

## Yama ile tamir edilmiş pim bağlantılı kompozitlerin kırılma davranışı: Üç boyutlu sayısal yaklaşım

### Fracture behavior of bolted joints in composites repaired with patch: 3D numerical approach

Yunus GÜNDÜZ<sup>1</sup>, Mete Onur KAMAN<sup>2\*</sup>

<sup>1,2</sup>Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye.  
yunusgunduz@yahoo.com, mkaman@firat.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 16.12.2017, Kabul Tarihi/Accepted: 05.03.2018  
\* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2018.70019  
Araştırma Makalesi/Research Article

#### Öz

Bu çalışmada, bir yüzü kompozit yamalı ve pim delikli kompozit levhaların kırılma davranışı sayısal olarak araştırılmıştır. Levha ve yama malzemesi, pim çapı ve yapıştırıcı özellikleri gibi parametrelerin değişiminin çatlak ucu gerilme şiddet faktörü üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çözümde; yama ile tamir edilmiş levha üç boyutlu olarak modellenmiş ve pim deliği kenarındaki çatlak ucu yer değiştirmeleri sonlu elemanlar yöntemi ile bulunmuştur. Gerilme şiddet faktörü; homojen ortotropik malzemeler için üç boyutlu çatlak problemlerine uygulanabilen DCM (Displacement Correlation Method) ile elde edilmiştir ve sonuçlar grafikler halinde sunulmuştur. Pim deliği merkezinden aynı uzaklıktaki çatlak uçları için, büyük delik çaplarının, büyük çatlak uzunluğuna göre gerilme şiddet faktörü üzerinde daha etkili bir parametre olduğu görülmüştür. Yama malzemesi değişiminin şiddet faktörü üzerinde üzerindeki etkisi büyük pim çaplarında artmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Gerilme şiddet faktörü, Ortotropik, Tamir, Yama

#### Abstract

In this study, fracture behavior of bolted joints in composite plates containing cracks repaired with single-sided composite patch was numerically investigated. The effects of variation of parameters such as plate and patch materials, pin diameter and adhesive properties on stress intensity factor at crack tip were investigated. In the solution, the plate repaired with the patch was modeled as three-dimensional and the crack displacement at the edge of the pin hole was found by the finite element method. Stress intensity factor is obtained by DCM (Displacement Correlation Method) which can be applied to three dimensional crack problems for homogeneous orthotropic materials and the results are presented in graphical form. It has been found that for the crack tips at the same distance from the center of the pin hole, larger hole diameters are a more effective parameter on the stress intensity factor than the larger crack length. It has been found that the effect of the patch material variation on the stress intensity factor is increased at large pin diameters.

**Keywords:** Stress intensity factor, Orthotropic, Repair, Patch

## 1 Giriş

Pim bağlantıları; özellikle yüksek yük taşıma ve iletme kapasitelerine sahip olmaları, pahalı yüzey hazırlama işlemleri gerektirmemeleri, çevre koşullarından fazla etkilenmemeleri ve maliyetlerinin düşük olması gibi nedenlerle oldukça sık tercih edilirler. Bu avantajlarına rağmen, birleştirilecek olan parçalara açılacak delikler nedeni ile yapının mukavemetini düşürürler. Gerekli tasarım önlemleri alınmadığında, bu delikler etrafında oluşan gerilme yığılmaları nedeni ile başlayan hasar ilerleyerek yayılmakta ve yapının işlevini kaybetmesine neden olmaktadır [1]. Oluşan çatlaklar, günümüzde yapıştırıcı ve yapıştırma teknolojisinin gelişmesi sonucu uygulama ve maliyet açısından avantaj sağlayan yama yöntemi ile başarılı bir şekilde tamir edilebilmektedir. Çentik, çatlak vb. hatalar içeren mühendislik yapılarının yapıştırıcı kullanılarak tamirinde sıklıkla kompozit malzemeler tercih edilmektedir [2]. Özellikle hava taşıtlarının gövde ve iç yüzeyinde çatlak içeren bölgenin dışarıdan yapıştırıcı kullanılarak kompozit yama ile tamir edilmesinde başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Kompozit yama yapının yorulma ve korozyon dayanımını arttırmanın yanında karmaşık şekillere de kolay uyum sağlar [3].

Tamir etkisini daha iyi anlamak ve ideal tamir tasarımını elde etmek için yapılan deneysel araştırmalarla birlikte [4],[5], sonlu elemanlar metodunun gelişmesine paralel olarak son yıllarda bu konudaki sayısal çalışmalar ön plana çıkmıştır.

Kompozit yama ile tamir üzerine yapılan çalışmalar genellikle izotropik levhalarda kenar veya merkezi çatlakların kompozit yama ile tamiri konusundadır. Emdad ve Mahaidi [6] ortasında çatlaklı dairesel delik bulunan çelik levhaların kompozit yama ile tamir performansını yorulma yükü altında deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Reddy ve diğ. [7] tarafından çatlak durdurma deliği bulunan merkezi çatlaklı çelik levhada gerilme şiddet faktörü (GŞF) sonlu elemanlar metodu kullanılarak incelenmiştir. Statik çekme yükü altındaki çelik levha karbon fiber takviyeli kompozit yama ile tamir edilmiştir. Açılı çatlakla sahip yamalı Al2014-T6 levhalardaki yorulma çatlak ilerlemesi Srilakshmi ve diğ. [8] tarafından araştırılmıştır. Çalışmada sonlu elemanlar metodu ve DIC (Digital Image Correlation) metodu kullanılmıştır. Çatlak içeren alüminyum levhalarda GŞF Errouane ve diğ. [9] tarafından araştırılmıştır. Sayısal olarak yapılan araştırmada kompozit yama için optimum tasarım şartları incelenmiştir.

Pim bağlantılı levhalarla ilgili yapılan araştırmalarda ise çekme yükü etkisindeki kompozitlerin gerilme davranışı ve ilerlemeli hasar analizi üzerine yoğunlaşmıştır [10]-[13]. Pim bağlantısı ile birleştirilmiş plakalarla yapılan deneysel çalışmalar, bağlantıların çekme kuvvetine maruz kaldıklarında genel olarak levhalarda pim kenarı etrafında çatlak oluştuğunu açık bir şekilde göstermektedir [14]-[16]. Pim bağlantılı yapılarda çatlak ucu gerilme davranışı ile ilgili olarak yapılan çalışmalar geniş değildir. Liqing ve Bingzheng [17], mekanik bağlantılarda civata deliğindeki çeyrek eliptik köşe çatlak probleminin

çözümünde üç boyutlu sonlu elemanlar metodunu kullanmışlardır. Çatlak boyunca GŞF'nü DCM (Displacement Correlation Method) tekniğini kullanarak belirlemişler ve GŞF üzerinde civata ile delik arasındaki boşluğun etkisini araştırmışlardır. Sayısal sonuçlar; çekme yükü altında çatlak açılması (Mod I) için GŞF'nün, mevcut açıklıktaki azalma ile azaldığını göstermiştir. Fawaz ve Anderson [18], delikteki köşe çatlak için GŞF'nü sonlu elemanlar metodunu kullanarak hesaplamışlardır. Analizleri sayısal çözüm hassasiyetini dikkate alarak yapmışlardır. Horng ve Ju [19], çoklu civata bağlantılarında oluşan tek bir çatlakın davranışını incelemişler ve yüklem oranlarının malzeme özelliklerine duyarlı olmadığını göstermişlerdir. Wang ve diğ. [20] kenar çatlak içeren pim bağlantılı fiber metal tabakalı levhalarda yorulma çatlak ilerlemesi için analitik bir tahmin metodolojisi sunmuşlardır. Kabeel ve diğ. [21] pim bağlantılı izotropik levhalarda hasar oluşumunu belirlemek amacıyla koheziv element tekniğini kullanan sayısal bir model geliştirmişlerdir. Elde ettikleri sonuçları deneysel verilerle karşılaştırmışlardır.

Bu çalışmada ise literatürden farklı olarak pim bağlantılı levhaların çekme yükü etkisinde yama ile tamir performansına kırılma mekanığı açısından yaklaşmıştır. Bu amaçla; pim bağlantılı levha; kompozit ortotropik malzeme olarak seçilmiş ve yapıştırıcı kullanılarak yine kompozit yama ile tamir edilmiştir. Tamir parametresi olarak yapıştırıcı ve kompozit yamanın boyut ve mekanik özellikleri kullanılmıştır. Bunun yanı sıra levhadaki pim ve çatlak boyutunun da kırılma davranışına etkisi araştırılmıştır. Tüm bu değişkenler kullanılarak çatlak ucu yer değiştirmeleri sonlu elemanlar metodunu kullanan ANSYS paket programı ile elde edilmiştir. Daha sonra bu yer değiştirmeler kullanılarak GŞF değerleri anizotropik malzemelere uygulanabilen DCM ile hesaplanmıştır.

## 2 Materyal ve metot

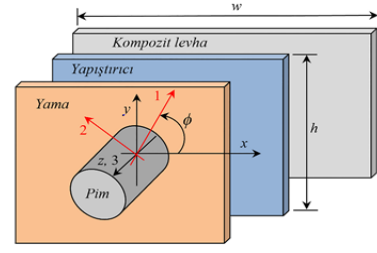
Bu çalışmada Şekil 1 ve 2'de gösterilen çatlaklı bir levhaya sağ tarafından 100 MPa çekme yükü uygulanarak GŞF hesaplanmış ve geometri ve malzeme gibi değişken parametrelerin GŞF üzerindeki etkisi araştırılmıştır (Tablo 1).

Tablo 1: Model için kullanılan parametrik değişkenler.

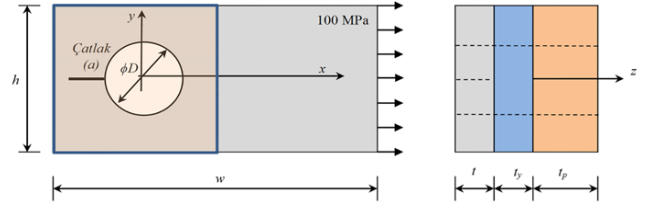
Özellik	Sembol	Birim	Değer
Levha Boyutları	$w \times h \times t$	$\text{mm}^3$	100x200x3
Çatlak Boyu	$a$	mm	5/10/15/20/25/30/35
Pim Çapı	$D$	mm	10/20/30/40/50/60/70
Gerilme	$\sigma$	MPa	100
Yama Kalınlığı	$t_p$	mm	0.5/1/1.5/2/2.5/3
Yapıştırıcı Kalınlığı	$t_y$	mm	0.1/0.2/0.3/0.4/0.5
Yapıştırıcı Kayma Modülü	$G_y$	MPa	87.5/175/350/700/1050
Yama Fiber Takviye açısı	$\phi$	$^\circ$	0/15/30/45/60/75/90

Tablo 2: Sayısal çözümde kullanılan malzemeler.

Malzeme	$E_1$ (MPa)	$E_2, E_3$ (MPa)	$G_{12}, G_{13}$ (MPa)	$G_{23}$ (MPa)	$\nu_{12}, \nu_{13}$	$\nu_{23}$
Boron-epoksi [24]	195120	25421	7234	4933	0.168	0.035
Grafit-epoksi [25]	172400	10340	4820	3100	0.3	0.18
Cam-epoksi [26]	27820	5830	2560	2240	0.31	0.41
Karbon-epoksi [27]	145000	10000	7000	3700	0.25	0.5



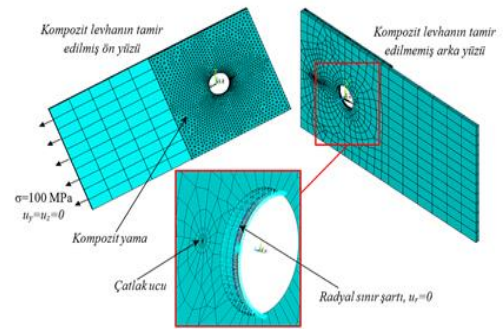
Şekil 1: Kompozit yama ile tamir edilmiş pim delikli kompozit levha.



Şekil 2: Kompozit yama ile tamir edilmiş pim delikli kompozit levhanın boyutları.

Levha ve yama malzemesi için kullanılan malzemelerin ise mekanik özellikleri Tablo 2'de verilmiştir. Çözümde çekme yükü etkisi altında çatlak ucu yer değiştirmeleri sonlu elemanlar paket programı ANSYS, 13.0 ile bulunmuştur [22]. Levha ve yama malzemesi olarak karbon-epoksi, boron-epoksi, cam-epoksi ve grafit-epoksi kullanılmıştır (Tablo 2).

Levha için sayısal model Şekil 3'te verilmiştir. Dairesel delikli kompozitlerde delik çevresi etrafında düzenli sonlu eleman ağı yapısı kullanılsa da [10]-[13],[23], çatlak ucu tekil eleman zorunluluğu buna izin vermemektedir. Levha, yama ve yapıştırıcı ANSYS programında Solid95 eleman tipi kullanılarak sonlu elemanlara bölünmüştür. Geometri ve malzeme gibi değişken parametreler ile toplamda 38 model hazırlanmıştır. 100 MPa'lık çekme yükü uygulanan levha kesitinde  $u_y = u_z = 0$  olarak seçilmiştir. Ayrıca rijit pim etkisini sağlayabilmek için deliğin sol yüzeyine radyal sınır şartı uygulanmıştır [10].



Şekil 3: Problemin sonlu elemanlar modeli ve sınır şartları.

Yüklemeye sonrası çatlak ucu açılmaları levhanın tamir edilmemiş serbest yüzeyinden okunmuştur. Çatlağın bulunduğu levha kalınlık boyunca iki elemana bölünmüştür. Çatlak bölgesinde tekil elemanın uzunluğu, çatlak uzunluğunun 0.0285 katıdır. GŞF'ndeki değişim oranının minimum %0.22 olarak elde edildiği ~23000 düğüm sayısı modeller için belirlenmiştir.

DCM için çatlak yüzeyindeki yer değiştirmelere ihtiyaç duyulur. Tekil eleman uzunluğu  $r$ , çatlak ucuna yaklaşıncan, anizotropik malzemeler için çatlak ucu yer değiştirmeleri

$$\lim_{r \rightarrow 0} \frac{\Delta u_x}{r} = 2 \sqrt{\frac{2}{\pi}} (\Omega_{21} K_I + \Omega_{11} K_{II} + \Omega_{31} K_{III}) \quad (1)$$

$$\lim_{r \rightarrow 0} \frac{\Delta u_y}{r} = 2 \sqrt{\frac{2}{\pi}} (\Omega_{22} K_I + \Omega_{12} K_{II} + \Omega_{32} K_{III}) \quad (2)$$

$$\lim_{r \rightarrow 0} \frac{\Delta u_z}{r} = 2 \sqrt{\frac{2}{\pi}} (\Omega_{23} K_I + \Omega_{13} K_{II} + \Omega_{33} K_{III}) \quad (3)$$

şekindedir [28]-[30].  $\frac{\Delta u_x}{\sqrt{r}}$ ,  $\frac{\Delta u_y}{\sqrt{r}}$  ve  $\frac{\Delta u_z}{\sqrt{r}}$  ifadeleri, çatlak ucu bölgesinde düğümlerin yer değiştirmelerinden yararlanılarak,

$$\frac{\Delta u_x}{\sqrt{r}} = A + Br, \frac{\Delta u_y}{\sqrt{r}} = C + Dr, \frac{\Delta u_z}{\sqrt{r}} = F + Hr \quad (4)$$

yazılacak olursa, GŞF'leri (1-3) ifadeleri kullanılarak aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\begin{bmatrix} K_I \\ K_{II} \\ K_{III} \end{bmatrix} = \frac{1}{2 \sqrt{\frac{2}{\pi}}} \begin{bmatrix} \Omega_{21} & \Omega_{11} & \Omega_{31} \\ \Omega_{22} & \Omega_{12} & \Omega_{32} \\ \Omega_{23} & \Omega_{13} & \Omega_{33} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} A \\ C \\ F \end{bmatrix} \quad (5)$$

Şekil 4'e göre, tekil bir elemanda ( $r_3 = 4r_2$ ) düğümlerin yer değiştirmeleri;

$$\frac{\Delta u_{y-24}}{\sqrt{r_2}} = C + Dr_2, \frac{\Delta u_{y-35}}{\sqrt{r_3}} = C + Dr_3 \quad (6)$$

eşitlikleri yardımıyla

$$C = \frac{8\Delta u_{y-24} - \Delta u_{y-35}}{3\sqrt{r_3}} \quad (7)$$

olarak elde edilir. Benzer şekilde  $A$  ve  $F$  katsayıları da sırasıyla

$$A = \frac{8\Delta u_{x-24} - \Delta u_{x-35}}{3\sqrt{r_3}}, F = \frac{8\Delta u_{z-24} - \Delta u_{z-35}}{3\sqrt{r_3}} \quad (8)$$

şeklinde bulunur. Denklem 5'de  $\Omega_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, 3$ )

$$\Omega_{ij} = -Im(A_{jk} L_{ki}^{-1}) \quad (i, j, k = 1, 2, 3) \quad (9)$$

ifadesi ile tanımlanır.

$$\begin{aligned} A_{1k} &= M_{11}\mu_k^2 + M_{12} - M_{16}\mu_k + \lambda_k(M_{15}\mu_k - M_{14}) \\ A_{2k} &= M_{21}\mu_k + \frac{M_{22}}{\mu_k} - M_{26} + \lambda_k \left( M_{25}\mu_k - \frac{M_{24}}{\mu_k} \right) \end{aligned} \quad (10a)$$

$$A_{3k} = M_{41}\mu_k + M_{42}/\mu_k - M_{46} + \lambda_k(M_{25}\mu_k - M_{44}/\mu_k)$$

$A_{jk}$ ,  $j = 1$  ve  $k = 1, 2$  için; Denklem (10a) kullanılır.  $j = 1$  ve  $k = 3$  için; ise

$$\begin{aligned} A_{13} &= \lambda_3(M_{11}\mu_3^2 + M_{12} - M_{16}\mu_3) + M_{15}\mu_3 - M_{14} \\ A_{23} &= \lambda_3(M_{21}\mu_3 + M_{22}/\mu_3 - M_{26}) + M_{25} - M_{24}/\mu_3 \\ A_{33} &= \lambda_3(M_{41}\mu_3 + M_{42}/\mu_3 - M_{46}) + M_{45} - M_{44}/\mu_3 \end{aligned} \quad (10b)$$

eşitlikleri kullanılır.

Düzlem şekil değiştirme şartı altında

$$M_{ij} = S_{ij} - \frac{S_{i3}S_{j3}}{S_{33}}, \quad (i, j = 1, \dots, 6) \quad (11)$$

ifadesine eşittir.

$S_{ij}$  ( $i, j = 1, \dots, 6$ ) esneklik matrisidir. Ortotropik malzeme için gerilme-şekil değiştirme bağıntısı

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} \quad (12)$$

ile verilir.

$\mu_i$ , ( $i=1, \dots, 3$ ) uygunluk denkleminin pozitif sanal kökleridir.

$$l_2(\mu)l_4(\mu) - [l_3(\mu)]^2 = 0 \quad (13)$$

Burada;

$$l_2(\mu) = M_{55}\mu^2 - 2M_{45}\mu + M_{44}$$

$$l_3(\mu) = M_{15}\mu^3 - (M_{14} + M_{16})\mu^2 + (M_{25} + M_{46})\mu - M_{24} \quad (14)$$

$$l_4(\mu) = M_{11}\mu^4 - 2M_{16}\mu^3 + (2M_{25} + M_{66})\mu^2 - 2M_{26}\mu + M_{22}$$

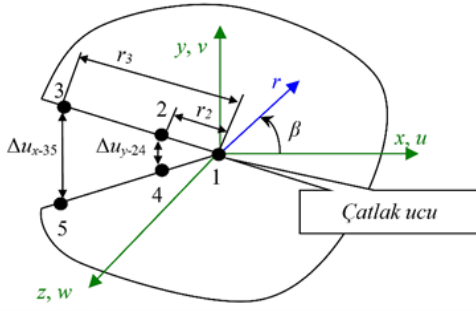
dir. Ayrıca;

$$L = \begin{bmatrix} -\mu_1 & -\mu_2 & -\mu_3\lambda_3 \\ 1 & 1 & \lambda_3 \\ \lambda_1 & \lambda_2 & -1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

şeklinde olup, Denklem (10) ve (15)'deki  $\lambda_i$ , ( $i = 1, 2, 3$ )

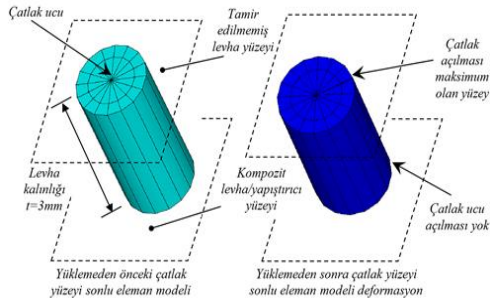
$$\begin{aligned} \lambda_1 &= -\frac{l_3(\mu_1)}{l_2(\mu_1)} \\ \lambda_2 &= -\frac{l_3(\mu_2)}{l_2(\mu_2)} \\ \lambda_3 &= -\frac{l_3(\mu_3)}{l_4(\mu_3)} \end{aligned} \quad (16)$$

olarak hesaplanır.



Şekil 4: Çatlak çevresi sonlu eleman modeli [29]-[31].

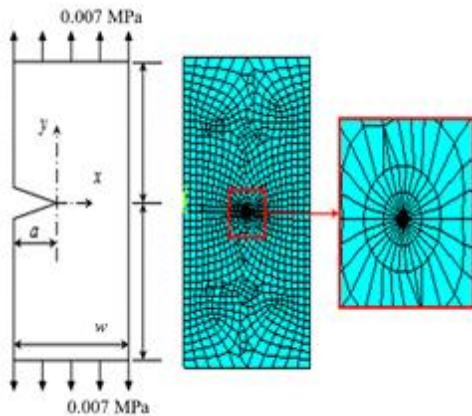
Tek yönlü yama kullanılarak yapılan üç boyutlu modellerde düzlem dışı yer değiştirmeler ve büyük yerel dönmeler oluşmaktadır [2],[31]. Dolayısıyla daha hassas sonuçlar elde etmek amacıyla geometrik lineer olmayan analiz gerçekleştirilmiştir. Maksimum çatlak ucu açılma miktarı tamir edilmiş levhanın serbest yüzeyinde elde edilir [32]. Bu nedenle de GŞF değerleri çatlakın tamir edilmemiş kenarındaki yer değiştirmeler kullanılarak hesaplanmıştır (Şekil 5).



Şekil 5: Çatlak ucu yer değiştirmelerinin belirlenmesi [32].

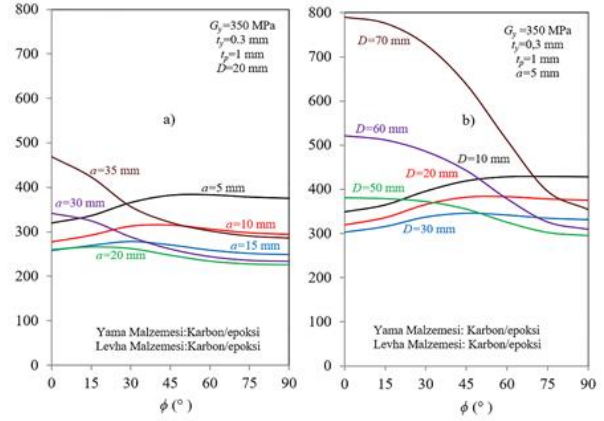
### 3 Sonuçlar

Sayısal çözüm tekniğinin kontrolü için literatürde bulunan tamir edilmemiş çatlak içeren bir levha örnek olarak ele alınmıştır [30]. Levha 1397 düğünden oluşmakta olup, levha malzemesinin mekanik özellikleri  $E_1=170645.2$  MPa,  $E_2=55158.1$  MPa,  $E_3=170645.2$  MPa,  $\nu_{12}=0.1114$ ,  $\nu_{23}=0.036$ ,  $\nu_{13}=0.1114$ ,  $G_{12}=4826.3$  MPa,  $G_{23}=4826.3$  MPa,  $G_{13}=76807.6$  MPa'dır (Şekil 6). Literatürde tamir edilmemiş ortotropik levhada kenar çatlak problemi için ( $\frac{a}{w} = 0.5$ ,  $\frac{h}{w} = 0.5$ ,  $\frac{h}{2} = 10a$ ) GŞF  $0.1674877$  MPa $\sqrt{\text{mm}}$  olarak hesaplanmış [33], buna karşılık bu çalışmada  $0.1673049$  MPa $\sqrt{\text{mm}}$  olarak bulunmuştur.



Şekil 6: Kenar çatlaklı ortotropik levha problemi ve sonlu elemanlar modeli.

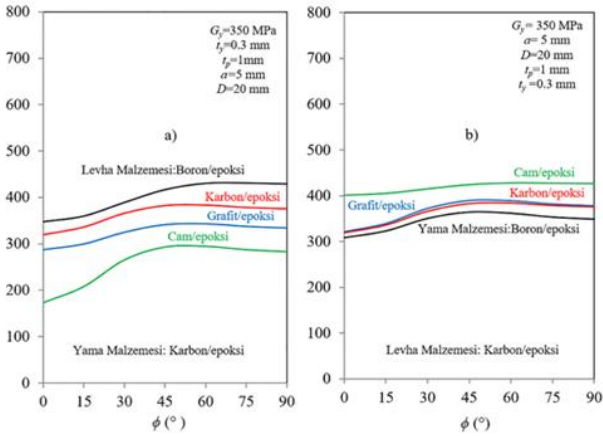
Çatlak boyunun artması  $K_I$  değerini  $a=20$  mm'ye kadar azaltmış, daha sonra da arttırmıştır (Şekil 7a). Başlangıçta pim deliği kenarındaki çatlak boyu küçüktür ( $a=5$  mm).  $a$ 'nın artması çatlak ucunun pim deliği kenarından uzaklaşmasına neden olacağından  $K_I$  değerini düşürecek.  $a=20$  mm'den sonra çatlak, levha serbest kenarına yaklaşacağından dolayı  $K_I$  değeri artmaya başlayacaktır. Yama açısının artması  $a=15$  mm'ye kadar  $K_I$  değerini artırırken  $a=15$  mm'den sonra daha büyük çatlak boyları için azaltmıştır. Ayrıca yama açısındaki artış serbest kenara yakın çatlak boylarında  $K_I$  değişimini daha fazla etkilemektedir. Maksimum  $K_I$  değeri  $\phi=0^\circ$ 'de  $a=35$  mm için  $469.5$  MPa $\sqrt{\text{mm}}$  olarak hesaplanmıştır.



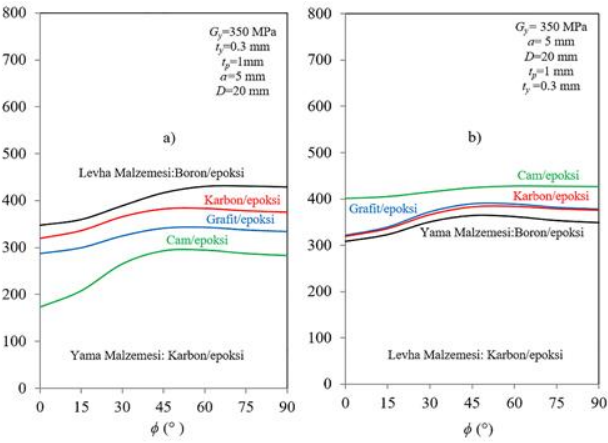
Şekil 7: GŞF'nün farklı (a): Çatlak uzunlukları, (b): Pim çapları için yama açısı ile değişimi.

Farklı pim çapları için yama açısının  $K_I$  ile değişimi Şekil 7b'de verilmiştir. Pim delik çapındaki değişimin,  $K_I$  üzerindeki etkisi çatlak boyundaki değişim ile aynı karakteri göstermektedir. Küçük delik çapı çentik etkisi yaratacağından, delik çapının artması  $K_I$ 'i azaltmış, daha sonra ise çatlak ucunun levha kenarına yaklaşmasından dolayı arttırmıştır. Özellikle büyük delik çaplarında ( $D=60$  mm)  $\phi$ 'nin  $K_I$  üzerindeki etkisi çok daha fazladır.  $\phi=0^\circ$  ile  $90^\circ$  arasında fark  $\phi=60$  mm'de  $211$  MPa $\sqrt{\text{mm}}$  olup,  $K_I$ 'in maksimum değeri  $\phi=0^\circ$ 'de  $D=60$  mm için  $520.75$  MPa $\sqrt{\text{mm}}$  olarak hesaplanmıştır.

Farklı levha malzemeleri için  $K_I$ 'in yama açısı  $\phi$  ile değişimi Şekil 8a'da gösterilmiştir. Maksimum  $K_I$  değeri tüm  $\phi$  değerlerinde boron/epoksi için daha sonra sırasıyla karbon/epoksi, grafit/epoksi ve cam/epoksi için elde edilmiştir.  $\phi$ 'nin artması tüm malzemelerde  $K_I$ 'i arttırmıştır. Bu artış miktarı cam/epoksi için en büyük olup,  $\phi=0^\circ$  ile  $90^\circ$  arasındaki GŞF farkı  $110$  MPa $\sqrt{\text{mm}}$  olarak hesaplanmıştır. Levha açısı  $0^\circ$  olduğunda yükleme doğrultusundaki elastisite modülü en yüksek malzeme boron/epoksidir. Yama malzemesi ise karbon/epoksi seçilmiştir. Levhanın boron/epoksiye göre daha düşük bir elastisite modülüne sahip karbon/epoksi ile yapılandırılıp tamir edilmesi çatlak ucu açılımını arttırmıştır. Bu nedenle en büyük  $K_I$  boron/epoksi levha malzemesi için elde edilmiştir. En düşük elastisite modülüne sahip cam/epoksinin kendisine göre daha dayanımlı bir malzeme olan karbon/epoksi ile tamir edilmesi ise çatlak ucunun açılmasını engellemiş ve en düşük  $K_I$  değeri elde edilmiştir. Dolayısıyla yama malzemesinde elastisite modülünün artması ( $E_1$ ) GŞF'nü azaltmıştır (Şekil 8b).



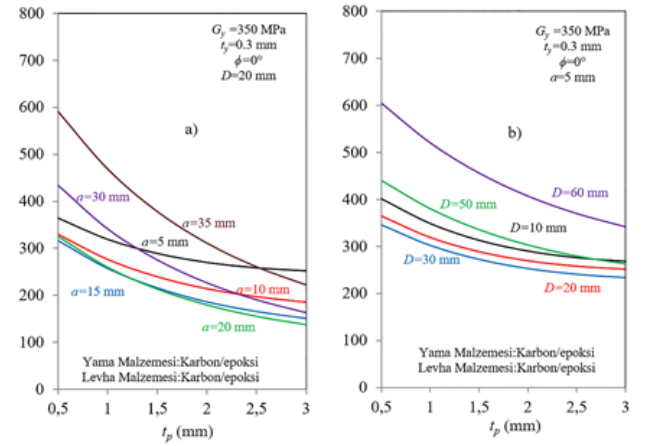
Şekil 8: GŞF'nün farklı (a): Levha, (b): Yama malzemeleri için yama açısı ile değişimi.



Şekil 9: GŞF'nün farklı (a): Yama, (b): Yapıştırıcı kalınlıkları için yama açısı ile değişimi.

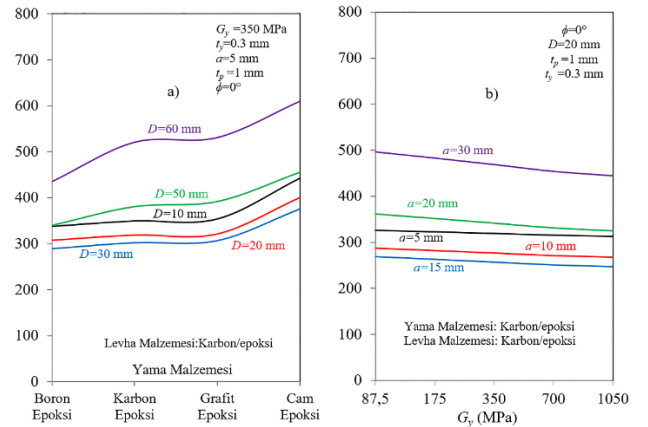
Farklı yama kalınlıkları için GŞF  $K_I$ 'in yama açısı ile değişimi Şekil 9a'da gösterilmiştir. Buna göre yama kalınlığının artması  $K_I$  değerini azaltmaktadır. Yama açısının artması ise, fiber  $0^\circ$ 'den  $90^\circ$ 'ye doğru gidildikçe yüklemeye doğrultusunda elastisite modülü azaldığından dolayı  $K_I$  değerini artırmıştır. Bu artış özellikle düşük yama kalınlıklarında daha fazladır. Dolayısı ile ince yama kalınlığı seçildiğinde, yama fiber açılarının konstrüksiyona uygun seçilmesi gerekir.  $t_p=0.5$  mm için yamadaki fiber açısı  $0^\circ$  yerine  $90^\circ$  seçilir ise  $K_I$ 'deki değişim  $53.36 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$  olarak elde edilirken,  $t_p=3$  mm'lik bir yama kalınlığı için değişim  $4.03 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$  değerinde kalmaktadır. Şekil 9b'den görüleceği üzere,  $\phi=45^\circ$ 'ye kadar  $K_I$ , yapıştırıcı kalınlığının değişiminden etkilenmez.  $\phi > 45^\circ$  için ise, yapıştırıcı kalınlığı arttıkça  $K_I$  kısmen artmıştır. Yapıştırıcı kalınlığının artırılması, yapıştırıcının asıl görevini yerine getirmesini engelleyeceği için istenmeyen bir durumdur.

Çatlak boyunun artması ile yama kalınlığının  $K_I$  üzerindeki etkisi artmaktadır.  $a=35$  mm'de  $t_p=0.5$  mm için  $K_I = 591.59 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$  iken  $t_p=3$  mm'de  $K_I = 222.22 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$  olarak elde edilmiştir (Şekil 10a). Pim çapının artması  $K_I$  değeri üzerinde yama kalınlığının etkisini artırmaktadır. Büyük delik çapları için daha kalın yamalar kullanmak çatlak için daha etkilidir (Şekil 10b).



Şekil 10: GŞF'nün, (a): Yama malzemesi, (b): Yapıştırıcı kayma modülü ile değişimi.

Farklı pim çapları için GŞF  $K_I$ 'in yama malzemesine bağlı olarak değişimi Şekil 11a'da verilmiştir. Çatlak uzunluğunun etkisine benzer olarak büyük delik çaplarında da yama malzemesinin  $K_I$  üzerindeki etkisinin büyük önem kazandığı görülmektedir.  $D=10$  mm için boron/epoksi yerine cam/epoksi kullanıldığında  $K_I$  artışı  $105.57 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$  iken, bu değer  $D=70$  mm için  $290.98 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$  olarak hesaplanmıştır.



Şekil 11: GŞF'nün (a): Yama malzemesi, (b): Yapıştırıcı kayma modülü ile değişimi.

Şekil 11b'de farklı çatlak boyları için  $K_I$  ile yapıştırıcı kayma modülünün değişimi verilmiştir. Çatlak boyunun artması ile  $K_I$   $a=15$  mm'ye kadar azalmış, sonrasında ise çatlak boyunun artması ile çatlak levhanın serbest kenarına yaklaşmasından dolayı artış olmuştur. Yapıştırıcı kayma modülünün artması ile GŞF'ndeki azalmanın özellikle büyük çatlak boylarında daha fazla olduğu görülmüştür.  $a=5$  mm için  $G_y=87.5$  MPa yerine  $G_y=1050$  MPa kayma modülüne sahip bir yapıştırıcı kullanıldığında GŞF'ndeki azalma  $12.45 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$  iken,  $a=35$  mm olduğu zaman bu azalma  $52.08 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$  değerine ulaşmıştır.

#### 4 Tartışma

Yapıştırıcı kullanılarak yama ile tamir edilmiş çatlak içeren pim delikli ortotropik kompozit levhalarda gerilme şiddet faktörleri, üç boyutlu sonlu elemanlar kullanılarak DCM metodu ile hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- Yama açısının artması küçük çatlak boylarında GŞF'nü artırırken, çatlağın uzunluğu levha serbest kenarına yaklaştıkça azaltmıştır. Yama açısının değişimi büyük çatlak boylarında daha etkili bir parametredir,
- Pim deliği merkezinden aynı uzaklıktaki çatlak uçları için hesaplanan GŞF değerleri karşılaştırıldığında, büyük delik çaplarında, büyük çatlak uzunluğuna göre daha büyük GŞF elde edilmiştir,
- Karbon/epoksi yama malzemesi kullanıldığı zaman, en büyük GŞF boron/epoksi levha malzemesi için, en küçük GŞF ise cam/epoksi levha malzemesi için elde edilmiştir,
- Yama malzemesinin çekme doğrultusundaki elastisite modülünün yüksek değerleri için GŞF, yama açısının değişiminden daha fazla etkilenmektedir. Levha malzemesinin değişimi için bu durum incelendiğinde tam tersi olduğu görülür,
- Düşük yama kalınlığında, yama açısındaki değişim GŞF değerini daha fazla etkilemektedir. Yama kalınlığının artması GŞF değerini azaltmıştır,
- 45°'ye kadar GŞF yapıştırıcı kalınlığının değişiminden etkilenmez 45°'den sonra ise yapıştırıcı kalınlığı arttıkça GŞF artmaktadır,
- Büyük çatlak boylarında yama kalınlığının artması GŞF değerini daha fazla etkileyerek önemli ölçüde azaltmıştır. Benzer şekilde delik çapının artması ile yama kalınlığının etkisi GŞF üzerinde önem kazanmaktadır,
- Büyük pim çapları için yama malzemesi değişiminin  $K_I$  üzerindeki etkisi artmaktadır,
- Büyük çatlak boylarında yapıştırıcı kayma modülünün etkisi daha fazladır. Çatlak boyu arttıkça GŞF'ndeki azalma miktarı daha fazla olmaktadır. Benzer olarak pim çapının artması ile yapıştırıcı kayma modülünün GŞF üzerindeki etkisi artmaktadır.

## 5 Semboller listesi

$a$	: Çatlak boyu (mm),
$D$	: Pim çapı (mm),
$E_1$	: Fiber doğrultusundaki elastisite modülü (MPa),
$E_2, E_3$	: Fibere dik doğrultulardaki elastisite modülleri (MPa),
$G_y$	: Yapıştırıcı kayma modülü (MPa),
$G_{12}$	: 1-2 düzlemindeki kayma modülü (MPa),
$G_{23}, G_{13}$	: 1-2 düzlemine dik düzlemlerdeki kayma modülleri (MPa),
$h$	: Levha yüksekliği (mm),
$K_{I,II,III}$	: Gerilme şiddet faktörü $MPa\sqrt{mm}$ ,
$r$	: Tekil eleman uzunluğu (mm),
$S_{ij}$	: Malzemenin esneklik matrisi
$t$	: Levha kalınlığı (mm),
$t_p$	: Yama kalınlığı (mm),
$t_y$	: Yapıştırıcı kalınlığı (mm),
$u_r$	: Radyal doğrultudaki yer değiştirme (mm),
$u_{x,y,z}$	: x, y ve z eksenlerindeki yer değiştirmeler (mm),
$w$	: Levha genişliği (mm),
$\varepsilon$	: Şekil değiştirme oranı,
$\phi$	: Yama fiber takviye açısı (°),
$\nu_{12}$	: 1-2 düzlemindeki Poisson oranı,

$\nu_{23}, \nu_{13}$	: 1-2 düzlemine dik düzlemlerdeki Poisson oranları,
$\mu_i$	: Uygunluk denkleminin pozitif sanal kökleri,
$\sigma$	: Gerilme (MPa).

## 6 Kaynaklar

- [1] Dano ML, Gendron G, Picard A. "Stress and failure analysis of mechanically fastened joints in composite laminates". *Composite Structures*, 50(3), 287-296, 2000.
- [2] Ayatollahi MR, Hashemi R. "Mixed mode fracture in an inclined center crack repaired by composite patching". *Composite Structures*, 81(2), 264-273, 2007.
- [3] Bouiadjra BB, Belhouari M, Serier B. "Computation of the stress intensity factors for repaired cracks with bonded composite patch in mod I and mixed mode". *Composite Structures*, 56(4), 401-406, 2002.
- [4] Seo DC, Lee JJ. "Fatigue crack growth behavior of cracked aluminum plate repaired with composite patch". *Composite Structures*, 57(1-4), 323-330, 2002.
- [5] Schubbe JJ, Mall S. "Investigation of a cracked thick aluminum panel repaired with a bonded composite patch". *Engineering Fracture Mechanics*, 63(3), 305-323, 1999.
- [6] Emdad R, Al-Mahaidi R. "Effect of prestressed CFRP patches on crack growth of centre-notched steel plates". *Composite Structures*, 123, 109-122, 2015.
- [7] Reddy S, Jaswanthasai V, Madhavann M, Kumar V. "Notch stress intensity factor for center cracked plates with crack stop hole strengthened using CFRP: A numerical study". *Thin-Walled Structures*, 98(B), 252-262, 2016.
- [8] Srilakshmi R, Ramji M, Chinthapenta V. "Fatigue crack growth study of CFRP patch repaired Al 2014-T6 panel having an inclined center crack using FEA and DIC". *Engineering Fracture Mechanics*, 134, 182-201, 2015.
- [9] Errouane H, Sereir Z, Chateaneuf A. "Numerical model for optimal design of composite patch repair of cracked aluminum plates under tension". *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 49, 64-72, 2014.
- [10] Turan K, Kaman MO, Gur M. "Progressive failure analysis of laminated composite plates with two serial pinned joints". *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 22(10), 839-849, 2015.
- [11] Liu X, Wang G. "Progressive failure analysis of bonded composite repairs". *Composite Structures*, 81(3), 331-340, 2007.
- [12] Okutan B, Karakuzu R. "The strength of pinned joints in laminated composites". *Composites Science and Technology*, 63(6), 893-905, 2003.
- [13] Atas A, Arslan N, Sen F. "Failure analysis of laminated composite plates with two parallel pin-loaded holes". *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 28(10), 1265-1276, 2009.
- [14] Madani K, Touzain S, Feaugas X, Cohendouz S, Ratwani M. "Experimental and numerical study of repair techniques for panels with geometrical discontinuities". *Computational Materials Science*, 48(1), 83-93, 2010.
- [15] Ahmad H, Crocombe AD, Smith PA. "Strength prediction in CFRP woven laminate bolted double-lap joints under quasi-static loading using XFEM". *Composites: Part A*, 56, 192-202, 2014.
- [16] Abd-Elhady AA, Sallam HEDM. "Crack sensitivity of bolted metallic and polymeric joints". *Engineering Fracture Mechanics*, 147, 55-71, 2015.

- [17] Liging W, Bingzheng G. "Numerical computation of stress intensity factor for bolt-hole corner crack in mechanical joints", *Chinese Journal of Aeronautics*, 21(5), 411-416, 2008.
- [18] Fawaz AS, Anderson B. "Accurate stress intensity factor solutions for corner cracks at a hole", *Engineering Fracture Mechanics*, 71, 1235-1254, 2004.
- [19] Horng LT, Ju HS. "Behaviors of a single crack in multiple bolted joints", *International Journal of Solids and Structures*, 36(27), 4055-4070, 1999.
- [20] Wanga W, Ransa C, Zhangb Z, Benedictus R. "Prediction methodology for fatigue crack growth behaviour in fibre metal laminates subjected to tension and pin loading". *Composite Structures*, 182(15), 176-182, 2017.
- [21] Kabeel AM, Maimi P, Gonzalez EV, Gascons N. "Net-tension strength of double-lap joints under bearing-bypass loading conditions using the cohesive zone mode". *Composite Structures*, 119, 443-451, 2015.
- [22] ANSYS, 13.0, (Academic Teaching Introductory) Command References and Gui.
- [23] Arman Y, Zor M, Aksoy S. "Determination of critical delamination diameter of laminated composite plates under buckling loads". *Composites Science and Technology*, 66(15), 2945-2953, 2006.
- [24] Okafor C, Bhogapurapu H. "Design and analysis of adhesively bonded thick composite patch repair of corrosion grind-out and cracks on 2024 T3 clad aluminum aging aircraft structures". *Composite Structures*, 6(1-2), 138-150, 2006.
- [25] Ayatollahi MR, Hashemi R. "Mixed mode fracture in an inclined center crack repaired by composite patching". *Composite Structures*, 81(2), 264-273, 2007.
- [26] Toudeshkya HH, Ghaffaria MA, Mohammadib B. "Fatigue propagation of induced cracks by stiffeners in repaired panels with composite patches". *Procedia Engineering*, 10, 3285-3290, 2011.
- [27] Gu L, Kasavajhala ARM, Zhao S. "Finite element analysis of cracks in aging aircraft structures with bonded composite-patch repairs". *Composites: Part B*, 42(3), 505-510, 2011.
- [28] Ozkan U, Kaya AC, Loghin A, Ayhan A, Nied HF. "Fracture analysis of cracks in anisotropic materials using 3DFAS and ANSYS", *ASME Applied Mechanics Division, Proceedings of IMECE 2006*, Chicago, Illinois, USA, 5-10 November 2006.
- [29] Kaman MO, Cetişli F. "Yama ile tamir edilmiş kenar çatlak içeren kompozit levha probleminin sayısal analizi". *9. Uluslararası Kırılma Konferansı, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye*, 19-21 Ekim 2011.
- [30] Gündüz Y. Yama ile Tamir Edilmiş Çatlak İçeren Pim Bağlantılı Kompozitlerde Kırılma Davranışının Sayısal Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye, 2013.
- [31] Turaga VRS, Ripudaman S. "Modeling of patch repairs to a thin cracked sheet". *Engineering Fracture Mechanics*, 62(2-3), 267-89, 1999.
- [32] Kaman MO, Gündüz Y, Turan K. "Kompozit yama ile tamir edilmiş pim delikli levhalarda çatlak problemi". *I. Ulusal Ege Kompozit Malzemeler Sempozyumu*, İzmir, Türkiye, 17-19 Kasım, 2011.
- [33] Kaya AC, Erdogan F. "Stress intensity factors and COD in an orthotropic strip". *International Journal of Fracture*, 16(2), 171-190, 1980.