



Numerical investigation of energy absorption behaviors of variable thickness tubes

Dursun Meriç^{1*} , Hasan Gedikli² 

¹A. Kanca Vocational School, Black Sea Technical University, Trabzon, 61530, Turkey

²Mechanical Engineering Department, Black Sea Technical University, Trabzon, 61080, Turkey

Highlights:

- Investigation of energy absorption properties of thin-walled variable thickness tubes
- Determination of the thickness change of variable thickness tubes by optimization method
- Comparison of force-displacement graphs of fixed thickness and variable thickness tubes

Keywords:

- Variable thickness tubes
- Finite element method
- Multi-objective optimization
- Energy absorption

Article Info:

Research Article
Received: 29.11.2019
Accepted: 09.05.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.652878

Correspondence:

Author: Dursun Meriç
e-mail: dmeric@ktu.edu.tr
phone: +90 462 752 8174

Graphical/Tabular Abstract

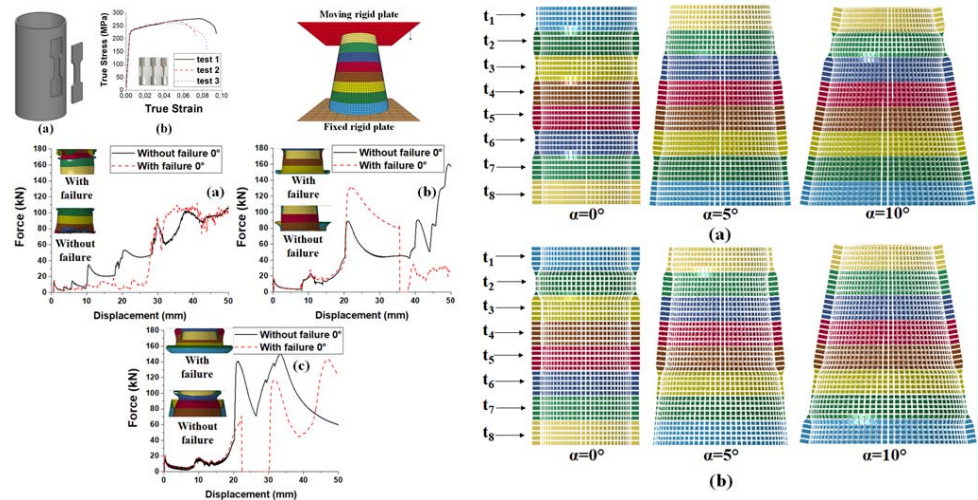


Figure A. Multi-objective optimization process of functionally graded tubes (FGT)

Purpose: This study aims to numerically investigate the energy absorption behavior of functionally graded tubes.

Theory and Methods: Numerical simulation and multi-objective optimization analysis were performed by Ls_Dyna software included Ls-Opt module. The optimum layer thickness determined according to highest specific energy absorption and lower peak force.

Results: As a result of optimization, the optimum layer thicknesses for 0° , 5° and 10° taper angles range from 0.53 mm to 3.90 mm, 0.53 mm to 3.96 and 0.55 mm to 3.97 mm, respectively.

Conclusion: 5° taper angle tubes gives the highest peak force and absorbed energy values compared 0° and 10° tubes for fixed thickness tubes.

Absorbed energy and peak force values increased with increasing layer thickness.

It is possible to obtain low peak force and high specific energy absorption at the same time by optimization of VTT layer thicknesses.



Değişken kalınlıklı tüplerin enerji sönümlenme davranışlarının sayısal incelenmesi

Dursun Meriç^{1*}, Hasan Gedikli²

¹Karadeniz Teknik Üniversitesi, A. Kanca MYO, 61530, Sürmene, Trabzon

²Karadeniz Teknik Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon

Ö N E Ç İ K A N L A R

- İnce cidarlı değişken kalınlıklı tüplerin enerji sönümlenme özelliklerinin incelenmesi
- Optimizasyon yöntemi ile değişken kalınlıklı tüplerin kalınlık değişiminin belirlenmesi
- Sabit kalınlıklı ve değişken bölge kalınlıklı tüplerin kuvvet- yer değiştirme grafiklerinin karşılaştırılması

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 29.11.2019

Kabul: 09.05.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.652878

Anahtar Kelimeler:

Değişken kalınlıklı tüp,
sonlu elemanlar yöntemi,
çok amaçlı optimizasyon,
enerji sönümlenme

ÖZET

Bu çalışmada; alüminyum alaşımı AA6063'den yapılmış farklı koniklik açısı (0°, 5° ve 10°) ve eksenel doğrultuda farklı kalınlığa (0,5 mm - 4 mm) sahip bölgelerden oluşmuş değişken kalınlıklı tüplerin (DKT) enerji sönümlenme davranışları sayısal olarak incelenmiştir. Analizler sonucunda tüplerin deformasyon şekilleri, kuvvet-yer değiştirme ve enerji-zaman grafikleri elde edilmiştir. Farklı koniklik açıları için en düşük pik kuvvet ve en yüksek özgül enerji sönümlenme (ÖES) değerlerini sağlayan optimum bölge kalınlıkları, İleri Beslemeli Yapay Sinir Ağları (İBYSA) tekniğini içeren optimizasyon yöntemi ile belirlenmiştir. Optimizasyon sonucunda elde edilen katman kalınlıklarının DKT'nin enerji sönümlenme davranışını iyileştirdiği görülmüştür.

Numerical investigation of energy absorption behaviors of variable thickness tubes

H I G H L I G H T S

- Investigation of energy absorption properties of thin-walled variable thickness tube
- Determination of the thickness change of variable thickness tube by optimization method
- Comparison of force-displacement graphs of fixed thickness and variable layer thickness tubes

Article Info

Research Article

Received: 29.11.2019

Accepted: 09.05.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.652878

Keywords:

Variable thickness tubes,
finite element method,
multi-objective optimization,
energy absorption

ABSTRACT

In this study; the energy absorption behaviors of variable thickness tube (VTT) made of aluminum alloy AA6063 which has different thickness (0.5 mm - 4 mm) layers in axial direction and different taper angles (0°, 5° and 10°) were numerically investigated. As a result of analysis deformations pattern, force-displacement and energy-time graphs of the tubes were obtained. Optimum layer thicknesses which provide the lowest peak force and the highest specific energy absorbing (SEA) values for different taper angles, were determined by the optimization method which includes Feedforward Artificial Neural Networks (FNN) technique. The layer thicknesses obtained as a result of optimization showed that the energy absorption behavior of the VTT was improved.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: *dmeric@ktu.edu.tr, hgedikli@ktu.edu.tr / Tel: +90 462 752 8174

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İnce cidarlı yapılar; hafiflik, düşük maliyet, üretim kolaylığı, yüksek mukavemet, mükemmel yük taşıma kapasitesi ve enerji sönümleme kabiliyetlerinin yanında taşıtlarda yolcu güvenliğini sağlamak ve kaza durumunda çarpışmanın olumsuz etkilerini en aza indirmek amacıyla otomobil, gemi, tren, helikopter ve uçak gibi taşıtlarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. 1960'lı yıllardan günümüze dairesel[1-3], kare[4-7] ve farklı kesitlere[8-10] sahip ince cidarlı yapıların eksenel, yanal ve farklı açılardaki enerji sönümleme karakteristikleri üzerine pek çok çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda ince cidarlı yapıların enerji sönümleme davranışlarını geliştirmek için hücre sayısını arttırma[11, 12] farklı dolgu malzemeleri ekleme[13], eksene dik doğrultuda oluk açma[14] ve takviye ile güçlendirme[15] gibi yaklaşımları geliştirilmiştir. Örneğin M. Kamal [16] vd. AISI1020 çeliğinden yapılmış kare ve dairesel kesitli tüplerin eksenel yüklenme durumunda enerji sönümleme davranışlarını araştırmış ve çalışmalarında farklı deformasyon şekillerinin enerji sönümleme davranışı üzerine etkilerini ortaya koymuşlardır. Hsu ve Jhones [17] ise farklı malzemelerden yapılmış dairesel kesitli tüplerin statik ve dinamik yük altındaki davranışlarını incelemiş ve deformasyon davranışını belirleyen narinlik oranının; deformasyon sertleşmesinin, deformasyon hızının ve atalet etkisinin çarpışma davranışına olan etkilerini belirlemişlerdir. Z. Fan [18] vd. literatürde çokça araştırılan dairesel ve kare kesitli tüplere alternatif olabilecek altıgen, sekizgen, 12 kenarlı ve 16 kenarlı yıldız kesit geometrili tüplerin enerji sönümleme davranışını deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmaları neticesinde iç köşe etkisinin belli bir değere kadar enerji sönümleme davranışını arttırdığını ve 12 kenarlı yıldızın ise en iyi enerji sönümleme davranışını sergilediğini göstermişlerdir. Tanlak [19], ve Wangyu Liu [20] ise kare ve dairesel kesitli tüplerin enerji sönümleme davranışını geliştirmek için şekil optimizasyonu yaptıkları çalışmalarında en iyi konfigürasyonu belirlemişlerdir. Marzbanrad [21] vd. kare, dairesel ve eliptik tüplerin enerji sönümleme davranışını karşılaştırdıkları çalışmalarında küçük kesit alanına sahip tüplerde enerji sönümlemenin et kalınlığı ile arttığını ve eliptik tüpün en iyi enerji sönümleme davranışı sergilediğini ifade etmişlerdir. Mehmet [22] vd. farklı kesit alanlarının yanı sıra et kalınlığı ve koniklik açısının enerji sönümleme davranışı üzerine etkisini incelemişlerdir. Çarpışma kuvveti veriminin kare tüp için en düşük olduğunu, 12.5° koniklik açısına ve 2 mm et kalınlığına sahip dairesel tüp için ise en yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Dairesel kesitli konik tüplerin enerji sönümleme davranışı ile ilgili yapılmış bir diğer çalışmada Ahmad [23] vd. köpük dolgunun konik tüplerde enerji sönümleme kabiliyetini arttırdığını göstermişlerdir. İnce cidarlı tüplerin enerji sönümleme davranışını geliştirmek amacıyla kesit ve koniklik değişiminin yanı sıra farklı dolgu malzemeleri de kullanılmaktadır. Zhibin Li [24] vd. AA6063'den yapılmış dairesel kesitli tüplerin eksenel olmayan yüklenme durumu için yaptıkları çalışmalarında köpük dolgulu tüplerin boş tüplere göre daha iyi enerji

sönümlediğini belirlemişlerdir. Kare kesitli köpük dolgulu tüpler üzerine Chun-ji [25] vd. yaptığı çalışmada köpük dolgulu kare kesitli tüplerin enerji sönümleme davranışının ayrı ayrı köpük ve tüpün enerji sönümleme davranışının toplamından daha iyi olduğunu göstermişlerdir. Başka bir çalışmada Zhang [26] vd., eksene dik doğrultuda yiv açılmış kare kesitli tüplerin enerji sönümleme davranışını incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada yiv açma işleminin enerji sönümleme davranışını % 82.7 arttırdığı, pik kuvvetini ise % 22.3 azalttığını göstermişlerdir. Çevresel olarak yiv açılmış köpük dolgulu dairesel kesitli tüpler üzerine Darvizeh [27] vd. yaptığı çalışmada köpük dolgulu tüplerin statik testlerde daha iyi enerji sönümlediği buna karşın dinamik testlerde bu iyileşmenin etkisinin aynı oranda görülmediğini belirlemişlerdir. Yang [28] vd. çok hücreli farklı origami desenli tüplerde düşük pik kuvvet ve yüksek enerji sönümlemeyi gerçekleştirebilmek amacıyla optimizasyon çalışması gerçekleştirmişler ve önerdikleri yeni origami desenli tüpün pik kuvveti düşürürken enerji sönümlemeyi davranışını geliştirdiğini göstermişlerdir. Wen Shen [29] vd. eksenel yüklenme altında dikkörtgen tek, çift ve üç hücreli tüplerin çarpışma davranışını inceledikleri çalışmalarında optimum tüp kalınlığını ve iç nevrürlerin çarpışma davranışına etkisini belirlemişlerdir.

Son yıllarda sabit kalınlığa sahip tüpler yerine değişken kalınlığa sahip değişken kalınlıklı tüplerin (DKT) enerji sönümleme davranışları üzerine olan çalışmalar ilgi çekmektedir. Bu konu ile alakalı Xiong Zhang [30] vd. yaptıkları çalışmada, değişken kalınlığa sahip kare kesitli tüplerin yanal yüklenme altındaki davranışlarını incelemiş ve RMS yöntemi ile optimize etmiştir. Muhammed Emin [31] vd. değişken kalınlığa sahip dairesel kesitli alüminyum tüplerin enerji sönümleme davranışını araştırdıkları çalışmalarında DKT'lerin sabit kalınlığa sahip tüplere göre daha iyi enerji sönümlediklerini göstermişlerdir. Sharad Rawat [32] vd. yaptığı fonksiyonel derecelendirilmiş eliptik tüpün enerji sönümleme davranışını araştırdıkları çalışmalarında fonksiyonel derecelendirilmiş eliptik tüpün pik kuvveti % 72 oranında azalttığını tespit etmişlerdir.

Literatürde DKT'ler üzerine genellikle kalınlık değişimi parametresine bağlı kalınlık değişiminin incelendiği görülmektedir [33-35]. Bunun yanında eksenel doğrultuda farklı kalınlığa sahip iki, üç ve dört bölge DKT'ler de çalışılmıştır [36, 37]. Bu çalışmanın literatürden farkı olarak; 0°, 5° ve 10° koniklik açılı dairesel kesitli tüplerin sekiz 8 farklı kalınlığa sahip bölgeden oluşturulmuş ve İleri Beslemeli Yapay Sinir Ağları yöntemi kullanılarak en düşük pik kuvvet ve en yüksek özgül enerji sönümleme özelliğine sahip bölge kalınlıkların belirlenmiştir.

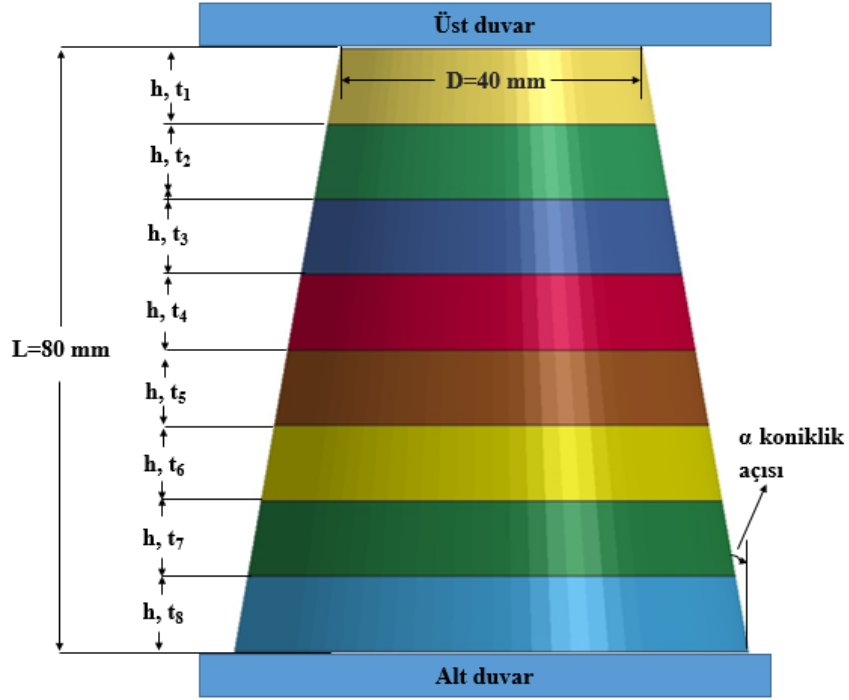
2. GEOMETRİ VE MALZEME ÖZELLİKLERİ (GEOMETRY AND MATERIAL PROPERTIES)

Şekil 1'de AA6063 malzemesinden yapılmış bir DKT görülmektedir. Toplam boyu 80 mm olan tüpün üst ucu sabit ve çapı (D) 40 mm seçilmiş olup alt ucun çapı 0°, 5° ve 10°

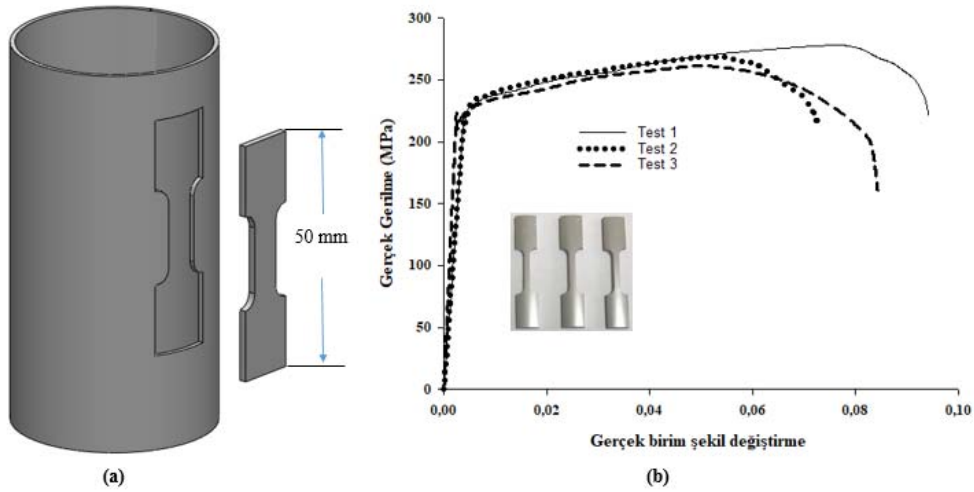
konik açısına göre değişmektedir. DKT, kalınlıkları 0,5 mm ile 4 mm arasında değişen sekiz eş bölgeye bölünmüştür. Tüp malzemesinin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla tüp üzerinden aksel doğrultuda ASTM E8 – E8M standardının büyük çaplı tüplerden çekme numunesi elde edilmesi bölümüne göre ½ ölçeğinde (L=50 mm) CNC Tel Erozyon tezgâhı kullanılarak Şekil 2'deki gibi elde edilmiştir. Numuneler (3 adet) için çekme testleri Instron 3382 üniversal test sisteminde 0,16 mm/s çene hızında gerçekleştirilmiştir. Testler sonucunda elde edilen gerçek gerilme-gerçek şekil değiştirme eğriler Şekil 2b'de verilmiştir.

3. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ (FINITE ELEMENT ANALYSIS)

Sayısal analizler, Ls-Dyna yazılımını kullanan Ls-Opt optimizasyon modülü ile gerçekleştirilmiştir DKT'nin sonlu elemanlar modeli Şekil 3'de verilmiştir. Sayısal modelde Belytschko-Tsay eleman formülasyonlu, dört kenarlı, dört düğüm noktalı ve kalınlık yönünde 7 integrasyon noktalı kabuk elemanlar kullanmıştır. Farklı ağ boyutları için sayısal analizler gerçekleştirilmiş, deneysel veriye uygun ve en kısa çözüm zamanını sağlayan 2x2 mm ağ boyutunun analizlerde kullanılmasına karar verilmiştir. Sayısal analizlerde çekme



Şekil 1. Konik açılı bir değişken kalınlıklı tüp (Variable thickness tube with tapered angle)



Şekil 2. Tüp üzerinden test numunesinin elde edilmesi (a) gerilme-şekil değiştirme grafiği (b)
(Obtaining the test sample on the tube (a) strain-strain graph (b))

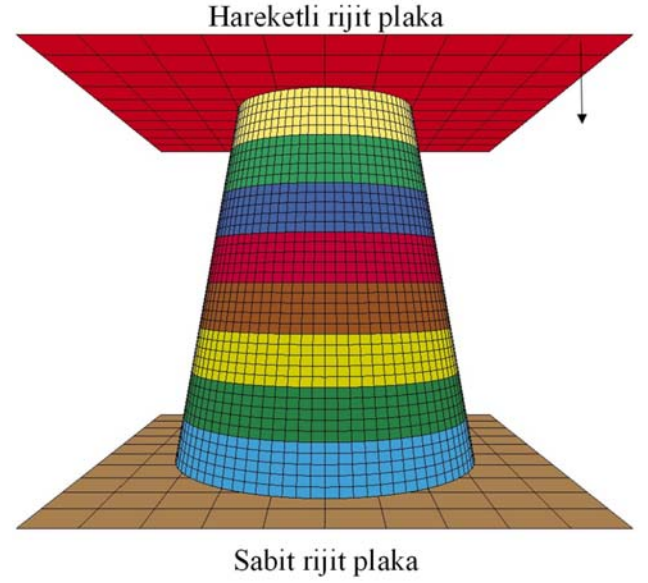
testinden elde edilen gerçek gerilme-gerçek şekil değiştirme grafiği kullanılmış ve Piecewise_Linear_Plasticity malzeme modeline girilmiştir. Hasarlı analizler için Add_Arosion kartı aktif edilmiş ve karttaki effective plastic strain değeri 1,0 olarak girilmiştir. Tüpün kendi üzerindeki teması için “Automatic_Single_Surface” kontak kartı kullanılmışken üst rijit duvar-tüp ve alt rijit duvar-tüp arasındaki temas için “Node_Surface” kontak kartları kullanılmıştır. Bu yüzeyler arasında statik ve dinamik sürtünme katsayıları sırasıyla 0,2 ve 0,1 olarak literatürden alınmıştır [38]. Tüpün altında ve üstünde bulunan duvarlar rijit plaka olarak modellenmiştir. Alt rijit plaka sabit tutulurken üst rijit plakaya BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID kartı ile düşey yönde 0,16 mm/s sabit hız tanımlanmıştır. Analizi durdurmak için TERMINATION_NODE kartı ile üst plakanın düşey yöndeki yer değiştirme mesafesi 50 mm olarak seçilmiştir. Tüplerin çarpışma performanslarını belirlemek için özgül enerji sönmemesi (ÖES), başlangıç pik kuvveti (F_{pik}) ve çarpışma kuvvet oranı (ÇKO) gibi özellikleri, Eş. 1-Eş. 4’teki gibi sayısal analizler sonucunda hesaplanmıştır.

$$\text{ÖES} = \frac{E_{toplam}}{M_{toplam}} = \frac{\int_0^{\Delta} F(x) dx}{M} \quad (1)$$

$$F_{ortalama} = \frac{E_{toplam}}{\Delta} \quad (2)$$

$$\text{ÇKO} = \frac{F_{ortalama}}{F_{pik}} \quad (3)$$

$$M_{toplam} = \rho_{AL} \pi \left(\begin{array}{l} D_{1ort} t_1 + D_{2ort} t_2 \\ + D_{3ort} t_3 + D_{4ort} t_4 \\ + D_{5ort} t_5 + D_{6ort} t_6 \\ + D_{7ort} t_7 + D_{8ort} t_8 \end{array} \right) \cdot L \quad (4)$$

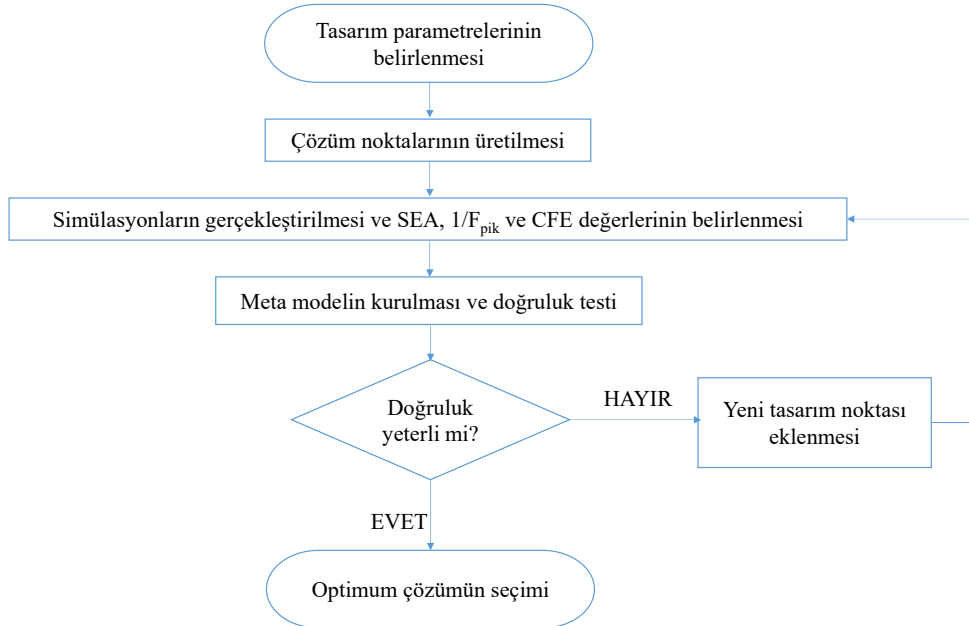


Şekil 3. DKT’nin sonlu elemanlar modeli (Finite element model of FGT)

Burada E_{toplam} sönmelenen toplam enerjiyi, $F(x)$ çarpışma kuvvetini, Δ çarpma mesafesini, M_{toplam} toplam kütle, D bölgenin ortalama çapını, t bölgenin kalınlığını, F_{pik} başlangıç maksimum kuvvetini, ρ_{AL} alüminyumun yoğunluğunu göstermektedir.

4. OPTİMİZASYON MODELİ (OPTIMIZATION MODEL)

Kaza sırasında canlılar üzerindeki yaralanmaları veya ölümcül hasarları azaltmak için maksimum pik kuvvetin sınırı ± 20 kN olarak seçilmiştir [39-41]. En iyi tüp kalınlık



Şekil 4. Optimizasyon akış şeması (Optimization flowchart)

değerlerini; maksimum ÖES, $1/F_{\text{pik}}$, ÇKO ve Eş. 5'de tanımlanan çoklu optimizasyon kısıtları için Şekil 4'de akış şeması görülen İBYSA yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. İBYSA ile yapılan optimizasyon sonucunda minimum pik kuvveti ve maksimum depolanan enerjiyi sağlayan en uygun kalınlık değerleri belirlenmeye çalışılmıştır.

$$\begin{cases} \text{Maksimize: } (\text{ÖES}, 1/F_{\text{pik}}(t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, t_7, t_8)) \\ \text{Kriterler: } \begin{cases} F_{\text{pik}} < 20 \text{ kN} \\ 0.5\text{mm} < t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, t_7, t_8 < 4\text{mm} \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

Optimizasyonun doğruluğunu artırmak için deneme nokta sayısını artırmak önemli olup çözüm zamanını hızlandırmak adına Ls-Opt kullanım kılavuzundan minimum 2^n (64) örneklem noktası (adım) seçilmelidir [42]. Mevcut optimizasyon çalışmasında, her koniklik açısı için boşluk doldurma şeması (Space Filling Schema) kullanılarak Tablo 1 ve Tablo 2'de detayları verilen 68 örneklem noktası seçilmiştir. Ayrıca optimizasyon modelin doğruluğunu kontrol etmek için Eş. 6'da verilen R^2 tahmincisi kullanılmıştır. R^2 tahminci değerinin 1 olması durumu, kullanılan optimizasyon yönteminin mükemmel olduğunu gösterir. Yani deneme nokta sayısında elde edilen hedef değer y_i ile optimizasyon yöntemiyle elde edilen deneme değerlerin \hat{y}_i aynı olduğu anlaşılır.

$$R^2 = \frac{\sum_i^P (y_i - \bar{y})^2}{\sum_i^P (y_i - \bar{y})^2} \quad (6)$$

Burada P örneklem noktalarının sayısını, y_i karşılık gelen değerleri, \hat{y}_i modelin tahmini değerini, \bar{y} ise y değerinin ortalamasını göstermektedir.

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

5.1. Sonlu Elemanlar Modelinin Doğruluğu (Accuracy of Finite Element Model)

Değişken kalınlıklı düz, değişken kalınlıklı konik ve sabit kalınlıklı konik tüplerin üretim zorluğu sebebiyle sonlu

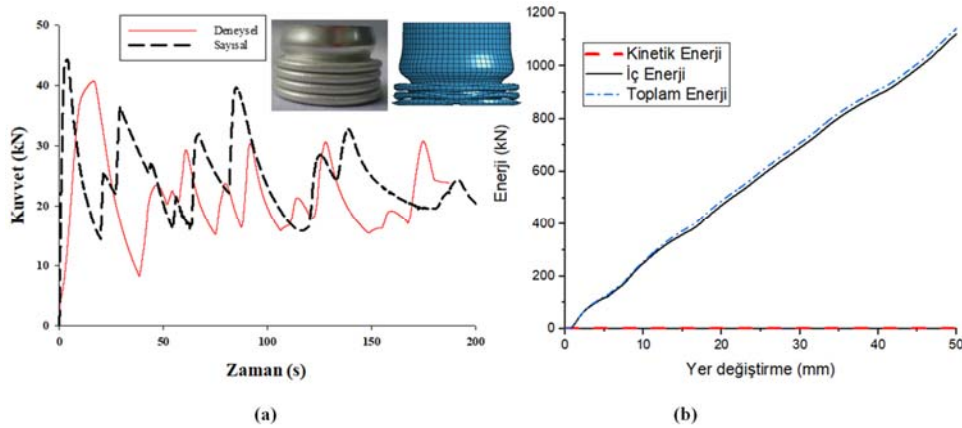
elemanlar modelinin doğruluğu, 80 mm uzunluğa ve 1,5 mm sabit kalınlığa sahip AA6063 malzemesinden yapılmış tüpün statik basma testi verileri ile sayısal analiz verilerinin karşılaştırılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Deneyden ve sayısal analizden elde edilen şekil değiştirme ve kuvvet-zaman grafiğinin karşılaştırılması Şekil 5a'da verilmiş olup sayısal analiz sonuçların deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu görülmektedir. Ayrıca Şekil 5b'de kinetik enerjinin toplam enerjiye oranının % 5'in altında olduğu görülmektedir.

5.2. Çok Amaçlı Optimizasyon Modelinin Doğruluğu (Accuracy of Multi-Objective Optimization Model)

İBYSA modelin doğruluğu, sayısal analizlerden elde edilen iç enerji değerlerinin R^2 tahminci değerine göre verilmiştir. Her bir koniklik açısında hasarlı ve hasarsız durum için Tablo 1 ve Tablo 2'de detayları verilen 68 örneklem noktası seçilerek toplamda 408 analiz gerçekleştirilmiştir. Tablo 3'den görüleceği gibi analiz sonucunda 0° , 5° ve 10° koniklik açılarında en düşük R^2 değerleri hasarlı durumlar için 0° , 5° ve 10° koniklik açılarında sırasıyla 0,92, 0,98, 0,95 elde edilmişken hasarsız durumlar için 0,97, 0,93, 0,98 olarak elde edilmiştir.

5.3. Sabit Kalınlıklı Tüpler İçin Kuvvet-Yer Değiştirme Grafikleri (Force-Displacement Graphs of Constant Thickness Tubes)

Şekil 6'da tüp kalınlığı 0.5 mm için üç farklı koniklik açılarında (0° , 5° ve 10°) elde edilen kuvvet – yer değiştirme grafikleri ve deformasyon şekilleri verilmiştir. 0° , 5° ve 10° koniklik açılarında ilk plastik deformasyon başlayana kadar kuvvet değerleri artarak pik kuvvetler sırasıyla 13,71 kN, 15,12 kN ve 13,76 kN olarak gerçekleşmiştir. Pik kuvvet, çökme için başlangıç kuvvetini gösterir ve bu noktadan sonra enerji sönmüleme işlemi başlar. İlk katlanma (bulking) başlayana kadar kuvvet artar, maksimum değerine ulaştıktan sonra ikinci katlanma oluşumuna kadar azalır. İkinci katlanma oluşum başlangıcı ile kuvvet tekrar artar ve katlanma sayısı kadar bu süreç devam eder [43]. Pik kuvvet değerleri; literatürle de uyumlu olarak koniklik açısı 5° için artmış, 10° için azalmıştır [38].



Şekil 5. Deney ve sayısal analiz sonucu elde edilen kuvvet-zaman grafikleri ve deformasyon şekilleri (a) ve enerji grafikleri (Force-time graphs obtained from experimental and numerical analysis)

Tablo 1. 0°, 5° ve 10° koniklikli tüplerin 68 örneklem noktasında hasarsız durum için sayısal analizlerden elde edilen iç enerji ve pik kuvvet değerleri

(Internal energy and peak force values obtained from numerical analysis for 68 sampling points of 0°, 5° and 10° tubes for without failure conditions)

Örneklem Noktası	Bölge Kalınlıkları (mm)								İç Enerji (kJ)			Pik Kuvvet (kN)		
	t ₁	t ₂	t ₃	t ₄	t ₅	t ₆	t ₇	t ₈	0°	5°	10°	0°	5°	10°
1	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,19	1,35	1,22	44,35	49,12	45,12
2	1,01	1,19	0,64	0,66	3,81	3,93	3,74	3,52	1,73	1,73	0,88	19,13	21,82	22,63
3	0,64	3,82	3,96	3,99	3,76	3,62	0,68	0,53	2,50	3,74	0,68	16,54	23,65	17,77
4	3,38	0,75	1,11	3,99	3,78	1,19	3,95	1,65	1,61	1,50	1,57	22,54	24,48	24,93
5	1,10	3,86	3,30	0,57	0,77	3,79	2,85	3,97	1,17	1,18	0,88	17,23	20,73	22,04
6	0,59	3,60	1,45	3,63	0,56	3,98	3,97	1,93	1,56	2,30	1,43	15,89	20,69	16,05
7	0,54	0,52	3,76	2,85	3,38	1,72	0,53	0,55	1,03	1,28	0,41	14,90	15,53	15,01
8	4,00	0,50	3,53	1,38	3,46	0,50	4,00	3,99	0,97	0,95	0,86	14,27	15,82	16,00
9	3,80	0,97	3,73	1,88	1,44	3,95	3,83	0,70	1,74	1,54	1,69	20,53	26,83	31,63
10	0,69	3,95	3,23	1,10	3,12	3,62	3,95	1,18	2,42	3,06	0,92	18,96	39,88	18,92
11	0,58	0,98	3,74	0,55	3,84	1,21	3,62	2,96	1,04	1,45	0,36	15,83	18,31	16,28
12	1,06	3,63	3,91	3,89	3,11	3,76	3,35	3,91	4,04	5,33	2,69	30,86	132,43	31,09
13	3,31	0,69	3,92	0,67	4,00	1,56	2,33	0,73	1,05	1,05	0,78	19,85	21,87	22,45
14	3,86	3,63	3,85	3,92	1,10	1,40	0,52	3,74	2,13	2,35	3,14	17,77	24,75	25,79
15	3,33	0,54	2,52	0,70	3,39	3,87	0,52	3,57	0,82	0,69	0,56	15,51	17,22	17,04
16	0,53	0,61	0,55	1,28	1,29	3,99	3,94	0,53	0,61	0,57	0,37	14,40	17,70	14,63
17	0,66	3,35	0,72	0,58	3,17	0,52	3,79	0,53	0,49	0,46	0,34	14,88	18,64	18,27
18	0,50	0,80	0,90	3,61	0,72	3,95	0,81	0,54	0,50	0,73	0,43	13,66	19,72	13,83
19	0,60	3,84	3,97	0,52	0,53	0,55	3,49	1,16	0,62	0,55	0,31	15,54	19,31	16,51
20	0,51	0,50	3,98	0,66	0,80	3,05	2,92	0,50	0,53	0,51	0,33	13,74	15,01	13,91
21	3,71	2,27	0,51	3,97	2,28	1,70	0,84	0,57	1,07	1,12	0,88	14,57	16,64	17,81
22	3,92	2,77	3,06	2,99	3,95	4,00	1,11	1,48	2,47	3,59	2,69	36,27	46,52	53,84
23	3,97	0,51	3,73	0,56	0,50	1,88	1,73	3,99	0,85	0,45	0,93	14,64	16,21	16,37
24	1,50	3,77	0,91	1,37	3,79	3,88	1,08	3,82	1,78	1,61	1,09	27,80	31,54	33,13
25	3,99	3,13	3,28	3,95	3,92	0,54	3,14	3,74	2,73	3,04	2,60	17,94	23,05	24,66
26	3,99	3,93	1,26	1,33	0,52	0,62	0,54	1,32	0,71	0,63	0,81	16,79	22,33	24,10
27	3,62	0,88	0,65	0,91	3,15	2,95	3,60	0,61	1,34	0,66	0,85	17,64	22,73	23,11
28	2,51	0,55	0,56	2,98	0,76	0,76	3,62	3,71	0,79	0,63	0,80	15,97	17,53	17,88
29	3,74	2,62	3,26	0,73	3,71	3,81	3,78	3,91	3,10	3,25	2,51	22,65	28,78	27,94
30	3,95	3,47	0,71	1,88	1,77	0,55	3,92	0,51	0,92	0,81	0,66	14,72	18,95	21,93
31	0,64	2,34	3,93	0,60	3,89	3,37	0,60	2,41	1,08	1,83	0,45	17,35	19,93	17,82
32	0,59	0,69	1,84	3,96	0,54	1,05	3,99	0,52	0,61	0,59	0,46	14,47	18,11	16,26
33	2,73	3,85	2,63	2,40	3,96	0,74	1,63	0,56	1,78	1,81	1,75	16,89	22,87	25,26
34	3,94	1,50	3,32	3,81	0,55	3,77	3,92	3,93	2,63	2,55	4,91	16,52	23,01	55,60
35	0,83	1,03	3,86	3,97	3,52	0,70	2,15	4,00	1,75	1,86	0,70	21,53	26,75	23,95
36	1,35	3,86	0,53	0,99	0,55	1,81	0,54	3,96	0,63	0,53	0,48	15,71	17,45	18,53
37	3,87	3,76	0,57	0,57	3,62	3,11	0,71	0,74	0,61	0,67	0,42	17,66	19,38	20,45
38	3,81	4,00	1,96	3,49	0,50	4,00	0,86	0,81	2,82	2,61	3,15	15,77	18,48	46,31
39	3,86	3,99	1,83	0,61	0,58	0,68	3,59	3,94	0,69	0,50	0,95	18,57	25,12	23,29
40	3,75	3,76	0,57	3,97	0,57	0,51	2,08	3,51	0,96	0,51	0,80	15,29	19,04	20,18
41	1,77	3,92	3,98	2,70	0,53	1,01	0,67	0,86	1,27	1,61	1,39	17,31	22,40	31,11
42	3,88	0,54	3,60	3,89	0,58	0,66	2,45	0,62	0,60	0,61	0,67	15,40	16,64	17,09
43	1,86	3,90	3,99	2,31	3,93	0,94	0,72	3,88	2,19	2,96	1,53	23,35	30,44	33,29
44	2,69	0,52	0,50	0,51	3,96	0,77	2,62	3,29	0,67	0,58	0,48	14,76	16,79	16,77
45	2,98	3,79	0,74	0,65	1,29	3,73	3,39	1,81	1,13	0,85	1,20	20,11	25,06	24,56
46	3,60	3,92	1,22	0,75	3,84	0,56	1,73	3,95	1,66	0,94	0,75	17,09	21,33	22,97
47	3,85	3,99	0,95	3,48	2,66	3,08	3,75	3,97	3,55	3,03	3,16	30,26	36,81	35,85
48	1,10	3,89	0,70	3,88	1,26	0,51	2,71	0,96	0,79	0,81	0,62	15,53	18,95	20,76
49	0,63	0,53	2,17	1,63	0,51	3,87	3,99	3,84	1,00	0,86	0,72	14,49	15,71	16,77
50	3,94	3,11	1,71	2,23	0,52	4,00	1,14	3,85	1,65	1,93	2,60	16,30	21,54	56,34
51	0,53	3,62	0,56	1,07	3,92	0,58	0,50	2,20	0,53	0,47	0,39	14,34	17,78	14,36
52	2,69	2,08	3,74	0,83	0,61	3,99	0,52	1,54	0,86	0,67	1,26	15,68	19,43	23,10
53	2,15	3,92	3,94	3,98	1,87	1,61	3,99	1,30	2,90	3,37	2,70	39,64	52,90	64,80
54	1,84	1,95	3,89	2,31	0,98	1,13	3,93	3,99	1,67	1,88	2,04	30,52	36,62	52,07
55	0,54	1,64	3,23	3,53	3,94	0,64	3,85	0,56	1,23	2,08	0,40	14,75	19,43	14,83
56	3,87	3,92	3,84	0,51	2,08	1,92	3,41	1,24	1,67	1,35	1,29	15,93	21,41	19,69
57	3,86	3,71	2,84	3,65	0,55	3,88	2,33	0,68	2,25	2,60	3,49	16,53	22,96	30,67
58	1,24	1,08	3,99	3,88	0,67	3,97	1,91	2,26	1,34	1,81	1,92	20,25	24,39	36,12
59	3,82	1,95	0,59	3,13	3,80	2,37	0,64	3,84	1,48	1,25	0,94	17,44	19,38	20,69
60	0,93	0,87	0,66	3,97	3,88	0,76	0,86	1,99	0,69	0,70	0,54	19,33	21,71	22,98
61	0,50	3,49	1,78	4,00	4,00	4,00	0,50	2,94	1,96	3,12	1,09	15,45	21,59	16,85
62	3,95	0,54	2,61	0,53	1,01	0,56	3,79	1,05	0,60	0,52	0,48	15,41	17,64	16,95
63	0,84	3,65	1,55	3,28	3,06	2,85	2,39	2,00	2,49	3,20	0,88	23,65	38,98	14,40
64	1,78	0,51	0,50	3,25	0,98	3,36	0,93	4,00	0,88	0,81	0,99	14,73	15,90	16,55
65	3,78	1,19	3,99	3,39	3,43	0,63	0,52	2,12	1,57	1,46	1,12	16,04	21,50	23,58
66	1,74	3,39	0,51	3,58	3,75	3,80	2,49	0,52	1,76	1,84	1,05	14,90	16,95	17,37
67	0,51	1,10	3,66	1,30	0,53	2,37	0,59	3,98	0,70	0,84	0,57	13,93	18,19	13,93
68	0,81	3,50	2,06	3,97	1,78	2,49	0,56	3,11	1,55	2,72	0,96	16,54	22,34	22,89

Tablo 2. 0°, 5° ve 10° koniklikli tüplerin 68 örneklem noktasında hasarlı durum için sayısal analizlerden elde edilen iç enerji ve pik kuvvet değerleri

(Internal energy and peak force values obtained from numerical analysis for 68 sampling points of 0°, 5° and 10° tubes for with failure conditions)

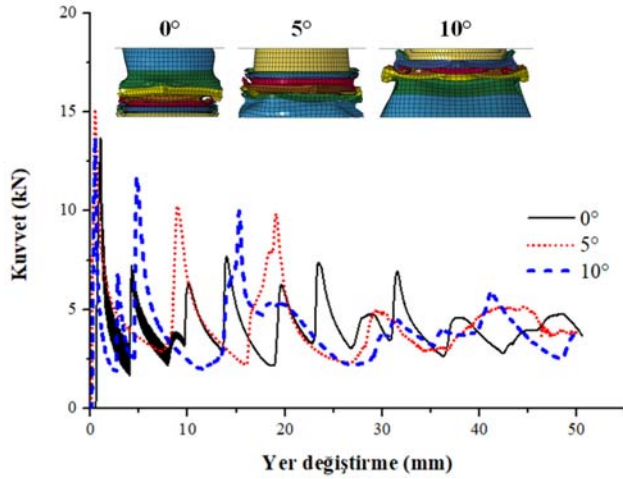
Örneklem Noktası	Katman Kalınlıkları (mm)								Enerji (kJ)			Pik Kuvvet (kN)		
	t ₁	t ₂	t ₃	t ₄	t ₅	t ₆	t ₇	t ₈	0°	5	10	0	5	10
1	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,21	1,34	1,31	44,35	49,10	45,13
2	1,01	1,19	0,64	0,66	3,81	3,93	3,74	3,52	1,89	1,90	0,88	19,18	21,75	22,62
3	3,96	0,72	2,85	3,96	0,53	0,58	3,76	3,62	2,49	3,04	0,68	16,72	23,83	17,75
4	3,38	0,75	1,11	3,99	3,78	1,19	3,95	1,65	1,69	1,65	1,63	22,54	24,49	24,99
5	1,10	3,86	3,30	0,57	0,77	3,79	2,85	3,97	1,18	1,21	0,88	17,23	20,69	22,02
6	0,59	3,60	1,45	3,63	0,56	3,98	3,97	1,93	1,65	1,05	1,44	15,89	20,43	16,06
7	0,54	0,52	3,76	2,85	3,38	1,72	0,53	0,55	1,05	1,13	0,43	14,91	15,53	15,01
8	4,00	0,50	3,53	1,38	3,46	0,50	4,00	3,99	0,96	0,95	0,86	14,26	15,82	16,00
9	3,80	0,97	3,73	1,88	1,44	3,95	3,83	0,70	1,81	1,48	1,71	21,83	29,01	32,91
10	0,69	3,95	3,23	1,10	3,12	3,62	3,95	1,18	2,47	1,12	0,94	18,96	39,98	18,94
11	0,58	0,98	3,74	0,55	3,84	1,21	3,62	2,96	1,04	1,41	0,36	15,83	18,26	16,27
12	1,06	3,63	3,91	3,89	3,11	3,76	3,35	3,91	4,21	5,30	1,08	30,83	132,37	31,08
13	3,31	0,69	3,92	0,67	4,00	1,56	2,33	0,73	1,05	1,10	0,83	19,84	21,90	22,47
14	3,86	3,63	3,85	3,92	1,10	1,40	0,52	3,74	1,82	2,31	3,16	17,75	24,70	25,70
15	3,33	0,54	2,52	0,70	3,39	3,87	0,52	3,57	0,83	0,69	0,56	15,51	17,37	17,05
16	0,53	0,61	0,55	1,28	1,29	3,99	3,94	0,53	0,53	0,59	0,44	14,52	17,72	14,57
17	0,66	3,35	0,72	0,58	3,17	0,52	3,79	0,53	0,46	0,46	0,32	15,11	18,70	18,37
18	0,50	0,80	0,90	3,61	0,72	3,95	0,81	0,54	0,51	0,78	0,47	13,66	20,48	13,87
19	0,60	3,84	3,97	0,52	0,53	0,55	3,49	1,16	0,66	0,55	0,31	15,55	19,33	16,51
20	0,51	0,50	3,98	0,66	0,80	3,05	2,92	0,50	0,50	0,52	0,33	13,89	14,96	13,92
21	3,71	2,27	0,51	3,97	2,28	1,70	0,84	0,57	1,10	1,11	0,89	14,50	16,59	17,80
22	3,92	2,77	3,06	2,99	3,95	4,00	1,11	1,48	2,62	2,45	2,74	36,15	46,75	53,79
23	3,97	0,51	3,73	0,56	0,50	1,88	1,73	3,99	0,91	0,45	0,93	14,64	16,17	16,26
24	1,50	3,77	0,91	1,37	3,79	3,88	1,08	3,82	1,77	1,60	1,09	27,82	31,60	33,16
25	0,58	3,22	1,98	2,22	3,15	1,96	2,25	3,74	2,51	2,29	2,62	17,94	22,98	24,65
26	3,99	3,93	1,26	1,33	0,52	0,62	0,54	1,32	0,72	0,65	0,81	16,78	22,34	24,12
27	3,62	0,88	0,65	0,91	3,15	2,95	3,60	0,61	1,30	0,69	0,86	18,54	22,62	22,96
28	2,51	0,55	0,56	2,98	0,76	0,76	3,62	3,71	0,76	0,63	0,80	15,97	17,53	17,77
29	3,74	2,62	3,26	0,73	3,71	3,81	3,78	3,91	3,01	3,25	2,50	22,63	28,93	27,86
30	3,95	3,47	0,71	1,88	1,77	0,55	3,92	0,51	0,91	0,80	0,67	15,31	18,83	22,81
31	0,64	2,34	3,93	0,60	3,89	3,37	0,60	2,41	1,06	1,47	0,45	17,35	20,13	17,80
32	0,59	0,69	1,84	3,96	0,54	1,05	3,99	0,52	0,60	0,59	0,54	14,77	18,40	16,23
33	2,73	3,85	2,63	2,40	3,96	0,74	1,63	0,56	1,80	1,84	1,78	17,84	24,62	27,79
34	3,94	1,50	3,32	3,81	0,55	3,77	3,92	3,93	1,75	1,64	4,42	16,53	23,13	55,68
35	0,83	1,03	3,86	3,97	3,52	0,70	2,15	4,00	1,82	1,70	0,70	21,53	26,81	23,96
36	1,35	3,86	0,53	0,99	0,55	1,81	0,54	3,96	0,62	0,53	0,48	15,66	17,19	18,87
37	3,87	3,76	0,57	0,57	3,62	3,11	0,71	0,74	0,64	0,68	0,42	17,65	19,24	20,41
38	3,81	4,00	1,96	3,49	0,50	4,00	0,86	0,81	2,98	3,09	3,33	15,75	18,46	17,44
39	3,86	3,99	1,83	0,61	0,58	0,68	3,59	3,94	0,69	0,49	0,95	18,57	25,13	23,24
40	3,75	3,76	0,57	3,97	0,57	0,51	2,08	3,51	1,01	0,51	0,82	15,30	19,14	20,21
41	1,77	3,92	3,98	2,70	0,53	1,01	0,67	0,86	1,23	1,65	1,43	17,31	22,49	30,82
42	3,88	0,54	3,60	3,89	0,58	0,66	2,45	0,62	0,58	0,63	0,70	15,42	16,55	17,13
43	1,86	3,90	3,99	2,31	3,93	0,94	0,72	3,88	2,21	3,01	1,59	23,30	30,60	33,22
44	2,69	0,52	0,50	0,51	3,96	0,77	2,62	3,29	0,67	0,58	0,48	14,77	16,97	16,81
45	2,98	3,79	0,74	0,65	1,29	3,73	3,39	1,81	1,17	0,86	1,42	20,14	25,55	24,81
46	3,60	3,92	1,22	0,75	3,84	0,56	1,73	3,95	1,64	0,94	0,75	17,07	21,13	22,86
47	3,85	3,99	0,95	3,48	2,66	3,08	3,75	3,97	3,56	1,95	3,16	30,25	36,87	35,78
48	1,10	3,89	0,70	3,88	1,26	0,51	2,71	0,96	0,80	0,90	0,62	15,56	19,26	20,74
49	0,63	0,53	2,17	1,63	0,51	3,87	3,99	3,84	1,01	0,87	0,72	14,50	15,69	16,79
50	3,94	3,11	1,71	2,23	0,52	4,00	1,14	3,85	1,84	1,23	2,62	16,30	21,56	56,36
51	0,53	3,62	0,56	1,07	3,92	0,58	0,50	2,20	0,56	0,47	0,39	14,34	17,81	14,36
52	2,69	2,08	3,74	0,83	0,61	3,99	0,52	1,54	0,88	0,63	1,26	15,68	19,55	23,14
53	2,15	3,92	3,94	3,98	1,87	1,61	3,99	1,30	2,05	2,92	2,81	42,56	56,83	68,86
54	1,84	1,95	3,89	2,31	0,98	1,13	3,93	3,99	1,66	1,89	2,04	30,52	36,47	52,10
55	0,54	1,64	3,23	3,53	3,94	0,64	3,85	0,56	1,19	1,18	0,42	14,77	21,75	14,83
56	3,87	3,92	3,84	0,51	2,08	1,92	3,41	1,24	1,73	1,43	1,39	15,92	21,33	19,68
57	3,86	3,71	2,84	3,65	0,55	3,88	2,33	0,68	2,31	2,27	3,54	16,55	23,26	33,75
58	1,24	1,08	3,99	3,88	0,67	3,97	1,91	2,26	1,38	1,88	1,26	20,26	24,29	36,12
59	3,82	1,95	0,59	3,13	3,80	2,37	0,64	3,84	1,52	1,27	0,95	17,44	19,47	20,63
60	0,93	0,87	0,66	3,97	3,88	0,76	0,86	1,99	0,69	0,70	0,54	19,34	21,72	22,98
61	0,50	3,49	1,78	4,00	4,00	4,00	0,50	2,94	1,82	2,09	1,09	15,44	16,16	16,84
62	3,95	0,54	2,61	0,53	1,01	0,56	3,79	1,05	0,60	0,52	0,48	15,44	17,58	16,96
63	0,84	3,65	1,55	3,28	3,06	2,85	2,39	2,00	2,55	2,23	0,88	14,51	38,86	14,40
64	1,78	0,51	0,50	3,25	0,98	3,36	0,93	4,00	0,87	0,81	1,01	14,61	15,90	16,52
65	3,78	1,19	3,99	3,39	3,43	0,63	0,52	2,12	1,61	1,12	0,89	16,02	21,49	23,50
66	1,74	3,39	0,51	3,58	3,75	3,80	2,49	0,52	1,72	1,96	1,06	14,89	16,91	17,22
67	0,51	1,10	3,66	1,30	0,53	2,37	0,59	3,98	0,70	0,85	0,57	13,93	18,42	13,93
68	0,81	3,50	2,06	3,97	1,78	2,49	0,56	3,11	1,56	1,80	0,96	16,54	22,40	22,91

Tablo 3. Hasarlı ve hasarsız durum için optimizasyondan elde edilen R^2 değerleri (R^2 values obtained from optimization for with and without failure conditions)

Koniklik	Sayısal Tahminci R-Kare (R^2)	
	Hasarlı	Hasarsız
	Enerji	Enerji
0	0,92	0,97
5	0,98	0,93
10	0,95	0,98

0° tüp için deformasyon 8. bölgeden başlayıp sırasıyla 7, 6, 5, 4, 3 ve 2. bölge şeklinde devam etmiştir. 5° tüp için deformasyon 2. bölgede başlamış sırasıyla 3 ve 4. bölge simetrik modda, 5, 6, 7 ve 8. bölge karışık modda katlanması ile devam etmiştir. 10° tüpte ise deformasyon 1 ve 2. bölgelerde simetrik modda başlamış ve diğer bölgelerde karışık modda devam etmiştir.

Şekil 7'de ise 1,5 mm sabit kalınlığa sahip tüpler için elde edilen kuvvet – yer değiştirme grafikleri ve deformasyon şekilleri görülmektedir. 0° , 5° ve 10° koniklik açıları için pik kuvvet değerleri sırasıyla 44,35 kN, 49,02 kN ve 45,12 kN olarak gerçekleşmiştir.

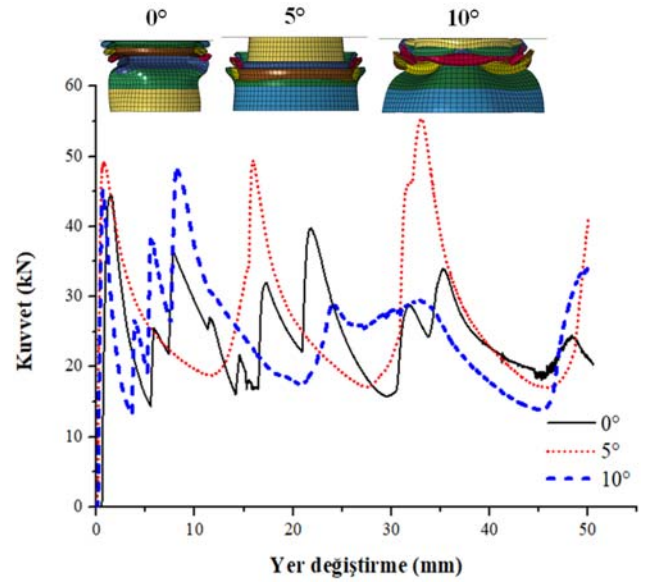


Şekil 6. 0,5 mm sabit kalınlıklı tüp için koniklik açısına göre kuvvet– yer değiştirme grafikleri (0.5 mm fixed thickness tubes' force-displacement graphs according to different taper angles)

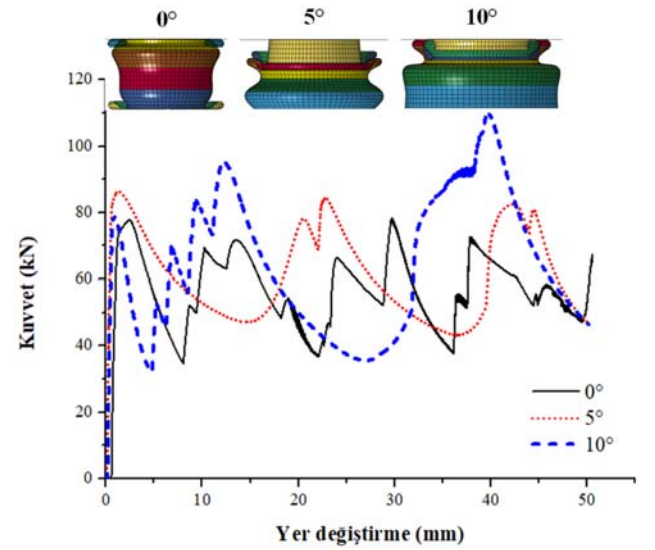
2,5 mm sabit kalınlığa sahip tüpler için gerçekleştirilen sayısal analizlerden elde edilen kuvvet– yer değiştirme ve deformasyon şekilleri Şekil 8'de görülmektedir. Bu tüplerin pik kuvvet değerleri, koniklik açıları 0° , 5° ve 10° için sırasıyla 77,63 kN, 86,29 kN ve 78,75 kN olarak elde edilmiştir.

Şekil 9'da 4 mm sabit tüp kalınlığı için gerçekleştirilen sayısal analizlerden elde edilen kuvvet– yer değiştirme eğrileri ve deformasyon şekilleri görülmektedir. 4 mm kalınlıklı tüplerin pik kuvvet değerleri koniklik açıları 0° , 5° ve 10° için sırasıyla 130,61 kN, 149,87 kN ve 132,12 kN olarak gerçekleşmiştir. 0° tüpte deformasyon 1. bölgede

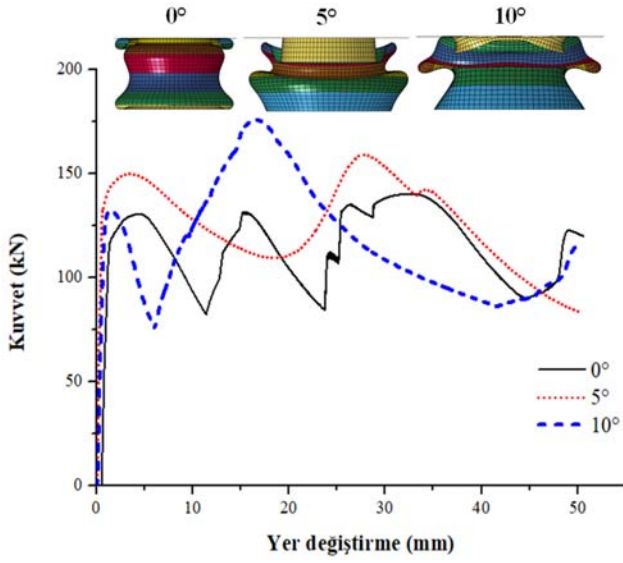
başlamış sonra sırasıyla 7, 8, 2, 3 ve 4. bölgeler ile devam etmiştir. 5° koniklik açılı sabit kalınlıklı tüpte ise deformasyon sırasıyla 2. ve 3. bölgenin 4. bölge içine kıvrılması ile başlamış ve sırasıyla 5, 6, 7 ve 8. bölgelerin deformasyona uğramasıyla sonlanmıştır. 10° koniklik açılı sabit kalınlıklı tüpte ise ilk deformasyon 1 ve 2. bölgenin içe kıvrılması ile başlamış; 3, 4, 5 ve 6. bölgenin 7 ve 8. bölgenin üzerine katlanması ile devam etmiştir. 0,5 mm sabit kalınlıklı tüpte olduğu gibi 1,5 mm, 2,5 mm ve 4 mm sabit kalınlıklı tüpler için de 5° koniklik açısında pik kuvvet artarken, 10° 'de azalmıştır.



Şekil 7. 1,5 mm sabit kalınlıklı tüp için koniklik açısına göre kuvvet– yer değiştirme grafikleri (1.5 mm fixed thickness tubes' force-displacement graphs according to different taper angles)



Şekil 8. 2,5 mm sabit kalınlıklı tüp için koniklik açısına göre kuvvet– yer değiştirme grafikleri (2.5 mm fixed thickness tubes' force-displacement graphs according to different taper angles)



şekil 9. 4mm sabit kalınlıklı tp için koniklik açısına göre kuvvet– yer değiştirme grafikleri
(4 mm fixed thickness tubes' force-displacement graphs according to different taper angles)

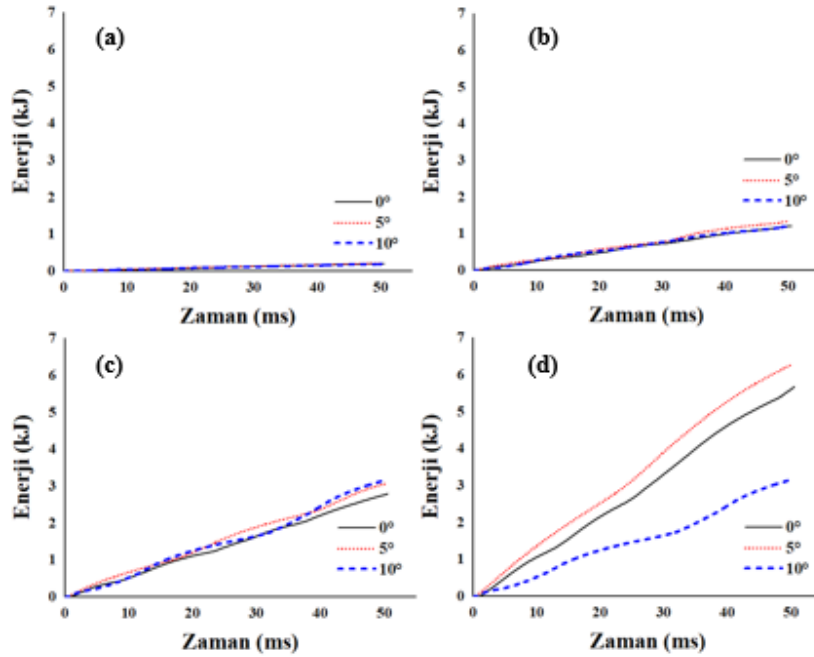
şekil 10'da 0,5 mm, 1,5 mm, 2,5 mm ve 4 mm sabit kalınlıklı tüplerin koniklik açıları 0°, 5° ve 10°'ye göre enerji-zaman grafikleri, Tablo 4'de ise sönümlenen enerji ve pik kuvvet değerleri verilmiştir. Grafikler, tüplerin eksenel doğrultuda 50 mm değirmasyona maruz kalması durumu için elde edilmiştir. 0,5 mm kalınlıklı tp için 0°, 5° ve 10° koniklikte hesaplanan enerji miktarları sırasıyla 0,209 kJ, 0,216 kJ ve 0,196 kJ; 1,5 mm kalınlıklı tüpler için 1,21 kJ, 1,34 kJ ve

1,21 kJ; 2,5 mm kalınlıklı tüpler için 2,79 kJ, 3,26 kJ ve 3,16 kJ; 4 mm kalınlıklı tüpler için ise 5,671 kJ, 6,270 kJ ve 5,720 kJ olarak gerçekleşmiştir. Sönümlenen enerji değerleri pik kuvvet değerlerindeki benzer davranarak ve literatürle de uyumlu olarak 5°'de artmış, 10°'de azalmıştır.

5.4. Değişken Kalınlıklı Tüpler için Kuvvet Yer Değiştirme Grafikleri (Force Displacement Graphs for Variable Thickness Tubes)

şekil 11'de, 0° koniklik açısı (düz tp) için hasarsız durumda en yüksek ES değerlerini veren örneklem noktaları ve aynı örneklem noktalarının hasarlı durumdaki kuvvet– yer değiştirme eğrileri ve değirmasyon şekilleri görülmektedir. şekilden en yüksek ve en düşük ES için pik kuvvet değerleri hasarsız durum için sırasıyla 30,86 kN ve 17,39 kN ve hasarlı durum için 30,62 kN ve 16,90 kN olarak gerçekleşmiştir. Hasarsız durumda adım 12 için değirmasyon en düşük bölge kalınlığı olan 1. bölgeden başlamış; ikinci en düşük bölge kalınlığı olan 5. bölge ile devam etmiş; 4, 5 ve 6. bölgelerin 7 ve 8. bölgeler üzerine yığılması ile sona ermiştir.

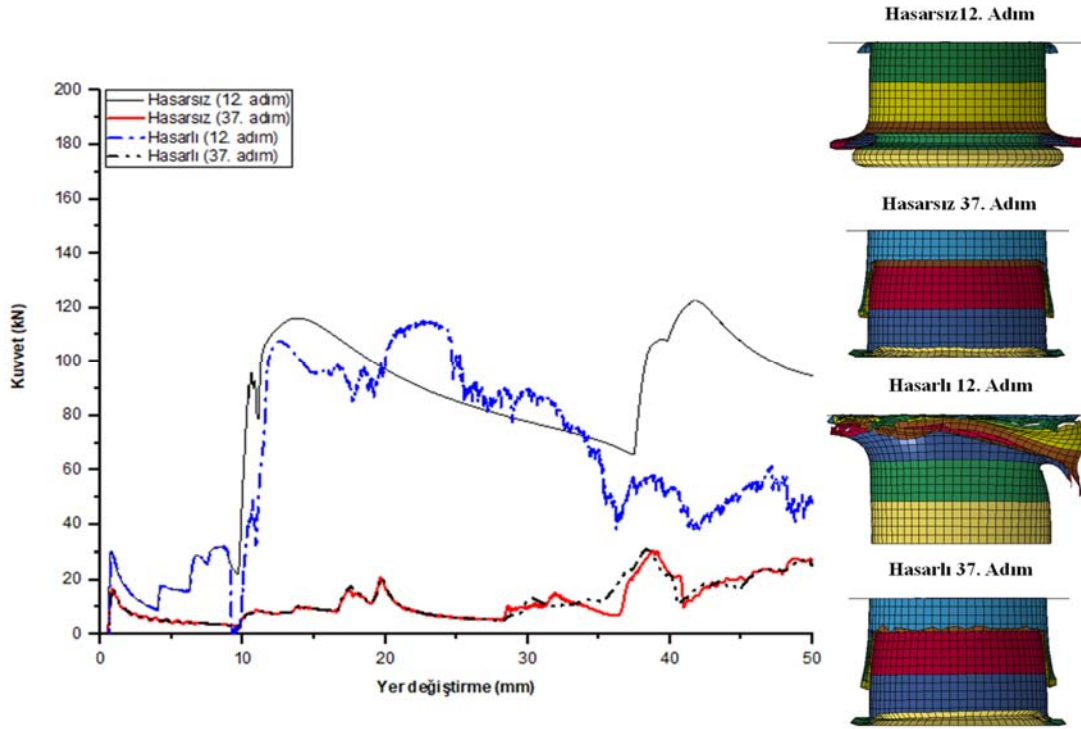
Örneklem noktası 37 için ise 3. bölgeden başlayıp sırasıyla 4, 7, 8, 2 ve 1. bölgeler ile devam etmiştir. Hasarlı durumda ise adım 12 için değirmasyon 1. bölgede başlamış, birinci bölgenin hasara uğraması ile hareketli rijit plaka ile DKT arasında kontak kesilmiş ve bu noktada kuvvet değeri sıfıra inmiştir. Değirmasyon DKT ile temasın tekrar sağlanması ile 2, 3, 4, ve 5. bölgelerde devam etmiş ve 6. bölge ile sonlanmıştır. Adım 37 için ise 3.bölgede başlamış 4, 7 ve 8. bölgeler ile devam etmiş ve 2. bölge ile sona ermiştir.



şekil 10. 0°, 5° ve 10° koniklik açılı 0,5 mm (a), 1,5 mm (b), 2,5 mm (c), 4 mm (d) sabit kalınlıklı tüplerin enerji-zaman grafikleri (energy-time graphs of 0°, 5° and 10° taper angles constant thickness tubes 0.5 mm (a), 1.5 mm (b), 2.5 mm (c), 4 mm (d))

Tablo 4. 0,5 mm, 1,5 mm, 2,5 mm ve 4 mm sabit kalınlıklı tüplerde pik kuvvet ve sönümlenen enerji değerleri (Peak force and absorbed energy values in 0.5 mm, 1.5 mm, 2.5 mm and 4 mm constant thickness tubes)

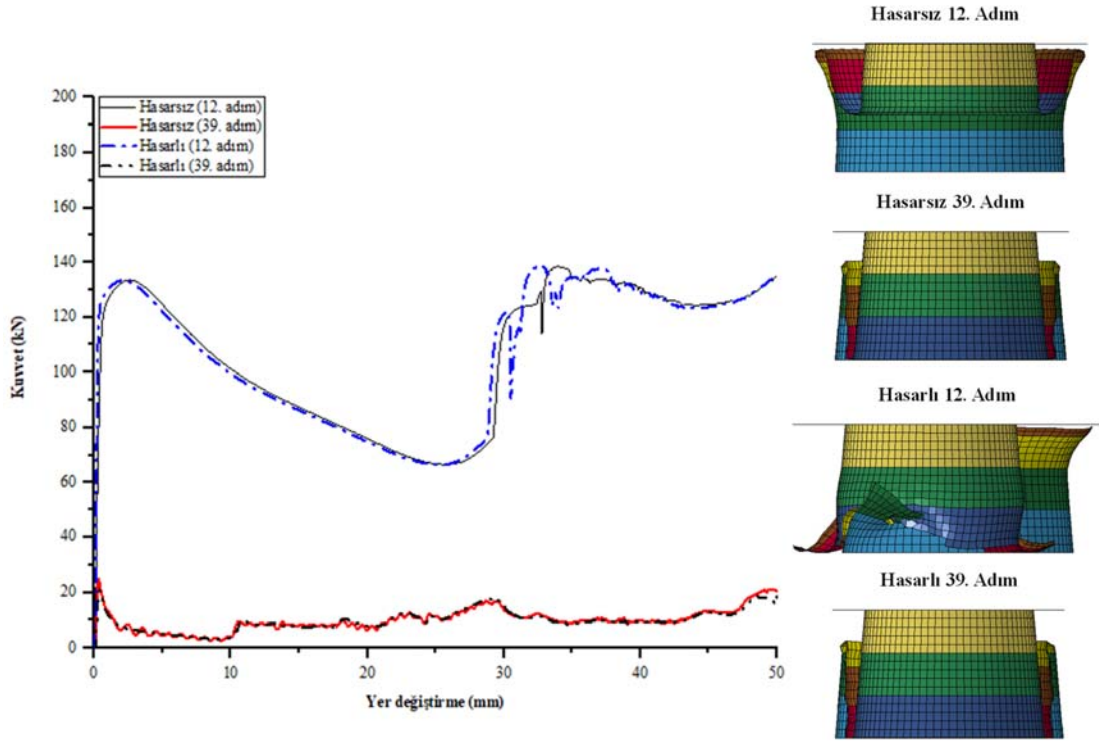
Koniklik açısı (°)	Et Kalınlığı (mm)	Pik kuvvet (kN)	Sönümlenen Enerji (J)
0	0,5	13,71	209
	1,5	44,35	1210
	2,5	77,63	2790
	4	130,61	5671
5	0,5	15,12	216
	1,5	49,02	1340
	2,5	86,29	3260
	4	149,87	6270
10	0,5	13,76	196
	1,5	45,12	1210
	2,5	78,75	3160
	4	132,12	5720

**Şekil 11.** Düz tüplerin hasarlı ve hasarsız durumlarda en düşük ve en yüksek ÖES adımları için kuvvet-yer değiştirme grafikleri (Force-displacement graphs for the lowest and highest SEA sampling point of straight (0°) tubes with and without failure conditions)

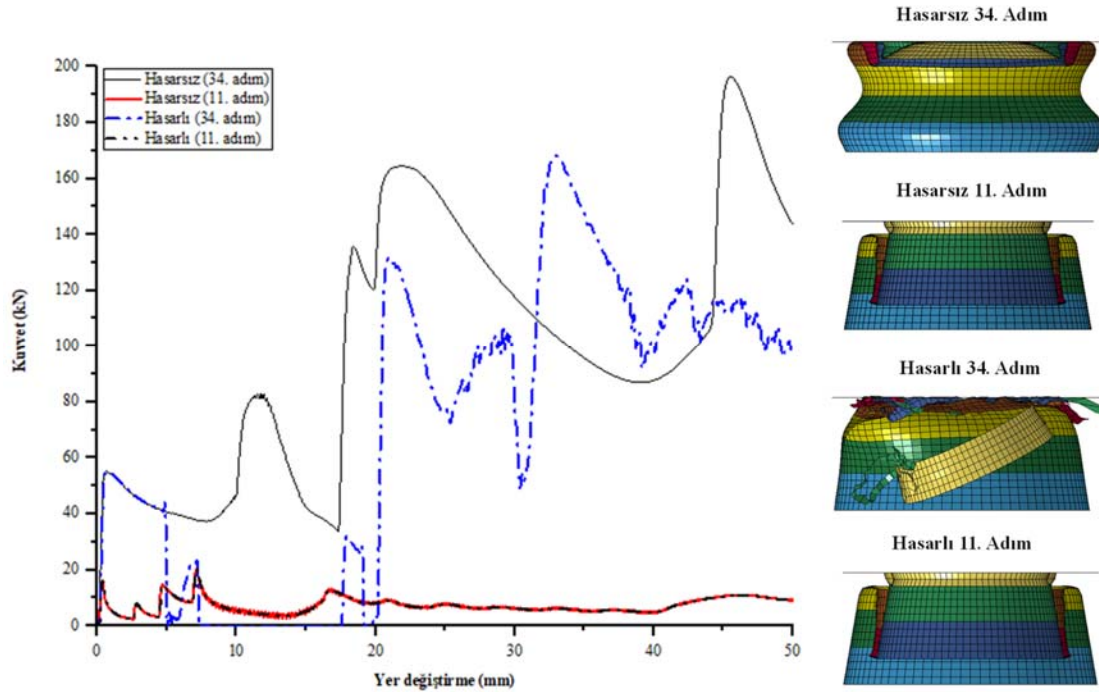
5° konikliğe sahip tüpler için gerçekleştirilen sayısal analizlerden elde edilen en yüksek ve en düşük ÖES değerleri için kuvvet- yer değiştirme eğrileri ve deformasyonlar görüntüleri Şekil 12’de verilmiştir. Hasarsız durumda 12. ve 39. adımlar için pik kuvvet değerleri 133,51 kN ve 25,12 kN olarak gerçekleşmişken, hasarlı durumda 12. ve 39. örneklem noktaları için 133,44 kN ve 25,02 kN olarak gerçekleşmiştir. 5° konikliğe sahip tüplerde hasar meydana gelmemiştir. Şekil 13’de ise 10° konikliğe sahip DKT’lerin hasarlı ve hasarsız durumda 34 ve 11. örneklem noktalarında elde edilen kuvvet- yer değiştirme eğrileri ve deformasyon şekilleri görülmektedir. 10° koniklik açısı örneklem noktası 34 için deformasyon 1. bölgenin 2. bölgenin içine geçmesi ile başlamış; 3 ve 4. bölgenin 5, 6, 7 ve 8. bölgenin içine

geçmesi ile devam etmiştir. Örneklem noktası 11 için ise 1. bölgenin içe katlanması ile başlayıp 4, 5 ve 6. bölgenin 7 ve 8. bölgenin içine katlanması ile devam etmiştir. 12. ve 39. adımlarda gerçekleşen pik kuvvet değerleri 55,53 kN ve 16,27 kN olarak gerçekleşmiştir.

Hasarlı durumda ise örneklem noktası 34 için deformasyon 2 ve 3. bölgenin hasarı ile başlamış, 5 ve 6. bölgenin deformasyonu ile sona ermiştir. 2. bölgenin hasara uğraması ile 1. bölge de hareketli rijit plaka ile temastan çıkmış ve yırtılarak DKT’nin içine düşmesi sebebiyle 5-20 mm deformasyon mesafeleri arasında kuvvet değeri sıfıra inmiştir. Örneklem noktası 11 için deformasyon 1. bölgeden başlamış 4. bölgenin 5 ve 6. bölgenin içine katlanması ile devam etmiştir



Şekil 12. 5° koniklik açılı tüplerin hasarlı ve hasarsız durumlarda en düşük ve en yüksek ÖES adımları için kuvvet-yer değiştirme grafikleri
(Force-displacement graphs for the lowest and highest SEA sampling point of 5° taper angles tubes with and without failure conditions)



Şekil 13. 10° koniklik açılı tüplerin hasarlı ve hasarsız durumlarda en düşük ve en yüksek ÖES adımları için kuvvet-yer değiştirme grafikleri
(Force-displacement graphs for the lowest and highest SEA sampling point of 10° taper angles tubes with and without failure conditions)

Tablo 5’de farklı koniklik açılarında gerçekleştirilen sayısal analizlerin hasarlı ve hasarsız durumda en yüksek ve en düşük ÖES değerini veren adımlar için pik kuvvet ve sönmülenen enerji değerleri verilmektedir. 0°, 5° ve 10° DKT’lerde en yüksek ÖES değerleri hesaplanan örneklem noktaları hasarsız durumda sırasıyla 12, 12 ve 34 olurken hasarlı durumda ise 12, 3 ve 57 olmuştur. En düşük ÖES değerleri hesaplanan örneklem noktaları ise hasarsız durumda 0°, 5° ve 10° için sırasıyla 37, 39 ve 11; hasarlı durumda ise 24, 10 ve 12 olmuştur. Bölge kalınlıkları arasında farkların büyük olduğu adımlarda iç içe geçme ve içe katlanma durumları meydana gelmekte, birim şekil değiştirme değerleri yükselmekte ve hasar oluşmaktadır. Hasar sonucu tüp-hareketli duvar temastan çıkmakta, tekrar temas sağlanana kadar kuvvet değerleri sıfır olmakta ve bu durum sönmülenen enerji değerlerini düşürmektedir.

5.5. Optimizasyon Sonuçları (Optimization Results)

İBYSA kullanılarak 0°, 5° ve 10° koniklik açıları için çok amaçlı optimizasyon modeli sonucu elde edilen bölge kalınlıkları, hasarlı ve hasarsız durumlar için Tablo 4’de verilmiştir. Şekil 14’de ise optimum kalınlık değerlerinin tüp üzerindeki kesit görüntüleri hasarlı ve hasarsız durumlar için verilmiştir.

Tablo 6’dan görüleceği gibi hasarsız durumda optimum kalınlık değerleri; düz tüpler için 0,55 mm ile 3,97 mm, 5° koniklik için 0,50 mm ile 3,99 mm ve 10° koniklik için ise 0,52 mm ile 3,92 mm aralığında değişmiştir. Hasarlı durumda ise optimum bölge kalınlık değerleri 0°, 5° ve 10° DKT’lerde sırasıyla 0,53 mm ile 3,99 mm, 0,60 mm ile 3,96

mm ve 0,54 mm ile 3,95 mm arasında gerçekleşmiştir. Optimum bölge kalınlık değerleri arasında, pik kuvvetin düşük olması için düşük kalınlığa sahip bölgeler bulunurken daha fazla enerjinin sönmülenebilmesi için büyük kalınlığa sahip bölgelerin de bulunduğu görülmektedir.

Şekil 15’de 0°, 5° ve 10° koniklik açısı için hasarlı ve hasarsız durumlarda optimum bölge kalınlık değerlerinin sayısal analizinden elde edilen kuvvet – yer değiştirme grafikleri ve deformasyon şekilleri verilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi kuvvet-yer değiştirme grafikleri istenildiği gibi düşük kuvvet (ilk pik kuvvet) değerinden başlamakta ve sürekli artmaktadır. 0°, 5° ve 10° tüplerde hasarsız durumda pik kuvvetler ve sönmülenen enerji değerleri sırasıyla 14,51 kN, 16,5 kN, 17,43 kN ve 2,57 kJ, 2,30 kJ, 3,11 kJ olarak gerçekleşmiştir. Hasarlı durumda ise artan koniklik açısına göre sönmülenen enerji değerleri 2,09 kJ, 2,10 kJ ve 2,08 kJ olurken pik kuvvet değerleri 15,26 kN, 15,20 kN ve 22,24 kN olmuştur.

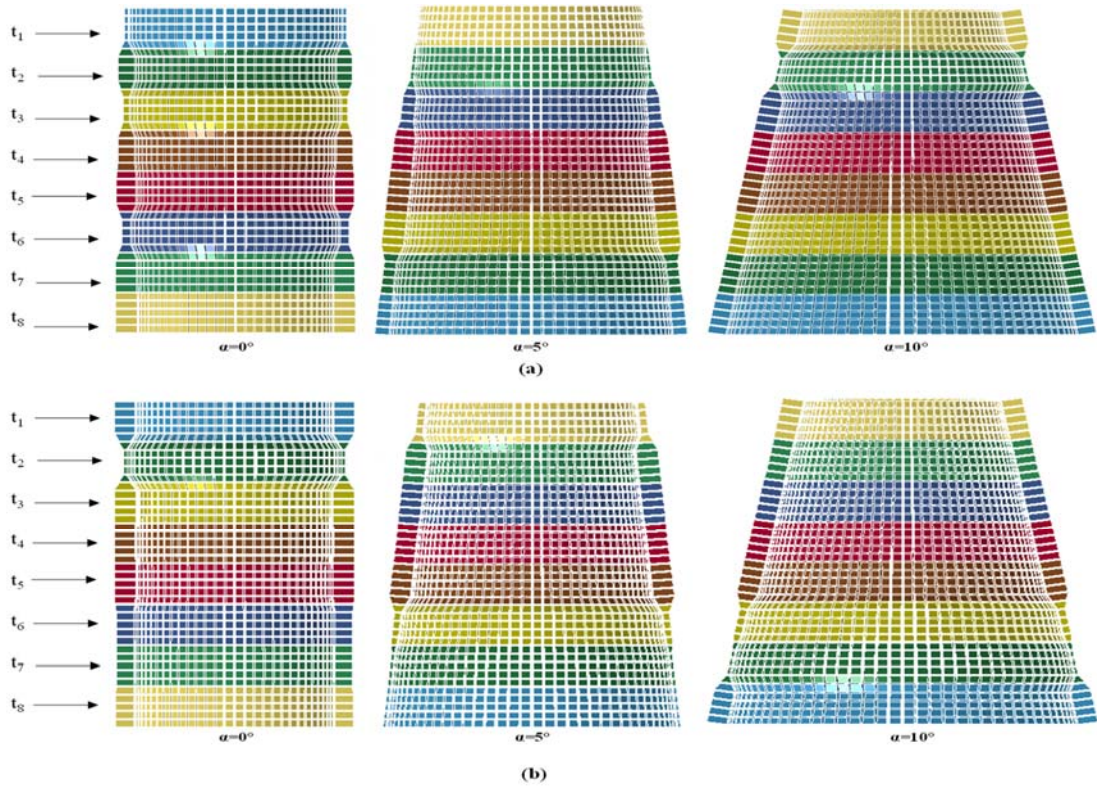
Optimum bölge kalınlıklı DKT’lerin hasarsız olarak gerçekleştirilen sayısal analizlerinden elde edilen adım adım katlanma şekillerinin kesit görüntüleri Şekil 16’da verilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi 0° tüp için deformasyon en düşük bölge kalınlıklarına sahip olan sırasıyla 1, 3 ve 5. bölgeler ile başlamış; 2. bölgenin 4. bölge üzerine yığılması ile devam etmiş ve 6. bölgenin deforme olmasıyla sona ermiştir. 5° tüp için deformasyon en düşük bölge kalınlığına sahip olan 2. bölgenin 3. bölgenin içine geçmesi ile başlamış, 7. bölgenin 8. bölge içine geçmesi ile devam etmiş, 3 ve 4. bölgelerin deformasyonu ile sona ermiştir.

Tablo 5. En yüksek ve en düşük ÖES değerini veren örneklem noktaları için pik kuvvet ve sönmülenen enerji değerleri (Peak force and absorbed energy values for the sample points giving highest and lowest SEA)

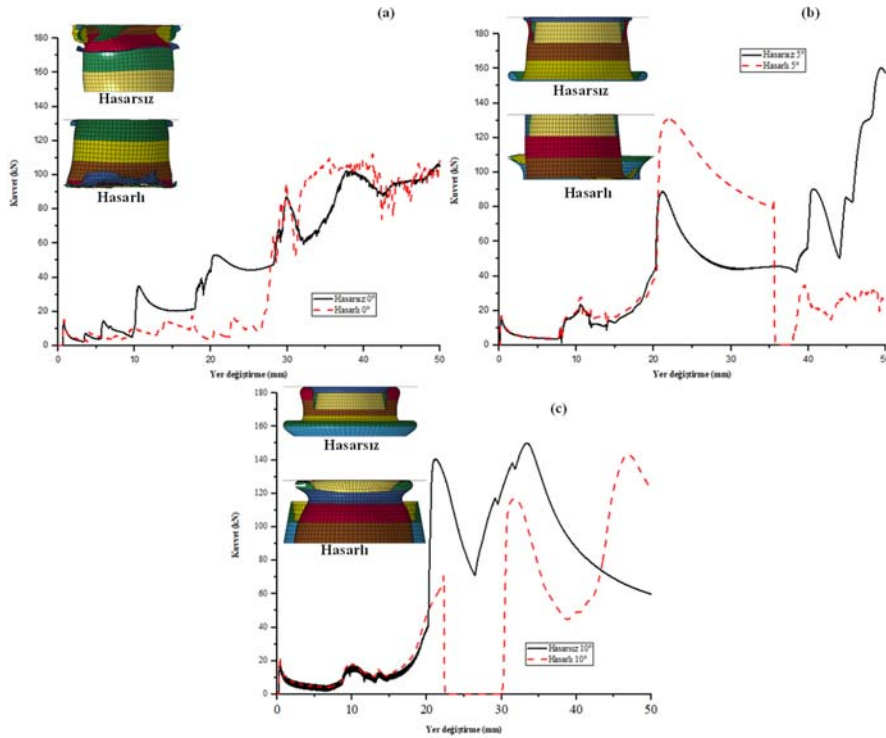
Koniklik açısı (°)	Pik kuvvet (kN)				Sönmülenen Enerji (kJ)			
	Hasarlı		Hasarsız		Hasarlı		Hasarsız	
	En yüksek	En düşük	En yüksek	En düşük	En yüksek	En düşük	En yüksek	En düşük
0	30,82	27,81	30,86	17,39	3,12	0,41	4,04	0,61
5	23,83	39,98	133,51	25,12	2,63	0,44	5,33	0,45
10	33,74	31,07	55,53	16,27	2,94	0,45	4,91	0,36

Tablo 6. Hasarlı ve hasarsız durum için optimum bölge kalınlıkları (Optimum layer thicknesses for with and without failure conditions)

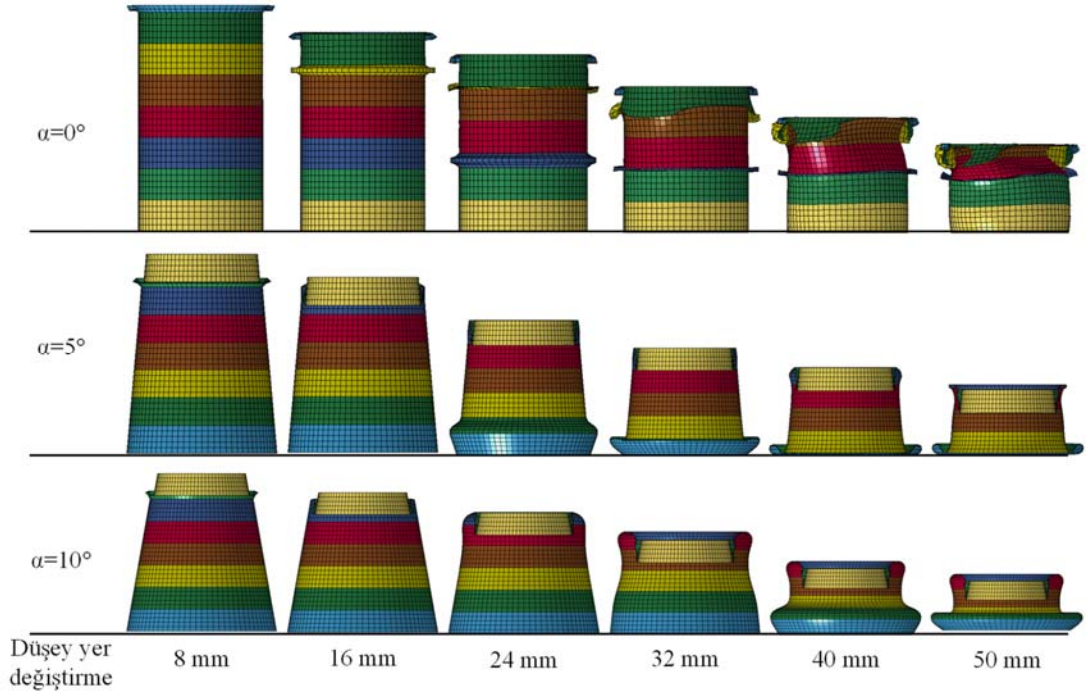
		Bölge Kalınlıkları (mm)								Pik Kuvvet (kN)	Se (kJ)
		T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇	T ₈		
Hasarsız	0°	3,76	0,55	3,88	3,79	3,97	3,22	3,14	3,34	14,51	2,57
	5°	1,41	3,98	3,99	3,76	3,86	1,26	0,50	0,50	16,50	2,30
	10°	3,86	3,63	3,85	3,92	1,10	1,40	0,52	3,74	17,43	3,11
Hasarlı	0°	0,64	3,82	3,96	3,99	3,76	3,62	0,68	0,53	15,26	2,09
	5°	0,60	0,53	2,34	3,74	3,96	3,96	2,11	2,52	15,20	2,10
	10°	3,99	3,13	3,28	3,95	3,92	0,54	3,14	3,74	22,24	2,08



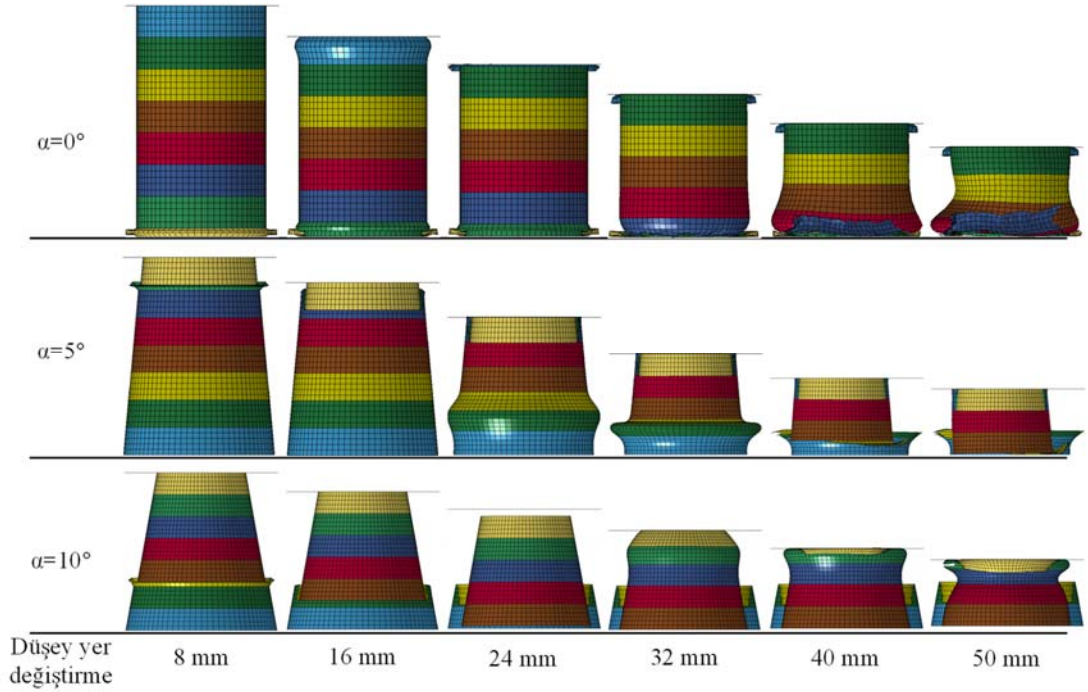
Şekil 14. Farklı koniklik açılı tüpler için hasarsız (a) ve hasarlı (b) durumda İBYSA sonucu elde edilen optimum tüp kalınlıklarının kesit görüntüsü
(Cross-sectional view of the optimum tube thicknesses obtained as a result of FNN in with failure (a) and without failure (b) for different tapered angles)



Şekil 15. Optimum bölge kalınlıklı tüplerin hasarlı ve hasarsız durum için kuvvet – yer değiştirme grafikleri (a) 0° (b) 5° (c) 10° (Force-displacement graphs of optimum layer thickness tubes for with and without failure conditions 0° (a) 5° (b) 10° (c))



Şekil 16. Hasarsız durumda 0° , 5° ve 10° optimum bölge kalınlıklı tüplerin adım adım deformasyon şekilleri (Step-by-step deformation of 0° , 5° and 10° optimum layer thickness tubes without failure conditions)



Şekil 17. Hasarlı durumda 0° , 5° ve 10° optimum bölge kalınlıklı tüplerin adım adım deformasyon şekilleri (Step-by-step deformation of 0° , 5° and 10° optimum layer thickness tubes with failure conditions)

10° tüp için ise ilk deformasyon 2. bölgenin 3 ve 4. bölgelerin içine geçmesi ile başlamış; 6 ve 7. bölgenin 8. bölgenin içine geçmesi ile sona ermiştir. 0°, 5° ve 10° tüplerde optimum bölge kalınlıkları için gerçekleştirilen analizlerde yüksek bölge kalınlığına sahip bölgelerin iç içe geçmesi esnasında kuvvet değerlerinde bir artış olduğu görülmektedir.

Hasarlı durum için optimum bölge kalınlıklı DKT'lerin deformasyon şekilleri Şekil 17'de görülmektedir. 0° koniklik için deformasyon 8. bölgede başlamış 7, 2, 6. bölgeler ile devam etmiş ve 5. bölge ile sona ermiştir. 5° koniklik için ise deformasyon 2 bölge ile başlamış 2. bölgenin 3. bölgenin içine geçmesi ile devam etmiş sonrasında 6. ve 7. bölgelerin ile devam etmiştir. 7. bölgenin deformasyona uğraması esnasında hasar oluşmuş ve 36-38 mm deformasyon mesafelerinde hareketli rijit plaka ile DKT arasındaki temas kesilmiştir. 10° koniklik açısında deformasyon en düşük kalınlığa sahip olan 6. bölgede başlamış, 6. bölgenin 7 ve 8. bölgeler içerisine geçişi esnasında hasar kriterine ulaşılmış ve kopma meydana gelmiştir. Bu esnada hareketli rijit plaka ile DKT arasında temas kesilmiş ve 23-30 deformasyon mesafelerinde kuvvet değerleri sıfır olmuştur. Temasin tekrar sağlanması ile sırasıyla 1, 2 ve 3. Bölgeler de deformasyon devam etmiştir.

6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada farklı (0°, 5° ve 10°) konikliklere sahip, 10 mm uzunlukta sekiz farklı bölgeye bölünmüş tüplerin enerji sönmleme özellikleri incelenmiş ve İBYSA kullanılarak minimum pik kuvvet ve maksimum iç enerji için optimum bölge kalınlıkları belirlenmiş olup aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Sönümlenen enerji miktarı ve pik kuvvet değerleri sabit kalınlıklı tüpleri için bölge kalınlığının artması ile artmaktadır.
- Sabit kalınlıklı tüpler için koniklik açısı 5°'de pik kuvvet ve sönümlenen enerji değerleri, koniklik açıları 0° ve 10° den daha fazla elde edilmiştir.
- DKT bölge kalınlıklarının optimizasyonu ile düşük pik kuvvet ve yüksek özgül enerji sönmleme değerini aynı anda elde etmek mümkündür.
- Sonuçlardan DKT'lerin hasara uğramasının sönümlenen enerji değerlerini düşürdüğü görülmektedir.
- 10° konikliğe sahip tüpün pik kuvvet değeri 0° ve 5° koniklikli tüpler ile karşılaştırıldığında % 17 ve % 5,6 artarken sönümlediği enerji miktarında % 21 ve %35 oranında artış gerçekleşmiştir.
- Optimizasyon sonucunda elde edilen bölge kalınlıklarında DKT'lerin pik kuvvet değerlerinin düşük çıkması için ilk

deformasyona başlayan bölgelerin kalınlıkları düşük olmuştur. Örneğin 10 tüpte 2. bölge kalınlığı 0,55 mm olurken diğer bölge kalınlıkları 4 mm'ye yakın olmuştur.

- Optimizasyon işlemi sonucunda hasarsız durum için en düşük pik kuvvet ve en yüksek ÖES değerinin 10° konikliğe sahip DKT'de gerçekleştiği; hasarlı durum için ise 5° konikliğe sahip DKT'de gerçekleştiği görülmüştür

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Abramowicz W., Jones N., Dynamic axial crushing of circular tubes, *International Journal of Impact Engineering*, 2 (3), 263-281, 1984.
2. Salehghaffari S., Tajdari M., Panahi M., Mokhtarnezhad F., Attempts to improve energy absorption characteristics of circular metal tubes subjected to axial loading, *Thin-Walled Structures*, 48 (6), 379-390, 2010.
3. Xu B., Cheng W., Wenlong X., An efficient energy absorber based on fourfold-tube nested circular tube system, *Thin-Walled Structures*, 137, 143-150, 2019.
4. Xiong Z., Zhuzhu W., Hui Zhang, Axial crushing and optimal design of square tubes with graded thickness, *Thin-Walled Structures*, 84, 157-163, 2014.
5. Christopher P. K., Mohammadi M., Raja K. M., Inal K., Effects of elastic-plastic behaviour on the axial crush response of square tubes, *Thin-Walled Structures*, 93, 64-87, 2015.
6. Xiong Z., Hui Z., Weijie R., Axial crushing of tubes fabricated by metal sheet bending, *Thin-Walled Structures*, 122, 252-263, 2018.
7. Caihua Z., Yan Z., Bo W., Crashworthiness design for trapezoid origami crash boxes, *Thin-Walled Structures*, 117, 257-267, 2017.
8. Caihua Z., Shizhao M., Chaoxiang X., Bo W., Xiangjun B., Peng H., Mingfa R., The energy absorption of rectangular and slotted windowed tubes under axial crushing, *International Journal of Mechanical Sciences*, 141, 2018.
9. Özer M., Altınkaynak A., Temiz V., Mutlu T., Dışpınar T., Özgen A., Yücel M., Dynamic analysis of front loading washing machine using finite element method, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31 (3), 773-780, 2016.
10. Yaman K., Özcan M., Tekiner Z., Determination of the spinning parameters of AISI 304L stainless steel by using finite element method, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33 (1), 299-331, 2018.
11. Caihua Z., Shizhao M., Chaoxiang X., Bo W., Xiangjun B., Peng H., Mingfa R., The energy absorption of rectangular and slotted windowed tubes under axial crushing, *International Journal of Mechanical Sciences*, 141, 89-100, 2018.
12. Altın M., Investigation of performances of energy absorbing profiles having different geometries under oblique loads. *Journal of the Faculty of Engineering and*

- Architecture of Gazi University 34 (3), 1517-1525, 2019.
13. Kai Y., Shanqing X., Shiwei Z., Yi M., Multi-objective optimization of multi-cell tubes with origami patterns for energy absorption, *Thin-Walled Structures*, 123, 100-113, 2018.
 14. Duarte I., Opara L. K., Oliveira J. D., Vesenjok M., Axial crush performance of polymer-aluminium alloy hybrid foam filled tubes, *Thin-Walled Structures*, 138, 124-136, 2019.
 15. Eyvazian A., Meisam K. Habibi, Abdel M. H., Hedayati R., Axial crushing behavior and energy absorption efficiency of corrugated tubes, *Materials & Design*, 54, 1028-1038, 2014.
 16. Kamal M., Shah M., Noorhifantylaily A., Irma O., J. W., Sahari, Study Of Crasworthiness Behaviour Of Thin Walled Tube under Axial Loading by Using Computational Mechanics, *International Journal of Materials and Metallurgical Engineering* 10 (8), 1170-1175, 2016.
 17. Hsu S. S., Jones N., Quasi-static and dynamic axial crushing of thin-walled circular stainless steel, mild steel and aluminium alloy tubes, *Int.J.Crash-worthiness* 9(2), 195-217, 2004.
 18. Fan Z., Lu G., Liu K., Quasi-static axial compression of thin-walled tubes with different cross-sectional shapes, *Engineering Structures*, 55, 80-89, 2013.
 19. Tanlak N., Sonmez F. O., Optimal shape design of thin-walled tubes under high-velocity axial impact loads, *Thin-Walled Structures*, 84, 302-312, 2014.
 20. Liu W., Lin Z., Wang N., Deng X., Dynamic performances of thin-walled tubes with star-shaped cross section under axial impact, *Thin-Walled Structures*, 100, 25-37, 2016.
 21. Javad Marzbanrad, Mehdi Mehdikhanlo , Ashkan Saeedi Pour, An energy absorption comparison of square, circular, and elliptic steel and aluminum tubes under impact loading, *Turkish J. Eng. Env. Sci.* 33, 159 - 166, 2009.
 22. Guler M. A., Cerit M. E., Bayram B., Gerceker B., Karakaya E., The effect of geometrical parameters on the energy absorption characteristics of thin-walled structures under axial impact loading, *International Journal of Crashworthiness*, 15 (4), 377-390, 2010.
 23. Z.Ahmad, D.P.Thambiratnam, Crushing response of foam-filled conical tubes under quasi-static axial loading, *Materials and Design*, 30, 2393-2403, 2009.
 24. Zhibin L., Jilin Y., Liuwei G., Deformation and energy absorption of aluminum foam-filled tubes subjected to oblique loading, *International Journal of Mechanical Sciences*, 54, 48-56, 2012.
 25. Chun-ji Z, Yi F., Xue-bin Z., Mechanical properties and energy absorption properties of aluminum foam-filled square tubes, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 20, 1380-1386, 2010.
 26. Xiong Z., Hoon H., Energy absorption of longitudinally grooved square tubes under axial compression, *Thin-Walled Structures*, 47, 1469-1477, 2009.
 27. Abolfazl D., Ata M., Majid A., Reza R., Low velocity impact of empty and foam filled circumferentially grooved thick-walled circular tubes, *Thin-Walled Structures*, 110, 97-105, 2017.
 28. Kai Y., Shanqing X., Shiwei Z., Yi M., Multi-objective optimization of multi-cell tubes with origami patterns for energy absorption, *Thin-Walled Structures*, 123, 100-113, 2018.
 29. Wen S., Xianguang G., Ping J., Jinfang H., Xiaojiang L., Lijun Q., Crushing analysis and multiobjective optimization design for rectangular unequal triple-cell tubes subjected to axial loading, *Thin-Walled Structures* 117, 190-198, 2017.
 30. Xiong Z., Hui Z., Zong W., Bending collapse of square tubes with variable thickness, *International Journal of Mechanical Sciences*, 106, 107-116, 2016.
 31. Emin E., Baykasoglu C., Tunay M., Quasi-static Axial Crushing Behavior of Thin-walled Circular Aluminum Tubes with Functionally Graded Thickness, *Procedia Engineering*, 149, 559 - 565, 2016 .
 32. Sharad R., Anirudh N., Theerthana N., Upadhyay A.K., Collapse Behavior and Energy Absorption in Elliptical Tubes with Functionally Graded Corrugation, *Procedia Engineering* 173, 1374 -1381, 2017.
 33. Yong Z., Minghao L., Guangyong S., Guangyao L., Qing L., On functionally graded composite structures for crashworthiness, *Composite Structures*, 132, 393-405, 2015.
 34. Xiuzhe A., Yunkai G., Jianguang F., Guangyong S., Qing L., Crashworthiness design for foam-filled thin-walled structures with functionally lateral graded thickness sheets, *Thin-Walled Structures*, 91, 63-71, 2015.
 35. Yafeng C., Zhonghao B., Linwei Z., Yulong W., Guangyong S., Libo C., Crashworthiness analysis of octagonal multi-cell tube with functionally graded thickness under multiple loading angles, *Thin-Walled Structures*, 110, 133-139, 2017.
 36. Nader J., Mohammad J., Crushing behavior of multi-component conical tubes as energy absorber: A comparative analysis between end-capped and non-capped conical tubes, *Engineering Structures*, 178, 128-135, 2019.
 37. Xiong Z., Hui Z., Zong W., Bending collapse of square tubes with variable thickness, *International Journal of Mechanical Sciences*, 106, 107-116, 2016.
 38. Meric D., Gedikli H., Energy absorption behavior of tailor-welded tapered tubes under axial impact loading using coupled FEM/SPH method, *Thin-Walled Structures*, 104, 17-33, 2016.
 39. Attia M.S., Meguid S.A., Nouraei H., Nonlinear finite element analysis of the crush behaviour of functionally graded foam-filled columns, *Finite Elements in Analysis and Design*, 61, 50-59, 2012.
 40. Zarei H.R., Kröger M., Crashworthiness optimization of empty and filled aluminum crash boxes, *International Journal of Crashworthiness*, 12, 255-264, 2007.

41. Acar E., Guler M.A., Gerçeker B., Cerit M.E., Bayram B., Multi-objective crashworthiness optimization of tapered thin-walled tubes with axisymmetric indentations, *Thin-Walled Structures*, 49, 94-105, 2011.
42. Ls-Opt User's manual, LSTC; 2010.
43. Meriç D., Farklı Malzemelerden Yapılmış Tüplerin Statik Ve Dinamik Yükler Altında Enerji Sönümlenme Karakteristiklerinin Deneysel ve Sayısal Olarak Belirlenmesi (Master), Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2014.