

## E-CAMI/EPOKSİ KOMPOZİT BORULARIN DARBE CEVABINA VURUCU GEOMETRİSİNİN ETKİSİ

Mesut UYANER<sup>1</sup>, Memduh KARA<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup> Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Selçuk Üniversitesi, Konya

<sup>2</sup> Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Seydişehir Ahmet Cengiz Mühendislik Fakültesi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Seydişehir, Konya

### ÖZET

Bu çalışmada filaman sarım yöntemiyle üretilmiş  $\pm 55^\circ$  sarım açısına sahip 10 tabakalı E-cami/epoksi kompozit boruların düşük hızlı darbe cevabına vurucu geometrisinin etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. V yatağı üzerine yerleştirilen kompozit boru numunelerine düşük hızlı darbe cihazı kullanılarak, 24 mm ve 12 mm çaplı yarı-küresel ve  $120^\circ$  piramit uca sahip vurucularla düşük enerjili darbe yapılmıştır. Düşük enerjili darbe deneyleri 5 J, 10 J ve 15 J enerji seviyelerinde yapılmıştır. Vurucu geometrisine ve enerji seviyesine bağlı olarak elde edilen kuvvet-zaman ve kuvvet yer değiştirme değişimleri incelenmiştir. Ayrıca farklı geometrilere sahip vurucuların kompozit boru numunesinde meydana getirmiş olduğu hasarlar haritalanmış, vurucu geometrisine bağlı olarak değişen hasar alanları tetkik edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Kompozit boru , Darbe cevabı, Vurucu geometrisi, Hasar mekanizması

## THE INFLUENCE OF IMPACTOR GEOMETRY ON THE IMPACT RESPONSE OF E-GLASS/EPOKSY COMPOSITE PIPES

### ABSTRACT

In this study, the effect of impactor shape on the low velocity impact response of 10 layered E-glass/epoxy composite pipes which were manufactured by the filament wound method with a winding angle of  $\pm 55^\circ$  was investigated. Composite pipes which were fixed onto a vee support were impacted using steel 24 mm and 12 mm in diameter hemispherical and  $120^\circ$  pyramidal impactors via a specially low velocity impact test machine. Composite pipes were subjected to low velocity impact tests at 5, 10 and 15 J low energy levels. Plots of contact force with respect to time and those of force-displacement were obtained and damages occurred on the specimens were examined by mapping depending on the impactor shape.

**Keywords:** Composite pipe, Impact response, Impactor shape, Damage mechanisms

## 1. GİRİŞ

Birçok endüstri alanında kullanımı hızla artmakta olan Cam takviyeli plastik (CTP) borular yüksek basınca ve korozyona dayanıklı malzemelerdir. CTP borular özellikle basınçlı hava, sıvılaştırılmış petrol gazı, sıkıştırılmış doğalgaz, su ve kimyasal madde iletiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Birçok iletim alanında kullanılan bu malzemeler üretim, servis ve bakım işlemleri sırasında yabancı cisimlerin darbesine maruz kalabilirler. Darbe yüklerine maruz kalan malzemenin mekanik özelliklerindeki değişim doğru hesap edilebilmelidir. İhmal edilen küçük hasarlar malzemenin mekanik özelliklerinde büyük değişimlere sebep olabilir ve istenmeyen kazalar ortaya çıkabilir [1]. Kompozit malzemeler farklı geometrilere sahip vurucular tarafından darbeye maruz kalabilir. Vurucu şekillerinin kompozit malzemelerin darbe cevabına etkisi ile ilgili yapılan birçok çalışma vardır ancak bu çalışmalar daha çok kompozit levhalar üzerine yapılmıştır.

Lee ve ark. [2] basitçe desteklenmiş SMC tabakalar üzerine düşük hızlı darbe testleri yapmışlardır. Konik, düz, yarıküresel ve yarı silindirik vurucular kullanarak 2.4 mm kalınlığındaki levha numunelere

\* Sorumlu Yazar: [mkara@konya.edu.tr](mailto:mkara@konya.edu.tr)

54.5 J enerji seviyesinde darbe yapmışlardır. Çalışmalarında düz ve yarı küresel vurucunun enerji sönmüleme seviyeleri ile hasar mekanizmalarının benzer olduğunu tespit etmişlerdir. Yarı silindirik vurucu dikey yönde ilerleyen bir çatlak oluşturmuştur. Yarı silindir vurucuyla karşılaştırıldığında düz ve yarı küresel vurucu tarafından numunede lokal bir girinti oluşturulmuştur. Konik vurucu tarafından ise daha düşük enerji seviyesinde numunede lokal bir batma oluşturulmuştur. Kim ve Goo [3] tabakalı kompozit levhaların dinamik temas davranışlarına vurucu şeklinin etkisini sonlu elemanlar analizi kullanarak modellemişlerdir. Çalışmalarında farklı geometrilere sahip eliptik uçlu vurucu kullanmışlardır. Eliptik uçlu vurucunun yatay yarıçapı  $a$  ve düşey yarıçapı  $b$  olmak üzere, analizde kullanılan  $b/a$  oranları 0.1, 1 ve 10 olarak seçilmiştir.  $b/a$  oranının 10 olduğu vurucu en sivri geometriye sahiptir. Çalışmalarında  $b/a$  oranı azaldıkça (numune körleştikçe, keskinliği azaldıkça) temas kuvveti artmış, temas süresi azalmıştır. Zhou ve ark. [4] 2 mm kalınlığında karbon/epoksi tabakalı kompozit levha numunelerine 8 mm ve 20 mm boyutlarındaki düz ve yarı küresel uçlarla yarı-statik yük uygulamışlardır. Uç geometrisinin değişmesi hasar modunun değişmesine neden olmuştur. Yarı küresel uç ile yapılan deneylerde matris çatlakları ve bunları takip eden fiber kopmaları olurken düz uç ile yapılan testlerde tabaka kaymaları ve buna bağlı olarak büyük bir delaminasyon alanı ortaya çıkmıştır. Bu durum Zhou [5] tarafından da çalışmada ortaya konmuştur. Mines ve ark. [6] Statik test şartlarında düz ve yarı küresel vurucuların konik vurucularla kıyaslandığında en büyük delaminasyon alanını oluşturduğunu ortaya koymuşlardır. Uyaner ve Kara [7] Ağırlık düşürme test cihazı kullanarak,  $90^\circ$  ve  $120^\circ$  konik, 24 mm ve 12 mm çaplı yarı-küresel ve  $120^\circ$  piramit uca sahip vurucularla e camı/epoksi numuneler üzerine düşük hızlı darbe testleri yapmışlardır. Darbe enerjisi 62,5J ve çarpma hızı 2.5 m/s olarak alınmıştır. Çalışmalarında en büyük hasar alanının 24 mm yarı küresel vurucudan elde edildiğini ortaya koymuşlardır. 24mm yarı küresel uçlu vurucunun 12 mm yarı küresel uçlu vurucuya göre daha fazla temas kuvveti ürettiğini ve temas süresinin daha az olduğunu ortaya koymuşlardır. Dhakal ve ark. [8] fiber takviyeli polyester kompozitlerin ağırlık düşürme darbe cevabına farklı vurucu geometrilerinin etkisini araştırmışlardır. Yarı küresel,  $30^\circ$  ve  $90^\circ$  konik vurucularla kompozit numunelere farklı çarpma hızlarında darbe testleri yapmışlardır. Yarı küresel vurucunun en büyük temas kuvvetini ürettiğini ve numunelerde konik vuruculara göre daha büyük hasar alanları oluşturduğunu ortaya koymuşlardır. Yahya M.F. ve ark. [9] örgü kumaş levhaların delinme simülasyonu üzerine iplik sürtünme etkilerini ve vurucu şekillerinin etkilerini araştırmışlardır. Çalışmalarında düz ve konik vurucular kullanmışlardır. İçten B.M. ve ark. [10] örgü cam/epoksi kompozit levhaların darbe cevabına vurucu çaplarının etkisini araştırmışlardır. 4 farklı çapa sahip yarı küresel vurucularla değişik enerji seviyelerinde darbe testleri yapmışlardır. Çalışmalarında kompozit numunelerin batma ve delinme sınırlarının vuru çapının artmasıyla artış gösterdiğini ortaya koymuşlardır.

Bu çalışmada üç farklı vurucu geometrisi seçilmiştir. Bunlar; 24 mm çaplı yarı küresel, 12 mm çaplı yarı küresel ve  $120^\circ$  piramit uca sahip vuruculardır. Farklı geometrilere sahip vurucular kullanılarak  $\pm 55^\circ$  sarım açısına sahip 10 tabakalı E-camı/epoksi kompozit borular üzerine 5 J, 10 J ve 15 J enerji seviyelerinde düşük hızlı darbe testleri yapılmıştır. Her bir darbe testi altı kez tekrar edilmiştir.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

### 2.1. CTP Kompozit Boruların Üretimi

Bu çalışmada kullanılan  $\pm 55^\circ$  E-camı/epoksi filaman sarım kompozit borular İzoreel Kompozit İzole Malzemeler San. ve Tic. Ltd. Şti. (İzmir, Türkiye) tarafından üretilmiştir. E-camı/epoksi kompozit borular  $\pm 55^\circ$  sarım açısında 10 tabaka olacak şekilde üretilmiştir. Çizelge 1’de kullanılan elyaf ve matrisin özellikleri verilmiştir.

**Çizelge 1.** Kullanılan elyaf ve matrisin özellikleri [1]

	E (GPa )	$\sigma_{çek}$ (MPa)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\epsilon_{kop}$ (%)
Elyaf: E-camı	73	2400	2.6	4-5
Matris: Epoksi Reçine	3,4	50-60	1,2	1,5-2

## 2.2. Düşük Hızlı Darbe Deneyleri

Cam takviyeli plastik (CTP) kompozit numunelerin düşük hızlı darbe cevabına vurucu şeklinin araştırılması için Şekil 1’de verilen düşük hızlı darbe cihazı kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan cihaz ile değişik darbe enerji seviyelerinde ya da değişik darbe hızlarında darbe deneyleri yapılabilmektedir.

Cihaz ile başlangıcından sonuna kadar, darbeyi kaydedebilme ve değerlendirebilme olanağı vardır. Vurucunun toplam kütlesi 6.35 kg’dır. V yatağı üzerine yerleştirilen boru numunesi üzerine Şekil 2’de verilen 24 mm ve 12 mm çaplı yarı-küresel ve 120° piramit uca sahip vurucularla düşük enerjili darbe yapılmıştır. Düşük enerjili darbe deneyleri 5 J, 10 J ve 15 J enerji seviyelerinde yapılmıştır.



**Şekil 1.** Düşük hızlı darbe test düzeneği



**Şekil 2.** Düşük hızlı darbe testlerinde kullanılan vurucu geometrileri

## 3. BULGULAR VE SONUÇLARIN İRDELENMESİ

Bu çalışmada 24 mm ve 12 mm çaplı yarı-küresel ve 120° piramit uca sahip üç ayrı vurucu ile 5 J, 10 J ve 15 J olmak üzere üç ayrı enerji seviyesinde deneyler yapılmak suretiyle toplam dokuz ayrı parametre kullanılmıştır. Her bir parametre ile ilgili deney altı kez tekrar edilmiş ve istatistiksel yaklaşım gerçekleştirilmiştir. İstatistiksel yaklaşımı sağlamak için deneylerden elde edilen, en büyük temas kuvveti, temas süresi, en büyük yer değiştirme ve hasar alanı gibi değerlerin standart sapması ASTM D7136/D7136M – 15’e uygun olarak Denklem 2 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\bar{x} = \left( \sum_{i=1}^n x_i \right) / n \quad (1)$$

$$S_{n-1} = \sqrt{\left( \sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2 \right) / (n-1)} \quad (2)$$

$$CV = 100 \times S_{n-1} / \bar{x} \quad (3)$$

Burada,

$\bar{x}$  = Ortalama değer

$S_{n-1}$  = Standart sapma

$CV$  = Varyasyon katsayısı

$n$  = deney sayısı

$x_i$  = ölçülen değer şeklindedir.

Deneylerden elde edilen ortalama en büyük temas kuvveti, temas süresi, en büyük yer değiştirme ve hasar alanı değerleri Standart sapması ile beraber Çizelge-2’de verilmiştir. Herbir vurucu geometrisi için farklı enerji seviyelerine göre elde edilen değerlerin hepsi, darbe enerjisinin artmasıyla artış göstermiştir.

**Çizelge 2.** Düşük hızlı darbe deneylerinde elde edilen değerler ( $X \pm S_x$ )

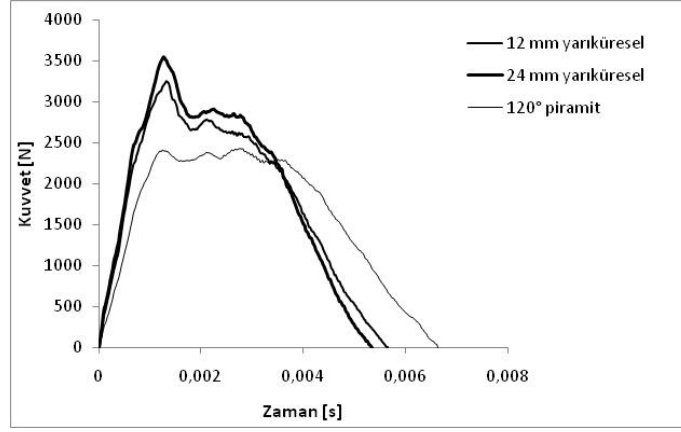
Vurucu Şekli	Darbe Enerjisi [J]	Çarpma Hızı [m/s]	En Büyük Temas Kuvveti [N]	Temas Süresi [ms]	En Büyük yer Değiştirme [mm]	Hasar Alanı [mm <sup>2</sup> ]
12 mm yarı küresel	5	1.26	3250.56±88.51	5.64±0.21	2.28±0.11	145.51±5.84
	10	1.78	3460.39±96.85	6.84±0.17	3.74±0.09	312.62±7.45
	15	2.18	3512.31±114.09	7.88±0.56	5.45±0.27	533.03±12.59
24 mm yarı küresel	5	1.26	3557.90±47.23	5.34±0.49	2.13±0.19	211.93±11.21
	10	1.78	3843.27±81.51	6.28±0.37	3.40±0.09	401.53±9.52
	15	2.18	3892.82±57.33	7.26±0.22	5.05±0.17	695.06±16.43
120° piramit	5	1.26	2430.97±107.29	6.64±0.61	2.84±0.25	186.76±14.05
	10	1.78	3282.57±126.70	8.16±0.46	4.45±0.27	415.73±18.47
	15	2.18	3344.43±82.93	8.90±0.68	6.30±0.34	724.76±24.53

### 3.1. Vurucu Geometrisinin Kuvvet-Zaman Değişimine Etkisi

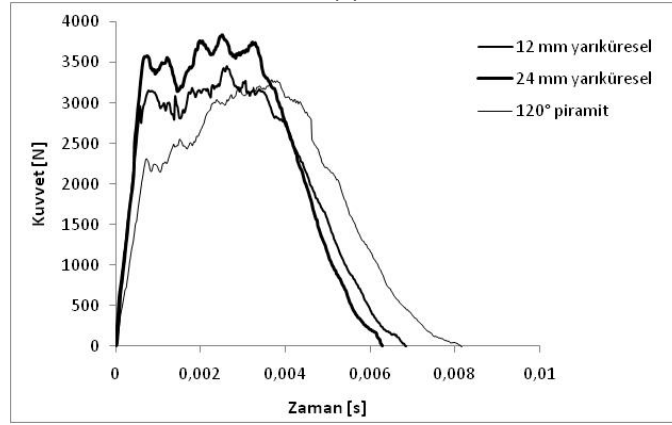
Şekil-3’te farklı vurucu geometrileri için değişik enerji seviyelerinde E-Cam/Epoksi kompozit boru numunelerinden elde edilen temas kuvveti-zaman değişimleri verilmiştir. Kuvvet-zaman değişimleri Cam takviyeli plastik (CTP) kompozit numunelerin vurucu geometrisi tarafından ayırt edilen karakteristik özelliklerini içermektedir. Kim ve Goo [3], Uyaner ve Kara [7], İçten ve ark. [10] ve diğer literatür çalışmalarında vurucu ucun sivriliği azaldıkça yani vurucu uç körleştikçe numunelerden elde edilen en büyük temas kuvvetinin arttığı ve temas süresinin azaldığı tespit edilmiştir. Şekil 3 incelendiğinde (literatürde olduğu gibi) bütün enerji seviyeleri için en büyük temas kuvvetinin ve en kısa temas süresinin sivriliği en düşük olan 24 mm yarı küresel vurucudan elde edildiği görülmektedir. En küçük temas kuvveti ve en uzun temas süresi ise piramit uçlu vurucudan elde edilmiştir. Çünkü piramit uçlu vurucu keskin kenarlara sahip olduğu için darbe anında numuneye diğer vuruculara göre daha fazla saplanmış, buna bağlı olarak temas süresi artmıştır. Saplanmanın etkisiyle vurucudan elde edilen temas kuvveti diğerlerinden daha düşük olmuştur. Düşük hızlı darbe testlerinde enerji seviyesi

artıkça grafiklerdeki salınımların arttığı görülmektedir. Darbe enerjisinin artmasıyla numunede meydana gelen hasarlar arttığı için grafiklerdeki salınımlarda artmıştır.

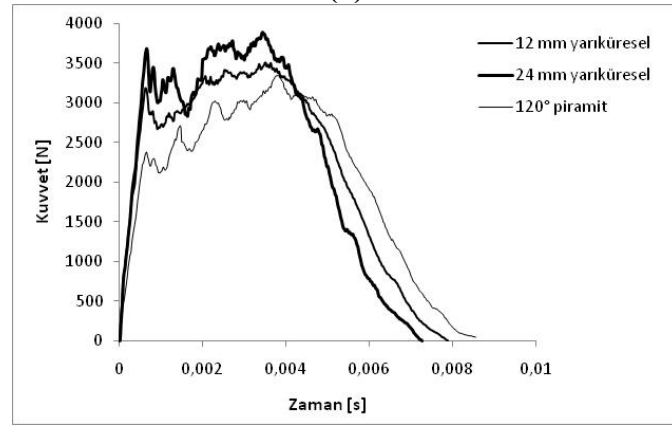
Grafikler dikkatle incelendiğinde tüm enerji seviyeleri için, kuvvet değeri hızla artmakta, 24 mm yarı küresel vurucu için yaklaşık 3500 N, 12 mm yarı küresel vurucu için yaklaşık 3200 N ve piramit uçlu vurucu için yaklaşık 2300 N değerine ulaşınca ani düşme göstermektedir. Bu kuvvet değerleri numunede ilk hasarın oluştuğu değerlerdir. Her bir vurucu için darbe enerjisinin artmasıyla en büyük temas kuvveti ve temas süresi değerlerinin arttığı grafiklerden anlaşılmaktadır.



(a)



(b)

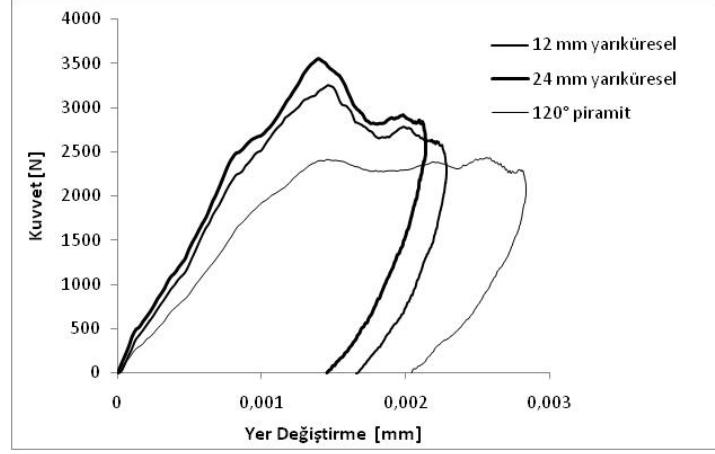


(c)

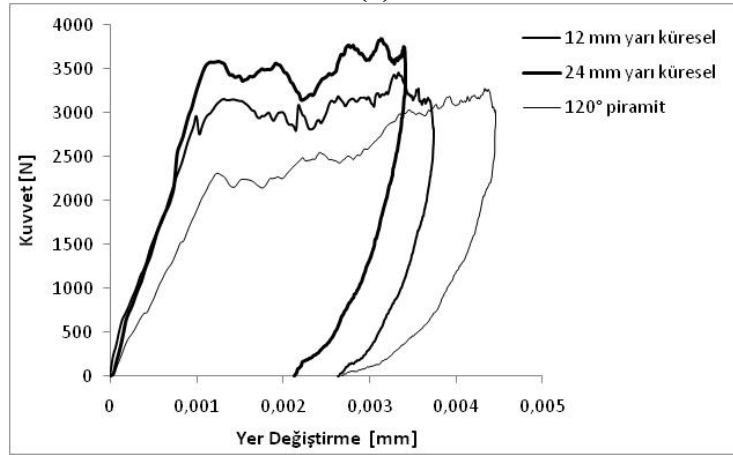
**Şekil 3.** Değişik vurucu geometrileri için a) 5 J b) 10 J ve c) 15 J enerji seviyelerinde CTP kompozit borulardan elde edilen kuvvet-zaman değişimi

### 3.2. Vurucu Geometrisinin Kuvvet-Yer Değişirme Değişimine Etkisi

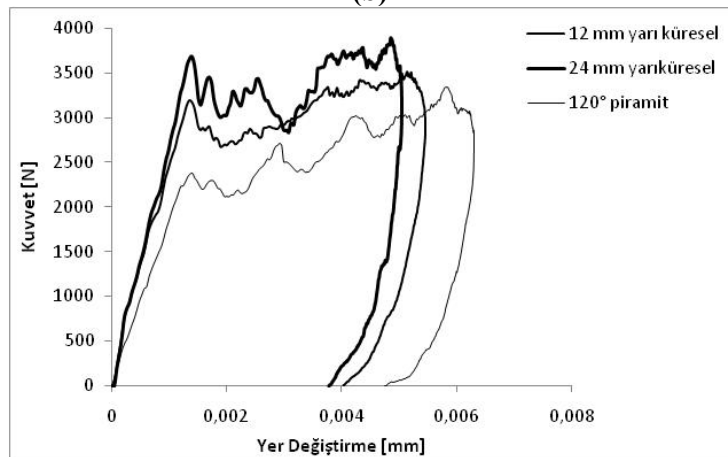
Farklı vurucu geometrileri için değişik enerji seviyelerinde kompozit boru numunelerinde elde edilen kuvvet yer değiştirme değişimleri Şekil-4'te verilmiştir.



(a)



(b)



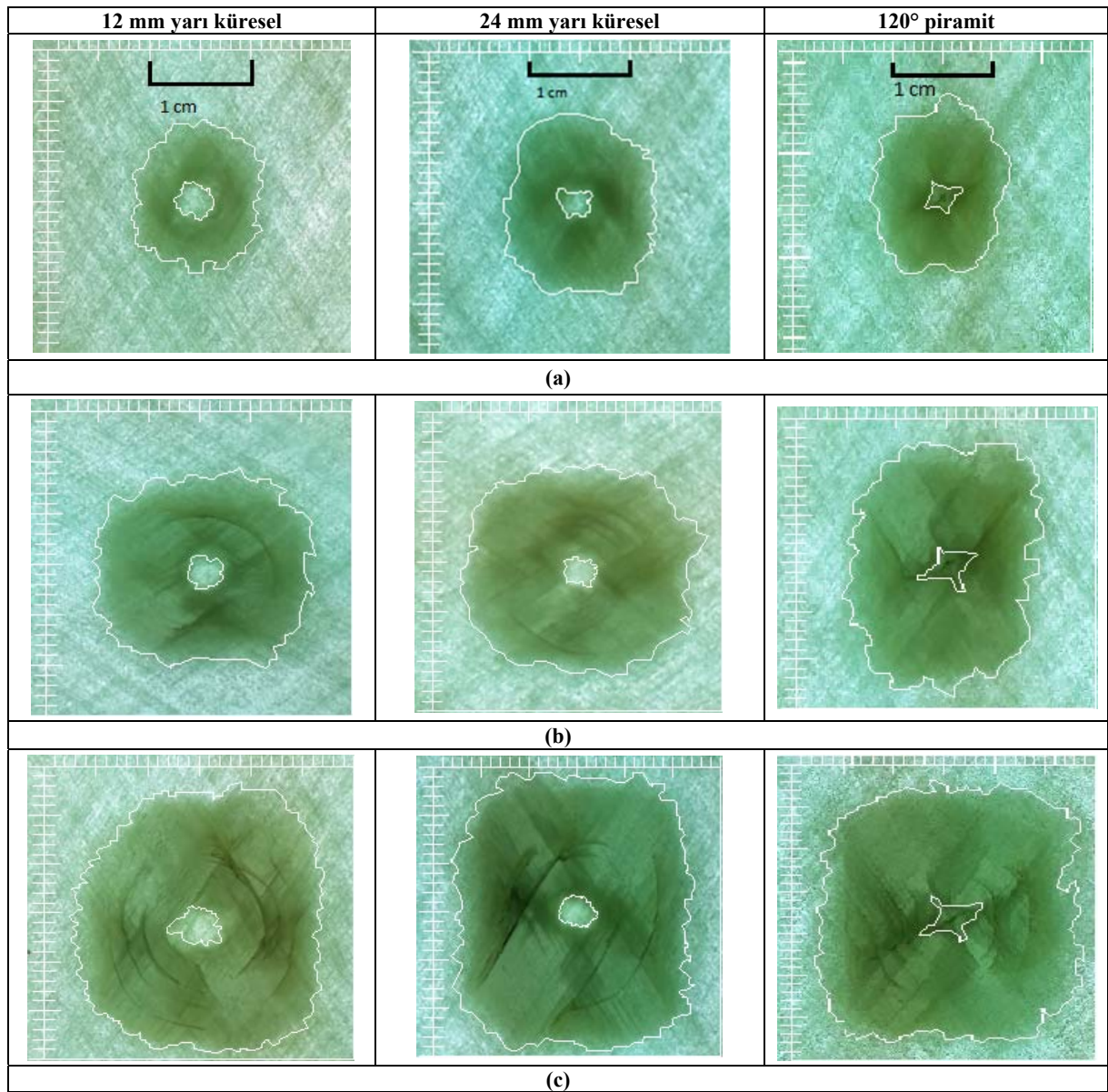
(c)

Şekil 4. Değişik vurucu geometrileri için a) 5 J b) 10 J ve c) 15 J enerji seviyelerinde CTP kompozit borulardan elde edilen kuvvet-yer değiştirme değişimi

Tüm enerji seviyeleri için en büyük yer değiştirme miktarının piramit uçlu vurucudan elde edildiği şekillerden anlaşılmaktadır. Bunun en önemli nedeni piramit uçlu vurucunun kompozit numuneyi keserek batmasıdır. Batma etkisinden dolayı piramit uçlu vurucu numunenin içerisine daha fazla dalmakta ve buna bağlı olarak yer değiştirme miktarı yarı küresel vuruculara göre daha fazla olmaktadır. Kuvvet Yer değiştirme grafiklerinde kuvvetin arttığı bölgedeki eğim eğilme rijitliği olarak adlandırılır. Yarı küresel uçlu vuruculardan elde edilen eğrilerde eğilme rijitliği benzerlik gösterirken piramit uçlu vurucudan elde edilen eğilme rijitliği daha düşük olmaktadır. Bunun nedeni de numuneye piramit uçlu vurucunun batmasıdır.

### 3.3. Hasar Mekanizmaları

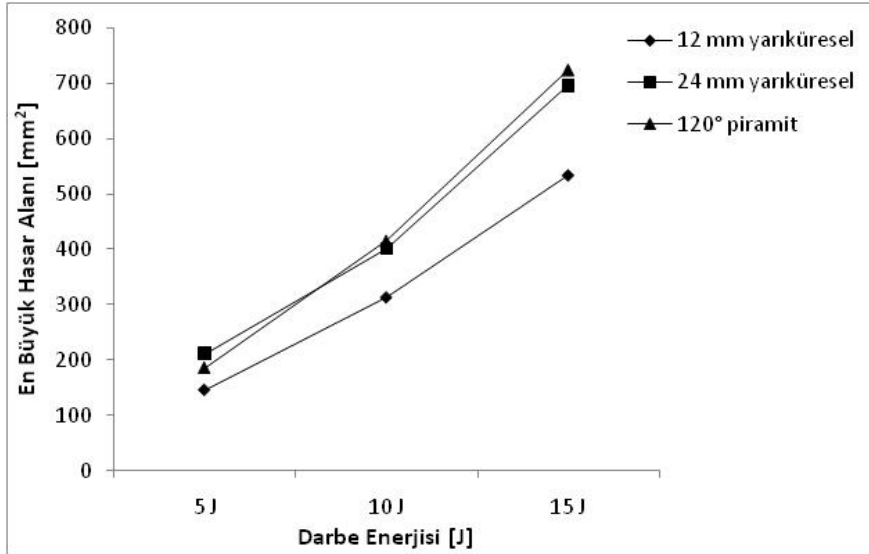
Farklı vurucu geometrileri için değişik enerji seviyelerinde kompozit boru numunelerinde oluşan hasar bölgelerine ait görüntüler Şekil-5'te verilmiştir.



Şekil 5. Değişik vurucu geometrileri için a) 5 J b) 10 J ve c) 15 J enerji seviyelerinde CTP kompozit borulardan elde edilen hasar mekanizmaları

CTP kompozit deney numunelerine farklı geometrilere sahip vurucularla yapılan darbe deneylerinden sonra numunede oluşan hasarlar haritalanmıştır. Kevlar ve cam/epoksi kompozit numunede meydana gelen hasarlar, hasarlı bölgenin arkasından ışık tutarak belirlenebilir. Tabakalar arası ayrılmaların boyutu ve şekli ile mevcut olan matris çatlakları çıplak göz ile belirlenebilir [11]. Hasarlı kompozit numunelerin arka tarafından ışık tutularak hasar bölgelerinin yüksek çözünürlükte fotoğrafları çekilmiştir. Daha sonra hasar bölgeleri grafik programları aracılığı ile haritalanmıştır. Haritalama işleminde numunelerin iki hasar bölgesi ortaya çıkarılmıştır. Ortadaki bölge darbenin merkezi olup vurucu nufuziyetinden kaynaklanan hasarların olduğu bölgedir. Piramit uçlu vurucuların bu bölgesinde batma ve kesilme görülmektedir. Haritalama işlemi ile ortaya çıkarılan ikinci bölge ise delaminasyonların ve matris çatlaklarının olduğu bölgedir. Tüm vurucu şekilleri için darbe enerjisinin artmasıyla numunede oluşan matris çatlaklarının ve delaminasyon hasarlarının arttığı görülmektedir. 24 mm yarı küresel vurucunun meydana getirdiği hasarlar 12 mm yarı küresel vurucunun meydana getirdiği hasarlardan daha fazladır. 15 J enerji seviyesi için en büyük hasar alanı piramit uçlu vurucudan elde edilmiştir.

Numunelerde oluşan hasar alanlarının ortalama boyutları ölçülerek tespit edilmiş ve Şekil-6'da darbe enerji seviyesine göre hasar alanı değişimi grafiğinde verilmiştir.



Şekil 6. Değişik vurucu geometrileri için darbe enerji seviyelerine göre hasar alanı değişimi

Tüm enerji seviyeleri için en küçük hasar alanlarının 12 mm yarı küresel vurucudan elde edildiği görülmektedir. 5 J enerji seviyesinde en büyük hasar alanı 24 mm yarı küresel vurucudan elde edilirken 15 j enerji seviyesi için piramit uçlu vurucudan elde edilmiştir. Enerji seviyesi arttıkça piramit uçlu vurucunun numune içerisine dalma miktarı artmış buna bağlı olarak numunelerde oluşturduğu hasar miktarının artış oranı diğerlerinden daha fazla olmuştur.

#### 4. SONUÇLAR

10 tabakalı  $\pm 55^\circ$  sarım açısına sahip E-camı/epoksi kompozit boruların düşük hızlı darbe davranışına vurucu geometrisinin etkilerinin deneysel olarak araştırıldığı bu çalışmadan elde edilen sonuçlar;

- Kuvvet-zaman değişim grafiğinde bütün enerji seviyeleri için en büyük temas kuvvetinin ve en kısa temas süresinin 24 mm çapa sahip yarı küresel vurucudan elde edildiği görülmektedir. En küçük temas kuvveti ve en düşük temas süresi ise piramit uçlu vurucudan elde edilmiştir.



- Farklı geometrilere sahip bütün vurucular için darbe enerjisinin artmasıyla en büyük temas kuvveti ve temas süresi değerleri de artmaktadır.
- Kuvvet-yer değiştirme grafiklerinden tüm enerji seviyeleri için en büyük yer değiştirme miktarının piramit uçlu vurucudan elde edildiği anlaşılmaktadır.
- Yarı küresel uçlu vuruculardan elde edilen eğrilerde eğilme rijitliği benzerlik gösterirken piramit uçlu vurucudan elde edilen eğilme rijitliği daha düşük olmaktadır. Bunun nedeni numuneye piramit uçlu vurucunun batmasıdır.
- Haritalama işleminde numunelerin iki hasar bölgesi ortaya çıkarılmıştır. Ortadaki bölge darbenin merkezi olup vurucu nufuziyetinden kaynaklanan hasarların olduğu bölgedir. İkinci bölge ise delaminasyonların ve matris çatlaklarının olduğu bölgedir.
- Tüm vurucu şekilleri için darbe enerjisinin artmasıyla numunede oluşan matris çatlaklarının ve delaminasyon hasarlarının arttığı görülmektedir. 24 mm yarı küresel vurucunun meydana getirdiği hasarlar 12 mm yarı küresel vurucunun meydana getirdiği hasarlardan daha fazladır. 15 J enerji seviyesi için en büyük hasar alanı piramit uçlu vurucudan elde edilmiştir.

## KAYNAKLAR

- [1] Kara M, Düşük Hızlı Darbe Sonrası Yama İle Tamir Edilmiş Filaman Sarım CTP Boruların İç Basınç Altındaki Hasar Davranışı, Doktora Tezi Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2012, Konya.
- [2] Lee SM, Cheon JS, Im YT. Experimental and numerical study of the impact behavior of SMC plates Compos. Struct., 1999; 47, 551–561
- [3] Kim SJ, Goo NS. Dynamic contact responses of laminated composite plates according to the impactor's shapes, Comput. Struct., 1997; 65 (1), 83–90.
- [4] Zhou GJC, Lloyd J. McGuirk J. Experimental evaluation of geometric factors affecting damage mechanisms in carbon/epoxy plates, Compos. Part A: Appl. Sci. Manuf., 2001; 32, 71–84.
- [5] G. Zhou, Damage mechanisms in composite laminates impacted by a flat-ended impactor, Compos. Sci. Technol., 1995; 54, 267–273.
- [6] Mines RAW, Roach AM. N. Jones, High velocity perforation behaviour of polymer composite laminates, Int. J. Impact Eng., 1999; 22, 561–588
- [7] Uyaner M and Kara M. Experimental study of the impact behavior of laminated composites stricken by sharp impactors. Sci Eng Compos Mater, 2012; 19, 307-313.
- [8] H.N. Dhakal, Z.Y. Zhang, N. Bennett, P.N.B. Reis, Low-velocity impact response of non-woven hemp fibre reinforced unsaturated polyester composites: Influence of impactor geometry and impact velocity, Compos. Struct., 2012; 94, 2756–2763.
- [9] Faizul YM, Ghani SA and Salleh J. Effect of impactor shapes and yarn frictional effects on plain woven fabric puncture simulation. Textile Research Journal, 2014; 0040517513515319.
- [10] Icten BM, Kiral BG and Deniz ME Impactor diameter effect on low velocity impact response of woven glass epoxy composite plates. Composites Part B: Engineering, 2013; 50 325-332.
- [11] Abrate, S. Impact on composite structures. Cambridge, Cambridge University Press., 1998, 135-160.
- [12] ASTM D 7136/D 7136M 07 Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event 2.