ölçümü ve spektral deneyleri neticesinde AL 6082 ve SAE 304 malzemeleri burkulma testi aşamasında numune olarak kullanımına uygun bulunmuştur. Deneylerde malzeme ve boyutsal parametre kriterleri için Şekil 3.16’da belirtildiği gibi boru profil mili modellenmiştir.



**Şekil 3. 16.** Boru profil milinin kesit gösterimi

Elektrikli silindir ürünün yapı elemanlarından boru profil mili Şekil 3.16’daki teknik resim boyut gösterimine bağlı olarak Çizelge 3.6’deki değerlere göre CNC torna ve freze kullanılarak imal edilmiştir. Deneysel çalışmalarda sonuçların doğruluğunu artırmak için her mesnetlenme durumuna uygun SAE 304 malzemedan altı adet, AL 6082 malzemedan

iki adet olmak üzere toplamda sekiz adet Çizelge 3.6’da belirtildiği üzere boru profil mil numunesi üretilmiştir. Boru profil millindeki farklı parametrelerin kritik burkulma kuvvetine etkisinin incelenmesi için boyutsal ölçümleri ve malzemeleri farklı numuneler oluşturulmuştur. Elektrikli silindir ürününde kullanılan ön başlık parçası kuvvet aktarımına yardımcı parça olduğundan dolayı boyutsal ölçüm parametresi oluşturulmamıştır. Deney numuneleri kendi içlerinde sekiz farklı gruba ayrılmış ve N.1 numunesi malzeme ve boyutsal ölçüm kıyaslaması için grup içinde referans numunesine olarak kabul edilmiştir. Böylelikle mesnetlenme koşullarında farklı boyut ve malzemeye bağlı boru profil millerinin etkisi incelenmiştir. N.1 ve N.6 aralığındaki numuneler Çizelge 3.6 da belirtilen M1 ve M2 ölçülerine göre dışlar açılmış fakat N.7 ve N.8 ise dış açılmayarak dış formlarının kritik burkulma kuvvetine etkisi incelenmek istenmiştir.

**Çizelge 3. 6.** Boru profil millerin kesit boyut ölçümleri

Numune	Kesit Boyutları (mm)									Malzeme	Adet
	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>4</sub>	T <sub>1</sub>	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>		
N. 1	20	16	147	13	13	173	2	M18x1-6H	M18x1-6H	SAE 304	6
N. 2	20	16,5	147	13	13	173	1,75	M18x1-6H	M18x1-6H	SAE 304	6
N. 3	20	17	147	13	13	173	1,5	M18x1-6H	M18x1-6H	SAE 304	6
N. 4	20	16	197	13	13	223	2	M18x1-6H	M18x1-6H	SAE 304	6
N. 5	20	16	247	13	13	273	2	M18x1-6H	M18x1-6H	SAE 304	6
N.6	20	16	147	13	13	173	2	M18x1-6H	M18x1-6H	AL 6082	6
N. 7	20	16	147	13	13	173	2	Diş yok	Diş yok	SAE 304	6
N. 8	20	16	147	13	13	173	2	Diş yok	Diş yok	AL 6082	6

Yukarıda bahsi geçen numunelerin farklı mesnetlenme durumlarına bağlı olarak bası yükü altında kritik burkulma kuvvetleri incelenmek istenmiştir. Mesnetlenme durumlarına göre de değişen bu kuvvetler  $L_k=0,7 L$ ,  $L_k= L$  olacak biçimde iki farklı kategoriye ayrılmıştır. Her mesnetlenme durumu için Çizelge 3.6’da belirtilen adetlerde N ile başlayan numune kodları verilmiştir.  $L_k=0,7 L$  ve  $L_k= L$  mesnetlenme durumları için çizelgede belirtilen her numune kodundan 3’er adet hazırlanmıştır.

$L_k=0,7 L$  ve  $L_k= L$  mesnetlenme durumlarında N.1, N.2 ve N.3 numunesi kullanılarak iç çap (D<sub>1</sub>) bağlı değişimin kritik burkulma kuvvetine etkisi incelenmek istenmiştir. İlk üç numune N.1, N.2 ve N.3 boyutsal ölçülendirmede iç çap değeri dışındaki boyutsal ölçümler ve malzeme sabit tutulmuştur. Bu çalışma için Çizelge 3.6’da belirtildiği üzere N.1 numunesindeki iç çap değerlerinin Ø16, N.2 numunesindeki Ø16,5, N.3

numunesindeki Ø17 olarak üç farklı iç çap ölçüsü kullanılmıştır. Böylelikle iki farklı mesnetlenme durumu için iç çap değişiminin kritik burkulma kuvvetine etkisi incelenmiştir.

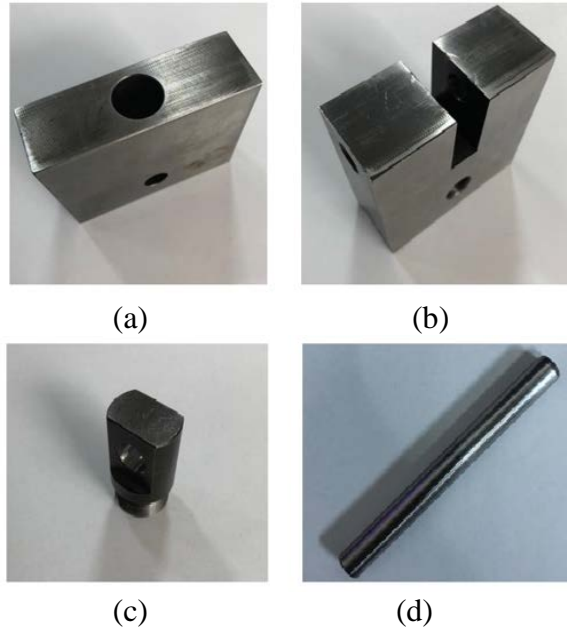
Bahsi geçen mesnetlenme durumlarında kritik burkulma kuvvetinin üzerinde boru boyunun etkisi incelenmek için N.1, N.4 ve N.5 numuneleri kullanılmıştır. N.4 ve N.5 numunelerin N.1 referans numunesinden farklı  $L_1$  boylarındaki değişimin kritik burkulma yüküne etkisi gözlenmiştir. N.1, N.4 ve N.5 numunelerin uzunluk dışındaki bütün boyutsal ölçüm değerleri ve malzeme sabit tutulmuştur. Çizelge 3.6'da belirtildiği üzere N.1 numunesindeki uzunluk değerlerinin 173 mm, N.2 numunesindeki 223 mm, N.3 numunesindeki 273 mm olarak üç farklı uzunluk ölçüsü kullanılmıştır. Böylelikle iki farklı mesnetlenme durumu için uzunluk değişiminin kritik burkulma kuvvetine etkisi incelenmiştir.

Kritik burkulma kuvvetinin mesnetlenme durumlarındaki malzemelerin etkisini incelenmek için SAE 304 malzemeden imal edilen N.1 ve AL 6082 malzemeden imal edilen N.6 numuneleri kullanılmıştır. N.1 ve N.6 numunelerinin malzeme özellikleri farkından yararlanılarak kritik burkulma yüküne etkisi incelenmek istemiştir. N.1 ve N.6 numunelerin malzemelerin dışındaki bütün boyutsal ölçüm değerleri sabit tutulmuştur. Böylelikle iki farklı mesnetlenme durumu için malzeme özelliklerinin kıyaslanması yapılarak kritik burkulma kuvvetine etkisi incelenmiştir.

$L_k=0,7 L$  ve  $L_k= L$  mesnetlenme durumlarında kullanılması amacıyla numunelerde Çizelgede 3.6'da belirtilen M1 ve M2 diş formları ortadan kaldırılarak SAE 304 malzemeden imal edilen N.7 ve AL 6082 malzemeden imal edilen N.8 numuneleri kullanılmıştır. N.7 ve N.8 malzeme özellikleri ve üzerindeki M1 ve M2 diş formları eklenmeyerek kritik burkulma yüküne etkileri gözlenmiştir. N.7 ve N.8 numunelerin malzeme ve diş formu dışındaki bütün boyutsal ölçüm değerleri sabit tutulmuştur. Böylelikle iki farklı mesnetlenme durumu için diş etkileri ortadan kaldırılarak kritik burkulma kuvvetinin etkisi incelenmiştir. Ayrıca üst kısımda bahsi geçen Rayleigh Oranına bağlı AL 6082 malzemenin teorik hesaplanması ve N.8 numaralı numune ile

deneysel karşılaştırma yapılması amaçlanmıştır. Yukarıda bahsi geçen numuneler deneysel çalışmaların parametrelerini oluşturmuştur.

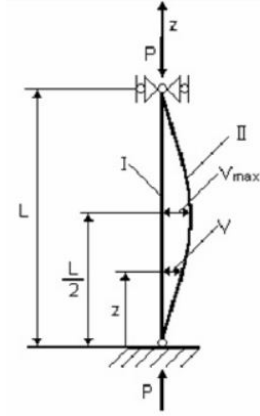
Test şartlarının oluşturulmasında diğer temel faktörlerden olan mesnetlenme durumları için hareket ve montaj yerleri incelenmelidir. Mesnetlenme şartlarını tayin eden ankastre ve mafsalama aparatları alt ve üst çenedeki montaj biçimine bağlı olarak hareket yönleri dolayısıyla mesnetlenme durumlarını değiştirmektedir. Yönlerin ve hareketlerin sağlanması için Şekil 3.17’de belirtilen alt ve üst çeneye montajlanan ankastre, mafsalama, ön başlık ve kuvvet ölçüm cihazına montajlanması için bağlantı pimi kullanılmıştır. Şekilde belirtilen soldan sağa yukarıdan aşağıya sırasıyla ankastre, mafsalama, ön başlık aparatı ve bağlantı piminin fotoğrafları paylaşılmıştır. Bahsi geçen aparat parçaları, mesnetlenme durumundaki dönme ve öteleme hareket yönlerinin sabit ve serbest olma durumunu belirlemektedir. Alt çene ve üst çeneye bağlanan ankastre aparat dönme ve öteleme yönünde hareketi sabit, başlık ile kullanılan mafsalama aparatı ise dönme yönünde serbest öteleme yönünde hareketi kısıtlamaktadır. Şekilde belirtilen aparatlar boru profil millerine kuvvet aktarımı sağlaması için Ç 4140 malzemeden 54-56 HB arasında ısıl işlem uygulanarak imal edilmiştir. Şekil 3.17’de görülen aparatlar, kuvvet ölçüm aşamasında boru profil millerinin test şartlarının oluşturulması için imal edilmiş olup fotoğrafları paylaşılmıştır.



**Şekil 3.17.** Bağlantı aparatları. a) Ankastre aparatı, b) Mafsallama aparatı, c) Ön başlık aparatı, d) Bağlantı pimi

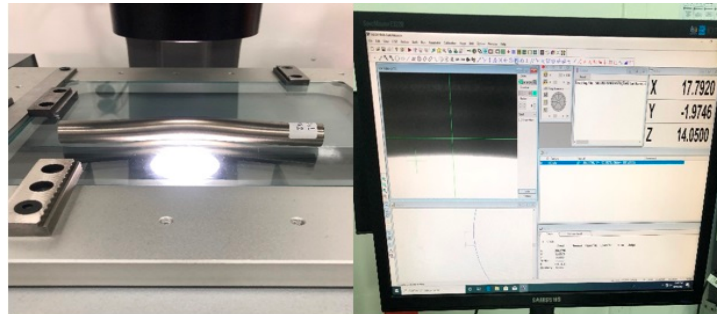
### 3.7.2.4 Test Sonrasında Ölçüm

Bası yükü altındaki burkulma deneyleri sonucunda boru millerinde Şekil 3.18’de belirtildiği üzere birinci ve ikinci durum oluşmaktadır. Bu durumlar arasındaki belirgin fark radüs, boy kısalması ve eksenel yönde yer değiştirmelerden oluşmaktadır (Anonim, 2018)



Şekil 3.18. İki uçundan mafsallı çubuk için yükleme durumu (Anonim, 2018)

Test sonrasında oluşan boyutsal değişimlerin hassas şekilde incelenmesi için aşağıda Şekil 3.19’da belirtilen CNC video ölçüm yöntemi kullanılmıştır. Test öncesinde tabla üzerine boru profil mil referanslaması yapılmıştır. Boy, radüs ve yer değiştirme değerlerinde ölçümlerin hassas olması için birçok nokta atanmıştır. Bu noktalar sonucunda elde edilen değerler deney sonuçları bölümlerinde çizelgelerde paylaşılmıştır.



Şekil 3.19. CNC video ölçüm sistemi

### 3.7.3 Burkulma Deneyi

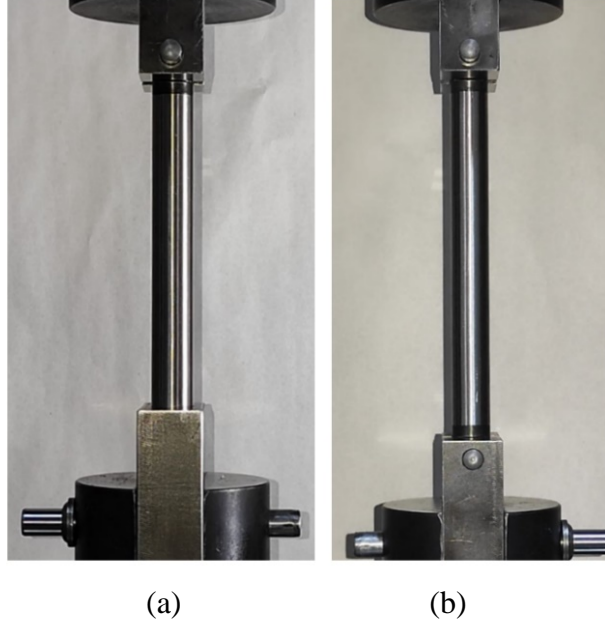
Bası yükü altında burkulma deneyinin oluşması numune özellikleri, mesnetlenme şartları, test cihazı gibi etkenlerin birlikte kullanımıyla gerçekleşmektedir. Euler-Johnson yöntemiyle kritik burkulma yükü incelemesi başlığı adı altında belirtilen mesnetlenme durumları (bkz. Şekil 3.7) kullanılarak numunelerin Zwick test cihazında kritik yük değerleri elde edilmeye çalışılmıştır. Burkulma deneyine başlamadan önce deney şartlarının uygun hale getirilmesi gerekmektedir. Test şartlarının oluşturulması aşamasında numune üzerinde herhangi bir ön yükleme olmamalı ve Loadcell (Yük hücresi) sıfırlanmalıdır. Numunelerin şekil değiştirmesini sağlayan basma kuvveti düşük hızlarda uygulanmalıdır. Testler sırasında çene hızı 10 mm/dak olarak alınmıştır. Deplasman-kuvvet grafiklerinin oluşmasında kriter olan deplasman mesafeleri 5-10-15-20 mm olarak belirlenmiştir. Kuvvet-deformasyon grafiğinde plastik deformasyon oluşurken kuvvet artışının düşmeye başladığı nokta kritik burkulma kuvvetini ifade etmektedir. Deplasman değerleri numunenin kuvvet yükseliş grafik değerlerine göre test anında en büyük kuvvete ulaşıncaya kadar kuvvet uygulanmaya devam edilmiştir. Kritik burkulma yüküne ulaşıldıktan sonra yüklemeye devam edilmemiştir. Her numune için yukarıda belirtilen test şartları yeniden tekrarlanmıştır.

Aşağıda deneysel çalışmaları yapılan  $L_k=0,7 L$  ve  $L_k= L$  Euler mesnetlenme (bkz Şekil 3.7) şartları ayrı ayrı bölümlerde ele alınmıştır. Deneysel süreçte üst bölümde hazırlanan (bkz Çizelge 3.6) numuneler kullanılmıştır. Burkulma deneylerinde kullanılan mesnetlenme yöntemlerinden biri olan  $L_k= 0,7 l$  durumu için kuvvet ölçüm cihazında alt çene ankastre ve üst çene mafsal yapıya uygun hale getirilmiştir. Şekil 3.20-a'da belirtildiği üzere alt çenede dönme ve öteleme engellenmiş üst çene ise dönme hareketi serbest öteleme hareketi ise engellenmiştir. Farklı mesnetlenme durumlarında da kullanılabilen bu aparatlar şekilde belirtildiği biçimde alt ve üst çeneye montajlanarak ankastre ve mafsal durumları oluşturulmuştur.

Burkulma deneylerinde kullanılan diğer mesnetlenme yöntemlerinden biri olan  $L_k= L$  durumu için alt ve üst çene mafsal yapıya uygun hale getirilmiştir. Şekil 3.20-b belirtildiği üzere alt ve üst çenede dönme hareketi serbest, öteleme hareketi ise engellenmiştir.



Mafsal mesnetlenme durumunun sağlanması için fotoğrafları (bkz Şekil 3.17) paylaşılan başlık parçaları alt ve üst çenelere pim yardımıyla montajlanarak boru profil milinin dönme yönünde hareket etmesi sağlanmıştır.



**Şekil 3.20.** Test öncesi görüntü a)  $L_k = 0,7 l$  mesnetlenme durumu, b)  $L_k = L$  mesnetlenme durumu

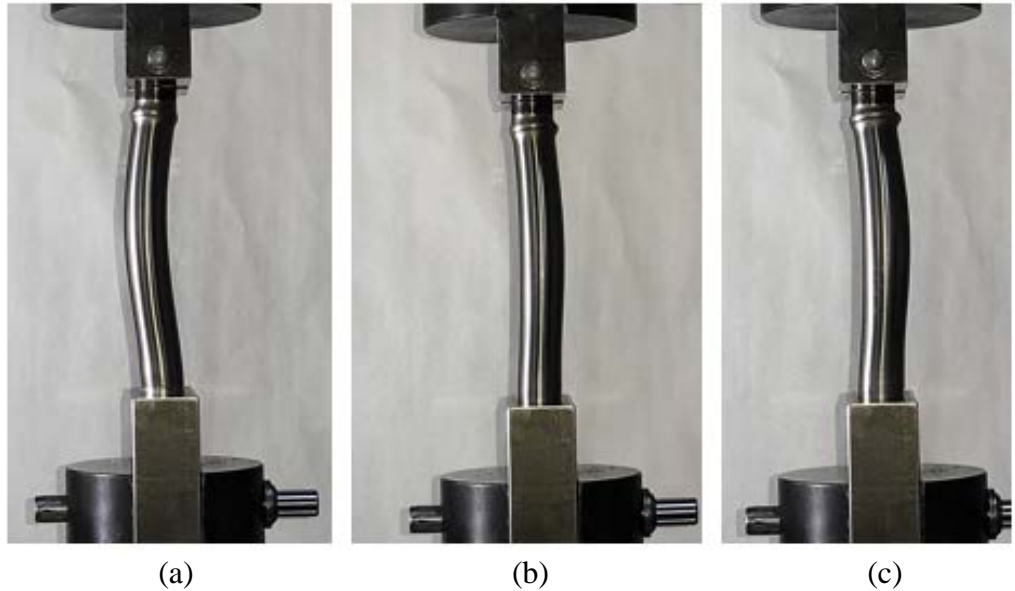
Test cihazına konumlandırılan boru profil milleri çene mesafeleri arasında ayar yapıldıktan sonra aparat yüzeylerine temaslı biçimde sabit kalması için 5N'luk ön yükleme kuvveti verilerek denge durumuna getirilmiştir. Bası yükü altında plastik deformasyonları gözlemleyebilmek için cihazın hız değeri 10 mm/dak ayarlandıktan sonra kuvvet artışı uygulanmıştır. Mesnetlenme durumlarında kuvvet ölçüm cihazından elde edilen yer değiştirme ve kuvvet değerleri Excel programına aktarılmıştır. Test parametrelerinde ortalama değerler elde edilebilmesi için 1-10 arasındaki kuvvet- yer değiştirme değerleri ve  $F_{kritik}$  değerleri bir tablo altında işlenmiştir. Numunelerden elde edilen değerler Excel formatında birleştirilerek ortalama kuvvet ( $N_{ort}$ ) ve standart sapma değerleri hesaplanmıştır. Yer değiştirme ve ortalama kuvvet değerleri dağılım grafikleri kullanılarak eğriler oluşturulmuştur. Test sonrasında ise plastik deformasyona uğrayan her numune için CNC video ölçüm cihazlarıyla radüs, yerdeğiştirme ve boy kontrolleri yapılarak kayıt altına alınmıştır.

#### 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde,  $L_k=0,7 L$  ve  $L_k=L$  mesnetlenme durumlarındaki deneysel çalışma ve  $L_k=0,7 L$  mesnetlenme durumunda Rayleigh Oranı teorik sonuçları yer almaktadır. Deneysel çalışmalarda  $L_k=0,7 L$  ve  $L_k=L$  mesnetlenme durumlarına göre iki grup halinde sonuçlar elde edilmiştir. Deneylerde SAE 304 ve AL 6082 malzeme türü, değişken cidar kalınlığı ve farklı boru boyları kullanılarak kritik yük değerleri elde edilmiştir. Ayrıca deney sonuçlarından elde edilen değerler Excel formatında birleştirilerek dağılım grafikleri halinde karşılaştırmıştır. Deneysel sonuçlarda elektrikli eyleyici için kullanıma uygun olduğu düşünülen AL 6082 malzemenin Rayleigh Oranından elde edilen teorik denklemler kullanılarak Matlab ortamında kritik burkulma yük değerleri elde edilmiştir. Böylelikle deneysel yöntemle ve teorik yöntem karşılaştırması da yapılmıştır.

##### 4.1 $L_k=0,7 L$ Mesnetlenme için Deney Sonuçları

$L_k=0,7 L$  mesnetlenme durumunda  $\varnothing 20 \times 2-173$  ölçülerine sahip SAE 304 malzemeden imal edilmiş N.11, N.12 ve N.13 numunelerinin plastik deformasyona uğramış görüntüleri Şekil 4.1'de paylaşılmıştır.



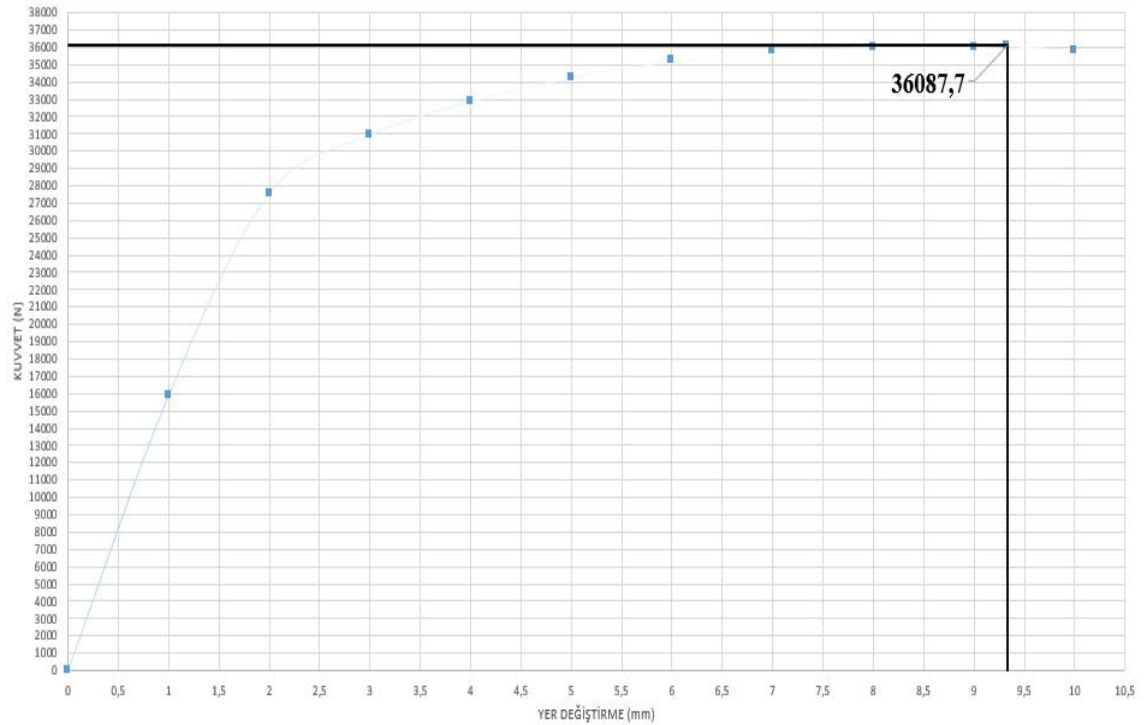
**Şekil 4.1**  $L_k=0,7 L$  mesnetlenme durumunda numunelerin yükleme sonrası görüntüleri  
a) N.11 numunesi, b) N.12 numunesi ve c) N.13 numunesi

Bu mesnetlenme durumunda N.11, N.12 ve N.13 numunelerinin kuvvet ölçümü sonucunda elde edilen kuvvet ve yer değiştirme değerleri izelge 4.1’de paylaşılmıştır. Test sonuçlarından elde edilen değerler kuvvet-yer değiştirmelere bağlı olarak standart sapma 745 N ve  $N.1_{ort}$  kritik kuvvet değeri 36088 N olarak hesaplanmıştır (izelge 4.1).

**Çizelge 4.1.**  $L_k=0,7 L$  mesnetlenme için N.11, N.12, N.13 ve  $N.1_{ort}$  numunelerinin kuvvet-yer değiştirme değerleri

Numune	$F_{kritik}$	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm	6 mm	7 mm	8 mm	9 mm	10 mm
N.11	35247,38	23334,90	29011,39	31252,40	32899,90	34057,10	34770,17	35133,50	35242,52	35136,90	34772,30
N.12	36346,82	23991,60	29937,90	32107,30	33833,70	35010,30	35757,30	36175,80	36336,30	36294,60	36091,40
N.13	36668,77	333,55	23725,17	29536,50	31911,10	33752,80	35087,27	35958,20	36447,39	36645,80	36650,44
N.1 Ort.	36087,66	15886,68	27558,15	30965,40	32881,57	34273,40	35204,91	35755,83	36008,74	36025,77	35838,05
N.1 Std Sapma	745,29	13473,41	3351,63	1309,21	961,43	656,06	503,97	549,83	665,88	789,56	964,36

N.11, N.12 ve N.13 numunelerinden elde edilen kuvvet-yer değiştirme değerleri Excel formatında işlenerek  $N.1_{ort}$  kritik kuvvet grafiği Şekil 4.2’de belirtildiği biçimde oluşturulmuştur.



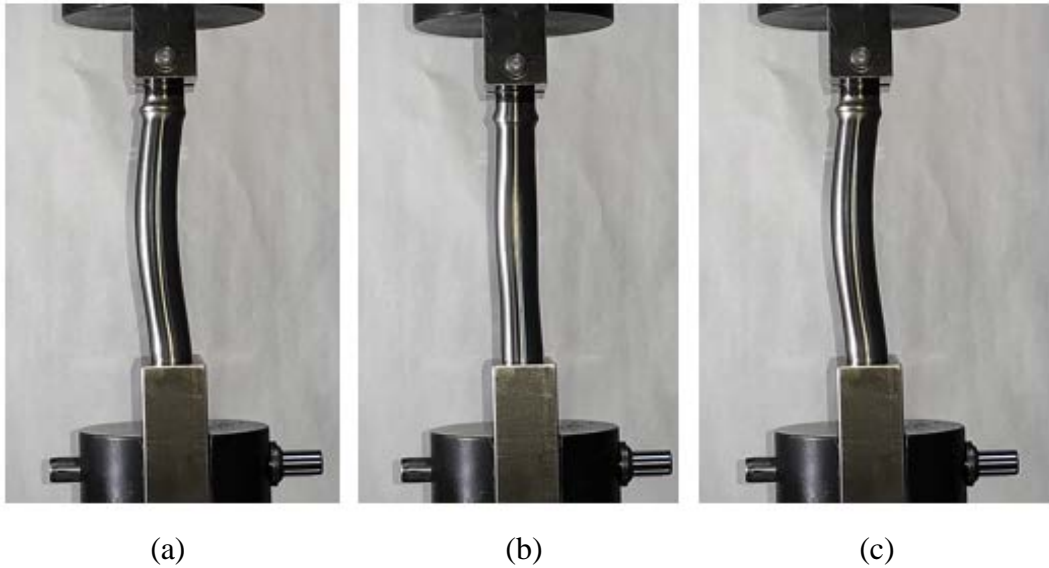
**Şekil 4. 2.**  $L_k=0,7 L$  mesnetlenme için  $N.1_{ort}$  kritik kuvvet-yer değiştirme grafiği

N.11, N.12 ve N.13 numunelerinin boy, yer değiştirme ve radüs değerleri video yöntemiyle ölçümler yapılarak aşağıdaki Çizelge 4.2’de paylaşılmıştır. Numunelerden elde edilen  $N.1_{ort}$  boydaki kısalma 10,817 mm, yer değiştirme 9,879 mm ve radüs değeri 180,678 mm olarak elde edilmiştir. Standart sapma değerleri ise sırasıyla boyda 0,312 mm, radüste 22,081 mm ve yer değiştirme ise 0,247 mm olarak elde hesaplanmıştır.

**Çizelge 4.2.**  $L_k=0,7 L$  mesnetlenme durumunda N.11, N.12 ve N.13 numunelerinin ölçüm sonucu

Numune	Test Öncesi Boy (mm)	Test Sonrası Boy (mm)	Boy Kısalması (mm)	Radüs (mm)	Yer değiştirme (mm)
N.11	173,000	162,431	10,569	157,055	9,866
N.12	173,000	162,283	10,717	184,179	10,133
N.13	173,000	161,833	11,167	200,799	9,639
N.1 Ort.	173,000	162,183	10,817	180,678	9,879
N.1 Std Sapma	0,000	0,312	0,312	22,081	0,247

$L_k=0,7 L$  durumunda  $\text{Ø}20 \times 1.75-173$  ölçülerine sahip SAE 304 malzemedен imal edilmiş N.21, N.22 ve N.23 numunelerinin plastik deformasyona uğramış görüntüleri şekil 4.3’de paylaşılmıştır.



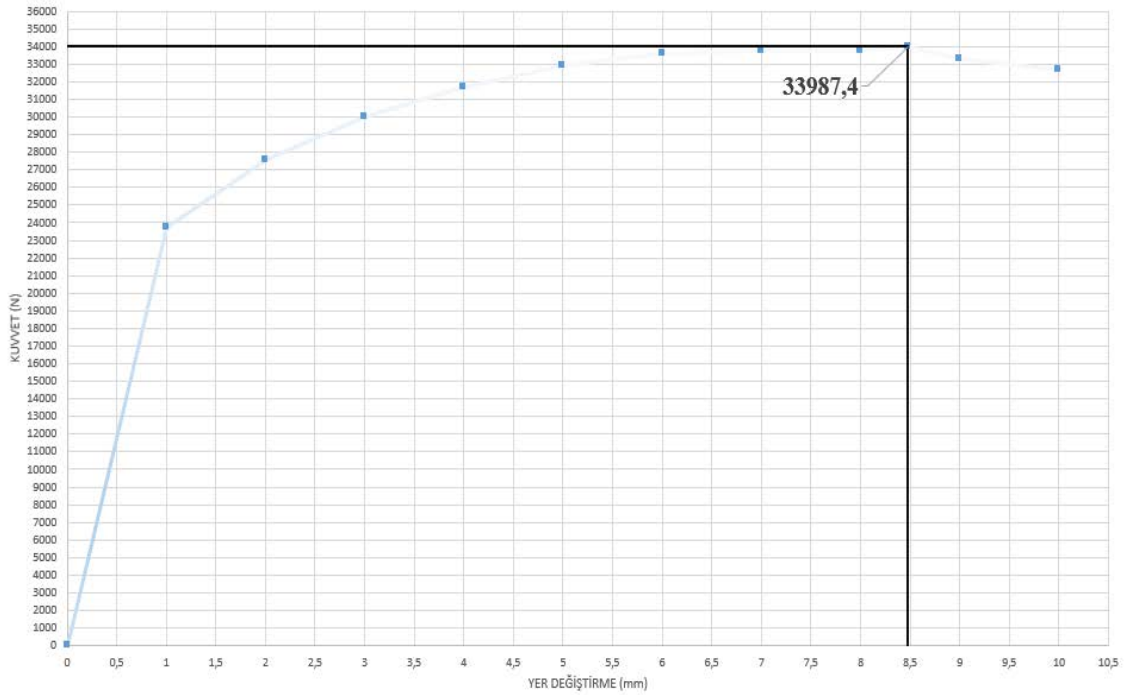
**şekil 4.3.**  $L_k=0,7 L$  mesnetlenme durumunda numunelerin yükleme sonrası görüntüleri  
a) N.21 numunesi, b) N.22 numunesi ve c) N.23 numunesi

Bu mesnetlenme durumunda N.21, N.22 ve N.23 numunelerinin kuvvet ölçümü sonucunda elde edilen kuvvet ve yer değiştirme değerleri izelge 4.3’de paylaşılmıştır. Test sonuçlarından elde edilen değerler kuvvet-yer değiştirmelere bağlı olarak standart sapma 3728 N ve  $N.2_{ort}$  kritik kuvvet değeri 33987 N olarak hesaplanmıştır (izelge 4.3).

**Çizelge 4.3.**  $L_k=0,7 L$  mesnetlenme için N.21, N.22, N.23 ve  $N.1_{ort}$ . numunelerinin kuvvet-yer değiştirme değerleri

Numune	$F_{kritik}$	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm	6 mm	7 mm	8 mm	9 mm	10 mm
N.21	29686,87	19786,50	24693,60	26761,60	28195,80	29061,70	29508,64	29061,70	29613,40	29398,00	29059,95
N.22	35970,64	29211,40	29205,58	31769,30	33535,70	34818,50	35633,14	35963,20	35793,47	35277,80	34596,86
N.23	36304,66	22201,20	28881,91	31446,20	33398,40	34810,00	35752,02	36243,30	35911,76	35290,40	34472,75
N.2 Ort.	33987,39	23733,03	27593,70	29992,37	31709,97	32896,73	33631,27	33756,07	33772,88	33322,07	32709,85
N.2 Std Sapma	3728,10	4895,62	2516,77	2802,59	3044,13	3321,24	3570,79	4067,85	3602,70	3398,35	3161,52

N.21, N.22 ve N.23 numunelerinden elde edilen kuvvet-yer değiştirme değerleri Excel formatında işlenerek  $N.2_{ort}$  ortalama kuvvet değer grafiği Şekil 4.4’de belirtildiği biçimde oluşturulmuştur.



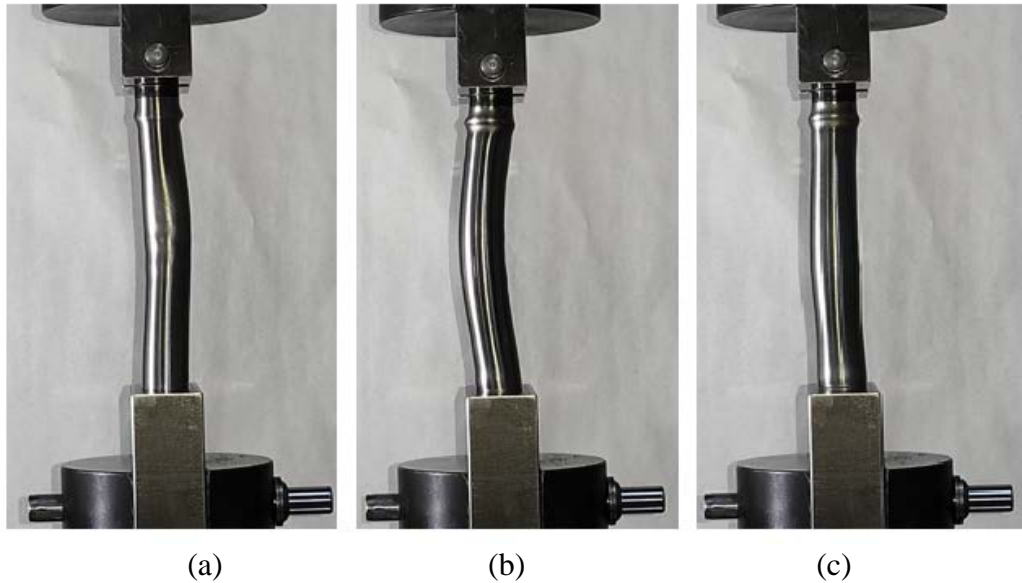
**Şekil 4. 4.**  $L_k=0,7 L$  mesnetlenme için  $N.2_{ort}$ . kritik kuvvet-yer değiştirme grafiği

N.21, N.22 ve N.23 numunelerinin boy, yer değiştirme ve radüs değerleri video yöntemiyle ölçümler yapılarak aşağıdaki Çizelge 4.4’de paylaşılmıştır. Numunelerden elde edilen N.2<sub>ort</sub> boydaki kısalma 10,907 mm, yer değiştirme 10,829 mm ve radüs değeri 179,468 mm olarak elde edilmiştir. Standart sapma değerleri ise sırasıyla boyda 0,906 mm, radüste 42,582 mm ve yer değiştirme ise 1,773 mm olarak elde hesaplanmıştır.

**Çizelge 4.4.**  $L_k=0,7 L$  mesnetlenme durumunda N.21, N.22 ve N.23 numunelerinin ölçüm sonucu

Numune	Test Öncesi Boy (mm)	Test Sonrası Boy (mm)	Boy Kısalması (mm)	Radüs (mm)	Yer değiştirme (mm)
N.21	173,000	163,063	9,937	226,405	9,302
N.22	173,000	161,947	11,053	168,685	10,410
N.23	173,000	161,269	11,731	143,314	12,773
N.2 Ort.	173,000	162,093	10,907	179,468	10,829
N.2 Std Sapma	0,000	0,906	0,906	42,582	1,773

$L_k=0,7 L$  durumunda  $\text{Ø}20 \times 1.5-173$  ölçülerine sahip SAE 304 malzemeden imal edilmiş N.31, N.32 ve N.33 numunelerinin plastik deformasyona uğramış görüntüleri Şekil 4.5’te paylaşılmıştır.



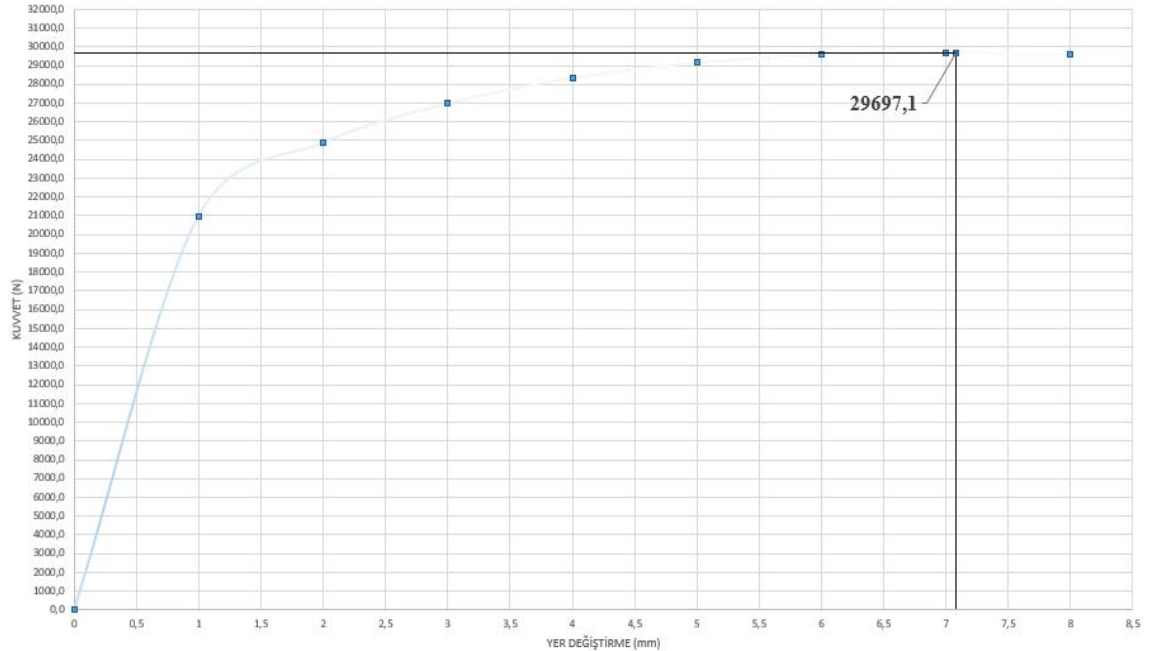
**Şekil 4.5.**  $L_k=0,7 L$  mesnetlenme durumunda numunelerin yükleme sonrası görüntüleri  
a) N.31 numunesi, b) N.32 numunesi ve c) N.33 numunesi

Bu mesnetlenme durumunda N.31, N.32 ve N.33 numunelerinin kuvvet ölçümü sonucunda elde edilen kuvvet ve yer değiştirme değerleri Çizelge 4.5’de paylaşılmıştır. N.33 numunesi ortalama kritik kuvvet ve Std. sapma değerlerine dahil edilmemiştir. N.31 ve N.32 ölçüm sonuçlarından elde edilen değerler kuvvet-yer değiştirmelere bağlı olarak standart sapma 2667 N ve N.3<sub>ort</sub> kritik kuvvet değeri 29697 N olarak hesaplanmıştır.

**Çizelge 4. 5.**  $L_k=0,7 L$  mesnetlenme durumunda N.31, N.32, N.33 ve N.3<sub>ort</sub>. numunelerinin kuvvet- yer değiştirme değerleri

Numune	$F_{kritik}$	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm	6 mm	7 mm	8 mm	9 mm	10 mm
N.31	27810,95	18079,70	22304,90	24553,10	26112,70	27079,40	27616,92	27800,00	27730,37	27451,10	27046,71
N.32	31583,14	23904,00	27478,83	29401,50	30554,30	31206,10	31523,69	31575,50	31414,21	31085,90	30628,31
N.33	38478,20	22476,80	25152,82	27543,20	29828,10	31843,30	33550,58	34904,20	36110,60	37099,50	37852,98
N.3 Ort.	29697,05	20991,85	24891,87	26977,30	28333,50	29142,75	29570,31	29687,75	29572,29	29268,50	28837,51
N.3 Std Sapma	2667,34	4118,40	3658,52	3428,34	3140,69	2918,02	2762,50	2669,68	2604,87	2570,19	2532,57

N.31, N.32 ve N.33 numunelerinden elde edilen kuvvet-yer değiştirme değerleri Excel formatında işlenerek N.3 ortalama kuvvet değeri grafiği Şekil 4.6’da belirtildiği gibi oluşturulmuştur.



**Şekil 4. 6 .**  $L_k=0,7 L$  mesnetlenme için N.3 <sub>ort</sub>. kritik kuvvet-yer değiştirme grafiği

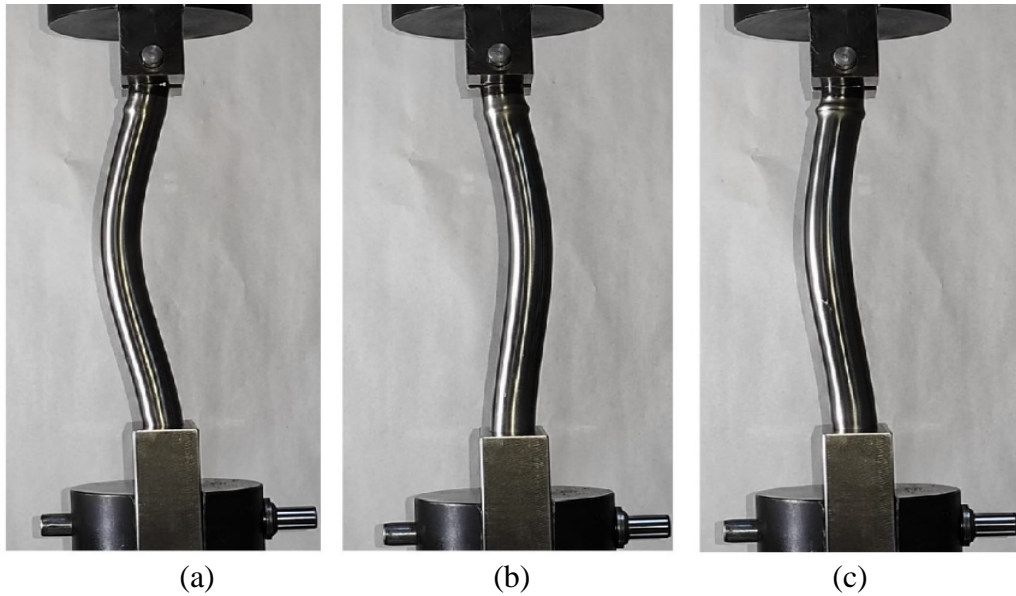


N.31, N.32 ve N.33 numunelerinin boy, yer değiştirme ve radüs değerleri video yöntemiyle ölçümler yapılarak aşağıdaki Çizelge 4.6'da paylaşılmıştır. Numunelerin ortalama boydaki kısalma değerleri 11,532 mm, yer değiştirme değeri 9,445 mm ve radüs değerleri 158,667 mm olarak elde edilmiştir. Standart sapma değerleri ise sırasıyla boyda 3,684 mm, radüste 56,503 mm ve yer değiştirme ise 2,611 mm olarak elde edilmiştir.

**Çizelge 4.6.**  $L_k=0,7 L$  mensetlenme durumunda N.31, N.32 ve N.33 numunelerinin ölçüm sonucu

Numune	Test Öncesi Boy (mm)	Test Sonrası Boy (mm)	Boy Kısalması (mm)	Radüs (mm)	Yer değiştirme (mm)
<b>N.31</b>	173,000	163,298	9,702	184,072	8,506
<b>N.32</b>	173,000	163,879	9,121	198,008	7,433
<b>N.33</b>	173,000	157,228	15,772	93,922	12,396
<b>N.3 Ort.</b>	173,000	160,263	12,737	138,997	10,451
<b>N.3 Std Sapma</b>	0,000	4,292	4,292	63,746	2,751

$L_k=0,7 L$  durumunda  $\text{Ø}20 \times 2-223$  ölçülerine sahip SAE 304 malzemeden imal edilmiş N.41, N.42 ve N.43 numunelerinin plastik deformasyona uğramış görüntüleri şekil 4.7'de paylaşılmıştır.



**şekil 4.7.**  $L_k=0,7 L$  mesnetlenme durumunda numunelerin yüklenme sonrası görüntüleri a) N.41 numunesi, b) N.42 numunesi ve c) N.43 numunesi

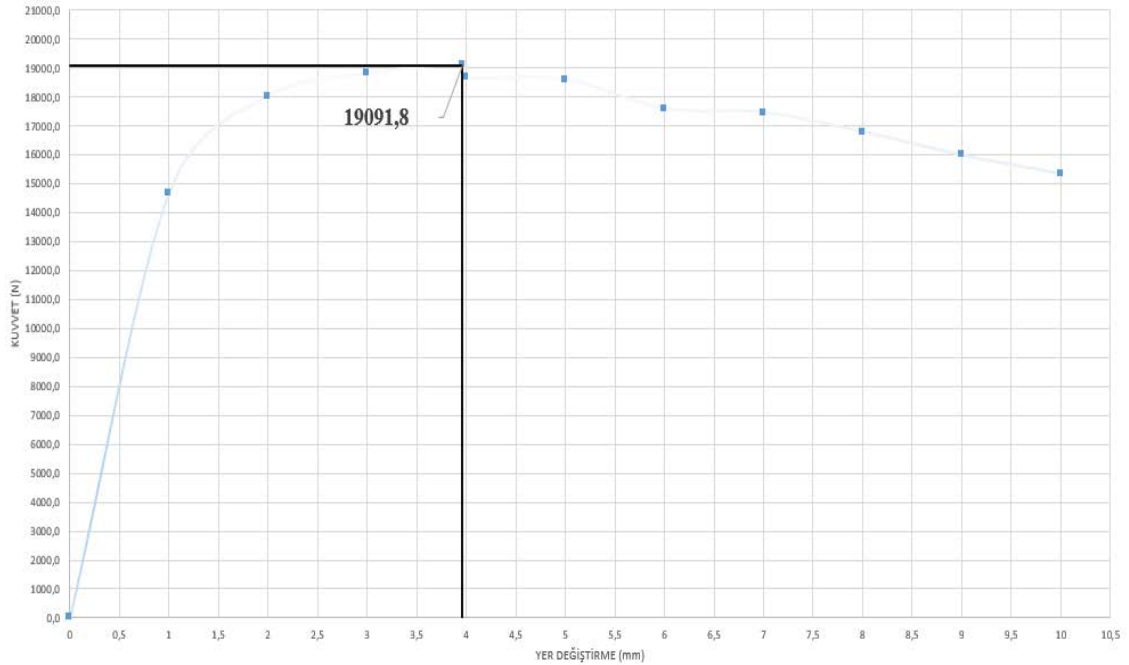


Bu mesnetlenme durumunda N.41, N.42 ve N.43 numunelerinin kuvvet ölçümü sonucunda elde edilen kuvvet ve yer değiştirme değerleri izelge 4.7’de paylaşılmıştır. Test sonuçlarından elde edilen değerler kuvvet-yer değiştirmelere bağlı olarak standart sapma 2019 N ve N.4ort kritik kuvvet değeri 19092 N olarak hesaplanmıştır (izelge 4.7).

**Çizelge 4.7.**  $L_k=0,7 L$  mesnetlenme durumunda N.41, N.42, N.43 ve N.4ort. numunelerinin kuvvet-yer değiştirme değerleri

Numune	$F_{kritik}$	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm	6 mm	7 mm	8 mm	9 mm	10 mm
N.41	18967,99	15925,10	18423,29	18961,20	17750,40	16087,70	15193,96	15879,40	15518,22	15115,70	14647,82
N.42	21170,22	15544,60	19772,58	20666,70	21114,20	21124,70	20853,93	20260,90	19280,12	18064,70	17346,81
N.43	17137,19	12515,20	15867,34	16800,80	17122,50	17065,50	16751,87	16248,60	15585,16	14799,90	14027,94
N.4 Ort.	19091,80	14661,63	18021,07	18809,57	18662,37	18092,63	17599,92	17462,97	16794,50	15993,43	15340,86
N.4 Std Sapma	2019,36	1868,58	1983,45	1937,41	2146,43	2670,97	2923,73	2430,10	2152,87	1800,71	1764,64

N.41, N.42 ve N.43 numunelerinden elde edilen kuvvet-yer değiştirme değerleri Excel formatında işlenerek N.4 ortalama kuvvet değeri grafiği Şekil 4.8’de belirtildiği gibi oluşturulmuştur.



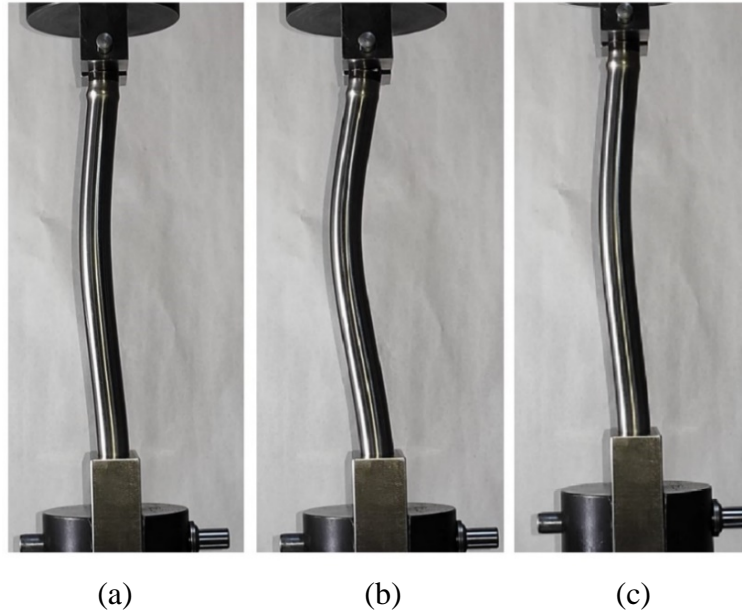
**Şekil 4. 8.**  $L_k=0,7 L$  mesnetlenme için N.4Ort. kritik kuvvet-yer değiştirme grafiği

N.41, N.42 ve N.43 numunelerinin boy, yer değiştirme ve radüs değerleri video yöntemiyle ölçümler yapılarak aşağıdaki Çizelge 4.8’de paylaşılmıştır. Numunelerin ortalama boydaki kısıalma değerleri 10,898 mm, yer değiştirme değeri 16,466 mm ve radüs değerleri 202,868 mm olarak elde edilmiştir. Standart sapma değerleri ise sırasıyla boyda 2,025 mm, radüste 44,973 mm ve yer değiştirme ise 3,166 mm olarak elde edilmiştir.

**Çizelge 4.8.**  $L_k=0,7 L$  mensetlenme durumunda N.41, N.42 ve N.43 numunelerinin ölçüm sonucu

Numune	Test Öncesi Boy (mm)	Test Sonrası Boy (mm)	Boy Kısıalması (mm)	Radüs (mm)	Yer değiştirme (mm)
N.41	223,000	212,634	10,366	202,167	15,929
N.42	223,000	213,808	9,192	248,188	13,604
N.43	223,000	209,863	13,137	158,249	19,866
N.4 Ort.	223,000	212,102	10,898	202,868	16,466
N.4 Std Sapma	0,000	2,025	2,025	44,973	3,166

$L_k=0,7 L$  durumunda  $\text{Ø}20 \times 2-273$  ölçülerine sahip SAE 304 malzemeden imal edilmiş N.51, N.52 ve N.53 numunelerinin plastik deformasyona uğramış görüntüleri Şekil 4.9’da paylaşılmıştır.



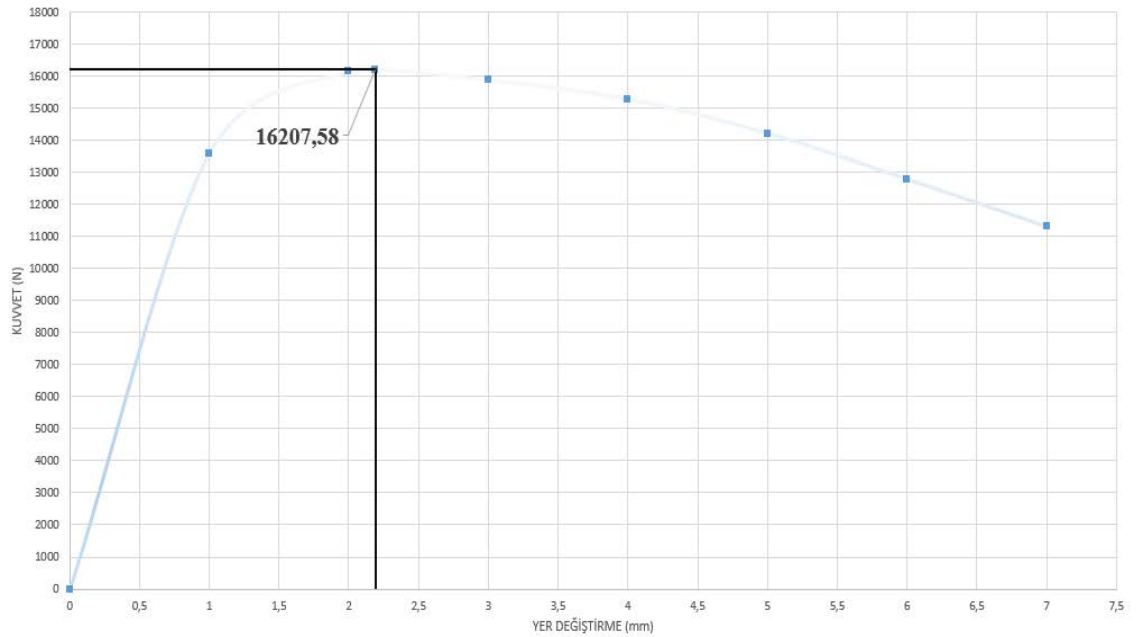
**Şekil 4.9.**  $L_k=0,7 L$  mesnetlenme durumunda numunelerin yükleme sonrası görüntüleri a) N.51 numunesi, b) N.52 numunesi ve c) N.53 numunesi

Bu mesnetlenme durumunda N.51, N.52 ve N.53 numunelerinin kuvvet ölçümü sonucunda elde edilen kuvvet ve yer değiştirme değerleri izelge 4.9’da paylaşılmıştır. N.52 numunesi ortalama kritik kuvvete ve Std sapma değerlerine dahil edilmemiştir. Test sonuçlarından elde edilen N.51 ve N.53 numunesinin kuvvet-yer değiştirmelere bağlı olarak standart sapma 2124 N ve N.5<sub>ort</sub> kritik kuvvet değeri 16207 N olarak hesaplanmıştır (izelge 4.9).

**Çizelge 4. 9 .**  $L_k=0,7 L$  mesnetlenme durumunda N.51, N.52, N.53 ve N.5<sub>ort</sub>. numunelerinin kuvvet- yer değiştirme değerleri

Numune	$F_{kritik}$	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm	6 mm	7 mm	8 mm	9 mm	10 mm
N.51	14705,63	12372,70	14648,91	14343,40	13741,70	12928,10	11918,47	10914,90	9918,72	8927,49	-
N.52	29522,38	18933,20	27799,69	29489,70	29181,90	28537,30	27397,93	25735,80	23890,61	22828,30	20687,20
N.53	17709,53	14826,50	17657,66	17403,00	16820,20	15505,80	13644,96	11697,90	10689,04	-	-
N.5 Ort.	16207,58	13599,60	16153,29	15873,20	15280,95	14216,95	12781,72	11306,40	10303,88	8927,49	-
N.5 Std Sapma	2124,08	1735,10	2127,51	2163,46	2176,83	1822,71	1220,81	553,66	544,70	-	-

N.51, N.52 ve N.53 numunelerinden elde edilen kuvvet-yer değiştirme değerleri Excel formatında işlenerek N.5 ortalama kuvvet değeri grafiği Şekil 4.10’da belirtildiği gibi oluşturulmuştur.



**Şekil 4. 10.**  $L_k=0,7 L$  mesnetlenme için N.5<sub>Ort.</sub> kritik kuvvet-yer değiştirme grafiği

N.51, N.52 ve N.53 numunelerinin boy, yer değiştirme ve radüs değerleri video yöntemiyle ölçümler yapılarak aşağıdaki Çizelge 4.10'da paylaşılmıştır. Numunelerin ortalama boydaki kısalma değerleri 8,169 mm, yer değiştirme değeri 15,750 mm ve radüs değerleri 307,645 mm olarak elde edilmiştir. Standart sapma değerleri ise sırasıyla boyda 0,759 mm, radüste 21,957 mm ve yer değiştirme ise 0,462 mm olarak elde edilmiştir.

**Çizelge 4.10.**  $L_k=0,7 L$  mesnetlenme durumunda N.51, N.52 ve N.53 numunelerinin ölçüm sonucu

Numune	Test Öncesi Boy (mm)	Test Sonrası Boy (mm)	Boy Kısalması (mm)	Radüs (mm)	Yer değiştirme (mm)
<b>N.51</b>	273,000	264,026	8,974	308,324	15,983
<b>N.52</b>	273,000	264,932	8,068	329,255	16,050
<b>N.53</b>	273,000	265,534	7,466	285,357	15,218
<b>N.5 Ort.</b>	273,000	264,780	8,220	296,841	15,601
<b>N.5 Std Sapma</b>	0,000	1,066	1,066	16,240	0,462

$L_k=0,7 L$  durumunda  $\text{Ø}20 \times 2-173$  ölçülerine sahip AL 6082 malzemeden imal edilmiş N.61 ve N.62 numunelerinin plastik deformasyona uğramış görüntüleri Şekil 4.11'de paylaşılmıştır.



**Şekil 4.11.**  $L_k=0,7 L$  mesnetlenme durumunda numunelerin yükleme sonrası görüntüleri a) N.61 numunesi, b) N.62 numunesi

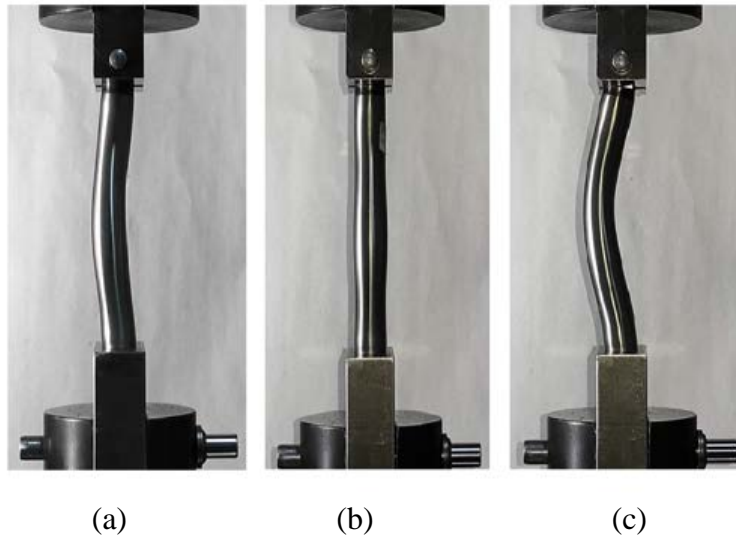
Bu mesnetlenme durumunda N.61 ve N.62 numunelerinin kuvvet ölçümü sonucunda elde edilen kuvvet ve yer değiştirme değerleri Çizelge 4.11’de paylaşılmıştır. Test sonuçlarından elde edilen değerler kuvvet-yer değiştirmelere bağlı olarak standart sapma 3492 N ve  $N_{6\text{ort}}$  kritik kuvvet değeri 28642 N olarak hesaplanmıştır. (Çizelge 4.11).

**Çizelge 4.11.**  $L_k=0,7 L$  mesnetlenme durumunda N.61, N.62 ve  $N_{6\text{ort}}$  numunelerinin kuvvet- yer değiştirme değerleri

Numune	$F_{\text{kritik}}$	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm	6 mm	7 mm	8 mm	9 mm	10 mm
N.61	31111,54	16137,10	18090,94	17353,20	17623,80	23685,10	27686,37	30295,50	31023,35	29218,00	22268,93
N.62	26173,08	17881,50	13814,80	22580,60	14236,40	22581,60	15491,85	16765,20	20698,03	22289,70	19577,86
N.6 Ort.	28642,31	17009,30	15952,87	19966,90	15930,10	23133,35	21589,11	23530,35	25860,69	25753,85	20923,40
N.6 Std Sapma	3492,02	1233,48	3023,69	3696,33	2395,25	780,29	8622,83	9567,37	7301,10	4899,05	1902,87

N.61, N.62 ve N.63 numuneleriyle alınan testlerde burkulma gerilmelerine uğramadan malzeme yapılarında ezilme ve dış formlarında şekil bozuklukları oluşmaktadır. N.63 numunesinde malzeme hasarlarından dolayı kuvvet ve boyutsal ölçüm sonuçları belirtilmemiştir. N.61 numunesinde ezilme, N.62’de dış formlarında sıkışma ve N.63 numunesinde ise malzeme hasarından dolayı boyutsal ölçüm değerleri çalışma kapsamına dahil edilmemiş ve dağılım grafikleri çizdirilmemiştir.

$L_k=0,7 L$  durumunda  $\varnothing 20 \times 2-173$  ölçülerine sahip SAE 304 malzemeden dış formu oluşturulmadan imal edilmiş N.71, N.72 ve N.73 numunelerinin plastik deformasyona uğramış görüntüleri Şekil 4.12’de paylaşılmıştır.



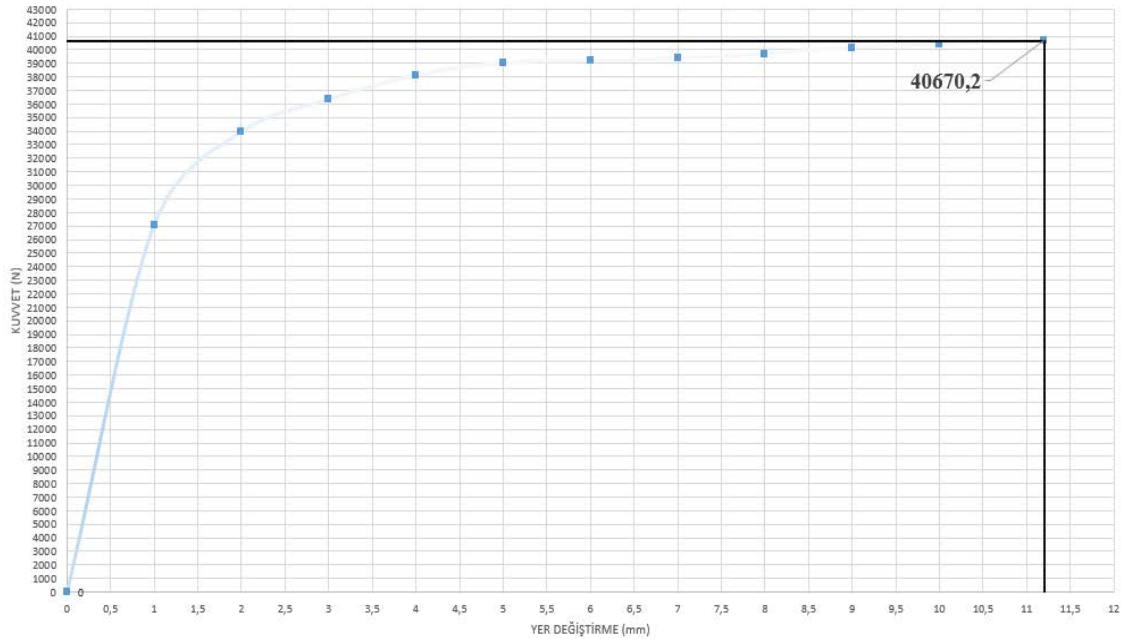
**Şekil 4.12.**  $L_k=0,7 L$  mesnetlenme durumunda numunelerin yükleme sonrası görüntüleri a) N.71 numunesi, b) N.72 numunesi ve c) N.73 numunesi

Bu mesnetlenme durumunda N.71, N.72, ve N.73 numunelerinin kuvvet ölçümü sonucunda elde edilen kuvvet ve yer değiştirme değerleri izelge 4.12’de paylaşılmıştır. Test sonuçlarından elde edilen değerler kuvvet-yer değiştirmelere bağlı olarak standart sapma 195 N ve  $N.7_{ort}$  kritik kuvvet değeri 40670 N olarak hesaplanmıştır (izelge 4.12).

**Çizelge 4. 12**  $L_k=0,7 L$  mesnetlenme durumunda N.71, N.72, N.7.3 ve N.7ort. numunelerinin kuvvet-yer değiştirme değerleri

Numune	$F_{kritik}$	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm	6 mm	7 mm	8 mm	9 mm	10 mm
N.71	40531,74	19663,70	30589,44	33493,70	35769,90	37322,4	38454,77	39299,70	39899,77	40303,80	40519,40
N.72	28511,54	17519,70	20739,50	23139,00	24843,00	26068,20	26967,80	27623,60	28081,80	28372,80	28501,30
N.73	40808,61	34531,80	37270,10	39195,60	40462,60	40727,90	39909,90	39432,20	39531,80	40037,00	40274,90
N.7 Ort.	40670,18	27097,75	33929,77	36344,65	38116,25	39025,15	39182,34	39365,95	39715,79	40170,40	40397,15
N.7 Std Sapma	195,78	10513,33	4723,94	4031,85	3318,24	2408,05	1028,93	93,69	260,19	188,66	172,89

N.71, N.72 ve N.73 numunelerinden elde edilen kuvvet-yer değiştirme değerleri yukarıdaki Excel formatına işlenmiştir. N.71 ve N.73 numunelerinin dağılım grafikleri çizdirilmiş olup N.72 numunesinin standart sapması yüksek olduğundan Şekil 4.13’deki dağılım grafiğine dahil edilmemiştir.



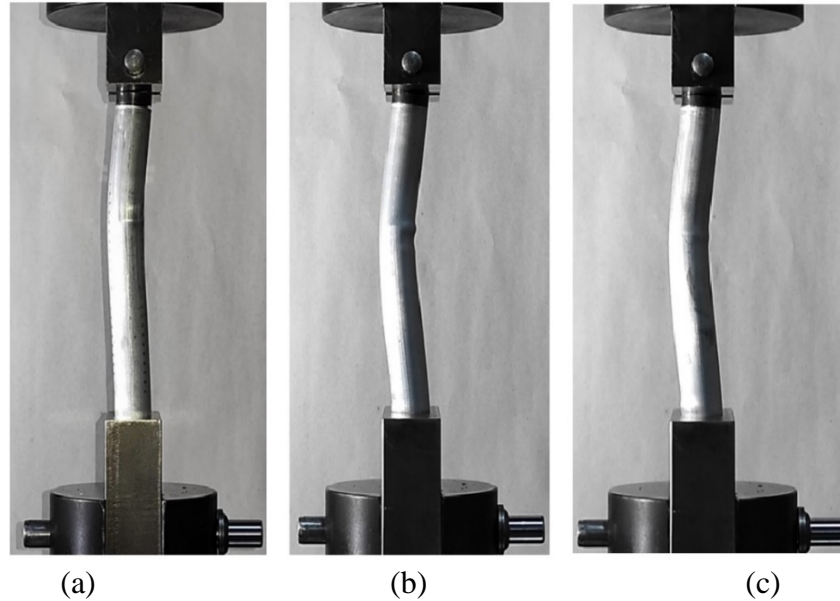
**Şekil 4. 13.**  $L_k=0,7 L$  mesnetlenme için N.7 Ort. kritik kuvvet-yer değiştirme grafiği

N.71, N.72 ve N.73 numunelerinin boy, yer değiştirme ve radüs değerleri video yöntemiyle ölçümler yapılarak aşağdaki Çizelge 4.13’de paylaşılmıştır. N.72 numunesinin boyut değerleri ölçülmüş fakat ortalamalara ve standart sapmalara dahil edilmemiştir. Numunelerin ortalama boydaki kısıalma değerleri 11,539 mm, yer değiştirme değeri 13,355 mm ve radüs değerleri 96,352 mm olarak elde edilmiştir. Standart sapma değerleri ise sırasıyla boyda 1,156 mm, radüste 10,485 mm ve yer değiştirme ise 0,471 mm olarak elde edilmiştir.

**Çizelge 4.13.**  $L_k=0,7 L$  mensetlenme durumunda N.71, N.72 ve N.73 numunelerinin ölçüm sonucu

Numune	Test Öncesi Boy (mm)	Test Sonrası Boy (mm)	Boy Kısılması (mm)	Radüs (mm)	Yer değiştirme (mm)
N.71	173,000	160,644	12,356	103,766	13,688
N.72	173,000	161,875	11,125	112,778	13,128
N.73	173,000	162,279	10,721	88,938	13,022
N.7 Ort.	173,000	161,461	11,539	96,352	13,355
N.7 Std Sapma	0,000	1,156	1,156	10,485	0,471

$L_k=0,7 L$  durumunda  $\text{Ø}20 \times 2-173$  ölçülerine sahip AL 6082 malzemedен dış formu oluşturulmadan imal edilmiş N.81, N.82 ve N.83 numunelerinin plastik deformasyona uğramış görüntüleri Şekil 4.14’te paylaşılmıştır.



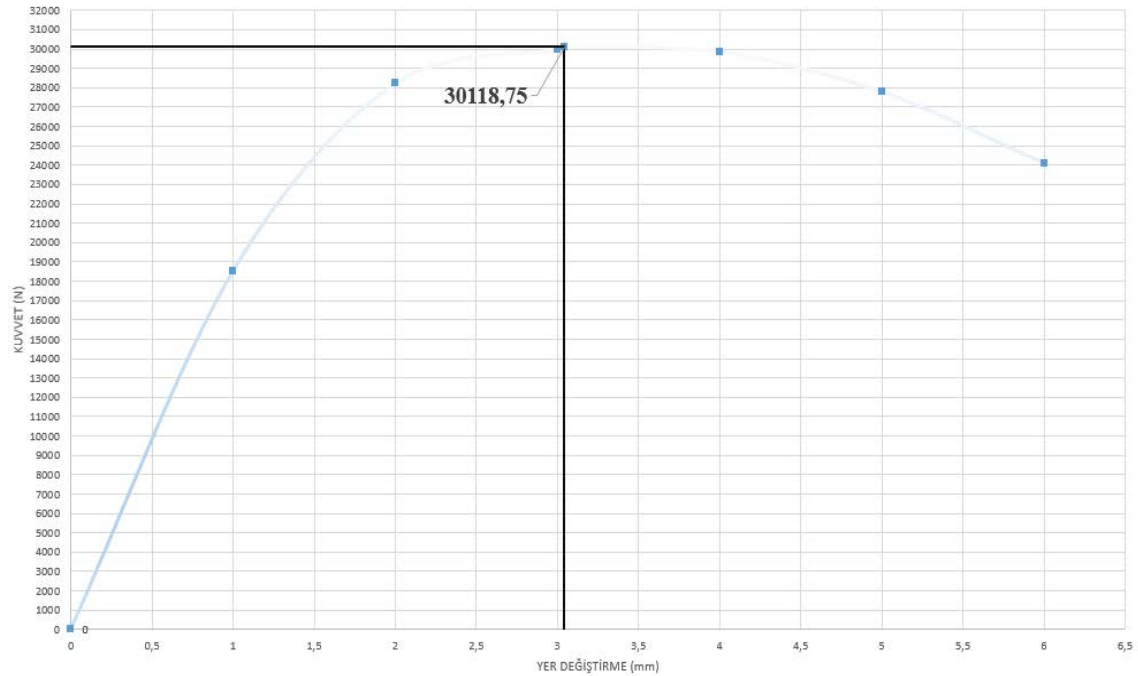
**Şekil 4.14.**  $L_k=0,7 L$  mesnetlenme durumunda numunelerin yükleme sonrası görüntüleri a) N.81 numunesi, b) N.82 numunesi ve c) N.83 numunesi

Bu mesnetlenme durumunda N.81, N.82 ve N.83 numunelerinin kuvvet ölçümü sonucunda elde edilen kuvvet ve yer değıştirme değeri Çizelge 4.14’de paylaşılmıştır. N.83 numunesinin kuvvet değeri ortalama kritik kuvvet ve Std sapma değeri dahil edilmemiştir. Test sonuçlarından elde edilen değeri kuvvet-yer değıştirmelere bağı olarak standart sapma 77 N ve N.8<sub>ort</sub> kritik kuvvet değeri 30118 N olarak hesaplanmıştır (Çizelge 4.14).

**Çizelge 4. 14**  $L_k=0,7 L$  mesnetlenme durumunda N.81, N.82, N.83 ve N.8<sub>ort</sub> numunelerinin kuvvet-yer değıştirme değeri

Numune	$F_{kritik}$	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm	6 mm	7 mm	8 mm	9 mm	10 mm
N.81	30173,57	18260,50	28508,80	30125,20	29812,80	26674,70	22740,10	-	-	-	-
N.82	30063,93	18787,80	27937,10	29844,10	29898,80	28914,50	25458,10	-	-	-	-
N.83	18236,67	16501,60	17762,70	18088,60	16338,20	14131,40	11944,70	-	-	-	-
N.8 Ort.	30118,75	18524,15	28222,95	29984,65	29855,80	27794,60	24099,10	-	-	-	-
N.8 Std Sapma	77,53	372,86	404,25	198,77	60,81	1583,78	1921,92	-	-	-	-

N.81 ve N.82 numunelerinin dağılım grafikleri çizdirilmiş olup N.83 numunesinin standart sapması yüksek olduğundan Şekil 4.15’teki dağılım grafiğine dahil edilmemiştir.



**Şekil 4. 15.**  $L_k=0,7 L$  mesnetlenme için N.8 Ort. kritik kuvvet-yer değıştirme grafiğı

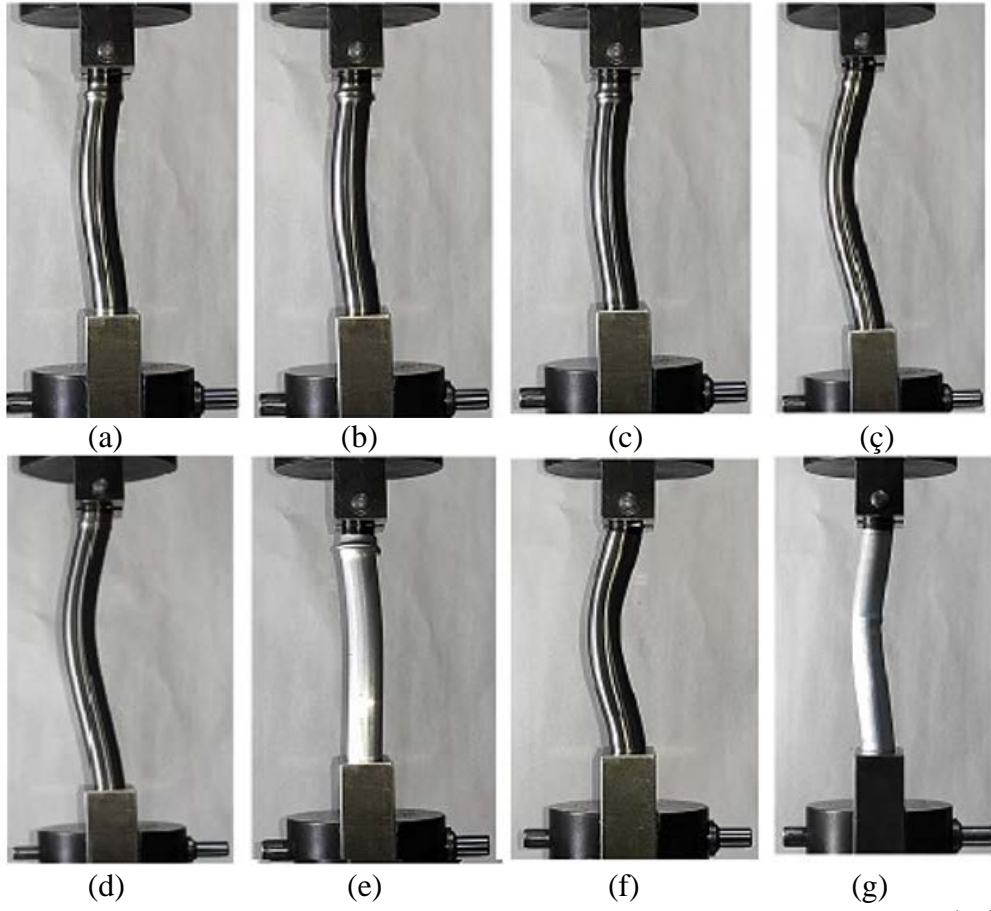


N.81, N.82 ve N.83 numunelerinin boy, yer değiştirme ve radüs değerleri video yöntemiyle ölçümler yapılarak aşağıdaki Çizelge 4.15’de paylaşılmıştır. N.83 numunesinin boyut değerleri ölçülmüş fakat ortalamalara ve standart sapmalara dahil edilmemiştir. Numunelerin ortalama boydaki kısalma değerleri 3,412 mm, yer değiştirme değeri 6,821 mm ve radüs değerleri 256,221 mm olarak elde edilmiştir. Standart sapma değerleri ise sırasıyla boyda 1,355 mm, 59,513 mm ve yer değiştirme ise 3,591 mm olarak elde edilmiştir.

**Çizelge 4. 15.**  $L_k=0,7 L$  mensetlenme durumunda N.81, N.82, ve N.83 numunelerinin ölçüm sonucu

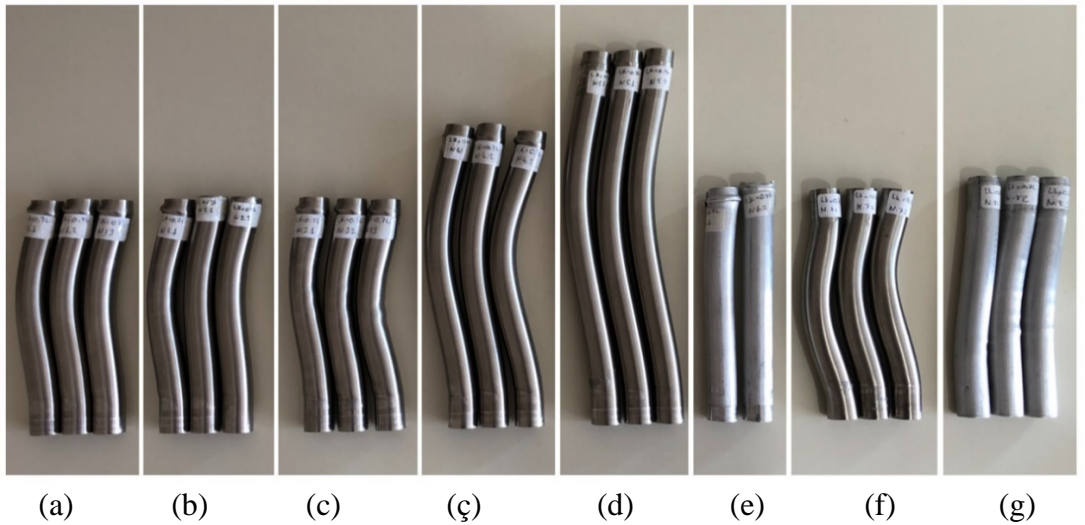
Numune	Test Öncesi Boy (mm)	Test Sonrası Boy (mm)	Boy Kısalması (mm)	Radüs (mm)	Yer değiştirme (mm)
<b>N.81</b>	173,000	170,547	2,453	298,303	4,282
<b>N.82</b>	173,000	169,123	3,877	229,052	11,302
<b>N.83</b>	173,000	168,630	4,370	214,139	9,361
<b>N.8 Ort.</b>	173,000	169,835	3,165	263,677	7,792
<b>N.8 Std Sapma</b>	0,000	1,007	1,007	48,967	4,964

$L_k=0,7 L$  mesnetlenme durumlarında yukarıda her numune için ayrı biçimde test sonuçları paylaşılan numuneler aşağıdaki şekiller ve çizelgeler halinde birleştirilmiştir. Test anında burkulma davranışlarındaki süreçleri gözlemleyebilmek adına burkulma numunelerinin hepsi için aynı açıdan video kaydı alınmıştır. şekil 4.16’da belirtilen fotoğraflarda bazı numunelerin burkulmadaki görüntüleri belirgin olup kamera açısıdadır fakat bazı numunelerin burkulma yönleri kamera açısına dik mesafede olmadığından belirgin değildir. Test alınan her gruptaki numune içinden bir adet seçilerek N.1, N.2, N.3, N.4, N.5, N.6, N.7 ve N.8 numunelerinin burkulma testi sonrasındaki görüntüleri aşağıda şekil 4.16’da belirtilmiştir.



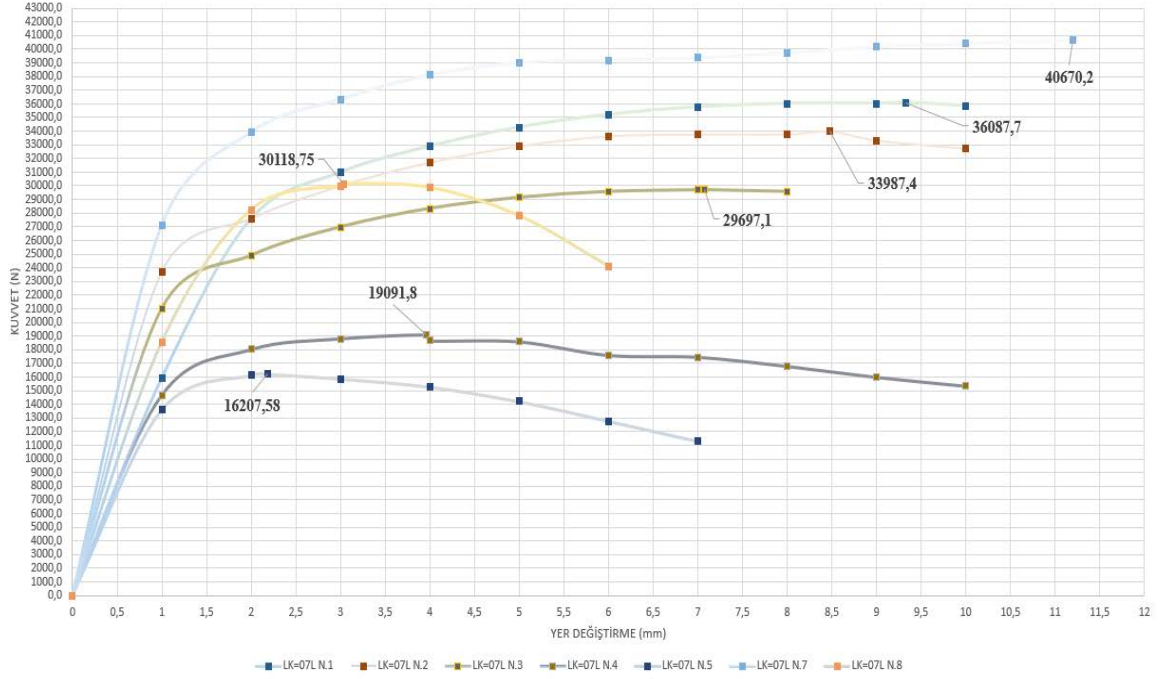
**Şekil 4.16.**  $L_k=0,7 L$  mesnetlenme durumunda numunelerin test sonrası görüntüleri a) N.1, b) N.2, c) N.3, ç) N.4, d) N.5, e) N.6, f) N.7 ve g) N.8

Bahsi geçen mesnetlenme durumunda testi tamamlanmış numunelerin fotoğrafları Şekil 4.17'de paylaşılmıştır.



**Şekil 4.17.**  $L_k=0,7 L$  mesnetlenme durumunda numunelerin görüntüleri a) N.1, b) N.2, c) N.3, ç) N.4, d) N.5, e) N.6, f) N.7 ve g) N.8

N.1<sub>Ort.</sub>, N.2<sub>Ort.</sub>, N.3<sub>Ort.</sub>, N.4<sub>Ort.</sub>, N.5<sub>Ort.</sub>, N.7<sub>Ort.</sub> ve N.8<sub>Ort.</sub> elde edilen kuvvet-yer değiştirme değerleri Excel formatında işlenerek ortalama kuvvet değerleri dağılım grafiği altında Şekil 4.18’de belirtildiği gibi oluşturulmuştur.



**Şekil 4. 18.**  $L_k=0,7 L$  mesnetlenme için N.1, N.2, N.3, N.4, N.5, N.7 ve N.8 ortalama kritik kuvvet-yer değiştirme grafikleri

Bu mesnetlenme durumu için çalışma mesafesinin 1,71-9,61 mm olduğu aralıktaki kritik burkulma kuvvet değerleri elde edilmiştir. Kritik kuvvet değerlerinin ulaşıldığı yer değiştirme mesafeleri de kıyaslama yapılırken dikkate alınmalıdır. Numunelerdeki cidar kalınlıkların azaltılması ve boylardaki artışa bağlı olarak kritik burkulma kuvvetleri de daha kısa yer değiştirme mesafelerinde elde edilmiştir.  $L_k=0,7 L$  mesnetlenme durumunda N.1<sub>Ort.</sub>, N.2<sub>Ort.</sub>, N.3<sub>Ort.</sub>, N.4<sub>Ort.</sub>, N.5<sub>Ort.</sub>, N.6<sub>Ort.</sub>, N.7<sub>Ort.</sub> ve N.8<sub>Ort.</sub> dan elde edilen ortalama kritik kuvvet değerleri izelge biçimde toplanmıştır. Test sonuçlarından elde edilen kuvvet-yer değiştirmelere bağlı ortalama kritik kuvvet değerleri sırasıyla 36088 N, 33987 N, 29697 N, 19092 N, 16207 N, 28642 N, 40670 N, 30118 N olarak izelge 4.16’da paylaşılmıştır.

**Çizelge 4. 16.**  $L_k=0,7 L$  mesnetlenme için N.1, N.2, N.3, N.4, N.5, N.6, N.7 ve N.8 numunelerinin ortalama kuvvet-yer değıştirme değeri

Numune	$F_{kritik}$	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm	6 mm	7 mm	8 mm	9 mm	10 mm
N.1 Ort.	36087,66	15886,68	27558,15	30965,40	32881,57	34273,40	35204,91	35755,83	36008,74	36025,77	35838,05
N.2 Ort.	33987,39	23733,03	27593,70	29992,37	31709,97	32896,73	33631,27	33756,07	33772,88	33322,07	32709,85
N.3 Ort.	29697,05	20991,85	24891,87	26977,30	28333,50	29142,75	29570,31	29687,75	29572,29	29268,50	28837,51
N.4 Ort.	19091,80	14661,63	18021,07	18809,57	18662,37	18092,63	17599,92	17462,97	16794,50	15993,43	15340,86
N.5 Ort.	16207,58	13599,60	16153,29	15873,20	15280,95	14216,95	12781,72	11306,40	10303,88	8927,49	-
N.6 Ort.	28642,31	17009,30	15952,87	19966,90	15930,10	23133,35	21589,11	23530,35	25860,69	25753,85	20923,40
N.7 Ort.	40670,18	27097,75	33929,77	36344,65	38116,25	39025,15	39182,34	39365,95	39715,79	40170,40	40397,15
N.8 Ort.	30118,75	18524,15	28222,95	29984,65	29855,80	27794,60	24099,10	-	-	-	-

Numune hazırlama bölümde bahsedilen (bkz. Çizelge 3.6) referans numunesi boyutlarından N.1'in cidar kalınlığı 2 mm iken N.2 ve N.3 numunesinin sırasıyla 1,75 mm ve 1,5 mm olarak imal edilen numunelerin ortalama kritik kuvvet değeri 36088 N, 33987 N ve 29697 N olarak azaldığı gözlenmiştir. N.1, N.4 ve N.5 numuneleri boylarındaki 50 mm artış farkından dolayı elde edilen ortalama kritik kuvvet değeri sırasıyla 36088 N, 19092 N ve 16207 N olarak yine azaldığı tespit edilmiştir. N.6 numunesi malzeme hasarına uğramıştır. N.6 numunesinin değeri 28642 N olarak elde edilmiş olup SAE 304 malzemesine kıyasla daha düşük kuvvetler elde edilmiştir. N.7 ve N.8 numunelerinin kritik burkulma kuvvet değeri 40670 N ve 30118 N olarak elde edilmiştir. N.7 ve N.8 numuneleri referans numunesiyle kıyaslandığında dış açılmadığından dolayı N.7 numunesi daha yüksek kritik kuvvete, N.8 numunesinde ise daha düşük kritik kuvvet değeri elde edilmiştir.

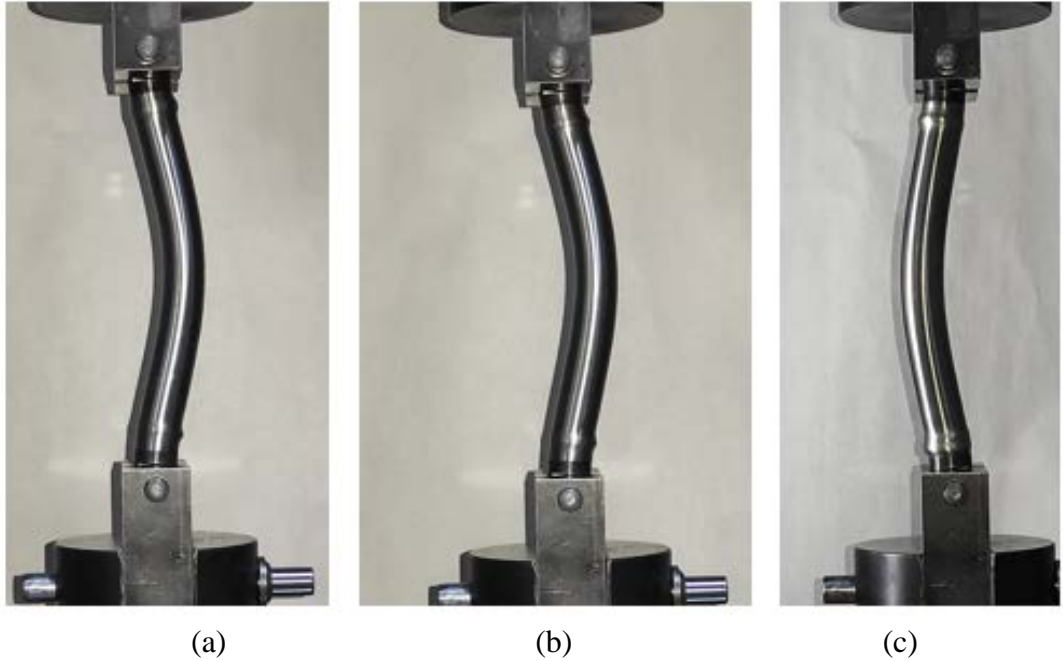
Çizelge 4.18'de bahsedilen boy kısalması, radüs ve yer değıştirme değeri test sonrasında video yöntemiyle ölçümler yapılarak N.1Ort., N.2Ort., N.3Ort., N.4Ort., N.5Ort., N.7Ort. ve N.8Ort. değeri elde edilerek aşağıda paylaşılmıştır. Numunelerin sırasıyla ortalama boydaki kısalma değeri 10,817 mm, 10,907 mm, 11,532 mm, 10,898 mm, 8,169 mm, 11,401 mm ve 3,567 mm olarak elde edilmiştir. Radüs değeri sırasıyla 180,678 mm, 179,468 mm, 158,667 mm, 202,868 mm, 307,645 mm, 101,827 mm ve 247,165 mm olarak elde edilmiştir. Yer değıştirme değeri sırasıyla 9,879 mm, 10,829 mm, 9,445 mm, 16,466 mm, 15,750 mm, 13,279 mm ve 8,315 mm olarak elde edilmiştir.

**Çizelge 4.17.**  $L_k=0,7 L$  mesnetlenme durumunda N.1, N.2, N.3, N.4, N.5, N.7 ve N.8 numunelerinin ölçüm sonucu

Numune	Test Öncesi Boy (mm)	Test Sonrası Boy (mm)	Boy Kısalması (mm)	Radüs (mm)	Yer değiştirme (mm)
N.1 Ort.	173,000	162,183	10,817	180,678	9,879
N.2 Ort.	173,000	162,093	10,907	179,468	10,829
N.3 Ort.	173,000	161,468	11,532	158,667	9,445
N.4 Ort.	223,000	212,102	10,898	202,868	16,466
N.5 Ort.	273,000	264,831	8,169	307,645	15,750
N.7 Ort.	173,000	161,599	11,401	101,827	13,279
N.8 Ort.	173,000	169,433	3,567	247,165	8,315

#### 4.2 $L_k=L$ Mesnetlenme için Deney Sonuçları

$L_k=L$  mesnetlenme durumunda  $\text{Ø}20 \times 2-173$  ölçülerine sahip SAE 304 malzemeden imal edilmiş N.11, N.12 ve N.13 numunelerinin plastik deformasyona uğramış görüntüleri Şekil 4.19’da paylaşılmıştır.



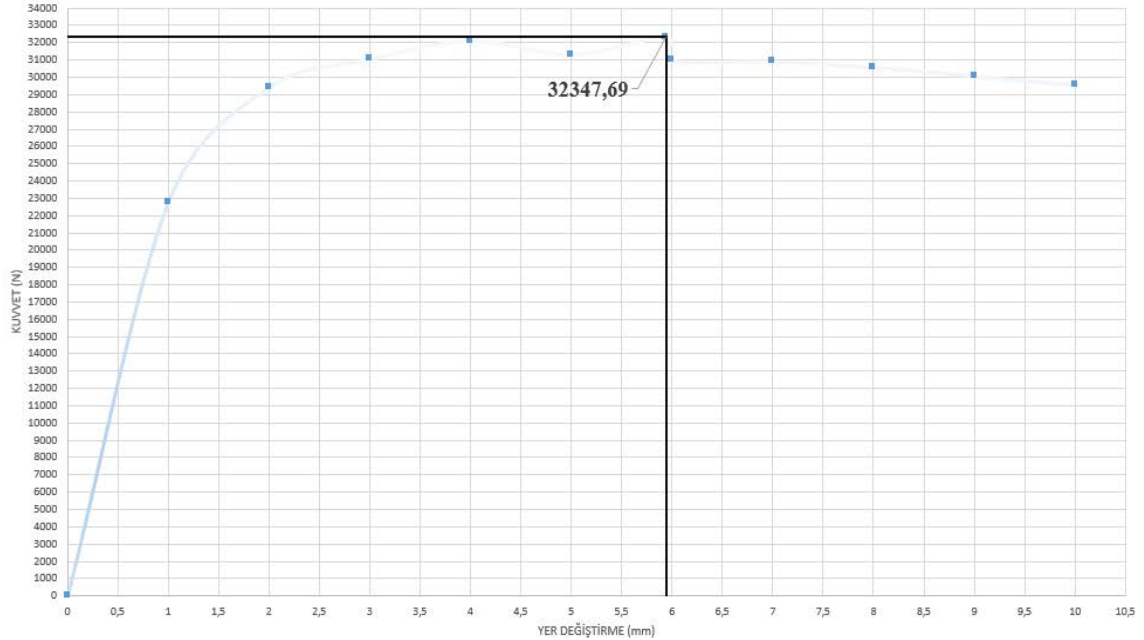
**Şekil 4.19.**  $L_k=L$  mesnetlenme durumunda numunelerin yükleme sonrası görüntüleri  
a) N.11 numunesi, b) N.12 numunesi ve c) N.13 numunesi

Bu mesnetlenme durumunda N.11, N.12 ve N.13 numunelerinin kuvvet ölçümü sonucunda elde edilen kuvvet ve yer değiştirme değerleri izelge 4.20’de paylaşılmıştır. Test sonuçlarından elde edilen değerler kuvvet-yer değiştirmelere bağlı olarak standart sapma 1021 N ve  $N.1_{ort}$  kritik kuvvet değeri 32348 N olarak hesaplanmıştır (izelge 4.20).

**Çizelge 4.18.**  $L_k=L$  mesnetlenme durumunda N.11, N.12, N.13 numunelerinin ortalama yer değiştirme-kuvvet değerleri

Numune	$F_{kritik}$	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm	6 mm	7 mm	8 mm	9 mm	10 mm
N.11	31628,71	23850,40	28825,55	30454,50	31461,80	30592,40	29410,72	29394,10	29013,76	28456,90	27910,84
N.12	31897,78	22338,60	29785,16	31282,70	31859,50	29863,50	30463,08	30463,60	30183,49	29722,20	29337,52
N.13	33516,59	22180,90	29661,69	31453,80	33039,40	33510,10	33058,92	32899,00	32529,47	32006,20	31414,33
N.1 Ort.	32347,69	22789,97	29424,13	31063,67	32120,23	31322,00	30977,57	30918,90	30575,57	30061,77	29554,23
N.1 Std Sapma	1021,20	921,74	522,05	534,45	820,48	1929,68	1877,73	1796,26	1790,35	1798,85	1761,77

N.11, N.12 ve N.13 numunelerinden elde edilen kuvvet-yer değiştirme değerleri Excel formatında işlenerek N.1 ortalama kuvvet değeri grafiği Şekil 4.20’de belirtildiği gibi oluşturulmuştur.



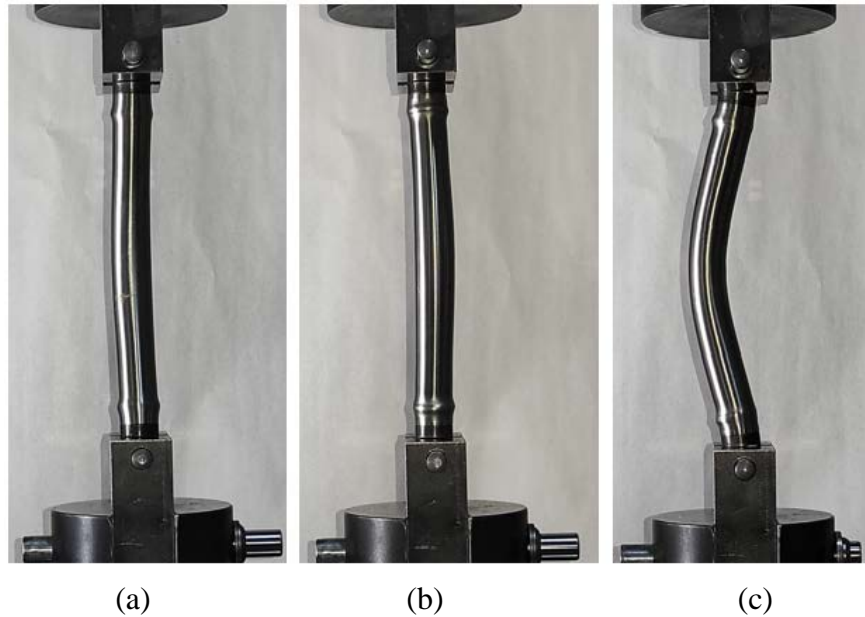
**Şekil 4. 20.**  $L_k=L$  mesnetlenme için  $N.1_{ort}$  kritik kuvvet-yer değiştirme grafiği

Çizelge 4.21’de bahsedilen boy, yer değiştirme ve radüs değerleri test sonrasında video yöntemiyle ölçümler yapılarak N.11, N.12 ve N.13 değerleri elde edilerek aşağıda paylaşılmıştır. Numunelerin ortalama boydaki kısalma değerleri 9,615 mm, yer değiştirme değeri 13,256 mm ve radüs değerleri 172,861 mm olarak elde edilmiştir. Standart sapma değerleri ise sırasıyla boyda 0,408 mm, radüste 18,691 mm ve yer değiştirme ise 0,380 mm olarak elde edilmiştir.

**Çizelge 4.19.**  $L_k = L$  mesnetlenme durumunda N.11, N.12 ve N.13 numunelerinin ölçüm sonucu

Numune	Test Öncesi Boy (mm)	Test Sonrası Boy (mm)	Boy Kısılması (mm)	Radüs (mm)	Yer değiştirme (mm)
<b>N.11</b>	173,000	163,501	9,499	159,855	13,349
<b>N.12</b>	173,000	162,932	10,068	164,447	13,581
<b>N.13</b>	173,000	163,723	9,277	194,280	12,839
<b>N.1 Ort.</b>	173,000	163,385	9,615	172,861	13,256
<b>N.1 Std Sapma</b>	0,000	0,408	0,408	18,691	0,380

$L_k = L$  durumunda  $\text{Ø}20 \times 1.75-173$  ölçülerine sahip SAE 304 malzemeden imal edilmiş N.21, N.22 ve N.23 numunelerinin plastik deformasyona uğramış görüntüleri Şekil 4.21’de paylaşılmıştır.



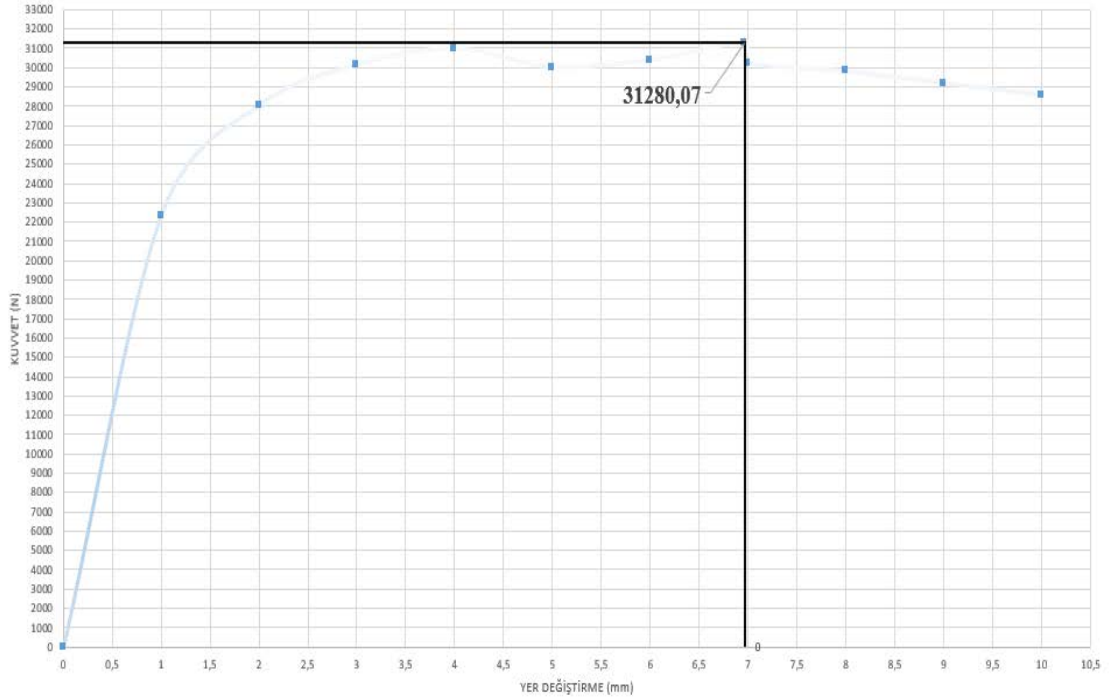
**Şekil 4.21.**  $L_k = L$  mesnetlenme durumunda numunelerin yükleme sonrası görüntüleri a) N.21 numunesi, b) N.22 numunesi ve c) N.23 numunesi

Bu mesnetlenme durumunda N.21, N.22 ve N.23 numunelerinin kuvvet ölçümü sonucunda elde edilen kuvvet ve yer değiştirme değerleri izelge 4.22’de paylaşılmıştır. Test sonuçlarından elde edilen değerler kuvvet-yer değiştirmelere bağlı olarak standart sapma 1339 N ve  $N.2_{ort}$  kritik kuvvet değeri 31280 N olarak hesaplanmıştır (izelge 4.22).

**Çizelge 4.20.**  $L_k=L$  mesnetlenme durumunda N.21, N.22, N.23 ve  $N.2_{ort}$  numunelerinin kuvvet-yer değiştirme değerleri

Numune	$F_{kritik}$	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm	6 mm	7 mm	8 mm	9 mm	10 mm
N.21	29734,23	23192,80	27597,39	28989,50	29556,00	29725,20	29650,48	29361,80	28884,93	28199,20	27503,59
N.22	32040,58	20547,80	27227,20	30043,30	31330,60	31876,90	32025,46	31967,50	31709,28	31292,20	30740,56
N.23	32065,41	23261,40	29256,83	31363,50	32016,10	28417,10	29494,13	29331,40	28788,81	28042,20	27448,35
N.2 Ort.	31280,07	22334,00	28027,14	30132,10	30967,57	30006,40	30390,02	30220,23	29794,34	29177,87	28564,17
N.2 Std Sapma	1338,80	1547,27	1080,91	1189,49	1269,59	1746,96	1418,49	1513,25	1659,08	1832,75	1885,01

N.21, N.22 ve N.23 numunelerinden elde edilen kuvvet-yer değiştirme değerleri Excel formatında işlenerek N.2 ortalama kuvvet değeri grafiği Şekil 4.22’te belirtildiği gibi oluşturulmuştur.



**Şekil 4. 22.**  $L_k=L$  mesnetlenme için N.2  $_{ort}$  kritik kuvvet-yer değiştirme grafiği

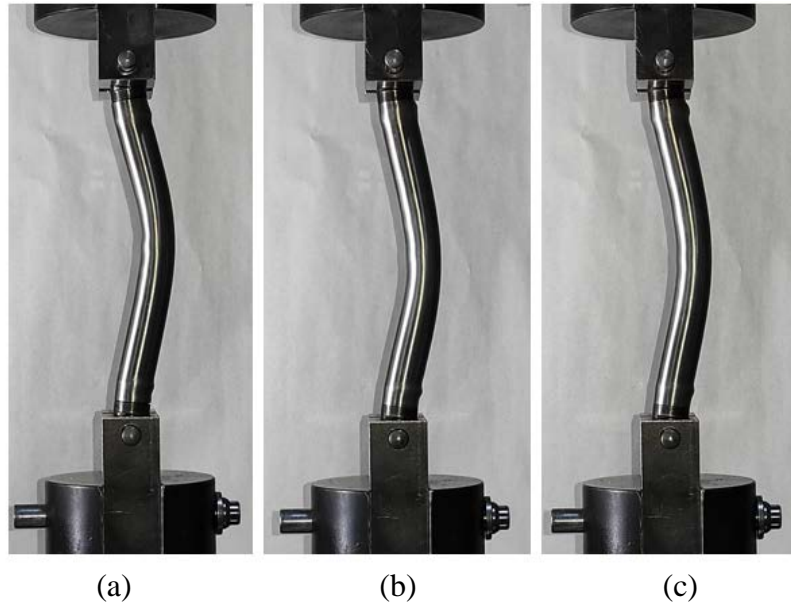


Çizelge 4.23'te bahsedilen boy, yer değiştirme ve radüs değerleri test sonrasında video yöntemiyle ölçümler yapılarak N.21, N.22 ve N.23 değerleri elde edilerek aşağıda paylaşılmıştır. Numunelerin ortalama boydaki kısıalma değerleri 10,237 mm, yer değiştirme değeri 13,180 mm ve radüs değerleri 10,237 mm olarak elde edilmiştir. Standart sapma değerleri ise sırasıyla boyda 13,180 mm, radüste 20,054 mm ve yer değiştirme ise 1,580 mm olarak elde edilmiştir.

**Çizelge 4.21.**  $L_k = L$  mensetlenme durumunda N.21, N.22 ve N.23 numunelerinin ölçüm sonucu

Numune	Test Öncesi Boy (mm)	Test Sonrası Boy (mm)	Boy Kısılması (mm)	Radüs (mm)	Yer değiştirme (mm)
N.21	173,000	163,002	9,998	183,211	11,857
N.22	173,000	162,756	10,244	166,271	12,755
N.23	173,000	162,532	10,468	143,256	14,929
N.2 Ort.	173,000	162,763	10,237	164,246	13,180
N.2 Std Sapma	0,000	0,235	0,235	20,054	1,580

$L_k = L$  durumunda  $\text{Ø}20 \times 1.5-173$  ölçülerine sahip SAE 304 malzemeden imal edilmiş N.31, N.32 ve N.33 numunelerinin plastik deformasyona uğramış görüntüleri Şekil 4.23'te paylaşılmıştır.



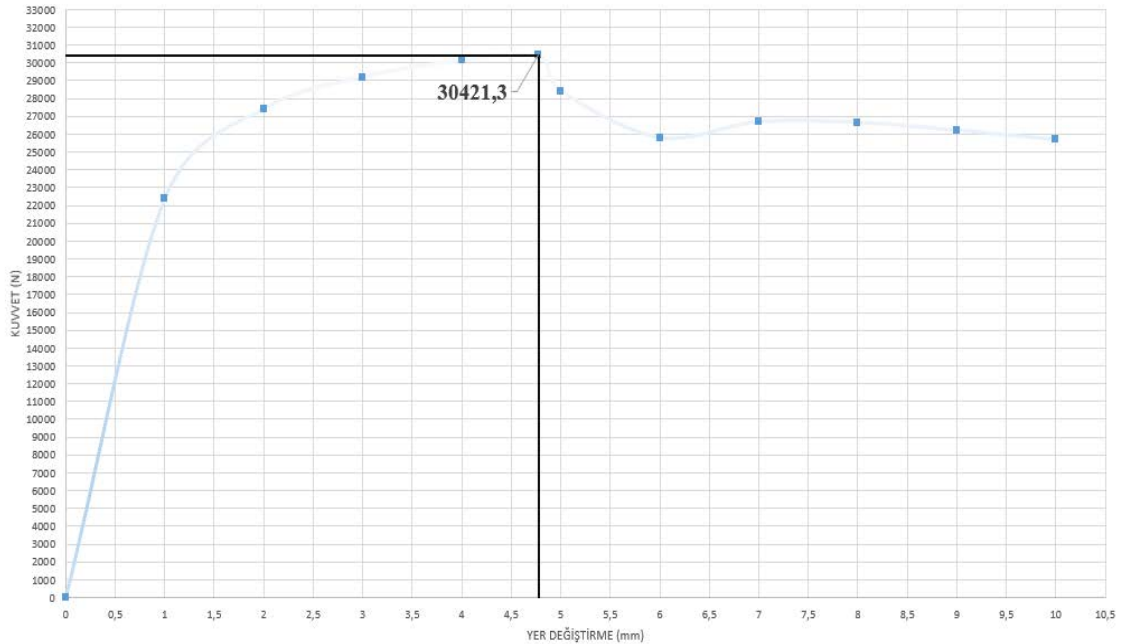
**Şekil 4.23.**  $L_k = L$  mensetlenme durumunda numunelerin yükleme sonrası görüntüleri a) N.31 numunesi, b) N.32 numunesi ve c) N.33 numunesi

Bu mesnetlenme durumunda N.31, N.32 ve N.33 numunelerinin kuvvet ölçümü sonucunda elde edilen kuvvet ve yer değiştirme değerleri izelge 4.24’de paylaşılmıştır. Test sonuçlarından elde edilen değerler kuvvet-yer değiştirmelere bağlı olarak standart sapma 1018 N ve N.3<sub>ort</sub> kritik kuvvet değeri 30421 N olarak hesaplanmıştır (izelge 4.24).

**Çizelge 4.22.** L<sub>k</sub>= L mesnetlenme durumunda N.31, N.32, N.33 ve N.3<sub>ort</sub>. numunelerinin kuvvet-yer değiştirme değerleri

Numune	F <sub>kritik</sub>	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm	6 mm	7 mm	8 mm	9 mm	10 mm
N.31	29920,29	21068,40	27467,45	29360,80	29585,50	24253,80	24351,85	25958,60	25566,15	25052,10	24600,47
N.32	29750,27	22803,70	26950,69	28059,30	29484,70	29541,20	25937,40	26708,90	26602,58	26166,50	25601,97
N.33	31593,34	23260,70	27810,77	30173,10	31328,80	31491,70	27086,00	27394,40	27785,54	27411,90	26848,21
N.3 Ort.	30421,30	22377,60	27409,64	29197,73	30133,00	28428,90	25791,75	26687,30	26651,42	26210,17	25683,55
N.3 Std Sapma	1018,57	1156,60	432,94	1066,29	1036,82	3744,96	1372,88	718,14	1110,50	1180,51	1126,09

N.31, N.32 ve N.33 numunelerinden elde edilen kuvvet-yer değiştirme değerleri excel formatında işlenerek N.3 ortalama kuvvet değeri grafiği Şekil 4.24’te belirtildiği gibi oluşturulmuştur.



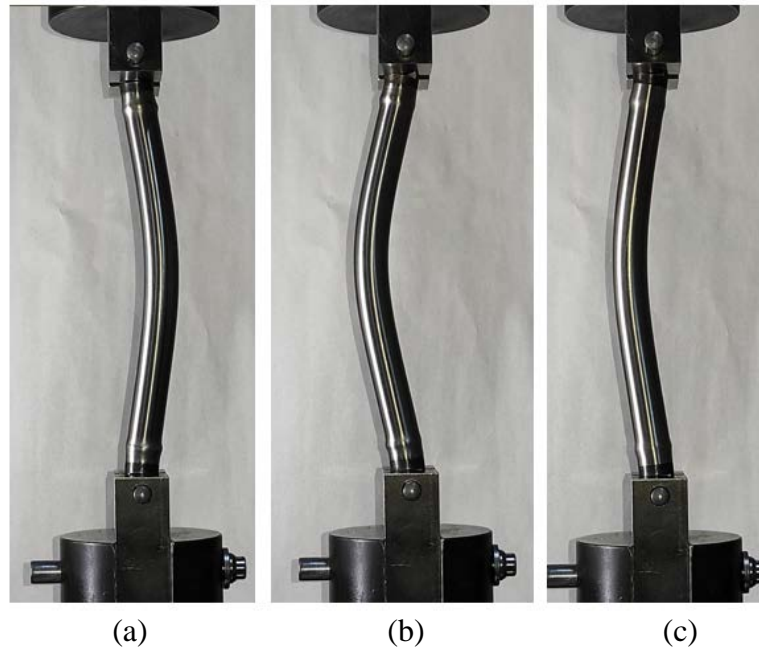
**Şekil 4. 24.** L<sub>k</sub>= L mesnetlenme için N.3<sub>ort</sub>. kritik kuvvet-yer değiştirme grafiği

Çizelge 4.25’te bahsedilen boy, yer değiştirme ve radüs değerleri test sonrasında video yöntemiyle ölçümler yapılarak N.31, N.32 ve N.33 değerleri elde edilerek aşağıda paylaşılmıştır. Numunelerin ortalama boydaki kısalma değerleri 8,396 mm, yer değiştirme değeri 12,603 mm ve radüs değerleri 172,532 mm olarak elde edilmiştir. Standart sapma değerleri ise sırasıyla boyda 1,226 mm, radüste 4,107 mm ve yer değiştirme ise 0,812 mm olarak elde edilmiştir.

**Çizelge 4.23.**  $L_k = L$  mensetlenme durumunda N.31, N.32 ve N.33 numunelerinin ölçüm sonucu

Numune	Test Öncesi Boy (mm)	Test Sonrası Boy (mm)	Boy Kısılması (mm)	Radüs (mm)	Yer değiştirme (mm)
<b>N.31</b>	173,000	166,018	6,982	177,062	11,719
<b>N.32</b>	173,000	163,846	9,154	169,052	13,316
<b>N.33</b>	173,000	163,947	9,053	171,483	12,774
<b>N.3 Ort.</b>	173,000	164,604	8,396	172,532	12,603
<b>N.3 Std Sapma</b>	0,000	1,226	1,226	4,107	0,812

$L_k = L$  durumunda  $\text{Ø}20 \times 2-223$  ölçülerine sahip SAE 304 malzemeden imal edilmiş N.41, N.42 ve N.43 numunelerinin plastik deformasyona uğramış görüntüleri Şekil 4.25’de paylaşılmıştır.



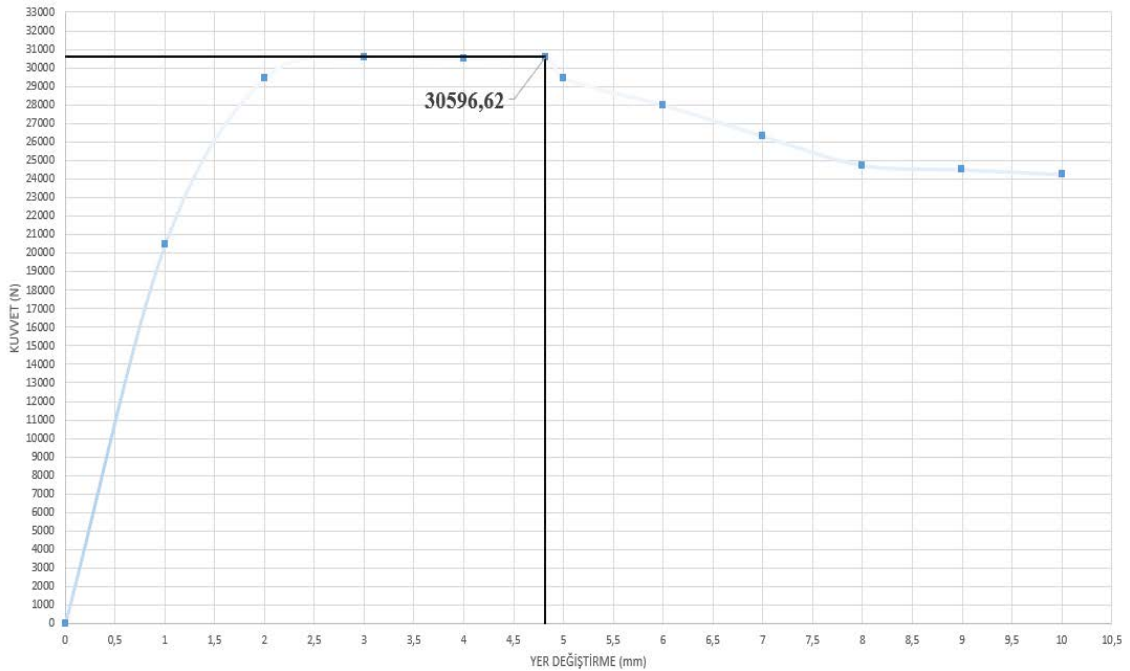
**Şekil 4.25.**  $L_k = L$  mesnetlenme durumunda numunelerin yükleme sonrası görüntüleri a) N.41 numunesi, b) N.42 numunesi ve c) N.43 numunesi

Bu mesnetlenme durumunda N.41, N.42 ve N.43 numunelerinin kuvvet ölçümü sonucunda elde edilen kuvvet ve yer değiştirme değerleri izelge 4.26’de paylaşılmıştır. Test sonuçlarından elde edilen değerler kuvvet-yer değiştirmelere bağlı olarak standart sapma 853 N ve  $N_{4\text{ort}}$  kritik kuvvet değeri 30597 N olarak hesaplanmıştır (izelge 4.26).

**Çizelge 4.24.**  $L_k=L$  mesnetlenme durumunda N.41, N.42, N.43 ve  $N_{4\text{ort}}$  numunelerinin kuvvet-yer değiştirme değerleri

Numune	$F_{\text{kritik}}$	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm	6 mm	7 mm	8 mm	9 mm	10 mm
N.41	31507,45	19472,60	29986,05	31474,00	31442,00	31049,70	30352,26	28892,60	26743,85	26534,70	26107,65
N.42	29816,54	20943,30	29073,50	29816,50	29584,50	27201,20	24647,03	23618,00	22519,23	22169,20	22035,96
N.43	30465,86	20942,30	29262,06	30422,40	30414,10	30037,50	28968,16	26427,10	24955,81	24829,60	24596,49
N.4 Ort.	30596,62	20452,73	29440,54	30570,97	30480,20	29429,47	27989,15	26312,57	24739,63	24511,17	24246,70
N.4 Std Sapma	853,00	848,82	481,74	838,68	930,51	1995,00	2975,95	2639,16	2120,59	2200,10	2058,26

N.41, N.42 ve N.43 numunelerinden elde edilen kuvvet-yer değiştirme değerleri Excel formatında işlenerek N.4 ortalama kuvvet değeri grafiği Şekil 4.26’de belirtildiği gibi oluşturulmuştur.



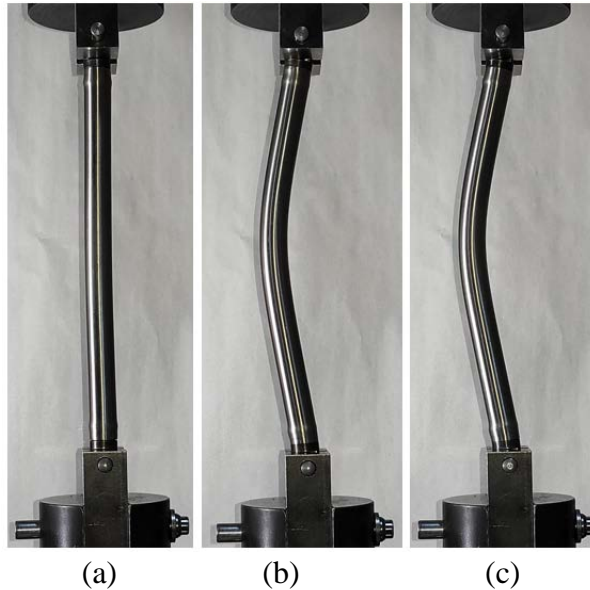
**Şekil 4. 26.**  $L_k=L$  mesnetlenme için  $N_{4\text{ort}}$  kritik kuvvet-yer değiştirme grafiği

Çizelge 4.27’de bahsedilen boy, yer değiştirme ve radüs değerleri test sonrasında video yöntemiyle ölçümler yapılarak N.41, N.42 ve N.43 değerleri elde edilerek aşağıda paylaşılmıştır. Numunelerin ortalama boydaki kısıalma değerleri 8,038 mm, yer değiştirme değeri 16,370 mm ve radüs değerleri 268,786 mm olarak elde edilmiştir. Standart sapma değerleri ise sırasıyla boyda 0,385 mm, radüste 20,898 mm ve yer değiştirme ise 1,247 mm olarak elde edilmiştir.

**Çizelge 4.25.**  $L_k = L$  mensetlenme durumunda N.41, N.42 ve N.43 numunelerinin ölçüm sonucu

Numune	Test Öncesi Boy (mm)	Test Sonrası Boy (mm)	Boy Kısılması (mm)	Radüs (mm)	Yer değiştirme (mm)
N.41	223,000	214,743	8,257	274,942	16,303
N.42	223,000	214,736	8,264	245,502	17,649
N.43	223,000	215,406	7,594	285,915	15,158
N.4 Ort.	223,000	214,962	8,038	268,786	16,370
N.4 Std Sapma	0,000	0,385	0,385	20,898	1,247

$L_k = L$  durumunda  $\text{Ø}20 \times 2-273$  ölçülerine sahip SAE 304 malzemeden imal edilmiş N.51, N.52 ve N.53 numunelerinin plastik deformasyona uğramış görüntüleri Şekil 4.27’de paylaşılmıştır.



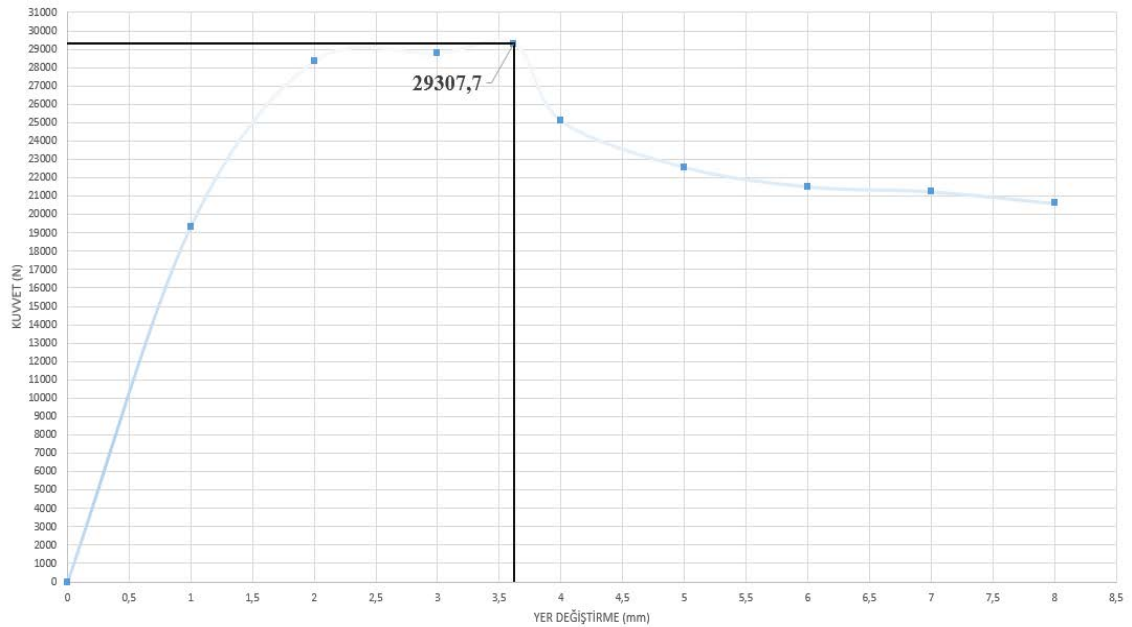
**Şekil 4.27.**  $L_k = L$  mesnetlenme durumunda numunelerin yükleme sonrası görüntüleri a) N.51 numunesi, b) N.52 numunesi ve c) N.53 numunesi

Bu mesnetlenme durumunda N.51, N.52 ve N.53 numunelerinin kuvvet ölçümü sonucunda elde edilen kuvvet ve yer değiştirme değerleri izelge 4.28’de paylaşılmıştır. Test sonuçlarından elde edilen değerler kuvvet-yer değiştirmelere bağlı olarak standart sapma 747 N ve  $N.4_{ort}$  kritik kuvvet değeri 29308 N olarak hesaplanmıştır (izelge 4.28).

**Çizelge 4.26.**  $L_k=L$  mesnetlenme durumunda N.51, N.52, N.53 ve  $N.5_{ort}$ . numunelerinin kuvvet-yer değiştirme değerleri

Numune	$F_{kritik}$	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm	6 mm	7 mm	8 mm	9 mm	10 mm
N.51	28570,52	22688,00	28570,21	27828,70	26775,00	25340,80	24181,82	23267,30	22371,46	-	-
N.52	29288,62	16702,90	28035,99	28813,90	23015,30	21604,30	19726,51	20026,40	19562,73	-	-
N.5.3	30063,97	18677,90	28428,84	29645,10	25534,30	20793,30	20638,43	20446,90	19885,50	19303,30	-
N.5 Ort.	29307,70	19356,27	28345,01	28762,57	25108,20	22579,47	21515,59	21246,87	20606,56	19303,30	-
N.5 Std Sapma	746,91	3049,67	276,80	909,29	1915,73	2425,52	2353,61	1762,33	1536,94	11144,77	-

N.51, N.52 ve N.53 numunelerinden elde edilen kuvvet-yer değiştirme değerleri Excel formatında işlenerek N.5 ortalama kuvvet değeri grafiği Şekil 4.28’de belirtildiği gibi oluşturulmuştur.



**Şekil 4. 28.**  $L_k=L$  mesnetlenme için N.5  $_{ort}$ . kritik kuvvet-yer değiştirme grafiği

Çizelge 4.29’da bahsedilen boy, yer değiştirme ve radüs değerleri test sonrasında video yöntemiyle ölçümler yapılarak N.51, N.52 ve N.53 değerleri elde edilerek aşağıda paylaşılmıştır. Numunelerin ortalama boydaki kısalma değerleri 3,903 mm, yer değiştirme değeri 15,624 mm ve radüs değerleri 470,179 mm olarak elde edilmiştir. Standart sapma değerleri ise sırasıyla boyda 1,965 mm, radüste 181,928 mm ve yer değiştirme ise 5,204 mm olarak elde edilmiştir.

**Çizelge 4.27.**  $L_k = L$  mensetlenme durumunda N.51, N.52 ve N.53 numunelerinin ölçüm sonucu

Numune	Test Öncesi Boy (mm)	Test Sonrası Boy (mm)	Boy Kısalması (mm)	Radüs (mm)	Yer değiştirme (mm)
<b>N.51</b>	273,000	271,328	1,672	338,578	9,747
<b>N.52</b>	273,000	268,342	4,658	397,808	17,477
<b>N.53</b>	273,000	267,622	5,378	335,574	19,649
<b>N.5 Ort.</b>	273,000	269,097	3,903	470,179	15,624
<b>N.5 Std Sapma</b>	0,000	1,965	1,965	35,096	5,204

$L_k = L$  durumunda  $\varnothing 20 \times 2-173$  ölçülerine sahip AL 6082 malzemeden imal edilmiş N.61 ve N.62 numunelerinden sadece N.61 numunesinin plastik deformasyona uğramış görüntüleri Şekil 4.29’da paylaşılmıştır. N.61 numunesi burkulma gerilmesine uğramadan yük altında ezilme gerçekleşmiştir. N.62 numunesi ise dış formalarında çatlaklar olduğundan Şekil 4.29’ da yer verilmemiştir.



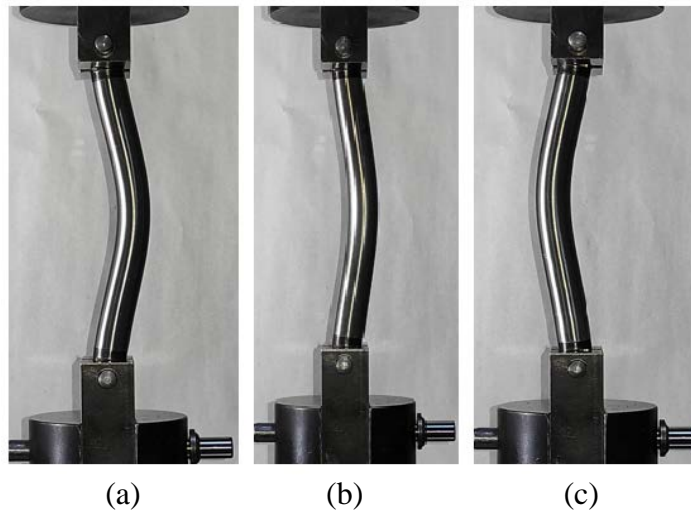
**Şekil 4.29.**  $L_k = L$  mesnetlenme durumunda N.61 numunesinin yükleme sonrası görüntüsü

Bu mesnetlenme durumunda N.61 ve N.62 numunelerinin kuvvet ölçümü sonucunda elde edilen kuvvet ve yer değiştirme değerleri Çizelge 4.30'de paylaşılmıştır. Test sonuçlarından elde edilen değerler kuvvet-yer değiştirmelere bağlı olarak standart sapma 9337 N ve N.6<sub>ort</sub> kritik kuvvet değeri 28315 N olarak hesaplanmıştır (Çizelge 4.30). N.61, N.62 numuneleriyle alınan testlerde burkulma gerilmelerine uğramadan malzeme yapılarında ezilme ve dış formlarında şekil bozuklukları gerçekleşmiştir. N.61 ve N.62 numuneleriyle elde edilen kuvvet değerleri Çizelge 4.30'da paylaşılmıştır. N.61 ve N.62 numunesi için malzeme hasarlarından dolayı kuvvet ve boyutsal ölçüm sonuçları belirtilmemiştir. N.61 numunesinde dış bölgesinde ezilme, N.62 numunesinde ise malzeme hasarından dolayı boyutsal ölçüm değerleri çalışma kapsamına dahil edilmemiş ve dağılım grafikleri çizdirilmemiştir.

**Çizelge 4.28.**  $L_k=L$  mesnetlenme durumunda N.61 ve N.62 numunelerinin ortalama yer değiştirme-kuvvet değerleri

Numune	$F_{kritik}$	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm	6 mm	7 mm	8 mm	9 mm	10 mm
N.61	34916,98	20185,00	23292,25	22552,90	22990,90	23079,80	21988,97	26014,60	32549,66	34816,80	26424,90
N.62	21712,73	19137,30	21612,72	9221,56	13882,70	18050,50	19393,39	19851,00	12478,20	-	-
N.6 Ort.	28314,86	19661,15	22452,49	15887,23	18436,80	20565,15	20691,18	22932,80	22513,93	34816,80	26424,90
N.6 Std Sapma	9336,81	740,84	1187,61	9426,68	6440,47	3556,25	1835,35	4358,32	14192,67	24619,20	18685,23

$L_k=L$  durumunda  $\text{Ø}20 \times 2-173$  ölçülerine sahip SAE 304 malzemeden dış formu oluşturulmadan imal edilmiş N.71, N.72 ve N.73 numunelerinin plastik deformasyona uğramış görüntüleri Şekil 4.30'da paylaşılmıştır.



**Şekil 4.30.**  $L_k=L$  mesnetlenme durumunda numunelerin yükleme sonrası görüntüleri a) N.71 numunesi, b) N.72 numunesi ve c) N.73 numunesi

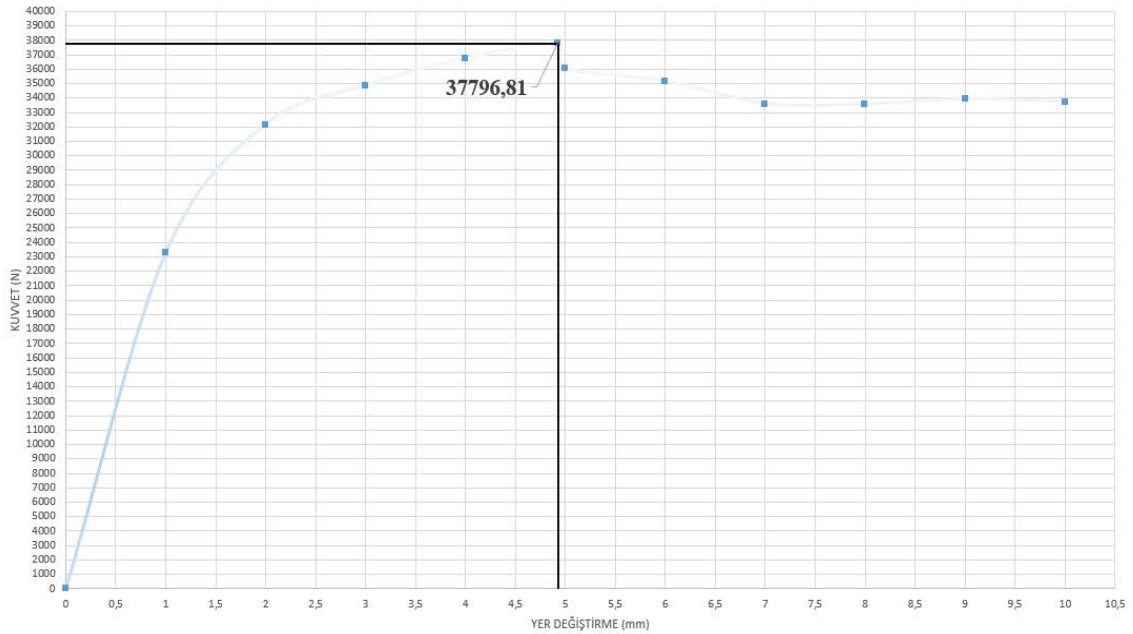


Bu mesnetlenme durumunda N.71, N.72 ve N.73 numunelerinin kuvvet ölçümü sonucunda elde edilen kuvvet ve yer değiştirme değerleri izelge 4.31’de paylaşılmıştır. Test sonuçlarından elde edilen değerler kuvvet-yer değiştirmelere bağlı olarak standart sapma 1228 N ve  $N.7_{ort}$  kritik kuvvet değeri 37797 N olarak hesaplanmıştır (izelge 4.31).

**Çizelge 4.29.**  $L_k=L$  mesnetlenme durumunda N.71, N.72, N.73 ve  $N.7_{ort}$  numunelerinin kuvvet-yer değiştirme değerleri

Numune	$F_{kritik}$	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm	6 mm	7 mm	8 mm	9 mm	10 mm
N.71	37285,73	23230,40	32887,10	35659,70	37197,30	32650,40	34057,90	34771,40	34622,20	34137,70	33497,70
N.72	36907,43	22260,90	31867,60	34301,90	35798,50	36618,20	36842,90	35794,80	34199,50	34206,90	34021,20
N.73	39197,28	24289,00	31741,00	34666,50	37209,00	38865,40	34583,60	30233,50	31832,00	33446,90	33685,20
N.7 Ort.	37796,81	23260,10	32165,23	34876,03	36734,93	36044,67	35161,47	33599,90	33551,23	33930,50	33734,70
N.7 Std Sapma	1227,50	1014,38	628,35	702,73	811,00	3146,94	1479,70	2959,95	1503,83	420,24	265,24

N.71, N.72 ve N.73 numunelerinden elde edilen kuvvet-yer değiştirme değerleri Excel formatında işlenerek N.7 ortalama kuvvet değeri grafiği Şekil 4.31’te belirtildiği gibi oluşturulmuştur.



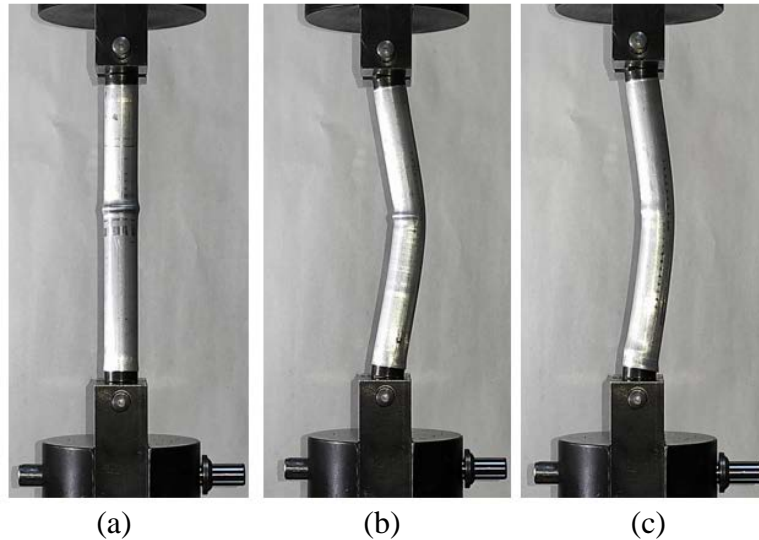
**Şekil 4. 31.**  $L_k=L$  mesnetlenme için  $N.7_{ort}$  kritik kuvvet-yer değiştirme grafiği

Çizelge 4.32’de bahsedilen boy, yer değiştirme ve radüs değerleri test sonrasında video yöntemiyle ölçümler yapılarak N.71, N.72 ve N.73 değerleri elde edilerek aşağıda paylaşılmıştır. Numunelerin ortalama boydaki kısalma değerleri 8,151 mm, yer değiştirme değeri 12,429 mm ve radüs değerleri 196,823 mm olarak elde edilmiştir. Standart sapma değerleri ise sırasıyla boyda 1,484 mm, radüste 23,585 mm ve yer değiştirme ise 0,912 mm olarak elde edilmiştir.

**Çizelge 4.30.**  $L_k = L$  mesnetlenme durumunda N.71, N.72 ve N.73 numunelerinin ölçüm sonucu

Numune	Test Öncesi Boy (mm)	Test Sonrası Boy (mm)	Boy Kısalması (mm)	Radüs (mm)	Yer değiştirme (mm)
N.71	173,000	165,707	7,293	206,974	13,073
N.72	173,000	163,136	9,864	169,861	12,828
N.73	173,000	165,704	7,296	213,633	11,385
N.7 Ort.	173,000	164,849	8,151	196,823	12,429
N.7 Std Sapma	0,000	1,484	1,484	23,585	0,912

$L_k = L$  durumunda  $\text{Ø}20 \times 2-173$  ölçülerine sahip AL 6082 malzemeden dış formu oluşturulmadan imal edilmiş N.81, N.82 ve N.83 numunelerinin plastik deformasyona uğramış görüntüleri Şekil 4.32’de paylaşılmıştır. N.81 numunesi burkulma gerilmesine uğramadan yük altında ezilme gerçekleşmiştir.



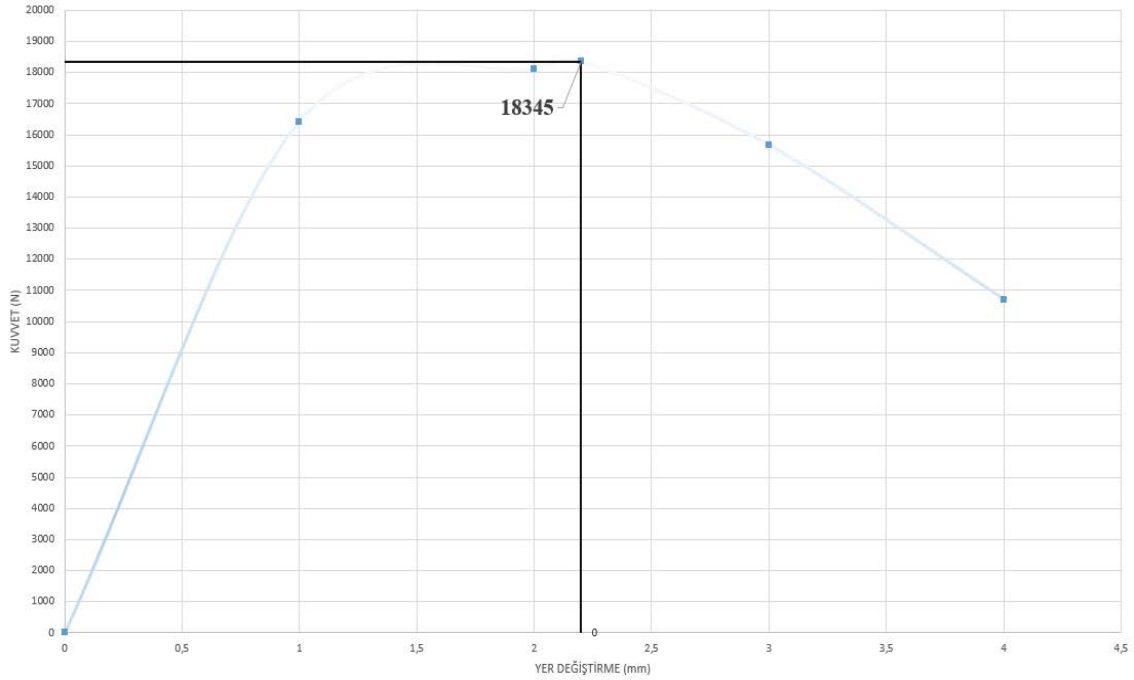
**Şekil 4.32.**  $L_k = L$  mesnetlenme durumunda numunelerin yükleme sonrası görüntüleri a) N.81 numunesi, b) N.82 numunesi ve c) N.83 numunesi

Bu mesnetlenme durumunda N.81, N.82 ve N.83 numunelerinin kuvvet ölçümü sonucunda elde edilen kuvvet ve yer değiştirme değerleri izelge 4.33’de paylaşılmıştır. Test sonuçlarından elde edilen değerler kuvvet-yer değiştirmelere bağlı olarak standart sapma 3605 N ve  $N_{8\text{ort}}$  kritik kuvvet değeri 18345 N olarak hesaplanmıştır. N.81 numunesinin ortalama kritik kuvveti ve Std sapma değerleri izelge 4.33’e dahil edilmemiştir.

**Çizelge 4. 31.**  $L_k=L$  mesnetlenme durumunda N.81, N.82, N.83 ve  $N_{8\text{ort}}$ . numunelerinin kuvvet-yer değiştirme değerleri

Numune	$F_{\text{kritik}}$	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm	6 mm	7 mm	8 mm	9 mm	10 mm
N.81	30781,65	16461,10	30608,20	29828,40	27517,30	25003,30	22563,10	-	-	-	-
N.82	20894,35	18411,60	20492,40	17491,40	11684,80	10129,90	8309,18	-	-	-	-
N.83	15795,65	14442,20	15735,20	13812,10	9719,23	4473,41	-	-	-	-	-
N.8 Ort.	18345,00	16426,90	18113,80	15651,75	10702,02	7301,66	8309,18	-	-	-	-
N.8 Std Sapma	3605,33	2806,79	3363,85	2601,66	1389,87	3999,74	5875,48	-	-	-	-

N.82 ve N.83 numunelerinin dağılım grafikleri çizdirilmiş olup N.81 numunesinin standart sapması ysek olduğundan Şekil 4.33’teki dağılım grafiğine dahil edilmemiştir.



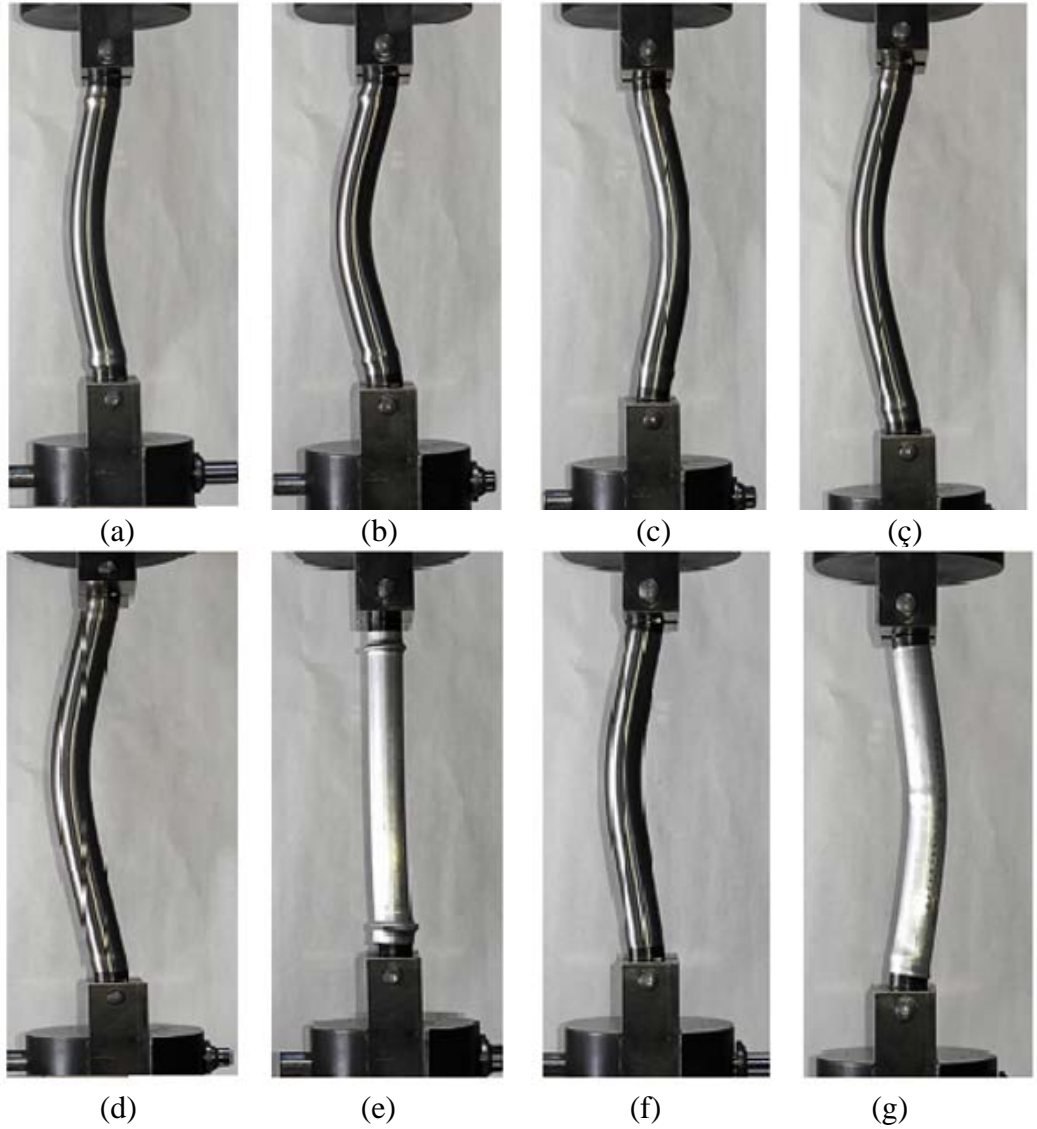
**Şekil 4. 33.**  $L_k=L$  mesnetlenme için  $N_{8\text{ort}}$  kritik kuvvet-yer değiştirme grafiği

Çizelge 4.34'te bahsedilen boy, yer değiştirme ve radüs değerleri test sonrasında video yöntemiyle ölçümler yapılarak N.81, N.82 ve N.83 değerleri elde edilerek aşağıda paylaşılmıştır. Numunelerin ortalama boydaki kısıalma değerleri 3,742 mm, yer değiştirme değeri 8,987 mm ve radüs değerleri 292,980 mm olarak elde edilmiştir. Standart sapma değerleri ise sırasıyla boyda 0,133 mm, radüste 24,843 mm ve yer değiştirme ise 0,845 mm olarak elde edilmiştir.

**Çizelge 4.32.**  $L_k = L$  mensetlenme durumunda N.81, N.82 ve N.83 numunelerinin ölçüm sonucu

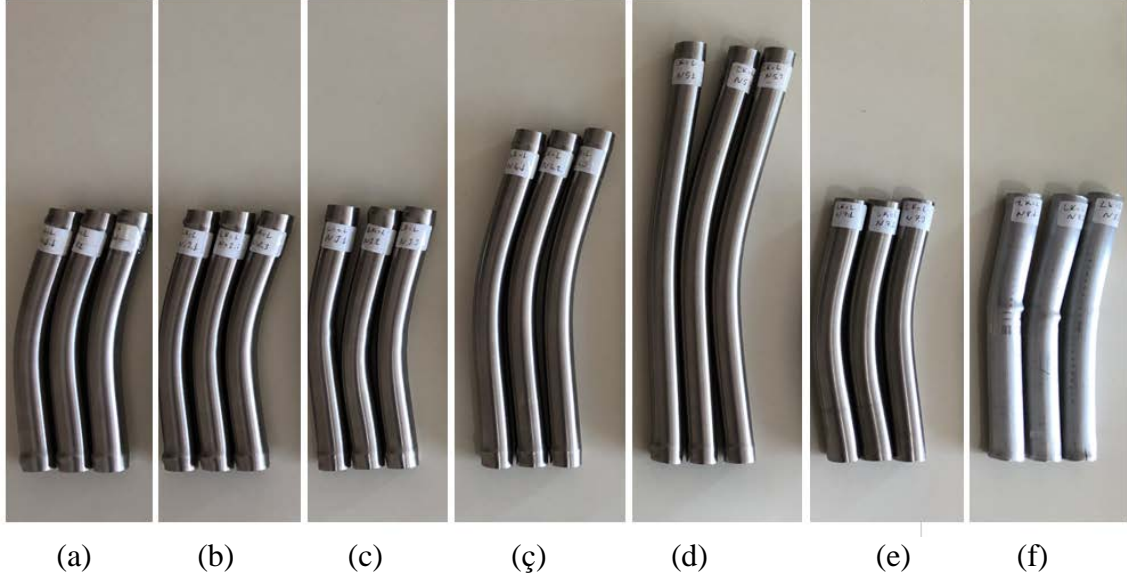
Numune	Test Öncesi Boy (mm)	Test Sonrası Boy (mm)	Boy Kısılması (mm)	Radüs (mm)	Yer değiştirme (mm)
<b>N.81</b>	173,000	169,391	3,610	294,508	8,703
<b>N.82</b>	173,000	169,258	3,742	267,409	9,938
<b>N.83</b>	173,000	169,125	3,875	317,024	8,320
<b>N.8 Ort.</b>	173,000	169,191	3,809	292,216	9,129
<b>N.8 Std Sapma</b>	0,000	0,094	0,094	35,083	1,144

Her numune için ayrı şekilde test sonuçları paylaşılan  $L_k = L$  mesnetlenme durumları için numuneler aşağıdaki şekiller ve sonuçlar halinde birleştirilmiştir. Şekil 4.34’de belirtilen fotoğraflarda bazı numunelerin burkulmadaki görüntüleri belirgin olup kamera açısındadır fakat bazı numunelerin burkulma yönleri kamera açısına dik mesafesinde olmadığından belirgin değildir. Test alınan her gruptaki numune içinden bir adet seçilerek N.1, N.2, N.3, N.4, N.5, N.6, N.7 ve N.8 numunelerinin burkulma testi sonrasındaki görüntüleri aşağıda Şekil 4.34’de belirtilmiştir.



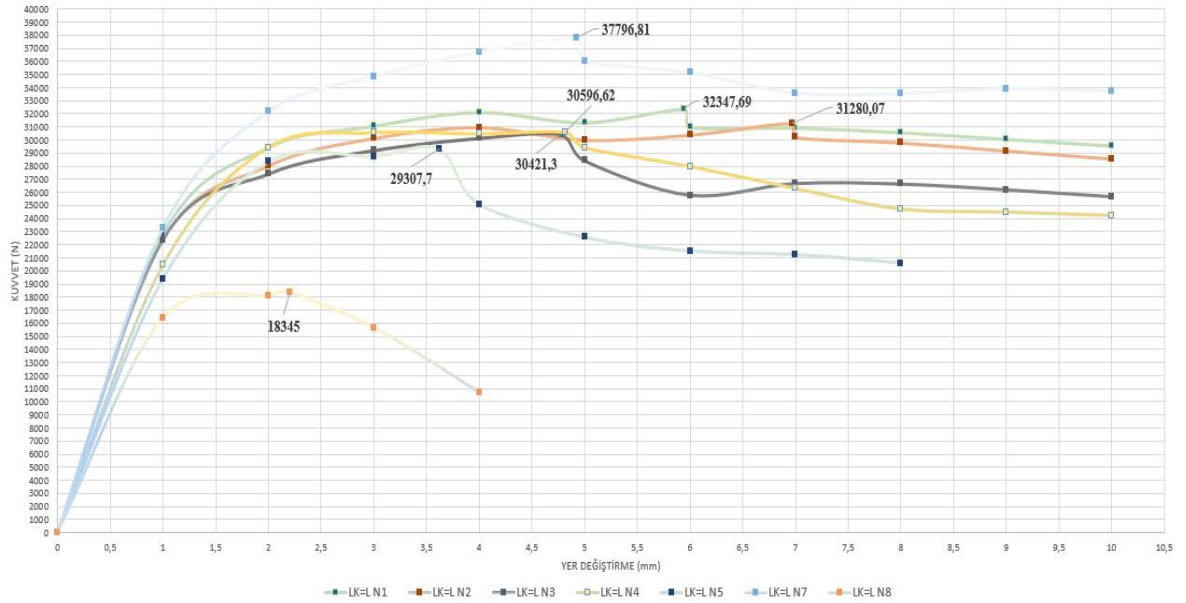
**Şekil 4.34.**  $L_k = L$  mesnetlenme durumunda numunelerin test sonrası görüntüleri a) N.1, b) N.2, c) N.3, ç) N.4, d) N.5, e) N.6, f) N.7 ve g) N.8

Bahsi geçen mesnetlenme durumunda testi tamamlanmış numunelerin N.6 numunesi hariç yüklenme sonrasındaki fotoğrafları Şekil 4.35’de paylaşılmıştır.



**Şekil 4.35.**  $L_k=L$  mesnetlenme durumunda numunelerin görüntüleri a) N.1, b) N.2, c) N.3, ç) N.4, d) N.5, e) N.7 ve f) N.8

N.1<sub>Ort.</sub>, N.2<sub>Ort.</sub>, N.3<sub>Ort.</sub>, N.4<sub>Ort.</sub>, N.5<sub>Ort.</sub>, N.7<sub>Ort.</sub> ve N.8<sub>Ort.</sub> elde edilen kuvvet-yer değiştirme değerleri Excel formatında işlenerek ortalama kuvvet değeri dağılım grafiği altında Şekil 4.36’da belirtildiği gibi oluşturulmuştur.



**Şekil 4.36.**  $L_k=L$  mesnetlenme için N.1, N.2, N.3, N.4, N.5, N.7 ve N.8 ortalama kritik kuvvet-yer değiştirme grafikleri

Bu mesnetlenme durumları için çalışma mesafesi değerlerinin 2,829-11,389 mm aralığında kritik burkulma kuvvetleri elde edilmiştir. Numunelerdeki et kalınlıkların azaltılması ve boylardaki artışa bağlı olarak kritik burkulma kuvvetleri de daha kısa yer değiştirme mesafelerinde elde edilmiştir.  $L_k = L$  mesnetlenme durumunda N.1<sub>Ort.</sub>, N.2<sub>Ort.</sub>, N.3<sub>Ort.</sub>, N.4<sub>Ort.</sub>, N.5<sub>Ort.</sub>, N.6<sub>Ort.</sub>, N.7<sub>Ort.</sub> ve N.8<sub>Ort.</sub> dan elde edilen ortalama kritik kuvvet değerleri çizelge biçimde toplanmıştır Test sonuçlarından elde edilen kuvvet-yer değiştirmelere bağlı ortalama kritik kuvvet değerleri sırasıyla 32348 N, 31280 N, 30421 N, 30597 N, 29308 N, 28315 N, 37797 N ve 18345 N olarak Çizelge 4.35’de paylaşılmıştır.

**Çizelge 4. 33.**  $L_k = L$  mesnetlenme için N.1, N.2, N.3, N.4, N.5, N.6, N.7 ve N.8 numunelerinin ortalama kuvvet- yer değiştirme değerleri

Numune	$F_{kritik}$	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm	6 mm	7 mm	8 mm	9 mm	10 mm
N.1 Ort.	32347,69	22789,97	29424,13	31063,67	32120,23	31322,00	30977,57	30918,90	30575,57	30061,77	29554,23
N.2 Ort.	31280,07	22334,00	28027,14	30132,10	30967,57	30006,40	30390,02	30220,23	29794,34	29177,87	28564,17
N.3 Ort.	30421,30	22377,60	27409,64	29197,73	30133,00	28428,90	25791,75	26687,30	26651,42	26210,17	25683,55
N.4 Ort.	30596,62	20452,73	29440,54	30570,97	30480,20	29429,47	27989,15	26312,57	24739,63	24511,17	24246,70
N.5 Ort.	29307,70	19356,27	28345,01	28762,57	25108,20	22579,47	21515,59	21246,87	20606,56	19303,30	-
N.6 Ort.	28314,86	19661,15	22452,49	15887,23	18436,80	20565,15	20691,18	22932,80	22513,93	34816,80	26424,90
N.7 Ort.	37796,81	23260,10	32165,23	34876,03	36734,93	36044,67	35161,47	33599,90	33551,23	33930,50	33734,70
N.8 Ort.	18345,00	16426,90	18113,80	15651,75	10702,02	7301,66	8309,18	-	-	-	-

Numune hazırlama bölümde bahsedilen (bkz. Çizelge 3.6) referans numunesi boyutlarından N.1’in cidar kalınlığı 2 mm iken N.2 ve N.3 numunesinin sırasıyla 1,75 mm ve 1,5 mm olarak imal edilen numunelerin ortalama kritik kuvvet değerleri 32348 N, 31280 N ve 30421 N olarak azaldığı gözlenmiştir. N.1, N.4 ve N.5. numunelerin boylarındaki 50 mm artış farkından dolayı elde edilen kritik kuvvet değerleri sırasıyla 32348 N, 30597 N ve 29308 N olarak yine azaldığı tespit edilmiştir. N.6<sub>Ort</sub> numunenin değerleri malzeme hasarından dolayı alınamamıştır. N.6 numune değerleri 28315 N olarak elde edilmiş olup SAE 304 malzemeye kıyasla daha düşük kuvvetler elde edilmiştir. N.7 ve N.8 numunelerinin kritik burkulma kuvvet değerleri 37797 N ve 18345 N olarak elde edilmiştir. N.7 ve N.8 numuneleri referans numunesiyle kıyaslandığında dış açılmadığından dolayı N.7 daha yüksek kritik kuvvete, N.8 numunesinde ise daha düşük kritik kuvvet değerleri elde edilmiştir.

Çizelge 4.37’de bahsedilen boy kısalması, radüs ve yer değiştirme değerleri test sonrasında video yöntemiyle ölçümler yapılarak N.1<sub>Ort.</sub>, N.2<sub>Ort.</sub>, N.3<sub>Ort.</sub>, N.4<sub>Ort.</sub>, N.5<sub>Ort.</sub>, N.7<sub>Ort.</sub> ve N.8<sub>Ort.</sub> değerleri elde edilerek aşağıda paylaşılmıştır. Numunelerin sırasıyla ortalama boydaki kısalma değerleri 9,615 mm, 10,237 mm, 8,396 mm, 8,038 mm, 3,903 mm, 8,151 mm ve 3,809 mm olarak elde edilmiştir. Radüs değerleri sırasıyla 172,861 mm, 164,246 mm, 172,532 mm, 268,786 mm, 357,320 mm, 196,823 mm ve 292,216 mm olarak elde edilmiştir. Yer değiştirme değerleri sırasıyla 13,256 mm, 13,180 mm, 12,603 mm, 16,370 mm, 15,624 mm, 12,429 mm ve 9,129 mm olarak elde edilmiştir.

**Çizelge 4.34.**  $L_k=L$  mensetlenme durumunda N.1, N.2, N.3, N.4, N.5, N.7 ve N.8 numunelerinin ölçüm sonucu

Numune	Test Öncesi Boy (mm)	Test Sonrası Boy (mm)	Boy Kısalması (mm)	Radüs (mm)	Yer değiştirme (mm)
N.1 Ort.	173,000	163,385	9,615	172,861	13,256
N.2 Ort.	173,000	162,763	10,237	164,246	13,180
N.3 Ort.	173,000	164,604	8,396	172,532	12,603
N.4 Ort.	223,000	214,962	8,038	268,786	16,370
N.5 Ort.	273,000	269,097	3,903	357,320	15,624
N.7 Ort.	173,000	164,849	8,151	196,823	12,429
N.8 Ort.	173,000	169,191	3,809	292,216	9,129

Yukarıda bahsi geçen  $L_k=0,7 L$  ve  $L_k=L$  mesnetlenme durumlarında değişken boyutsal ölçü ve malzeme kriterlerine göre deney sonuçlarından elde edilen kritik kuvvet değerleri Çizelge 4.35’de belirtilmiştir.

**Çizelge 4. 35.**  $L_k=0,7 L$  ve  $L_k=L$  mesnetlenme durumunda kritik yük değerleri

Numune	$L_k=0,7 L$	$L_k=L$
N.1 Ort.	36087,66	32347,69
N.2 Ort.	33987,39	31280,07
N.3 Ort.	29697,05	30421,30
N.4 Ort.	19091,80	30596,62
N.5 Ort.	16207,58	29307,70
N.6 Ort.	28642,31	28314,86
N.7 Ort.	40670,18	37796,81
N.8 Ort.	30118,75	18345,00



$L_k=0,7 L$  ve  $L_k= L$  mesnetlenme durumlarında cidar kalınlığı, boru profil boyu ve malzemelerin kritik burkulma kuvvetine etkileri Çizelge 4.35'den referans alınarak detaylı şekilde açıklanmıştır.

$L_k=0,7 L$  ve  $L_k= L$  mesnetlenme durumlarında N.1<sub>Ort.</sub> numunelerinin kritik burkulma kuvvetleri sırasıyla 36087 N ve 32347 N olarak elde edilmiştir.

N.2<sub>Ort.</sub> numunesinde cidar kalınlığının 0,5 mm azaltılmasıyla kritik burkulma kuvvetleri sırasıyla 33987 N ve 31280 N olarak elde edilmiştir. N.3<sub>Ort.</sub> numunesinde ise cidar kalınlığının 1 mm azaltılmasıyla kritik burkulma kuvvetleri sırasıyla 29697 N ve 30421 N olarak elde edilmiştir. Boru profil millerinde N.1<sub>Ort.</sub> numunesi, N.2<sub>Ort.</sub> ve N.3<sub>Ort.</sub> numuneleriyle kıyaslandığında cidar kalınlığının azaltılması kritik burkulma kuvvetlerini azalttığı gözlenmiştir.

N.4<sub>Ort.</sub> numunesinde boyun 50 mm artırılmasıyla kritik burkulma kuvvetleri sırasıyla 19091 N ve 30596 N olarak elde edilmiştir. N.5<sub>Ort.</sub> numunesinde ise boyun 100 mm artırılmasıyla 16207 N ve 29307 N olarak elde edilmiştir. Boru profil millerinde N.1<sub>Ort.</sub> numunesi, N.4<sub>Ort.</sub> ve N.5<sub>Ort.</sub> numuneleriyle kıyaslandığında boru boyunun artırılması kritik burkulma kuvvetlerini azalttığı gözlenmiştir.

N.6<sub>Ort.</sub> numunesinde AL 6082 malzemenin kullanılmasıyla kritik burkulma kuvvetleri sırasıyla 28642 N ve 28314 N olarak elde edilmiştir. Boru profil millerinde N.1<sub>Ort.</sub> numunesi, N.6<sub>Ort.</sub> numunesiyle kıyaslandığında malzemenin SAE 304'den AL 6082'e değiştirilmesi kritik burkulma kuvvetini azalttığı gözlenmiştir.

N.7<sub>Ort.</sub> numunesinde SAE 304 malzemedan dış formsuz imal edilen boru profil millerinin kritik burkulma kuvvetleri 40670 N ve 37796 N olarak elde edilmiştir. N.8<sub>Ort.</sub> numunesinde ise AL 6082 malzemedan dış formsuz imal edilen boru profil millerinin kritik burkulma kuvvetleri 30118 N ve 18345 N olarak elde edilmiştir. N.7<sub>Ort.</sub> numunesi, N.8<sub>Ort.</sub> ile kıyaslandığında AL 6082 malzemedan dış formsuz imal edilen numunenin kritik burkulma kuvvetinin daha düşük olduğu gözlenmiştir. Boru profil millerinde N.1<sub>Ort.</sub>

numunesi, N.7<sub>Ort.</sub> numunesiyle kıyaslandığında diş formlarının malzemenin kritik burkulma kuvvetini azalttığı gözlenmiştir.

### 4.3 Rayleigh Oranı Sonuçları

Rayleigh oranına göre elde edilen burkulma denkleminde (bkz. Denklem 3.33)  $L_k=0,7 L$  mesnetlenme durumu için N.8 numunesinin değerleri Matlab programı kullanılarak numerik çözümler elde edilmiştir. Bu çözümler neticesinde uygulanan P yüküne bağlı K polinom kök değerleri elde edilmiş ve K değerleri neticesinde  $P_{kr}$  kuvvet değerleri bulunmuştur. Çizelge 4.36'da bahsedilen farklı kuvvet (P) değerlerinde K yüküne bağlı kritik burkulma kuvvet ( $P_{kritik}$ ) değerleri elde edilmiştir.

**Çizelge 4.36.** P ve K değerlerine bağlı  $P_{kr}$  burkulma yükü

P (N)	K	$P_{kr}$ (N)
1	0,000563	26325
500	0,00125	26313
1000	0,00178	26301
1500	0,00218	26290
2000	0,00251	26279
5000	0,00398	26214
10000	0,00563	26122
20000	0,00796	26003
50000	0,0125	26401

Enerji metodu yöntemlerinden Rayleigh Oranı kullanılarak elde edilen verilerde AL 6082 malzemenin  $P_{kr}$  değer ortalaması 26250 N olarak hesaplanmıştır. Rayleigh Oranı çözümler tekniğiyle elde edilen  $P_{kr}$  çözümler denkleminde değişken P değerleri altında değişken K sabitleri bulunmuş ve bunlara bağlı  $P_{kr}$  burkulma sonuçları elde edilmiştir. Çizelge 4.40'da uygulanan P değerleri doğrultusunda tespit edilen K değerleri gösterilmiş ve teorik çözümler denklemindeki  $P_{kr}$  değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlarda P değerlerinden bağımsız bir şekilde sonuca yakınsadığı gözlemlenmiştir.

## 5. SONUÇ

Bu tez çalışmasında Rayleigh Oranı teorik hesaplaması ve deneysel yöntem kullanılarak bası yüklemesi altındaki boru profil millerinin burkulma davranışları incelenmiştir.

Deneysel yöntem kullanılarak  $L_k=0,7 L$  ve  $L_k=L$  mesnetlenme durumları için SAE 304 ve AL 6082 malzemelerinin farklı geometrilerde kritik burkulma yükleri hesaplanmıştır. Deneysel yöntemler neticesinde farklı mesnetlenme türleri, malzeme, cidar kalınlığı ve boru boyu etkilerinde kritik burkulma yükü davranışları incelenmiştir. Deneysel yöntem sonuçlarından (bkz. Çizelge 4.35) boyutsal kriterler incelendiğinde cidar kalınlığının azaltılması ve boru profil boyunun uzatılması kritik burkulma kuvvetini azalttığı gözlenmiştir. Malzeme kriterleri yönünden incelendiğinde SAE 304 malzemesi AL 6082 malzemesine kıyasla daha yüksek kritik burkulma kuvvetleri elde edilmiştir.

$L_k=0,7 L$  mesnetlenme durumunda AL 6082 malzemesinin deneysel sonuçlarda uygun olduğu düşünülerek Rayleigh Oranı teorik yöntemiyle de kritik yük değeri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlarda normal kuvvet (P) değerinden bağımsız bir şekilde kritik burkulma kuvvet ( $P_{kr}$ ) değerine ulaşıldığı gözlenmiştir. Teorik ve deneysel yöntem kullanılarak hesaplanan AL 6082 malzemesinin kritik burkulma yük karşılaştırmaları yapılmıştır. Rayleigh Oranı kullanılarak teorik  $P_{kr}$  değerleri 26250 N olarak hesaplanmış, deneysel sonuç ise 30118 N olarak elde edilmiştir. Bu iki değer farkı hesaplandığında 3868 N kabul edilebilir düzeyde olduğu söylenebilmektedir.

Yoğunluk-dayanım ilişkisi için malzemelerin kütleleri hesaplanmıştır. N.1 numunesinden imal edilen SAE 304 malzemenin kütlesi 145,5 g ve AL 6082 malzemedan imal edilenin kütlesi ise 49,1 g olarak ölçülmüştür.

Elektrikli silindir eyleyici modelindeki çalışma kuvveti 900 N dur. Çalışma şartları düşünülerek emniyet katsayısı 3 alındığında 2700 N kritik burkulma kuvvetine ihtiyaç duyulmaktadır. Çalışma kapsamında kullanılan SAE 304 ve AL 6082 malzemelerin ihtiyaç duyulan kritik burkulma kuvvetini karşılayabilmektedir.

Sonuç olarak teorik ve deneysel yöntem kullanılarak yapılan hesaplarda kütle kriteri de düşünöldüğünde AL 6082 malzemedен Ø20x2-173-M18x1-M18x1 boyutlarında imal edilen boru profil milinin elektrikli silindir eyleyicide kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

## KAYNAKLAR

- Al-Naib, A., 2019. DC motors. Mosul, Northern Technical University. [https://www.researchgate.net/publication/332835517\\_DC\\_Motors](https://www.researchgate.net/publication/332835517_DC_Motors) (Erişim tarihi: 20.12.2020).
- Anonim, 2016. Kormas DC motors. Kocaeli, Türkiye. <https://kormas.com/urun-katalog-lari/>(Erişim tarihi: 17.02.2021).
- Anonim, 2017. linak, <https://www.linak.com.tr/sektoerel-%C3%A7oezuemler/hastane/tedavi-ve-muayene-i%C3%A7in-koltuk-ve-masalar-hastane/> (Erişim tarihi:20.12.2020)
- Anonim, 2017. <https://selcukuniversitesimalzeme.tr.gg/Spektral-Analiz.htm> (Erişim tarihi: 17.07.2021).
- Anonim, 2017. Linak.<https://www.linak.com.tr/ueruenler/> (Erişim tarihi: 20.12.2020).
- Anonim, 2018. Control and protection of easye-line actuators.<https://www.bansbach.com/index.php/en/products/easye-line/easye/controllers/s1> -(Erişim tarihi: 16.10.2020).
- Anonim, 2018. Burkulma deney föyü.Yıldız teknik üniversitesi.<http://mekanik.mkm.yildiz.edu.tr/deney%20foyleri/Burkulma%20deneyi.pdf>
- Anonim, 2019. Linak history. <https://www.linak.com/about-linak/history/>, (Erişim tarihi: 16.10.2020).
- Akın, Ö. 2016. Akınsoft-Akinrobotics. [https://www.ozgurakin.com.tr/download/3Aktuator\\_ve\\_Aktuator\\_Secimi.pdf](https://www.ozgurakin.com.tr/download/3Aktuator_ve_Aktuator_Secimi.pdf)
- Ayhan, D. 2007. *Çelik kirişlerde yanal burulmalı burkulma analizi*. (Yüksek Lisans Tezi) İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul. <https://polen.itu.edu.tr/xmlui/handle/11527/6548>
- Bakioğlu, M. 2009. Cisimlerin mukavemeti. Beta Yayınevi, İstanbul, 475 s.
- Beer, F. P. 2011. Statics and Mechanics of materials. McGraw-Hill Education. Boston.USA.651 s.
- Bohlooly, M., Mirzavand, B. 2015. Closed form solutions for buckling and postbuckling analysis of imperfect laminated composite plates with piezoelectric actuators. *Composites Part B: Engineering*. 72, 21-29. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.10.049>
- Boldea, I., Nasar, S. A. 1999. Linear electric actuators and generators. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 14(3), 712-717. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=790940>

Durmaz, M. 2011. *Eksantrik yüklü korniyerlerin sonlu elemanlar yöntemiyle geometri ve malzeme bakımından doğrusal olmayan burkulma analizi*.(Doktora tezi).Karadeniz Teknik Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü.

Hao, R., Wang, J., Zhao, J.2013. Adaptive robust control for electric linear actuator using modified LuGre model with fast load-based parameter estimation. Proceedings of the 32nd Chinese Control Conference, 26-28 July 2013, Xi'an, China.

İnan, M. 2018. Cisimlerin mukavemeti. İTÜ Vakfı, İstanbul, 594 s.

Jensen, B., 1983. *Linearmotor*. Denmark Patent: DK497581A. Erişim adresi: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/008138331/publication/DK497581A?q=DK497581A>

Koç, E. 2009. Makina Elemanları Cilt-I, Nobel Yayınları, Adana, 417 s.

Philatenkov, P. I., Morozova, E. V., Morozova, T. S. 2020. Linear actuator modeling. IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, 27-30 January 2020, St. Petersburg and Moscow, Russia.<https://ieeexplore.ieee.org/document/9039171>

Popov, E.P., Çev. Demiray, H. 1990. Mukavemet Katı Cisimlerin Mekaniğine Giriş, Çağlayan Kitabevi, 2. baskı, İstanbul.

Potuk, K. B. 2019. *Eksenel bası yükü altındaki kirişlerin doğrusal olmayan burkulma analizi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Ruiz-Rojas, E. D., Vazquez-Gonzalez, J. L., Alejos-Palomares, R., Escudero-Uribe, A. Z., Mendoza-Vázquez, J. R. 2008. Mathematical model of a linear electric actuator with prosthesis applications. 18th International Conference on Electronics, Communications and Computers (conielecomp 2008),

Sakurai, T. 2015. Buckling characteristics of cylindrical pipes. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 3, 178-185.

Sampaio Jr, J. H., & Hundhausen, J. R. (1998). A mathematical model and analytical solution for buckling of inclined beam-columns. Applied Mathematical Modelling, 22(6), 405-421.

Senthilkumar, M., Rajeev, P., Kodikara, J., & Thusynathan, N. I. (2011, June). Laboratory modelling of pipe-clay seabed interaction in axial direction. In The Twenty-first International Offshore and Polar Engineering Conference. OnePetro.

Şekercioğlu, T. 2015. Makine elemanları: hesap şekillendirme. Birsen Yayınevi, İstanbul, 430 s.

Şekercioğlu, T. 2018. Ölçme tekniği. Birsen Yayınevi, İstanbul, 300 s.

Türkmen, D. 1995. Experimental investigation of the phenomenon of buckling for steel and aluminium struts. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 1(1), 39-43. <http://pajes.pau.edu.tr/en/jvi.aspx?pdire=pajes&plng=eng&un=PAJES-33734>

Yunusov, R., Bayzakov, T., Sattarov, N., Xaliqnazarov, U., Nazarov, O., Dinikulov, D. 2020. Linear electric actuator of a sectional plane shut-off of hydrotechnical structures. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Doi:10.1088/1755-1315/614/1/012017

Zhang, Z., Liu, H., Chen, Z. J. M. 2019. Lateral buckling theory and experimental study on pipe-in-pipe structure. *Metals*, 9(2), 185. Erişim adresi: <https://www.mdpi.com/2075-4701/9/2/185>