



Yay-Şekli silindirik sandviç kompozit yapıların düşük hızlı darbe performanslarının farklı vurucu tipleri ve darbe açıları için incelenmesi

Investigation of low velocity impact performance of cylindrical sandwich structures arc-shaped core with different impact types and impact angles

İlyas Bozkurt^{1,*} 

¹ Muş Alparslan Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, 49250, Muş Türkiye.

Öz

Bu çalışmanın amacı yay-şekli silindirik sandviç kompozit yapıların farklı geometri ve farklı darbe açıları için darbe performanslarını sonlu elemanlar yöntemi ile incelemektir. Çalışmada vurucu şeklinin, vurucu temasının, yüzey kalınlığının ve darbe noktasının maksimum temas kuvveti, absorbe enerji verimliliği, maksimum yer değiştirme ve hasar deformasyonu üzerine etkileri incelenmiştir. Düşük hızlı darbe simülasyonları için *LS DYNA* sonlu elemanlar programında gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonunda çekirdek yapısının desteklediği P2 noktasındaki temas kuvvet değerleri P1 (çekirdek destekli) noktasından yüksektir. Çekirdek desteği temas kuvveti üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Vurucu açısı arttıkça ($\theta=30^\circ$ 'den 90° 'ye) temas kuvvet değeri 2.6 kat, enerji absorbe verimlilik değeri de 1.65 kat artmıştır. Koni vurucu ile elde edilen maksimum temas değeri silindir ve küre uçlu vurucuya göre sırasıyla %35.1 ve %73.7 daha yüksek iken enerji absorbe verimlilik değeri ise sırasıyla %37.1 ve %36.2 daha yüksektir. Her üç vurucu için en büyük ve baskın hasar tipinin matris hasarı olduğu belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Silindirik sandviç kompozit; Düşük hızlı darbe testi; İlerlemeli hasar analizi; Sonlu elemanlar yöntemi; Kohezif Bölge Modeli (CZM).

1 Giriş

Kompozit yapılar yüksek mukavemet/ağırlık oranları nedeniyle, başta havacılık ve uzay endüstrisi olmak üzere birçok sektörde kullanılmaktadır [1]. Özellikle son zamanlarda teknolojik gelişmeler ile beraber üretim makinelerinin ve üretim yöntemlerinin gelişmesiyle günlük hayatımızda bisiklet gövdelerinden, araba direksiyonlarına, dizüstü bilgisayar kılıflarından ayakkabı kumaşlarına kadar birçok alanda kullanılmaya başlamıştır [2]. Bununla beraber toplu taşımada kullanılan uçak ve arabalarda da kompozit yapıların kullanım oranı her geçen gün artmaktadır. Fakat uygulama alanlarında ve hizmet sırasında maruz kaldıkları yüklerden dolayı performansları düşmektedir [3]. Farklı alanlarda kullanılan bu yapılar çok farklı türde ve büyüklükte yüklere ve darbelere maruz kalabilmektedir. Bu yükler nedeniyle hasar alan yapının hizmet ömrü azalmaktadır. Buda hizmet sırasında büyük facialara ve büyük maliyet

Abstract

The aim of this study is to investigate the impact performance of arc-shaped cylindrical sandwich composite structures for different geometries of impactors and different impact angles using the finite element method. The effects of striker shape, striker angle, facesheet thickness and impact point on maximum contact force, absorbed energy efficiency, maximum displacement and damage deformation are investigated. Low velocity impact simulations were performed in the *LS DYNA* finite element program. At the end of the study, the contact force values at the P2 point supported by the core structure are higher than the P1 (core unsupported) point. As the impactor angle increased (from $\theta=30^\circ$ to 90°), the contact force value increased 2.6 times and the energy absorption efficiency value increased 1.65 times. The maximum contact value obtained with the cone impactor is 35.1% and 73.7% higher than the cylinder and sphere-tipped impactors, respectively, while the energy absorption efficiency value is 37.1% and 36.2% higher, respectively. For all three impactors, matrix damage was found to be the largest and dominant damage type.

Keywords: Cylindrical sandwich composite; Low velocity impact test; Progressive damage analysis; Finite element method; Cohesive Zone Model (CZM).

kayıplarına sebebiyet verebilmektedir. Dolayısıyla bu alanda çalışan araştırmacılar ve mühendisler kompozit yapıların maruz kalacağı darbe şeklini ve vurucu tipini iyi belirlemeli ve yapının buna göstereceği reaksiyonu öngörerek uygun malzeme seçimi ve yapı seçimi yapmalıdır [4].

Sandviç yapılar genel olarak çekirdek ve yüzey kapak yapıların bir araya gelmesiyle oluşan ve mühendislik alanında çokça kullanılan yapılardır [2]. Genellikle düz olarak üretilen bu yapılar teknolojik gelişmelere ve üretim tekniklerinin ilerlemesiyle beraber kavisli ya da silindirik olmak üzere birçok farklı şekilde de üretilebilmektedir. Uçakların uç kısmı ya da yeni nesil hafif bisiklet gövdeleri olmak üzere günlük hayatın birçok alanında farkında olmadan bile bu yapılar kullanılmaktadır.

Darbe yükü altında malzemelerin reaksiyonları farklı olabilir. Metal malzemeler darbeye maruz kaldıklarında

yapılarındaki lineerlikten ötürü malzeme davranışı tahmin edilebilmektedir. Fakat kompozit yapılarda malzemenin mikro mekanik yapısının karmaşıklığından ötürü bu tahmini yapmak daha zordur [5]. Çünkü bu yapılarda malzeme mukavemetini etkileyen fiber türü, matris türü, fiber ve matris oranı, fiber ve matris uyumu gibi birçok faktör bulunmaktadır. Bunların hepsinin malzeme mekaniğine bir oranda etkisi bulunmaktadır. Dolayısıyla bütün bu olasılıkları önceden tahmin etmek çok zordur. Bunun için araştırmacılar laboratuvar ortamlarında ya da sayısal analizler yardımıyla kompozit yapıların mekanik performansı hakkında araştırma yapmaktadırlar [6].

Kompozit yapıların üretimi ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi için birçok özel makine ve cihazlar geliştirilmiştir. Yüksek maliyetli sarf malzeme kullanılarak üretilen kompozit yapıların mekanik özelliklerini belirlerken birçok özel cihaz kullanılmak zorundadır. Laboratuvar imkânlarının kısıtlı olduğu ve finansal desteğin az olduğu kurumlarda araştırmacılar, bu alanda sağlıklı çalışmalar yapamamaktadırlar. Bu problemin üstesinden gelmek için araştırmacılar, sonlu elemanlar yöntemi ile kompozit yapıların mekanik davranışlarını inceleyebilmektedir. Bununla beraber bazı karmaşık ve zor deneyler bile yüksek doğruluk hassasiyetiyle sonlu elemanlar yöntemi ile uygulanabilmektedir [7-9].

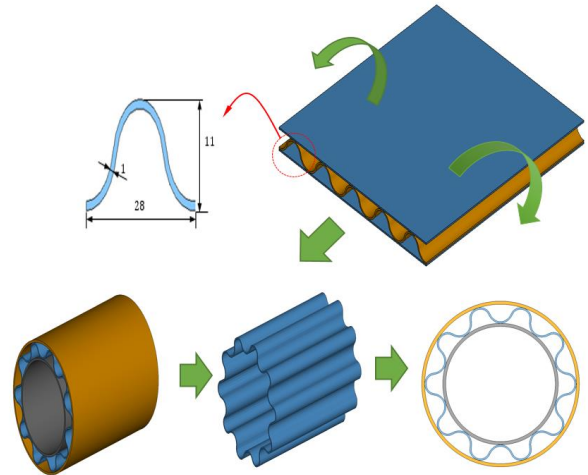
Darbe emme potansiyeli çok yüksek olan sandviç kompozit yapıların darbe altındaki davranışlarını inceleyen birçok çalışma bulunmaktadır [10-20]. Rong vd., [20] oluklu çekirdeklerin geometrik konfigürasyon değişiminin darbe ve ezilme performansları üzerindeki etkilerini sayısal olarak incelemiştir. Liu vd., [21] karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) kapak ve alüminyum çekirdekli oluklu sandviç yapılarda vurucunun etkilerini deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Düşük hızlı darbe testleri, konik, yarım küre ve düz çarpma tertibatları tarafından darbe direncini incelemek için gerçekleştirilmiştir. *ABAQUS/Explicit*'te Hashin kırılma kriterlerine ve Yeh delaminasyon kırılma kriterlerine dayanan aşamalı hasar modelini uygulamışlardır. Khalkhali vd., [22] farklı geometrik şekillere sahip vurucular ile darbelerle maruz kalan sandviç plakanın doğrusal olmayan düşük hızlı darbe tepkisini incelemiştir. Küre, koni ve silindirik şekilli olmak üzere üç farklı vurucu ucu kullanarak darbe testlerini deneysel olarak gerçekleştirmişlerdir. He vd., [23], karbon fiberle güçlendirilmiş polimer yüzey tabakaları ve alüminyum alaşımlı oluklu çekirdeklerden oluşan hibrit sandviç yapıların düşük hızlı darbe davranışını ve darbe sonrası eğilme davranışını deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Li vd., [24] kirigami oluklu çekirdekli sandviç yapıların sarkaç darbe testleri yoluyla dinamik ezilme altındaki performansını ve enerji emilimini incelemiştir. Yang vd., [25] sıcak pres kalıplama yöntemiyle üretilen karbon fiber kompozit dairesel oluklu sandviç silindirik panel darbe dayanımını ve hasar mekanizmalarını incelemiştir. Çalışmada relative yoğunluğun, darbe enerjisinin ve darbe konumunun darbe tepkileri üzerindeki etkilerini incelemek için Hashin hasar kriterlerine dayanan doğrulanmış sonlu elemanlar analizi modellerini kullanmışlardır. Cheng vd., [26] U-tipi oluklu sandviç panellerin düşük hızlı darbe davranışlarını deneysel

ve sayısal olarak incelemiştir. Boonkong vd., [27] eğrisel alüminyum alaşım çekirdekli hafif alüminyum sandviç panellerin düşük hızlı darbe davranışı, enerji soğurma performansı ve hasar mekanizmalarını deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Yellur vd., [28] polipropilen petek sandviç yapılarında üst ve alt yüzey levha kalınlıklarının darbe davranışı üzerindeki etkilerini deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Sayısal analiz için *LS-DYNA* sonlu eleman modelini kullanmışlardır.

Bu çalışmada ise literatürden farklı olarak yay çekirdekli silindirik sandviç CFRP kompozit yapının darbe performansları sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Çalışmada vurucu şeklinin, vurucu açısının, yüzey kalınlığının ve darbe noktasının maksimum temas kuvveti, absorbe enerji verimliliği, maksimum yer değiştirme ve hasar deformasyonu üzerine etkileri detaylıca araştırılmıştır. Düşük hızlı simülasyonları için *LS DYNA* sonlu elemanlar programında *MAT 54* malzeme modeli kullanılarak Hashin hasar kriterine dayalı olarak ilerlemeli hasar analizi gerçekleştirilmiştir. Vurucu tipi olarak literatürde en çok kullanılan silindir, koni ve küre uçlu vurucular kullanılmıştır. Bununla beraber ilerlemeli hasar analizi ile kritik noktadaki deformasyonlar gösterilmiştir. Aynı standartlara sahip vurucuların etkileri mukayese edilmiştir.

2 Materyal ve metod

Yay çekirdekli silindirik sandviç yapının ölçü detayları ve üretim aşamaları Şekil 1'de verilmiştir. Ölçüleri verilen sandviç yapıya farklı geometriye vurucular ile darbe testleri uygulanmıştır. Bununla beraber darbe açısının darbe performansı üzerindeki etkileri de ayrıca incelenmiştir.



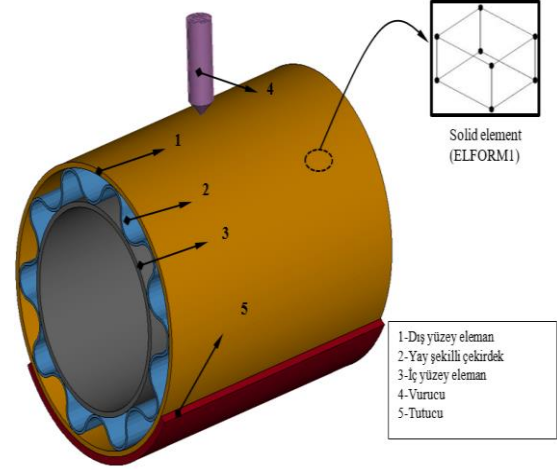
Şekil 1. Numune ölçüleri.

Düz bir plaka olarak çizilen numuneler *Solidworks* 'te *Flex* komutu ile bükülerek silindir haline getirilmiştir (Şekil 1). Çap x uzunluk ölçüleri 100 x 140 mm olan bu yapıda kalınlıkları 2 mm ve 4 mm iki farklı yüzey kapaklar kullanılarak darbe performansları ayrıca incelenmiştir. Düşük hızlı darbe simülasyonu Şekil 2'deki gibi modellenmiştir. Tüm darbe testleri numunelerin merkezine uygulanmıştır. Alt tutucu sabit olarak belirlenmiştir. Vurucu

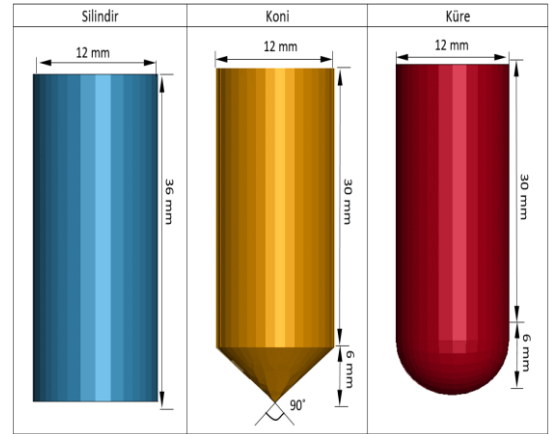
x ve y yönlerindeki yer değiştirmelerle sınırlandırılmış ve yalnızca vurucu yönünde (z eksen) hareket edebilmektedir. Her ne kadar *Shell* eleman ile yapılan analizlerin çalışma süresi az olsa da hasar yapılarını daha net ve deneysel hasarlara yakın göstermek için sekiz düğümlü katı eleman (*solid*) (*ELFORM1*) kullanılmıştır. Bu eleman yapısı çalışmada kullanılan vurucular Şekil 3'te verilmiştir. Vurucu uçları belirlenirken literatürde kullanılan küre vurucu ucu referans alınmıştır [29]. Vurucu etkisi incelendiği için koni ve silindirik vurucularının da aynı ölçülerde olmasına dikkat edilmiştir. Ağ yapısı için 1x1 mm, 2x2 mm ve 3x3 mm ağ yakınsama çalışması yapılmıştır. Çalışmada kullanılan eleman sayısı ve işlem süresi göz önüne alınarak 2 x 2 mm ağ eleman boyutu seçilmiştir. Burada sadece sayısal simülasyon yapıldığı için ve ayrıca tüm sınır şartları ve yükleme durumları eşit olduğu için darbe simülasyonu her üç vurucu için eşit şartlarda gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışma ile desteklenen bir çalışma olması durumunda mesh yakınsama yapılarak en uygun mesh tercihi yapılabilirdi [29]. Toplamda 30197 düğüm ve 26750 katı eleman kullanılmıştır. Vurucu ve silindirik sandviç yapı arasında teması tanımlamak için CONTACT ERODING SURFACE TO SURFACE temas kartı kullanılmıştır. Darbe esnasında tutucular arasındaki numunenin hareket etmemesi ve tutucu tarafından sabit tutulması için CONTACT AUTOMATIC SURFACE TO SURFACE temas kartı kullanılmıştır. Buradaki statik ve dinamik sürtünme katsayıları ise sırayla 0.2 ve 0.3 olarak girilmiştir [8].

Çalışmada kullanılan çekirdek yapısı korrige (*corrugated*) yapıda olduğu için numunenin her yerinde aynı şekilde temas etmemektedir. Dolayısıyla vurucunun uygulandığı bazı noktalarda çekirdek desteği var iken bazı yerlerde aynı şekilde temas etmemektedir. Dolayısıyla vurucunun uygulandığı bazı noktalarda çekirdek desteği bulunmamaktadır. Çalışmada iki farklı noktada darbe testleri uygulanmıştır. Darbe noktaları Şekil 4'te verilmiştir. Bu noktaların darbe performansları ayrıca mukayese edilmiştir. Bu çalışmada yapıştırıcı malzeme olarak kullanılan *Araldite*

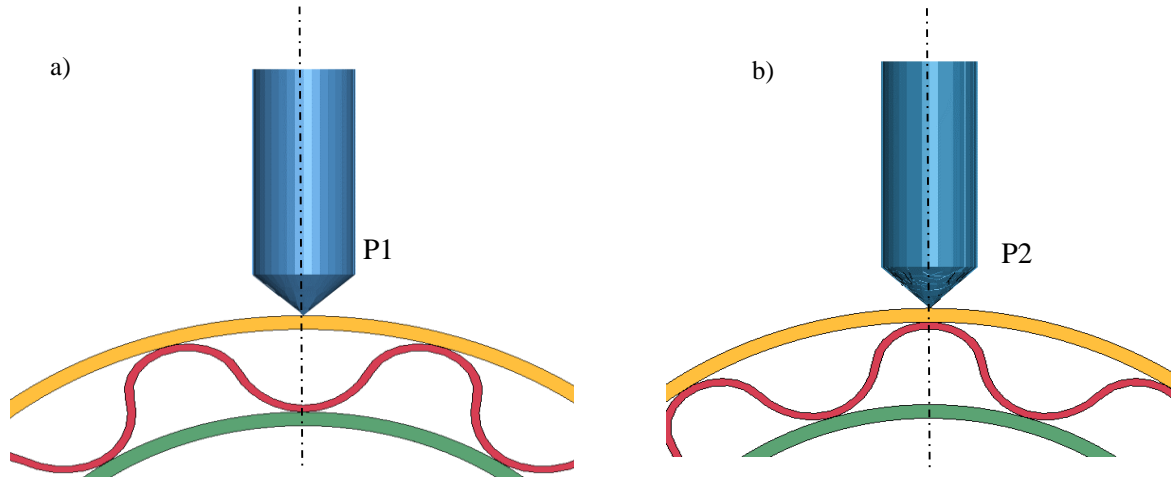
2015'in temas parametreleri Tablo 1'de verilmiştir. Çalışmada kullanılan CFRP malzemenin mekanik özellikleri ve hasar parametreleri sırayla Tablo 2 ve Tablo 3'te verilmiştir.



Şekil 2. Düşük hızlı darbe testinin sonlu elemanlar modeli.



Şekil 3. Vurucu ölçüleri.



Şekil 4. a)Yay temassız darbe noktası, b)Yay temaslı darbe noktası.

Tablo 1. Çekirdek ve yüzey levhaları arasındaki delaminasyonun kohezyon parametreleri [12].

Sembol	Tanım	Değer	Birim
<i>NFLS</i>	Normal yönde maksimum çekme gerilmesi	21.63x10 ⁹	Pa
<i>SFLS</i>	Teğetsel yönde maksimum çekme gerilmesi	17.9x10 ¹⁰	Pa
<i>PARAM</i>	Karışık mod kriteri için üs	1	-
<i>ERATEN</i>	Mod I için kritik enerji yayılım hızı	430	N/m
<i>ERATES</i>	Mod II için kritik enerji yayılım hızı	4700	N/m
<i>CT2CN</i>	Teğetsel sertliğin normal sertliğe oranı	1	-
<i>CN</i>	Normal sertlik	8080	Pa/m

Tablo 2. CFRP kompozit malzemenin mekanik özellikleri [8].

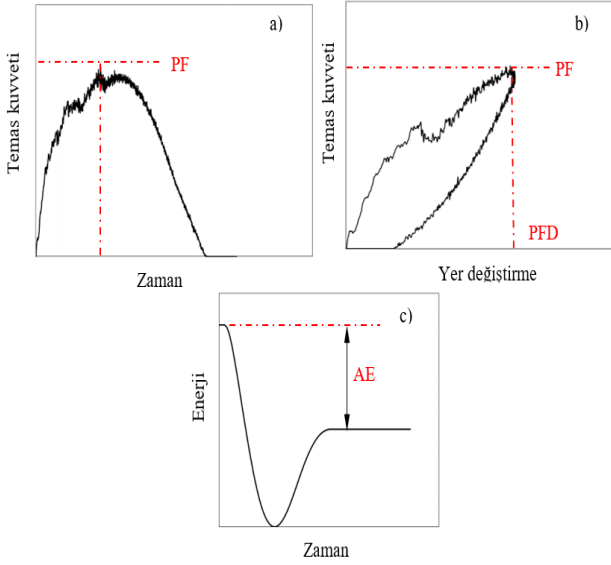
Sembol	Özellik	Değer
ρ (kg/m ³)	Yoğunluk	1500
E_a, E_b (GPa)	a ve b doğrultularındaki elastisite modülleri	43.7
E_c (GPa)	c doğrultusundaki elastisite modülü	14.57
ν_{ab} (-)	$a - b$ düzlemi için poisson oranı	0.21
ν_{bc} (-)	$b - c$ düzlemi için poisson oranı	0.21
ν_{ca} (-)	$c - a$ düzlemi için poisson oranı	0.21
G_{ab} (GPa)	$a - b$ düzlemi için kayma modülü	14.18
G_{bc} (GPa)	$b - c$ düzlemi için kayma modülü	14.65
G_{ca} (GPa)	$c - a$ düzlemi için kayma modülü	14.65
S_{aT} (GPa)	a doğrultusundaki çekme dayanımı	0.589
S_{aC} (GPa)	a doğrultusundaki basma dayanımı	0.1096
S_{bT} (GPa)	b doğrultusundaki çekme dayanımı	0.859
S_{bC} (GPa)	b doğrultusundaki basma dayanımı	0.1096
S_{ab} (GPa)	$a - b$ düzlemi için matris modu kayma dayanımı	0.1082

Tablo 3. CFRP kompozit malzemenin hasar parametreleri [30].

Sembol	Özellik	Değer
<i>DFAILM</i>	Çekme ve basınçta matris gerilmesi için maksimum gerilme	0.0
<i>DFAILS</i>	Maksimum kayma gerilmesi	0.0
<i>DFAILT</i>	Fiber gerilmesi için maksimum çekme	0.0
<i>DFAILC</i>	Fiber gerilmesi için maksimum basma	0.0
<i>TFAIL</i>	Eleman silinmesi için zaman adımı boyutu kriterleri	0.16
<i>Alpha</i>	Kayma gerilmesi (doğrusal olmayan terimi)	0.0
<i>Soft</i>	Ezilmede mukavemeti azaltan parametre	0.7
<i>FBRT</i>	Matris hasarında sonra fiber çekme mukavemeti için yumuşama faktörü	1
<i>YCFAC</i>	Matris hasarında sonra fiber basma mukavemeti için yumuşama faktörü	3
<i>EFS</i>	Efektif hasar gerilmesi	0.90

3 Bulgular ve tartışma

Malzemenin darbe yükü altındaki davranışın belirlenmesi için genellikle düşük hızlı darbe testleri uygulanır. Bu testler sayesinde malzemenin mekanik performansı hakkında bilgiler elde edilir. Darbe testi sonucu elde edilen grafikler Şekil 5'te verilmiştir. Bu sonuçlar malzeme mekaniği hakkında araştırmacılar için önemli bilgiler içerir. Örneğin Şekil 5a' da temas kuvveti-zaman grafiğinde vurucu numuneye temas ettikten sonra kuvvet maksimum noktaya çıkmış sonrada geri dönmüştür. Tepe noktasında dalgalanmalar meydana gelmiştir burada temas ettiği noktadaki katmanlarda hasarlar meydana geldiğinden ötürü kuvvet değerinde değişimler meydana gelmiştir. Sonlu elemanlar simülasyonunda temas kuvvet değeri vurucunun ucundan okunmaktadır. Vurucunun temas ettiği noktadaki elemanlar üzerinde gerilme yığılması (stress intensity) meydana gelir. Malzemenin mekanik özelliğine göre belirli kritik değerden sonra bu elemanlar silinir [31]. Silinen elemanlarda vurucu ile teması kesilir. Tam bu anda kuvvet değerinde düşüş meydana gelir. Vurucunun enerjisi numune tarafında absorbe edildikten sonra geri döner. Bu geri dönüşü Şekil 5b'de vurucunun yer değiştirme hareketlerinden de görülebilmektedir. Şekil 5c'de ise vurucunun baştaki enerjisi ile sonda enerjisi arasındaki farkın absorbe enerji (AE) değeri gösterilmiştir. Vurucu numune yüzeyinden geri sekmıştır. Çünkü temas kesildikten sonra belirli bir hızda enerjisine devam etmektedir. Bu grafikler ile darbe senaryosunda yaşanan mekanik durumları değerlendirerek uygun malzeme ve yapı seçimi yapılabilir.



Şekil 5. Darbe yükü altındaki kompozit boruların a) Temas kuvveti-zaman, b) Temas kuvveti-yer değiştirme ve c) Enerji-zaman grafikleri.

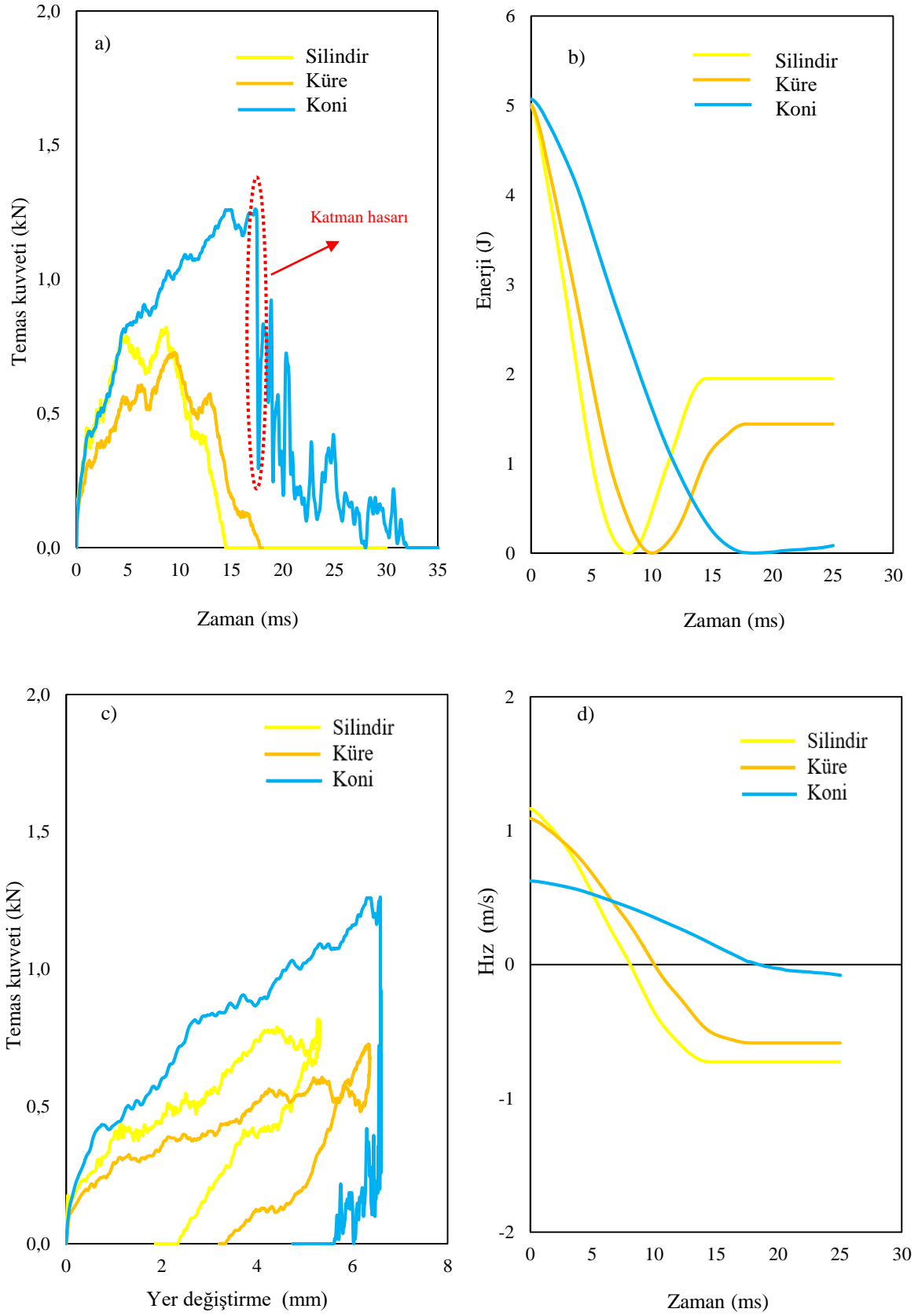
Yay şekli çekirdek yapı silindirik sandviç yapıya ait farklı vurucular için temas kuvveti-zaman, absorbe enerji-zaman, temas kuvveti-yer değiştirme ve hız-zaman grafikleri Şekil 6'da verilmiştir. Buradaki darbe testi P1 noktasına uygulanmıştır. Şekil 6a'da temas kuvveti-zaman grafiğindeki vurucunun numune yüzeyine temas etmesi sebebiyle kuvvet maksimum noktaya ulaşır ve daha sonra enerji boşalmasıyla tekrar sıfır noktasına geri döner. Her üç vurucu için aynı senaryo gerçekleşmiştir. Çalışmada vurucu ucun etkisini daha iyi göstermek için 5 J darbe enerjisi ile silindirik, konik ve küresel uçlu vurucular ile darbe simülasyonu uygulanmıştır. Silindir, koni ve küre uçlu vurucu için maksimum temas kuvvetleri sırayla 0.82, 1.26 ve 0.3 kN'dur. Buna göre bu üç vurucu arasında maksimum temas değeri en yüksek koni vurucuda elde edilmiştir [21]. Yani koni uçlu bir vurucu ile darbeye maruz kaldığındaki dayanımı diğer vuruculara göre daha fazla olduğu anlamına gelir. Maksimum değerden sonra dikkat edilirse grafiklerde düşüş meydana gelmiştir. Grafik detaylıca incelendiğinde silindir ve küre uçlu vurucular ile yapılan darbelerde kuvvetin maksimum noktaya ufak dalgalanmalar ile çıkıp indiği belirlenmiştir. Fakat koni vurucuda ise kuvvet bir noktaya kadar çıkmış sonra sert bir şekilde düşmüştür. Burada üst katmanda hasarın meydana geldiği anlaşılmaktadır. Dolayısıyla bu kuvvetin düştüğü andaki vurucunun temas ettiği nokta grafik üzerinde gösterilmiştir. Şekil 6b'de enerji-zaman grafiğindeki her üç vurucu içinde başlangıç enerjisi 5 J'dür. Fakat darbe sonu silindir, koni ve küre uçlu vurucu için geriye kalan enerjileri sırayla 1.95 J, 0.15 J ve 1.44 J'dür. Enerji absorbe verimliliği bu enerji farkını (son enerji-ilk enerji) başlangıç enerjisine bölerek hesaplanır. Dolayısıyla silindir, koni ve küre uçlu vurucu için enerji absorbe verimliliği (η) sırayla 0.61, 0.97 ve 0.71'dir. En fazla enerji absorbesi koni uçlu vurucu ile yapılan darbe simülasyonunda elde edilmiştir. Şekil 6c'de temas kuvveti-yer değiştirme grafiğinde yer değiştirmeler incelendiğinde silindir, koni ve

küre uçlu vurucu için sırayla 8.95, 6.62 ve 6.38 mm yer değiştirme meydana gelmiştir. Şekil 6d'de ise hız-zaman grafiğindeki değişimler verilmiştir. Grafik incelendiğinde hızın sıfır değeriye indiği daha sonra da negatif yönde hareket ettiği görülmektedir. Burada vurucu temas ettikten sonra hızının sıfıra kadar düştüğü daha sonra tam ters yönde hareket ettiğini gösterir. Şekil 7'de ise P2 noktası için benzer grafikler verilmiştir. Şekil 7a'da temas kuvveti-zaman grafiğinde kuvvet maksimum noktaya salınım olmadan çıkıp inmiştir. Dolayısıyla burada yani P2 noktasında P1 noktası gibi büyük oranda deformasyonun meydana gelmediği anlaşılmaktadır. Bunun nedeni ise bu noktanın çekirdek yapısı tarafından desteklenmesidir [32]. Şekil 7b'de enerji-zaman grafiğinde son çıkış enerji değerlerinin başlangıç enerji değerlerine yakın olduğu görülmektedir.

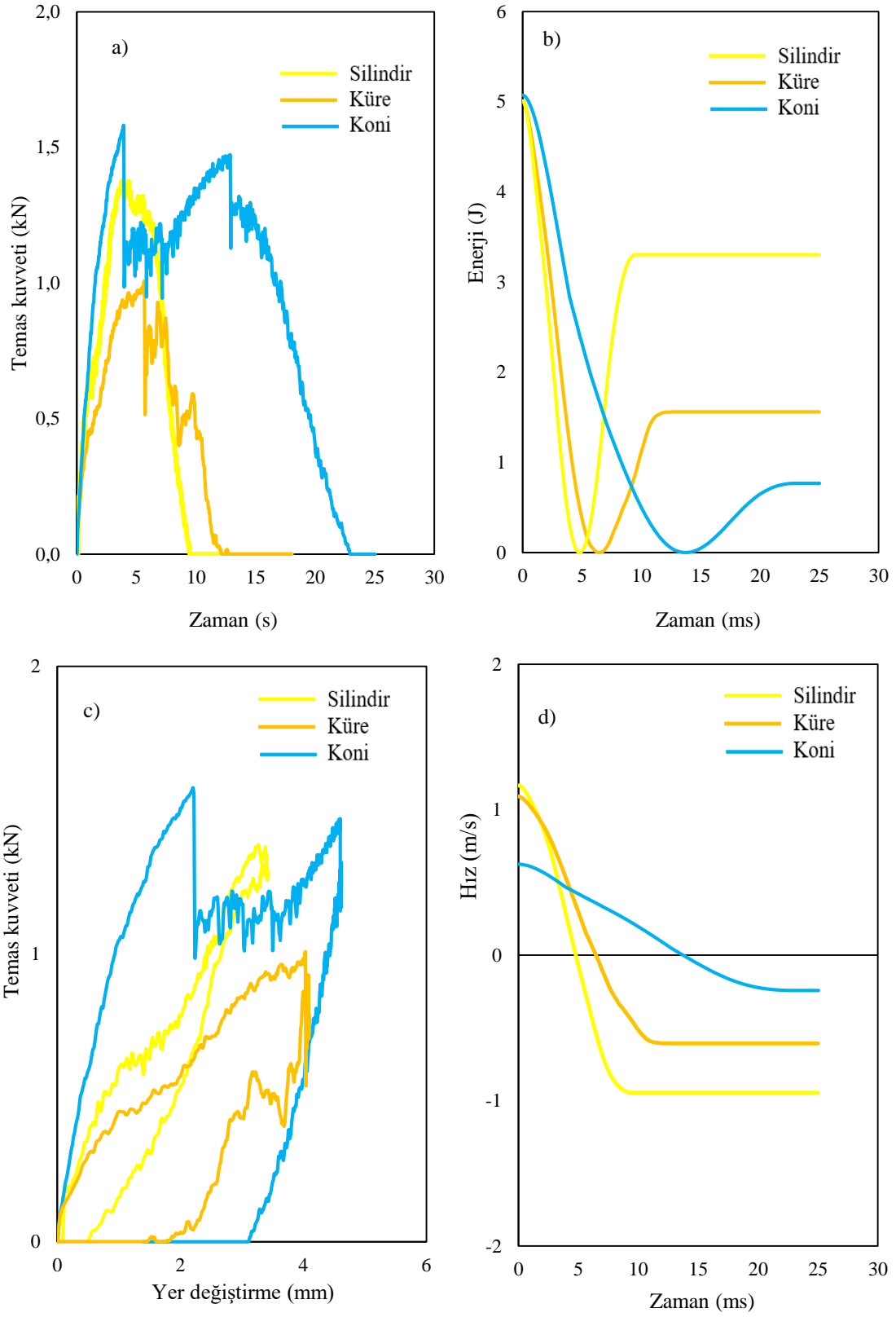
Dolayısıyla P1 den daha az enerji absorbe değeri olduğu belirlenmiştir. Şekil 7c'de temas kuvveti-yer değiştirme grafiğinde kuvvet maksimum noktaya çıkıp tekrar geri döndüğü burada daha açık bir şekilde görülmektedir. Şekil 7d'de ise hız-zaman grafiğindeki değişimleri benzerdir.

Şekil 8'de ise yay şekli sandviç yapının farklı vurucular altında maksimum temas ve enerji absorbe verimlilik değeri verilmiştir. Şekil 8a'da P1 darbe noktası için koni vurucu 1,26 kN ile maksimum temas değeri en yüksektir. En yüksek enerji absorbe verimlilik değeri de yine koni vurucu ile elde edilmiştir. Şekil 8b'de P2 darbe noktası için aynı şekilde koni vurucu 1.58 kN ile en yüksek temas kuvveti değeri sahiptir. En yüksek enerji absorbe verimlilik değeri ise 0.92 ile yani % 92 ile koni uçlu vurucuda elde edilmiştir. Şekil 9'da yüzey kapak kalınlığı $t=4$ mm için farklı vurucular altında maksimum temas ve enerji absorbe verimlilik değeri verilmiştir. Yüzey kapak t kalınlığı 2 mm den 4 mm çıkarıldığında her üç numune için maksimum temas kuvvetinin arttığı görülmüştür [33]. Buna karşın enerji absorbe değeri de azalmıştır. En yüksek maksimum temas kuvveti değeri ve enerji absorbe verimlilik değeri yine koni vurucu ile elde edilmiştir.

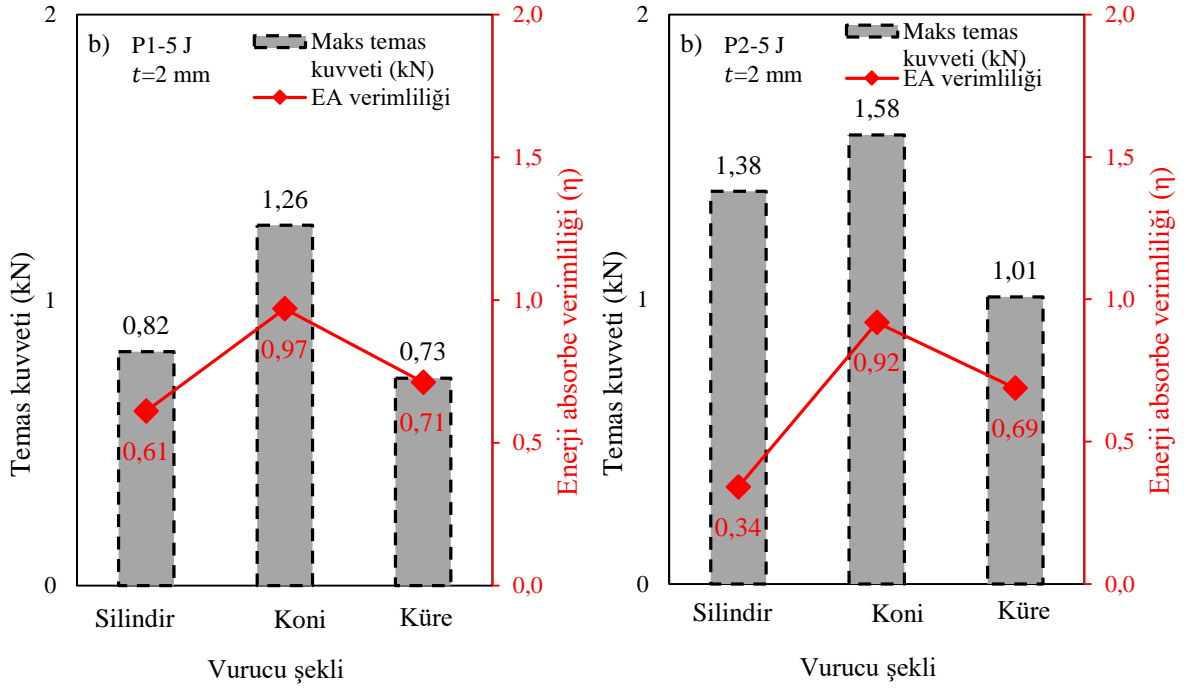
Tablo 4 ve Tablo 5'te farklı darbe noktaları için (P1 ve P2) Fiber çekme modu, Fiber basma modu, Matris çekme modu ve Matris basma modu hasarları ayrı ayrı gösterilmiştir. Farklı vurucular için 5 J darbe için meydana gelen hasarlar mukayese edilmiştir. Burada kırmız renk ile gösterilen bölgeler hasarlı bölgeler, mavi ile gösterilen bölgeler ise hasarın meydana gelmediği alanları temsil etmektedir [33]. İlk olarak P1 noktasında çekirdek tarafından desteklenmediği için meydana gelen deformasyonun büyük olduğu görülmektedir [21]. Bununla beraber hasarın etkisinin daha geniş bir alana yayıldığı belirlenmiştir. Bu etki grafik yapılarında büyük dalgalanmalara sebebiyet verdiği önceki bölümde değinilmiştir. P2 noktasında ise çekirdek yapı tarafından desteklendiği için hasar daha stabil ve P1'e göre lokal kalmıştır [8]. Koni vurucunun daha yıkıcı bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Burada çekirdek yapısının darbeye karşı çok önemli bir parametre olduğu anlaşılmaktadır [2]. Bununla beraber matris hasarının en baskın hasar tipi olduğu görülmektedir.



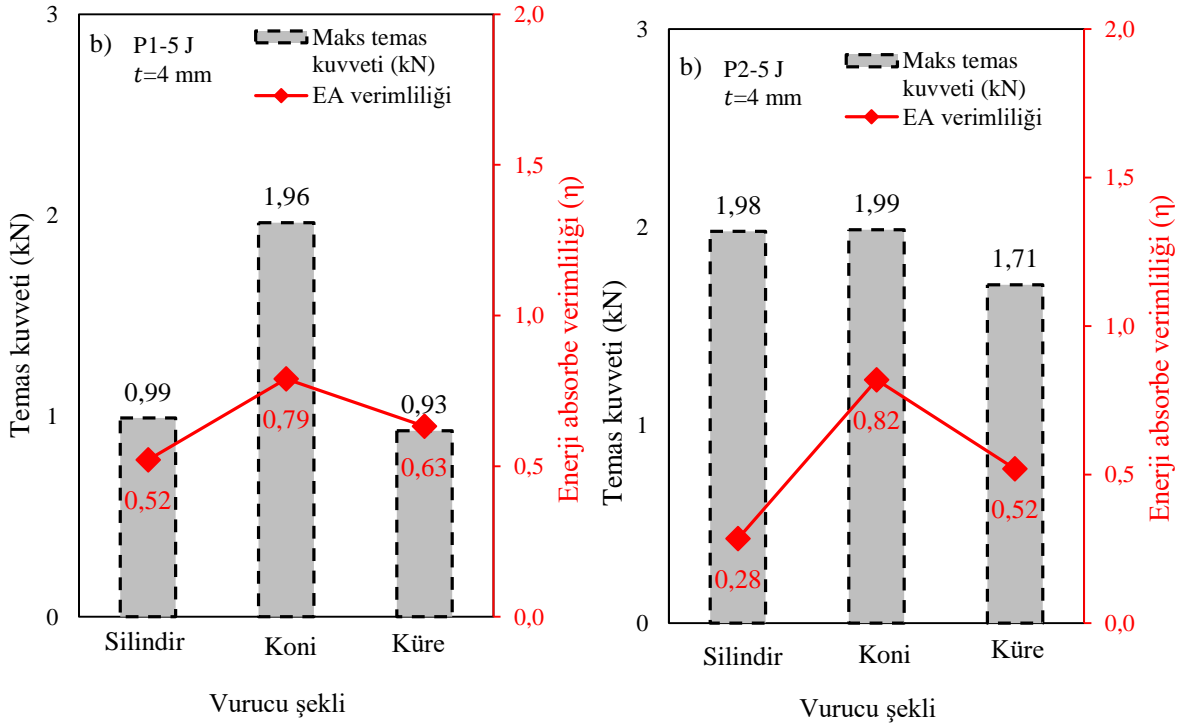
Şekil 6. Vurucu geometrisinin a) Temas kuvveti-zaman, b) Enerji-zaman, c) Temas kuvveti-Yer değiştirme ve d) Hız-zaman grafikleri üzerindeki etkisi (P1).



Şekil 7. Vurucu geometrisinin a) Temas kuvveti-zaman, b) Enerji-zaman, c) Temas kuvveti-Yer değiştirme ve d) Hız-zaman grafikleri üzerindeki etkisi (P2).



Şekil 8. a) P1, b) P2 darbe noktaları için temas kuvvetinin ve enerji absorbe verimlilik değerinin değişimi (Yüzey kapak kalınlığı $t=2$ mm).

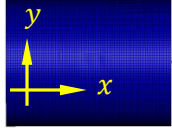
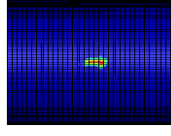
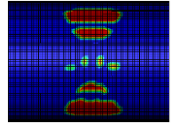
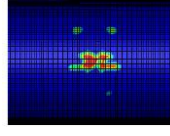
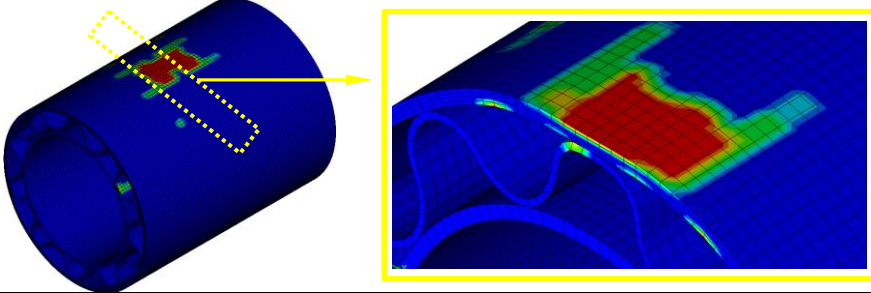
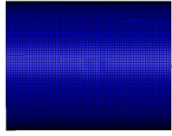
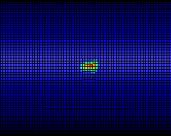
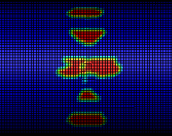
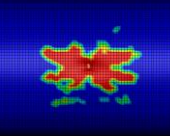
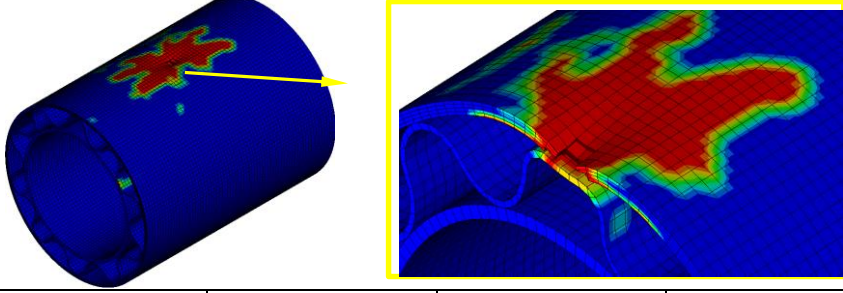
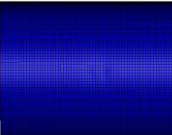
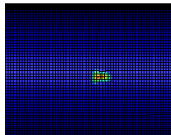
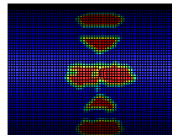
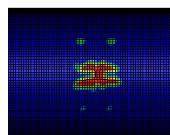
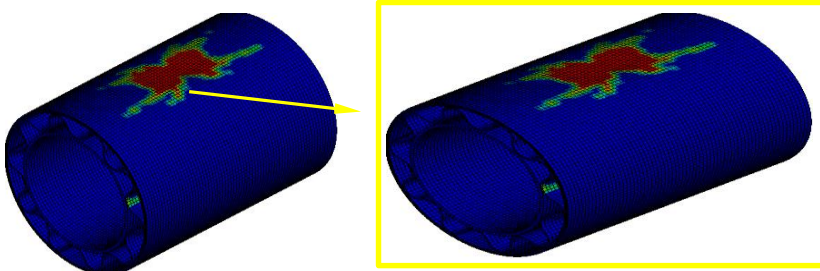


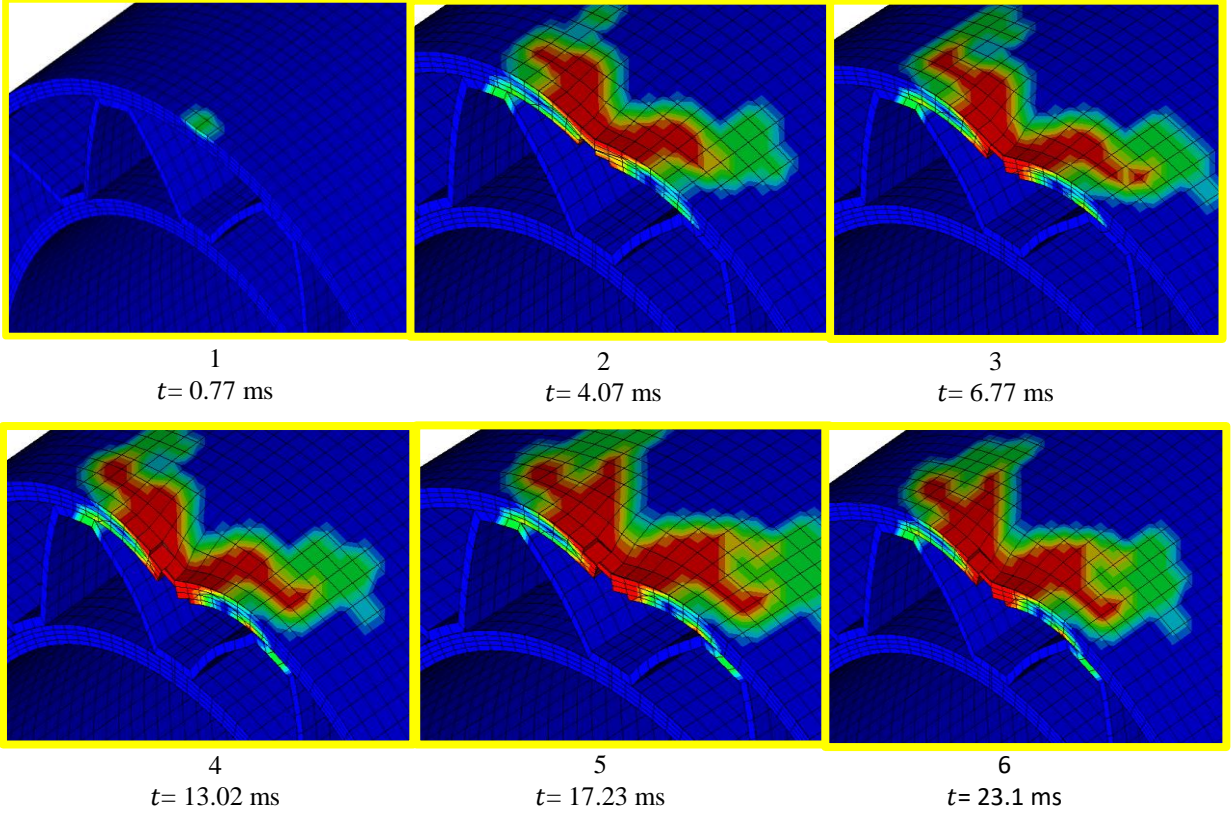
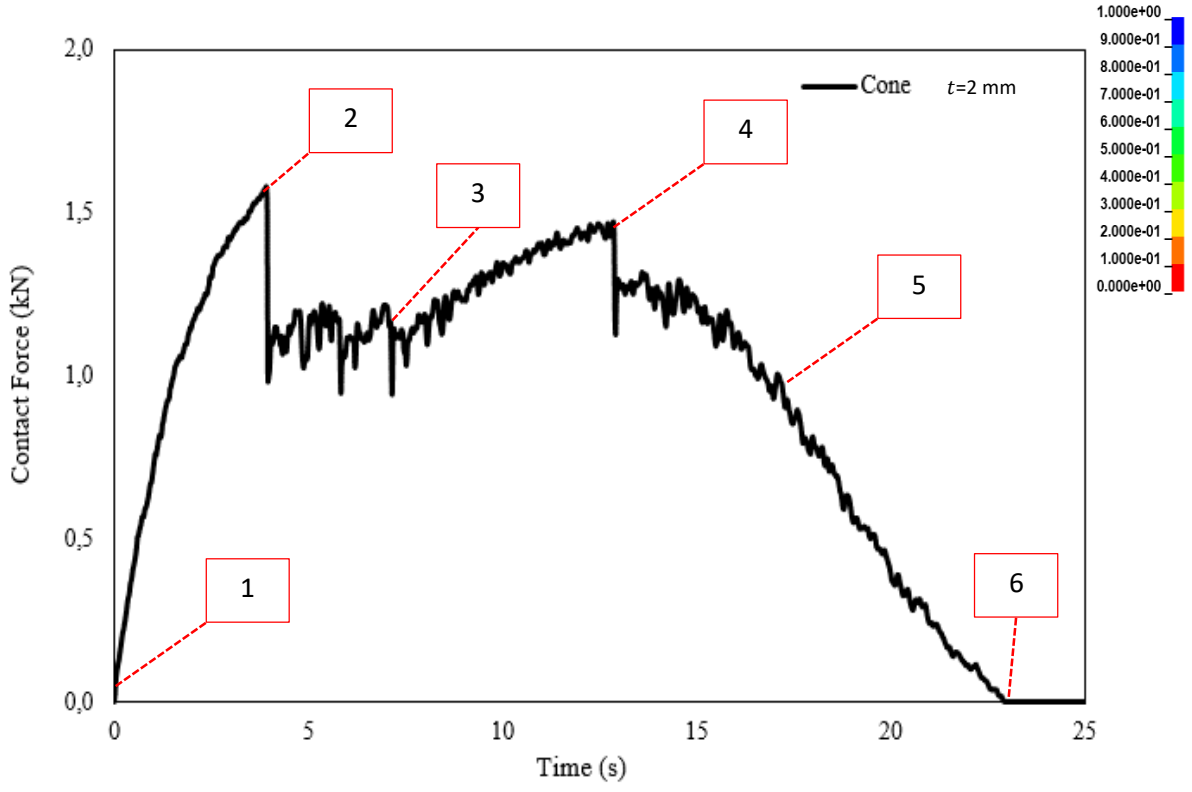
Şekil 9. a) P1, b) P2 darbe noktaları için temas kuvvetinin ve enerji absorbe verimlilik değerinin değişimi (Yüzey kapak kalınlığı $t=4$ mm).

Tablo 4. Farklı vurucular ile yapılan darbe için deformasyonlar (P1).

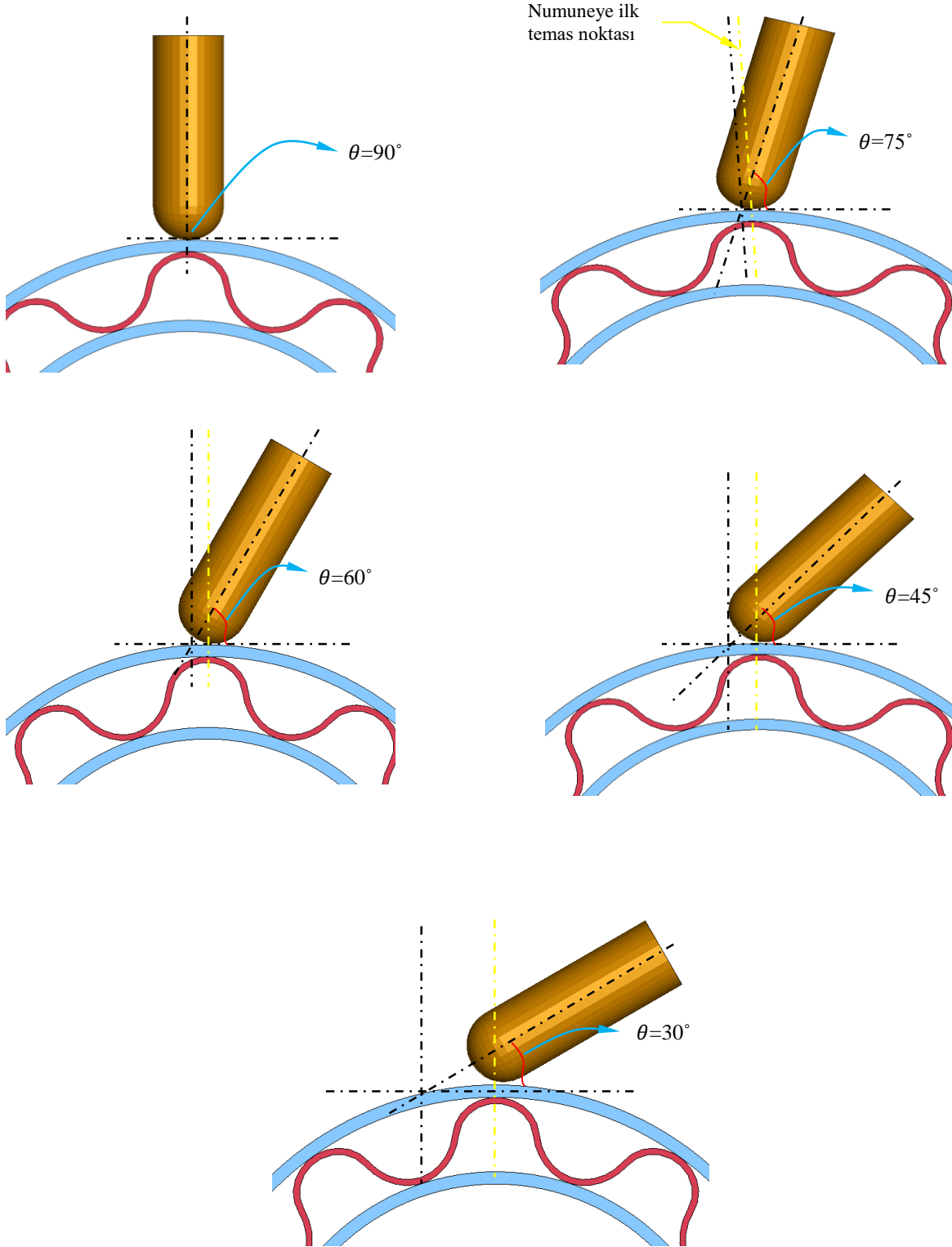
E (J)		Fiber çekme modu	Fiber basma modu	Matris çekme modu	Matris basma modu
Silindir, 5 J	Üst yüzey				
	İzometrik				
Koni	Üst yüzey				
	İzometrik				
Küre	Üst yüzey				
	İzometrik				

Tablo 5. Farklı vurucular ile yapılan darbe için deformasyonlar (P2).

E (J)		Fiber çekme modu	Fiber basma modu	Matris çekme modu	Matris basma modu
Silindir, 5 J	Üst yüzey				
	İzometrik				
Koni	Üst yüzey				
	İzometrik				
Küre	Üst yüzey				
	İzometrik				



Şekil 10. Koni uçlu vurucu ile darbe sonucu meydana gelen deformasyonlar (P1).

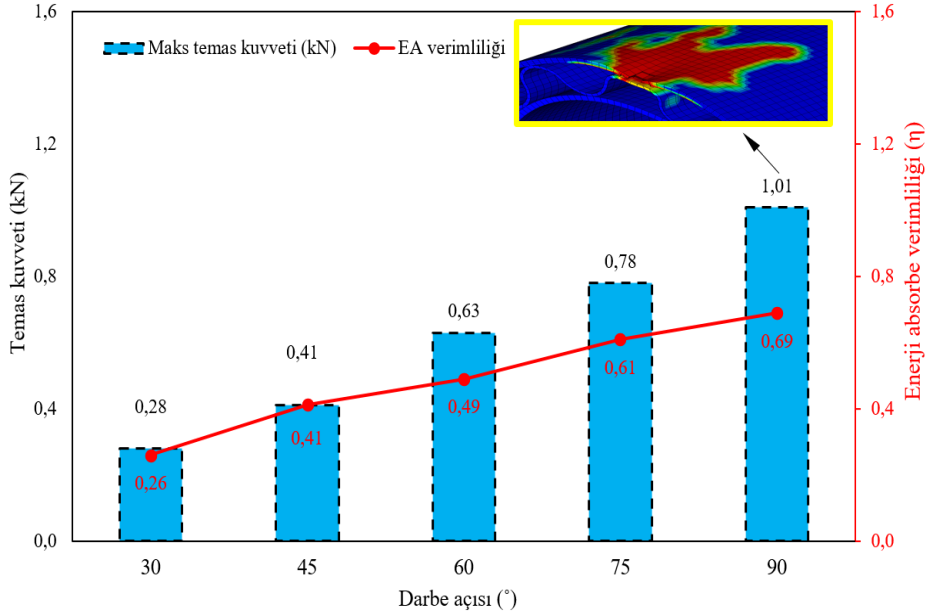


Şekil 11. Farklı darbe açıları için sonlu elemanlar modeli.

Sonlu elemanlar yönteminin bize sunduğu en önemli kolaylıklardan bir tanesi de darbe simülasyonu boyunca istenilen noktadaki deformasyonları görebilmektir [34]. Şekil 10’da koni uçlu vurucu için P1 noktasında yapılan darbe sonucu elde edilen temas kuvveti-zaman grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde vurucunun numuneye temasıyla beraber kuvvet değeri maksimum noktaya artmıştır. Daha sonra burada kuvvet değerinde keskin bir düşüş meydana gelmiştir. Kuvvet dalgalı olarak devam ederken ikinci sert düşüş meydana gelmiştir. Son kısımda kuvvet değerinin belirli salınımlar ve dalgalı hareketler yaparak sıfır noktasına geldiği görülmektedir. Genel olarak grafik incelendiğinde koni ucunun yıkıcı etkisi nedeniyle diğer grafiklerden daha dalgalı ve salınımlı temas kuvveti eğrisi elde edilmiştir [35].

Kuvvet arttıkça hasar alanı yani kırmızı bölgenin alanı artmıştır (Aşama 3). Kuvvet ve dolayısıyla gerilmelerden kaynaklı elemanlar silindiği için temas kuvveti değerinde keskin düşüş yaşanmıştır (Aşama 4). Vurucu teması keserken temas alanında hasarların son hali grafikte verilmiştir (Aşama 5-6).

Daha önce yapılan simülasyonlarda $\theta=90^\circ$ olarak yani numune yüzeyine dik olarak darbe testleri uygulandı.



Şekil 12. Darbe açısının temas kuvveti ve enerji absorbe verimliliği üzerindeki etkisi (η).

4. Sonuçlar

Bu çalışmada farklı geometriye sahip vurucular ile yay çekirdekli silindirik sandviç yapının darbe performansı sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Çalışmada vurucu şeklinin, vurucu açısının, yüzey kapak kalınlığının ve darbe noktasının maksimum temas kuvveti, absorbe enerji verimliliği, maksimum yer değiştirme ve hasar deformasyonu üzerine etkileri incelenmiştir. Düşük hızlı simülasyonları için LS DYNA sonlu elemanlar programında gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonunda elde edilen sonuçlar şu şekilde sıralanabilir;

- Genel olarak P2 noktasında (çekirdek destekli) temas kuvvet değerleri P1 (çekirdek desteksiz) 'den

Çalışmada darbe açısının etkileri göstermek için ise Şekil 11’de verilen küre uçlu vurucu ile $\theta=90^\circ, 75^\circ, 60^\circ, 45^\circ, 30^\circ$ darbe açıları ve 5 J ile darbe testleri uygulanmıştır. Açılı darbe simülasyonları yaklaşık paralel sonuçlar vereceği için koni ve silindir uçlu vurucular için ayrı simülasyonlar yapılmamıştır.

Çalışmada kullanılan numune silindirik yapıya sahip olduğu için açılı darbe durumunda istenilen noktaya temas etmek için referans noktasına ihtiyaç vardır. Sarı renk ile gösterilen çizgi vurucunun numuneye ilk temas ettiği noktayı temsil etmektedir [36]. Darbe simülasyonu sonucu elde edilen enerji absorbe verimliliği değerleri Şekil 12’de verilmiştir.

Grafik incelendiğinde darbe açısı $\theta=30^\circ$ ’den 90° ’ye doğru arttıkça temas kuvvet değeri 2.6 kat artmıştır. Bununla beraber enerji absorbe verimliliği değeri de 1.65 kat artmıştır. Açılı darbe durumunda vurucunun enerjisinin tamamını boşaltmadığı dolayısıyla numunede enerji absorbesi meydana gelmediği belirlenmiştir.

yüksektir. Çekirdek desteği temas kuvveti üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

- Koni vurucu ile elde edilen maksimum temas değeri silindir ve küre uçlu vurucuya göre sırasıyla %35.1 ve %73.7 daha yüksek iken enerji absorbe verimliliği değeri ise sırasıyla %37.1 ve %36.2 daha yüksektir. Vurucunun numune ile temas alanı küçük ve yıkıcı olduğundan kaynaklanmaktadır.
- Darbe sonucu en büyük yer değiştirme koni vurucu ile meydana gelmiştir.
- Vurucu geometrisinin enerji emme verimliliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.

- Vurucu açısı artıkça ($\theta=30^\circ$ 'den 90° 'ye) temas kuvvet değeri 2.6 kat, enerji absorbe verimlilik değeri de 1.65 kat artmıştır.
- Her üç vurucu için en büyük ve baskın hasar tipinin matris hasarı olduğu belirlenmiştir.
- Yapılan bu çalışma ileriki araştırmalarda deneysel çalışma ile de desteklenirse literatüre büyük katkı sağlayacak potansiyele sahiptir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 11

Kaynaklar

- [1] V. Crupi, E. Kara, G. Epasto, E. Guglielmino, and H. Aykul, Prediction model for the impact response of glass fibre reinforced aluminium foam sandwiches. *Int J Impact Eng*, vol. 77, pp. 97–107, 2015, doi: [10.1016/j.ijimpeng.2014.11.012](https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2014.11.012).
- [2] M. O. Kaman, M. Y. Solmaz, and K. Turan, Experimental and numerical analysis of critical buckling load of honeycomb sandwich panels. *J Compos Mater*, vol. 44, no. 24, pp. 2819–2831, 2010, doi: [10.1177/0021998310371541](https://doi.org/10.1177/0021998310371541).
- [3] A. I. Ayten, Y. Polat, M. Sahbaz, and A. Seyhan, Effect of solution-blown nanofibrous web on quasi-static punch shear test results and quasi-static indentation behavior of carbon fiber-reinforced epoxy matrix composites. *J Compos Mater*, vol. 57, no. 24, pp. 3865–3875, Aug. 2023, doi: [10.1177/00219983231197351](https://doi.org/10.1177/00219983231197351).
- [4] A. İ. Ayten, Investigation of mechanical properties and damage types of E-glass fiber reinforced epoxy matrix composites under various loadings. *International Advanced Researches and Engineering Journal*, vol. 7, no. 3, pp. 185–190, 2023, doi: [10.35860/iaej.1334883](https://doi.org/10.35860/iaej.1334883).
- [5] Z. Wu, L. Zhang, Z. Ying, J. Ke, and X. Hu, Low-velocity impact performance of hybrid 3D carbon/glass woven orthogonal composite: Experiment and simulation. *Compos B Eng*, vol. 196, Sep. 2020, doi: [10.1016/j.compositesb.2020.108098](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108098).
- [6] J. Xiong, R. Ghosh, L. Ma, A. Vaziri, Y. Wang, and L. Wu, Sandwich-walled cylindrical shells with lightweight metallic lattice truss cores and carbon fiber-reinforced composite face sheets. *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 56, pp. 226–238, Jan. 2014, doi: [10.1016/J.COMPOSITESA.2013.10.008](https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESA.2013.10.008).
- [7] M. Albayrak, M. O. Kaman, and I. Bozkurt, Experimental and Numerical Investigation of the Geometrical Effect on Low Velocity Impact Behavior for Curved Composites with a Rubber Interlayer. *Applied Composite Materials*, vol. 30, no. 2, pp. 507–538, 2023, doi: [10.1007/s10443-022-10094-5](https://doi.org/10.1007/s10443-022-10094-5).
- [8] I. Bozkurt, M. O. Kaman, and M. Albayrak, Low-velocity impact behaviours of sandwiches manufactured from fully carbon fiber composite for different cell types and compression behaviours for different core types. *Materialpruefung/Materials Testing*, vol. 65, no. 9, pp. 1349–1372, 2023, doi: [10.1515/mt-2023-0024](https://doi.org/10.1515/mt-2023-0024).
- [9] İ. Bozkurt, M. Kaman, and M. Albayrak, LS-DYNA MAT162 Finding Material Inputs and Investigation of Impact Damage in Carbon Composite Plates. XVI. international research conference 2022., pp. 3–7, 2022.
- [10] B. Kazemianfar, M. Esmaeeli, and M. R. Nami, Response of 3D woven composites under low velocity impact with different impactor geometries. *Aerosp Sci Technol*, vol. 102, Jul. 2020, doi: [10.1016/j.ast.2020.105849](https://doi.org/10.1016/j.ast.2020.105849).
- [11] M. Y. Solmaz and T. Topkaya, The flexural fatigue behavior of honeycomb sandwich composites following low velocity impacts. *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 10, no. 20, pp. 1–14, 2020, doi: [10.3390/app10207262](https://doi.org/10.3390/app10207262).
- [12] I. Bozkurt, M. O. Kaman, and M. Albayrak, Experimental and numerical impact behavior of fully carbon fiber sandwiches for different core types. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 46, no. 5, p. 318, May 2024, doi: [10.1007/s40430-024-04865-3](https://doi.org/10.1007/s40430-024-04865-3).
- [13] W. He, S. Lu, K. Yi, S. Wang, G. Sun, and Z. Hu, Residual flexural properties of CFRP sandwich structures with aluminum honeycomb cores after low-velocity impact. *Int J Mech Sci*, vol. 161–162, no. July, p. 105026, 2019, doi: [10.1016/j.ijmecsci.2019.105026](https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.105026).
- [14] W. He, J. Liu, B. Tao, D. Xie, J. Liu, and M. Zhang, Experimental and numerical research on the low velocity impact behavior of hybrid corrugated core sandwich structures. *Compos Struct*, vol. 158, pp. 30–43, 2016, doi: [10.1016/j.compstruct.2016.09.009](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.09.009).
- [15] Y. Chen, K. Fu, S. Hou, X. Han, and L. Ye, Multi-objective optimization for designing a composite sandwich structure under normal and 45° impact loadings. *Compos B Eng*, vol. 142, no. December 2016, pp. 159–170, 2018, doi: [10.1016/j.compositesb.2018.01.020](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.01.020).
- [16] X. Zhang, F. Xu, Y. Zang, and W. Feng, Experimental and numerical investigation on damage behavior of honeycomb sandwich panel subjected to low-velocity impact. *Compos Struct*, vol. 236, no. January, p. 111882, 2020, doi: [10.1016/j.compstruct.2020.111882](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.111882).
- [17] W. He, J. Liu, S. Wang, and D. Xie, Low-velocity impact behavior of X-Frame core sandwich structures – Experimental and numerical investigation. *Thin-Walled Structures*, vol. 131, no. July, pp. 718–735, 2018, doi: [10.1016/j.tws.2018.07.042](https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.07.042).
- [18] T. K. Demircioğlu, F. Balıkoğlu, O. İnal, N. Arslan, Ay, and A. Ataş, Experimental investigation on low-velocity impact response of wood skinned sandwich composites with different core configurations. *Mater Today Commun*, vol. 17, no. May, pp. 31–39, 2018, doi: [10.1016/j.mtcomm.2018.08.003](https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2018.08.003).
- [19] J. Wang, A. M. Waas, and H. Wang, Experimental and numerical study on the low-velocity impact behavior of foam-core sandwich panels. *Compos Struct*, vol. 96, pp. 298–311, 2013, doi: [10.1016/j.compstruct.2012.09.002](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.09.002).
- [20] Y. Rong, J. Liu, W. Luo, and W. He, Effects of geometric configurations of corrugated cores on the

- local impact and planar compression of sandwich panels. *Compos B Eng*, vol. 152, no. August, pp. 324–335, 2018, doi: [10.1016/j.compositesb.2018.08.130](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.08.130).
- [21] J. Liu, W. He, D. Xie, and B. Tao, The effect of impactor shape on the low-velocity impact behavior of hybrid corrugated core sandwich structures. *Compos B Eng*, vol. 111, pp. 315–331, 2017, doi: [10.1016/j.compositesb.2016.11.060](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.060).
- [22] A. Khalkhali, N. Geran Malek, and M. Bozorgi Nejad, Effects of the impactor geometrical shape on the non-linear low-velocity impact response of sandwich plate with CNTRC face sheets. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, vol. 22, no. 4, pp. 962–990, May 2020, doi: [10.1177/1099636218778998](https://doi.org/10.1177/1099636218778998).
- [23] W. He, J. Liu, S. Wang, and D. Xie, Low-velocity impact response and post-impact flexural behaviour of composite sandwich structures with corrugated cores. *Compos Struct*, vol. 189, pp. 37–53, Apr. 2018, doi: [10.1016/J.COMPSTRUCT.2018.01.024](https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2018.01.024).
- [24] Z. Li et al., Impact response of a novel sandwich structure with Kirigami modified corrugated core. *Int J Impact Eng*, vol. 156, p. 103953, Oct. 2021, doi: [10.1016/J.Ijimpeng.2021.103953](https://doi.org/10.1016/J.Ijimpeng.2021.103953).
- [25] J. S. Yang et al., Low velocity impact behavior of carbon fibre composite curved corrugated sandwich shells. *Compos Struct*, vol. 238, no. August 2019, pp. 1–16, 2020, doi: [10.1016/j.compstruct.2020.112027](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112027).
- [26] Y. Cheng, K. Liu, Y. Li, Z. Wang, and J. Wang, Experimental and numerical simulation of dynamic response of U-type corrugated sandwich panels under low-velocity impact. *Ocean Engineering*, vol. 245, p. 110492, Feb. 2022, doi: [10.1016/J.OCEANENG.2021.110492](https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2021.110492).
- [27] T. Boonkong, Y. O. Shen, Z. W. Guan, and W. J. Cantwell, The low velocity impact response of curvilinear-core sandwich structures. *Int J Impact Eng*, vol. 93, pp. 28–38, 2016, doi: [10.1016/j.ijimpeng.2016.01.012](https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2016.01.012).
- [28] M. R. Yellur, H. Seidlitz, F. Kuke, K. Wartig, and N. Tsombanis, A low velocity impact study on press formed thermoplastic honeycomb sandwich panels. *Compos Struct*, vol. 225, no. November 2018, p. 111061, 2019, doi: [10.1016/j.compstruct.2019.111061](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111061).
- [29] Ilyas Bozkurt, Effect of geometric configurations and curvature angle of corrugated sandwich structures on impact behavior. *Polym Compos*, pp. 1–24, 2024.
- [30] M. ALBAYRAK and M. O. KAMAN, Production of Curved Surface Composites Reinforced With Rubber Layer. *European Journal of Technic*, vol. 11, no. 1, pp. 19–22, 2021, doi: [10.36222/ejt.824761](https://doi.org/10.36222/ejt.824761).
- [31] I. Bozkurt, Determination of Deformation Behaviors and Energy Absorption of Lightweight Composite Lattice Cylinders With Different Structures. *Int J Polym Sci*, vol. 2024, no. 1, Jan. 2024, doi: [10.1155/2024/2280726](https://doi.org/10.1155/2024/2280726).
- [32] H. E. Yalkın, R. Karakuzu, and T. Alpyıldız, Low-velocity impact behaviors of sandwich composites with different structural configurations of foam core: numerical study and experimental validation. *Phys Scr*, vol. 98, no. 11, Nov. 2023, doi: [10.1088/1402-4896/ad008f](https://doi.org/10.1088/1402-4896/ad008f).
- [33] C. Atas, B. M. Icten, and M. Küçük, Thickness effect on repeated impact response of woven fabric composite plates. *Compos B Eng*, vol. 49, pp. 80–85, 2013, doi: [10.1016/j.compositesb.2013.01.019](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.01.019).
- [34] B. A. Gama, T. A. Bogetti, and J. W. Gillespie Jr, Progressive Damage Modeling of Plain-Weave Composites using LS-Dyna Composite Damage Model MAT162. 7th European LS-DYNA Conference, no. August 2014, 2009.
- [35] B. M. Icten, B. G. Kiral, and M. E. Deniz, Impactor diameter effect on low velocity impact response of woven glass epoxy composite plates. *Compos B Eng*, vol. 50, pp. 325–332, 2013, doi: [10.1016/j.compositesb.2013.02.024](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.02.024).
- [36] İ. Bozkurt, Numerical Investigation of the Effects of Impactor Geometry on Impact Behavior of Sandwich Structures. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, Sep. 2024, doi: [10.17798/bitlisfen.1482456](https://doi.org/10.17798/bitlisfen.1482456).

