



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



Farklı geometrik yapılardaki çarpışma kutularının içerisine yerleştirilen alüminyum köpük malzemenin enerji sönmleme kapasitesi üzerine etkisinin incelenmesi

The effect of aluminum foam material on the energy absorption capacity of different geometric structure crash boxes

Yazar(lar) (Author(s)): Murat ALTIN¹, H. Serdar YÜCESU²

ORCID¹: 0000-0002-2404-2614

ORCID²: 0000-0002-7805-6085

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Altın M. ve Yücesu H. S., “Farklı geometrik yapılardaki çarpışma kutularının içerisine yerleştirilen alüminyum köpük malzemenin enerji sönmleme kapasitesi üzerine etkisinin incelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 22(1): 141-148, (2019).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.426642

Farklı Geometrik Yapılardaki Çarpışma Kutularının İçerisine Yerleştirilen Alüminyum Köpük Malzemenin Enerji Sönümlenme Kapasitesi Üzerine Etkisinin İncelenmesi

Araştırma Makalesi / Research Article

Murat ALTIN*, Hüseyin Serdar YÜCESU

Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 14.11.2017 ; Kabul/Accepted : 24.04.2018)

ÖZ

Otomobillerde kullanılan çarpışma kutuları olası bir kaza durumunda ortaya çıkan darbe enerjisini sönümleyerek otomobil içerisine en az seviyede iletilmesini sağlayan bağlantı elemanlarıdır. Bu görevlerinden dolayı çarpışma kutuları otomobiller üzerinde önemli bir komponent durumundadır. Yapılan çalışmada daire, kare, beşgen ve altıgen kesite sahip çarpışma kutularının içerisine alüminyum esaslı metalik köpük malzeme yerleştirilmiş ve sonlu elemanlar analizleri ile enerji sönümlenme kapasitesindeki değişimler incelenmiştir. Yapılan tüm analizler Ls-Dyna programı ile gerçekleştirilmiştir. Gerçek kaza koşullarının canlandırılması amacıyla çarpışma kutularına 500 kg'lık kütle 17,7 m/s'lik bir hız ile çarpıtılmıştır. Çalışmanın sonucunda içi boş çarpışma kutularının içerisine yerleştirilen alüminyum esaslı metalik köpük malzemelerin enerji sönümlenme kapasitesini önemli derecede arttırdığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çarpışma kutusu, Alüminyum köpük, Sonlu elemanlar analizi, Alüminyum tüp kiriş.

The Effect of Aluminium Foam Material on the Energy Absorption Capacity of Different Geometric Structure Crash Boxes

ABSTRACT

Crash boxes used in automobiles are connecting elements that can transmit the impact energy to the automobile at the minimum level by damping the impact energy that arises in case of a possible accident. Due to this role, crash boxes are an important component on automobiles. In the study, aluminum based metallic foam material was placed in crash boxes with circle, square, pentagonal and hexagonal sections and the changes in energy absorption capacity were investigated using finite elements analysis. All analyses were performed with Ls-Dyna program. In order to simulate real accident conditions, a mass of 500 kg was hit at a speed of 17.7 m/s to the crash boxes. As a result of the study, it has been found that the aluminum based metallic foam materials placed in the hollow crash boxes have been found to significantly increase the energy absorption capacity.

Keywords: Crash box, Aluminum foam, Finite element analysis, Aluminum tube beam.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Otomobiller icadı ile birlikte yaşamımızda önemli bir yer kaplamış ve bize sundukları yararlarından dolayı hayatımızın vazgeçilmezleri arasına girmiştir. 20. Yüzyılın başlarından itibaren otomobiller pahalı ulaşım aracı statüsünden çıkarak yaygın bir kitlenin kullanmaya başladığı temel ulaşım araçları haline dönüşmüşlerdir [1]. Otomobillere duyulan ihtiyaç beraberinde trafik kazalarında artmasına yol açmıştır. Karayollarında meydana gelen kazaların büyük bir çoğunluğu önden

çarpmalar şeklinde gerçekleşmektedir. Bunun neticesinde otomobil üzerinde en büyük darbeler öncelikle ön kısımlarda meydana gelmektedir.

Hal böyle olunca kaza anında darbe kuvvetlerine maruz kalan otomobil parçalarının tasarımının önemi ortaya çıkmaktadır.

Otomobillerde kullanılan ve ön tampon üzerinde yer alan çarpışma kutuları deforme olarak önden çarpmalı kazalarda ortaya çıkan kinetik enerjini emebilme yeteneğine sahip bağlantı elemanlarıdır. Kaza anında çarpışma kutularının maruz kaldığı darbe kuvvetlerinin yeterince sönümlenememesi bu kuvvetlerin doğrudan

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : maltin@gazi.edu.tr

araç içerisindeki yolcu bölümüne aktarılmasına sebebiyet verir. Bu durum hem araç içerisindeki yolcuların ölümcül yaralanmalarına neden olacak ve hem de araçta üzerinde yüksek miktarda maddi hasara yol açacaktır.

Çarpışma kutularının enerji sönümleme kapasitelerinin artırılmasına yönelik geçmişten günümüze çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalar genellikle çarpışma kutularının geometrisi üzerine olmuştur. Bazı çalışmalarda dairesel kesitli [2-4] çarpışma kutuları kullanılırken bazılarında dikdörtgen ve kare [5-7] ve bazılarında ise çok değişik geometriler [8-10] ele alınmıştır. Çarpışma kutularının geometrik özelliklerinin değiştirilmesi enerji sönümleme kapasitesi üzerine etkili olduğu bilinmektedir. Bunun yanında yapılan diğer çalışmalarda çarpışma kutularının malzemesi [11-12], et kalınlıkları [13-15] ve koniklik açısı [16-18] değişken parametreler olarak kullanılmıştır. Öztürk ve diğerleri, sonlu elemanlar yöntemini kullanarak LS-DYNA yazılımıyla darbe emici sistemler üzerine bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada % 40 ofsetten oluşan bir tampon çarpışma modeli LS-DYNA üzerinde oluşturulmuştur. Çalışmanın sonucunda analiz edilen model için 10 m/s'lik süre içerisinde sönümlenen enerji kapasitesi 4.21×10^6 J olarak bulunmuştur. Bununla birlikte 1000 kg'lık kütleyle sahip blok 15,8 m/s'lik hızla tampona çarptığı varsayılırsa ortaya çıkan toplam enerjinin yaklaşık %3,4'lük bölümünün çarpışma kutusu tarafından sönümlendiğini belirlenmiştir [19].

Demirci ve diğerleri, farklı geometrilerdeki çarpışma kutularının önden çarpmalı kaza durumlarında enerji sönümleme kapasitelerini belirleyebilmek amacıyla sonlu elemanlar analizi yapmışlardır. Çarpışma kutularının malzemesini çelik olarak belirlenmiş ve LS-DYNA yazılımı ile 15,6 m/s lik hızda 80 kg lık kütleyle sahip rijit bir duvara aksel doğrultuda çarptırarak sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Tasarımı gerçekleştirilen modellerden en iyisinin mevcut modele göre daha üstün olduğunu, 6,66 kJ olan enerji sönümleme kapasitesinin 6,7 kJ'la çıktığı ve maksimum deformasyon kuvvetinin 107 kN'dan 106 kN'a indiği tespit edilmiştir [20].

Toksoy, içerisine kapalı hücreli alüminyum köpük malzeme doldurulmuş kare kesitli çarpışma kutularının deformasyonlarını incelemiştir. Toksoy çalışmasında kullanacağı her bir çarpışma kutusunun et kalınlığını 2 mm, 2,5 mm ve 3 mm, boyutlarını $70,6 \times 73,2 \times 125,2$ mm ve $60 \times 70,4 \times 122,6$ mm olarak belirlemiştir. Çalışma sonucunda Dolu profillerdeki ortalama ezilme miktarının boş tüplere göre % 55, özgül enerji sönümleme kapasitesinde ise %9,8 arttığını belirtmiştir. En yüksek enerji sönümleme kapasitesinin ise 3 mm et kalınlığındaki alüminyum köpük ile dolu çarpışma kutusunun sağladığı belirtilmiştir [21].

Zarei ve diğerleri, boş ve alüminyum köpük malzeme ile doldurulmuş profillerin aksel ve eğik yükler altındaki enerji sönümleme kapasitelerini incelemiştir. Çalışma sonucunda yapılan testler ile köpük malzeme ile dolu çarpışma kutularının özgül enerji sönümleme kapasitesi diğerlerine göre daha iyi olduğunu belirtmişlerdir. Buna

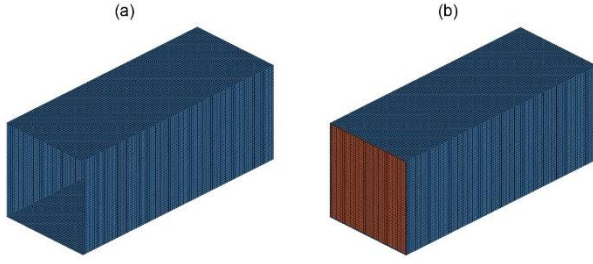
karşın kullanılan köpük malzemenin yoğunluğunun optimum değerden fazla olması ezilme kuvveti verimi ile özgül enerji sönümleme kapasitesinin azalmasına neden olacağını dile getirmişlerdir [22].

Malzeme teknolojisini gelişmesiyle birlikte çarpışma kutularının enerji sönümleme kapasitelerinin artırılmasında yeni bir materyal olan metalik köpük malzemeler kullanılmaya başlanmıştır. Gerek mekanik özellikleri gerekse fiziksel özellikleri bu malzemeleri kullanışlı hale getirmektedir. Hafif olmaları ve enerji sönümleme kapasitelerinin yüksek olması en büyük avantajları arasında sayılabilmektedir. Metalik köpük malzemeler gaz fazındaki baloncukların sıvı haldeki metal fazı içerisinde hapsolarak gözenekler oluşturmasıyla meydana gelir. Bu baloncuklar daha sonra sıvı fazdan katı faza geçerken önceki oluşturdukları şekilleri korumakta ve katı haldeki köpük malzemeyi oluşturmaktadır [23]. Hücre yapısına göre metalik köpük malzemeler açık hücreli ve kapalı hücreli olarak ikiye ayrılmaktadır. Köpük malzemelerde gözenekler arasında bir bağlantı varsa bu tür köpüklere açık hücreli, gaz hücreler içerisinde hapsedilmiş ve sızdırmazlık derecesinde birbirlerinden duvarlarla ayrılıyorsa kapalı hücre olarak adlandırılmaktadır [24]. Metalik köpük malzemeler çarpışma kutularının içerisine yerleştirilerek çarpışma esnasında ortaya darbe enerjisini daha fazla sönümlemesi amacıyla kullanılmaktadır. Genellikle 0,5 g/cm³ ile 0,7 g/cm³ arasında yoğunluğa sahip metalik köpük malzemelerin çarpışma kutularının enerji sönümleme kapasitelerini arttırdığı görülmektedir [25-27]. Metalik köpük malzemelerin yanında sentetik bazlı köpük malzemelerde kullanılmaktadır [28-29].

Bu çalışmada otomobillerde kullanılan farklı geometrik yapıdaki çarpışma kutularının içerisine alüminyum köpük malzeme yerleştirilmiş ve darbe kuvveti altında ki çarpışma performansı sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir.

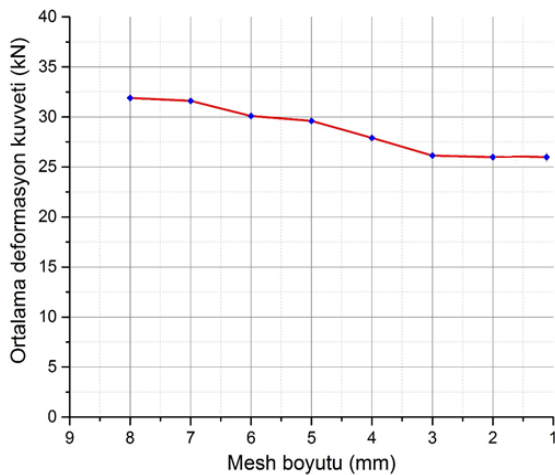
2. SONLU ELEMANLAR MODELİ (FINITE ELEMENT MODEL)

Çalışmanın bu bölümünde tasarımı gerçekleştirilen çarpışma kutularının sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerin yapılabilmesi için bir dizi ön hazırlık gerekmektedir. Tüm çarpışma kutularının uzunlukları 200 mm ve et kalınlıkları 1,5 mm olarak alınmıştır. İlk olarak tasarlanan çarpışma kutularının kabuk modelleri Solidworks programı yardımıyla çizilmiştir. Daha sonra çarpışma kutularının sonlu elemanlar modelinin oluşturulabilmesi için Hypermesh programından yararlanılmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Temsili içi boş (a) ve içi dolu (b) çarpışma kutularının sonlu elemanlar modeli (Representative finite element models empty (a) and foam filled (b) crash box)

Sonlu elemanlar analizinde mesh (bölüntüleme) işlemi yapmak fiziksel olarak tanımlanan bir bölgeyi belli büyüklüklerde parçalara bölme işlemi olarak tanımlanmaktadır. Kullanılacak mesh boyutu yapılan analizin sonucunu etkilemektedir. Yapılan çalışmada kullanılacak mesh boyutunu belirlemek amacıyla örnek olarak alınan içi boş kare çarpışma kutusu farklı boyutlarda (2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm, 6 mm, 7 mm ve 8 mm) mesh işlemine tabi tutulmuş ve aynı koşullar altında analizleri gerçekleştirilmiştir. Mesh işlemi yapılırken 4 nodlu Belytschko-Tsay ince kabuk (shell) elemanlar kullanılmış, bu kabuk elemanların kesitine 5 integrasyon noktası uygulanmıştır. Çarpışma kutularının kendi üzerlerinde katlanmalarını kontrol etmek amacıyla Automatic Single Surface Contact algoritmaları ile çarpışma kutusu ve alüminyum köpük arasındaki bağlantıyı sağlamak için Automatic Surface to Surface kontak algoritmaları kullanılmıştır. Kullanılan kontak algoritmalarında statik sürtünme katsayısı 0,3, dinamik sürtünme katsayısı 0,2 alınmıştır. Yapılan analiz neticesinde Şekil 2’de verilen sonuçlar elde edilmiş ve 2 mm mesh boyutu tüm analizlerde kullanılmak üzere seçilmiştir.



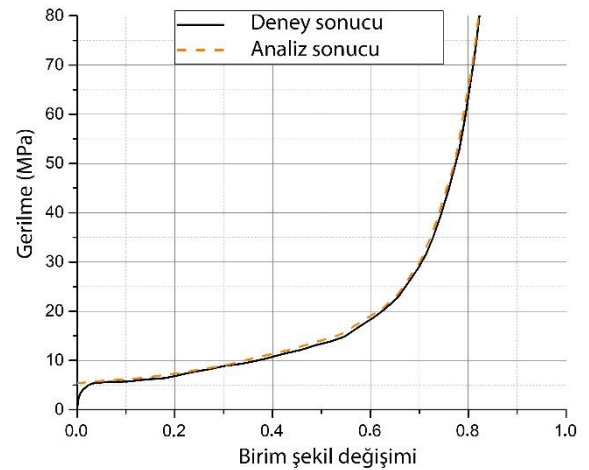
Şekil 2. Ortalama deformasyon kuvvetine bağlı olarak yakınsak mesh boyutunun belirlenmesi (Determination of convergence mesh size depending on mean crush force)

Sonlu elemanlar modeli oluşturulan çarpışma kutularının malzeme kartları ve sınır şartları Ls-PrePost programı yardımıyla oluşturulmuştur. Çarpışma kutularının sonlu elemanlar modeli için elasto-plastik malzeme yapısından oluşan ve Ls-Dyna programının içerisinde yer alan “MAT 24 (Piecewise Linear Isotropic Plasticity), alüminyum köpük malzemeler için “MAT 154 (Deshpande and Fleck) malzeme kartları seçilmiştir. “MAT 154” malzeme kartı için gerekli olan parametreler belirlenirken üretilen köpük malzemelere basma testi uygulanmıştır. Basma testi yapılan köpük malzemenin kesit görüntüsü Şekil 3’te verildiği gibidir.



Şekil 3. Üretilen köpük malzemenin kesit görüntüsü

Basma testi sonucunda elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme grafiği LS-DYNA simülasyonu sonucunda elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme grafiği ile karşılaştırılmıştır. Şekil 4’te görüldüğü gibi deney sonucu ile simülasyon sonucu birbirine çok yakın çıkmıştır.



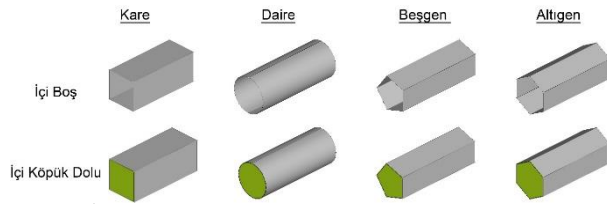
Şekil 4. Al köpük malzemenin gerilme-birim şekil değişimi grafiğinin karşılaştırılması (Comparison of stress-strain curve of Al foam material)

Yapılan bu karşılaştırma çalışması sonucunda analizlerde kullanılacak köpük malzemeye ait parametreler belirlenmiştir. Çarpışma kutularının malzemesi Al 6063 olarak belirlenmiştir. Kullanılan malzemelere ait mekanik özellikler Çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1. Kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri
(Mechanical properties of materials)

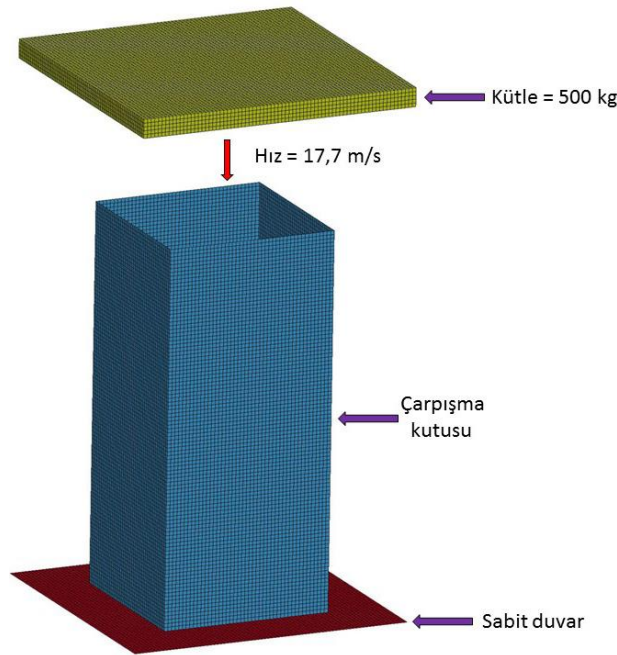
Malzeme Türü	Yoğunluk (ρ)	Elastik Modülü (E)	Poisson Oranı (ν)
Al 6063	2,7 (g/cm ³)	68,2 (GPa)	0,3
Al Köpük	0,628 (g/cm ³)	0,806 (GPa)	0

Oluşturulan içi boş ve alüminyum köpük malzeme ile dolu çarpışma kutuları Şekil 5’de verilmektedir.



Şekil 5. İçi boş ve içi köpük dolu çarpışma kutuları

Son olarak sonlu elemanlar modelleri ile malzeme kartları oluşturulan çarpışma kutuları Ls-Dyna ile analiz edilmiştir. Analizler yapılırken tüm çarpışma kutularına 500 kg’lık kütle 17,7 m/s’lik bir hız ile çarpıtılmıştır (Şekil 6).



Şekil 6. Çarpışma kutusunun sonlu elemanlar modeli (Finite element model of the crash box)

3. ANALİZ SONUÇLARI VE TARTIŞMA (ANALYSIS RESULTS & DISCUSSION)

Yapılan bu çalışmada farklı geometrik özelliklere sahip içi boş ve içi alüminyum köpük malzeme ile dolu toplam sekiz adet çarpışma kutusu 120 mm boyunca deforme edilerek sönmölenen enerji, maksimum deformasyon

kuvveti, ortalama deformasyon kuvveti, ezilme kuvveti verim ve özgül enerji sönmöleme kapasiteleri belirlenmiştir.

Analiz sonuçları belirlenirken bazı veriler program çıktılarından alınırken bazı veriler ise çeşitli hesaplamalar sonucu elde edilmiştir. Bu hesaplamalarda kullanılan formüller aşağıdaki eşitliklerde verilmiştir.

Sönmölenen Enerji: Çarpışma kutularının çarpışma sonunda sönmölediği toplam enerji (S_E), çarpma kuvvetinin yaptığı iş olarak tanımlanabilir [30].

$$S_E = \int_{\delta_p}^{\delta} P d\delta \quad (1)$$

Burada P ezilme kuvvetini, δ ve δP yapılan işin hesaplanacağı ezilme aralığını ifade etmektedir. Sönmölenen enerji veya yük- yer değiştirme grafiğinin altında kalan alan olarak ifade edilmektedir.

Özgöl Enerji Sönmöleme (ÖES): Özgöl enerji sönmöleme kapasitesi sönmölenen enerjinin (S_E) çarpışma kutusunun deformasyona uğramadan önceki kütlelerine (m) oranı olarak tanımlanmaktadır.

$$\text{ÖES} = \frac{S_E}{m} \quad (2)$$

Tasarım esnasında malzeme seçimi, çarpışma kutusunun enerji sönmöleme kapasitesini direkt olarak etkileyeceğinden önemli bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır. Çarpışma kutusunu kütle ne kadar hafif olursa özgül enerji sönmöleme kapasitesi o kadar yüksek olacaktır.

Ortalama Deformasyon Kuvveti: Sönmölenen enerji miktarının (S_E) aksenal yöndeki toplam yer değiştirme mesafesine (X) oranı olarak tanımlanır.

$$F_{ort} = \frac{S_E}{X} \quad (3)$$

Ezilme Kuvveti Verimi (EKV): Ezilme kuvveti verimi, ortalama ezilme kuvvetinin maksimum ezilme kuvvetine oranı olarak tanımlanır.

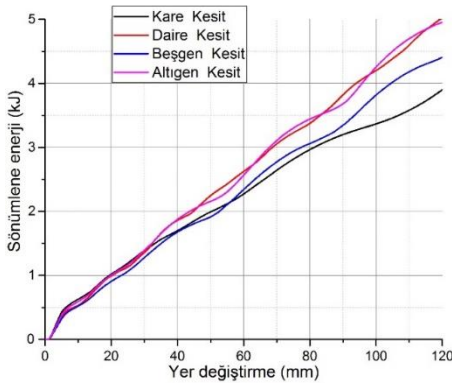
$$EKV = \frac{F_{ort}}{P_{max}} \quad (4)$$

3.1. Çarpışma kutularının sonlu elemanlar analiz sonuçları (The result of analysis of the empty crash boxes)

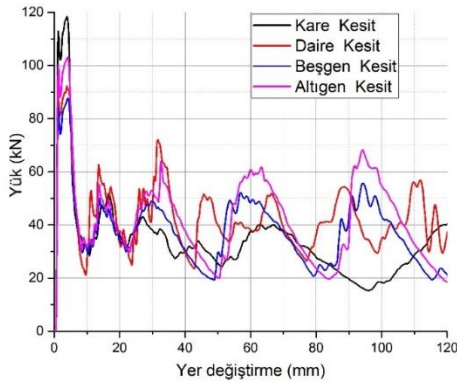
İçi boş çarpışma kutuları 500 kg’lık bir kütle 17,7 m/s’lik bir hızla deforme edilmiş ve Çizelge 2’de verilen sonuçlar elde edilmiştir. Aynı zamanda 120 mm’lik deformasyon mesafesi içerisinde yük-yer değiştirme ve sönmölenen enerji-yer değiştirme grafikleri Şekil 7 ve Şekil 8’de verildiği gibi tespit edilmiştir

Çizelge 2. Analiz sonuçları (Results of the analysis)

İçi Boş Çarpışma Kutuları							
Geometri	Toplam yer değiştirme (mm)	Sönümlenen enerji (kJ)	Maksimum deformasyon kuvveti (kN)	Ortalama deformasyon kuvveti (kN)	Ezilme kuvveti verimi (%)	Özgül enerji sönümleme (kJ/kg)	Et kalınlığı (mm)
Daire	120	4,851	92,21	40,43	0,44	23,80	1,5
Kare	120	3,899	118,40	32,49	0,27	15,04	1,5
Beşgen	120	4,705	87,68	39,21	0,45	24,68	1,5
Altıgen	120	4,955	103,09	41,29	0,40	21,90	1,5



Şekil 7. İçi boş çarpışma kutularının sönümlenen enerji-yer değiştirme grafiği (Absorb energy – displacement curves for empty crash boxes)

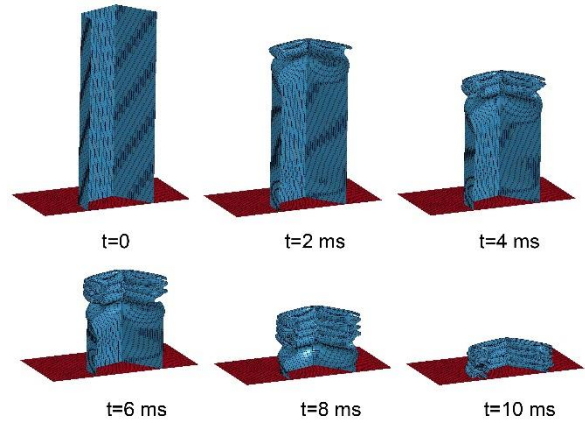


Şekil 8. İçi boş çarpışma kutularının yük-yer değiştirme grafiği (Load-displacement curves for empty crash boxes)

Çizelge 3. Analiz sonuçları (Results of the analysis)

İçi Alüminyum Köpük Dolu Çarpışma Kutuları							
Geometri	Toplam yer değiştirme (mm)	Sönümlenen enerji (kJ)	Maksimum deformasyon kuvveti (kN)	Ortalama deformasyon kuvveti (kN)	Ezilme kuvveti verimi (%)	Özgül enerji sönümleme (kJ/kg)	Et kalınlığı (mm)
Daire	120	16,463	225,44	137,19	0,61	20,64	1,5
Kare	120	19,547	260,22	162,89	0,63	19,08	1,5
Beşgen	120	13,276	161,60	110,63	0,68	20,72	1,5
Altıgen	120	17,862	226,39	148,85	0,66	19,88	1,5

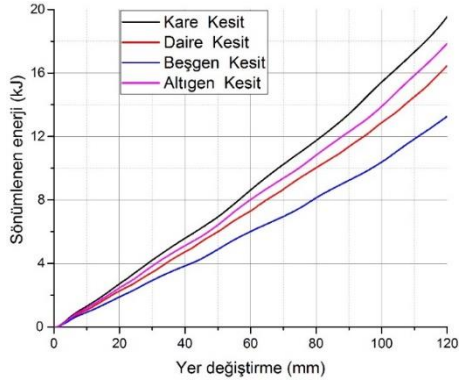
Analiz sonuçlarına göre en iyi çarpışma performansına beşgen kesitli çarpışma kutusunun sahip olduğu belirlenmiştir. Beşgen kesite sahip çarpışma kutusunun 120 mm'lik deformasyon mesafesi içerisinde farklı zaman aralıklarında çekilmiş görüntüleri Şekil 9'da verildiği gibi elde edilmiştir.



Şekil 9. İçi boş çarpışma kutularının deformasyon görüntüsü (Progressive collapse of empty model)

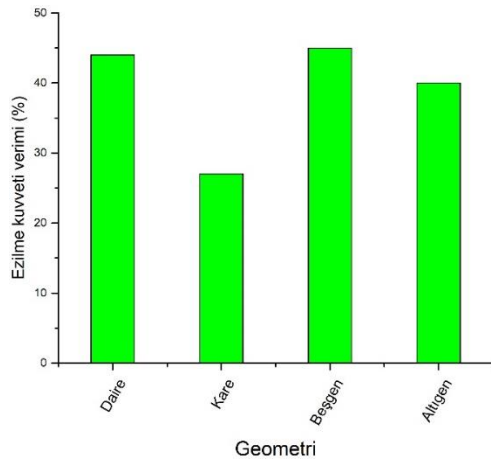
İçi boş çarpışma kutularının sonlu elemanlar analizlerinin bitmesiyle birlikte içi alüminyum köpük dolu çarpışma kutularının analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler neticesinde elde edilen sonuçlar Çizelge 3'de verilmiştir.

İçi köpük dolu çarpışma kutularının arasında en yüksek performansa sahip çarpışma kutusu içi boşlarda olduğu gibi beşgen kesitli çarpışma kutusu çıkmıştır. Sönümlenen enerji bakımından en fazla artışı kare kesitli çarpışma kutusu sağlasa da maksimum deformasyon kuvveti ve çarpışma kutusunun kütleisindeki artışın çok fazla olması özgül enerji sönümlenme kapasitesi ile ezilme kuvveti veriminin azalmasına yol açmıştır. İçi alüminyum köpük malzeme ile dolu çarpışma kutularının sönümlenen enerji-yer değiştirme ve yük-yer değiştirme grafikleri sırasıyla Şekil 10 ve Şekil 11’de verilmiştir.

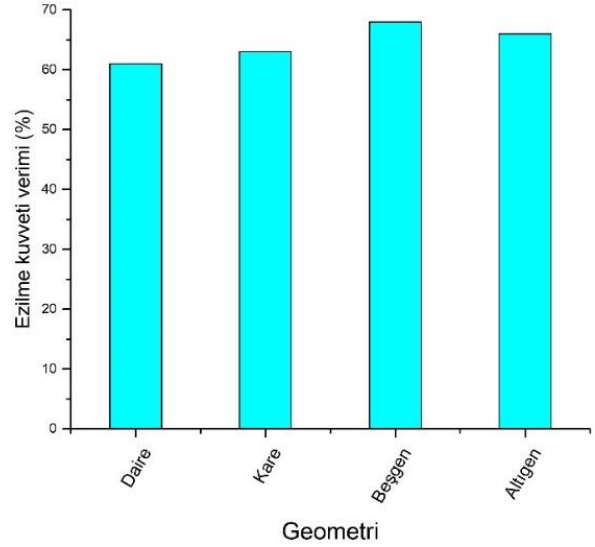


Şekil 10. İçi alüminyum köpük dolu çarpışma kutularının sönümlenen enerji-yer değiştirme grafiği (Absorb energy -displacement curves for aluminum foam filled crash boxes)

Beşgen kesitli çarpışma kutusunun her ne kadar sönümlenen enerji miktarı düşük olsa bile maksimum deformasyon kuvvetinin diğer çarpışma kutularından çok daha az olması ezilme kuvveti verimini arttırmıştır. Şekil 12 ve 13 te içi boş ve içi köpük dolu çarpışma kutularının ezilme kuvveti verimindeki değişim görülmektedir.

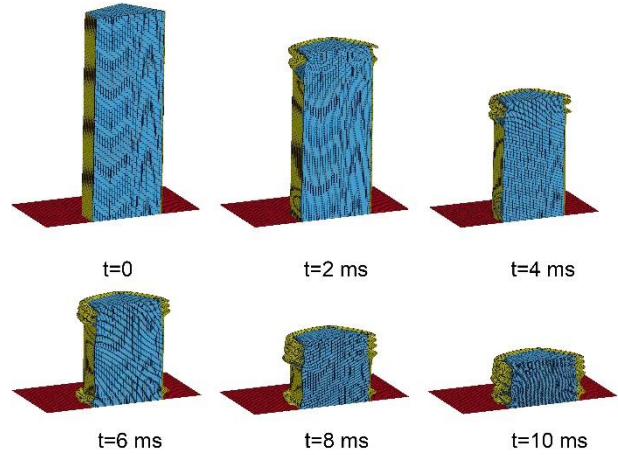


Şekil 12. İçi köpük dolu geometrilerin ezilme kuvveti verimleri (Crush force efficiency for foam filled geometries)



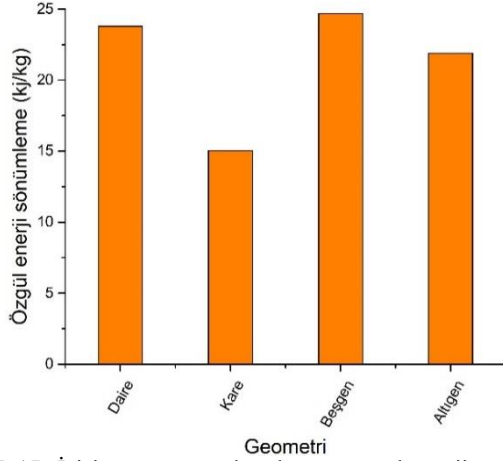
Şekil 13. İçi boş geometrilerin ezilme kuvveti verimleri (Crush force efficiency for empty geometries)

Benzer şekilde çarpışma kutularının içerisine köpük yerleştirme çarpışma kutularının toplam kütleisinde artış meydana getirirse de bu artıştan en az etkilenen çarpışma kutusu beşgen kesitli çarpışma kutusu olmuştur. Beşgen kesitli çarpışma kutusunun farklı deformasyon süreleri içerisindeki davranışı Şekil 14’deki gibi olmuştur.

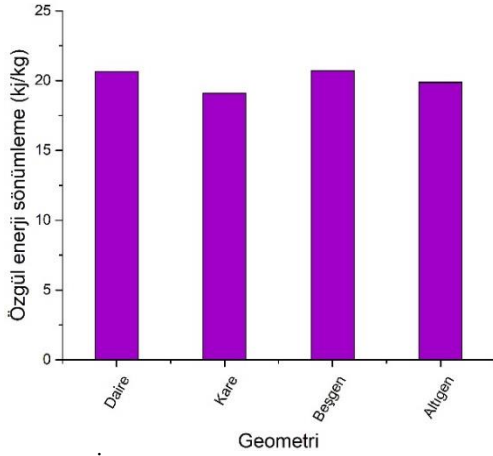


Şekil 14. İçi alüminyum köpük dolu çarpışma kutularının deformasyon görüntüsü (Progressive collapse of aluminum foam filled model)

Özgül enerji sönümlenme kapasitesi çarpışma kutularının deformasyon mesafesi boyunca sönümlendiği enerji ve ağırlıkları ile değişim göstermektedir. Buna bağlı olarak içi boş ve içi köpük dolu çarpışma kutularının özgül enerji sönümlenme kapasitelerindeki değişim sırasıyla Şekil 15 ve Şekil 16’da verilmiştir.



Şekil 15. İçi boş çarpışma kutularının özgül enerji sönümlenme kapasiteleri (Specific energy absorption capacity curves for empty crash boxes)



Şekil 16. İçi alüminyum köpük dolu çarpışma kutularının özgül enerji sönümlenme kapasiteleri (Specific energy absorption capacity curves for foam filled crash boxes)

4. SONUÇLARI (RESULTS)

Yapılan çalışma neticesinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

- Çarpışma kutularının geometrilerindeki değişim enerji sönümlenme kapasiteleri üzerinde önemli derecede farklılık sağlamaktadır.
- İçi boş çarpışma kutuları içerisinde en yüksek ezilme kuvveti verimi ve özgül enerji sönümlenme kapasitesine sahip olanı beşgen kesitli çarpışma kutusu olduğu tespit edilmiştir.
- Çarpışma kutularının içerisine alüminyum köpük malzeme yerleştirmek enerji sönümlenme kapasitesini yaklaşık 4 kat arttırmıştır.
- Çarpışma kutularının içerisine yerleştirilen köpük miktarının artması ezilme kuvveti verimini arttırmıştır. Ancak bu durum maksimum deformasyon kuvvetinin de artmasına neden olmuştur.
- İçi boş beşgen kesitli çarpışma kutusunun 0,45 olan ezilme kuvveti verimi içerisini alüminyum köpük malzeme ile doldurmanın sonucunda 0,68 olmuştur.

- İçi boş beşgen kesitli çarpışma kutusunun 24,68 kJ/kg olan özgül enerji sönümlenme kapasitesi içerisini alüminyum köpük malzeme ile doldurmanın sonucunda toplam kütlede çok fazla artması sonucunda 20,72 kJ/kg'a kadar düşmüştür.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Altın M., "Taşıtlarda kullanılan metalik köpük içeren çarpışma kutularının enerji sönümlenme kapasitelerinin araştırılması" , *Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2017).
- [2] Javad M., Abdollahpoor A. and Mashadi B., "Effects of the triggering of circular aluminum tubes on crashworthiness", *International Journal of Crashworthiness*, 14(6): 591-599, (2009).
- [3] Zarei H. R. and M. Kröger, "Multiobjective crashworthiness optimization of circular aluminum tubes" *Thin-walled structures*, 44(3): 301-308, (2006).
- [4] Guillow S. R., Lu G. and Grzebieta R. H., "Quasi-static axial compression of thin-walled circular aluminium tubes", *International Journal of Mechanical Sciences*, 43(9): 2103-2123, (2001).
- [5] Zou X., Gao G., Dong H., Xie S., Chen G. and Tan T., "Crashworthiness analysis and structural optimisation of multi-cell square tubes under axial and oblique loads", *International Journal of Crashworthiness*, 22(2): 129-147, (2017).
- [6] Xie S., Yang W., Li H. and Wang N., "Impact characteristics and crashworthiness of multi-cell, square, thin-walled, structures under axial loads", *International Journal of Crashworthiness*, 22(5): 1-15, (2017).
- [7] Mamalis A. G., Manolakos D. E., Spentzas K. N., Loannidis M. B., Kautrobakis S. and Kostazos P. K., "The effect of the implementation of circular holes as crush initiators to the crushing characteristics of mild steel square tubes: experimental and numerical simulation", *International Journal of Crashworthiness*, 14(5): 489-501, (2009).
- [8] Yin H., Wen G., Hou S. and Chen K., "Crushing analysis and multiobjective crashworthiness optimization of honeycomb-filled single and bitubular polygonal tubes", *Materials & Design*, 32(8): 4449-4460, (2011).
- [9] Zhang X., Cheng G., You Z. and Zhang H., "Energy absorption of axially compressed thin-walled square tubes with patterns", *Thin-Walled Structures*, 45(9): 737-746, (2007).
- [10] Reddy S., Abbasi M. and Fard M., "Multi-cornered thin-walled sheet metal members for enhanced crashworthiness and occupant protection", *Thin-Walled Structures*, 94: 56-66, (2015).
- [11] Hussain N., Nasir S. P. and Rao Y. V. D., "Comparative Study of Trigger Configuration for Enhancement of Crashworthiness of Automobile Crash Box Subjected to Axial Impact Loading", *Procedia Engineering*, 173: 1390-1398, (2017).

- [12] Hussain N., Nasir S. P. and Rao Y. V. D., “Low velocity Impact Characterization of Glass Fiber Reinforced Plastics for Application of Crash Box”, *Materials Today: Proceedings*, 4(2): 3252-3262, (2017).
- [13] Sun G., Pang T., Xu G., Zheng G. and Song J., “Energy absorption mechanics for variable thickness thin-walled structures”, *Thin-Walled Structures*, 118: 214-228, (2017).
- [14] Xu F., “Enhancing material efficiency of energy absorbers through graded thickness structures”, *Thin-Walled Structures*, 97: 250-265, (2015).
- [15] Fang J., Gao Y., Sun G., Zheng G. and Q. Li, “Dynamic crushing behavior of new extrudable multi-cell tubes with a functionally graded thickness”, *International Journal of Mechanical Sciences*, 103: 63-73, (2015).
- [16] Asanjarani A., Dibajian S. H. and A. Mahdian, “Multi-objective crashworthiness optimization of tapered thin-walled square tubes with indentations”, *Thin-Walled Structures*, 116: 26-36, (2017).
- [17] Li G., Xu F., Sun G. and Li Q., “A comparative study on thin-walled structures with functionally graded thickness (FGT) and tapered tubes withstanding oblique impact loading”, *International Journal of Impact Engineering*, 77: 68-83, (2015).
- [18] Qi C., Yang S. and Dong F., “Crushing analysis and multiobjective crashworthiness optimization of tapered square tubes under oblique impact loading”, *Thin-Walled Structures*, 59: 103-119, (2012).
- [19] Öztürk, İ., Kaya, N., “Otomobil ön tampon çarpışma analizi ve optimizasyonu”, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 13(1), 119-127, (2008).
- [20] Demirci, E., Yıldız, A.R., Semerci, F., “Taşıtlarda önden çarpışma performansını etkileyen enerji yutucularının optimum tasarımı”, *7. Otomotiv Teknolojileri Kongresi*, Bursa, 56 (663), 40-45, (2014).
- [21] Toksoy, A.K., “Optimization of the axial crushing behavior of closed-cell aluminum foam filled welded 1050 al square-cross section crash boxes”, *Yüksek Lisans Tezi*, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Fen Bilimleri, İzmir, 20-138. (2009).
- [22] Zarei, H., Kröger, M. “Optimum honeycomb filled crash absorber design”, *Materials and Design*, 29(1): 193-204, (2006).
- [23] Sezer Ş. D., “Kompakt toz ergitme tekniği ile alüminyum köpük üretimi”, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2009).
- [24] A. A. Sertkaya “Alüminyum köpüğün ısı değiştiricisi olarak tasarımı ve ısı transferi modeli”, *Doktora Tezi*, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2008).
- [25] Ahmad Z. and Thambiratnam D. P., “Crushing response of foam-filled conical tubes under quasi-static axial loading”, *Materials & Design*, 30(7): 2393-2403, (2009).
- [26] Toksoy A. K. and Güden M., “Partial Al foam filling of commercial 1050H14 Al crash boxes: The effect of box column thickness and foam relative density on energy absorption”, *Thin-walled structures*, 48(7): 482-494, (2010).
- [27] Hanssen A. G., Langseth M. and Hopperstad O. S., “Optimum design for energy absorption of square aluminium columns with aluminium foam filler”, *International Journal of Mechanical Sciences*, 43(1): 153-176, (2001).
- [28] Azarakhsh S., Rahi A., Ghamarian A. and Motamedi H., “Axial crushing analysis of empty and foam-filled brass bitubular cylinder tubes”, *Thin-Walled Structures*, 95: 60-72, (2015).
- [29] Haorongban B., Deb A. and Grupta N. K., “Behaviour of polyethylene foam-filled steel hat sections under axial loading: testing and simulation”, *11 th International Symposium on Plasticity and Impact Mechanics*, Delhi, 1349-1356, (2017).
- [30] Jin S. Y. and Altenhof W., “ Comparison of the load/displacement and energy absorption performance of round and square AA6061-T6 extrusions under a cutting deformation mode”, *International Journal of Crashworthiness*, 12: 265-278, (2007).