



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

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

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



Çarpışma kutularının üzerine açılan oyukların çarpışma performansı üzerine etkisinin incelenmesi

Investigation of the effect of corrugated on crash performance in crash boxes

Yazar(lar) (Author(s)): Murat ALTIN

ORCID: 0000-0002-2404-2614

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Altın M. “Çarpışma kutularının üzerine açılan oyukların çarpışma performansı üzerine etkisinin incelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 22(1): 135-139, (2019).

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

DOI: 10.2339/politeknik.403989

Çarpışma Kutularının Üzerine Açılan Oyukların Çarpışma Performansı Üzerine Etkisinin İncelenmesi

Araştırma Makalesi / Research Article

Murat ALTIN*

Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye
(Geliş/Received : 14.11.2017 ; Kabul/Accepted : 23.02.2018)

ÖZ

Pasif güvenlik sistemi elemanlarından birisi olan çarpışma kutuları olası bir kaza durumunda hasarın minimum seviyede oluşmasını sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Yapılan bu çalışmada çarpışma kutusunun üzerine açılan oyukların çarpışma performansı üzerine etkisi sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Çalışmada farklı oyuk genişliklerine sahip çarpışma kutusu tasarımları gerçekleştirilmiştir. Oyukların genişlikleri 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm ve 5 mm olarak belirlenmiş ve çarpışma kutularının üzerine farklı sayıda açılmıştır. Her bir çarpışma kutusunun et kalınlığı 2 mm olarak alınmıştır. Tasarımları gerçekleştirilen çarpışma kutuları Hypermesh programı ile sonlu elemanlarına ayrılmış, Ls-PrePost programı ile malzeme kartları, kontaklar ve sınır şartları gibi özelliklerin belirlenmiş ve Ls-Dyna ile dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda çarpışma kutularının üzerine oyuk açmanın çarpışma performansı üzerinde olumlu etki gösterdiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çarpışma kutusu, sonlu elemanlar analizi, çarpışma performansı.

Investigation of the Effect of Corrugated On Crash Performance In Crash Boxes

ABSTRACT

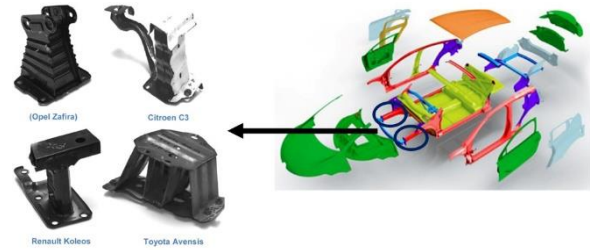
Crash boxes, one of the components of passive safety systems, will ensure that damage is minimized in the event of an accident. In this study, the impact on the crash performance of the corrugated on the crash box was investigated using the finite element method. Crash box designs with different corrugate widths were modeled. The widths of the corrugate were determined as 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm and 5 mm, and were opened at different numbers on the crash boxes. The wall thickness of each crash box is taken as 2 mm. Designed crash boxes are divided into finite elements with Hypermesh program, Ls-PrePost program has been used to determine material cards, properties such as contacts and boundary conditions and dynamic analyses were carried out with Ls-Dyna. As a result of the analyses made, it has been found that corrugate on crash boxes has a positive effect on crashworthiness performance.

Keywords: Crash box, Finite element analysis, crash performance .

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Toplumsal gelişimin sağlanmasında önemli role sahip olan otomobiller 18. yüzyılın sonlarına doğru icat edilmiştir. Otomobillerin icadıyla birlikte başta ekonomi olmak üzere birçok alanda toplumsal gelişime katkı sağlamıştır. Teknolojinin gelişmesi seri üretimin önünü açmış ve böylelikle dünya üzerindeki otomobil sayıları hızlı bir şekilde artmaya başlamıştır. Bu durum olumlu etki sağlasa da meydana gelen trafik kazalarının da artmasına sebep olmuştur. Kazaların artması otomobil üreten firmaların gerek pasif gerekse aktif güvenlik sistemleri üzerine yaptıkları çalışmalara daha fazla önem vermelerine neden olmuştur. Otomobiller gündelik hayatta çeşitli kazalara karışmaktadır. En çok karşılaşılan kaza türlerinden biriside önden çarpmalı kazalardır. Önden çarpmalı kazalarda olası hasarları en aza indirmek amacıyla çarpışma kutuları kullanılmaktadır. Ön tampon

üzerinde yer alan çarpışma kutuları kaza anında deforme olarak ortaya çıkan kinetik enerjiyi sönmüleyebilme yeteneğine sahip bağlantı elemanlarıdır (Şekil 1).



Şekil 1. Çarpışma kutusu örnekleri (Sample of crash boxes) [1]

Kaza anında çarpışma kutularının maruz kaldığı darbe kuvvetlerinin yeterince sönmülememesi bu kuvvetlerin doğrudan 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

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

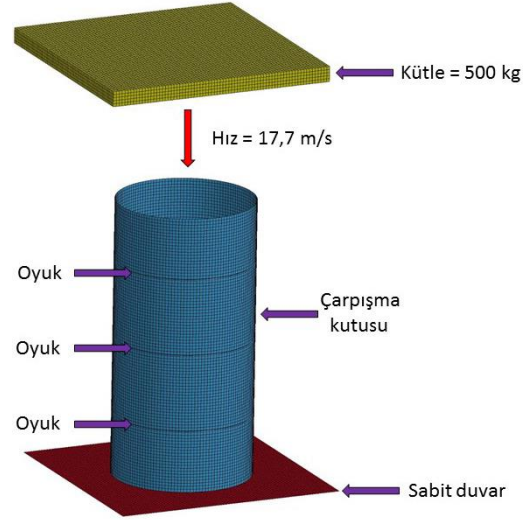
hasara yol açacaktır. Çarpışma kutularının enerji sönümlenme kapasitelerinin artırılmasına yönelik geçmişten günümüze çok çeşitli çalışmalar yapılmıştır [2-9]. Bu çalışmalardan bazıları çarpışma kutularının geometrik özellikleri üzerinedir. Çalışmalarda kullanılan çarpışma kutuları genellikle dairesel, kare ve dikdörtgen kesitle sahiptir. Aktay ve arkadaşları [10], dairesel kesitli çarpışma kutularının içerisinde bal petek yapı ile doldurmuş ve uygulanan yükler altındaki enerji sönümlenme kapasitelerini araştırmışlardır. Isaac ve arkadaşları [11], dairesel kesite sahip çarpışma kutularının aksel ve farklı açıdaki deformasyon yükleri karşısındaki enerji sönümlenme kapasiteleri üzerindeki etkiyi incelemiştir. Langseth ve Hopperstad [12] yaptıkları bir çalışmada kare kesite sahip farklı temperleme sıcaklıklarında ekstrüze edilmiş, farklı et kalınlıklarına sahip çarpışma kutularını statik ve dinamik yükler altındaki performanslarını incelemiştir. Nagel ve Thanbiratman [13], dikdörtgen kesitli çarpışma kutularının et kalınlıklarını ve koniklik açılarını değiştirerek farklı hızlardaki dinamik yükler altındaki enerji sönümlenme kapasitesindeki değişimleri incelemiştir. Yapılan bazı çalışmalarda [14-17] ise farklı geometrilerdeki çarpışma kutularının enerji sönümlenme kapasiteleri farklı parametreler kullanılarak (et kalınlığı, koniklik açısı vs.) araştırılmıştır. Çarpışma kutularının performanslarını arttırmak için çeşitli değişiklikler yapılmaktadır. Bunlardan bir tanesi de çarpışma kutularının üzerine oyuk açmaktır. Çarpışma kutularında katlanmanın başlayabilmesi için gerekli olan ilk deformasyon kuvvetinin açılan oyuklar sayesinde azaltıldığı ve buna bağlı olarak ezilme kuvveti veriminin arttırıldığı bilinmektedir [18-20].

Yapılan bu çalışma kapsamında çarpışma kutularının üzerine bir, iki ve üç adet oyuk açılmıştır. Açılan her bir oyukun genişliği 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm ve 5 mm olarak belirlenmiş ve tüm durumlar için ayrı ayrı analizler gerçekleştirilerek çarpışma performansları incelenmiştir. Sonuç olarak en yüksek ezilme kuvveti verimi ve özgül enerji sönümlenme kapasitesine sahip çarpışma kutusu belirlenmiştir. Literatür çalışmaları ile karşılaştırıldığında çarpışma kutularının üzerine oyuk

açmanın ezilme kuvveti verimi arttırdığı tespiti doğrulanmış yenilik olarak oyuk genişliğinin ve sayısının ezilme kuvveti verimi ile özgül enerji sönümlenme kapasitesi üzerine etkisi incelenmiştir.

2. SONLU ELEMANLAR MODELİ (FINITE ELENET MODEL)

Tasarımı gerçekleştirilen çarpışma kutularının sonlu elemanlar modelleri Hypermesh programı ile oluşturulmuştur. Sonlu elemanlar modeli oluşturulan örnek bir çarpışma kutusu Şekil 2’de verilmektedir.



Şekil 2. Çarpışma kutusunun sonlu elemanlar modeli (Finite element model of the crash box)

Üzerine oyuklar açılmış çarpışma kutularına 500 kg’lık bir kütle 17,7 m/s’lik hız ile çarpıtılmıştır. Üzerine birden fazla oyuk açılan çarpışma kutularında oyuklar arası mesafe eşit uzaklıkta alınmıştır. Tek oyuklu çarpışma kutularında ise oyuk orta kısımda olacak şekilde açılmıştır. Çarpışma kutularının çapı 90 mm, yüksekliği 180 mm ve et kalınlıkları 2 mm ve malzemesi standart çelik olarak alınmıştır. Standart çeliğe ait mekanik özellikler Çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1. Standart çelik malzemeye ait mekanik özellikleri (Mechanical properties of standard steel)

| Malzeme Türü | Yoğunluk (ρ) | Elastik Modülü (E) | Poisson Oranı (ν) | Akma Gerilmesi (σ_y) |
|----------------|------------------------|--------------------|-------------------------|-------------------------------|
| Standart Çelik | 7,85 g/cm ³ | 210 GPa | 0,3 | 0,31 GPa |

Çarpışma kutularının sonlu elemanlar modeli için elasto-plastik malzeme yapısından oluşan ve Ls-Dyna programının içerisinde yer alan “MAT 24 (Piecewise Linear Isotropic Plasticity) malzeme kartı seçilmiştir.

Standart çeliğin plastik bölgede yer alan davranışlarını temsil eden gerçek gerilme-gerinme eğrisine ait veriler

Çizelge 2. Standart çelik malzemeye ait gerçek gerilme- gerçek gerinim değerleri (True effective stress-true effective plastic strain values for standard steel)

| | | | | | | | |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| σ (GPa) | 0,310 | 0,358 | 0,373 | 0,398 | 0,413 | 0,430 | 0,459 |
| ϵ | 0 | 0,002 | 0,004 | 0,016 | 0,024 | 0,034 | 0,061 |

Çizelge 2’de verildiği gibidir. Mesh işlemi yapılırken 4 nodlu Belytschko-Tsay ince kabuk (shell) elemanlar kullanılmış, bu kabuk elemanların kesitine 4 integrasyon noktası uygulanmıştır. Çarpışma kutularının kendi üzerlerinde katlanmalarını kontrol etmek amacıyla Automatic Single Surface Contact kontak algoritmaları kullanılmıştır.

3. SONUÇ (CONCLUSION)

Çalışma kapsamında farklı oyuk boyut ve sayılarına sahip çarpışma kutularının 130 mm'lik deformasyon mesafesinde toplam sönmölenen enerji, maksimum (pik) deformasyon kuvveti, ortalama ezilme kuvveti, ezilme kuvveti verimi (EKV) ile özgül enerji sönmöleme (ÖES) kapasiteleri belirlenmiştir. Bu belirleme işlemleri yapılırken bazı formüllerden yararlanılmıştır.

Toplam sönmölenen enerji: Çarpışma kutularının çarpışma sonunda sönmölediği toplam enerji (TSE), çarpma kuvvetinin yaptığı iş olarak tanımlanabilir [21].

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

Burada P ezilme kuvvetini, δ ve δP yapılan işin hesaplanacağı ezilme aralığını ifade etmektedir. Çarpma enerjisi yük-yer değiştirme grafiğinin altında kalan alanın integrali olarak ifade edilmektedir.

Özgöl enerji sönmöleme (ÖES): Özgöl enerji sönmöleme kapasitesi toplam sönmölenen enerjini çarpışma kutusunun deformasyona uğramadan önceki kütle sine oranı olarak tanımlanmaktadır.

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

Ortalama ezilme kuvveti (F_{ort}): Toplam enerji sönmöleme miktarının eksenel yöndeki toplam deformasyon mesafesine oranı olarak tanımlanır.

$$F_{ort} = \frac{T_{SE}}{S} \quad (3)$$

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

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

Maksimum deformasyon kuvveti: Çarpışma kutuları üzerine eksenel yönde gelen ilk kuvvetler çarpışma kutularının kalıcı deformasyona uğramalarını sağlayan kuvvetlerdir ve bu kuvvetlerin en büyüğüne maksimum deformasyon kuvveti denilir. Bu kuvvet ilk deformasyon anında oluşabileceği gibi nadir de olsa deformasyon esnasında da ortaya çıkabilir. Maksimum deformasyon kuvvetin yüksek çıkması istenen bir durum değildir. Bu değerin yüksek çıkması çarpışma kutusunun görevini yerine getirememesi, darbe kuvvetinin direk olarak aracın şasisine ilemesi anlamına gelecektir. Dolayısıyla tasarım çalışmaları bu değeri minimum düzeyde tutabilecek şekilde yapılmalıdır.

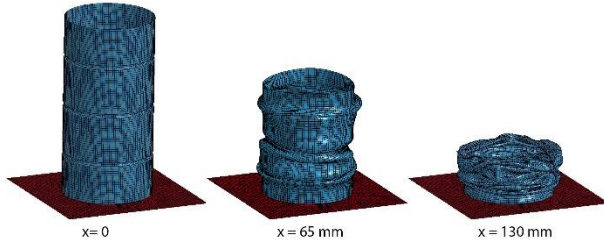
Tasarlanan her bir çarpışma kutusu farklı isimler ile adlandırılmıştır. Bu adlandırmalarda "OG..." oyuk genişliğini, "...S." ise oyuk sayısını belirtmektedir. Örneğin "OG5S3" üzerine 5 mm genişliğinde 3 adet oyuk açılan çarpışma kutusunun ifade etmektedir. Yapılan analizlerle elde edilen sonuçlar yukarıda verilen formüller ile hesaplanmış ve Çizelge 3'de ki gibi elde edilmiştir.

Çizelge 3. Analiz sonuçları (Results of the analysis)

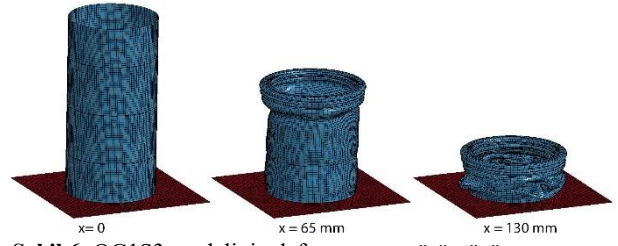
| Çarpışma Kutusu | Oyuk Genişliği (mm) | Oyuk Sayısı | Deformasyon Mesafesi (mm) | Toplam Sönmölenen Enerji (kJ) | Maksimum Deformasyon Kuvveti (kN) | Ortalama Ezilme Kuvveti (kN) | Ezilme Kuvveti Verimi (%) | Özgöl Enerji Sönmöleme (kJ/kg) | Çarpışma Kutusunun Ağırlığı (kg) |
|-----------------|---------------------|-------------|---------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|---------------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| OG0S0 | 0 | 0 | 130 | 26.201 | 426.76 | 201.55 | 0.47 | 32.75 | 0.798 |
| OG1S1 | 1 | 1 | 130 | 25.607 | 416.45 | 196.98 | 0.47 | 31.98 | 0.800 |
| OG1S2 | 1 | 2 | 130 | 26.171 | 414.81 | 201.32 | 0.49 | 32.61 | 0.802 |
| OG1S3 | 1 | 3 | 130 | 26.819 | 412.74 | 206.30 | 0.50 | 33.34 | 0.804 |
| OG2S1 | 2 | 1 | 130 | 21.335 | 405.44 | 164.12 | 0.40 | 26.35 | 0.802 |
| OG2S2 | 2 | 2 | 130 | 21.446 | 392.16 | 164.97 | 0.42 | 26.48 | 0.806 |
| OG2S3 | 2 | 3 | 130 | 21.742 | 384.00 | 167.25 | 0.44 | 26.86 | 0.809 |
| OG3S1 | 3 | 1 | 130 | 22.629 | 381.24 | 174.07 | 0.46 | 28.14 | 0.804 |
| OG3S2 | 3 | 2 | 130 | 23.071 | 356.13 | 177.47 | 0.50 | 28.51 | 0.809 |
| OG3S3 | 3 | 3 | 130 | 23.564 | 353.87 | 181.26 | 0.51 | 28.93 | 0.814 |
| OG4S1 | 4 | 1 | 130 | 21.760 | 369.36 | 167.38 | 0.45 | 26.94 | 0.807 |
| OG4S2 | 4 | 2 | 130 | 22.083 | 354.59 | 169.87 | 0.48 | 27.05 | 0.816 |
| OG4S3 | 4 | 3 | 130 | 23.844 | 339.60 | 183.42 | 0.54 | 28.90 | 0.825 |
| OG5S1 | 5 | 1 | 130 | 22.040 | 365.07 | 169.54 | 0.46 | 27.22 | 0.809 |
| OG5S2 | 5 | 2 | 130 | 22.916 | 340.75 | 176.28 | 0.52 | 27.94 | 0.820 |
| OG5S3 | 5 | 3 | 130 | 23.913 | 324.80 | 183.95 | 0.57 | 28.78 | 0.830 |

Çizelge 3'ü genel olarak değerlendirilecek olunursa 1-5 mm arasındaki tüm oyuk genişliğine sahip çarpışma kutularının oyuk sayılarını arttırmanın toplam enerji sönmöleme kapasitesini arttırdığı görölmektedir. Enerji sönmöleme kapasitesindeki artış özgül enerji sönmöleme miktarını da arttırmıştır. Oyuk sayısının artması aynı zamanda maksimum deformasyon kuvvetinin de kayda değer şekilde azalmasını sağlamıştır. Maksimum deformasyon kuvvetinin azalması çarpışma kutularının

kütlelerindeki bir miktar artışa rağmen ezilme kuvveti verimini de arttırmıştır. Tasarımı gerçekleştirilen çarpışma kutuları içerisinde en yüksek ezilme kuvveti verimine sahip olan çarpışma kutusunun OG5S3 olan çarpışma kutusudur. OG5S3 çarpışma kutusunun 130 mm'lik deformasyon mesafesinde farklı zaman aralıklarındaki katlanma görüntüleri Şekil 3'de verilmiştir.

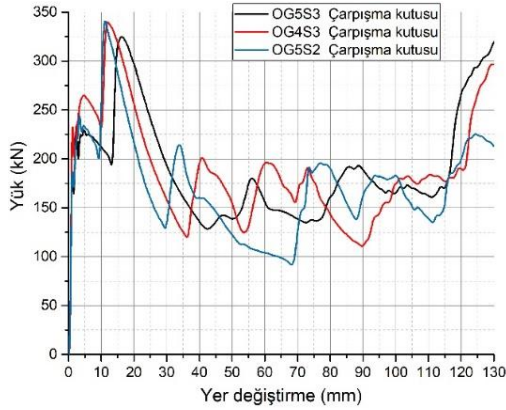


Şekil 3. OG5S3 modelinin deformasyon görüntüsü
(Progressive collapse of model OG5S3)

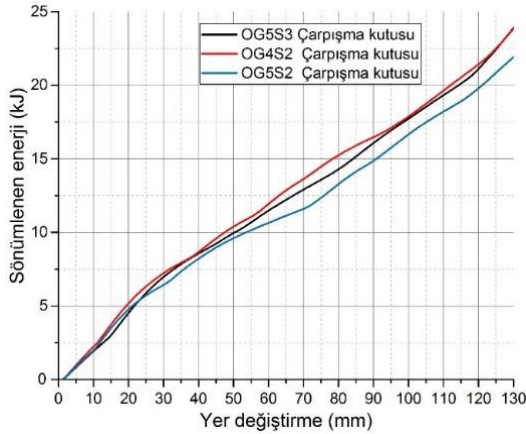


Şekil 6. OG1S3 modelinin deformasyon görüntüsü
(Progressive collapse of model OG1S3)

Bu çarpışma kutusunu OG4S3 ve OG5S2 çarpışma kutularının takip ettiği görülmektedir. Bu üç çarpışma kutusunun 130 mm'lik deformasyon mesafesi içerisindeki sırasıyla yük-yer değiştirme ve enerji-yer değiştirme grafikleri Şekil 4 ve Şekil 5'De verilmiştir.



Şekil 4. Çarpışma kutularının yük-yer değiştirme grafiği
(Load-displacement curves for crash boxes)



Şekil 5. Çarpışma kutularının sönmülenen enerji -yer değiştirme grafiği (Absorb energy –displacement curves for crash boxes)

Özgül enerji sönmüleme kapasiteleri bakımından incelendiğinde en iyi sonuca oyuk genişliği 1 mm olan OG1S3 çarpışma kutusunun sahip olduğu görülmektedir. OG1S3 çarpışma kutusunun 130 mm'lik deformasyon mesafesinde farklı zaman aralıklarındaki katlanma görüntüleri Şekil 6'da verilmiştir.

Oyuk genişliğinin az olması çarpışma kutusunun deformasyonu esnasında sönmülemiş olduğu toplam enerji miktarının fazla olmasına yol açmıştır. Buna karşılık bu durum maksimum deformasyon kuvvetinin fazla çıkmasına yol açmıştır.

Yapılan çalışma neticesinde aşağıda belirtilen sonuçlar elde edilmiştir;

- Çarpışma kutularının üzerindeki oyuk sayısı ve oyuk genişliğini arttırmak maksimum deformasyon kuvvetinin azalmasını sağlamıştır. Örneğin OG5S3 çarpışma kutusunun maksimum deformasyon kuvveti 324,80 kN iken OG1S1 çarpışma kutusunun 416,45 kN'a çıkmıştır.
- Çarpışma kutularının üzerindeki oyuk sayısını arttırmak ezilme kuvveti verimi ve özgül enerji sönmüleme kapasitesini her durumda arttırmıştır.
- En yüksek ezilme kuvveti verimine sahip çarpışma kutusu (OG5S3) en düşük olan çarpışma kutusundan (OG2S1) % 42,5 daha fazla çıkmıştır.
- En yüksek özgül enerji sönmüleme kapasitesine sahip çarpışma kutusu (OG1S3) en düşük olan çarpışma kutusundan (OG2S1) % 26,5 daha fazla çıkmıştır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Pit S., Werner S., Zerbe J. and Gohlich D., "Robust Optimization of Vehicle Crashboxes", *SAE Technical Paper*, No. 2014-01-0397, (2014).
- [2] Sharifi S., Shakeri M., Fakhari H. E. and Bodaghi M., "Experimental investigation of bitubal circular energy absorbers under quasi-static axial load", *Thin-Walled Structures*, 89: 42-53, (2015).
- [3] Othman A., Abdullah S., Ariffin A. K. and Mohamed N.A.N., "Investigating the crushing behavior of quasi-static oblique loading on polymeric foam filled pultruded composite square tubes", *Composites Part B: Engineering* 95: 493-514, (2016).
- [4] Mohammadiha O. and Ghariblu H., "Crush response of variable thickness distribution inversion tubes under oblique loading", *Thin-Walled Structures*, 109: 159-173, (2016).
- [5] Rezvani M. and M. Nouri., "Axial Crumpling of Aluminum Frusta Tubes with Induced Axisymmetric Folding Patterns" *Arabian Journal for Science & Engineering*, 39(3): 2179-2190, (2014).
- [6] Sun G., Xu F., Li G. and Li Q., "Crashing analysis and multiobjective optimization for thin-walled structures with functionally graded thickness", *International Journal of Impact Engineering*, 64: 62-74, (2014).

- [7] Zhu G., Li S., Sun G., Li G. and Li Q., "On design of graded honeycomb filler and tubal wall thickness for multiple load cases", *Thin-Walled Structures*, 109: 377-389, (2016).
- [8] Xiong Z. and Zhang H., "Relative merits of conical tubes with graded thickness subjected to oblique impact loads", *International Journal of Mechanical Sciences*, 98: 111-125, (2015).
- [9] Zhang X. and Zhang H., "Experimental and numerical investigation on crush resistance of polygonal columns and angle elements", *Thin-Walled Structures*, 57: 25-36, (2012).
- [10] Aktay L., Çakıroğlu C. and Güden M., "Quasi-static axial crushing behavior of honeycomb-filled thin-walled aluminum tubes", *The Open Materials Science Journal*, 5: 184-193 (2011).
- [11] Isaac W. and Oluwole O., "Energy absorption improvement of circular tubes with externally press-fitted ring around tube surface subjected under axial and oblique impact loading", *Thin-Walled Structures*, 109: 352-366, (2016).
- [12] Langseth M. and Hopperstad O.S., "Static and dynamic axial crushing of square thin-walled aluminium extrusions", *International Journal of Impact Engineering*, 18: 7-8, (1996).
- [13] Nagel G. M. and D. P. Thambiratnam. "Computer simulation and energy absorption of tapered thin-walled rectangular tubes", *Thin-walled structures*, 43(8): 1225-1242, (2005).
- [14] Abbasi M., Reddy S., Nazari G.A. and Fard M., "Multiobjective crashworthiness optimization of multi-cornered thin-walled sheet metal members" *Thin-walled structures*, 89: 31-41, (2015).
- [15] Jusuf A., Dirgantara T., Gunawan L. and Putra I.S., "Crashworthiness analysis of multi-cell prismatic structures", *International Journal of Impact Engineering*, 78: 34-50, (2015).
- [16] Tarlochan F., Samer F., Hamouda A.M.S., Ramehs S. and Khalid K., "Design of thin wall structures for energy absorption applications: Enhancement of crashworthiness due to axial and oblique impact forces", *Thin-Walled Structures*, 71: 7-17, (2013).
- [17] Xiong Z. and Zhang H., "Energy absorption of multi-cell stub columns under axial compression" *Thin-Walled Structures*, 68: 156-163, (2013).
- [18] Deepak A., Rawat S. and A. K. Upadhyay., "Crashworthiness of Circular Tubes with Structurally Graded Corrugations", *SAE Technical Paper*, No. 2016-28-0050, (2016) .
- [19] Asanjarani A., Dibajian S. H. and Mahdian A., "Multi-objective crashworthiness optimization of tapered thin-walled square tubes with indentations" *Thin-Walled Structures*, 116: 26-36, (2017).
- [20] Rawat, Sharad, et al. "Collapse Behavior and Energy Absorption in Elliptical Tubes with Functionally Graded Corrugations." *Procedia Engineering* 173 (2017): 1374-1381.
- [21] Alkoles O.M.S., Mahdi E. and Hamouda A.M.S., "Sahari, B.B., "Ellipticity Ratio Effects in the Energy Absorption of Axially Crushed Composite Tubes", *Applied Composite Materials*, 10: 339-363, (2003).