

Pim Bağlantılı Tabakalı Kompozit Levhalarda Fiber Takviye Açısının Hasar Tipine Etkisi

Effect of Fiber Orientation Angle on the Failure Mode of Pin Jointed Laminated Composite Plates

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

^a Dicle Üniversitesi, Mühendislik - Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 21280, Diyarbakır.

^b Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 23119, Elazığ.

Geliş Tarihi/Received : 30.09.2009, Kabul Tarihi/Accepted : 09.12.2009

ÖZET

Bu çalışmada, pim bağlantılı tabakalı kompozit levhalarda fiber takviye açısının değişiminin hasar yükleri ve hasar tipleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Analizlerde tek yönlü karbon fiberlerle takviye edilmiş epoksi reçine matrisli tabakalı kompozit levhalar kullanılmıştır. Tabaka dizilimleri $[\theta^0]_4$ olmak üzere, θ ; fiber takviye açısı 0° 'den 90° 'ye kadar 15° 'lik artımlarla seçilmiştir. Levhaların farklı fiber takviye açılarındaki hasar yükü ve hasar tipleri deneysel ve sayısal olarak bulunmuştur. Sayısal çalışmada Ansys programı kullanılmıştır. Tabakalı kompozit levhaların ilerlemeli hasar analizi için Hashin hasar kriteri kullanan APDL kodları yazılarak malzeme indirgemeleri yapılmıştır. Deneysel çalışmada en büyük hasar yükü 749.917 N ile $[15^0]_4$ tabaka dizilimi için ve en düşük hasar yükü ise 467.483 N ile $[60^0]_4$ tabaka dizilimi için elde edilmiştir. Sayısal ve deneysel çalışma sonuçlarının uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Tabakalı kompozit malzemeler, İlerlemeli hasar analizi, Pim bağlantıları, Sonlu elemanlar metodu.

ABSTRACT

In this study, the major aim is to investigate change effects of fiber orientation angles on the failure loads and failure modes for the pin jointed laminated composite plates. In the analysis, laminated composite plates with epoxy matrix resin reinforced unidirectional carbon fibers are used. The ply arrangements are chosen $[\theta^0]_4$ and θ ; fiber reinforced angle changes from 0° to 90° with 15° increments. The failure load and failure mode are analyzed experimentally and numerically. In the numerical analysis Ansys program is used. In the program, material properties are degraded using APDL code which is written for progressive failure analysis and contains Hashin failure criteria for laminated composite plates. In the experimental study, the maximum failure load for $[15^0]_4$ laminae configuration, 749.917 N and minimum failure load for $[60^0]_4$ 467.483 N laminae configuration are obtained. A good agreement between experimental and numerical solution is obtained.

Keywords: Laminated composite materials, Progressive failure analysis, Pin joints, Finite element method.

1. GİRİŞ

Yapı veya makina konstrüksiyonlarında montaj için değişik çözülebilir birleştirme elemanları kullanılmaktadır. Kompozit malzemelerden imal edilen yapı ya da makine elemanlarının birleştirilmesinde pim, perçin ve civata gibi bağlama elemanları ile yapılan çözülebilir bağlantılar; ekonomikliği, kolay uygulanabilirliği ve geniş uygulama alanına sahip olması nedeni ile tercih edilmektedirler. Ancak bağlantı için kompozit malzemede açılacak olan delikler gerilme yığılmalarına ve dolayısıyla malzemenin

mukavemetinde azalmalara neden olmaktadır. Karbon fiber takviyeli epoksi reçine esaslı kompozit malzemeler lineer elastik özelliktedirler ve metalik malzemeler gibi akma davranışı göstermezler. Gevrek yapıda olan bu malzemeler yüklemelerin kopma sınırına ulaşması durumunda kırılırlar. Çözülebilir bağlantı elemanı kullanılarak yapılan birleştirmelerde sisteme uygulanan yük bağlama elemanı üzerinden bağlantı parçalarına iletilmektedir. Delinerek mukavemeti zayıflatılmış olan kompozit yapıda bağlantı elemanının delik yüzeyine yapacağı basınç ile malzemenin mukavemeti olumsuz yönde

* Yazışılan yazar/Corresponding author. E-posta adresi/E-mail address : kturan@firan.edu.tr (K. Turan)

etkilenecektir. Uygun fiber takviye açısının, tabaka sayısının belirlenmesi ve bağlantı yapılırken malzeme mukavemetinde meydana gelecek değişikliklerin göz önüne alınarak analizlerin yapılması gerekir.

Camanho ve Matthews (1997) tabaka diziliminin, fiber takviye açısı ve bağlama geometrisinin değişiminin tek ve çoklu pim kullanılan birleştirmelere etkilerini araştırmışlardır. İki ve üç boyutlu sayısal modellerin kullanıldığı, pim bağlantılı levhalar üzerinde yaptıkları analizlerde sürtünme, pim-delik arasındaki boşluk ve temas yüzeyi dikkate alınmıştır. Analizlerde uygun bir hasar kriteri ile birlikte uygun indirgemelerin kullanılmasının en iyi sonuçları sağlayacağı belirtilmiştir. Tserpes v.d., (2001) civata bağlantılı tabakalı kompozit yapılarda hasar ilerlemesinin üç boyutlu sayısal analizini sonlu elemanlar metodu kullanarak ANSYS programında yapmışlardır. Hashin hasar kriterini kullanarak yazmış oldukları programda gerilme analizi yaparak hasara uğrayan elemanlarda malzeme özelliklerinin indirgenmesi metodunu kullanmışlardır. İçten ve Karakuzu (2002) örgülü karbon takviyeli tabakalı kompozit malzemelerde pim bağlantılarının ilerlemeli hasar analizini deneysel ve sayısal olarak çalışmışlardır. Farklı fiber takviye açılarının, pim bağlantı geometrilerinin ve malzeme özelliklerinin, hasar yükleri ve hasar oluşma şekli üzerine etkilerini araştırmışlardır. Sayısal çalışmalarında Hashin ve Hoffman hasar kriterlerini kullanarak deneysel sonuçlara göre yaklaşık olarak % 20 fark elde etmişlerdir. Whitworth v.d., (2003) pim bağlantılı kompozit malzemelerde hasar analizini Chang-Scott karakteristik eğrisini kullanarak yapmışlardır. Çalışmalarında Yamada-Sun hasar kriterini kullanarak iki boyutlu bir sonlu eleman analizinden elde etmiş oldukları sonuçlarını deneysel çalışmaları ile karşılaştırmışlardır. McCarthy v.d., (2005) tek kesme bağlantılı civata ile birleştirilmiş tabakalı kompozit yapılarda üç boyutlu sonlu elemanlar metodu kullanarak yapmış oldukları analizleri deneysel çalışmaları ile karşılaştırmışlardır. Çalışmada esas olarak civata ile delik arasındaki tolerans değerlerinin değişiminin hasar üzerine olan etkilerini araştırmışlardır. Pim bağlantılı alüminyum-cam fiber takviyeli epoksi reçine matrisli kompozit yapılarda hasar analizi İçten ve Sayman, (2003) tarafından deneysel olarak yapılmıştır. Çalışmalarında fiber takviye açısının değişimini ve pim bağlantı geometrisinin değişiminin hasar yükleri üzerine olan etkilerini incelemiştir. Echavara v.d., (2007) pim bağlantılı elastik ortotropik tabakalı kompozit yapılarda delik etrafındaki gerilme yığılmasını analitik metotlar kullanarak incelemiştir. Aktaş, (2005) karbon fiber takviyeli ve epoksi reçine matrisli tabakalı kompozit yapılarda statik ve dinamik yükleme etkisi altında yük taşıma mukavemetinin değişimini pimli bağlantılarda araştırmıştır. Karbon fiber takviyeli ve epoksi reçine matrisli tabakalı

kompozit yapılarda pim bağlantısının mukavemeti deneysel ve sayısal yöntemler kullanılarak Aktaş ve Dirikolu, (2004) tarafından araştırılmıştır. Sayısal analizde Yamada-Sun hasar kriterini kullanarak hasar tipini karakteristik eğri yöntemiyle elde etmişlerdir. Karakuzu v.d., (2006) pim bağlantılı tabakalı kompozit yapılarda hasar analizini deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Çalışmalarında; örgülü cam fiber takviyeli, vinilester matrisli, tabakalı kompozit yapıda pim bağlantı geometrisinin değişiminin hasar yükleri ve hasar tipi üzerine etkilerini araştırmışlardır. Sayısal hasar yüklerini Hashin hasar kriterine göre Lusas sonlu elemanlar programında üç boyutlu sonlu eleman modeliyle belirlemiştir. Okutan ve Karakuzu, (2003) tabakalı kompozit malzemelerde pim bağlantılarının mukavemetini deneysel ve sayısal yöntemler kullanarak araştırmışlardır. Çalışmalarında fiber takviye açısı, tabaka dizilimi ve bağlantı geometrisinin değişimini incelemiştir. Dursun ve Özbay, (2008) iki boyutlu sayısal analizlerinde Hashin hasar kriterini kullanarak hasar ilerlemesini modellemiştir. Sayısal çalışmada ilerlemeli hasar analizi için yazmış oldukları ANSYS APDL (ANSYS Parametric Design Language) kodlarını kullanmışlardır.

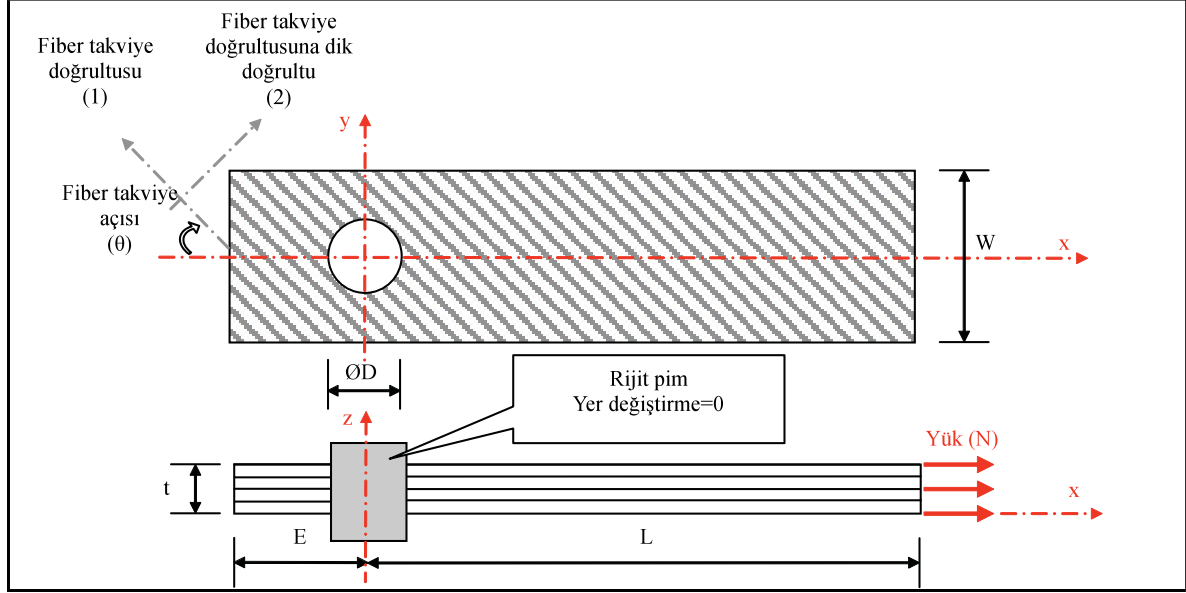
Araştırmalar, pim bağlantılı tabakalı kompozit levhaların hasar tipinin ve yükünün tespiti için yapılan deneysel çalışmaların farklı hasar kriterleri kullanılarak sonlu elemanlar metoduyla sayısal olarak ta desteklendiğini göstermektedir. Bu çalışmada; pim bağlantılı, karbon fiber takviyeli, epoksi reçine esaslı ve dört tabakalı kompozit levhalara aksel çekme yükü uygulanmış ve hasar yükleri deneysel olarak bulunmuştur. Levhaların tabaka dizimleri $[\theta^0]_4$ olarak belirlenmiş olup θ değeri; 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° ve 90° olarak seçilmiştir. Böylece fiber takviye açısının değişiminin hasar yüküne ve tipine etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Sayısal çalışmada ilerlemeli hasar analizi metodunu ANSYS programında uygulayan ve Hashin hasar kriterini kullanan APDL kodları yazılmıştır. Hasar yükü ve tipleri için sayısal ve deneysel sonuçlar arasındaki uyumlu sonuçlar grafikler halinde sunulmuştur.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA

Kompozit levhalar 330 gr/m^2 yoğunlukta tek yönlü karbon fiber ve Ciba Geigy, Bisphenol A, CY-225 epoksi reçineden oluşmaktadır. Epoksi reçineye %20 oranında Ciba Geigy, Anhydride HY-225 sertleştirici katılmasıyla oluşturulan matris içine takviye elemanı olarak dört tabaka halinde karbon fiberler yerleştirilmiştir. $W=33 \text{ mm}$ genişliğinde ve $E+L=97 \text{ mm}$ uzunluğunda ($E=13 \text{ mm}$, $L=84 \text{ mm}$) oluşturulan kompozit yapı 150 bar basınç altında $160 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıkta 3 saat bekletilerek $t=1.3 \text{ mm}$ kalınlığında, tabakalı levhalar elde edilmiştir. Daha sonra tabakalı kompozitlere pim bağlantısını yapmak için matkapla

D=6 mm çapında delik açılmıştır (Şekil 1). Çalışmada kullanılan kompozit levhaların mekanik özellikleri Tablo 1’de verilmiştir. Deneyler UTEST çekme cihazında 0.5 mm/dak çekme hızında yapılmıştır. Kompozit levhaların açılan deliklerine yerleştirilmiş rijit pim özel aparat yardımıyla cihazın sabit çenesine

mesnetlenmiş, levhaların delikten uzak kenarı ise cihazın hareketli çenesine bağlanarak x eksenine doğrultusunda aksel çekme yükü uygulanmıştır. Deneyler sonucunda farklı takviye açılarında sahip her bir levhanın yük yer değiştirme grafiği çizilerek, hasar yükleri ve hasar tipleri tespit edilmiştir.



Şekil 1. Karbon/epoksi tabakalı kompozit levha boyutları ve deney sınır şartları.

Tablo 1. Karbon/epoksi tabakalı kompozit levhanın mekanik özellikleri.

1 Yönünde Elastisite Modülü	E_1 (MPa)	172891
2 Yönünde Elastisite modülü	E_2 (MPa)	10796.66
Kayma modülü	G_{12} (MPa)	3638
Poisson oranı	ν_{12}	0.32
1 Yönünde çekme mukavemeti	X_c (MPa)	1440.105
2 Yönünde çekme mukavemeti	Y_c (MPa)	36.586
1 Yönünde basma mukavemeti	X_b (MPa)	- 419.946
2 Yönünde basma mukavemeti	Y_b (MPa)	- 115.405
Kayma mukavemeti	S (MPa)	56.34

3. SAYISAL ÇALIŞMA







Sayısal çalışma sonlu elemanlar metodunu kullanarak çözüm yapan ANSYS programında yapılmıştır. Programın özel bir hasar ilerleme ve malzeme özelliklerini indirgeme çözümü yoktur. Tabakalı kompozit levhaların hasar ilerlemesini ve sonuçta hasar yükü ile hasar tipini sayısal olarak ANSYS’te modelleyebilmek amacıyla Hashin hasar kriterini kullanan APDL kodları yazılmıştır. Program, verilen sınır şartlarına ve malzeme özelliklerine göre öncelikle kompozit malzeme özelliklerinden dolayı lineer elastik gerilme analizi yapmaktadır. Elde edilen gerilme değerleri her bir sonlu eleman

için, Hashin kriterine göre kontrol edilmekte; eğer hasar varsa o elemana ait malzeme özellikleri indirgenmekte eğer hasar yoksa yük değeri artırılarak çözüm tekrarlanmaktadır. Bu döngü kompozit levha kenarındaki sonlu elemanların malzeme indirgenmesi yapılanaya kadar yani hasar levha kenarına ulaşıncaya kadar devam eder. APDL kodları yardımıyla ANSYS sonlu eleman programında yapılan ilerlemeli hasar analizinde her bir tabakadaki hasar başlangıcı, hasar ilerlemesi ve hasar yükleri hesaplanmıştır. Analiz sırasında kullanılan malzeme indirgeme kuralları ve üç boyutlu Hashin hasar kriteri şartları sırasıyla Tablo 2 ve Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 2. Malzeme indirgemeleri tablosu.

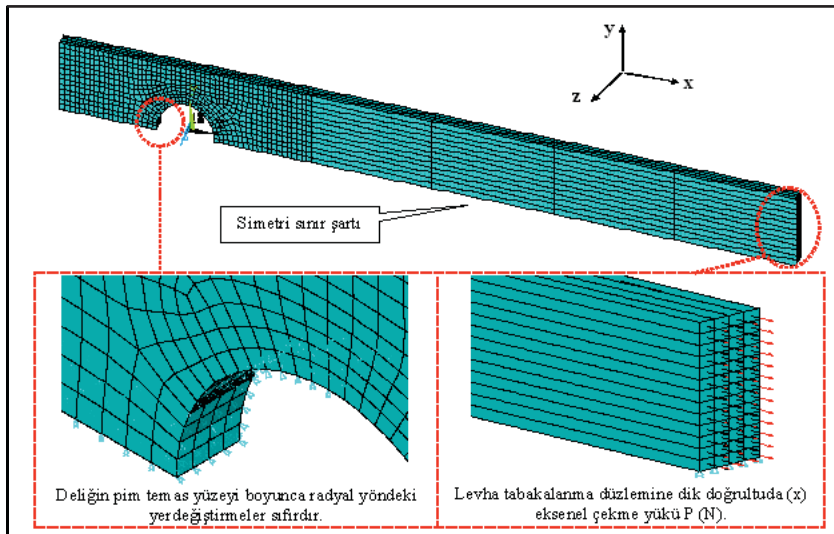
Mekanik Özellikler	Hasar Tipi				
	Fiber Çekme Hasarı	Fiber Basma Hasarı	Matriks Çekme Hasarı	Matriks Basma Hasarı	Fiber – Matriks Kayma Hasarı
E ₁	x10 ⁻⁵	x10 ⁻⁵	-	-	-
E ₂	x10 ⁻⁵	x10 ⁻⁵	x10 ⁻⁵	x10 ⁻⁵	-
E ₃	x10 ⁻⁵	x10 ⁻⁵	-	-	-
G ₁₂	x10 ⁻⁵	x10 ⁻⁵	-	-	x10 ⁻⁵
G ₁₃	x10 ⁻⁵	x10 ⁻⁵	-	-	-
G ₂₃	x10 ⁻⁵	x10 ⁻⁵	-	-	-
ν ₁₂	x10 ⁻⁵	x10 ⁻⁵	x10 ⁻⁵	x10 ⁻⁵	x10 ⁻⁵
ν ₁₃	x10 ⁻⁵	x10 ⁻⁵	-	-	-
ν ₂₃	x10 ⁻⁵	x10 ⁻⁵	-	-	-

Tablo 3. Üç boyutlu Hashin hasar kriteri ve sayısal analizde ortaya çıkan renkler (Tserpes v.d., (2001)).

Hasar tipi	Hasar şartı	Hasar Kriteri bağıntısı	Renk
Hasara uğramamış eleman	-	-	Açık mavi 
Fiber Çekme	σ ₁ >0	$\left(\frac{\sigma_1}{X_c}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S}\right)^2 \geq 1$	Mor 
Fiber Basma	σ ₁ <0	$\left(\frac{\sigma_1}{X_b}\right) \geq 1$	Kırmızı 
Matriks çekme	σ ₂ >0	$\left(\frac{\sigma_2}{Y_c}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S}\right)^2 \geq 1$	Koyu mavi 
Matriks Basma	σ ₂ <0	$\left(\frac{\sigma_2}{Y_b}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S}\right)^2 \geq 1$	Pembe 
Fiber Matriks Kayma	σ ₁ <0	$\left(\frac{\sigma_1}{X_b}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S}\right)^2 \geq 1$	Yeşil 

[0°]₄ tabaka dizilimine sahip levhanın sonlu eleman modelinde sekiz düğümlü tabakalı Solid 46 (ANSYS, 2007) eleman tipi kullanılmış olup, modelde 7480 eleman ve 9845 düğüm bulunmaktadır. Her bir fiber tabakası ayrı modellenmiş olup daha sonra bu dört tabaka sırasıyla birleştirilmiştir. Levhanın sonlu elemanlara bölünme işlemi için özel bir bölmelendirme işlemi yapılmamıştır. Böylece hasar ilerlemesinin sınırlandırılmış doğrultuda ilerlemesinin önüne geçilmiştir. Levhalar yüklemeye

ve sınır şartlarından dolayı yarım modellenmiş olup kesilen yüzeylerine simetri sınır şartı uygulanmıştır. Pim deliğinin pimle temas yüzeyi boyunca radyal sınır şartı uygulanarak, basınç yükü etkisinin gerçek modellenmesi yapılmıştır. Deneyde levha kesitine x eksenini doğrultusunda aksenal çekme yükü uygulanmıştır. Tabakalı kompozit levhanın üç boyutlu sonlu eleman modeli ve sınır şartları Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Tabakalı kompozit levhanın sonlu eleman modeli ve sınır şartı.

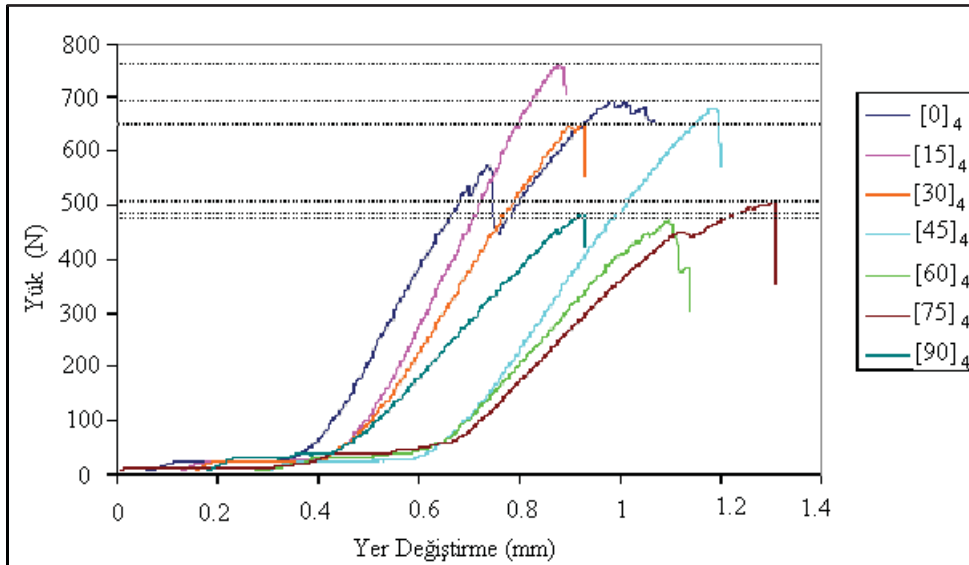
4. SONUÇLAR

Pim delikli $[0^0]_4$ tabaka dizilimine sahip kompozit levhaların farklı fiber takviye açılarında (θ) hasar yüklerini ve hasar tiplerini tespit etmek amacıyla yapılan deneysel ve sayısal çalışmada levhalara aksel çekme yükü uygulanmış, sonuçlar grafikler halinde sunulmuştur.

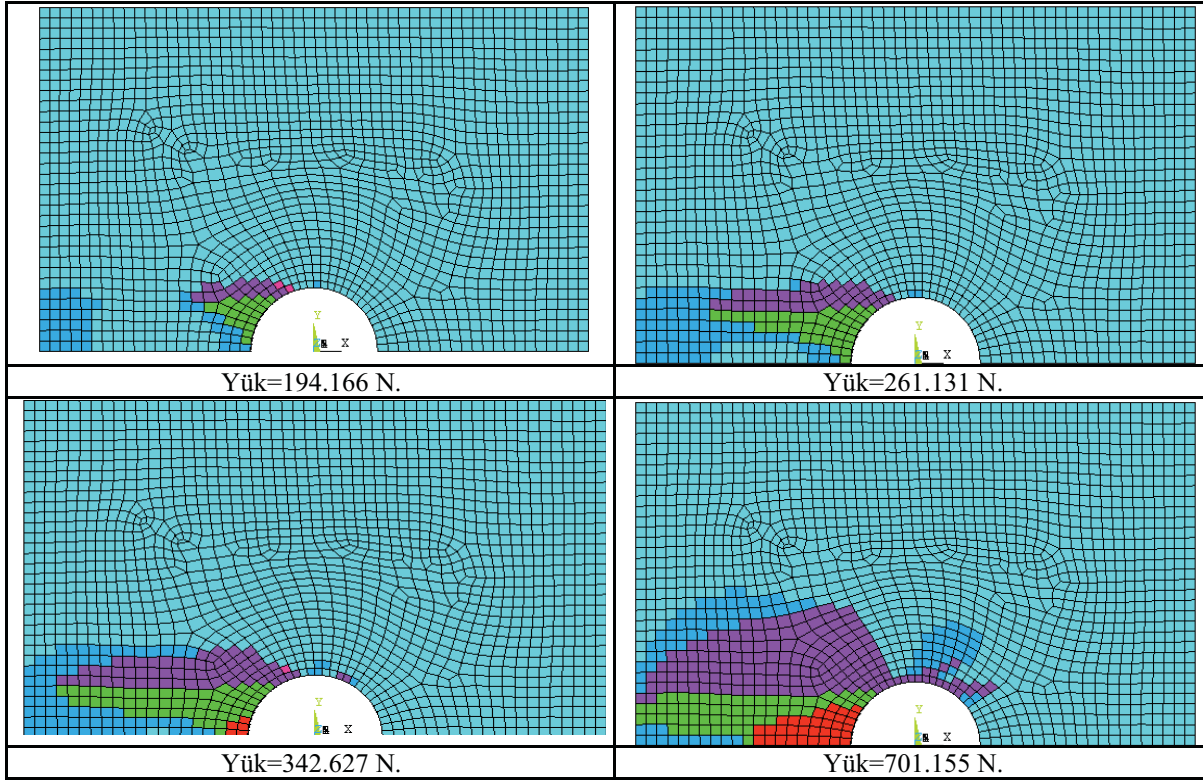
Şekil 3'de farklı fiber takviye açılarındaki levhaların yük yer değiştirme grafiği gösterilmiştir. Bu grafiklerde her bir levhaya ait maksimum yük değerleri belirlenerek o levhaya ait hasar yükleri tespit edilmiştir. Şekil 4'te $[0^0]_4$ dizilimi için levhanın yük artışına bağlı olarak sayısal hasar ilerlemesi gösterilmiştir. Fiber takviye açısı aksel yük doğrultusunda olduğundan dolayı hasar ilerleme yönü de bu doğrultuda (x-ekseni) olmuştur. $P=261.131$ N yükünde hasar matris çekmesi olarak gerçekleşmiş, son hasar yükü ise 701.155 N değerinde fiber çekme ve fiber matris kayma hasarı şeklinde oluşmuştur. Dört tabakanın da aynı doğrultuda takviyelendirilmesinin fiberlerle matris arasında kayma hasarlarının oluşumunu sağladığı açık olarak görülmektedir. $[30^0]_4$, $[45^0]_4$, $[60^0]_4$ ve $[75^0]_4$ tabaka dizilimleri için sayısal ve deneysel hasar yükleri ve tipleri karşılaştırılmalı olarak Şekil 5'de verilmiştir. Fiber takviye açısının artışına bağlı olarak hasar yönlerinin de bu doğrultuda gerçekleştiği sayısal ve deneysel sonuçlarla uyumlu olarak açıkça görülmektedir. Tüm takviye açılarındaki ilk hasar tipi matris çekme hasarı şeklinde ve levha üzerinde

diğer hasar tiplerine göre daha geniş bölgeye yayılmış olarak fiber takviye doğrultusunda elde edilmiştir. $\theta < 90^0$ olduğu durumlarda matris hasarı yıkıcı hasar olarak görülmediğinden dolayı hasar ilerlemesine devam edilmiştir (Tserpes v.d., 2001).

Yükün artışına bağlı olarak aynı doğrultulu dört tabakalı kompozit levhalardaki son hasar tipleri; $[30^0]_4$ ve $[45^0]_4$ için fiber matris kayma ve fiber çekme hasarı, $[60^0]_4$ için fiber matris kayma hasarı ve $[90^0]_4$ için matris çekme hasarı olarak gerçekleşmiştir. Ancak pim temas yüzeyi boyunca ve pim deliğine yakın bölgelerde $[0^0]_4$ tabaka dizilimi için aksel çekme doğrultusunda olan fiberlerin basma hasarı etkisinde kaldığı Şekil 4'te görülmektedir. Takviye açısının çekme doğrultusundan uzaklaşmasıyla bir başka deyişle fiber takviye açısının artmasıyla delik etrafında fiber basma hasarı oluşumu ortadan kalkmaktadır. Fiber takviye açısının değişimine göre tabakalı kompozit levhaların sayısal ve deneysel hasar yükleri Şekil 6'da gösterilmiştir. En büyük deneysel hasar yükü 749.917 N ile $[15^0]_4$ dizilimi için, en düşük hasar yükü ise 467.483 N ile $[60^0]_4$ dizilimi için elde edilmiştir. Sayısal hasar yükleri tüm takviye açılarındaki deneysel hasar yüklerinden daha büyüktür. Deneysel ve sayısal hasar yükleri arasındaki en büyük fark 51.13 N olarak $[90^0]_4$ diziliminde bulunmuştur. Sayısal ve deneysel sonuçları; en düşük % 92.87 yaklaşım oranıyla $[90^0]_4$ için, en yüksek ise % 98.41 olarak $[30^0]_4$ için tespit edilmiştir.



Şekil 3. Farklı fiber takviye açılarındaki levhalar için yük- yer değiştirme grafiği ve hasar yüklerinin tespiti.



Şekil 4. $[0^\circ]_4$ tabaka dizilimi için hasar başlangıcı, hasar ilerlemesi ve son hasar yükü.

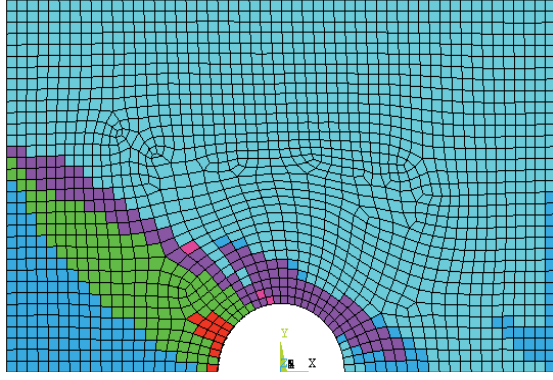
5. TARTIŞMA

Pim bağlantılı $[0^\circ]_4$ tabaka dizilimine kompozit levhaların θ ; 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° ve 90° açıları için aksenal çekme yükü altında hasar yüklerini ve hasar tiplerini tespit etmek amacıyla yapılan deneysel ve sayısal çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir;

- $[0^\circ]_4$ tabaka dizilimine sahip tabakalı kompozit levhalarda hasar yükleri ve hasar tipleri deneysel ve sayısal olarak en düşük % 92.87 yaklaşım oranıyla uyumlu olduğu görülmektedir.
- Tabakalı kompozit levhadaki dört tabaka aynı doğrultuda takviye edildiği için takviye açısı θ değerinin değişmesiyle hasar tipi takviye açısıyla aynı doğrultuda deneysel ve sayısal olarak elde edilmiştir.
- Sayısal çözümde; takviye açısı θ aksenal çekme doğrultusunda veya yakın doğrultularda (0° ,

15° ve 30° açıları) olduğu zaman pim delik temas yüzeyi ve çevresinde fiber basma hasarları elde edilmiştir. Takviye açısının artmasıyla ($\theta > 45^\circ$) fiber basma hasarı oluşmamıştır.

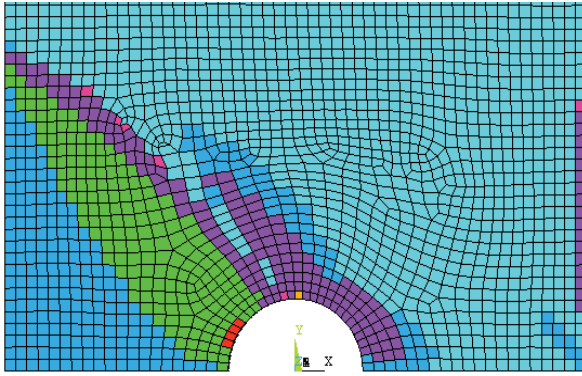
- İlk hasar oluşumu tüm takviye açıları sayısal olarak matriks çekme hasarı şeklindedir. Ancak aksenal yüklemeye dik doğrultuda takviye dışında bu hasar yıkıcı hasar olmadığından dolayı daha sonra yük artışına bağlı olarak son hasarlar fiber çekme ve fiber matriks kayma hasarı şeklinde elde edilmiştir. $\theta = 90^\circ$ olduğunda ise hasar tipi matriks hasarı şeklinde bulunmuştur.
- ANSYS sonlu eleman programında APDL kodları kullanılarak yapılan ilerlemeli hasar analizi sonucunda deneysel hasar yükleri ve tipleriyle elde edilen uyumlu sonuçlar, farklı yüklemeye ve malzeme özelliklerindeki problemlere de kolaylıkla uygulanabileceğini göstermiştir. Böylelikle modelleme yapılarak birçok problem için sayısal hasar öngörülerini sunulabilir.



[30°]₄; Sayısal hasar yükü=651.091 N.



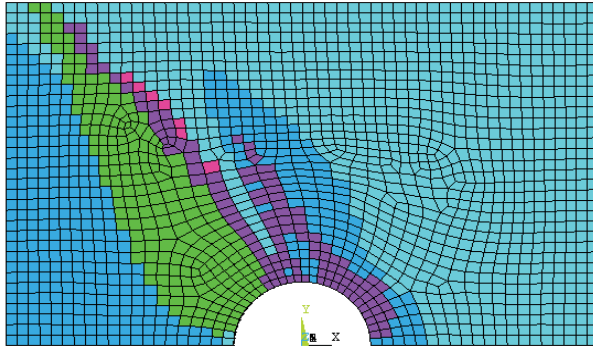
Deneysel hasar yükü=640.776 N.



[45°]₄; Sayısal hasar yükü=717.751 N.



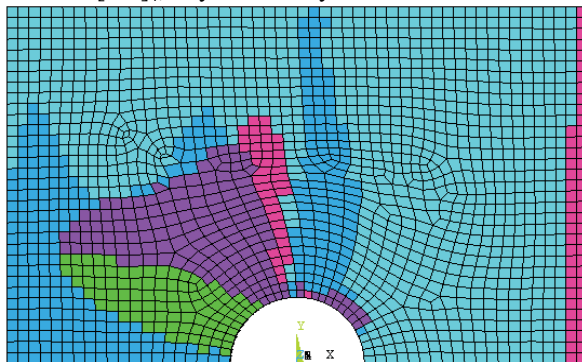
Deneysel hasar yükü=666.621 N.



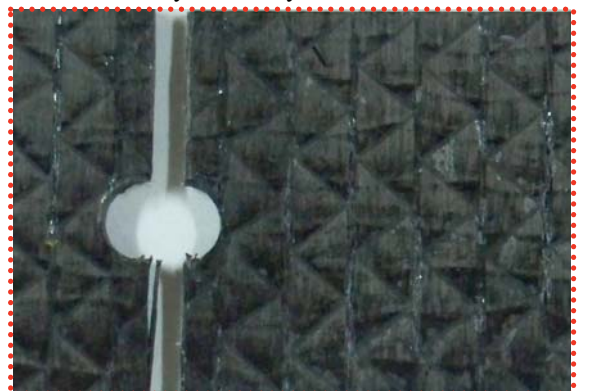
[60°]₄; Sayısal hasar yükü=512.679 N.



Deneysel hasar yükü=467.483 N.

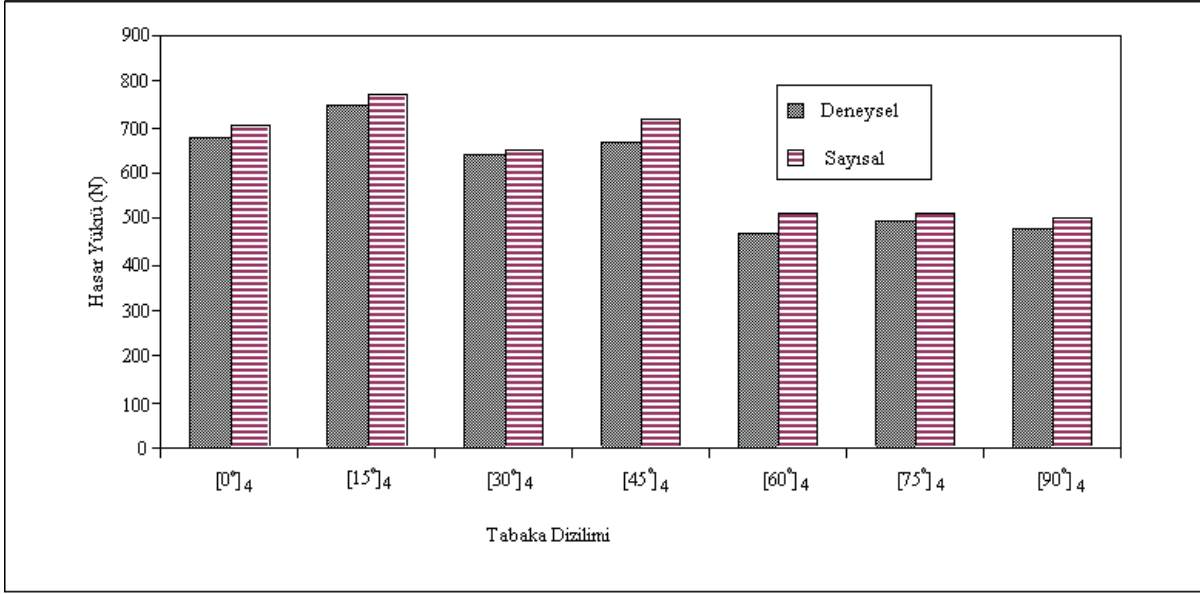


[90°]₄; Sayısal hasar yükü=502.397 N.



Deneysel hasar yükü=475.967 N.

Şekil 5. Farklı tabaka dizimleri için sayısal ve deneysel hasar yüklerinin ve hasar tiplerinin karşılaştırılması.



Şekil 6. Fiber takviye açısının değişimine göre sayısal ve deneysel hasar yüklerinin karşılaştırılması.

KAYNAKLAR

- Aktaş, A. 2005. "Bearing Strength of Carbon Epoxy Laminates under Static and Dynamic Loading" *Composite Structures*. 67 (4), 485-489.
- Aktaş, A. and Dirikolu, M. H. 2004. "An Experimental and Numerical Investigation of Strength Characteristics of Carbon-Epoxy Pinned-Joint Plates" *Composites Science and Technology*. 64 (10-11), 1605-1611.
- ANSYS, 2007. ANSYS 11.0 Academic Teaching Introductory Help Menu.
- Camanho, P. P. and Matthews, F. L. 1997. "Stress Analysis and Strength Prediction of Mechanically Fastened Joints in FRP : A Review" *Composites*. 28 (6), 529- 547.
- Dursun, T. ve Özbay, M. 2008. "Tabakalı Kompozit Levhalarda Hasar İlerleme Modellemesi" *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*. 23 (1), 65-68.
- Echavarría, C., Haller, P. and Salenikovich, A. 2007. "Analytical Study of a Pin-Loaded Hole in Elastic Orthotropic Plates" *Composite Structures*. 79 (1), 107-112.
- İçten, B.,M. and Sayman, O. 2003. "Failure Analysis of Pin-Loaded Aluminum-Glass-Epoxy Sandwich Composite Plates" *Composites Science and Technology*. 63 (5), 727-737.
- İçten, B.,M. and Karakuzu, R. 2002. "Progressive Failure Analysis of Pin-Loaded Carbon-Epoxy Woven Composite Plates" *Composites Science and Technology*. 62 (9), 1259-1271.
- Karakuzu, R., Gülem, T. and İçten, B. M. 2006. "Failure Analysis of Woven Laminated Glass-Vinylester Composites with Pin-Loaded Hole" *Composite Structures*. 72 (1), 27-32.
- McCarthy, M., A., McCarthy, C., T., Lawlor, V., P. and Stanley, W. F. 2005. "Three-Dimensional Finite Element Analysis of Single-Bolt, Single-Lap Composite Bolted Joints: Part I-Model Development and Validation" *Composite Structures* 71 (2), 140-158.
- Okutan, B. and Karakuzu, R. 2003. "The Strength of Pinned Joints in Laminated Composites" *Composites Science and Technology*. 63 (6), 893-905.
- Tserpes, K.I. Papanikos, P. and Kermanidis, T.H. 2001. "A Three Dimensional Progressive Damage Model for Bolted Joints in Composite Laminates Subjected to Tensile Loading" *Fatigue Fracture Engineering Materials and Structures*. 24 (10), 663- 675.
- Whitworth, H.,A., Othieno, M. and Barton, O. 2003. "Failure Analysis of Composite Pin Loaded Joints" *Composite Structures*. 59 (2), 261-266.