

Tek Tesirli Yapıştırma Bağlantılarında İlerlemeli Hasar Analizi

Progressive Failure Analysis on the Single Lap Bonded Joints

Kadir TURAN^a ve Mete Onur KAMAN^{b*}

^aDicle Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 21280, Diyarbakır

^bFırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 23119, Elazığ

Geliş Tarihi/Received : 14.12.2009, Kabul Tarihi/Accepted : 19.04.2010

ÖZET

Bu çalışmada, iki kompozit levhayı birleştirmek için yapıştırıcı kullanılarak elde edilmiş olan tek tesirli yapıştırma bağlantısının hasar analizi deneysel ve sayısal metotlar kullanılarak araştırılmıştır. Bağlantı yapılırken yapıştırıcı olarak epoksi reçine ve yapışan olarak ta karbon fiber takviyeli epoksi reçine matrisli dört tabakadan oluşan kompozit levhalar kullanılmıştır. Sayısal çalışma sonlu elemanlar metodunu kullanarak çözüm yapan ANSYS programında yapılmıştır. Sayısal hasar yüklerini elde etmek için ilerlemeli hasar analizi metodu malzeme indirgeme kuralları ile birlikte kullanılmıştır. Hasar analizinde kompozit levhalar için Hashin Hasar Teorisi kullanılırken yapıştırıcı için Maksimum Asal Gerilme Hasar Teorisi kullanılmıştır. Bağlantı mukavemeti üzerine yapıştırıcı kalınlığı, bindirme uzunluğu ve plaka genişliğinin etkisi sayısal olarak araştırılmıştır. Sonuç olarak yapışma yüzey alanının değişiminin hasar yükleri üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Elde edilen sonuçlar tablolar ve grafikler halinde sunulmuştur.

AnahtarKelimeler: *Yapıştırıcı, Tek tesirli bağlantı, Sonlu elemanlar metodu, İlerlemeli hasar analizi.*

ABSTRACT

In this study, the failure analysis on the single lap bonded joint, which is used for joined two composite plates each other with adhesive, is investigated experimentally and numerically. In the joint, the epoxy resin is used for adhesive and the four layered carbon fiber reinforced epoxy matrix resin composite plates are used for adherent. Numerical study is performed in the ANSYS software which is used finite element method for solution. For obtained numerical failure loads, the progressive failure analysis is used with material property degradation rules. In the failure analysis the Hashin Failure Criterion is used for composite plates and the Maximum Principal Stress failure criterion is used for adhesive. The effects of the adhesive thickness overlap lengths and plate weight on the joint strength is investigated with numerically. As a result it is seen that the failure loads is affected the bond face area. The results are presented with graphs and tables.

Keywords: *Adhesive, Single lap joint, Finite element method, Progressive failure analysis.*

1. GİRİŞ

Geleneksel birleştirme yöntemlerine göre uygulamadaki kolaylığı, düşük maliyeti ve hafifliğinden dolayı kompozit malzemelerin birleştirilmesinde yapıştırma bağlantılarının kullanımı yaygınlaşmıştır. Hafifliğin, rijitliğin ve güvenilirliğin önemli olduğu hava taşıtlarında yapıştırma bağlantısı önemli oranda kullanılmaktadır (Yarrington v.d., 2005, Liu ve Wang, 2007). Ayrıca gerilme yığılmalarını giderdiği, korozyona karşı dayanıklı ve yorulma ömrü uzun olduğu için kompozit malzemelerde meydana

gelen hasarların tamirinde de tercih edilmektedirler (Papanikos v.d., 2007). Yapıştırma bağlantılarının güvenli ve verimli bir şekilde tasarımı; doğru malzeme modelleri ve hasar kriterlerinin kullanımına bağlıdır. Bulk numunelerinden elde edilen mekanik özelliklerin bir yapıştırma bağlantısında kullanıldığında ne yönde etki oluşturduğu yani yapıştırma bağlantısından elde edilen özelliklerle, bulk yapıştırıcı numunelerinden elde edilen özelliklerin örtüşüp örtüşmediğinin tespit edilmesi gereklidir (Aydın v.d., 2007).

* Yazışılan yazar/Corresponding author. E-posta adresi/E-mail address : mkaman@firat.edu.tr (M. O. Kaman)

İlerlemeli hasar analizi metodu kompozit malzemelerin mekanik davranışlarının sayısal olarak araştırıldığı çalışmalarda sıklıkla kullanılan bir çözüm metodudur (Liu ve Tsai, 1998; Camanho ve Matthew, 2000; Shokrieh ve Lessard, 2001). Yapıştırma bağlantılarında sayısal hasar analizinin doğru ve etkin bir şekilde yapılabilmesi önemli oranda hasar kriterine bağlıdır (Taib v.d., 2005; Yarrington v.d., 2005; Aydın v.d., 2007).

Apalak v.d., (2006) tek tesirli bir yapıştırma bağlantısında hasar analizini sayısal ve deneysel yöntemler kullanarak yapmışlardır. Tek yönde takviye edilmiş tabakalı kompozit levha kullanarak yapmış oldukları çalışmalarında yapıştırıcı ve kompozit levhada meydana gelen hasarı ayrı ayrı ele almışlardır. Sayısal çalışmalarını ilerlemeli hasar analizi metodunu kullanarak ANSYS sonlu elemanlar programında yapmışlardır. Sayısal hasar yüklerinin tespitinde, kompozit levhada meydana gelen hasarı Hashin ve yapıştırıcıda meydana gelen hasarı ise Von Mises hasar teorilerine göre elde etmişlerdir. Aydın v.d., (2007) tek tesirli bir yapıştırma bağlantısında bağlantı mukavemeti üzerine kürleşme basıncının etkisini deneysel ve sayısal yöntemler kullanarak araştırmışlardır. Sayısal hasar yüklerinin tespitinde Drucker Prager akma kriterlerini kullanmışlardır. Çalışma sonucu elde edilen deneysel ve sayısal hasar yüklerinin 0.1 MPa kürleşme basıncı için birbirine oldukça yakın olduğu görülmüştür. Yarrington v.d., (2005) farklı yapıştırma bağlantısı türleri için hasar analizini deneysel ve sayısal yöntemler kullanarak yapmışlardır. Her bir bağlantı türü için farklı hasar kriterlerinin kullanıldığı çalışmalarda, sayısal ve deneysel hasar yüklerinin birbirine yaklaşım oranı 0.77 ile 0.95 oranında elde edilmiştir.

Liu ve Wang, (2007) kompozit bir levhanın yapılandırıldığı üzerinde dairesel delik bulunan bir kompozit levhada hasar analizi yapmışlardır. ANSYS sonlu elemanlar programını kullanarak yapmış oldukları sayısal çalışmada ilerlemeli hasar analizi metodunu kullanmışlardır. Sayısal hasar yüklerinin tespitinde kompozit levha için Tsai Wu ve Ye delaminasyon teorilerini kullanırken yapıştırıcının hasar kontrolünde ise Maksimum Kayma Gerilmesi Hasar Teorisini kullanmışlardır. Taib v.d., (2005) epoksi reçine kullanılarak yapıştırma bağlantısı ile birbirine bağlanmış olan cam fiber/epoksi kompozit levhalarda hasar yüklerini deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışmalarında farklı bağlantı şekilleri, yapıştırıcı kalınlığı ve levha mukavemetinin değişimi için hasar yüklerinin ve tipinin değişimini incelemişlerdir.

Bu çalışmada ise tek tesirli yapıştırma bağlantısı ile birbirine bağlanmış karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit levhalarda yapışma ve levha hasarı incelenmiştir. Sayısal çözüm için ANSYS sonlu elemanlar programı ile ilerlemeli hasar analizinde; kompozit levha için Hashin Hasar Kriteri, yapıştırıcı için ise Maksimum Asal Gerilme Kriteri kullanılmıştır. Sayısal çalışmanın doğruluğu deneysel olarak kontrol edilerek bağlantı geometrisi parametrelerinin bağlantı mukavemeti üzerine etkileri araştırılmıştır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA

Deneysel çalışma iki aşamadan oluşmaktadır. İlk olarak epoksi reçinenin mekanik özellikleri tespit edilmiştir. Epoksi reçine saf olarak kullanıldığı zaman katılaşması için uzun bir süreye ihtiyaç olduğu için içerisine belirli oranlarda sertleştirici ve hızlandırıcı katılmıştır. Kullanılan malzemelere ait özellikler ve karışım oranları Tablo 1'de yer almaktadır.

Tablo 1. Yapıştırıcı elde etmek için kullanılan epoksi reçine, sertleştirici ve hızlandırıcının özellikleri.

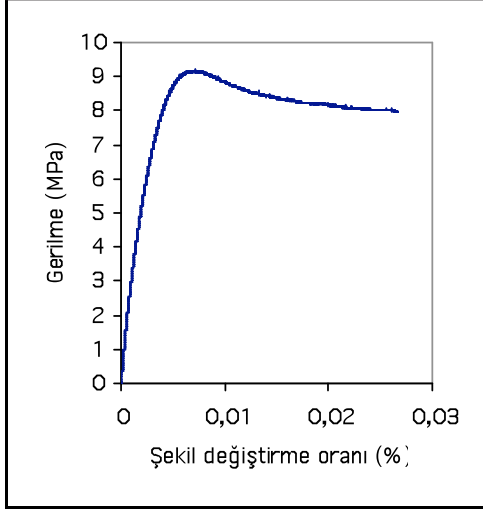
Bileşenler	Marka ve özelliği	Karışım oranı (hacimsel)
Epoksi reçine	Admiral-Epoksi	1/1
Sertleştirici	Akiş-Kobalt oktoat	1/40
Hızlandırıcı	Akiş-MEK Peroksit	1/400

Yapıştırıcı olarak kullanılan epoksi reçinenin mekanik özelliklerini tespit etmek için hazırlanan bulk numunelerine çekme testi uygulanmıştır. Kompozit malzeme olarak ise dört tabakadan oluşan $[0^{\circ}]_4$ tek yönlü karbon fiber takviyeli epoksi matrisli reçineden üretilmiş olan levhalar kullanılmıştır (Turan v.d., 2009). Şekil 1'de yapıştırıcının, Şekil 2'de tabakalı kompozit levhanın gerilme-şekil değiştirme grafikleri, Tablo 2'de ise yapıştırıcı ve kompozit levhaya ait mekanik özellikler verilmiştir.

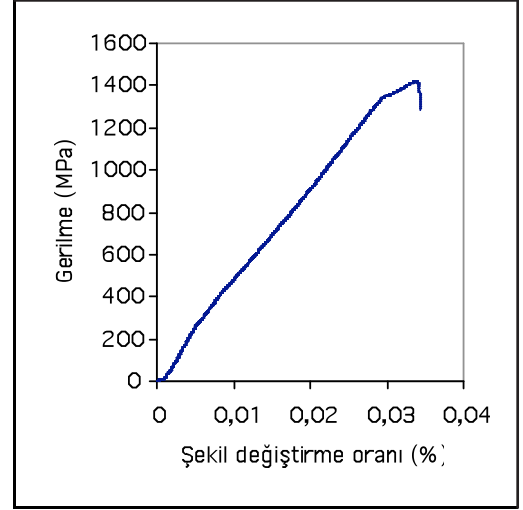
Deneysel çalışmanın ikinci bölümünde ise iki kompozit levha Şekil 3'te görüldüğü gibi yapıştırıcı kullanılarak tek tesirli yapıştırma bağlantısı oluşturacak şekilde

birleştirilmiştir. Deneysel çalışmada; L, kompozit levhanın boyu 150 mm ve t, kompozit levhanın kalınlığı 1.235 mm ve r, çene bağlantısı 35 mm olarak seçilmiş olup deneysel ve sayısal çalışmada kullanılan diğer geometrik parametreler Tablo 3'de verilmiştir.

Eksenel çekme yükü etkisi altında tek tesirli yapışma bağlantısı için deney sonucu elde edilen yük-yer değiştirme grafiği ve hasarlı numune resmi Şekil 4'te görülmektedir. Yük etkisi altında deneysel hasar yükü 172.54 ± 10.64 N olarak elde edilmiştir. Son hasar olarak numunelerde yapıştırıcı hasarı elde edilmiş olup kompozit levhada herhangi bir hasar oluşmamıştır.



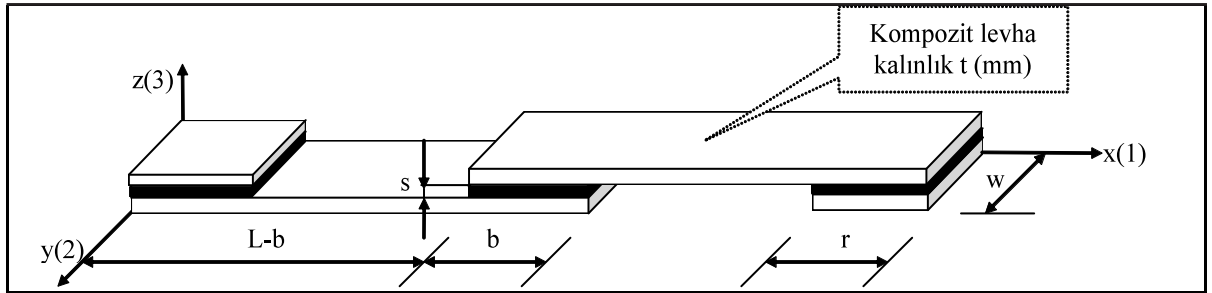
Şekil 1. Epoksi reçineye ait gerilme-şekil değiştirme grafiği.



Şekil 2. Kompozit levhaya ait gerilme-şekil değiştirme grafiği.

Tablo 2. Yapıştırma bağlantısında kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri.

Epoksi reçineye ait özellikler		Kompozit levhaya ait özellikler	
Elastisite modülü	$E = 2807 \text{ (MPa)}$	Fiber takviye doğrultusunda Elastisite modülü	$E_1 = 172891 \text{ (MPa)}$
		Fiber takviye doğrultusuna dik doğrultuda Elastisite modülü	$E_2 = 10796.66 \text{ (MPa)}$
		Kayma modülü	$G_{12} = 3638 \text{ (MPa)}$
Poisson oranı	$\nu = 0.17$	Poisson oranı	$\nu_{12} = 0.32$
Çekme mukavemeti	$X_{çyp} = 9.155 \text{ (MPa)}$	Fiber takviye doğrultusunda çekme mukavemeti	$X_ç = 1440.105 \text{ (MPa)}$
		Fiber takviye doğrultusuna dik doğrultuda çekme mukavemeti	$Y_ç = 36.586 \text{ (MPa)}$
		Fiber takviye doğrultusunda basma mukavemeti	$X_b = 419.946 \text{ (MPa)}$
		Fiber takviye doğrultusuna dik doğrultuda basma mukavemeti	$Y_b = 115.405 \text{ (MPa)}$
		Kayma mukavemeti	$S = 56.34 \text{ (MPa)}$

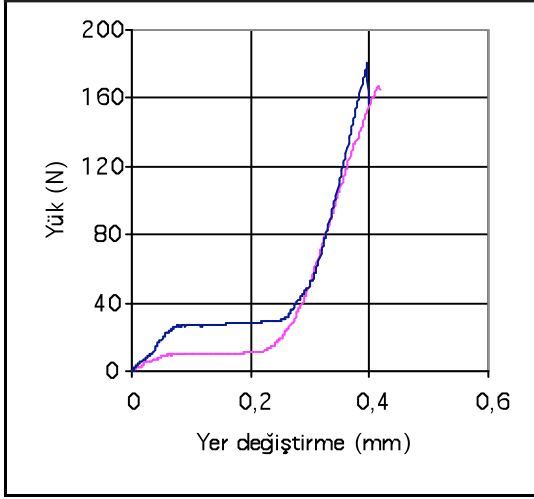


Şekil 3. Tek tesirli yapışma bağlantısı ve geometrik özellikleri.

Tablo 3. Deneysel ve sayısal çalışmada kullanılan geometrik parametreler.

Yapıştırıcı bindirme uzunluğu $b \text{ (mm)}$	Yapıştırıcı kalınlığı $s \text{ (mm)}$	Kompozit levhanın genişliği $w \text{ (mm)}$
10	0.1*	12
15	0.2	18*
20	0.3	24
25*	0.4	30

*:Deneysel çalışmada kullanılan geometrik parametreler.



a)



b)

Şekil 4. Tek tesirli yapışma bağlantısı için çekme testi sonucunda elde edilen a) yük-yer değiştirme grafiği ve b) test sonu hasarlı numune.

3. SAYISAL HASAR ANALİZİ

Sayısal çalışma sonlu elemanlar metodunu kullanarak çözüm yapan ANSYS 11.0 programında yapılmıştır. Sayısal çözüm iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci bölümde problemin sonlu elemanlar modeli, sınır şartları ve gerilme analizi yapılırken, ikinci bölümde ise ilerlemeli hasar analizi yapılmıştır.

3. 1. Sonlu Eleman Modeli

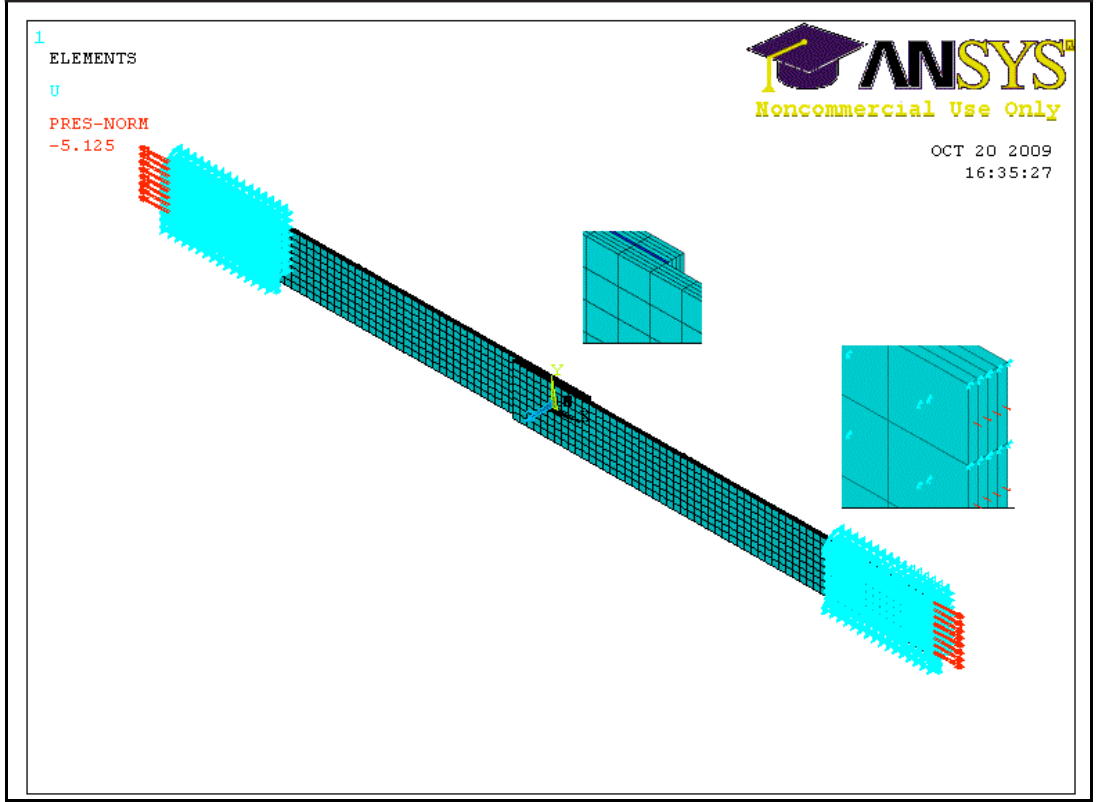
Sayısal çalışmanın gerçekleştirildiği ANSYS programında Tablo 3'de verilen geometrik parametrelerin programa girilmesi ile tek tesirli yapıştırma bağlantısının gerçeğe en uygun üç boyutlu katı bir tam model oluşturulmuştur. Katı modelin sonlu elemanlara bölünmesi işlemi için ANSYS programında probleme ve malzemelere uygun olarak tanımlanmış eleman tipleri kullanılmıştır. Tabakalı kompozit levha için Solid 46 ve yapıştırıcı için Solid 45 sekiz düğümlü üç boyutlu elemanlar kullanılmıştır (ANSYS, 2007). Şekil 5'te sonlu elemanlara bölünmüş katı modelin ve sınır şartlarının görüntüsü yer almaktadır. Malzeme özelliklerinin programa girilmesinde yapıştırıcı için hazırlanmış olan bulk numunesinden elde edilen Elastisite modülü ve Poisson oranı kullanılmıştır. Yapıştırıcının gerilme-şekil değiştirme davranışı Şekil 1'de verilmiştir.

Sayısal çözümde deneysel çalışmaya en uygun yaklaşımı elde etmek amacı ile kompozit levhanın her iki ucuna düzgün yayılı eksenel çekme yükü uygulanmış ve deneysel çalışmada dönmeleri önlemek amacı ile kullanılan kompozit parçaların uzunluğu kadar bölgedeki düğümlerin y ve z yönündeki yer değiştirmeler (u_y ve u_z) sıfır olarak alınmıştır. Simetri sınır şartı uygulanarak kompozit levhaların genişlik boyunca yarısı modellenmiştir. Dolayısıyla da kompozit levhanın her iki ucuna P/2

kadar yük uygulanmış ve her bir döngüde yüklemeler 1.025 kadar arttırılmıştır. Sayısal çalışmada sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan çözümde kullanılan eleman sayısının uygunluğunu 25 mm bindirme mesafesi, 0.1 mm yapıştırıcı kalınlığı ve 18 mm plaka genişliği için araştırılarak en uygun eleman sayısı Şekil 6'da verilmiş olan grafikten tespit edilmiştir. Sayısal çözümde 5590 eleman ve 7828 düğüm kullanılmıştır. Diğer geometrik özelliğe sahip numuneler aynı orandaki eleman sıklığına karşı gelen parametreler kullanılarak modellenmiştir.

3. 2. İlerlemeli Hasar Analizi

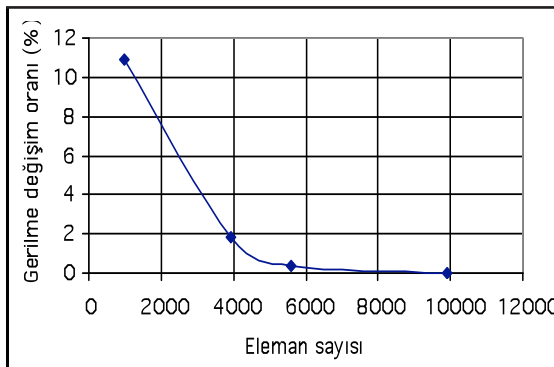
Problemin çözümünde kullanılan ilerlemeli hasar analizi metodu gerilme analizine bağlı olarak çalışan, uygulanan yüklemeler sonucunda hasara uğrayan elemanlarda malzeme özelliklerini değiştirerek ilerleyen ve uygun görülen hasarın oluşması durumunda programı sonlandırılan bir döngüdür. Şekil 7'de ilerlemeli hasar analizi için akış şeması gösterilmiştir. Bu çalışmada hasar kontrolü yapmak için kompozit levha ve yapıştırıcı ayrı ayrı ele alınarak kontrol edilmiştir. Kompozit levha için hasarı farklı yönlerden ele alan Hashin Hasar Teorisi kullanılmıştır. Yapıştırıcı hasarı için ilerlemeli hasar analizinde Maksimum Şekil Değiştirme Hasar Kriteri, Maksimum Asal Gerilme Kriteri, Maksimum Kayma Hasar Kriteri vb. farklı hasar modelleri kullanılmaktadır (Yarrington v.d., 2005; Liu ve Wang, 2007). Çalışmada gerilme-şekil değiştirme diyagramı kullanılarak kolayca uygulama olanağı sağlayan Maksimum Asal Gerilme Kriteri kullanılmıştır. Gerilme analizi sonucunda herhangi bir elemanda hasarın tespit edilmesi durumunda o elemana ait mekanik özellikler 10-5 gibi düşük bir katsayı ile çarpılarak malzeme özellikleri indirgenmektedir. Tablo 4 ve Tablo 5'te Hashin ve Maksimum Asal Gerilme Hasar Teorisi ve malzeme indirgeme kuralları yer almaktadır.



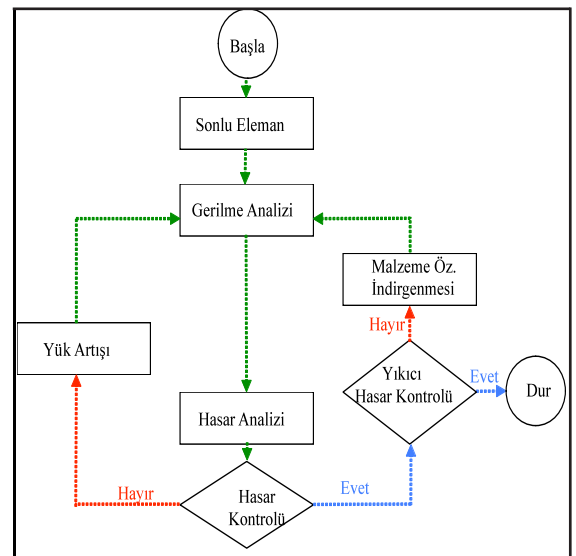
Şekil 5. Sonlu eleman modeli ve sınır şartları.

Sayısal modelin çözümünden elde edilen sonuçların tutarlılığını test etmek amacı ile Tablo 3’de verilmiş olan boyutlara göre hazırlanmış olan numunelere aksenal çekme yükü uygulanmıştır. Deney ve sayısal çözümden elde edilen sonuçlar Tablo 6’da gösterilmiştir. Deneysel çalışma sonuçlarının ortalamasına göre sayısal hasar yükünün deneysel hasar yüküne yaklaşım oranı 0.88 olarak belirlenmiştir. İlerlemeli hasar analizinin yapılması

ile hasar başlangıcı, hasar ilerlemesi ve son hasar yüklerinin tespiti ANSYS programından elde edilmiştir. Tablo 3’te verilmiş olan deneysel numune boyutları için yapıştırıcıda meydana gelen hasar başlangıcı, ilerlemesi ve son hasar yükünün elde edildiği sonlu eleman modeli Şekil 8’de görülmektedir.



Şekil 6. Gerilmelerdeki % değişim oranı ile eleman sayısı arasındaki ilişki.



Şekil 7. İlerlemeli hasar analizi akış diyagramı.

Tablo 4. Hashin Hasar Teorisi ve malzeme özelliklerinin indirgenmesi kuralı (Hashin, 1980; Turan v.d., 2009).

Hasar tipi	Hasar şartı	Hasar kriteri bağıntısı	İndirgeme kuralı
Fiber çekme	$\sigma_1 > 0$	$\left(\frac{\sigma_1}{X_c}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S}\right)^2 \geq 1$	$E_1, E_2, E_3, U_{12}, U_{13}, U_{23}, G_{12}, G_{23}, G_{13} \times 10^{-5}$
Fiber basma	$\sigma_1 < 0$	$\left(\frac{\sigma_1}{X_b}\right) \geq 1$	$E_1, E_2, E_3, U_{12}, U_{13}, U_{23}, G_{12}, G_{23}, G_{13} \times 10^{-5}$
Matriks çekme	$\sigma_2 > 0$	$\left(\frac{\sigma_2}{Y_c}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S}\right)^2 \geq 1$	$E_2, U_{12} \times 10^{-5}$
Matriks basma	$\sigma_2 < 0$	$\left(\frac{\sigma_2}{Y_b}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S}\right)^2 \geq 1$	$E_2, U_{12} \times 10^{-5}$
Fiber matriks kayma	$\sigma_1 < 0$	$\left(\frac{\sigma_1}{X_b}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S}\right)^2 \geq 1$	$G_{12}, U_{12} \times 10^{-5}$

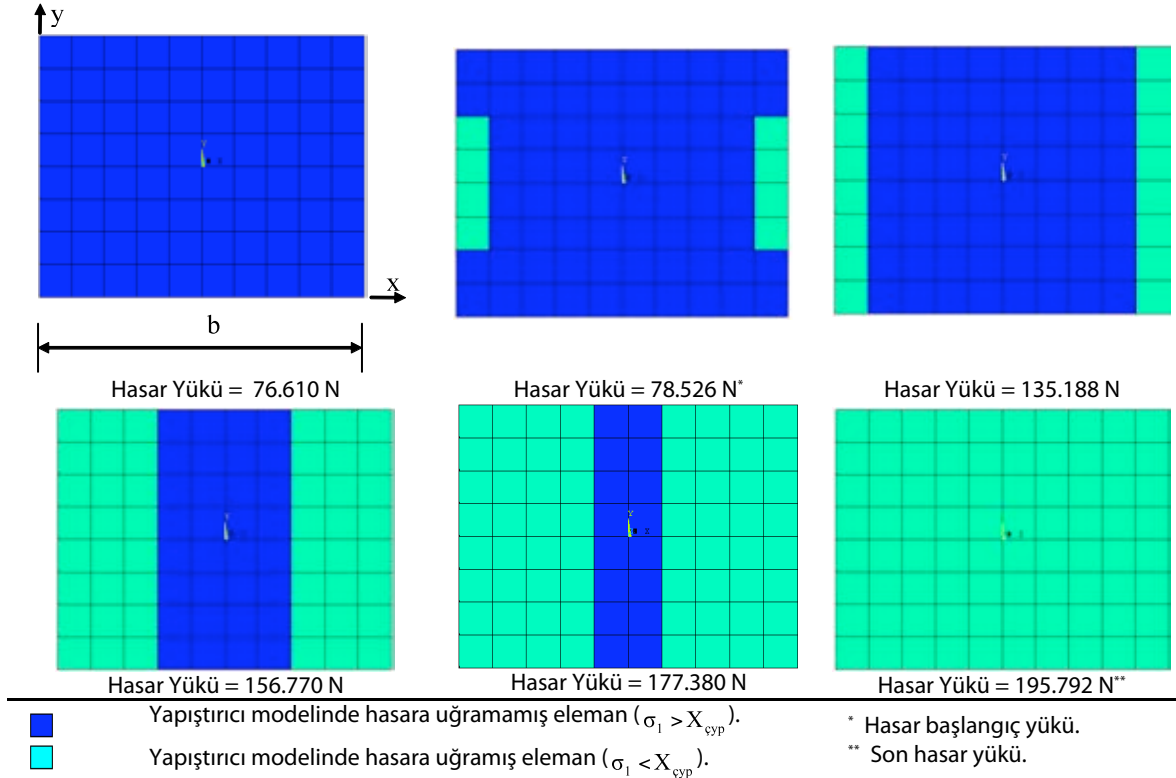
Tablo 5. Maksimum asal gerilme teorisi ve malzeme özelliklerinin indirgenmesi kuralı (Yarrington v.d., 2005).

Hasar şartı	Hasar kriteri bağıntısı	İndirgeme kuralı
$\sigma_1^* > \sigma_2 > \sigma_3$	$\sigma_1 > X_{cyp}$	$E \times 10^{-5}$

* $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$: Sırasıyla 1, 2 ve 3 yönlerindeki asal gerilmeler.

Tablo 6. Deneysel ve sayısal hasar yükleri.

Numune	Deneysel hasar yükü (N)	Sayısal hasar yükü (N)
1	165.01	
2	180.06	
Ortalama	172.54±10.64	195.792

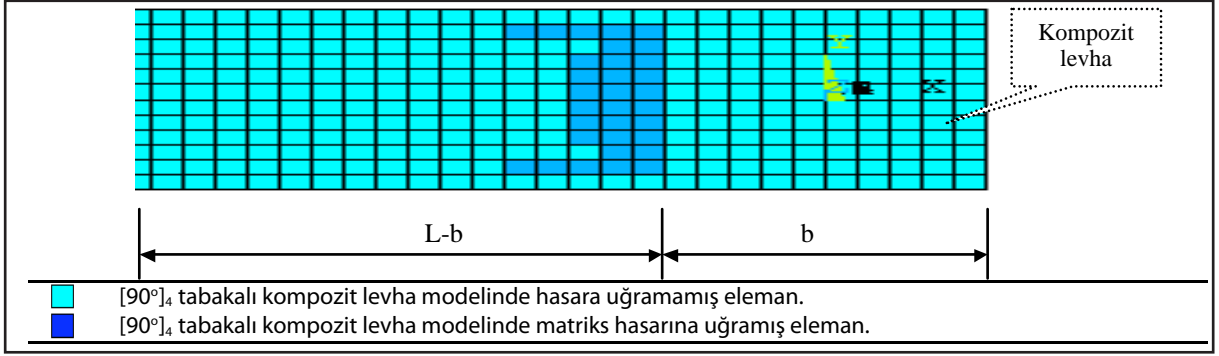
**Şekil 8. b=25 mm, s=0.1 mm w=18 mm olan [0]4 tabakalı deney numunesine ait yapıştırıcıda meydana gelen sayısal hasar başlangıcı, ilerlemesi ve son hasar yükü.**

Şekil 8'den görüldüğü üzere yapıştırıcı bölgesinde 78.526 N yük değerinde yapıştırıcı bölgesinin kenarında başlayan hasar 195.792 N değerine kadar ilerleyerek tüm yapışma bölgesine yayılmış

ve son hasar yükü değerine ulaşılmıştır. Bu değerinde yapıştırıcı tamamen hasara uğramış ve sayısal olarak kopma gerçekleşmiştir. Sadece yapıştırıcı hasarı olarak gerçekleşen sayısal çözümden

tabakalı kompozit üzerinde herhangi bir hasar elde edilmemiştir. Fiber takviye doğrultusuna dik doğrultu olan $[90^\circ]_4$ tabaka dizilimi levhada en zayıf dayanımın elde edildiği durumdur. Tabakalı kompozitte de hasar durumunu inceleyebilmek için tabakanın yüklemeye doğrultusunda en zayıf, yapıştırıcı bağlantısının ise en güçlü dayanımına sahip olan $b = 25$ mm, $s = 0.4$ mm ve $w = 30$ mm boyutları için sayısal çözüm yapılmıştır. Şekil 9'da yapıştırıcı hasarı

ile son bulan nihai hasar yükünde kompozit levha modelinde meydana gelen hasarlar gösterilmiştir. Şekil 9'dan görüldüğü gibi kompozit malzemede sadece matriks çekme hasarı belirli bir bölge için meydana gelmiştir. $[90^\circ]_4$ tabakalı kompozit levhada meydana gelen bu hasar levhanın kırılması için yeterli değildir. Fiber takviye açısının 90° 'den küçük olduğu durumlarda matriks hasarı yıkıcı hasar olarak görülmemektedir (Tserpes v.d., 2002).

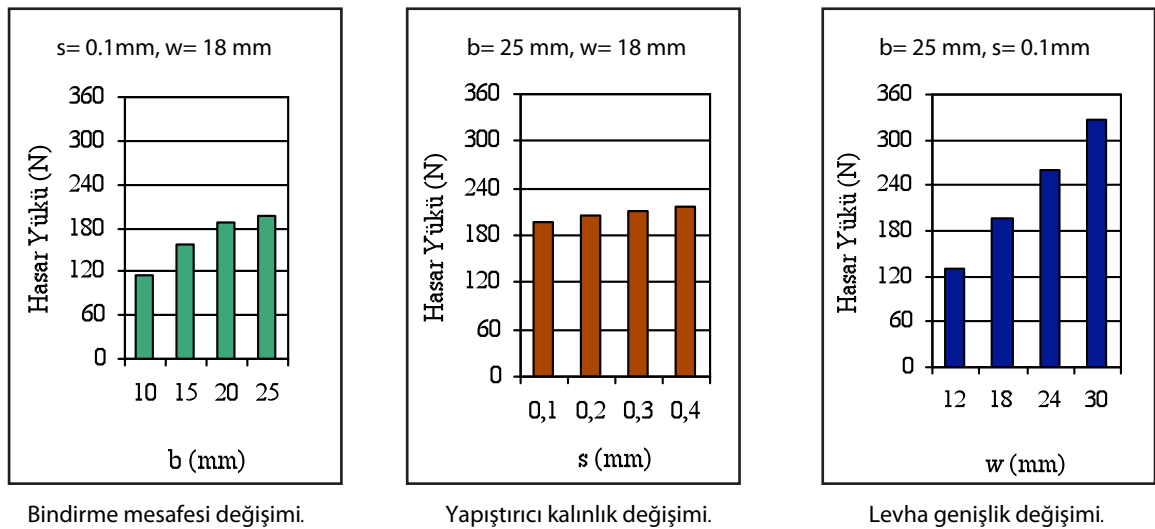


Şekil 9. $b = 25$ mm, $s = 0.4$ mm ve $w = 30$ mm olan modelde yapıştırıcının son hasar yükü için $[90^\circ]_4$ tabakalı kompozit levhada meydana gelen hasar.

4. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Sayısal çalışma Tablo 3'de verilmiş olan geometrik parametreler kullanılarak ANSYS programında oluşturulan sonlu eleman modellerine uygulanan ilerlemeli hasar analizi metodu ile gerçekleştirilmiştir. Geometrik parametrelerin değişimine göre sonuçları üç gurup halinde toplamak mümkündür. Buna göre bindirme mesafesinin, yapıştırıcı kalınlığının ve levha genişliğinin değişimi ile hasar yüklerinin değişimi sayısal olarak hesaplanmıştır. Şekil 10'da geometrik parametrelerin değişimine göre hasar yüklerinin değişimi grafik halinde gösterilmiştir.

Bindirme mesafesi (b) değerinin artışının $s = 0.1$ mm ve $w = 18$ mm sabit değerleri için hasar yüklerinin artırdığı Şekil 10'daki grafikten görülmektedir. En düşük bindirme mesafesi değeri olan 10 mm için hasar yükü 113.728 N olarak elde edilirken en yüksek bindirme mesafesi 25 mm için 195.792 N hasar yükü elde edilmiştir. Yapıştırıcı kalınlığı (s) değişiminin hasar yükleri üzerine olan etkileri $b = 25$ mm ve $w = 18$ mm genişliğine sahip kompozit levhalarda araştırılmıştır. Sonuç olarak yapıştırıcı kalınlığındaki artışın hasar yüklerini artırdığı görülmüştür. 0.1 mm kalınlığı için en düşük hasar yükü 195.792 N olarak elde edilirken 0.4 mm kalınlık için bu değer 216.118 N olarak hesaplanmıştır.



Şekil 10. Geometrik parametrelerle hasar yüklerinin değişimi.

Levha genişliğinin (w) artışına bağlı olarak $b = 25$ mm ve $s = 0.1$ mm sabit değerleri için hasar yüklerinin yaklaşık olarak aynı oranda arttığı Şekil 10'daki grafikten görülmektedir. En düşük levha genişliği 12mm için 130.528 N hasar yükü elde edilirken en büyük levha genişliği içinse 326.321 N hasar yükü elde edilmiştir. Sayısal çalışmanın sonucunda Şekil 9'dan görüldüğü gibi çekme hasar yükünün en düşük olduğu $[90^\circ]_4$ tabaka dizilimi için; en yüksek hasar yüküne sahip yapıştırma bağlantısında sadece matriks çekme hasarı meydana gelmektedir. Bu hasar tipi de kompozit malzemenin kırılması için yeterli değildir.

Bindirme mesafesinin 2.5 kat artmasına rağmen hasar yükünün doğru orantılı olarak artmadığı Şekil 10'daki grafikten görülmektedir. Yapıştırıcı kalınlığının 0.1 mm' den 0.4 mm' ye kadar dört kat artmasına rağmen hasar yüklerinin aynı oranda artmaması hasar yükleri üzerinde yapıştırıcı kalınlığının çok fazla oranda etkili olmadığını göstermektedir. Literatürdeki çalışmalarda da yapıştırıcı kalınlığının 0.7 mm'ye kadar artması hasar yüklerini bazı yapıştırıcılar için kısmen (Silva v.d., 2006) ve hatta tamamen (Kahraman v.d., 2008) değiştirmedini göstermektedir. Yapıştırma bağlantısı üzerine geometrik parametrelerin etkileri incelendiği zaman yapılmış olan sayısal çalışmanın sonuçlarına göre hasar yükleri üzerine en etkili parametrenin kompozit levha genişliği olduğu görülmüştür. Levha genişliğinin artması ile artan bu değerlerin sebebi yapıştırıcı yüzey alanının artmasından kaynaklanmaktadır. Levha genişliği dolayısı ile yapışma yüzey alanının artmasının mukavemeti arttırıcı yönde olması fiziksel olarak anlamlı bir olgudur. Yapıştırıcı kalınlığının artması ile hasar yüklerinin en az etkiye sahip olması kalınlık artışına bağlı olarak iki kompozit levha arasında bağlantıyı sağlayan yapıştırıcı üzerindeki yükü arttırmakta bu durumda kalınlık artsa bile yapıştırıcı mukavemeti levhanın mukavemetine oranla oldukça düşük olduğu için mukavemet sınırlı olmaktadır. Bindirme mesafesindeki artışın hasar yükleri üzerinde etkili olması yine yapıştırıcı yüzey alanındaki artışa bağlıdır.

Deneysel olarak yapılan çalışmanın çeşitli parametreler için sadece hazırlanmış olan program sayesinde ANSYS sonlu elemanlar programında çalışılması zaman, maliyet ve deneysel hataları en aza indirmiş ve kısa sürede tek tesirli yapıştırma bağlantıları ile ilgili sonuçlar elde edilmesine olanak sağlamıştır. Kullanılan programın deneysel veriler ile bu derecede uyumlu olması neticesinde daha sonraki çalışmalar içinde kullanılabilir olması önemlidir.

5. SEMBOLLER LİSTESİ

B	: Yapıştırıcı bindirme uzunluğu	mm
E	: Epoksi reçinenin Elastisite modülü	MPa
E ₁	: Kompozit levhanın fiber takviye doğrultusunda Elastisite modülü	MPa
E ₂	: Kompozit levhanın Fiber takviye doğrultusuna dik doğrultuda Elastisite modülü	MPa
G ₁₂	: Kompozit levhanın Kayma modülü	MPa
L	: Kompozit levha uzunluğu	mm
r	: Kompozit levhanın çekme cihazı çenesine bağlantı uzunluğu	mm
s	: Yapıştırıcı kalınlığı	mm
S	: Kompozit levhanın Kayma mukavemeti	MPa
t	: Kompozit levha kalınlığı	mm
u _y	: y-yönündeki yer değiştirme	mm
u _z	: z-yönündeki yer değiştirme	mm
X _b	: Kompozit levhanın Fiber takviye doğrultusunda basma mukavemeti	MPa
X _ç	: Kompozit levhanın fiber takviye doğrultusunda çekme mukavemeti	MPa
X _{cyp}	: Epoksi reçinenin çekme mukavemeti	MPa
Y _b	: Kompozit levhanın Fiber takviye doğrultusuna dik doğrultuda basma mukavemeti	MPa
Y _ç	: Kompozit levhanın Fiber takviye doğrultusuna dik doğrultuda çekme mukavemeti	MPa
w	: Kompozit levha genişliği	mm
u	: Epoksi reçinenin Poisson oranı	-
u _{1,2}	: Kompozit levhanın Poisson oranı	-
σ ₁	: 1-doğrultusundaki asal gerilme	MPa
σ ₂	: 2-doğrultusundaki asal gerilme	MPa
σ ₃	: 3-doğrultusundaki asal gerilme	MPa

REFERANSLAR

ANSYS 11.0 Academic Teaching Introductory Help Menu, 2007.

Apalak, Z. G., Apalak, M. K and Genç, M. 2006. "Progressive Damage Modeling of an Adhesively Bonded Unidirectional Composite Single – lap Joint in Tension at the Mesoscale Level" Journal of Thermoplastic Composite Materials. (19), 671-702.

Aydın, M.D., Temiz, Ş. ve Özel, A. 2007. "Yapıştırma Bağlantılarının Dayanımı Üzerine Kürleşme Basıncının Etkisi" **8. Uluslararası Kırılma Konferansı**, 7–9 Kasım 2007, İstanbul, Türkiye.

Camanho, P.P. and Matthews, F.L. 2000. "A Progressive Damage Model for Mechanically Fastened Joints in Composite Laminates" Journal of Composite Materials. (33), 906–927.

- Hashin, Z. 1980. "Failure Criteria for Unidirectional Fibre Composites" *Journal of Applied Mechanics*. (47), 329–334.
- Kahraman, R., Sunar, M. and Yilbas, B. 2008. "Influence of Adhesive Thickness and Filler Content on the Mechanical Performance of Aluminum Single-lap Joints Bonded with Aluminum Powder Filled Epoxy Adhesive"; *Journal of Materials Processing Technology*. (205), 183-189.
- Liu, K.S. and Tsai, S.W. 1998. "A Progressive Quadratic Failure Criterion for a Laminate" *Composites Science and Technology*. 58 (7) 1023-1032.
- Liu, X. and Wang, G. 2007. "Progressive Failure Analysis of Bonded Composite Repairs" *Composite Structures*. (81), 331-340.
- Papanikos, P., Tserpes, K.I. and Pantelakis, S. 2007. "Initiation and Progression of Composite Patch Debonding in Adhesively Repaired Cracked Metallic Sheets", *Composite Structures*. (81), 303-311.
- Shokrieh, M.M. and Lessard, L.B. 2001. "Progressive Fatigue Damage Modeling of Composite Materials Part I: Modeling" *Journal of Composite Materials*. (34), 1056-1080.
- Silva, L. F. M., Rodrigues, T. N. S. S., Figueiredo, M. A. V., Moura, M. F. S. F. and Chousal, J. A. G. 2006. "Effect of Adhesive Type and Thickness on the Lap Shear Strength", *The Journal of Adhesion*. (82), 1091–1115.
- Taib, A., Boukhili R., Achiou, S., Gordon, S. and Boukehili, H. 2005. "Bonded Joints with Composite Adherents, Part 1. Effect of Specimen Configuration, Adhesive Thickness, Spew Fillet and Adherent Stiffness on Fracture" *International Journal of Adhesion and Adhesives*. (26), 226-236.
- Tserpes, K.I., Papanikos, P. and Kermanidis, T.H. 2002. "A Three-dimensional Progressive Damage Model for Bolted Joints in Composite Laminates Subjected to Tensile Loading" *Fatigue and Fracture Engineering Materials and Structures*. 24 (10), 673-686.
- Turan, K., Kaman, M.O. ve Gür, M. 2009. "Dairesel Delikli Tabakalı Kompozit Levhalarda Deneysel ve Sayısal Hasar Analizi" **5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu**, 13-15 Mayıs 2009, Karabük, Türkiye.
- Yarrington, P., Zhang, J., Collier, C. and Bednarczyk, B.A. 2005. "Failure Analysis of Adhesively Bonded Composite Joints" *American Institute of Aeronautics and Astronautics*. 1-23.