

XV. Ulusal Mekanik Kongresi, 03-07 Eylül 2007, ISPARTA

TABAKALI KOMPOZİTLERDE PİM SAYISININ VE KONUMUNUN HASAR YÜKÜ VE HASAR TİPİNE ETKİSİ

Ramazan Karakuzu, Mehmet Aktaş, Yusuf Arman

Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 35100, Bornova, İzmir.

ÖZET

Bu çalışmada; tek dairesel deliğe, seri veya paralel iki dairesel deliğe sahip pim bağlantılı tabakalı kompozit numunelerin hasar tipleri ve hasar yükleri deneysel yolla araştırılmıştır. Tabakalı kompozit plaka üretiminde ana malzeme olarak vinilester reçine, takviye edici olarak da örgü tipi cam lifi kullanılmıştır. Her üç durum için; plaka uç kısmı-delik çapı oranı birden beşe kadar ($E/D=1, 2, 3, 4, 5$) değiştirilmiştir. Seri veya paralel dairesel deliğe sahip plakalarda ise iki delik arası mesafe 15 mm olarak alınmıştır. Yapılan deneyler neticesinde seri iki deliğe sahip numunelerden elde edilen hasar yükleri diğer numunelerden daha yüksek çıkmıştır. Ayrıca, en düşük hasar yükü her üç durum için E/D oranının bir olduğu numunelerde belirmiştir.

ABSTRACT

In this study; the failure types and failure loads of laminated composite specimens pinned joint which have single circular hole, two serial or two parallel circular holes were investigated, experimentally. Vinylester resin as main material and woven glass fiber as reinforcement were used for the manufacturing of the laminated composite plate. The free end of plate-hole diameter ratio was changed from 1 to 5 ($E/D=1, 2, 3, 4, 5$) for each three cases. The distance between two holes was taken as 15 mm in the plates having serial or parallel circular holes. As a result of experiments; the failure loads, which are obtained from the specimens having serial two holes, are higher than the other ones. In addition, the lowest failure load appears in the specimen which have $E/D=1$ for each three cases.

1.GİRİŞ

Aynı ağırlığa sahip fiber takviyeli kompozit malzemeler ve metal esaslı malzemeler karşılaştırıldığında, kompozit malzemelerin daha yüksek mukavemete ve direngenliğe sahip oldukları görülür. Bunun sonucu olarak, fiber takviyeli kompozit malzemeler, uçak ve uzay

sanayinde, sağlık sektöründe ve otomotiv sanayinde geniş bir uygulama alanı bulmuştur. Kompozitlerin, kompozitlerle veya metallerle birleştirilmesi yapıştırıcı reçineler kullanılarak veya mekanik bağlayıcılar kullanılarak yapılmaktadır. Pimler vasıtası ile mekanik olarak birleştirme uygulaması kolay ve ekonomik olduğundan pimli bağlantılar en yaygın bağlantı şekilleridir. Bundan dolayı pimli bağlantılarla ilgili oldukça fazla çalışma yapılmıştır.

Literatürde yer alan çalışmaların çoğunluğunda plaka boyutlarının, lif yönlenim açılarının hasar yüküne etkileri incelenmiştir. Bu çalışmaların bir kaçında epoksi reçine ana malzeme olarak kullanılırken takviye edici olarak da karbon lifi [1–2], cam lifi [3–8] ve kevlar lifi [9] kullanılmıştır. Ayrıca vinylester reçine cam lifi ile takviye edilerek de kullanılmıştır [10].

Bir kaç çalışmada ise plaka kalınlığının etkisi incelenmiştir. Liu ve arkadaşları [11–12] örgü tipi cam lifi ve fenolik reçineden oluşmuş kalın plakanın küçük çaplı pimle veya ince plakanın büyük çaplı pimle bağlantılarını incelemiştir. Li ve arkadaşları [13] ise karbon lifi ve epoksiden oluşmuş kompozit plakalarda plaka kalınlığının yatak gerilmesine etkisini incelemiştir. Bazı araştırmacılar ise, pim bağlantılı kompozitlerde hasar yükü ve hasar moduna, pim-delik arası açıklığın [14–17] ve sürtünmenin [14, 18–19] nasıl etkidiğini araştırmışlardır.

Bazı çalışmalarda ise pimler vasıtasıyla yüklenmiş plakalara delik sayısının etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Karakuzu ve arkadaşları seri [20] ve paralel [21] iki dairesel deliğe sahip kompozit plakada hasar yükü ve hasar modlarını deneysel ve sayısal metotlarla belirlemişlerdir.

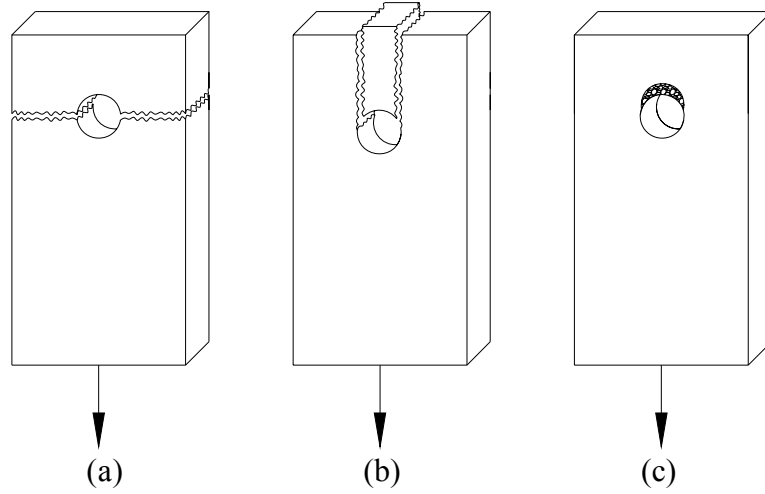
Chang ve arkadaşları [22–25] seri ve paralel iki deliğe ve tek bir deliğe sahip tabakalı kompozitlerde hasar yükünü ve hasar modunu belirlemek üzere bir bilgisayar programı geliştirmişlerdir. Yamada-Sun hasar kriterini geliştirerek farklı levha yönlenimleri, farklı malzeme ve geometriler için maksimum hasar yükü ve hasar modları belirlenmiştir.

Kim ve Kim [26] seri veya paralel bağlanmış iki civata bağlantısına sahip kompozit plakada sonlu elemanlar metodu kullanılarak civata ve delik arasındaki teması ve plaka geometrisinin hasar yüküne etkisini üç farklı oryantasyon kullanarak incelemiştir. Mc Carthy ve arkadaşları [27] bir den fazla civata bağlantısına sahip kompozit yapılarda civata delik arasındaki açıklığın hasar ilerlemesine etkisini araştırmak için sonlu elemanlar analizi yapmışlardır.

Bu çalışmada ise tek dairesel deliğe, seri veya paralel iki dairesel deliğe sahip pim bağlantılı tabakalı kompozitlerin hasar tipleri ve hasar yükleri deneysel yolla araştırılmıştır. Her üç durum için; plaka genişliği $W=25$ mm olarak alınmıştır. Plaka uç kısmı-delik çapı oranı birden beşe kadar ($E/D=1, 2, 3, 4, 5$) değiştirilmiştir. Seri veya paralel dairesel deliğe sahip plakalarda ise iki delik arası mesafe 15 mm olarak alınmıştır.

Pim bağlantılı kompozit yapılarda genel itibariyle, üç temel hasar tipi görülmektedir. Bunlar, çekme, kayma ve yatak hasarlarıdır (Şekil 1). Çekme hasarı, aniden meydana gelen bir hasar tipidir. Bu hasar tipinde hasar genişlik boyunca yayıldığından en tehlikeli hasar tipidir. Kayma hasarı çekme hasarına göre daha fazla yük taşımaya rağmen yinede istenmeyen bir hasar türüdür. Yatak hasarında ise ilk hasardan sonra numune yükü taşımaya devam eder.

Böyle bir bağlantıda hasar teşhisi ilk hasardan sonra yapılabilmektedir. Bu nedenle yatak hasarı tercih edilen bir hasar türüdür.



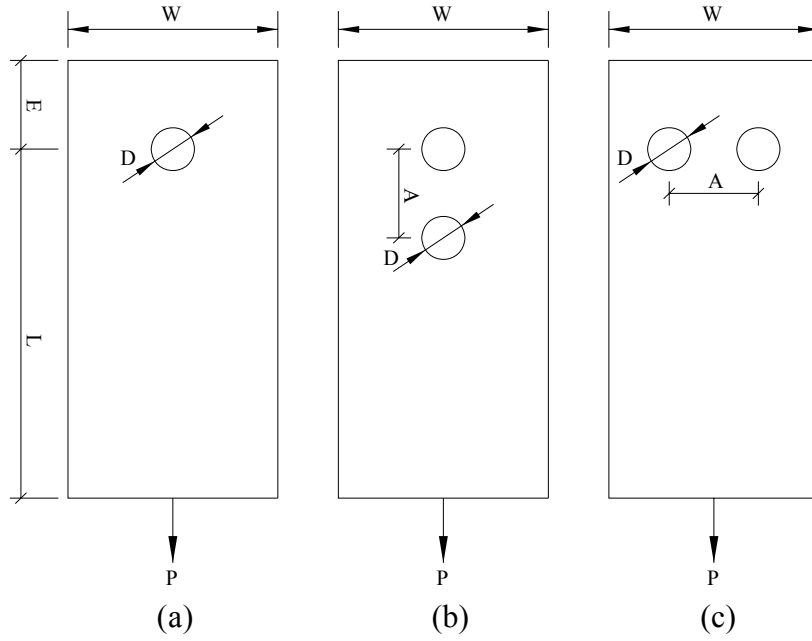
Şekil 1 Pim bağlantılarında; (a) çekme, (b) kayma ve (c) yatak hasarı [20].

2.NUMUNELERİN HAZIRLANMASI

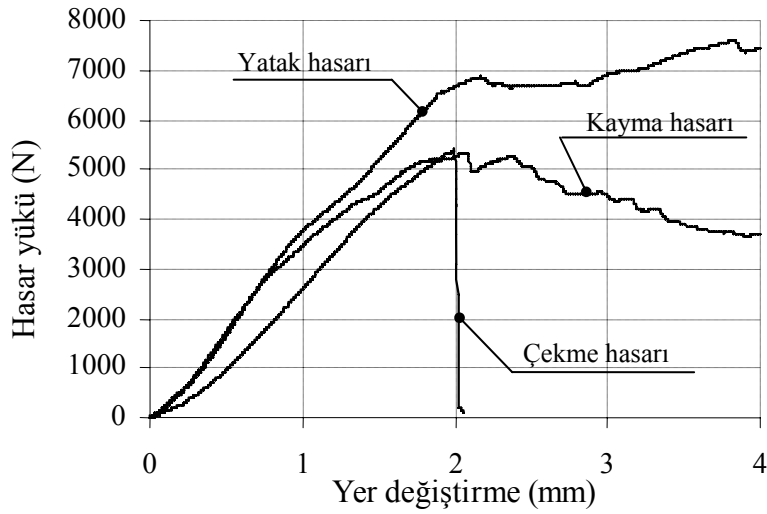
12 adet tabakadan oluşan kompozit plakalar el yatırma yöntemi kullanılarak IZOREEL firmasında üretilmiştir. Takviye edici olarak örgü tipi cam lifi ve güçlendirici olarak da vinilester reçine kullanılan plakalar 100°C ve 10 MPa basınç altında 30 dakika süre ile pişirilmiştir. Üretim sonunda plaka kalınlığı 2,8 mm olarak ölçülmüştür. Cam lifi hacim oranı yaklaşık % 63 olarak hesaplanmıştır.

Seri ve paralel iki dairesel deliğe sahip olan numuneler ile tek dairesel deliğe sahip numune şematik olarak Şekil 2’ de gösterilmiştir. $W=25$ mm genişliğe sahip numuneler $E/D=1, 2, 3, 4$ ve 5 oranlarına göre kesilmiş ve matkap yardımıyla pim delikleri açılmıştır. Pim deliği çapı 5 mm olarak alınmıştır. Delikler numunenin serbest ucundan itibaren E kadar uzaklığa yerleştirilmiştir. L mesafesi tüm deneyler için sabit ve 70 mm olarak alınmıştır. Seri ve paralel delikli numunelerde iki delik arası mesafe $A=15$ mm’dir. Numune üzerinde moment oluşturmayacak şekilde tasarlanmış özel bir aparat kullanılarak yüklemeler yapılmıştır.

Şekil 3’te yük-yer değiştirme karakteristik eğrileri görülmektedir. Pim bağlantılarında hasar yükü-yer değiştirme grafikleri genel itibariyle ilk pik değerine kadar lineer olarak artar. Çekme hasarında; ilk pik noktasına kadar numune yükü karşılamakta ve malzeme sürekliliği kesildiği noktadan itibaren yük değerinde ani bir düşüş gözlenmektedir. Kayma hasarında; ilk hasardan sonra yük değeri kademeli olarak azalmakta ve belli bir yer değişiminden sonra numune tamamen hasara uğradığından kuvvet değeri sıfıra düşmektedir. Yatak hasarında ise numuneler ilk hasar değerinden sonrada dayanmaya devam ederek yük değeri ilk pik değerden daha yüksek bir değere ulaşabilir. Bu tip hasarda daha fazla yük elde edildiğinden istenen bir hasar tipidir.



Şekil 2 Tek deliğe (a), seri (b) ve paralel iki deliğe (c) sahip kompozit deney numuneleri



Şekil 3 Hasar yükü-yer değiştirme eğrileri

3.HASAR YÜKÜ VE HASAR TİPİNİN BULUNMASI

Pim bağlantılı numunelere çekme deneyleri 20 kN kapasitesindeki INSTRON marka çekme cihazında yapılmıştır. Deney sırasında numuneler bir ucundan dakikada 0,5 mm hızla çekilmiştir. Geliştirilen bir yazılım yardımıyla bilgisayarda hasar yükü-yer değiştirme eğrileri kaydedilmiştir. Ayrıca deney esnasında hasar ilerleme biçimine bakılarak hasar tipleri belirlenmiştir. Hasar yüklerini belirlemek için her bir numuneden üçer adet deney yapılmış ve elde edilen değerlerin aritmetik ortalamaları alınmıştır.

Seri veya paralel iki deliğe ve tek deliğe sahip plakaların hasar yükleri karşılaştırıldığında (Tablo 1), yük taşıma kapasitesi en yüksek olan seri bağlantı olduğundan tasarımda bu bağlantı biçimi tavsiye edilebilir. Tablo 1’den görülebileceği gibi seri iki deliğe sahip numuneler tek delikliye nazaran yaklaşık 2 kat yük taşıyabilmektedir. Paralel iki deliğe sahip numuneler de ise E/D=1 hariç (bu oranda kayma hasarı görüldüğünden) tek delikliye göre yük taşıma kapasitesi 1,71 ile 1,80 katı arasında değişmektedir. E/D oranı arttıkça seri numunelerin yük taşımaları paralel numunelere oranla azalmaktadır. Öyle ki bu oran 1,57 değerinden 1,06 değerine kadar düşmektedir.

Tablo 1 Örgü tipi cam lifi-vinilester kompozite ait hasar yükleri ve karşılaştırılması

E/D	Tek delik	Hasar yükü		Oran		
		Seri iki delik	Paralel iki delik	S/T	P/T	S/P
1	2680	5154	3278	1,92	1,22	1,57
2	3181	6703	5695	2,11	1,79	1,18
3	3596	7010	6429	1,95	1,79	1,09
4	3844	7016	6590	1,86	1,71	1,06
5	3918	7493	7065	1,95	1,80	1,06





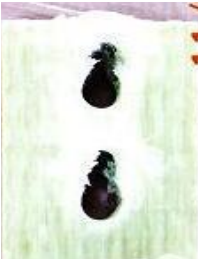


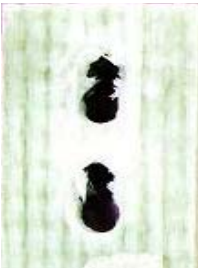


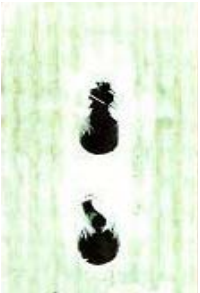




P: Paralel iki delikli numuneyi S: Seri iki delikli numuneyi ve T: Tek delikli numuneyi ifade etmektedir.

Tablodan da görülebileceği gibi her üç tip numune için hasar yükü E/D oranının artmasıyla artış göstermektedir. En küçük hasar yükü E/D=1 oranında meydana gelirken E/D oranı arttıkça hasar yükü değerlerinin birbirlerine yaklaştığı ve belirli bir E/D oranından sonrada yük değerinin çok fazla olmadığı görülür. Seri iki deliğe sahip numunelerden elde edilen hasar yükü paralel iki delikli ve tek delikli numunelerden elde edilen hasar yüklerinden daha yüksek çıkmıştır. En düşük hasar yükü tek delikli numunede meydana gelmektedir.

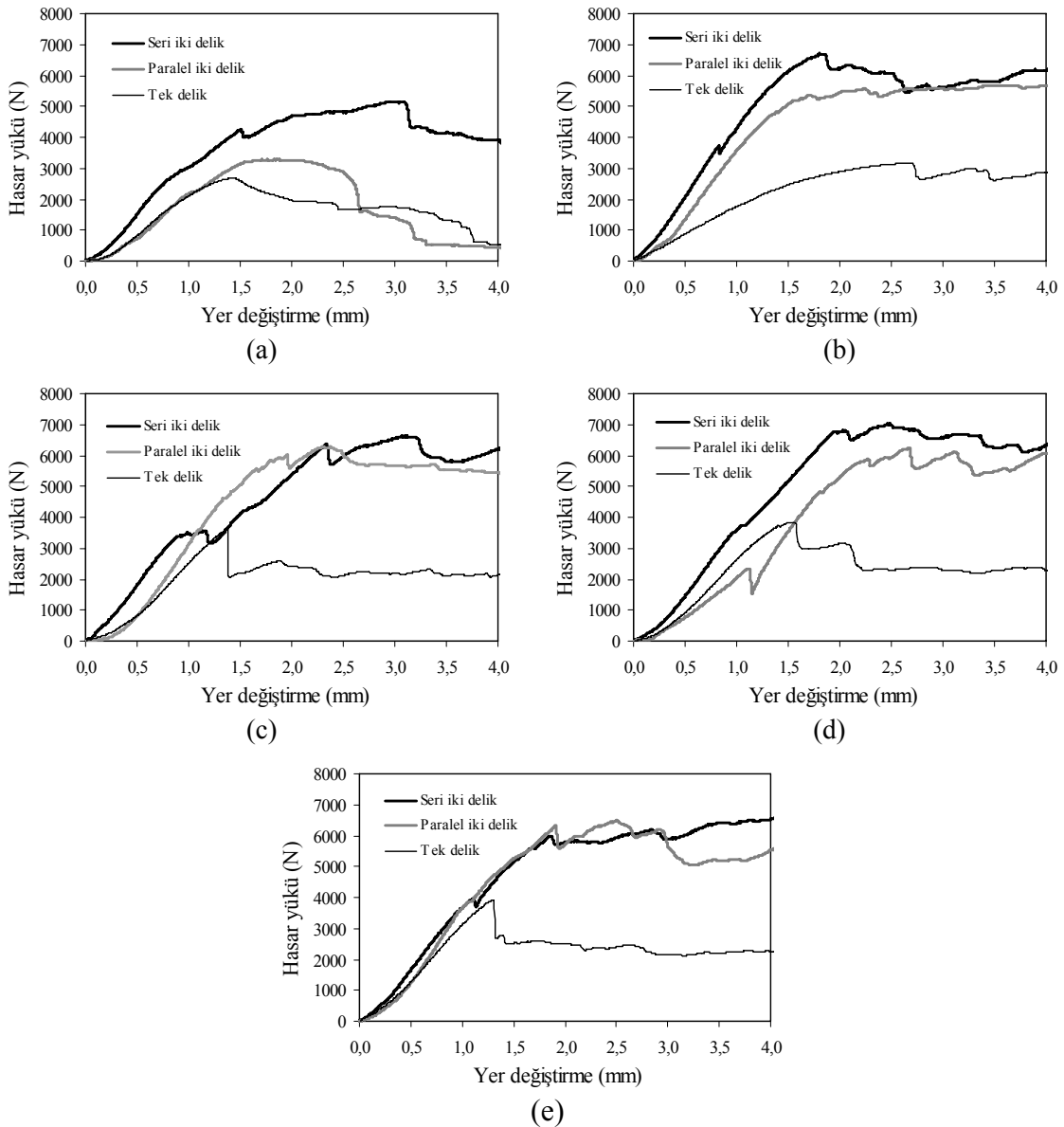
Yapılan deneyler sonucunda elde edilen hasar tipleri Tablo 2’de verilmiştir. K, kayma hasarını; Y yatak hasarını göstermektedir. Paralel iki deliğe sahip numuneler için her iki deliğe ait hasar tipi aynı olduğundan sadece bir deliğin hasar tipi verilmiştir. Fakat seri iki deliğe sahip numuneler için her iki delikteki hasar tipi aynı olmadığından her ikisi için hasar tipi verilmiştir. Verilen iki harften birincisi iç delikteki hasarı, ikincisi ise dış delikteki hasarı tanımlamaktadır. Örneğin Y/K iç delikte yatak hasarının, dış delikte ise kayma hasarının meydana geldiğini ifade eder. Bazı durumlarda birden fazla hasar tipi de meydana gelmektedir. Örneğin Y-K, yatak ve kayma hasarının aynı delikte birlikte meydana geldiğini gösterir.

Tek delikli numunede hasar tipi E/D=1 hariç yatak hasarı biçimindedir. E/D=1 için hasar kayma hasarıdır. Seri iki deliğe sahip numunelerde; E/D=3, 4 ve 5 için iç ve dış delikte hasar tipi yatak hasarıdır. E/D= 1 için hasar iç ve dış delikte karışık olup yatak hasarı ve kayma hasarı şeklindedir. E/D=2 için ise iç ve dış delikte hasar şekli birbirinden farklıdır. İç delik için hasar yatak hasarı iken, dış delikte hasar yatak ve kayma hasarı karışımıdır. Paralel iki deliğe sahip numunelerde ise E/D=1 ve E/D=2 hariç yatak hasarı biçimindedir. Hasar E/D=1 için kayma hasarı iken E/D=2 için yatak ve kayma hasarı karışımıdır.

Tablo 2 Örgü tipi cam lifi-vinilester kompozite ait hasar tipleri

E/D	Tek delik	Seri iki delik	Paralel iki delik
1	K 	Y-K/Y-K 	K 
2	Y 	Y/Y-K 	Y-K 
3	Y 	Y/Y 	Y 
4	Y 	Y/Y 	Y 
5	Y 	Y/Y 	Y 

Şekil 4’de iki delikli (paralel ve seri) ve tek delikli tabakalı kompozitlerin hasar yükü-yer değiştirme diyagramları verilmiştir. Şekilden görüleceği gibi; yük taşıma kapasitesi en yüksek olan numuneler seri iki deliğe sahip numuneler, en düşük olanlar ise tek delikli numunelerdir. Seri iki deliğe sahip numunelerde genel itibariyle (grafığın lineer kısmında) iki adet pik değeri gözlenmektedir. Bu da bize öncelikle yüklemeye yakın deliğin zorlandığını ve hasara uğradığını ve daha sonra her iki deliğin birlikte yüklendiğini gösterir. Daha önce ifade edildiği gibi yatak hasarında ilk pik değerinden sonrada yüklemeye devam eder. Dolayısıyla seri deliğe sahip kompozitlerde genel itibariyle yatak hasarı gözlenir denilebilir. E/D oranı arttıkça paralel ve seri iki deliğe sahip numunelerin hasar yükü-yer değiştirme grafikleri birbirine yaklaşmaktadır. Bu da bize bir tasarımda gerektiğinde seri delikler yerine paralel veya paralel delikler yerine seri delik kullanabileceğimizi gösterir.



Şekil 4 İki delikli (paralel ve seri) ve tek delikli tabakalı kompozitlerin hasar yükü-yer değiştirme diyagramları (a) E/D=1, (b) E/D=2, (c) E/D=3, (d) E/D=4 ve (e) E/D=5.

4.SONUÇLAR

Bu çalışmada; tek delikli, seri veya paralel iki delikli örgülü cam lifi vinilester kompozit plakalar pimler ile bağlanmış ve hasar yükü deneysel olarak incelenmiştir. E/D oranı birden beşe kadar değiştirilerek delik sayısı (bir veya iki), ve deliğin durumu (iki delikli numunelerde seri veya paralel) incelenmiştir. Buna göre aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Her üç durum için E/D=1 iken hasar yükü minimum değerdedir. Hasar yükü E/D oranının artması ile artmaktadır.
- Minimum ve maksimum hasar yükleri sırasıyla tek deliğe ve seri iki deliğe sahip numunelerde gözlenmiştir.
- Numunedeki pim sayısı arttıkça hasar yükünün arttığı görülmüştür.
- Seri deliklere sahip numunelerden elde edilen hasar yükleri paralel numunelerden elde edilenlere göre daha büyüktür. Bu da pimli bağlantılarda seri pim kullanmanın verimliliği arttıracaklarını gösterir.
- E/D oranının belli bir değerinden sonra deliklerin seri veya paralel olması yük taşıma kabiliyetini çok fazla değiştirmemektedir. Bundan dolayı tasarıma geometrik açıdan uygun olan seçilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Aktas, A. and R. Karakuzu., “Failure Analysis of Two-Dimensional Carbon-Epoxy Composite Plate Pinned Joint” *Mechanics of Composite Materials and Structures* 6 347–361, 1999.
- [2] İçten, B.M. and Karakuzu R., “Progressive Failure Analysis of Pin-Loaded Carbon-Epoxy Woven Composite Plates” *Composite Science and Technology* 62 1259–1271, 2002.
- [3] Okutan, B., Aslan Z. and Karakuzu R., “A Study of the Effects of Various Geometric Parameters on the Failure Strength of Pin-Loaded Woven Glass-Fiber Reinforced Epoxy Laminate” *Composite Science and Technology* 61 1491–1497, 2001.
- [4] Okutan, B. and Karakuzu R., “The Strength of Pinned Joints in Laminated Composites” *Composite Science and Technology* 63 893–905, 2003.
- [5] Okutan, B. and Karakuzu R., “The Failure Strength of Pin-Loaded Multidirectional Fiber-Glass Reinforced Epoxy Laminate” *Journal of Composite Materials* 36(24) 2695–2712, 2002.
- [6] İçten, B.M., Okutan, B. and Karakuzu R., “Failure Strength of Woven Glass Fiber-Epoxy Composite Pinned Joints” *Journal of Composite Materials* 37(15) 1337–1351, 2003.
- [7] Okutan B., “The Effects of Geometric Parameters on the Failure Strength for Pin-Loaded Multi-Directional Fiber-Glass Reinforced Epoxy Laminate” *Composites: Part B* 33 567-578, 2002.
- [8] Baba, B.O., “Behavior of Pin-Loaded Laminated Composites” *Experimental Mechanics* 46(5) 589-600, 2006.
- [9] İçten, B.M., Karakuzu, R. and Toygar, M.E., “Failure Analysis of Woven Kevlar Fiber Reinforced Epoxy Composites Pinned Joints” *Composite Structures* 73 443-450, 2006.
- [10] Karakuzu, R., Gülem, T. and İçten, B.M., “Failure Analysis of Woven Laminated Glass-Vinylester Composites with Pin-Loaded Hole” *Composite Structures* 72 27-32, 2006.
- [11] Liu, D. and Hou, L., “Three-Dimensional Size Effects in Composite Pin Joints” *Experimental Mechanics* 43(2) 115-123, 2003.

- [12] Liu, D., Raju, B.B. and You J., “Thickness Effects on Pinned Joints for Composites” *Journal of Composite Materials* 33(1) 2-21, 1999.
- [13] Li, R., Kelly, D. and Crosky, A., “Strength Improvement by Fibre Steering Around a Pin Loaded Hole” *Composite Structures* 57 377–383, 2002.
- [14] Lin, C.C., Lin, C.H. and Wang, J.T.S., “On Some Aspects of Pin-Loaded Laminates” *International Journal of Solids and Structures* 37 599-625, 2000.
- [15] Scalea, F.L., Cappello, F. and Cloud, G.L., “On the Elastic Behavior of A Cross-Ply Composite Pin-Joint with Clearance Fits” *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 12 13-22, 1999.
- [16] Scalea, F.L., Cappello, F. and Cloud, G.L., “On the Effects of Interference Fits in Composite Pin-Joints” *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 12 23-32, 1999.
- [17] McCarty, M.A., Lawlor, V.P. and Stanley, W.F., “An Experimental Study of Bolt-Hole Clearance Effects in Single-Lap, Multibolt Composite Joints” *Journal of Composite Materials* 29(9) 799-825, 2005.
- [18] Zhang, C., Ganesan, R. and Hoa, S.V., “Effects of Friction on Three-Dimensional Contact Stresses in Pin-Loaded Laminated Composites” *Journal of Composite Materials* 34(16) 1382-1415, 2000.
- [19] Xiao, Y.X., Wang, W.X. and Takao, Y., “The Effective Friction Coefficient of a Laminate Composite and Analysis of Pin-Loaded Plates” *Journal of Composite Materials* 34(1) 69-87, 2000.
- [20] Karakuzu, R., Çalışkan, C.R., Aktaş, M. and İçten, B.M., “Failure Behavior of Laminated Composite Plates with Two Serial Pin-Loaded Holes” *Composite Structures*, in press.
- [21] Karakuzu, R., Taylak, N., İçten, B.M. and Aktaş, M., “Effects of Geometric Parameters on Failure Behavior in Laminated Composite Plates with Two Parallel Pin-Loaded Holes” *Composite Structures*, in review.
- [22] Chang, F.K., Scott, R.A. and Springer, G.S., “Failure Composite Laminates Containing Pin Loaded Holes — Method of Solution” *Journal of Composite Materials* 18 255–278, 1984.
- [23] Chang, F.K. and Chang, K.Y., “A Progressive Damage Model for Laminated Composites Containing Stress Concentrations” *Journal of Composite Materials* 21 834–855, 1987.
- [24] Chang, F.K., “The Effect of Pin Load Distribution on the Strength of Pin Loaded Holes in Laminated Composites” *Journal of Composite Materials* 20 401–408, 1986.
- [25] Chang, F.K., Scott, R.A. and Springer G.S., “Failure Strength of Nonlinearly Elastic Composite Laminates Containing a Pin Loaded Hole” *Journal of Composite Materials* 18 465–475, 1984.
- [26] Kim, S.J. and Kim, J.H., “Finite Element Analysis of Laminated Composite Plates with Multi-Pin Joints Considering Friction” *Computers and Structures* 55(3) 507–514, 1995.
- [27] McCarthy, C.T., McCarthy, M.A. and Lawlor, V.P., “Progressive Damage Analysis of Multi-Bolt Composite Joints with Variable Bolt-Hole Clearances” *Composites: Part B* 36B 290-305, 2005.

