

## Farklı Kesit Geometrilerine Sahip İnce Duvarlı Sac Metal Çarpışma Kutularının Darbe Performanslarının Nümerik İncelenmesi

Oğuz DOĞAN<sup>1,a</sup>, Muhammed Safa KAMER<sup>1,b</sup>

<sup>1</sup>Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü

<sup>a</sup>ORCID: 0000-0003-4203-8237; <sup>b</sup>ORCID: 0000-0003-3852-1031

### Makale Bilgileri

Geliş : 29.06.2024

Kabul : 27.09.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1560152

### Sorumlu Yazar

Oğuz DOĞAN

oğuzdogan@ksu.edu.tr

### Anahtar Kelimeler

Darbe performansı

Kesit etkisi

Sonlu elemanlar metodu

Darbe analizi

**Atf şekli:** DOĞAN, O., KAMER, M.S., (2024). Farklı Kesit Geometrilerine Sahip İnce Duvarlı Sac Metal Çarpışma Kutularının Darbe Performanslarının Nümerik İncelenmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(3), 719-728.

### ÖZ

Bu çalışmada, farklı kesit geometrilerine sahip ince duvarlı sac metalden tasarlanan çarpışma kutularının darbe performansları nümerik olarak incelenmiştir. Öncelikle eşit kesit alanı ve boya sahip beş farklı kesit geometrisinde (kare, daire, üçgen, beşgen, altıgen) çarpışma kutuları tasarlanmıştır. Tasarlanan çarpışma kutuları, darbe simülasyonlarının gerçekleştirilebilmesi için ANSYS Workbench programına aktarılmıştır. Darbe analizleri 400 kg'lık bir kütlenin 10 m/s hızla çarpışma kutularına çarpıtılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Darbe analizleri sonucunda çarpışma kutularında meydana gelen maksimum kuvvet, sönmülenen enerji miktarı ve farklı darbe indikatörleri incelenerek en iyi kesit geometrisi belirlenmiştir. Darbe analiz sonuçlarına göre en yüksek darbe kuvveti ve sönmülenen enerji miktarı daire kesite sahip çarpışma kutularında elde edilmiştir. Diğer taraftan en düşük darbe kuvveti ve sönmülenen enerji miktarı üçgen kesite sahip çarpışma kutularında görülmüştür. Sonuç olarak kesitteki kenar sayısı artışı ile birlikte yapının enerji sönmüleme kabiliyetinin de arttığı tespit edilmiştir.

## Numerical Investigation of the Impact Performance of Thin-walled Sheet Metal Crash Boxes with Different Cross-section Geometries

### Article Info

Received : 29.06.2024

Accepted : 27.09.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1560152

### Corresponding Author

Oğuz DOĞAN

oğuzdogan@ksu.edu.tr

### Keywords

Impact performance

Section effect

Finite element method

Impact analysis

**How to cite:** DOĞAN, O., KAMER, M.S., (2024). Farklı Kesit Geometrilerine Sahip İnce Duvarlı Sac Metal Çarpışma Kutularının Darbe Performanslarının Nümerik İncelenmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(3), 719-728.

### ABSTRACT

This study numerically investigates the impact performance of crash boxes designed from thin-walled sheet metal with different cross-sectional geometries. Initially, crash boxes with five different cross-sectional geometries (square, circle, triangle, pentagon, hexagon) were designed, each having equal cross-sectional area and length. The designed crash boxes were imported into the ANSYS Workbench program to perform impact simulations. The impact analyses were conducted by simulating the collision of a 400 kg mass impacting the crash boxes at a speed of 10 ms<sup>-1</sup>. As a result of the impact analyses, the maximum force, absorbed energy, and various impact indicators were examined to determine the best cross-sectional geometry. According to the impact analysis results, the highest impact force and absorbed energy were observed in crash boxes with circular cross-sections. On the other hand, the lowest impact force and absorbed energy were observed in crash boxes with triangular cross-sections. In conclusion, it was determined that as the number of edges in the cross-section increases, the energy absorption capability of the structure also increases.

## 1. GİRİŞ

Darbe yükleri altında yüksek performansın gerektiği durumlarda ince duvarlı sac metal yapılar tercih edilmektedir. Bu yapılar özellikle otomobillerde olası bir çarpışma sırasında darbe enerjisini sönmölemek için kullanılırlar. Otomotiv endüstrisinde bu yapılar çarpışma kutuları adını almaktadır. Çarpışma kutuları çarpışma esnasında aracın ana parçalarına gelebilecek zararı en aza indirerek, yolcuları çeşitli yaralanmalardan koruyacak şekilde tasarlanmaktadır. Literatür incelendiğinde de çarpışma kutuları üzerine birçok nümerik ve deneysel çalışmanın olduğu görülmektedir. Zhang ve arkadaşları [1], farklı kalınlıklara sahip konik boruların çarpışma performansını deneysel ve nümerik olarak incelemişlerdir. Dairesel boruların enerji emme kapasitesi ve verimliliği, borunun daha hafif kütleyle azaltılmasından sonra %120'den fazla artırılmıştır. Büzölme sırasında malzemenin sertleşmesinin, çarpışma dayanıklılığı performansının büyük ölçüde artmasına yol açan en önemli faktör olduğu tespit edilmiştir. Usta ve arkadaşları [2], alüminyum alaşımından yapılmış aksel yükü iç içe çarpma tüplerinin çarpma dayanıklılık özelliklerini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmada farklı senaryolardaki çarpışma tüplerinin darbe davranışları incelenmiştir. Çalışma sonucunda petek dolgu çift iç içe tüp yapıları çarpışma kutusu tasarımının en uygun seçim olabileceği belirtilmiştir. Yu ve arkadaşları [3], elytra böceğinden esinlenerek yüksek verimli enerji soğurma yeteneklerine sahip bir tür, trabeküler-bal peteği biyomimetik yapı önermişlerdir. Önerilen geometriler üretilerek basma ve darbe testlerine tabi tutulmuştur. Ayrıca nümerik çalışmalar da gerçekleştirilerek önerilen geometrilerin enerji sönmöleme özellikleri araştırılmıştır. İnce ve arkadaşları [4], alüminyum ve çelik malzemelerinden özel kaynak yöntemi ile birleştirilerek ürettikleri çarpışma kutularının darbe özelliklerini incelemişlerdir. Üretilen yeni hibrit çarpışma kutularının %17,5 ağırlık kazancı sağladığını tespit etmişlerdir.

Çarpışma kutularında kesit geometrisi, sönmölenen enerji miktarını ve çarpışma kuvvetini etkileyen önemli parametrelerden bir tanesidir. Bu nedenle literatürde birçok araştırmacının farklı kesit geometrilerinin çarpışma kutularının darbe özelliklerine olan etkisini deneysel ve nümerik olarak incelediği görülmektedir. Hussain ve arkadaşları [5], cam elyaf takviyeli plastik çarpışma kutuları için farklı geometrilerle birlikte etkinliğini darbe testi kullanılarak araştırmışlardır. Dört farklı kesit geometrisine (kare, daire, altıgen ve ongen) sahip çarpışma kutuları aynı koşullarda darbe testine tabi tutulmuştur. Deney sonuçlarına göre en yüksek enerji sönmöleme kapasitesi ongen kesit geometrisinde gözlenirken, en düşük sönmöleme kapasitesi ise kare kesit geometrisine sahip çarpışma kutularında gözlemlenmiştir. Yuan ve arkadaşları [6], bazıları konik bir şekil alan kare, dikdörtgen ve çokgen kesitli bir origami çarpışma kutusu numuneleri tasarlayıp darbe özelliklerini incelemişlerdir. Origami sanatından esinlenerek tasarlanan çarpışma kutuları, geleneksel çarpışma kutusuyla karşılaştırıldığında birim kütle başına enerji emiliminde maksimum %107,1 artış ve başlangıç tepe kuvvetinde maksimum %68,3 azalma meydana gelmiştir. Köseadağ ve arkadaşları [7], otomobil çarpışma kutuları için, iki farklı malzeme ve dört farklı kesit geometrisine sahip çarpışma kutuları tasarlayıp darbe analizleri gerçekleştirmişlerdir. En yüksek enerji sönmöleme kapasitesinin altıgen kesit yapısına sahip çarpışma kutusunda olduğu tespit edilmiştir. Çelik malzemenin üretilen çarpışma kutularının alüminyumdan üretilenlere göre 10 kat daha fazla enerji sönmölediği tespit edilmiştir. Kale ve arkadaşları [8], ve Davoudi ve arkadaşları [9], farklı kesit geometrilerine sahip otomotiv çarpışma kutularının darbe özelliklerini deneysel ve nümerik olarak incelemişlerdir. Her iki çalışmada da kesit üzerindeki kenar sayısı artışının sönmölenen enerji miktarını önemli ölçüde arttırdığı tespit edilmiştir.

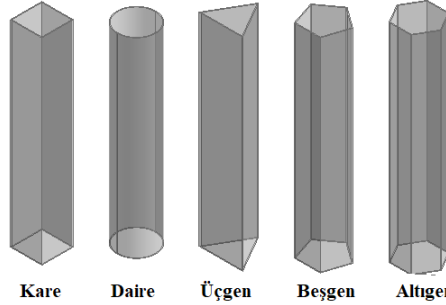
Çarpışma kutularında sönmölenen enerji miktarının artırılması amacıyla tek hücreli yapılar yerine çok hücreli yapılar tercih edilmektedir. Ayrıca çarpışma kutularının boyutlarının belirlenmesinde günümüzde çeşitli optimizasyon yöntemleri de sıklıkla kullanılmaktadır. Albak [10] ve Ceyhan ve arkadaşları [11], otomotivde kullanılan çok hücreli çarpışma kutularının darbe davranışlarını deneysel ve nümerik olarak araştırmışlardır. Ayrıca, optimizasyon çalışmaları yapılarak darbeye karşı en uygun çok hücre yapısı tespit edilmiştir. Fang ve arkadaşları [12], on farklı hücre sayısına sahip çok hücreli tüplerin hem aksel hem de eğik yükler altında çarpışma davranışlarını kapsamlı bir şekilde araştırmışlardır. Az hücreli tüplerin geniş açılı eğik yüklere karşı daha dayanıklı olduğunu, ancak saf aksel yük altında daha fazla hücreli tüplere göre daha kötü performans gösterdiğini tespit etmişlerdir. Wang ve arkadaşları [13], katlanma deformasyonuna sahip biyonomik çarpışma kutusunun tasarımını ve çok amaçlı optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Kaktüs bitkisinden ilham alınarak yeni bir çarpışma kutusu tasarımı ve optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar geleneksel çarpışma kutusuyla karşılaştırıldığında, optimize edilmiş biyonomik çarpma kutusu kütlelerinin %41,1 oranında azaldığı, sönmölenen enerji miktarının da %69,9 oranında arttırıldığı tespit edilmiştir. Tanlak ve arkadaşları [14], yüksek hızlı aksel darbe yükleri altında çalışan ince duvarlı boruların optimum şekil tasarımını nümerik yöntemler kullanarak gerçekleştirmişlerdir.

Sun ve arkadaşları [15] işlevsel olarak derecelendirilmiş kalınlığa sahip ince duvarlı çarpışma kutuları için çarpışma analizi ve çok amaçlı optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Li ve arkadaşları [16] rastgele ve aralık belirsizlikleri olan köpük dolgulu ince duvarlı çarpışma kutularının çarpışma dayanıklılığı tasarımı için çok amaçlı optimizasyon prosedürü önermişlerdir. Özgül enerji emilimi ve tepe darbe kuvvetini amaç olarak, ortalama çarpışma kuvveti ise kısıt olarak belirlenmiştir. Önerilen optimizasyon prosedürünün köpük dolgulu yapılar için çarpışma dayanıklılığı tasarımında etkili olduğu kanıtlanmıştır. Reddy ve arkadaşları [17] dört farklı kesit geometrisine sahip (kare, altıgen, sekizgen ve on iki köşeli) ince duvarlı sac metal çarpışma kutularının darbe özelliklerini teorik, nümerik ve deneysel olarak ayrı ayrı incelemişlerdir. Üç farklı yöntem ile hesaplanan verilerin birbirini doğruladığı görülmekle birlikte en iyi çarpışma özellikleri on iki köşeli kesitte en kötü çarpışma özellikleri ise kare kesite sahip çarpışma kutularında olduğu tespit edilmiştir. Tanlak ve arkadaşları [18] farklı kesit geometrilerine sahip yüksek hızlı eksenel darbe yükleri altında ince duvarlı boruların optimum şekil tasarımını nümerik olarak gerçekleştirmişlerdir.

Bu çalışmada, beş farklı kesit geometrisine sahip çarpışma kutularının darbe performansları nümerik olarak incelenmiştir. Beş farklı kesit geometrisinde tasarlanan çarpışma kutuları ANSYS ortamında darbe testlerine tabi tutulmuştur. Darbe analizleri sonucunda kuvvet, sönmülenen enerji ve çeşitli darbe indikatörleri yardımıyla en iyi darbe performansına sahip kesit geometrisi belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre en yüksek kuvvet enerji sönmüleme kabiliyeti daire kesite ait olmasına rağmen, kırılma kuvveti verimliliği bakımından en iyi geometrinin altıgen kesit olduğu tespit edilmiştir. En düşük darbe kuvveti ve sönmülenen enerji miktarının ise üçgen kesite sahip çarpışma kutularında görülmüştür.

## 2. YÖNTEM

Bu çalışmada öncelikle farklı kesit geometrisine sahip çarpışma kutularının tasarımları gerçekleştirilmiştir. Her farklı kesit geometrisine sahip çarpışma kutuları Solidworks 2022 programında, 250 mm yüksekliğinde ve 156 mm<sup>2</sup> taban alanına sahip olacak şekilde tasarlanmıştır [9]. Şekil 1'de farklı kesit geometrisi, eşit yüzey alanı ve eşit yüksekliğe sahip ince duvarlı sac metal kutuların tasarımları görülmektedir.

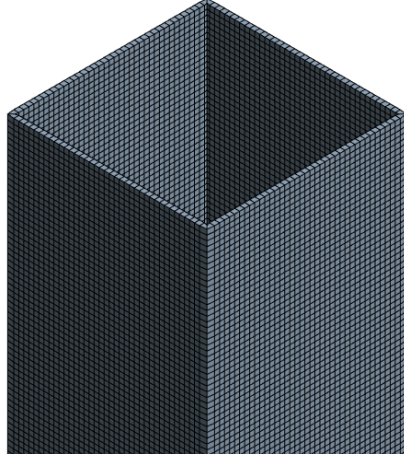


Şekil 1. Farklı kesit geometrisine sahip çarpışma kutularının tasarımı

Tasarımları tamamlanan geometriler sonlu elemanlar analizlerini gerçekleştirmek üzere ANSYS Workbench 2022 R2 programının Explicit Dynamics modülüne aktarılmıştır. Analiz programında öncelikle ince duvarlı sac metal kutuların malzeme tanımları gerçekleştirilmiştir. Malzeme olarak ANSYS program kütüphanesinden explicit malzemeler arasından 4340 çeliği seçilmiştir. 4340 malzemesine ait malzeme özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. 4340 Çeliğine ait malzeme özellikleri

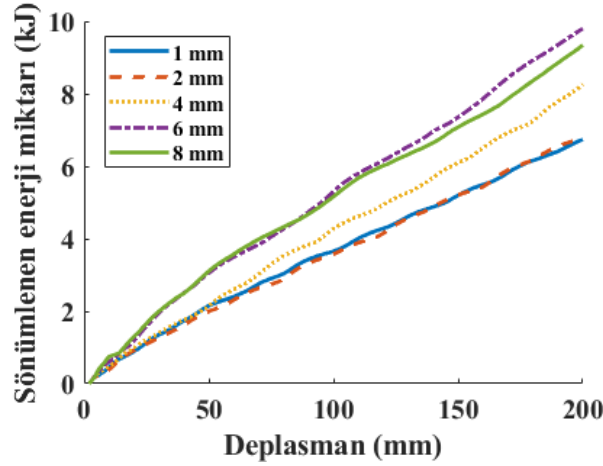
Özellik	Değer
Akma sınırı	792 MPa
Esneklik modülü	159000 MPa
Kayma modülü	81800 MPa
Johnson-Cook özellikleri	
Sertleşme sabiti	510 MPa
Sertleşme üssü	0,26
Gerilme oranı sabiti	0,014
Termal yumuşama üssü	1,03
Erime sıcaklığı	1519,9 °C
Referans gerilme oranı (/s)	1



Şekil 2. Kare kesit için oluşturulan ağ yapısı

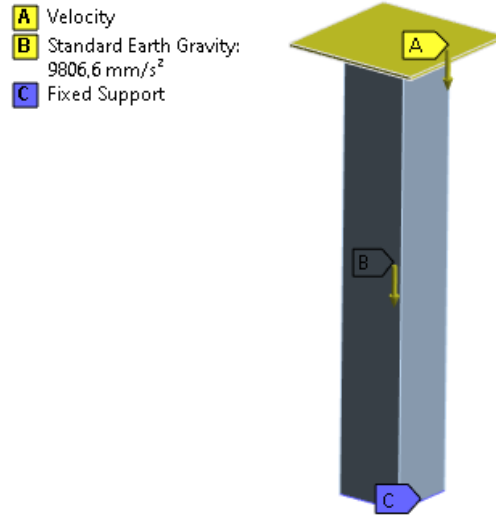
Malzeme tanımı yapıldıktan sonra modelin ağ yapısı oluşturulmuştur. Çözümün daha hızlı gerçekleşmesi için model iki boyutlu olarak tasarlanmıştır. Bu nedenle model 2 mm boyutunda yüzey elemanlar kullanılarak oluşturulmuştur. 2 mm boyutunda eleman kullanılması durumunda modelde yaklaşık 10000 düğüm noktası ve 9800 elemandan oluştuğu tespit edilmiştir. Şekil 2’de kare kesit için oluşturulan ağ yapısının genel durumu görülmektedir.

Oluşturulan ağ yapısının güvenilirliğinin belirlenmesi ve modelin ağdan bağımsız çözümler vermesi için ağdan bağımsızlık çalışması gerçekleştirilmiştir. Ağdan bağımsızlık çalışmasında oluşturulan model, 8 mm eleman boyutundan başlanarak sırasıyla 8-6-4-2 ve 1 mm eleman boyutları için çözdürülmüştür. Elde edilen çözümler sonucunda sönmelenen enerji miktarı-deplasman grafikleri çizdirilmiştir (Şekil 3). Çizdirilen grafikler sonucunda 2 mm eleman boyutuna inildikten sonra ağ yapısını 1 mm’ye indirsek bile üst üste çakışan grafikler elde edilmiştir. Bu nedenle gerek hızlı çözüm, gerekse de model için gerekli depolama boyutunun düşük olması için 2 mm eleman boyutu sabit olarak tüm farklı kesit geometrisine sahip analizlerde aynı olacak şekilde kullanılmıştır.



Şekil 3. Ağdan bağımsızlık çalışması

Ağ yapısının oluşturulmasından sonra modelin sınır şartları tanımlanmıştır. Şekil 4’de bu çalışmadaki modelin sınır şartları görülmektedir. Sac metal kutunun alt yüzeyi tüm eksenlerden sabit olacak şekilde sabitlemiştir. A kütlesi ise özkütlesi artırılarak 400 kg’lık bir yükü temsil edecek hale getirilmiş ve sabit 10 m/s hızla sac metal kutu ile çarpışması sağlanmıştır. Ayrıca standart yer çekimi tanımı da şekilde görüldüğü gibi eklenmiştir. Tüm tanımlamalar tamamlandıktan sonra model çözdürülmüştür. Her bir model yaklaşık olarak 1,5 saat süre sonucunda çözüme ulaşmıştır (Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2650 v3 2.30GHz 2.30 GHz 2 işlemci – 64GB Ram). Çözümün tamamlanmasından sonra elde edilen veriler incelenerek kesit profilinin darbe özelliklerine olan etkisi çeşitli indikatörler vasıtasıyla araştırılmıştır.



Şekil 4. Sonlu elemanlar modelinin sınır şartları

Enerji sönümleyen yapıların performanslarının incelenmesi için çeşitli indikatörler bulunmaktadır. Bu indikatörler sönümlenen enerji miktarı (SEM), özel sönümlenen enerji miktarı (ÖSEM), maksimum kırılma kuvveti (MKK), ortalama kırılma kuvveti (OKK) ve kırılma kuvveti verimliliği (KKV) olarak sıralanabilir.

SEM çarpışma sırasında metal kutunun sönümlendiği enerji miktarıdır. MKK çarpışma sırasında okunan en yüksek kuvvet değeridir. ÖSEM birim kütle başına sönümlenen enerji miktarını ölçmek için kullanılır.

$$\text{ÖSEM} = \frac{\text{SEM}}{\text{Kütle}} \quad (1)$$

Bu çalışmada kullanılan sac metal çarpışma kutularının yüzey alanları eşit olduğundan, SEM ile ÖSEM arasındaki oran eşit olacaktır. Sadece SEM'in incelenmesi yeterli olacaktır. OKK, SEM'in toplam kırılma uzunluğuna (x) oranı şeklinde hesaplanmaktadır.

$$\text{OKK} = \frac{\text{SEM}}{x} \quad (2)$$

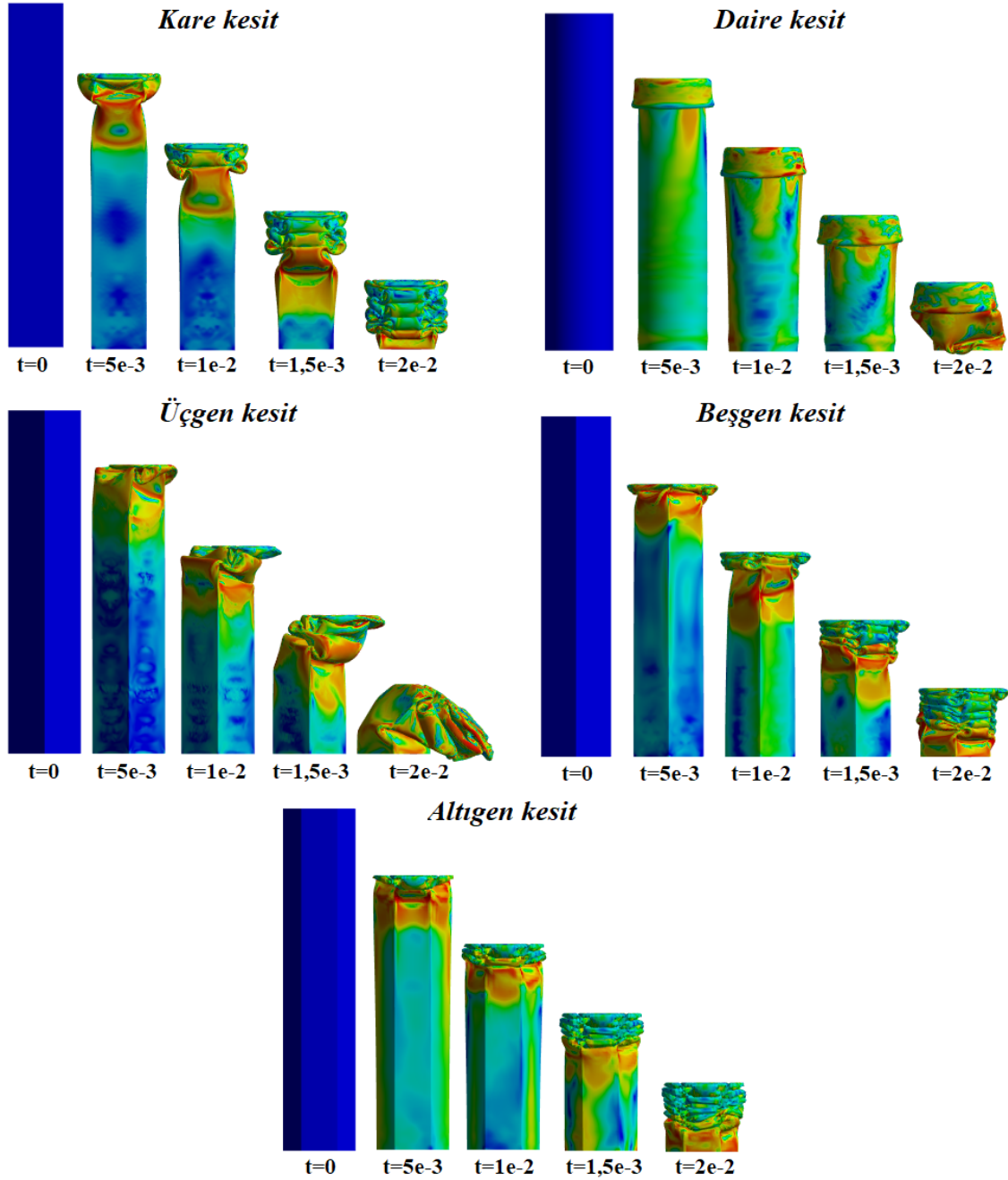
KKV, OKK'nin MKK'ne oranı ile hesaplanmaktadır.

$$\text{KKV} = \frac{\text{OKK}}{\text{MKK}} \quad (3)$$

### 3. ARAŞTIRMA BULGULARI

Beş farklı kesit geometrisine sahip ince duvarlı sac metal kutularıyla gerçekleştirilen darbe testleri sunucunda, her bir geometri için kuvvet-zaman grafikleri, sönümlenen enerji miktarı-zaman grafikleri ve darbe indikatörlerinin değişimi incelenmiştir. Bu sayede en iyi darbe sönümleme performansına sahip olan kesit geometrisi belirlenmeye çalışılmıştır.

Şekil 5'te farklı kesit geometrilerine sahip ince duvarlı sac metal kutuların darbe yükü altında zaman içerisinde gerilme ve deformasyon değişimleri görülmektedir.  $t=0$  anında yük henüz uygulanmadığından metal kutular üzerinde herhangi bir gerilme oluşmamıştır. Yükün uygulanmasıyla birlikte kutuların üzerinde gerilmeler meydana gelmiştir. Üçgen kesit incelenecek olursa gerilmenin eşit dağılmadığı, sadece üst bölgede toplandığı görülmektedir. Benzer şekilde kare kesitte de gerilmenin tüm kutu boyunca dağılmadığı üst bölgede yoğunlaştığı görülmektedir. Beşgen, altıgen ve daire kesitlerde ise gerilmenin tüm kutu boyunca diğer kesitlere göre daha homojen dağıldığı görülmektedir. Bunun sebebi kenar sayısı arttıkça kenarların yapıyı daha dirençli hale getirerek gerilmeyi daha düzgün dağıtmasıdır.

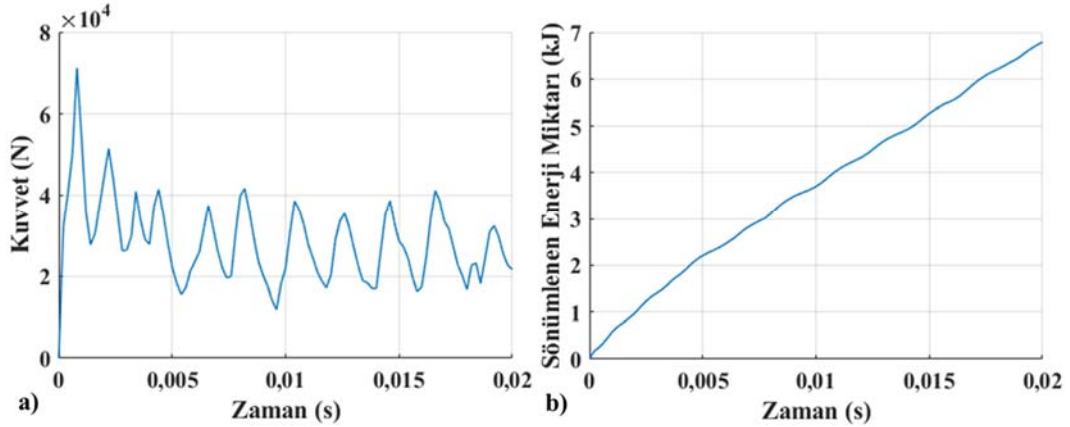


Şekil 5. Farklı kesite sahip sac metal kutularının eşit zaman aralıklarındaki çarpışma davranışları

$t=0,01$  sn'den sonra üçgen kesitte meydana gelen katlanmaların diğer kesitlere göre çok daha düzensiz hale geldiği, burkulmanın meydana geldiği görülmektedir. Bu nedenle üçgen kesit için dayanım ve sönümün diğer kesitlere göre daha düşük olacağı öngörülebilir. En düzgün katlanma şeklinin ise daire kesitte olduğu görülmektedir. Şekilde tam olarak görülmemekle birlikte, daire kesitli metal kutuda diğer kesit geometrilerine sahip metal kutulara göre daha fazla kıvrılma meydana gelmiştir. Bu da bu kesitin daha fazla enerjisi sönümleyeceği anlamına gelmektedir.

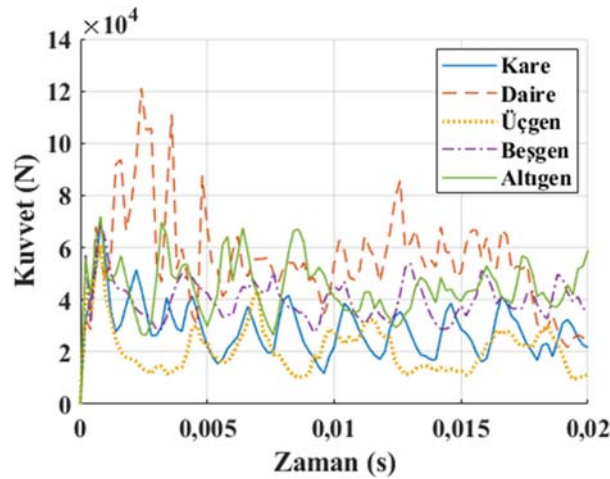
Şekil 6'da kare profil için çarpışma zamanına bağlı olarak kuvvet ve sönümlenen enerji değişimi görülmektedir. Şekil incelendiğinde kare profil için maksimum darbe kuvvetinin 70000 N civarında olduğu görülmektedir. Çarpışma esnasında zamanla kutu üzerinde meydana gelen katlanmalarla birlikte kuvvetin artıp azaldığı görülmektedir (Şekil 6a). Çarpışma esnasında ortalama kuvvetin ise yaklaşık olarak 25000 N civarında olduğu söylenebilir. Çarpışma esnasında sönümlenen enerji miktarının ise yaklaşık olarak lineer

arttığı görülmektedir (Şekil 6b). Kare kesit geometrisine sahip çarpışma kutusu için toplamda 6,7 kJ'lük enerjinin sönmüldüğü tespit edilmiştir.



Şekil 6. Kare profil için çarpışma testi sonuçları a) kuvvet-zaman, b) sönümlenen enerji-zaman değişimi

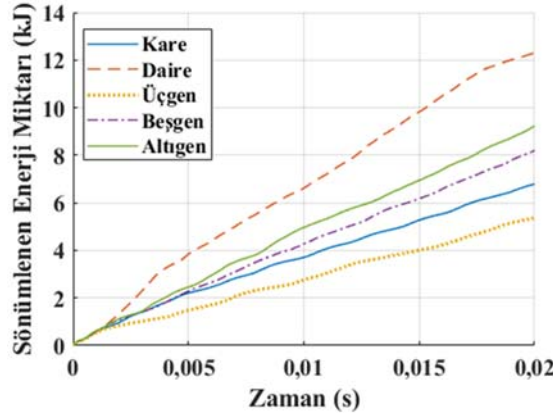
Kesit geometrisinin darbe kuvvetine olan etkisi Şekil 7'de gösterilmektedir. Şekil incelendiğinde tüm kesitlerde belli zaman aralıklarında katlanmalar meydana gelmektedir. Üçgen kesite sahip çarpışma kutularında kuvvetin beş kez yükselip alçaldığı görülmektedir. Diğer kesitlerde ise çok daha fazla katlanmanın olduğu görülmektedir. En yüksek kuvvet değerinin daire kesitte ( $123000$  N) olduğu görülmektedir.



Şekil 7. Kesit geometrisinin darbe kuvvetine olan etkisi

Dairesel kesite sahip çarpışma kutularında kenar olmadığından, katlanma sayısının daha çok olması nedeniyle diğerlerine göre daha dayanıklı olduğu tespit edilmiştir. Çarpışma kutularında kuvvetin bu şekilde ani olarak yükselmesi istenilen bir durum değildir. Çünkü araç içerisinde oturan canlılara da bu kuvvet iletilmiş olacaktır. Kare, üçgen, beşgen ve altıgen kesite sahip çarpışma kutularında ise maksimum kuvvetin birbirine yakın ve yaklaşık  $65000 \sim 70000$  N arasında değiştiği görülmektedir. Ortalama kuvvet sıralaması göz önüne alındığında, en yüksek ortalama kuvvetten en düşüğe sırasıyla daire, altıgen, beşgen, kare ve üçgen kesite sahip çarpışma kutuları olduğu görülmektedir. Bu durumun Şekil 7 ile de uyumlu olduğu görülmektedir.

Kesit geometrisinin sönümlenen enerji miktarına olan etkisi Şekil 8'de gösterilmektedir. Darbe süresince en az enerji sönümleyen kesit geometrisinin  $5,3$  kJ ile üçgen kesit olduğu tespit edilmiştir. En yüksek enerji sönümleme kabiliyetinin ise  $12,3$  kJ ile daire kesit ile tasarlanan çarpışma kutularına ait olduğu görülmektedir. Sönümlenen enerji bakımından kesitler büyükten küçüğe doğru sırasıyla daire, altıgen, beşgen, kare ve üçgen kesit olarak sıralanmaktadır. Bu sıralamanın darbe anında ortalama kuvvet sıralaması ile aynı olduğu görülmektedir (Şekil 7). Kesit üzerindeki kenar sayısı arttıkça sönümlenen enerji miktarının da arttığı söylenebilir. Elde edilen sonuçların literatürle de uyumlu olduğu görülmektedir [8-9].



Şekil 8. Kesit geometrisinin sönmülenen enerji miktarına etkisi

Çizelge 2’de farklı kesit geometrilerine sahip çarpışma kutularının darbe analizleri sonucunda elde edilen indikatör değişimleri görülmektedir. ÖSEM ve OKK değerlerinin birbiri ile özdeş sonuçlar verdiği görülmektedir. Hem ÖSEM hem de OKK değerleri incelendiğinde, iyi kesit geometrisinin daire olduğu en kötü geometrinin ise üçgen olduğu tespit edilmiştir. KKV açısından ise daire kesitte meydana gelen çok yüksek ani kuvvetten dolayı verimlilik düşmektedir. KKV değeri bakımından en iyi kesitin altıgen kesit olduğu tespit edilmiştir. Dairesel kesitin ise KKV bakımından üçüncü sırada kaldığı görülmektedir.

Çizelge 2. Kesit geometrisinin indikatörlere olan etkisi

Profil/İndikatör	ÖSEM [kJ/kg]	OKK [kJ/m]	KVV
Kare	22,03	33,95	0,47
Daire	39,92	61,5	0,5
Üçgen	17,42	26,85	0,44
Beşgen	26,61	41	0,59
Altıgen	30,34	46,75	0,65

#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışmada eşit kesit yüzey alanına ve farklı kesit geometrilerine (kare, daire, üçgen, beşgen, altıgen) sahip ince duvarlı çarpışma kutularının darbe performansları sayısal olarak incelenmiştir. Belirtilen özelliklerde tasarlanan çarpışma kutuları darbe analizleri için ANSYS programına aktarılmıştır. ANSYS programında malzeme tanımı, ağ yapısının oluşturulması, ağdan bağımsızlık çalışması, sınır şartlarının tanımlanması gibi genel sonlu elemanlar analiz prosedürü uygulanmış ve darbe analizleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen analizlerin sonucunda, kuvvet-zaman, sönmülenen enerji-zaman ve çeşitli indikatörlerin değişimi ile kesit değişiminin çarpışma kutularının darbe performansı üzerine olan etkisi incelenmiştir. Gerçekleştirilen sonlu elemanlar darbe analizleri sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Darbe esnasında en büyük kuvvet değeri 123000 N ile daire kesite sahip çarpışma kutularında gözlenirken, en düşük kuvvet değeri 60000 N ile üçgen kesite sahip çarpışma kutusunda gözlemlenmiştir.
- Darbe esnasında oluşan ortalama kuvvet değerlerinin büyükten küçüğe doğru sırasıyla daire, altıgen, beşgen, kare ve üçgen kesite sahip çarpışma kutularında olduğu tespit edilmiştir. Buna ek olarak sönmülenen enerji miktarlarının ortalama darbe kuvveti ile doğru orantılı olarak değiştiği belirlenmiştir.
- KKV bakımından kesitler incelendiğinde en verimli kesitin altıgen kesit olduğu tespit edilmiştir. En yüksek kuvvet ve enerji sönmüleme kapasitesine sahip olan daire kesit ise verimlilik bakımından üçüncü sırada kalmıştır.
- Kesit geometrisi üzerindeki kenar sayısının artmasıyla birlikte yükün darbe esnasında taşınımı daha homojen olmuştur. Bu nedenle bu tarz çarpışma kutularının tasarımında kenar sayısı çok olan kesit tiplerinin belirlenmesi uygun çözüm olacaktır.

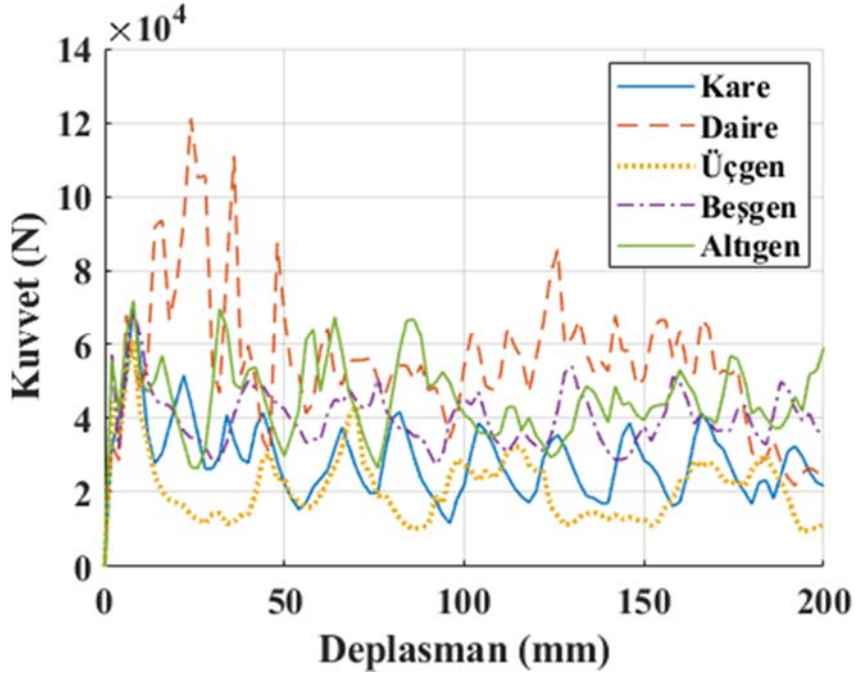


Bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre eşit yüzey alanına sahip kesitlerde kenar sayısının artmasıyla birlikte darbe performansının arttığı tespit edilmiştir. Bu sonuçtan hareketle standart olmayan kesitler için düşünüldüğünde kenar sayısı büyük (alan atalet momenti büyük) olan kesitlerin darbe performansının daha iyi olacağı öngörülmektedir. Bu çalışmanın ardından standart olmayan kesitler için de benzer çalışmalar yürütülecek ve elde edilen sonuçlar bu çalışma ile kıyaslanacaktır.

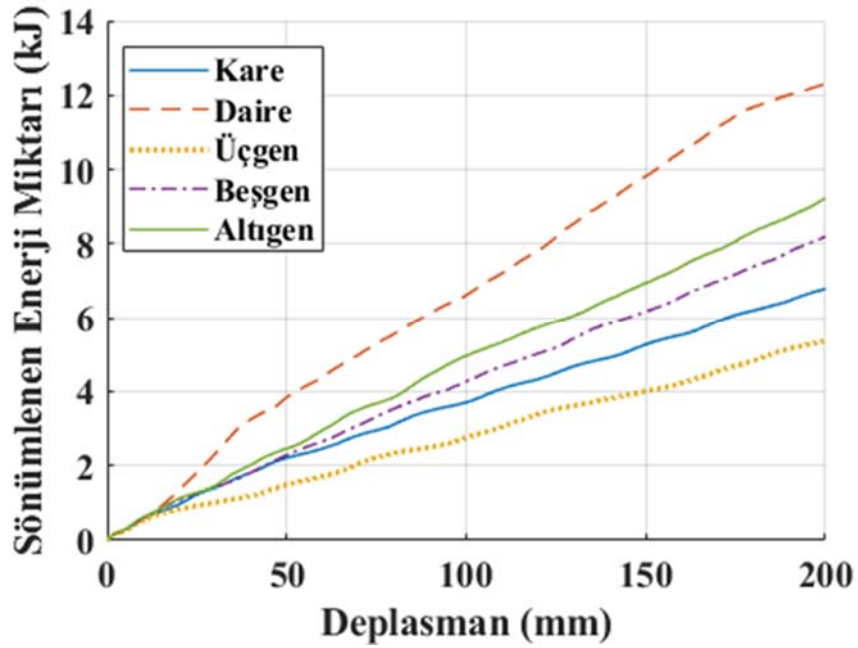
## 5. KAYNAKLAR

1. Zhang, H., Zhang, X., 2016. Crashworthiness performance of conical tubes with nonlinear thickness distribution. *Thin-Walled Structures*, 99, 35-44.
2. Usta, F., Türkmen, H.S., 2019. Experimental and numerical investigation of impact behavior of nested tubes with and without honeycomb filler. *Thin-Walled Structures*, 106256.
3. Yu, X., Pan, L., Chen, J., Zhang, X., Wei, P., 2019. Experimental and numerical study on the energy absorption abilities of trabecular-honeycomb biomimetic structures inspired by beetle elytra. *Journal of Materials Science*, 54, 2193-2204.
4. İnce, F., Türkmen, H.S., Mecitoğlu, Z., Uludag, N., Durgun, İ., Altınok, E., Örenel, H., 2011. A numerical and experimental study on the impact behavior of box structures. *Procedia Engineering*, 10, 1736-1741.
5. Hussain, N.N., Regalla, S.P., Rao, Y.V.D., Dirgantara, T., Gunawan, L., Jusuf, A., 2021. Drop-weight impact testing for the study of energy absorption in automobile crash boxes made of composite material. *Proc IMechE Part L: J Materials: Design and Applications*, 235(1), 114-130.
6. Yuan, L., Shi, H., Ma, J., Zhong, Y., 2019. Quasi-static impact of origami crash boxes with various profiles. *Thin-Walled Structures*, 141, 435-446.
7. Köseadağ, E., İşler, D., 2023. Effect of section geometry and material type on energy absorption capabilities of crash boxes. *Karaelmas Fen ve Müh. Dergisi*, 13(1), 42-51.
8. Kale, B.S., Bhole, K.S., Mandhare, N.A., Patil, S.V., 2023. Finite element analysis and deployment of analytical hierarchical process for design of the structural framework formicro-actuators of vehicle crash box. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 1-11.
9. Davoudi, M., Kim, K., 2022. Energy absorption capability of thin-walled structures with various cross sections under oblique crash. *International Journal of Steel Structures*, 22(6), 1786-1797.
10. Albak, E.İ., 2021. Multi-objective crashworthiness optimization of thin-walled multi-cell tubes with different wall lengths. *International Journal of Crashworthiness*, 26(4), 438-455.
11. Ceyhan, M., Yıldız, B.S., 2023. Investigation of crash performance of multi-cell crash-boxes. *Cukurova University Journal of the Faculty of Engineering*, 38(3), 613-621.
12. Fang, J., Gao, Y., Sun, G., Qiu, N., Li, Q., 2015. On design of multi-cell tubes under axial and oblique impact loads. *Thin-Walled Structures*, 95, 115-126.
13. Wang, C.Y., Lu, G., Zhao, W., Wang, Y., 2020. Modeling and multi-objective optimization of a bionic crash box with folding deformation. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 61, 283-299.
14. Tanlak, N., Sonmez, F.O., 2014. Optimal shape design of thin-walled tubes under high-velocity axial impact loads. *Thin-Walled Structures*, 84, 302-312.
15. Sun, G., Xu, F., Li, G., Li, Q., 2014. Crashing analysis and multiobjective optimization for thin-walled structures with functionally graded thickness. *International Journal of Impact Engineering*, 64, 62-74.
16. Li, F., Sun, G., Huang, X., Rong, J., Li, Q., 2015. Multiobjective robust optimization for crashworthiness design of foam filled thin-walled structures with random and interval uncertainties. *Engineering Structures*, 88, 111-124.
17. Reddy, S., Abbasi, M., Fard, M., 2015. Multi-cornered thin-walled sheet metal members for enhanced crashworthiness and occupant protection. *Thin-Walled Structures*, 94, 56-66.
18. Tanlak, N., Sonmez, F.O., 2014. Optimal shape design of thin-walled tubes under high-velocity axial impact loads. *Thin-Walled Structures*, 84, 302-312.

## 6. EKLER



Ek 1. Farklı kesit geometrileri için kuvvet – deplasman değişimi



Ek 2. Farklı kesit geometrileri için sönümlenen enerji miktarı – deplasman değişimi