

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

**İÇERİDEN PVC KÖPÜKLÜ TAKVIYE EDİLMİŞ  
ALÜMİNYUM TÜP ÇİFTİNİN KATLANMA  
DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Marufjan DOVRANOV**

**Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Kenan GENEL**

**Temmuz 2019**

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İÇERİDEN PVC KÖPÜKLÜ TAKVIYE EDİLMİŞ  
ALÜMİNYUM TÜP ÇİFTİNİN KATLANMA  
DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Marufjan DOVRANOV

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 10.07.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği /oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr.  
Kenan GENEL  
Jüri Başkanı



Doç.Dr.  
Akın Oğuz KAPTI  
Üye



Prof.Dr.  
Uğur ÖZSARAÇ  
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.

Marufjan DOVRANOV

10.07.2019



## **TEŞEKKÜR**

Yüksek lisans eğitiminin boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Prof. Dr. Kenan GENEL'e teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar olanakları konusunda anlayış ve yardımlarını esirgemeyen bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım sayın hocam Araştırma Görevlisi Muhammet YALÇIN'a teşekkür ederim.

Ayrıca bu çalışmanın maddi açıdan desteklenmesine olanak sağlayan Özel Proje Çözümleri Üretimi Mimarlık Sanayi ve Ticaret LTD.ŐTİ firmasına teşekkür ederim.

# İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ .....	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	v
TABLolar LİSTESİ .....	vi
ÖZET .....	vii
SUMMARY .....	vii

## BÖLÜM 1.

GİRİŞ .....	1
-------------	---

## BÖLÜM 2.

DENEYSEL ÇALIŞMA .....	6
2.1. Alüminyum Malzemenin Genel Özellikleri .....	6
2.2. Alüminyum Malzemenin Özellikleri .....	6
2.3. Numunelerin Hazırlanması ve Numune Kombinasyonları.....	8

## BÖLÜM 3.

DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA .....	13
3.1. Alüminyum Tüplerin Deney Sonuçları .....	13
3.1.1. Boş tüplerin grafiği .....	13
3.1.2. Düşük yoğunluklu PVC köpük takviyeli tüplerin deney sonuçları .....	16
3.1.3. Yüksek yoğunluklu PVC köpük takviyeli tüplerin grafiği .....	20

3.1.4. Farklı yoğunluklu PVC köpüklerle takviye edilmiş ikili numunelerin deney sonuçları .....	24
3.2. Takviyesiz ve Takviyeli Tüp Yapıların Enerji Değerleri.....	25
BÖLÜM 4.	
GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	28
4.1. Sonuçların Değerlendirilmesi .....	28
4.2. Öneriler .....	28
KAYNAKLAR .....	30
ÖZGEÇMİŞ .....	33

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Si	: Silisyum
Mg	: Magnezyum
Fe	: Demir
Ti	: Titanyum
Cr	: Krom
Cu	: Bakır
Mn	: Mangan
C	: Karbon
P	: Fosfor
S	: Kükürt
Mo	: Molibden
Ni	: Nikel
N	: Azot

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.(a)d=40mm (t=1mm),(b)58 mm(t=1,5mm) çaplı 6063 boru için elde edilen çekme eğrileri.....	7
Şekil 2.2.PVC köpüğün basma zorlanması altındaki gerilme birim şekil değişim eğrisi.....	8
Şekil 2.3.Alüminyum boru numunelerin talaş kaldırma işlemi .....	10
Şekil 2.4.Çapları 40 ve 58 mm alüminyum numuneleri .....	10
Şekil 2.5.Çapları 40 ve 58 mm alüminyum numunelerin aksenal ezilme şekli ....	11
Şekil 2.6.Düşük yoğunluklu PVC dolu alüminyum tüplerin birlikte gösterimi ....	11
Şekil 2.7.Yüksek yoğunluklu PVC dolu alüminyum tüplerin birlikte gösterimi ....	11
Şekil 2.8.Düşük ve yüksek yoğunluklu PVC halka ve silindir tüplerin birlikte gösterimi .....	12
Şekil 3.1. 40 mm çapa sahip takviyesiz tüpün kuvvet-deplasman eğrisi.....	14
Şekil 3.2. 58 mm çapa sahip takviyesiz tüpün kuvvet-deplasman eğrisi.....	15
Şekil 3.3. Boş tüplerin birlikte gösterim şekli.....	16
Şekil 3.4. 40 mm çapında düşük yoğunluklu PVC tüpün gösterim şekli.....	17
Şekil 3.5. 58 mm çapında düşük yoğunluklu PVC tüpün gösterim şekli.....	18
Şekil 3.6. Düşük yoğunluklu PVC halkalı tüpün gösterim şekli.....	19
Şekil 3.7. Düşük yoğunluklu PVC halkalı ve silindir tüpün gösterim şekli.....	20
Şekil 3.8. 40 mm çapında yüksek yoğunluklu PVC tüpün gösterim şekli.....	21
Şekil 3.9. 58 mm çapında yüksek yoğunluklu PVC tüpün gösterim şekli .....	22
Şekil 3.10. Yüksek yoğunluklu PVC halkalı tüpün gösterim şekli .....	23
Şekil 3.11. Yüksek yoğunluklu PVC halka ve silindir tüpün gösterim şekli .....	24
Şekil 3.12. Yüksek yoğunluklu halka & düşük yoğunluklu PVC silindir ve düşük yoğunluklu halka &yüksek yoğunluklu PVC silindir gösterim şekli .....	25



## TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. Kullanılan alüminyum alaşımının (6063-T5) kimyasal özellikleri.....	8
Tablo 2.2. Kullanılan alüminyum alaşımının (6063-T5) mekanik özellikleri .....	8
Tablo 3.1. Alüminyum numunelerin kombinasyonları .....	13
Tablo 3.2. Deneylerin enerji değerleri.....	27

## ÖZET

Anahtar kelimeler: PVC köpük, alüminyum tüp, eksenel yükleme

Bu çalışmada, takviyesiz ve takviyeli metalik tüplerin eksenel yük altında sergiledikleri deformasyon davranışları ve enerji absorbe etme kabiliyetleri incelenmiştir. Metalik tüp olarak 6063-T5 serisi alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Takviye elemanı olarak  $60 \text{ kg/m}^3$  ve  $80 \text{ kg/m}^3$  yoğunluklarına sahip kapalı gözenekli PVC köpükler kullanılmıştır. Tek tüp ve çoklu tüp numune kombinasyonlarının yarıstatik eksenel basma deneyleri yapılmış ve numunelerin absorbe ettikleri enerji değerleri karşılaştırılmıştır. Son olarak tüp yapıların özgül enerji absorbe etme kabiliyetleri incelenmiştir.

# **INVESTIGATION OF THE FOLDING BEHAVIOR OF PVC FOAMED REINFORCED ALUMINUM TUBE PAIR**

## **SUMMARY**

Keywords: PVC foam, aluminum tube, axial loading.

In this study, deformation behaviors and energy absorption capabilities of unreinforced and reinforced metallic tubes under axial load were investigated. 6063-T5 series aluminum alloy was used as metallic tube. As a reinforcement element, closed porous PVC foams with densities of  $60 \text{ kg / m}^3$  and  $80 \text{ kg / m}^3$  was used. Quasi-static tests of single tube and multiple tube sample combinations were made and the energy values of the samples were compared. Finally, the ability of the tube structures to absorb specific energy was investigated.

## **BÖLÜM 1. GİRİŞ**

İnce cidarlı metalik tüpler özgül yük taşıma kabiliyetlerinin yüksek olması nedeni ile gündelik hayatta ve imalat sektöründe geniş bir kullanım alanına sahiptirler. Dayanım/ağırlık oranlarının yüksek olması nedeniyle dolu profillere göre daha yüksek özgül enerji absorbe etme değerleri sunmaktadırlar. Buna karşın teknolojinin ilerlemesi ve yeni malzemelerin ortaya çıkması bu geometrideki yapıların daha da iyileştirilmesine yönelik çalışmaların önünü açmıştır.

İnce cidarlı metalik tüpler, stabiliteleri ve öngörülebilir deformasyon davranışları nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Tüp yapıların enerjiyi absorbe etme değerlerini iyileştirmek için farklı kesitlerde ve geometrik ölçülerdeki tüplerin incelendiği çok sayıda çalışma mevcuttur [1-2].

Hosseini-pour ve arkadaşları tüp yapıların katlanma davranışlarının, tüplerin içinden ve dışından açılacak oluklar yardımıyla yönlendirilebileceğini göstermiştir. Ayrıca çalışmada, katlama kuvvetinin salınımını en aza indirmenin mümkün olduğunu vurgulamıştır [3,4]. Buna ek olarak, köpük, bal peteği gibi dolgu malzemeleri üzerine bazı çalışmalar da metal boruların enerji absorbe etme kapasitesini yükseltebileceğini vurgulamıştır [5,6].

Metalik yapılarda takviye elemanı ile sağlanan enerji artışının, takviye elemanından kaynaklanan ağırlık artışından daha yüksek olması, enerji absorbe edici yapılarda en temel amaçlardan biridir. Bu kapsamda özellikle son yıllarda yapılmış deneysel, teorik ve nümerik çok sayıda çalışma bulmak mümkündür [7-10].

İçi boş profillerin takviye edilmesiyle ilgili çalışmalar, PVC köpük, alüminyum köpük ya da cam elyaf-epoksi yapılar ile sınırlı değildir. Sung-Hyuk LEE ve Nak-Sam CHOĐ [11] yaptıkları çalışmada kare kesitli 6063-T5 profilin alt ve/veya üst yüzeylerine farklı kesitlerde alüminyum levha yapıştırarak yük taşıma kabiliyetini %87.6 ya kadar iyileşme sağlamışlardır. Ayrıca herhangi bir metal profil kullanmaksızın farklı yoğunluktaki PVC, PUR ve PMI köpük materyallerin cam-elyaf ile takviye edildiği çalışmalar da mevcuttur [12].

Köpük dolgulu, çok hücreli tüplerin konfigürasyon tipleri ve tüp uzunluğu, kesit, duvar kalınlığı gibi aksenal ezilme tüplerinin geometrik parametreleri hakkında çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Qiao ve arkadaşları (Qiao, Chen ve Che, 2006), 6063-T5 alüminyum kare tüplerin ezilme davranışını, hasar değerlendirmesi göz önüne alarak incelemişlerdir. Alüminyum tüplerin ezilme tepkisi malzemenin mikro yapısına, sınır koşullarına, duvar kalınlığına ve tüp uzunluğuna ve darbe hızına bağlı olduğunu değerlendirmişlerdir. Ghamarian ve diğerleri köpük dolgulu ve boş uçlu konik ve silindirik borular arasındaki farkı sayısal ve deneysel olarak araştırmışlar.

Chen ve Wierzbicki, sayısal ve analitik yöntemler kullanarak aksenal yükleme altındaki içi boş ve köpük dolgulu çok hücreli tüpleri incelenmiştir. Tek, çift ve üçlü hücre tüplerinin enerji absorbe etme karakteristikleri “Süper Katlanma Elemanı” teorisine göre hesaplanmış ve sayısal sonuçlarla doğrulanmıştır. İkili ve üçlü hücre tüplerinin SEA değerleri, tekli tüplerinkinden daha yüksek bulunduğunu vurgulamıştır (Chen ve Wierzbicki, 2001).

S.R. Guillow ve arkadaşlarının, ince cidarlı dairesel tüplerin aksenal ezilme ile ilgili deneysel araştırma nitelikli çalışmalarından bahsetmişlerdir. 6060-T5 alüminyum tüplerde toplam 70 yarı statik test yapılmıştır. D/t aralığı, önceki çalışmalara göre genişletilerek 10-450 aralığına genişletilmiştir.  $L/D \leq 10$  için deformasyon modları gözlenmiş ve deformasyon modları özel bir grafikte gösterilmiştir. Ortalama ezilme kuvveti,  $F_{AV}$  boyutsallaştırılmamış ve  $F_{AV}/M_P = 72.3(D/t)^{0.32}$  olarak ampirik bir formül oluşturulmuştur. Hem simetrik hem de elmas modlar için test sonuçlarının tek bir eğri

üzerinde yer aldığı söylenmiştir. Mevcut teoriler ve  $F_{AV}$  için yapılan test sonuçları arasında kapsamlı karşılaştırmalar yapılmıştır. Bu, bazı teorik çalışmaların gerekli olabileceğini öne sürerek bazı eksiklikleri ortaya çıkarmıştır.  $F_{MAX}/F_{AV}$  oranının,  $D/t$  oranındaki bir artış önemli faktör olduğunu vurgulamışlar. Ayrıca farklı yoğunlukta poliüretan köpükle takviye edilmiş alüminyum tüplerde incelenmiştir.

D.AL.GALİB ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada,  $D/t=14$  A6060 T5 alüminyum dairesel tüpler üzerinde yapılan deneylerin statik ve dinamik sonuçları verilmiştir. Aynı tüplerde elde edilen sayısal simülasyonlar, önerilen sayısal modelleri doğrulamak için bu deneysel veritabanları kullanarak karşılaştırma yapılmıştır. Bu modelleri kullanarak parametrik çalışmalar yapılmıştır: (1) tüplerin davranışını, çarpma tertibatının kütesini ve hızını değiştirirken değerlendirmek; (2) bu dairesel tüplerin statik ve dinamik davranışları üzerindeki geometrik kusurların, destek koşullarının ve yükleme türünün etkilerini incelemişler. Bu çalışmanın ana sonuçları aşağıdaki gibi özetlenmiştir:

D.AL.GALİB ve arkadaşları yaptıkları çalışmada sayısal model ve deneysel şeklinde iki farklı model üzerinde durmuşlardır. Sayısal model, ilk pik kuvvetini %1 ve ortalama kuvveti %4 farkla tahmin etmiştir. Ortalama kuvvetin farklı analitik çözümlerden karşılaştırılmasında  $10 < D/t < 65$  için sayısal tahminler arasında iyi bir uyum olduğunu göstermiştir. Bu nedenle, ince cidarlı tüplerin katlanma davranışını tahmin etmek için sayısal simülasyon yeteneği ile, bu tür analizlerin, gerçek testlerin gerçekleştirilmesinden önce dairesel alüminyum tüplerin tasarımında ve analizinde oldukça faydalı olduğunu vurgulamışlar.

Eksenel yük altında dairesel tüpün deforamasyonu, A.A.A. Alghamdi'nin çalışmalarında mekanikteki klasik bir sorun olarak dile getirilmiştir. Enerji emme kapasitesi açısından, eksenel sıkıştırma altındaki dairesel tüplerin en iyi cihazlardan birinde sağlandığı bulunmuştur. Bu özellik belki de neden enerji emici sistemlerde en sık kullanılan bileşenler olduklarını açıklamıştır [13-19]. Dairesel tüp popüler bir enerji emicidir, çünkü bazı uygulamalarda, enerji emicinin temel özelliği oldukça sabit

bir çalışma kuvveti sağlandığını söylemiştir. Ayrıca, nispeten yüksek enerji emme kapasitesine, birim kütle başına ve strok uzunluğuna sahip olduğunu vurgulamıştır. Örneğin, aksenal sıkıştırma ile yanal sıkıştırmanın karşılaştırılmasında, aksenal bükülme modu, plakalarda yanal olarak sıkıştırıldığında aynı tüpün yaklaşık 10 katı olan belirli bir enerji absorbe etme kapasitesine sahip olduğunu söylemiştir [20]. Üstelik aksenal yük altındaki bir tüpün, tüm malzemenin, enerjisinin plastik işleme emilmesine sağlanabilirliği hakkında nitelikli olduğunu söylemiştir.

Abramowicz ve Jones [21-23], statik ve dinamik yükleme koşullarında aksenal olarak ezilmeye maruz tüplerin Euler (global) burkulma modundan aşamalı bükme moduna geçişini incelemişler. Geçiş noktasının boru uzunluğuna, kesitine, malzeme tipine, pekleşmeye, zorlanma hızına ve sınır koşullarına bağlı olduğunu bulmuşlardır.

Teorik çalışmalar genellikle dinamik (atalet) etkileri görmezden gelir ve problemi düşük darbe hızlarında kabul edilebilir bir yarı-statik durum olarak görür. İnce cidarlı tüplerin ( $D/t > 20$ ) aksenal yüklere maruz kaldıklarında dairesel ve kare kesitli davranışları, Pugsley ve Macaulay'ın öncü çalışmalarından bu yana özellikle ilgi çekmiştir [25].

Boyutsuz modeli Johnson ve arkadaşları [26], yazarların esas itibarıyla boyutsuz bir deformasyon modu olarak gördükleri ve karşılık gelen ortalama yükünü hesapladıklarını öne sürmüşlerdir. Önerilen model, ortalama kırma yükünün makul tahminlerini vermiştir [27].

Mamalis ve Johnson [28], yarı-statik koşullar altında alüminyum boruların aksenal ezilmesini araştırmıştır. Mamalis ve diğerleri [29,30], ince PVC tüplerin iç yivlerle aksenal kırılmasını hem teorik hem de deneysel olarak araştırmıştır. Mamalis ve diğerleri [31] ayrıca ince iki malzemeli dairesel tüplerin aksenal ezilme davranışını incelemişlerdir. Çelik, alüminyum ve PVC gibi farklı malzemeler kullanıldığını söylemişler.

Wierzbicki ve diğeri [32-34], aksel simetrik deformasyon modunda dairesel tüplerin aşamalı parçalanması için yeni bir model önermişlerdir. S şeklinde bir katlama elemanı ortaya çıkarmışlar. Sonuçtaki denklemler  $D/t > 20$  için deneysel değerlerle iyi bir uyum içinde olduğunu vurgulamışlardır.

Eksenel katlanma üzerinde yapılan çalışmalarda katlama mesafesinin yakınsak olduğu bildirilmiştir. Katlanma uzunluğu tüp yapının geometrik ölçülerinden çap ve et kalınlığı ile doğrudan ilişkilidir [35]. Katlama uzunluğu bükülme olarak düşünülebilir. Özellikle ilk katlama işleminden sonra oluşan kıvrımların gecikmesi tüp beklendiği gibi emilen enerjinin büyüklüğünü artıracaktır. Her ne kadar tüpün enerji emme kapasitesini arttırmak için birkaç denemeyle bazı çalışmalar yapılmış olsa da, açık literatürde ince cidarlı tüpün halka şeklinde döndürülmesi üzerine bir çalışma yapılmamıştır. Buna göre, aksel deformasyon sırasında emilen enerjinin iyileştirilmesinin mümkün olduğu düşünülmektedir.

Bu çalışmada iki farklı çapa sahip takviyesiz alüminyum tüpler ve bu tüplerin farklı kombinasyonlarda PVC köpükle takviye edilmesi durumu için aksel deformasyon davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Tüm deneyler yarı statik teste tabi tutulmuş, numunelerin deformasyon davranışları ve enerji absorbe değerleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Enerji absorbe etme bakımından en uygun takviye modelinin belirlenmesi ana hedefi oluşturmaktadır.



## **BÖLÜM 2. DENEYSEL ÇALIŞMA**

### **2.1. Alüminyum Malzemenin Genel Özellikleri**

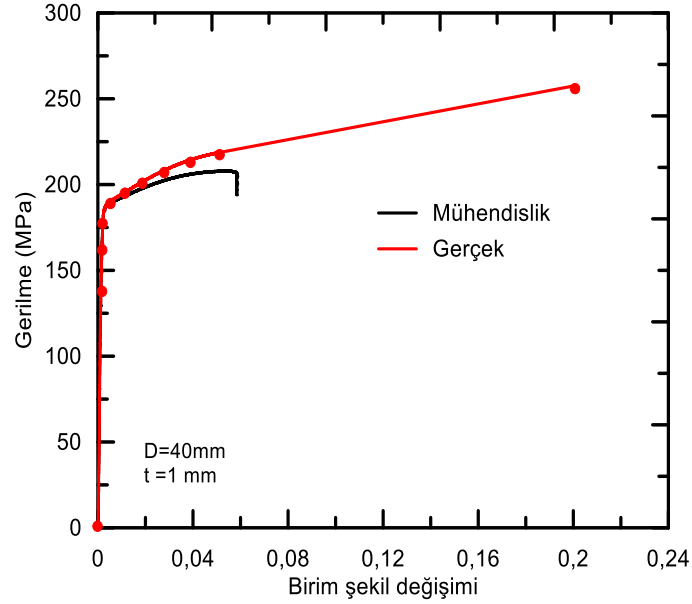
Çalışmalarda yüksek korozyon direnci, nispeten ucuz olması ve kolay temin edilebilmesi nedeniyle 6063-T5 kalitesinde alüminyum boru tercih edilmiştir. Alüminyum'un genel özellikleri aşağıda özetlenmiştir:

1. Alüminyum hafiftir. Aynı hacimdeki bir çelik malzemenin ağırlığının ancak üçte biri kadar ağırlıktadır.
2. Alüminyum, hava şartlarına, yiyecek maddelerine ve günlük yaşamda kullanılan pek çok sıvı ve gazlara karşı dayanıklıdır.
3. Alüminyumun anodik oksidasyon (eloksal), lâke maddeleri vs. gibi uygulamalar ile uzun müddet korunabilir. Çeşitli alüminyum alaşımlarının mukavemeti, normal yapı çeliğinin mukavemetine denk veya daha yüksektir.
4. Alüminyum, işlenmesi kolay bir metaldir. Kalınlığı 1/100 mm. den daha ince olan folyo veya tel haline getirilebilir.
5. Alüminyum ısı ve elektriği bakır kadar iyi iletir.
6. Alüminyum'a şekil vermek için döküm, dövme, haddeleme, presleme, ekstrüzyon, çekme gibi tüm metodlar uygulanabilir.

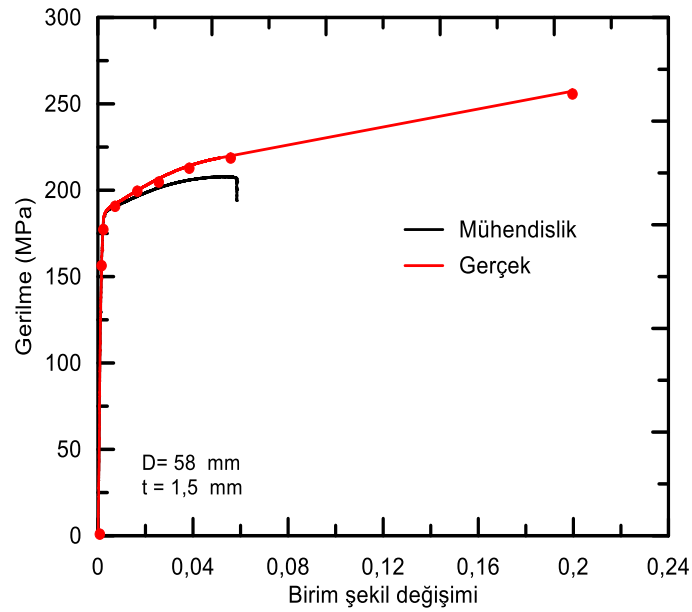
### **2.2. Alüminyum Malzeme Özellikleri**

Deneysel çalışmada 6063-T5 alüminyum alaşımı borular kullanılmıştır. Tüpler sırasıyla 58 mm ve 40 mm çapa sahiptir. Tüp yapılarının mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla ASTM standartına göre çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.1.'de iki farklı çaptaki alüminyum tüplere ait gerilme-

birim şekil değişimi eğrileri verilmiştir. Şekil 2.2.'de iki farklı çaptaki alüminyum tüplere ait PVC köpüğün basma zorlanması altındaki gerilme birim şekil değişim eğrisi verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 2.1. (a) d= 40 (t=1 mm) (b) 58 mm (t=1,5mm) çaplı 6063 boru için elde edilen çekme eğrileri

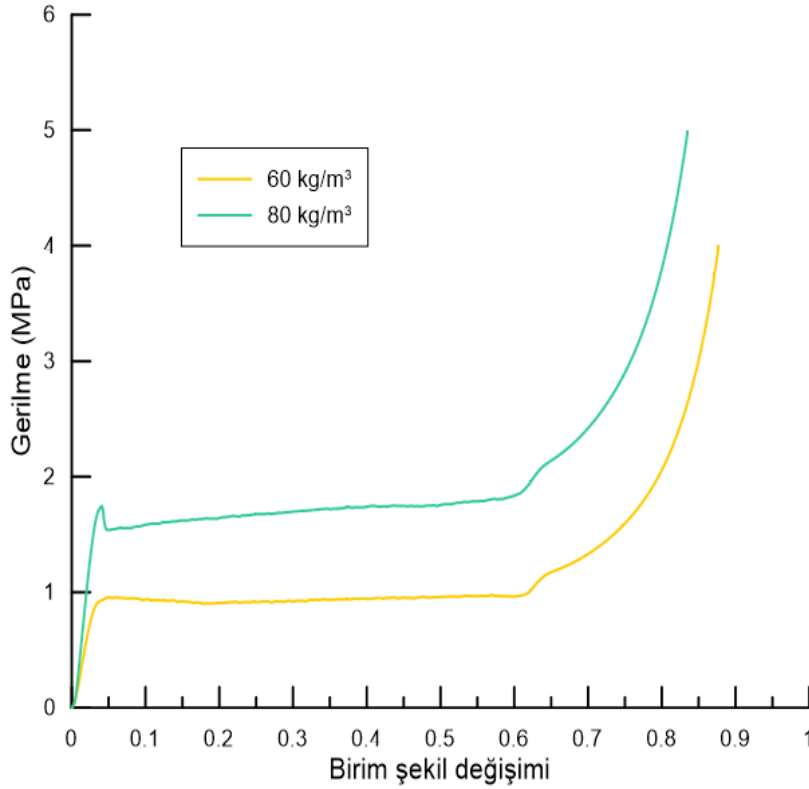
Ekli tabloda yüksek ve düşük yoğunluklu PVC tüplerin eğrisi gösterilmiştir. Tablo 2.1.'de kullanılan alüminyum alaşımının kimyasal özellikleri verilmiştir. Kullanılan alüminyum alaşımına ait malzemenin mekanik özellikleri ise Tablo 2.2'de verilmiştir.

Kimyasal Bileşimi	% DEGER
Silisyum (Si)	0,20-0,60
Krom (Cr)	0,00-0,10
Mangan (Mn)	0,00-0,10
Magnezyum (Mg)	0,45-0,90
Bakır (Cu)	0,00-0,10
Titanyum (Ti)	0,00-0,10
Çinko (Zn)	0,00-0,10
Demir (Fe)	0,00-0,35

Tablo 2.1. Kullanılan alüminyum alaşımının (6063-T5) kimyasal özellikleri

Mekanik Özellikler	Değer
Uzama	%21
Elastisite	69 GPa
Akma Mukavemeti	188 MPa
Çekme Mukavemeti	212 MPa
Sertlik	70-72 HB

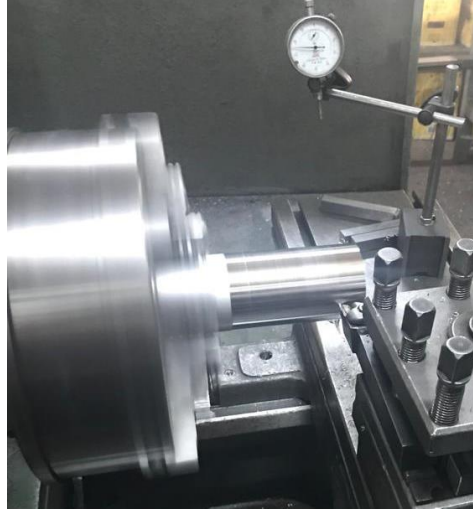
Tablo 2.2. Kullanılan alüminyum alaşımının (6063-T5) mekanik özellikleri



Şekil 2.2. PVC köpüğün basma zorlanması altındaki gerilme birim şekil değişim eğrisi

### 2.3. Numunelerin Hazırlanması ve Numune Kombinasyonları

Ticari olarak 60 mm çap ve 2,5 mm cidar kalınlığında temin edilen borular tornada içinden ve dışından talaş kaldırmak suretiyle 58 mm çapa ve yaklaşık 1,5 mm cidar kalınlığına düşürülmüştür. Bunun yanı sıra 40 mm çapta ve 1 mm cidar kalınlığındaki alüminyum tüpler sadece istenilen uzunlukta kesilerek deneye hazır hale getirilmiştir. Tüm tüp yapılar aksenal yükün tüm cidara homojen dağılabilmesi amacıyla alt ve üst yüzeylerinden tornalanarak paralellik sağlanmıştır. Tüp yapıların torna işlemine ait bir görüntü Şekil 2.3.'de verilmiştir.



Şekil 2.3. Alüminyum boru numunelerden talaş kaldırma işlemi

Talaş kaldırma işlemi sonrasında 40 ve 58 mm çaplı tüpler 50 mm yükseklikte kesilmiştir. Şekil 2.4.'de iki farklı çaptaki takviyesiz tüp yapılarının görüntüleri verilmiştir.



Şekil 2.4. Çapları 40 ve 58 mm alüminyum numuneleri

Deneyler dört ana grupta yapılmıştır. İlk grup deneylerde, takviyesiz tek ve ikili tüplerin aksenal ezilme durumları incelenmiştir. Bu numunelere ait deney öncesi görüntüler Şekil 2.5.'de verilmiştir. Bu grup numunelerde öncelikle 40 mm çapa sahip tüp, sonrasında 58 mm çapa sahip tüp ve son olarak ta iki tüpün iç içe kullanıldığı ikili tüp yapının deneyi gerçekleştirilmiştir. İkili tüp yapıda, sağlıklı sonuçlar elde etmek adına tüplerin merkezlenmesine özellikle dikkat edilmiştir.



Şekil 2.5. Çapları 40 ve 58 mm alüminyum numunelerin aksel ezilme şekli

İkinci aşama deneylerde, Şekil 2.6.'da verilen  $60 \text{ kg/m}^3$  yoğunluğa sahip PVC köpüğün takviye elemanı olarak kullanıldığı numunelerin aksel ezilme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu grupta öncelikle PVC köpük silindirle takviye edilmiş 58 ve 40 mm çaplı numunelerin deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sonrasında ikili tüp yapılardan sadece halka köpüğün kullanıldığı ikili tüp yapının ve son olarak halka ve silindirik PVC köpüklerin birlikte kullanıldığı ikili tüp yapının aksel ezilme deneyleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.6. Düşük yoğunluklu PVC dolu alüminyum tüplerin birlikte gösterimi

Üçüncü grup deneylerde kullanılan numunelerin deney öncesi görüntüleri Şekil 2.7.'de verilmiştir. Bu numunelerin içeriden takviye edilmesinde  $80 \text{ kg/m}^3$  yoğunluğa sahip PVC köpük kullanılmıştır. Numunelerin deney sırası ikinci grup deneylerle aynıdır.



Şekil 2.7. Yüksek yoğunluklu PVC dolu alüminyum tüplerin birlikte gösterimi

Son grup deneylerde ise farklı yoğunluklardaki halka ve silindirik PVC köpüklerin birlikte kullanıldığı ikili tüp numuneler vardır. Numunelerin deney öncesi görüntüleri Şekil 2.8.'de verilmiştir. Bu numunelerde halka köpük ile silindirik köpüğün yoğunlukları farklı seçilmiştir. Dolayısıyla aynı numunede halkanın düşük yoğunluklu olması durumunda silindirik köpüğün yüksek yoğunluklu olması gerekmektedir.



Şekil 2.8. Düşük ve yüksek yoğunluklu PVC halka ve silindir tüplerin birlikte gösterim şekli

## BÖLÜM 3. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

### 3.1. Alüminyum Tüplerin Deney Sonuçları

#### 3.1.1. Boş tüplerin grafiği

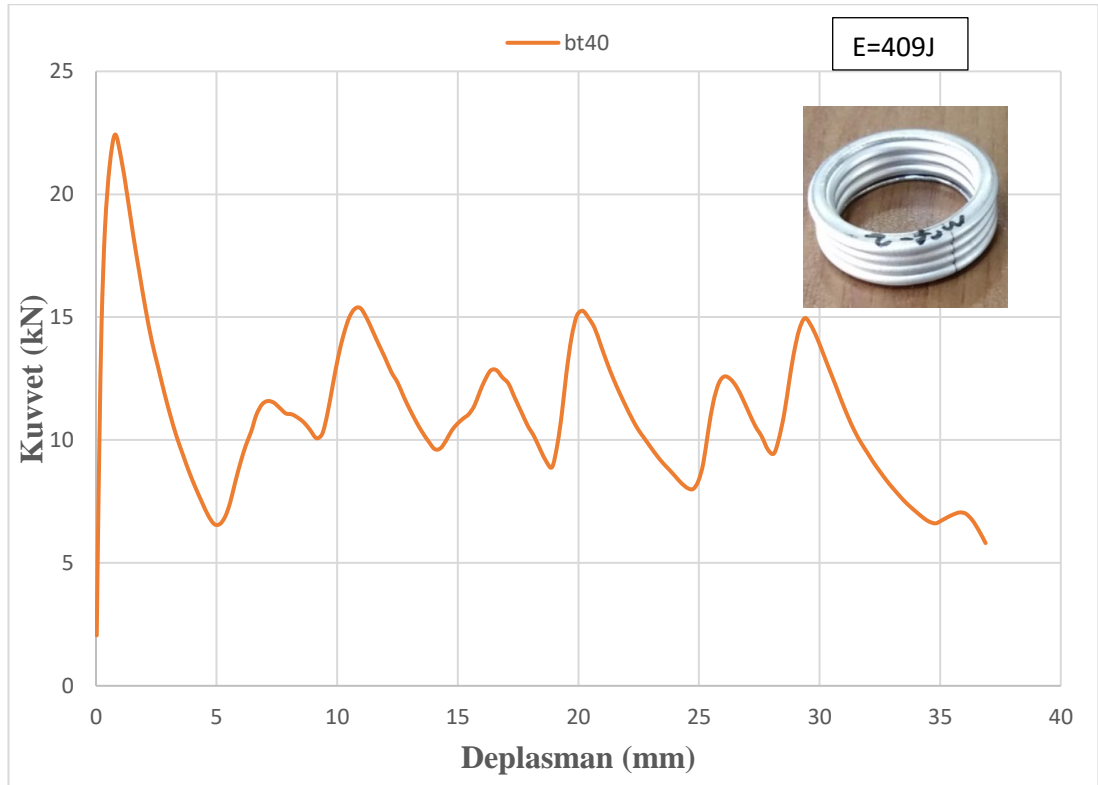
Tablo 3.1.'de numune kombinasyonları ağırlıkları ile birlikte verilmiştir.

TANIM	KOD	AÇIKLAMA	AĞIRLIK (gr)
Boş tüpler	bt-40	40 mm çaplı tüp	16,5
	bt -58	58 mm çaplı tüp	31,61
	bt -(40+58)	40 + 58 mm çaplı birlikte tüpler	48,16
Düşük yoğunluklu PVC	dyp-40	PVC dolu 40 mm çaplı tüp	20,32
	dyp-58	PVC dolu 58 mm çaplı tüp	39
	dyph-(40+58)	PVC halkalı 40 + 58 mm çaplı tüpler	51,78
	dyphs-(40+58)	PVC halkalı ve silindirli 40 + 58 mm çaplı tüpler	55,55
Yüksek yoğunluklu PVC	yyp-40	PVC dolu 40 mm çaplı tüp	25,63
	yyp-58	PVC dolu 58 mm çaplı tüp	41,47
	yyph-(40+58)	PVC halkalı 40+58 mm çaplı tüpler	52,99
	yyphs-(40+58)	PVC halkalı ve silindirli 40+58 mm çaplı tüpler	58,02
Düşük + yüksek yoğunluklu PVC birlikte	dyh&yys (40+58)	Düşük yoğunluklu halka ve Yüksek yoğunluklu silindir PVC 40+58 mm çaplı tüpler	56,81
	yyh&dys (40+58)	Yüksek yoğunluklu halka ve Düşük yoğunluklu silindir PVC 40+58 mm çaplı tüpler	56,76

Tablo 3.1. Alüminyum numune kombinasyonları



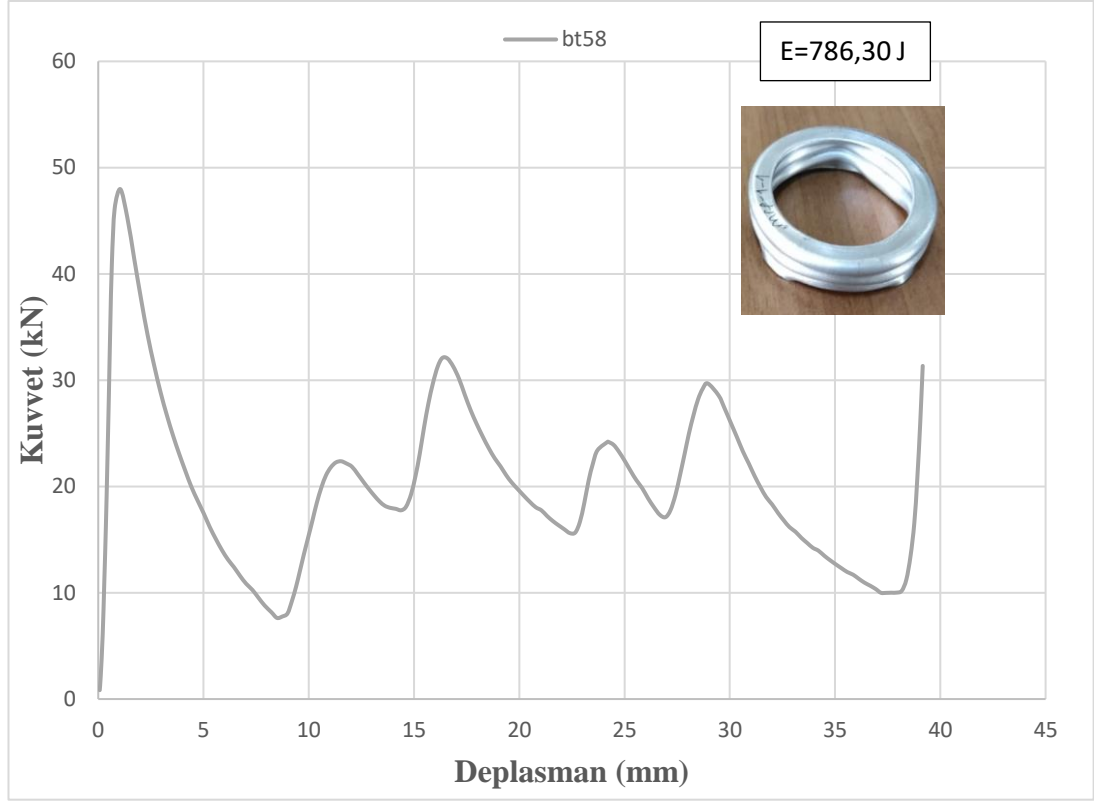
Öncelikle, takviyesiz tüplerden 40 mm ve 58 mm çapa sahip numunelerin aksel ezilme deneyleri gerçekleştirilmiştir.Şekil 3.1.'de 40 mm çapa sahip numunenin kuvvet-deplasman eğrisi verilmiştir. 40 mm çapındaki boş tüpün ilk kuvvet değeri 22,4 kN'a çıkmıştır. Ortalama kuvvet değeri ise 11,05 kN değerine ulaşmıştır. Enerji miktarı ise 409 J olmuştur. Dolayısıyla, aynı boyda fakat farklı çaplara sahip boş tüplerinin enerji absorbe etme değerleri farklı olmuştur. Deney sonrası 40 mm çapında alüminyum tüpün görüntüsü grafiğin yanında verilmiştir.Görüldüğü üzere deformasyon şekil değişiminden sonra dörtlü simetrik katlanmada sergilenmiştir.Deney sonrası incelendiğinde numunenin plastik deformasyona uğradığı görülmüştür.



Şekil 3.1. 40 mm çapa sahip takviyesiz tüpün kuvvet-deplasman eğrisi

Şekil 3.2.'de 58 mm çapa sahip numunenin kuvvet-deplasman eğrisi verilmiştir.Deney sonrası 58 mm çapında alüminyum tüpün görüntüsü grafiğin yanında verilmiştir.Tüpün ilk pik kuvvetinden sonra üçüncü katlanmada içe doğru bir şekil değişimi sergilenmiştir. 58 mm çapındaki boş tüpün ilk kuvvet değeri 48,5 kN'a

çıkmıştır. Ortalama kuvvet değeri ise 19,77 kN değerine ulaşmıştır. Enerji değeri ise 786,30 J olmuştur. Deney sonrası incelendiğinde numunenin plastik deformasyona uğradığı görülmüştür. Takviyesiz 58 mm çapında tüpün enerji absorbe etme miktarı yüksek değerlere ulaşmıştır .

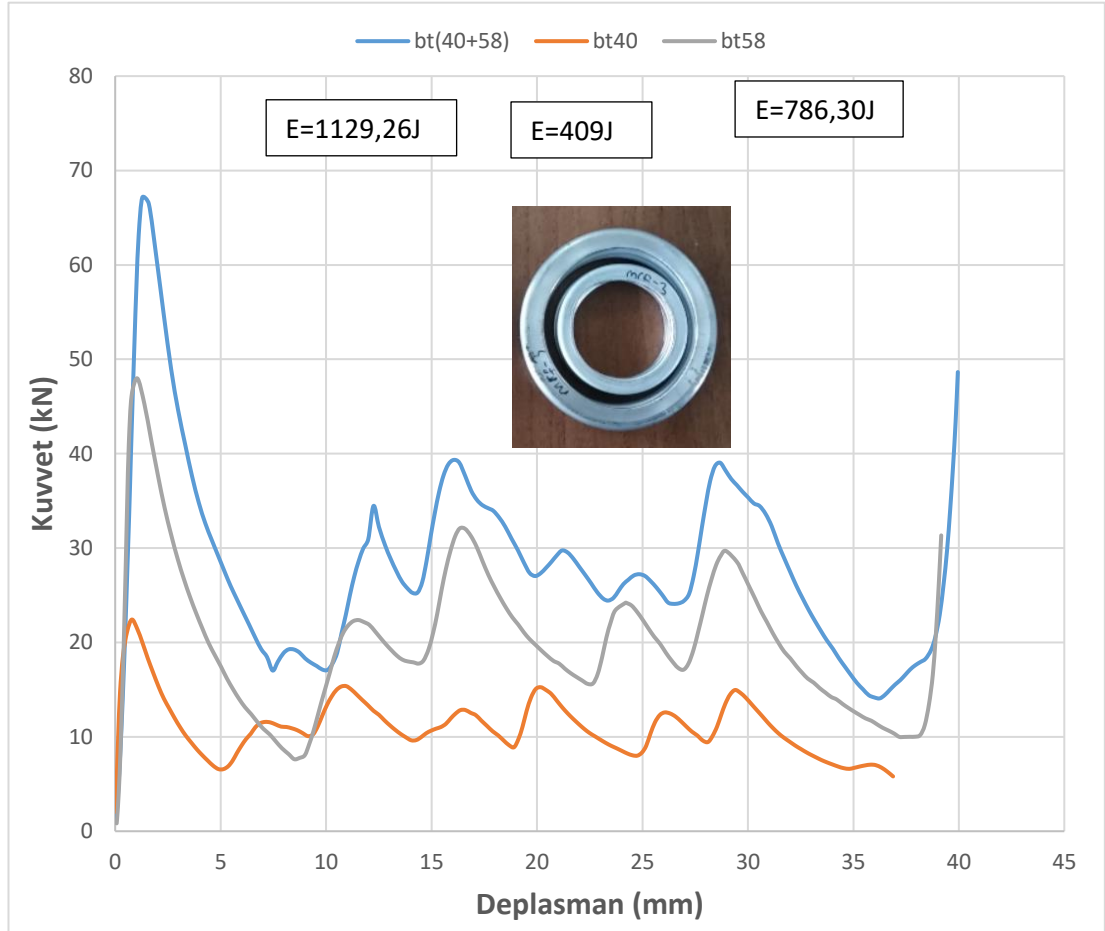


Şekil 3.2. 58 mm çapa sahip takviyesiz tüpün kuvvet-deplasman eğrisi

Şekil 3.3.'de 40 mm ve 58 mm çapa sahip tüplerin birlikte kullanıldığı takviyesiz ikili tüp numune ile tekli tüplerin kuvvet-deplasman eğrileri birlikte verilmiştir. Takviyesiz tüplerin birlikte (iç içe) olduğu deney kombinasyonunda malzemenin enerji absorbe etme miktarındaki değer daha yüksek olduğu anlaşılmıştır. Sonuç olarak malzemenin enerji absorbe etme miktarı, tüpün cidar kalınlığı, eksenel yönde uygulanan kuvvet değeri ve ezilme aralığına bağlıdır.

Deneylelerden elde edilen 40 ve 58 mm boş tüplerin kuvvet-yer değiştirme grafikleri ele alınmıştır. 40 mm çapındaki boş tüpte ise grafikte görüldüğü üzere düzgün kuvvet-deplasman şekli yer almaktadır. Bu tüplerin birlikte yer aldığı grafikte görüldüğü

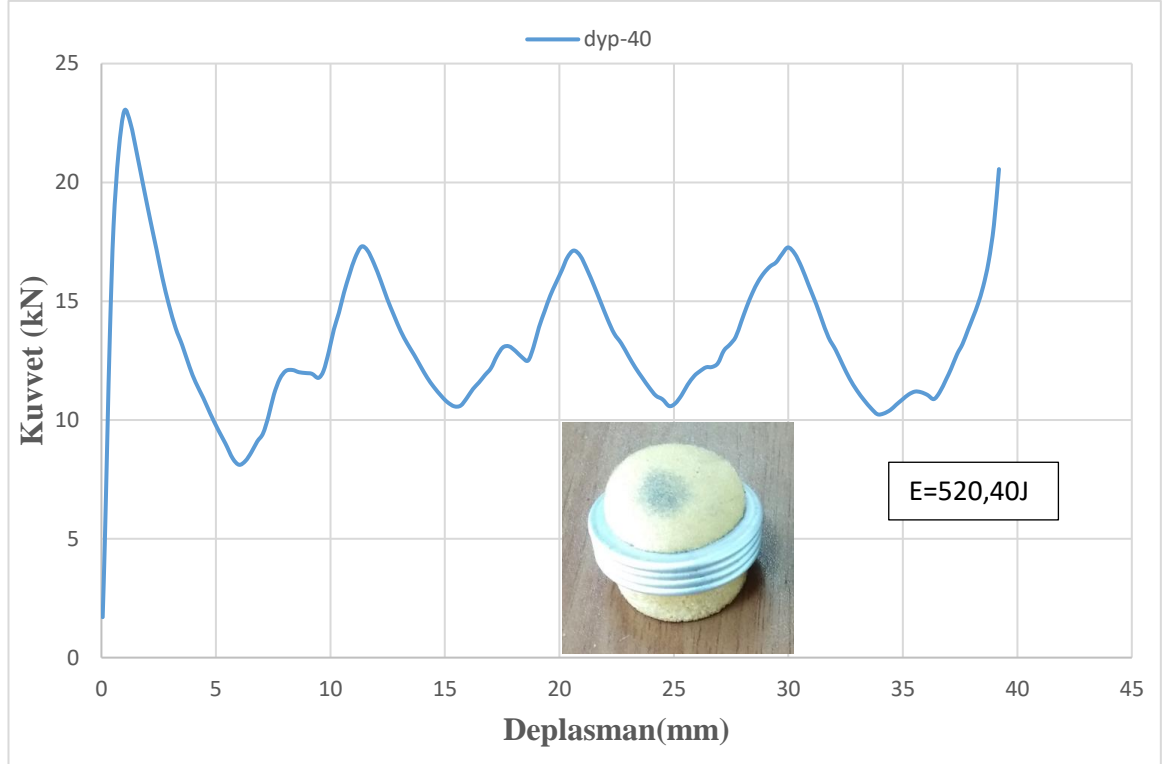
üzere kuvvetin artması birim şekil değişiminde ve enerji değerlerindeki miktarın yüksek olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 3.3. Boş tüplerin kuvvet-deplasman grafiği

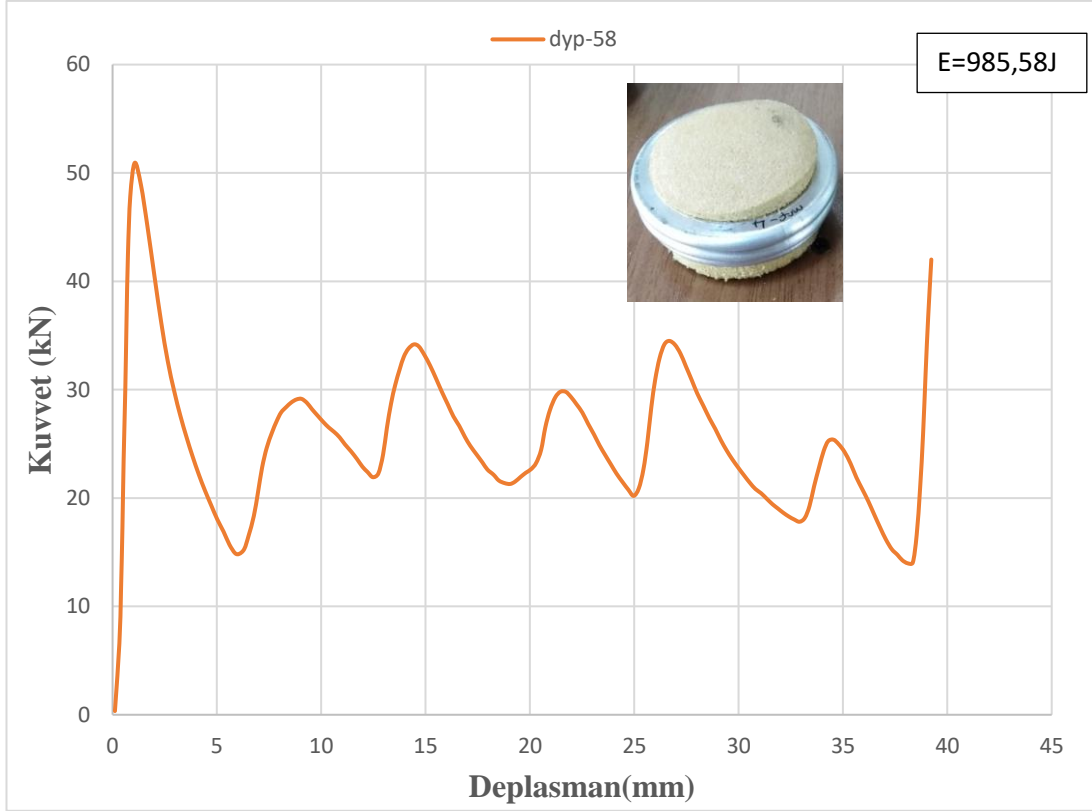
### 3.1.2. Düşük yoğunluklu PVC köpük takviyeli tüplerin deney sonuçları

Şekil 3.4.'de düşük yoğunluklu PVC köpük takviyeli 40 mm çapa sahip numunenin kuvvet-deplasman eğrisi verilmiştir. Düşük yoğunluklu PVC köpüğün ilk pik kuvveti 23kN, ortalama kuvveti ise 13,26 kN değerlerine ulaşmıştır. Takviyeli alüminyum tüpün enerji değeri ise 520,4 J olmuştur. Deney sonrası 40 mm çapında alüminyum tüpün görüntüsü grafiğin yanında verilmiştir. Görüldüğü üzere deformasyon şekil değişiminden sonra dörtlü simetrik katlanmada sergilenmiştir. Deney sonrası incelendiğinde numunenin plastik deformasyona uğradığı görülmüştür. Takviye edilen PVC köpük, tüpün düzgün katlanma sergilediği görülmüştür.



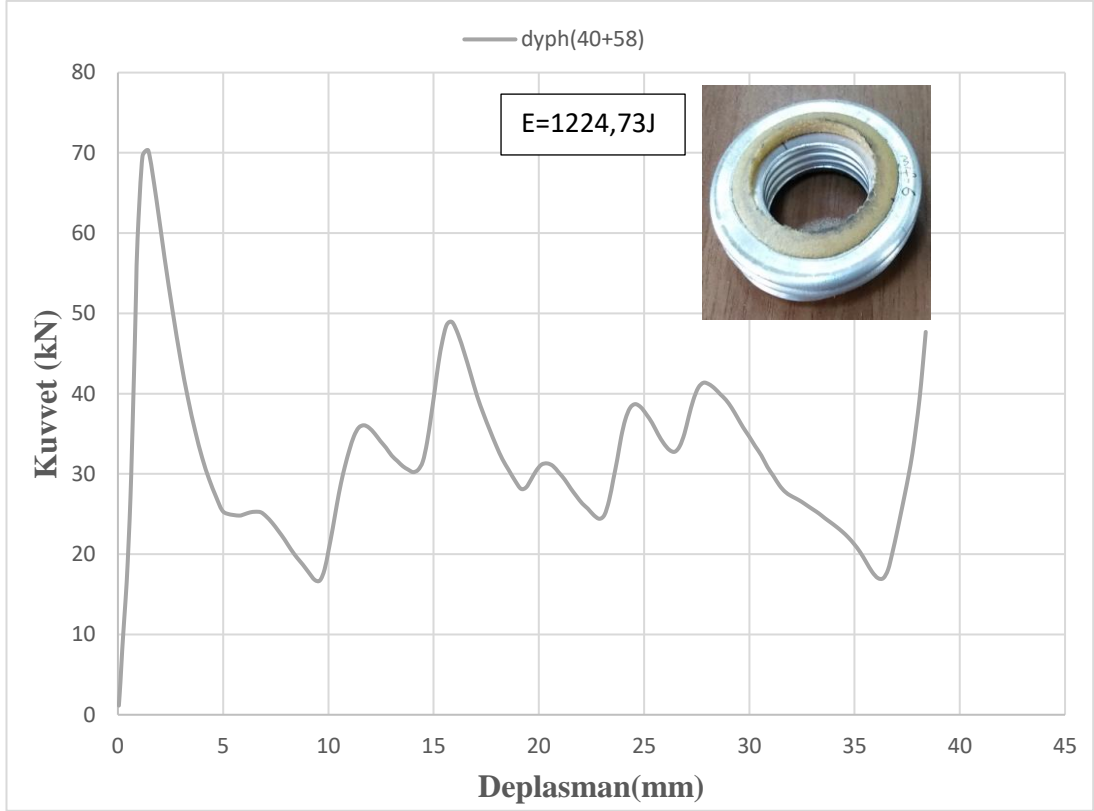
Şekil 3.4. 40 mm çapında düşük yoğunluklu PVC tüpün kuvvet-deplasman grafiği

Şekil 3.5.'de düşük yoğunluklu PVC köpük takviyeli 58 mm çapa sahip numunenin kuvvet-deplasman eğrisi verilmiştir. Düşük yoğunluklu PVC köpüğün ilk pik kuvveti 51kN, ortalama kuvveti ise 25,16 kN değerlerine ulaşmıştır. Takviyeli alüminyum tüpün enerji değeri ise 985,58 J olmuştur. Deney sonrası 58 mm çapında alüminyum tüpün görüntüsü grafiğin yanında verilmiştir. Görüldüğü üzere deformasyon şekil değişiminden sonra dörtlü simetrik katlanmada sergilenmiştir. Deney sonrası incelendiğinde numunenin plastik deformasyona uğradığı görülmüştür.



Şekil 3.5. 58 mm çapında düşük yoğunluklu PVC tüpün kuvvet-deplasman grafiği

Şekil 3.6.'da düşük yoğunluklu PVC halkalı tüpün kuvvet-deplasman eğrisi verilmiştir. Deney sonrası düşük yoğunluklu PVC halkalı alüminyum tüpün görüntüsü grafik yanında verilmiştir. Görüldüğü üzere deformasyon şekil değişiminden sonra dördü simetrik katlanmada sergilenmiştir. Düşük yoğunluklu PVC halkalı tüpün ilk pik kuvveti 70,2 kN, ortalama kuvveti ise 31,5 kN değerlerine ulaşmıştır. Takviyeli alüminyum tüpün enerji değeri ise 1224,73 J olmuştur. Deney sonrası incelendiğinde numunenin plastik deformasyona uğradığı görülmüştür.

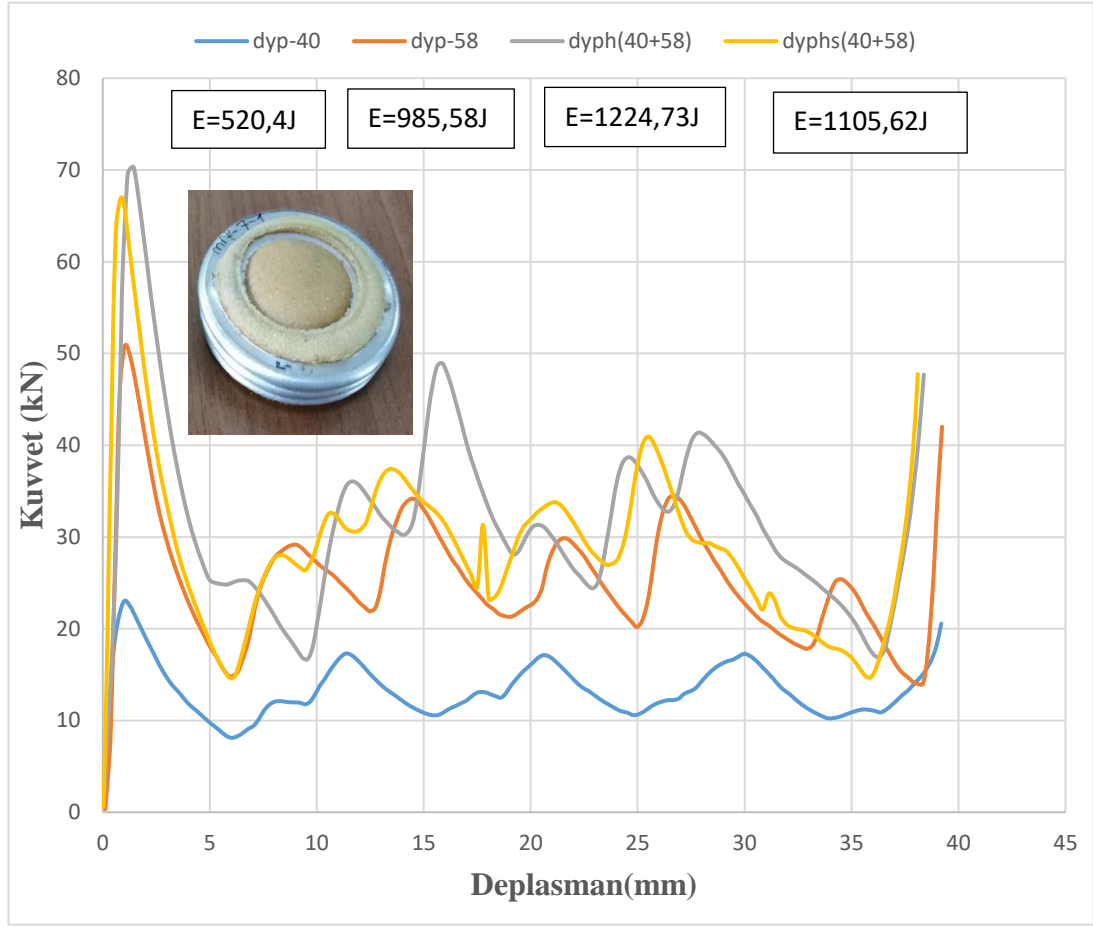


Şekil 3.6. Düşük yoğunluklu PVC halkalı tüpün kuvvet-deplasman grafiği

Kuvvetin en yüksek seviyedeki artış miktarından sonra düşük yoğunluklu halkanın arada ezilmesi ile şekil değişiminde ve yer değiştirmede artış görülmektedir. Düşük yoğunluklu PVC halka ve silindir tüpün kuvvet-deplasman grafiği Şekil 3.7.'de verilmiştir. Aşağıda verilmiş dörtlü kombinasyon grafikte kuvvetin ve enerji değerinin yüksek olduğu görülmüştür. dyp-40 no'lu takviyeli tüpün ilk pik değeri 23 kN, ortalama kuvvet ise 13,26 kN; dyp-58 no'lu takviyeli tüpün ilk pik değeri 51 kN, ortalama kuvvet ise 25,16 kN; dyph-(40+58) no'lu takviyeli tüpün ilk pik değeri 70,2 kN, ortalama kuvvet ise 31,5 kN; dyphs-(40+58) no'lu takviyeli tüpün ilk pik değeri 66 kN, ortalama kuvvet ise 28,79 kN değerlerine ulaşmıştır.

Dolayısıyla dyp-40 no'lu takviyeli tüp hem ilk kuvvet, hem de ortalama kuvvet bakımından en düşük performans gösteren numune olmuştur. Diğer taraftan, ilk kuvvetin en büyük değerini aldığı numune dyph-(40+58) no'lu takviyeli tüp olup, benzer şekilde en yüksek ortalama kuvvet değeri de (31.5kN) bu numune elde

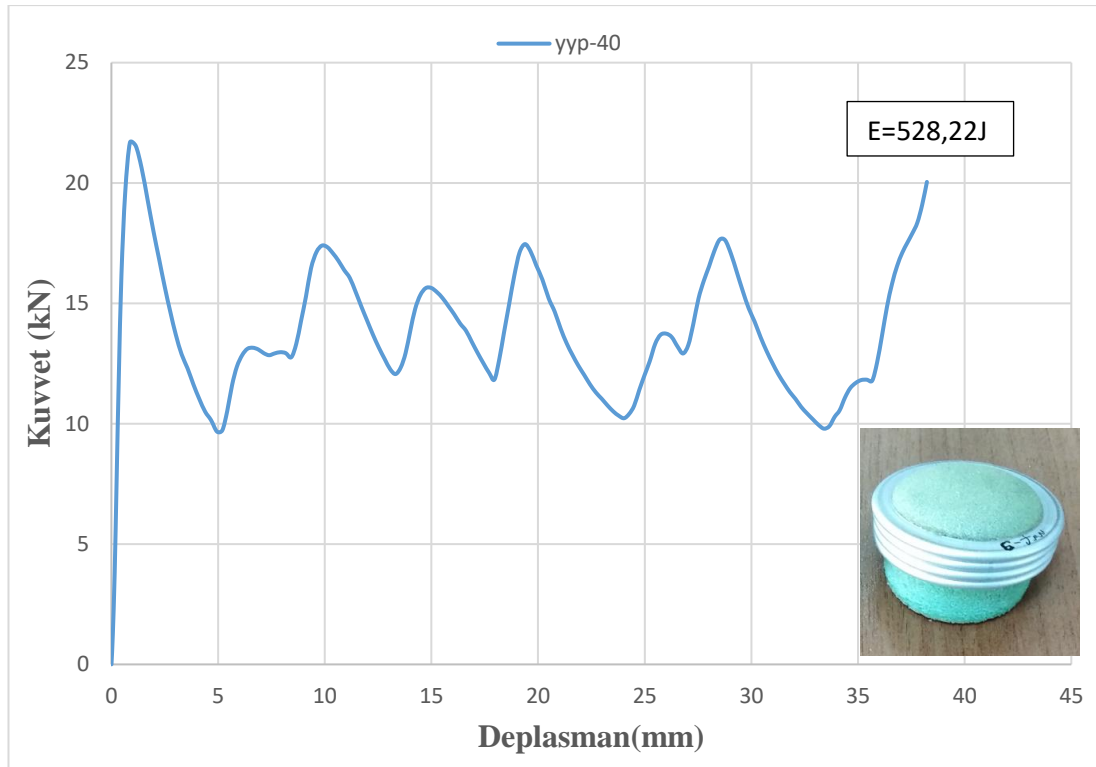
edilmiştir. Düşük yoğunluklu PVC halka ve silindir takviyeli tüpün enerji değerleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.7. Düşük yoğunluklu PVC halkalı ve silindir tüpün kuvvet-deplasman grafiği

### 3.1.3. Yüksek yoğunluklu PVC tüplerin grafiği

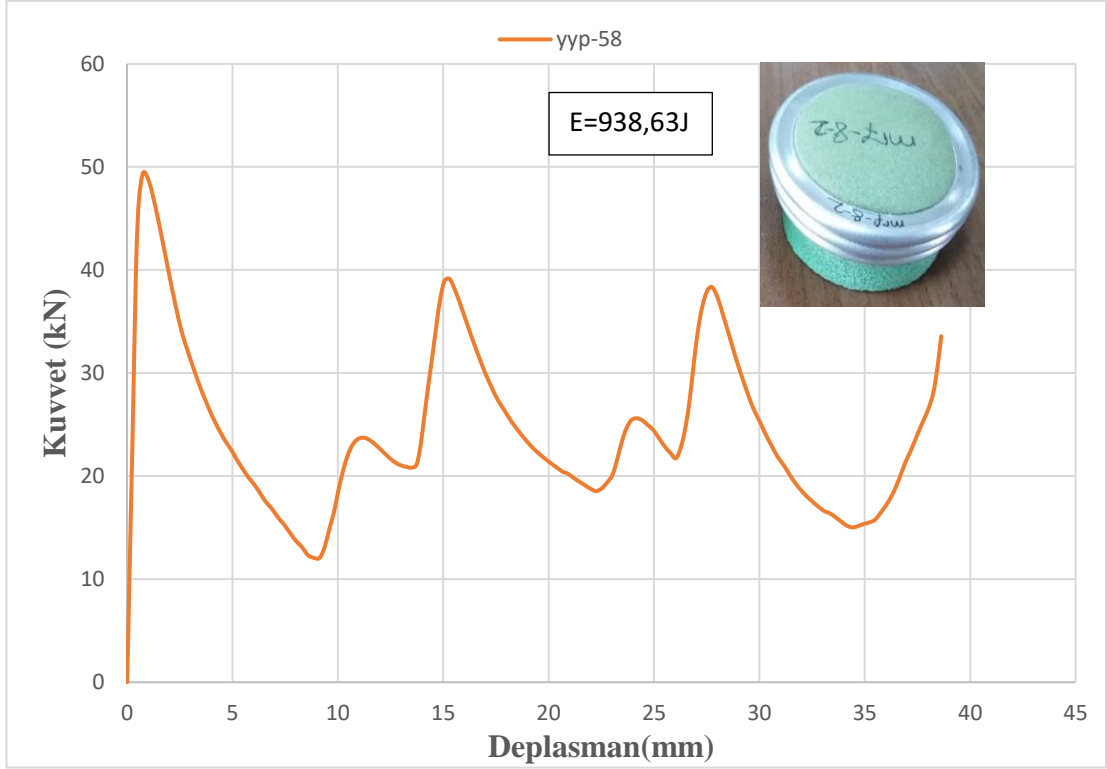
Şekil 3.8.'de 40 mm çapında yüksek yoğunluklu PVC tüpün kuvvet-deplasman grafiği verilmiştir. Takviyeli tüpün ilk kuvvet değeri 21,5 kN ,ortalama kuvvet değeri de 13,64 kN'dur. Enerji değeri ise  $E=528,22$  J olmuştur. İkinci pik kuvvet değeri ise 18 kN'dur. Malzemenin deformasyona uğradıktan sonraki kuvvet değerlerinin düşük olduğu görülmüştür. Deney sonrası 40 mm çapında alüminyum tüpün görüntüsü grafiğin yanında verilmiştir. Görüldüğü üzere deformasyon şekil değişiminden sonra dörtlü simetrik katlanmada sergilenmiştir. Deney sonrası incelendiğinde numunenin plastik deformasyona uğradığı görülmüştür.



Şekil 3.8. 40 mm çapında yüksek yoğunluklu PVC tüpün kuvvet-deplasman grafiği

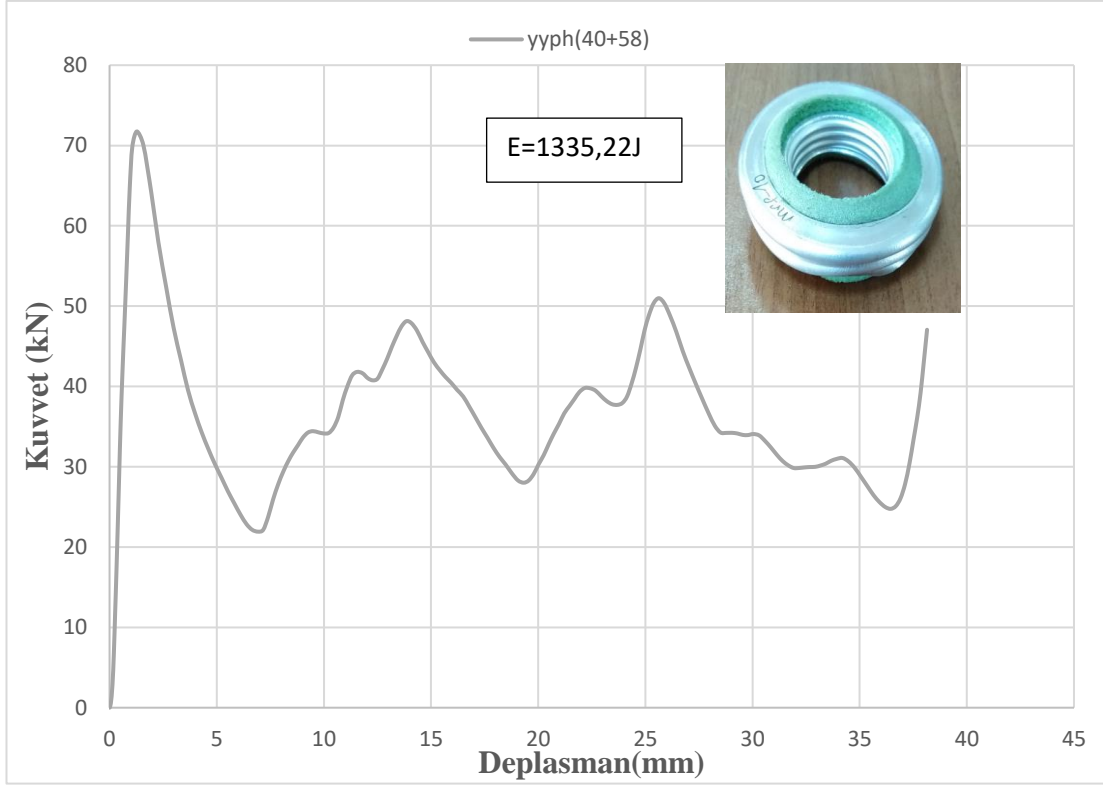
Yüksek yoğunluklu PVC dolu 58 mm çapında tüpün kuvvet-yer değiştirme grafiği Şekil 3.9.'da verilmiştir. Yüksek yoğunluklu PVC takviyeli tüpün ilk kuvvet değeri 49,7 kN, ortalama kuvvet değeri ise 24,05 kN olmuştur. Takviye edilmiş olan tüpün enerji değeri ise 938,63 J olmuştur. Deney sonrası 58 mm çapında yüksek yoğunluklu PVC tüpün görüntüsü grafik yanında verilmiştir. Görüldüğü üzere deformasyon şekil değişiminden sonra üçlü simetrik katlanmada sergilenmiştir. Deney sonrası incelendiğinde numunenin plastik deformasyona uğradığı görülmüştür.





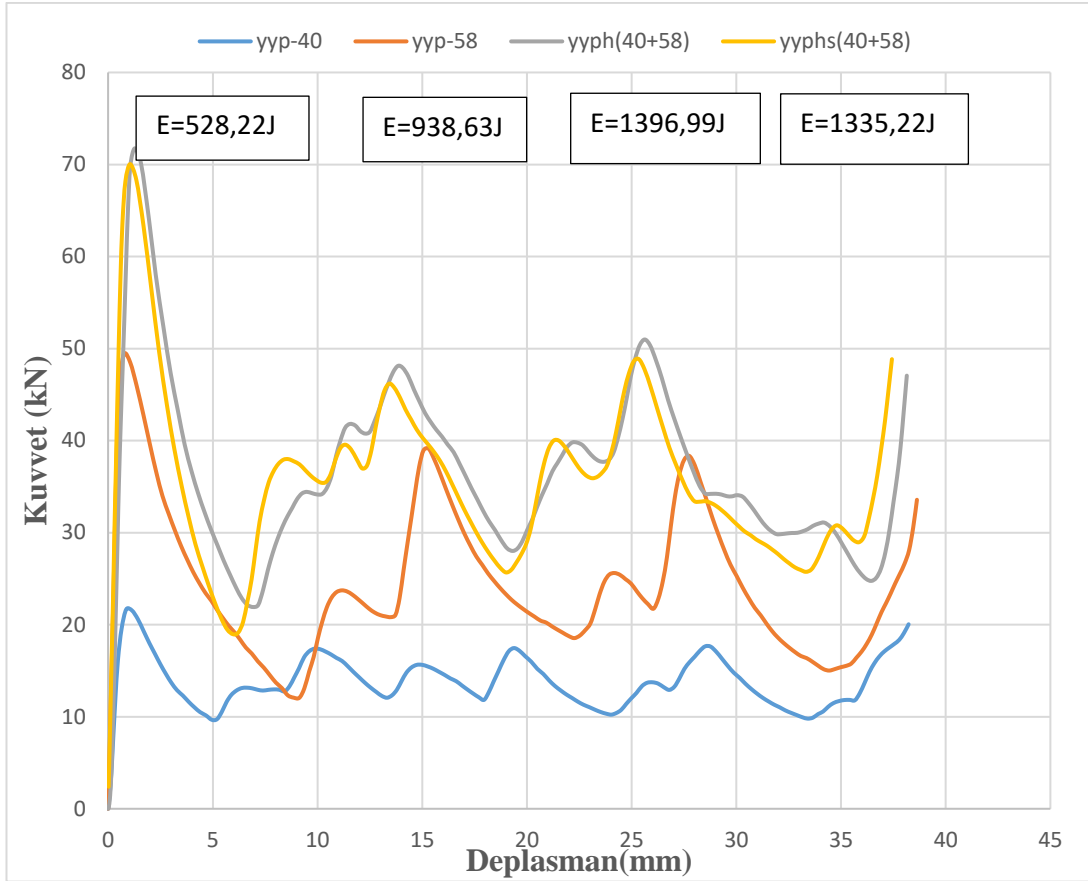
Şekil 3.9. 58 mm çapında yüksek yoğunluklu PVC tüpün kuvvet-deplasman grafiği

Elde edilen kuvvet-deplasman grafiği Şekil 3.10.'da gösterilmiştir. Kuvvetin en yüksek seviyedeki artış miktarından sonra yüksek yoğunluklu halkanın arada ezilmesi ile yer değiştirme miktarında artış görülmektedir. Bu artış homojen olmayan bir durumdur. Yüksek yoğunluklu PVC halkalı tüpün ilk kuvvet değeri 71 kN ,ortalama kuvvet değeri de 35,96 kN'dur.Enerji değeri ise  $E=1396,99$  J olmuştur.Deney sonrası 40 ve 58 mm çapında alüminyum tüplerin deney kombinasyonuna ait görüntüsü grafik yanında verilmiştir.Görüldüğü üzere deformasyon şekil değişiminden sonra dörtlü simetrik katlanmada sergilenmiştir.Deney sonrası incelendiğinde numunenin plastik deformasyona uğradığı görülmüştür.



Şekil 3.10. Yüksek yoğunluklu PVC halkalı tüpün kuvvet-deplasman grafiği

Deneyden elde edilen yüksek yoğunluklu PVC halka ve silindirin kombinasyon kuvvet-deplasman grafiği Şekil 3.11.'de verilmiştir. Aşağıda verilmiş dörtlü kombinasyon grafik şeklinde kuvvetin ve enerji değerinin yüksek olduğu görülmüştür. yyp-40 no'lu takviyeli tüp hem ilk kuvvet, hem de ortalama kuvvet bakımından en düşük performans gösteren numune olmuştur. Diğer taraftan, ilk kuvvetin en büyük değerini aldığı numune yyph-(40+58) no'lu takviyeli tüp olup, benzer şekilde en yüksek ortalama kuvvet değeri de (35,96 kN) bu numune elde edilmiştir. Dolayısıyla kuvvet-deplasman değerlerindeki fark malzemenin enerji absorbe etme miktarında da görülmektedir. Yüksek yoğunluklu PVC halkalı, 40 ve 58 mm çaplarındaki birlikte olan tüplerin enerji absorbe etme miktarı yüksek olduğu görülmüştür.



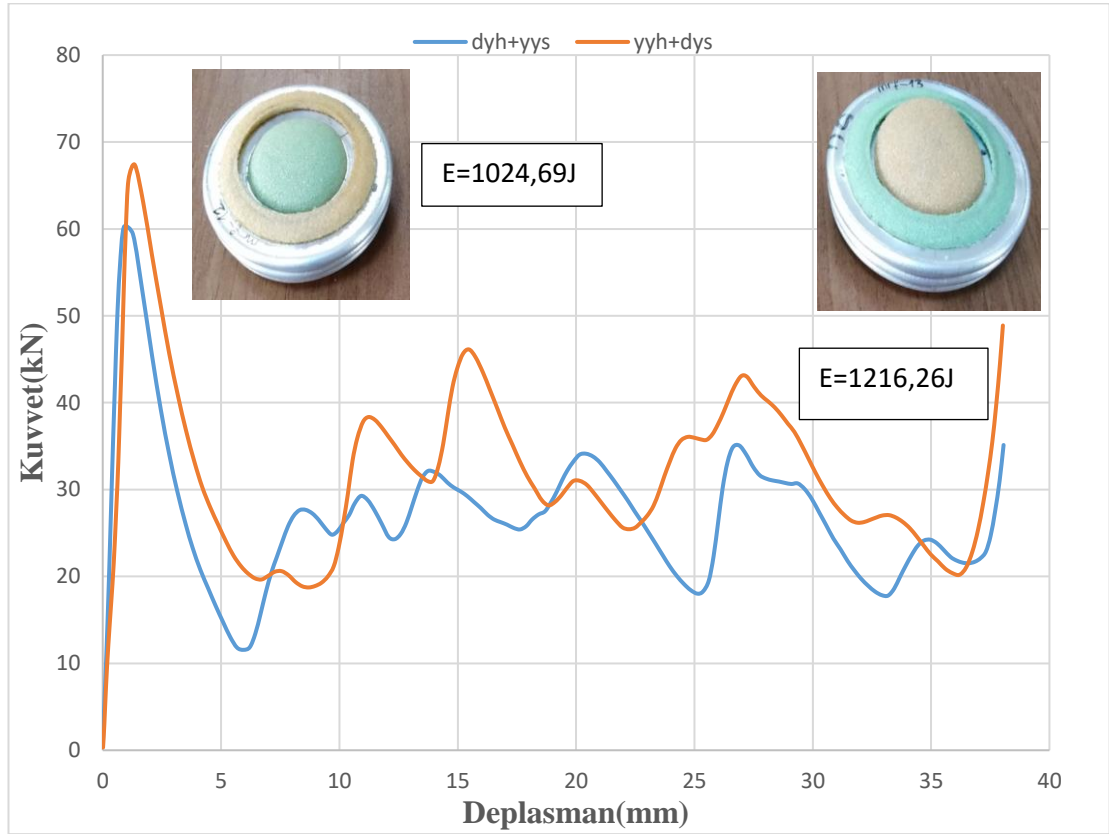
Şekil 3.11. Yüksek yoğunluklu PVC halka ve silindir tüpün kuvvet-deplasman grafiği

### 3.1.4. Farklı yoğunluklu PVC köpüklerle takviye edilmiş ikili tüp numunelerinin deney sonuçları

Düşük yoğunluklu halka ve yüksek yoğunluklu silindir PVC; yüksek yoğunluklu halka ve düşük yoğunluklu silindir PVC tüplerinin deney kombinasyonlarının kuvvet ve deplasman grafikleri Şekil 3.12.'de verilmiştir. dyh&yys(40+58) no'lu kombinasyon tüpün pik (maksimum) değeri 60,2 kN ,ortalama kuvvet değeri ise 26,5 kN olmuştur. Enerji değeri ise E=1024,69J.

yyh&dys(40+58) no'lu kombinasyon tüpün pik (maksimum) değeri 78 kN, ortalama kuvvet değeri 31,76 kN enerji değeri ise E=1216,26 J'dür. Sonuç olarak yüksek yoğunluklu halka ve düşük yoğunluklu silindir PVC tüpün enerji absorbe etme değeri, düşük yoğunluklu halka ve yüksek yoğunluklu silindir PVC tüpün enerji değerlerinden yüksek olduğu gözlenmiştir

Deney sonrası alüminyum kombinasyon tüplerin görüntüsü grafik yanında verilmiştir. Görüldüğü üzere deformasyon şekil değişiminden sonra her iki numunede de dördü simetrik katlanmada sergilenmiştir. Tüplerin içine takviye edilen PVC halka ve silindir düzgün katlanma için önemli unsur olduğu görülmüştür. Deney sonrası incelendiğinde numunenin plastik deformasyona uğradığı görülmüştür.



Şekil 3.12. Yüksek yoğunluklu halka & düşük yoğunluklu PVC silindir ve düşük yoğunluklu halka & yüksek yoğunluklu PVC silindir gösterim şekli













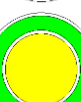
### 3.2. Takviyesiz ve Takviyeli Tüp Yapıların Kuvvet ve Enerji Değerleri

Tüm numunelere ait kuvvet ve enerji absorbe etme değerleri Tablo 3.2.'de sıralanmıştır. yyh-40 no'lu takviyeli tüp kuvvet bakımından en düşük, yyh&dys (40+58) no'lu takviyeli tüp kuvvet bakımından en yüksek performans gösteren numune olmuştur. Diğer taraftan, enerji değerinin en düşük olduğu tüp bt-40 no'lu, en büyük olduğu numune ise yyph-(40+58) takviyeli tüp olup, benzer şekilde en düşük

özgül enerji absorbe etme değerine sahip olan numune dyh&dys(40+58)takviyeli tüp olup,en yüksek özgül enerji absorbe etme değeri sahip olan tüp ise yyph-(40+58) numune elde edilmiştir.

Tekrarlanan deneyler sonucunda, sadece iki tüp arasında köpük takviyesi yapılmış numunelerin daha yüksek enerji absorbe ettiği ispatlanmıştır. Genel olarak beklentinin dışında sonuçlanan bu durumun muhtemel nedeni aşağıda şu şekilde açıklanabilir.Herhangi bir takviye içermeyen, boş tüpte aksel zorlanma altında cidarların katlanma davranışı tüp kat boyunun yaklaşık olarak %35 içeriye, %65 ise dışarıya yönlendiği şeklindedir. Bu, cidarın radyal yönde içeriye hareketinin, dışarıya göre daha zor olmasından kaynaklanmaktadır. İçerideki tüpün iç kısmında köpük bulunmaması durumunda; dış tüp zorlanma altında hem içeriye hem dışarıya katlanma gösterirken, iç kısma yani köpüğe uyguladığı baskı kuvveti içerideki tüpü dışa doğru katlanmasını sınırlamakta, dolayısıyla cidarların içe harekete zorlamakta ve bunun sonucunda içerideki tüpün serbest haldekine davranışından farklı olarak nispeten daha yüksek kuvvetlerin ortaya çıkmasına yol açmaktadır. Tüpte cidarın dışarıya hareketinin sınırlandırılması her iki tip köpük yoğunluğu için ve tekrarlanan (4 adet) deneylerde de gözlenmiştir. Kuvvet artışı, merkezdeki köpüğün ezilmesi için gerekli kuvvetten daha baskın olması bir diğer önemli sonucu oluşturmaktadır.

Düşük ve yüksek yoğunluklu köpüklerin kullanıldığı numunelerde enerji değerindeki fark düşük ve yüksek yoğunluklu köpükler için sırasıyla %9,7 ve %4 mertebesinde olduğu görülmüştür.

No	Numune No	İlk Kuvvet (kN)	Ortalama Kuvvet (kN)	Enerji(J)	Özgül Enerji(J/gr)
1		22,4	11,05	409,00	24,79
2		48,5	19,77	786,30	24,87
3		68	28	1129,26	23,44
4		23	13,26	520,42	25,61
5		51	25,16	985,58	25,27
6		70,2	31,5	1224,73	23,65
7		66	28,79	1105,62	19,90
8		21,5	13,64	528,22	21,59
9		49,7	24,05	938,63	22,63
10		71	35,96	1396,99	26,36
11		70	35,32	1335,22	23,01
12		60,2	26,5	1024,69	18,04
13		78	31,76	1216,26	21,43

Tablo 3.2. Deneylerin enerji değerleri

## **BÖLÜM 4. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER**

### **4.1. Sonuçların Değerlendirilmesi**

Bu çalışmada takviyeli polimerik köpüklerin simetrik katlanma davranışlarının aynı sayıda ve tek tip katlanma olduğu görülmüştür. Deneysel çalışmada takviyesiz tüpler ile farklı şekillerde takviye edilmiş tüplerin aksel ezilme deneyleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar tartışılmıştır.

- a) Alüminyum tüpler iki farklı çapa sahip olacak şekilde tekli ve ikili olmak üzere iki farklı kombinasyonlarda kullanılmıştır.
- b) Köpük dolgu tüplerde köpük yoğunluğuna bağlı olarak pik kuvvet artmıştır.
- c) Tüplerin takviye edilmesinde  $60 \text{ kg/m}^3$  ve  $80 \text{ kg/m}^3$  yoğunluğunda PVC köpükler tercih edilmiştir.
- d) Takviye yöntemlerinde silindirik ve halka köpükler ya tek başlarına veya birlikte kullanılmışlardır.
- e) Numunelerin absorbe ettikleri enerji değerleri incelenmiş, bunun yanı sıra özgül enerji absorbe etme değerleri de karşılaştırılmıştır.

### **4.2. Öneriler**

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar neticesinde aşağıdaki önerilerde bulunulmuştur.

- 1) Farklı malzemelerin enerji absorbe etme kabiliyetini incelemek amacıyla tüplerin malzemeleri değiştirilebilir.
- 2) Farklı çaplara sahip tüplerin farklı et kalınlıkları için çalışmalar yapılabilir.

- 3) Tüplerdeki katlanma sayısı ve aralığı değiştirilerek çalışmalar yapılabilir.
- 4) Farklı dolgu malzemelerin enerji absorbe etme kabiliyetine etkileri incelenebilir.
- 5) Yapılan çalışmalarda, düşük ve yüksek yoğunluklu PVC köpük takviyenin, malzemenin yük taşıma ve enerji absorbe etme kabiliyeti ile özgül enerji absorbe etme değerlerinde oldukça etkin olduğu anlaşılmıştır.
- 6) PVC köpüğün sağladığı katkının, farklı şekillerde uygulanması durumunda, tüp yapının daha verimli enerji değerleri sunabileceği düşünülmektedir.



## KAYNAKLAR

- [1] Mamalis, D. Manolakos, G. Viegelaahn, N. Vaxevanidis, W. Johnson, On the inextensional axial collapse of thin pvc conical shells, *International journal of mechanical sciences* 28 (5) (1986) 323–335.
- [2] A. Singace, H. El-Sobky, M. Petsios, Influence of end constraints on the collapse of axially impacted frusta, *Thin-walled structures* 39 (5) (2001) 415–428.
- [3] . Zhang, H. Zhang, Z. Wen, Axial crushing of tapered circular tubes with graded thickness, *International Journal of Mechanical Sciences* 92 (2015)12–23.
- [4] Bouchet, E. Jacquelin, P. Hamelin, Dynamic axial crushing of combined composite aluminium tube: the role of both reinforcement and surface treatments, *Composite structures* 56 (1) (2002) 87–96.
- [5] Mamalis, G. Viegelaahn, D. Manolakos, W. Johnson, Experimental investigation into the axial plastic collapse of steel thinwalled grooved tubes, *International journal of impact engineering* 4 (2) (1986) 117–126.
- [6] Mamalis, D. Manolakos, G. Viegelaahn, N. Vaxevanidis, W. Johnson, The inextensional collapse of grooved thin-walled cylinders of pvc under axial loading, *International journal of impact engineering* 4 (1) (1986) 41–56.
- [7] Salehghaffari, M. Rais-Rohani, A. Najafi, Analysis and optimization of externally stiffened crush tubes, *Thin-walled structures* 49 (3) (2011) 397–408.
- [8] Zhang, H. Zhang, Axial crushing of circular multi-cell columns, *International Journal of Impact Engineering* 65 (2014) 110–125.
- [9] Zhang, H. Zhang, Energy absorption of multi-cell stub columns under axial compression, *Thin-Walled Structures* 68 (2013)156–163.
- [10] S. Hosseinipour, G. Daneshi, Energy absorption and mean crushing load othinwalled grooved tubes under axial compression, *Thin-walled structures* 41(1)(2003).
- [11] Hosseinipour, Mathematical model for thin-walled grooved tubes under axialcompression, *Materials & design* 24 (6) (2003) 463–469.

- [12] A. Hanssen, M. Langseth, O. S. Hopperstad, Static and dynamic crushing of circular aluminium extrusions with aluminium foam filler, *International Journal of Impact Engineering*.
- [13] S. Santosa, T. Wierzbicki, Crash behavior of box columns filled with aluminum honeycomb or foam, *Computers & Structures* 68 (4) (1998) 343–367.
- [14] W. Abramowicz, T. Wierzbicki, Axial crushing of foam-filled columns, *International Journal of Mechanical Sciences* 30 (3-4) (1988) 263–271.
- [15] S. Santosa, T. Wierzbicki, Effect of an ultralight metal filler on the bending collapse behavior of thin-walled prismatic columns *International Journal of Mechanical Sciences* 41 (8) (1999) 995–1019.
- [16] M. Seitzberger, F. G. Rammerstorfer, H. P. Degischer, R. Grading, Crushing of axially compressed steel tubes filled with aluminium foam, *Acta Mechanica* 125 (1) (1997) 93–105.
- [17] Q. Liu, J. Ma, Z. He, Z. Hu, D. Hui, Energy absorption of bio-inspired multi-cell cfrp and aluminum square tubes, *Composites Part B: Engineering*.
- [18] Q. Liu, X. Xu, J. Ma, J. Wang, Y. Shi, D. Hui, Lateral crushing and bending responses of cfrp square tube filled with aluminum honeycomb, *Composites Part B: Engineering* 118 (2017).
- [19] A. Hanssen, M. Langseth, O. Hopperstad, Static and dynamic crushing of square aluminium extrusions with aluminium foam filler, *International Journal of Impact Engineering* 24 (4) (2000).
- [20] Guillow SR, Lu G, Grzebieta RH. Quasi static axial compression of thin-walled circular aluminum tubes. *Int J Mech Sci* 2001.
- [21] Gupta NK, Gupta SK. Effect of annealing, size and cutouts on axial collapse behavior of circular tubes. *Int J Mech Sci* 1993;35:519–613.
- [22] Wierzbicki T, Abramowicz W. The mechanics of deep plastic collapse of thin walled structures. In: Jones N, Wierzbicki T, editors. *Structural failure*. New York: Wiley; 1989.
- [23] Santosa S, Wierzbicki T (1998) *Comput Struct* 68:343.
- [24] Reid SR. Plastic deformation mechanisms in axially compressed metal tubes used as impact energy absorbers. *International Journal of Mechanical Sciences* 1993;35:1035–52.

- [25] Johnson W, Walton AC. Protection of car occupants in frontal impact with heavy lorries: frontal structures. *Int J Impact Engng* 1983;1(2):111–23.
- [26] Jones N, Wierzbicki T, editors. *Structural crashworthiness*. London: Butterworths, 1983.
- [27] Davies GAO, Morton J, editors. *Structural impact and crashworthiness*. New York: Elsevier Applied Science Publishers, 1984.
- [28] Gupta NK. Some aspect of axial collapse of cylindrical thin-walled tubes. *Thin-Walled Struct* 1998;32(1-3):111–26.
- [29] Reid JD. Crashworthiness of automotive steel midrails: thickness and material sensitivity. *Thin-Walled Struct* 1996;26(2):83–103.
- [30] Jones N. Scaling of inelastic structures loaded dynamically. In: Davies G, Morton J, editors. *Structural impact and crashworthiness*. New York: Elsevier, 1984:45–74.
- [31] Guillow SR, Lu G and Grzebieta RH. Quasi-static axial compression of thin-walled circular aluminium tubes. *Int J Mech Sci* 2001;
- [32] Seitzberger M, Rammerstorfer F, Degiseher HP, et al. Crushing of axially compressed steel tubes filled with aluminium foam. *Acta Mechanica* 1997; 125: 93–105.
- [33] Al Galib D and Limam A. Experimental and numerical investigation of static and dynamic axial crushing of circular aluminum tubes. *Thin-Walled Struct* 2004; 42:1103–1137.
- [34] Hanssen AG, Langseth M and Hopperstad OS. Static and dynamic crushing of circular aluminium extrusions with aluminium foam filler. *Int J Impact Eng* 2000; 24: 475–507
- [35] Thornton PH (1980) Energy absorptions by foam-filled structures. SAE paper
- [36] Guillow SR, Lu G, Grzebieta RH (2001) *Int J Mech Sci* 43:2103

## **ÖZGEÇMİŞ**

Marufjan DOVRANOV, 22.01.1992 tarihinde Türkmenistan'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Farap ilçesinde tamamladı. 2012 yılında Sakarya Üniversitesi'nde başladığı Makine Mühendisliği eğitimini 2016 yılında tamamladı. Aynı yıl İstanbul'da Özel Proje Çözümleri Üretimi Mimarlık Sanayi ve Ticaret Limited Şirketi'nde tasarım mühendisi olarak çalışmaya başladı. 2016 yılında Sakarya Üniversitesi'nde, Makine Tasarım ve İmalat dalında yüksek lisansa başladı. Halen Özel Proje Çözümleri Üretimi Mimarlık Sanayi ve Ticaret Limited Şirketi'nde tasarım mühendisi olarak çalışmaya devam etmektedir.