



FATURALI CTP LEVHALARDA
GERİLME KONSANTRASYONUNUN ARAŞTIRILMASI

(AN INVESTIGATION OF STRESS CONCENTRATION
IN FILLETED GRP COMPOSITE PLATES)

İbrahim GÜLDÜ*, Behcet DAĞHAN* ve Sami KAYA*

ÖZET/ABSTRACT

Makina parçalarındaki süreksizlikler gerilme konsantrasyonlarına sebep olur. Bu yüzden gerilme konsantrasyonlarının iyi analiz edilmesi ve tasarımda kullanılacak gerilme konsantrasyon katsayılarının belirlenmesi gerekir. Teknolojinin gelişimiyle yeni malzemelere duyulan ihtiyaçtan dolayı kompozit malzemelerin önemi artmıştır. Buna paralel olarak özellikle cam elyaf takviyeli plastikler (CTP) üzerinde geniş araştırmalar yapılmıştır. İzotropik malzemelerdeki konsantrasyon katsayıları kompozit malzemelerde kullanılamayacağından dolayı kompozit malzemelere ait gerilme konsantrasyon katsayıları araştırılarak belirlenmelidir. Bu çalışmada cam-polyester, grafit-epoksi ve kevlar-epoksi kompozitlerden yapılmış değişik fatura yarıçaplı faturalı levhalarda, eksenel çekme ile meydana gelen gerilme konsantrasyon katsayıları nümerik ve deneysel olarak elde edilmiştir. Fatura yarıçapı-levha genişliği (r/d) oranları 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 ve takviye açıları 0° , 15° , 30° , 45° alınmıştır. Sonuçlar çizelge ve grafiklerle karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Discontinuity in machine elements results in stress concentrations. For these reasons stress concentrations must be exactly analysed and stress concentration coefficients which will be used during design must be identified. Nowadays the development of technology increase the importance of new materials, especially composite materials. At the same time researches on glass reinforced plastics were widely performed. Since concentration coefficients of isotropic materials can not be used in composite materials. Stress concentration coefficients of composite materials must be defined by researches. In this study stress concentration coefficients obtained in tensile test by using plates with various fillet radii which are produced from glass-polyester, graphite-epoxy and kevlar-epoxy composites numerically and experimentally. Fillet radius-plate width ratios are taken as 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 and fiber angles are 0° , 15° , 30° , 45° . The results are given as tables and diagrams

ANAHTAR KELİMELER/KEYWORDS

CTP, Gerilme konsantrasyonu, Sonlu elemanlar metodu, Strain-gauge tekniği
GRP, Stress concentration, Finite element method, Strain-gauge

* Selçuk Üni., Müh.-Mim. Fakültesi, Makina Müh. Böl., Kampüs, KONYA

1. GİRİŞ

Elastisite teorisinde gerilme konsantrasyonu problemlerinin analitik yolla çözümü çok kompleks bir işlem olduğundan çoğunlukla yaklaşık metotlar kullanılır. Bu metotlarda bilinmeyen sayısı arttıkça elle çözüm zorlaşmakta hatta imkansızlaşmaktadır. Eğer problemin çözümü için kullanılacak lineer denklem takımları matris formunda yazılır ve bilgisayardan da faydalanılırsa çözüm son derece kolaylaşır. Huebner, izotropik malzemeler için gerilme konsantrasyon faktörlerini sonlu elemanlar metoduyla elde etmiştir (Huebner, 1975). Gerhard ise eliptik çentikli anizotropik levhalarda gerilmeleri sonlu elemanlar metoduyla incelemiştir (Gerhard, 1984). Bathe, Zienkiewicz ve Lekhnitski konuyu daha farklı metotlarla incelemiştir (Bathe, 1982; Zienkiewicz, 1982; Lekhnitski, 1963). Gerilme konsantrasyonları deneysel olarak da incelenmiştir. Bu konudaki ilk çalışmalar fotoelastik metot üzerine çalışan Frocht tarafından yapılmıştır (Frocht, 1935). Bu çalışmalara Dally ve Riley'de katılmıştır (Dally ve Riley, 1982).

Teknolojik gelişmelerin hızla ilerlemesinden dolayı yeryüzünde bulunan mevcut malzeme türleri sanayinin ihtiyacını karşılayamaz olmuştur. Bilim adamları ihtiyaca cevap verecek ekonomik ve teknik yönden daha uygun malzemeler bulmaya çalışmışlardır. Sonuçta kompozit malzemeler üzerinde çalışmalar yoğunlaşmıştır. Kompozit malzemeler doğrudan doğruya istenilen maksatla kullanılamayan en az iki malzemenin belirli şartlar altında ve belirli bir oranda makro seviyede birleştirilmeleriyle elde edilirler.

Kompozit malzemelerin en yaygın türü elyaf takviyeli kompozitlerdir. Elyaf takviyeli kompozitlerde takviye malzemesi olarak ilk sırayı cam almıştır. Matriks malzeme olarak plastik reçineler en fazla kullanılan tür olup bunlardan da polyester ucuzluğu sebebiyle ilk sırayı almaktadır. Epoksi reçine ise yüksek mukavemet ve kimyasal dayanım sebebiyle uzay, havacılık, ev ve spor aletleri yapımına kadar çok geniş bir alanda kullanım imkanı bulmuştur. Grafit ve kevlar elyaf-epoksi kompozitler 'ileri kompozitler' olarak uzay ve havacılık endüstrisinin temel malzemeleri olmuşlardır.

Bu çalışmada çekmeye zorlanan faturalı CTP levhalarda değişik fatura yarıçapı ve değişik malzemeler için gerilme konsantrasyon katsayıları nümerik ve deneysel yollarla araştırılmıştır. Bu amaçla cam-polyester numuneler hazırlanmış ve fatura civarına strain-gaugeler yapıştırılarak şekil değiştirmeler ve gerilme değerleri elde edilmiştir. Problem ayrıca sonlu elemanlar metoduyla çözülmüş ve elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

2. ORTOTROPİK MALZEMELERDE DÜZLEM GERİLME HALİ

Gerilme-şekil değiştirme bağıntıları genelleştirilmiş Hooke kanunundan aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (i,j,k,l = 1,2,3,4) \quad (1)$$

Burada σ_{ij} ikinci mertebeden gerilme tansörünü, C_{ijkl} dördüncü mertebeden elastisite tansörünü, ε_{kl} ise ikinci mertebeden şekil değiştirme tansörünü ifade etmektedir. Eğer ortotropik bir malzemede düzlem gerilme hali söz konusu ise bu bağıntı aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = [Q] \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

Burada gerilmeler ve şekil değiştirmeler asal doğrultulardaki gerilme ve şekil değiştirmelerdir. Kompozit malzeme literatürüne uygun olarak da elastisite matrisi $[Q]$ ile gösterilmiştir. Elastisite matrisinin elemanları

$$Q_{11} = \frac{E_{11}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, \quad Q_{22} = \frac{E_{22}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, \quad Q_{12} = \frac{\nu_{21}E_{11}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} = \frac{\nu_{12}E_{22}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, \quad Q_{66} = G_{12} \quad (3)$$

şeklinde. Buradaki elastisite modülü E ler ve Poisson oranı ν ler de asal doğrultulardaki değerlerdir. Eğer asal eksenlerle θ açısı yapan herhangi bir x - y eksenleri üzerindeki gerilmeler bulunmak istenirse

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = [T]^{-1} [Q] [T] \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_{xy} \end{Bmatrix} = [\bar{Q}] \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_{xy} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

bağıntısı kullanılır. Burada $[T]$ transformasyon matrisini göstermektedir. Transformasyon matrisi ise aşağıdaki şekildedir.

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & \sin 2\theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & -\sin 2\theta \\ -\sin 2\theta / 2 & \sin 2\theta / 2 & \cos 2\theta \end{bmatrix} \quad (5)$$

3. DENEYLER

3.1. Kompozit Levha İmalatı

Gerilme konsantrasyonlarını deneysel olarak tespit etmek için önce kompozit CTP levhalar üretilmiştir. CTP levhalar, Fibrotex A.Ş. den temin edilen F80 tipi kumaş ve Cam Elyaf San. A.Ş.'den temin edilen Neoxil CE BV8(T) reçine ile imal edilmiştir. F80 tipi kumaş E -camından imal edilen ortalama çapı $15 \mu\text{m}$ olan elyaflardan dokunmuş olup 800 g/m^2 'dir ve bağlayıcısı silandır. Neoxil CE BV8(T) reçine ise orta reaktiviteli ortoftalik ve viskozitesi iyi, yüksek mekanik mukavemete sahip bir reçinedir. Reçine ve dokuma kumaş seçiminde bu konuda önceden yapılan çalışmalar dikkate alınarak, numune özelliklerine uygun levhalar üretilmiştir. Kompozit levha üretiminde kullanılan E -camı ve polyester reçinenin özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Kompozit malzeme imalatı ülkemizde henüz çok yeni olduğundan, cam kumaş takviye ile seri ve standart üretim yapılmamaktadır. Deney sonuçlarının literatürle karşılaştırılabilmesi amacıyla literatürde belirtilen türde levha üretimi yapılmıştır. Kalıp içerisine kalıp ayırıcı sürüldükten sonra bir tabaka cam kumaş kalıp içerisine yatırılmıştır. Hazırlanmış olan polyester, fırça ile emdirilmiştir. Üzerine bir tabaka daha cam kumaş yatırılıp tekrar fırça ile polyester emdirilmiştir. Böylece, 4 tabaka oluncaya kadar aynı işlemler tekrarlanmıştır.

Çizelge 1. Polyester reçine ve cam dokumanın özellikleri

Polyester reçine (Neoxil CE BV8)	Çekme dayanımı	45 MPa
	Elastisite modülü	3 GPa
	Uzama	% 1.4
	Eğilme dayanımı	85 MPa
	Deformasyon sıcaklığı	70 °C
	Özgül ağırlık	1.09-1.2 g/cm ³
	Jelleşme süresi	8 dak
	Sertlik	45 Barcol
Cam fiber (E-camı)	Özgül ağırlık	2.56 g/cm ³
	Çekme dayanımı	3.6 GPa
	Elastisite modülü	70 GPa
	Lif çapı	11.7-13.75 µm
	Nem	% 0.07

Galvanize sac levhalar arasında sıcak presleme ile sıkıştırılarak muhtemel olan hava kabarcıkları dışarı atılmıştır. Aynı zamanda fazla olan polyester de sızdırılmıştır. Bu işlemler bittikten sonra sertleşmeye bırakılmıştır. 24 saat sonra sertleşen malzeme kalıptan ayrılmıştır. Ayrıca ilave kür işlemi uygulanmamıştır. Üretilen tabakalı kompozit levhalar çapraz katlı olup simetriktir.

3.2. Mühendislik Sabitlerinin Bulunması

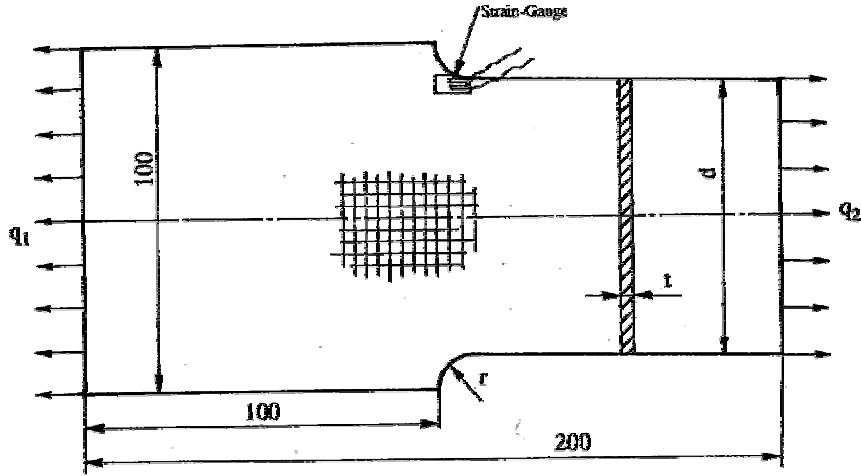
CTP deney levhalarının hazırlanması ve deney levhalarının çekme özelliklerinin belirlenmesi ile ilgili deneyler TS 3783 ve TS 3860 ta standart olarak verilmiştir. Elastik özelliklerin tespit edilmesi için yapılan deneyler Şekil 1 de görülen çentiksiz çekme numuneleri ile Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Uygulamalı Mekaniğin Laboratuvarında Instron Ünlversal çekme cihazında yapılmıştır. Elastisite modülü Şekil 1 deki gibi yerleştirilen strain-gaugeler yardımıyla üç ölçme ortalaması alınarak bulunmuştur. Çekme gerilmesi 10 MPa olarak uygulanmıştır.

Kompozit malzemenin elastisite modülleri ise çekme deney numunesinin enine ve boyuna yapıştırılan strain-gaugeler yardımıyla bulunmuştur. Cam elyaf çapraz katlı dokuma kumaş şeklinde olduğundan elastisite modülleri $E_1 = E_2 = 23.3$ GPa ve $\nu_{12} = 0.174$ olarak bulunmuştur.

Teorik olarak mühendislik sabitlerinin bulunmasında ise cam kumaş, çapraz katlı kompozit şeklinde düşünülerek aynı V_f oranında bileşenler kuralına göre E_1 ve E_2 hesaplanmıştır.

$$E_1 = V_f E_f + (1 - V_f) E_m \quad 1/E_2 = V_f / E_f + (1 - V_f) / E_m \quad (6)$$

Buradan E_1 ve E_2 sırasıyla 38.12 GPa ve 5.56 GPa olarak bulunmuş ve $E_c = E_1 + E_2 / 2$ formülünden $E_c = 21.88$ GPa değeri elde edilmiştir. Bulunan deneysel E_c değeri 23.3 GPa olup aradaki fark teorik hesaplamada kompozitin çapraz katlı olarak kabul edilmesinden kaynaklanmaktadır. Cam kumaş kompozitte, her iki yöndeki liflerin birbiri içerisine geçmesinden dolayı rijitlik çapraz katlıya nazaran daha yüksek olacaktır. Alınan teorik E_f ve E_m değerleri ideal olup üretilen levhanın elastisite modülü hızlandırıcı ve sertleştirici miktarları, sertleşme süresi ve sıcaklığı, elyaf ıslanma derecesi, dokuma sırasındaki elyaf hasarı, elyaf sarım gerginliği gibi çeşitli üretim parametrelerine bağlı olduğundan bulunan teorik ve deneysel değerler uyumludur.



Şekil 1. Gerilme konsantrasyonu deney numunesi

3.3. Yakma Deneyi

Elyaf takviyeli kompozitlerin elyaf/reçine oranının belirlenmesinde iki ayrı metot kullanılmaktadır. Bunların birincisi kompozitin yoğunluğunun ölçülmesidir. Daha kesin bir deney metodu ise elyafı etkilemeyen fakat matriksi çözebilen bir çözücü ile matriksin uzaklaştırılmasıdır. Düşük sıcaklıklarda plastik matriksin yakılması, cam elyafta herhangi bir fiziksel değişime sebep olmamaktadır. Bu deney, yakma deneyi (Burn-off) olarak adlandırılmaktadır. Deney işleminde kondüsyonlanmış numuneler hassas olarak tartıldıktan sonra yakılmaktadır.

Bu çalışmada kullanılan cam kumaş-polyester kompozitin yakma deneyi sonucunda elyaf hacimsel oranı $V_f = 0.48$ olarak bulunmuştur.

3.4. Gerilme Konsantrasyon Deneyleri

Gerilme konsantrasyon deneyleri için Şekil 1'de verilen boyutlarda çekme numuneleri hazırlanmıştır. Burada q_1 ve q_2 levhanın uçlarına uygulanan yayılı yüklerdir. r , fatura yarıçapı, t , levhanın kalınlığı ve d ise levhanın faturalı kısmının genişliğidir. İncelenen levhalarda r/d oranları 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 ve $t=2$ mm seçilmiştir. Araştırma sonucunda HBM firması tarafından imal edilen LY13 1.5/120 tipi strain-gaugeler seçilmiştir. Şekil 1'de görüldüğü gibi en kritik bölgeye soğukta sertleşen Cyano-Acrilate reçine ile yapıştırılmıştır. Strain-gauge okumaları Selçuk Üniversitesi Teknik Bilimler Yüksekokulu Malzeme Laboratuvarında hazırlanan deney setindeki Japon TML firması tarafından imal edilen TDS-100 model indikatör ile elde edilmiştir. Strain-gauge değerleri elastik bölgenin içerisinde olacak şekilde 10 MPa gerilme değerinde alınmıştır.

Cam-polyester kompozit ($\theta=0^\circ$) için farklı fatura yarıçaplarına karşılık gelen ortalama (3 değer ortalaması) şekil değiştirmeler ve bunlara karşılık gelen gerilme konsantrasyon katsayıları Çizelge 2'de verilmiştir. Levhaya x -yönünde 200 N luk kuvvet uygulanmıştır. k gerilme konsantrasyon katsayıları aşağıdaki formüllerden hesaplanmıştır.

$$\sigma_{ort} = P/A, \quad \sigma_{max} = E\varepsilon, \quad k = \sigma_{max} / \sigma_{ort} \quad (7)$$

Çizelge 2. Farklı fatura yarıçaplarına karşılık gelen ortalama şekil değiştirmeler ve gerilme konsantrasyon katsayıları

Fatura yarıçapı (r) (mm)	Şekil değiştirme (ϵ)	Gerilme konsantrasyon katsayısı (k)
4	547.75×10^{-6}	1.93
6	440.0×10^{-6}	1.83
10	836.0×10^{-6}	1.80

Burada P , uygulanan yayılı yük q_1 'in de q_2 'nin de bileşkesidir. A , levhanın faturalı kısmının kesit alanı, σ_{ort} , fatura bölgesinde ortaya çıkan gerilmelerin ortalama değeri, σ_{max} , gerilmelerin fatura bölgesinde ortaya çıkan maksimum değeri, ϵ , şekil değiştirmez.

4. NÜMERİK SONUÇLAR

4.1. Gerilme Konsantrasyon Katsayısı

Gerilme konsantrasyon katsayısı, kesit değişiminin olduğu bölgelerdeki maksimum gerilmenin, ortalama gerilmeye oranı diye tanımlanır. Elyaf takviyeli, üzerinde fatura bulunan, eksenel çekmeye maruz kompozit levhalarda gerilme konsantrasyonu fatura civarında görülmektedir. Fatura civarında yoğunlaşan gerilmenin büyüklüğü, fatura yarıçapı ve elyaf takviye doğrultularının çekme doğrultusu ile yaptığı açı ile değişir. Bu çalışmada cam-polyester, grafit-epoksi ve kevlar-epoksi kompozitlerden yapılmış faturalı levhalarda, eksenel çekme ile meydana gelen gerilme konsantrasyon katsayısı hesaplanmıştır. Bunun için öncelikle sonlu elemanlar metoduyla fatura civarındaki gerilmeler bulundu. Bulunan maksimum gerilmeler r/d ve θ açısına bağlı olarak Çizelge 3, 4 ve 5'te verilmiştir.

Fatura yarıçapı oranları r/d artarken, gerilmelerin azalmakta olduğu ve elyaf takviye açıları 0° den 45° ye doğru artarken de gerilmelerin artmakta olduğu gözlenmiştir. Bu durum her üç kompozit malzemede de aynı eğilimde gerçekleşmiştir.

Levhaya uygulanan x -yönündeki 200 N kuvvetin etkisinde 2.5 MPa lık ortalama gerilme elde edilmiştir. Maksimum gerilmenin ortalama gerilmeye oranlanması ile bulunan gerilme konsantrasyon katsayıları Çizelge 6, 7 ve 8'de verilmiştir.

Şekil 2'de cam-polyester kompozit levhaların, Şekil 3'te kevlar-epoksi kompozit levhaların, Şekil 4'te ise grafit-epoksi kompozit levhaların fatura civarında en büyük gerilme konsantrasyon katsayılarının r/d ye ve θ ya göre değişimi gösterilmiştir. Her üç malzemede de r/d nin azalması ile gerilme konsantrasyon katsayısının arttığı görülmektedir. Yine aynı şekillerde, elyaf takviye açılarına göre gerilme konsantrasyon katsayılarının değişimi incelenecek olursa her bir r/d değerinde açı büyüdükçe gerilme konsantrasyon katsayısı k nın arttığı dikkati çekmektedir. Yine her üç malzeme için, takviye açısının büyümesi ile, k nın az bir eğimle arttığı görülür. Bu artış r/d nin düşük değerlerinde fazla, r/d nin büyük değerlerinde çok yavaştır. Buradan r/d değerinin 1'e yaklaşması halinde, eğrilerden k nın sabit olacağı söylenebilir.

Gerilme konsantrasyon katsayıları, sonlu elemanlar metoduyla bulunduktan sonra strain-gauge metoduyla deneysel olarak da tespit edilmiştir. En büyük gerilmenin bulunduğu bölgeye strain-gauge yapıştırılarak maksimum gerilmeler belirlenmiştir. İmkanların kısıtlı olması nedeniyle sadece cam-polyester kompozit malzemelerde deneyler yapılmış ve elde edilen sonuçlar Çizelge 9'da verilmiştir. Eşitlik 11'den $\theta = 0^\circ$ elyaf takviyesi için gerilme konsantrasyon katsayıları r/d nin 0.1, 0.2, 0.3 oranlarında hesaplanmıştır. Her iki yolla

bulunan gerilme konsantrasyon katsayılarının arasında % 1, % 9.28, % 15.0 oranında bir fark olduğu görülmektedir.

Çizelge 3. Cam-Polyester kompozitlerde fatura yarıçapları ve takviye açılarına bağlı maksimum gerilmeler (MPa)

θ	r/d					
	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
0°	5.55	4.82	4.15	3.80	3.55	3.37
15°	5.82	4.91	4.22	3.85	3.57	3.40
30°	5.97	4.97	4.3	3.95	3.72	3.52

Çizelge 4. Kevlar-Epoksi kompozitlerde fatura yarıçapları ve takviye açılarına bağlı maksimum gerilmeler (MPa)

θ	r/d					
	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
0°	5.35	4.62	4.02	3.67	3.45	3.27
15°	5.47	4.90	4.12	3.70	3.47	3.37
30°	5.85	4.92	4.32	4.00	3.80	3.62

Çizelge 5. Grafit-Epoksi kompozitlerde fatura yarıçapları ve takviye açılarına bağlı maksimum gerilmeler (MPa)

θ	r/d					
	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
0°	6.50	4.67	4.07	3.72	3.47	3.30
15°	5.50	4.90	4.15	3.75	3.50	3.37
30°	5.82	4.92	4.30	3.97	3.75	3.57

Çizelge 6. Cam-Polyester levhalarda gerilme konsantrasyon katsayıları

θ	r/d					
	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
0°	2.22	1.90	1.66	1.52	1.42	1.35
15°	2.33	1.98	1.69	1.54	1.43	1.36
30°	2.24	1.99	1.72	1.58	1.49	1.41

Çizelge 7. Kevlar-epoksi levhalarda gerilme konsantrasyon katsayıları

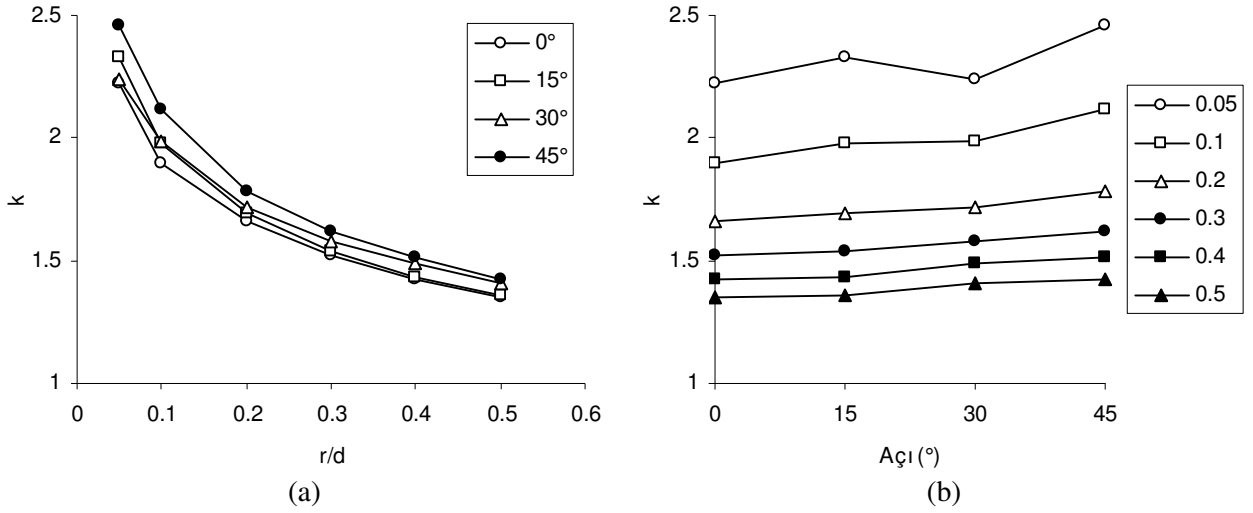
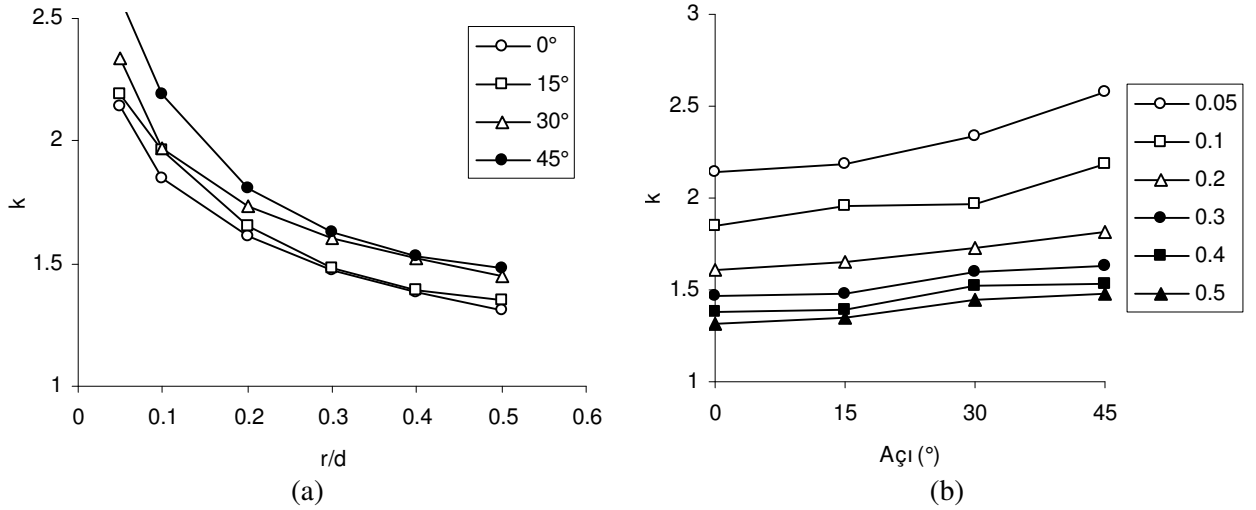
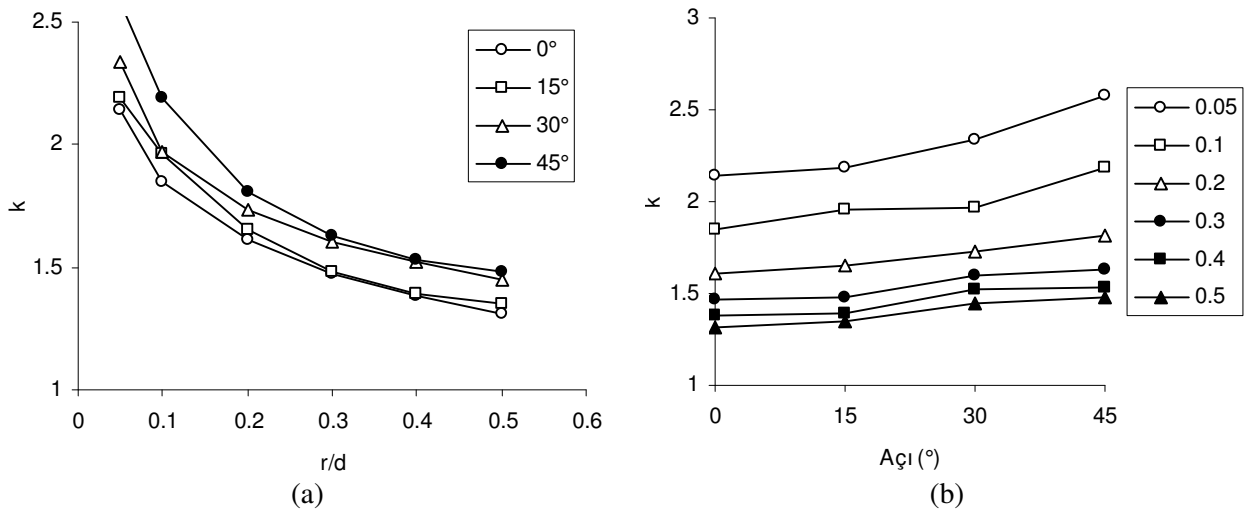
θ	r/d					
	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
0°	2.14	1.85	1.61	1.47	1.38	1.31
15°	2.19	1.96	1.65	1.48	1.39	1.35
30°	2.34	1.97	1.73	1.60	1.52	1.45

Çizelge 8. Grafit-epoksi levhalarda gerilme konsantrasyon katsayıları

θ	r/d					
	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
0°	2.22	1.93	1.66	1.52	1.42	1.35
15°	2.33	1.98	1.69	1.54	1.43	1.36
30°	2.24	1.99	1.72	1.58	1.49	1.41

Çizelge 9. Cam-Polyester kompozit ($\theta = 0^\circ$) için deneysel ve teorik gerilme konsantrasyon katsayıları

r (mm)	r/d	Deneysel k	Teorik k	Fark (%)
4	0.1	1.93	1.90	1.50
6	0.2	1.83	1.66	9.28
10	0.3	1.80	1.52	15.0

Şekil 2. Cam-Polyester kompozit levhalar için a) $k-r/d$ grafiği, b) $k-\theta$ grafiğiŞekil 3. Kevlar-Epoksi kompozit levhalar için a) $k-r/d$ grafiği, b) $k-\theta$ grafiğiŞekil 4. Grafit-Epoksi kompozit levhalar için a) $k-r/d$ grafiği, b) $k-\theta$ grafiği

5. SONUÇLAR

Elyaf takviye açısı $\theta = 0^\circ$ olduğu zaman bütün kompozit malzemelerde gerilme konsantrasyon katsayısı en küçük değerleri almıştır. Açının artması ile gerilme konsantrasyon katsayısı da büyümektedir.

$\theta = 0^\circ$ iken gerilme konsantrasyon katsayısı k en küçük değerde olduğundan, malzeme daha büyük gerilmeleri taşıyabilir. Bundan dolayı $\theta = 0^\circ$ lik takviye açıları diğerlerine göre mukavemet yönünden daha elverişli olmaktadır.

Cam-polyester, kevlar-epoksi ve grafit-epoksi kompozitlerde herhangi bir elyaf takviye açısında fatura civarındaki maksimum gerilme, fatura yarıçap oranı r/d küçüldükçe artmaktadır.

Her üç tip kompozit malzemede gerilme takviye açısı $\theta = 0^\circ$ den 45° ye kadar arttırıldığında gerilme konsantrasyon katsayısı k da artmaktadır.

Yine her üç tip kompozit malzemede gerilme konsantrasyon katsayısı, r/d oranı arttıkça azalma göstermektedir.

Herhangi bir r/d oranında, elyaf takviye açısı 0° den itibaren 45° ye kadar artarken, maksimum gerilme de büyümektedir. Bu olay her üç tip kompozit malzemede de görülmektedir.

KAYNAKLAR

- Bathe K.J. (1982): "Finite Element Procedures in Engineering Analysis", Prentice Hall Inc.
- Dally J.W., Riley W.F. (1982): "Experimental Stress Analysis", McGraw-Hill.
- Frocht M.M. (1935): "Factors of Stress Concentration Photoelastically Determined", Trans. Ame. Soc. Mech. Eng.
- Gerhard T.D. (1984): "A Hybrid/Finite Element Approach for Stress Analysis of Notched Anisotropic Materials", J. App. Mech., Vol. 51.
- Huebner H.K. (1975): "The Finite Element Method for Engineers", John Wiley and Sons, New York.
- Lekhnitski S.G. (1963): "Theory of Elasticity of Anisotropic Elastic Body", Holden-Day Inc., San Francisco.
- Zienkiewicz O.C. (1982): "The Finite Element Method", McGraw-Hill.