

*XV. Ulusal Mekanik Kongresi, 3-7 Eylül 2007, ISPARTA*

## **ÖRGÜLÜ KOMPOZİT PLAKLARDA DARBE DENEYLERİNİN İRDELENMESİ**

Cesim Ataş, Bülent Murat İçten, Mehmet Aktaş

Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü

35100, Bornova, İzmir

### **ÖZET**

Bu çalışmada örgülü cam-elyaf/epoksi kompozit plakların darbe davranışları incelenmiştir. Enerji profili diyagramı, hasarlı numune görüntüleri ve ilgili kuvvet-çökme eğrilerini karşılaştırmak suretiyle, hasarlı numunelerin hasar gelişiminin tespit edilebileceği gösterilmiştir. Örne açısının tabakalı plakların darbe direnci ve hasar mekanizmaları üzerindeki etkisi de araştırılmıştır. Ayrıca, maksimum kuvvet, maksimum çökme ve maksimum temas süresi gibi darbe karakteristiklerinin darbe enerjisi ile değişimleri de sunulmuş ve bu karakteristiklerin hasar gelişimi ile arasındaki ilişki kurulmuştur.

### **ABSTRACT**

In this study, impact behavior of woven glass fabric -epoxy composite plates is examined. It is shown that the damage process of individual specimens can be reconstructed from comparing the energy profile diagram, images of damaged specimens and corresponding load-deflection curves. The effect of weave angle on impact resistance and damage mechanisms of laminated plates is also investigated. In addition, variation of the impact characteristics such as maximum force, maximum deflection and maximum contact time versus impact energy is presented. The correlation between those characteristics and damage process is also constructed.

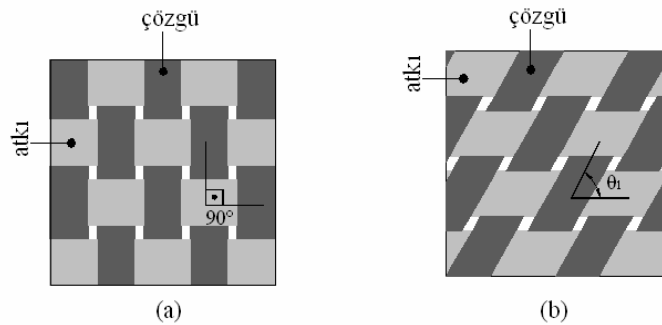
### **1. GİRİŞ**

Günümüzde her alanda olduğu gibi mühendislik sahasında da büyük ilerlemeler sağlanmıştır. Bu ilerlemelerin hızla meydana geldiği sahalardan birisi de, klasik metalik malzemeler yerine, artan kompozit malzeme imalatı ve kullanımı teknolojisidir. Kompozit malzemeleri bu kadar önemli ve tercih edilir kılan neden, sahip oldukları özellikler ve sağladıkları avantajlardır. Kompozit malzemelerin farklı kullanım sahaları için sağladıkları avantajların bazıları; yüksek mukavemete karşın hafiflik, yüksek korozyon direnci, yüksek ısı dirençleri, ses yalıtımı vb. şeklinde sıralanabilir. Fakat diğer taraftan, çok geniş uygulama sahası bulan kompozit

malzemelerin metallerin aksine düşük kırılma tokluklarına sahip olmaları (ör; karbon ve camlifi takviyeli kompozit plaklar) onları darbe yüklerine karşı hassas hale getirmektedir. Bu nedenle; kompozit plakların darbe davranışlarının incelenmesi, darbe yüklerine karşı dirençlerinin artırılması günümüzün en önemli araştırma konularından biri haline gelmiştir [1]. Kompozit malzemelerin darbe davranışları ile ilgili çalışmaların listesi literatürden bulunabilir [2–5]. Örgülü kompozitlerin tek yönlü (unidirectional) kompozitlere oranla darbe direnci açısından avantajlar sağladığı yapılan çalışmalarda gösterilmiştir. Örgülü kompozitlerin darbe davranışları hakkında farklı yönlerden ele alınan pek çok çalışma mevcuttur [6–18].

Burada bu çalışmaların bir kısmının içeriği hakkında kısa bilgiler verilmiştir. Siow ve Shim [7] örgülü karbon-epoxy kompozitlerin darbe davranışlarını ve hasara uğramış numunelerin mekanik özelliklerini incelediler. Rydin ve çalışma arkadaşları [8] örgülü ve örgüsüz kompozitlerin düşük hızlı darbe testlerinde hızın etkisini araştırdılar. Ebeling ve arkadaşları [9] örgülü camlifi takviyeli kompozit plaklarda tabakalar arası ayrılmaları incelediler. Kim ve Sham [11] tarafından yapılan başka bir çalışmada, darbeye maruz örgülü kompozitlerin kırılma davranışı ve tabakalar arası ayrılma mekanizmaları araştırıldı. Söz konusu çalışmada örgülü kompozitlerin diğer tabakalı kompozit plaklara göre (darbe yükleri açısından) avantajları hakkında faydalı bilgiler sunulmuştur. Atas ve Liu [16] küçük örgü açısına sahip kompozit plakların darbe davranışını ve örgü açısının darbe karakteristikleri üzerine etkisini incelediler.

Bu çalışmada; kompozit plakların darbe deneylerinin yapılmasında ve deney sonuçlarının değerlendirilmesinde izlenecek yol ile ilgili bilgiler verilmiştir. Çalışmada örgülü cam-elyaf takviyeli plaklar kullanılmıştır. Yatay (atkı) ve dikey (çözgü) lifler arası  $90^\circ$  olan ortogonal elyafların yanında, Şekil 1(a), lifler arası açı değeri  $90^\circ$  den küçük, Şekil 1(b), olan cam-elyaf takviyeli kompozit plakların da darbe davranışları incelenmiş ve hasar mekanizmaları karşılaştırılmıştır. Daha önce yapılan araştırmalarda [16], lifler arası açı  $90^\circ$  den küçük elyaf takviyeli kompozit plakların ortogonal olanlara oranla darbe direncinin daha yüksek olduğu gösterilmiştir. O çalışmalarda örgü açısı  $90^\circ$  ve  $20^\circ$  olan plaklar için hasar mekanizmaları resimlerle gösterilmiştir. Bu çalışmada ilave olarak, örgü açısı  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  ve  $75^\circ$  olan numuneler için de hasar resimleri verilmiş ve karşılaştırmalar yapılmıştır.



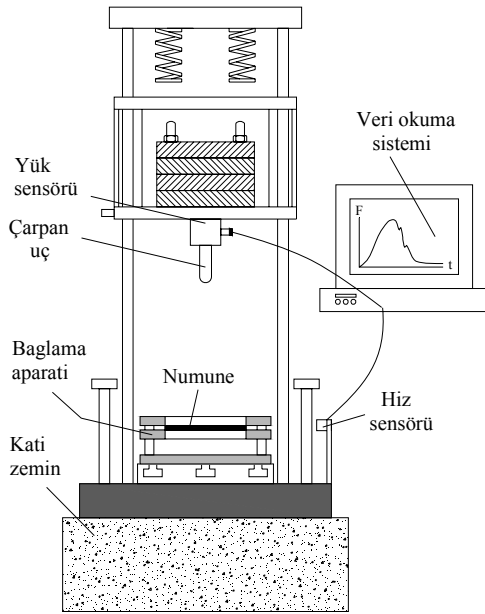
**Şekil 1.** Lifler arası açı  $90^\circ$  ve  $\theta^\circ$  olan örgülü elyaflar.

## 2. MALZEME VE TEST YÖNTEMİ

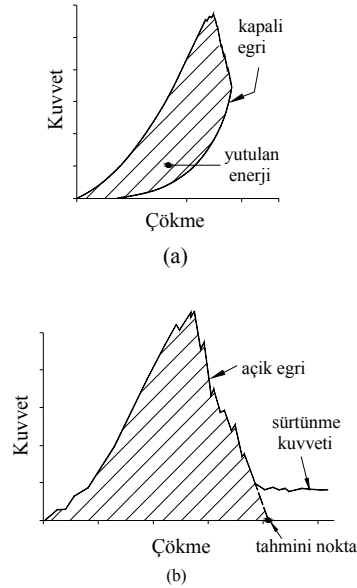
Deneyleerde kullanılan kompozit plaklar (cam elyafı ve epoksi reçineden oluşan), epoksi reçine sağlayıcı firmanın önerileri doğrultusunda, sıcaklık ve basınç ayarlamaları otomatik olarak yapılabilen bir preste önce 60°C de 2 saat daha sonra 93°C de 4 saat bekletilerek üretilmiştir. İmalat süresince 0.35 MPa'lık sabit bir basınç uygulanmıştır. Deneyleerde kullanılan numunelerin ortalama kalınlığı 2.2 mm ve boyutları 100 x 100 mm idi.

Üretimde kullanılan cam elyaf kumaşın yaklaşık olarak kütlesi 800 gr/m<sup>2</sup>, kalınlığı 0.5 mm, 25 mm'lik uzunluğa karşılık gelen yatay lif sayısı 4 ve düşey lif sayısı 5 idi. Yatay liflerin genişliği yaklaşık olarak 5.5 mm düşey liflerinki 4.5 mm idi.

Darbe deneyleerinde şematik olarak Şekil 2'de gösterilen ve düşen ağırlık esasına dayalı çalışan bir darbe test cihazı kullanılmıştır. Bir darbe deneyleerinde genel olarak Şekil 3'te gösterilen iki tip eğri ile karşılaşılır; kapalı eğri ve açık eğri. Bu eğrilerin altında kalan alanlar darbe süresince numuneler tarafından yutulan enerjiye karşılık gelmektedir. Burada her bir numuneye ait yutulan enerji değerleri tespit edildikten sonra, kompozit plağa ait yutulan enerji-darbe enerjisi (enerji profili diyagramı) çizilebilir.



Şekil 2. Bir darbe test cihazının şematik gösterimi.



Şekil 3. Bir darbe olayında karşılaşılan eğri tipleri: (a) kapalı eğri, (b) açık eğri.

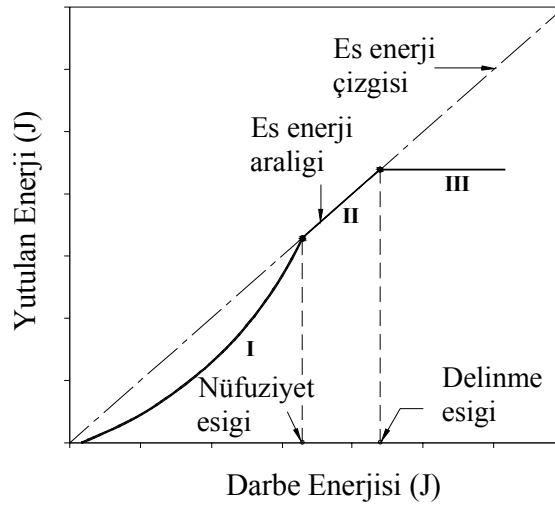
## 3. ENERJİ PROFİLİ DİYAGRAMI (EPD)

Kompozit yapıların darbe davranışını ve darbe direncini incelemeye göz önüne alınan en önemli parametrelerden ikisi de darbe enerjisi ( $E_d$ ) ve yutulan enerjidir ( $E_y$ ). Darbe enerjisi çarpan uç tarafından kompozit numuneye aktarılan enerji olarak, yutulan enerji ise darbe

enerjisinin numune tarafından deformasyonlar (hasarlar) yolu ile yutulan kısmı olarak tanımlanabilir. Bu iki parametre arasındaki ilişkiyi gösteren grafik “enerji profili diyagramı” olarak adlandırılmıştır [16, 17]. Enerji profili diyagramı ile yük-çökme eğrilerini ve hasarlı numuneleri bir arada ve karşılaştırarak incelemek hasar mekanizmalarının tespitinde önemli avantajlar sağlar.

Bir enerji profili diyagramının şeklini çarpan uç ve numune ile ilişkili birtakım parametreler belirler. Kompozit yapıyı meydana getiren bileşenler, lif geometrisi, numunelerin kalınlık ve tabaka dizilişi, ve çarpan ucun geometrisi gibi faktörler buna örnek olarak verilebilir. Şekil 4’te bir EPD şematik olarak verilmiştir. Diyagram genel olarak 3 ana bölgeye ayrılabilir.

- I. Bölge: Çarpan ucun numuneye saplanmadığı, çarpma sonrası geri sıçramanın gerçekleştiği bölgedir. Bu bölgede eş enerji çizgisi ile deney verileri arasındaki fark yutulmayan artık enerjiye karşılık gelmektedir.
- II. Bölge: Çarpan ucun numuneye nüfuz etmeye başladığı ve darbe enerjisi değerine bağlı olarak farklı derinlikte numuneye saplanıp kaldığı aralıktır. Bu bölgede darbe enerjisinin tamamına yakını numune tarafından yutulduğu için deney verileri eş enerji çizgisinin neredeyse üzerinde yer alırlar.
- III. Bölge: Bu bölgede çarpan (vurucu) uç delinme eşiğinden daha büyük bir enerjiye sahiptir. Bu bölgede darbe enerjisinin arttırılması meydana gelen hasar miktarını çok fazla değiştirmedeğinden yutulan enerji miktarı hemen hemen sabit kalmaktadır.



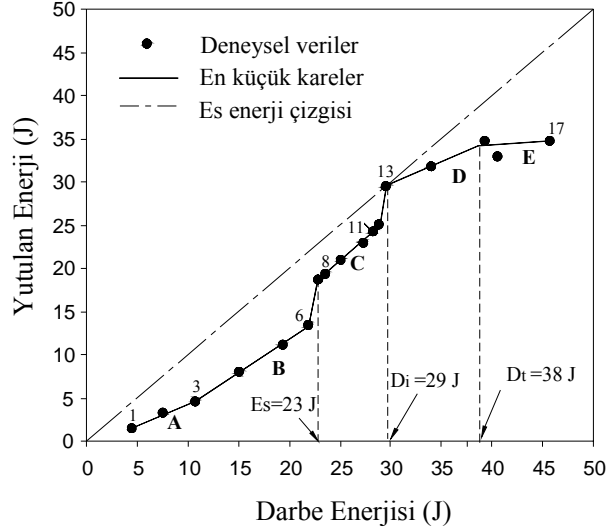
Şekil 4. Enerji profili diyagramı ve değişik enerji bölgeleri

#### 4. DENEY VERİLERİ VE TARTIŞMA

Bu çalışmada farklı örgü açılarına sahip numuneler için de deneyler yapılmış ve enerji profil diyagramları ile birlikte nüfuziyet ve delinme eşikleri tespit edilmiştir. Aşağıda, elde edilen veriler ışığında bir malzemeye ait darbe davranışının ve darbe direncinin nasıl değerlendirileceğii açıklanmıştır.

#### 4.1. Örgü Açısı 90° Olan 4 Tabakalı Numuneler

Şekil 5'te örgü açısı 90° olan 4 tabakalı numuneler,  $[0/90]_4$ , için Enerji Profili Diyagramı verilmiştir.



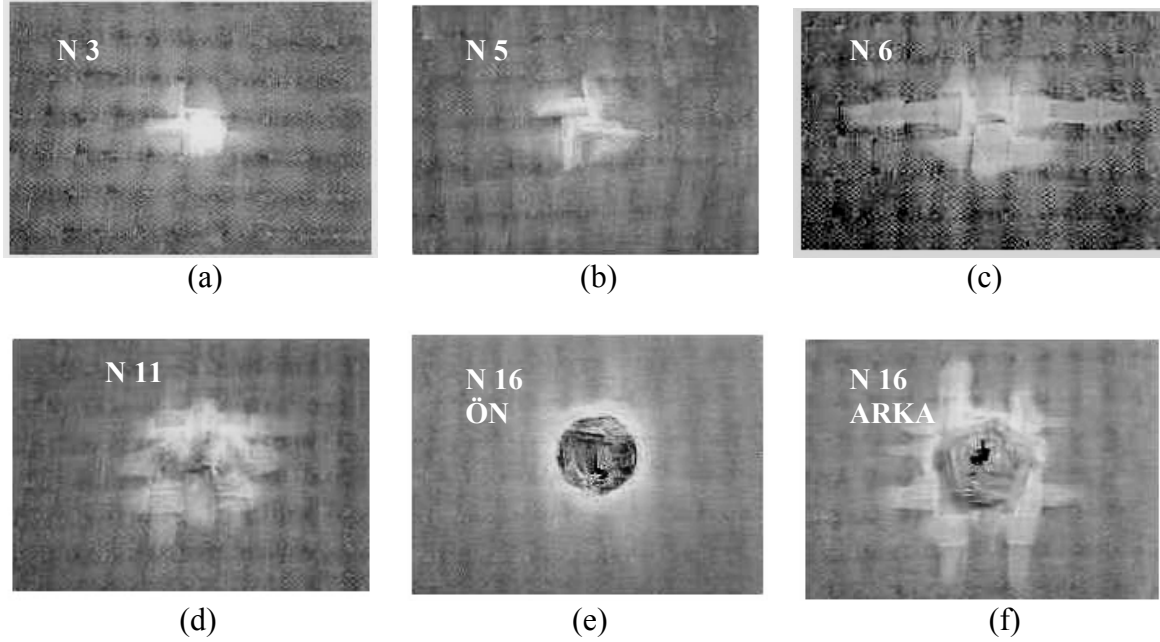
Şekil 5. Örgü açısı 90° olan 4 tabakalı numuneler,  $[0/90]_4$ , için EPD.

Buradaki deneysel verileri de daha önce sözü edilen birkaç bölgeye ayırmak mümkündür: A, B, C, D, E. Dikkat edilirse grafik Şekil 4'ten farklılıklar göstermektedir. Nüfuziyet öncesi bölge burada 3 farklı bölgeye ayrılmıştır. B'den C'ye geçerken yutulmuş enerjide çok ani bir artış meydana gelmektedir. Hasarlı numuneler incelendiğinde çok küçük bir enerji farkı (numune 6'dan 7'ye) büyük hasarlar ile sonuçlanabilmektedir. Yutulmuş enerji miktarında meydana gelen ilk sıçrama noktası  $E_s$  ile gösterilmiştir. 13 nolu numuneye karşılık gelen yaklaşık 29 J'luk darbe enerjisi burada nüfuziyet eşikine karşılık gelmektedir. Hasarlı numuneler incelendiğinde bu enerjiye karşılık numunede delinme başlangıcı da gözlenmiştir. Yine Şekil 4'ten farklı olarak eş enerji aralığı mevcut değildir. Bunun nedeni kullanılan kompozit plakaların kalınlığıdır [18]. Plaka kalınlıkları yaklaşık 2.2 mm iken, çarpan küresel ucun yarıçapı 6.25 mm idi. Bu nedenle, çarpan ucun geri sıçraması olmaksızın saplanma ancak plağın bir miktar delinmesi ile mümkündür. Bu bölgede (D) darbe enerjisi arttıkça numunede oluşan hasarın delik çapı artmaktadır. Belli bir enerji değerine ulaşıldığında ( $D_t$ ) çarpan uç numuneyi tam olarak delip geçer ve yutulmuş enerjinin neredeyse sabit kaldığı E bölgesine geçilir. Grafik üzerinde farklı bölgelerdeki bazı noktalara karşılık gelen hasarlı numune resimleri Şekil 6'da verilmiştir. 3, 5, 6 ve 11 nolu numuneler için sadece darbe noktasına uzak (arka) yüzdeki hasarlar verilirken 16 nolu numune için hem ön hem de arka yüzdeki hasar resmi verilmiştir.

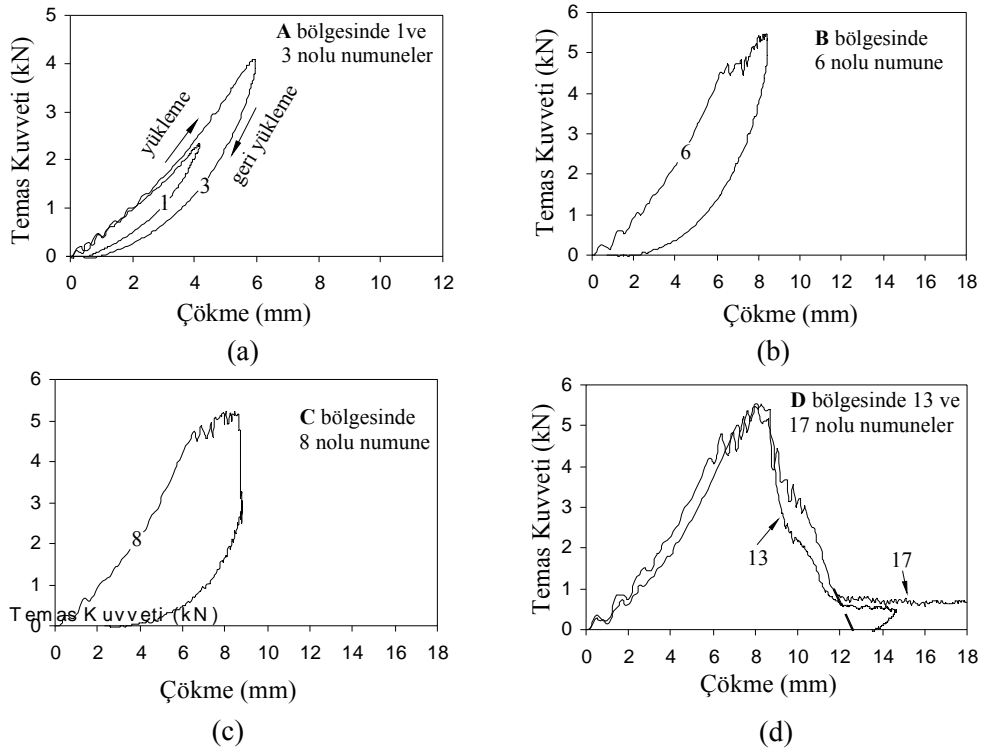
Şekil 7'de ise yine bazı bölge ve noktalara karşılık gelen temas kuvveti-çökme diyagramları bir arada verilmiştir.

Şekilde verilen kuvvet-çökme eğrileri, hasarlı numune resimleri ve enerji profili diyagramı karşılaştırıldığında darbe sonucu oluşan hasarların mekanizmaları hakkında bir özetleme yapılabilir. Temas kuvveti darbe süresince numuneden çarpma ucuna (yük sensörünü taşıyan) uygulanan tepki kuvvetidir. Darbe enerjisi küçük olduğunda, örneğin 1 ve 3 nolu durumlar,

yük-çökme eğrisinde yükleme ve geri yükleme durumları parabolik bir şekil alır ve darbe enerjisi arttıkça temas kuvvetinin aldığı en büyük değer de artar. EPD' da A bölgesine karşılık gelen bu noktalara ait resimler incelendiğinde artan enerji ile matris kırıklarının arttığı ve matrisle lifler arası ayrılmaların başladığı görülmüştür.



Şekil 6. 3, 5, 6, 11 ve 16 nolu numunelere ait hasar resimleri.



Şekil 7. 1, 3, 6, 8, 13 ve 17 nolu numunelere ait kuvvet-çökme eğrileri

EPD'da B bölgesine karşılık gelen 6 nolu numuneye ait resim (Şekil 6-c) incelendiğinde matris kırıklarına ilave olarak lif kırılmalarının da başladığı görülmektedir. Bu durum kuvvet-çökme grafiğinde de karşılığını bulmaktadır (Şekil 7-b): eğride maksimum yük civarında numune direngenliğinin azalmasına işaret eden eğim düşüşü vardır ve bu eğimle bir süre devam eden kuvvet artışını çarpan ucun geri sıçraması (geri yükleme) takip etmektedir. EPD'daki C bölgesine karşılık gelen resim ve grafiklerden (Şekil 6-d, 7-c), yukarıda sözü edilen yutulmuş enerji miktarındaki ani artışın (sıçrama) izleri görülebilir. Dikkat edilirse, bir önceki örnekten farklı olarak 8 nolu numunenin kuvvet-çökme diyagramında; maksimum kuvvet civarında hasarı ima eden değişimi önce ani bir kuvvet düşüşü ve daha sonra ise geri yükleme takip etmektedir. Bu durum eğilmeden kaynaklanan ani ve ciddi lif kırıklarına ve dolayısı ile çarpan uca etkiyen tepki kuvvetindeki ani düşüşe (geri yükleme başlamadan) işaret etmektedir.

Şekil 7-d de ilk nüfuziyet veya delinme başlangıcına karşılık gelen 13 nolu numune ile tam delinme durumunu ifade eden eğriler verilmiştir. Her iki durumda da yükün azalmasına karşın çökme artışının devam etmesi, geri sıçramanın olmadığını, vurma ucunun numuneye saplandığını veya numuneyi delip geçtiğini göstermektedir.

#### **4.2. Örgü Açısı 90°'den Küçük 4 Tabakalı Numuneler, [0/θ]<sub>4</sub>.**

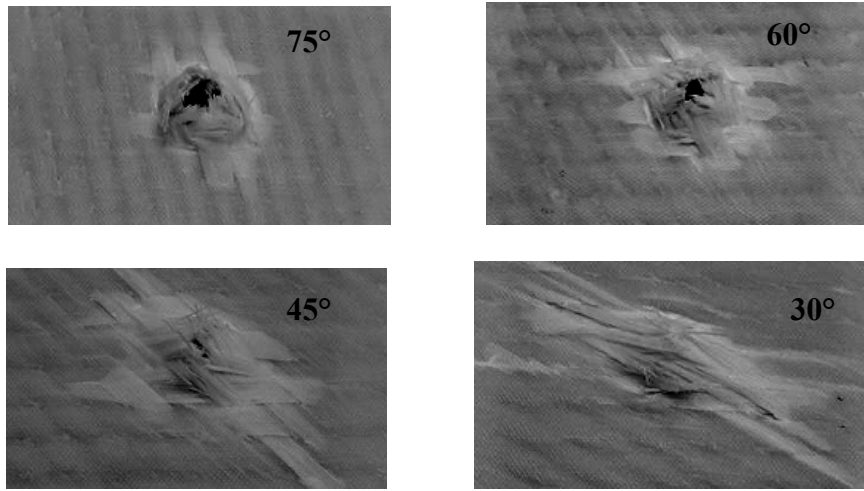
Yatay (atkı) ve düşey (çözgü) lifler arası 90° olan ortogonal elyafa ilave olarak, lifler arası açı 20°, 30°, 45°, 65° ve 75° olan numuneler kullanılarak darbe direncinin ve buna bağlı olarak hasar şekillerinin değişimi irdelenmiştir. Elde edilen sonuçlar küçük örgü açılarının darbe direncini arttırdığını göstermiştir. Bu artımın ne oranda olduğunu liflerin geometrileri, lif kalınlıkları, birim uzunluğa düşen atkı ve çözgü lif sayıları belirler. Burada her bir açı için ayrı ayrı bilgi vermek yerine genel bir değerlendirme yapılmıştır. Örneğin, bu çalışmada ilk delinme ve tam delinme eşikleri 30°, 45°, 60° için sırası ile 37-49J, 32-42J, 29-37J olarak tespit edilmiştir. 20° nin değerleri 30°'ye, 75°'nin değerleri ise 60°'ye yakın elde edilmiştir. Bu değerler 90° için 29-38J idi. Görüldüğü gibi özellikle 20° ve 30°'lerde darbe direnci önemli ölçüde artmaktadır. Bunun en önemli nedenlerinden birisi küçük örgü açısı ile ortaya çıkan küçük kıvrım açıları ve büyük lif temas (kilitleme) açıklıklarıdır. Bilindiği gibi örgülü kumaşlarda boyutsal kararlılık yatay ve düşey liflerin birbirlerinin üzerinden ve altından geçerek birbirlerini mekanik olarak kilitlemesi ile sağlanır. Örneğin, yatay bir lifin bu şekildeki geçişleri esnasında düşey bir lifle temas noktası ile bir sonraki düşey lifle teması arasındaki mesafeye burada lif temas açıklığı denmiştir. Örgü açısı düştükçe boyutsal kararlılığın kötüleşmesine karşılık lif temas açıklığı arttığından [16] darbe karşısında malzemenin esneme kabiliyeti artmakta ve hasarlar lokal kalmayarak darbe direnci artmaktadır. Şekil 8'de farklı örgü açıları için bazı numunelere ait resimler verilmiştir. Görüldüğü gibi büyük açılarda hasar daha belirgin ve lokaldır.

#### **4.3. Darbe Karakteristikleri**

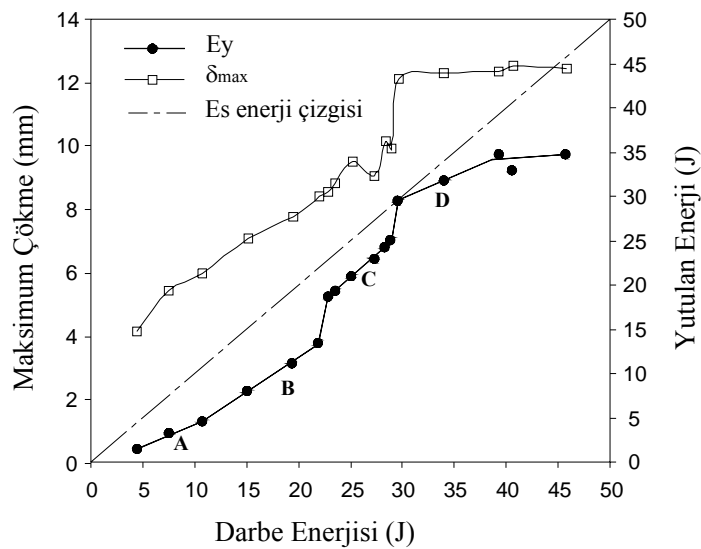
Bir kompozit plağın darbe davranışının incelenmesinde EPD, hasarlı numuneler ve kuvvet-çökme eğrilerinin karşılaştırılması ve yorumlanmasının önemi yukarıda izah edildi. Ayrıca darbe karakteristikleri olarak tanımlanan maksimum çökme, maksimum temas kuvveti ve maksimum temas süresinin darbe enerjisine bağlı değişimleri de çok önemli bilgiler ve ipuçları içerir. Birbirlerine benzer değişimler gösterdikleri için aşağıda sadece [0/90]<sub>4</sub>'ye ait

darbe karakteristikleri verilmiştir. Şekil 9, 10 ve 11’de sırası ile yutulan enerji değişimi ile beraber maksimum çökme ( $\delta_{max}$ ), maksimum temas süresi ( $t_{max}$ ) ve maksimum temas kuvvetinin ( $F_{max}$ ) darbe enerjisine bağlı değişimleri verilmiştir. Grafiklerdeki değişimler kısaca şu şekilde özetlenebilir:

- Maksimum çökme  $\delta_{max}$ , nüfuziyet bölgesine kadar neredeyse lineer bir değişim göstermekte, nüfuziyet bölgesi civarında ani bir artıştan sonra hemen hemen sabit kalmaktadır.
- Maksimum temas süresi  $t_{max}$ , nüfuziyet noktası civarında çok büyük artış göstermekte; buna karşılık delinme eşiğine ulaşıldıktan sonra da aniden ciddi miktarda azalmaktadır.
- Maksimum kuvvet  $F_{max}$ , yani darbe süresince numune tarafından vurucu uca uygulanan maksimum temas kuvveti, darbe enerjisinin artımı ile nüfuziyet noktasına kadar artmakta daha sonra darbe enerjisi artsa bile çok fazla değişim göstermemektedir.

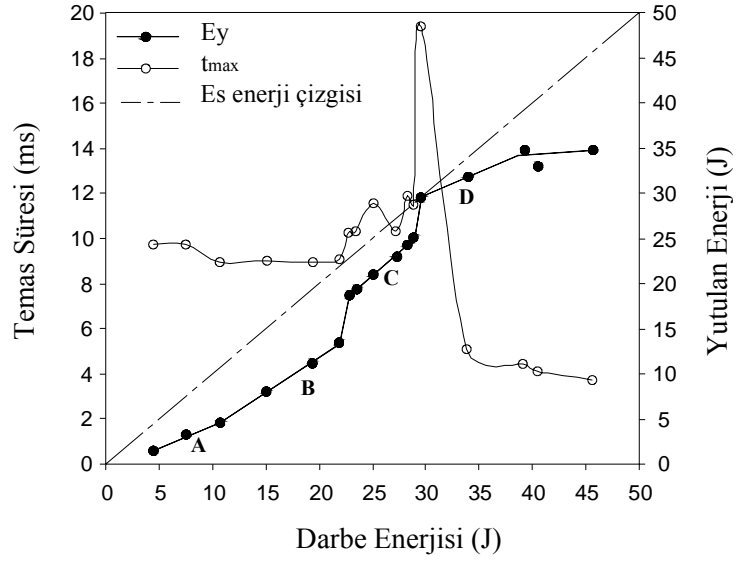


Şekil 8. Değişik örgü açıları için hasar şekilleri.

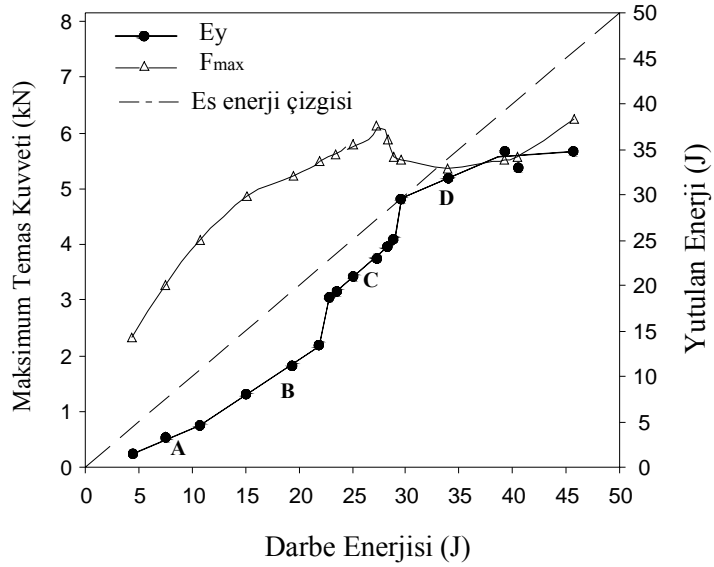


Şekil 9. Darbe enerjisine bağlı olarak maksimum çökme değişimi.





Şekil 10. Darbe enerjisine bağlı olarak maksimum temas süresi değişimi.



Şekil 11. Darbe enerjisine bağlı olarak maksimum temas kuvveti değişimi.

## 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada değişik örme açlarına sahip cam-elyaf kumaşlardan imal edilen kompozit plakların darbe davranışı incelenmiştir. Darbe deneylerinden elde edilen verilerin birtakım grafikler yardımı ile nasıl değerlendirileceği ve hasar mekanizmaları hakkında bilgiler sunulmuştur. Örme açısının darbe direncine ve hasar gelişimine etkisi resimlerle birlikte izah edilmiştir. Bir kompozit plağın darbe davranışı incelenirken; “enerji profili diyagramı”, “hasarlı numuneler” ve “kuvvet-çökme eğrileri”nin birlikte göz önüne alınmasının, hasar mekanizmalarını tespit etme ve yorumlamada önemli katkılar sağladığı gösterilmiştir.

Bunlarla birlikte darbe karakteristiklerinin de bir plağın darbe davranışı hakkında önemli ipuçları içerdiği belirlenmiştir.

## KAYNAKLAR

- [1] Abrate S., "Impact on composite structures" Cambridge: Cambridge University Press-1998.
- [2] Abrate S., "Impact on laminated composite materials" Applied Mechanics Review, 44 155–190, 1991.
- [3] Cantwell W.J., Morton J., "The impact resistance of composite materials-a review" Composites, 22 347–362, 1991.
- [4] Abrate S., "Impact on laminated composites: recent advances" Applied Mechanics Review, 47 517–544, 1994.
- [5] Richardson M.O., Wisheart M.J. "Review of low-velocity impact properties of composite materials" Composites Part A, 27(A) 1123–1131, 1996.
- [6] Winkel J.D., Adams D.F., "Instrumented drop weight impact testing of cross-ply and fabric composites" Composites, 16 268–278, 1985.
- [7] Siow Y.P., Shim V.P.W., "An experimental study of low velocity impact damage in woven fiber composites" Journal of Composite Materials, 32 1178–1202, 1998.
- [8] Rydin R.W., Bushman M.B., Karbhari V.M., "The influence of velocity in low velocity impact testing of composites using the drop weight impact tower" Journal of Reinforced Plastics and Composites, 14 113–127, 1995.
- [9] Ebeling T, Hiltner A, Baer E, Fraser IM, Orton M.L., "Delamination failure of a woven glass fiber composite" Journal of Composite Materials, 31 1318–1333, 1997.
- [10] Wu E, Chang L.C., "Loading rate effect on woven glass laminated plates by penetration force" Journal of Composite Materials, 32 702–721, 1998.
- [11] Kim J.K. and Sham M.L., "Impact and delamination failure of woven-fabric composites" Composites Science and Technology, 60 745–763, 2000.
- [12] Naik N.K., Sekher Y.C., Meduri S., "Polymer matrix woven fabric composites subjected to low velocity impact: Part I-Damage initiation studies" Journal of Reinforced Plastics and Composites, 19 912–954, 2000.
- [13] Naik N.K., Borade S.V., Arya H, Sailendra M, Prabhu S.V., "Experimental studies on impact behavior of woven fabric composites: Effect of impact parameters" Journal of Reinforced Plastics and Composites, 21 1347–1362, 2002.
- [14] Naik N.K, Sekher Y.C, Meduri S., "Damage in woven-fabric composites subjected to low-velocity impact" Composites Science and Technology, 60 731–744, 2000.
- [15] Baucom J.N., Zikry M.A., "Low-velocity impact damage progression in woven E-glass composite systems" Composites Part A, 36 658–664, 2005.
- [16] Atas C., Liu D., "Impact response of woven composites with small weaving angles" International Journal of Impact Engineering, basımda.
- [17] Liu D., "Characterization of impact properties and damage process of Glass/Epoxy composite laminates" Journal of Composite Materials, 38 1425-1442, 2004.
- [18] Atas C., Sayman O., "An overall view on impact response of woven fabric composite plates" Composite Structures, basımda.