



Makale

Yapıştırıcı İle Birleştirilmiş Tek Bindirmeli Dokumalı Kompozit Yapıların Eğilme Hasarı

Şükrü KARAKAYA, Ömer SOYKASAP

Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Afyonkarahisar

ÖZET

Polimer matrisli kompozit malzemeler hafiflikleri ile birlikte üstün dayanım ve rijitliklerinden dolayı hava-uzay yapıları, otomotiv ve denizcilik endüstrilerinde kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Bu malzemelerden yapılan yapılar; tamir için, gerek birbirleriyle gerekse de diğer yapı elemanlarıyla bağlantıları için çeşitli avantajlarından dolayı yapıştırılarak birleştirilmektedir. Bu çalışmada epoksi yapıştırıcıyla birleştirilmiş polimer matrisli dokumalı kompozitlerin eğilme halindeki davranışı deneysel olarak araştırılmış ve sonlu eleman modellemesi yapılmıştır. Çalışmada kullanılan yapıştırıcı BMS 5-101 tipi film yapıştırıcıdır ve kullanılan dokumalı cam kompozit $(0/45/90/-45)_2$ şeklinde dizilmiştir.

Sonlu eleman modeli ile yapışmış elemanlardaki gerilmeler, oluşacak hasar durumları irdelenmiş ve sonuçlar deneysel çalışma ile karşılaştırılmıştır. Tek bindirmeli olarak yapıştırılmış dokumalı kompozit yapının yapıştırma bölgesindeki kayma gerilmesinin hasara olana etkisi incelenmiştir. Üç nokta eğme deneyi esnasında numunede oluşan eğrilik yarıçapı belirlenmiş, oluşan hasarın kritik eğrilik yarıçapı ile olan ilişkisi araştırılmıştır. Ayrıca yapıştırma bölgesi yakınında oluşan kayma gerilmeleri tabaka yerleşim durumunu bağlı olarak karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Üç nokta eğme deneyi, Dokumalı kompozit, Yapıştırma bağlantısı

1.GİRİŞ

Polimer matrisli kompozitler günümüzde malzeme dayanım ve/veya rijitlik değerlerinin yüksek olduğu uçak, roket, füze gövdeleri, yüksek kalitede spor malzemeleri alanlarda kullanıldığı gibi lastik, otomotiv sanayi, beyaz eşya, basınca dayanımlı boru gibi daha düşük maliyet gerektiren sektörlerde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Polimer matrisli kompozitlerin yapıştırılması, bunların mekanik özelliklerinin deneysel yollarla belirlenmesi ve modellenmesi oldukça önem kazanmaktadır [1-3]. Örneğin Cheuk and Tong çatlak içeren ve yapışmış tabakalı kompozitlerde çekme yükleri altında kopma modları için deneysel ve analitik çalışmalar yapmıştır [4, 5]. Yarrington ve diğerleri [6] yapışmış kompozitlerde hata modlarının belirlenmesi için değişik hata teorileri kullanmış ve bu teoriler deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Yapışmış parçalarda bu hata modları şu şekilde gruplandırılabilir: (i) yapıştırıcının kopması, (ii) yapıştırıcı ve yapışan yüzeyler arasında kopma, (iii) yada yapışan parçaların kopması. Kullanılan kriterler maksimum asal gerilme kriteri, matriste çatlama, tabaka ayrılması, ilk tabaka kopması, maksimum düzlem içi gerilme kriterini içermektedir. Sonlu eleman modelleri

günümüzde yapışmış kompozitlerde gerilme dağılımının belirlenmesi için ve analitik hesaplamalarla karşılaştırmak için çeşitli çalışmalarda kullanılmıştır [7].

Yapıştırma tekniği yapışmış kompozitlerin dayanımını oldukça etkilemektedir. Kompozit parçalar ilave yapıştırıcı ile ya da ilave yapıştırıcı olmadan ortak kür edilerek birleştirilebilmektedir. Kim ve diğerleri [8] ilave yapıştırıcı olmadan ortak kür edilmiş parçaların daha yüksek dayanıma sahip olduğunu belirtmiştir. İlave yapıştırıcı kullanarak ortak kür edilmiş parçalarda ise yük etkisi altında tabaka ayrılmasının gerçekleştiği belirtilmiştir. Ortak kür edilmemiş ve daha sonra yapıştırıcı yardımı ile birleştirilmiş parçalarda ise yapıştırıcı katman boyunca çatlak oluşumu ve bu çatlağın ilerlemesi sonucu hasar oluşmaktadır. Yapışmış kompozitlerin dayanımına yüzey pürüzlülüğün, yapıştırıcı kalınlığının ve yuvarlatmaların da etkisi olduğu gözlemlenmiştir.

Durmuş [9] ise tek ve çift bindirme bağlantılarının çekme, yorulma performansını incelemiştir. Tek bindirme ve çift bindirme yapıştırılarda yapılan bütün çekme deney sonuçlarında karbon-karbon yapıştırmada her iki yüzeyde de tabaka ayrılması meydana geldiği, cam-cam yapıştırmada sadece bir yüzeyde tabaka ayrılması meydana geldiği, diğer yüzeyde yapıştırıcının kaldığı görülmüştür. Yorulmada, gerek tek gerekse de çift bindirme bağlantılarının dayanımları yapışmamış malzemeye göre daha düşük çıkmıştır. Bu da bu tür bağlantılarda yapıştırıcının rolünün oldukça büyük olduğunu göstermiştir.

Avila ve diğerleri [10] kompozit malzemelerinin yapıştırma şekillerinin önemli olduğunu vurgulamıştır ve dalgalı yapıştırma şekli ile ilgili deneysel çalışmalar yapmışlardır. Bu yapıştırma tekniğinin avantaj ve dezavantajlarını karşılaştırmışlardır.

Erpolat ve diğerleri [11] çift bindirmeli yapıştırılmış kompozitlerin farklı yükler altında yorulma ömürlerini incelemiş ve çatlak başlangıç ile ilgili önemli incelemelerde bulunmuştur. Önerdiği yöntem ile birlikte yorulma ömürleri hakkında önemli artışlar olduğunu belirtmiştir.

Balkova ve diğerleri [12] çeşitli ortam şartlarında en iyi yapıştırıcıyı tespit etmek için çeşitli çalışmalar yapmışlardır. Bu ortam şartlarının kayma gerilmesine olan etkisini tespit etmişlerdir.

2. TEK BİNDİRME İLE YAPILMIŞ NUMUNENİN ÜÇ NOKTA EĞİLME DENEYLERİ

Dokumalı tek bindirmeli cam kompozitin eğilme özelliklerinin belirlenmesi için üç nokta eğilme deneyi uygulanmıştır. Ele alınan basit dokumalı kompozit cam elyaflarının epoksi reçine ile elle yayma tekniği kullanılarak 8 katmandan oluşmakta ve ısı lambası altında kür edilmektedir. Bu tabakalar (0/45/90/-45)₂ şeklinde dizilmiştir (bkz. Şekil 1). Uygun boyutlarda kesilen parçalar BMS 5-101 tipi film yapıştırıcı ile yapıştırılmıştır. Şematik deney numunesi Şekil 2’de görülmektedir. Dokumalı cam kompozit numune için beş deney yapılmıştır. Instron 8800 marka test cihazında yapılan deneylerde çene hızı 5 mm/dk olarak alınmıştır. Üç nokta eğilme deneyi ile elde edilen veriler Tablo 1’de verilmektedir. Yapıştırma bağlantısında eğilme mukavemetinin belirlenmesi için yapışmamış bir numune için kullanılan şu formül göz önüne alınabilir:

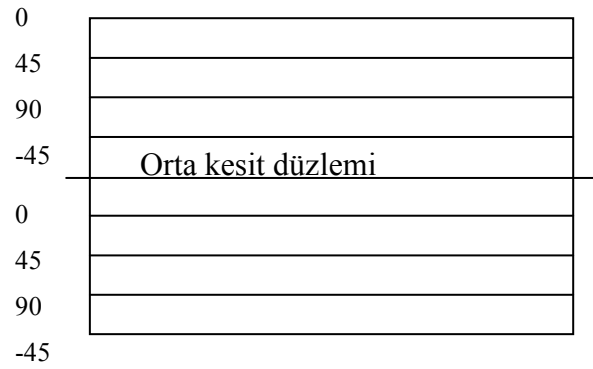
$$\sigma_E = \frac{1}{2} \frac{P_s}{wt^2} \quad (1)$$

burada P uygulanan maksimum yük, s destekler arası mesafe, w yapışan parça genişliği ve t yapışan parça kalınlığıdır. Yapılan deneyler sırasında numuneler yapıştırma bölgesinde tabaka ayrılması ile ya da yapışma hattı boyunca koparak hasara uğramıştır. Destekler arası mesafenin azalması ile eğilme mukavemetinin arttığı söylenebilir. Deneyler video kamera ile kaydedilerek hasara başlama anı video görüntülerinden elde edilmiştir. Hasara başlangıç anında yapışan parçadaki yapışma bölgesine yakın bölge kritik bölgedir (bkz. Şekil 3). Bulunan yarıçap değerleri Tablo 1’de verilmektedir. Numune uzunluğu ve buna bağlı olarak seçilen destek mesafesi azaldıkça kopma anında hesaplanan yarıçap

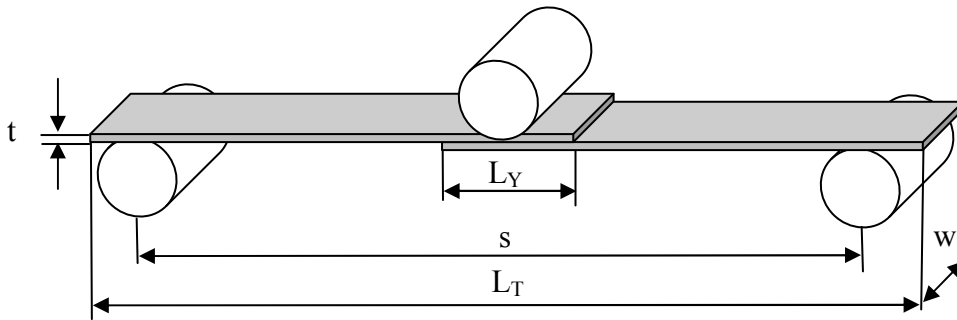
değerlerinin arttığı bulunmuştur. Yapışma sonucu kalınlık iki kat artmakta dolayısıyla yapı eğilmeye karşı daha rijit hale gelmektedir.

Tablo 1. Eğilme Deneyi Sonuçları

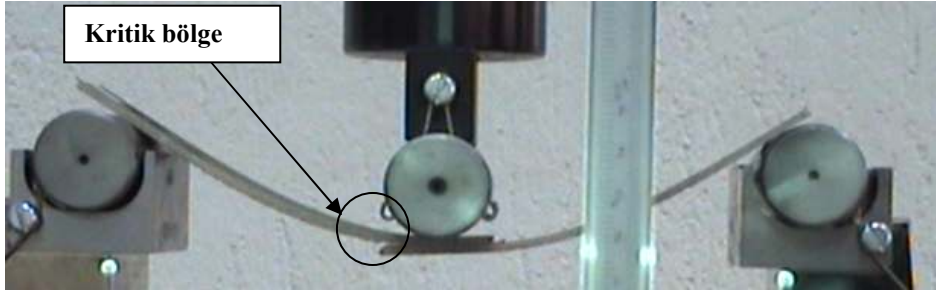
Deney no	t (mm)	L _Y (mm)	L _T (mm)	s (mm)	P (N)	R _{min} (mm)	σ_E (MPa)	Kopma modu
1	2.22	25.4	214.6	190	104	63.7	219.5	Yapışma hattı
2	2.19	25.4	194.6	175	117	67.5	233.7	Yapışma hattı
3	2.12	25.4	194.6	175	110	-	234.5	Yapışma hattı
4	2.14	25.4	194.6	175	108	-	225.9	Yapışma hattı
5	2.12	25.4	174.6	160	159	72.4	309.9	Tabaka ayrılması



Şekil 1. Tabaka Açılarının Yerleşim Durumu

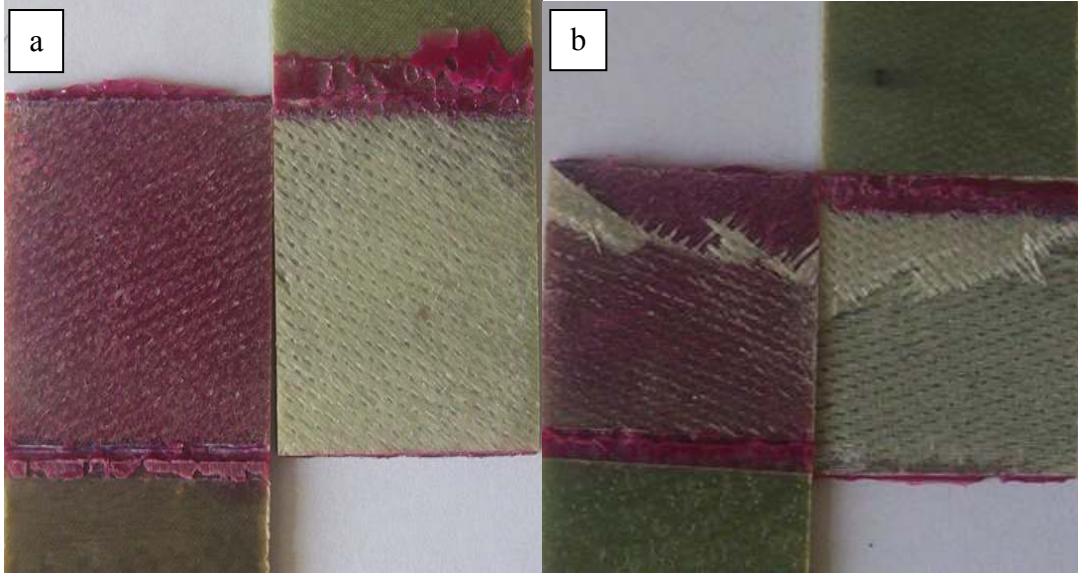


Şekil 2. Üç Nokta Eğilme Deney Numunesi (mm)



Şekil 3. Üç Nokta Eğme Deneyinde Hasarın Oluşmaya Başladığı Durum

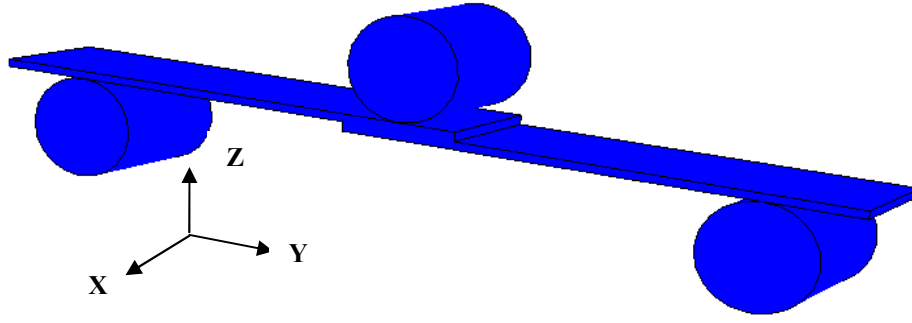
Eğilme deneyi sonrası meydana gelen hasar durumları Şekil 4'te görölmektedir: a)'da yapışma hattından kopma meydana gelmiştir. Kompozit tabaka ile yapıştırma bölgesi birbirinden ayrılmıştır; b'de ise hasar yapıştırma bölgesinde tabaka ayrılması ile gerçekleşmiştir. Bu ayrılma, hasarın gerçekleştiği kritik bölgenin incelenmesi sonucu analiz edilebilir. Yapılan deney için iki farklı hasar modunun gerçekleştiği söylenebilir.



Şekil 4. Hasara Uğramış Deney Numuneleri, a) Yapışma Hattında Kopma b) Tabaka Ayrılması

3. ÜÇ NOKTA EĞİLME TESTİNİN SONLU ELEMANLARLA MODELLENMESİ

Tek bindirmeli kompozit parçanın üç nokta eğilme durumu sonlu elemanlarla modellenerek tek bindirmeli kompozit numunelerin eğilme performansı, gerilme dağılımı ve hasar durumları incelenmiştir. Şekil 5'te üç nokta eğilme deneyi için tek bindirmeli kompozit model görölmektedir. Model için Abaqus 6.7 sonlu elemanlar programı kullanılmıştır.

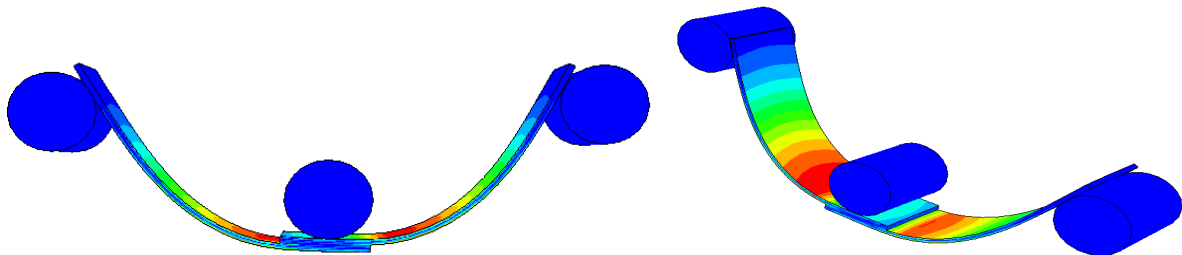


Şekil 5. Üç Nokta Eğme Testi İçin Üç Boyutlu Model

Modellemede yapışmış parçanın önden görünüşü çizilmiş ve genişlik boyunca bu kesit ekstrüzyon yöntemi ile genişletilerek üç boyutlu yapı elde edilmiştir. Daha sonra her biri 2.24 mm kalınlığında 8 tabakadan oluşan kompozit kısımlar ve 0.4 mm kalınlığındaki yapıştırıcı ana parçanın kısımlara ayrılması ile oluşturulmuştur. Yapıştırılmış kompozit plak 1540 eleman ve 2180 adet düğüm noktasından oluşmaktadır. Oluşturulan modelin yapıştırma bölgesinde daha fazla deformasyon beklendiği için daha yoğun elemanlar kullanılmıştır. Yapılan modelde destekler ile kompozit plak arasında belli bir sürtünme katsayısı 0.01 alınarak kontak tanımlanmıştır. Destekler 25 mm çapında çelik silindir şeklindedir. Desteklerden ikisi (kompozit plağın altında olanlar) x, y ve z yönünde ankastre olarak tanımlanmış, eğilme de kullanılan desteğe ise -z yönünde deplasman verilmiştir. Destek, yapıştırıcı ve tabaka özellikleri Tablo 2’de verilmektedir. Kompozit malzeme basit dokumalı olduğu için elastik modüller E_1 ve E_2 birbirine eşit alınmıştır. Üç nokta eğilme simülasyonu büyük deplasmanlar içerdiği için yapılan analiz lineer olmayan statik bir analizdir. Analiz sonucunda bindirmeli bağlantının eğilme davranışı ve hasar durumları tespit edilmiştir. Analiz sonucunda kompozit yapıdaki Mises gerilme konturları Şekil 6’te görülmektedir. Buna göre kompozit malzemede kritik olan bölge, yapışma bölgesine yakın olan kısımlardır ve bu bölgeler detaylı olarak incelenecektir.

Tablo 2. Malzeme Özellikleri

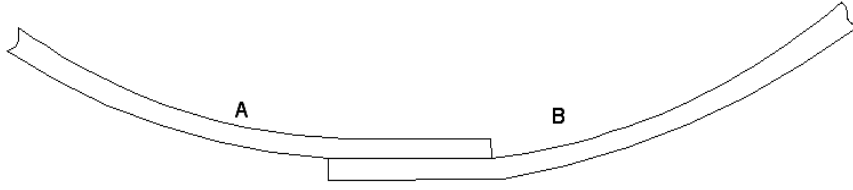
Kompozit tabaka	$E_1=E_2=22.8$ GPa, $\nu_{12}=0.01$, $G_{12}=3$ GPa
Yapıştırıcı	$E=4$ GPa, $\nu=0.35$ $G=34$ MPa
Destekler	$E=210$ GPa, $\nu=0.3$



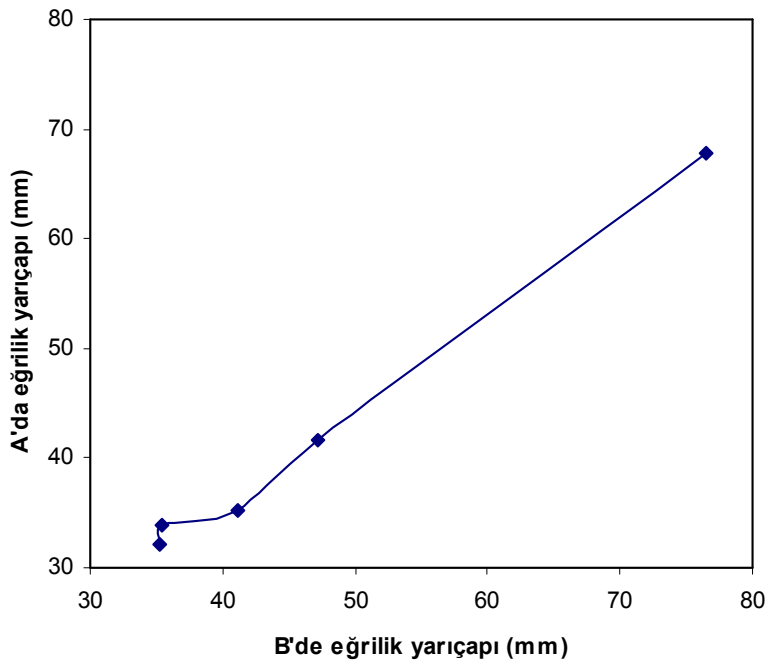
Şekil 6. Analiz Sonrası Kompozit Bağlantıda Gerilme Dağılımı

Bindirme bağlantısının deney sırasında iki farklı kopma durumu olabileceği deneysel çalışmalar kısmında belirtilmişti. Bunun için kompozit plağın üzerindeki kritik bölgeden koordinat noktaları belli analiz adımlarında alınmış, bu noktalar kullanılarak eğrilik yarıçapları hesaplanmış ve deney esnasındaki eğrilik yarıçapları ile karşılaştırılmıştır. Deney sırasında hasarın yapıştırma ucunda başladığı video kamera görüntüleri ile saptanmıştır. Bu görüntüler ile analiz sonrası durum karşılaştırılmıştır. Şekil 7’de eğilme

halinde kompozit bindirme bağlantısının durumu ve kritik bölgeler şematik olarak verilmektedir. Eğrilik yarıçapı ile ilgili durum şekil 8’de grlmektedir.



Şekil 7. Eğilme Halinde Bindirme Bağlantısı ve Kritik Bölgeler A (sol) ve B (sağ)



Şekil 8. A ve B Bölgesinin Eğrilik Yarıçapları

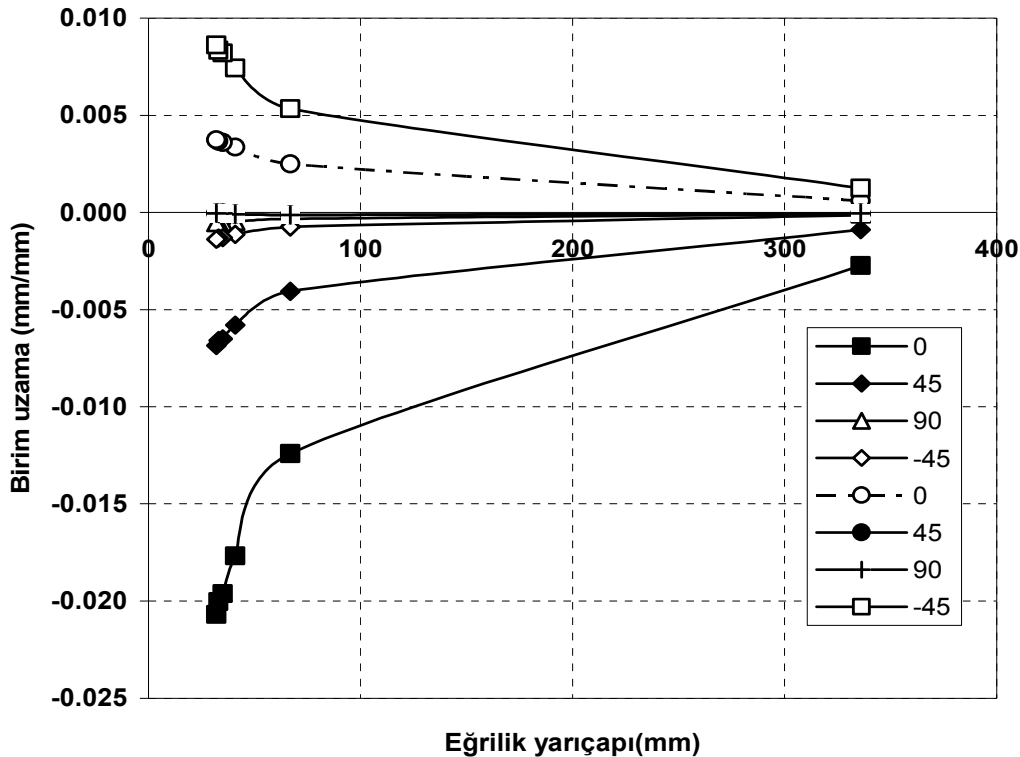
Şekil 8’de analizin çeşitli adımlarında A ve B bölgeleri için bulunan eğrilik yarıçapları verilmektedir. Yapıştırma bağlantısı simetrik olmayan bir bağlantıdır. Eğilme anında bindirme bağlantısının üst kısmında kalan parça ve alt kısmında kalan parçalarda eğilme durumu bu yüzden farklılık göstermektedir. Buna göre herhangi bir anda A bölgesindeki eğrilik yarıçapı B’ye göre daha küçüktür, bu da hasarın A’da gerçekteceğini ortaya koymaktadır ve deneysel çalışmalarla uyumludur. Yapılan deneylerde hasar başlama anındaki ortalama eğrilik yarıçapı 68.3 mm dir.

Üç nokta eğme durumunda kritik A bölgesinde her bir tabakadaki birim uzama değerleri eğrilik yarıçapına bağlı olarak Şekil 9’de verilmektedir. Yüzde uzama ile eğrilik yarıçapı arasındaki ilişki incelendiğinde, bütün tabakalarda eğrilik yarıçapının azalması ile birlikte yüzde uzama mutlak değerce başlangıçta doğrusal olarak ve daha sonra doğrusal olmayan bir şekilde artmaktadır. Üst tabakalarda basma alt tabakalarda ise çekme durumu söz konusudur. Üst kısımlardaki birim uzama alt kısımdaki birim uzamaya göre daha fazladır. İç kısımlardaki açılarda birim uzama miktarı oldukça küçüktür. Bu da iç tabakalardaki aç dizilimin çok önemli olmadığını göstermektedir. Yüzde uzamanın en yüksek olduğu

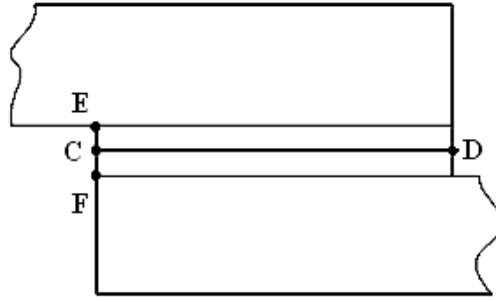
yer en üstteki 0° tabakasıdır. En üst tabakada 67 mm eğrilik yarıçapına karşılık gelen birim uzama değeri %1.2 olup malzemenin kopma anındaki birim uzama değerinden küçüktür. Bu da yapışan kompozit parçaların bu eğrilik yarıçapı için emniyette olduğunu göstermektedir.

Hasarın deneysel çalışma sonucu yapıştırma bölgesinden gerçekleştiği belirlendikten sonra sonlu elemanlar modeli ile ilgili çalışmamızda da yapıştırıcı ve yapıştırma bölgesi ile ilgili gerilme analizleri yapılmıştır. Çalışmalarda hem yapıştırma bölgesinin enine hem de boyuna doğrultularda gerilmenin değişimi ele alınmıştır. Şekil 10'de şematik olarak yapıştırma bölgesi görülmektedir; C ve D noktaları yapışma simetri düzleminde olan başlangıç ve bitiş noktalarını, E ve F ise kalınlık boyunca üst ve alt noktaları temsil etmektedir. Şekil 11'de C noktasından D noktasına kadar yapıştırıcıdaki kayma gerilmesi A bölgesindeki eğilme yarıçapına bağlı olarak verilmektedir. Eğilme yarıçapı arttıkça yapıştırıcıdaki kayma gerilmesi de artmaktadır. Herhangi bir eğrilik yarıçapında en fazla kayma gerilmesi C ve D noktalarındadır. Uçlardan ortaya doğru ilerledikçe kayma gerilmesi azalmaktadır. Bu kayma gerilmelerinin yaklaşık olarak simetrik olduğu grafikten görülmektedir. Deneysel olarak yapıştırıcıda gerçekleşen hasarın ortalama olarak $R=68.3$ mm kritik eğrilik yarıçapında olduğu belirlenmiştir. Kritik eğrilik yarıçapı için grafiğe bakılacak olursa kayma gerilmesi C'de 15 MPa'dır ve ilk 5 mm boyunca yüksek kayma gerilmeleri mevcuttur. Yapıştırıcının kayma mukavemetinin 34 MPa olduğu düşünülürse bu eğrilik yarıçapı için yapıştırma simetri düzlemi boyunca herhangi bir hasar beklenmemektedir.

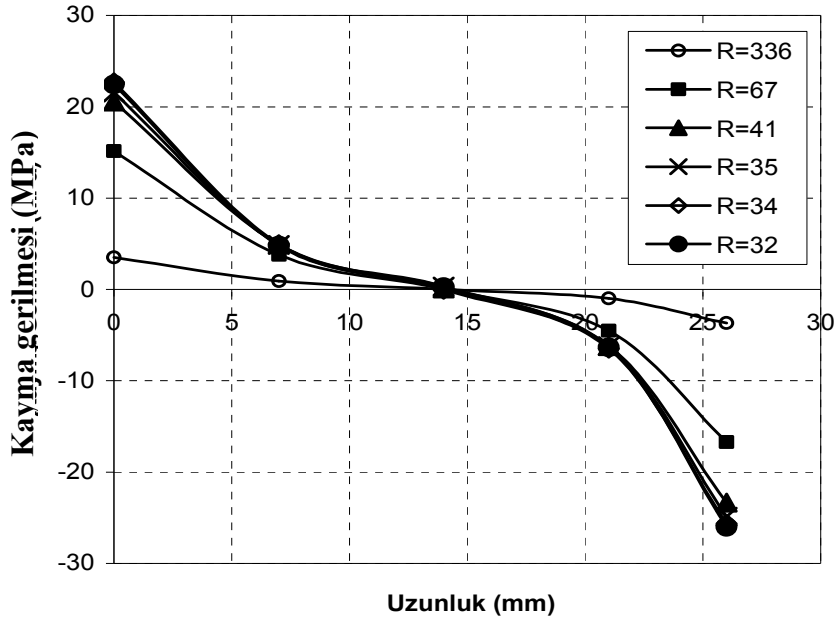
Şekil 12'de kalınlık boyunca (E-F) kayma gerilmesinin değişimi A bölgesindeki eğilme yarıçapına bağlı olarak verilmektedir. Eğrilik yarıçapı azaldıkça kayma gerilmesi artmaktadır. Belirli bir eğrilik yarıçapında en büyük kayma gerilmesi E'de oluşmaktadır. Eğrilik yarıçapı 68.3 mm için kayma gerilmesi 30 MPa civarlarında olup, yapıştırıcının kayma mukavemet değeri olan 34 MPa'a yakın bir değerdir. Bu da hasarın E noktasından başlayacağını göstermektedir.



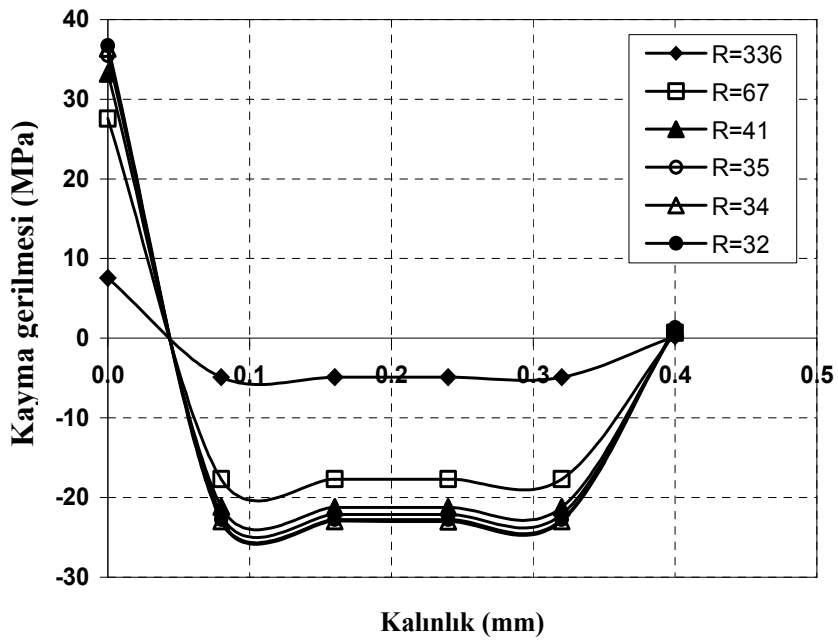
Şekil 9. Kritik Bölgedeki Eğrilik Yarıçapının Birim Uzamaya Etkisi



Şekil 10. Yapıştırma Bölgesinin Şematik Görüntüsü



Şekil 11. Yapıştırıcı Boyunca (C-D) Kayma Gerilmesi Durumu



Şekil 12. Yapıştırıcı Kalınlığı Boyunca (E-F) Kayma Gerilmesi Durumu

4.SONUÇLAR

Yapılan çalışmada tek bindirmeli olarak yapıştırılmış dokumalı cam kompozit malzemenin üç nokta eğme deneyi yapılmış ve sonlu elemanlar metodu kullanılarak deney numunesinde meydana gelen hasar durumları tespit edilmiştir. Üç nokta eğme deneyinde yapıştırıcı kullanılarak elde edilen tek bindirmeli yapışmış kompozit malzemelerde hasar yapıştırma bölgesinden gerçekleşmektedir. Hasar tipi yapışma hattından kopma, kompozit malzemede tabakalar arası ayrılma veya yapıştırma bölgesine yakın olan bölgelerde hasar oluşma durumu söz konusudur. Bu bölgelerde azalan eğrilik yarıçapı ile birlikte kritik olan bölgelerde tabaka dizilimine bağlı olarak yüzde uzamalar artmaktadır. Deneysel ve sonlu elemanlar modeli ile hasar anında elde edilen eğrilik yarıçapları karşılaştırıldığında her iki eğrilik yarıçapının yaklaşık olarak aynı olduğu tespit edilmiştir.

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma 06.TEF.04 nolu A.K.Ü. BAP proje ile desteklemiş olup, yazarlar Afyon Kocatepe Üniversite'ne teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

1. Krueger, R., Paris, I. L., O'Brien T. K., and Minguet, P. J., 2001, Fatigue Life Methodology for Bonded Composite Skin/Stringer Configurations, NASA/TM-2001-210842, ARL-TR-2432.
2. Krueger, R., Paris, I. L., O'Brien T. K., and Minguet, P. J., 2000, Testing and Analysis of Composite Skin/Stringer Debonding under Multi-axial Loading, Journal of Composite Materials, Vol. 34, pp. 1263-1300.
3. Krueger, R., Paris, I. L. and O'Brien, T. K., 2000, Fatigue Life Methodology for Bonded Composite Skin/Stringer Configurations, Proc. The American Society for Composites, 15th Technical Conference, pp. 729-736.
4. Cheuk, P.T. and Tong L., 2002, Failure of Adhesive Bonded Composite Lap Shear Joints with Embedded Precrack, Composites Science and Technology, Vol. 62, pp.1079-1095.
5. Tong, L.,1998, Failure of Adhesive-Bonded Composite Single Lap Joints with Embedded Cracks, AIAA Journal, Vol. 36, No. 3, pp. 448-456.
6. Yarrington, P., Zhang, J., Collier, C., Bednarczyk, B.A., 2005, Failure Analysis of Adhesively Bonded Composite Joints, 46th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics & Materials Conference, Austin, Texas, AIAA 2005-2376.
7. Kedward K.T., Zhu, Y., Keifer S.H., 2005, Evaluation of Composite Bonded Joint Designs for Space Applications, 46th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics & Materials Conference, Austin, Texas, AIAA 2005-2098.
8. Kim, K.S., Yoo, J.S., Yi Y.M, Kim, C.G., 2006, Failure Mode and Strength of Uni-directional Composite Single Lap Bonded Joints with Different Bonding Methods, Composite Structures, Vol. 72 (4), pp.477-485.
9. Durmuş, F., 2006, Uçak Gövdesinde Meydana Gelen Hasarlar ve Tamir Edilen Bir Kompozit Yapının Mekanik Deneyleri, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar.

10. Avila, A., Bueno, O., 2004, An Experimental and Numerical Study on Adhesive Joints for Composites, *Composite Structures* 64, pp 531–537.
11. Erpolat, S., Ashcroft, A., Crocombe, B., Abdel-Wahab, M., 2004, A Study of Adhesively Bonded Joints Subjected to Constant and Variable Amplitude Fatigue, *International Journal of Fatigue* 26, pp1189–1196.
12. Balkova, R., Holcnerova, S., Cech, V., 2002, Testing of Adhesives for Bonding of Polymer Composites, *International Journal of Adhesion & Adhesives* 22, pp 291–295.