



Investigation of the crushing performance of bio-inspired structure filled thin-walled hybrid aluminum tubes under axial loadings

Murat Altın^{1*}, Selin Arıcı²

¹Department of Automotive Engineering, Faculty of Technology, Gazi University, 06560, Ankara, Türkiye

²Department of Automotive Engineering, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Gazi University, 06500, Ankara, Türkiye

Highlights:

- Bio-inspired energy absorbing profile design
- Specific energy absorption and crush force efficiency
- Hybrid energy absorption profiles

Keywords:

- Passive safety systems
- Hybrid energy absorbers
- Bio-inspired structures
- Specific energy absorption
- Crush force efficiency

Article Info:

Research Article

Received: 25.04.2023

Accepted: 07.07.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1287380

Acknowledgement:

This study was supported by Gazi University Scientific Research Projects Unit with the number FYL-2021-7392

Correspondence:

Author: Murat Altın

e-mail: maltin@gazi.edu.tr

phone: +90 312 202 8663

Graphical/Tabular Abstract

One of the most critical parts in the design of vehicle structures is energy absorbing profiles. In this study, bio-inspired energy absorbing structures were designed by taking inspiration from nature. The designed structures were produced with a 3D printer with SLA technology. Hybrid structures were obtained by using aluminum profiles on the exterior of these structures. In the continuation of the study, quasi-static experiments of hybrid structures are included. The hybrid structures were deformed by a plate at an angle of 0° at a distance of 80 mm from a plate. Performance metrics were calculated as a result of the experiments (Figure A).

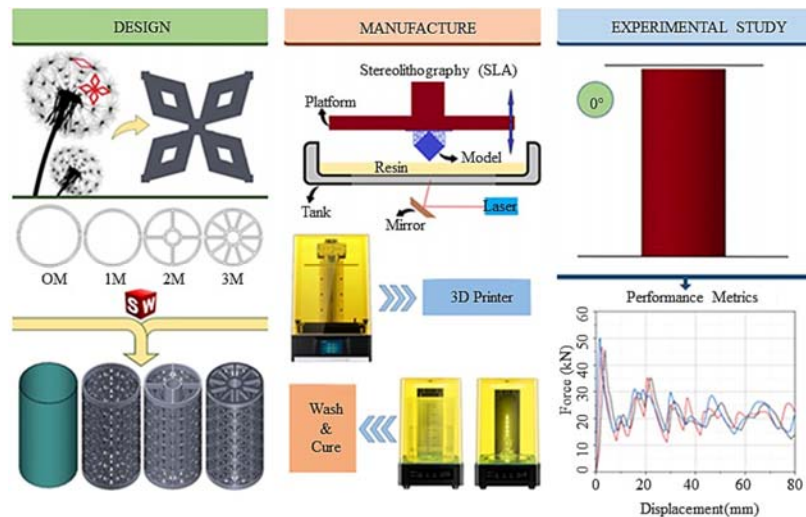


Figure A. The design, manufacture and testing processes of hybrid profiles

Purpose: The study aims to transform the designed and produced bio-inspired structures into alternative structures to traditional energy absorbers as a result of the performance metrics obtained through experimental studies.

Theory and Methods: Hybrid energy absorbing structures were designed with the SolidWorks program. For the bio-inspired structure, 405 nm resin and Al6063 material were preferred for the outer profile. Experiments were deformed with a 0° angled plate at a speed of 5 mm/min. Performance metrics were calculated as a result of the experiments.

Results: In the experiments performed at 0° deformation angle, the highest value in terms of total absorbed energy was obtained in the 3M model. Although the maximum crushing force is the lowest in the hollow aluminum energy absorbing structure, the profile with the highest value in terms of average crushing force is the 3M model. Therefore, the highest crushing force efficiency was obtained from the 3M model with 54.11%. The 0M model showed the best performance in terms of specific energy absorption capacity, and the 3M model in terms of crush force efficiency.

Conclusion: The present review outlines the major trends in research and development of bio-inspired structures, concentrating on the most recent work. According to experimental results, it can be found that the crushing force efficiency of 3M is 8.63% higher than that of conventional empty circular tubes, while the specific energy absorption of 3M is 13.28 kJ/kg lower than that of 0M.



Eksenel yükler altında bio-ilhamlı yapı dolgulu ince cidarlı alüminyum hibrit tüplerin ezilme performanslarının incelenmesi

Murat Altın^{1*}, Selin Arıcı²

¹Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, 06560, Ankara, Türkiye

²Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, 06500, Ankara, Türkiye

ÖNEÇIKANLAR

- Bio-ilhamlı enerji sönümleyici profil tasarımı
- Spesifik enerji sönümleme ve ezilme kuvveti verimi
- Hibrit enerji sönümleyici profiller

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 25.04.2023

Kabul: 07.07.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1287380

Anahtar Kelimeler:

Pasif güvenlik sistemleri,
hibrit enerji sönümleyiciler,
biyo-ilhamlı yapılar,
spesifik enerji sönümleme,
ezilme kuvveti verimi

ÖZ

Araçlar ile ilgili kazalar dünya çapında önemli bir sorundur ve bu durum toplum için büyük bir ekonomik kayıp oluşturmaktadır. Bilindiği üzere, diğer tüm kaza türlerinde olduğu gibi (düşük hızlı kazalar hariç), düz yolda hızla hareket eden araçların çarpması çok kısa bir zaman diliminde gerçekleşir. Taşıt yapılarının tasarımında en önemli parçalardan biri enerji sönümleyici profillerdir. Enerji sönümleyici profillerin tasarımında ve test edilmesinde, kaza esnasında en üst seviyede koruma sağlaması istenmektedir. Araçlarda kazalardan kaynaklanan hasarların azaltılması için, son yıllarda çok çeşitli enerji sönümleyici türleri araştırılmıştır. Bu alanda otomotiv endüstrisindeki bir başka önemli eğilim, otomobillerde biyo-ilhamlı geometrik kesit gibi farklı yapıların enerji sönümleyiciler olarak kullanılmasıdır. Bu çalışmada, hibrit tüplerin enerji sönümleme kabiliyetini geliştirmek için karahindibanın yapısından esinlenerek üç farklı biyo-ilhamlı yapı tasarımı yapılmıştır (1M, 2M ve 3M). Tüm modeller aynı koşullarda deforme edilmiştir. Hibrit tüpler ile geleneksel boş dairesel tüpler (0M) arasında yapılan karşılaştırmada 3M modelinin ezme kuvveti verimliliğinin %8,63, enerji sönümleme kapasitesinin %22,64 arttığı belirlenmiştir. Geleneksel boş dairesel tüplerin tüm modelleri içerisinde en yüksek spesifik enerji sönümleme kapasitesine (13,28 kJ/kg) sahip olduğu görülmüştür.

Investigation of the crushing performance of bio-inspired structure filled thin-walled hybrid aluminum tubes under axial loadings

HIGHLIGHTS

- Bio-inspired energy absorbing profile design
- Specific energy absorption and crush force efficiency
- Hybrid energy absorbing profiles

Article Info

Research Article

Received: 25.04.2023

Accepted: 07.07.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1287380

Keywords:

Passive safety systems,
hybrid energy absorbers,
bio-inspired structures,
specific energy absorption,
crush force efficiency

ABSTRACT

Vehicle-related accidents are a significant problem worldwide and they do indeed lead to a substantial economic loss for society. It is well known that, as with all other impact types (except the low speed crash), the crash of a rapidly moving vehicle on a straight road occurs in a short period of time. It is desired that the damage on the vehicle will be at a minimum level during this time. One of the most important parts in the design of vehicle structures is energy absorbing profiles. In the design and testing of energy absorbing profiles, it is required to provide the highest level of protection during an accident. Various types of energy absorbers have been investigated in recent years to reduce the damage caused by accidents in vehicles. Another important trend in the automotive industry in this area is the use of different structures, such as bio-inspired geometric cross section, as energy absorbers in automobiles. In this study, three different bio-inspired structures were designed (1M, 2M and 3M) inspired by the structure of the dandelion to improve the energy absorption ability of hybrid tubes. All models were deformed under the same conditions. In the comparison between hybrid tubes and conventional hollow circular tubes (0M), it was determined that the crushing force efficiency of the 3M model increased by 8.63% and the energy absorption capacity increased by 22.64%. It can be seen that the conventional hollow circular tubes (13.28 kJ/kg) have the highest energy absorption capacity in all hybrid these tubes.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : *maltin@gazi.edu.tr, selin.arici@gazi.edu.tr / Tel: +90 312 202 8663

1. Giriş (Introduction)

Otomotiv endüstrisi, ülkelerin en önemli ticari kazanç alanlarından birisidir. Artan dünya nüfusu ile toplumsal ve bireysel olarak otomobillere olan talep her geçen gün pozitif yönde ivmelenmektedir. Buna paralel olarak taşıtlara olan yüksek talep beraberinde kaza sayılarının da artmasına yol açmaktadır. Bu yüzden araç çarpışma dayanıklılığı ve güvenliği gibi alanlar, araştırma-geliştirme çalışmalarında önemli bir konu haline gelmiştir [1].

Otomotiv sektöründe üzerine çalışma yapılan en önemli konulardan bir tanesi güvenlik sistemleridir. Otomobillerde güvenlik sistemleri aktif ve pasif olmak üzere iki temel alandan oluşmaktadır. Pasif güvenlik sistemleri, kazanın kaçınılmaz olduğu durumda araç içerisindeki zarar görmemesini sağlarken aktif güvenlik sistemleri kaza oluşma ihtimalinin en aza indirgenmesi ya da hiç oluşmaması için kullanılmaktadır. Pasif güvenlik sistemlerine hava yastığı, emniyet kemeri vb., aktif güvenlik sistemlerine ise ABS (Anti-lock Brake System), şerit takip sistemi vb. örnek verilebilir. Tüpler üzerine yapılan çalışmalar çok öncelere dayanmaktadır. Bu konuda ilk çalışmalar 1970 yıllarda başlamıştır. Öncü çalışma Alexander tüp katlanma modelidir ve 1960 yılında geliştirilmiştir [2]. Bu çalışmayı takiben 1980-1990 yılları arasında kare ve dairesel yapıdaki enerji sönümleyici profiller üzerine Wierzbicki ve Abramowicz tarafından birçok çalışma yapılmıştır [3-5].

Pasif güvenlik sistemi elemanlarından biri olan enerji sönümleyici yapılar üzerine geçmişten günümüze çok çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmaların bir bölümünde silindirik [6, 7], kare [8-10], dikdörtgen [11, 12] ve konik [13-15] gibi farklı geometrik yapılarıdaki enerji sönümleyici profiller incelenmiş ve birbirleriyle kıyaslanmıştır. Çalışmalar sonunda plastik deformasyon davranışları ve enerji sönümleme kapasiteleri belirlemek en iyi enerji sönümleyici yapıların ortaya çıkartılması hedeflenmiştir [16-19].

Çalışmaların başka bir bölümünde enerji sönümleyici yapının boyutları ve et kalınlıkları değiştirilerek performansları olan etkileri incelenmiştir. Ayrıca en iyi performans özelliklerine sahip enerji sönümleyici yapıların belirlenmesi için optimizasyon çalışmaları da yapılmıştır. Qi C. vd. [20] AA6060-T4 malzemesine sahip çok ve tek hücreli enerji sönümleyici yapıların performanslarının belirlenmesi üzerine çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. 250 mm yüksekliğe, 80 mm kenar uzunluğa ve 2 mm et kalınlığına sahip düz ve konik yapıdaki kare profiller tasarlamışlardır. Tasarlanan bu yapılar Ls-Dyna sonlu elemanlar analiz programı kullanılarak 10 m/s deformasyon hızında deformasyona uğratılmıştır. Çalışmanın devamında çok hücreli konik enerji sönümleyici yapıların et kalınlığını 1,0 mm, 1,5 mm, 2,0 mm ve 2,5 mm olarak farklı açılarında deformasyona uğratmışlardır. Sonuç olarak et kalınlığı 2,5 mm'den 1,0 mm'ye düşürüldüğünde özgül enerji sönümleme kapasitesinin 25,603 kJ/kg'dan 11,834 kJ/kg'a düştüğünü belirlemişlerdir. Aynı zamanda profillerin koniklik açılarının artmasının özgül enerji sönümleme kapasitesini ve maksimum ezilme kuvvetini azalttığını belirlemişlerdir. Altın M. [21] çalışmasında kare ve dairesel kesitli farklı geometrilerdeki on adet enerji sönümleyici yapının farklı deformasyon açılarındaki çarpışma performanslarını incelemiştir. Al 6063 malzemesine sahip dairesel profillerin çapı 80 mm, kare profillerin kenar uzunlukları 80 mm ve yükseklikleri 180 mm olacak şekilde tasarlanmıştır. Çalışma sonucunda 8 hücreye ayrılmış dairesel profilin (DT4) ezilme kuvveti verimini %85, özgül enerji sönümleme kapasitesi 33,03 kJ/kg bulunarak en iyi sonucu verdiği ve deformasyon açısının artması ile toplam sönümleme miktarının ters orantılı olduğunu bulmuştur. Vinayagar K. vd. [22] çalışmalarında dairesel yapıdaki bir enerji sönümleyici içine üçgen, kare ve altıgen profiller yerleştirilerek yeni tasarımlar oluşturmuşlardır. Çelik sacdan üretilen enerji sönümleyici

yapılarda dış silindir boyutu 90 mm olacak şekilde sabit tutulup, iç kısımlara yerleştirilen profillerin çapları 60 mm, 70 mm ve 80 mm olacak şekilde değiştirilerek 9 adet farklı yapının deneysel testleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel testlerde enerji sönümleyici yapılar 10 mm/min hıza sahip bir plaka ile deforme edilmiştir. Çalışmalar sonucunda iç profili altıgen olan yapılar, diğer yapılara göre daha fazla enerji sönümleme kabiliyetine sahip olduğu ve bütün yapılarda iç profilin yerleştirildiği çapın artmasıyla özgül enerji sönümleme miktarının arttığı bulunmuştur. Zarei H. vd. [23] çalışmalarında alüminyum ve kompozit malzemelerden oluşan kare ve altıgen şekilde enerji sönümleyici yapılar tasarlayarak çarpışma performanslarını incelemişlerdir. Her iki yapı için et kalınlığı 2,4 mm ve 2,7 mm alınmıştır. Çalışma deneysel ve nümerik olarak iki aşamadan meydana gelmektedir. Deneysel çalışmalarda profiller farklı hızlarda deformasyona uğratılmıştır. Deneysel sonuçlarda özgül enerji sönümleme miktarı, kare yapı için 10,4 m/s hız ve 2,7 mm et kalınlığında, altıgen yapı için de 8,9 m/s hız ve 2,4 mm et kalınlığında en fazla değerde çıkmıştır. Nümerik analiz aşamasında Ls-Dyna sonlu elemanlar analiz programı kullanılmıştır. Profillerin et kalınlığı 1 mm-4 mm, kenar uzunluğu 70 mm-120 mm ve yükseklik 100 mm-350 mm arasında değişecek şekilde çok sayıda analiz yapılarak optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonunda kompozit malzemeye sahip enerji sönümleyici yapıların alüminyumlara göre %17 daha fazla enerji sönümleme kapasitesine sahip olduğunu bulmuşlardır. Araştırmacılar son zamanlarda farklı mühendislik çalışmaları için yıllar boyunca evrim geçirerek kendilerini zor şartlara karşı koruyan biyolojik yapılar üzerine çalışmaya başlamışlardır. Doğadaki bitki ve hayvanlar, araştırmacılar için yeni enerji sönümleyici tasarımların ilham kaynağı olmuştur. Günümüzde çarpışma performanslarının geliştirilmesini sağlayan yeni bio-ilhamlı tasarımlar geleneksel enerji sönümleyicilere alternatif bir yapı olmaktadır [24-27]. Gergedan böceği kanatlarının mikro yapısından ilham alan Zhang L. vd. [28] AA6060-T4 malzemesini kullanarak dörtgen, altıgen ve sekizgen enerji sönümleyici yapılar geliştirmişlerdir. Geliştirilen yapıları Ls-Dyna sonlu elemanlar analiz programı ile geleneksel dörtgen, altıgen ve sekizgen türdeki enerji sönümleyiciler ile karşılaştırmışlardır. Analizlerde, geliştirilen yeni yapının alt yüzeyi sabit tutulmuş ve 10 m/s hızla bir levha tarafından 168 mm deforme edilmiştir. Çalışmanın sonunda en iyi performans değerlerini O-BMCT-6 sekizgen yapıya sahip profillerin verdiğini tespit etmişlerdir. Çalışmanın ilerleyen aşamalarında bu profiller farklı değişkenler kullanılarak optimize edilmiş ve en iyi enerji sönümleyici yapıların et kalınlığının 2,04 mm ve boru çapı 10,24 mm olduğunu belirlemişlerdir. Bir bambu mikro yapısına bakıldığında diyaframı ve sert bir şekle sahip olduğu görülür. Bambunun bu özelliği Liu S. ve arkadaşlarına [29] yeni bir enerji sönümleyici tasarımı yapmaları için ilham kaynağı olmuştur. Çalışmalarında enerji sönümleme özelliklerini iyileştirmek için çok köşeli ince duvarlı profillere diyafram bölmeleri eklemişlerdir. Yeni yapılar 3 mm et kalınlığına, 200 mm yüksekliğe ve 80 mm genişliğe sahip olarak tasarlanmıştır. Tasarlanan yeni yapılar ile kare geometriye sahip geleneksel enerji sönümleyici profillerin enerji sönümleme kapasiteleri Ls-Dyna sonlu elemanlar analiz programı kullanılarak incelenmiştir. Analiz sonuçlarında, yeni tasarımların geleneksel yapılara göre daha iyi enerji sönümlediği ve katlanmalar esnasında genişleme ve büzülme deformasyon moduna geçmesini engellediği bulunmuştur. Yang X. vd. [30] geleneksel üçgen, kare, kagome ve altıgen yapıların çarpışma performanslarını, at nalı şeklindeki mezo yapılardan oluşan biyo-ilhamlı alüminyum petek profiller ile karşılaştırmışlardır. Profiller 1 m/s hıza sahip bir plaka ile deforme edilmiştir. Çalışma sonucunda mezo yapıların özgül enerji sönümleme kapasitesi üçgen petek yapısına göre %37, kare petek yapısına göre %38,4, altıgen petek yapısına göre %6,5 ve kagome petek yapısına göre ise %12,4 daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir.

Mantis karidesinin telzon kısmından ilham alınarak AlSi10Mg malzemesine sahip, 0,4 mm et kalınlığında yeni enerji sönümleyici yapılar tasarlayan Yang J. vd. [31] çalışmalarında dalga boyu ve genliğin değişken kabul edildiği bir optimizasyon çalışması gerçekleştirmişlerdir. Genlik $6 < A < 10$ mm ve dalga boyu $6 < \lambda < 14$ mm olacak şekilde birbirinden farklı birçok yapı tasarlanmıştır. Yapılan nümerik analizler sonucunda dalga boyunun genliğe göre enerji sönümleme kabiliyetinde daha etkin olduğu ve optimizasyonlar sonucunda elde edilen yapı için en ideal dalga boyu 6 mm, genliğin ise 8 mm olduğu bulunmuşlardır.

Çalışma kapsamında pasif güvenlik sistemi elemanlarından birisi olan enerji sönümleyici profillerin çarpışma performanslarının geliştirilmesi amaçlanmıştır. Özgünlük bakımından karahindiba bitkisinden esinlenilerek 3D (3 boyutlu) yazıcı teknolojisi ile üretilen profillerin dış kısımlarına dairesel geometriye sahip alüminyum profiller yerleştirilmiş ve hibrit enerji sönümleyici yapılar elde edilmiştir. Daha sonra hibrit profiller ile geleneksel profillerin performansları yapılan deneysel çalışmalar ile karşılaştırılmıştır.

2. Materyal Metot (Material Method)

2.1. Bio-ilhamlı Yapıların Tasarım ve Üretimi (Design and Manufacture of Bio-inspired Structures)

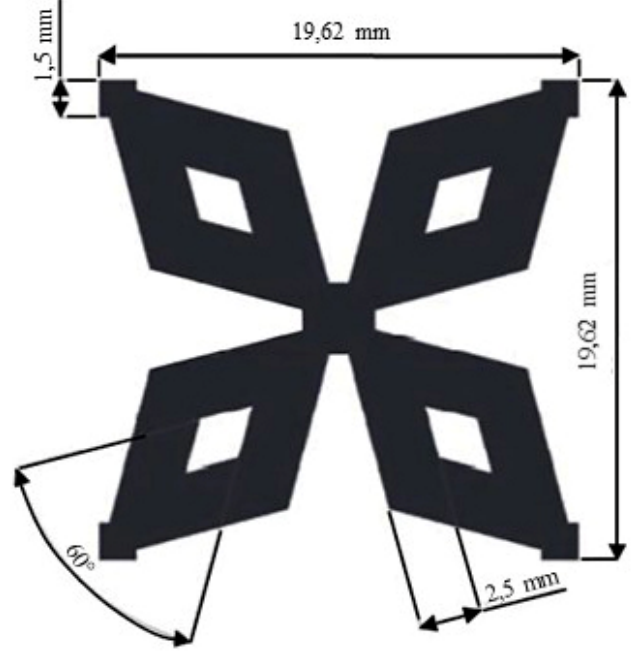
Yapıların bio-ilhamlı olarak anılabilmesi için bir canlıdan esinlenilerek tasarlanmış olması gerekir. Canlıların mikro yapısı, fizyolojik özellikleri ve zorlu şartlarda hayatta kalabilme kapasiteleri farklı tasarım çalışmalarına ilham kaynağı olmuştur. Bu çalışma kapsamında karahindiba bitkisinin fizyolojik yapısından ilham alınarak özgün tasarımlar modellenmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. İlham alınan karahindiba bitki yapısı
(The inspired dandelion plant structure)

Karahindiba özellikle hafifliği ve çarpmalara karşı direnci yüksek olan bitkilerdendir. Bu tarz bio-ilhamlı yapıların daha önceden literatürde enerji sönümleyici profillerin performansının artırılması amacıyla kullanılmamış olması çalışmada denenmesi adına ilham kaynağı olmuştur.

Karahindiba bitkisinin fizyolojik yapısından esinlenerek üç farklı enerji sönümleyici profil tasarımı gerçekleştirilmiştir. Profiller üzerinde oluşturulacak her bir hücre eş büyüklükte olacak şekilde tasarlanmıştır. Verilen ölçülere bağlı olarak her bir hücrenin geometrik parametreleri Şekil 2’de verildiği gibi belirlenmiştir.



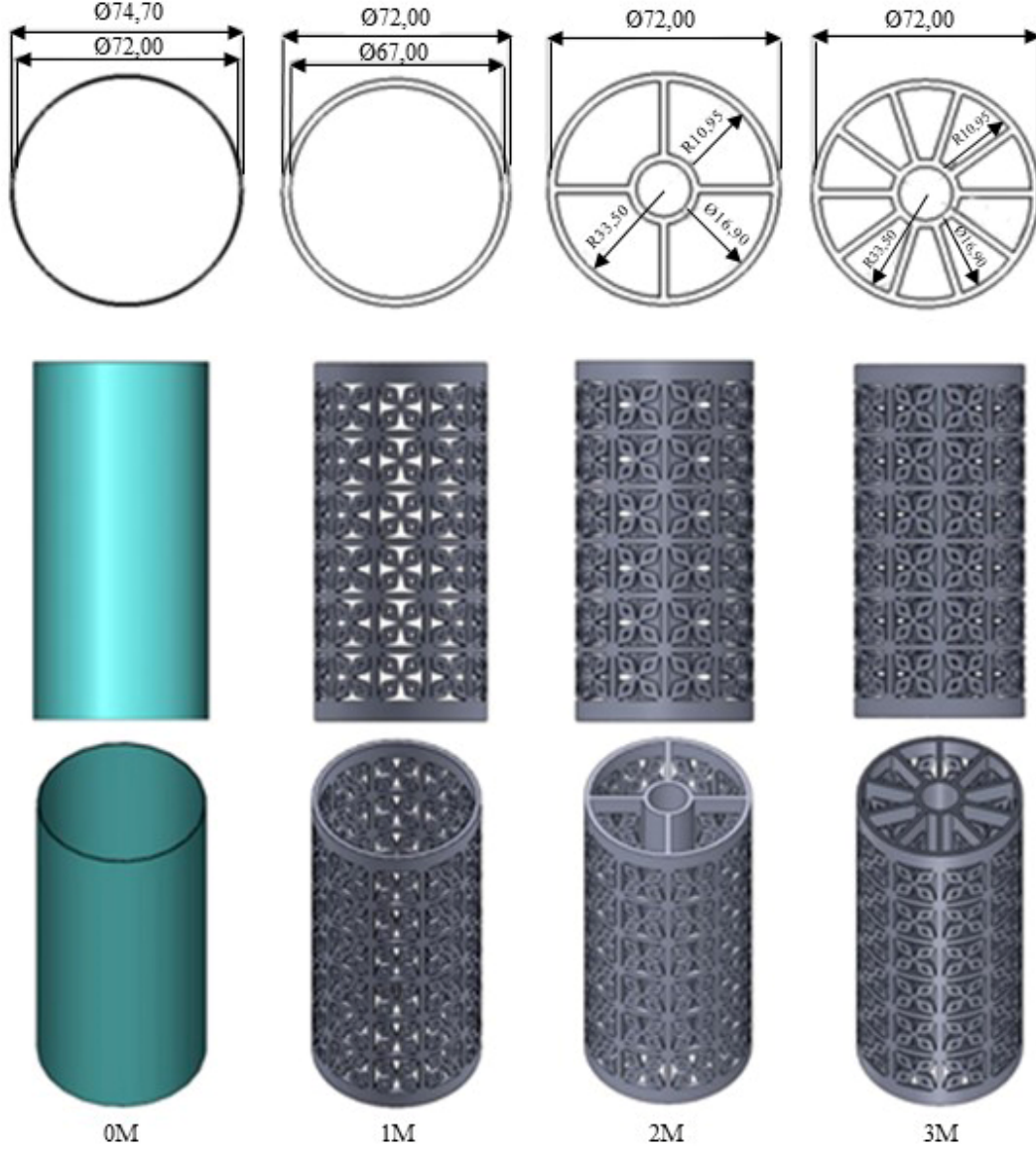
Şekil 2. Karahindiba bitki hücre ölçüleri
(Dandelion lant cell measurements)

Profiller dairesel yapıdaki geleneksel enerji sönümleyici profiller ile kıyaslanacağından standart çaplara uygun olacak şekilde ölçülendirilmiştir. Tasarımlarda bütün yapılar için yükseklik 150 mm, dış çap 72 mm ve iç çap 67 mm olarak belirlenmiştir. Bu ölçüler dikkate alınarak üç farklı geometrik özelliğe sahip enerji sönümleyici profil tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu profillerin çeşitli açılardan görüntüleri Şekil 3’te verilmiştir.

Enerji sönümleyici profillerinin performanslarının deneyler sonucunda daha rahat değerlendirilebilmesi çeşitli kısıltmalar ile adlandırılması gerekmektedir. Bu kapsamda geleneksel yapıdaki içi boş alüminyum model 0M ve karahindiba bitkisinden esinlenerek tasarlanan modeller 1M, 2M ve 3M olarak farklı isimler ile adlandırılmıştır. Ayrıca testler üçer tekrarlı yapılacağından tekrarlı her bir model için adlandırılan sembolün yanına test numarası gelecektir. Örneğin 0M modelinin birinci test profili 0M01, ikinci test profili 0M02 ve üçüncü test profili 0M03 olarak adlandırılacaktır. Yapılan tasarımların deformasyonları esnasında dayanımı arttırmak ve daha fazla enerji sönümlemesini sağlamak amacıyla bazı değişiklikler yapılmıştır. Örneğin 2M ve 3M profillerinin iç kısımlarına destek mekanizmaları yerleştirilmiştir. Bu destek mekanizmalarının katlanmalar esnasında birim kütle başına daha fazla enerji sönümlemesini sağlayacağı düşünülmüştür.

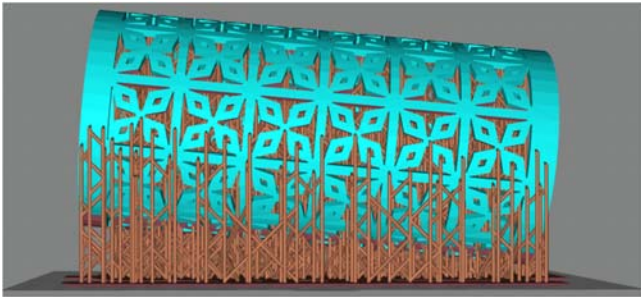
2.2. Hibrit Tüplerin Üretimi (Production of Hybrid Tubes)

Ekllemeli imalat yöntemleri ile çeşitli parçalar üretilmektedir. Üretilen bu parçalar otomotiv sektörünün yanı sıra çeşitli sektörlerde kullanılmaktadır [32-34]. Bio-ilhamlı yapıların üretilmesi destek-katman oluşturma ve 3D yazıcıdan baskı alınması şeklinde iki aşamadan meydana gelmektedir. Profillerin üretim tablasında yatay pozisyonda üretilmesi pek mümkün değildir. Bu sebeple profiller 5°



Şekil 3. Tasarım görüntüleri (Design images)

açıya sahip ve tabladan 5 mm yukarıda olacak şekilde konumlandırılmıştır. Modelin tabladaki konumu katman sayısını etkilemektedir. Modelin açısı arttıkça katman sayısı da artmaktadır (Şekil 4.).



Şekil 4. Bio-ilhamlı yapıların üretime hazırlanması (Preparing bio-inspired structures for production)

Profillerin belirtilen konumda tutulmaları için destekler ile sabitlenmeleri gerekmektedir. Desteklerin atılmasından sonra yapı üzerindeki katman sayılarının belirlenmesi gerekmektedir. Profillerin her biri 1796 katmana ayrılmıştır. Ön hazırlıkları tamamlanan profillerin üretimi için LCD tabanlı SLA teknolojisiyle çalışan 192×120×245 mm baskı hacmine sahip 3D yazıcısı tercih edilmiştir. Bio-ilhamlı profillerin her birinin üretimi yaklaşık 6 saatlik süre sonunda gerçekleştirilmiştir. Şekil 5'te standart reçineden üretilen örnek numune görülmektedir.

Üretimi gerçekleştirilen her bir profilin üzerinde kalan artık reçinelerin temizlenmesi amacıyla özel bir yıkama/kürleme makinesinde %99,9 saflık özelliğine sahip alkol ile 8 dakika boyunca yıkanmış ve 5 dakika boyunca UV ışın ile kürlenmiştir (Şekil 6).

Yapılacak deformasyon testlerinin doğruluğunun teyit edilebilmesi için her bir profilden üçer adet olmak üzere toplam dokuz adet bio-ilhamlı yapı üretimi gerçekleştirilmiştir. Şekil 7'de üretimi gerçekleştirilen profiller verilmiştir.

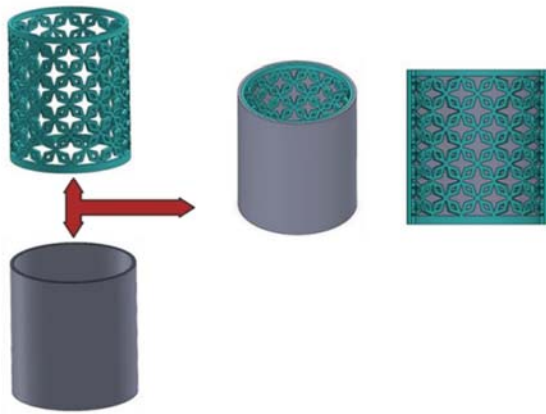


Şekil 5. Üretimi gerçekleştirilen bio-ilhamlı profil (Bio-inspired profile produced)



Şekil 6. Bio-ilhamlı profillerin kürlenme işlemi (Curing process of bio-inspired profiles)

Üretimi gerçekleştirilen bio-ilhamlı yapılar enerji sönümleyici profil olarak hibrit yapıya dönüştürülebilmesi gerekmektedir. Bu amaçla



Şekil 8. Hibrit enerji sönümleyici profiller (Hybrid energy absorbing profiles)

standart ölçülerde dairesel geometriye sahip Al-6063 profiller elde edilmiş ve üretilen her bir bio-ilhamlı yapı bu profillerin içerisine yerleştirilerek hibrit enerji sönümleyiciler elde edilmiştir (Şekil 8).



Şekil 7. Bio-ilhamlı profiller (Bio-inspired profiles)

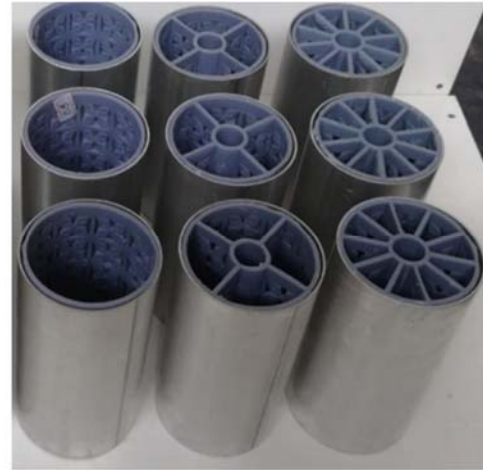
2.3. Hibrit Tüplerin Deformasyon Testleri (Deformation Tests of Hybrid Tubes)

Üretimleri gerçekleştirilen hibrit enerji sönümleyici profillerin deformasyon testlerinin gerçekleştirilebilmesi için Şekil 9'da verilen yarı-statik yükleme özelliğine sahip INSTRON 600 LX model basma test cihazı kullanılmıştır.

Deformasyon esnasında enerji sönümleyici profillerin iki plaka arasında sabit bir şekilde kalmaları gerekmektedir. Eksenel yönde herhangi bir hareket olması düzgün bir deformasyon oluşmasını engelleyecek ve sonuçların hatalı çıkmasına neden olacaktır. Bunun önlenmesi adına Şekil 10'da resmi verilen enerji sönümleyici profillerin içerisine yerleştirilebileceği 5 mm derinliğinde, 15 mm yüksekliğinde ve 100 mm genişliğinde bir alt plaka yapılmıştır. Bu plaka ile deformasyon esnasında enerji sönümleyici profillerin zeminde sabit kalmasını ve eksenel yönde oluşabilecek istenmeyen hareketlerin önüne geçmiştir.

3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

Çalışma sonucunda her bir profil 2 mm/min sabit bir hız ile 80 mm boyunca deformasyona uğratılmıştır. Bunun yanında deneylerin doğruluğunun kanıtlanabilmesi için testler tüm profiller için üçer kez



tekrar edilmiştir. Deneyler ile elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafiklerin anlamlandırılabilmesi için aşağıda verilen bazı eşitliklerden faydalanılmıştır [35].

$$F_{ort} = \frac{E_T}{\delta_{maks}} \quad (2)$$

Ezilme Kuvveti Verimi (EKV): Ezilme kuvveti verimliliği Eş. 3'te verildiği gibi ortalama ezilme kuvvetinin maksimum ezilme kuvvetine (F_{maks}) oranıdır. Maksimum ezilme kuvveti profillerin deformasyonları esnasında ortaya çıkan en yüksek kuvvettir. Bir enerji sönümleyici için bu değer yüksek olması beklenir. Yüksek bir ezilme kuvveti verimi, bize bu enerji sönümleyiciden iyi bir verim alındığını ifade eder.

$$EKV = \frac{F_{ort}}{F_{maks}} \quad (3)$$

Spesifik Enerji Sönümleme (SES): Spesifik enerji sönümleme kapasitesi, birim kütle başına düşen enerji miktarı olarak tanımlanır ve Eş.4'te verilen formül ile hesaplanır. Burada E_T toplam sönümlenen enerji, m_T ise toplam kütleyi ifade etmektedir.

$$SES = \frac{E_T}{m_T} \quad (4)$$

Bu çalışmada karahindiba bitkisinden esinlenerek tasarlanan farklı geometrik özelliklere sahip bio-ilhamlı hibrit yapılar ve geleneksel yapıların enerji sönümleme performansları kıyaslanmıştır. Yapılan tekrarlı testlerden elde edilen verilerin ortalaması alınarak ve bu değerler kıyaslamalarda esas sonuç olarak kabul edilecektir. Kıyaslamaların yapılabilmesi için öncelikle içi boş geleneksel yapıdaki üç adet enerji sönümleyici alüminyum profil (0M01, 0M02 ve 0M03) 2 mm/min hızda 80 mm boyunca deforme edilerek Şekil 11'de verilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri elde edilmiştir. Bu grafiğe göre Eş.1, Eş.2 ve Eş.3'ten faydalanılarak yapılan hesaplama sonuçları elde edilen performans metrikleri Tablo 1'de verildiği gibi bulunmaktadır.

Geleneksel dairesel geometriye sahip OM modeli için en yüksek deformasyon kuvvetinin ortalama 47,517 kN çıktığı tespit edilmiştir. Bunun yanında toplam sönümlenen enerjinin de çok az farklılıklarla ortalama 1,727 kJ, ezilme kuvveti verimleri ortalama % 42,55, spesifik enerji sönümleme kapasitesi ise 13,28 kJ/kg çıkmıştır. Neticede aynı malzeme ve geometrik özelliklerden oluşan geleneksel

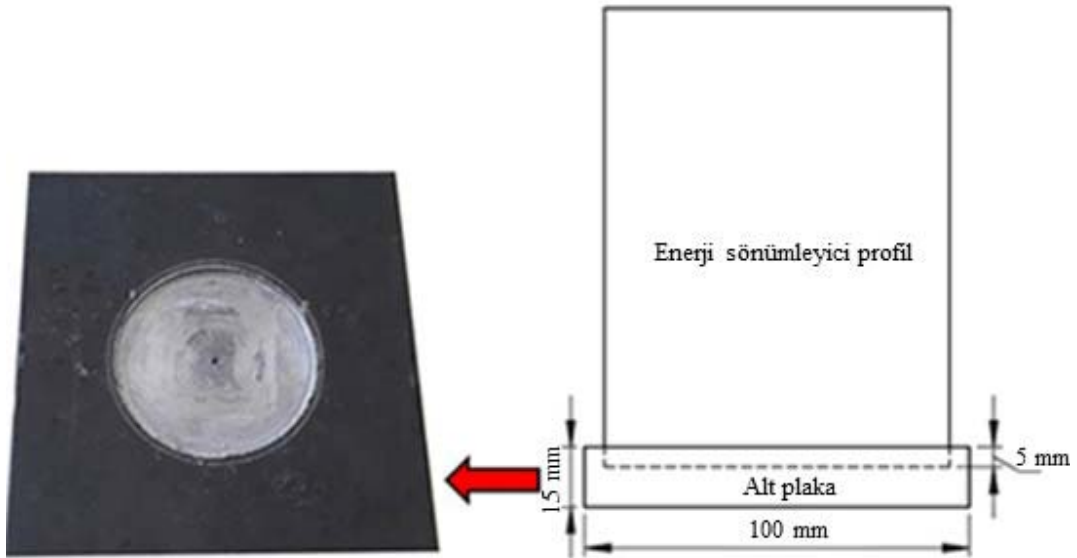


Şekil 9. Test düzeneği (Test setup)

Toplam sönümlenen enerji (E_T): Enerji sönümleyici profillerin deformasyonları sonucunda sönümledikleri toplam enerji miktarıdır ve Eş.1'de verilen formülle hesaplanır. Burada F eksenel yöndeki ezilme kuvveti, δ ise enerji sönümleyici yapının deformasyon mesafesidir.

$$E_T = \int_0^{\delta_{maks}} F d\delta \quad (1)$$

Ortalama Ezilme Kuvveti (F_{ort}): Ortalama ezilme kuvveti Eş. 2'de verildiği gibi toplam sönümlenen enerjinin maksimum yer değiştirmeye oranına göre hesaplanır.

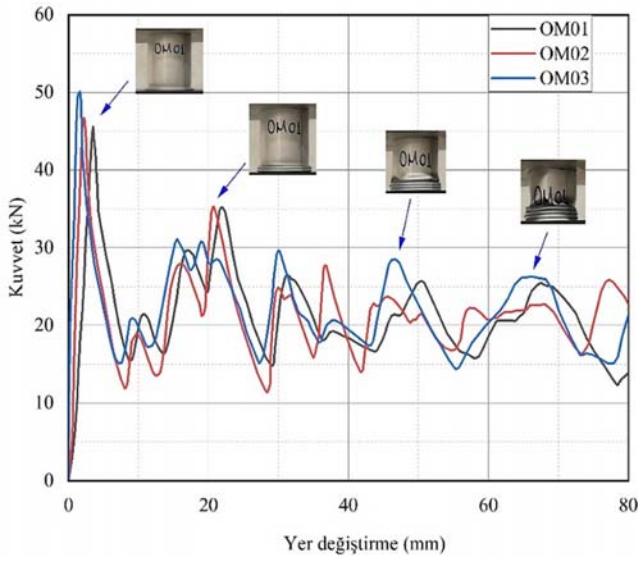


Şekil 10. Sabitleme plakası (Fixing plate)

Tablo 1. 0M01, 0M02 ve 0M03 modellerinin performans metrikleri (Performance metrics of model 0M01, 0M02 and 0M03)

	δ_{maks} (mm)	E_T (kJ)	F_{maks} (kN)	F_{ort} (kN)	EKV (%)	SES (kJ/kg)
0M01	80	1,707	45,703	21,338	46,68	13,76
0M02	80	1,704	46,838	21,300	45,47	13,74
0M03	80	1,771	50,010	22,138	44,26	14,28
0M-Ortalama	80	1,727	47,517	21,592	45,47	13,28

profillerin deformasyonları sırasında katlanma şekillerindeki ufak farklılıkların performans metriklerinde az da olsa farklılıkların oluşmasına neden olduğu görülmüştür. Her bir profilin deformasyonları aynı şartlar altında gerçekleştirilmiştir. Bunun yanında deformasyon esnasında profillerin katlanmalarındaki ufak bazı farklılıklar meydana gelmiştir. Bu durum Tablo-1’de verilen sonuçlar az da olsa farklı çıkmasına neden olmuştur.



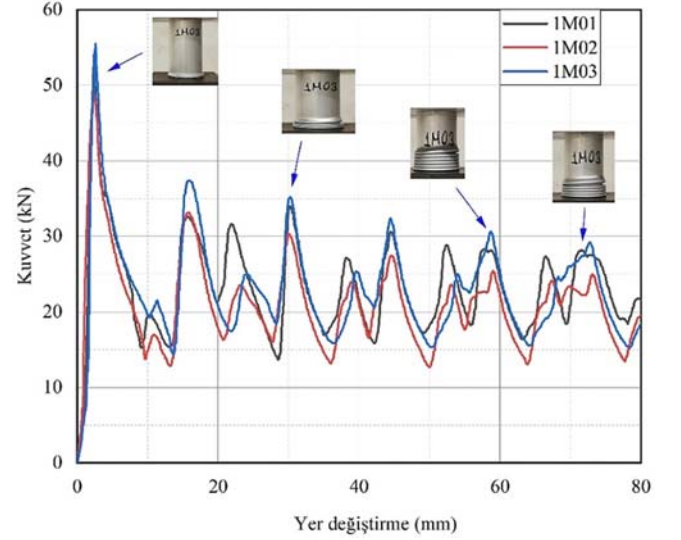
Şekil 11. 0M01, 0M02 ve 0M03 modellerine ait kuvvet-yer değiştirme grafiği (Load-displacement curve of 0M01, 0M02 and 0M03 models)

Çalışmanın devamında içerisinde bio-ilhamlı yapıların olduğu 1M, 2M ve 3M hibrit modellerin üçer tekrarlı testleri yapılmıştır. 80 mm deformasyon mesafesinde yapılan bu testler sonucunda elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri sırasıyla Şekil 12, Şekil 13 ve Şekil 14’te verildiği gibi bulunmuştur.

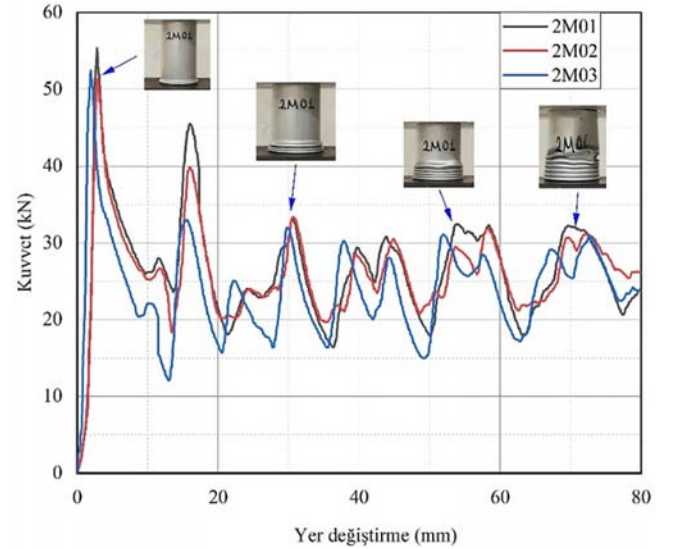
Elde edilen kuvvet yer değiştirme grafikleri dikkate alınarak her bir hibrit profili deformasyonları sonucu performans metrikleri hesaplanmış ve Tablo 2’de verildiği gibi elde edilmiştir.

Tablo 2’de verilen ortalama değerler incelendiğinde en yüksek enerji sönmüleme kapasitesi 2,118 kJ ile 3M hibrit profilinden elde edildiği görülmüştür. Bu değer geleneksel dairesel içi boş enerji sönmüleyici profilin sönmülediği değerden % 22,64 daha fazladır. Benzer şekilde ezilme kuvveti verimi incelendiğinde en yüksek değere yine 3M modelinin sahip olduğu görülmektedir. 3M modeli geleneksel dairesel profile göre % 8,63 daha fazla ezilme kuvveti verimine sahip olduğu tespit edilmiştir. Bunun yanında spesifik enerji sönmüleme kapasitesi bakımından ortalama 9,56 kJ/kg ile en iyi sonuç içi boş 0M geleneksel modelden elde edilmiştir. Bunun nedeni boş profilin içerisine yerleştirilen yapının ağırlığındaki artış oranının sönmülenen enerji oranından daha fazla olmasıdır. Ancak Şekil 15’te görüldüğü üzere örnek olarak verilen 3M modeli bio-ilhamlı yapı katmanlar arasında

girmiş ve maksimum deformasyon kuvvetinin düşük olmasına yardımcı olmuştur.



Şekil 12. 1M01, 1M02 ve 1M03 modellerinin kuvvet-yer değiştirme grafiği (Load-displacement curve of 1M01, 1M02 and 1M03 models)



Şekil 13. 2M01, 2M02 ve 2M03 modellerinin kuvvet-yer değiştirme grafiği (Load-displacement curve of 2M01, 2M02 and 2M03 models)

Geleneksel profillerin içlerine yerleştirilen karahindiba yapısından esinlenilerek üretilen profiller deformasyon esnasında katlanmalarını değişken olmasına sebep olmuştur. Bu durum Tablo 2’de verilen metriklerin farklı çıkmasına yol açmıştır. Karahindiba yapısı maksimum deformasyon kuvvetini bir miktar arttırmıştır. Ancak

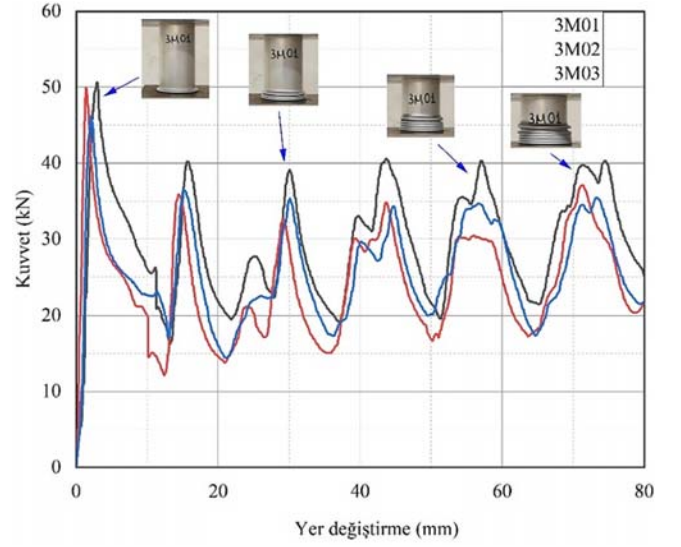
sönümlenen toplam enerji miktarındaki artış oranının fazla olması ezilme kuvveti verimi üzerinde olumlu bir etki yaratmıştır. Örneğin geleneksel içi boş dairesel profilin ezilme kuvveti verimi ortalama % 45,47 iken bu değer 3M modelinde % 54,11'e kadar çıkmıştır.

Katlanma şekilleri yüksek enerji sönmleme üzerine oldukça etkili bir durumdur. Yapılan deneysel çalışmalar incelendiğinde tüm hibrit modellerin katlanma şekilleri içi boş geleneksel model ile benzer olduğunu göstermiştir.

Geleneksel dairesel profil ile karahindiba yapısı ile desteklenmiş hibrit tüplerin katlanma mekanizmaları birbirlerine çok benzemektedir. Ancak deformasyon esnasında malzeme yapısı bakımından reçineden imal edilmiş karahindiba profilinde kırılmalar meydana gelmiş ve yeteri kadar enerji sönmleyememiştir. Şayet deformasyon elastik sınırlar içerisinde gerçekleşmiş olsaydı çok daha fazla enerji sönmünecek, böylelikle spesifik enerji sönmleme miktarının daha fazla olması sağlanacaktı.

Yapılan litetatür taramalarında karahindiba yapısının daha önce bu tarz enerji sönmleyici profiller üzerinde kullanılmadığı görülmüştür. O yüzden çalışma yapılmadan önce deformasyonlar esnasındaki davranışlar tam olarak öngörülemedi. Yapılan deneylerde geleneksel enerji sönmleyicilerin deformasyonları önceki çalışmalar ile benzer olduğu görülmüş, bununla birlikte kara hindiba yapısının tam olarak düzgün bir katlanma olmadan deforme olduğu tespit

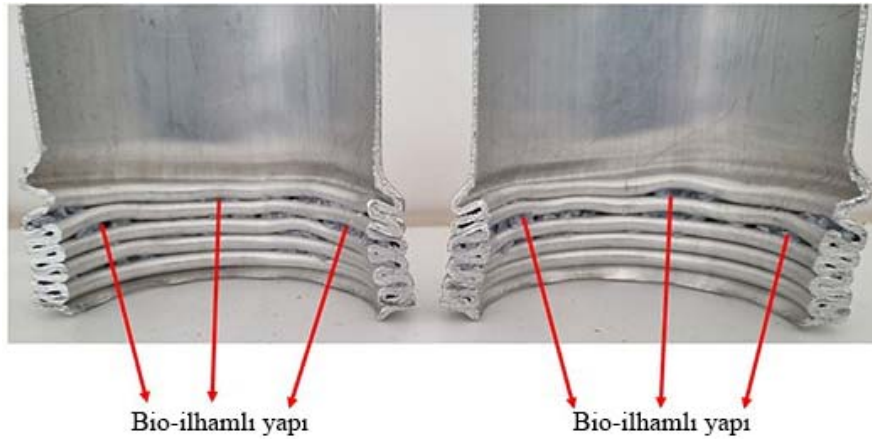
edilmiştir. Bu durum karşısında her iki yapının birbirlerinden bir miktar bağımsız katlanmalar gerçekleştirdiğini göstermiştir.



Şekil 14. 3M01, 3M02 ve 3M03 modellerinin kuvvet-yer değiştirme grafiği (Load-displacement curve of 3M01, 3M02 and 3M03 models)

Tablo 2. 1M, 2M ve 3M hibrit modellerinin performans metrikleri (Performance metrics of model 1M, 2M and 3M)

	δ_{maks} (mm)	E_T (kJ)	F_{maks} (kN)	F_{ort} (kN)	EKV (%)	SES (kJ/kg)
1M01	80	1,863	54,130	23,288	43,02	9,91
1M02	80	1,691	48,972	21,138	43,16	8,99
1M03	80	1,843	55,551	23,038	41,47	9,80
1M-Ortalama	80	1,799	52,884	22,488	42,55	9,56
2M01	80	2,128	55,356	26,600	48,05	8,83
2M02	80	2,093	51,331	26,163	50,96	8,68
2M03	80	1,926	52,466	24,075	45,88	7,99
2M-Ortalama	80	2,049	53,051	25,613	48,30	8,50
3M01	80	2,365	50,651	29,563	58,36	6,22
3M02	80	1,934	50,000	24,175	48,35	5,08
3M03	80	2,056	46,211	25,700	55,61	5,41
3M-Ortalama	80	2,118	48,954	26,479	54,11	5,75



Şekil 15. 3M modelinin deformasyon süreci (The deformation process of the 3M tube)

4. Sonuçlar (Conclusions)

Yapılan çalışmada, otomobillerde kullanılan ve önemli bir pasif güvenlik sistemi elemanı olan enerji sönümleyici profillerin enerji sönümleme performanslarının geliştirilmesi amaçlanmıştır. Çalışma dairesel yapıya sahip geleneksel enerji sönümleyici profiller ile içi özgün olarak tasarlanarak 3D yazıcı yöntemi ile üretilmiş bio-ilhamlı yapılar ile doldurulmuş hibrit enerji sönümleyici profiller ile karşılaştırılmıştır. Tüm profiller yarı-statik basma test cihazı ile 2 mm/min deformasyon hızında 80 mm deformasyona uğratılmıştır.

Çalışma sonucunda elde edilen veriler aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Sönümlenen toplam enerji miktarı bakımından en yüksek değer ortalama 2,118 kJ ile 3M modelinden elde edilmiştir. Bu değer 0M modelinden % 22,64, 1M modelinden % 17,75 ve 2M modelinden % 3,38 daha fazladır.
- Ezilme kuvveti verimi bakımından en yüksek değer yine %54,11 ile 3M modelinden elde edilmiştir.
- Toplam sönümlenen enerji bakımından en yüksek değer 3M modelinde elde edilmiştir.
- En iyi performansa sahip olan 3M modeli ile geleneksel enerji sönümleyici profil kıyaslandığından deformasyon sonucunda maksimum ezilme kuvvetinin 1,437 kN (% 3,02) arttığı görülmüştür. Bununla birlikte toplam sönümlenen enerji miktarında 0,391 kJ (% 22,64) ve ezilme kuvveti veriminde % 8,63 artış olmuştur.
- Spesifik enerji sönümleme kapasitesi bakımından en iyi değer ortalama 13,28 kJ/kg ile 0M geleneksel modelden elde edilmiştir. Spesifik enerji sönümleme kapasitesinin diğer modellerde düşük olması boş profillerin içerisine yerleştirilen yeni yapılarıdaki birim kütle başına düşen ağırlık artış miktarının sönümlenen enerji miktarından daha fazla olmasıdır.

5. Teşekkür (Acknowledgment)

Bu çalışmaya, FYL-2021-7392 nolu proje ile sağladığı destekten dolayı Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne teşekkür ederiz.

Kaynaklar (References)

1. Çavdar A., Uçar M., Kılıçaslan İ., Checking of the high speed faults caused to traffic accident and controlling by active safety systems, Journal of Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 23 (1), 187–198, 2008.
2. Alexander, J.M., An approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shells under axial loading, The quarterly journal of mechanics and applied mathematics, 13.1, 10-15, 1960.
3. Wierzbicki T., Włodzimierz A., On the crushing mechanics of thin-walled structures, Journal of Applied Mechanics, 727-734, 1983.
4. Jones, N., Abramowicz W., Static and dynamic axial crushing of circular and square tubes, Metal forming and impact mechanics, 225-247, 1985.
5. Abramowicz, W., T. Wierzbicki, Axial crushing of multicorner sheet metal columns, Journal of Applied Mechanics, 113-120, 1989.
6. San H., Pham N., Chen T. M., Hao H., Lu, G., Crashworthiness analysis of bio-inspired fractal tree-like multi-cell circular tubes under axial crushing, Thin-Walled Structures, 169, 108315, 2021.
7. Mansor M. A., Ahmad, Z., Abdullah M. R., Crashworthiness capability of thin-walled fibre metal laminate tubes under axial crushing, Engineering Structures, 252, 113660, 2022.
8. Zhang X., Cheng G., Zhang H., Theoretical prediction and numerical simulation of multi-cell square thin-walled structures, Thin-Walled Structures, 44 (11), 1185–1191, 2006.
9. Xie S., Yang W., Wang N., Li H., Crashworthiness analysis of multi-cell square tubes under axial loads, International Journal of Mechanical Sciences, 121, 106–118, 2017.
10. Tran T. N., Study on the crashworthiness of windowed multi-cell square tubes under axial and oblique impact, Thin-Walled Structures, 155, 106907, 2020.
11. Mert S. K., Demiral M., Altun M., Acar E., Güler M. A., Experimental and numerical investigation on the crashworthiness optimization of thin-walled aluminum tubes considering damage criteria, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 43 (2), 1-22, 2021.
12. Kazi M., Eljack K., Mahdi E., Design of composite rectangular tubes for optimum crashworthiness performance via experimental and ANN techniques. Composite Structures, 279, 114858, 2022.
13. Zhang H., Zhang X., Crashworthiness performance of conical tubes with nonlinear thickness distribution, Thin-Walled Structures, 99, 35-44, 2016.
14. Alkhatib S. E., Tarlochan F., Eyvazian A., Collapse behavior of thin-walled corrugated tapered tubes, Engineering Structures, 150, 674–692, 2017.
15. Asanjarani A., Dibajian S. H., Mahdian A., Multi-objective crashworthiness optimization of tapered thin-walled square tubes with indentations, Thin-Walled Structures, 116, 26–36, 2017.
16. Acar E., Yılmaz B., Güler M. A., Altun M., Multi-fidelity crashworthiness optimization of a bus bumper system under frontal impact, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 42 (9), 1–17, 2020.
17. Djameluddin F., Abdullah S., Ariffin A. K., Nopiah Z. M., Optimization of foam-filled double circular tubes under axial and oblique impact loading conditions, Thin-Walled Structures, 87, 1–11, 2015.
18. Fang J., Gao Y., Sun G., Qiu N., Li Q., On design of multi-cell tubes under axial and oblique impact loads, Thin-Walled Structures, 95, 115–126, 2015.
19. Altun M., Acar E., Güler M. A., Foam filling options for crashworthiness optimization of thin-walled multi-tubular circular columns, Thin-Walled Structures, 131, 309-323, 2018.
20. Qi C., Yang S., Dong F., Crushing analysis and multiobjective crashworthiness optimization of tapered square tubes under oblique impact loading, Thin-Walled Structures, 59, 103–119, 2012.
21. Altun M., Investigation of performances of energy absorbing profiles having different geometries under oblique loads, Journal of Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 34 (3), 1517–1525, 2019.
22. Vinayagar K., Senthil Kumar A., Crashworthiness analysis of double section bi-tubular thin-walled structures, Thin-Walled Structures, 112, 184–193, 2017.
23. Zarei H., Kröger M., Albertsen H., An experimental and numerical crashworthiness investigation of thermoplastic composite crash boxes, Composite Structures, 85 (3), 245–257, 2008.
24. Wang P., Yang F., Fan H., Lu G., Bio-inspired multi-cell tubular structures approaching ideal energy absorption Performance, Materials and Design, 225, 111495, 2023.
25. Wu F., Chen Y., Zhao S., Hong Y., Zhang Z., Zheng S., Mechanical properties and energy absorption of composite bio-inspired multi-cell tubes, Thin-Walled Structures, 184, 110451, 2023.
26. Hao P., Du J., Energy absorption characteristics of bio-inspired honeycomb column thin-walled structure under impact loading. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 79, 301–308, 2018.
27. Yao R., Pang T., He S., Li Q., Zhang B., Sun G., A bio-inspired foam-filled multi-cell structural configuration for energy absorption, Composites Part B: Engineering, 238, 109801, 2022.
28. Zhang L., Bai Z., Bai F., Crashworthiness design for bio-inspired multi-cell tubes with quadrilateral, hexagonal and octagonal sections, Thin-Walled Structures, 122, 42–51, 2018.
29. Liu S., Tong Z., Tang Z., Liu Y., 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.
30. Yang X., Sun Y., Yang J., Pan Q., Out-of-plane crashworthiness analysis of bio-inspired aluminum honeycomb patterned with horseshoe mesostructure, Thin-Walled Structures, 125, 1–11, 2018.
31. Yang J., Gu D., Lin K., Yang Y., Ma C., Optimization of bio-inspired bi-directionally corrugated panel impact-resistance structures: Numerical simulation and selective laser melting process, Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 91, 59–67, 2019.

32. Karakuş, R., Tanık, Ç., Optimization of additive manufacturing by vacuum infusion method, Journal of Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 38 (4), 2451-2463, 2023.
33. Güleç, E., Evirgen, B., A scale effect on the geogrids produced with three-dimensional printer technology, Journal of Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 38 (3), 1793-1804, 2023.
34. Duman, B., Özsoy, K., A deep learning-based approach for defect detection in powder bed fusion additive manufacturing using transfer learning, Journal of Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 37 (1), 361-375, 2022.
35. Altın M., Acar E., Güler M. A., Crashworthiness optimization of hierarchical hexagonal honeycombs under out-of-plane impact, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 235 (6), 963–974, 2021.

