

**T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

# **ÇİFT TARAFLI KONİK EZİLME KUTUSU TASARIMI VE NÜMERİK HESAPLAMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Halil KAYAR**

**Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**  
**Enstitü Bilim Dalı : MAKİNE TASARIMI VE İMALAT**  
**Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Gör. Osman Hamdi METE**

**Haziran 2019**

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇİFT TARAFLI KONİK EZİLME KUTUSU TASARIMI  
VE NÜMERİK HESAPLAMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Halil KAYAR**

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ  
Enstitü Bilim Dalı : MAKİNE TASARIM VE İMALAT

Bu tez 14.06.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.

  
Dr. Öğr. Üyesi  
Osman Hamdi METE  
Jüri Başkanı

  
Dr. Öğr. Üyesi  
Yaşar KAHRAMAN  
Üye

  
Dr. Öğr. Üyesi  
Emre ESENER  
Üye

## **BEYAN**

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Halil KAYAR

09.05.2019

## TEŞEKKÜR

İlk başta Lisans ve Yüksek lisans boyunca bana maddi ve manevi desteklerini eksik etmeyen çalışmalarında ve beşeri hayatımda yol gösteren danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Osman Hamdi Mete'ye,

TUBİTAK 1001(Proje Numarası; 115M583) projesinde bana da çalışma fırsatı veren, tecrübe ve birikimlerini paylaşan Prof. Dr. Kenan Genel hocama, projede beraber çalıştığımız Dr. Öğr. Üyesi Yaşar Kahraman ve Arş. Gör. Muhammed Yalçın hocalarıma,

Eğitim öğretim hayatım boyunca her zaman beni destekleyen ailem ve tüm sevdiklerime teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

|                                                   |      |
|---------------------------------------------------|------|
| TEŞEKKÜR.....                                     | i    |
| İÇİNDEKİLER .....                                 | ii   |
| SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....              | iv   |
| ŞEKİLLER LİSTESİ .....                            | v    |
| TABLolar LİSTESİ .....                            | vii  |
| ÖZET.....                                         | viii |
| SUMMARY .....                                     | ix   |
| BÖLÜM 1.                                          |      |
| GİRİŞ .....                                       | 1    |
| BÖLÜM 2.                                          |      |
| ENERJİ ABSORBSİYONU İLE İLGİLİ TANIMLAMALAR ..... | 3    |
| 2.1. Toplam Enerji Absorbsiyonu .....             | 3    |
| 2.2. Maksimum Ezilme Kuvveti.....                 | 5    |
| 2.3. Ortalama Ezilme Kuvveti .....                | 6    |
| 2.4. Özgül Enerji Absorbsiyonu .....              | 6    |
| 2.5. Ezilme Kuvveti Verimi .....                  | 7    |
| BÖLÜM 3.                                          |      |
| EZİLME KUTULARININ DEFORMASYON ÇEŞİTLERİ .....    | 8    |
| 3.1. Lokal Burkulma .....                         | 8    |
| 3.2. Global Burkulma .....                        | 9    |
| 3.3. Katastrofik Hasarlanma .....                 | 10   |

|                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| BÖLÜM 4.                                                                         |    |
| LİTERATÜR TARAMASI .....                                                         | 11 |
| <br>BÖLÜM 5.                                                                     |    |
| EZİLME KUTUSU SONLU ELEMEN MODELİNİN OLUŞTURULMASI .....                         | 14 |
| 5.1. Deneysel Verilerle Sonlu Elemanlar Malzeme Modelinin<br>Oluşturulması ..... | 15 |
| 5.2. Sonlu Eleman Tipi Ve Eleman Ağının Oluşturulması .....                      | 20 |
| 5.3. Sonlu Elemanlar Modelinde Temas Algoritmasının Tanımlanması .....           | 21 |
| 5.4. Sonlu Elemanlar Modelinde Sınır Şartlarının Tanımlanması .....              | 24 |
| <br>BÖLÜM 6.                                                                     |    |
| SONLU ELEMALAR MODELİNİN DOĞRULANMASI .....                                      | 26 |
| <br>BÖLÜM 7.                                                                     |    |
| KONİK EZİLME KUTUSU SONLU ELEMENLER.....                                         | 32 |
| ANALİZLERİ .....                                                                 | 32 |
| 7.1. Tasarım Parametreleri .....                                                 | 32 |
| 7.2. Sonlu Elemanlar Sonuçları .....                                             | 32 |
| <br>BÖLÜM 8.                                                                     |    |
| KARŞILAŞTIRMA VE SONUÇLAR.....                                                   | 37 |
| <br>KAYNAKLAR.....                                                               | 40 |
| ÖZGEÇMİŞ .....                                                                   | 42 |

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

|                 |                                         |
|-----------------|-----------------------------------------|
| $\delta$        | : Eksenel doğrultudaki ezilme miktarı   |
| $\delta_0$      | : Eksenel ezilmenin ilk başladığı konum |
| $\delta_1$      | : Eksenel ezilmenin bittiği konum       |
| $\delta_t$      | : Toplam eksenel ezilme miktarı         |
| $E_{emilen}$    | : Toplam absorbe edilen enerji miktarı  |
| $E_m$           | : Özgül enerji emilimi                  |
| $P$             | : Eksenel doğrultudaki ezilme kuvveti   |
| $P_m$           | : Ortalama ezilme kuvveti               |
| $P_{max}$       | : Maksimum ezilme kuvveti               |
| $\varepsilon_g$ | : Gerçek birim şekil değişimi           |
| $\varepsilon_m$ | : Mühendislik birim şekil değişimi      |
| $\sigma_m$      | : Mühendislik gerilme değeri            |
| $\sigma_g$      | : Gerçek gerilme değeri                 |
| $\sigma_y$      | : Akma gerilmesi                        |
| $E$             | : Elastik modül                         |
| $L$             | : Ezilme kutusu uzunluğu                |
| $m$             | : Ezilme kutusunun kütlesi              |
| $t$             | : Et kalınlığı                          |
| $\alpha$        | : Koniklik derecesi                     |
| $\rho$          | : Malzeme yoğunluğu                     |
| $\nu$           | : Poisson oranı                         |

## ŞEKİLLER LİSTESİ

|             |                                                                                         |    |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1.  | Genel bir ezilme kutusu kuvvet-yer değişimi grafiği.....                                | 4  |
| Şekil 2.2.  | Eksenel ezilmenin başlangıcı ve bitişini gösteren sonlu eleman modeli .....             | 5  |
| Şekil 3.1.  | Lokal burkulmanın gözlemlendiği ezilme kutularının görseli .....                        | 8  |
| Şekil 3.2.  | Homojen lokal burkulma gözlenen bir ezilme kutusu .....                                 | 9  |
| Şekil 3.3.  | Global burkulmaya uğramış profil görseli .....                                          | 9  |
| Şekil 3.4.  | Katastrofik hasarlanmaya uğramış bir enerji yutucu.....                                 | 10 |
| Şekil 4.1.  | Ezilme kutusu, (a) konstrüksiyondaki yeri (b) çarpışma sonrası oluşan Deformasyon ..... | 11 |
| Şekil 4.2.  | Alüminyum 6060 tüplerin katlanma modları .....                                          | 13 |
| Şekil 5.1.  | Ezilme kutusu için kurgulanan sonlu elemanlar modeli .....                              | 15 |
| Şekil 5.2.  | (a) Numune sıkıştırma aparatı (b) Numunenin çenelere yerleştirilmesi .....              | 15 |
| Şekil 5.3.  | Malzeme çekme deneyi cihazı .....                                                       | 16 |
| Şekil 5.4.  | Alüminyum 6063-T5 malzemesi gerilme-birim şekil değişimi grafiği .....                  | 17 |
| Şekil 5.5.  | *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY malzeme kartı.....                                     | 18 |
| Şekil 5.6.  | Üst tabla *MAT_RIJID malzeme kartı .....                                                | 19 |
| Şekil 5.7.  | Alt tabla *MAT_RIJID malzeme kartı.....                                                 | 19 |
| Şekil 5.6.  | Sonlu elamanlar ağı oluşturulmuş ezilme kutuları.....                                   | 20 |
| Şekil 5.7.  | Belytschko-Tsay kabuk eleman ve koordinat sistemi .....                                 | 20 |
| Şekil 5.8.  | *SECTION_SHELL kesit tanımlama kartı.....                                               | 21 |
| Şekil 5.9.  | *CONTACT_AUTOMATIC_NODES_TO_SURFACE üst tabla ile tüp arasındaki kontak kartı .....     | 22 |
| Şekil 5.10. | *CONTACT_AUTOMATIC_NODES_TO_SURFACE alt tabla ile tüp arasındaki kontak kartı .....     | 23 |



|                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 5.11. *CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE _TO_SURFACE tüpün kendi elemanları arasındaki kontak kartı .....                | 23 |
| Şekil 5.12. *BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIJIT sınır şartı tanımlanma kartı.....                                        | 24 |
| Şekil 6.1. a) Deneysel düzeneği b)kurgulanan model c) hazırlanan sonlu eleman modeli .....                             | 26 |
| Şekil.6.2. Deneysel numunelerin kuvvet-yer değişimi grafikleri (Ø40mm-L=82mm ve t=1mm) .....                           | 27 |
| Şekil 6.3. Farklı ezilme miktarlarında 40 mm çaplı tüpün absorbe ettiği enerji ve oluşan deformasyon görüntüleri ..... | 27 |
| Şekil 6.4. Enerji-eleman sayısı grafiği .....                                                                          | 28 |
| Şekil 6.5. Sonlu elemanlar modelinin kuvvet-yer değişimi eğrisi.....                                                   | 29 |
| Şekil 6.6. Ezilme kutusunun sonlu elemanlar ve deneysel görsellerinin Karşılaştırılması .....                          | 29 |
| Şekil 6.7. Deneysel ve sonlu elemanlar modeli sonuçlarının kuvvet-yer değişimi eğrileri .....                          | 30 |
| Şekil 6.8. a)Deneysel numunenin ve b)Sonlu elemanlar modelinin kesiti.....                                             | 31 |
| Şekil 7.1. Dairesel konik ezilme kutusunu tasarım parametreleri .....                                                  | 32 |
| Şekil 7.2. Düz tüp(0°) ile 10° koniklikteki tüpün a) eksenel ezilme miktarları ve b)ezilme görünüşleri .....           | 33 |
| Şekil 7.3. Düz tüp ve 10° konikliğe sahip ezilme kutularının kuvvet-yer değiştirme grafiği .....                       | 34 |
| Şekil 7.4. Çift taraflı konik ezilme kutusu tasarımı.....                                                              | 35 |
| Şekil 7.5. Çift taraflı konik ezilme kutusu ezilme görünüşleri .....                                                   | 36 |
| Şekil 7.6. Çift taraflı konik ezilme kutusu kuvvet-yer değişimi grafiği.....                                           | 36 |
| Şekil 8.1. Absorbe edilen enerji-koniklik derecesi ve özgül enerji emilimi-koniklik derecesi grafikleri.....           | 37 |
| Şekil 8.2. Düz tüp ile 10°konik tüpe ait kuvvet-yer değişim grafiğinde ezilme miktarı detayı .....                     | 38 |
| Şekil 8.3. Çift taraflı konik ezilme kutusunu oluşturan tüplerin grafik üzerinde katlanma başlangıç ve bitişleri ..... | 39 |

## TABLÖLAR LİSTESİ

|                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablo 5.1. Al 6063-T5 malzemesinin mekanik özellikleri.....                                  | 18 |
| Tablo 5.2. Al 6063-T5 malzemesinin plastik bölge gerilme-birim şekil Değişimi Verileri ..... | 18 |
| Tablo 6.1. 40 mm çapa sahip tüpün SE ve Deney sonuçları karşılaştırması.....                 | 30 |
| Tablo 7.1. Ezilme kutularının ezilme miktarları .....                                        | 33 |
| Tablo 7.2. Ezilme kutularının enerji absorpsiyonu performans parametre değerleri .....       | 35 |

## ÖZET

Anahtar kelimeler:Ezilme kutusu,koniklik derecesi,enerji absorbsiyonu,sonlu elemanlar methodu,çift taraflı konik ezilme kutusu

Son zamanlarda artan nüfus ve araç sayısı sonucunda trafik kazalarında artmaktadır.Trafik kazalarının azalması ve kaza sonucu can kaybını önlemek için günümüzde kullandığımız araçlarda aktif ve pasif güvenlik sistemleri kullanılmaktadır.Pasif güvenlik sistemlerinden bir tanesi ezilme kutusudur. Çarpışma esnasında oluşan enerjiyi kendi üzerinde plastik deformasyona uğrayarak absorbe etmektedir. Absorbe edilen enerji can ve mal kaybını azaltmaktadır. Günümüzde ezilme kutuları daha fazla enerji absorbe edilebilmesi için çalışmalar devam etmektedir. Genellikle enerji absorbe etme yeteneği yüksek, hafif ve imal edilebilirliği kolay olan ince cidarlı yapılar kullanılmaktadır.

Bu çalışmada ince cidarlı konik tüplerin, koniklik derecesinin değişmesi eksenel ezilme davranışına etkileri ve enerji absorbe etme yeteneklerine olan etkileri sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Yapılan sonlu elemanlar modeli deneysel çalışmalar ile desteklenmiştir. Konik tüplerin ortalama ezilme kuvveti,absorbe edilen toplam enerji miktarı ve özgül enerji absorbsiyonu değerlerine göre ezilme performansları karşılaştırılmıştır. Konik ezilme kutularında enerji absorbsiyon yeteneği en iyi olan ezilme kutusu  $10^\circ$  koniklik derecesine sahip ezilme kutusu olduğu gözlemlenmiştir.

$10^\circ$  konik ve düz tüpten oluşan farklı kalınlıklarda çift taraflı konik ezilme kutusu tasarımı yapılmıştır. Yapılan çift taraflı konik ezilme kutusu sonlu eleman yöntemiyle incelenmiştir.

# **DOUBLE-SIDED CONICAL CRUSH BOX DESIGN AND NUMERICAL CALCULATION**

## **SUMMARY**

Keywords: Crash box, Degree of taper, Energy absorption, Finite element method, double-sided conical crush box

Traffic accidents are increasing as a result of the increasing number of vehicles and population in recent years. Active and passive safety systems are used in the vehicles we use today to reduce traffic accidents and prevent casualties. One of the Passive Security Systems is the crush box (crashworthiness). it absorbs the energy generated during the crash by plastic deformation on itself. Absorbed energy reduces loss of life and property. Today, crush boxes are continuing to work to absorb more energy. Generally, thin-walled structures with high energy absorbability, light weight and easy to manufacture are used.

In this study, thin-walled conical tubes, the axial crushing behavior and energy effects of changing the degree of taper on their ability to absorb the effects were investigated by the finite element method. Finite element model is supported by experimental studies. The crushing performances of the conical tubes according to their average crushing force, total energy absorption and specific energy absorption values were compared. In conical crush boxes, it has been observed that the crush box with  $10^\circ$  conical degree is the one with the best energy absorption ability.

A double-sided conical crush box design with different thicknesses of  $10^\circ$  cone and flat tube is designed. The double-sided conical crush box was examined by finite element method

## BÖLÜM 1. GİRİŞ

Günümüzde yaşanan trafik kazalarında sürücü ve yolcuların can güvenliğinin sağlanması için gelişen teknolojiyle beraber çeşitli güvenlik önlemleri geliştirilmiştir. Güvenlik önlemi denildiğinde bu durum iki başlıkta incelenmektedir. İlk olarak kaza olmadan kazayı önlemek için alınan güvenlik sistemlerini içeren aktif güvenlik sistemleri yer almaktadır.

ABS (Kilitleme Önleyici Sistem), ESP (Elektronik Denge Programı), ASR (Anti-Patinaj Sistemi), EBD (elektronik fren dağılım sistemi) gibi araç frenleme sistemleri aracın çeşitli yol ve hava koşullarında güvenli seyir edilebilmesinde sürücüye yardımcı olmaktadır. Bu tür sürücüye yardımcı olan sistemler aktif güvenlik sistemlerine girmektedir [1].

Araçta bulunan sensörler vasıtasıyla sürücüyü sürüş esnasında uyaran sistemlere aktif güvenlik sistemlerine girmektedir. Aracın hızının seyredilmekte olan yoldaki hız limitini aşıp aşmadığını kontrol edip sürücüyü uyaran ya da otomatik olarak öndeki araca göre takip mesafesini ve hızını ayarlayan akıllı hız kontrol sistemleri (intelligent speed adaptation/intelligent speed advice), şerit ihlali uyarı sistemi (lane departure warning system), kör noktada bulunan ve sürücü tarafından görülemeyecek araçların saptanarak sürücünün ikaz edildiği kör nokta algılama sistemi (blind spot detection), sürücünün seyir halinde iken dikkatinin dağılması uyuması durumunda uyarıldığı sürücü uyku algılama sistemi(driver drowsiness detection) ve araçta bulunan geri görüş kamerası,gece görüş sistemleride aktif güvenlik sistemlerine girmektedir [1].

İkinci olarak aktif güvenlik sistemlerinin başarısız olduğu, kazanın meydana gelmesinin kaçınılmaz olduğu zaman diğer bir deyişle kaza anında devreye giren,

can ve mal güvenliğini arttıran pasif güvenlik sistemleridir. Pasif güvenlik sistemleri kaza anında devreye girerek insan sağığı anlamında yol açacağı hasarları önlemek ya da mümkün olduğu kadar aza indirmek işlevlerini yerine getirmesi amaçlanan sistemlerdir. Pasif güvenlik sistemleri arasında çarpışma anında şişerek sürücü ya da yolcunun araç içerisindeki parçalara çarparak yaralanmasını engelleyen hava yastıkları, araç içerisindeki sürücü ve yolcuların hareketini sınırlayarak araç içerisinde savrulmasını ve çarpışmanın etkilerini azaltan emniyet kemeri, çarpışma esnasında parçalanmayarak araç içerisindeki insanların cam parçaları ile yaralanmasını engelleyen havalı ön cam bulunmaktadır. Aracın ön ve arka tarafında bulunan enerji yutucular ezilme kutuları da pasif güvenlik yöntemlerine girmektedir.

Teziminde konusu olan ezilme kutuları çarpışma esnasında çarpışma enerjisini üzerinde sönümleyerek araç içerisindeki sürücü ve yolculara iletilecek çarpışma enerjisini azaltır yada çarpışma durumuna göre enerjinin tamamını absorbe eder. Çarpışma esnasında oluşan enerjinin ezilme kutusu tarafından absorbe edilmesi sürücü ve yolcuların hayatta kalma olasılığını artırır.

Ezilme kutusu dayanımı, bağlı olduğu şasinin dayanımından yüksek olmamalıdır. Ezilme kutusunun dayanımı, şasi dayanımından fazla olması durumunda çarpışmada şasi ezilme kutusundan önce hasarlanır bu istenmeyen bir durumdur. Bunun yanında absorbe edilemeyen çarpışma enerjisi sürücü ve yolculara zarar verir. Ezilme kutusunun amacı araç içerisindeki sürücü ve yolcuların çarpışma enerjisinden minimum etkilenmeleri ve şasiyi hasara uğratmadan çarpışma enerjisini kendi üzerinde sönümlemesidir.

## **BÖLÜM 2. ENERJİ ABSORBSİYONU İLE İLGİLİ TANIMLAMALAR**

Ezilme kutusunun çarpışma esnasında olabildiğince fazla enerji absorbe etmesi istenir. Fakat ezilme kutusunun çarpışma enerjisi karşısında sergilediği performansı belirlemek için toplam absorbe edilen enerji miktarı tek başına yeterli değildir.

Enerji miktarının yanında birden fazla parametre göz önünde bulundurulmalıdır. Ezilme kutusu çarpışma enerjisini absorbe ederken ezilme esnasındaki kuvvetlerin, şasinin yada bağlı olduğu konstrüksiyonun hasarlanma kuvvetini geçmemelidir. Ezilme kutusunun bağlı olduğu şasi ve konstrüksiyonun dayanımından yüksek ezilme kuvvetlerine çıkması, ezilme kutusu çalışma prensibine aykırı ve istenmeyen bir durumdur.

Bunun yanında ezilme kutusunun ağırlığı ile absorbe ettiği enerji arasındaki ilişki özgül enerji emilimi, ezilme başlangıcı ile bitişine kadar olan ezilme kuvvetlerinin ortalaması olan ortalama ezilme kuvveti ve Ortalama ezilme kuvvetinin maksimum ezilme kuvvetine oranı yani ezilme kuvveti verimi gibi özellikler kaza kutusu tasarımında ürün performansını belirleyen özelliklerdir.

### **2.1. Toplam Enerji Absorbsiyonu**

Ezime kutusunun ezilme başlama anından tamamiyle ezilene kadar geçen sürede absorbe ettiği enerji miktarına toplam enerji absorbsiyonu denmektedir. Diğer bir deyişle ezilme kuvvetinin yaptığı toplam iş şeklinde tanımlanabilir.

Toplam enerji absorbsiyonu (J) iş formülünden kuvvet ile yolun çarpımından bulunabilir. Literatürde geçen, Denklem 2.1 aşağıda verilmektedir [2].

$$E_{emilen} = \int P d\delta \quad (2.1)$$

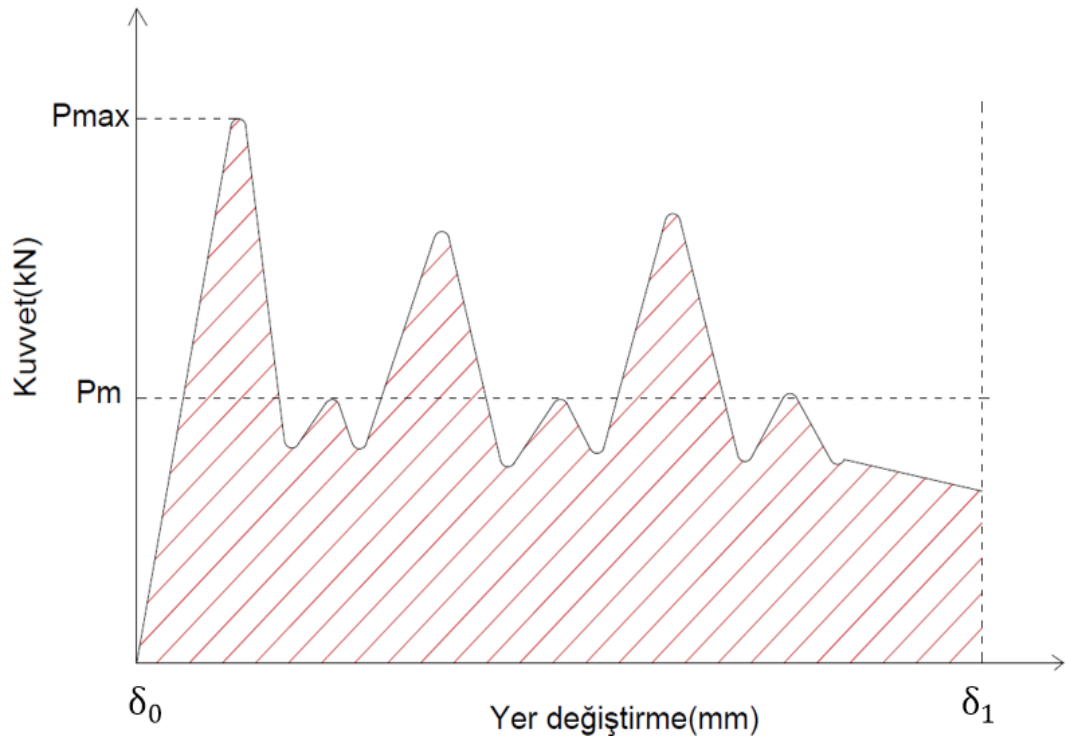
Burada geçen denklem parametreleri;

$E_{emilen}$  = Toplam absorbe edilen enerji miktarı (J)

P = Eksenel doğrultudaki ezilme kuvveti (kN)

$\delta$  = Eksenel doğrultudaki ezilme miktarı(mm)

Toplam enerji absorpsiyonu, ezilen bir enerji yutucunun kuvvet-yerdeğişimi eğrisinin altında kalan alan olarakta hesaplanmaktadır. Şekil 2.1.'de verilen Kuvvet-Yer değişimi grafiğinin altında kalan alan toplam alan absorbe edilen enerjiyi temsil etmektedir.



Şekil 2.1. Genel bir ezilme kutusu kuvvet-yer değişimi grafiği

Denklem 2.1'i geliştirerek Denklem 2.2'yi üretebiliriz. Geliştirilen denklemde kuvvet-yer değişimi grafiğinin altında kalan alanın integralini alarak toplam enerji absorpsiyonunu(emilimini) bulabiliriz [3] [4].



$$E_{emilen} = \int_{\delta_0}^{\delta_1} P d\delta = P_m(\delta_1 - \delta_0) = P_m \delta_t \quad (2.2)$$

Burada geçen denklem parametreleri;

$P_m$ =Ortalama ezilme kuvveti (kN)

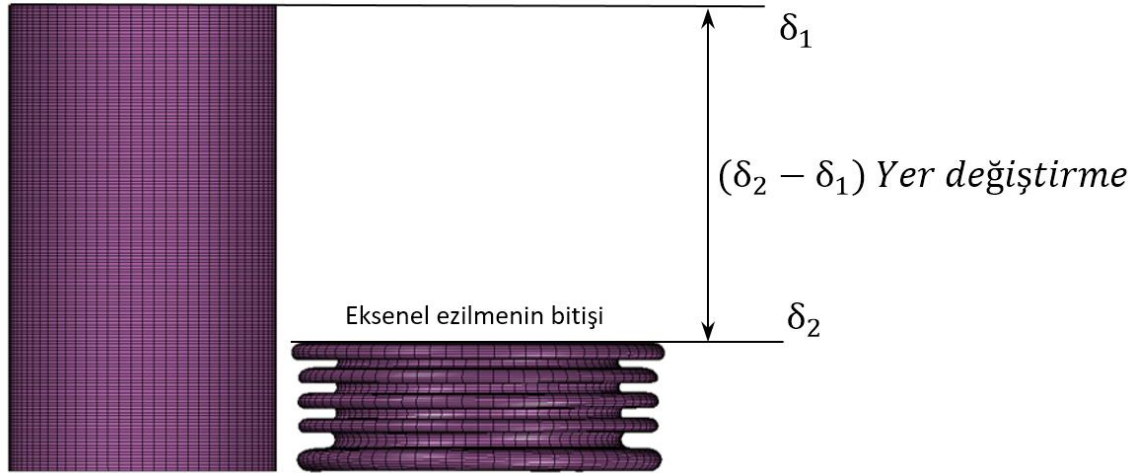
$\delta_0$ =Ezilmenin ilk başladığı konum (mm)

$\delta_1$ =Ezilmenin bittiği konum (mm)

$\delta_t$ =Toplam eksenel ezilme miktarı(Yerdeğiştirme Miktarı) (mm)

Denklemden geçen toplam eksenel ezilme miktarı ezilmenin başladığı konum ile bittiği konum arasındaki yer değiştirme miktarıdır. Şekil 2.2.'de gösterildiği gibi ezilmenin başladığı ve bittiği konumları verilen bir ezilme kutusu modeli gösterilmektedir.

Eksenel ezilmenin başlangıcı



Şekil 2.2. Eksenel ezilmenin başlangıcı ve bitişini gösteren sonlu eleman modeli

## 2.2. Maksimum Ezilme Kuvveti

Ezilme kutularının deformasyonu sırasındaki maksimum kuvvet değerine maksimum ezilme kuvveti ( $P_{maks}$ (kN)) denir. Şekil 2.1.'deki grafikte belirtilmiştir. Maksimum ezilme kuvveti genel olarak çok yüksek değerlerde olması istenmez. Bunun nedeni ezilme kutusunun etkileşimde olduğu diğer parçaların

elastik dayanım sınırının üstüne çıkmamasının istenmesidir. Maksimum ezime kuvveti genel olarak ezilme kutusunun ezilmeye başladığı ilk katlanma oluşumu sırasında meydana gelmektedir. Bu bilgi tüm ezilme kutusu tasarımları için geçerli olamamakla beraber maksimum ezilme kuvvetini azaltarak ezilme veriminin yükselmesi için çeşitli tetikleme veya katlanma yönlendirme işlemleri uygulamalar yapılmaktadır.

### 2.3. Ortalama Ezilme Kuvveti

Toplam enerji absorpsiyonunun ( $E_{emilen}$ ) eksenel deformasyon miktarına ( $\delta_1 - \delta_0$ ) bölünmesi sonucu ortalama ezilme kuvveti bulunmaktadır. Denklem 2.3’de matematiksel ifadesi verilmiştir. Ortalam ezilme kuvveti ezilme kuvveti Şekil 2.1.’de görüldüğü gibi eksenel ezilme boyunca sabit bir değerdir. Bu değer hesaplanması ezilme kutusunun hangi deplasmanda ne kadar enerji absorbe ettiğinin hesabını kolaylaştırmak ve diğer bir ezilme kutusu performans parametresi olan ezilme verimliliği değerinin hesaplanarak daha ideal bir tasarım yapılmasına imkan tanımaktadır [2].

$$P_m = \frac{E_{emilen}}{\delta_1 - \delta_0} \quad (2.3)$$

### 2.4. Özgül Enerji Absorpsiyonu

Ezilme kutusu tasarımındaki en önemli performans kriterlerinden bir tanesi özgül enerji emilimi değeridir. Özgül enerji emilimi absorbe edilen toplam enerjinin ezilme kutusunun kütlesine bölünerek bulunur. Denklem 2.4’te matematiksel ifadesi verilmektedir. Özgül enerji veriminin birimi kJ/kg yada J/gr olarak literatürde geçmektedir [1] [5].

$$E_m = \frac{E_{emilen}}{m} \quad (2.4)$$

Burada;

$E_m$ =Özgöl enerji emilimi(J/gr)(kJ/kg)

m=Ezilme kutusunun kütlesi(gr)(kg)

Ezilme kutusunun kütlesi araç tasarımında önemli bir kriter olabilir. Geçmişten günümüze otomobillerin ağırlığı günden güne azalmaktadır. Azalan otomobil ağırlığı ile yakıt ve malzeme tasarrufu yapılmaktadır. Bu yüzden ağırlık optimizasyonunu önemli olduğu araçlarda kullanılan ezilme kutusunun kütlesi ve özgöl enerji emilimi değeri daha da önem kazanmaktadır. Tren,otobüs,kamyon gibi ağırlığı fazla olan araçlarda ezilme kutusunun ağırlığından çok çarpışmada absorbe ettiği enerji miktarı daha önemlidir.

## 2.5. Ezilme Kuvveti Verimi

Ezilme kuvveti verimi, ortalama ezilme kuvveti ile maksimum ezilme kuvvetinin birbirine oranı ile bulunmaktadır. Denklem 2.5'te ilgili matematiksel denklem verilmektedir. Ezilme kutusunun ezilme kuvveti verimi, ortalama ezilme kuvveti ile maksimum ezilme kuvvetinin birbirine yaklaşmasıyla artmaktadır. Ezilme kuvveti verimide tek başına bakıldığında birşey ifade etmemekle beraber diğer performans parametreleriyle beraber değerlendirilmesi gerekmektedir. Ezilme kuvveti verimini maksimum olması için maksimum ezilme kuvvetinin ortalama ezilme kuvvetine eşit olması gerekir [2].

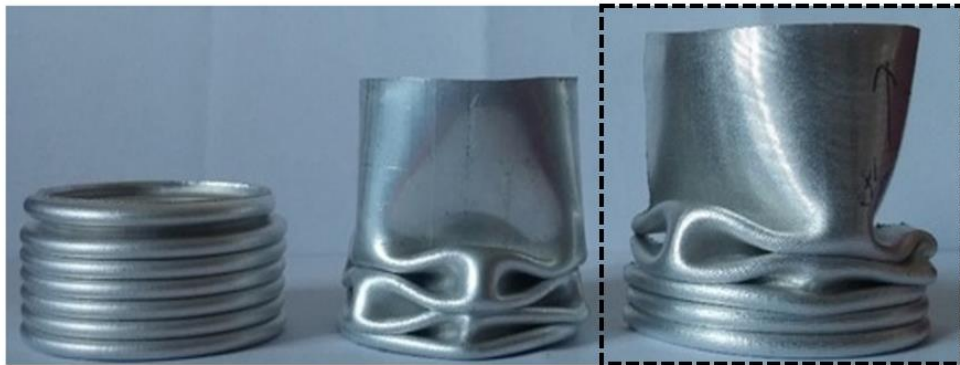
$$Ezilme\ kuvveti\ verimi = \frac{P_m}{P_{max}} \quad (2.5)$$

## BÖLÜM 3. EZİLME KUTULARININ DEFORMASYON ÇEŞİTLERİ

Genel olarak çarpışma sırasında ezilme kutularında farklı deformasyon şekilleri görülmektedir. Bu deformasyon çeşitleri lokal burkulma, global burkulma ve katastrofik hasar olmak üzere üç çeşit olarak incelenebilir [1] [4].

### 3.1. Lokal Burkulma

Ezilme kutularında en çok görülen deformasyon biçimlerinden biri lokal burkulmadır. Eksenel ezilme sonucu lokal burkulma bir ezilme kutusunda deformasyon bölgesel olarak gerçekleştirildiği görülmektedir. Bu bölgesel deformasyon belirli periyotlarla tam deformasyon gerçekleşene kadar yani maksimum ezilme noktasına gelene devam eder. Şekil 3.1.'de lokal burkulmanın gözlemlendiği ezilme kutularının görseli verilmiştir. Bu görselde görüldüğü üzere (dikdörtgen içindeki ezilme kutusu) lokal burkulma her zaman homojen olarak devam etmeyebilir. Lokal burkulma şekil değiştirebilir.



Şekil 3.1. Lokal burkulmanın gözlemlendiği ezilme kutularının görseli [7]

Bu lokal burkulma homojen olarak gerçekleşiyor ise belirli aralıklarla birbirini tekrarlamaktadır. Buda Şekil 3.2.'de homojen katlanan bir ezilme kutusu ve katlanma aşamaları verilmektedir.



Şekil 3.2. Homojen lokal burkulma gözlenen bir ezilme kutusu [7]

### 3.2. Global Burkulma

Ezilme kutusunun üzerine gelen eksenel kuvvetler eksenel ezilme ve eğilme momenti oluşturmaktadır. Eksenel kuvvetler sonucunda oluşan eğilme momentinin yüksek olması ezilme kutusunun eksenel yönde ezilmesini engelleyerek global burkulmaya neden olur. Şekil 3.3.'te global burkulmaya uğrayan bir ezilme kutusu verilmiştir. Global burkulmaya Euler burkulması da denmektedir.



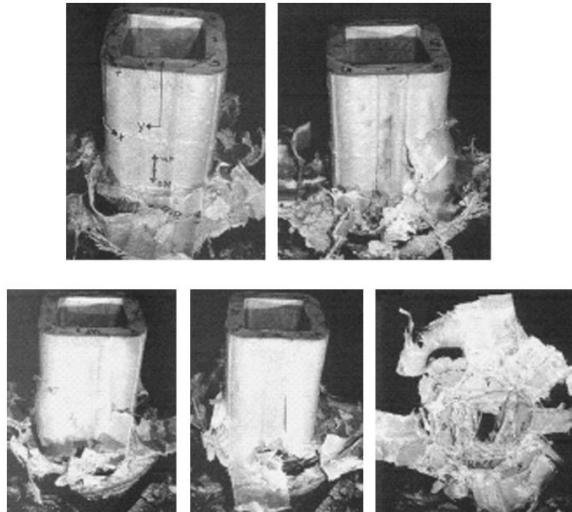
Şekil 3.3. Global burkulmaya uğramış profil görseli [1]

Global burkulma ezilme kutuları için istenilen bir durum değildir. Global burkulmada eksenel ezilme olmadığından ötürü ezilme performansı düşüktür. Global

burkulmada ilk burkulma gerçekleşene kadar kuvvet artar ve burkulma gerçekleştiğinde eksenel olarak taşıyabileceği kuvvetler hızlı bir şekilde düşer. Toplam absorbe edilen enerji miktarı Kuvvet-Yer değiştirme eğrisinin altında kalan alan olarak tanımlamıştık. Bu durumda ani kuvvet artışı ve ardından hızlı bir düşüş gösteren davranışta eğrinin altında kalan alan azalmaktadır. Bu durumda Global burkulmaya uğrayan ezilme kutularının enerji absorbe etmeye uygun olmadığına bir göstergesidir [3].

### 3.3. Katastrofik Hasarlanma

Cam elyaf ve onun türevi kompozit yapıların kuvvetler altında gösterdiği deformasyon biçimine katastrofik hasarlanma denmektedir. Bu tür ezilme kutuları eksenel ezilme kuvvetine kendini parçalara ayırarak karşı koymaktadır. Bu parçalanma enerjisi aynı zamanda absorbe edilen toplam enerjide denktir. Katastrofik hasarlanan malzemeler lokal burkulan malzemelere takviye olarak kullanılmaktadır. Şekil 3.4.'te katastrofik hasarlanmaya uğramış bir ezilme kutusu verilmiştir. Takviyeli (kompozit) ezilme kutularının ezilme performansı gün geçtikçe gelişmektedir [6].

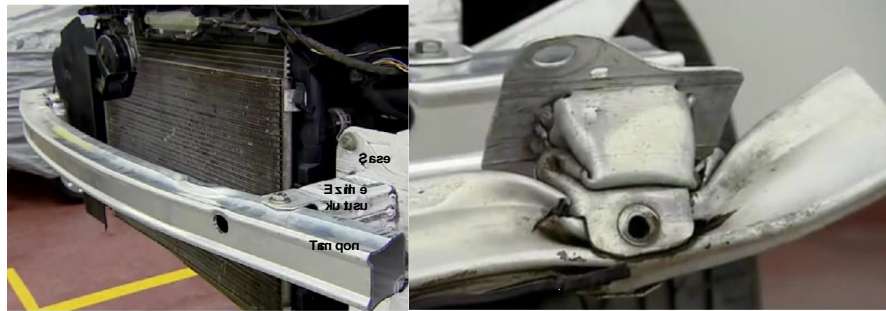


Şekil 3.4. Katastrofik hasarlanmaya uğramış bir enerji yutucu [6]

## BÖLÜM 4. LİTERATÜR TARAMASI

Kazalarda sürücü ve yolcuların güvenliğinin sağlanması birinci öncelikte yer almakta ve uluslararası çarpışma testleriyle de bu konunun önemi gün geçtikçe artmaktadır. Hayati kayıpların ve yaralanmaların minimize edilmesinde pasif güvenlik sistemleri (ezilme kutusu) çarpışma anında sergiledikleri performans (absorbe edilen ezilme enerjisi) oldukça önemlidir. Ezilme kutuları pasif koruma amaçlı kullanılan yapılardan birisi olup, absorbe edilen enerji, parçanın geometrik özelliklerinin yanı sıra kullanılan malzeme özellikleriyle doğrudan ilişkilidir. Çarpışma esnasında korunması gereken yapıya en düşük oranda kuvvetin iletilmesi için, çarpışma enerjisinin ezilme kutusunda absorbe edilmesi esastır.

Dolayısıyla absorbe edilen enerji değerini artırıcı yönde etkiye sahip özel imalat yöntemi, özel tasarım ya da yeni bir teknolojik uygulama araca ait yaşam güvenliğini doğrudan katkı sunacaktır. Dairesel ya da prizmatik geometriye sahip ezilme kutularında enerji absorbe etme verimliliğini arttırmak amacıyla genelde ince cidarlı parçalardan yararlanılmaktadır. Bu parçaların (ince cidarlı yapıların) eksenel yükler altındaki deformasyon davranışı oldukça ilgi çekici olup, çarpışma enerjisi cidarın düzgün bir şekilde birbiri üstüne katlanması sırasında harcanmaktadır. Bu durum Şekil 4.1.'deki görselde verilmektedir.



Şekil 4.1. Ezilme kutusu, (a) konstrüksiyondaki yeri (b) çarpışma sonrası oluşan deformasyon [7]

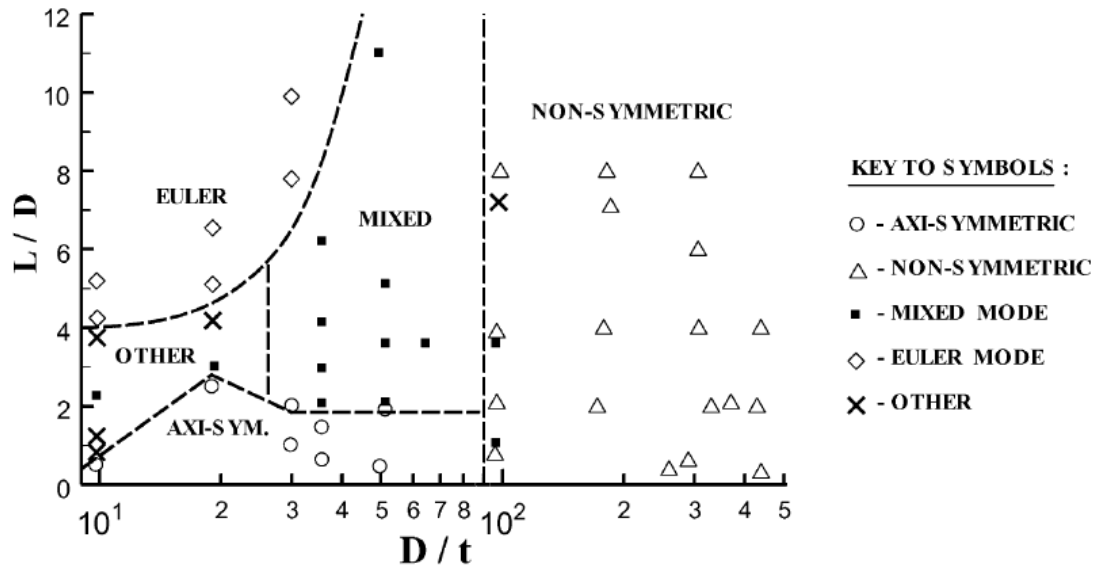
İdeal bir ezilme kutusunda beklenen özellikler aşağıda verilmektedir:

- Çarpışma sırasında bağlı olduğu yapıya zarar vermemesi için, ezilme kutusu için gerekli deformasyon kuvvetlerinin yapı dayanım kuvvetlerinden yüksek olmamalıdır.
- Eksenel ezilme esnasında absorbe edilen toplam enerjinin, ezilme miktarı değerine oranlanmasıyla belirlenen ortalama ezilme kuvvetinin ( $P_m$ ) başlangıçta nispeten düşük, ancak eksenel ezilme ilerlemesiyle artan karakterde olmalıdır.
- Deformasyonun kontrollü bir şekilde gerçekleştiği bir yapı tasarlanmalıdır.
- Yapı basit, düşük maliyetli, hafif, küçük hacimli ve değişimi kolay olmalıdır.
- Özgül enerji verimi diye adlandırılan ezilme kutusunun absorbe ettiği enerjinin kendi kütlesine oranıyla elde edilen değer yüksek olması istenmektedir.

İnce cidarlı yapıların kullanıldığı ezilme kutularında, parçanın enerji absorbe etme kapasitesi temel olarak tüp geometrisi ve ebatları, şekli ve yükleme türüne ait parametrelerle doğrudan ilişkilidir [8]. T.Wierzbicki ve W. Abramowicz yaptıkları çalışmalarda, dairesel kesitli, kare kesitli ve çok köşeli ince cidarlı yapıların eksenel zorlanma altındaki kuvvet ve absorbe edilen enerji değerlerindeki değişimi ve de parçaların deformasyon davranışlarını detaylı olarak incelemişlerdir.

S.R. Guillow ve G. Lu ince cidarlı alüminyum tüplerin boy/çap ve çap / et kalınlığı değerlerine göre katlanma biçimlerini grafiğe dökmüşlerdir. Ayrıca katlanma boyları ve ortalama ezilme kuvvetleri ile ilgili ampirik ifadeler geliştirmişlerdir. Şekil 4.2.'de yaptıkları deneysel çalışmaların sonuçlarını grafiğe dökmüşlerdir [9].





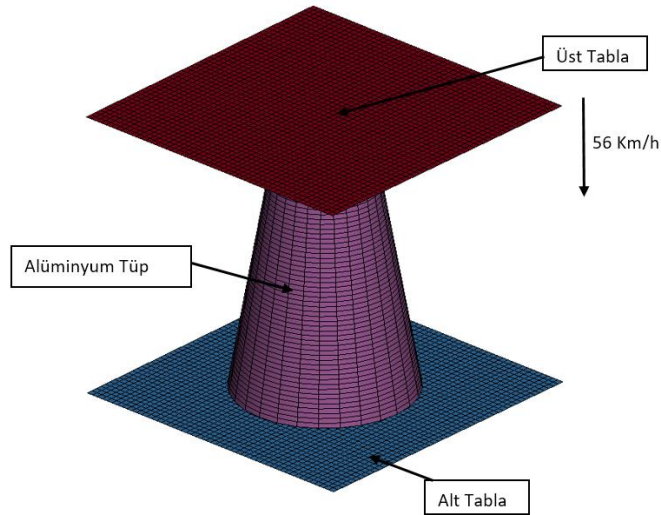
Şekil 4.2. Alüminyum 6060 tüplerin katlanma modları [9]

Eksenel ezilme sırasında ezilme kutusunun global burkulması istenmez. Jensey ve Langseth tüplerin global ve lokal burkulmalarını incelemişlerdir. Bu inceleme sonucunda Lokal burkularak katlanan ezilme kutularının global burkulma ile katlanan ezilme kutularına göre daha çok enerji absorbe ettiğini gözlemlemişlerdir [10]. Nagel ve Thambiratnam konik ezilme kutularının düz ezilme kutularına göre global burkulmaya daha dayanıklı olduğunu gözlemlemişlerdir. Bunun yanında farklı bir makalesinde konik ezilme kutularında koniklik derecesi ve et kalınlığının enerji absorpsiyonuna olan etkisini araştırmışlardır. Yapılan 7,5° koniklikte ki dikdörtgen tüpün düz tüpe göre daha fazla enerji absorbe ettiği görülmüştür [11] [12].

## **BÖLÜM 5. EZİLME KUTUSU SONLU ELEMAN MODELİNİN OLUŞTURULMASI**

Tezde yapılan sonlu elemanlar analizlerin oluşturulur iken Livermore Software Technology Corporation adlı firmanın Ls-Prepost programından yararlanıldı. Ls-Prepost programında ezilme kutularının sonlu eleman modeli oluşturuldu. Oluşturulan modeli de yine aynı firmanın nonlinear problemleri çözmede rüştünü kanıtlamış olan Ls-Dyna Expilicite Dynamic çözücüsü tarafından yapılmıştır. Bir problemin sonlu elemanlar modeli oluşturulurken gerçekteki kurgudan uzaklaşmadan sistemi en doğru parametrelerle tanımlanması gereklidir. Problemin tanımlanmasında bazı kabuller alınması gereklidir. Alınan bu kabuller ve problem verileri ne kadar gerçeğe yakınsa alınacak sonuçlarda gerçek sonuçlara o kadar yakınsayacaktır.

Üç boyutlu uzayda kartezyen koordinat sisteminin üç eksen ve altı serbestlik derecesi bulunmaktadır. Bu eksenler sırasıyla x ekseni, y ekseni ve z eksenidir. Bu eksenlerin her birinde iki adet serbestlik derecesine sahiptir. Bu serbestlikler öteleme ve dönme hareketi şeklindedir. Bu bölümde sonlu elemanlar modelimizi nasıl oluşturulacağı anlatılmaktadır. Modelimiz üç parçadan oluşmaktadır. Bu parçaların isimleri sırasıyla Üst Tabla,Tüp ve Alt tabla şeklinde sıralanmaktadır. Alt tabla, altı serbestlikte kitlenmiş bir parça olup Tüp parçasına alt tarafından destek olan parçadır. Tüp, serbestlik derecesi altı olan deformasyona uğrayan iş parçasıdır. Üst tabla ise tek eksenle öteleme hareketi yapılabilecek sınır şartı parametresi olarak parça hareket hızını verdiğimiz tüpü aksenal deformasyona uğratan parçadır. Genel bir dille aksenal deformasyona maruz kalan tüp sabit bir tabla üzerinde hareketli tablanın z yönündeki hareketi ile deformasyonun gözlemlenmesidir. Kurguladığımız bu sonlu eleman modeli Şekil 5.1.'de gösterilmektedir.



Şekil 5.1. Ezilme kutusu için kurgulanan sonlu elemanlar modeli

### 5.1. Deneysel Verilerle Sonlu Elemanlar Malzeme Modelinin Oluşturulması

Sonlu elemanlar yönteminde problemin gerçek sonuçlara yakınsayabilmesi için malzeme davranışının doğru modellenmesi gerekmektedir. Malzeme modelinin doğru oluşturulabilmesi için malzeme özelliklerinin iyi tanımlanması gerekmektedir. Ezilme kutusunun tasarımında alüminyum 6063-T5 malzemesi kullanılmıştır. Kullanılan alüminyum malzemeye ait mekanik özelliklerin belirlenebilmesi amacıyla çekme deneyi yapılmıştır. Şekil 5.2.'de Al 6063-T5 borulardan hazırlanan numuneler ve numuneleri tutmak için çeneler gösterilmektedir.



Şekil 5.2. (a) Numune sıkıştırma aparatı (b) Numunenin çenelere yerleştirilmesi [7]

Hazırlanan numuneler Şekil 5.3.'te verilen ekstansometre özelliği olan numune üzerine işaretlenen düşey noktaları referans alarak, uzamayı hassas bir şekilde

izleyebilmesine imkan veren Instron marka çekme cihazı kullanılarak çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.3. Malzeme çekme deneyi cihazı [7]

Çekme deneyi yapılan malzemenin verileri işlenerek gerilme–birim şekil değişimi grafiği oluşturulmuştur. Şekil 5.4.’te gösterilen çekme eğrisinde kırmızı ve siyah eğriler bulunmaktadır. Bu eğrilerden siyah olan eğri mühendislik gerilme-birim şekil değişimi eğrisidir. Kırmızı olan eğri ise gerçek gerilme-birim şekil değişimi eğrisidir. Mühendislik eğrisi verileri aksel çekilen numunedeki ilk kesit alanına göre hesaplanır. Gerçek eğri verileri ise aksel çekilen numunenin anlık kesit alanı dikkate alınarak hesaplanır. İki eğri arasında ki fark malzeme akmaya başladıktan sonra açılmaktadır. Bununun nedeni malzemenin kesit alanındaki değişimin başlamasıdır. Anlık kesit alanını ölçmek zordur. Bu yüzden mühendislik eğrisinden elde edilen gerime ve birim şekil değişimi verilerini kullanarak Denklem 5.2 ve Denklem 5.3’deki formülasyondan gerçek eğri değerleri hesaplanabilir [13].

$$\varepsilon_g = \ln(1 + \varepsilon_m) \quad (5.2)$$

$$\sigma_g = \sigma_m(1 + \varepsilon_m) \quad (5.3)$$

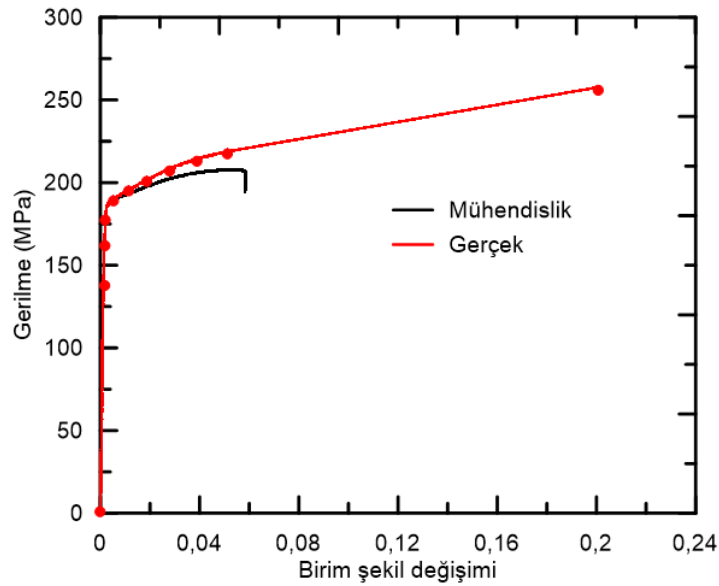
Burada;

$\varepsilon_m$  =Mühendislik birim şekil değişimi değeri

$\varepsilon_g$  = Gerçek birim şekil değişimi değeri

$\sigma_m$  =Mühendislik gerilme değeri

$\sigma_g$  =Gerçek gerilme değeri



Şekil 5.4. Alüminyum 6063-T5 malzemesi gerilme – birim şekil değişimi grafiği

Yapılan çekme deneyi sonucunda Al 6063-T5 malzemesinin mekanik özelliklerini belirlendi. Sonlu elemanlar modelinin oluşturduğumuz Ls-Dyna Explicit programında metal malzemelerin modellendiği 83 adet malzeme algoritması bulunmaktadır. Ezilme kutusu analizlerinde yaygın olarak kullanılan malzeme kartlarından biri olan \*Mat24 malzeme kartı diğer adıyla \*MAT\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY malzeme kartı ile Al 6063-T5 malzemesi modellenmiştir[15]. \*MAT\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY malzeme kartında lineer bölgeyi modellememiz için elastisite modülü ile poisson oranını özellikleri plastik bölgeyi modellemek için akma gerilmesinin başladığı gerilme değeri ve plastik bölgedeki stress-strain eğrisini girmemiz yeterlidir. Tablo 5.1.'de Al 6063-T5 malzemesinin mekanik özellikleri verilmektedir. Şekil 5.4.'te

verilen gerilme birim şekil grafiğinden elde edilen plastik bölge verileride Tablo 5.2.'de verilmiştir [14] [15].

Tablo 5.1. Al 6063-T5 malzemesinin mekanik özellikleri

| Malzeme Türü      | Yoğunluk ( $\rho$ )    | Elastik Modülü (E) | Poisson Oranı ( $\nu$ ) | Akma Gerilmesi ( $\sigma_y$ ) |
|-------------------|------------------------|--------------------|-------------------------|-------------------------------|
| Alüminyum 6063-T5 | 2700 kg/m <sup>3</sup> | 72 GPa             | 0,3                     | 178 MPa                       |

Tablo 5.2. Al 6063-T5 malzemesinin plastik bölge gerilme-birim şekil değişimi verileri

|            |     |       |       |       |       |       |        |     |
|------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-----|
| $\epsilon$ | 0   | 0.023 | 0.031 | 0.035 | 0.044 | 0.049 | 0.0589 | 0.2 |
| $\sigma$   | 178 | 185   | 188.2 | 190   | 193.5 | 195   | 197.6  | 255 |

Tablolarda verilen bilgilerden yararlanarak Şekil 5.5.'te verilen \*MAT\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY malzeme kartı parametreleri tanımlanmıştır.

\*MAT\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY\_(TITLE) (024) (1)

|              |             |             |             |             |             |             |             |
|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <u>TITLE</u> |             |             |             |             |             |             |             |
| Al 6063-T5   |             |             |             |             |             |             |             |
| 1            | <u>MID</u>  | <u>RO</u>   | <u>E</u>    | <u>PR</u>   | <u>SIGY</u> | <u>ETAN</u> | <u>FAIL</u> |
|              | 3           | 2.700e-009  | 7.200e+004  | 0.3000000   | 178.00000   | 0.0         | 1.000e+021  |
| 2            | <u>C</u>    | <u>P</u>    | <u>LCSS</u> | <u>LCSR</u> | <u>VP</u>   | <u>LCF</u>  |             |
|              | 0.0         | 0.0         | 2           | 0           | 0.0         | 0           |             |
| 3            | <u>EPS1</u> | <u>EPS2</u> | <u>EPS3</u> | <u>EPS4</u> | <u>EPS5</u> | <u>EPS6</u> | <u>EPS7</u> |
|              | 0.0         | 0.0         | 0.0         | 0.0         | 0.0         | 0.0         | 0.0         |
| 4            | <u>ES1</u>  | <u>ES2</u>  | <u>ES3</u>  | <u>ES4</u>  | <u>ES5</u>  | <u>ES6</u>  | <u>ES7</u>  |
|              | 0.0         | 0.0         | 0.0         | 0.0         | 0.0         | 0.0         | 0.0         |

Şekil 5.5. \*MAT\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY malzeme kartı

Burada geçen malzeme parametreleri:

MID=Malzeme kimliği(Material identification)

RO=Yoğunluk ( ton/mm<sup>3</sup> )

E =Elastik Modül ( MPa )

PR=Poisson Oranı

SIGY=Akma gerilmesi (MPa)

Al 6063-T5 malzemesini deneysel veriler sonucunda bulunan mekanik özelliklerin yardımıyla Ls-Dyna sonlu elemanlar programında malzeme modeli oluşturulmuştur. Alt ve Üst tabla modelde rijit olarak tanımlanmıştır. Ls-Dyna'da bu malzeme \*MAT\_RIJID malzeme algoritması ile tanımlanmıştır. Şekil 5.6.'da ve Şekil 5.7.'de kart parametreleri verilmiştir.

\*MAT\_RIJID\_(TITLE) (020) ( 2 )

---

TITLE

ust malzeme material

|   |                  |             |             |           |           |               |          |              |
|---|------------------|-------------|-------------|-----------|-----------|---------------|----------|--------------|
| 1 | <u>MID</u>       | <u>RO</u>   | <u>E</u>    | <u>PR</u> | <u>N</u>  | <u>COUPLE</u> | <u>M</u> | <u>ALIAS</u> |
|   | 1                | 7.800e-009  | 2.100e+005  | 0.3000000 | 0.0       | 0             | 0.0      |              |
| 2 | <u>CMO</u>       | <u>CON1</u> | <u>CON2</u> |           |           |               |          |              |
|   | 1.0              | 4           | 7           |           |           |               |          |              |
| 3 | <u>LCO OR A1</u> | <u>A2</u>   | <u>A3</u>   | <u>V1</u> | <u>V2</u> | <u>V3</u>     |          |              |
|   | 0.0              | 0.0         | 0.0         | 0.0       | 0.0       | 0.0           |          |              |

Şekil 5.6. Üst tabla \*MAT\_RIJID malzeme kartı

\*MAT\_RIJID\_(TITLE) (020) ( 2 )

---

TITLE

alt tabla malzeme material

|   |                  |             |             |           |           |               |          |              |
|---|------------------|-------------|-------------|-----------|-----------|---------------|----------|--------------|
| 1 | <u>MID</u>       | <u>RO</u>   | <u>E</u>    | <u>PR</u> | <u>N</u>  | <u>COUPLE</u> | <u>M</u> | <u>ALIAS</u> |
|   | 2                | 7.800e-009  | 2.100e+005  | 0.3000000 | 0.0       | 0             | 0.0      |              |
| 2 | <u>CMO</u>       | <u>CON1</u> | <u>CON2</u> |           |           |               |          |              |
|   | 1.0              | 7           | 7           |           |           |               |          |              |
| 3 | <u>LCO OR A1</u> | <u>A2</u>   | <u>A3</u>   | <u>V1</u> | <u>V2</u> | <u>V3</u>     |          |              |
|   | 0.0              | 0.0         | 0.0         | 0.0       | 0.0       | 0.0           |          |              |

Şekil 5.7. Alt tabla \*MAT\_RIJID malzeme kartı

\*MAT\_RIJID kartında geçen ek parametreler:

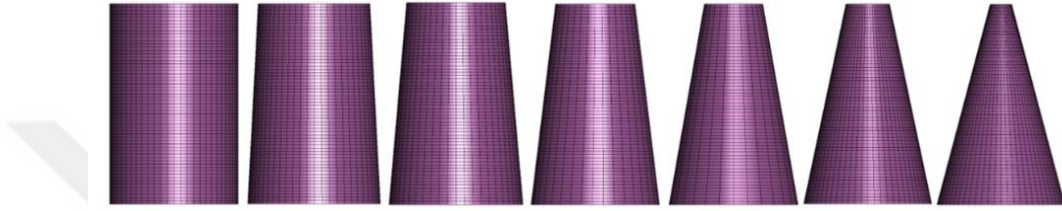
CMO=Global yönlerde uygulanan kısıtlamalar

CON1=Öteleme serbestliğinin tanımlandığı parametre

CON2=Dönme serbestliğinin tanımlandığı parametre

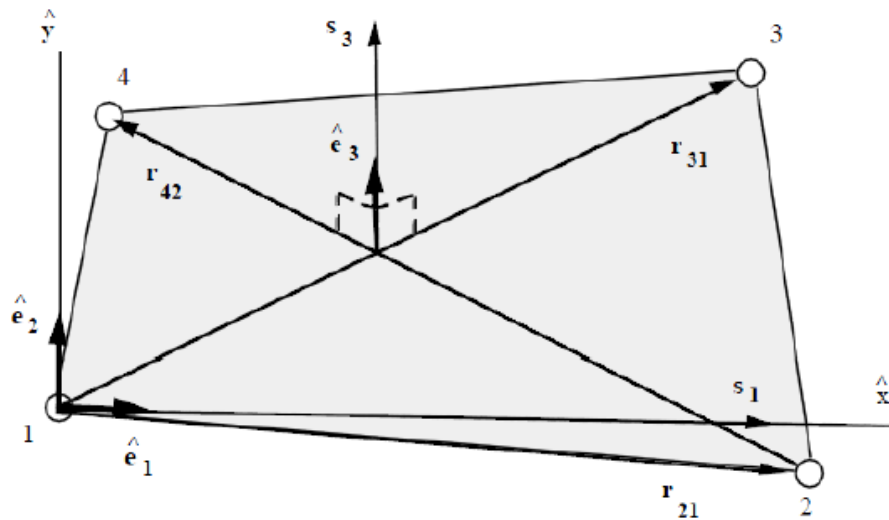
## 5.2. Sonlu Eleman Tipi Ve Eleman Ağı'nın Oluşturulması

Sonlu elemanlar ağı Ls-Prepost programının Mesh bölümünün içerisinde bulunan bir ağ oluşturma algoritması yardımıyla oluşturulmaktadır. Bu analizde sonlu elemanlar da kullanılan eleman tiplerinden biri olan iki boyutlu kabuk eleman tipi kullanılmıştır. Sonlu elemanlar ağı oluşturulmuş ezilme kutularının görünümü Şekil 5.6.'da verilmektedir.



Şekil 5.6. Sonlu elemanlar ağı oluşturulmuş ezilme kutuları

Modelimizdeki bütün parçalar dört düğümden oluşan kabuk elemanlarla kurulmuştur. Kabuk eleman formülasyonu olarak Ls-Dyna da bulunan kabuk eleman formülasyonlarının içinde hızlı ve doğruluğu yüksek hesaplama yapabilen Belytschko -Tsay eleman formülasyonu kullanılmıştır. Şekil 5.7.'de Belytschko-Tsay kabuk eleman ve koordinat sistemini gösterilmiştir.



Şekil 5.7. Belytschko-Tsay kabuk eleman ve koordinat sistemi [15]



Şekil 5.7.'de görüldüğü üzere  $e_1$  ve  $e_2$  kabuk elemanın düzlemdeki x ve y eksenindeki birim vektörünü,  $e_3$  ise düzleme dik kalınlık yönündeki birim vektörü ifade etmektedir. 1,2,3 ve 4 numara ile gösterilen noktalar kabuk elemanın düğüm noktalarını ifade etmektedir. Ls-Dyna'da kabuk elemanlara, eleman formülasyonu tanımlamak için \*SECTION\_SHELL kartı kullanılır. Şekil 5.8.'de \*SECTION\_SHELL kartı verilmiştir.

Şekil 5.8. \*SECTION\_SHELL kesit tanımlama kartı

Burada geçen kart parametreleri:

SECCID=Kesit kimliği

ELFORM=Eleman formülasyonu (2)( Belytschko-Tsay )

T1-2-3-4=Kabuk kalınlığı

NIP=Kalınlık yönündeki integrasyon noktası sayısı

SHRF=Kayma Faktörü (Önerilen değer,0,8333)

### 5.3. Sonlu Elemanlar Modelinde Temas Algoritmasının Tanımlanması

Sonlu elemanlar modelimiz Şekil 5.1.'deki gibi üç parçadan oluşmaktadır. Üst tabla ve alt tablayı oluşturan elemanlar ezilme kutusunu(tüpü) oluşturan elemanlarla birbirleriyle temas etmektedir. Bu durumu sonlu elemanlar modelinde tanımlanması gerekmektedir. Ls-Dyna'da farklı parçalar arasında ki teması modellemek için birçok temas algoritması bulunmaktadır.

Temas algoritması modeldeki parçalar arasındaki kuvvet etkileşimlerini de hesaplayabilmektedir. Modelimizde alt tabla ile tüp ve üst tabla ile tüp arasındaki teması \*CONTACT\_AUTOMATIC\_NODES\_TO\_SURFACE kontak kartı ile tanımlanmıştır. Tüpün kendi elemanları içindeki teması \*CONTACT\_AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE kontak kartı ile tanımlanmıştır. Kontak kartlarının çalışma prensibi temas eden parçaların biri master ve diğerini slave olarak tanımlamak gerekmektedir. Nodes to surface temas algoritmasında Slave olarak seçilen parçanın düğümlerinin master olarak seçtiğimiz parçanın yüzeyinden geçmesini engelleyerek temasın hesaplama boyunca kalmasını sağlar. Surface to surface kartında ise Slave olarak seçilen parçanın yüzeyinin master olarak seçtiğimiz parçanın yüzeyinden geçmesini engelleyerek temasın hesaplama boyunca kalmasını sağlar.

Şekil 5.9.'da ve Şekil 5.10.'da nodes\_to surface kontak kartları ve Şekil 5.11.'de surface to surface kontak kartı tanımlamaları verilmiştir.

\*CONTACT\_AUTOMATIC\_NODES\_TO\_SURFACE\_(ID/TITLE/MPP) (3)

| CID                                                         | TITLE           |          |          |            |           |           |            |
|-------------------------------------------------------------|-----------------|----------|----------|------------|-----------|-----------|------------|
| 1                                                           | üst tabala /tup |          |          |            |           |           |            |
| <input type="checkbox"/> MPP1 <input type="checkbox"/> MPP2 |                 |          |          |            |           |           |            |
| IGNORE                                                      | BUCKET          | LCBUCKET | NS2TRACK | INITITER   | PARMAX    | UNUSED    | CPARMB     |
| 0                                                           | 200             |          | 3        | 2          | 1.0005    |           | 0          |
| UNUSED                                                      | CHKSEGS         | PENSEF   | GRPABLE  |            |           |           |            |
|                                                             | 0               | 1.0      | 0        |            |           |           |            |
| SSID                                                        | MSID            | SSTYP    | MSTYP    | SBOXID     | MBOXID    | SPR       | MPR        |
| 3                                                           | 1               | 3        | 3        | 0          | 0         | 0         | 0          |
| FS                                                          | FD              | DC       | VC       | VDC        | PENCHK    | BT        | DT         |
| 0.3000000                                                   | 0.2000000       | 0.0      | 0.0      | 10.0000000 | 0         | 0.0       | 1.000e+020 |
| SFS                                                         | SFM             | SST      | MST      | SFST       | SFMT      | FSF       | VSE        |
| 1.0000000                                                   | 1.0000000       | 0.0      | 0.0      | 1.0000000  | 1.0000000 | 1.0000000 | 1.0000000  |

Şekil 5.9. \*CONTACT\_AUTOMATIC\_NODES\_TO\_SURFACE üst tabla ile tüp arasındaki kontak kartı

\*CONTACT\_AUTOMATIC\_NODES\_TO\_SURFACE(ID/TITLE/MPP) (3)

| CID                                                         | TITLE         |          |          |            |           |           |            |
|-------------------------------------------------------------|---------------|----------|----------|------------|-----------|-----------|------------|
| 3                                                           | Alt tabla/tup |          |          |            |           |           |            |
| <input type="checkbox"/> MPP1 <input type="checkbox"/> MPP2 |               |          |          |            |           |           |            |
| IGNORE                                                      | BUCKET        | LCBUCKET | NS2TRACK | INITITER   | PARMAX    | UNUSED    | CPARM8     |
| 0                                                           | 200           |          | 3        | 2          | 1.0005    |           | 0          |
| UNUSED                                                      | CHKSEGS       | PENSG    | GRPABLE  |            |           |           |            |
|                                                             | 0             | 1.0      | 0        |            |           |           |            |
| SSID                                                        | MSID          | SSTYP    | MSTYP    | SBOXID     | MBOXID    | SPR       | MPR        |
| 3                                                           | 2             | 3        | 3        | 0          | 0         | 0         | 0          |
| FS                                                          | FD            | DC       | VC       | VDC        | PENCHK    | BT        | DT         |
| 0.3000000                                                   | 0.2000000     | 0.0      | 0.0      | 10.0000000 | 0         | 0.0       | 1.000e+020 |
| SFS                                                         | SFM           | SST      | MST      | SFST       | SFMT      | FSF       | VSE        |
| 1.0000000                                                   | 1.0000000     | 0.0      | 0.0      | 1.0000000  | 1.0000000 | 1.0000000 | 1.0000000  |

Şekil 5.10. \*CONTACT\_AUTOMATIC\_NODES\_TO\_SURFACE alt tabla ile tüp arasındaki kontak kartı

\*CONTACT\_AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE(ID/TITLE/MPP)\_(THERMAL) (1)

| CID                                                         | TITLE     |          |          |            |           |           |            |
|-------------------------------------------------------------|-----------|----------|----------|------------|-----------|-----------|------------|
| 2                                                           | TupTup    |          |          |            |           |           |            |
| <input type="checkbox"/> MPP1 <input type="checkbox"/> MPP2 |           |          |          |            |           |           |            |
| IGNORE                                                      | BUCKET    | LCBUCKET | NS2TRACK | INITITER   | PARMAX    | UNUSED    | CPARM8     |
| 0                                                           | 200       |          | 3        | 2          | 1.0005    |           | 0          |
| UNUSED                                                      | CHKSEGS   | PENSG    | GRPABLE  |            |           |           |            |
|                                                             | 0         | 1.0      | 0        |            |           |           |            |
| SSID                                                        | MSID      | SSTYP    | MSTYP    | SBOXID     | MBOXID    | SPR       | MPR        |
| 3                                                           | 3         | 3        | 3        | 0          | 0         | 0         | 0          |
| FS                                                          | FD        | DC       | VC       | VDC        | PENCHK    | BT        | DT         |
| 0.3000000                                                   | 0.2000000 | 0.0      | 0.0      | 10.0000000 | 0         | 0.0       | 1.000e+020 |
| SFS                                                         | SFM       | SST      | MST      | SFST       | SFMT      | FSF       | VSE        |
| 1.0000000                                                   | 1.0000000 | 0.0      | 0.0      | 1.0000000  | 1.0000000 | 1.0000000 | 1.0000000  |

Şekil 5.11. \*CONTACT\_AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE Tüpün kendi elemanları arasındaki kontak kartı

Bura kartlarda geçen parametreler:

CID=kontak kartı kimlik numarası

SSID=slave seçilen parçanın kimlik numarası

MSID= master seçilen parçanın kimlik numarası,

SSTYP=slave tipi(part,node set,part set)

MSTYP=master tipi(part,node set,part set)

FS=static sürtünme katsayısı(0.3)

FD=dinamik sürtünme katsayısı(0.2)

VDC=viskoz sönümleme oranı(10)

#### 5.4. Sonlu Elemanlar Modelinde Sınır Şartlarının Tanımlanması

Sonlu elemanlar modelinde sınır şartı olarak üst tablanın düşey eksenindeki hareketi ve alt tablanın sabitlenmesi gerekmektedir. Alt tablanın hareketini \*MAT\_RIJIT kartındaki serbestlik derecelerinden faydalanılarak alt tablayı üç boyutlu uzay da 6 serbestlik derecesinde de sabitlendi. Bunu Şekil 5.10.'da ikinci satırda verilen sırasıyla CMO, CON1 ve CON2 değerlerinden ayarlandı.

Burada CMO değeri 1 , CON1 değeri cismin öteleme serbestliğinin tanımlandığı parametre olup bu değer 7 dir. Cismin Kartezyen koordinat sistemindeki eksenlerin öteleme serbestliğini engeller. CON2 değeri ise cismin dönme serbestliğini tanımlandığı parametre olup bu değer 7 dir. Cismin Kartezyen koordinat sistemindeki eksenlerde dönme serbestliğini engeller.

Üst tablada rijit olarak tanımlanmıştır. Üst tablada sadece z ekseninde hareket serbestliği bulunmaktadır. Üst tablada CMO=1 , CON1=4 ve CON2=7 olarak tanımlanmıştır. Üst tablada ki başlangıç şartını Ls-Dyna'da bulunan rijir cisimlerin hareketinin tanımlandığı \*BOUNDARY\_PRESCRIBED\_MOTION\_RIJIT sınır şartı kartı kullanılmıştır. Şekil 5.11.'de kart parametreleri verilmektedir.

| ID | TITLE     |     |     |            |    |            |       |       |
|----|-----------|-----|-----|------------|----|------------|-------|-------|
| 0  | üst tabla |     |     |            |    |            |       |       |
| 1  | PID       | DOF | VAD | LCID       | SF | VID        | DEATH | BIRTH |
| 1  | 3         | 0   | 1   | -1.0000000 | 0  | 1.000e+028 | 0.0   |       |

Şekil 5.12. \*BOUNDARY\_PRESCRIBED\_MOTION\_RIJIT sınır şartı tanımlanma kartı

Burada;

PID=Parça kimliği

DOF=Serbestlik derecesi

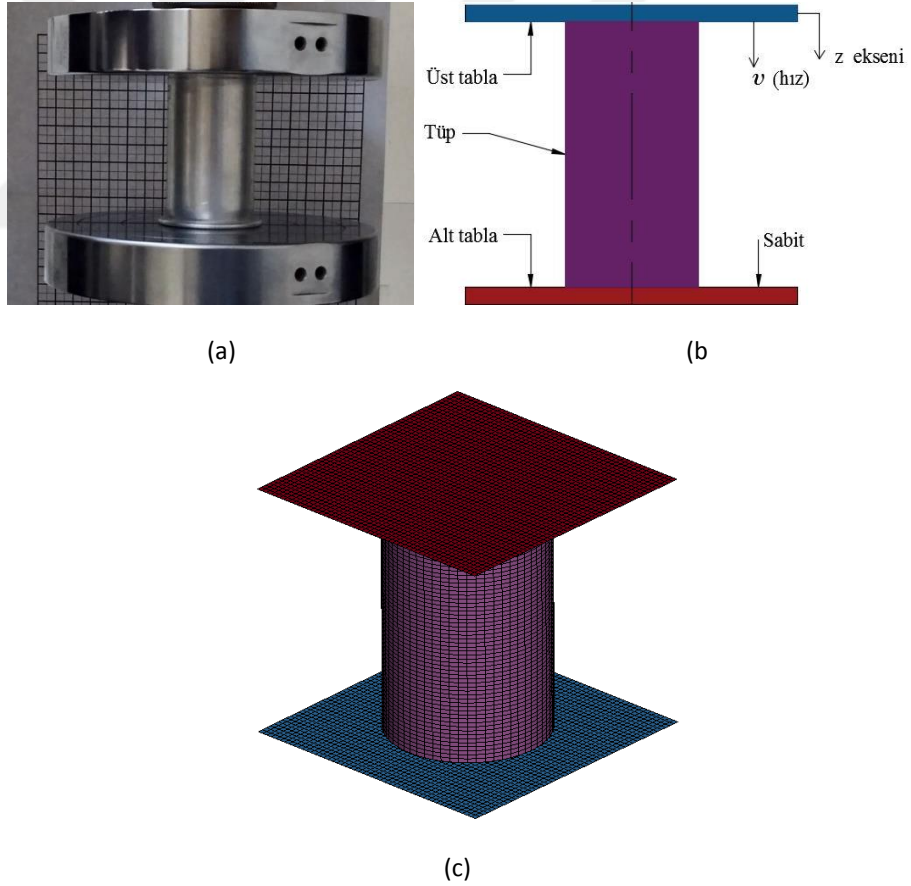
VAD=Hız(0)\ivme(1)\yer değıştirme(2)

LCID= Hız\ivme\yer değıştirme tablosu

Olarak tanımlanmıştır. LCID de 56km/s (15555mm/s) çarpışma hızı grafiksel olarak tanımlanmıştır.

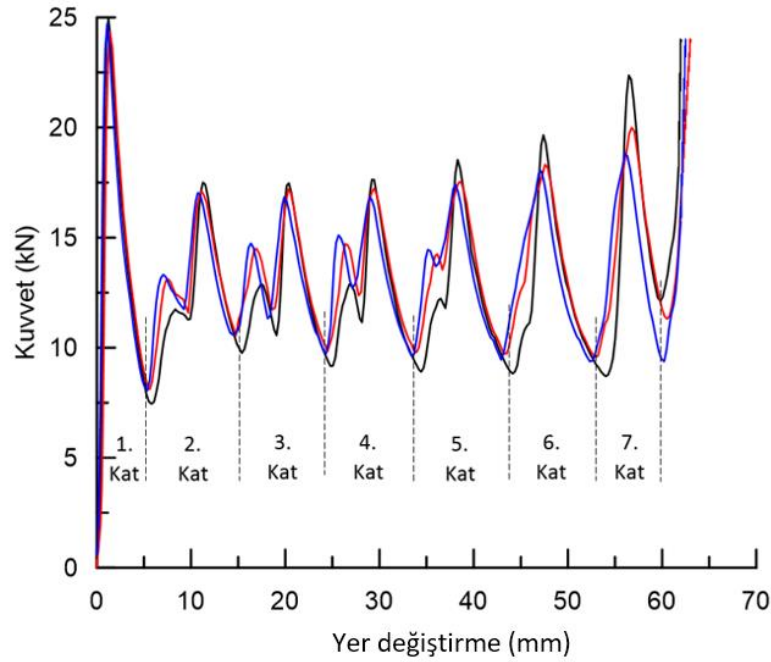
## BÖLÜM 6. SONLU ELEMALAR MODELİNİN DOĞRULANMASI

Sonlu eleman analizlerini doğrulaması için yapılan  $\varnothing 40$  mm ,  $L=82$  mm ve  $t=1$  mm boyutlarındaki AL 6063-T5 numunenin deneysel olarak ezilmesi ve bu ezilme sonucu çıkan sonuçları sonlu elemanlar yöntemi ile kıyaslaması yapılmıştır. Deney düzeneği , kurgulanan modelin görünümü ve sonlu eleman görünümü Şekil 6.1.'de verilmektedir.



Şekil 6.1. a) Deneysel düzeneği b)kurgulanan model c) hazırlanan sonlu eleman modeli

Deneysel çalışmada üç adet aynı boyutlarda ( $\varnothing 40, L=82$  ve  $t=1$ ) ve aynı malzemeden yapılan numunelerin kuvvet–yer değiştirme eğrileri Şekil 6.2.’de verilmektedir. Numuneler aynı katlanma performansını ve biçimini göstermiştir.



Şekil 6.2. Deneysel numunelerin kuvvet-yer değişimi grafikleri( $\varnothing 40\text{mm}-L=82\text{mm}$  ve  $t=1\text{mm}$ ) [7]

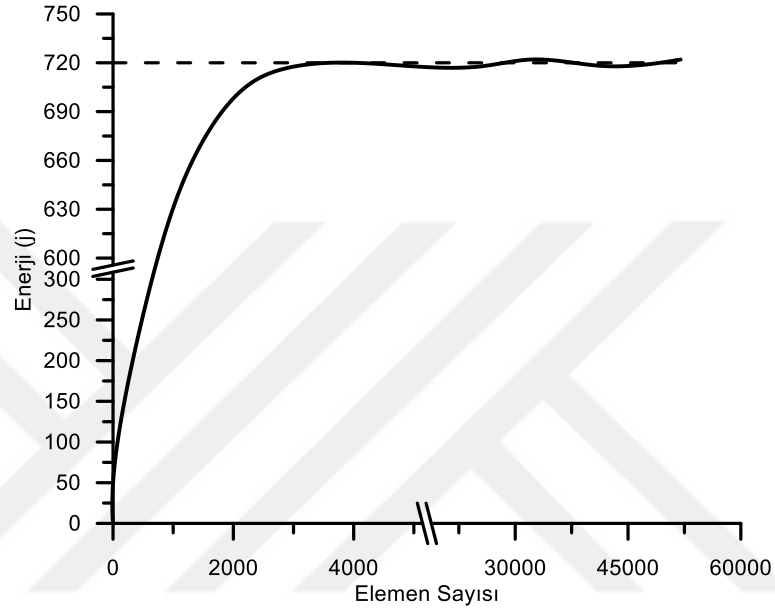
Deneyi gerçekleştirilen 40 mm çaplı numunelerin farklı ezilme miktarında ki absorbe ettikleri enerji ve görüntüleri Şekil 6.3.’te verilmiştir.



Şekil 6.3. Farklı ezilme miktarlarında 40 mm çaplı tüpün absorbe ettiği enerji ve oluşan deformasyon görüntüleri

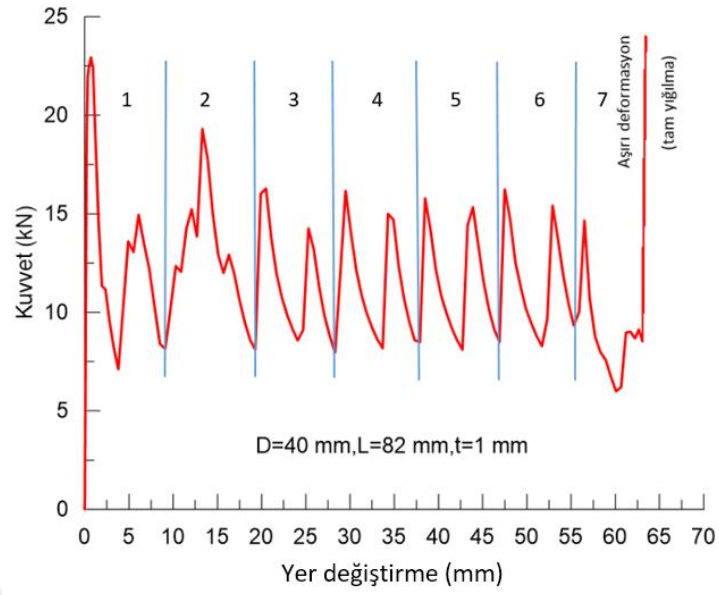
40 mm çapındaki enerji yutucu 61 mm ezilme miktarında 760 J enerji absorbe etmiş ve 7 adet aksisimetrik katlanma gözlenmiştir.

Yapılan sonlu eleman analizlerinde eleman sayısının sonuçlara olan etkisini görmek için 1200, 2400, 3600, 8000, 14600, 25800, 32000, 41800 ve 52000 eleman sayılarında sonlu eleman modelleri oluşturuldu. Oluşturulan modellerin sonuçları Şekil 6.4.'de verilmiştir. Bu durumda grafik te de görüldüğü gibi 3600 elemandan sonra eleman sayısındaki artış sonuçları etkilememektedir.



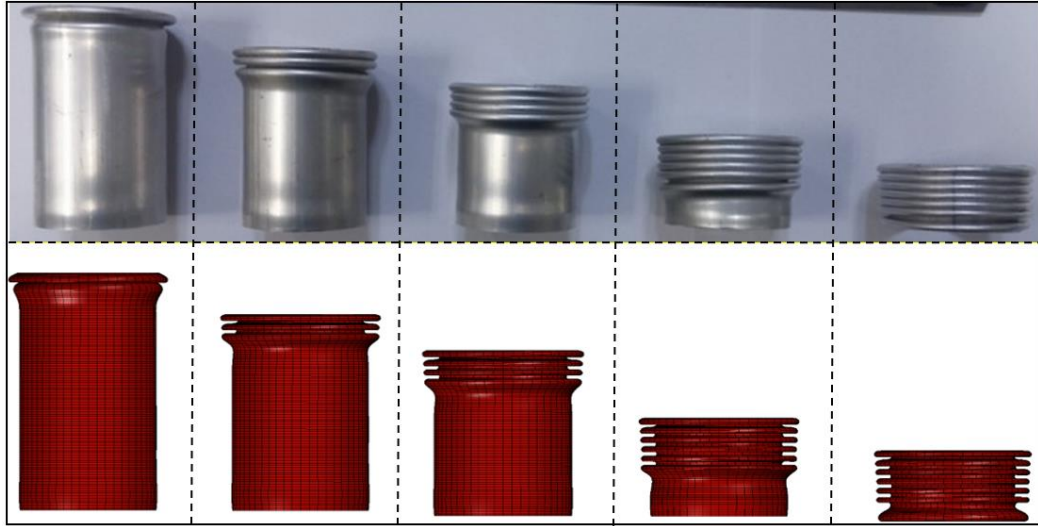
Şekil 6.4. Enerji-Element sayısı Grafiği

Element sayısının fazla olması sonlu elemanlar modelinin çözümü sırasında çözücü program daha fazla matematiksel işlem yüküne maruz bırakılmasına yol açar. Buda hesaplama süresini uzatacaktır. Kurgulanan sonlu eleman modeli de deneysel numunedeki gibi bir ezilme davranışı sergilemiştir. Şekil 6.5.'te sonlu elemanlar modelinin kuvvet-yer değişimi eğrisi verilmektedir. Eksenel ezilen ezilme kutusunda 7 adet aksisimetrik katlanma gözlemlenmiştir.



şekil 6.5. Sonlu elemanlar modelinin kuvvet-yer değişimi eğrisi

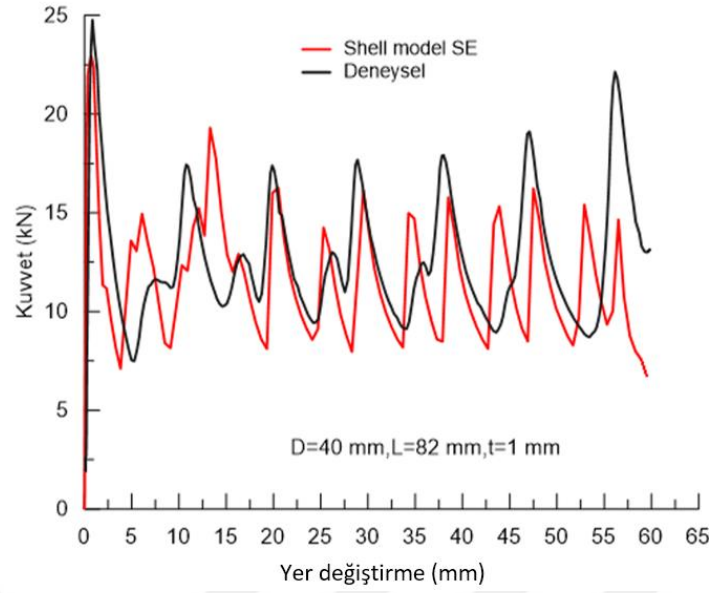
Sonlu elemanlar modeli ile deneysel numunenin farklı ezilme miktarlarındaki görünümleri şekil 6.6.'da verilmektedir. Ezilme görünümleri üst tarafta deneysel sonuçlar ve alt tarafta sonlu eleman görünümleri bulunmaktadır.



şekil 6.6. Ezilme kutusunun sonlu elemanlar ve deneysel görsellerinin karşılaştırılması

Deneysel sonuçlar ve Sonlu elemanlar analizi sonuçlarının daha iyi karşılaştırma bilmek için deneysel ve sonlu elemanlar kuvvet-yer değişimi eğrileri aynı grafikte şekil 6.7.'de verilmektedir.





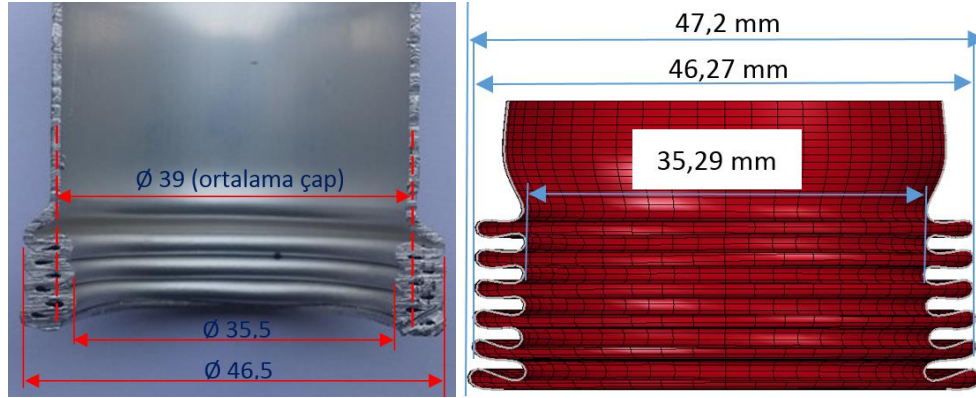
Şekil 6.7. DeneySEL ve sonlu elemanlar modeli sonuçlarının kuvvet-yer değişimi eğrileri

Eğrilerden elde edilen verilere göre deneySEL sonuçlarda  $P_{max}=24,76$  kN,  $P_m=12,67$  kN,  $E_{memilen}=760$  J ve katlanma şekli aksisimetri 7 kat olduğu sonlu elemanlar analizlerinde  $P_{max}=23,10$  kN,  $P_m=11,84$  kN,  $E_{memilen}=720$  J ve katlanma şekli aksisimetri 7 kat olduğu görölmüştür. Bu veriler sistematik olarak tablo 6.1’de verilmiştir.

Tablo 6.1. 40 mm çapa sahip tüpün SE ve Deney sonuçları karşılaştırması

|           | $P_{max}$ (kN) | $P_m$ (kN) | $E_{emilen}$ (J) | Katlanma adedi |
|-----------|----------------|------------|------------------|----------------|
| Deney     | 24,76          | 12,67      | 760              | 7              |
| SE modeli | 23,10          | 11,84      | 710              | 7              |

Sonlu elemanlar modeli sonuçlarına bakıldığında deneySEL sonuçlara maksimum ezilme kuvvetinde %93,2 ortalama ezilme kuvvetinde %93,4 ve absorbe edilen enerji miktarında ise %94,7 yakınsadığı görölmektedir. Katlanma sonucunda deneySEL ve sonlu elemanlar modelinin kesit görünümü ve katlanma sonrası i ve dış çap lleri Şekil 6.8.’de verilmiştir.



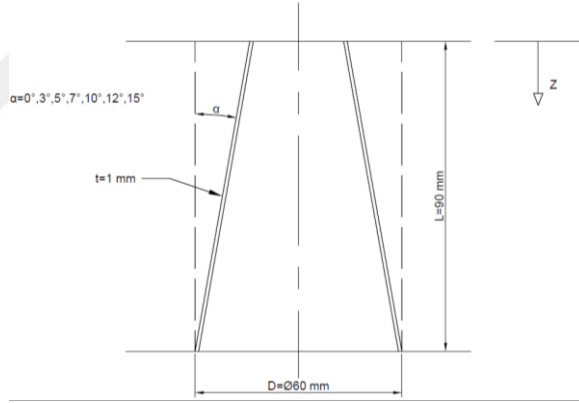
Şekil 6.8. a)Deneysel numunenin ve b)Sonlu elemanlar modelinin kesiti

Deneysel numunede katlama sonucu numunenin iç çapı  $\varnothing 35,5$  mm, dış çapı 46,5 ölçülmüştür. Sonlu elemanlar modelinde ise iç çap  $\varnothing 35,29$  mm, dış çap  $\varnothing 46,73$  mm (ortalama( $\varnothing 47,2 - \varnothing 46,27$ )) olarak ölçülmüştür. Kat oluşumu ve katlanma sayısına bakıldığında Şekil 6.6. ve Şekil 6.8.'de görüldüğü gibi Sonlu elemanlar modeli yüksek doğrulukla deneysel sonuçları yansıtmaktadır.

## BÖLÜM 7. KONİK EZİLME KUTUSU SONLU ELEMENLAR ANALİZLERİ

### 7.1. Tasarım Parametreleri

Ezilme kutusu tasarımında dairesel kesitli konik tüplerin koniklik derecesinin enerji absorbe etme kabiliyetine olan etkisini görmek için malzemesi Al 6063-T5 ,alt çap Ø60 mm, konik tüp boyu  $L=90$  mm ve cidar kalınlığı  $t=1$  mm olan konik tüpün koniklik derecesini  $\alpha=0^\circ, 3^\circ, 7^\circ, 10^\circ, 12^\circ$  ve  $15^\circ$  olan değerlerdeki ezilme performansı ve incelemesi yapılacaktır. Şekil 7.1.'de tasarım parametreleri verilmektedir.

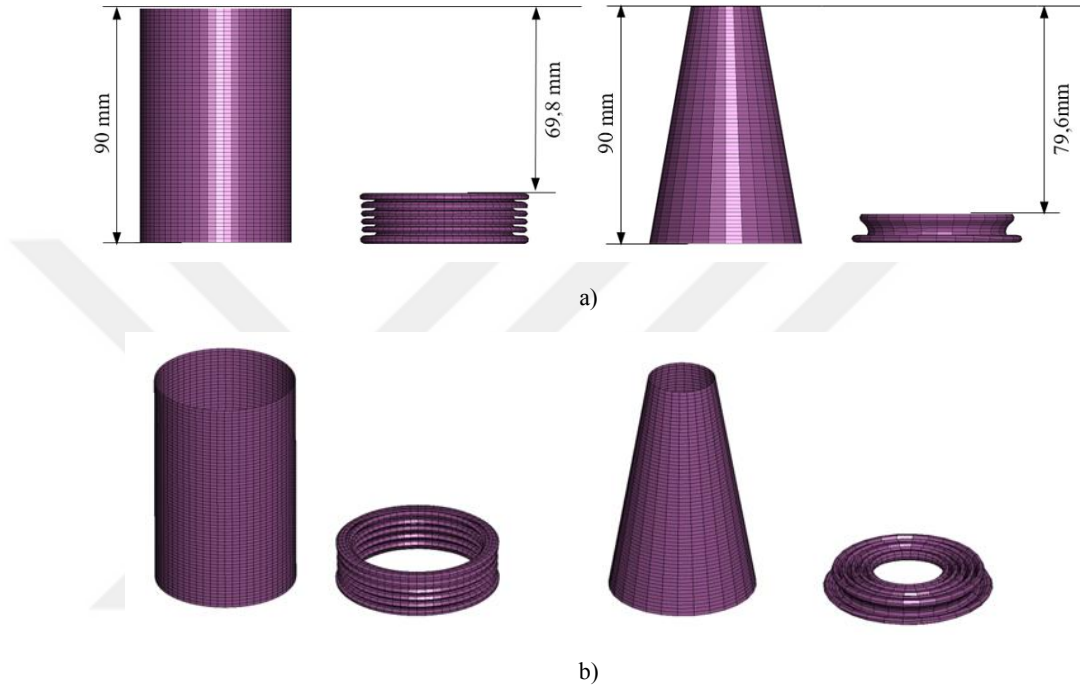


Şekil 7.1. Dairesel konik ezilme kutusunu tasarım parametreleri

### 7.2. Sonlu Elemanlar Sonuçları

Yapılan analizlerde alt çap, boy ve et kalınlığı sabit tutularak koniklik derecesinin katlanmaya ve enerji absorbsiyonuna olan etkisi incelenmiştir. Koniklik derecesinin artması katlanma biçimini, kat oluşumunu değiştirmektedir. Koniklik derecesinin artması malzemenin toplam ezilme miktarını da etkilemektedir. Konik tüpler düz tüplere göre daha fazla ezilmektedir. Buda aynı boyuttaki düz ve konik tüpün ezilmesi durumunda konik tüpün daha fazla ezilme göstereceğinin ifade eder. İlk

boyları 90 mm olan tüpler tamimiyle ezildiklerinde düz tüpün ezilme miktarı 69,8 mm iken  $10^\circ$  konik tüpün ezilme miktarı 79,6 mm olduğu gözlemlenmiştir. Düz tüpte ilk boya göre % 77,56 oranında ezilirken konik tüpte bu oran % 88,4 olarak hesaplanmıştır. Şekil 7.2.'de düz tüp ( $0^\circ$ ) ile  $10^\circ$  koniklikteki tüpün aksenal ezilme miktarları ve ezilme görünüşleri verilmektedir.



Şekil 7.2. Düz tüp ( $0^\circ$ ) ile  $10^\circ$  koniklikteki tüpün a) aksenal ezilme miktarları ve b) ezilme görünüşleri

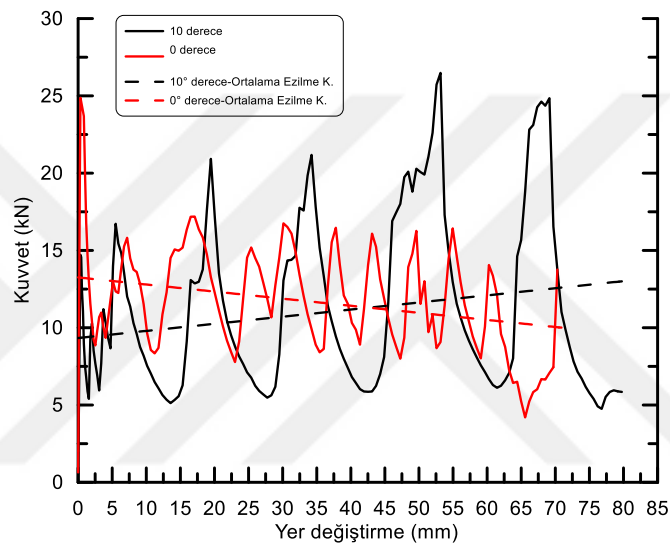
Yapılan diğer konik tüplerdeki ezilme miktarını incelediğimizde koniklik derecesinin artması toplam ezilme miktarını da arttırdığı gözlemlenmiş olup Tablo 7.1.'de ezilme kutularının toplam ezilme miktarları gösterilmiştir.

Tablo 7.1. Ezilme kutularının ezilme miktarları

|                     | $0^\circ$ (Düz tüp) | $3^\circ$ | $5^\circ$ | $7^\circ$ | $10^\circ$ | $12^\circ$ | $15^\circ$ |
|---------------------|---------------------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|
| Ezilme Miktarı (mm) | 69,8                | 71,2      | 72,4      | 75,4      | 79,6       | 80,3       | 80,95      |
| Ezilme Miktarı(%)   | 77,56               | 79,11     | 80,04     | 83,78     | 88,4       | 89,2       | 89,94      |

Ezilme kutularının aksenal deformasyon sonuçlarına bakıldığında ortalama ezilme kuvvetlerinin eğilimini konik ve düz tüplerde farklılık gösterdiği gözlemlenmiştir. Düz tüpte ortalama ezilme kuvveti eğilimi azalan bir davranış gösterirken konik

tüplerde bu eğilim ezilme bitene kadar artış göstermektedir. Bu artışın koniklik derecesinin artması ile eğimi de artmaktadır. Ezilen kesitin çapının artması katlanmaya karşı daha fazla direnç göstermesine yol açmaktadır. Konik tüplerin ezilmeye başladığı çap koniklik ten ötürü sürekli artmaktadır. Bunun sonucunda konik tüplerde ezilme miktarı arttıkça ezilme kuvvetlerinde de artış gözlemlenir. Buda Ezilme kutularında istenilen bir davranıştır. Şekil 7.3.'te düz tüp ve 10° konikliğe sahip ezilme kutularının kuvvet-yer değiştirme grafiği verilmektedir.



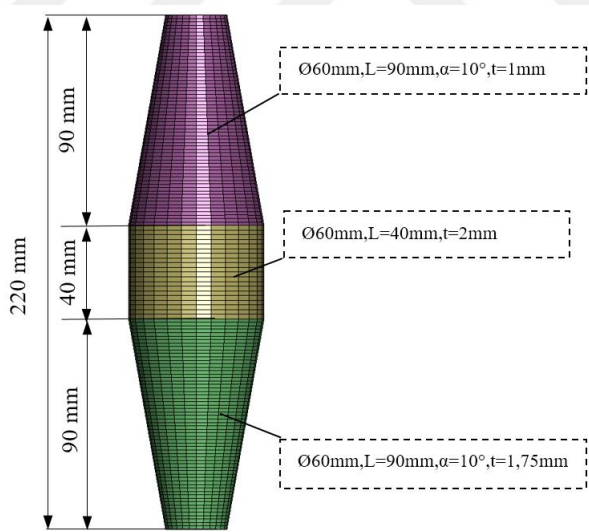
Şekil 7.3. Düz tüp ve 10° konikliğe sahip ezilme kutularının kuvvet-yer değiştirme grafiği

Ezilme kutularının sonlu elemanlar sonuçlarından yola çıkılarak Absorbe edilen enerji miktarları özgül enerji emilimi ortalama ezilme kuvveti gibi özellikleri Tablo 7.2.'de verilmektedir.

Tablo 7.2. Ezilme kutularının enerji absorpsiyonu performans parametre değerleri

|                   | 0°(Düz tüp)  | 3°    | 5°          | 7°    | 10°          | 12°   | 15°   |
|-------------------|--------------|-------|-------------|-------|--------------|-------|-------|
| $E_{emilen}(j)$   | 836          | 864   | 883         | 890   | <b>947</b>   | 865   | 717   |
| $E_m(j\text{gr})$ | 18,49        | 20,7  | 22,47       | 24,04 | <b>28,10</b> | 27,44 | 25,33 |
| $P_m(kN)$         | <b>11,94</b> | 11,81 | 11,77       | 11,13 | 11,83        | 10,42 | 8,53  |
| $P_{max}(kN)$     | 25           | 21,1  | 20,2        | 25,6  | <b>26,3</b>  | 22,5  | 17,5  |
| Ezilme verimi     | 0,47         | 0,56  | <b>0,58</b> | 0,43  | 0,45         | 0,46  | 0,48  |

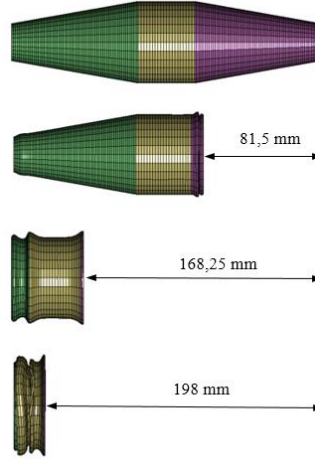
Tablo 7.2.'deki verilere göre enerji absorpsiyonu ve performansı bakımından 10° konikliğe sahip ezilme kutusu diğer ezilme kutularına göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Tezinde konusu olan çift taraflı konik bir ezilme kutusu tasarımında Al 6063-T5 malzemeden 60 mm çapında, 90 mm boyunda ve konikliği 10° farklı et kalınlıklarında 2 adet konik ve 60 mm çapında 40 mm boyuna sahip düz tüpleri birbirine seri bağlayarak eksenel ezilme davranışı incelenmiştir. Şekil 7.4.'te Çift taraflı konik ezilme kutusunu oluşturan parçaların boyutları verilmektedir.



Şekil 7.4. Çift taraflı konik ezilme kutusu tasarımı

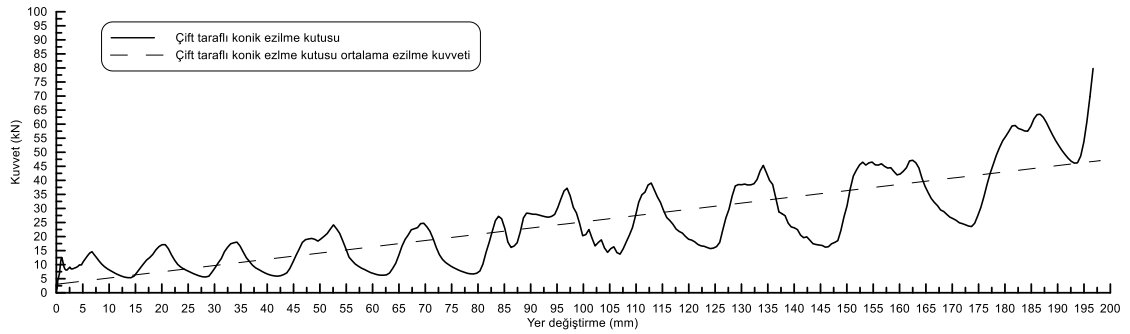
Burada 10° konik tüplerin kalınlıkları 1 mm ve 1,75 mm olarak belirlenmesinin sebebi katlanmanın ilk önce üst taraftan ardından alt tarafından katlanarak en son ortada bulunan katlanmanın gözlemlenmesi için kalınlıklar katlanma sırasına göre verilmiştir. Sonuçlara bakıldığında ilk başta 1 mm olan konik tüp ardından 1,75 mm

konik tüp ve en son da 2 mm olan düz tüpte katlanmalar gözlemlenmiştir. Şekil 7.5.'te aksel ezilme miktarı ve görünüşleri verilmektedir.



Şekil 7.5. Çift taraflı konik ezilme kutusu ezilme görünüşleri

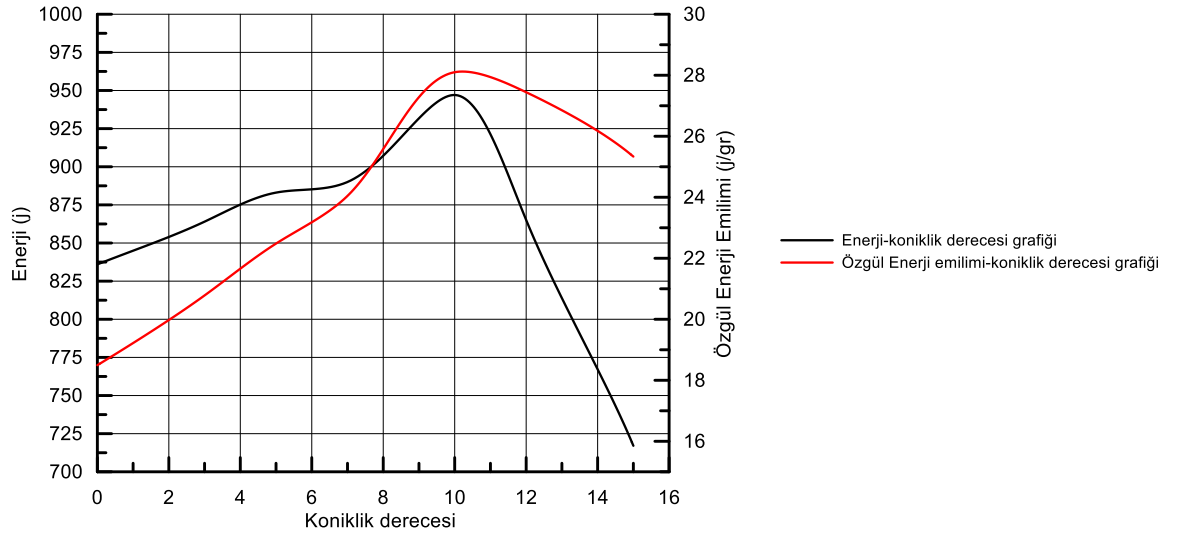
Çift taraflı konik tüplerden oluşan ezilme kutusu aksel ezilme sonucunda 198 mm ezilerek 4894 j enerji absorbe etmiştir. Ezilme kutusunun ortalama ezilme kuvveti beklenildiği üzere artan eğilimde olduğu gözlemlenmiştir. Çift taraflı konik ezilme kutusunun kuvvet-yer değişimi grafiği Şekil 7.6.'da verilmektedir.



Şekil 7.6. Çift taraflı konik ezilme kutusu kuvvet-yer değişimi grafiği

## BÖLÜM 8. KARŞILAŞTIRMA VE SONUÇLAR

Yapılan konik ezilme kutusu analizlerinde koniklik derecesinin enerji absorpsiyonuna olan etkisi araştırılmıştır. Koniklik derecesinin artması belirli bir değere kadar ezilme kutusu enerji değerlerini ve özgül enerji emilimini arttırmaktadır. Koniklik derecesi  $0^\circ$  den  $10^\circ$  ye kadar gerek enerji absorpsiyonu gerekse özgül enerji emilimi değerleri artış göstermektedir. Koniklik derecesi  $10^\circ$  de maksimum enerji ve özgül enerji emilimi değerlerine ulaştığı gözlemlenmiştir.  $10^\circ$ den sonra enerji absorpsiyonu ve özgül enerji emilimi azalmaktadır. Sonlu elemanlar sonuçlarından yola çıkılarak konik ezileme kutularının absorbe edilen enerji –koniklik derecesi ve özgül enerji emilimi –koniklik derecesi eğrileri Şekil 8.1.’de verilmektedir.

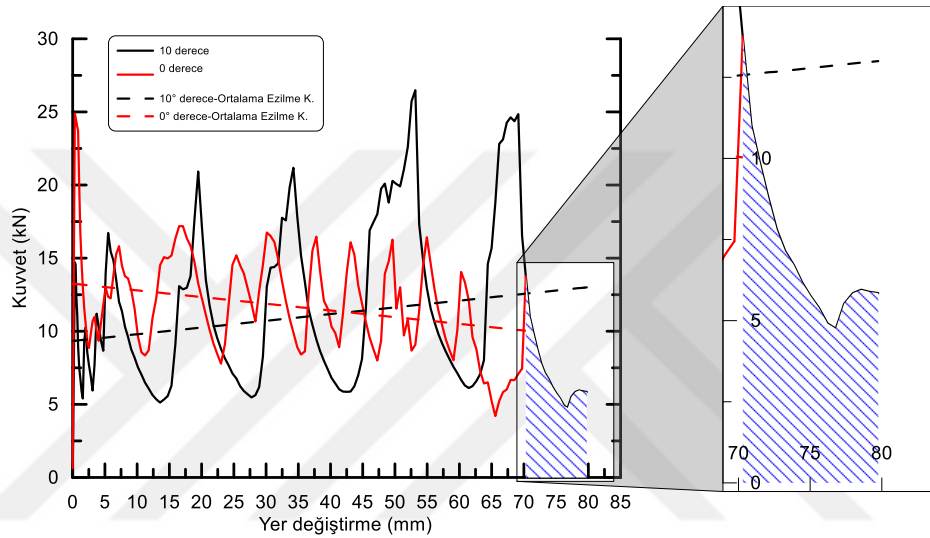


Şekil 8.1. Absorbe edilen enerji-koniklik derecesi ve özgül enerji emilimi-koniklik derecesi grafikleri

Ortalama ezilme kuvvetlerine bakıldığında düz tüp( $0^\circ$ ) ile  $10^\circ$  konik tüpün değerlerinin nerdeyse aynı olduğu görülmektedir. Fakat Konik Tüpler düz tüplere

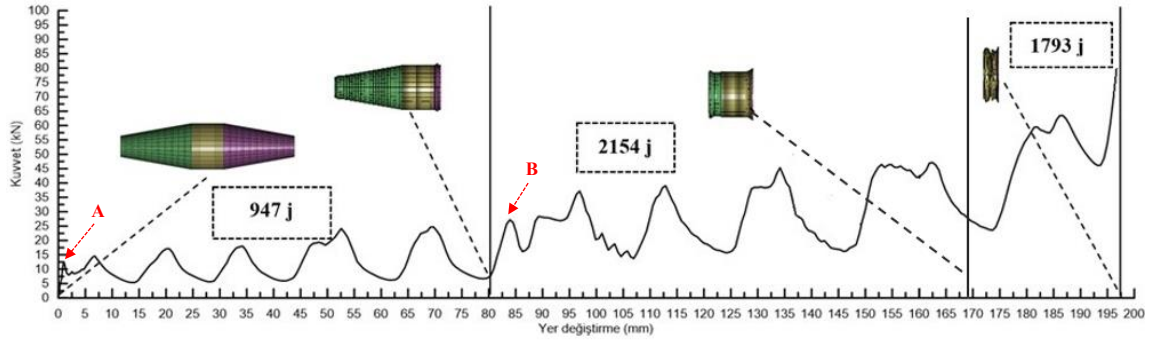


göre daha fazla ezilme miktarına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Düz tüpte maksimum ezilme 70 mm de gerçekleşirken  $10^\circ$  lik konik tüpte ise bu değer 80 mm e kadar devam etmektedir. Bu nedenden dolayı konik tüp daha fazla enerji absorbe etmiştir. Şekil 8.2.'de düz tüp ( $0^\circ$ ) ile  $10^\circ$  konik tüpün kuvvet-yer değişimi grafiği verilmektedir. Bu grafikte ezilme miktarları grafiğin sağ kısmında detay alınarak gösterilmiştir.



Şekil 8.2. Düz tüp ile  $10^\circ$  konik tüpe ait kuvvet-yer değişim grafiğinde ezilme miktarı detayı

$10^\circ$  konik tüpün sergilediği eksenel değerlendirme sonucunda çift taraflı konik enerji yutucunun koniklik derecesi  $10^\circ$  olarak seçilmiştir. Çift taraflı konik ezilme kutusunda kademeli bir ezilme gözlenebilmesi için 1 mm , 1,75 mm ve 2 mm tüpler kullanılmıştır. Et kalınlıklarının artması ortalama ezilme kuvvetinin ve absorbe edilen enerjinin arttığı gözlemlenmiştir. Çapı 60 mm , boyu 90 mm ve et kalınlığı 1 mm olan konik tüp 947 j ,et kalınlığı 1,75 mm olan konik tüp 2154 j ve çapı 60 mm 40 mm uzunluğunda ki düz tüp 1793 j enerji absorbe etmiştir. A ve B noktaları kalınlıkları 1 mm ve 1,75 mm olan konik tüplerin ilk pik oluşum noktalarını göstermektedir. Et kalınlığının artışı sonucu ilk pik kuvvetinin de bununla beraber arttığı gözlemlenmiştir. Şekil 8.3.'te kuvvet-yer değişimi grafiğinin üzerinde absorbe edilen enerji ve ezilme görünümüleri verilmiştir.



şekil 8.3. Çift taraflı konik ezilme kutusunu oluşturan tüplerin grafik üzerinde katlanma başlangıç ve bitişleri

Ezilme kutuları için yapılan çalışmalarda řu sonuçlar elde edilmiştir:

- Yapılan çalışmalarda konik ezilme kutularının düz ezilme kutularına göre daha fazla eksenel ezilebildiği gözlemlenmiştir.
- Ezilme kutularının et kalınlığını artması ilk pik kuvveti,ortalama ezilme kuvvetini ve absorbe edilen enerji miktarını arttırmaktadır.
- Konik ezilme kutularının ezilme kuvvetleri başlangıçta nispeten düşük, ancak eksenel ezilme ilerlemesiyle artan karakterde olduğu gözlemlenmiştir.
- Çalışma yapılan boyutlarda ortalama ezilme kuvveti,absorbe edilen enerji miktarı ve özgül enerji emilimi değerlerine bakıldığında optimum koniklik derecesinin 10° konikliğe sahip ezilme kutusu olduğu sonucuna varılmıştır.
- Konik ezilme kutularında kat oluşumu sırasında katlanmanın içeri(ezilme kutusu merkezine) yönlenmesi düz ezilme kutularına göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir

## KAYNAKLAR

- [1] Cerit, M.(2011).Şehirlerarası otobüslerde önden çarpışma enerjisini yutucu pasif güvenlik sisteminin geliştirilmesi. Ankara: TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü[ Yüksek Lisans Tezi].
- [2] Jin, S.Y., Altenhof, W., Comparison of the Load/Displacement and Energy Absorption Performance of Round and Square Aa6061-T6 Extrusions Under a Cutting Deformation Mode, International Journal of Crashworthiness, 12(3), 265- 278, 2007.
- [3] Alkoles, O.M.S., Mahdi, E., Hamouda, A.M.S., Sahari, B.B., Ellipticity Ratio Effects in the Energy Absorption of Axially Crushed Composite Tubes, Applied Composite Materials, 10, 339-363, 2003.
- [4] Chathbai, A., 2007, Parametric Study of Energy Absorption Characteristic of a Rectangular Aluminum Tube Wrapped With E-Glass/Epoxy, Master Tezi, Wichita State University, Mechanical Engineering Department, Kansas, USA.
- [5] Alghamdi, A., 2001. "Collapsible Impact Energy Absorbers: An Overview," Thin-Walled Structures, vol. 39, p. 189- 213.
- [6] Energy Absorption of Monolithic and Fibre Reinforced Aluminium Cylinders, De Kanter, J.L.C.G., Aerospace Engineering, doctoral thesis, Technische Universiteit Delft.
- [7] Tübitak 1001 Projesi, Proje No:115M583, Araştırma Projesi Bilimsel Raporu, 2017, Proje Yürütücüsü, Kenan Genel
- [8] Wierzbicki T, Abramowicz W. On the crushing mechanics of thin walled structures. Journal of Applied Mechanics 1983;50:727–34.
- [9] S.R. Guillow, G. Lu, R.H. Grzebieta Quasi-static axial compression of thin-walled circular aluminium tubes International Journal of Mechanical Sciences 43 (2001) 2103–2123.
- [10] Jensen, Ø., Langseth, M., Hopperstad, O.S., Experimental Investigations on the Behaviour of Short to Long Square Aluminium Tubes Subjected to Axial Loading, International Journal of Impact Engineering, 30, 973-1003, 2004.

- [11] Nagel, G.M., Thambiratnam, D.P., A Numerical Study on the Impact Response and Energy Absorption of Tapered Thin-walled Tubes, International Journal of Mechanical Sciences, 46, 201-216, 2004.
- [12] Nagel, G.M., Thambiratnam, D.P., Dynamic Simulation and Energy Absorption of Tapered Tubes Under Impact Loading, International Journal of Crashworthiness, 9(4), 389-399, 2004.
- [13] Malzeme Bilimi ve Mühendisliği (Materials Science and Engineering, William D. CALLISTER, David D. RETHWISCH, Wiley), Nobel yayıncılık, Çeviri kitap, Cuma BİNDAL, Kenan GENEL, Mehmet DEMİRKOL, Recep ARTIR, Mustafa BAKKAL, S. Ahmet Parasız.
- [14] Livermore Software Technology Corporation Dynamat, Material selector for LS-Dyna, <http://www.lstc.com/dynamat/> ,Erişim Tarihi: 03.04.2019.
- [15] LS-DYNA dev Keyword Manual Vol II - Material Models, <http://www.lstc.com/download/manuals/> ,Erişim Tarihi: 03.04.2019.

## ÖZGEÇMİŞ

Halil KAYAR, 03.04.1994'de Sakarya'da doğdu. İlk, orta, lise ve üniversite eğitimini Sakarya'da tamamladı. 2012 yılında Tes-iş Adapazarı Anadolu Lisesi'nden mezun oldu. 2012 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nü 2016 yılında bitirdi. 2016 yılında Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde Makine Tasarım ve İmalat Bilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı. Halen Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Tasarım ve İmalat Programı'nda yüksek lisans öğrencisidir.