

ONARILMIŞ POLİMER MATRİS KOMPOZİT PLAKLARIN STATİK YÜKLER ALTINDAKİ DAVRANIŞLARI

Cesim Ataş^a, Bülent M. İçten^a, Mehmet Sarıkanat^b, Çiçek Özses^a, Mustafa İ. Uysal^a

^a Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü
Bornova, İzmir

^b Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü
Bornova, İzmir

Özet

Bu çalışmada onarılmış kompozit plakların mekanik davranışları incelenmiştir. Çalışmada kullanılan plaklar vakum destekli infüzyon yöntemi ile üretilmiştir. Onarımı temsil etmek üzere basamaklı yamalar yapılmış ve farklı yamaların mekanik davranışlara etkisi incelenmiştir. Bu amaçla üç nokta eğme, burkulma ve çekme testleri yapılarak sonuçlar hasarsız bir numunenin davranışları ile karşılaştırılmıştır.

Abstract

In this study, mechanical behavior of repaired composite plates is investigated. The plates were manufactured by vacuum assisted resin infusion process. The stepped lap technique was used to simulate repaired plates. The effect of various repairs on mechanical behaviors is examined. In this respect, three point bending, buckling and tensile tests are conducted, and the obtained results are compared with those of intact samples.

1. Giriş

Fiber takviyeli polimer kompozitler sağladıkları pek çok avantaj nedeniyle hava ve deniz araçlarında, otomotiv endüstrisinde, yenilenebilir enerji alanında, savunma sanayinde ve daha pek çok sahada yoğun olarak kullanılmaktadır. Bu yoğun kullanım beraberinde onarım konusunu da gündeme getirmektedir. Bu nedenle, onarım yöntemleri ve onarılmış kompozitlerin performansları üzerine literatürde çok çeşitli çalışmalar yapılmış bulunmaktadır. Bunların bir kısmı aşağıda özetlenmiştir.

Ahn ve Springer [1] hasara uğramış fiber takviyeli tabakalı kompozitlerin onarımında kullanılan tekniklerin verimliliğini tespit etmek için deneysel bir çalışma yapmıştır. Diğer taraftan aynı yazarlar [2] dolgu ve düzgün dış yama teknikleri ile onarılan kompozit plakların hasar yüklerinin hesaplanmasına yönelik matematiksel modeller geliştirdiler. Bair ve arkadaşları [3] hasara uğramış kompozit plakların analizi için bir sonlu elemanlar yaklaşımı

sundular. Gama [4] ve arkadaşları dolgu tekniği ile onarılmış kalın kesitli kompozit plakların statik ve dinamik eksenel yükler altındaki dayanımını incelediler.

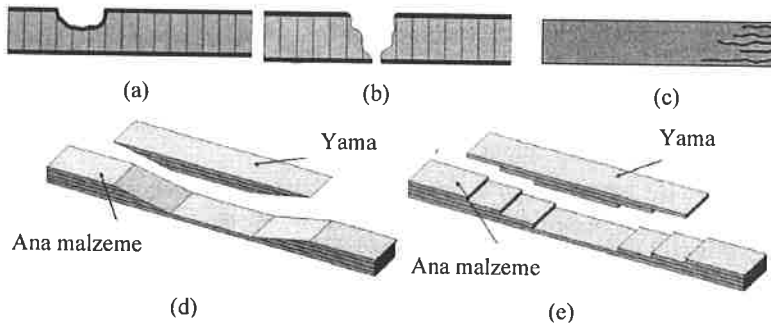
Hava ve uzay araçları da kompozit plakların sıklıkla kullanıldığı uygulamalardır. Buralarda kullanılacak kompozit parçaların tasarım ve analizinin yanında tamir ve bakımı da çok önemli bir konudur. Son zamanlarda, bu konuda pek çok analitik, nümerik ve deneysel çalışma yapılmıştır [5–8].

Charalambides ve arkadaşları [9] karbon fiber/epoxy ile onarılmış bağlantıların statik ve dinamik (yorulma) yükler altındaki performansını incelediler. Tzetzis ve Hogg [10] karbon fiber kompozitlerin vakum destekli infüzyon sistemi ile yapılan onarımlarında yapışma ara yüzey tokluğunun geliştirilmesi üzerine bir çalışma yapmıştır. Belhouari ve arkadaşları [11] simetrik kompozit yapılarda tek taraflı veya çift taraflı yama ile yapılan onarımların kırılma mekanizması açısından nümerik bir analizini yapmışlardır. Soutis ve arkadaşları [12] yama yapılarak onarılmış karbon fiber/epoxy kompozit plakların bası yükleri altındaki davranışları üzerine bir çalışma yapmıştır. Ayrıca, eksenel bası yüklerine maruz dıştan yama edilmiş karbon fiber takviyeli kompozit plakların dayanımı da başka bir çalışma kapsamında incelenmiştir [13]. Özellikle deniz araçlarında, askeri araçlarda ve yapı uygulamalarında karbon dışında malzemelerden üretilen kalın kesitli kompozitler de çok geniş kullanım alanları bulmaktadır. Bu nedenle kalın kesitli ve hasarlı kompozitlerin onarımı da önemli araştırma konularından biri haline gelmiştir. Hosur ve arkadaşları [14] balistik darbeye maruz kalmış kalın kesitli ve örgülü S2-cam elyaf /vinylester kompozitlerin onarım stratejileri üzerine bir çalışmanın sonuçlarını sunmuştur.

Bu çalışmada ise onarılmış kompozit plakların mekanik davranışlarını incelenmek amacı ile hasarsız ve yamalı numuneler üretilmiştir. Farklı yama geometrileri için çekme, üç nokta eğme ve burkulma testleri yapılmış ve sonuçlar hasarsız bir yamanın davranışları ile karşılaştırılmıştır.

2. Kompozit Yapılarda Onarım

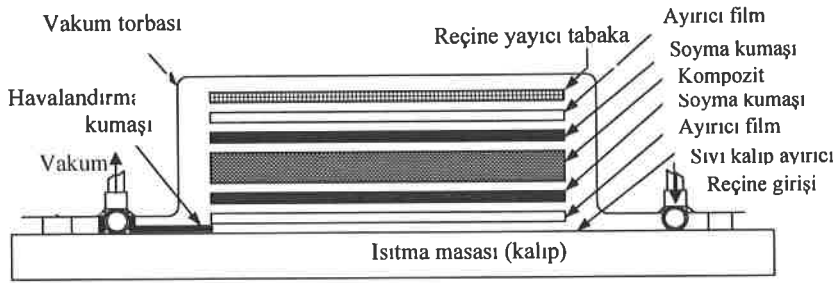
Kompozit yapılarda onarım genellikle üretim esnasında meydana gelen sorunları veya çalışma esnasında oluşan hasarları gidermek amacıyla yapılır. Söz konusu hasar malzemede kısmi çökme veya tamamen delinme şeklinde, Şekil 1 (a) ve (b) oluşabildiği gibi tabakalar arası ayrılmalar şeklin de ortaya çıkabilir, Şekil 1 (c). Onarımda çeşitli yöntemler uygulanmaktadır. Bunlar dolgu (scarf), basamaklı (stepped), tek taraflı (single lap) ve çift taraflı (double lap) dış yama şeklindeki onarımlar olabilir. Şekil 1’de dolgu (d) ve basamaklı yama (e) örnekleri şematik olarak verilmiştir.



Şekil 1 Çeşitli hasar şekilleri ve onarım yöntemleri

3. Malzeme Üretimi

Bu çalışmada kompozit plaka üretiminde vakum destekli reçine infüzyon metodu kullanılmıştır. Şekil 2’de bu metot şematik olarak gösterilmiştir [15].

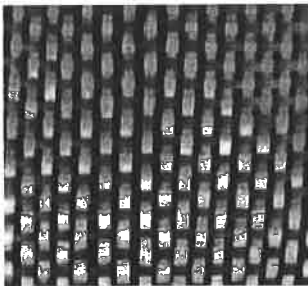


Şekil 2 Vakum destekli reçine infüzyon sisteminin şematik gösterimi

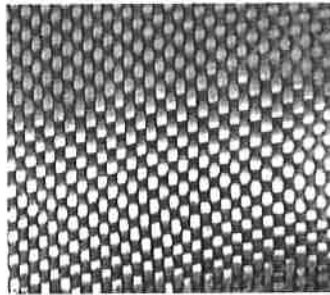
Kompozit plaka üretiminde iki farklı örgülü kumaş (Tablo 1) kullanılmıştır, Şekil 3. Bu kumaşlardan üretilen kompozit plaklar sunum kolaylığı için bundan sonra K1 ve K2 olarak anılacaktır.

Tablo 1. Üretimde kullanılan örgülü cam elyaflara ait özellikler

	Ağırlık (gr/m ²)	Çözümlü sayısı (adet/cm)	Atkı sayısı (adet/cm)
K1	400	3	2.5
K2	275	4	5



(a) K1 için cam elyaf



(b) K2 için cam elyaf

Şekil 3 K1 ve K2 kompozitlerinde kullanılan örgülü cam elyaflar

Kompozit yapıların onarımında basamaklı yamaya sahip numune üretimi iki şekilde yapılabilir. Birinci yol, kompozit plaka üretildikten sonra yama yapılacak bölgeyi basamaklı olarak işlemek ve daha sonra işlenen bölgeyi orijinal plakaya uygun tabaka dizilişinde elyaf kumaşla kapatıp epoksi reçine emdirmektir. İkinci yol ise, yamalı bölgeyi temsil etmek üzere kompozit plaka üretimi esnasında kumaşları basamaklı olarak kesip reçine emdirmektir.

Birinci yöntem gerçek uygulamalara daha yakındır. 50-60 kat kumaştan oluşan bir bölgeyi yama yaparken hasar bölgesinde 10 kat yerine 11, 12 kat kumaş kesilmesi veya tıraşlanması onarım sonrası performansı çok büyük oranda etkilemez. Akademik çalışmalarda bu kadar kalın plaklar ile çalışmanın bazı dezavantajları ve zorlukları vardır. Bunların başında artan üretim maliyeti ve iş gücü ile yüksek kapasiteli test cihazlarının gerekliliği gelmektedir. Diğer taraftan 10-16 kat kumaştan üretilen örneğin 3-4 mm kalınlığındaki ince bir plakanın basamaklı olarak hassas işlenmesi zordur. Hatalı bir talaş alma işlemi, örneğin 4 kat yerine 6 kat kumaşa karşılık gelen bir talaş alma 10 tabakalı bir plaka için sonuçları önemli ölçüde etkileyecektir. Bu nedenle bu çalışma kapsamında geliştirilen ikinci yöntemin akademik amaçlı çalışmalarda büyük kolaylıklar sağlayabileceği düşünülmüştür. Böylece gerçek bir yamayı temsil etmek üzere mükemmel yapışmanın sağlandığı numuneler üretmek mümkün olacaktır. Ancak; bu şekilde üretilen yamalı bir numune (ideal yamalı numune) ile gerçek bir yama arasındaki ilişkinin de ortaya konması gerekmektedir. Şekil 4'de K1 ve K2 kodlu kompozit plaklar için kullanılan yama geometrileri şematik olarak verilmiştir.

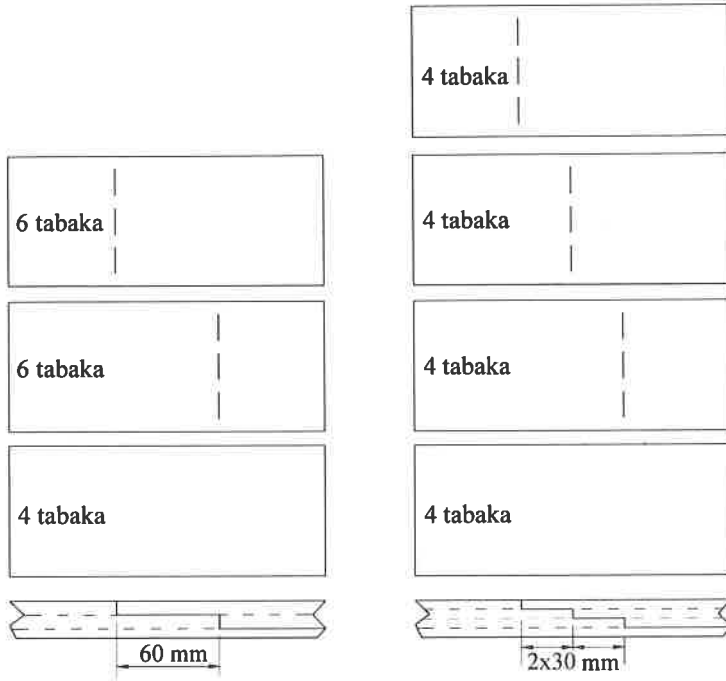
Burada ideal bir yama elde etmek için elyaf tabakalarında süreksiz bölgeler oluşturulmuştur. Bunun için elyaf kumaşlar plaka içindeki konumu ve yama geometrisi göz önüne alınarak markalanmış ve gerekli yerlerden kesilmiştir. Daha sonra, istenen dizilişte elyaf kumaşlar üst üste konularak vakum ortamında reçine infüzyonu yöntemi ile kompozit plaka haline getirilmiştir.

Sonuç olarak; yukarıda sözü edilen testlerde kullanmak üzere yamasız, iki-basamaklı ve üç-basamaklı yamaya sahip numuneler üretilmiştir. Yamasız kompozit plakalar 16 tabaka örgülü cam elyaf kumaş üst üste konarak üretilmiştir. Yamalı ve yamasız numuneler için ortalama kalınlıklar K1 malzemesi için 3.7 mm ve K2 malzemesi için 3.2 mm olarak elde edilmiştir. K1 numunelerinde yamalar tek noktadan numune ortasına gelecek şekilde yapılmıştır. Buna karşılık K2 numunelerinde yamalar iki taraflı olarak yapılmıştır. Dolayısı ile yamaların başlangıç noktaları numunelerin ortasına değil de uçlarına daha yakın yer almıştır.

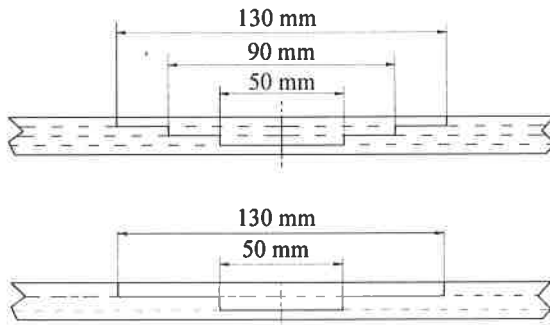
4. Mekanik Testler

Bu çalışmada onarılmış kompozit plakaların mekanik davranışlarını incelemek için vakum destekli infüzyon yöntemi ile üretilen yamalı numuneler eğme, burkulma ve çekme testlerine tabi tutulmuştur. Testler için Shimadzu AUTOGRAPH AG-IS Serisi universal çekme test cihazı kullanılmıştır. Her numune için en az 3 adet test yapılmış olup çalışmada sunulan veriler bu testlerin ortalamasını göstermektedir.

ASTM D-3039 standartlarına uygun olarak gerçekleştirilen çekme testleri oda sıcaklığında 2 mm /dak. çekme hızında yapılmıştır. Üç nokta eğilme testi olarak bilinen eğilme testleri ASTM D 790 standartlarına uygun olarak yapılmış ve testlerde mesnetler arası mesafe (span) 100 mm ve eğilme hızı 1.3 mm/dak olarak seçilmiştir. Burkulma testlerinde ise basma hızı 1.3 mm/dak olarak seçilmiş ve testlerde farklı genişliklerde numuneler kullanılmıştır.



(a) K1 numuneleri için 3 basamaklı ve 2 basamaklı yama geometrisi



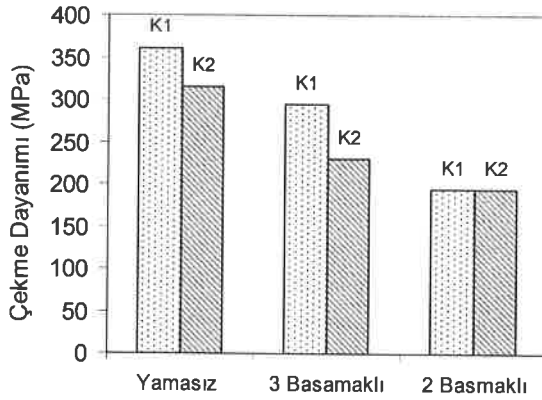
(b) K2 numuneleri için 3 basamaklı ve 2 basamaklı yama geometrisi

Şekil 4 K1 ve K2 için yama geometrileri

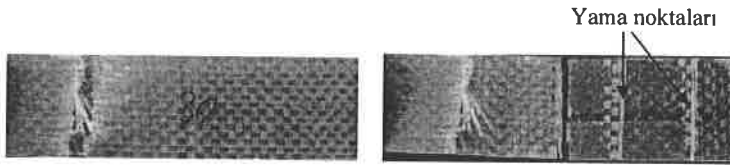
5. Deneysel Sonuçlar ve Tartışma

5.1. Çekme Testi

Şekil 5’de K1 ve K2 numunelerinin çekme testi sonucunda elde edilen dayanım değerleri gösterilmiştir. Beklenildiği gibi yamasız numunelerin çekme dayanımı en büyük çıkmaktadır. Üç basamaklı yamada ise dayanım değerleri süreksizlik 3 farklı noktaya dağıtıldığı için 2 basamaklı yamaya göre daha yüksek çıkmaktadır. Deney numuneleri incelendiğinde hasarların yama noktalarında meydana geldiği görülmektedir. Şekil 6 (a)’da hasara uğramış bir çekme numunesi gösterilmiştir. Aynı numunenin çekme testi sonunda hasara uğrayarak ayrılmaya başlayan üst tabakası kaldırıldığında hasarların numunenin yama noktalarında meydana geldiği görülmüştür, Şekil 6 (b).



Şekil 5 Yamalı ve yamasız numuneler için çekme dayanımları

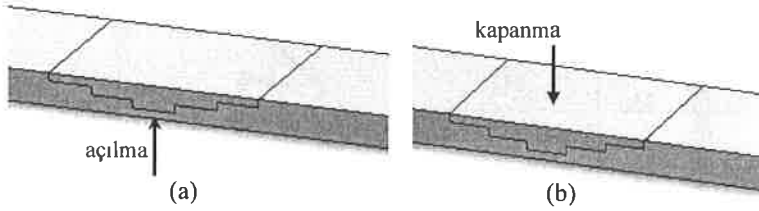


Şekil 6 Hasara uğramış bir çekme numunesi (K2) ve hasar noktaları

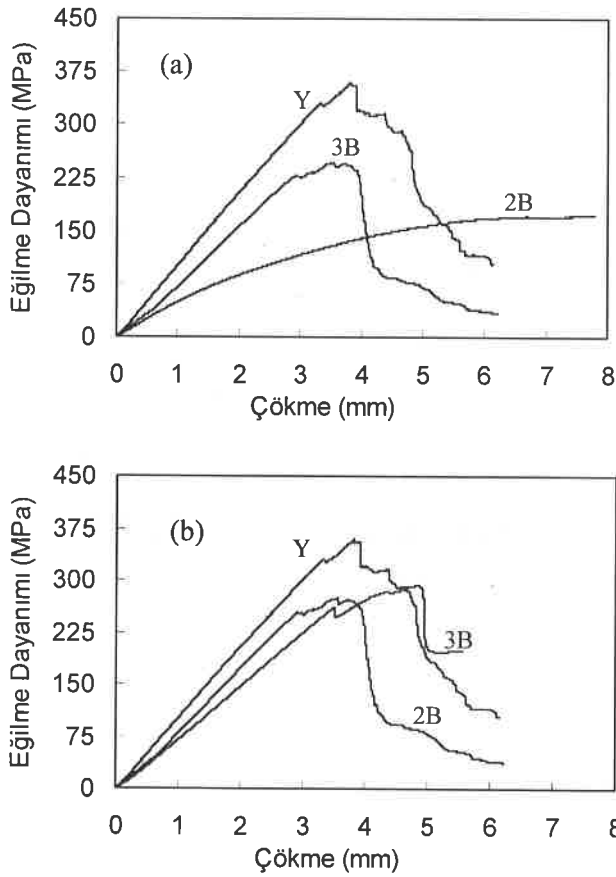
5.2. Üç Nokta Eğme Testi

Yamasız, iki basamaklı ve üç basamaklı yamaya sahip numunelerin üç nokta eğme testleri hem yama açılma yönünde hem de yama kapanma yönünde yapılmıştır. Şekil 7’de açılma ve kapanma için yükleme yönleri şematik olarak gösterilmiştir. Yükleme yönüne bağlı olarak eğilme dayanımı-çökme diyagramlarında ve hasar mekanizmalarında farklılıklar ortaya çıkmaktadır. Şekil 8’de K2 numuneleri için yükleme yönüne bağlı olarak grafiklerde meydana

gelen değişim gösterilmiştir. Kapanma yönündeki yüklemelerde, eğilme dayanım değerleri değişmekle beraber, eğriler benzer karakteristiklere sahiptir. Ancak yama açılması yönünde yapılan yüklemelerde durum biraz daha farklıdır, Şekil 8 (a). Yama noktasından başlayan hasarlar tabakalar arasında ayrılmalar şeklinde devam etmektedir. Bu tip kırılmalarda hasar başlangıcından sonra tam kırılmaya kadar eğri genellikle yatay bir değişim (şekilde verilen 2 basamaklı yama eğrisi) göstermektedir.

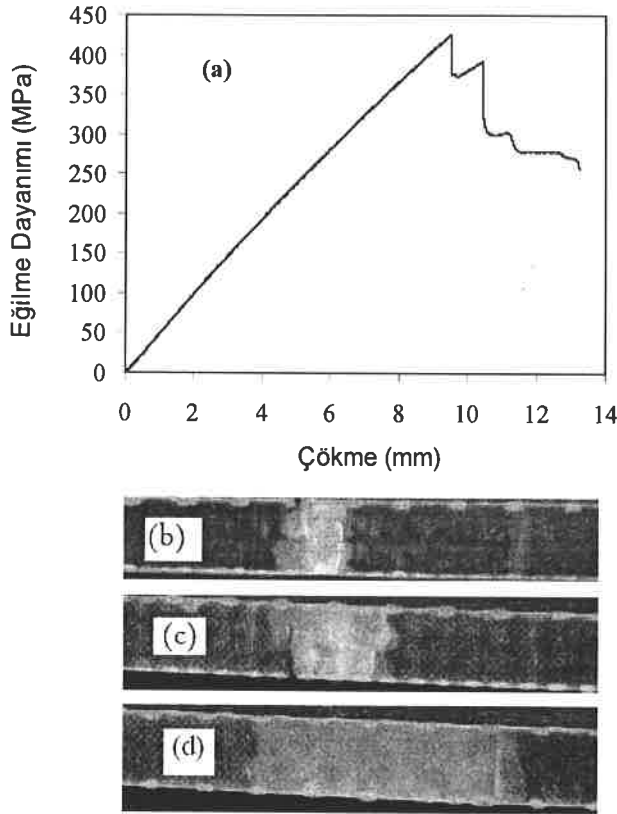


Şekil 7 Eğilme numuneleri için yükleme yönleri



Şekil 8 K2 için (a) açılma yönünde (b) kapanma yönünde eğilme dayanımları

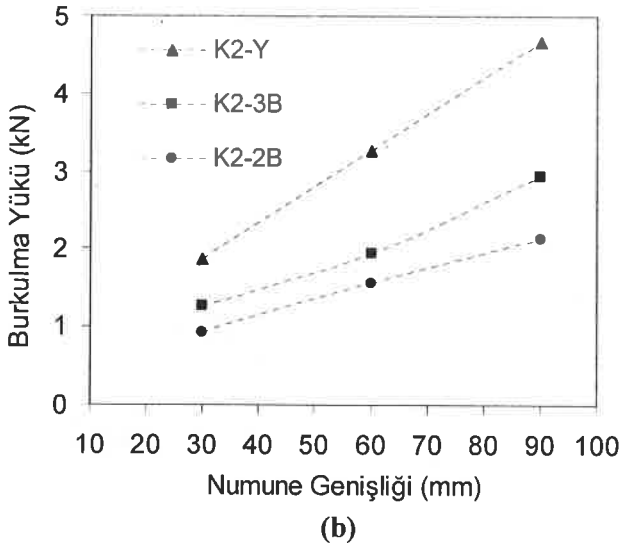
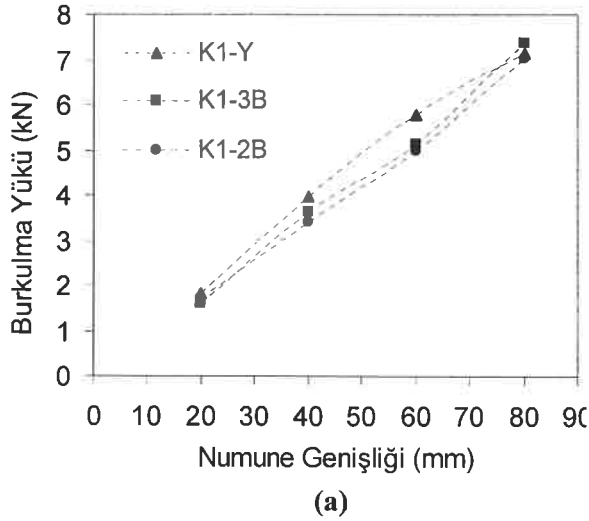
Ancak K1 numuneleri için aynı şeyi söylemek mümkün değildir. Çünkü söz konusu numunelerde yama, numunelerin tam orta noktasında yer almaktadır. Yani hasar yama noktasından başlasa bile üstte ifade edildiği gibi uzun mesafeli bir ara yüzey kırılmasından bahsedilemez. Burada daha kısa mesafeli basamaklı ara yüzey kırılmaları meydana gelmektedir, Şekil 9 (a). Şekil 9 (b)-(d)'de bazı K1 numunelerine ait üç nokta eğme hasarları görülmektedir.



Şekil 9 Üç basamaklı bir K1 numunesine ait eğilme dayanımı-çökme değişimi ve hasar resimleri

5.3. Burkulma Testleri

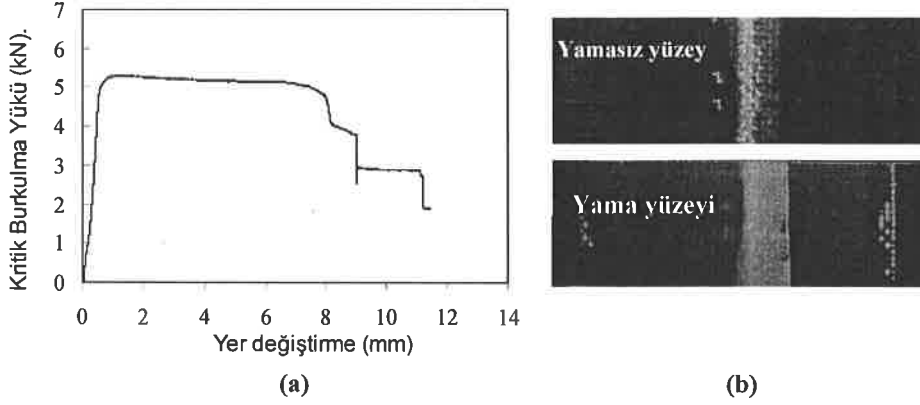
Burkulma testleri için K1 kompozit plakasından 20, 40, 60, 80 mm ve K2 plakasından 30, 60, 90 mm genişliğinde numuneler kesilmiştir. Yapılan burkulma deneylerine ait ortalama sonuçlar K1 ve K2 plakaları için sırası ile Şekil 10 (a) ve (b)'de verilmiştir. Bu sonuçlardan da görüldüğü gibi genişlik arttıkça kritik burkulma yükü hemen hemen lineer olarak artmaktadır. Bu değişim beklenen bir durumdur. Ancak homojen bir üretimin gerçekleştiğine işaret etmesi açısından önemlidir. Şekideki “Y” harfi yamasız numuneleri, “3B” üç basamaklı yamayı, “2B” ise iki basamaklı yamayı temsil etmektedir.



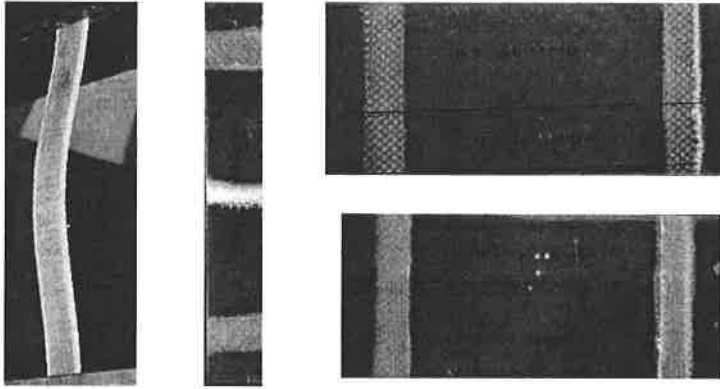
Şekil 10 K1 ve K2 numunelerine ait kritik burkulma değerleri

Şekilden de görüldüğü gibi K1 numuneleri için burkulma yükleri arasında K2 numunelerinde olduğu kadar fark yoktur. Bunun nedeni K1 numunelerinde yamanın numune ortasına konumlanmış olmasıdır. Bu tip numunelerde kritik burkulma yüküne ulaştıktan belli bir süre sonra hasarların başladığı (çoğu zaman yama bölgesinden başlayarak) gözlemlenmiştir. Bu hasarlara ait izler yük-yer değiştirme diyagramlarından ve numune resimlerinden kolaylıkla görülebilir, Şekil 11 (a)-(b). K2 numunelerinde ise dış yüzeydeki yama başlangıç noktaları numune uçlarına daha yakındır. Bu nedenle hasarlar daha çok bu

bölgelerde meydana gelmiştir, Şekil 12.



Şekil 11 Burkulma sonrası yama bölgesinden hasara uğrayan bir K1 numunesine ait yük-yer değıştirme eğrisi ve resim



Şekil 12 K2 numunelerine ait test esnasındaki ve sonrasındaki bazı resimler

6. Sonuç

Bu çalışmada ideal yama yöntemi ile onarılmış numunelerin çekme, eğilme ve burkulma testleri yapılarak mekanik davranışları ve hasar mekanizmaları incelenmiştir. Onarılmış bir yapıyı temsil etmek üzere idealize edilmiş yamaların üretim esnasında nasıl oluşturulacağı açıklanmıştır. Bu yöntemle akademik amaçlı numune üretiminin kolaylıkla yapılabileceği gösterilmiştir. Gerçek yama tekniğı ile üretilen numuneler üzerinde de benzer testler yapılarak başka bir çalışma çerçevesinde karşılaştırmalar yapılacaktır.

7. Kaynaklar

- 1 S-H Ahn, G.S. Springer, "Repair of Composite Laminates-I: Test Results" *Journal of Composite Materials*, 32: 1036–1074, 1998.
- 2 S-H Ahn, G.S. Springer, "Repair of Composite Laminates-II: Models" *Journal of Composite Materials*, 32: 1076–1114, 1998.
- 3 D.L. Bair, P.O. Hudson, G.R. Ghanimati, "Analysis and Repair of Damaged Composite Laminates" *International SAMPE Symposium and Exhibition-How Concept Becomes Reality*, 36: 2264–2278, 1991.
- 4 B.A Gama, C. Cichanowski, J.W. Gillespie Jr., "Static and Dynamic Axial Compression of Scarf Repaired Thick Section Composite Laminates" *International SAMPE Symposium and Exhibition (Proceedings)*, 48 I: 814–825, 2003.
- 5 R.L. Keller, "Challenges in Composite Maintenance and Repair: A Perspective" *International SAMPE Technical Conference, SAMPE 2004*: 3359–3372, 2004.
- 6 Z. Marioli-Riga, D. Xenos, C. Vrettos, "A Standard Analysis Methodology For the Stress Analysis of Repaired Aircraft Structures with the Method of Composite Patch Repair" *Applied Composite Materials*, 11: 191–203, 2004.
- 7 A.C. Okafor, N. Singh, U.E. Enemuoh, S.V. Rao, "Design, Analysis and Performance of Adhesively Bonded Composite Patch Repair of Cracked Aluminum Aircraft Panels" *Composite Structures*, 71: 258–270, 2005.
- 8 A.B. Harman, C.H. Wang, "Improved Design Methods For Scarf Repairs to Highly Strained Composite Aircraft Structure" *Composite Structures*, 75: 132–144, 2006.
- 9 M. N. Charalambides, A. J. Kinloch, F. L. Matthews, "Adhesively-Bonded Repairs to Fibre-Composite Materials II: Finite element modeling" *Composites Part A*, 29A: 1383–1396, 1998.
- 10 D. Tzetzis, P.J. Hogg, "Bondline Toughening of Vacuum Infused Composite Repairs" *Composites: Part A*, 37: 1239–1251, 2006.
- 11 M. Belhouari, B.B. Bouiadjra, A. Megueni, K. Kaddouri, "Comparison of Double and Single Bonded Repairs to Symmetric Composite Structures: A Numerical Analysis" *Composite Structures*, 65: 47–53, 2004.
- 12 C. Soutis, D-M. Duan, P. Goutas, "Compressive Behaviour of CFRP Laminates Repaired with Adhesively Bonded External Patches" *Composite Structures*, 45: 289–301 1999.
- 13 F.Z. Hu, C. Soutis, "Strength Prediction of Patch-Repaired CFRP laminates loaded in compression" *Composites Science and Technology*, 60: 1103–1114, 2000.
- 14 M.V. Hosur, U.K. Vaidya, D. Myers, S. Jeelani, "Studies on the Repair of Ballistic Impact Damaged S2-Glass/Vinylester Laminates" *Composite Structures*, 61: 281–290, 2003.
- 15 A. Goren, C. Atas, "Manufacturing of Polymer Matrix Composites using Vacuum Assisted Resin Infusion Molding" *Archives of Materials Science and Engineering*, 34: 117-120, 2008.

8. Teşekkür

Bu çalışma 107M406 nolu TÜBİTAK projesi kapsamında yapılmıştır. TÜBİTAK'a verdiği destekten dolayı teşekkürlerimizi sunarız.

