



SERİ ÇİFT CIVATA BAĞLANTILI ÇAPRAZ TAKVİYE EDİLMİŞ TABAKALI KOMPOZİT LEVHALARIN HASAR DAVRANIŞI

(FAILURE BEHAVIOUR OF TWO SERIAL BOLTED CROSS-PLY LAMINATED COMPOSITE PLATES)

Faruk ŞEN^{*,**}, Onur SAYMAN^{***}

ÖZET/ABSTRACT

Bu çalışmada, birbirine seri çift civata bağlantılı tabakalı kompozit plakaların hasar davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Tabakalı kompozit levhaların üretiminde, takviye elemanı olarak cam lifleri ve matris malzemesi olarak epoksi kullanılmıştır. Tabaka dizilişi olarak, çapraz $[0_2^\circ/90_2^\circ]_s$ takviyeli simetrik oryantasyon seçilmiştir. Levhaların üretiminden sonra, belirlenen çeşitli boyutsal değişkenlere göre deney numuneleri hazırlanmıştır. Bilgisayara bağlı çekme cihazı kullanılarak yapılan deneyler ile bağlantılardaki maksimum hasar yükleri elde edilmiştir. Bu sonuçlar kullanılarak, yatak mukavemetleri hesaplanmış ve numunelerin incelenmesi ile hasar tipleri tespit edilmiştir. Deneysel çalışma sonuçlarına göre, seri çift civata bağlantılı kompozit numunelerde incelenen geometrik değişkenlerin, hasar davranışını önemli şekilde etkilediği anlaşılmıştır. Bir başka şekilde ifade etmek gerekirse, maksimum hasar yükleri ile yatak mukavemetlerinin değerlerinin ve hasar tiplerinin oluşumunun geometrik parametrelere bağlı olarak değiştiği tespit edilmiştir.

In this study, failure behaviour of two serial bolted laminated composite plates was investigated experimentally. During the production of laminated composite plates, glass fibers and epoxy were used as reinforcement and matrix materials, respectively. The orientation of laminas were preferred as cross-ply and symmetric, $[0_2^\circ/90_2^\circ]_s$. After the production of plates, the specimens were prepared according to various dimensional parameters. The maximum failure loads were obtained from experiments via tensile test machine connected a computer. The bearing strengths were calculated using experimental failure loads and failure types were determined from observations of tested specimens. It is understood that, according to experimental study results, failure behavior of two serial bolted kompozit specimens were effected from geometrical parameters strictly. On the other hand, the magnitudes of maximum failure loads, bearing strengths and the creation of failure types were changed related to geometrical parameters.

ANAHTAR KELİMELER/KEYWORDS

Tabakalı kompozit, Hasar davranışı, Hasar analizi
Laminated composite, Failure behaviour, Failure analysis

* Sheffield Ün., Mekanik Müh. Bölümü, SHEFFIELD

** Aksaray Ün., Mekanik Müh. Bölümü, 68100 AKSARAY

*** DEÜ Makine Müh. Bölümü, 35100 İZMİR

1. GİRİŞ

İki veya daha fazla malzemenin makroskobik düzeyde kombine edilmesi ile elde edilen ve kendisini oluşturan malzemelerden oldukça farklı özellikler gösteren yeni malzeme, kompozit malzeme olarak adlandırılmaktadır. Fiber takviyeli polimer (FRP) kompozitler ise özellikle İkinci Dünya savaşından sonra yaygın mühendislik malzemeleri olarak birçok uygulamada yeni ve cazip malzemeler olarak ortaya çıkmıştır. Günümüze gelindiğinde, kompozitler hava araçları, uzay araçları, uydular, gemiler, denizaltılar, otomobiller, kimyasal işlem aparatları, sportif araçlar, alt yapı sistemleri, insan sağlığı açısından çok önemli olan tıbbi protezler ve mikroelektronik aletler gibi pek çok alanda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Özellikle, alüminyum ve çelik gibi yaygın olarak kullanılan geleneksel metal ve metal alaşımları ile karşılaştırıldığında, kompozit malzemeler, hafiflik, yorulmaya karşı uzun ömür, korozyon dayanımı gibi üstün özellikleri nedeniyle daha da ön plana çıkmaktadır. Bu avantajları yanında, istenen yönde daha iyi mukavemet özelliklerinin sağlanabilmesi, sahip oldukları ısıl genleşme özellikleri ve boyutlarını yüksek oranda koruyabilmeleri gibi üstün bazı özellikleri vardır. Polimerler, FRP kompozitlerin üretiminde genel olarak matris malzemesi olarak kullanılmaktadır. Mühendislik uygulamalarında, bu matrisler çelik, cam lifi ve karbon gibi malzemelerden elde edilen çeşitli fiberler ile takviye edilmektedir (Tong vd., 2002).

Kompozit levhaları birleştirmek için çeşitli bağlama teknikleri olmasına rağmen, pimler ve civatalar düşük maliyetleri, kolay uygulanabilirliği, tamir ve bakım için kolay sökülme gibi bazı avantajlı özelliklerinden dolayı yaygın olarak tercih edilmektedirler (Scalea vd., 1999). Literatürde, pim ve civata bağlantısı yapılmış farklı yapılarıdaki ve özelliklerdeki kompozitlerin hasar analizi ile ilgili olarak çeşitli çalışmalar mevcuttur. Pakdil ve diğ. cam lifleri ile takviye edilmiş tabakalı kompozit plakalara uygulamış oldukları tek pim/civata bağlantısında, meydana getirdikleri boşluğun hasar oluşumu ve hasar yükleri üzerine etkisini deneysel olarak incelemiştir (Pakdil vd., 2007). Sayman ve diğ. tek civata bağlantılı tabakalı kompozit plakalarda meydana gelen hasar davranışlarını deneysel olarak incelemiştir (Sayman vd., 2007). Çalışmada, tek civata bağlantısına çekme testinden önce uygulanan ön yüklem momentinin hasar oluşumuna etkisi incelenmiştir. Şen ve diğ. tek pimli/civatalı kompozit bağlantılarda hasar analizini farklı tabaka dizilişleri ve farklı geometrik parametreler için boşluk etkisini de dikkate alarak deneysel olarak yapmışlardır (Şen vd., 2008). Şen ve diğ. birbirine paralel çift pim bağlantılı tabakalı kompozit plakalarda meydana gelen maksimum hasar yüklerini deneysel olarak bulmuşlar ve oluşan hasar tiplerini tespit etmişlerdir (Şen vd., 2008). Tabaka dizilişleri olarak $[0_2/30_2]_s$, $[0_2/45_2]_s$ ve $[0_2/60_2]_s$ şeklinde simetrik oryantasyonlar seçilmiştir. Ataş ve diğ. cam lifi ile takviye edilmiş polyester matrise sahip tabakalı kompozit plakalara uygulanan, birbirine paralel çift pimli bağlantıların hasar analizini deneysel ve nümerik olarak yapmışlardır (Ataş vd., 2009).

Bu çalışmada, birbirine seri olarak konumlandırılmış çift civata bağlantılı tabakalı kompozit levhaların hasar davranışı deneysel olarak yapılmıştır. Deneylerden elde edilen maksimum hasar yükleri kullanılarak, maksimum yatak mukavemetleri hesaplanmıştır. Ayrıca, test edilen numunelerin incelenmesi ile oluşan hasar tipleri tespit edilmiştir.

2. MALZEME VE YÖNTEM

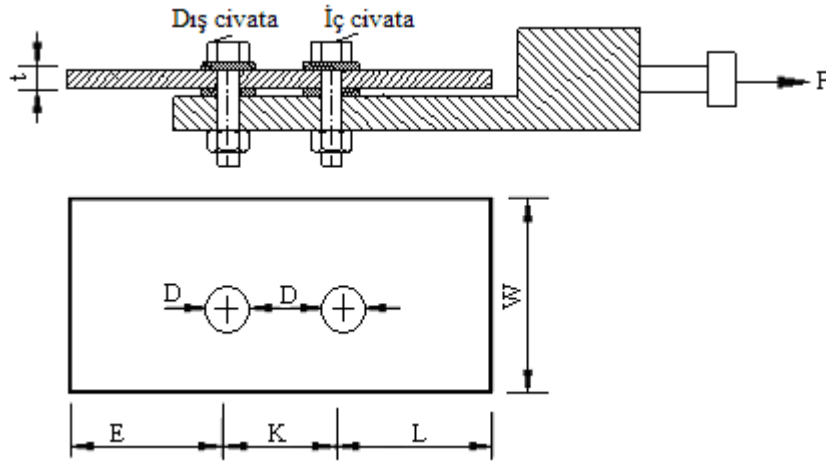
Deneysel çalışma yapabilmek amacıyla, ilk olarak, cam lifleri ile takviye edilmiş epoksi matrise sahip tabakalı kompozit levhalar üretilmiştir. Üretilen tabakalı kompozit plakaların her biri 8 tabakacığın uygun bir ısı ve basınç altında birleştirilmesi ile meydana getirilmiştir. Tabaka dizilişi olarak, uygulamalarda çok tercih edilen bir tabakalı kompozit dizilişi olan

olan çapraz takviyeli $[0^{\circ}_2/90^{\circ}_2]_s$ düzenleme seçilmiştir. Bunun yanında, simetrik düzenleme yapılmıştır. Üretim sonunda, her bir tabakalı kompozit levhaların ortalama kalınlığı (t) 1,6 mm olarak ölçülmüştür. Tabakalı kompozit levhaların üretim işleminden sonra, levhalardan standart deney numuneleri çıkarılarak, kompozit malzemenin mekanik özellikleri deneysel olarak literatüre uygun elde edilmiştir (Gibson, 1994; Jones, 1999; Mallick, 1993.). Fiberlerin kompozit yapı içerisindeki hacimsel oranı % 59 olarak tespit edilmiştir. Deneylerde uzama telleri kullanılmış ve INSTRON 1114 çekme cihazından yararlanılmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen mekanik özellikler Çizelge 1’de gösterilmiştir (Şen, 2007).

Çizelge 1. Kompozit malzemenin mekanik özellikleri

E_1 (MPa)	E_2 (MPa)	G_{12} (MPa)	ν_{12}	X_t (MPa)	Y_t (MPa)	X_c (MPa)	Y_c (MPa)	S (MPa)	V_f (%)
43500	16250	6970	0.28	940	109	940	156	91	59

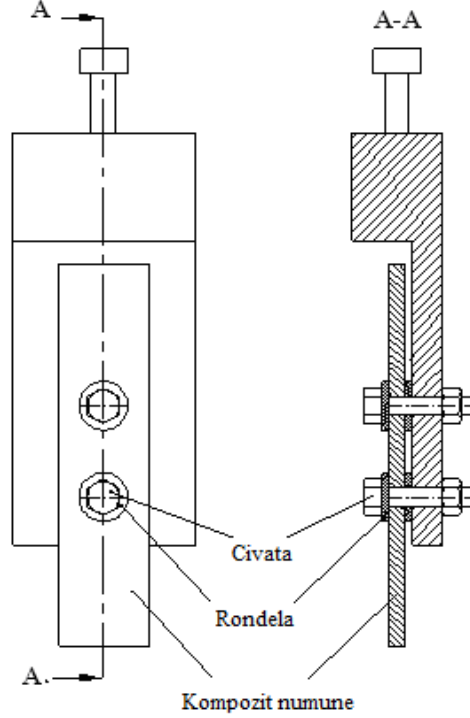
Üretilen tabakalı kompozit levhalardan, çalışmanın amacına uygun olarak Şekil 1’de gösterilen boyutlarda seri çift delikli deney numuneleri, kesme ve delme işlemleri ile hassas bir şekilde hazırlanmıştır. Her bir deliğin çapı D’dir. Numune uzunlukları 135 mm ve delik çapları 5 mm olacak şekilde sabit değerler seçilmiştir. Test edilen numunelerin genişliğinin delik çapına oranı olan W/D oranı 2, 3, 4 ve 5, dış civatanın merkezinin numunenin serbest ucuna olan mesafesinin delik çapına oranı olan E/D oranı 1, 2, 3, 4 ve 5 olacak şekilde farklı geometrik parametreler belirlenmiştir.



Şekil 1. Seri iki civatalı kompozit numune boyutları

Birbirine seri olan iki civata deliğinin merkezleri arasındaki mesafenin delik çapına oranı olan K/D oranı 4 olarak seçilmiştir. Daha sonra bu parametrelere uygun olan birbirinin aynı üçer adet numune hazırlanmıştır. Farklı geometrik parametrelere sahip numuneler hazırlanmasının amacı, değişen parametrelerin hasar davranışını ne şekilde ve oranda değiştirdiğinin araştırılmak istenmesidir. Deneylerde, çelik civatalar, rondelalar ve somunlar kullanılmıştır. Numuneler test edilmeden önce 3 Nm’lik bir tork uygulanmıştır. Seri iki civatalı bağlantı, çekme cihazında deneylerin yapılabilmesine olanak sağlayacak şekilde geliştirilmiş olan aparat ile yapılmıştır (Şekil 2). Numuneler, çekme cihazında düzgün yayılı P yükü ile tamamen hasara uğrayıncaya kadar çekilmiştir. Çekme hızı 0.5 mm/dak olarak ayarlanmıştır. Çekme deneyleri esnasında tüm veriler, çekme cihazına bağlanmış olan bir bilgisayara kaydedilmiştir. Her bir tip numune için üçer deney numunesi aynı şartlar altında

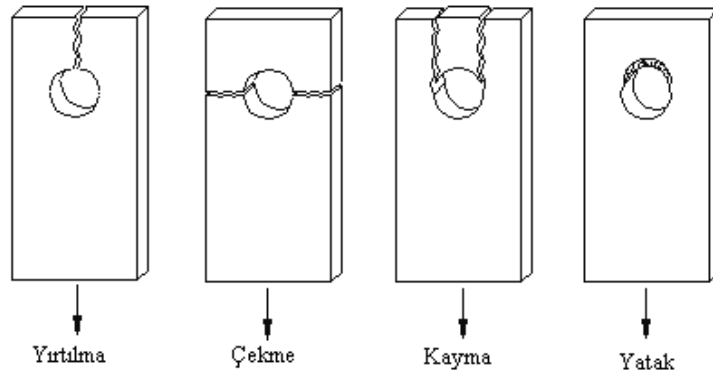
test edilmiştir. Böylece, her bir tip numune için üç deneyin ortalaması alınmak suretiyle ortalama bir maksimum yük ve yatak mukavemeti değeri hesaplanmıştır. Hasar tiplerinin belirlenmesinde, her üç numunenin hasarı incelenmiş ve yük-şekil değiştirme eğrilerinden faydalanılmıştır.



Şekil 2. Numunelerin iki seri bağlı civata ile bağlanması

3. BULGULAR

Homojen özelliklere sahip metalik bağlantıların aksine, çekme ve kayma gerilmeleri altındaki kompozit levhalarda, kompozitlerin sahip oldukları anizotropik özelliklerinden dolayı bazı özel şekillerde hasarlar oluşmaktadır. Şekil 3'te (Pakdil vd., 2007; Gibson 1994) gösterilen bu hasar tipleri, yırtılma, çekme, kayma ve yatak hasarları olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 3. Civata bağlantılı kompozit plakalarda oluşan hasar tipleri

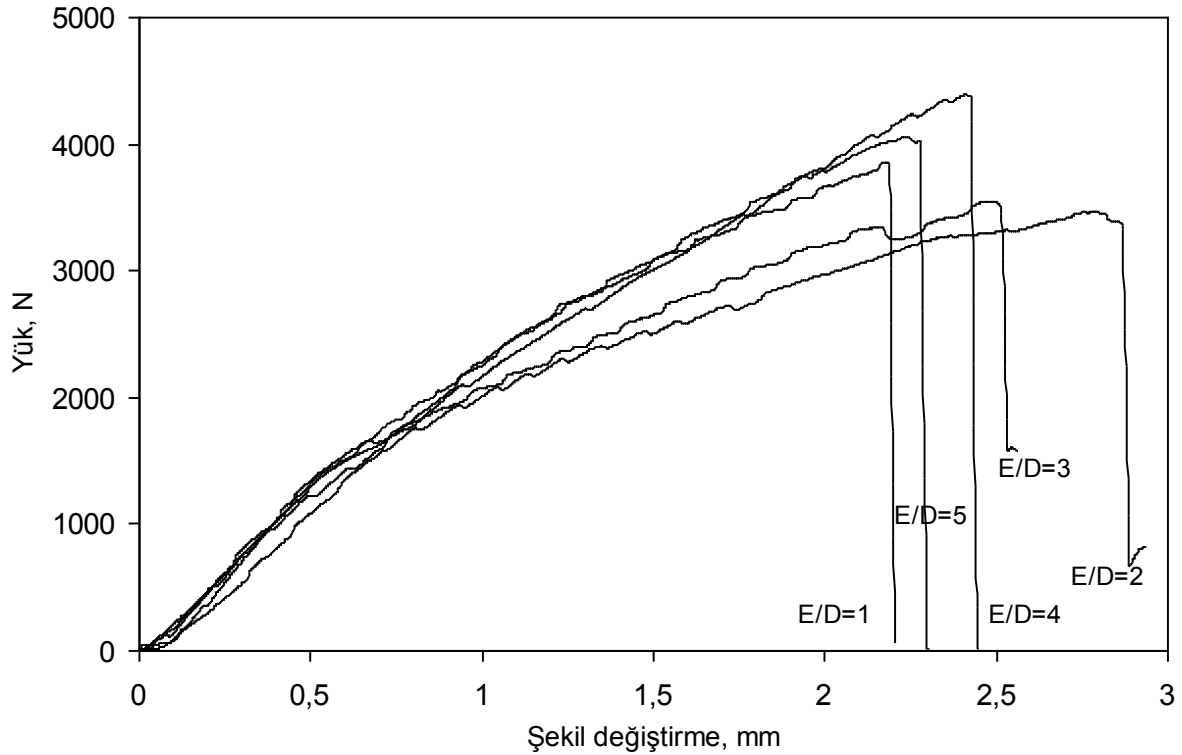
Bu çalışmada, test edilen numunelerde gözlenen hasar tipleri Çizelge 2'de verilmiştir. Hasar tiplerinin belirlenmesinde test edilen numunelerin incelenmesi yanında, yük şekil değiştirme eğrilerinden de faydalanılmıştır. Çizelge 2'den açıkça görüldüğü üzere, test edilen

numunelerde yırtılma hasarı dışındaki hasarlar gözlenmiştir. Bunun nedeni, yırtılma hasarının genel olarak tek yönlü takviye edilmiş olan levhalarda oluşmasıdır. Örneğin $[0_8^\circ]$ yukarıda açıklandığı üzere bu çalışmadaki tabakalı kompozit levhalar çapraz olarak, $[0_2^\circ/90_2^\circ]_s$ takviye edilmiştir (Şen, 2007).

Çizelge 2. Test edilen numunelerde oluşan hasar tipleri

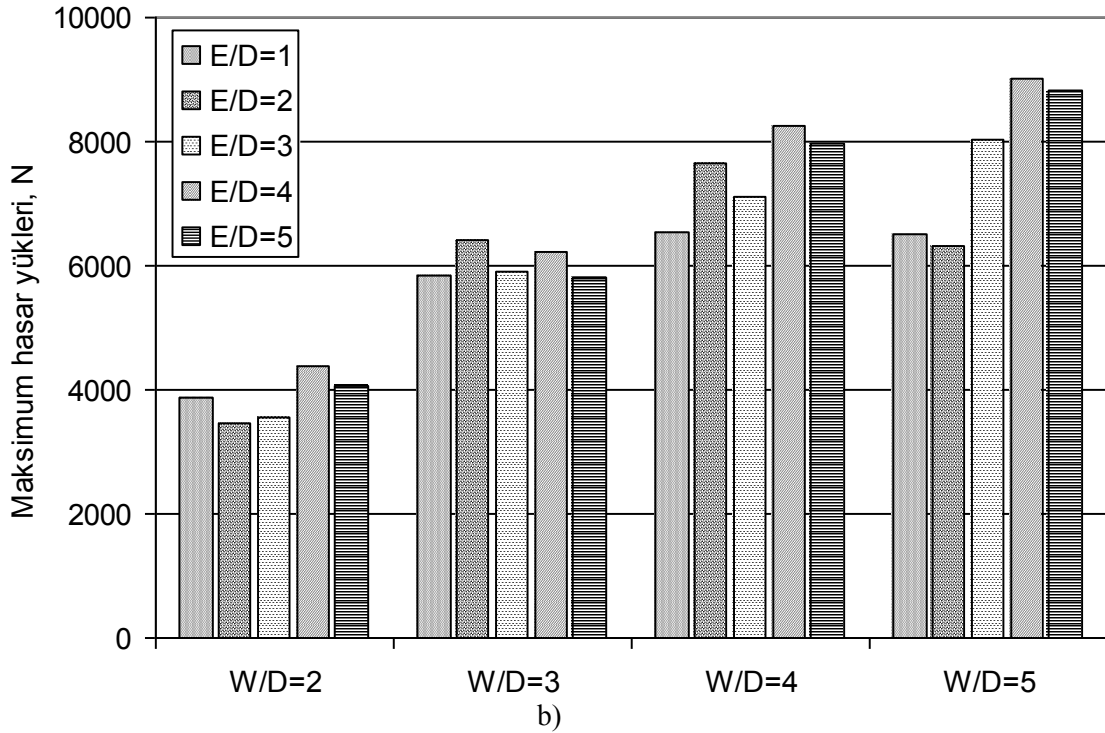
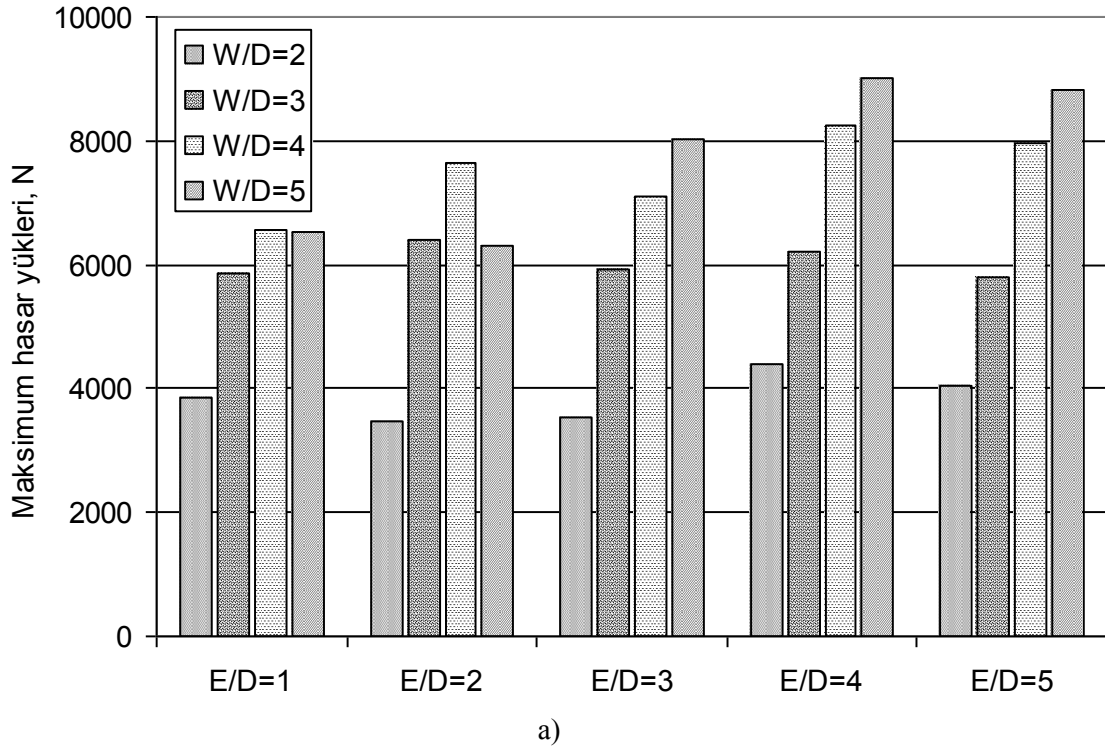
K/D	E/D	W/D			
		2	3	4	5
		İç / Dış	İç / Dış	İç / Dış	İç / Dış
4	1	N/-	BN/S	BN/S	BN/S
	2	BN/-	BN/-	BN/S	BN/S
	3	BN/-	BN/B	BN/B	BN/S
	4	BN/-	BN/B	BN/B	B/B
	5	BN/-	BN/B	BN/B	B/B

(N: Çekme hasarı, S: Kayma hasarı, B: yatak hasarı, -: Hasarsız)

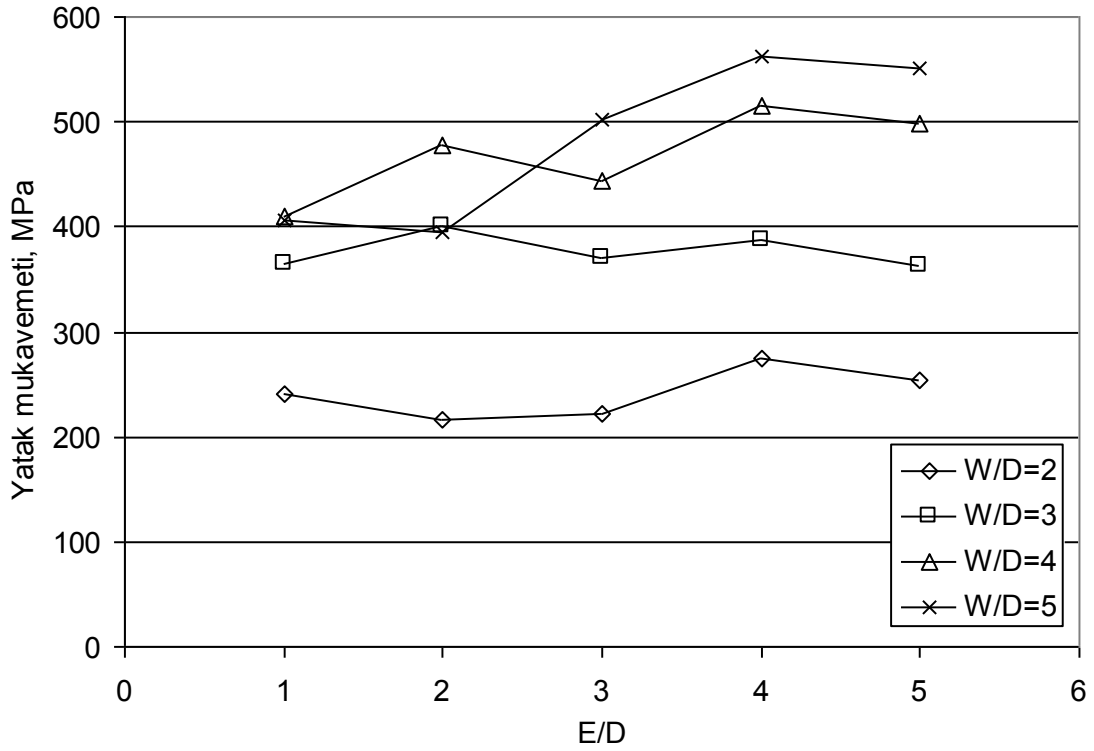


Şekil 4. W/D=2 için yük-şekil değiştirme eğrileri

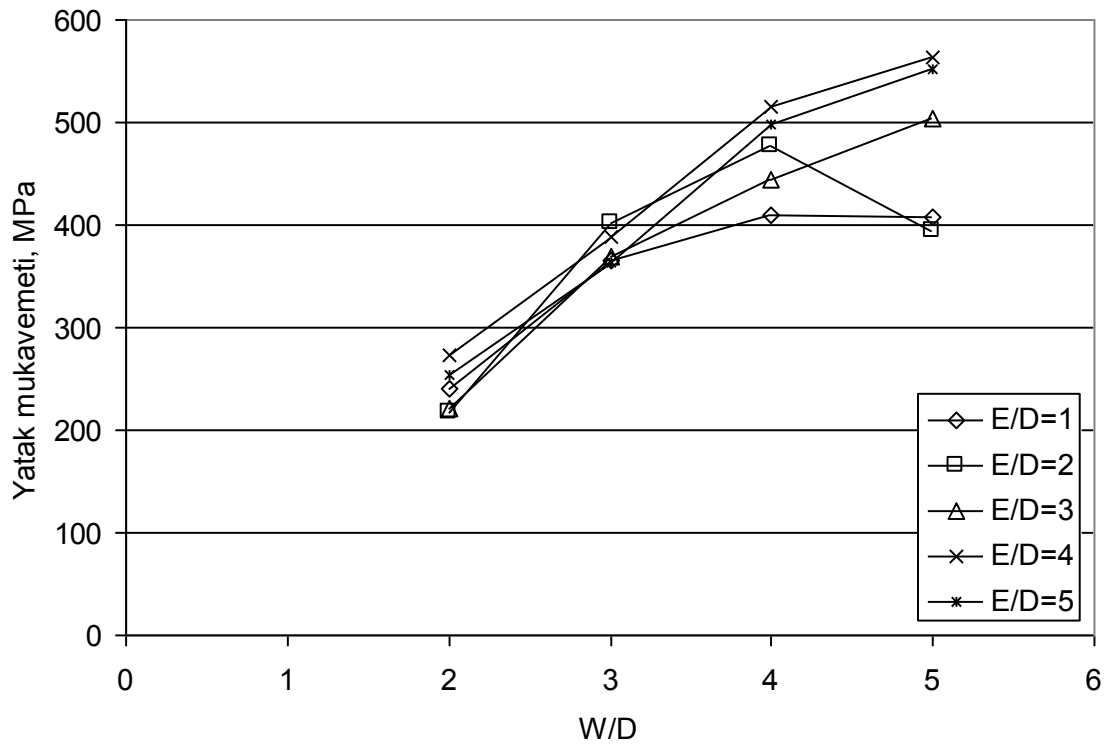
Bazı numunelerde, sadece çekme (E/D=1 ve W/D=2) veya sadece yatak (E/D=W/D=5) hasarları görülebilirken, birçok numunede karma hasar tipi olarak adlandırılan hasarlar meydana gelmiştir. Örneğin, deney esnasında hem iç hem de dış delikte yatak hasarı oluşmaya başlamış, yükün belli bir değere oluşmasından sonra özellikle iç delikte çekme hasarı oluşmuştur (BN/B). Bunların yanında, numuneler W/D=2 olarak boyutlandırıldığında tüm E/D oranları için özellikle dış delikte herhangi bir hasar oluşumu gözlenmeden, sadece iç delikte çekme (N) veya karma (BN) hasarlar oluşmuştur.



Şekil 5. Maksimum hasar yüklerinin değişimleri



a)



b)

Şekil 6. Yatak mukavemetlerinin değişimleri

Bir başka ifadeyle, iç delikte oluşan çekme hasarı oluşumu nedeniyle numune yük taşıyamayacak şekilde hasara uğramış bunun sonucu olarak dış delikte herhangi bir hasar oluşmamıştır. Çekme hasarının aniden olması ve numunenin çekmeye dik doğrultuda kırılması nedeniyle, numune o andan itibaren tamamen yük taşıyamaz hale gelmektedir. Bu sebepten dolayı, gerçek uygulamalarda çekme hasarı istenmeyen bir hasar tipidir. Diğer taraftan, $W/D=5$ ve $E/D=4, 5$ olan numunelerin her iki deliğinde yatak hasarı meydana gelmiştir. Yatak hasarının ezilme şeklinde oluşması ve malzemenin yük taşımaya devam etmesi nedeniyle, herhangi bir hasar esnasında yatak hasarı diğerlerine tercih edilen bir hasar tipidir. Deney esnasında, çekme cihazına bağlı bir bilgisayar yardımıyla her bir test edilen numune için yük-şekil değiştirme eğrileri çizilmiştir. Bu eğrilerden, hasar tiplerinin belirlenmesinde, maksimum hasar yüklerinin tespitinde ve yatak mukavemetlerinin hesaplanmasında yararlanılmıştır. $W/D=2$ oranı için elde edilen yük şekil değiştirme eğrileri Şekil 4'te gösterilmiştir. Eğriler üzerinde, maksimum değerlerden sonra görülen ani düşüşler numunelerde çekme hasarının oluştuğunu göstermektedir.

Maksimum hasar yüklerinin değişimleri, Şekil 5'te gösterilmiştir. Şekil 5a'da W/D oranına, Şekil 5b'de ise E/D oranına göre değişimler verilmiştir. Bu şekil, W/D ve E/D oranındaki artışa bağlı olarak maksimum hasar yüklerinin arttığını göstermektedir. Bu genel olarak doğru bir sonuç olmasına rağmen bazı numunelerde, daha küçük bir oranın kendisinden daha büyük olan bir orandan biraz daha fazla yük taşıyabildiği görülmüştür. Bunun nedeni, kompozit malzemenin izotropik malzemelerin taşıdığı özellikler yerine, anizotropik özellikler taşımasındandır. Bir başka nedende, özellikle kesme ve delme işlemlerinde delikler çevresinde mikro çatlaklar ve delaminasyonlar meydana gelebilmesidir. Bu tür olumsuz etkiler, numunenin yük taşıma kapasitesini bir miktar düşürebilmektedir.

Test edilen numuneler için yatak mukavemetleri maksimum hasar yükleri kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen değerlerin W/D ve E/D oranlarına bağlı değişimleri, sırasıyla Şekil 6a ve b'de grafik olarak çizilmiştir. $W/D=2$ oranının çok kötü bir seçim olacağı bu grafikte çok net bir şekilde bir kez daha anlaşılmaktadır. Bunun yanında, E/D oranının da yük taşıma kapasitesi açısından oldukça düşük olduğu görülmektedir. Yatak mukavemetlerinin değerlerinde, E/D ve W/D oranlarının değişimindeki artışa bağlı olarak genel bir artma olmaktadır. Dolayısıyla, $W/D=5$ ve $E/D=5$ oranlarının, incelenen geometrik parametreler içinde oldukça iyi bir seçim olduğu görülmüştür.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, birbirine seri olarak yerleştirilmiş çift cıvata bağlantısı yapılmış tabakalı kompozit bağlantıların hasar davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmadan sonucunda bazı önemli sonuçlar elde edilmiştir. Bunlardan birincisi, $W/D=2$ oranının oldukça kötü bir oran olduğudur. Bu orana sahip numunelerde oluşan hasar tipleri, iyi bir dizayn açısından istenmeyen hasar tipleridir ve numuneler diğer numuneler göre oldukça düşük değerlerde yükler taşıyabilmişlerdir. Dolayısıyla gerçek uygulamalarda, $W/D=2$ oranı tercih edilmemelidir. Benzer bir sonuç $E/D=1$ içinde çıkarılabilir. E/D ve W/D oranlardaki artışa bağlı ve genel olarak kompozit levhaların maksimum hasar yükleri ile bu değerlere bağlı olarak hesaplanan yatak mukavemeti değerleri artış göstermektedir. Bir başka şekilde ifade etmek gerekirse, geometrik parametre olarak seçilen oranlar büyüdükçe kompozit numunelerin yük taşıma kapasiteleri artış göstermiştir. Kompozit malzemeler genel olarak anizotropik malzeme özelliği gösterirler. Bundan dolayı, bu çalışma ile elde edilen sonuçlar, çift cıvata uygulamalarının olduğu diğer tabakalı kompozit levhalar içinde kolaylıkla kullanılabilir. Özetle, bu deneysel çalışma ile elde edilen sonuçların, kompozit levhaların çift cıvatalı birleştirilme tasarımlarında, uygun geometrik parametrelerin seçilmesini sağlayabilecek olmasından dolayı, tasarımcılara önemli katkılar sağlayacağı düşünülmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Yrd. Doç. Dr. Faruk Şen tarafından Prof. Dr. Onur Sayman danışmanlığında 2007 yılında tamamlanan **Failure Analysis of Composite Pin-Loaded Joints under Preload Moments** adlı doktora tezinin sonuçlarından üretilmiştir. Adı geçen tez, Teorik ve Uygulamalı Mekanik Türk Milli Komitesi tarafından en iyi doktora tezi birincilik ödülü ile ödüllendirilmiştir. Yazarlar, özellikle Prof. Dr. Hilmi Demiray, Prof. Dr. Yalçın Aköz ve diğer komite üyelerine bu onur verici takdirlerinden dolayı teşekkür etmektedirler.

KAYNAKLAR

- Ataş A., Şen F., Arslan N. (2009): "Failure Analysis of Laminated Composite Plates with Two Parallel Pin-loaded holes", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Cilt 28, No. 10, s. 1265-1276.
- Gibson R.F. (1994): "Principals of Composite Material Mechanics", Singapore. Mc Graw-Hill.
- Jones R. M. (1999): "Mechanics of Composite Material". Philadelphia: Taylor & Francis.
- Mallick P. K. (1993): "Fiber-reinforced Composites Materials, Manufacturing and Design". Marcel Decker.
- Pakdil M., Şen F., Sayman O., Benli S. (2007): "The Effect of Preload on Failure Response of Glass-Epoxy Laminated Composite Bolted-joints with Clearance". *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Cilt 26, s. 1239-1252.
- Scalea F. L. D., Cappello F., Cloud G. L. (1999): "On the Elastic Behavior of a Cross-ply Composite Pin-joint with Clearance fits", *J. of Thermoplastic Composite Materials*, Cilt. 12, s. 13-22.
- Sayman O., Siyahkoç R., Şen F., Özcan R. (2007): "Experimental Determination of Bearing Strength in Fiber Reinforced Laminated Composite Bolted-joints under Preload", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Cilt 26, s. 1051-1063.
- Şen F., Pakdil M., Sayman O., Benli S. (2008): "Experimental Failure Analysis of Mechanically Fastened Joints with Clearance in Composite Laminates under Preload", *Materials & Design*, Cilt 29, s. 1159-1169.
- Şen F. (2007): "Failure Analysis of Composite Pin-Loaded Joints under Preload Moments", PhD Thesis, Dokuz Eylül University, İzmir.
- Şen F., Pakdil M., Çakan A. (2008): "Paralel Çift Pim Bağlantılı E-Glass/Epoksi Tabakalı Kompozit Plakalarda Hasar Yükleri ve Tipleri", VII. Havacılık Sempozyumu Bildiriler Kitabı, s. 36-40, Kayseri.
- Tong L., Mouritz A. P., Bannister M. (2002): "3D Fibre Reinforced Polymer Composites", Elsevier, UK.