

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

**İÇ İÇE GEÇİRİLMİŞ TÜPLERİN YANAL YÜKLEME  
ALTINDA ENERJİ ABSORBE ETME DAVRANIŞININ  
İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Ortaç AKDİKMEN**

**Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**  
**Enstitü Bilim Dalı : MAKİNE TASARIM VE İMALAT**  
**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Kenan GENEL**

**Mayıs 2019**

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İÇ İÇE GEÇİRİLMİŞ TÜPLERİN YANAL YÜKLEME  
ALTINDA ENERJİ ABSORBE ETME DAVRANIŞININ  
İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Ortaç AKDİKMEN**

**Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**Enstitü Bilim Dalı : MAKİNE TASARIM VE İMALAT**

Bu tez 23.05. 2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.



**Prof. Dr. 'İbrahim ÖZSERT**  
Juri Başkanı



**Prof. Dr. Kenan GENEL**  
Üye



**Dr. Öğr. Üyesi Ahmet PARASIZ**  
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.

Ortaç AKDİKMEN

23.05.2019

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim 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 Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölüm Başkanlığına 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.                                                                             |      |
| KAYNAK ARAŞTIRMASI .....                                                             | 3    |
| 2.1. İnce Duvarlı Enerji Sönümleyici Çalışmalarına Genel Bakış.....                  | 3    |
| 2.2. Yanal Yükleme Altındaki İç İç Geçirilmiş Tüpler ile Yapılan<br>Çalışmalar ..... | 4    |
| 2.3. Dairesel Tüp Yapılarda Yanal Yükleme .....                                      | 6    |
| 2.3.1. İki nokta yükü ile sıkıştırılmış halka .....                                  | 7    |
| 2.3.2. İki yassı plaka ile sıkıştırılmış halka .....                                 | 8    |
| 2.4. Enerji ve Özgül Enerji Absorbe Kapasitesi .....                                 | 10   |
| BÖLÜM 3.                                                                             |      |
| DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....                                                             | 11   |
| 3.1. Malzeme ve Numune Kombinasyonları .....                                         | 11   |
| 3.2. Önerilen Yeni Model Enerji Sönümleyiciler .....                                 | 13   |
| 3.3. Yöntem .....                                                                    | 15   |

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| 3.3.1. Tüplerin işlenmesi .....       | 15 |
| 3.3.2. Tüplerin birleştirilmesi ..... | 15 |
| 3.3.3. Test cihazı .....              | 17 |

#### BÖLÜM 4.

|                                                      |    |
|------------------------------------------------------|----|
| DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA .....                    | 18 |
| 4.1. B1, B2, B3, B4 Tüplerinin Deney Sonuçları ..... | 18 |
| 4.2. İç İç Geçirilmiş Tüplerin Deney Sonuçları ..... | 20 |
| 4.3. Vaka Çalışması .....                            | 34 |

#### BÖLÜM 5.

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER ..... | 35 |
| KAYNAKLAR .....                  | 37 |
| ÖZGEÇMİŞ .....                   | 39 |

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

|          |                                   |
|----------|-----------------------------------|
| AB       | : AB uzunluğu                     |
| E        | : Enerji                          |
| L        | : Tüp uzunluğu                    |
| $M_p$    | : P kuvvetinin oluşturduğu moment |
| ÖEAK     | : Özgül enerji absorbe kapasitesi |
| P        | : Kuvvet (yük)                    |
| $P_o$    | : Çökme kuvveti (yükü)            |
| t        | : Tüp cidar kalınlığı             |
| Y        | : Akma mukavemeti                 |
| $\delta$ | : Yer değiştirme                  |
| $\Theta$ | : Dönme açısı                     |

## ŞEKİLLER LİSTESİ

|                                                                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1.1. Tipik bir tampon kirişi ve ince cidarlı tüp yapılardan oluşan enerji<br>sönümleyiciler .....                                                         | 2  |
| Şekil 2.1. Enerji sönümleyicilere uygulanan yükleme durumları .....                                                                                             | 3  |
| Şekil 2.2. Eksenel yüklenen enerji sönümleyici yapıların deformasyon modları ...                                                                                | 4  |
| Şekil 2.3. Yanal yüklenen enerji sönümleyici yapıların kararlı deformasyon<br>davranışı .....                                                                   | 4  |
| Şekil 2.4. İç içe geçmiş üç tüplü sistem .....                                                                                                                  | 5  |
| Şekil 2.5. Xue ve ark. çalışma yaptıkları tüp sistemleri.....                                                                                                   | 5  |
| Şekil 2.6. Wang. ve ark. çalışma yaptıkları dört tüplü sistem.....                                                                                              | 6  |
| Şekil 2.7. Bir halkada içe doğru etki eden iki nokta yükü altındaki çökme<br>mekanizması (a). Bir çeyrek halkaya etkiyen kuvvet ve moment<br>dengesini (b)..... | 7  |
| Şekil 2.8. Düz plakanın sıkıştırılmasıyla oluşabilecek iki mod (a) ve (b). Bir<br>çeyrek halkaya etkiyen kuvvet ve momentlerin dengesi (c)                      | 9  |
| Şekil 3.1. Üniform enerji - yer değiştirme modeli .....                                                                                                         | 11 |
| Şekil 3.2. Tüm tüplerin kullanıldığı dıştan içe kademeli enerji sönümlemesi<br>sağlayacak temel model .....                                                     | 12 |
| Şekil 3.3. İç içe geçirilmiş tüplerden elde edilecek enerji sönümleyici modelleri                                                                               | 14 |
| Şekil 3.4. Tüplerin birleştirilmesinde kullanılan aparat (a). Kaynak işlemi öncesi<br>aparata yerleştirilmiş tüpler (b) .....                                   | 15 |
| Şekil 3.5. Üretilen enerji sönümleyiciler .....                                                                                                                 | 16 |
| Şekil 3.6. Deney numunesinin basma makinasına yerleştirilmesi .....                                                                                             | 17 |
| Şekil 4.1. Temel tüp numunelerine ait basma testi kuvvet - yer değiştirme<br>grafikleri.....                                                                    | 18 |
| Şekil 4.2. İki plaka arasında yanal olarak ezilmeye zorlanan bir tüpe ait<br>karakteristik kuvvet-yer değiştirme eğrisi.....                                    | 19 |



|                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 4.3. 2A numunesi kuvvet- yer değiştirme grafiği .....                                              | 23 |
| Şekil 4.4. 2A numunesi absorbe edilen enerji-yer değiştirme grafiği .....                                | 23 |
| Şekil 4.5. 3A numunesi kuvvet- yer değiştirme grafiği .....                                              | 24 |
| Şekil 4.6. 3A numunesi absorbe edilen enerji-yer değiştirme grafiği .....                                | 24 |
| Şekil 4.7. 3B numunesi kuvvet- yer değiştirme grafiği .....                                              | 25 |
| Şekil 4.8. 3B numunesi absorbe edilen enerji-yer değiştirme grafiği .....                                | 25 |
| Şekil 4.9. 3C numunesi kuvvet- yer değiştirme grafiği .....                                              | 26 |
| Şekil 4.10. 3C numunesi absorbe edilen enerji-yer değiştirme grafiği .....                               | 26 |
| Şekil 4.11. 4A numunesi kuvvet- yer değiştirme grafiği .....                                             | 27 |
| Şekil 4.12. 4A numunesi absorbe edilen enerji-yer değiştirme grafiği .....                               | 27 |
| Şekil 4.13. 4B numunesi kuvvet- yer değiştirme grafiği .....                                             | 28 |
| Şekil 4.14. 4B numunesi absorbe edilen enerji-yer değiştirme grafiği .....                               | 28 |
| Şekil 4.15. 4C numunesi kuvvet- yer değiştirme grafiği .....                                             | 29 |
| Şekil 4.16. 4C numunesi absorbe edilen enerji-yer değiştirme grafiği .....                               | 29 |
| Şekil 4.17. 5A numunesi kuvvet- yer değiştirme grafiği .....                                             | 30 |
| Şekil 4.18. 5A numunesi absorbe edilen enerji-yer değiştirme grafiği .....                               | 30 |
| Şekil 4.19. 5B numunesi kuvvet- yer değiştirme grafiği .....                                             | 31 |
| Şekil 4.20. 5B numunesi absorbe edilen enerji-yer değiştirme grafiği .....                               | 31 |
| Şekil 4.21. 5C numunesi kuvvet- yer değiştirme grafiği .....                                             | 32 |
| Şekil 4.22. 5C numunesi absorbe edilen enerji-yer değiştirme grafiği .....                               | 32 |
| Şekil 4.23. 6A numunesi kuvvet- yer değiştirme grafiği .....                                             | 33 |
| Şekil 4.24. 6A numunesi absorbe edilen enerji-yer değiştirme grafiği .....                               | 33 |
| Şekil 4.25. Araç önündeki yapısal elemanların çarpışma enerjisini absorbe<br>etmeye olan katkıları ..... | 34 |
| Şekil 5.1. İç içe geçirilmiş tüp yapıların enerji sönmleme davranışlarının<br>karşılaştırılması .....    | 36 |

## TABLÖLAR LİSTESİ

|                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablo 3.1. Tüp ebatlarının ve çökme yüklerinin parametrik olarak incelenmesiyle oluşturulan değerler tablosu..... | 12 |
| Tablo 3.2. Önerilen enerji sönümleyicilerin sahip olduğu maksimum yer değiştirme miktarları.....                  | 13 |
| Tablo 3.3. DIN1629 işlenmemiş tüplerin ölçüleri ve mekanik özellikleri.....                                       | 15 |
| Tablo 4.1. B1, B2, B3, B4 tüplerine ait ağırlık ve absorbe edilen enerji verileri.....                            | 19 |
| Tablo 4.2. Deney sonuçları analiz tablosu.....                                                                    | 34 |

## ÖZET

Anahtar kelimeler: Enerji sönümleyici, şok sönümleyici, iç içe geçirilmiş tüpler, yanal yükleme

Bu çalışmada; başta otomotiv sektörü olmak üzere taşımacılık, havacılık, uzay sanayi gibi bir çok alanda kullanılmakta olan ince cidarlı enerji sönümleyici yapılara alternatif olabilecek, çeşitli konfigürasyonlardaki iç içe geçirilmiş tüplerden elde edilmiş enerji sönümleyicilerin yanal yükleme altındaki enerji sönümleme davranışları araştırılmıştır. Üniform enerji absorbe modeli sergilemesi amaçlanan kademeli deformasyon modeli geliştirilen tüp yapılarının 2'li, 3'lü, 4'lü, 5'li ve 6'lı tüp konfigürasyonları, yarı-statik basma koşulları altında deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, enerji sönümleme karakterleri ve özgül enerji absorbe kapasitesi açısından karşılaştırılarak yorumlanmıştır.

# **INVESTIGATION OF ENERGY ABSORPTION BEHAVIOR OF NESTED TUBES UNDER LATERAL LOADING**

## **SUMMARY**

Keywords: Energy absorber, shock absorber, nested tubes, lateral loading

In this study; as an alternative to thin-walled energy-absorbing structures used in many areas such as automotive industry, transportation, aerospace, space industry; the energy damping behaviors under the lateral loading of the energy dampers obtained from the nested tubes of various configurations were investigated. With 2, 3, 4, 5, 6 and 6 tube configurations of the tube structures, which are designed to show uniform energy absorption model, were investigated experimentally under semi-static pressure conditions. The results were compared with energy damping characteristics and specific energy absorption capacity.

## BÖLÜM 1. GİRİŞ

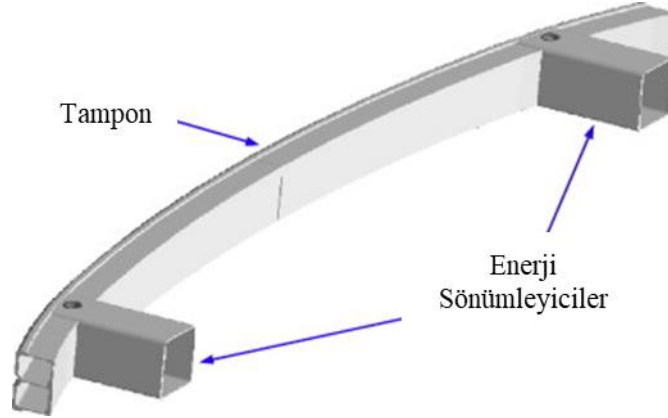
Şok enerjisi absorbe özelliği olması nedeniyle, ezilme kutuları bir çok türde malzeme ve tasarım kombinasyonu ile başta otomotiv sektörü olmak üzere, taşımacılık, havacılık-uzay sanayi alanlarında kullanılmaktadır.

Enerji absorbe edici yapıların işlevi, yolcu yaralanmalarını en aza indirmek ve hayati yapıları darbe hasarlarından veya diğer dinamik yüklerden korumaktır. Bu nedenle araçların önünde, uçak alt yapılarında ve asansör boşlukları tabanı gibi bir çok uygulamada ince duvarlı tüplerden elde edilen enerji absorbe ediciler kullanılır. Farklı geometri ve malzemelere sahip ince cidarlı tüpler, plastik malzeme deformasyonu yoluyla kinetik enerjiyi emdiği için yaygın olarak tercih edilirler [1].

İnce cidarlı tüpler, yüksek sertlik/ağırlık oranlarına ve enerji absorbe etme kapasitelerine bağlı olarak da tercih sebebidir [2].

Enerji sönümleyicilerin darbe dayanımlarının belirlenerek geliştirilmesi uzun zamandır araştırmacıların dikkatini çeken konuların başında gelmektedir. Yapıların, çarpışma sonucunda ani deformasyon yerine, düzenli bir şekilde deforme olarak enerjiyi sönümlemesi istenir [3].

Otomotiv endüstrisinde; bir enerji absorbe edici kutu, önden olan çarpışmalarda kinetik enerjiyi absorbe etmek amacıyla ön tamponun üzerine yerleştirilen bir elemandır (Şekil 1.1.). Bu yapılar, kinetik enerjiyi yeterince absorbe etmiyorsa, çarpma kuvveti doğrudan aracın yolcu bölümüne aktarılır. Bu, yolculara daha fazla zarar verecek ve araçta yüksek miktarda hasara neden olacaktır [2].



Şekil 1.1. Tipik bir tampon kirişi ve ince cidarlı tüp yapılardan oluşan enerji sönümleyiciler [4].

Genel olarak, çarpışma için tasarlanmış bir araçta, bütünlüğün sağlanması ve enerji yönetimi gereksinimlerinin karşılanması gerekir. Örneğin, araba, uçak veya tren kazalarında, yolcu kabinlerinin yapısı, yolcuların güvenliğini tehlikeye atacak aşırı deformasyonlar oluşmadan çarpışma yükleri karşılanmalıdır [5].

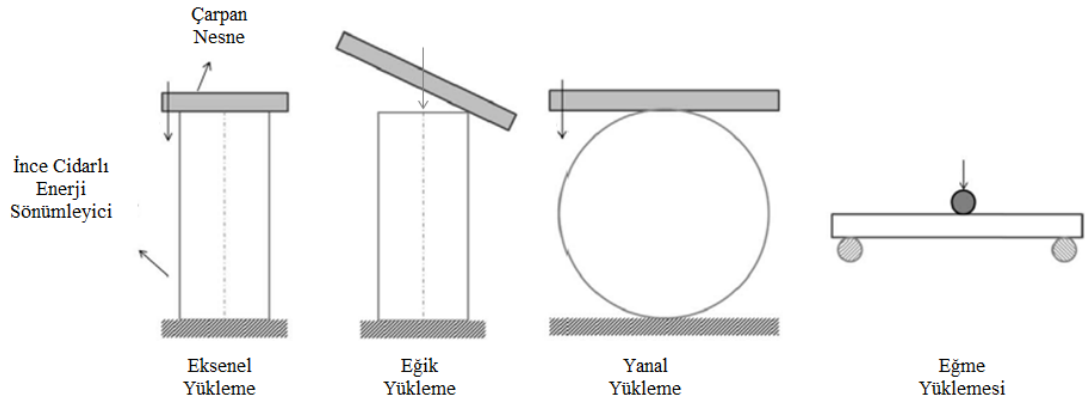
Bir çarpışma olayı sırasında ortaya çıkan ilk tepe kuvveti sonrakilerden oldukça büyüktür. Enerji sönümleyicilerin görevi oluşan bu tepe kuvvetini absorbe ederek çarpışmanın etkisini azaltmaktır. Burada enerji absorbe etme davranışının uniform olması en idealidir [6].

Bu çalışmada; uniform enerji sönümleme davranışından yola çıkarak, içi içe geçirilmiş tüp yapılarla kademeli enerji emilimi sağlanması amaçlanmış, uniform bir enerji sönümleme karakterine yaklaşacak sistemler deneysel olarak araştırılmıştır.

## BÖLÜM 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

### 2.1. İnce Duvarlı Enerji Sönümleyici Çalışmalarına Genel Bakış

Tüplerin kinetik enerjiyi sönümlediği deformasyon mekanizmalarının yüklenme durumları araştırıldığında temel olarak; eksenel yüklenme [5-9], eğme yüklemesi [10, 11], yanal yüklenme [12-18], eğik yüklenme [19] üzerine çalışmalar yapıldığı görülmüştür (Şekil 2.1.).

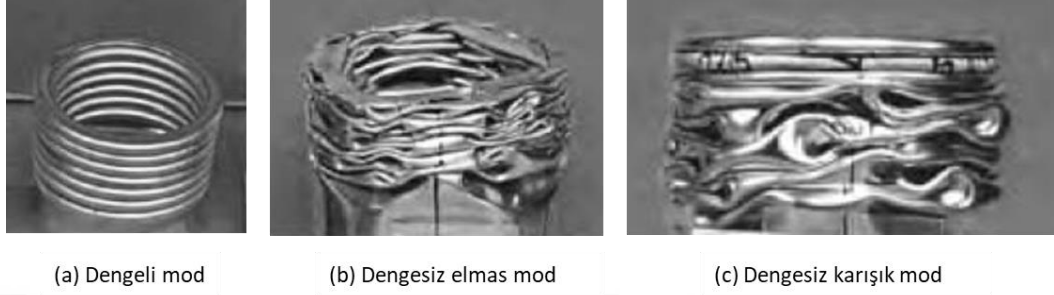


Şekil 2.1. Enerji sönümleyicilere uygulanan yüklenme durumları [20].

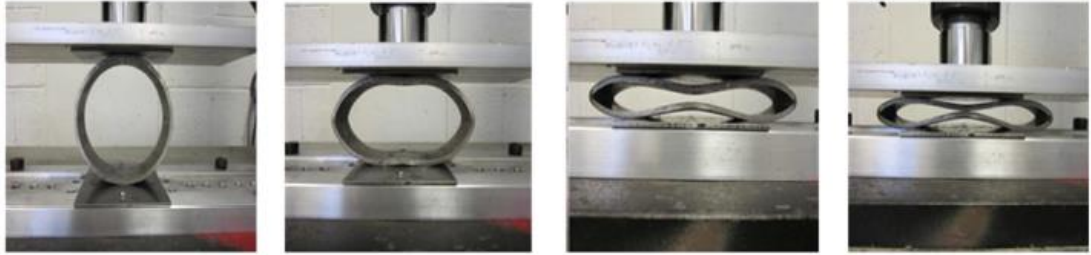
Yüklenme durumlarının yanı sıra, farklı kesit geometrilerine yönelik de birçok çalışma yapılmıştır. Kesit geometrilerine göre incelendiğinde, dairesel tüpler, boru biçimli halka tüpler, kare borular, oluklu borular, çok köşeli sütunlar, bal peteği hücreleri, sandviç plakalar ve kademeli dairesel ince cidarlı borular gibi bazı özel şekiller bulunur [21].

Eksenel olarak yüklenen yapılar sahip oldukları enerji sönümleme kapasitelerini sınırlayan global burkulma deformasyon modu olarak adlandırılan dengesiz deformasyon modu gibi bazı dezavantajlara sahiptir (Şekil 2.2.). Buna karşılık, yanal

olarak yüklenmiş tüpler (Şekil 2.3.) eksen dışı yükleme altında bile herhangi bir dengesiz deformasyon moduna girmemekle birlikte, bu yapıların deformasyon modu plastik mafsallık bükülmesi olduğundan plastik mafsalların etrafında lokalizasyona neden olur ve enerjinin yanal çöküş boyunca dağılmasını sağlar [1].



Şekil 2.2. Eksenel yüklenen enerji sönümleyici yapıların deformasyon modları [22].



Şekil 2.3. Yanal yüklenen enerji sönümleyici yapıların kararlı deformasyon davranışı [20].

## 2.2. Yanal Yükleme Altındaki İç İç Geçirilmiş Tüpler ile Yapılan Çalışmalar

Bu çalışmada içi içe geçirilmiş dairesel tüplerin yanal yükleme altındaki davranışları inceleneceğinden bu konu hakkında yapılan diğer çalışmalara değinilecektir.

Olabi ve ark. [13] iç içe geçirilmiş üç tüp sistemini (Şekil 2.4.) serbest ve yanlardan kısıtlı olarak, dikey, yarı statik olarak, yanal sıkıştırılmasını deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. İki tip basma yüzeyi kullanılarak kısıtlanmış kısa yumuşak çelik tüplerin kuvvet sapma tepkisi üzerinde durulmuştur. Kısıtlamalara bağlı olarak elde edilen farklılıklar ile bunların bu tür sistemlerin enerji absorbe etme kapasitesinde bir artışa nasıl katkıda bulunabileceği gösterilmiştir. Analiz modelleri ve deneysel sonuçlar birbirini desteklemiştir.





Şekil 2.4. İç içe geçmiş üç tüplü sistem [13].

Bir diğer çalışmada Olabi ve ark. [14], iç içe geçmiş hafif çelik tüpleri 3-5m/s darbe hızıyla yerçekimi etkisi altında sabit kütle kullanarak dinamik yükleme ile yanall olarak ezilmesini deneysel ve sayısal olarak incelemiş, tasarım ile optimize bir model geliştirmiştir. Optimize edilmiş modelde basit bit tasarım revizyonu ile standart düzenlemeden daha fazla bir kuvvet sapma tepkisi gösterdiği gösterilmiştir.

Xue ve ark. [15], yapıları patlama şokuna karşı korumak için etkili bir enerji absorbe bileşeni geliştirmeyi amaçlamış ve üçlü bir tüp sistemi önermiş ve performansını deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Tek tüplü ve çift tüplü sistem ile önerdikleri üç tüplü yeni sistemi (Şekil 2.5.) karşılaştırdıklarında sonuçlar; üç tüplü sistemin en yüksek enerji absorbe verimliliğini ve en kararlı deformasyon modunu sağlayabildiğini göstermiştir. Üç tüplü sistem ile sivil hava savunma merkezlerinde kullanılan bir patlama geçirmez kapıya uygulayarak; üç tüplü sistemin, yapıların patlama şoku dalgası altındaki hasarlardan korunmasında en etkili darbe kuvveti azaltımı ve en hafif ağırlığı sağlayabildiğini göstermiştir.



Şekil 2.5. Xue ve ark. çalışma yaptıkları tüp sistemleri [15].

Wang ve ark. [16], bir ekipmanı darbe ve patlama şokuna karşı korumak için etkili bir enerji absorbe yapısı geliştirmek amacıyla, dört tüpten oluşan sistemi önermiştir. Performansı deneysel olarak analiz edilmiştir. Dört tüp sisteminin deformasyon modu, simülasyon ve deney ile ayrıntılı olarak tarif edilmiştir. Dış tüpün çökmesiyle, üst iç tüpler alt iç tüpün her iki tarafına doğru itilir, daha sonra üç iç tüp dış tüpte yan yana durur ve tüm tüpler eşzamanlı olarak daralmaya zorlanır. Sonuç olarak, iç içe geçmiş boru sisteminin koruma kapasitesi, enerji absorbe etme kapasitesini ve deformasyon modunun sağlamlığını artırarak geliştirmiştir. Dört tüplü sistemin dinamik yük altında, yüksek zorlanma oranlarında beklendiği gibi çalışabileceğini kanıtlamış ve yapıları patlamadan ve şok dalgası altındaki hasarlardan korumak için kullanılabileceğini göstermiştir. Dört tüplü sistemin en istikrarlı deforme modu ve en yüksek enerji emilim verimliliği sağlayabileceğini göstermiştir.



Şekil 2.6. Wang. ve ark. çalışma yaptıkları dört tüplü sistem [16].

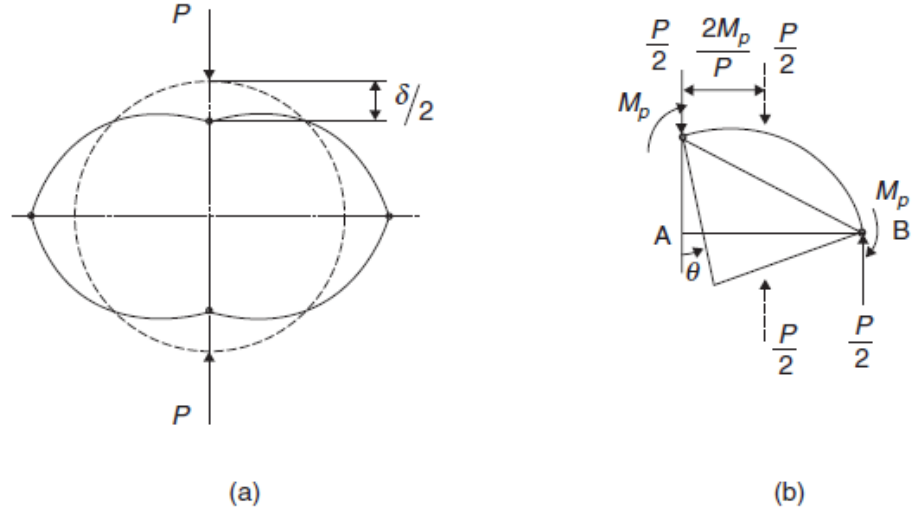
Bu çalışmada, daha önceden denenmiş sınırlı sayısındaki tüplerden oluşan sistemlere alternatif olarak, 2-6 adet arasında tüp içeren, farklı kombinasyon ve düzenlerde oluşturulan tüp sistemlerinin deneysel olarak incelenmesi amaçlanmıştır.

### 2.3. Dairesel Tüp Yapılarda Yanal Yükleme

Bu çalışmada iç içe geçmiş tüp yapıların yanal yüklemeye maruziyeti inceleneceğinden dolayı yanal yükleme konusundaki sayısal yaklaşımların ele alınması yerinde olacaktır. Lu ve Yu kitabında [22], yanal yüklenmiş halkalara etkiyen kuvvet mekanizmasına yer vermiştir.

### 2.3.1. İki nokta yükü ile sıkıştırılmış halka

İki karşıt nokta yüküyle sıkıştırılmış sert, plastik bir halka düşünüldüğünde (Şekil 2.7. (a)) bir çökme mekanizması için dört plastik mafsalsal noktası oluşmaktadır. Burada  $P$  etkiyen kuvvet,  $M_p$  moment,  $\delta$  yer değiştirme,  $R$  yarıçap,  $\theta$  dönme açısıdır [22].



Şekil 2.7. Bir halkada içe doğru etki eden iki nokta yükü altındaki çökme mekanizması (a). Bir çeyrek halkaya etkiyen kuvvet ( $P$ ) ve moment ( $M_p$ ) dengesi (b). [22]

Bu problem bir çeyrek halkadaki denge yaklaşımından çözülebilir (Şekil 2.7. (b)). Böylece, bir  $\theta$  dönme açısı için, yer değiştirme ( $\delta$ ) Denlem 2.1'deki gibidir.

$$\frac{\delta}{2} = R - \sqrt{2}R \sin\left(\frac{\pi}{4} - \theta\right) = R + R \sin \theta - R \cos \theta \quad (2.1)$$

AB uzunluğu da Denklem 2.2'deki gibi elde edilir.

$$AB = \sqrt{2}R \cos\left(\frac{\pi}{4} - \theta\right) \quad (2.2)$$

Bir çeyrek halkaya etkiyen kuvvet ve momentler, zıt yönlerde etki eden, eşit büyüklükteki iki  $P / 2$  kuvvetine eşdeğer olmaktadır. Denge, bu iki kuvvetin, itme

çizgisi olarak bilinen aynı çizgi boyunca hareket etmesini gerektirmektedir. Bu nedenle  $2M_p / P$  kuvvetinin kayması  $AB / 2$  olmalıdır, burada  $M_p$  halkanın tamamen plastik bükülme momentidir. Denklem 2.2'ye dahil edildiğinde,

$$\frac{2M_p}{P} = \frac{\sqrt{2}}{2} R \cos\left(\frac{\pi}{4} - \theta\right) \text{ veya,}$$

$$P = \frac{4 M_p}{\sqrt{2} R \cos(\frac{\pi}{4} - \theta)} \quad (2.3)$$

$\theta = 0$  olduğunda, ilk çökme yükü,

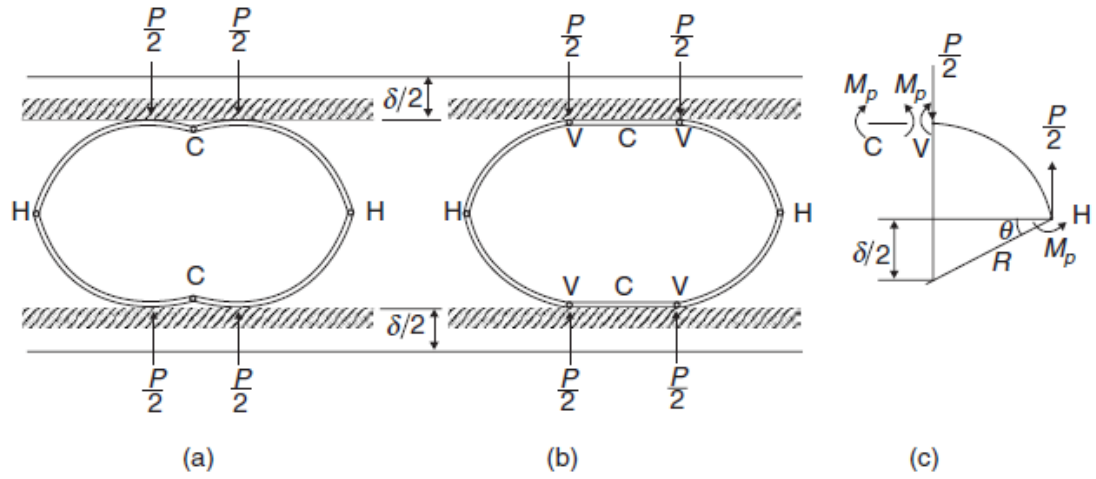
$$P_0 = \frac{4M_p}{R} = \frac{8M_p}{D} \quad (2.4)$$

D, halkanın çapıdır. Denklem 2.1, 2.2 ve 2.4'ü birleştirdiğinde,  $P/P_0$  oranı Denklem 2.5.'de olduğu gibidir [22].

$$\frac{P}{P_0} = \frac{1}{\left[1 + 2\frac{\delta}{D} - \left(\frac{\delta}{D}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}} \quad (2.5)$$

### 2.3.2. İki yassı plaka ile sıkıştırılmış halka

Bir halkanın iki düz plaka arasında sıkıştırma altında çökmesi durumunda Şekil 2.8. (a) ve (b) deki gibi iki mod oluşabileceği açıklanmaktadır. İlk mod (a) daha düşük akma noktasına sahip olan yumuşak çelikler için daha uygun görülmektedir. İkinci mod, halkanın hareketli temas noktasındaki düzleşme durumudur. Her iki mod da deforme olmamış bölgeler için aynı kuvvet dağılımına sahiptir ve dolayısıyla aynı kuvvet-sapma eğrisinin geçerli olduğu ifade edilmektedir [22].



Şekil 2.8. Düz plakanın sıkıştırılmasıyla oluşabilecek iki mod (a) ve (b). Bir çeyrek halkaya etkiyen kuvvet ve momentlerin dengesi (c). [22]

İlk çökme yükü, nokta yükleme durumundaki ile aynıdır (Denklem 2.4). Dengeden;

$$\frac{1}{2} PR \cos \theta = 2 M_p \quad (2.6)$$

ve geometrik olarak

$$\delta = 2R \sin \theta \quad (2.7)$$

Denklem (2.6), (2.7) ve (2.4) birleştirildiğinde,

$$P = \frac{P_0}{\left[1 - (\delta/D)^2\right]^{1/2}} \quad (2.8)$$

Burada  $P_0$  ilk çöküş yüküdür ve Denklem 2.9 ile hesaplanır.

$$P_0 = 2Yt^2L/D \quad (2.9)$$

L halka veya tüpün uzunluğunu, D çapı, Y akma mukavemetini, t cidar kalınlığını ifade etmektedir [22].

## 2.4. Enerji ve Özgül Enerji Absorbe Kapasitesi

Bir enerji sönümleyicinin enerji absorbe kapasitesi ( $E$ ); kuvvet-yer değiştirme eğrisinin entegrasyonu olarak tanımlanmaktadır (Denklem 2.10) [1].

$$E = \int_0^{\delta} P(\delta).d\delta \quad (2.10)$$

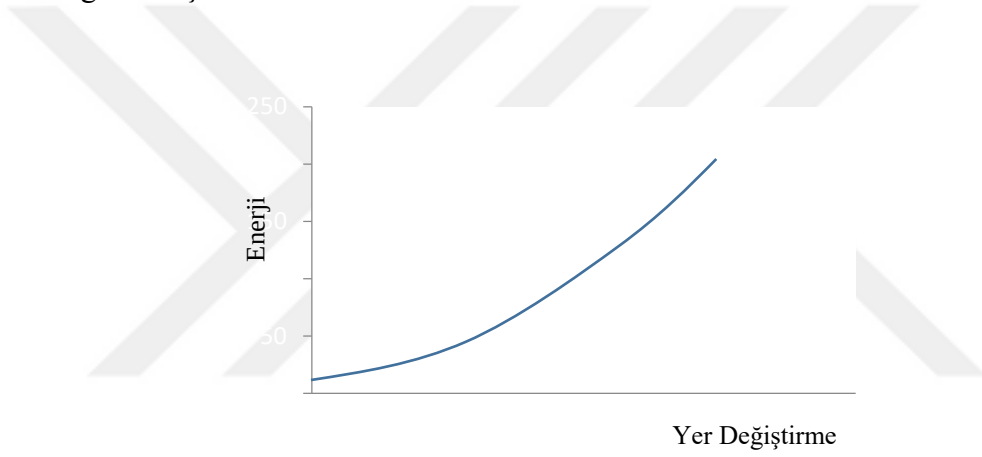
Özgül enerji absorbe kapasitesi (ÖEAK) olarak ifade edilen büyüklük, enerji sönümleyicilerin en önemli parametrelerinden biridir [1]. ÖEAK, birim kütle başına absorbe edilen enerji ile tanımlanmaktadır (Denklem 2.11).

$$\text{ÖEAK} = \frac{E}{m} \quad (2.11)$$

$m$  enerji emicinin kütlesidir.

## BÖLÜM 3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

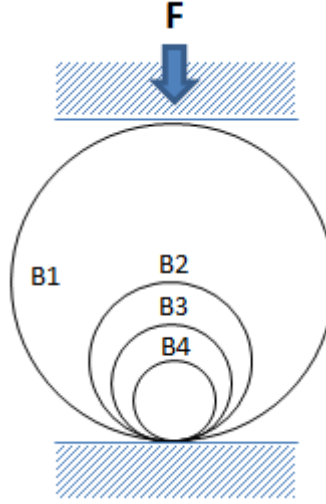
Çalışmanın amacı, yer değiştirme karşısında giderek artan bir enerji sönümleme davranışını yakalamaktır. Bu kapsamda iç içe geçirilmiş dairesel tüplerden elde edilen yapılardan, özgül enerji absorbe kapasitesi yüksek olan kombinasyonların belirlenmesine yönelik bir ön çalışma yapılmış ve tezin içeriği bu plan dahilinde kurgulanmıştır.



Şekil 3.1. Üniform enerji - yer değiştirme modeli

### 3.1. Malzeme ve Numune Kombinasyonları

Çalışmada, DIN1629 dikişsiz boru malzemelerden elde edilecek dört çeşit temel tüpün (B1, B2, B3, B4) kullanılması planlanmıştır. Amaçlanan enerji sönümleme modeline yaklaşabilmek için iç içe geçirilmiş tüp kombinasyonlarının bir düzen dahilinde ezilmesiyle giderek artan bir enerji sönümleme modeline ulaşılması amaçlanmıştır. Tüm tüplerin bir arada kullanıldığı dıştan içe kademeli enerji sönümlemesi sağlayacak temel model Şekil 3.2.'deki gibidir.



Şekil 3.2. Tüm tüplerin kullanıldığı dıştan içe kademeli enerji sönümlemesi sağlayacak temel model

Ön çalışma kapsamında, Şekil 3.2.'deki F kuvvetinin uygulanması durumunda dıştan içe oluşacak çökme için B1, B2, B3, B4 tüplerinde ilk çökme yükü  $P_0$  değerleri  $P_{B1} < P_{B2} < P_{B3} < P_{B4}$  olacak kombinasyon kurgusu hedeflenmiştir. Bu şartın sağlanması için, tüplerin yanal yükleme altındaki çökme kuvveti değerlerine bağlı olarak çap ve cidar kalınlıklarının dikkate alınması söz konusudur. Bunun için Bölüm 2'deki Denklem 2.9'dan ( $P_0 = 2Yt^2L/D$ ) yararlanılarak geometrik parametreler belirlenmiş ve ilk çökme yükleri hesaplanarak Tablo 3.1.'de verilmiştir. Yapılan kabuller; B1 tüpünün dış çapı 88.9 mm, tüm tüplerin boyları 50 mm'dir. Ayrıca B1 tüpü içine 2 adet B<sub>2</sub> tüpü yerleştirebilmek için B1, B2 çapları ( $D_{B1}$ ,  $D_{B2}$ ) arasındaki bağıntı  $D_{B1} = 2D_{B2}$  olarak kabul edilmiştir.

Tablo 3.1. Tüp ebatlarının ve çökme yüklerinin parametrik olarak incelenmesiyle oluşturulan değerler tablosu

| Tüp tipi | Dış çap (mm) | İç çap (mm) | Kalınlık (mm) | Boy (mm) | Akma-Çekme Dayanımı Ortalaması (Mpa) | İlk çökme yükü (N) |
|----------|--------------|-------------|---------------|----------|--------------------------------------|--------------------|
| B1       | 88,9         | 83,6        | 2,65          | 50       | 377,5                                | 2982,00            |
| B2       | 41,8         | 36,8        | 2,5           | 50       | 387,5                                | 5793,96            |
| B3       | 33,4         | 28          | 2,7           | 50       | 366                                  | 7988,44            |
| B4       | 20,9         | 15,9        | 2,5           | 50       | 365                                  | 10915,07           |

Tablo 3.1.'de yapılan parametrik çalışma sonucunda çıkan,  $2P_{B1} = P_{B2}$ ;  $2,5P_{B1} = P_{B3}$ ;  $3,8P_{B1} = P_{B4}$  oranları; amaçlanan enerji sönümleme modeline yaklaşabilmek açısından, değerlerin uygun olduğunu göstermiştir.



### 3.2. Önerilen Yeni Model Enerji Sönümleyiciler

B1, B2, B3, B4 tüplerinin kullanılmasıyla elde edilen enerji sönümleyici modelleri Şekil 3.3.'deki gibidir. Modeller, sıralı deformasyona olanak sağlaması için boyutlandırılan dört ana tüpün (B1, B2, B3, B4) sıralı çöküş mekanizması oluşturmasıyla ortaya çıkacak kademeli enerji sönümleme modeli düşünülerek tasarlanmıştır.

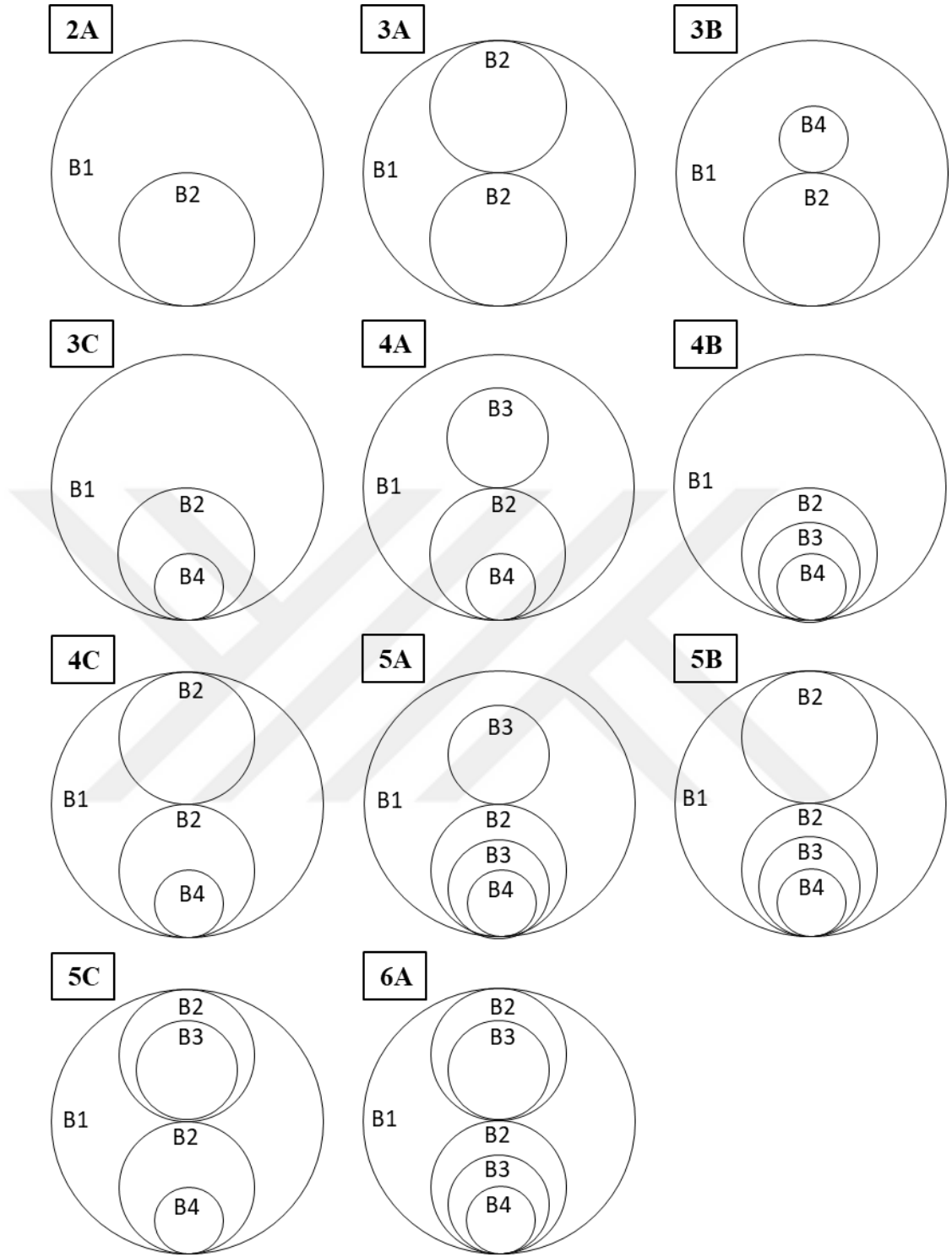
Enerji sönümleyici modellerinin sahip olacağı maksimum yerdeğiştirme miktarları Denklem 3.1'den hesaplanarak Tablo 3.2.'de verilmiştir.

$$\delta_{maks} = d_{B1} - 2[(t_{B2} \cdot n_{B2}) - (t_{B3} \cdot n_{B3}) - (t_{B4} \cdot n_{B4})] \quad (3.1)$$

$\delta_{maks}$ = enerji sönümleyicinin maksimum yer değiştirme miktarını, t=tüp kalınlığını, n=tüp adedini, d= tüp iç çapını ifade etmektedir.

Tablo 3.2. Önerilen enerji sönümleyicilerin sahip olduğu maksimum yer değiştirme miktarları

| Numune<br>Adı | Tüp Tipi Adetleri |    |    |    | $\delta_{maks}$<br>(mm) |
|---------------|-------------------|----|----|----|-------------------------|
|               | B1                | B2 | B3 | B4 |                         |
| 2A            | 1                 | 1  | 0  | 0  | 78,6                    |
| 3A            | 1                 | 2  | 0  | 0  | 73,6                    |
| 3B            | 1                 | 1  | 0  | 1  | 73,6                    |
| 3C            | 1                 | 1  | 0  | 1  | 73,6                    |
| 4A            | 1                 | 1  | 1  | 1  | 68,2                    |
| 4B            | 1                 | 1  | 1  | 1  | 68,2                    |
| 4C            | 1                 | 2  | 0  | 1  | 68,6                    |
| 5A            | 1                 | 1  | 2  | 1  | 62,8                    |
| 5B            | 1                 | 2  | 1  | 1  | 63,2                    |
| 5C            | 1                 | 2  | 1  | 1  | 63,2                    |
| 6A            | 1                 | 2  | 2  | 1  | 57,8                    |



Şekil 3.3. İç içe geçirilmiş tüplerden elde edilecek enerji sönümleyici modelleri

### 3.3. Yöntem

#### 3.3.1. Tüplerin işlenmesi

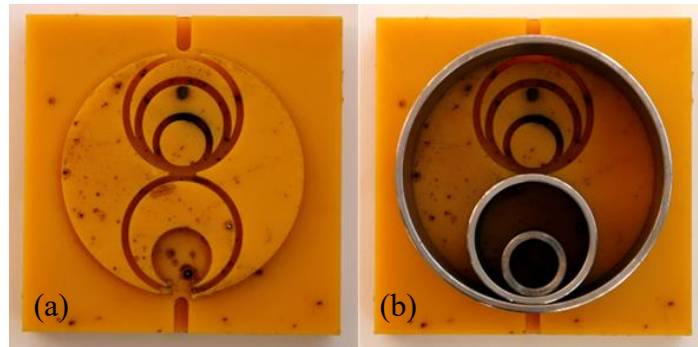
B1, B2, B3, B4 tüplerinin Tablo 3.1.'deki ölçülere getirilebilmesi için Tablo 3.3.'deki işlenmemiş tüplere talaşlı imalat uygulanmıştır. Tüplerin mekanik özellikleri de Tablo 3.3 verilmiştir.

Tablo 3.3. DIN1629 işlenmemiş tüplerin ölçüleri ve mekanik özellikleri

| DIN 1629 Dikişsiz-Basit Karbonlu-Çelik Boru |               |                      |                     |           |
|---------------------------------------------|---------------|----------------------|---------------------|-----------|
| Dış çap (mm)                                | Kalınlık (mm) | Çekme Dayanımı (Mpa) | Akma Dayanımı (Mpa) | Uzama (%) |
| 95                                          | 10            | 460                  | 295                 | 21,5      |
| 45                                          | 10            | 455                  | 320                 | 21        |
| 38                                          | 8             | 465                  | 267                 | 20,4      |
| 30                                          | 8             | 515                  | 215                 | 25        |

#### 3.3.2. Tüplerin birleştirilmesi

Tüpler ark kaynağı ile alından puntalanarak birbirlerine tutturulmuştur. Tuturma işleminde pozisyon hassasiyetini sağlamak için özel pozisyonlama aparatı tasarlanmış ve kullanılmıştır (Şekil 3.4.).



Şekil 3.4. Tüplerin birleştirilmesinde kullanılan aparat (a). Kaynak işlemi öncesi aparata yerleştirilmiş tüpler (b).

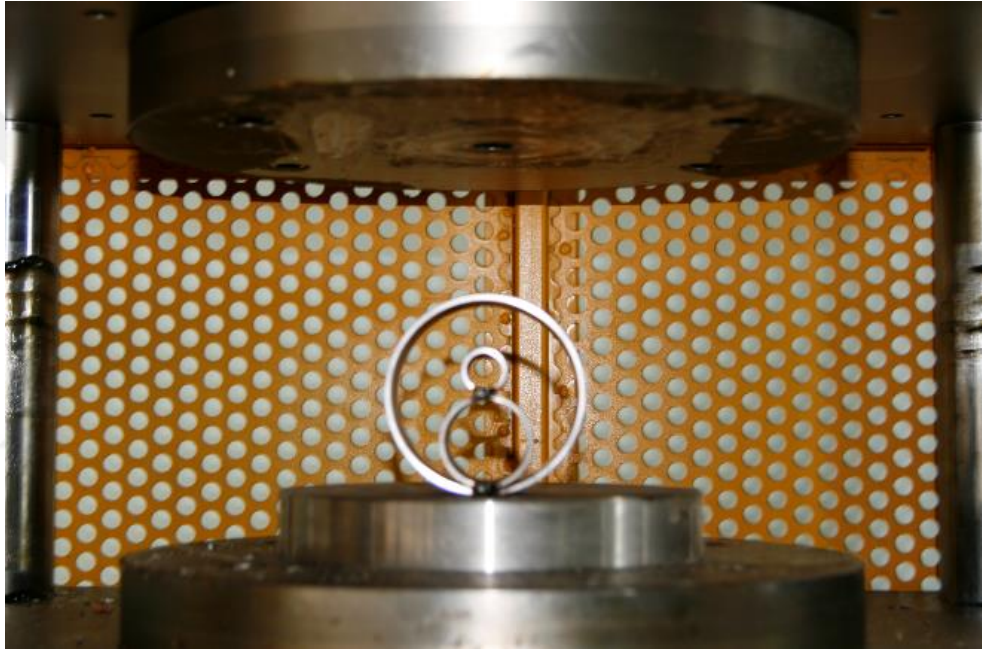
Kaynak işlemi sonrası elde edilen numuneler Şekil 3.5'deki gibidir.



Şekil 3.5. Üretilen enerji sönümleyiciler

### 3.3.3. Test cihazı

Bu çalışmada deney numunelerine; 1 mm/sn hızda yanal olarak yarı statik basma uygulayacak, 250 kN yük kapasiteli, üst tablası sabit, alt tablası hareketli, 4 kolonlu test cihazı kullanılmıştır. Cihaz, hidrolik tahrikli olup, saniyede 6 adet veri okuyabilmektedir (kuvvet-yer değiştirme verileri). Numuneler; hareketli alt tablanın üzerine yerleştirilip, alt tablaya paralel olan üst tablaya doğru numunenin hareket etmesi sonucu basma işlemi gerçekleştirilmiştir. (Şekil 3.6.).



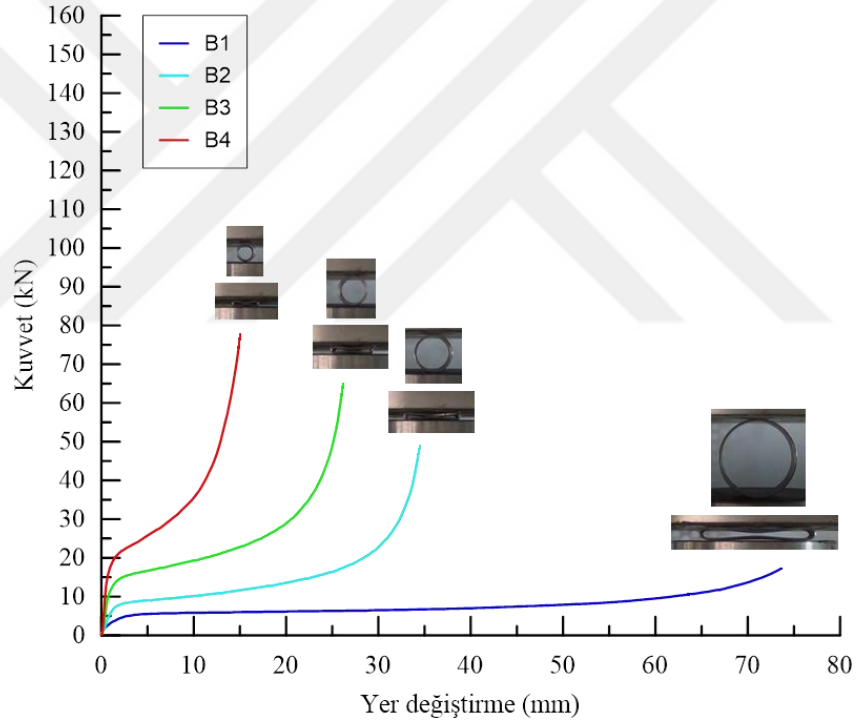
Şekil 3.6. Deney numunesinin basma makinasına yerleştirilmesi

Test cihazından elde edilen verilerden, kuvvet-yer değiştirme ve enerji yer değiştirme grafikleri elde edilmiştir.

## BÖLÜM 4. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

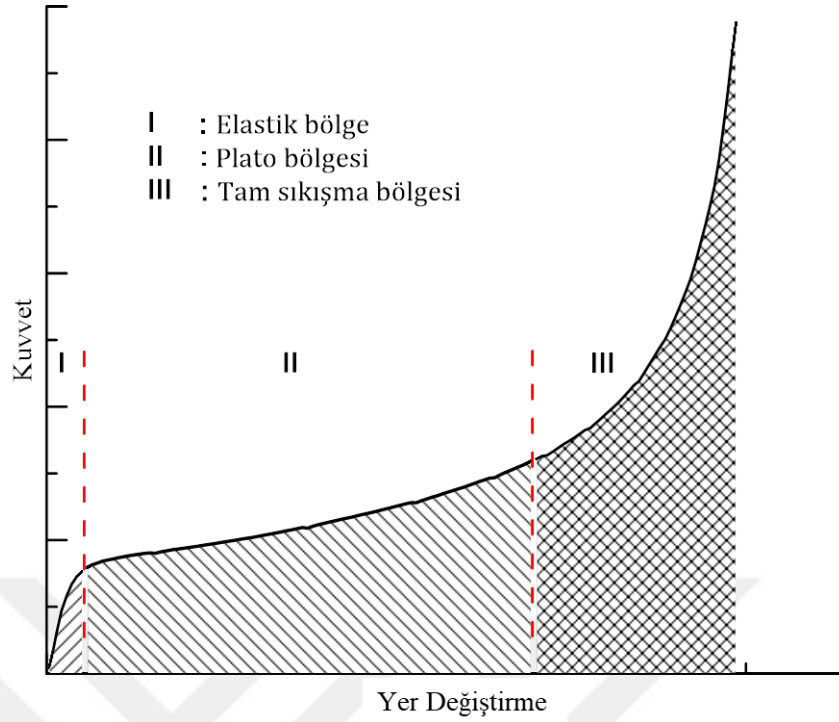
### 4.1. B1, B2, B3, B4 Tüplerinin Deney Sonuçları

İlk olarak, kombinasyonları oluşturan dört temel tüpün basma davranışı incelenmiştir. Bunlar, çökme kuvvetleri daha önce teorik olarak hesaplanmış olan B1, B2, B3, B4 numuneleridir (Tablo 3.1.). Temel tüplere ait kuvvet-yer değiştirme eğrileri Şekil 4.1.'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Temel tüp numunelerine ait basma testi kuvvet-yer değiştirme grafikleri

Yanal olarak ezilmeye zorlanan tekil tüplerin basma testinden elde edilen eğriler Şekil 4.2.'deki gibi üç ana kısma ayrılabilir. Bunlar; i) yükün uygulandığı ilk anda tüpün elastik olarak deforme olduğu elastik bölge, ii) tüpün neredeyse sabit bir yük altında ezildiği plato bölgesi ve iii) yanal kuvvetin çok hızlı bir şekilde arttığı tam sıkışma bölgesidir.



Şekil 4.2. İki plaka arasında yanal olarak ezilmeye zorlanan bir tüpe ait karakteristik kuvvet-yer değiştirme eğrisi

B1, B2, B3, B4 tüplerinin kuvvet- yerdeğiştirme eğrileri (Şekil 4.1.) incelendiğinde; plato bölgesinin genişliği, çapa ve cidar kalınlığına bağlı olarak farklılık gösterdiği görülmektedir. Ayrıca; aynı cidar kalınlığına sahip B2 ve B4 tüplerinin enerji absorbe değerleri birbirine yakın olmasına rağmen, ağırlıkları kıyaslandığında B2, B4'den 2,14 kat daha ağırdır. Tablo 4.1.'de tüplerin boyut, ağırlık ve absorbe edilen enerji değerleri görülmektedir. Enerji değerleri; kuvvet-yer değiştirme grafiklerinin altındaki alanların MS Excel'de hesaplanmasıyla elde edilmiştir.

Tablo 4.1. B1, B2, B3, B4 tüplerine ait ağırlık ve absorbe edilen enerji verileri

| Tüp Kodu | Dış çap (mm) | Kalınlık (mm) | Boy (mm) | Ağırlık (gr) | Absorbe Edilen Enerji (joule) |
|----------|--------------|---------------|----------|--------------|-------------------------------|
| B1       | 88,9         | 2,65          | 50       | 280          | 567                           |
| B2       | 41,8         | 2,5           | 50       | 120          | 513                           |
| B3       | 33,4         | 2,7           | 50       | 102          | 637                           |
| B4       | 20,9         | 2,5           | 50       | 56           | 505                           |

#### 4.2. İç İçe Geçirilmiş Tüplerin Deney Sonuçları

İç içe geçirilmiş tüplerin basma testinden elde edilen kuvvet- yer değiştirme ve enerji-yer değiştirme grafikleri Şekil 4.3.'den Şekil 4.24.'e kadar olan grafiklerde verilmiştir. Grafikler doğrultusunda tüplerin enerji sönümleme davranışları ve ÖEAK (Denklem 2.11.) değerleri irdelenmiştir. Buna göre;

- 2A numunesi kuvvet-yer değiştirme ve enerji-yer değiştirme grafikleri Şekil 4.3. ve Şekil 4.4.'de verilmiştir. Şekil 4.3.'de görüldüğü gibi ilk 40 mm yer değiştirme boyunca B1 tüpünün ezilmesi sonucunda ilk plato bölgesi oluşmuş, daha sonra B2 tüpünün ezilmeye başlamasıyla beraber B1 ve B2 tüpleri birlikte ezilerek ikinci plato bölgesini oluşturmuşlardır. 2A'nın absorbe ettiği enerji miktarı 987,2 j'dür.
- 3A numunesi kuvvet- yer değiştirme ve enerji-yer değiştirme grafikleri Şekil 4.5. ve Şekil 4.6.'de verilmiştir. 3A'da, birbirine temas halinde olan 3 tüpün aynı anda ezilmeye başlaması sonucunda tüpler tek tüp davranışı sergilemiş ve tek plato oluşumu meydana gelmiştir. B1 ile 3A kıyaslandığında, ağırlık %86, enerji %200 artmıştır. 3A'nın absorbe ettiği enerji miktarı 1688 j'dür.
- 3B numunesi kuvvet- yer değiştirme ve enerji-yer değiştirme grafikleri Şekil 4.7. ve Şekil 4.8.'de verilmiştir. Şekil 4.7.'de görüldüğü gibi; B1, B2 ve B4'ün sıralı olarak ezilmesiyle 3 adet plato oluşumu gözlemlenmiştir. 3B ile 2A numunesi kıyaslandığında ağırlık %14 artmış, enerji değeri ise %78 artmıştır. 3B'nin absorbe ettiği enerji miktarı 1760,1 j'dür.
- 3C numunesi kuvvet- yer değiştirme ve enerji-yer değiştirme grafikleri Şekil 4.9. ve Şekil 4.10.'de verilmiştir. Şekil 3.3.'den görüldüğü gibi 3C; 3B'deki B4 tüpünün B2'nin içine yerleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Bu farklılık; ilk plato bölgesinin uzunluğunun 3B'ye göre artmasına neden olmuş, enerji absorbe değeri %19 azalmış, ağırlık aynı kalmıştır. 3C'nin absorbe ettiği enerji miktarı 1416,9 j'dür.
- 4A numunesi kuvvet- yer değiştirme ve enerji-yer değiştirme grafikleri Şekil 4.11. ve Şekil 4.12.'de verilmiştir. B1, B2, B3 ve B4'ün sıralı ezilmesiyle 4 adet plato oluşumu gözlemlenmiştir. Şekil 3.3.'den görüldüğü gibi 4A; 3C'ye



B3 tüpünün ilave edilmesiyle oluşturulmuştur. Bu farklılık sonucunda, B1 tüpünün ezilmesiyle oluşan plato uzunluğu kısal mış ve dengeli bir enerji absorbe eğrisi elde edilmiştir. 3C'ye göre ağırlık %22,2 art mış, enerji %53,8 art mıştır. 4A'nın absorbe ettiği enerji miktarı 2179,7 j'd r.

- 4B numunesi kuvvet- yer değiştirme ve enerji-yer değiştirme grafikleri şekil 4.13. ve şekil 4.14.'de verilmiştir. şekil 3.3.'den görüldüğü gibi 4B; 4A'daki B3 tüpünün B2'nin içine yerleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Bu farklılık; ilk plato bölgesinin uzamasına ve enerji absorbe değerinin 4A'ya göre %22 azalmasına neden olmuştur. Ağırlık 4A ile aynı kalmıştır. 4B'nin absorbe ettiği enerji miktarı 1699,3 j'd r.
- 4C numunesi kuvvet- yer değiştirme ve enerji-yer değiştirme grafikleri şekil 4.15. ve şekil 4.16.'de verilmiştir. şekil 3.3.'den görüldüğü gibi 4C; 4A'daki B3 tüpünün yerine B2 yerleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Bu farklılık sonucunda, 4A'ya göre ağırlık %3,3 art mış, enerji %9,3 azalmıştır. 4C aynı zamanda 3C'ye B2 tüpünün ilave edilmesiyle de elde edilmiştir. 3C'ye göre kıyaslandığında ağırlık %26 art mış, enerji %39,4 art mıştır. 4C'nin absorbe ettiği enerji miktarı 1975,8 j'd r.
- 5A numunesi kuvvet- yer değiştirme ve enerji-yer değiştirme grafikleri şekil 4.17. ve şekil 4.18.'de verilmiştir. şekil 3.3.'den görüldüğü gibi 5A; 4B'ye ikinci B3 tüpünün yerleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Bu farklılık sonucunda, 4B'ye göre ağırlık %18,2 art mış, enerji %39,2 art mıştır. 5A'nın absorbe ettiği enerji miktarı 2365,6 j'd r.
- 5B numunesi kuvvet- yer değiştirme ve enerji-yer değiştirme grafikleri şekil 4.19. ve şekil 4.20.'de verilmiştir. şekil 3.3.'den görüldüğü gibi 5B; 4C'ye B3 tüpünün yerleştirilmesiyle oluşturulmuştur. 4C'ye göre ağırlık %17,6 art mış, enerji %7,3 art mıştır. 5B aynı zamanda 5A'daki B2 tüpünün yerine B3 tüpünün gelmesiyle ve 4B tüpüne B2 tüpünün ilave edilmesiyle oluşturulmuştur. 5B ile 5A karşılaştırıldığında, ağırlık %2,8 art mış, enerji %10,3 azalmıştır. 5B ile 4B karşılaştırıldığında, ağırlık %2,15 art mış, enerji %24,8 art mıştır. 5B'nin absorbe ettiği enerji miktarı 2121,1 j'd r.
- 5C numunesi kuvvet- yer değiştirme ve enerji-yer değiştirme grafikleri şekil 4.21. ve şekil 4.22.'de verilmiştir. şekil 3.3.'den görüldüğü gibi 5C; 5B'deki

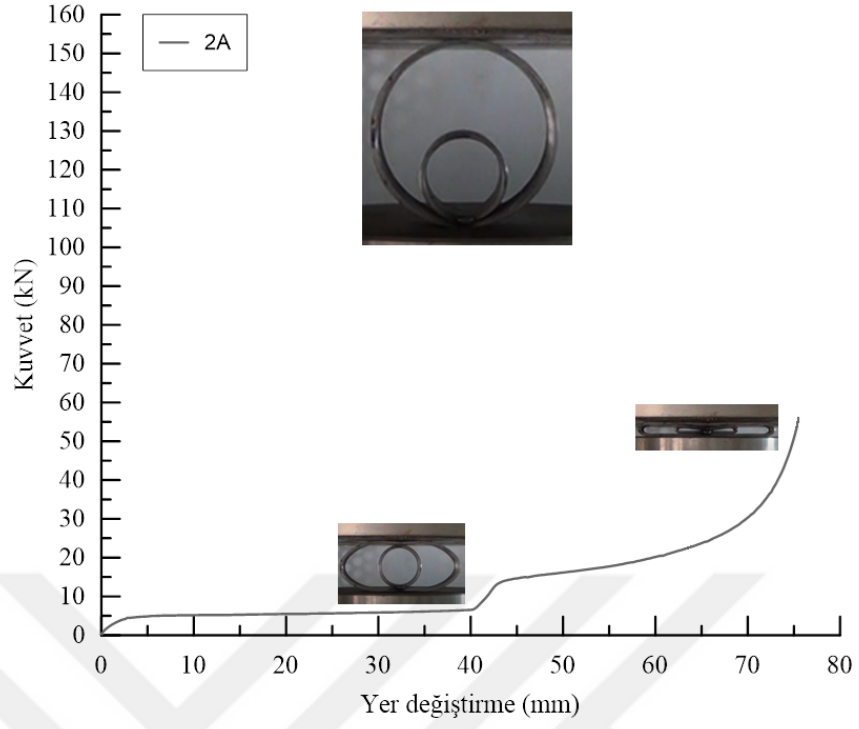
B3 tüpünün yer değiştirmesiyle oluşturulmuştur. 5B'ye göre ağırlık artmamış, enerji %13,4 artmıştır. 5C aynı zamanda, 4C'ye B3 tüpünün ilave edilmesiyle de oluşmuştur. 4C'ye göre ağırlık %17,6 artmış, enerji %21 artmıştır. 5C'nin absorbe ettiği enerji miktarı 2405,8 j'd r.

- 6A numunesi kuvvet- yer değiştirme ve enerji-yer değiştirme grafikleri şekil 4.23. ve şekil 4.24.'de verilmiştir. şekil 3.3.'den görüldüğü gibi 6A; 5C'ye ikinci B3 tüpünün yerleştirilmesiyle oluşturulmuştur. 5C'ye göre ağırlık % 14,9 artmış, enerji %4,3 artmıştır. 6A aynı zamanda 5A'ya B2 tüpünün ilave edilmesiyle de oluşturulmuştur. 5A'ya göre ağırlık %18, enerji %6 artmıştır. 6A'nın absorbe ettiği enerji miktarı 2511 j'd r.

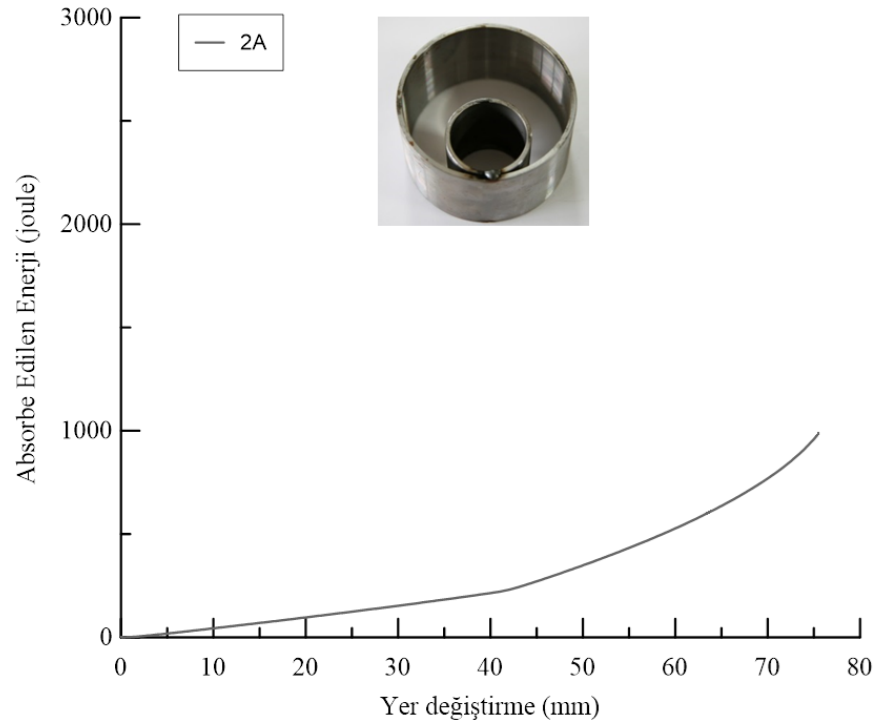
Deney numunelerine ait ÖEAK (E/m) değerleri Tablo 4.2. verilmiştir. Buna göre;

- Kuvvet- yer değiştime grafiği için bir  n kısıt olmadığı durumda, ÖEAK değeri 8,96 olan B4 tekil tüpünü kullanmak yerinde olacaktır.
- Sadece ÖEAK değerleri bakımından kıyaslandığında 4A kullanılmalıdır.
- Minimum ağırlık bakımından değerlendirildiğinde, ÖEAK birbirine yakın olan 4A ile 3B arasından, 3B tercih edilebilir. Ayrıca, 3B maliyet açısından da 4A'ya göre avantaj sağlayacaktır.
- Ağırlıktan bağımsız olarak, sadece enerji açısından değerlendirildiğinde en yüksek enerji sönümlleme değeri 6A numunesinden elde edilmiştir.
- Üniform enerji absorbe karakteristikleri bakımından 4A, 5C ve 6A  n plana çıkmaktadır.

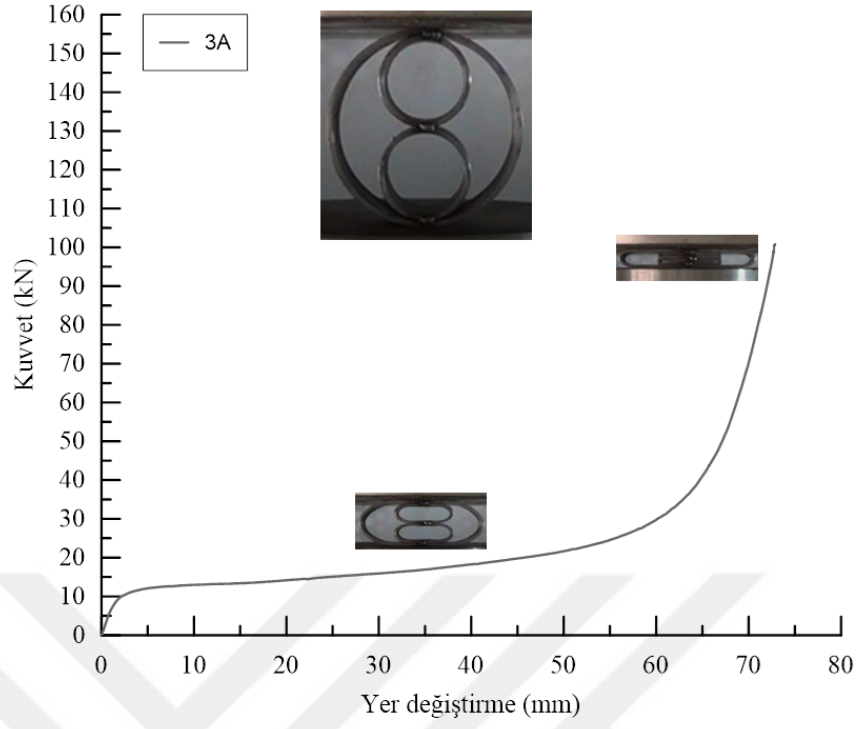
Literatürdeki benzer çalışmalarda,    tüplü sistemlerin [1, 15] ÖEAK değerleri 1,67-1,95 aralığında olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmadaki    tüplü sistemlerin ÖEAK değerlerinin 3,10-3,85 aralığında olduğu dikkate alındığında, literat rdekilere göre daha verimli enerji absorbe ediciler elde edildiği anlaşılmaktadır.



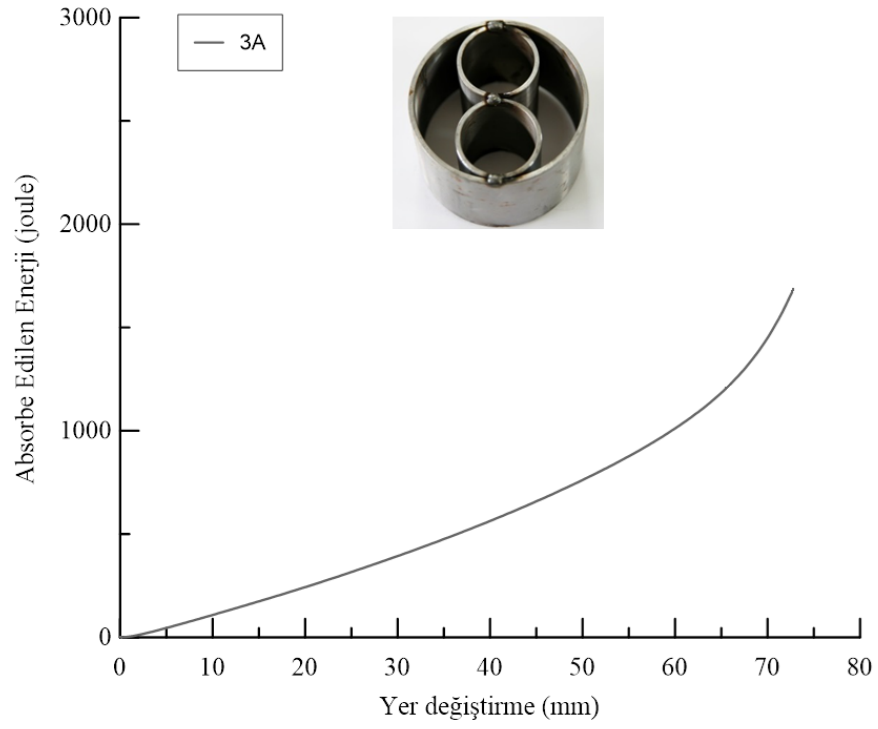
şekil 4.3. 2A numunesi kuvvet- yer değiştirme grafiği



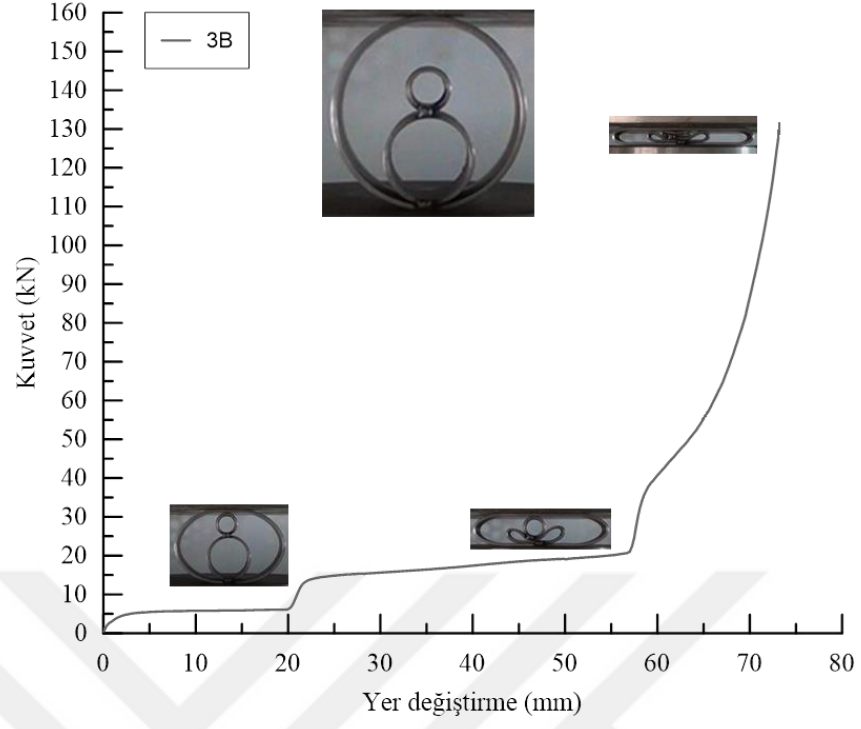
şekil 4.4. 2A numunesi absorbe edilen enerji-yer değiştirme grafiği



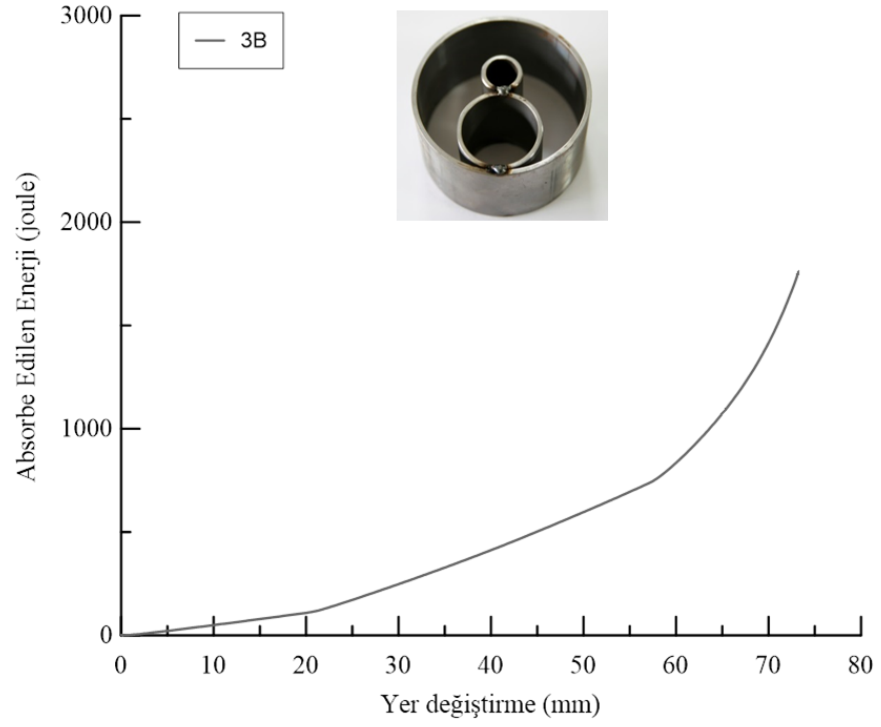
şekil 4.5. 3A numunesi kuvvet-yer değiştirme grafiği



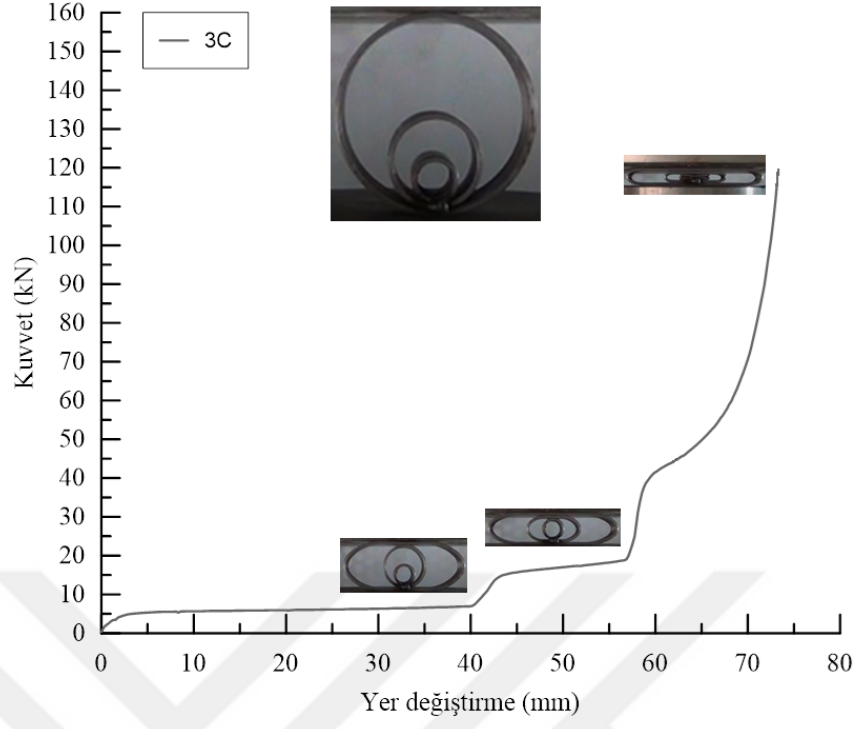
şekil 4.6. 3A numunesi absorbe edilen enerji-yer değiştirme grafiği



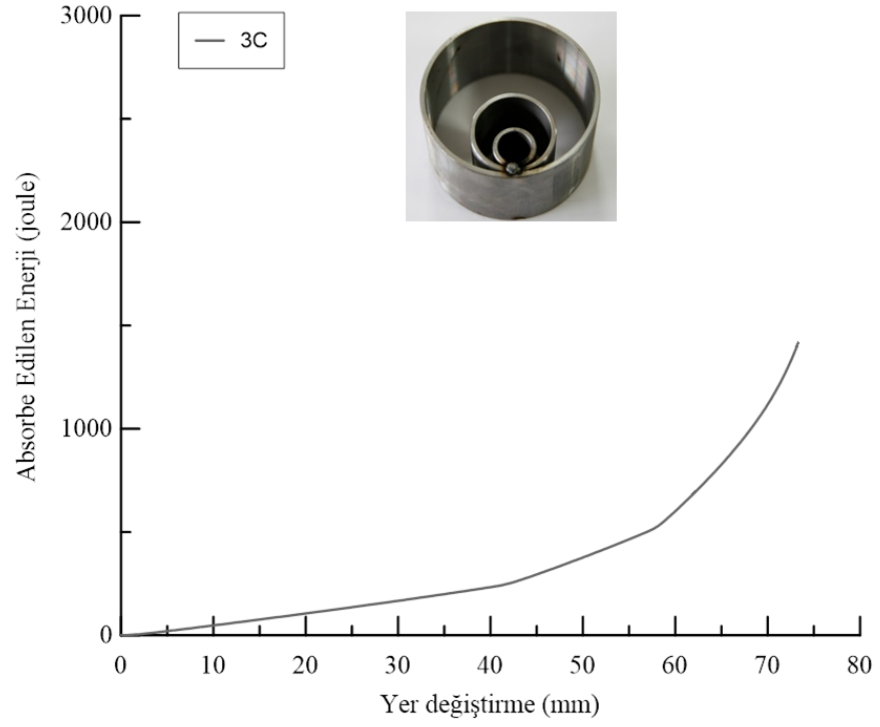
şekil 4.7. 3B numunesi kuvvet- yer değiştirme grafiği



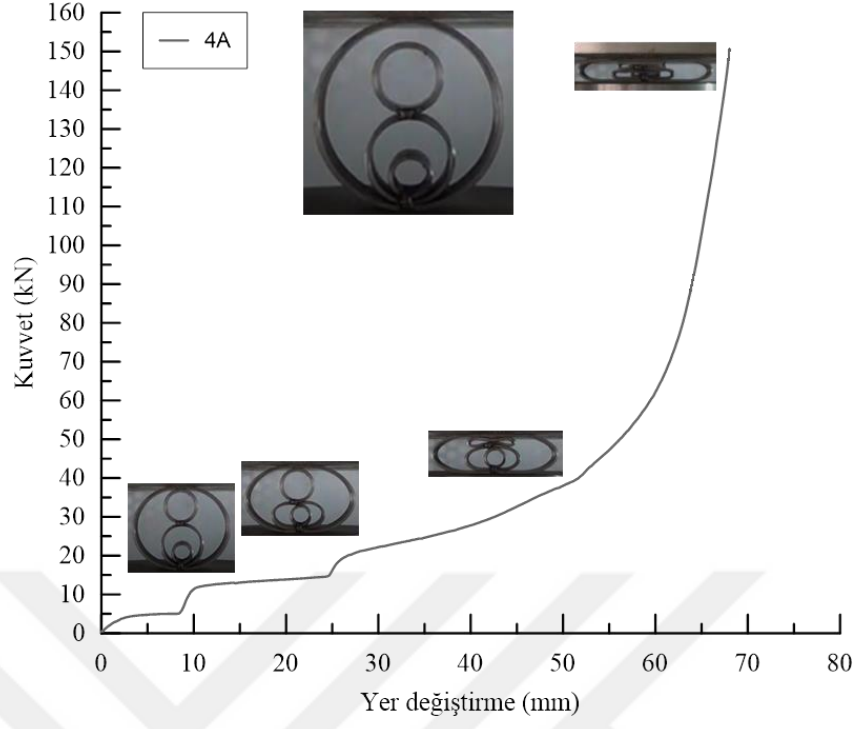
şekil 4.8. 3B numunesi absorbe edilen enerji-yer değiştirme grafiği



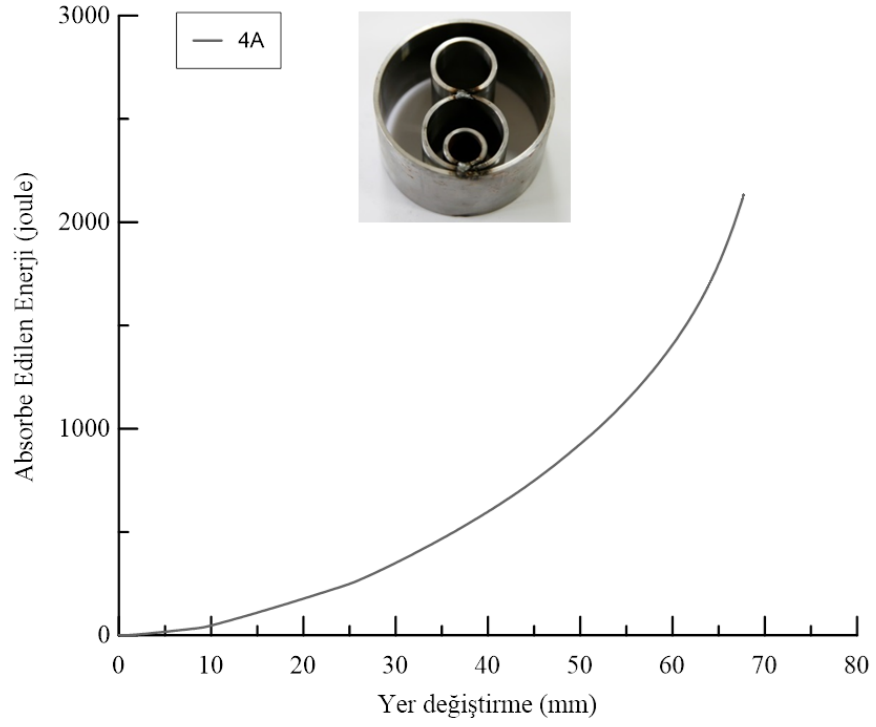
şekil 4.9. 3C numunesi kuvvet- yer değiştirme grafiği



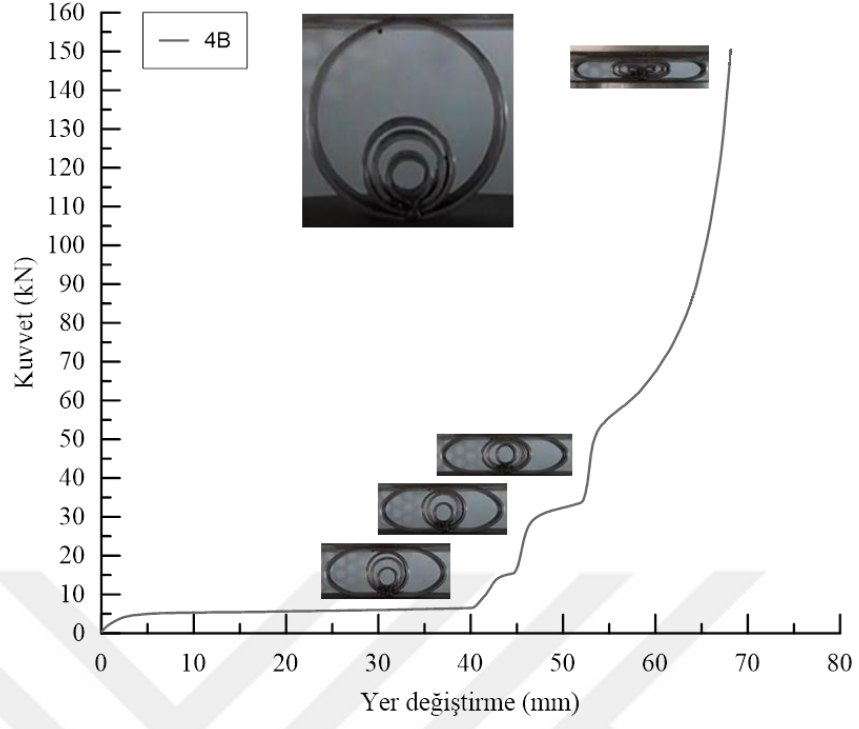
şekil 4.10. 3C numunesi absorbe edilen enerji-yer değiştirme grafiği



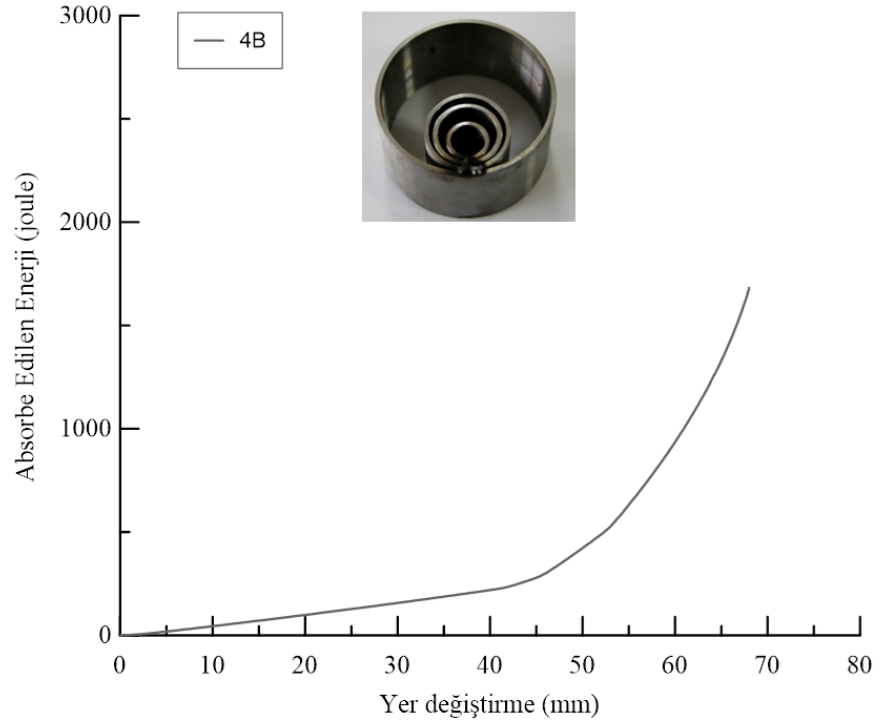
şekil 4.11. 4A numunesi kuvvet- yer değiştirme grafiği



şekil 4.12. 4A numunesi absorbe edilen enerji-yer değiştirme grafiği

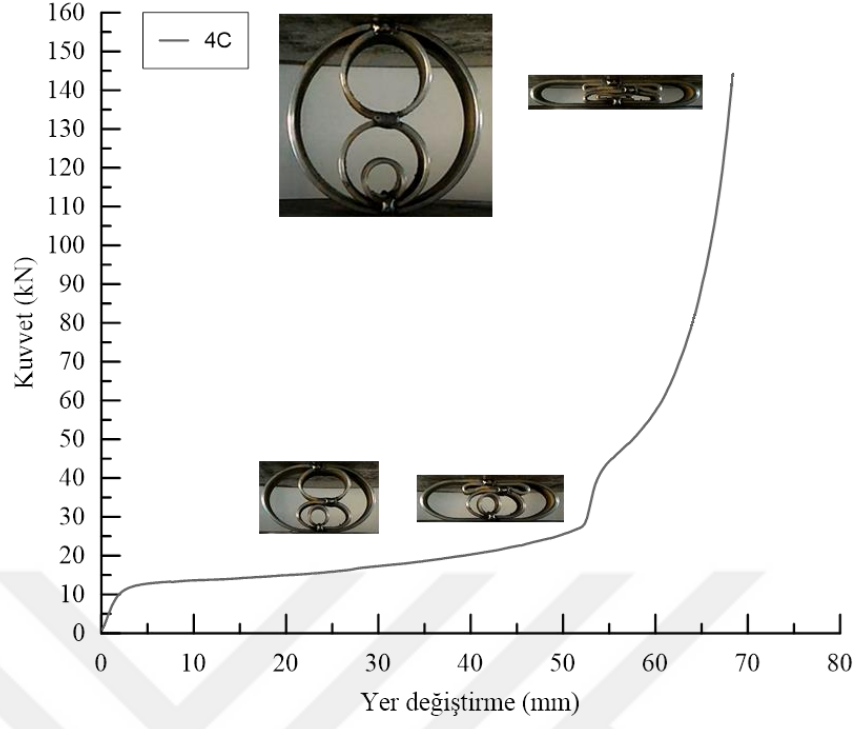


şekil 4.13. 4B numunesi kuvvet- yer değiştirme grafiği

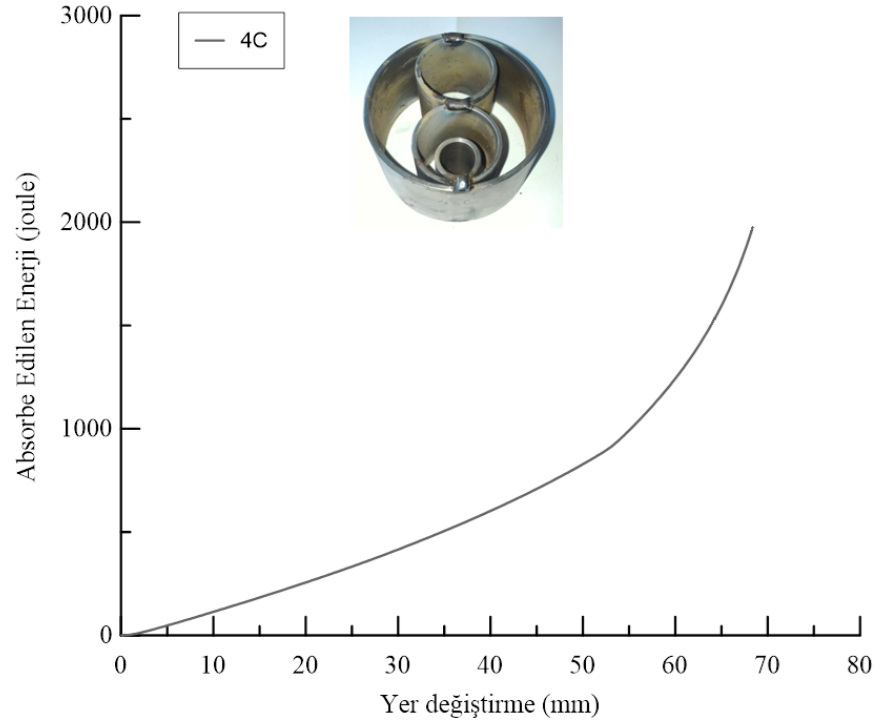


şekil 4.14. 4B numunesi absorbe edilen enerji-yer değiştirme grafiği

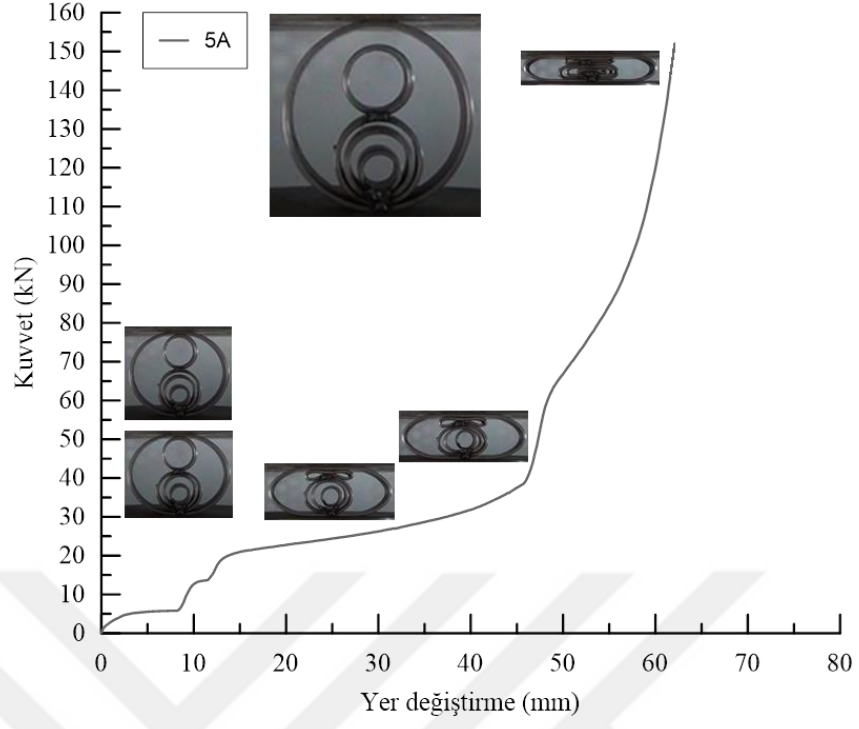




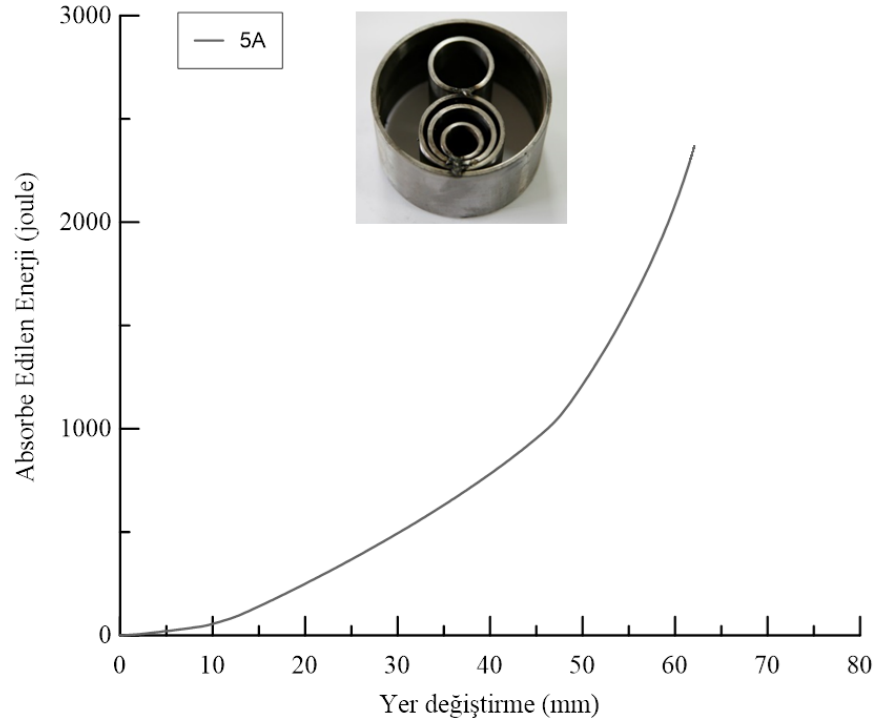
şekil 4.15. 4C numunesi kuvvet- yer değiştirme grafiği



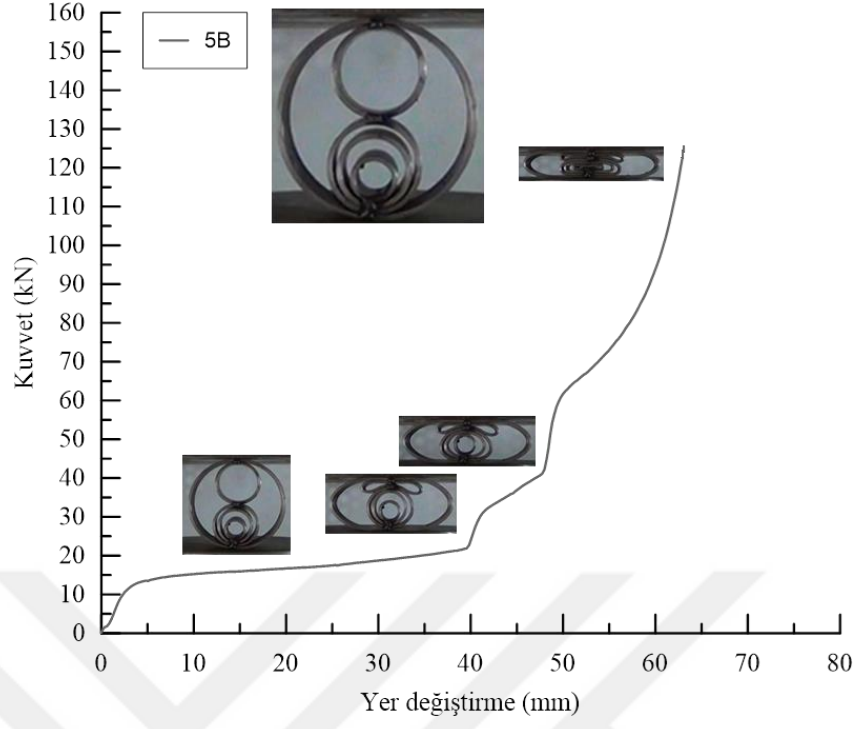
şekil 4.16. 4C numunesi absorbe edilen enerji-yer değiştirme grafiği



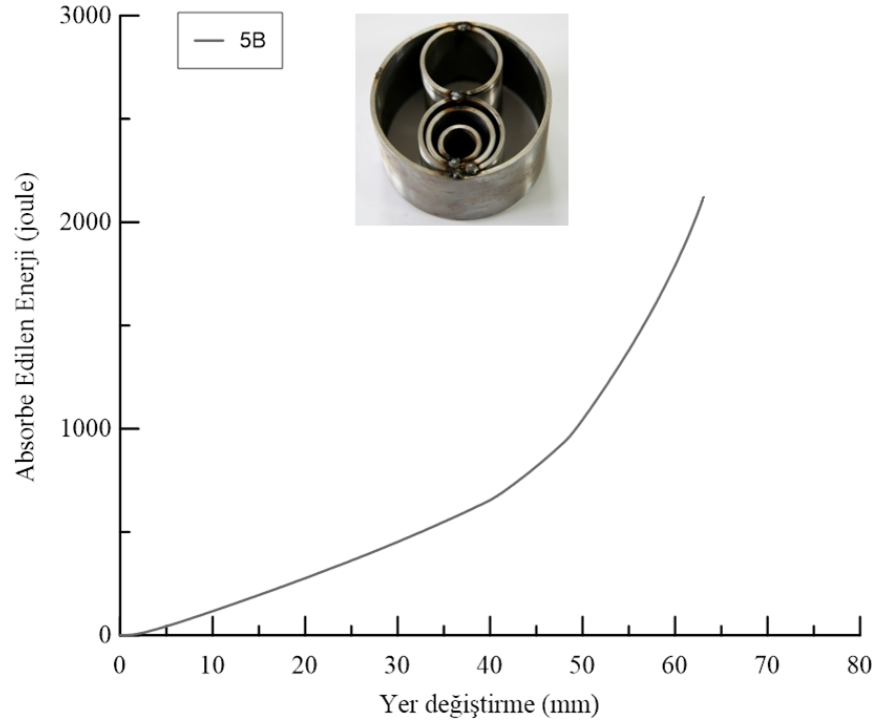
şekil 4.17. 5A numunesi kuvvet- yer değiştirme grafiği



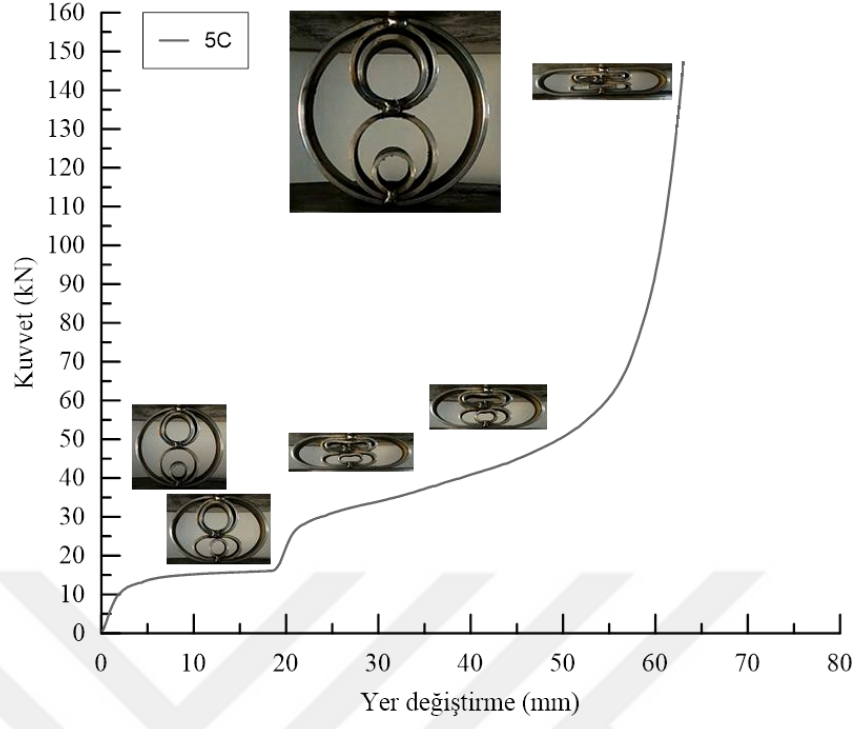
şekil 4.18. 5A numunesi absorbe edilen enerji-yer değiştirme grafiği



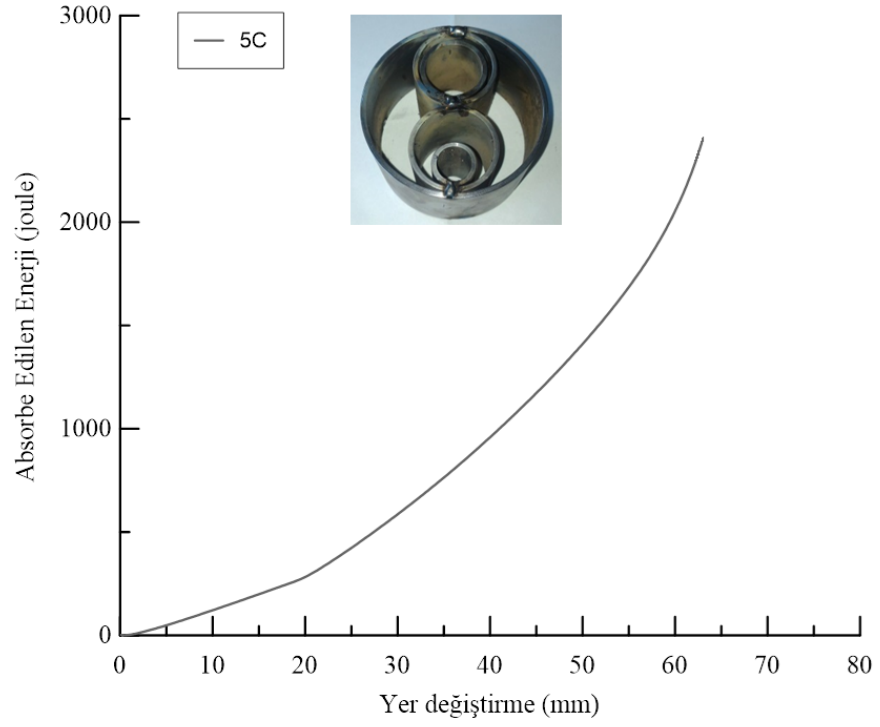
şekil 4.19. 5B numunesi kuvvet- yer değiştirme grafiği



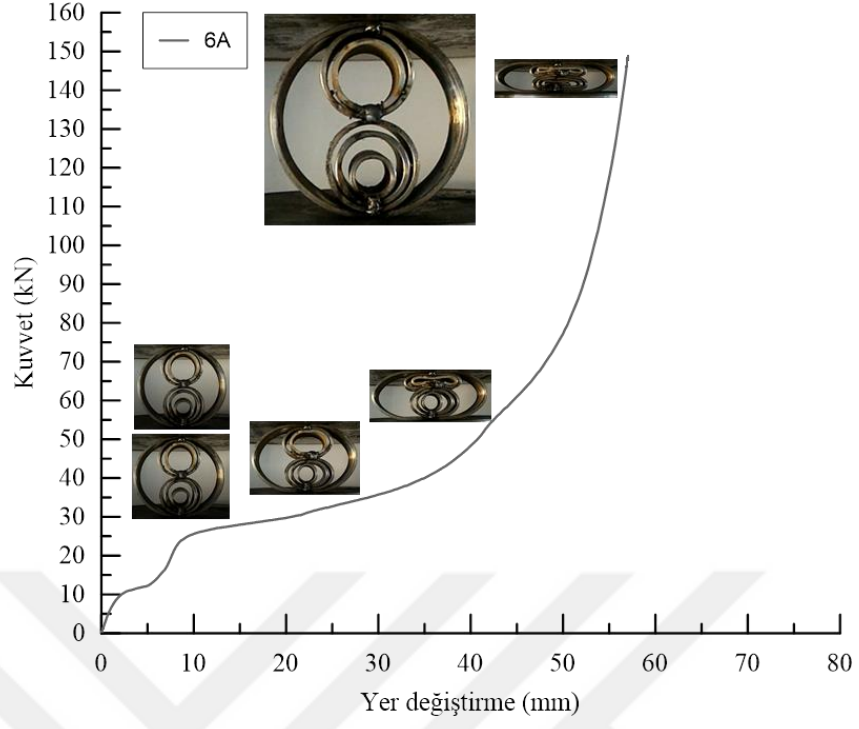
şekil 4.20. 5B numunesi absorbe edilen enerji-yer değiştirme grafiği



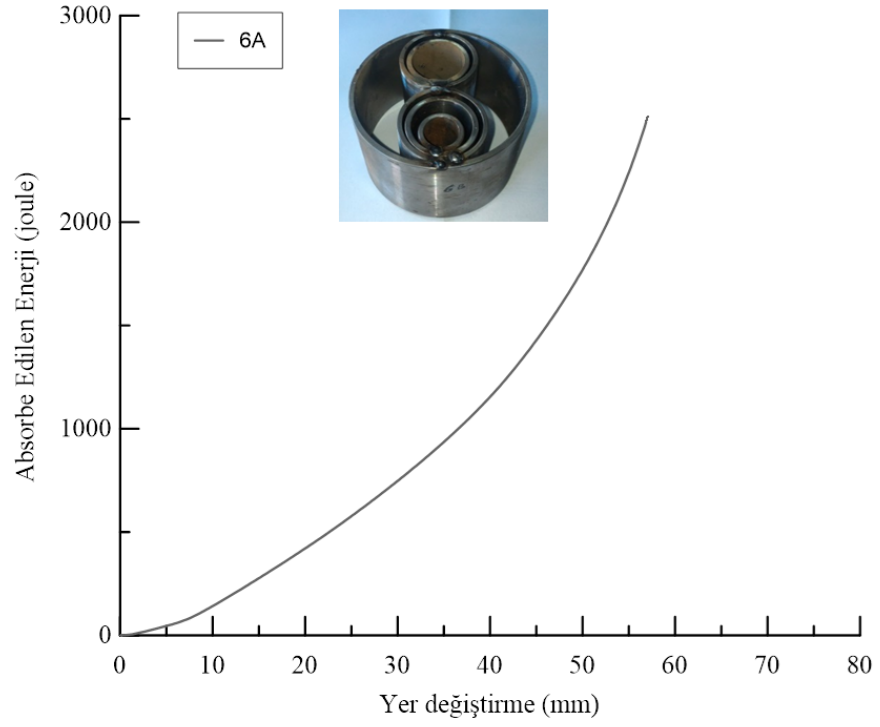
şekil 4.21. 5C numunesi kuvvet- yer değiştirme grafiği



şekil 4.22. 5C numunesi absorbe edilen enerji-yer değiştirme grafiği



şekil 4.23. 6A numunesi kuvvet- yer değiştirme grafiği



şekil 4.24. 6A numunesi absorbe edilen enerji-yer değiştirme grafiği

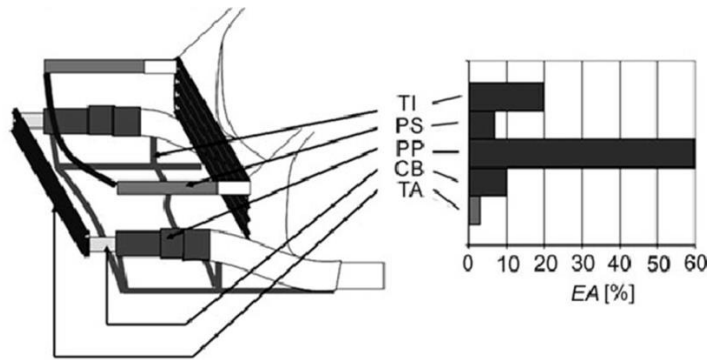
Tablo 4.2. Deney sonuçları analiz tablosu

| Numune | Yer Değ. (mm) | Enerji (J) | Ağırlık (gr) | ÖEAK(J/gr) |
|--------|---------------|------------|--------------|------------|
| 2A     | 75,5          | 987,2      | 400,4        | 2,47       |
| 3A     | 72,8          | 1688,0     | 520,8        | 3,24       |
| 3B     | 73,3          | 1760,1     | 456,7        | 3,85       |
| 3C     | 73,3          | 1416,9     | 456,7        | 3,10       |
| 4A     | 68,0          | 2179,7     | 558,3        | 3,90       |
| 4B     | 68,2          | 1699,3     | 558,3        | 3,04       |
| 4C     | 68,4          | 1975,8     | 577,1        | 3,42       |
| 5A     | 62,8          | 2365,6     | 659,9        | 3,59       |
| 5B     | 63,1          | 2121,1     | 678,7        | 3,13       |
| 5C     | 63,0          | 2405,8     | 678,7        | 3,54       |
| 6A     | 57,0          | 2511,0     | 780,2        | 3,22       |
| B1     | 73,6          | 567,0      | 280,0        | 2,02       |
| B2     | 34,5          | 513,1      | 120,4        | 4,26       |
| B3     | 26,2          | 637,3      | 101,6        | 6,28       |
| B4     | 15,1          | 505,2      | 56,4         | 8,96       |

Enerji değerleri grafiklerin altındaki alanın ölçümü ile elde edilmiştir.

#### 4.3. Vaka Çalışması

56 km/saat hızında, 1000 kg ağırlığındaki bir B segmenti araç, rijit bir engele tam karşıdan çarptığında 121000 j enerji açığa çıkmaktadır. Bu enerjinin %10'unu araç üzerinde bulunan iki adet enerji sönümleyen ezilme kutusu sönümlemektedir (Şekil 4.25.). Bu durumda 2 adet enerji sönümleyiciden her birinin sönümlemesi gereken enerji 6050 joule'dür. Tablo 4.2.deki değerler incelendiğinde; ÖEAK en yüksek olan 4A numunesinin uzunluğu 50 mm'den 140 mm'ye çıkarıldığında söz konusu araç için 4A'nın kullanılabileceği görülmektedir.



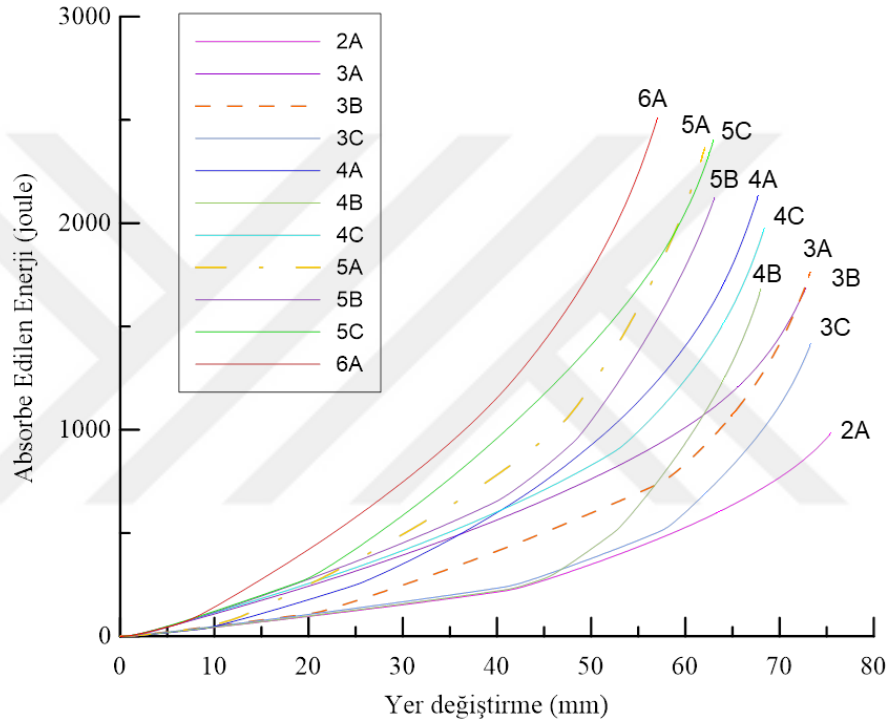
Şekil 4.25. Araç önündeki yapısal elemanların çarpışma enerjisini absorbe etmeye olan katkıları (TI: Alt çerçeve, PS: Üst ray, PP: Ön ana ray, CB: Ezilme kutusu, TA: Tampon) [23].

## BÖLÜM 5. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

İç içe geçirilmiş tüp yapı kombinasyonlarıyla yapılan çalışmalardan elde edilen genel sonuçlar ve öneriler aşağıda özetlenmiştir.

- Tüp yapının genel deformasyon davranışında yanal yük altında akmayla kendini gösteren çökme olayı, kuvvet-yer değiştirme eğrisinde plato oluşumuna neden olmakta ve daha sonra aşırı ezilmeyle (yığılma) birlikte eğrinin hızlı bir şekilde yükselmesiyle son bulmaktadır.
- Tüp yapının hem elastik hem plastik deformasyon direnci, cidar kalınlığı, çap ve malzemenin mekanik özellikleriyle ilişkili olarak değişmektedir.
- B1 tüpü içine yerleştirilen diğer tüplerin iç içe ve uç uca dizilim farklılıkları (3B ile 3C ve 4A ile 4B olduğu gibi) sönümlenen enerji değerini doğrudan etkilediği anlaşılmıştır. Konu irdelendiğinde; iç içe konumlandırılan tüplerin uç uca konumlandırılanlara göre daha az yer değiştirme miktarına sahip oldukları, dolayısıyla daha az enerji sönümleyebildikleri görülmüştür. Sistemlerde yüksek enerji sönümleme değerine sahip olan tüplerin bu açıdan da değerlendirilmesi gerekmektedir.
- İç içe geçirilmiş tüp yapılarında, kullanılan tüp sayısı, dizilimi, bunların temas durumu ve aralarındaki mesafe, kuvvet-yer değiştirme ve sönümlenen enerji eğrilerinin temel karakteristiğini belirlemektedir.
- 3B ve 4A modelleri ÖEAK (Özgül Enerji Absorbe Kapasitesi) değerinin yüksek olması nedeniyle öne çıkan kombinasyonlar olmuştur (Tablo 4.1.).
- 4A, 5C, 6A'nın numuneler arasında en iyi üniform enerji sönümleme davranışı sergilediği görülmüştür (Şekil 5.1.). 5C ve 6A'nın ÖEAK değeri ve yer değiştirme değerinin sınırlı olması nedeniyle malzeme, kalınlık ve çap parametrelerinin optimizasyon edilmesi suretiyle geliştirilmesi gerekir.

- Kombinasyonlarda tüp boşluklarına yerleştirilecek hafif gözenekli malzemelerin hem genel deformasyon davranışını hem de ÖEAK değerinin geliştirmesine katkı sunması beklenmektedir.
- Tek tüp ile daha küçük yüklerde çöken ve gittikçe yükselerek önemli oranda enerji absorbe eden yapılar elde etmek mümkün görünmemektedir. Belli bir sistematik ile geliştirilmiş iç içe geçirilen tüp sistemlerinin bu ihtiyaca cevap veren yapılar olduğu bu deneysel çalışmalar neticesinde daha iyi anlaşılmıştır.



Şekil 5.1. İç içe geçirilmiş tüp yapıların enerji sönmeme davranışlarının karşılaştırılması



## KAYNAKLAR

- [1] Olabi, A.G. , Quasi-static, impact and energy absorption of internally nested tubes subjected to lateral loading. *Thin-Walled Structures*, 337-350, 2015.
- [2] Altin, M., The effect of percent foam fill ratio on the energy absorption capacity of axially compressed thin-walled multi-cell square and circular tubes. *Int. Journal of Mechanical Sciences*, 368-379, 2017.
- [3] Kılıçaslan, C., Farklı Geometrillerdeki Ezilme Tüplerinin Enerji Sönümleme Kapasitelerinin Nümerik Olarak Belirlenmesi. <https://www.researchgate.net>, 2016.
- [4] Feraboli, P., Crush energy absorption of composite channel section specimens. *Composites: Part A*, 1248–1256, 2009.
- [5] Abramovicz, W., Thin-walled structures as impact energy absorbers. *Thin-Walled Structures* 41, 91–107, 2003.
- [6] Eren, Z., İ., Eksenel darbe yükü uygulanan iç içe tüplerin çarpışma ve ezilme davranışının sayısal ve deneysel olarak incelenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Uçak ve Uzay Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi, 2015.
- [7] Chen, Z., A novel multi-cell tubal structure with circular corners for crashworthiness. *Thin-Walled Structures* 122, 329–343, 2018.
- [8] Altın, M., Taşıtlarda kullanılan metalik köpük içeren çarpışma kutularının enerji sönümleme kapasitelerinin araştırılması. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi, Yüksek Lisans Tezi, 2017.
- [9] Cerit, M., E., Şehirler arası otobüslerde önden çarpışma enerjisini yutucu pasif güvenlik sisteminin geliştirilmesi. TOBBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi, 2011.

- [10] Bai, J., Bending collapse of dual rectangle thin-walled tubes for conceptual design. *Thin-Walled Structures* 135, 185–195, 2019.
- [11] Huang, Z., Three-point bending collapse of thin-walled rectangular beams. *International Journal of Mechanical Sciences* 144, 461–479, 2018.
- [12] Morris, E., Lateral crushing of circular and non-circular tube systems under quasi-static conditions. *Journal of Materials Processing Technology* 191, 132–135, 2007.
- [13] Morris, E., Analysis of nested tube type energy absorbers with different indenters and exterior constraints. *Thin-Walled Structures* 44, 872–885, 2006.
- [14] Olabi, A., G., Optimised design of nested circular tube energy absorbers under lateral impact loading. *International Journal of Mechanical Sciences* 50, 104–116, 2008.
- [15] Yu, Z., L., Nested tube system applicable to protective structures against blast shock. *International Journal of Impact Engineering* 102, 129–139, 2017.
- [16] Xu, B., An efficient energy absorber based on fourfold-tube nested circular tube system. *Thin-Walled Structures* 137, 143–150, 2019.
- [17] Sinaie, S., Validation of the material point method for the simulation of thin-walled tubes under lateral compression. *Thin-Walled Structures* 130, 32–46, 2018.
- [18] Tran, T., A study on nested two-tube structures subjected to lateral crushing. *Thin-Walled Structures* 129, 418–428, 2018.
- [19] Azarakhsh, S., Collapse behavior of thin-walled conical tube clamped at both ends subjected to axial and oblique loads. *Thin-Walled Structures* 112, 1–11, 2017.
- [20] Baroutaji, A., On the crashworthiness performance of thin-walled energy absorbers: Recent advances and future developments. *Thin-Walled Structures* 118, 137–163, 2017.
- [21] Alghamdi, A., A., A., Collapsible impact energy absorbers: an overview. *Thin-Walled Structures* 39, 189–213, 2001.
- [22] Lu, G., Yu., T., *Energy absorption of structures and materials*. Woodhead Publishing Ltd and CRC Press LLC, 88–98, 2003.
- [23] Morello, L., *The automotive body*. Springer, 2011.

## ÖZGEÇMİŞ

Ortaç AKDİKMEN, 27.11.1979'da İstanbul'da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini İstanbul'da tamamladı. 1996 yılında Beşiktaş Lisesi'nden mezun oldu. 1998 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nü 2003 yılında bitirdi. 2004 yılında otomotiv sektöründe sac şekillendirme ve kaynaklı imalat üzerine üretim yapan bir firmada çalışmaya başladı. 2013 yılında Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisansa başladı. Halen 2004 yılında çalışmaya başladığı firmada görevini sürdürmektedir.