

Otomobil çarpışma kutularında performans artırıcı yaklaşımların incelenmesi

Fatih ATEŞ¹, Altuğ BAKIRCI^{1,2*}, Ahmet Can GÜNAYDIN¹, Cihat ENSARİOĞLU², Mustafa Cemal ÇAKIR²

¹Ermetal Otomotiv ve Eşya Sanayi Tic. A.Ş., Bursa DOSAB, Bursa, Türkiye

²Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bursa, Türkiye

Geliş Tarihi (Received Date): 27.11.2021

Kabul Tarihi (Accepted Date): 07.02.2022

Öz

Kaza anında araçların hızları ve kütleleri sebebiyle yüksek miktarda enerji açığa çıkmakta ve bu enerjinin uygun şekilde sönmülmesi gerekmektedir. Düzgün sönmülmemeyen enerji iç parçalara, sürücüye ve yolculara zarar verecek kuvvetlerin oluşmasına sebep olarak hayati sorunlara yol açar. Araçlarda bu sönmülmeyi yapabilmek için devletlerin, kurumların ve sigorta şirketlerinin öne sürdüğü kriterleri karşılayabilecek özel tasarlanmış çarpışma kutusu adındaki parçalara ihtiyaç duyulmaktadır. Sürdürülebilirlik, çevre, yakıt tasarrufu gibi kavramlarla beraber araçlarda hafifliğin ön plana çıkması ve artan rekabet, kaza dışında âtil duran çarpışma kutuları üzerinde önemli çalışmalara yol açmıştır. Bu nedenlerle, çarpışma kutularının kinetik enerjiyi emme performansı, üretilebilirliği, maliyeti, hafifliği göz önünde bulundurularak uygun seçimler yapılmalıdır. Bu çalışma, çarpışma kutusunun performansını artırıcı temel faktörleri ele alan kapsamlı bir literatür araştırmasını içermektedir. Çalışmada, çarpışma kutularının enerji sönmülme yeteneği; geometri, malzeme ve dolgu gibi üç temel başlık altında ele alınmıştır. Bu kapsamda, literatürdeki çalışmalar incelenerek çarpışma kutuları ile gerçekleştirilen enerji emilimi konusundaki önemli noktalar derlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Çarpışma kutusu, geometri, köpük dolgu, balpeteği, çökme, origami.

Fatih ATEŞ, fatih.ates@ermetal.com, <http://orcid.org/0000-0002-8624-713X>

*Altuğ BAKIRCI, altugbakirci@uludag.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0003-0438-6337>

Ahmet Can GÜNAYDIN, ahmet.gunaydin@ermetal.com, <http://orcid.org/0000-0001-8489-4088>

Cihat ENSARİOĞLU, cihatensari@uludag.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0003-2843-9536>

M. Cemal ÇAKIR, cemal@uludag.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0003-0816-4029>

A review of performance improvement approaches on crash boxes

Abstract

In the event of an accident, due to the velocity and mass of the vehicles, a high amount of energy is released and this energy must be properly absorbed. The energy that cannot be properly absorbed causes the formation of forces that will damage the interior parts, the driver and the passengers, causing life-threatening problems. In order to absorb some of this energy, specially designed parts called crash boxes are needed to meet the criteria suggested by states, institutions and insurance companies. Along with the concepts such as sustainability, environment and fuel-saving, lightness in vehicles and increasing competition have led to important studies on crash boxes, which is a passive safety component. For these reasons, appropriate choices should be made considering the kinetic energy absorption performance, manufacturability, cost and weight of the crash boxes. This study includes a comprehensive literature review that addresses the key factors that increase the performance of crash boxes. In the study, the energy absorption ability of crash boxes is discussed under three main titles, namely, geometry, material and filler material. In this context, the studies in the literature were reviewed and the important points on energy absorption using crash boxes were compiled.

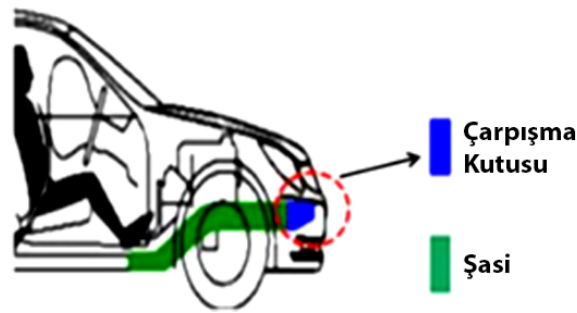
Keywords: Crash box, geometry, foam filled, honeycomb, collapse, origami.

1. Giriş

Otomobillerde kullanılan çarpışma kutuları, genellikle aracın ön ve arka bölgelerinde konumlandırılmış metal ya da kompozit malzemelerden oluşan, ince duvarlı pasif güvenlik elemanlarıdır (Şekil 1). Bu yapıların kullanılmasının amacı, kaza anında oluşacak enerjiyi sönmüleyerek yolcuların güvenliğini ve çarpışma kutusunun arkasında kalan bileşenlerin olabildiğince az hasar almasını sağlamaktır. Çarpışma kutuları bazı yapısal kusurlar bulunacak şekilde tasarlanır ve bu yapısal kusurlar, çarpışma kutusunun darbe esnasında enerjiyi, istenen doğrultularda ve istenen kuvvetlerde şekil değiştirerek sönmülenmesine olanak sağlar [1–7].

Son zamanlarda iklim değişikliklerinin ortaya çıkması, fosil kaynaklı yakıtların tükenmeye başlaması ve artan rekabetle birlikte, yakıt tasarrufu ve sürdürülebilirlik gibi konular gündeme gelmiştir. Yakıt tasarrufunda en önemli etken, ağırlık olarak karşımıza çıkmaktadır. Kütlesi düşük aracı hareketlendirmek için gerekli güç düşük olacak, böylece daha az yakıtı ihtiyaç duyulacaktır. Gerekli gücün düşük olması; elektrikli araçlarda pillerden kaynaklı karbon ayak izini azaltacak, fosil yakıtlı araçlarda ise ortama yayılan emisyonu direkt olarak düşürecektir. Araç parçalarının hafifletilme çabası; tek seferlik kullanıma sahip, çarpışma dışında atıl duran, araç ömrü boyunca ileri sürücü destek sistemlerinin ve otonom kullanımın gelişmesiyle belki hiç kullanılmayacak ve bir tedbirden öteye geçmeyecek çarpışma kutularının gelişmesinde ciddi sayıda araştırmaya yol açmıştır [5, 8–13].

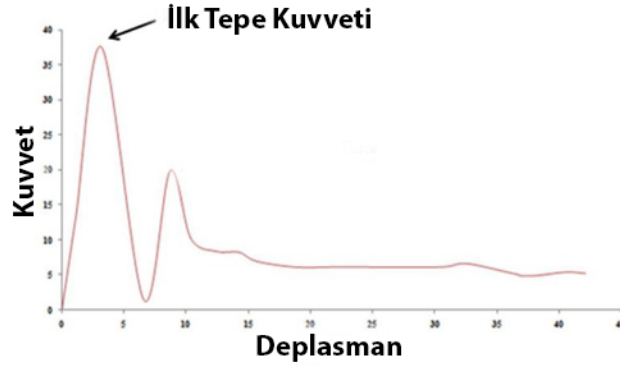
Çarpışma kutularından beklenen özellikler arasında geri dönüştürülebilirlik, maksimum sönümlenme performansı, minimum ağırlık, minimum üretim süresi ve üretim maliyeti sayılabilir. Hafiflik, araştırmalarda ve tasarımlarda başlıca motivasyon kaynağı olarak ortaya çıksa da diğer parametreler göz ardı edilmemelidir. Örneğin, düşük ağırlık ve yüksek enerji sönümlenme kabiliyetleri sebebiyle yüksek performans gösteren fiber takviyeli polimer kompozitlerin; üretim süreleri ve zorlukları, üretimleri sırasında kullanılan kimyasallar, kompozitin tamamının geri dönüştürülememesi, geri dönüşüm sırasında piroliz gibi proseslerle yüksek enerji sarfiyatına sebep olmaları ve (bazı fiberler için) parçalandıklarında veya olası bir yangın durumunda ortaya çıkan toksik fiber tozlarının ve gazların insan sağlığı ve çevreye zararlı olması, tercih edilmelerini zorlaştırmaktadır [7, 14–18]. Doğal fiberlerin kullanımı üzerine çalışmalar yürütülse de doğal fiberler de atmosfere, toprağa, sulara, çevre yaşama, ve insanlara çeşitli zararlar verebilmektedir [19, 20].



Şekil 1. Aracın ön yapısının temsili görüntüsü ve çarpışma kutusu [1].

Çarpışma kutuları üzerinde darbe testleri yapıldığında Şekil 2'deki gibi, şekil değişimine bağlı kuvvet grafikleri elde edilmektedir. Bu Kuvvet - Deplasman (K-D) grafiklerinde, kuvvet eğrisinin altında kalan alan, çarpışma kutusunun çökme anında şekil değiştirirken sönümlendiği enerji miktarını göstermektedir. Sönümlenen enerji miktarı; çarpışma kutusunun malzemesinin mukavemetine, duvarların kalınlığına, kutunun temel şekline ve dolgu malzemesi kullanılıp kullanılmadığı gibi bazı tasarım parametrelerine bağlı olarak değişmektedir. Her ne kadar enerji sönümlenme miktarı, kullanılan malzemenin mukavemetine bağlı olsa da enerji sönümlenmek için şekil değiştirme gereklidir. Yani çok mukavemetli ve darbe altında rijit kalabilen bir yapı kullanarak darbeyi karşılamak istenen bir durum değildir. Böyle bir durumda; yavaşlama ivmesi çok yüksek değerlerde kalacak, yüksek kuvvetler yolcuya tesir edecek ve içerideki hassas parçaların yüke dayanamayarak deforme olmasına sebep olacaktır. Yapılan deneylerde temel olarak, Özgül Enerji Emilimi (ÖEE) ve Ezilme Kuvveti Verimi (EKV) olarak iki kriter dikkate alınır. EKV, ortalama kuvvetin İlk Tepe Kuvvetine (İTK) bölünmesiyle bulunur. Bu değer, çarpışma kutusunun arkaya doğru ve yolcuya ne seviyelerde ve ne kadar dengeli kuvvet ilettiğinin bir göstergesidir. ÖEE ise bir çarpışma kutusunun sönümlendiği enerji miktarının kütlelerine oranıdır ve araçlarda hafifliğin önemini de dikkate alır [3, 21–23].

Çarpışma kutularının performansları sigorta şirketleri ve Research Council for Automobile Repairs (RCAR), FIA (Federation International of Automobile), US ve Euro NCAP (New Car Assessment Programme), NHTSA (The National Highway Traffic Safety Administration) gibi kuruluşların ortaya koydukları verilere ve isterlere göre ve aynı zamanda ABD'de CMVSS 215, Avrupa'da ise ECE-R42 gibi devlet regülasyonlarına göre zamanla değişim göstermektedir [24–27].



Şekil 2. Darbe esnasında oluşan kuvvet-deplasman grafiği [1].

Çarpışma kutuları; silindirik [28–32], kare [29, 32–34] ve çokgen [35–38], hiyerarşik geometriler halinde [39–46], çok hücreli yapılar halinde [34, 47–50] ve köpük doldurulmuş halde [11, 28, 29, 51, 52] tasarlanarak enerji sönmleme miktarını arttırmak amacıyla birçok çalışmaya konu olmuşlardır. Yapılan çalışmalardan da görüleceği üzere, geometrinin enerji sönmlemesi üzerinde çok büyük etkisi vardır.

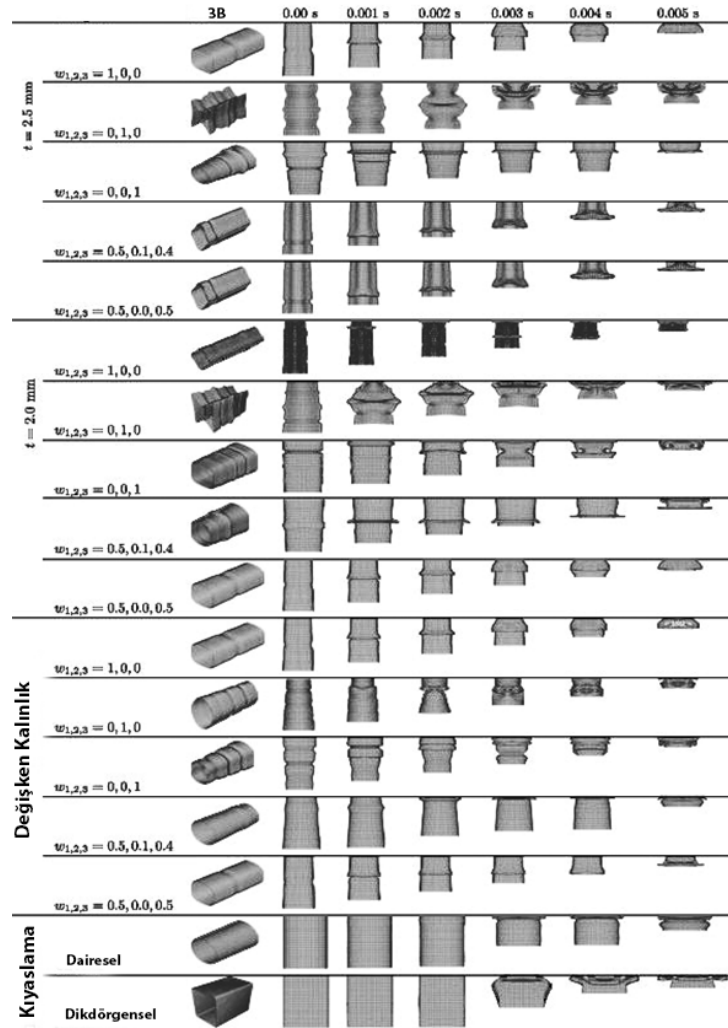
Temel amacı, kaza anında oluşacak enerjiyi sönmlemek olan çarpışma kutuları, çoğunlukla çelik ve alüminyum gibi metallerden imal edilerek kullanılmıştır. Ancak otomobil endüstrisinin gelişimiyle birlikte ağırlığın azaltılması ve yakıt veriminin artırılması yönündeki istemler, araçlarda daha hafif malzemelerin kullanılabilirliği üzerindeki çalışmaları hızlandırmıştır [1, 5, 8–13]. Metal darbe sönmleyiciler, genelde enerjiyi tekrarlı katlanarak ve bükülerek kolonun çökmesi ile bölgesel olarak sönmlemler. Burada dikkat edilmesi gereken kısım, darbe anında bölgesel şekil değiştirmeler olurken yapının geri kalanının rijitliğini korumasıdır. Bu nedenle, enerji sönmleme sürekli dar bir aralıkta gerçekleşir. Metallere kıyasla lif yapıları kompozit malzemelerde ise kolon, fiberler boyunca matris malzemedan ayrılmalar, (çatlamaya bağlı) kırılma ve kırılmalar göstererek gevrek halde çökmektedir. Başka bir deyişle; kompozit malzemeler delaminasyon ile kinetik enerjiyi sönmlemlerken, metal malzemeler eğilme ve burkulma ile kinetik enerjiyi plastik deformasyon enerjisine dönüştürerek sönmleme eğilimindedirler. Delaminasyon mekanizmasının, plastik şekil değiştirmeye oranla daha fazla enerji sönmlediği yapılan çalışmalarda gözlemlenmiştir [6, 53–56]. Bu sebeple, metallere oranla kompozit malzemelerin mukavemet-ağırlık oranları çok yüksektir. Bu malzemelerin getirdiği hafiflik çok büyük bir avantajdır. Ayrıca kompozit malzemelerin gürültü ve titreşim engelleme gibi özellikleri metallere göre çok daha iyidir. Kompozit malzemeler, mekanik özellikler düşünüldüğünde, otomotiv sektöründe metallerin yerini alabilir. Ancak yüksek maliyetleri ve üretim süreleri göz önüne alındığında, üst segmentteki araçlar hariç, otomotiv sektöründe kullanılması mevcut durumda mümkün görülmemektedir [6, 7, 53, 57–59].

2. Enerji sönmleme performansını arttırmak için yapılan çalışmalar

Çarpışma kutularını enerji sönmleme, ağırlık ve maliyet konularında iyileştirmek için günümüze kadar birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar; geometriyi değiştirmek, dolgu malzemesi kullanmak ve kullanılan malzemeyi değiştirmek olarak üç ana başlık altında incelenebilir.

2.1. Geometrinin değiştirilmesi

Çarpışma kutusunun ÖEE kabiliyetini artırmak amacıyla kutunun dış geometrik şekli için; kare, beşgen, altıgen, ongen veya daire gibi bir temel şekil seçilebilir. Fakat bu dış şekil değişimi ÖEE'yi artırır da İTK'nin göz ardı edilmemesi gerekir. İTK'nin artması, yüksek kuvvetin çarpışma kutusunun arkasındaki parçalara ve sürücüye yükün iletileceği anlamına gelir. Bu sebeple, çarpışma kutularında ÖEE değerinin olabildiği en yüksek değerlerde olması istenirken, İTK'nin minimumda tutulması hedeflenir [21, 60]. ÖEE'den ödün verilecek olsa da zayıflatıcı ve çökmeyi kontrol edici bazı tasarımsal eklemelere ihtiyaç duyulur. Bazı durumlarda zayıflatıcılar çökme kontrolü sağladıkları için, daha fazla katlanmayı ve malzemenin daha fazla yararlanmayı sağlayarak hem ÖEE ve ortalama kuvveti artırırken hem de İTK'yi düşürebilmektedir. Bu tasarımsal eklemeleri koniklikler, değişken kalınlıklar, yerel ısıl işlem, sac şekillendirmesi, kanallar, pahlar, çentikler, delikler ve bunların konumları şeklinde çeşitlendirmek mümkündür [11, 23, 30, 61–63]. İTK'yi düşürmek ve çökmeyi kontrol etmek amacıyla eklenen zayıflatıcı elemanlar literatürde genel olarak tetikleyiciler olarak isimlendirilmektedir. Farklı geometrilerin çökme üzerindeki etkisi Şekil 3'te gösterilmiştir.

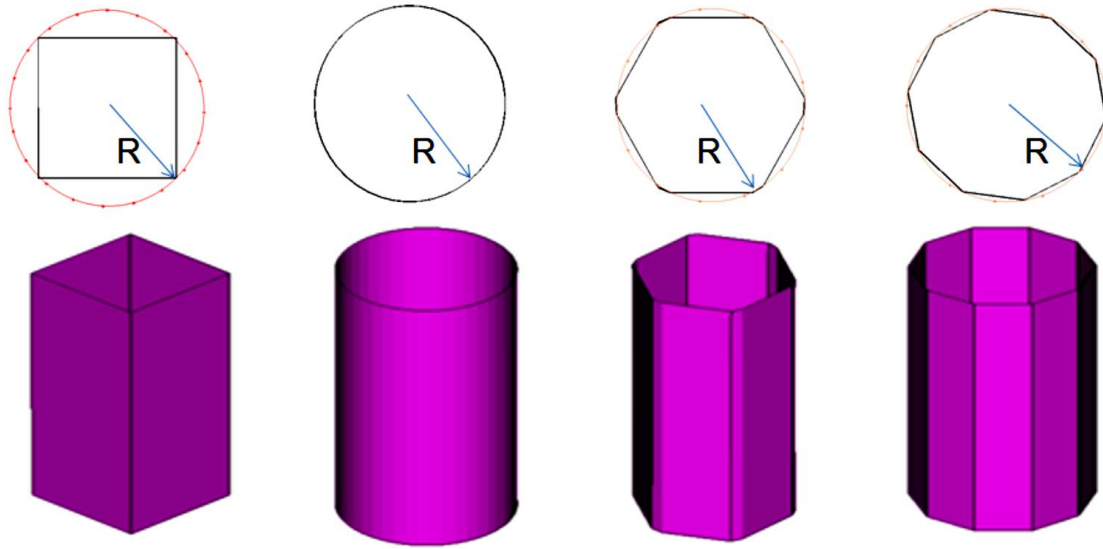


Şekil 3. Farklı çarpışma kutusu geometrileri ve çökme anındaki şekil değiştirme aşamaları [64].

Geometrinin temel görünüşünü belirleyecek ana kriterlerden biri kenar sayısıdır. Birçok parametre bu ana görünüşün belirlenmesinden sonra şekillenecektir. Kenar sayısı ile ilgili olarak Nasir ve ark. [65] cam elyaf malzeme için simülasyonun sonuçları ile deneysel sonuçları kıyaslayarak bir doğrulama gerçekleştirmişler. Simülasyon sonuçlarının doğrulanması sonrasında çalışmayı analizler üzerinden sürdürmüşlerdir.

Nasir ve ark. [65] çalışmanın devamında 36 mm dış çapa teğet olacak biçimde 1,829 mm kalınlık ve 120 mm uzunluğa sahip, farklı çokgenler üzerinde analizler yapmışlardır (

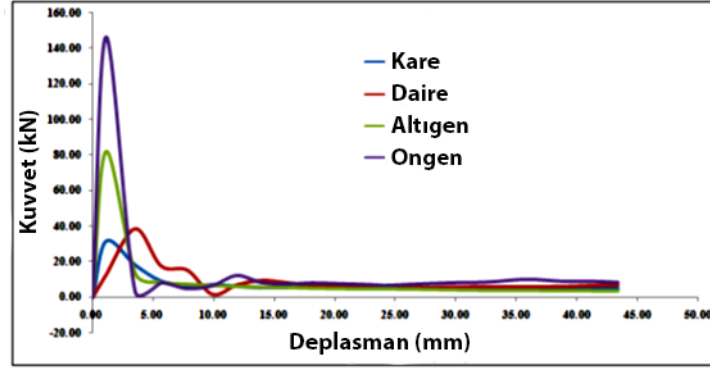
Şekil 4). Şekillendirmelerin homojenliğini sağlamak amacıyla tüm kolonlar aynı çap içerisinde teğet olarak tasarlanmış, tasarımlara herhangi bir tetikleyici eklenmemiştir. Tüm dört çarpışma kutusu aynı rijit bariyerle ve 16 km/sa ile test edilmiştir.



Şekil 4. Farklı basit şekillerden oluşan çarpışma kutuları [65].

Analiz sonucunda elde edilen K-D grafiği

Şekil 5'te görüldüğü gibidir. K-D grafiğinden ve Tablo 1' den de görüleceği gibi en yüksek İTK ongende daha sonra altıgen, silindir ve kare geometriyi takip edecek bir sırada oluşmuştur. Kolonların deformasyon tipleri, kesite bağlı olarak önemli ölçüde değişmektedir. Altıgen geometrinin İTK' si silindir geometriye göre daha yüksek olmasına karşın, silindir geometrinin sönümlendiği enerji miktarı altıgen geometriye göre az bir farkla olsa da daha fazladır. Bu farklılığın sebebi, altıgen yapının deformasyon tipinden kaynaklanmaktadır. Altıgen yapı, darbe anında diğerlerinden farklı olarak, orta bölgesindeki bükülmeden ötürü, deformasyon göstermeye darbenin alındığı kısım yerine kutunun orta bölgesinden başlamaktadır. Bu durum sıralı olmayan katlanmaların enerji sönümleme miktarını düşürdüğü şeklinde de açıklanabilir. Ancak, enerji sönümlenmesi başlı başına yeterli bir değerlendirme kriteri değildir. Geometrilerin kütleleri değerlendirmeye dahil edilerek ÖEE' ler hesaplandığında, sonuçlar Tablo 1'deki gibi olmaktadır (Tablodan da görüldüğü üzere altıgen geometrinin ÖEE' si silindir geometriden yüksektir). Tüm geometriler içinde en iyi ÖEE değeri, 7.345,123 J/kg ile ongen tasarımda elde edilmektedir [65].



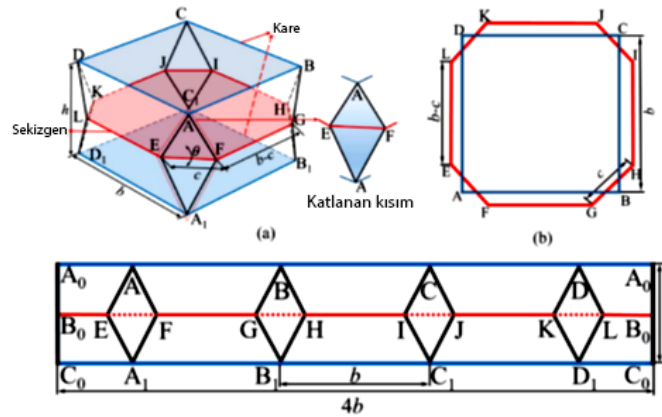
Şekil 5. Tetikleyici olmadan elde edilen K-D grafiği [65].

Tablo 1. Enerji ve kuvvetlerin geometrilere göre karşılaştırılması (tetikleyici yok) [65].

Geometri	Enerji Emilimi (J)	İTK (kN)	ÖEE (J/kg)	Kütle (g)
Kare	313,292	31,35	3.935,82	79,68
Silindir	368,461	36,67	4.168,11	88,42
Altıgen	353,222	81,87	4.265,96	82,82
Ongen	638,292	146,89	7.345,12	86,95

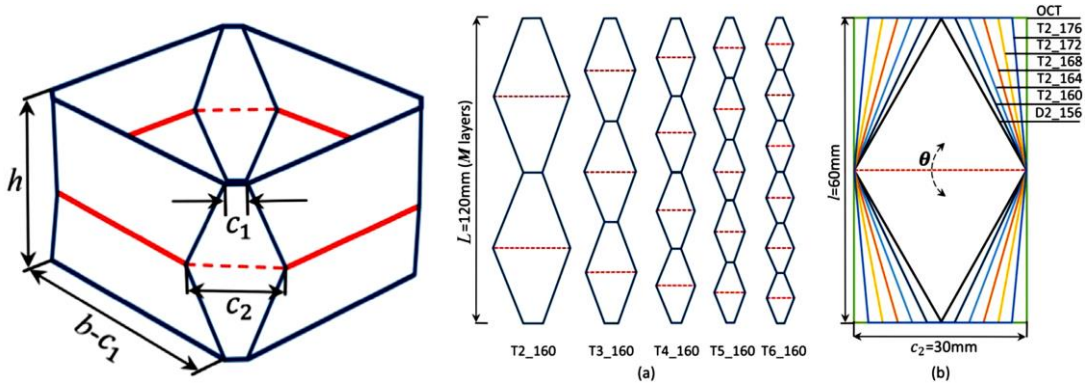
Çokgenin kenar sayısının enerji sönmlemeye etkisi ele alınan çalışmadan da görülmektedir [65]. Enerji emilimi çoğu zaman kenar sayısının artışıyla artış gösterse de bazı kenar sayılarında ve bazı kenar sayılarına yaklaşıırken azalış gösterebilir ve silindirin sonsuz bir çokgen olduğunu göz önünde bulundurursak enerji emilimi üzerinde kenar sayısına bağlı bir optimum noktanın varlığından söz edilebilir [37, 65–68].

Katlanmanın kontrollü bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için origamiden esinlenilmiş, ön-katlanmış çarpışma kutuları da oluşturulabilir [69–78]. Zhou ve ark. [70, 73], Wang ve ark. [72] origami esaslı çarpışma kutusu üzerinde çalışmışlardır. Origami esaslı çarpışma kutusuna Şekil 6'de görüldüğü gibi, çarpışma anında kolonun çökmesini kontrol edecek bazı yapısal kusurlar eklenmiştir.



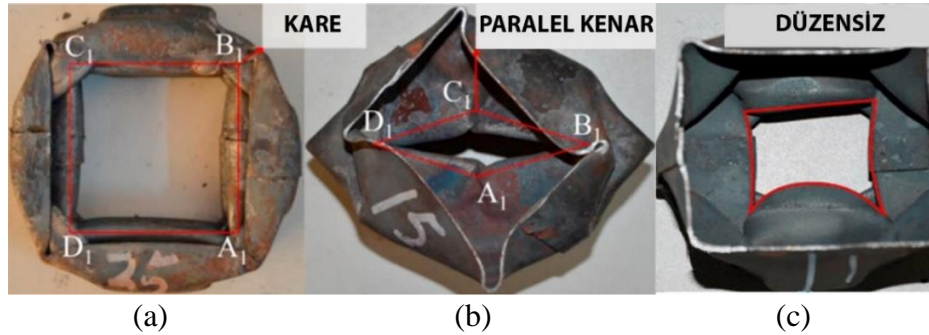
Şekil 6. Origami esaslı çarpışma kutusu: (a) Çarpışma kutusunun bir modeli, (b) Üstten görünüşü, (c) Açınımı [70].

Bu yapısal kusurlar M , c_2 ve θ parametreleri ile şekilsel ve boyutsal olarak kontrol edilmektedir. M tam boyutta kaç adet yapısal kusur bulunduğunu, c_1 bu şeklin en dar yerinin ölçüsünü, c_2 bu şeklin en geniş yerinin ölçüsünü ve θ ise c_2 ve c_1 ölçüleri arasında kalan açığı göstermektedir (Şekil 7).



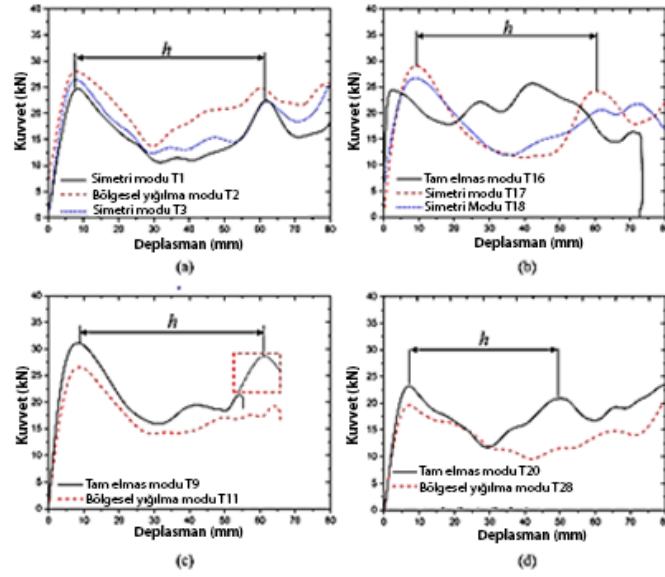
Şekil 7. Origami esaslı çarpışma kutusu üzerindeki yapısal kusurun parametreleri [73].

Önemli görülen parametreler kontrollü olarak değiştirilerek elmas (diamond) ve trapez (trapezoid) yapılar için sonuçlar elde edilmiş ve tasarlanan yapısal kusurun kullanılan geometrilere göre optimum ölçüler elde edilmiştir. Aynı ekibin 2016 yılında yaptığı çalışmada ise tam elmas modu (complete diamond mode), bölgesel yığılma modu (local buckling mode) ve simetrik mod (symmetric mode) olmak üzere üç farklı çökme modundan bahsedilmiştir (Şekil 8). Bu çökme tiplerini oluşturacak tetikleyicileri içeren numunelere farklı seviyelerde çarpışma testleri uygulanarak her bir numunenin davranışı incelenmiştir. Uygulanan farklı enerji miktarlarına bağlı olarak çarpışma modlarının birbirlerine üstünlükleri Şekil 9 da gösterilmiştir.



Şekil 8. (a) Tam elmas modu, (b) Simetrik mod (c) Bölgesel yığılma modu, [70]

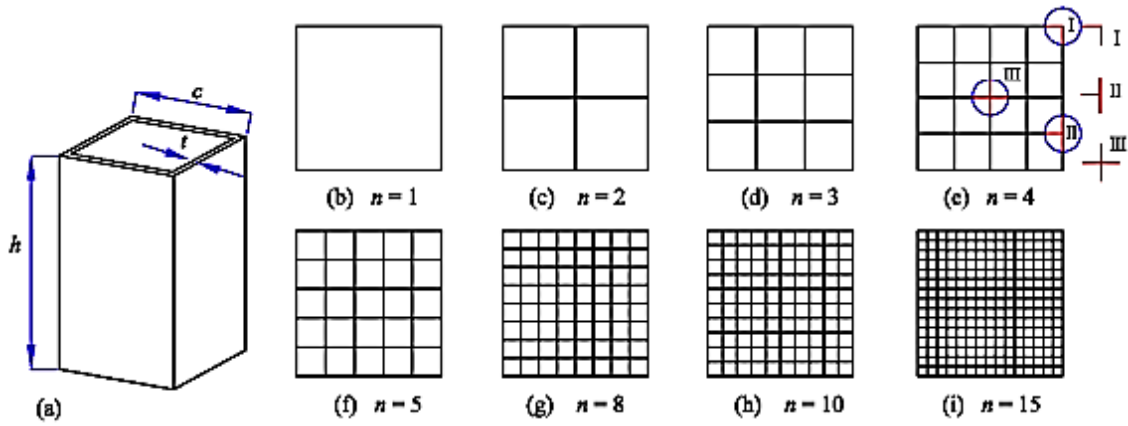
Eğik yüklemelere karşı etkili olabilmek, aynı zamanda taşıyıcı dik elemana yükü daha iyi dağıtarak kontrollü bir çökme elde edebilmek amacıyla, ince duvarlı yapının iç kısmı hücelere bölünebilir [49, 50, 79–84]. Zhonggang Wang ve ark. [81] çalışmalarında klasik bir boş kolon ve içerisi hücelere bölünmüş kolonlar üzerinde ağırlığı sabit tutarak çalışmalar yapmıştır. Yapılan çalışmada katlanma mekaniğinin incelenmesi hedeflenmiştir. Nasir ve ark.'ın [65] yaptığı çalışmaya benzer olarak bu çalışmada da yapılan deney ve simülasyonlarda elde edilen sonuçlar kıyaslanarak simülasyonlar doğrulanmış daha sonra çalışmalara simülasyon ağırlıklı olarak devam edilmiştir.



Şekil 9. Farklı çökme modlarının karşılaştırılması: (a) $E_k=2,39$ kJ (b) $E_k=1,57$ kJ (c) $E_k=1,15$ kJ (d) $E_k=2,39$ kJ [70]

Yapılan çalışmalarda

Şekil 10'da gösterilen farklı hücre sayılarına (n) sahip kolonlar kullanılmıştır. Ayrıca Şekil 10'da görülen kolon bağlantı tiplerinin enerji emilimine katkısının belirlenmesi için bağlantı şekilleri köşe (I), t (II) ve çapraz (III) olarak üçe ayrılmış ve kaç adet olduklarına bakılmıştır. Kolonlarda hücre sayısı artırıldıkça ağırlığı sabit tutabilmek için kalınlık Tablo 2'de görüldüğü gibi azaltılmıştır.



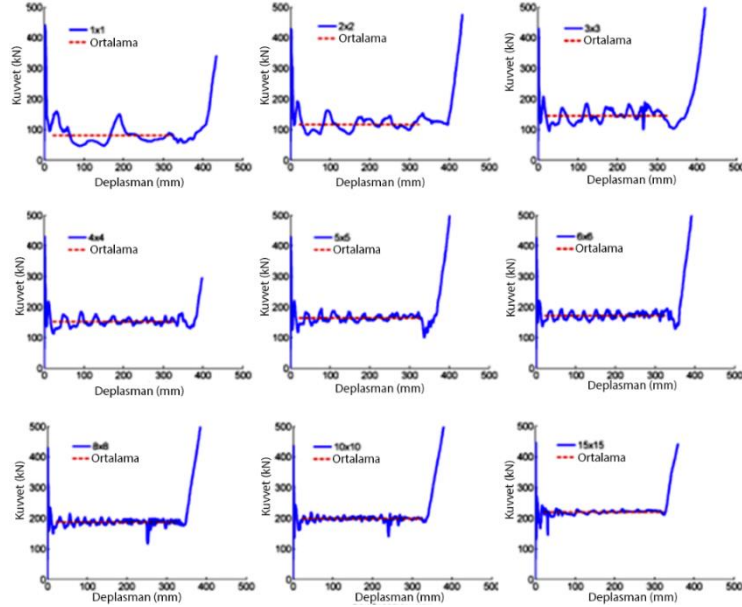
Şekil 10. Çok hücreli kolonlar: (a) Şematik gösterim (b)-(i) Farklı hücre n sayısına sahip kolonlar [81].

Tablo 2. Farklı hücre sayıları için kalınlıklar [81].

Durum	1x1	2x2	3x3	4x4	5x5	8x8	10x10	15x15
t_n	3	2	1,5	1,2	1	0,67	0,55	0,38

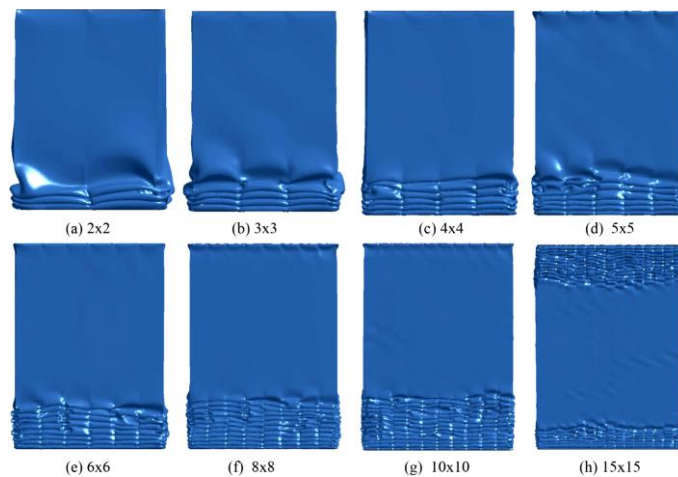
Deneyle, taşıyıcı aracın üzerine yerleştirilmiş numunenin, belirlenen bir hızla, rijit bir duvara çarpıtılması sonucunda elde edilen K-D grafiği ve kameralarla takip edilen katlanma mekanizması incelenerek yapılmıştır.

Şekil 11’de görülebileceği üzere hücre sayısı arttıkça ortalama kuvvet değeri sırayla artmaktadır. Dolayısıyla, sönmölen enerji miktarı da hücre sayısının artmasıyla artış göstermektedir. Ayrıca hücre sayısı arttıkça, tepe kuvvetinden sonra ortalama kuvvetin oluştuğu kısımda kuvvetlerin salınımı da azalmış ve kuvvetler daha kararlı bir hal almıştır.



Şekil 11. Kuvvet-deplasman grafiği [81].

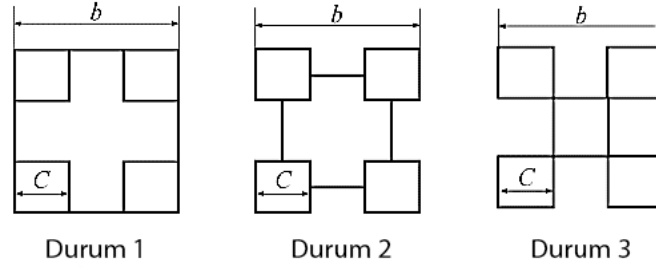
Darbe esnasında katlanmaların başlama ve devam etme şekilleri Şekil 12’de gösterilmiştir. Kalın duvarlı düşük hücreli yapıların daha uzun boylarda burkularak katlandıkları şekilde görölmektedir. Kuvvetlerdeki salınım genlikleri, hücre sayısı arttıkça duvarların incelmesinin de etkisiyle ciddi oranda düşüş göstermiştir. Bu çalışmada ayrıca çapraz bağlantı tipinin enerji emiliminde en etkili bağlantı tipi olarak tespit edilmiştir [81].



Şekil 12. Hücre sayısına bağlı deformasyon şekli [81].

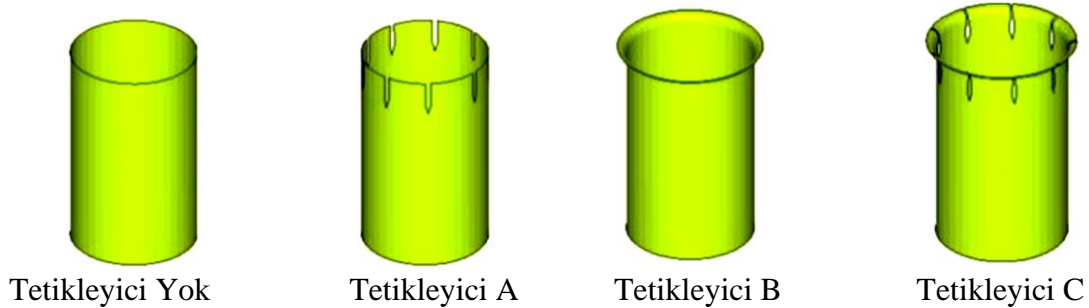
Çok hücreli çalışmalarda köşe ve bağlantı noktalarının enerji sönmölemeleri üzerinde etkisi vardır [83, 80, 85–90]. Heung-Soo Kim [91] köşe kısmına daha fazla malzeme

eklendikçe daha fazla çarpışma enerjisinin emildiğini bildiren çalışmalardan yola çıkmıştır. Ancak köşeleri daha kalın olan kolonlar için katlanma dalga boyu çok daha uzun olduğundan global kararsızlık sorunu ortaya çıkabilmektedir. Bu olumsuzluğu da göz önünde bulundurarak belirli kısıtlar altında hem çarpışma enerjisi emilimini arttırmak hem de daha kararlı, aşamalı bir çökmeyi sağlamak için farklı profiller öngörülmüştür. Bu kapsamda, enine bir kesitin köşe kısmına ilave bir katlama elemanı ekleme fikri önerilmiş, alüminyum ekstrüzyon ile üretilmiş, Şekil 13'te verilen, köşelerine birer kare kolon daha eklenmiş farklı kesit alanlarına sahip profiller teste tabi tutulmuştur. En iyi şekil Durum 2 olarak belirlemiştir.



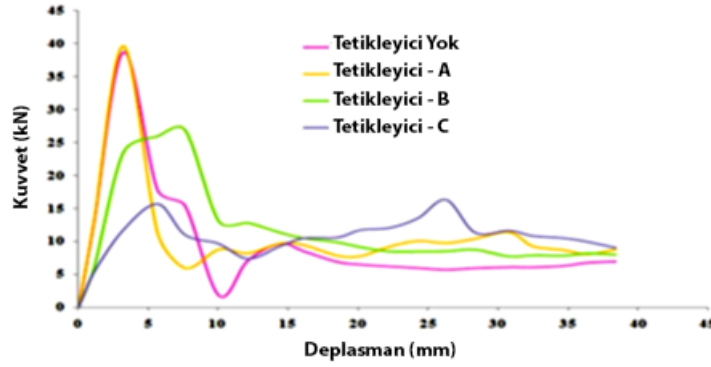
Şekil 13. Farklı kesit profilleri [91].

İTK'yi azaltabilmek için çarpışma kutularına bazı kusurların eklenmesi gerekir [30, 61, 63, 92–95]. N. Nasir Hussain ve ark. [1] çalışmalarında farklı tipteki tetikleyicilerin ÖEE'ye etkilerini belirlemek için bir çalışma yapmış ve birebir aynı kolonlarda küçük bir tasarım farkının ÖEE'yi ne kadar etkilediğini ortaya koymuşlardır. Yapılan çalışmada Şekil 14'te görüldüğü gibi yarıçapı 36 mm ve boyu 120 mm olan silindirik kolonlar üzerine, şekil değiştirilmeden, tetikleyici unsurlar eklenmiştir. Tetikleyici A, 1 mm genişliğinde 20 mm derinliğindeki yarıklardan oluşmaktadır ve silindirin çevresine eşit olarak dağıtılmıştır. Tetikleyici B ise, 5 mm yarıçapında bir yuvarlatmadır. Tetikleyici C'de ise, A ve B tipindeki tetikleyiciler birleştirilerek kullanılmıştır. Tüm numunelerde deneyler 16 km/sa ile aynı şartlarda yapılmıştır.



Şekil 14. Farklı tetikleyici tipleri [1].

K-D grafiğinden de görüleceği gibi en düşük ÖEE, tetikleyici olmayan kolonda 4168,11 J/kg olarak elde edilmiştir (Şekil 15). ÖEE artışı A, C, B şeklinde olmuştur (Tablo 3).



Şekil 15. Farklı tipteki tetikleyiciler içeren kolonlar için Kuvvet-Deplasman grafiği [1].

Tablo 3. Tetikleyici tiplerine göre elde edilen sonuçlar [1].

Tetikleyici Tipi	Sönümlenen Enerji (J)	İlk Tepe Kuvveti (kN)	İkincil Tepe Kuvveti (kN)	ÖEE (J/kg)	ÖEE'nin Yüzde Artışı (%)
Tetikleyici Yok	368,461	38,67	9,61	4.168,11	0 (Temel Değer)
Tetikleyici A	408,523	39,65	11,36	4.647,58	11,5
Tetikleyici B	512,668	23,46	26,87	5.646,12	35,45
Tetikleyici C	462,277	15,65	16,29	5.125,02	22,95

Sonuç olarak, enerji sönümleme miktarı ve karakteristiği cam elyafla üretilmiş çarpışma kutuları için farklı geometriler kullanılarak değiştirilmiş, ÖEE açısından incelendiğinde basit bir tetikleyici kullanmanın bile aynı geometri ve boyuttaki kolonda %35,45 artışa sebep olduğu gösterilmiştir. Ayrıca, deformasyon modunun da tasarımla önemli ölçüde değiştiği görülmektedir. Uygun tetikleyici geometrilerinin uygun geometriler ile kullanılması yoluyla istenen kuvvetin ve enerji sönümleme miktarının malzemenin imkan verdiği ölçüde elde edilmesi mümkündür [1].

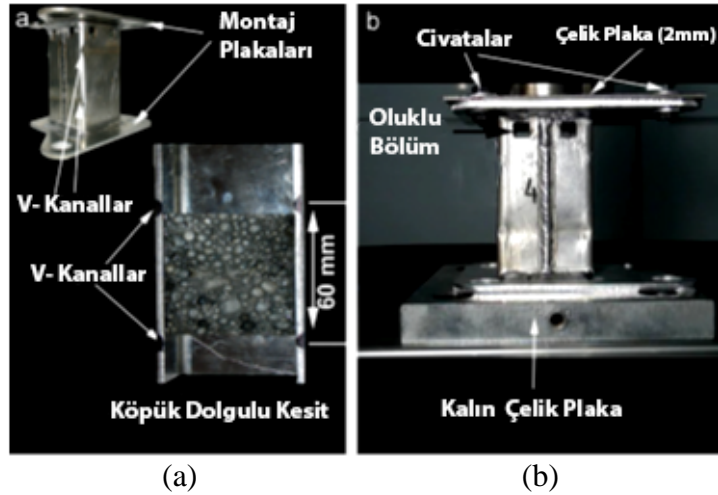
2.2. Dolgu malzemesinin kullanılması

Çöküş esnasında duvarın tekrarlı katlanmasıyla kuvvette oluşan salınımları düşürmek, salınımları kontrol etmek, eğik gelen yüklere karşı etkili bir kutu elde edebilmek ve ÖEE'yi artırabilmek için çarpışma kutularının iç kısımlarına çeşitli dolgu malzemeleri konulabilir. Bu dolgu malzemeleri; alüminyum köpük gibi metal köpükler veya poliüretan köpükler [11, 23, 52, 54, 96–101], kafes yapıda bloklar [102–106], öksetik yapılar [107–113], tel kafesler [114–118], balpeteği gibi tekrarlı yapılar [46, 119–125] olabilir. Toksoy ve ark. [2] yaptıkları çalışmada, kare geometriye sahip çarpışma kutusunun duvar kalınlığının ve içine kısmen yerleştirilen alüminyum köpüğün özelliklerinin enerji sönümlenmeye etkisini araştırmışlardır. Numunelerin içi kısmen alüminyum köpük doldurulmuştur. Yarı statik basma uygulanmıştır.

Deneyler sırasında belirlenen parametreler; G1 (boyutun 73x70x120 mm), G2 (boyutun 70x60x12 mm), E (dolgu kullanılmadığını), F1 (bağlı yoğunluğun 0,11), F2 (bağlı yoğunluğu 0,15) ve T (duvar kalınlığı, mm cinsinden) olarak verilmiştir.

Deney numunesinin kesiti ve test sistemi Şekil 16’da verilmiştir. Numune 1050H4 malzemeden yapılan kolonun duvarlarının lazerle kesildikten sonra bükülmesi ve TIG kaynağı ile uçlarının birleştirilmesiyle imal edilmiştir. Hemen köpüğün bittiği alt ve üst kısımlarda, katlanmayı tetiklemek için, dört adet V-kanal açılmıştır. Tüm V-kanallar arasındaki mesafeler eşittir. Köpüğü sabitlemek için herhangi bir bağlantı yöntemi (yapıştırıcı, kaynak, vb.) kullanılmamıştır. Köpüğü sabitleme işlemi, V-kanallar yardımı ile yapılmıştır.

Yapılan testlerde, belirli zaman aralıklarında fotoğraflar çekilmiş ve sadece grafik benzeşmesi değil çökme sırasındaki görüntülerle de LS-Dyna simülasyonlarında elde edilen sonuçlar kıyaslanmış ve sonuçların uyumlu olduğu saptanmıştır.

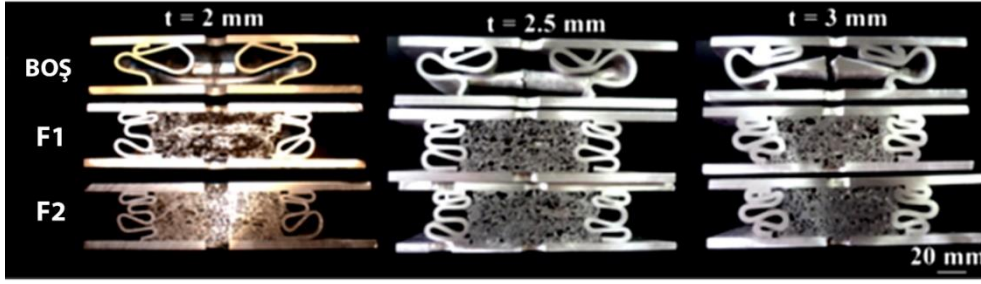


Şekil 16. (a) 3 mm kalınlıktaki ve G1 ölçülerindeki çarpışma kutusunun kesit alınmış hali, (b) Test sistemi ve çarpışma kutusu [2].

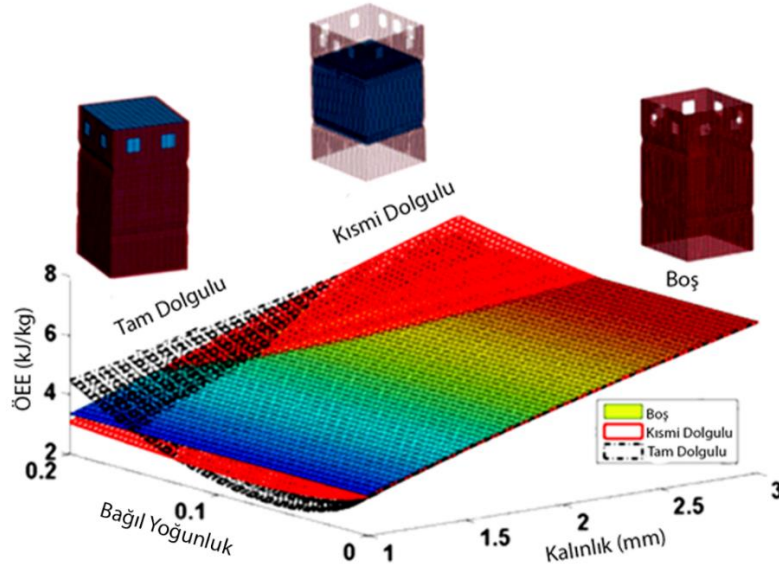
Yapılan deneyler sonucunda kalınlık arttıkça sönmelenen enerji artmıştır. Aynı zamanda dolgu malzemesi kullanımının da enerji sönmelenmesini artırdığı görülmüştür. Kullanılan dolgu malzemesinin bağıl yoğunluğunun artması enerji emilimini arttırmıştır. Ancak, enerji emilimi artarken ağırlık da artmıştır. Bu nedenle, net bir karar verebilmek için ÖEE’yi incelemek gerekir.

Şekil 17’de, farklı kalınlık ve dolgular kullanılarak yapılan deneysel çalışmalarda 80 mm’ye kadar sıkıştırılmış numunelerin kesitleri verilmiştir. Dolgu malzemesi, darbe anında oluşan kinetik enerjiyi şekil değiştirerek sönmelenmesinin yanında, kolonun katlanma mekaniğini de değiştirmektedir. Şekilden görüleceği üzere, katlanma sayısı köpük dolu numunelerde daha fazladır. Sonuç olarak, köpük dolgulu numunelerde sönmelenen enerji miktarının arttığı görülmüştür. Ancak Şekil 18’de verilen 3 boyutlu ÖEE grafiği incelendiğinde, tam dolu, yarı dolu ve boş kolonların her üçünün de bölgesel olarak üstün olduğu kısımların mevcut olduğu görülmektedir [2].

Köpüğün dolgu malzemesi olarak kullanımı, tasarıma ve isteklerin önem sırasına göre uygun olabilir ve eğer güvenlik ağırlıktan daha önemliyse kullanılmasında hiçbir sakınca yoktur. Genel anlamda, dolgunun kullanılabilmesi için fiyat, ağırlık ve seri üretime uygunluk açısından değerlendirme yapılarak bir karara varılmasında fayda vardır.



Şekil 17. 80 mm'ye kadar sıkıştırılmış numunelerin kesit alanları [2].



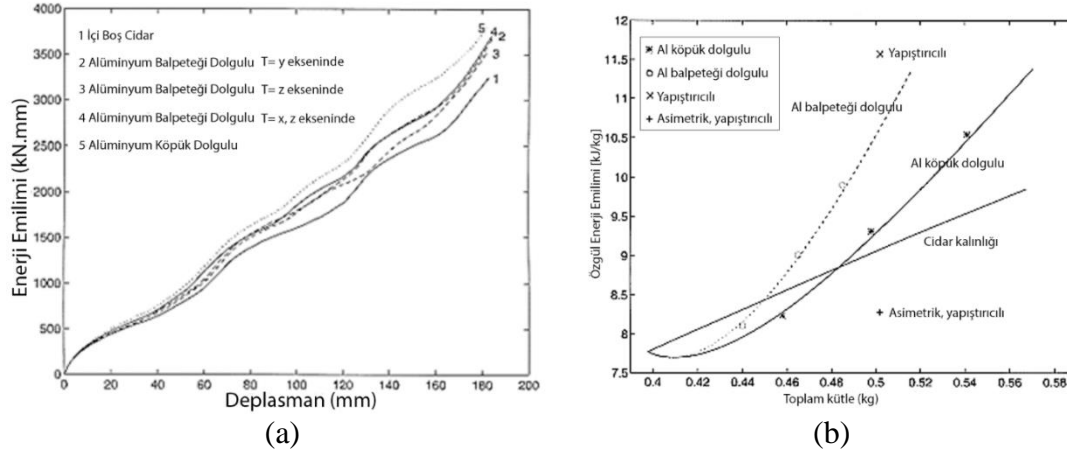
Şekil 18. Tüm kalınlıklar ve kullanılan köpüğün bağıl yoğunluğuna göre ÖEE değerlerinin 3 boyutlu grafiği [2].

S. Santosa ve ark. [126] yaptıkları çalışmada, kare bir çarpışma kutusunun içerisinde dolgu malzemesi olarak bal-peteği yapı (honeycomb) ve alüminyum köpük kullanarak deneyler yapmışlardır. Bu deneylerde, ÖEE' ler üzerinden değerlendirme yaparak dolgu malzemelerinin enerji sönümlenmesi üzerindeki etkisini gözlemlemiştir.

Şekil 19a'da verilen sonuçlar göz önüne alındığında, alüminyum köpük ile doldurulan çarpışma kutusunun enerji sönümlenmesinin en yüksek olduğu görülmektedir. T-ekseni, dolgunun güçlü olduğu eksenini belirtir ve petek dolguda T'nin x, z eksenlerinde güçlü olduğu durum varsayımsal bir yaklaşımdır. Alüminyum köpük dolgusunda güçlü yön, üç eksenini de kapsar. Güçlü eksen yaklaşımı analizlerde, kompozit malzemelerin yönlendirilmiş olarak kullanılmasından dolayı kullanılmıştır [126].

Şekil 19b'de yapılan analizlerden elde edilen ÖEE değerleri kutuların ağırlıklarıyla ilişkilendirilebilecek şekilde bir araya getirilerek nokta olarak gösterilmiştir ve eğriler bu sonuçlardan üydürülmüştür. Bu grafikte ağırlıklar dikkate alındığında aksenal yüklemeler altında alüminyum bal-peteğinin dolgu malzemesi olarak kullanıldığı çarpışma kutusu daha iyi bir performans sergilemektedir [126, 127]. Fakat eğik gelen yüklemelerde, eğim açısı arttıkça bal-peteği dolgulu yapının performansı alüminyum köpük dolgulu tipe düşmektedir [128–132]. Ayrıca, simülasyonlarda alüminyum köpük, yapıstırıcı ile cidara sabitlendiğinde, kayma direnci oluşturarak katlanma dalga

boyunu kısaltır. Bu durumda, grafikten de görülebileceği üzere, alüminyum köpük dolgulu kolonda bal-peteği dolgulu kolondakine yakın bir ÖEE değeri öngörülmüştür.



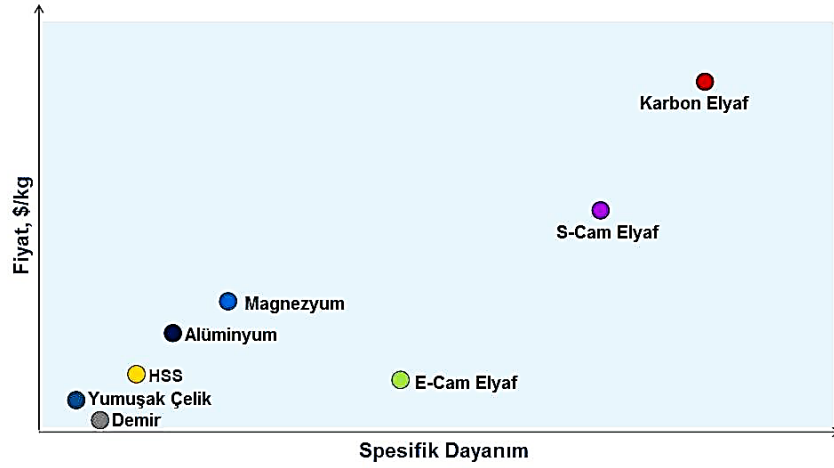
Şekil 19. (a) Dolgulu kolonların enerji sönümlenme karakteristikleri; (b) Farklı tip dolgu malzemeleri için ÖEE'ler; işaretler yapılan analiz sonuçlarını göstermektedir [126].

2.3 Kullanılan malzemenin değiştirilmesi

Geometri veya dolgu ilavesi ile istenen seviyelere ulaşamadığı durumlarda ilk aklı gelen çözüm, ana malzemenin, mekanik özellikleri daha iyi malzemeyle değiştirilmesidir. Ayrıca, tasarım ile yıllardır belirli bir seviyeye ulaşılmış çalışmalarda küçük iyileştirmeler yüksek maliyet ve büyük iş yükü getirmektedir. Bu nedenle, belirli bir seviyeden sonra farklı yollar aramak ilerlemenin en etkili yoludur. Kompozit malzemeler, otomotiv sektöründeki en önemli uğraşlardan biri olan ağırlık azaltma konusunda oldukça etkilidirler [6, 7, 53, 57–59].

Kompozit malzemeler; iki ya da daha fazla mikro veya makro yapılı, birbirinin içinde çözünmeyen ve kimyasal olarak birbirinden farklı bileşenlerin oluşturduğu malzeme sistemidir. En basit şekliyle, bir matris içinde bir güçlendiricinin kullanılmasıyla oluşurlar. Kompozit malzemeler, istenen duruma uygun olarak tasarlanır ve kullanılırlar. Belirli bir yönde mukavemeti çok mükemmel özellikler gösteren bir kompozit yapının, başka bir yönde oldukça mukavemetsiz olduğu durumlar olabilir. Bu nedenle, amacın çok iyi belirlenip malzemenin buna göre seçilmesi şarttır [133–137].

Otomotiv sektöründe geri dönüşüm oldukça önemlidir ve bazı regülasyonlara tabidir. Bu nedenle, matris olarak termoset kullanılan kompozit malzemeler otomotiv sektöründe kullanılmaya uygun değildir ki bu durum termoplastiklerle aşılabılır. Ancak, termoplastik kompozit üretilmesi konusunda da bazı sorunlar mevcuttur. Kompozit malzemeler hafif olmalarına karşın mukavemetli olsalar da çok pahalıdırlar ve üretim süreleri uzundur. Alüminyuma rakip olarak E-cam, elyaf üretim süresinde bir iyileşme sağlanabilirse otomotiv sektöründe hafif malzeme olarak en çok kullanılan malzemelerden biri olabilir [6, 10, 17, 18, 138–142]. Şekil 20'de malzeme karşılaştırmalarının daha iyi anlaşılabilmesi için malzemelerin spesifik dayanımları fiyat/kg halinde verilmiştir.



Şekil 20. Bazı malzemelerin fiyat ve spesifik dayanımları grafiği [143].

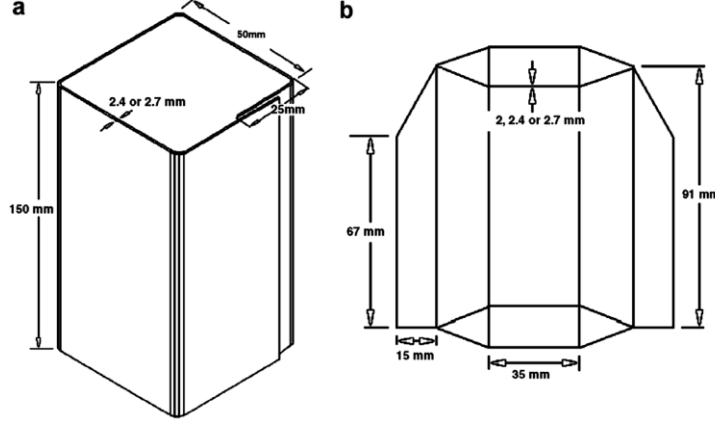
Günümüzde çarpışma kutularının kompozit malzemeler ile yapılması konusunda birçok akademik çalışma yapılmıştır [5, 6, 53, 144–146]. Şekil 21’de görülen çarpışma kutusu karbon fiberden üretilmiştir. Geleneksel çarpışma kutularının ezilerek (katlanarak) enerjiyi sönmlemesinin aksine, karbon fiber gibi polimer matrisli kompozit yapılarda çarpışma kutusunda enerji sönmleme mekanizması, kırılma ve kırılma gibi delaminasyon mekanizmalarıyla gerçekleşmektedir. Polimer matrisli çarpışma kutularının her bir partikülü kopmak için bir enerjiye ihtiyaç duyarak milyonlarca parçaya bölünmek ister, dolayısıyla bu sistemin metal yapılara göre daha verimli enerjiyi sönmlediği gözlenir [6, 53–56, 147].



Şekil 21. Karbon fiber çarpışma kutusu [147].

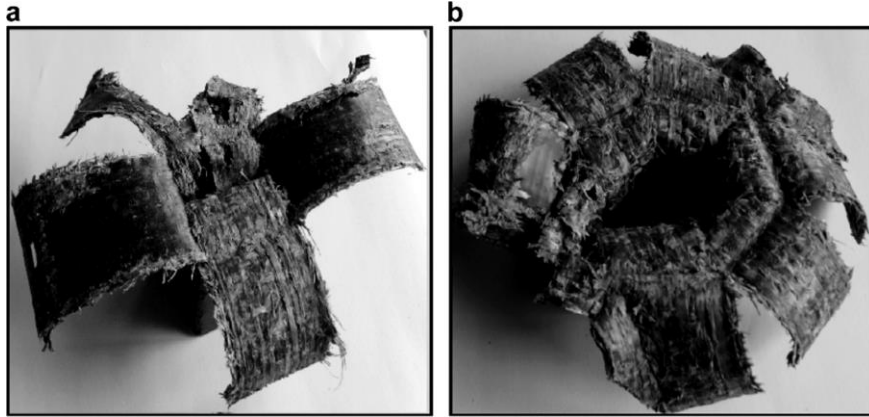
Genellikle enjeksiyon kalıplama ile üretimi yapılabilen karmaşık termoplastik parçalarda, düşük elyaf uzunluğu/fiber çapı (L/D) oranı kullanılmaktadır. Bu oran arttıkça çarpışma performansı artarken malzemenin akabilirliği düşmektedir. Bu nedenle, sürekli takviyeli termoplastikler termoformlanarak, kaynak edilerek ve proses öncesi işlemler uygulanarak çok yüksek çarpışma performansları gösterecek biçimde imal edilmektedir. Numuneler tek taraflı katlanarak, uç kısımlarda adeziv yapılar kullanılarak birleştirilmiştir. Bu yapılarda vidalar kullanılarak çarpışma performanslarının artırıldığı da yazarlar tarafından gösterilmiştir.

Hamidreza Zarei ve ark. [57] yaptıkları çalışmada 2, 2,4 ve 2,7 mm kalınlığındaki kare ve altıgen kolon çarpışma kutuları üzerinde durmuşlardır. Kare tüplerin uzunluğu 150 mm ve altıgen tüplerin uzunluğu 91 mm'dir (Şekil 22). Çarpışma kutuları, örülü %50 oranında cam elyafa polyamid matris uygulayarak elde edilmiştir. Çarpışma kutuları, son kısmında 45°'lik bir tetikleyici olacak biçimde üretilmiştir. Altıgen çarpışma kutuları iki kısımdan oluşmaktadır ve bu iki kısım birbirine kaynak edilmiştir.



Şekil 22. Sırasıyla kare çarpışma kutusu ve altıgen çarpışma kutusu [57].

Kare ve altıgen çarpışma kutuları üzerinde deneyler yapılmış ve deney sonrası numunelerin durumu ve çökme tipleri Şekil 23'te görüldüğü gibi olmuştur. Altıgen tüplerin ÖEE'leri daha yüksek çıkmıştır.



Şekil 23. Sırasıyla kare numune ve altıgen numune için çarpışma tipi [57].

Yapılan çalışmada, çarpışma kutularında günümüzde en çok kullanılan malzeme olan alüminyum ile üretilmiş kolon ve aynı ebatlarda kompozit kolon karşılaştırılmıştır. Sonuçlar Tablo 4'te verilmiştir. Kompozit çarpışma kutusunda köşelerdeki mukavemetin %50 oranında düştüğü tespit edilmiştir [57].

Tablo 4. Optimum alüminyum ve kompozit çarpışma kutularının karşılaştırılması [57]

Kolon tipi	Kalınlık (<i>T</i>)	Genişlik (<i>D</i>)	Uzunluk (<i>L</i>)	Enerji Emilimi (<i>E</i>)	<i>Enerji</i> <i>Artışı</i>	ÖEE	ÖEE Artışı
	[mm]	[mm]	[mm]	[J]	(%)	[J/kg]	(%)
Alüminyum	2,1	70	210	7.602	–	26.124	–
Kompozit	3	70	210	9.198	17,4	35.716	26,9

3. Sonuç

Otomotiv sektöründe, performansı arttırmanın yanında hafiflik ve maliyet konuları da oldukça önemlidir. Performans, maliyet ve ağırlık ortak olarak değerlendirildiğinde, istek listesi çerçevesinde bir optimum nokta belirlenmelidir. Çarpışma kutularında enerji sönümlenmesini arttırmak için ilk akla gelen ve en basit yöntem geometriyi değiştirmektir. Geometriyi değiştirmek, malzemenin enerji sönümlenme kabiliyetini ortaya çıkaran bir yaklaşımdır. Geometri değişimi ile çözülemeyecek noktaya gelindiğinde dolgu malzemesi ve istenen özellikler yönünde daha iyi davranabilen malzemeler kullanmak akla gelmektedir. Çarpışma kutularında dolgu malzemesi kullanıldığında enerji sönümlenme miktarı artmaktadır. Ancak dolgu malzemesi, ağırlık ve maliyet artışı gibi otomotiv sektörü için ciddi dezavantaj sayılan etkenleri de yanında getirmektedir. Çarpışma kutularında geçmişten günümüze birçok malzeme kullanılmıştır. Günümüz şartlarında ağırlık-performans oranı göz önünde bulundurulduğunda en etkin malzeme alüminyumdur ve çarpışma kutularında çokça tercih edilmektedir. Otomotiv sektöründe alüminyum malzemelere alternatif olarak kompozit malzemeler üzerinde çalışmalar devam etmektedir. Kompozit malzemeler, ağırlık-performans oranı dikkate alındığında oldukça kullanışlı malzemelerdir. Ancak, kompozit malzemelerin yüksek maliyetleri ve uzun üretim süreleri, otomotiv sektöründe kullanılabilirliklerini olumsuz yönde etkilemektedir.

Çarpışma kutusu tasarımında: istek listesi doğru bir şekilde belirlendikten sonra; performans, maliyet ve ağırlık kriterlerini esas alarak, ana sanayinin talebi doğrultusunda hedefler netleştirilmeli; hedeflere ulaşmadaki problemler belirlenerek çözüm arayışına başlanmalıdır.

Kaynaklar

- [1] Hussain, N. N., Regalla, 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).
- [2] 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).
- [3] Ha, N. S., and Lu, G., Thin-walled corrugated structures: A review of crashworthiness designs and energy absorption characteristics, **Thin-Walled Structures**, 157, 106995, (2020).

- [4] Xu, F., Zhang, X., and Zhang, H., A review on functionally graded structures and materials for energy absorption, **Engineering Structures**, 171, 309–325, (2018).
- [5] Abdullah, N. A. Z., Sani, M. S. M., Salwani, M. S., and Husain, N. A., A review on crashworthiness studies of crash box structure, **Thin-Walled Structures**, 153, 106795, (2020).
- [6] Isaac, C. W., and Ezekwem, C., A review of the crashworthiness performance of energy absorbing composite structure within the context of materials, manufacturing and maintenance for sustainability, **Composite Structures**, 257, 113081, (2021).
- [7] Isaac, C. W., Crashworthiness performance of green composite energy absorbing structure with embedded sensing device providing cleaner environment for sustainable maintenance, **Sustainable Materials and Technologies**, 25, e00196, (2020).
- [8] Lu, R., Gao, W., Hu, X., Liu, W., Li, Y., and Liu, X., Crushing analysis and crashworthiness optimization of tailor rolled tubes with variation of thickness and material properties, **International Journal of Mechanical Sciences**, 136, 67–84, (2018).
- [9] Zhu, G., Zhao, Z., Hu, P., Luo, G., Zhao, X., and Yu, Q., On energy-absorbing mechanisms and structural crashworthiness of laterally crushed thin-walled structures filled with aluminum foam and CFRP skeleton, **Thin-Walled Structures**, 160, 107390, (2021).
- [10] Nikbakt, S., Kamarian, S., and Shakeri, M., A review on optimization of composite structures Part I: Laminated composites, **Composite Structures**, 195, March, 158–185, (2018).
- [11] 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).
- [12] Van Brummelen, J., O'Brien, M., Gruyer, D., and Najjaran, H., Autonomous vehicle perception: The technology of today and tomorrow, **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, 89, 384–406, (2018).
- [13] Perumal, P. S., Sujasree, M., Chavhan, S., Gupta, D., Mukthineni, V., Shingekar, S. R., ... Fortino, G., An insight into crash avoidance and overtaking advice systems for Autonomous Vehicles: A review, challenges and solutions, **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, 104, 104406, (2021).
- [14] Nguyen, T. D., Jitae, K., Viet, N. M., Thang, P. Q., and Huong, P. T., Combination of La-TiO₂ and activated carbon fiber for degradation of toxic organic pollutants under the visible light, **Journal of Environmental Chemical Engineering**, 7, 3, 103180, (2019).
- [15] Kumar Singh, S., Khan, S., Kumar Mishra, R., and Karloopia, J., Fabrication and evaluation of mechanical properties of polymer matrix composite using nano fibers as a reinforcement, **Materials Today: Proceedings**, 46, 1376–1383, (2021).
- [16] Hu, L., Ghafoori, E., Pons, S., Feng, P., Yang, J., and Azim, I., Fire behavior and design of steel columns reinforced by prestressed CFRP strips, **Composite Structures**, 275, August, 114516, (2021).
- [17] Chapple, R., Chivas-Joly, C., Kose, O., Erskine, E. L., Ferry, L., Lopez-Cuesta, J.-M., ... Forest, V., Graphene oxide incorporating carbon fibre-reinforced composites submitted to simultaneous impact and fire: Physicochemical

- characterisation and toxicology of the by-products, **Journal of Hazardous Materials**, 127544, (2021).
- [18] Zhang, B., Jia, L., Tian, M., Ning, N., Zhang, L., and Wang, W., Surface and interface modification of aramid fiber and its reinforcement for polymer composites: A review, **European Polymer Journal**, 147, 110352, (2021).
- [19] Das, P. P., and Chaudhary, V., Environmental impact and effect of chemical treatment on bio fiber based polymer composites, **Materials Today: Proceedings**, (2021).
- [20] Das, P. P., and Chaudhary, V., Moving towards the era of bio fibre based polymer composites, **Cleaner Engineering and Technology**, 4, 100182, (2021).
- [21] Altin, M., Değişik geometrilere sahip enerji sönümleyici profillerin açılı yükler altında performanslarının incelenmesi, **Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi**, 34, 3, 1517–1525, (2019).
- [22] Ensarioglu, C., Cakan, B. G., Koluk, H., Reis, M., Aksel, L., Uguz, A., and Cakir, M. C., Development of A Thermoplastic Crash-Box Reinforced with Aluminum Foam., In **9th International Automotive Technologies Congress OTEKON**. Bursa/Turkey, (2018).
- [23] Li, Z., Rakheja, S., and Shangguan, W. Bin, Study on crushing behaviors of foam-filled thin-walled square tubes with different types and number of initiators under multiple angle loads, **Thin-Walled Structures**, 145, February, 106376, (2019).
- [24] Research Council for Automobile Repairs (RCAR), (n.d.) Retrieved October 26, 2021, from <https://www.rcar.org/>.
- [25] Kurtuluş, E., and Tekin, G., Conversion of Aluminum Front Bumper System to Magnesium Material by Using Design of Experiment Method, **International Journal of Automotive Science And Technology**, 5, 34–42, (2021).
- [26] Jang, H. H., Lee, H.-A., Yi, S.-I., Kim, D. S., Yang, H. W., and Park, G.-J., Cross-Section Design of the Crash Box to Maximize Energy Absorption, In **16th Asia Pacific Automotive Engineering Conference**, (2011).
- [27] Constantin, B. A., Iozsa, D., and Fratila, G., Studies about the Behavior of the Crash Boxes of a Car Body, **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, 160, 1, 12010, (2016).
- [28] Sadighi, A., Mahbod, M., and Asgari, M., Bi-tubular corrugated composite conical–cylindrical tube for energy absorption in axial and oblique loading: Analysis and optimization, **Journal of Composite Materials**, 54, 18, 2399–2432, (2020).
- [29] Li, Z., Chen, R., and Lu, F., Comparative analysis of crashworthiness of empty and foam-filled thin-walled tubes, **Thin-Walled Structures**, 124, 343–349, (2018).
- [30] Palanivelu, S., Van Paepegem, W., Degrieck, J., Kakogiannis, D., Van Ackeren, J., Van Hemelrijck, D., ... Vantomme, J., Comparative study of the quasi-static energy absorption of small-scale composite tubes with different geometrical shapes for use in sacrificial cladding structures, **Polymer Testing**, 29, 3, 381–396, (2010).
- [31] Kamran, M., Xue, P., Ahmed, N., Zahran, M. S., and Hanif, A. A. G., Axial crushing of uni-sectional bi-tubular inner tubes with multiple outer cross-sections, **Latin American Journal of Solids and Structures**, 14, 12, 2198–2220, (2017).
- [32] Dindar, Ç., Beytut, H., and Karagoz, S., 51CrV4 Yay Çeliğinde Isıl İşlem ve Kesit Geometrisinin Çarpışma Dayanıklılığı Üzerine Etkisi, **Uludağ University**

- Journal of The Faculty of Engineering**, 24, 2, 477–488, (2019).
- [33] Han, D. C., and Park, S. H., Collapse behavior of square thin-walled columns subjected to oblique loads, **Thin-Walled Structures**, 35, 3, 167–184, (1999).
- [34] Zhang, X., and Zhang, H., Energy absorption of multi-cell stub columns under axial compression, **Thin-Walled Structures**, 68, 156–163, (2013).
- [35] Mamalis, A. ., Manolakos, D. ., Ioannidis, M. ., Kostazos, P. ., and Dimitriou, C., Finite element simulation of the axial collapse of metallic thin-walled tubes with octagonal cross-section, **Thin-Walled Structures**, 41, 10, 891–900, (2003).
- [36] Liu, Y., Crashworthiness design of multi-corner thin-walled columns, **Thin-Walled Structures**, 46, 12, 1329–1337, (2008).
- [37] Alavi Nia, A., and Parsapour, M., Comparative analysis of energy absorption capacity of simple and multi-cell thin-walled tubes with triangular, square, hexagonal and octagonal sections, **Thin-Walled Structures**, 74, 155–165, (2014).
- [38] Wang, Z., Zhang, Y., and Liu, J., Comparison between five typical reinforced honeycomb structures, In **Proceedings of the 2015 International Conference on Advanced Engineering Materials and Technology** (pp. 704–707). Paris, France: Atlantis Press, (2015).
- [39] Huang, H., and Xu, S., Crashworthiness analysis and bionic design of multi-cell tubes under axial and oblique impact loads, **Thin-Walled Structures**, 144, March, 106333, (2019).
- [40] Wang, J., Zhang, Y., He, N., and Wang, C. H., Crashworthiness behavior of Koch fractal structures, **Materials and Design**, 144, 229–244, (2018).
- [41] Zhang, Y., Wang, J., Wang, C., Zeng, Y., and Chen, T., Crashworthiness of bionic fractal hierarchical structures, **Materials and Design**, 158, 147–159, (2018).
- [42] Li, W., Luo, Y., Li, M., Sun, F., and Fan, H., A more weight-efficient hierarchical hexagonal multi-cell tubular absorber, **International Journal of Mechanical Sciences**, 140, December 2017, 241–249, (2018).
- [43] Wu, Y., Fang, J., He, Y., and Li, W., Crashworthiness of hierarchical circular-joint quadrangular honeycombs, **Thin-Walled Structures**, 133, July, 180–191, (2018).
- [44] Zhang, Y., Xu, X., Wang, J., Chen, T., and Wang, C. H., Crushing analysis for novel bio-inspired hierarchical circular structures subjected to axial load, **International Journal of Mechanical Sciences**, 140, 407–431, (2018).
- [45] Sun, F., Lai, C., Fan, H., and Fang, D., Crushing mechanism of hierarchical lattice structure, **Mechanics of Materials**, 97, 164–183, (2016).
- [46] Tsang, H. H., and Raza, S., Impact energy absorption of bio-inspired tubular sections with structural hierarchy, **Composite Structures**, 195, April, 199–210, (2018).
- [47] Shen, Y., Zhou, H., Wang, H., Liao, B., Wu, X., and Zhang, X., Tribological behavior of diamond-like carbon coatings with patterned structure deposited by the filtered cathodic vacuum arc, **Thin Solid Films**, 685, December, 123–130, (2019).
- [48] Zhang, L., Bai, Z., and Bai, F., Crashworthiness design for bio-inspired multi-cell tubes with quadrilateral, hexagonal and octagonal sections, **Thin-Walled Structures**, 122, 42–51, (2018).
- [49] Fang, J., Gao, Y., Sun, G., Qiu, N., and Li, Q., On design of multi-cell tubes under axial and oblique impact loads, **Thin-Walled Structures**, 95, 115–126,

- (2015).
- [50] Tran, T. N., and Baroutaji, A., Crashworthiness optimal design of multi-cell triangular tubes under axial and oblique impact loading, **Engineering Failure Analysis**, 93, July, 241–256, (2018).
- [51] Güden, M., and Kavi, H., Quasi-static axial compression behavior of constraint hexagonal and square-packed empty and aluminum foam-filled aluminum multi-tubes, **Thin-Walled Structures**, 44, 7, 739–750, (2006).
- [52] Yin, H., Wen, G., Fang, H., Qing, Q., Kong, X., Xiao, J., and Liu, Z., Multiobjective crashworthiness optimization design of functionally graded foam-filled tapered tube based on dynamic ensemble metamodel, **Materials and Design**, 55, 747–757, (2014).
- [53] Zhu, G., Liao, J., Sun, G., and Li, Q., Comparative study on metal/CFRP hybrid structures under static and dynamic loading, **International Journal of Impact Engineering**, 141, 103509, (2020).
- [54] Sun, G., Wang, Z., Yu, H., Gong, Z., and Li, Q., Experimental and numerical investigation into the crashworthiness of metal-foam-composite hybrid structures, **Composite Structures**, 209, 535–547, (2019).
- [55] Yang, H., Lei, H., Lu, G., Zhang, Z., Li, X., and Liu, Y., Energy absorption and failure pattern of hybrid composite tubes under quasi-static axial compression, **Composites Part B: Engineering**, 198, May, 108217, (2020).
- [56] Wang, Z., Jin, X., Li, Q., and Sun, G., On crashworthiness design of hybrid metal-composite structures, **International Journal of Mechanical Sciences**, 171, December, 105380, (2020).
- [57] Zarei, H., Kröger, M., and Albertsen, H., An experimental and numerical crashworthiness investigation of thermoplastic composite crash boxes, **Composite Structures**, 85, 3, 245–257, (2008).
- [58] Alkbir, M. F. M., Sapuan, S. M., Nuraini, A. A., and Ishak, M. R., Fibre properties and crashworthiness parameters of natural fibre-reinforced composite structure: A literature review, **Composite Structures**, 148, 59–73, (2016).
- [59] Barnett, P. R., Hulett, B. M., and Penumadu, D., Crashworthiness of recycled carbon fiber composites, **Composite Structures**, 272, May, 114232, (2021).
- [60] Acar, E., Altin, M., and Güler, M. A., Evaluation of various multi-cell design concepts for crashworthiness design of thin-walled aluminum tubes, **Thin-Walled Structures**, 142, 227–235, (2019).
- [61] Bahramian, N., and Khalkhali, A., Crashworthiness topology optimization of thin-walled square tubes, using modified Bidirectional Evolutionary Structural Optimization approach, **Thin-Walled Structures**, 147, 106524, (2020).
- [62] Sun, G., Pang, T., Xu, C., Zheng, G., and Song, J., Energy absorption mechanics for variable thickness thin-walled structures, **Thin-Walled Structures**, 118, 214–228, (2017).
- [63] Montazeri, S., Elyasi, M., and Moradpour, A., Investigating the energy absorption, SEA and crushing performance of holed and grooved thin-walled tubes under axial loading with different materials, **Thin-Walled Structures**, 131, 646–653, (2018).
- [64] Tanlak, N., and Sonmez, F. O., Optimal shape design of thin-walled tubes under high-velocity axial impact loads, **Thin-Walled Structures**, 84, 302–312, (2014).
- [65] Nasir Hussain, N., Prakash Regalla, S., and Daseswara Rao, Y. V., Low velocity Impact Characterization of Glass Fiber Reinforced Plastics for Application of Crash Box, **Materials Today: Proceedings**, 4, 2, 3252–3262, (2017).

- [66] Zheng, G., Wu, S., Sun, G., Li, G., and Li, Q., Crushing analysis of foam-filled single and bitubal polygonal thin-walled tubes, **International Journal of Mechanical Sciences**, 87, 226–240, (2014).
- [67] Pirmohammad, S., and Esmaeili Marzdashti, S., Crashworthiness optimization of combined straight-tapered tubes using genetic algorithm and neural networks, **Thin-Walled Structures**, 127, 318–332, (2018).
- [68] Yin, H., Wen, G., Hou, S., and Chen, K., Crushing analysis and multiobjective crashworthiness optimization of honeycomb-filled single and bitubular polygonal tubes, **Materials and Design**, 32, 8–9, 4449–4460, (2011).
- [69] Ming, S., Song, Z., Zhou, C., Du, K., Teng, C., Wang, Y., ... Wang, B., The crashworthiness design of metal/CFRP hybrid tubes based on origami-ending approach: Experimental research, **Composite Structures**, 279, 114843, (2021).
- [70] Zhou, C., Wang, B., Ma, J., and You, Z., Dynamic axial crushing of origami crash boxes, **International Journal of Mechanical Sciences**, 118, 1–12, (2016).
- [71] Yuan, L., Shi, H., Ma, J., and You, Z., Quasi-static impact of origami crash boxes with various profiles, **Thin-Walled Structures**, 141, April, 435–446, (2019).
- [72] Wang, B., and Zhou, C., The imperfection-sensitivity of origami crash boxes, **International Journal of Mechanical Sciences**, 121, 58–66, (2017).
- [73] Zhou, C., Zhou, Y., and Wang, B., Crashworthiness design for trapezoid origami crash boxes, **Thin-Walled Structures**, 117, 257–267, (2017).
- [74] Yao, S., Zhu, H., Liu, M., Li, Z., and Xu, P., Energy absorption of origami tubes with polygonal cross-sections, **Thin-Walled Structures**, 157, 107013, (2020).
- [75] Song, J., Chen, Y., and Lu, G., Axial crushing of thin-walled structures with origami patterns, **Thin-Walled Structures**, 54, 65–71, (2012).
- [76] Xiang, X. M., Lu, G., and You, Z., Energy absorption of origami inspired structures and materials, **Thin-Walled Structures**, 157, September, (2020).
- [77] Ye, H., Ma, J., Zhou, X., Wang, H., and You, Z., Energy absorption behaviors of pre-folded composite tubes with the full-diamond origami patterns, **Composite Structures**, 221, 800, 110904, (2019).
- [78] Ye, H., Zhou, X., Ma, J., Wang, H., and You, Z., Axial crushing behaviors of composite pre-folded tubes made of KFRP/CFRP hybrid laminates, **Thin-Walled Structures**, 149, 800, 106649, (2020).
- [79] Bigdeli, A., and Nouri, M. D., A crushing analysis and multi-objective optimization of thin-walled five-cell structures, **Thin-Walled Structures**, 137, 1–18, (2019).
- [80] Wang, Z., Li, Z., Shi, C., and Zhou, W., Mechanical performance of vertex-based hierarchical vs square thin-walled multi-cell structure, **Thin-Walled Structures**, 134, 102–110, (2019).
- [81] Wang, Z., Liu, J., and Yao, S., On folding mechanics of multi-cell thin-walled square tubes, **Composites Part B: Engineering**, 132, 17–27, (2018).
- [82] Kenyon, D., Shu, Y., Fan, X., Reddy, S., Dong, G., and Lew, A. J., Parametric design of multi-cell thin-walled structures for improved crashworthiness with stable progressive buckling mode, **Thin-Walled Structures**, 131, 76–87, (2018).
- [83] Chen, S., Yu, H., and Fang, J., A novel multi-cell tubal structure with circular corners for crashworthiness, **Thin-Walled Structures**, 122, 329–343, (2018).
- [84] Xie, S., Yang, W., Wang, N., and Li, H., Crashworthiness analysis of multi-cell square tubes under axial loads, **International Journal of Mechanical Sciences**,

- 121, September 2016, 106–118, (2017).
- [85] Liu, S., Tong, Z., Tang, Z., Liu, Y., and Zhang, Z., Bionic design modification of non-convex multi-corner thin-walled columns for improving energy absorption through adding bulkheads, **Thin-Walled Structures**, 88, 70–81, (2015).
- [86] Zhang, X., Wen, Z., and Zhang, H., Axial crushing and optimal design of square tubes with graded thickness, **Thin-Walled Structures**, 84, 263–274, (2014).
- [87] Abbasi, M., Reddy, S., Ghafari-Nazari, A., and Fard, M., Multiobjective crashworthiness optimization of multi-cornered thin-walled sheet metal members, **Thin-Walled Structures**, 89, 31–41, (2015).
- [88] Wu, Y., Fang, J., Cheng, Z., He, Y., and Li, W., Crashworthiness of tailored-property multi-cell tubular structures under axial crushing and lateral bending, **Thin-Walled Structures**, 149, January, 106640, (2020).
- [89] Qiu, N., Gao, Y., Fang, J., Feng, Z., Sun, G., and Li, Q., Crashworthiness analysis and design of multi-cell hexagonal columns under multiple loading cases, **Finite Elements in Analysis and Design**, 104, 89–101, (2015).
- [90] Zhou, J., Qin, R., and Chen, B., Energy absorption properties of multi-cell thin-walled tubes with a double surface gradient, **Thin-Walled Structures**, 145, (2019).
- [91] Kim, H.-S., New extruded multi-cell aluminum profile for maximum crash energy absorption and weight efficiency, **Thin-Walled Structures**, 40, 4, 311–327, (2002).
- [92] Harhash, M., Kultz, M., Richter, J., Hornig, A., Gude, M., and Palkowski, H., Trigger geometry influencing the failure modes in steel/polymer/steel sandwich crashboxes: Experimental and numerical evaluation, **Composite Structures**, 262, October, 113619, (2021).
- [93] Szlosarek, R., Luft, J., Wittig, F., Ullmann, M., Prah, U., Kawalla, R., and Kröger, M., Improving the crashworthiness of magnesium AZ31 by tapering and triggering, **Thin-Walled Structures**, 162, February, 107565, (2021).
- [94] Estrada, Q., Szwedowicz, D., Silva-Aceves, J., Majewski, T., Vergara-Vazquez, J., and Rodriguez-Mendez, A., Crashworthiness behavior of aluminum profiles with holes considering damage criteria and damage evolution, **International Journal of Mechanical Sciences**, 131–132, 776–791, (2017).
- [95] LI, Z. gang, YANG, H. feng, ZHANG, Z. sheng, SUN, Y., HAN, Z. tong, and WEI, J. fei, Crashworthiness of extruded magnesium thin-walled square tubes, **Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)**, 29, 6, 1223–1232, (2019).
- [96] Mahbod, M., and Asgari, M., Energy absorption analysis of a novel foam-filled corrugated composite tube under axial and oblique loadings, **Thin-Walled Structures**, 129, 58–73, (2018).
- [97] Gedikli, H., Crashworthiness optimization of foam-filled tailor-welded tube using coupled finite element and smooth particle hydrodynamics method, **Thin-Walled Structures**, 67, 34–48, (2013).
- [98] Goel, M. D., Deformation, energy absorption and crushing behavior of single-, double- and multi-wall foam filled square and circular tubes, **Thin-Walled Structures**, 90, 1–11, (2015).
- [99] Darvizeh, A., Meshkinzar, A., Alitavoli, M., and Rajabiehfard, R., Low velocity impact of empty and foam filled circumferentially grooved thick-walled circular tubes, **Thin-Walled Structures**, 110, 97–105, (2017).
- [100] Mozafari, H., Molatefi, H., Crupi, V., Epasto, G., and Guglielmino, E., In plane

- compressive response and crushing of foam filled aluminum honeycombs, **Journal of Composite Materials**, 49, 26, 3215–3228, (2015).
- [101] Gulcimen Cakan, B., Ensarioglu, C., and Cakir, M. C., Farklı oranlarda alüminyum köpük takviyeli çarpışma-kutularının mekanik performanslarının karşılaştırılması, **Bahkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, 21, 1, 295–305, (2019).
- [102] Chen, L., Zhang, J., Du, B., Zhou, H., Liu, H., Guo, Y., ... Fang, D., Dynamic crushing behavior and energy absorption of graded lattice cylindrical structure under axial impact load, **Thin-Walled Structures**, 127, 333–343, (2018).
- [103] Ebrahimi, S., and Vahdatazad, N., Multiobjective optimization and sensitivity analysis of honeycomb sandwich cylindrical columns under axial crushing loads, **Thin-Walled Structures**, 88, 90–104, (2015).
- [104] Baykasoğlu, A., Baykasoğlu, C., and Cetin, E., Multi-objective crashworthiness optimization of lattice structure filled thin-walled tubes, **Thin-Walled Structures**, 149, (2020).
- [105] Liu, H., Chng, Z. X. C., Wang, G., and Ng, B. F., Crashworthiness improvements of multi-cell thin-walled tubes through lattice structure enhancements, **International Journal of Mechanical Sciences**, 210, 106731, (2021).
- [106] Wang, H., Su, M., and Hao, H., The quasi-static axial compressive properties and energy absorption behavior of ex-situ ordered aluminum cellular structure filled tubes, **Composite Structures**, 239, 2, 112039, (2020).
- [107] Wei, L., Zhao, X., Yu, Q., and Zhu, G., A novel star auxetic honeycomb with enhanced in-plane crushing strength, **Thin-Walled Structures**, 149, December, 106623, (2020).
- [108] Gao, Q., Ge, C., Zhuang, W., Wang, L., and Ma, Z., Crashworthiness analysis of double-arrowed auxetic structure under axial impact loading, **Materials and Design**, 161, 22–34, (2019).
- [109] Mohsenizadeh, S., Alipour, R., Shokri Rad, M., Farokhi Nejad, A., and Ahmad, Z., Crashworthiness assessment of auxetic foam-filled tube under quasi-static axial loading, **Materials and Design**, 88, 258–268, (2015).
- [110] Simpson, J., and Kazancı, Z., Crushing investigation of crash boxes filled with honeycomb and re-entrant (auxetic) lattices, **Thin-Walled Structures**, 150, July, 106676, (2020).
- [111] Zhao, X., Gao, Q., Wang, L., Yu, Q., and Ma, Z. D., Dynamic crushing of double-arrowed auxetic structure under impact loading, **Materials and Design**, 160, 527–537, (2018).
- [112] Wang, H., Lu, Z., Yang, Z., and Li, X., In-plane dynamic crushing behaviors of a novel auxetic honeycomb with two plateau stress regions, **International Journal of Mechanical Sciences**, 151, December, 746–759, (2019).
- [113] Gao, Q., Zhao, X., Wang, C., Wang, L., and Ma, Z., Multi-objective crashworthiness optimization for an auxetic cylindrical structure under axial impact loading, **Materials and Design**, 143, 120–130, (2018).
- [114] Smith, D. J., Graciano, C. A., Teixeira, P., Martínez, G., and Pertuz, A., Energy absorption characteristics of coiled expanded metal tubes under axial compression, **Latin American Journal of Solids and Structures**, 13, 16, 2845–2860, (2016).
- [115] Wu, F., Xiao, X., Dong, Y., Yang, J., and Yu, Y., Quasi-static axial crush response and energy absorption of layered composite structure formed from novel crochet-sintered mesh tube and thin-walled tube, **Composite Structures**,

- 192, 592–604, (2018).
- [116] Wu, F., Xiao, X., Yang, J., and Gao, X., Quasi-static axial crushing behaviour and energy absorption of novel metal rope crochet-sintered mesh tubes, **Thin-Walled Structures**, 127, July 2017, 120–134, (2018).
- [117] Wu, F., Liu, T., Xiao, X., Zhang, Z., and Hou, J., Static and dynamic crushing of novel porous crochet-sintered metal and its filled composite tube, **Composite Structures**, 209, May, 830–843, (2019).
- [118] Kang, K. J., Wire-woven cellular metals: The present and future, **Progress in Materials Science**, 69, 213–307, (2015).
- [119] Yang, X., Ma, J., Wen, D., and Yang, J., Crashworthy design and energy absorption mechanisms for helicopter structures: A systematic literature review, **Progress in Aerospace Sciences**, 114, 100618, (2020).
- [120] Zarei Mahmoudabadi, M., and Sadighi, M., A theoretical and experimental study on metal hexagonal honeycomb crushing under quasi-static and low velocity impact loading, **Materials Science and Engineering A**, 528, 15, 4958–4966, (2011).
- [121] Nian, Y., Wan, S., Li, M., and Su, Q., Crashworthiness design of self-similar graded honeycomb-filled composite circular structures, **Construction and Building Materials**, 233, (2020).
- [122] Zarei, H., and Kröger, M., Optimum honeycomb filled crash absorber design, **Materials and Design**, 29, 1, 193–204, (2008).
- [123] Zhang, Y., Lu, M., Wang, C. H., Sun, G., and Li, G., Out-of-plane crashworthiness of bio-inspired self-similar regular hierarchical honeycombs, **Composite Structures**, 144, 1–13, (2016).
- [124] He, Q., and Ma, D. W., Parametric study and multi-objective crashworthiness optimisation of reinforced hexagonal honeycomb under dynamic loadings, **International Journal of Crashworthiness**, 20, 5, 495–509, (2015).
- [125] Yang, X., Ma, J., Sun, Y., and Yang, J., Ripplecomb: A novel triangular tube reinforced corrugated honeycomb for energy absorption, **Composite Structures**, 202, May, 988–999, (2018).
- [126] Santosa, S., and Wierzbicki, T., Crash behavior of box columns filled with aluminum honeycomb or foam, **Computers & Structures**, 68, 4, 343–367, (1998).
- [127] Santosa, S., and Wierzbicki, T., The concept of double-walled sandwich columns for energy absorption, **International Journal of Crashworthiness**, 4, 2, 175–198, (1999).
- [128] Tarlochan, F., Samer, F., Hamouda, A. M. S., Ramesh, 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).
- [129] Yang, S., and Qi, C., Multiobjective optimization for empty and foam-filled square columns under oblique impact loading, **International Journal of Impact Engineering**, 54, 177–191, (2013).
- [130] Liu, Q., Mo, Z., Wu, Y., Ma, J., Pong Tsui, G. C., and Hui, D., Crush response of CFRP square tube filled with aluminum honeycomb, **Composites Part B: Engineering**, 98, 406–414, (2016).
- [131] Wang, Z., Lu, Z., Yao, S., Zhang, Y., Hui, D., and Feo, L., Deformation mode evolutionary mechanism of honeycomb structure when undergoing a shallow inclined load, **Composite Structures**, 147, 211–219, (2016).
- [132] Altin, M., Acar, E., and Güler, M. A., Foam filling options for crashworthiness

- optimization of thin-walled multi-tubular circular columns, **Thin-Walled Structures**, 131, March, 309–323, (2018).
- [133] Danişmanlık, R. P., Kompozit Sürekli Elyaf Takviyeli Termoplastik Malzemeler Eğitimi, In **BTSO**, (2017).
- [134] Siromani, D., Henderson, G., Mikita, D., Mirarchi, K., Park, R., Smolko, J., ... Tan, T. M., An experimental study on the effect of failure trigger mechanisms on the energy absorption capability of CFRP tubes under axial compression, **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, 64, 25–35, (2014).
- [135] Ma, Q., Zha, Y., Dong, B., and Gan, X., Structure design and multiobjective optimization of CFRP/aluminum hybrid crash box, **Polymer Composites**, 41, 10, 4202–4220, (2020).
- [136] Huang, Z., and Zhang, X., Crashworthiness and optimization design of quadruple-cell Aluminum/CFRP hybrid tubes under transverse bending, **Composite Structures**, 235, October, 111753, (2020).
- [137] Liu, Q., Liufu, K., Cui, Z., Li, J., Fang, J., and Li, Q., Multiobjective optimization of perforated square CFRP tubes for crashworthiness, **Thin-Walled Structures**, 149, February, 106628, (2020).
- [138] Bernatas, R., Dagneou, S., Despax-Ferreres, A., and Barasinski, A., Recycling of fiber reinforced composites with a focus on thermoplastic composites, **Cleaner Engineering and Technology**, 5, 100272, (2021).
- [139] Aliyeva, N., Sas, H. S., and Saner Okan, B., Recent developments on the overmolding process for the fabrication of thermoset and thermoplastic composites by the integration of nano/micron-scale reinforcements, **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, 149, June, 106525, (2021).
- [140] Obande, W., Ó Brádaigh, C. M., and Ray, D., Continuous fibre-reinforced thermoplastic acrylic-matrix composites prepared by liquid resin infusion – A review, **Composites Part B: Engineering**, 215, February, (2021).
- [141] Ramaswamy, K., O’Higgins, R. M., Lyons, J., McCarthy, M. A., and McCarthy, C. T., An evaluation of the influence of manufacturing methods on interlocked aluminium-thermoplastic composite joint performance, **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, 143, January, 106281, (2021).
- [142] Striewe, J., Reuter, C., Sauerland, K. H., and Tröster, T., Manufacturing and crashworthiness of fabric-reinforced thermoplastic composites, **Thin-Walled Structures**, 123, December, 501–508, (2018).
- [143] Tila, K., Otomotiv Pazarında Karbon ve Cam Elyaf Kullanımı Sunumu, In **BTSO**. Bursa, (2017).
- [144] Kumar, A. P., Shunmugasundaram, M., Sivasankar, S., and Amuthavalli, N. K., Evaluation of axial crashworthiness performance of composite wrapped metallic circular tubular structures, **Materials Today: Proceedings**, 27, 1268–1272, (2020).
- [145] Ha, N. S., and Lu, G., A review of recent research on bio-inspired structures and materials for energy absorption applications, **Composites Part B: Engineering**, 181, October 2019, 107496, (2020).
- [146] Sun, G., Li, S., Liu, Q., Li, G., and Li, Q., Experimental study on crashworthiness of empty/aluminum foam/honeycomb-filled CFRP tubes, **Composite Structures**, 152, 969–993, (2016).
- [147] Schmitt, B., The Making Of The Lexus LFA Supercar. An Inside Report, Chapter 2: In The Clean Room, **The Truth About Car**, (2012) Retrieved from <https://www.thetruthaboutcars.com/2012/07/the-making-of-the-lexus-lfa-supercar-an-inside-report-chapter-2-in-the-clean-room/>.