

Dairesel delikli kompozit levhalarda gerilme yığılmalarının incelenmesi

Serdar KARAKILÇIK¹, Mahmut ÖZBAY¹, Hamit ADİN^{*2}

¹Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Müh. Bölümü, Ankara

²Batman Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Müh. Bölümü, Batman

Makale Gönderme Tarihi: 10.02.2016

Makale Kabul Tarihi: 10.04.2016

Öz

Bu çalışmada, tek eksenli gerilmeye maruz düzlemsel olarak yüklenmiş ve ortasında dairesel delik bulunan kompozit levhalarda delik kenarlarında meydana gelen gerilme yığılmaları hesaplanmıştır. Hesaplamalarda dört tabakalı Grafit/Epoksi kompozit levha kullanılmıştır. Gerilme yığılması hesaplamaları Sonlu Elemanlar Analizi kullanılarak yapılmıştır. Sonlu Elemanlar Analizi ANSYS(v.12.01) yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Gerilme yığılmalarını doğru olarak hesaplayabilmek için ağ yapısının etkinliği yakınsama testi yapılarak belirlenmiştir. Delik çevresindeki etkin eleman sayısı belirlenerek ağ yapısı her bir model için oluşturulmuştur. Maksimum gerilme bulunmuş ve ortalama gerilmeye bölünerek gerilme yığılma faktörü hesaplanmıştır. Bulunan sonuçlar literatürde yer alan sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca, fiber takviye açısının ve levha genişliğinin gerilme yığılmalarına olan etkisi incelenmiştir. Fiber açısının 45⁰ civarında tutulması, gerilme yığılması açısından büyük avantaj sağlamıştır. Sonuçta, takviye açısı ve levha genişliği/delik çapı oranı arttıkça gerilme yığılmasının azaldığı görülmüştür. Gerilme yığılması azalırken, çekme eksenindeki Elastisite Modülü de düştüğünden dolayı malzemenin mukavemeti azalmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kompozit malzemeler; Gerilme, Gerilme yığılması; Fiber takviye açısı; Ansys;

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Hamit ADİN. hamit.adin@batman.edu.tr; Tel: (0488) 2173553

Giriş

Kompozit malzemeler hafifliği, yüksek mukavemeti, korozyon direnci, düşük ısı iletimi ve rijitliğinden dolayı havacılık endüstrisinde, otomotiv endüstrisinde ve deniz taşıtları gibi birçok alanda kullanılmaktadır (Sleight, 1999). Farklı özelliklerde tabakaların bir araya getirilmesi ile tabakalı kompozit malzemeler oluşur. Tabakalı kompozit malzemelerde fiber takviye açısına göre mekanik özellikler farklılık göstermektedir. Böylece yükleme tipine uygun bir fiber dizilimi sağlanmasına olanak sunmaktadır. Reçine esaslı tabakalı kompozit malzemeler lineer elastik özellikte olup gevrek kırılmaya uğramaktadır. Kompozit malzemeler yüksek mukavemet değerlerine sahip olmalarına karşın gevrek ve anizotrop özelliklerinden dolayı gerilme yığılmalarına karşı hassastır (Dursun ve Özbay, 2008). Bu nedenle yapının geometrik süreksizliklerinin gerilme yığılmalarını ve hasarı nasıl etkileyebileceğini hesaplamak gerekir (Chang ve Chang, 1991).

Kompozit levhalarda dairesel deliklerin çevresindeki gerilme yığılmaları çeşitli araştırmacılar tarafından incelenmiştir. Lekhnitskii (1968), farklı sınır ve yükleme koşulları için sonsuz genişlikteki plakalarda delik kenarlarında oluşan gerilme dağılımlarını analitik olarak incelemiştir. Whitworth ve Mahase (1999), Lekhnitskii'nin (1968) anizotropik elastisite teorisini kullanarak ortasında dairesel delik bulunan kompozit malzemeleri eksenel yüklemeyerek analiz yapmışlardır. Yük doğrultusuna göre fiber açısındaki artışın gerilme konsantrasyonunu azalttığını ve kırılmaların; gerilme yığılmasının maksimuma ulaştığı yerlerde olduğunu gözlemlemişlerdir. Kaltakçı (1996), çekme ve basma yüklü dairesel delikli plakalarda gerilme yığılmalarını analiz etmiştir. Gerilmenin fiber açısına bağlı olarak değiştiğini ve fiber yönünde çekme yükü uygulandığında gerilme yığılmalarının maksimum olduğunu, açı arttıkça gerilme yığılmalarının azaldığını göstermiştir.

Özer ve Özbay (2004), düzlemsel yüklü dairesel delikli kompozit plakada elastik gerilme analizini sonlu elemanlar yöntemi kullanarak yapmışlardır. Dairesel deliği bulunan plak bir kenarı boyunca üniform düzlemsel yüklemeye maruz bırakılmış ve deliğin kenarları boyunca herhangi bir yük uygulanmamıştır. Xu, Lee ve Lu (2004), delikli ve deliksiz kompozit plakalarda gerilme analizlerini sonlu elemanlar metodunu kullanarak incelemiştir. Deliğin varlığının gerilme dağılımını tamamen değiştirdiğini göstermişlerdir. Arslan, Çelik ve Arslan (2002), kompozit plakalarda kare delik etrafındaki gerilme dağılımlarını tespit etmişlerdir. Örçen, Gür ve Solmaz (2009), ortasında eliptik delik bulunan dört ortotropik tabakalı çelik fiber takviyeli kompozit levhalarda, plastik bölgelerin yayılışı ve gerilme analizini Sonlu Elemanlar Metoduyla yapmışlardır. Sonuçta plastik bölgeler plakanın alt ve üst yüzeylerinde oluşmuştur.

Taubal, Karama ve Lorrain (2005), elektronik ölçüm cihazı ile temassız olarak dairesel delikli kompozit plakalarda gerilme yığılmalarını ve çekme şekil değişimini araştırmışlardır. Deformasyonları mikrometre hassasiyetinde tespit ederek gerilme yığılmalarını ortaya çıkarmışlardır. Deneysel sonuçlar, Lekhnitskii (1968) sonuçları ve nümerik sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Deliğin yakınında deneysel gerilmeler, analitik ve sayısal gerilmelerden düşük çıkarken, örgü kumaş kompozitlerde ise uygun sonuçlar elde edilmiştir.

Dursun ve Özbay (2008), tabakalı kompozit levhaların kopma dayanımını tespit etmek amacıyla sonlu eleman analiz uygulamalarına göre hasar ilerleme modeli geliştirmişlerdir. Ortasında delik bulunan düzlemsel yüklü kompozit levhaların kopma dayanımı hesaplanmış ve sonuçların literatürdeki deneysel sonuçlara çok yakın olduğu görülmüştür.

İçten ve Sayman (2003), kompozit plakalarda pin yüklemelerinde (kompozit genişliği)/(delik çapı) (W/D) oranına, (delik merkezi parça ucu

mesafesi)/(delik çapı) (E/D) oranına ve fiber açısına bağlı hasar analizi yapmışlardır. W/D=3 ve E/D=1 oranları için delik kenarlarından çekme yönüne paralel yırtılmalar, E/D=3 ve W/D=1 oranları için delik ekseninde çekme yönüne dik kopma ve E/D=1 ve W/D=2 oranları olduğunda delik kenarındaki plastik deformasyonları tespit etmişlerdir.

Fan ve Wu (1988), anizotropik kompozit plakalarda birden çok delik bulunması halinde delik mesafelerinin gerilme dağılımlarını nasıl etkilediklerini araştırmışlardır. Sonuçta iki komşu deliğin aralarındaki mesafenin delik yarıçapına oranının 4.5'ten küçük olması durumunda ($L/R \leq 4.5$) oluşan maksimum gerilmenin Lekhnitskii (1968)'nin çözümü ile farklılıklar gösterdiğini, $L/R > 4.5$ olması durumunda ise farklılıkların ihmal edilebilir seviyede olduğunu göstermişlerdir.

Çalışmanın Önemi

Kompozit malzemeler birbirleriyle ve diğer malzemelerle vida, pim v.b değişik metotlarla bağlanmaktadır. Kompozit plakaların heterojen ve anizotropik yapısından dolayı plakada açılan deliğin kenarlarında süreksizlik, karmaşık gerilme dağılımları ve gerilme yığılmaları meydana gelmektedir. Bu nedenle çalışmamızda L boyunda, W genişliğinde, ortasında D çapında dairesel delik bulunan kompozit levha tek eksenli çekmeye maruz bırakılarak gerilme yığılması incelenmiştir. Fiber takviye açısının ve Levha genişliği/Delik çapı oranının gerilme yığılması faktörüne etkisi araştırılmış, literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Gerilme Yığılması Faktörü

Plakaların birbirlerine bağlanması için plakada delik açmak gerekir. Kompozit malzemelerde delik etrafında oluşan gerilme yığılması, kompozit olmayan malzemelere göre daha fazladır. Bu kompozit malzeme kullanımında sorun oluşturur.

Delik çevresindeki gerilme dağılımı ve gerilme yığılması; lineer elastik analiz, sonlu elemanlar yöntemi ve deneysel metotlarla bulunur.

Deneysel metotlarla deformasyonlar ölçülür ve gerilme dağılımları, kırılma şekilleri belirlenip teorik değerlerle karşılaştırılır.

Lekhnitskii (1968), farklı sınır şartları ve yükleme durumları için sonsuz genişlikteki anizotropik plakalarda eliptik ve dairesel delik kenarındaki gerilme dağılımını analitik olarak incelemiştir. Lekhnitskii (1968), düzlemsel yüklü ortasında dairesel delik bulunan kompozit plakalardaki gerilme yığılması faktörünü (K_T) aşağıdaki şekilde ifade etmiştir.

$$K_T = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_n} \quad (1)$$

Burada σ_{\max} delik kenarında oluşan maksimum gerilmeyi, σ_n ise delikli plakada ortalama gerilmeyi ifade etmektedir. Sonsuz genişlikte ortası delikli ortotropik kompozit malzemeye y yönünde bir yükleme yapıldığında gerilme yığılması aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir (Nuismer ve Whitney, 1974). Burada E_{11} eksenel Elastisite Modülü, E_{22} ise enine Elastisite Modülüdür.

$$K_{T=1} = \sqrt{2 + \left(\frac{E_{11}}{E_{22}} - \sigma_{12} \right) + \frac{E_{11}}{G_{12}}} \quad (2)$$

Delik ekseninde herhangi bir x noktasındaki gerilme ise aşağıdaki denklem kullanılarak bulunabilir.

$$\sigma_x(x, 0) = \frac{\sigma_n}{2} \left[2 + \left(\frac{R}{x} \right)^2 + 3 \left(\frac{R}{x} \right)^4 \right] - (K_T - 3) \left[5 \left(\frac{R}{x} \right)^6 - 7 \left(\frac{R}{x} \right)^8 \right] \quad (3)$$

Burada K_T^∞ sonsuz genişlikte ortotropik kompozit bir plakadaki gerilme yığılma faktörünü ifade etmektedir. Belirli bir genişlikteki levhada dairesel delik için gerilme aşağıdaki denklem verilmiştir (Tan, 1988).

$$\frac{K_T^\infty}{K_T} = \frac{3(1-2R/W)}{2+(1-2R/W)^3} + 0.5 \left(\frac{2R}{W} M \right)^6 (K_T - 3) \left(1 - \left(\frac{2R}{W} M \right)^2 \right) \quad (4)$$

Burada R daire yarıçapını, W levha genişliğini, K_T sonlu genişlikteki plakanın gerilme yığılma

faktörünü belirtmektedir. M ise aşağıdaki denklemlerle ifade edilmektedir.

$$M^2 = \frac{\sqrt{1-8 \left[\frac{3(1-2R/W)}{2+(1-2R/W)^3} - 1 \right]} - 1}{2(2R/W)^2} \quad (5)$$

Whitney ve Nuismer (1975) nokta gerilme kriteri ve ortalama gerilme kriterlerini tanımlamışlardır. Burada delikten d_0 kadar mesafede gerilme, deliksiz plakada oluşan gerilmeye (σ_0) eşit veya büyük olduğu kabul edilmiştir. Nokta gerilme kriteri aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir;

$$\sigma_y = (x, 0)_{x=R+d_0} \geq \sigma_0 \quad (6)$$

Bu eşitliğe, denklem (3) uygulandığında, aşağıdaki denklem yazılabilir.

$$\frac{\sigma_N^\infty}{\sigma_0} = 2 / \{ 2 + \xi_1^2 + 3\xi_1^4 - (K_T^\infty - 3)(5\xi_1^6 - 7\xi_1^8) \} \quad (7)$$

Burada σ_N^∞ sonsuz genişlikli plakanın ortalama gerilmesini ifade etmektedir. Ayrıca burada

$$\xi_1 = R / (R + d_0) \quad (8)$$

dır.

İkinci kriter ise ortalama gerilme kriteridir. Buna göre delik kenarından enine doğru a_0 mesafesinde oluşacak ortalama gerilme deliksiz plakadaki gerilmeye (σ_0) eşit veya ondan büyüktür.

$$\frac{1}{a} = \int_R^{R+a_0} \sigma_y(x, 0) dx \geq \sigma_0 \quad (9)$$

Bu eşitliğe denklem (3) uygulandığında, aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\frac{\sigma_N^\infty}{\sigma_0} = \left(\frac{2(1-\xi_2)}{2-\xi_2^2-3\xi_2^4+(K_T^\infty-3)(\xi_2^6-3\xi_2^8)} \right) \quad (10)$$

Burada;

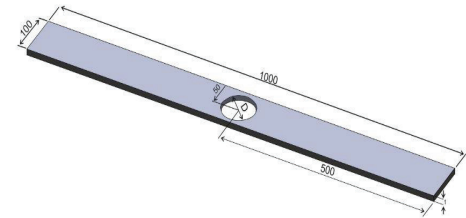
$$\xi_2 = R / (R + a_0) \quad (11)$$

dır.

Ortalama gerilme deliksiz plakada oluşacak ortalama gerilmeye eşit veya ondan büyük ise kopma olacaktır, küçük ise kopma olmayacaktır. Burada a_0 ve d_0 değerleri, levha geometrisinden ve gerilme dağılımından bağımsız olduğu belirtilmiştir (Nuismer ve Whitney, 1975).

Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Gerilme Yığılmalarının İncelenmesi

Çalışmamızda Şekil 1’de görülen ortasında D çapında delik bulunan 4 tabakalı Grafit/Epoksi kompozit levha incelenmiştir. Levha sol tarafından ankastre edilerek sağ tarafından 1 MPa’lık tek eksenli çekme gerilmesine maruz bırakılmıştır. Öncelikle delik çapı 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm, 60 mm, 70 mm, 80 mm ve 90 mm olacak şekilde 9 ayrı model oluşturulmuştur. Fiber takviye açısının gerilme yığılması faktörüne etkisini araştırmak için 0^0 , 5^0 , 10^0 , 15^0 , 20^0 , 25^0 , 30^0 , 35^0 , 40^0 , 45^0 , 50^0 , 55^0 , 60^0 , 65^0 , 70^0 , 75^0 , 80^0 , 85^0 ve 90^0 ’lik fiber takviye açılı 19 farklı model oluşturulmuştur. 0^0 fiber yönü numunelerin eksenine paralel kabul edilmiştir. Levhaya ait mekanik değerler Tablo 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Çalışmada kullanılan kompozit levha

Tablo 1. T300/5208 malzemesi için mühendislik sabitleri (Özer ve Özbay, 2004)

Fiber yönündeki Elastisite Modülü	Fibere dik yöndeki Elastisite Modülü
$E_1=141$ GPa	$E_2=9.44$ GPa
Kayma Modülü	Poisson Oranı
$G_{12}=5.18$ GPa	$\nu_{12}=0.31$

Dairesel delikli kompozit levhalarda gerilme yığılmasının incelenmesi

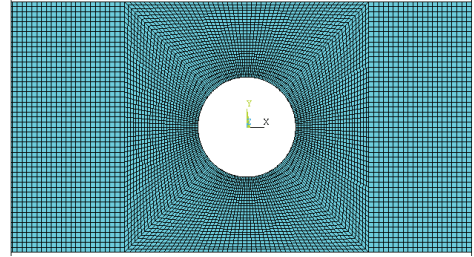
Gerilme analizini yapmak için Sonlu elemanlar yöntemlerinden biri olan ANSYS (v.12.01) paket programı tercih edilmiştir. Modellemeler Shell 99 elemanı kullanılarak yapılmıştır. Gerilme yığılmasını doğru olarak hesaplayabilmek için ağ yapısının etkinliği yakınsama testi yapılarak belirlenmiştir. Delik çevresindeki etkin eleman sayısı belirlenerek ağ yapısı her bir model için oluşturulmuştur. Malzemede oluşan maksimum gerilme bulunmuş ve ortalama gerilmeye bölünerek gerilme yığılması faktörü hesaplanmıştır. Bulunan değerler, Lekhnitskii'nin (1968) analitik yöntemiyle hesaplanan değerlerle karşılaştırılmıştır. Ortasında 0.04 m çapında delik bulunan levha için yapılan yakınsama testi sonucu Şekil 2'de gösterilmiştir. Şekil 2'de görüldüğü gibi delik çevresindeki eleman sayısı 10'dan 150'ye çıkarılınca K_T 'nin değeri %90 artmaktadır. Eleman sayısı 200 olduğunda çözüm yakınsamaktadır. Bu nedenle delik çevresindeki eleman sayısı 200 olarak alınmıştır. Bu model için oluşturulan ağ yapısı (mesh) ise Şekil 3'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Gerilme yığılması faktörünün delik çevresindeki eleman sayısına göre değişimi.

$D=0.04$ m delikli kompozit levha için oluşturulan sonlu eleman ağ yapısı yapılan analizler sonucunda, denklem (1) kullanılarak gerilme yığılması faktörü hesaplanmıştır. Analizle bulunan maksimum gerilme değeri ortalama gerilmeye bölünerek gerilme yığılması faktörü bulunmuştur.

Aşağıda tablo 2, 3, 4, 5 ve 6'da sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen sonuçlar ve analitik olarak hesaplanan değerler, 0^0 'den 90^0 'ye kadar değişen fiber takviye açıları için literatürde yer alan sonuçların aritmetik ortalamaları ile karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.



Şekil 3. $D=0.04$ m delikli kompozit levha için oluşturulan sonlu eleman ağ yapısı

Aşağıdaki tablolarda değişen delik çapları için farklı fiber takviye açılarına bağlı olarak gerilme yığılması faktöründeki değişimler gösterilmiştir. Tablo 2, 3, 4, 5 ve 6 dikkatli bir şekilde incelenirse elde edilen sonuçların tablolarda belirtilen literatür sonuçlarına çok yakın olduğu görülmektedir. Ayrıca fiber takviye açısının artmasıyla gerilme yığılma faktörünün bariz bir şekilde azaldığı görülmüştür. Fiber takviye açısının küçük delik çaplarında daha fazla etkili olduğu rahatlıkla görülebilir.

Tablo 2. Ortasında 0.09 m ve 0.08 m çapında delik bulunan kompozit levhalar için 1 MPa'lık çekme gerilmesi altında yapılan analiz sonuçları ve hesaplanan değerler.

S.No	θ	L=1 m, W=0.1 m, t=1 mm, P=1 MPa					
		D=0.09 m			D=0.08 m		
		ANSYS		Nuismer (1975), Whitney (1975), Tan (1988)	ANSYS		Nuismer(1975), Whitney(1975), Tan (1988)
		σ_{\max} (MPa)	K_T	K_T	σ_{\max} (MPa)	K_T	K_T
1	0°	25.9	25.9	23.34	13.8	13.8	13.73
2	5°	25.3	25.3	23.14	13.5	13.5	13.48
3	10°	25	25	22.67	13.4	13.4	12.90
4	15°	23.6	23.6	22.15	12.7	12.7	12.27
5	20°	22.3	22.3	21.66	11.7	11.7	11.72
6	25°	21.5	21.5	21.24	11.1	11.1	11.27
7	30°	20.9	20.9	20.88	10.6	10.6	10.90
8	35°	20.4	20.4	20.58	10.4	10.4	10.60
9	40°	20.2	20.2	20.33	10.2	10.2	10.35
10	45°	20	20	20.12	10	10	10.15
11	50°	19.9	19.9	19.94	9.9	9.9	9.98
12	55°	19.8	19.8	19.79	9.82	9.82	9.83
13	60°	19.7	19.7	19.65	9.74	9.74	9.71
14	65°	19.6	19.6	19.52	9.67	9.67	9.59
15	70°	19.6	19.6	19.41	9.6	9.6	9.48
16	75°	19.6	19.6	19.29	9.56	9.56	9.38
17	80°	19.5	19.5	19.19	9.53	9.53	9.29
18	85°	19.5	19.5	19.11	9.52	9.52	9.22
19	90°	19.6	19.6	19.08	13.8	9.53	9.19

Dairesel delikli kompozit levhalarda gerilme yığılmalarının incelenmesi

Tablo 3. Ortasında 0.07 m ve 0.06 m çapında delik bulunan kompozit levhalar için 1 MPa'lık çekme gerilmesi altında yapılan analiz sonuçları ve hesaplanan değerler.

S.No	θ	L=1 m, W=0.1 m, t=1 mm, P=1 MPa					
		D=0.07 m			D=0.06 m		
		ANSYS		Nuismer (1975), Whitney (1975), Tan (1988)	ANSYS		Nuismer (1975), Whitney (1975), Tan (1988)
		σ_{\max} (MPa)	K_T	K_T	σ_{\max} (MPa)	K_T	K_T
1	0°	10.52	10.52	10.81	9.12	9.12	9.49
2	5°	10.2	10.2	10.48	8.87	8.87	9.10
3	10°	9.84	9.84	9.77	7.68	7.68	8.27
4	15°	9.81	9.81	9.05	6.56	6.56	7.46
5	20°	9.43	9.43	8.44	6.26	6.26	6.82
6	25°	8.76	8.76	7.96	5.89	5.89	6.33
7	30°	7.99	7.99	7.59	5.57	5.57	5.95
8	35°	7.26	7.26	7.29	5.68	5.68	5.66
9	40°	6.75	6.75	7.05	5.37	5.37	5.44
10	45°	6.52	6.52	6.86	5.05	5.05	5.25
11	50°	6.42	6.42	6.70	5	5	5.11
12	55°	6.38	6.38	6.56	4.95	4.95	4.98
13	60°	6.36	6.36	6.45	4.9	4.9	4.87
14	65°	6.37	6.37	6.34	4.85	4.85	4.78
15	70°	6.39	6.39	6.25	4.79	4.79	4.69
16	75°	6.42	6.42	6.16	4.75	4.75	4.61
17	80°	6.44	6.44	6.08	4.72	4.72	4.54
18	85°	6.45	6.45	6.01	4.7	4.7	4.49
19	90°	6.46	6.46	5.99	4.72	4.72	4.46

Tablo 4. Ortasında 0.05 m ve 0.04 m çapında delik bulunan kompozit levhalar için 1MPa'lık çekme gerilmesi altında yapılan analiz sonuçları ve hesaplanan değerler.

S.No	θ	L=1 m, W=0.1 m, t=1 mm, P=1 MPa					
		D=0.05 m			D=0.04 m		
		ANSYS		Nuismer (1975), Whitney (1975), Tan (1988)	ANSYS		Nuismer (1975), Whitney (1975), Tan (1988)
		σ_{\max} (MPa)	K_T	K_T	σ_{\max} (MPa)	K_T	K_T
1	0°	8.42	8.42	8.72	7.63	7.63	8.11
2	5°	7.56	7.56	8.26	7.14	7.14	7.63
3	10°	7.12	7.12	7.35	6.04	6.04	6.69
4	15°	6.25	6.25	6.50	5.13	5.13	5.84
5	20°	6.12	6.12	5.85	4.8	4.8	5.20
6	25°	5.84	5.84	5.36	4.3	4.3	4.74
7	30°	5.48	5.48	5.00	4.19	4.19	4.39
8	35°	5.02	5.02	4.72	4.02	4.02	4.13
9	40°	4.59	4.59	4.51	3.99	3.99	3.93
10	45°	4.21	4.21	4.34	3.92	3.92	3.77
11	50°	3.93	3.93	4.20	3.85	3.85	3.65
12	55°	3.82	3.82	4.09	3.67	3.67	3.54
13	60°	3.79	3.79	3.99	3.65	3.65	3.45
14	65°	3.79	3.79	3.90	3.53	3.53	3.37
15	70°	3.8	3.8	3.82	3.39	3.39	3.30
16	75°	3.82	3.82	3.75	3.21	3.21	3.24
17	80°	3.84	3.84	3.69	3.24	3.24	3.18
18	85°	3.84	3.84	3.64	3.26	3.26	3.13
19	90°	3.85	3.85	3.62	3.24	3.24	3.11

Dairesel delikli kompozit levhalarda gerilme yığılmalarının incelenmesi

Tablo 5. Ortasında 0.03 m ve 0.02 m çapında delik bulunan kompozit levhalar için 1 MPa'lık çekme gerilmesi altında yapılan analiz sonuçları ve hesaplanan değerler.

S.No	θ	L=1 m, W=0.1 m, t=1 mm, P=1 MPa					
		D=0.03 m			D=0.02 m		
		ANSYS	Nuismer (1975), Whitney (1975), Tan (1988)		ANSYS	Nuismer (1975), Whitney (1975), Tan (1988)	
		σ_{max} (MPa)	K_T	K_T	σ_{max} (MPa)	K_T	K_T
1	0°	7.14	7.14	7.58	6.38	6.38	7.17
2	5°	6.52	6.52	7.11	6.12	6.12	6.72
3	10°	5.35	5.35	6.19	5.19	5.19	5.84
4	15°	4.58	4.58	5.38	4.42	4.42	5.06
5	20°	4.32	4.32	4.77	4.33	4.33	4.48
6	25°	4.24	4.24	4.32	4.25	4.25	4.06
7	30°	4.22	4.22	4.00	4.2	4.2	3.76
8	35°	3.91	3.91	3.76	4	4	3.53
9	40°	3.84	3.84	3.57	3.97	3.97	3.35
10	45°	3.66	3.66	3.42	3.89	3.89	3.21
11	50°	3.57	3.57	3.30	3.88	3.88	3.10
12	55°	3.47	3.47	3.21	3.66	3.66	3.01
13	60°	3.44	3.44	3.12	3.62	3.62	2.93
14	65°	3.41	3.41	3.05	3.56	3.56	2.86
15	70°	3.39	3.39	2.98	3.4	3.4	2.80
16	75°	3.37	3.37	2.92	3.25	3.25	2.74
17	80°	3.36	3.36	2.87	3.25	3.25	2.69
18	85°	3.34	3.34	2.83	3.24	3.24	2.65
19	90°	3.33	3.33	2.81	3.24	3.24	2.63

Tablo 6. Ortasında 0.01 m çapında delik bulunan kompozit levhalar için 1 MPa'lık çekme gerilmesi altında yapılan analiz sonuçları ve hesaplanan değerler.

S.No	θ	L=1 m, W=0.1 m, t=1 mm, P=1 MPa, t=1 mm, P=1 MPa		
		D=0.01 m		
		ANSYS		Nuismer (1975), Whitney(1975), Tan (1988)
		σ_{max} (Pa)	K_T	K_T
1	0°	6.27	6.27	6.93
2	5°	5.95	5.95	6.50
3	10°	5.14	5.14	5.65
4	15°	4.69	4.69	4.89
5	20°	4.21	4.21	4.33
6	25°	3.94	3.94	3.93
7	30°	3.86	3.86	3.63
8	35°	3.73	3.73	3.41
9	40°	3.66	3.66	3.24
10	45°	3.57	3.57	3.10
11	50°	3.56	3.56	2.99
12	55°	3.28	3.28	2.90
13	60°	3	3	2.83
14	65°	3.02	3.02	2.76
15	70°	3.01	3.01	2.70
16	75°	3	3	2.65
17	80°	2.96	2.96	2.60
18	85°	2.9	2.9	2.56
19	90°	2.92	2.92	2.54

Sonuçlar ve Tartışma

Yukarıda verilen analiz sonuçlarına ilişkin fiber takviye açısının ve delik çapının gerilme yığılmasına etkileri iki başlık halinde aşağıda değerlendirilmiştir.

Fiber Takviye Açısının Gerilme Yığılması Faktörüne Etkisi

Her bir delik çapı için yukarıda verilen analiz sonuçları fiber takviye açısına göre gerilme yığılması faktöründeki değişim grafiği olarak aşağıda gösterilmiştir. Yapılan analizlerin sonuçları, Nuismer ve Whitney (1974, 1975) ve Tan (1988)'in bulunduğu sonuçlar ile Lekhnitskii (1968)'nin analitik çözüm yöntemi ile bulunduğu değerler benzerdir. Analiz sonuçları Nuismer ve Whitney (1974, 1975) ve Tan (1988)'in bulunduğu sonuçlar ile yaklaşık olarak %95 oranında örtüşmüştür. Fiber takviye açısı arttıkça gerilme yığılması faktörü azaldığı görülmüştür. Özellikle 0°-45° fiber takviye açıları için gerilme yığılması faktörü hızla düşmüştür. 45°'den büyük fiber takviye açılarının gerilme yığılması üzerindeki etkisi giderek azalmıştır.

Delik çapı küçüldükçe fiber takviye açısının gerilme yığılması faktörü üzerindeki etkisinin daha da arttığı görülmüştür. Meydana gelen bu azalma ortalama gerilmedeki artış ile açıklanmaktadır. Çünkü çentik etkisi yapan deliğin boyutu arttığı zaman parçadaki net kesit alanı azalmaktadır. Kesit alanının azalması gerilme yığılma katsayısı formülünde paydada bulunan ortalama gerilme değeri arttırdığı için yığılma katsayısı değeri azalmaktadır. Şekil 4'teki a ve i şekilleri arasındaki fark değerlendirildiğinde; Şekil 4 a'da gerilme yığılmasındaki düşüş yaklaşık olarak %20 civarında iken, Şekil 4 i'de yaklaşık %50 oranında bir düşüş gözlenmiştir.

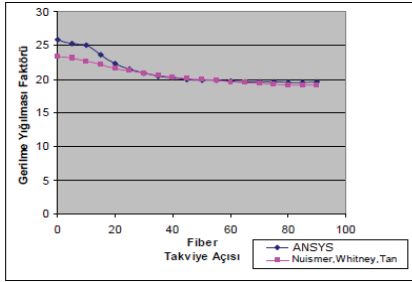
Delik Çapının Gerilme Yığılması Faktörüne Etkisi

Her bir fiber takviye açısı için verilen analiz sonuçları delik çapına göre gerilme yığılması faktöründeki değişim grafiği olarak Şekil 5'te gösterilmiştir. Yapılan analizlerin sonuçları, Nuismer ve Whitney (1974, 1975) ve Tan (1988)'in bulunduğu analitik sonuçlar ile benzerlik

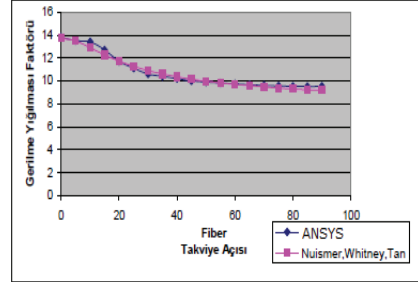
Dairesel delikli kompozit levhalarda gerilme yığılmasının incelenmesi

göstermiştir. Şekil 5'te levha Genişliği/Delik Çapı (W/D) oranı arttıkça gerilme yığılması faktörü düşmektedir. Ayrıca Levha Genişliği/Delik Çapı (W/D) oranı büyüdükçe gerilme yığılması faktöründeki etkisi giderek azalmıştır. W/D oranı 1.1–2.5 aralığında iken gerilme yığılması faktörü hızlı bir şekilde düşmüştür. Oranın 2.5'ten sonraki kısımda gerilme yığılması faktörü çok az değişmiştir.

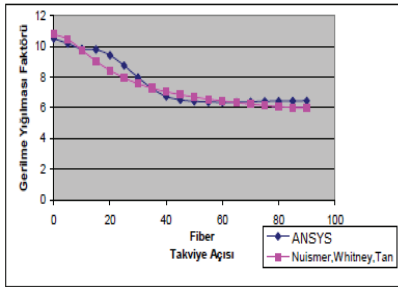
Çünkü kesit sürekliliğini bozan bölgelerde ve özellikle delik v.b. kesit süreksizlikleri çentik etkisi oluşturmakta ve gerilme yığılması meydana gelmesine neden olmaktadır. Bu nedenle çentik etkisi azaldığı için levha genişliği/delik çapı arttıkça gerilme yığılma faktörü azalmıştır. Bu faktörün azalması, plakanın mukavemetinin artması anlamına gelmektedir.



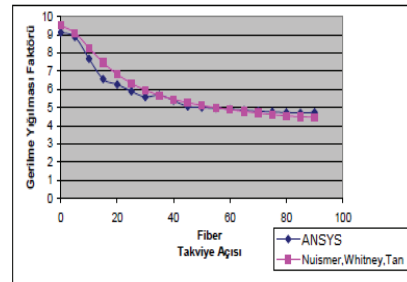
a) $D=0.09\ m$



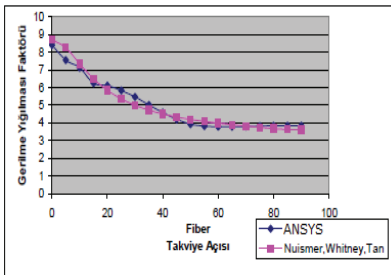
b) $D=0.08\ m$



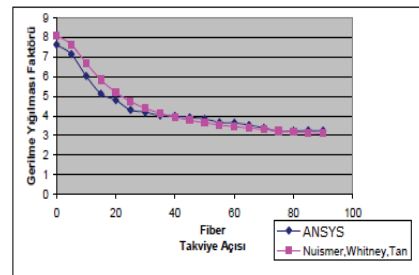
c) $D=0.07\ m$



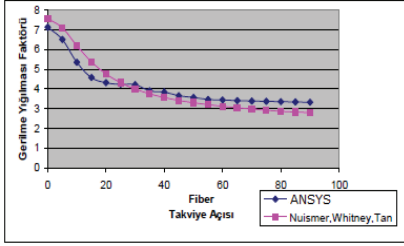
d) $D=0.06\ m$



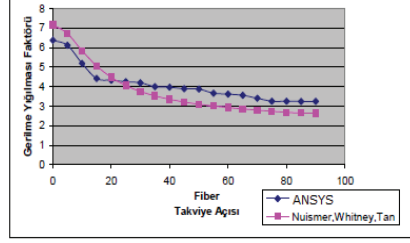
e) $D=0.05\ m$



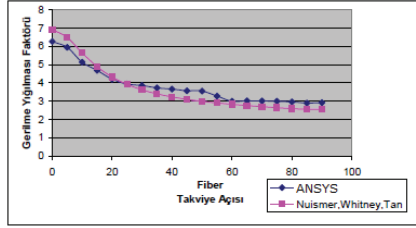
f) $D=0.04\ m$



g) $D=0.03\text{ m}$

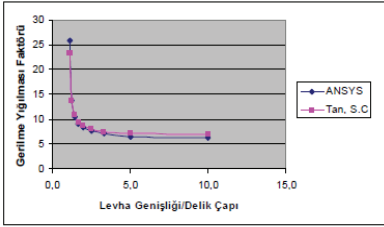


h) $D=0.02\text{ m}$

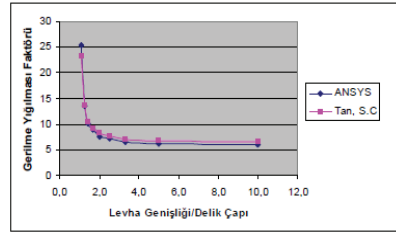


i) $D=0.01\text{ m}$

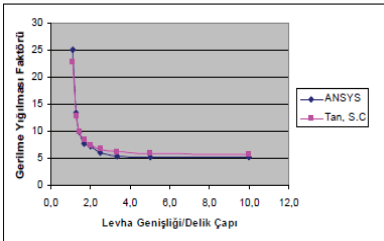
Şekil 4. Farklı çaptaki delikli kompozit levhalar için fiber takviye açısı-gerilme yığılması faktörü grafikleri



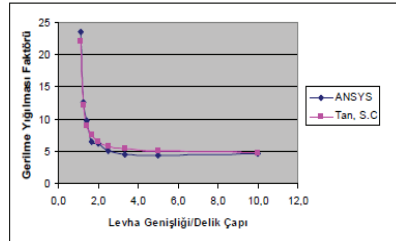
a) $\theta=0^{\circ}$



b) $\theta=5^{\circ}$

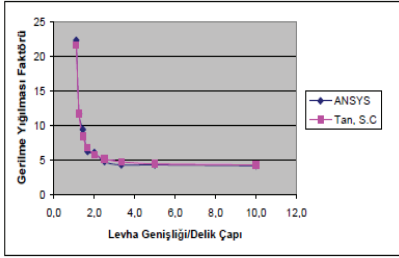


c) $\theta=10^{\circ}$

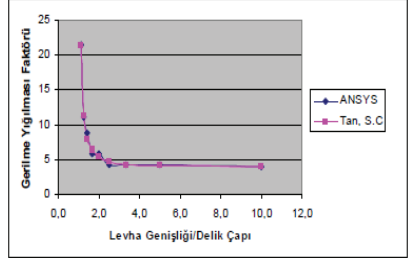


d) $\theta=15^{\circ}$

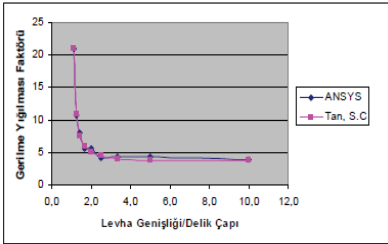
Dairesel delikli kompozit levhalarda gerilme yığılmasının incelenmesi



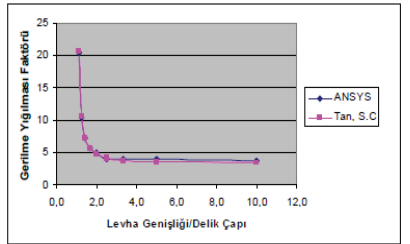
e) $\theta=20^0$



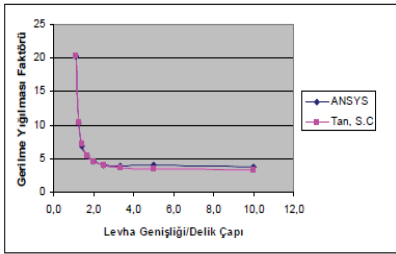
f) $\theta=25^0$



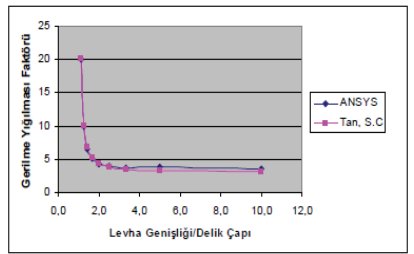
g) $\theta=30^0$



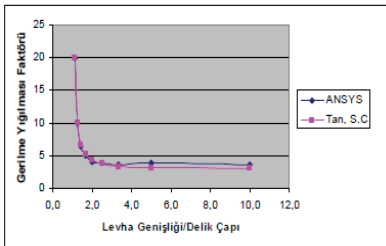
h) $\theta=35^0$



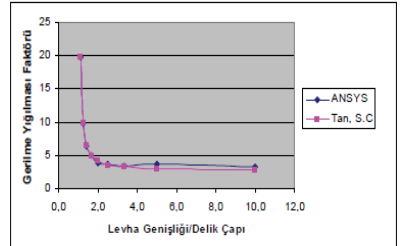
i) $\theta=40^0$



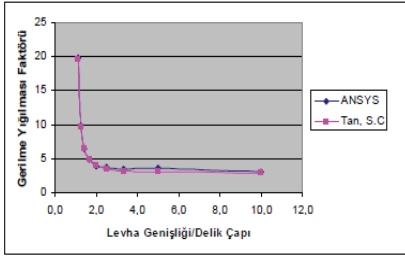
j) $\theta=45^0$



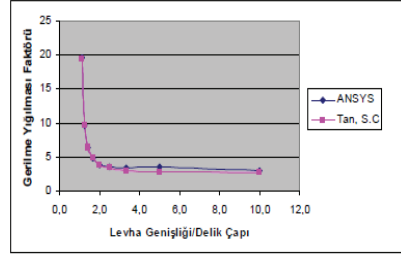
k) $\theta=50^0$



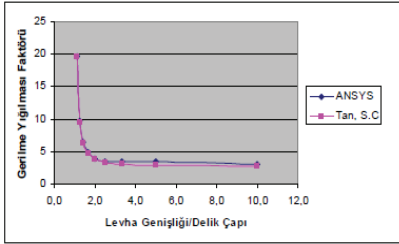
l) $\theta=55^0$



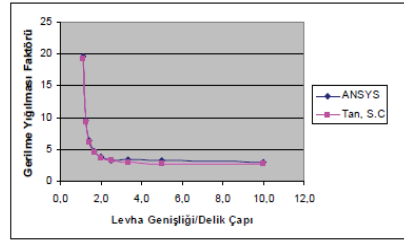
m) $\theta=60^0$



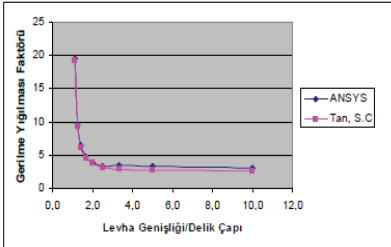
n) $\theta=65^0$



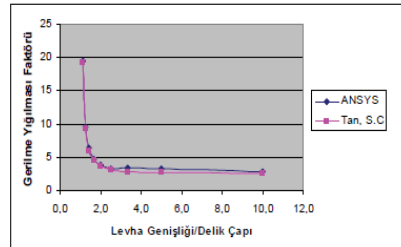
o) $\theta=70^0$



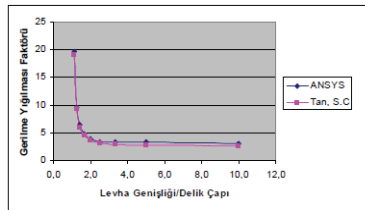
p) $\theta=75^0$



r) $\theta=80^0$



s) $\theta=85^0$



s) $\theta=90^0$

Şekil 5. Farklı takviye açılı dairesel delikli kompozit levhalarda levha genişliği/delik çapı-gerilme yığılması faktörü grafikleri

Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, ortasında dairesel delik bulunan düzlemsel yüklü kompozit levhalarda delik kenarlarında meydana gelen gerilme yığılmaları incelenmiş olup aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

Fiber takviye açısındaki artış gerilme yığılmasını düşürmüştür. Bu nedenle tasarım yapılırken gerilme yığılması ve mukavemet düşüşünün birlikte düşünülmesi gerektiği görülmüştür. Tasarımda, aksine ihtiyaç olmadıkça levha üzerindeki delik çapı, levha genişliğinin en fazla 2/5'i kadar olmalıdır. Daha büyük değerlerde gerilme yığılmasının hızla arttığı görülmüştür. Ayrıca, maksimum gerilmenin oluştuğu delik kenarlarında çatlama ve kopma riski yüksek olmaktadır.

Levha üzerinde tek bir delik yerine daha küçük çaplı iki komşu deliğin mukavemeti ne ölçüde değiştireceği, delik merkezleri arasındaki mesafelerin en uygun değerinin ne olacağı ve analitik çözümü mümkün olmayan durumlarda neler yapılabileceği, bu çalışmanın bir devamı olarak ele alınabileceği görülmüştür.

Kaynaklar

Sleight, D.W., (1999). "Progressive Failure Analysis Methodology for Laminated Composite Structures", Nasa.

Dursun, T., Özbay, M., (2008). "Tabakalı Kompozit Levhalarda Hasar İlerleme Modellemesi", Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 23, 1, 65-68.

Chang, K.F., Chang, K.Y., (1991) "Damage Tolerance of Laminated Composites Containing an Open Hole and Subjected to Tensile Loadings", *Journal of Composite Materials*, 25, 274 – 301.

Lekhnitskii, S.G., (1968). "Anisotropic Plates", Gordon and Breach Science Publishers, N.Y. USA, 245-250.

Whitworth, H.A., Mahase, H., (1999) "Failure of orthotropic plates containing a circular opening", *Composite Structures*, 46:53-57.

Kaltakçı, M.Y., (1996) "Stress Concentrations and Failure Criteria in Anisotropic Plates With Circular Holes Subjected to tension or compression", *Computers and Structures*, 61, 67-78.

Özer, D., Özbay, M., (2004). "Düzlemsel Yüklü Ortasında Dairesel Delik Bulunan Kompozit Plakta Oluşan Elastik Gerilmelerin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Analizi", *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 19, 1, 51-57.

Xu, X.D., Lee, H.P., Lu, C., (2004). "The Structural Intensities of Composite Plates With a Hole", *Composite Structures*, 65, 493-498.

Arslan, N., Çelik, M., Arslan, N., (2002). "Prediction of the elastic-Plastic behavior of thermo plastic composite laminated plates with square hole", *Composite Structures*, 55, 37-49.

Örçen, G., Gür, M., Solmaz, M.Y., (2009). "Eliptik Delikli Termoplastik Tabakalı Kompozit Levhalarda Plastik Gerilme Analizi", *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 24, 4, 667-674.

Taubal, L., Karama, M., Lorrain, B., (2005). "Stress concentration in a circular hole in composite plate", *Composite Structures*, 68, 31-36.

İçten, B.M., Sayman, O., (2003). "Failure analysis of pin loaded aluminum glass-epoxy sandwich composite plates", *Composites Science And Technology*, 63, 727-737.

Fan, W., Wu, J., (1988). "Stress Concentration of a Laminate Weakened by Multiple Holes", *Composite Structures*, 10, 303-319.

Whitney, J.M., Nuismer, R.J., (1974) "Stress Fracture Criteria for Laminated Composites Containing Stress Concentrations", *J. Composite Materials*, 8, 253-265.

Nuismer, R.J., Whitney, J.M., (1975). "Uniaxial Failure of Composite Laminates Containing Stress Concentrations", *Fracture Mechanics of Composites*, ASTM STP 593, 117-142.

Tan, S.C., (1988). "Finite-Width Correction Factors for Anisotropic Plate Containing a Central Opening", *J. Composite Materials*, 22, 1080-1097.

ANSYS, The general purpose finite element software, Swanson Analysis Systems, Houston, TX.

The investigation of the stress concentration in composite plates with a circular hole

Extended abstract

In this study, the stress concentrations of composite plate have been investigated numerically by static tensile test. The stress concentrations that occurred at the vicinity of the hole that centered on a laminated composite plate which is exposed to one axial load have been calculated. Four layered Grafite / Epoxy composite plates have been used in calculates. In order to calculate of stress concentrations was by using Finite Element Analysis. The Finite Element Analysis was executed with ANSYS (v.12.01) software program. In modeling, Shell 99 elements were used.

The analysis on the different diameter of the plate (10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm, 60 mm, 70 mm, 80 mm and 90 mm) has been examined for 9 different types in the stress concentrations. Effects of the fiber reinforcement angle has been investigated for the plate with layer 0° , 5° , 10° , 15° , 20° , 25° , 30° , 35° , 40° , 45° , 50° , 55° , 60° , 65° , 70° , 75° , 80° , 85° and 90° . The fiber direction of 0° was adopted to parallel the axis of the samples. Uniaxial tensile stress was performed to applying to each model 1 MPa. Effects of the hole diameter and fiber reinforcement angle has been investigated for concentrations of stress.

In order to calculate accurately of the stress concentrations have been determined by the convergence test of effectiveness of the mesh. Then, for each model has been created by determining the number of active mesh elements around the hole. The number of active elements in the around holes was found to as 200. Thus, the maximum stresses formed in the material were found and the factor of stress concentration is calculated by dividing to the average tensile. These values are compared with the values calculated by Lekhnitski (1968) analytical method.

The obtained results were compared the studies available in the literature. Besides, the effects of fiber orientation angle and plate's width on the stress concentration have been analyzed. As a result, the stress concentration was found to be decreased with the increase of the ratio between fiber orientation angle and plate's width to the diameter of the hole.

The results showed that we need different approaches to improve the stress concentrations. To get the higher performance, more effective methods should be improved. In the future work, we focused on this problem.

As a continuation of this work was seen that instead of a single hole on the composite plate of two adjacent holes the smaller diameter will change to the extent to which strength what would be the most appropriate level of distance between the centers of hole and what can be done in the case of the analytical solution is not possible, and can be done in the case of the analytical solution is not possible.

Keywords: Composite Materials, Stress, Stress Concentration, fiber orientation angle, Ansys.