

YAMA İLE TAMİR EDİLMİŞ ÇATLAK İÇEREN PİM
BAĞLANTILI KOMPOZİTLERDE KIRILMA
DAVRANIŞININ SAYISAL ANALİZİ

Mak.Müh.Yunus GÜNDÜZ

Yüksek Lisans Tezi

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Mete Onur KAMAN

OCAK-2013

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YAMA İLE TAMİR EDİLMİŞ ÇATLAK İÇREN PİM BAĞLANTILI
KOMPOZİTLERDE KIRILMA DAVRANIŞININ SAYISAL ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yunus GÜNDÜZ

101120102

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih:18.12.2012

Tezin Savunulduğu Tarih:11.01.2013

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Mete Onur KAMAN

Diğer Jüri Üyeleri: Prof. Dr. Aydın TURGUT

Yrd. Doç. Dr. Mustafa GÜR

OCAK – 2013

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmamın gerçekleşmesi sürecinde tezimin planlanıp yürütülmesinde büyük bir titizlik, sabır ve özveriyle bana destek olan, yakın ilgi ve yardımlarını gördüğüm, beni araştırmaya yönelten ve hiçbir yardımını benden esirgemeyen kıymetli danışman hocam, Sayın Yrd. Doç. Dr. Mete Onur KAMAN'a sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Seminer çalışmamda yardım ve desteklerinden dolayı Mekanik Anabilim Dalı Öğretim Başkanı Sayın Yrd.Doç.Dr. Mustafa GÜR'e ve Mekanik Anabilim Dalı Öğretim Üyesi Sayın Yrd.Doç.Dr. Murat Yavuz SOLMAZ'a teşekkür ederim.

Yüksek lisans ders dönemim boyunca kendilerinden ders alma fırsatı bulduğum, bilgi ve deneyimlerinden yararlanarak fikir alışverişinde bulunduğum kıymetli hocam Sayın Prof. Dr. Aydın TURGUT'a, sonsuz saygı ve şükranlarımı sunarım.

Ayrıca bana seminerimde yardım ve desteklerini esirgemeyen Makine Mühendisliği Bölüm Başkanı Doç.Dr. Haydar EREN'e teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca çalışmam sırasında bana destek olan ve sabır gösteren eşime en içten teşekkürlerimi sunarım.

Yunus GÜNDÜZ
Makine Mühendisi
ELAZIĞ – 2012

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	I
İÇİNDEKİLER.....	II
ÖZET.....	IV
SUMMARY	V
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	VI
TABLolar LİSTESİ.....	XII
SEMBOLLER LİSTESİ	XIII
KISALTMALAR LİSTESİ.....	XV
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	3
3. KOMPOZİT MALZEMELER.....	6
3.1. Fiber Takviyeli Kompozit Malzemeler.....	7
3.2. Tabakalı Kompozitler.....	9
3.3. Kompozit Tabakalarının Makromekanik Analizi.....	10
3.3.1. İzotropik Tabaka.....	10
3.3.2. Ortotropik Tabaka.....	13
3.3.2.1. Gerilme Bağlantıları.....	15
3.3.2.2. Şekil Değişirme Bağlantıları.....	17
3.3.2.3. Gerilme – Şekil Değişirme Bağlantıları.....	21
3.3.2.4. Mühendislik Sabitleri.....	25

4. KIRILMA MEKANİĞİ.....	27
4.1. Lineer Elastik Kırılma Mekanîği.....	28
4.1.1. Gerilme Şiddet Faktörü.....	29
4.1.2. Mod I Ve Mod II İçin Elastik Gerilme Alanı Denklemleri.....	30
4.1.3. Kırılma Tokluğu.....	33
4.2. Enerji Dengesi.....	34
4.3. Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerde Kırılma.....	40
5. GERİLME ŞİDDET FAKTÖRÜNÜN SAYISAL ÇÖZÜMÜ.....	44
5.1 İzotropik Malzemeler İçin gerilme Şiddet Faktörü.....	44
5.2. Anizotrop Malzemeler İçin Gerilme Şiddet Faktörü.....	46
6. PROBLEM TANIMI.....	52
7. SONUÇLAR.....	56
8. TARTIŞMA ve ÖNERİLER.....	119

ÖZET

Bu çalışmada, bir yüzü kompozit yama ile tamir edilmiş pim delikli bir kompozit levhadaki çatlak ucu gerilme şiddet faktörü çekme yükü etkisi altında sayısal olarak hesaplanmış ve hesaplanmış ve geometri ve malzeme gibi değişken parametrelerin etkisi incelenmiştir. Çözümde çatlak ucu yer değiştirmeleri sonlu elemanlar paket programı ANSYS ile bulunmuştur ve tamir edilmiş levha üç boyutlu olarak modellenmiştir. Gerilme şiddet faktörü; *Yer değiştirme Korelasyon (YK)* metodu ile hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar grafikler halinde sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Kompozit yama, gerilme şiddet faktörü, sonlu elemanlar metodu, yapıştırıcı, pim bağlantısı.

SUMMARY

In this study, the pin hole on one side and a composite plate was repaired with composite patch crack tip stress intensity factor under the influence of tensile load was calculated and calculated numerically investigated the effect of variable parameters, such as geometry and material. Crack tip displacements in the finite element program *ANSYS* solution, was found and repaired with a plate is modeled as a three-dimensional. Stress intensity factor, the Displacement Correlation (*DC*) were calculated by the method. The results obtained are presented graphically.

Keywords: Composite patch, stress intensity factor, finite element method, glue, pin connection.

ŞEKİLLER LİSTESİ

<u>Sekil No</u>	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1 Pim bağlantılarının hasar modları.....	1
Şekil 3.1 Kompozit malzemenin oluşumu ve tanımlanması.....	8
Şekil 3.2 Üç boyutlu gerilme sistemi.....	11
Şekil 3.3 Referans eksenleri hakkında ortotropik tabaka doğrultusu a) referans (x,y) θ doğrultusunda tabakanın esas eksenleri (1,2), b) (1,2) ve (x,y) eksenlerinde gerilim altındaki bir eleman.....	15
Şekil 3.4 Normal ve kayma uzamaları altında deformasyona uğrayan bir eleman.....	19
Şekil 4.1 a) Sünek kırılma tek kristallerde kayma kırılması b) Gevrek kırılma c) Çok kristallerde sünek kırılması d) Çok kristallerde tam sünek kırılma.....	27
Şekil 4.2 a) Tane içi b) taneler arası kırılma.....	28
Şekil 4.3 a) Mod I-çekme, b) Mod II-kayma, c) Mod III-makaslama.....	29
Şekil 4.4 Çatlak ucunda bir noktada gerilme.....	30
Şekil 4.5 İnce bir çatlak içeren iki ekseninde yüklenmiş sonsuz bir levha.....	31
Şekil 4.6 Merkezinde çatlak bulunan sonlu genişlikte numune.....	33
Şekil 4.7 Bir malzemede numune kalınlığının K_C 'ye etkisinin şematik olarak gösterilişi.....	34
Şekil 4.8 Bir çentik ve çatlağın ucunda gerilme.....	35
Şekil 4.9 Elyaf takviyeli kompozit malzemelerde oluşan hasar türleri.....	41
Şekil 4.10 Elyaf takviyeli kompozit malzemelerde çekme durumunda rastlanan kırılma türleri.....	41
Şekil 4.11 Mod I ve mod II türü yükleme koşullarında oluşan tabaka ayrılması sonucu elyaf takviyeli kompozit malzemede oluşan çatlak ilerleme mekanizmaları [38].....	43
Şekil 5.1 Çatlak ucunda sonlu elemanlar modeli.....	44
Şekil 5.2 Yer değiştirme ekstrapolasyon metodu için çatlak bölgesi düğümleri ve yer değiştirmeler.....	46
Şekil 5.3 Çeyrek-nokta eleman için çatlak bölgesi düğümleri ve yer değiştirmeler.....	48
Şekil 6.1. Kompozit yama ile tamir edilmiş pim delikli kompozit levhanın arkadan görünüşü.....	52

Şekil 6.2. Kompozit yama ile tamir edilmiş pim delikli kompozit levhanın önden görünüşü ve boyutları.....	52
Şekil 6.3 Problemin sonlu elemanlar modeli.....	54
Şekil 6.4 Kenar çatlaklı ortotropik levha problemi sonlu elemanlar modeli.....	55
Şekil 7.1 Farklı β çatlak açısı için K_I gerilme şiddet faktörünün ϕ yama açısı ile değişimi($MPa\sqrt{mm}$).....	57
Şekil 7.2 Farklı β çatlak açısı için K_{II} gerilme şiddet faktörünün ϕ yama açısı ile değişimi($MPa\sqrt{mm}$).....	58
Şekil 7.3 Farklı a çatlak boyu için K_I gerilme şiddet faktörünün ϕ yama açısı ile değişimi ($MPa\sqrt{mm}$).....	59
Şekil 7.4 Farklı a çatlak boyu için K_{II} gerilme şiddet faktörünün ϕ yama açısı ile değişimi($MPa\sqrt{mm}$).....	60
Şekil 7.5 Farklı pim deliği çapları için K_I gerilme şiddet faktörünün ϕ yama açısı ile değişimi($MPa\sqrt{mm}$).....	61
Şekil 7.6 Farklı pim deliği çapları için K_{II} gerilme şiddet faktörünün ϕ yama açısı ile değişimi ($MPa\sqrt{mm}$).....	62
Şekil 7.7 Farklı α levha açısı için K_I gerilme şiddet faktörünün ϕ yama açısı ile değişimi($MPa\sqrt{mm}$).....	63
Şekil 7.8 Farklı α levha açısı için K_{II} gerilme şiddet faktörünün ϕ yama açısı ile değişimi($MPa\sqrt{mm}$).....	64
Şekil 7.9 Farklı levha malzemeleri için K_I gerilme şiddet faktörünün ϕ yama açısı ile değişimi($MPa\sqrt{mm}$).....	65
Şekil 7.10 Farklı levha malzemeleri için K_{II} gerilme şiddet faktörünün ϕ yama açısı ile değişimi($MPa\sqrt{mm}$).....	66
Şekil 7.11 Farklı yama kalınlıkları için K_I gerilme şiddet faktörünün yama açısı ile değişimi($MPa\sqrt{mm}$).....	67
Şekil 7.12 Farklı yama kalınlıkları için K_{II} gerilme şiddet faktörünün yama açısı ile değişimi($MPa\sqrt{mm}$).....	68

Şekil 7.13 Farklı yama malzemeleri için K_I gerilme şiddet faktörünün yama açısı ile değişimi ($MPa\sqrt{mm}$).....	69
Şekil 7.14 Farklı yama malzemeleri için K_{II} gerilme şiddet faktörünün yama açısı ile değişimi ($MPa\sqrt{mm}$).....	70
Şekil 7.15 Farklı yapıştırıcı kalınlıkları için K_I gerilme şiddet faktörünün yama açısı ile değişimi ($MPa\sqrt{mm}$).....	71
Şekil 7.16 Farklı yapıştırıcı kalınlıkları için K_{II} gerilme şiddet faktörünün yama açısı ile değişimi ($MPa\sqrt{mm}$).....	72
Şekil 7.17 Farklı çatlak açıları için K_I gerilme şiddet faktörünün yama kalınlığı (t_p) ile değişimi ($MPa\sqrt{mm}$).....	73
Şekil 7.18. Farklı çatlak açıları için K_{II} gerilme şiddet faktörünün yama kalınlığı (t_p) ile değişimi ($MPa\sqrt{mm}$).....	74
Şekil 7.19 Farklı çatlak boyları için K_I gerilme şiddet faktörünün yama kalınlığı (t_p) ile değişimi ($MPa\sqrt{mm}$).....	75
Şekil 7.20 Farklı çatlak boyları için K_{II} gerilme şiddet faktörünün yama kalınlığı (t_p) ile değişim ($MPa\sqrt{mm}$).....	76
Şekil 7.21 Farklı pim deliği çapları için K_I gerilme şiddet faktörünün yama kalınlığı (t_p) ile değişimi ($MPa\sqrt{mm}$).....	77
Şekil 7.22 Farklı pim deliği çapları için K_{II} gerilme şiddet faktörünün yama kalınlığı (t_p) ile değişimi ($MPa\sqrt{mm}$).....	78
Şekil 7.23 Farklı α levha açısı için K_I gerilme şiddet faktörünün yama kalınlığı (t_p) ile değişimi ($MPa\sqrt{mm}$).....	79
Şekil 7.24 Farklı α levha açısı için K_{II} gerilme şiddet faktörünün yama kalınlığı (t_p) ile değişimi ($MPa\sqrt{mm}$).....	80
Şekil 7.25 Farklı levha malzemeleri için K_I gerilme şiddet faktörünün yama kalınlığı (t_p) ile değişimi ($MPa\sqrt{mm}$).....	81
Şekil 7.26 Farklı levha malzemeleri için K_{II} gerilme şiddet faktörünün yama kalınlığı (t_p) ile değişimi ($MPa\sqrt{mm}$).....	82

Şekil 7.27 Farklı çatlak açıları için K_I gerilme şiddet faktörünün yama malzemesi ile değişimi($MPa\sqrt{mm}$).....	83
Şekil 7.28 Farklı çatlak açıları için K_{II} gerilme şiddet faktörünün yama malzemesi ile değişimi($MPa\sqrt{mm}$).....	84
Şekil 7.29 Farklı çatlak boyları için K_I gerilme şiddet faktörünün yama malzemesi ile değişimi($MPa\sqrt{mm}$).....	85
Şekil 7.30 Farklı çatlak boyları için K_{II} gerilme şiddet faktörünün yama malzemesi ile değişimi($MPa\sqrt{mm}$).....	86
Şekil 7.31 Farklı pim çapları için K_I gerilme şiddet faktörünün yama malzemesi ile değişimi($MPa\sqrt{mm}$).....	87
Şekil 7.32 Farklı pim çapları için K_{II} gerilme şiddet faktörünün yama malzemesi ile değişimi($MPa\sqrt{mm}$).....	88
Şekil 7.33 Farklı levha açıları için K_I gerilme şiddet faktörünün yama malzemesi ile değişimi($MPa\sqrt{mm}$).....	89
Şekil 7.34 Farklı levha açıları için K_{II} Gerilme şiddet faktörünün yama malzemesi ile değişimi($MPa\sqrt{mm}$).....	90
Şekil 7.35 Farklı levha malzemeleri için K_I gerilme şiddet faktörünün yama malzemesi ile değişimi ($MPa\sqrt{mm}$).....	91
Şekil 7.36 Farklı yama kalınlıkları için K_I gerilme şiddet faktörünün yama malzemesi ile değişimi($MPa\sqrt{mm}$).....	92
Şekil 7.37 Farklı yapıştırıcı kalınlıkları için K_I gerilme şiddet faktörünün levha malzemesi ile değişimi($MPa\sqrt{mm}$).....	93
Şekil 7.38 Farklı yapıştırıcı kalınlıkları için K_I gerilme şiddet faktörünün çatlak boyu ile değişimi($MPa\sqrt{mm}$).....	94
Şekil 7.39 Farklı çatlak açıları için K_I gerilme şiddet faktörünün çatlak boyu ile değişimi($MPa\sqrt{mm}$).....	95
Şekil 7.40 Farklı çatlak açıları için K_{II} gerilme şiddet faktörünün çatlak boyu ile değişimi($MPa\sqrt{mm}$).....	96

Şekil 7.41 Farklı çatlak boyları için K_I gerilme şiddet faktörünün pim çapı ile değişimi($MPa\sqrt{mm}$).....	97
Şekil 7.42 Farklı çatlak açıları için K_I gerilme şiddet faktörünün pim çapı ile değişimi($MPa\sqrt{mm}$).....	98
Şekil 7.43 Farklı çatlak açıları için K_{II} gerilme şiddet faktörünün pim çapı ile değişimi($MPa\sqrt{mm}$).....	99
Şekil 7.44 Farklı levha açıları için K_I gerilme şiddet faktörünün pim çapı ile değişimi($MPa\sqrt{mm}$).....	100
Şekil 7.45 Farklı levha açıları için K_{II} gerilme şiddet faktörünün pim çapı ile değişimi($MPa\sqrt{mm}$).....	101
Şekil 7.46 Farklı yapıştırıcı kalınlıkları için K_I gerilme şiddet faktörünün levha açısı ile değişimi($MPa\sqrt{mm}$).....	102
Şekil 7.47 Farklı yapıştırıcı kalınlıkları için K_{II} gerilme şiddet faktörünün levha açısı ile değişimi($MPa\sqrt{mm}$).....	103
Şekil 7.48 Farklı çatlak açıları için K_I gerilme şiddet faktörünün levha açısı ile değişimi($MPa\sqrt{mm}$).....	104
Şekil 7.49 Farklı çatlak açıları için K_{II} gerilme şiddet faktörünün levha açısı ile değişimi($MPa\sqrt{mm}$).....	105
Şekil 7.50 Farklı çatlak boyları için K_I gerilme şiddet faktörünün levha açısı ile değişimi($MPa\sqrt{mm}$).....	106
Şekil 7.51 Farklı çatlak boyları için K_{II} gerilme şiddet faktörünün levha açısı ile değişimi($MPa\sqrt{mm}$).....	107
Şekil 7.52 Farklı çatlak açıları için K_I gerilme şiddet faktörünün yapıştırıcı Kayma modülü ile değişimi($MPa\sqrt{mm}$).....	108
Şekil 7.53 Farklı çatlak açıları için K_{II} gerilme şiddet faktörünün yapıştırıcı Kayma modülü ile değişimi($MPa\sqrt{mm}$).....	109
Şekil 7.54 Farklı çatlak boyları için K_I gerilme şiddet faktörünün yapıştırıcı Kayma modülü ile değişimi($MPa\sqrt{mm}$).....	110

Şekil 7.55 Farklı pim çapları için K_I gerilme şiddet faktörünün yapıştırıcı Kayma modülü ile değişimi($MPa\sqrt{mm}$).....	111
Şekil 7.56 Farklı levha açıları için K_I gerilme şiddet faktörünün yapıştırıcı Kayma modülü ile değişimi($MPa\sqrt{mm}$).....	112
Şekil 7.57 Farklı levha açıları için K_{II} gerilme şiddet faktörünün yapıştırıcı Kayma modülü ile değişimi($MPa\sqrt{mm}$).....	113
Şekil 7.58 Farklı levha malzemeleri için K_I gerilme şiddet faktörünün yapıştırıcı Kayma modülü ile değişimi($MPa\sqrt{mm}$).....	114
Şekil 7.59 Farklı yapıştırıcı kalınlıkları için K_I gerilme şiddet faktörünün yapıştırıcı Kayma modülü ile değişimi($MPa\sqrt{mm}$).....	115
Şekil 7.60 Farklı yama açıları için K_I Gerilme şiddet faktörünün yapıştırıcı Kayma modülü ile değişimi($MPa\sqrt{mm}$).....	116
Şekil 7.61 Farklı yama açıları için K_{II} gerilme şiddet faktörünün yapıştırıcı Kayma modülü ile değişimi($MPa\sqrt{mm}$).....	117
Şekil 7.62 Farklı yama kalınlıkları için K_I gerilme şiddet faktörünün yapıştırıcı Kayma modülü ile değişimi($MPa\sqrt{mm}$).....	118

TABLÖLAR LİSTESİ

<u>Tablo No.</u>	<u>Sayfa No</u>
Tablo 6.1 Modelin geometrik ve malzeme özellikleri.....	53
Tablo 6.2 Karbon, Boron, Grafit ve Cam Epoksi kompozitlerin mekanik özellikleri.....	53
Tablo 6.3 Problemin sonlu eleman modeline göre düğüm sayıları.....	55

SEMBOLLER LİSTESİ

a	:Çatlak yarı boyu
B	: Numune kalınlığı
D	:Pim çapı
E	:Elastisite modülü
F	:Dış etkiler ile gerçekleştirilen iş
G	:Kayma modülü
G_C	:Kritik enerji yayılım hızı
G_{IC}	:Mod I için kırılma direnci
G_{IIC}	:Mod II için kırılma direnci
G_{IIIC}	:Mod III için kırılma direnci
G_y	:Yapıştırıcı kayma modülü
K	:Gerilme şiddet faktörü
K_C	:Düzlem gerilme durumunda kırılma tokluğu
K_I	:Mod I gerilme şiddet faktörü
K_{IC}	:Düzlem germe durumunda kırılma tokluğu
K_{II}	:Mod II gerilme şiddet faktörü
K_{III}	:Mod III gerilme şiddet faktörü
L	:Numune boyu
Mod I	:Çekme (açılma) modu
Mod II	:Kayma modu
Mod III	:Makaslama modu
P	:Uygulanan yük
r	:Çatlak ucundan olan uzaklık
R	:Çatlak direnci
S_{ij}	:Kompliyans matrisi
t_p	:Yama kalınlığı
t_y	:Yapıştırıcı kalınlığı
u	:Kiriş ucundaki deformasyon

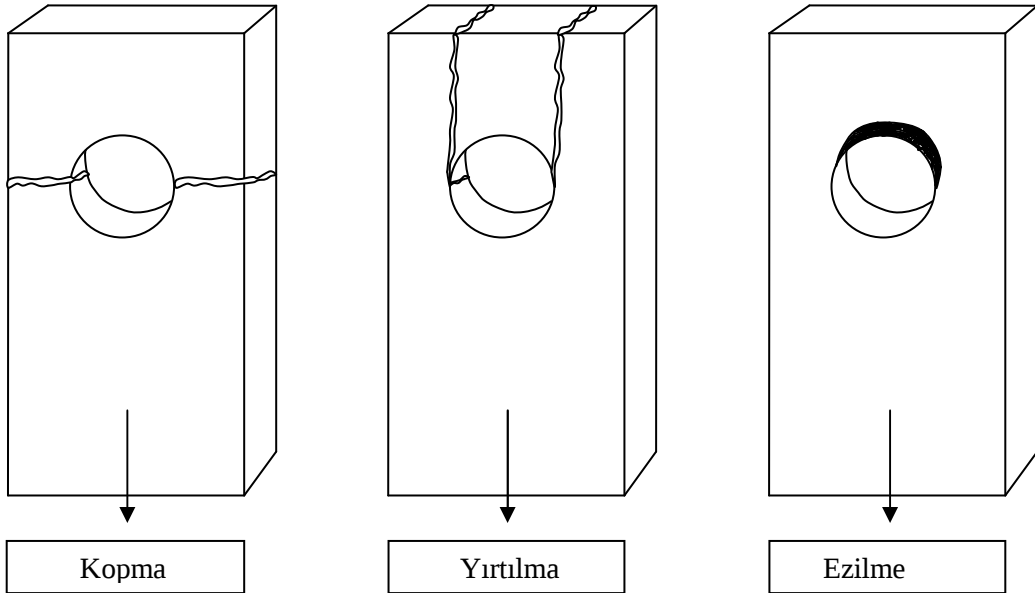
U	: Çatlak içeren levhanın enerjisi
U_0	:Yüklenmiş fakat çatlak içermeyen levhanın elastik enerjisi
U_a	:Levhada çatlağın oluşmasıyla elastik şekil değiştirme enerjisindeki değişim
U_γ	:Çatlak yüzeylerinin oluşmasıyla elastik yüzey enerjisindeki değişim
W	:Numune genişliği
α	: Levha fiber takviye açısı
β	:Çatlak açısı
ϕ	:Yama fiber takviye açısı
$f(a/W)$	:Numune ve çatlak geometrisine bağlı boyutsuz bir büyüklük
θ	:Çatlak ucuna göre noktanın açısal olarak konumu
θ	:Temel eksen ile yapılan açı
ν	:Poisson oranı
ρ	:Çatlak ucu eğrilik yarıçapı
σ	:Normal gerilme
Δ_u	:Çatlak ucu bölgesinde düğümlerin x doğrultusunda yer değiştirmeler
Δ_v	:Çatlak ucu bölgesinde düğümlerin y doğrultusunda yer değiştirmeleri
Δ_w	:Çatlak ucu bölgesinde düğümlerin z doğrultusunda yer değiştirmeleri
γ_e	:Elastik yüzey enerjisi
γ_p	:Plastik deformasyon enerjisi
σ_1	:1 yönündeki gerilme
σ_2	:2 yönündeki gerilme
σ_3	:3 yönündeki gerilme
σ_c	:Kritik gerilme
σ_F	:Hasar gerilmesi
σ_x	: x yönündeki gerilme
σ_{xy}	:Kayma gerilmesi
σ_y	: y yönündeki gerilme

KISALTMALAR

COD	:Çatlak Ucu Açılma Yerdeğiştirmesi
ÇAK	:Çift Ankastre Kiriş
HMK	:Hacim Merkezli Kübik
SEM	:Sonlu Elemanlar Metodu
SOKM	:Sabit Oranlı Karışık Mod
SPH	:Sıkı Paket Hekzagonal
UÇE	:Uçtan Çentikli Eğme
UYA	:Uçtan Yükleme Ayrılma
YK	Yer Değiştirme Korelasyon Tekniği
YMK	:Yüzey Merkezli Kübik

1. GİRİŞ

Yapı veya makine kontrüksüyonlarında birleştirme için değişik montaj elemanları kullanılmaktadır. Bağlantı şekilleri itibari ile çözülebilir ve çözülemez olmak üzere iki ana grupta incelenebilir. Çözülebilir bağlantı elamanları olarak cıvata, pim vs. sayılabilir. Bu tip bağlantı elemanları ile yapılan birleştirmeler ekonomik ve kullanım kolaylığına sahip olup; daha yaygın bir kullanın alanına sahiptirler. Pimli bağlantıların otomotiv sanayiden uzay ve deniz araçlarına kadar geniş kullanım alanları vardır. Pim bağlantısı ile mekanik olarak sabitlenmiş plakalarla yapılan deneysel çalışmalar, bağlantıların çekme kuvvetine maruz kaldıklarında genel olarak kopma, yırtılma ve yataklama olmak üzere üç temel hasar modunda bozulduklarını göstermiştir. Her bir hasar modunun meydana getirdiği hasar tipleri Şekil 1.1’de gösterilmiştir. Ayrıca hasarlar bu modların karışımı şeklinde de olabilirler [1].



Şekil 1.1 Pim bağlantılarının hasar modları

Cıvata bağlantıları özellikle yüksek yük taşıma/iletme kapasitelerine sahip olmaları, pahalı yüzey hazırlama işlemleri gerektirmemeleri, çevre koşullarından fazla etkilenmemeleri ve maliyetlerinin düşük olması gibi nedenlerle tercih edilmektedirler. Bu avantajlarına rağmen, birleştirilecek olan parçalara açılacak delikler nedeni ile yapının mukavemetini düşürmektedirler. Gerekli tasarım önlemleri alınmadığında, bu delikler etrafında oluşan gerilme yığılmaları nedeni ile başlayan hasar ilerleyerek tüm yapının hasara uğramasına, işlevini kaybetmesine neden olmaktadır [2-6].

Oluşan çatlaklar, günümüzde yapıştırıcı ve yapıştırma teknolojisinin gelişmesi sonucu uygulama ve maliyet açısından avantaj sağlayan yama yöntemi ile başarı ile tamir edilebilmektedir. Çentik, çatlak vb. hatalar içeren mühendislik yapılarının yapıştırıcı kullanılarak tamirinde sıklıkla kompozit malzemeler tercih edilmektedir [7]. Özellikle hava taşıtlarının gövde ve iç yüzeyinde çatlak içeren bölgenin dışarıdan yapıştırıcı kullanılarak kompozit yama ile tamir edilmesinde başarılı sonuçlar elde edilmiştir [8]. Kompozit yama yapının yorulma ve korozyon dayanımını arttırmanın yanında karmaşık şekillere de kolay uyum sağlar [9].

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Literatürdeki çalışmalar özellikle pim delikli levhalarda hasar analizi üzerine yoğunlaşmaktadır [27-28]. Çatlak içeren levha problemleri analitik [29] ve sayısal [30] olarak çözülebilmektedir. Sayısal çözüm tekniğinin ve programlarının gelişmesine paralel olarak, analitik olarak çözümü zor olan problemleri sayısal olarak inceleme olanağı tanımıştır.

Bunla birlikte ideal tamir tasarımını elde etmek için yapılan deneysel çalışmaların yanında [10-12] yapılan sayısal çalışmalar daha fazla ön plana çıkmaktadır.

Aktaş ve Orhan [13], içinde pim bulunan bir levhanın çatlak ilerleme yönü ve Gerilme şiddet faktörünü sonlu elemanlar metodu ile incelemişlerdir. Sonlu elemanlar analizi için *Franc2DL* programını kullanmışlardır. Levhanın delik kenarlarında 0° - 180° açılarında 2 mm uzunluğunda çatlak oluşturup; her bir açı değeri için Gerilme şiddet faktörleri ve çatlak ilerleme açılarını tespit etmişlerdir. Sonlu Elemanlar Metodu ve analitik olarak bulunan çatlak ilerleme açılarının birbirine yakın olduğu sonucuna varmışlardır.

Liqing ve Bingzheng [14], mekanik bağlantılarda cıvata deliğinin çeyrek eliptik köşe çatlak probleminin çözümünde üç boyutlu sonlu elemanlar analizi kullanmışlardır. Ön çatlak boyunca Gerilme şiddet faktörünü yer değiştirme korelasyon tekniği kullanılarak değerlendirmişler ve Gerilme şiddet faktöründe cıvata delik arasındaki boşluğun etkisini araştırmışlardır. Sayısal sonuçlar göstermiştir ki; çekme yükü altında çatlak açılması (Mod I) için Gerilme şiddet faktörü, mevcut açıklık durumlarında ve açıklıktaki azalma ile azalır.

Fawaz ve Anderson [15], bir delikte köşe çatlak için gerilme şiddet faktörünü sonlu elemanlar metodu ile sayısal çözüm hassasiyetini dikkate alarak araştırmışlardır.

Ju ve Horng [16], birden fazla cıvata bağlantılarında tek bir çatlağın davranışını incelemişler ve yük oranlarının malzeme özelliklerine duyarlı olmadığını göstermişlerdir.

Pekbey [17], pim bağlantılı kompozit plakalarda hasar yükü ve modunu deneysel olarak incelemiştir. Ön gerilme momenti (M), plakanın bir kenarından delik merkezine olan mesafesinin delik çapına oranı (E/D) ve kompozit plaka genişliğinin delik çapına oranı (W/D) gibi parametrelerin, hasara olan etkileri incelenmiştir. Yapılan deneylerle,

numuneler üzerindeki hasar tipleri ve maksimum hasar yükleri tespit edilmiştir. Tüm numunelerde, E/D ve W/D oranlarına bağlı olarak yatak, kayma, net çeki ve bunların kombinasyonları olan hasar tipleri oluşmuştur. Ayrıca, ön gerilme momentinin, yatak mukavemetini artırıcı bir etkiye sahip olduğu görülmüştür.

Oudad ve diğ. [18] kompozit yama ile tamir edilmiş hava taşıtlarında kullanılan metalik yapıların performansını üç boyutlu lineer olmayan sonlu elemanlar metodu kullanarak araştırmışlardır. Kompozit yamanın çatlak ucu plastik bölge boyutunu önemli ölçüde küçülttüğünü belirlemişlerdir.

Albedah ve diğ. [19] merkezi çatlağa sahip levhalarda dairesel kompozit yama kullanımının tek ve çift yönlü tamir performansına etkisini üç boyutlu sonlu elemanlar metodu kullanarak araştırmışlardır. Çift yönlü yama yapılmasının Gerilme şiddet faktörünü azalttığını ayrıca dairesel yamanın kütle kazanımı sağladığını göstermişlerdir.

Yarı dairesel çentikli ve çentik ucunda kenar çatlağa sahip levhada Gerilme şiddet faktörleri, yapıştırıcı kullanılarak farklı yama yarıçapları ile tamir edilmesi durumunda Quinas ve diğ.[20] tarafından hesaplanmıştır. Sayısal çalışmada, kompozit yama malzemesi olarak Grafit/Epoksi seçilmiştir. Yama yarıçapının artmasının çentik ucunda gerilme yoğunluğunu ve çatlakta ise Gerilme şiddet faktörünü azalttığını, yama performansını artırmak için yapıştırıcı özelliklerinin optimize edilmesi gerektiğini belirtmişlerdir.

Gu ve diğ.[21] V çentikli *Al7075-T6* malzemesinin 1 ve 4 tabakalı kompozit yama ile tamiri sonrasında mekanik davranışını sonlu elemanlar metodunu kullanarak araştırmışlardır. Yapıştırıcı epoksi film, yama malzemesi ve kalınlığının ayrıca tabaka diziliminin Gerilme şiddet faktörü üzerindeki etkisini kontur integral metodunu kullanarak incelemişlerdir. Kayma dayanımı ve yapıştırıcı kalınlığının yama etkisi üzerinde en önemli faktör olduğunu bulmuşlardır.

Sekizgen kompozit yama kullanılarak tamir edilmiş Alüminyum levhada çatlak davranışını karışık mod yüklemesi altında Quinas ve diğ.[22] sonlu elemanlar metodu kullanılarak araştırmıştır.

Bezzerrouki ve diğ.[23], çift yönlü yama/tek yapıştırıcı ve tek yönlü yama/iki yapıştırıcılı bant ile tamir edilmiş kenar çatlağa sahip Alüminyum levhaların Gerilme

şiddet faktörlerini sonlu elemanlar metodu kullanarak karşılaştırmışlardır. Yapıştırıcı Kayma modülünün artırılmasının çift yönlü yama ile tamir tekniğinde avantaj sağladığını, yapıştırıcı kalınlığının azaltılıp yama kalınlığının artırılmasının ise tek yönlü yama/iki yapıştırıcılı bant tamir tekniğinde etkili olduğunu belirlemişlerdir.

12 ve 14 tabakalı grafit epoksi yama kullanılarak tamir edilmiş merkezi çatlağa sahip 2024-T3 alüminyum levhada Gerilme şiddet faktörleri sonlu elemanlar metodu kullanılarak Madani ve diğ. [24] tarafından araştırılmıştır.

Kaman ve diğ.[48], bir yüzü kompozit yama ile tamir edilmiş pim delikli alüminyum levhada gerilme şiddet faktörünü sayısal olarak hesaplamışlardır. Kompozit yamadaki fiberlerin takviye açısının değişiminin gerilme şiddet faktörü üzerindeki etkisi farklı çatlak uzunlukları ve açısı, farklı yapıştırıcı özellikleri ve levha boyutları için araştırmışlardır.

Araştırmalar özellikle uzay ve hava sanayinde sıklıkla kullanılan alüminyum alaşımların tamiri üzerine yoğunlaşmaktadır. Ancak, teknolojik gelişmelere paralel olarak günümüzde kompozit malzemelerin kullanımı yaygınlaşmakta ve belirli bir hasar sonucu kompozit levhalarda oluşan çatlakların tamiri de önem kazanmaktadır. Ayrıca çalışmalar, yapıştırıcı ve özellikle kompozit yama özelliklerinin gerilme şiddet faktörü üzerinde etkili olduğunu göstermektedir [25–26].

Özellikle fiber takviyeli ortotropik malzemelerde çatlak problemi ve yama ile tamiri, günümüzde kompozit malzemelerin kullanım alanlarının artmasına paralel olarak önem kazanmaktadır. Bu amaçla çalışmada; kompozit yama ile tamir edilmiş pim bağlantılı kompozit levhalarda çatlak probleminin çözümü ele alınmış ve sayısal çözüm tekniği ayrıntılı olarak incelenmiştir. Yapıştırıcı ve kompozit yamanın kalınlığı ve mekanik özelliklerinin gerilme şiddet faktörü üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Ayrıca farklı pim deliği çapı ve çatlak boyu ve konum için ideal yapıştırıcı ve yama seçiminin yapılması sağlanmıştır. Kompozit malzemelerde fiber takviye açısı da levha mekanik özelliklerini etkileyen bir parametredir ve gerilme şiddet faktörü üzerinde etkilidir. Levha ve fiber takviye açısının değişiminin gerilme şiddet faktörü üzerindeki etkisi de incelenen diğer bir parametredir.

3. KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozit malzeme, iki veya daha fazla malzemenin en iyi özelliklerini, yeni ve tek bir malzemede toplamak amacıyla, makro düzeyde oluşturulmuş yeni malzeme olarak adlandırılabilir. Kompozit malzemeler nispeten yeni bir alan olup, üretimi ve mekanik özellikleri üzerine araştırmalar hala devam etmektedir [31].

Kompozit malzemelerde; en iyi özelliklerin bir malzeme üzerinde toplanması en büyük avantajdır. Genel olarak avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Yüksek dayanım,
- Yüksek rijitlik,
- Yüksek yorulma dayanımı,
- Mükemmel aşınma direnci,
- Yüksek sıcaklık kapasitesi,
- İyi korozyon direnci,
- Düşük ağırlık vs.

Yukarıda belirtilen bu özellikleri elde etmek için, uygun matriks ve takviye eleman çifti, üretim tekniği, bileşenlerin mukavemet özellikleri ve diğer faktörler göz önüne alınarak üretim yapılmalıdır. Uygun matriks/takviye eleman seçiminin kompozitin mekanik ve fiziksel özellikleri üzerine etkisi çoktur [31].

Kompozit malzemelerin bu avantajlarının yanı sıra, dezavantajları da vardır. Bunlar,

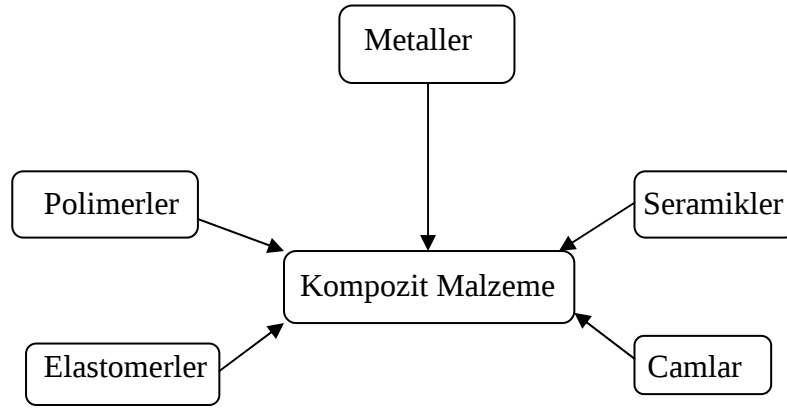
- Üretim güçlüğü,
- Pahalı olması,
- İşlenmesinin güç olması yanında maliyetinin yüksek oluşu ve gerekli yüzey kalitesinin elde edilemeyişi,
- Diğer malzemeler gibi geri dönüşümünün olmayışıdır [31].

3.1 Fiber Takviyeli Kompozit Malzemeler

Metallerle karşılaştırıldığı zaman, uygulamada kullanılan polimerlerin en belirgin problemi, sahip oldukları düşük rijitlikleri ve mukavemetleridir. Günümüzde bu problem matrise takviye edici küçük partiküllerin veya elyafların eklenmesiyle bir ölçüde ortadan kaldırılmıştır. Bu ilave sonucunda elde edilen yeni malzeme kompozit malzeme olarak adlandırılıp; bugün birçok mühendislik yapılarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Böylece elyaf ve partikül takviyeli kompozit malzeme iki farklı yapıdan meydana gelir. Bunlar, termoplastik veya termoset plastikten yapılan bir matriks ve mukavemet artışına sebep olan elyaf dolgu malzemesidir. Genelde, dolgu malzemesine kıyasla matriksin bilhassa basma dayanımı düşük olmakta ancak daha rijit ve gevrek yapıya sahip olduğu bilinmektedir. Bu iki farklı malzemenin birleştirilmesi sonucu oluşan yeni yapıda maksimum bir mukavemet elde edilebilmesi için eklenen elyafın uygulanan gerilmeyi azami ölçüde taşıması arzu edilir. Matriksin görevi ise elyafları destekleyip bir arada tutmak ve uygulanan dış yükü, elyaf/matriks yüzeyinde oluşan kayma mukavemeti ile elyafa iletmektir. Elyaf takviyeli kompozit malzemelerde elyafın birinci görevi dayanım ve rijitliği artırmaktır.

Yumuşak ve sünek matriks içine sert, dayanıklı, elastikliği yüksek elyaflar ilave edildiğinde çekme dayanımı, yorulma dayanımı, modül ve diğer dayanım özellikleri iyileşir. Matris malzemesi kuvveti elyaflara transfer ederek yumuşaklık ve tokluk özelliği sağlarken elyaf uygulanan yükün çoğunu taşımaktadır. Elyafların kompozit içine belirli doğrultuda yerleştirilebilmeleri büyük avantaj sağlar. Lifler kompozit içerisine uygun geometrilerde yerleştirilerek, kompozitin çekme gibi yüklemelere farklı yönlerde farklı yanıtlar vermesi sağlanır. Örneğin, kompozitin kopma dayanımı, liflerin yönlendirildiği ekseninde yapılan yüklemelerde en büyük olacaktır [32].

Kompozit malzemelerin kullanımı endüstriyel uygulamalarda gün geçtikçe yaygınlaşmakta ve önem kazanmaktadır. Bu malzemelerin özelliklerini ve kırılma davranışlarını anlamak, bu malzemeden üretilen yapılarda ortaya çıkacak hasar ve onun etkisini öngörmek için önemlidir. Kompozit malzeme iki veya daha fazla malzemenin karıştırılması ile elde edilir (Şekil 3.1) [33].



Şekil 3.1 Kompozit malzemenin oluşumu ve tanımlanması.

Kompozit malzemede ortaya çıkacak hasar, takviyenin yönüne, oranına, katkıların mekanik özelliklerine ve takviye ile matriks ara yüzey özelliklerine bağlıdır. Bu sayılan tüm özellikler doğrudan üretim yöntemine bağlıdır. Aynı katkı kullanılsa bile üretim yöntemi farklı elyaf yönlendirmelerine ve hacim oranlarına sebep olabilir. Başta mekanik özellikler olmak üzere bu mikroyapısal parametreler önemli ölçüde farklılıklar gösterirler. Kompozit malzeme içinde oluşan hasar mekanizması da bir noktadan başka bir noktaya farklılık gösterir. Elyaf biribirinden fazla ayrılırlarsa veya birbirlerine fazla yakınlarsa çatlak hep aynı yönde ilerlemeyebilir [33].

Metalik malzemeler ile karşılaştırıldığında kompozit malzemelerin en belirgin üstünlükleri; malzemenin birim ağırlık başına düşen Elastisite modülü (E/ρ)'nün ve mukavemetlerinin (σ/ρ) oldukça yüksek olmasıdır. Bu nedenle de kompozit malzemeler ileri mühendislik uygulamalarında özellikle yüksek rijitlik/ağırlık ve mukavemet/ağırlık oranlarının önemli olduğu havacılık ve otomotiv sanayinde her gün artan bir şekilde kullanım alanı bulmaktadır [33].

3.2 Tabakalı Kompozitler

Tabakalı kompozit malzemeler, değişik özelliklere sahip birden çok malzemenin bir yapıştırıcı vasıtasıyla bir araya getirilmesiyle oluşur. Bu tür kompozitler “Lamine Kompozit Malzeme” diye de adlandırılırlar.

Tabakalı kompozitler genelde levha malzeme niteliğindedir. Çeşitli tabakaların birbirlerine yapıştırılması şeklindeki üretimin bir sonucu olarak, yapısal nitelikleri bakımından diğer kompozit malzeme türlerinden farklılık göstermektedirler [34].

Tabakalı kompozitlerin üretiminde genel olarak tabaka niteliğindeki her türlü malzeme kullanılmaktadır. Burada önemli olan, birbirlerinin özelliklerini takviye edecek kompozisyonun oluşturulmasıdır. Örneğin, yangına dayanıklı olması öngörülen bir malzemede, yanmayı geciktirici ve ısı iletimini kısıtlayıcı alçı tabakasının oluşturulması gibi uygulamalar yapılabilir.

Tabakalı kompozitlerin üretimde aynı veya farklı türden malzeme kullanılmaktadır. Üretimde kullanılan malzeme türlerinden hareketle,

- Farklı malzemelerden oluşan tabakalı kompozitler,
- Tek tür malzemedan oluşan kompozit malzemeler,

şeklinde iki ana grupta toplamak mümkündür. Tabakalı kompozit malzeme üretiminde kullanılan başlıca malzemeler;

- Metal tabakalı kompozit malzeme,
- Cam tabakalı kompozit malzeme,
- Polimer esaslı kompozit malzeme,
- Ahşap tabakalı kompozit malzeme,
- Tabakalı lifli kompozit malzemelerdir [34].

3.3 Kompozit Tabakalarının Makromekanik Analizi

Elyaf/matriks takviyeli bir kompozitin üretimi esnasında istenilen kompozit kalınlığını sağlamak için çok katlı, düz veya değişik yönlü elyafların düzenlenmesi gerekir. Bu nedenle, kompozit tabakaların özellikleri, lamine, özelliklerine, elyafların düzenlenmesine ve kompozitin üretim tekniğine bağlıdır.

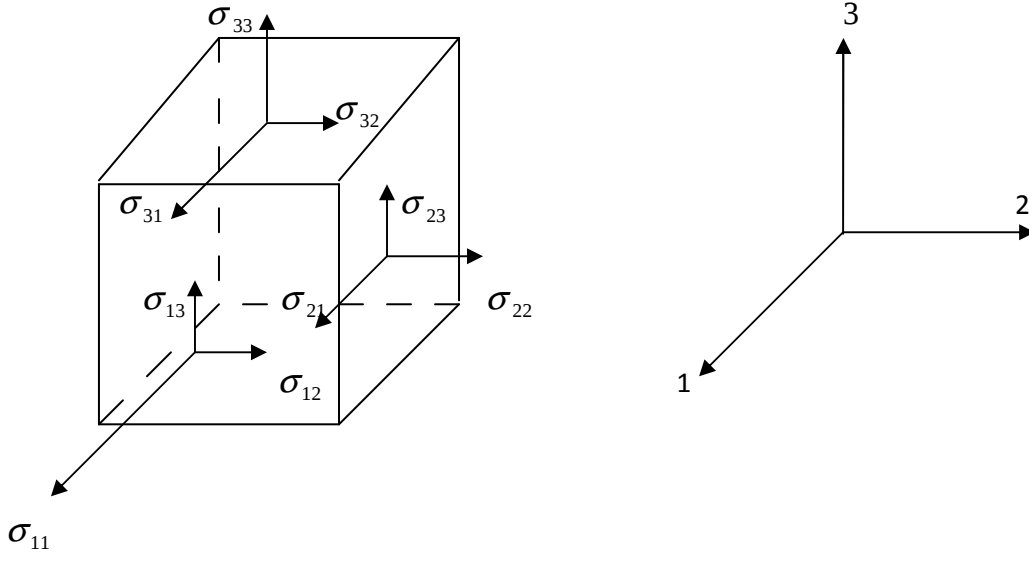
Lamina kompozit analizinde bir diğer varsayım da elyaf ve matriks arasında tam bağın mevcut olmasıdır. Kompozitin elastik karakteristikleri üzerine polimer matriks içinde gerilme dağılımı üzerine sürtünmenin etkisi, elyafların en uygun şekilde konumlanmasının sağlanması ile minimize edilebilir. Bununla beraber, kompozitte elyaf oranının artırılması, yükün büyük kısmının elyaflar tarafından taşındığını ve bunun sonucu olarak da yükün daha az kısmı matriks tarafından taşınacağını gösterir [31].

Diğer taraftan elyaf içeriği az ise fazla yüklerde matriks üzerine etkiyen sürünme etkisi oldukça fazla olabilir. Kompozitlerde gerilmeler ve bunlara karşılık gelen uzama miktarları arasındaki bağıntıların geliştirilmesinde malzeme özellikleri, aşağıdaki varsayımlara göre yapılacaktır. Bunlar;

- i. Kompozit malzemelerin lineer elastik özelliklere sahip olması,
- ii. Kompozitlerin çekme ve basma özelliklerinin aynı olması şeklindedir.

3.3.1 İzotropik Tabaka

Kompozitlerin mekaniksel özellikleri, bunları oluşturan bileşenlerin özellikleri ve mikro-yapısal şekilleri ile kesin olarak kontrol edilir. Bu nedenle, değişik şartlar altında bu özelliklerin belirlenmesi gerekmektedir. Bir kompozit malzeme içinde elyaflar rastgele yönlendirilmiş ise bunlar makroskobik ölçek olarak düşünülür. Tabaka düzleminde malzeme özellikleri bütün doğrultularda aynı olur ve böylece kompozit malzeme Şekil 3.2'de gösterildiği gibi, bir gerilme durumuna maruz kalabilir [31].



Şekil 3.2 Üç boyutlu gerilme sistemi.

Hooke kanunu bağıntıları;

$$\sigma_{11} = \left\{ E / (1 - \nu^2) \right\} [\varepsilon_{11} + \nu \varepsilon_{22}] \quad (3.1)$$

$$\sigma_{22} = \left\{ E / (1 - \nu^2) \right\} [\varepsilon_{22} + \nu \varepsilon_{11}] \quad (3.2)$$

$$\sigma_{12} = \left\{ E / (1 - \nu^2) 2 \right\} [\varepsilon_{12}] \quad (3.3)$$

yazılabilir. Matris formunda ise;

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} \\ Q_{21} & Q_{22} & Q_{23} \\ Q_{31} & Q_{32} & Q_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$[\sigma] = [Q][\varepsilon] \quad (3.5)$$

şeklinde yazılır. Burada da;

$$Q_{11} = Q_{22} = E/(1 - \nu^2) \quad (3.6)$$

$$Q_{12} = Q_{21} = E\nu/(1 - \nu^2) \quad (3.7)$$

$$Q_{13} = Q_{23} = Q_{31} = Q_{32} = 0 \quad (3.8)$$

$$Q_{33} = E/2(1 + \nu) = G \quad (3.9)$$

eşitlikleri yazılabilir.

Bu eşitlikte; G : Kayma modülü, E : Elastisite modülü ve ν : Poison oranını göstermektedir. Fakat izotropik malzemelerde kayma modülü, Q_{33} denkleminde verildiği gibi, diğer iki elastik özelliklerin fonksiyonu olarak ifade edilebilir. Yukarıdaki denklemler, düzlem gerilme altında izotropik bir malzemeyi karakterize etmek için sadece 2 elastik sabitin gerekli olduğunu göstermektedir [31].

Eşitlik 3.1'e karşılık gelen uzama ve gerilme eşitlik grupları olarak;

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$$[\varepsilon] = [S \parallel \sigma] \quad (3.11)$$

yazılabilir. Burada;

$$S_{11} = S_{22} = 1/E \quad (3.12)$$

$$S_{12} = S_{21} = -\nu/E \quad (3.13)$$

$$S_{33} = 1/G \quad (3.14)$$

olur. Eşitlik 3.4'te verilen kare matris, Q , gerilme ve uzama vektörleri arasında bağıntıyı açıklamaktadır. Bu malzeme matrisi olarak bilinir ve bunun bileşenleri malzemenin elastik özelliklerinin bir fonksiyonudur. Denklem (3.10)'da verilen S kare matris ise Q matrisinin tersi olup (uyum) kompiyans matrisi olarak bilinir.

3.3.2 Ortotropik Tabaka

Bir kompozit malzemede; elyaflar tek yönlü sürekli veya iki yönlü takviyeli olarak düzenlenirse elyaf doğrultusunda yüksek dayanım ve rijitlik elde edilebilir. Mekanik özellikler kullanılan elyaf içeriği ile değişecektir. Bunun sonucunda tek yönlü doğrultuda yapılan elyaf düzenlenmesinde yüksek dayanım ve Elastisite modülü değeri elyaf eksenine paralel doğrultuda bulunacaktır.

İki yönlü doğrultuda ise, yani elyaflar hem eksene paralel hem de dik yönde takviyelendirilen kompozitte ise iki ortogonal yönde dayanım ve Elastisite modülü eşit olur.

Hooke kanunu bağıntıları;

$$\sigma_{11} = Q_{11}\varepsilon_{11} + Q_{12}\varepsilon_{22} \quad (3.15)$$

$$\sigma_{22} = Q_{12}\varepsilon_{11} + Q_{22}\varepsilon_{22} \quad (3.16)$$

$$\sigma_{12} = Q_{33}\varepsilon_{12} \quad (3.17)$$

yazılabilir. Burada

$$Q_{11} = E_{11}/(1 - \nu_{12}\nu_{21}) \quad (3.18)$$

$$Q_{22} = E_{22}/(1 - \nu_{12}\nu_{21}) \quad (3.19)$$

$$Q_{12} = Q_{21} = \nu_{21}E_{11}/(1 - \nu_{21}\nu_{12}) = \nu_{12}E_{22}/(1 - \nu_{12}\nu_{21}) \quad (3.20)$$

$$Q_{33} = G_{12} \quad (3.21)$$

olur. Ortotropik durumda Kayma modülü ve gerilmeler, burulmaların oluştuğu doğrultulara göre tanımlanır. Bu durumda G , E ve ν değerlerinden bağımsızdır. Ortotropik özelliklere sahip kompozit isetamamen dört bağımsız elastik sabitleri ile ifade edilir (E_{11} , E_{22} , ν_{12} ve G_{12}) [31].

burada;

$$S_{11} = 1/E_{11} \quad S_{22} = 1/E_{22} \quad S_{33} = 1/G_{12} \quad (3.22)$$

$$S_{12} = -\nu_{21}/E_{22} = -\nu_{12}/E_{11} \quad (3.23)$$

ν_{12} kuvvet 1 doğrultusuna uygulandığında 2 doğrultusunda ortaya çıkan uzamayı ifade eder (Şekil 3.3). Keyfi seçilen eksenlere göre gerilmeler ve uzamalar arasındaki ilişkileri oluşturabilmek için malzemenin temel eksenine θ açısı ile yönlendirme yapılır.

3.3.2.1 Gerilme Bağlıları

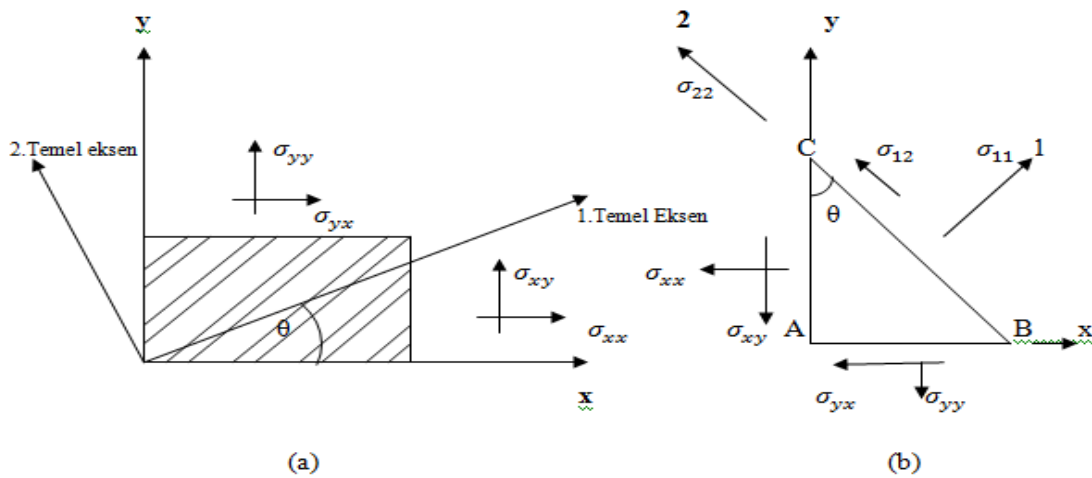
Şekil 3.3'deki 1 yönündeki kuvvetler çözülerek denge denklemi;

$$\sigma_{11}BC - \sigma_{xx} \cos \theta = -\sigma_{yy}AB \sin \theta = -\sigma_{xy}AC \sin \theta - \sigma_{yx}AB \cos \theta = 0 \quad (3.24)$$

yazılabilir. $AC = AB \cos \theta$ ve $AB = BC \sin \theta$ ve $\sigma_{xy} = \sigma_{yx}$ olduğundan dolayı;

$$\sigma_{11} = \sigma_{xx} \cos 2\theta + \sigma_{yy} \sin 2\theta + \sigma_{xy} 2 \sin \theta \cos \theta \quad (3.25)$$

elde edilir [31].



Şekil 3.3 Referans eksenleri hakkında ortotropik tabaka doğrultusu a) referans eksenleri (x,y) θ doğrultusunda tabakanın esas eksenleri (1,2), b) (1,2) ve (x,y) eksenlerinde gerilim altındaki bir eleman

2 doğrultusunda çözümlenirse;

$$\sigma_{12} = -\sigma_{xx} \sin \theta \cos \theta + \sigma_{yy} \cos 2\theta + \sigma_{xy}(\cos 2\theta - \sin 2\theta) \quad (3.26)$$

halini alır. Benzer olarak;

$$\sigma_{22} = \sigma_{xx} \sin 2\theta + \sigma_{yy} \cos 2\theta - \sigma_{xy} 2 \sin \theta \cos \theta \quad (3.27)$$

yazılabilir. Böylece, matris formunda aşağıdaki bağıntılar referans eksenleri (x, y) ve temel eksenlerde $(1, 2)$ gerilmeler,

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

şeklinde yazılabilir. Matris dönüşümü $[T]$ ise;

$$[T] = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & 2mn \\ n^2 & m^2 & -2mn \\ -2mn & mn & m^2 - n^2 \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

$$[T]^{-1} = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & 2mn \\ n^2 & m^2 & -2mn \\ -2mn & mn & m^2 - n^2 \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

şeklinde yazılabilir. Bu eşitliklerde; $m = \cos\theta$ ve $n = \sin\theta$ 'yı göstermektedir.

3.3.2.2 Şekil Değiştirme Bağlılıkları

$O-1$ doğrusu, $0-x$ ile θ açısı yaptığı zaman, $\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{xy}$ uzamaları altında olan $OFAE$ elemanı ele alınsın (Şekil 3.4). $x-y$ eksenleri ve $1-2$ eksenleri arasında meydana gelen bağıntıyı elde etmek gerekir. Burada x ve y doğrultularında normal ve kayma uzamaları;

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (3.32)$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y} \quad (3.33)$$

$$\varepsilon_{xy} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \quad (3.34)$$

yazılabilir. Şekil 3.4'den gerilme altında $OFAE$ elemanının OA doğrusu OC doğrusu olarak deformasyona uğrar. Bu nedenle, yer değiştirmenin ya $x-y$ veya $1-2$ koordinat yönlerinde olduğu ifade edilebilir. A 'ya göre C 'nin koordinat durumu x,y ekseninde AB, BC ve $1-2$ koordinat ekseninde AD, DC olur. Böylece;

$$AB = \frac{\partial u}{\partial x} \delta x + \frac{\partial u}{\partial y} \delta y \quad BC = \frac{\partial v}{\partial x} \delta x + \frac{\partial v}{\partial y} \delta y \quad (3.35)$$

yazılabilir.

Şekil 3.3'deki transformasyon bağıntısından;

$$\begin{bmatrix} AD \\ CD \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} mn \\ -nm \end{bmatrix} \begin{bmatrix} AB \\ BC \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

yazılabilir. Bu nedenle de;

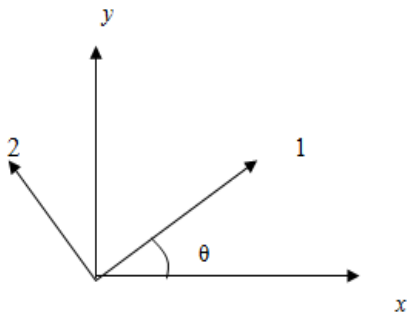
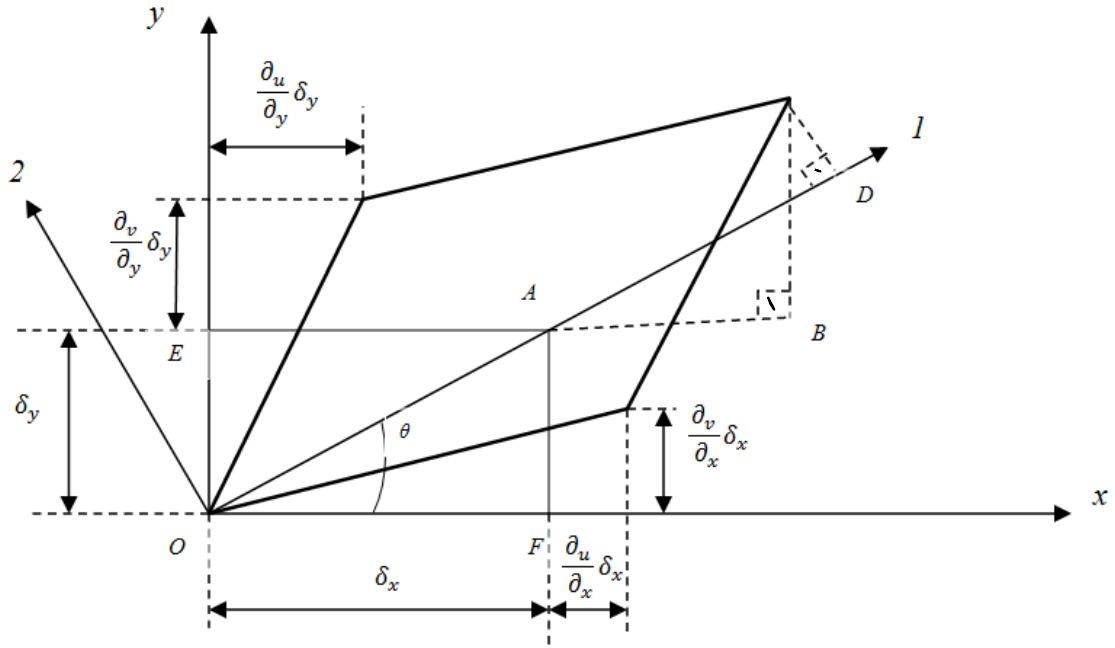
$$AD = \cos \theta \left[\frac{\partial u}{\partial x} \delta x + \frac{\partial u}{\partial y} \delta y \right] + \sin \theta \left[\frac{\partial v}{\partial x} \delta x + \frac{\partial v}{\partial y} \delta y \right] \quad (3.37)$$

olur.

$$CD = -\sin \theta \left[\frac{\partial u}{\partial x} \delta x + \frac{\partial u}{\partial y} \delta y \right] + \cos \theta \left[\frac{\partial v}{\partial x} \delta x + \frac{\partial v}{\partial y} \delta y \right] \quad (3.38)$$

ve

$$\varepsilon_{11} = \frac{AD}{OA} = \cos \theta \left[\frac{\partial u}{\partial x} \frac{\delta x}{\delta s} + \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\delta y}{\delta s} \right] + \sin \theta \left[\frac{\partial v}{\partial x} \frac{\delta x}{\delta s} + \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\delta y}{\delta s} \right] \quad (3.39)$$



$$OF=\delta x \quad OE=\delta y \quad OA=\delta s$$

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m & n \\ -n & m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$

$$m=\cos\theta \quad \text{ve} \quad n=\sin\theta$$

Şekil 3.4 Normal ve kayma uzamaları altında deformasyona uğrayan bir eleman.

yazılabilir. Burada $OA = \delta s$ ve $\frac{\delta x}{\delta y} = \cos \theta$ $\frac{\delta y}{\delta x} = \sin \theta$ olduğundan dolayı,

$$\varepsilon_{11} = \frac{\partial u}{\partial x} \cos^2 \theta + \frac{\partial v}{\partial y} \sin^2 \theta + \left[\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right] \sin \theta \cos \theta \quad (3.40)$$

elde edilir. Eşitlik (3.32-34)'in uzama değerleri (3.40) eşitliğinde yerine koyularak aşağıdaki hali alır.

$$\varepsilon_{11} = \varepsilon_{xx}m^2 + \varepsilon_{yy}n^2 + \frac{\varepsilon_{xy}}{2}2mn \quad (3.41)$$

Benzer şekilde ε_{22}

$$\varepsilon_{22} = \varepsilon_{xx}n^2 + \varepsilon_{yy}m^2 - \frac{\varepsilon_{xy}}{2}2nm \quad (3.42)$$

ve

$$\frac{\varepsilon_{12}}{2} = -\varepsilon_{xx}mn + \varepsilon_{yy}nm + \frac{\varepsilon_{xy}}{2}(m^2 - n^2) \quad (3.43)$$

halini alır. Bundan dolayı matris şeklindeki denklem (3.44) bağıntılar referans eksenleri x,y ve esas eksenleri gerilmelerle birleşir.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{12}/2 \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{xy}/2 \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

Burada; $[T]$: (3.24), (3.25) denklemlerinde verilen matrisin dönüşümüdür ve;

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{xy}/2 \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{12}/2 \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

şeklinde yazılabilir.

3.3.2.3 Gerilme-Şekil Değiştirme Bağlılıları

Esas eksenler 1-2'ye göre malzeme özelliklerine bağılı olarak x-y ekseninde gerilme ve şekil değıştirme arasındaki bağıntılar aşığıdaki gibidir.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} = [S] \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} \quad (3.46)$$

ve

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = [Q] \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} \quad (3.47)$$

(3.29) ve (3.47) eşitliklerinden;

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1} [Q] \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

yazılır. (3.28) ve (3.46) eşitliklerinden;

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} = [S] [T] \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.49)$$

elde edilir. Yarı kayma uzamadan tam kayma uzamasına (3.44) ve (3.45) denklemlerini dönüştürmek için, $[T]$ matris, $[R]$ ve $[R]^{-1}$ ile sırasıyla çarpılır. Burada R aşağıdaki değere eşit olur.

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

Bu nedenle (3.44) ve (3.4) eşitlikleri aşağıdaki şekle döner.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} = [R][T][R]^{-1} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

ve

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{xy} \end{bmatrix} = [R][T]^{-1}[R]^{-1} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} \quad (3.52)$$

$$[R][T][R]^{-1} = [[T]^{-1}]^T \quad (3.53)$$

$$[R][T]^{-1}[R]^{-1} = [T]^T \quad (3.54)$$

ve

$$[[T]^{-1}]^T = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & nm \\ n^2 & m^2 & -nm \\ -2mn & 2mn & (m^2 - n^2) \end{bmatrix} \quad (3.55)$$

$$[T]^T = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & -nm \\ n^2 & m^2 & nm \\ 2nm & -2nm & (m^2 - n^2) \end{bmatrix} \quad (3.56)$$

elde eldir. Böylece (3.51) ve (3.52) eşitlikleri,

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} = [[T]^{-1}]^T \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.57)$$

ve

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{xy} \end{bmatrix} = [T]^T \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} \quad (3.58)$$

şeklinde yazılabilir. (3.48) eşitliğinde (3.57) eşitliğini koyarak eksenlerdeki uzama bileşenlerine göre x-y referans eksenlerinde gerilme bileşenleri elde edilebilir.

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1}[Q][[T]^{-1}]^T \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.59)$$

veya

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = [\overline{Q}] \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.60)$$

dır. $[\overline{Q}]$ matriksi 3x3 matris olup burada bileşenler;

$$\overline{Q}_{11} = Q_{11}m^4 + Q_{22}n^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{33})n^2m^2 \quad (3.61)$$

$$\overline{Q}_{12} = Q_{21} = (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{33})n^2m^2 + Q_{12}(n^4 + m^4) \quad (3.62)$$

$$\overline{Q}_{13} = Q_{31} = (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{33})nm^3 + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{33})n^3m \quad (3.63)$$

$$\overline{Q}_{22} = Q_{11}n^4 + Q_{22}m^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{33})n^2m^2 \quad (3.64)$$

$$\overline{Q}_{23} = Q_{32} = (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{33})n^3m + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{33})nm^3 \quad (3.65)$$

$$\overline{Q}_{33} = (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 2Q_{33})n^2m^2 + Q_{33}(n^4 + m^4) \quad (3.66)$$

şeklinde yazılabilir. Bu eşitlikte m ve n (3.30), (3.31) denklemlerinde tanımlanmıştır. x-y referans eksenlerinde uzama bileşenleri için eşitlik (3.49)'ü (3.58)'de yerine koyarak elde edilebilir.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{xy} \end{bmatrix} = [\overline{S}] \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.67)$$

$\overline{[S]}$ matrisi 3x3 uyum matrisi olup bileşenleri;

$$\overline{S_{11}} = S_{11}m^4 + S_{22}n^4 + (2S_{12} + S_{33})n^2m^2 \quad (3.68)$$

$$\overline{S_{12}} = S_{21} = S_{12}(n^4 + m^4) + (S_{11} + S_{22} - S_{33})n^2m^2 \quad (3.69)$$

$$\overline{S_{13}} = S_{31} = (2S_{11} - 2S_{12} - S_{33})nm^3 - (2S_{22} - S_{12} - S_{33})n^3m \quad (3.70)$$

$$\overline{S_{23}} = S_{32} = (2S_{11} - 2S_{12} - S_{33})n^3m - (2S_{22} - 2S_{12} - S_{33})nm^3 \quad (3.71)$$

$$\overline{S_{22}} = S_{11}n^4 + S_{22}m^4 + (2S_{12} + S_{33})n^2m^2 \quad (3.72)$$

$$\overline{S_{33}} = 2(2S_{11} + 2S_{22} - 4S_{12} - S_{33})n^2m^2 + S_{33}(n^4 + m^4) \quad (3.73)$$

olacak şekilde hesaplanır. $S_{11}, S_{22}, S_{12}, S_{21}$ ve S_{33} ise denklem (3.22-23)'de tanımlanmıştır.

3.3.2.4 Mühendislik Sabitleri

Bölüm 3.3.2.3'de tasarlanan yaklaşım kullanılarak 1-2 eksenlerinde elastik sabitlerine dayanarak x-y eksenlerine karşılık gelen E_{xx}, E_{yy}, G_{xy} ve ν_{xy} elastik özellikleri için ifadeler elde etmek mümkündür. Bu denklemler;

$$\frac{1}{E_{xx}} = \frac{1}{E_{11}} m^4 + \left(\frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{12}}{E_{11}} \right) n^2 m^2 + \frac{1}{E_{22}} n^4 \quad (3.74)$$

$$\frac{1}{E_{yy}} = \frac{1}{E_{11}} n^4 + \left(\frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{12}}{E_{11}} \right) n^2 m^2 + \frac{1}{E_{11}} m^4 \quad (3.75)$$

$$\frac{1}{G_{xy}} = 2 \left(\frac{2}{E_{11}} + \frac{2}{E_{22}} + \frac{4\nu_{12}}{E_{11}} - \frac{1}{G_{12}} \right) n^2 m^2 + \frac{1}{G_{12}} (n^4 + m^4) \quad (3.76)$$

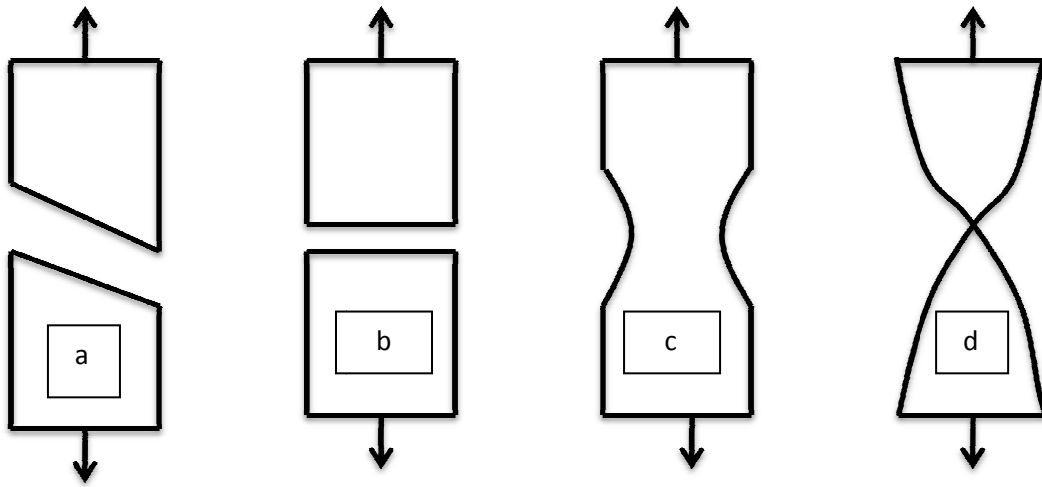
$$\nu_{xy} = E_{xx} \left[\frac{\nu_{12}}{E_{11}} (n^4 + m^4) - \frac{1}{E_{11}} + \frac{1}{E_{22}} - \frac{1}{G_{12}} \right] n^2 m^2 \quad (3.77)$$

şeklinde yazılabilir. Bu nedenle E_{11}, E_{22}, G_{11} ve ν_{12} bilinirse x-y eksenini ile herhangi bir açıdaki elastik özellikler hesaplanabilir.

4. KIRILMA MEKANİĞİ

Maddelerin gerilme altında iki veya daha fazla parçaya ayrılması veya parçalanmasına kırılma denir. Kırılma olayı bir çatlağın başlaması ve ilerlemesi olarak iki kısımda incelenir. Genel olarak iki şekilde kırılma meydana gelir. Bunlar sünek ve gevrek kırılma olarak adlandırılır. Sünek kırılmada çatlak ilerlemesi sırasında ve öncesinde plastik deformasyon ile karakterize edilir. Gevrek kırılma ise hiçbir deformasyon bırakmadan meydana gelen kırılma türüdür. Gevrek kırılma önceden belirti göstermeden meydana geldiğinden ve çoğunlukla büyük felaketler ile sonuçlandığından istenmeyen ve mutlaka önlenmesi gereken bir kırılma türüdür.

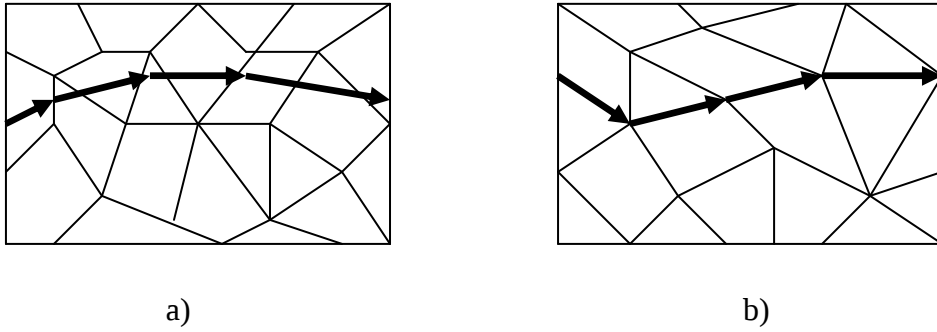
Kırılma, malzemenin cinsine, sıcaklığına, yükleme durumu ve hızına bağlı olarak çeşitlilik gösterebilmektedir. Kırılma türleri Şekil 4.1’de şematik olarak gösterilmiştir. Gevrek kırılmada (Şekil 4.1.b) dıştan bakıldığı zaman deformasyon belirtisi gözükmemektedir. Ancak kırılma yüzeyi incelendiği zaman ince bir tabakada deformasyon belirtisi görmek mümkündür. Gevrek kırılma çoğunlukla Hacim Merkezli Kübik (HMK) ve Sıkı Paket Hekzagonal (SPH) kristal yapısına sahip metallerde gözlenir. Tane sınırlarının gevrekleşmesine etki eden bazı faktörlerin olmadığı durumda Yüzey Merkezli Kübik (YMK) kristal sisteme sahip metallerde kırılma gözlenmez [35].



Şekil 4.1 a) Sünek kırılma tek kristallerde kayma kırılması b) Gevrek kırılma c) Çok kristallerde sünek kırılması d) Çok kristallerde tam sünek kırılma.

Sünek kırılma değişik şekillerde meydana gelebilir. SPH yapıya sahip tek kristallerde bazı ana düzlemlerde kayma sonucu kristal kayarak ayrılır (Şekil 4.1.a). Yüksek sünekliğe sahip çok kristalli malzemeler kırılmadan önce bir noktaya kadar incelirler (Şekil 4.1.d). Orta derecede sünek yapıya sahip malzemeler ise çekme yükü altında bir boyun bölgesi oluşturur ve kırılma malzemenin merkezinden başlayarak gelişir ve kopma oluşur (Şekil 4.1.c).

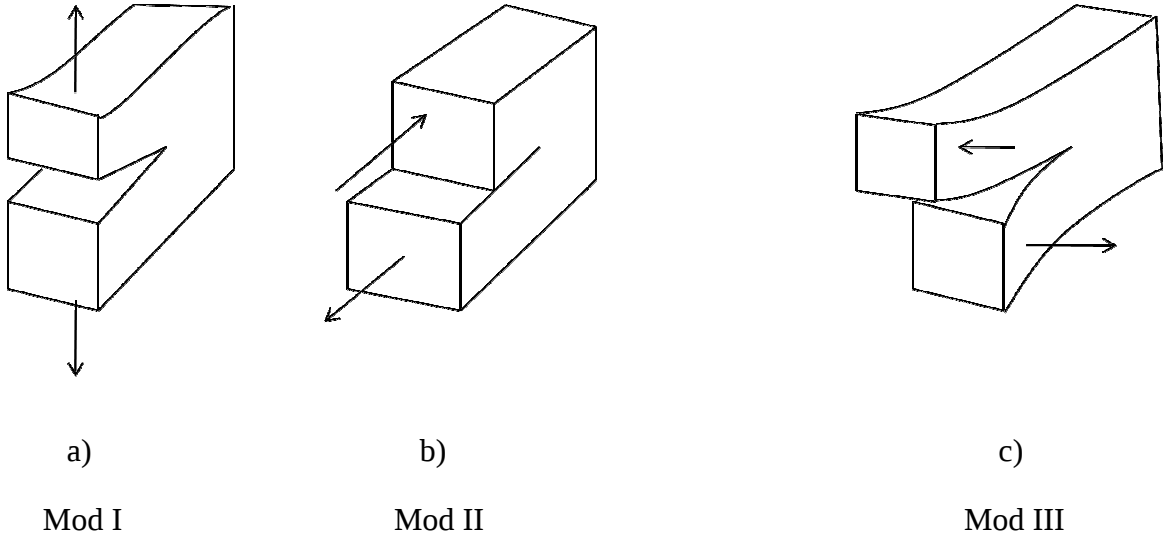
Çok kristalli malzemelerde kırılma iki şekilde meydana gelir. Bunlar transgranüler (tane içi) ve intergranüler (taneler arası) olup, Şekil 4.2’de verilmiştir. Çatlak, taneleri keserek ilerliyorsa tane içi, tane sınırlarını izleyerek ilerliyorsa taneler arası kırılma söz konusudur. Pratikte çoğu zaman bu iki tip kırılma birlikte görülür [35].



Şekil 4.2 a) Tane içi b) taneler arası kırılma.

4.1 Lineer Elastik Kırılma Mekanikliği

Malzemelerde yükleme durumuna bağlı olarak çatlak üç şekilde ilerleyebilir. Bunlar Şekil 4.3’de verilmiştir. Mod I durumunda, iki kırılma yüzeyi birbirlerine zıt yönde ve birbirlerine dik olarak ayrılır. Mod II durumunda, çatlak yüzeyleri x - z düzlemi üzerinde zıt yönde hareket eder ve Mod III durumunda ise, çatlak x - y ve x - z düzlemlerine göre ters simetrik olarak ilerler [36].



Şekil 4.3 a) Mod I-çekme, b) Mod II-kayma, c) Mod III-makaslama.

4.1.1 Gerilme Şiddet Faktörü

Çatlak ucunda oluşan elastik alanın büyüklüğü gerilme şiddet faktörü olarak tanımlanır ve K ile gösterilir. Irwin, bir çatlak civarındaki gerilmelerin;

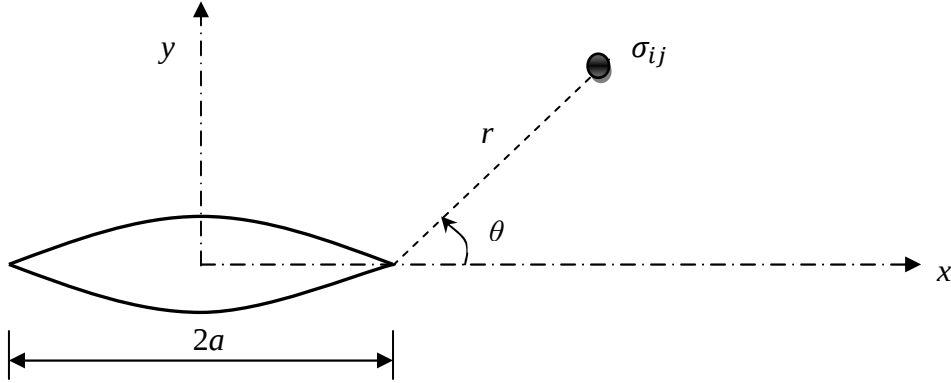
$$\sigma_{ij} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f(\theta) + \dots \quad (4.1)$$

şeklinde verilebileceğini göstermiştir. Burada r ve θ , çatlak ucuna göre bir noktanın koordinatlarını göstermektedir (Şekil 4.4).

Yapılan boyutsal analizler, K 'nın gerilmeyle doğrusal olarak, karakteristik bir uzunluğun da kareköküyle ilişkili olduğunu göstermiştir. Bu karakteristik uzunluk, çatlak boyudur ve gerilme şiddet faktörü;

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \cdot f\left(\frac{a}{w}\right) \quad (4.2)$$

şeklinde verilir. Burada $f(a/W)$ numunenin ve çatlakın geometrilerine bağlı boyutsuz bir parametredir.



Şekil 4.4 Çatlak ucunda bir noktada gerilme.

4.1.2 Mod I ve Mod II İçin Elastik Gerilme Alanı Denklemleri

Merkezinde bir çatlak bulunan, iki eksenle yüklenmiş sonsuz kalınlıkta bir levha için sınır şartları aşağıdaki gibi verilmektedir (Şekil 4.5).

1. $-a < x < +a$ ve $y=0$ için $\sigma_y = 0$
2. $x \rightarrow \infty$ iken $\sigma_y \rightarrow \sigma_\infty$
3. Çatlak bir gerilme arttırıcı olduğundan $x=\pm a$ iken $\sigma_y \rightarrow \infty$

Elastik gerilme alan denklemleri;

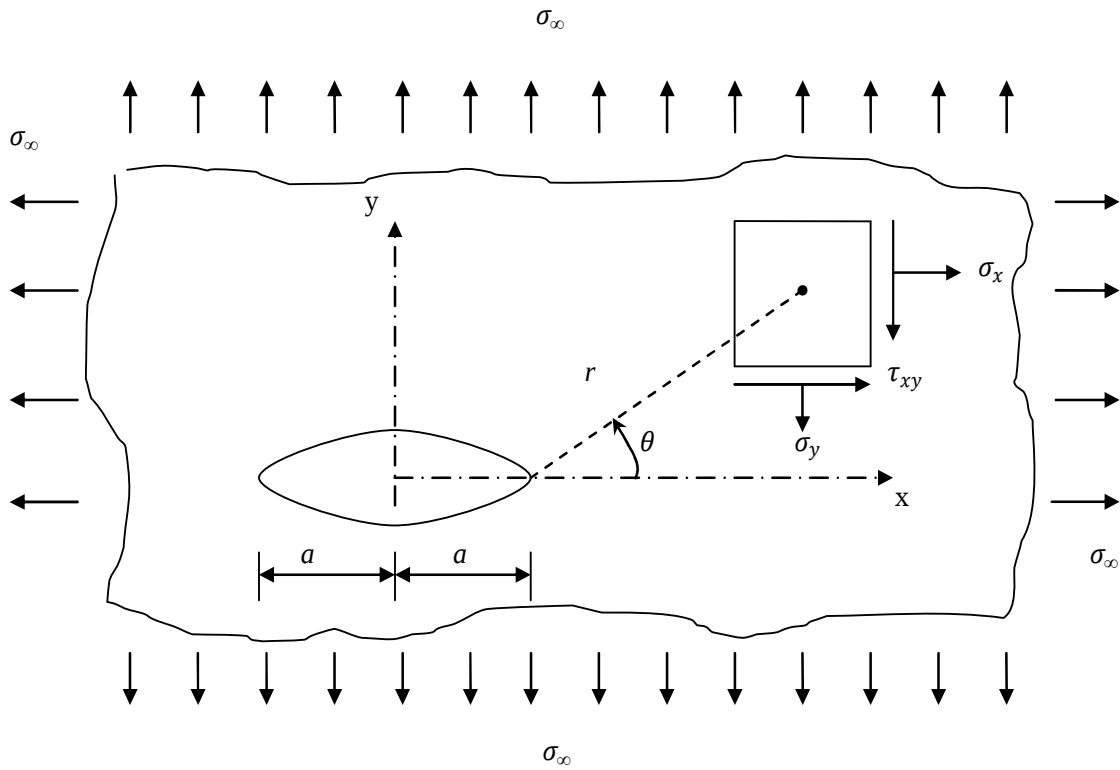
$$\sigma_x = \frac{\sigma\sqrt{\pi a}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (4.3)$$

$$\sigma_y = \frac{\sigma\sqrt{\pi a}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (4.4)$$

$$\tau_{xy} = \frac{\sigma\sqrt{\pi a}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \quad (4.5)$$

şeklindedir. Bu denklemlerdeki σ_x , x yönündeki, σ_y , y yönündeki ve τ_{xy} kayma gerilmelerini göstermektedir. Bu eşitliklerde $r=0$ (çatlak ucu)'da bütün gerilmeler sonsuza gitmektedir ve gerilmeler; $\frac{1}{\sqrt{2\pi r}} f(\theta)$ geometrik faktör ile $\sigma\sqrt{\pi a}$ faktörünün çarpımına eşittir. $\sigma\sqrt{\pi a}$, uygulanan gerilme ve ilk çatlak boyunun basit bir fonksiyonu olup, gerilme şiddet faktörüne (K) eşittir.

$$K = \sigma\sqrt{\pi a} \quad (4.6)$$



Şekil 4.5 İnce bir çatlak içeren iki eksende yüklenmiş sonsuz bir levha.

Mod II için;

$$K_{II} = \tau\sqrt{\pi a} \quad (4.7)$$

$$\sigma_x = -\frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \left(2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right) \quad (4.8)$$

$$\sigma_y = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \left(\cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right) \quad (4.9)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (4.10)$$

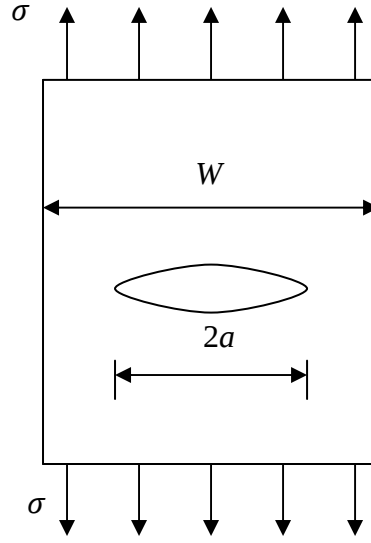
Çatlak ucu gerilme alanını, sonlu genişlikteki numune boyutlarının geometrisi etkilemektedir. Pratikte problemlerde kullanılabilmesi için gerilme şiddet faktörü;

$$K_I = C\sigma\sqrt{\pi a} \cdot f(a/W) \quad (4.11)$$

şeklinde verilebilir. Burada C ve $f(a/W)$, yapılan gerilme analizlerinden belirlenir. Merkezinde çatlak bulunan bir numune için (Şekil 4.6) [35];

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a} \sqrt{\frac{W}{\pi a} \tan \left(\frac{\pi a}{W} \right)} \quad (4.12)$$

denklemi verilebilir.

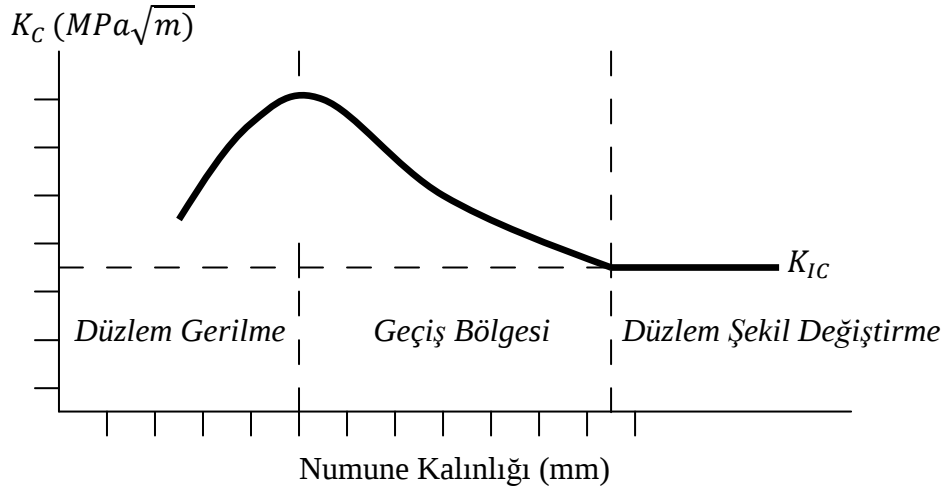


Şekil 4.6 Merkezinde çatlak bulunan sonlu genişlikte numune.

4.1.3 Kırılma Tokluğu

Mod I'e göre hesaplanan gerilme şiddet faktörü (K_I) malzemenin özelliği olmayıp, herhangi bir geometrideki bir malzeme için belirli bir gerilme değerinde sabittir. Ancak tüm malzemeler bir kritik gerilme değerinde kırılırlar (σ_C veya σ_F). Malzemenin kırıldığı bu gerilme değerindeki ölçülen gerilme şiddet faktörü o malzeme için kırılma tokluk değerini vermektedir. Düzlem şekil değiştirme için K_{IC} ile gösterilmektedir. Sıcaklık, yükleme hızı ve numune kalınlığına bağlı olarak değişmesine rağmen, malzemenin bir özelliği olup, kullanılan hesaplama yöntemine bağlı olarak sabittir.

Düzlem germe şartları sağlandığı zaman K_I değerleri, gerilme yerine σ_F (kırılma gerilmesi) yazılarak K_{IC} şeklinde ifade edilir. Düzlem gerilme durumunda ise K_C şeklinde ifade edilir.



Şekil 4.7 Bir malzemede numune kalınlığının K_C 'ye etkisinin şematik olarak gösterilişi.

Şekil 4.7'de görüldüğü gibi K_C numunenin kalınlığına göre değişim göstermekte ve belirli bir numune kalınlığında ise (düzlem şekil değiştirme durumunda) sabit bir değere gelir. Bu değere K_{IC} denir ve düzlem şekil değiştirmede malzemenin kırılma tokluğu adını alır. K_{IC} sabit bir minimum değer göstermektedir ve bu değer de bir malzeme özelliğidir. Böylece birçok yapısal malzeme için akma ve çekme gerilmesi, sertlik, vb. mekanik özelliklerin saptandığı gibi, bir K_{IC} değerinin de saptanabileceği görülmüştür [35].

4.2 Enerji Dengesi

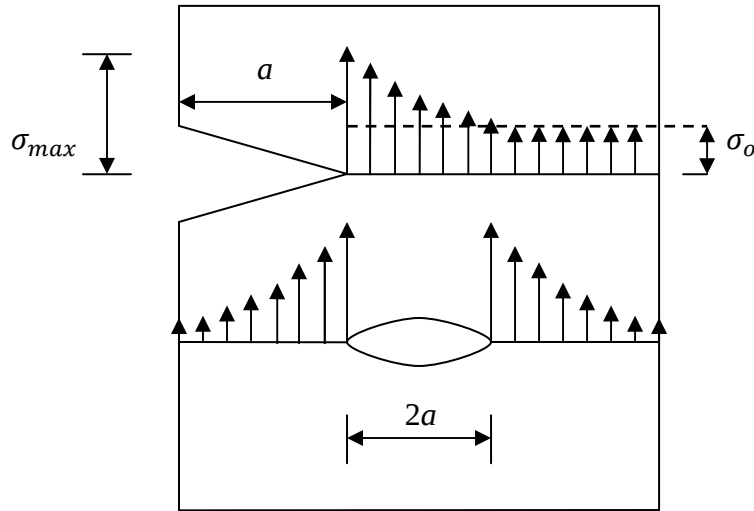
Cam üzerinde yaptığı çalışmalardan sonra Griffith, camın yüzeyinde bulunan ve gözle görülmeyen mikro çatlakların olduğunu ve bu çatlakların camın mukavemetini azalttığını belirlemiştir. Şekil 4.8'de belirtildiği gibi, yüzeyinde veya içinde eliptik bir çatlak bulunan malzemenin çatlak uç kısmında yüksek gerilme yığılmaları meydana gelir ve çatlak ucundaki maksimum gerilme σ_{max} , ortalama σ_o gerilmesinden çok daha büyüktür. σ_{max} ,

$$\sigma_{max} = 2\sigma_o \sqrt{\frac{a}{\rho}} \quad (4.13)$$

formülü ile hesaplanmaktadır. a iç çatlakın yarı boyu, ρ çatlak ucu eğrilik yarıçapını göstermektedir. Griffith'in önerdiği teoriye göre, çatlakın ilerlemeye başlayabilmesi için, gerilmelerin çatlak civarında oluşturacağı elastik enerji, yeni oluşacak çatlak yüzeylerinin yüzey enerjisine eşit olmalıdır. Sonsuz genişlikte ve birim kalınlıktaki bir levha için gerilme,

$$\sigma = \sqrt{\frac{2\gamma_e E}{\pi a}} \quad (4.14)$$

olarak tanımlanır. Burada E malzemenin Elastisite modülü ve γ_e elastik yüzey enerjisidir. Gevrek malzemeler için Griffith'in bu yaklaşımı iyi sonuçlar vermekte ve bu tür malzeme kırılmalarına elastik kırılma denmektedir. Irwin ve Orowan'ın γ_e elastik yüzey enerjisinin yanı sıra γ_p plastik deformasyon enerjisini de dikkate almaları sonucu Griffith teorisinin gerçek malzeme davranışlarına daha iyi uyduğu görülmüştür [35].



Şekil 4.8 Bir çentik ve çatlak ucunda gerilme yığılması.

Elastik, sonsuzda yüklenmiş birim kalınlıkta ve bu kalınlık boyunca çatlak içeren levhanın sabit yer değiştirme durumunda enerji içeriği (U) (Şekil 4.6) aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$U = U_o + U_a + U_\gamma - F \quad (4.15)$$

Burada, U_o ; yüklenmiş fakat çatlak içermeyen levhanın elastik enerjisi (sabit), U_a ; levhada çatlağın oluşmasıyla elastik şekil değiştirme enerjisindeki değişim, U_γ ; çatlak yüzeylerinin oluşmasıyla elastik yüzey enerjisindeki değişim, F ; dış etkiler ile gerçekleştirilen iş; olarak tanımlanmıştır. Griffith, U_a 'nın mutlak değerini, Inglis tarafından geliştirilen bir gerilme analizini kullanarak aşağıdaki şekilde göstermiştir.

$$|U_a| = \frac{\pi \sigma^2 a^2}{E} \quad (4.16)$$

elastik yüzey enerjisindeki değişim (U_γ), malzemenin elastik yüzey enerjisi (γ_e) ile çatlağın yeni yüzey alanının çarpımına eşittir [35].

$$U_\gamma = 2(2a\gamma_e) \quad (4.17)$$

Dış etkenler tarafından bir iş yapılmadığı durumda $F=0$ olur ve levhada çatlağın oluşmasıyla elastik enerjideki (U_a) değişim negatiftir. Yani elastik şekil değiştirme enerjisinde bir azalma söz konusudur. Çünkü levhanın katılığı azalır ve uygulanan yük düşer. Çatlak içeren bir levhanın toplam enerjisi;

$$U = U_o - \frac{\pi\sigma^2 a^2}{E} + 4a\gamma_e \quad (4.18)$$

olur. Burada U_o sabit olduğundan $dU_o/da = 0$ 'dır. Böylece çatlak ilerlemesi için denge durumu dU/da sıfıra eşitlenerek bulunur;

$$\frac{d}{da} \left(-\frac{\pi\sigma^2 a^2}{E} + 4a\gamma_e \right) = 0 \quad (4.19)$$

Denge koşullarından;

$$\frac{2\pi\sigma^2 a^2}{E} = 4\gamma_e \quad (4.20)$$

$$\sigma\sqrt{a} = \sqrt{\frac{2E\gamma_e}{\pi}} \quad (4.21)$$

Sonuç olarak bu eşitlikten, bu tür malzemelerde çatlak ilerlemesinin, $\sigma\sqrt{a}$ çarpımının kritik bir değere ulaşması ile oluşacağı çıkarılabilir [35]. (4.21) eşitliği,

$$\frac{\pi\sigma^2 a}{E} = 2\gamma_e \quad (4.22)$$

şeklinde yeniden düzenlenir ise eşitliğin sol tarafı enerji yayılım hızı (G) olarak tanımlanır. Bu eşitliğin sağ tarafı ise, çok küçük bir çalاک ilerleyişi ile meydana gelen

yüzey enerji artışın temsil eder ve çatlak direnci (R) olarak adlandırılır. Bu durumda karasız çatlak büyümesinin oluşabilmesi için G , en azından R 'ye eşit olmalıdır. R sabit olduğundan G , G_C gibi kritik bir değeri aşmamalıdır. Böylece kırılma;

$$\frac{\pi\sigma^2a}{E} \geq \frac{\pi\sigma_c^2a}{E} = G = R \quad (4.23)$$

olduğunda gerçekleşecektir. Kritik G_C değerini hesaplamak için, $2a$ uzunluğunda bir çatlğa sahip bir levhayı kırmak için gerekli σ_C gerilmesinin ölçülmesi gerekir. Irwin, Griffith'in ideal gevrek malzemeler için olan bu teorisinin, hem gevrek hem de plastik deformasyon gösteren metallere uygulanabileceğini önermiştir. Irwin'e göre, malzemenin çatlak ilerleyişine karşı gösterdiği direnç, elastik yüzey enerjisi (γ_e) ve plastik şekil değiştirme işinin (γ_p) toplamı olarak ele alınmalıdır.

Sonuç olarak eşitlik;

$$\frac{\pi\sigma^2a}{E} = 2(\gamma_e + \gamma_p) \quad (4.24)$$

şekline dönüşür. Nispeten sünek malzemeler için $\gamma_p \gg \gamma_e$ 'dir, yani R , hemen hemen tümüyle plastik enerjidir ve yüzey enerjisi ihmal edilebilir [35].

G ile K_I arasındaki ilişki ise; aşağıdaki şekildedir.

$$K = \sigma\sqrt{\pi a} \quad (4.25)$$

olduğundan,

$$G = \frac{K_I^2}{E} \quad (\text{düzlem gerilme}) \quad (4.26)$$

$$G = (1 - \nu^2) \frac{K_I^2}{E} \quad (\text{düzlem şekil değiştirme}) \quad (4.27)$$

şeklinde verilirken aynı şekilde;

$$G_C = \frac{K_C^2}{E} \quad (\text{düzlem gerilme}) \quad (4.28)$$

$$G_C = (1 - \nu^2) \frac{K_C^2}{E} \quad (\text{düzlem şekil değiştirme}) \quad (4.29)$$

şeklinde yazılabilir.

$$\sigma\sqrt{\pi a} \geq \sigma_C\sqrt{\pi a} = K_C \quad (4.30)$$

Düzlem şekil değiştirme için G_{IC} (tokluk) ve K_{IC} (kırılma tokluğu) ifadeleri kullanılır. Bu verilen denkleme göre $\sigma\sqrt{\pi a}$ çatlak ilerlemesi için kritik bir değere ulaşması gerekmektedir ve kritik bu değere ulaştığında çatlak ilerlemesi görülür. Deneysel olarak bir malzemenin kırılma gerilmesi ölçülerek saptanabilir. Mod I için bu, kritik gerilme yoğunluğu K_{IC} 'dir. Bir malzemenin kırılma mukavemeti (σ_F) plastik bölgenin çok küçük olması koşulu ile aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\sigma_F = \sqrt{\frac{E G_{IC}}{\pi a(1 - \nu^2)}} = \frac{K_{IC}}{\sqrt{\pi a}} \quad (4.31)$$

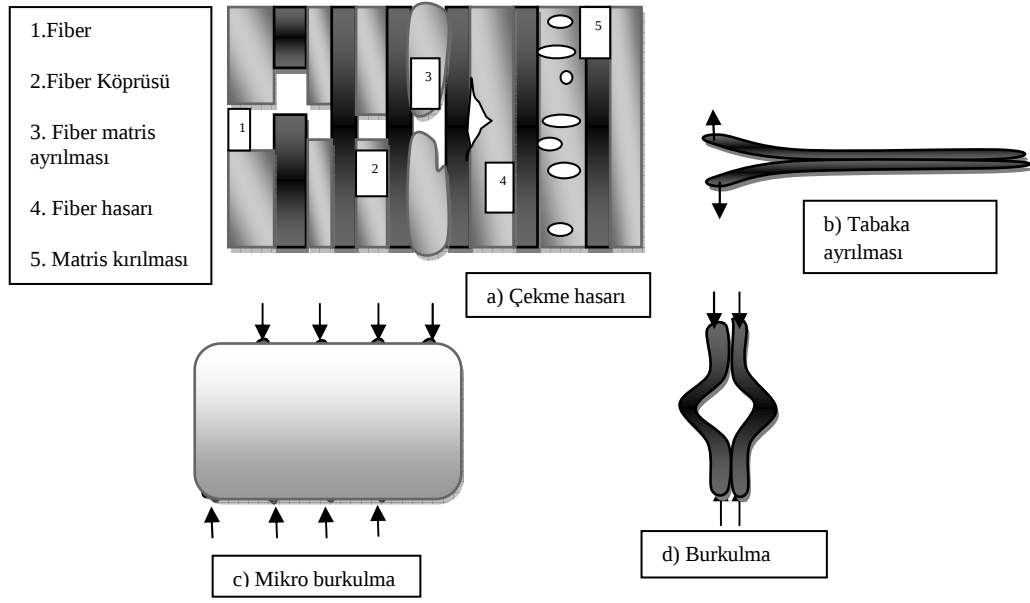
Düzlem gerilme durumunda $(1 - \nu^2)$ ifadesi kullanılmaz (çok ince levhalarda) ve bu durumda malzemenin tokluğu da G_c şeklinde belirlenir [35].

4.3 Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerde Kırılma

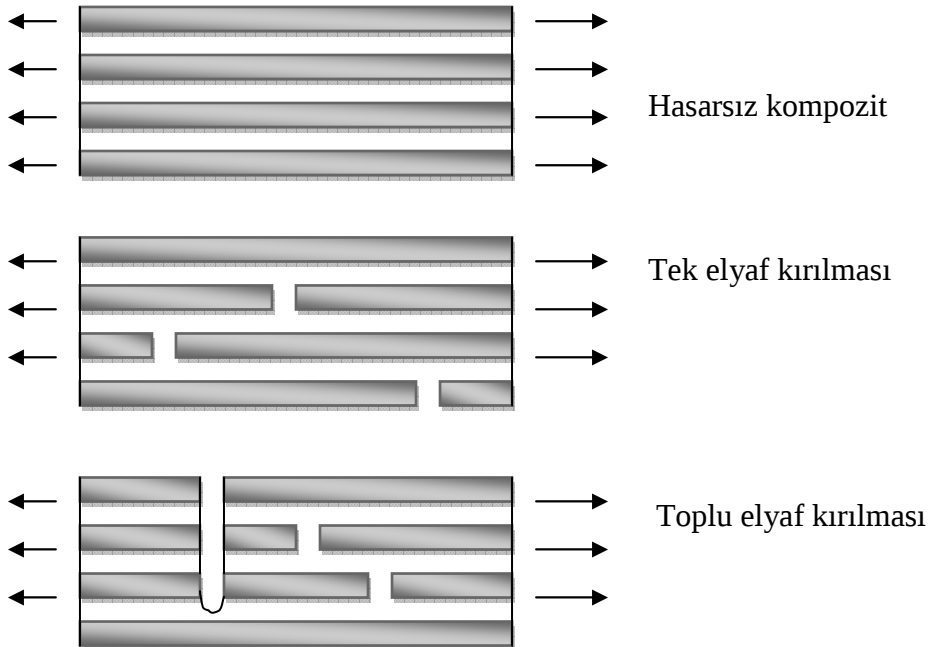
Elyaf takviyeli kompozit malzemeler homojen ve izotrop değildir. Aynı doğrultuda yönlendirilmiş olsa bile elyaf takviyeli kompozit malzemeler çeşitli şekillerde hasara uğrayabilirler. Bu hasar türleri: elyaf kırılması, ara yüzey ayrılması, matris kırılması ve tabaka ayrılmasıdır (Şekil 4.9). Homojen ve izotrop malzemelerin kırılmasında artan gerilme ile çatlak uzunluğu artsa bile şekli ve yönü aynı kalır. Elyaf takviyeli kompozit malzemelerde ise tek bir mikro çatlaktan ziyade kırılma malzeme içinde bir çok mikro çatlak tarafından kontrol edilir. Bu yüzden homojen malzemeler için geliştirilen teoriler kompozit malzemeler için uygulamada farklılık gösterebilir.

X-ray radyografi, optik ve elektron mikroskobu çalışmalarından da anlaşılmıştır ki tek eksenli gerilme altında yüklendiğinde ortaya çıkacak olan temel hasar dört aşamalı bir şekilde gerçekleşecektir. Bu hasarlar Şekil 4.10'da belirtilmiştir.

- a) Numune içindeki her bir elyaf rastgele bir şekilde kırılabilir. Bu hasar gevrek elyaflardaki hasarlar yüzünden en azından azami yükün %50'sinde başlar.
- b) Numune yüzeyindeki elyaf demetinde yoğunlaşmış olan elyaf kırılmaları sonucu bu demet boyunca farklı yerlerde mikroskobik çatlaklar ortaya çıkabilir.
- c) Makro çatlaklardan başlayıp elyaf boyunca tabaka ayrılmalarının ortaya çıkması,
- d) Elyaf doğrultusunda tabaka ayrılmasının ilerlemesi



Şekil 4.9 Elyaf takviyeli kompozit malzemelerde oluşan hasar türleri [33].



Şekil 4.10 Elyaf takviyeli kompozit malzemelerde çekme durumunda rastlanan kırılma türleri.

Kuvvet artmaya devam ederse diğer çatlakların ortaya çıkması ile hasar devam eder ve elyaf doğrultusunca tabaka ayrılması ilerler. Bu kırılan elyaf demetleri çoğalarak parçanın kırılmasına neden olur [33].

Kompozit bir parça elyaf doğrultusunda statik olarak çekilmeye çalışıldığında parça içinde kırılan her bir elyaf kendi çevresinde iki tür gerilme yığılması meydana getirir. Bunlar kırılmayan en yakın elyaf etrafında çekme gerilme yığılması ve kırılan elyaf ile onu saran matris arasındaki kayma gerilme yığılmasıdır. Bu yüzden fiberler kırılınca lokal hasar iki farklı türde devam edebilir. En yakın fiberde çekme kırılması ve/veya yüzeyde kayma kırılması [33].

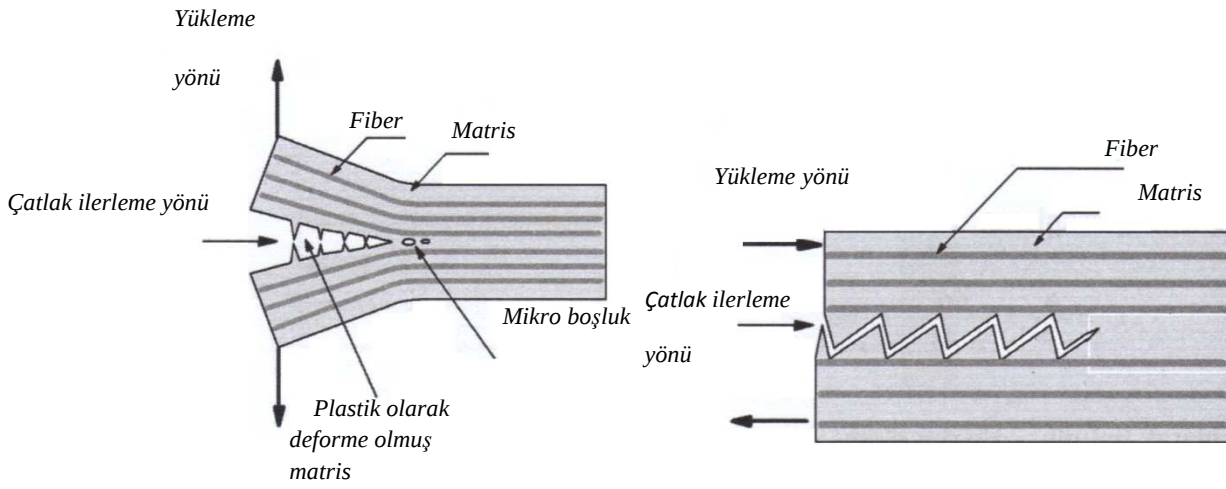
Elyaf takviyeli kompozit malzemelerin en önemli özelliğinden biri de malzemenin tabaka ayrılmalarına karşı göstermiş olduğu dirençtir. Tabaka ayrılması, yapının tamamen tahrip olmasına yol açtığı gibi aynı zamanda rijitliğini düşürmektedir.

Elyaf takviyeli kompozit malzemelerin değişik modlardaki kırılma dirençlerini deneysel olarak tespit etmek için farklı yöntemler geliştirilmiştir [37]. Bunlar arasında en fazla kullanılan Çift Ankastre Kiriş (ÇAK) deney tekniğidir. Bu teknikte Mod I kırılma direnci (G_{IC}) tespit edilir. ÇAK tekniğinin kısmen değiştirilmesiyle elde edilen başka bir yöntem ise Uçtan Yüklemeli Ayrılma (UYA) tekniği ve Uçtan Çentikli Eğme (UÇE) tekniğidir. Bu teknikle malzemenin Mod II kırılma direnci (G_{IIC}) tespit edilebilmektedir. Kompozit malzemenin belirli bir Mod I/II oranları için G_{IC} ve G_{IIC} kırılma dirençlerini tespit etmek amacıyla yaygın olarak kullanılan teknik ise Sabit Oranlı Karışık Mod (SOKM) yöntemidir. Bu teknikte malzemenin belirli bir G_I/G_{II} oranı için her bir çatlak direnci tespit edilebilmektedir [33].

Kırılma mekaniği prensipleri kullanılarak kırılma enerjisi hesabında en yaygın olarak kompliyans (compliance) metodu, kiriş metodu ve alan metodu gibi farklı metodlar kullanılmakta olup, en yaygın olanı kiriş metodudur.

Çift ankastre kiriş testi (Double Centilever Beam- DCB) pratikte sıklıkla kullanılmakta olup, kiriş ucunda sıfır dönme öngörülmesi durumunda basit kiriş teorisi kullanılarak analitik çözüm elde edilir.

Tabaka ayrılması sonucu kompozit malzemelerde oluşan kırılma ve çatlak ilerleme mekanizmaları birbirinden farklıdır. Bu farklılıklar oluşan kırılma yüzeylerinde de kendini ortaya koymaktadır.

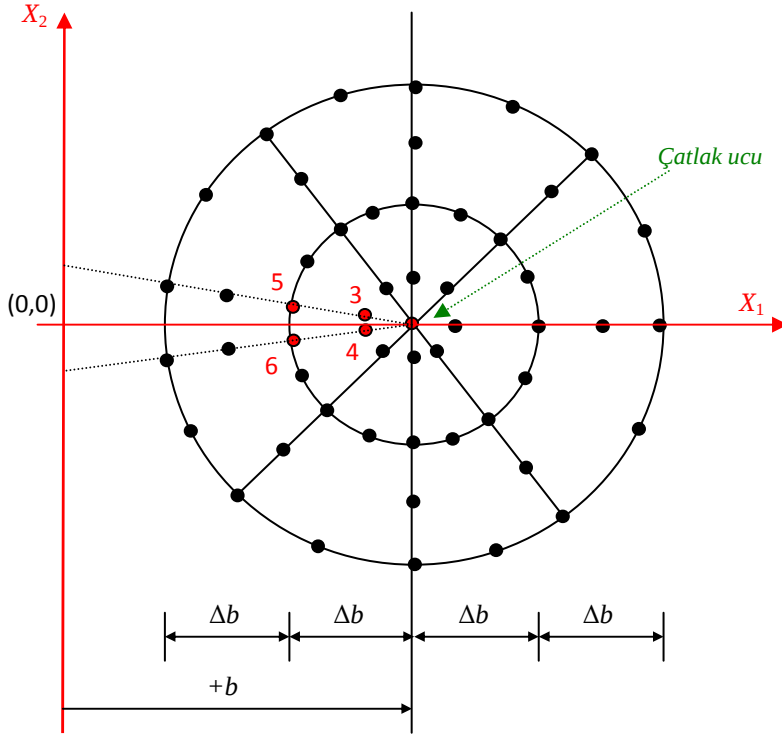


Şekil 4.11 Mod I ve mod II türü yükleme koşullarında oluşan tabaka ayrılması sonucu elyaf takviyeli kompozit malzemede oluşan çatlak ilerleme mekanizmaları [38].

5. GERİLME ŞİDDET FAKTÖRÜNÜN SAYISAL ÇÖZÜMÜ

5.1 İzotropik Malzemeler için Gerilme Şiddet Faktörü

Gerilme şiddet faktörünün hesaplanmasında kullanılan en önemli yöntemlerden birisi yer değiştirme korelasyon tekniğidir (Displacement Correlation Technique-DCT).



Şekil 5.1 Çatlak ucunda sonlu elemanlar modeli [49].

Çatlak ucu açılma yer değiştirmesi (COD);

$$COD = (4u_{2,3-4} - u_{2,5-6}) \sqrt{\frac{r}{\Delta b}} \quad (5.1)$$

$$COD = K_I \left(\frac{\kappa+1}{G} \right) \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \quad (5.2)$$

Burada, ν poisson's oranı, G : Kayma modülü, r düğümün çatlağa olan uzaklığı, u_1 ; x_1 doğrultusunda, u_2 ise x_2 doğrultusundaki yer değiştirmeler ve düzlem şekil değiştirme için $\kappa = 3 - 4\nu$, düzlem gerilme için $\kappa = (3 - \nu)/(1 + \nu)$ dir. Mod I için gerilme şiddet faktörü,

$$K_I = \sqrt{\frac{2\pi}{\Delta b}} \left[4 \left(\frac{G}{\kappa+1} \right) u_{2,3-4} - \left(\frac{G}{\kappa+1} \right) u_{2,5-6} \right] \quad (5.3)$$

Mod II için gerilme şiddet faktörü,

$$K_{II} = \sqrt{\frac{2\pi}{\Delta b}} \left[4 \left(\frac{G}{\kappa+1} \right) u_{1,3-4} - \left(\frac{G}{\kappa+1} \right) u_{1,5-6} \right] \quad (5.4)$$

olarak formüle edilir [39].

Ayrıca sonlu elemanlar paket programı kullanılarak gerilme şiddet faktörü izotropik malzemeler için otomatik olarak bulunabilir. ANSYS programı çatlak ucundaki gerilme şiddet faktörünü GŞF (K_I) *KCALC* komutunu kullanarak; yer değiştirme ekstrapolasyon metoduyla (*DE:Displacement Extrapolation*) hesaplamaktadır [40]. Bu metoda göre tam modellenmiş çatlak ucundaki gerilme şiddet faktörü Mod I yükleme durumu için;

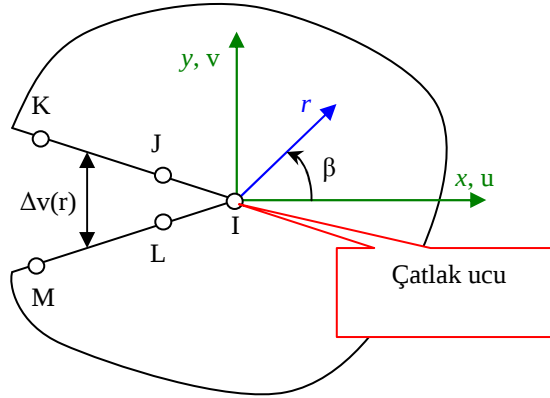
$$K_I = \sqrt{2\pi} \frac{2G}{1 + \kappa} \left(\lim_{r \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\sqrt{r}} \right) \quad (5.5)$$

ile tanımlanır (Şekil 5.2) [41]. Burada Δv ; çatlak yüzeyinde koordinatları aynı düğümler arasındaki açılma miktarı, $\frac{\Delta v}{\sqrt{r}}$ ifadesi, çatlak ucu bölgesinde düğümlerin yer değiştirmelerinden yararlanılarak r 'nin lineer bir fonksiyonu şeklinde,

$$\frac{\Delta v}{\sqrt{r}} = A + Br \quad (5.6)$$

yazılacak olursa (5.5) ifadesi aşağıdaki gibi olur.

$$K_I = \sqrt{2\pi} \frac{2\mu}{1+\kappa} A \quad (5.7)$$



Şekil 5.2 Yer değiştirme ekstrapolasyon metodu için çatlak bölgesi düğümleri ve yer değiştirmeler.

5.2 Anizotropik Malzemeler için Gerilme Şiddet Faktörü

Tekil eleman uzunluğu r , çatlak ucuna yaklaşırken, anizotropik malzemeler için çatlak ucu yer değiştirmeleri

$$\lim_{r \rightarrow 0} \frac{\Delta u}{r} = 2\sqrt{\frac{2}{\pi}} (\Omega_{21}K_I + \Omega_{11}K_{II} + \Omega_{31}K_{III}) \quad (5.8)$$

$$\lim_{r \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{r} = 2\sqrt{\frac{2}{\pi}} (\Omega_{22}K_I + \Omega_{12}K_{II} + \Omega_{32}K_{III}) \quad (5.9)$$

$$\lim_{r \rightarrow 0} \frac{\Delta w}{r} = 2\sqrt{\frac{2}{\pi}} (\Omega_{23}K_I + \Omega_{13}K_{II} + \Omega_{33}K_{III}) \quad (5.10)$$

şeklinde yazılabilir [42]. $\frac{\Delta u}{\sqrt{r}}$, $\frac{\Delta v}{\sqrt{r}}$ ve $\frac{\Delta w}{\sqrt{r}}$ ifadeleri, çatlak ucu bölgesinde düğümlerin yer değiştirmelerinden yararlanılarak r 'nin lineer bir fonksiyonu şeklinde,

$$\frac{\Delta u}{\sqrt{r}} = A + Br, \quad \frac{\Delta v}{\sqrt{r}} = C + Dr, \quad \frac{\Delta w}{\sqrt{r}} = F + Hr \quad (5.11)$$

yazılacak olursa, GŞF'leri (5.10) ifadesi kullanılarak aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\begin{bmatrix} K_I \\ K_{II} \\ K_{III} \end{bmatrix} = \frac{1}{2\sqrt{\frac{2}{\pi}}} \begin{bmatrix} \Omega_{21} & \Omega_{11} & \Omega_{31} \\ \Omega_{22} & \Omega_{12} & \Omega_{32} \\ \Omega_{23} & \Omega_{13} & \Omega_{33} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} A \\ C \\ F \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

Şekil 5.3'e göre, tekil bir elemanda ($r_3 = 4r_2$) düğümlerin yer değiştirmeleri;

$$\frac{\Delta v_{24}}{\sqrt{r_2}} = C + Dr_2, \quad \frac{\Delta v_{35}}{\sqrt{r_3}} = C + Dr_3, \quad (5.13)$$

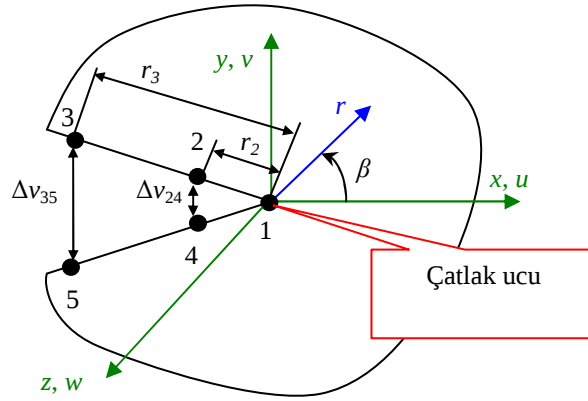
eşitlikleri yardımıyla;

$$C = \frac{8\Delta v_{24} - \Delta v_{35}}{3\sqrt{r_3}} \quad (5.14)$$

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

$$A = \frac{8\Delta u_{24} - \Delta u_{35}}{3\sqrt{r_3}}, \quad F = \frac{8\Delta w_{24} - \Delta w_{35}}{3\sqrt{r_3}} \quad (5.15)$$

şeklinde elde edilir.



Şekil 5.3 Çeyrek-nokta eleman için çatlak bölgesi düğümleri ve yer değiştirmeler.

Denklem 5.12'de Ω_{ij} ($i,j=1,2,3$)

$$\Omega_{ij} = -\text{Im}(A_{jk} L_{ki}^{-1}) \quad (i,j,k=1,2,3) \quad (5.16)$$

ifadesi ile bulunur. Burada A_{jk} , $j=1$ ve $k=1,2$ için;

$$\begin{aligned}
 A_{1k} &= M_{11}\mu_k^2 + M_{12} - M_{16}\mu_k + \lambda_k(M_{15}\mu_k - M_{14}) \\
 A_{2k} &= M_{21}\mu_k + M_{22}/\mu_k - M_{26} + \lambda_k(M_{25}\mu_k - M_{24}/\mu_k) \\
 A_{3k} &= M_{41}\mu_k + M_{42}/\mu_k - M_{46} + \lambda_k(M_{45}\mu_k - M_{44}/\mu_k)
 \end{aligned} \tag{5.17.a}$$

$j=1$ ve $k=3$ için;

$$\begin{aligned}
 A_{13} &= \lambda_3(M_{11}\mu_3^2 + M_{12} - M_{16}\mu_3) + M_{15}\mu_3 - M_{14} \\
 A_{23} &= \lambda_3(M_{21}\mu_3 + M_{22}/\mu_3 - M_{26}) + M_{25} - M_{24}/\mu_3 \\
 A_{33} &= \lambda_3(M_{41}\mu_3 + M_{42}/\mu_3 - M_{46}) + M_{45} - M_{44}/\mu_3
 \end{aligned} \tag{5.17.b}$$

Düzlem şekil değiştirme şartı altında

$$M_{ij} = S_{ij} - \frac{S_{i3} - S_{j3}}{S_{33}}, \quad (i,j=1,\dots,6) \tag{5.18}$$

ifadesine eşittir. S_{ij} ($i,j=1,\dots,6$) malzemenin kompliyans matrisi olup, ortotropik malzeme için gerilme-şekil değiştirme bağıntısı

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} \quad (5.19)$$

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

$$l_2(\mu)l_4(\mu) - [l_3(\mu)]^2 = 0 \quad (5.20)$$

Burada;

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

$$l_3(\mu) = M_{15}\mu^3 - (M_{14} + M_{16})\mu^2 + (M_{25} + M_{46})\mu - M_{24} \quad (5.21)$$

$$l_4(\mu) = M_{11}\mu^4 - 2M_{16}\mu^3 + (2M_{12} + M_{66})\mu^2 - 2M_{26}\mu + M_{22}$$

ayrıca;

$$L = \begin{bmatrix} -\mu_1 & -\mu_2 & -\lambda_3\mu_3 \\ 1 & 1 & \lambda_3 \\ \lambda_1 & \lambda_2 & -1 \end{bmatrix} \quad (5.22)$$

şeklinde olup, Denklem (5.22) ve (5.17)'deki λ_i , ($i=1,\dots,3$)

$$\lambda_1 = -\frac{l_3(\mu_1)}{l_2(\mu_1)}, \lambda_2 = -\frac{l_3(\mu_2)}{l_2(\mu_2)}, \lambda_3 = -\frac{l_3(\mu_3)}{l_4(\mu_3)} \quad (5.23)$$

olarak yazılır.

Şayet kompozit levhadaki fiberler x ekseninde pozitif α açısı kadar döndürülür ise yeni kompliyanans matrisi

$$[\bar{S}] = [R]^T [S] [R] \quad (5.24)$$

Olara elde edilir. Burada $R_{ij}(i,j=1,\dots,6)$ dönüşüm matrisidir ve

$$[R] = \begin{bmatrix} \cos^2 \beta & \sin^2 \beta & 0 & 0 & 0 & \sin 2\beta \\ \sin^2 \beta & \cos^2 \beta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \beta & -\sin \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sin \beta & \cos \beta & 0 \\ -\sin \beta \cos \beta & -\sin \beta \cos \beta & 0 & 0 & 0 & \cos^2 \beta - \sin^2 \beta \end{bmatrix} \quad (5.25)$$

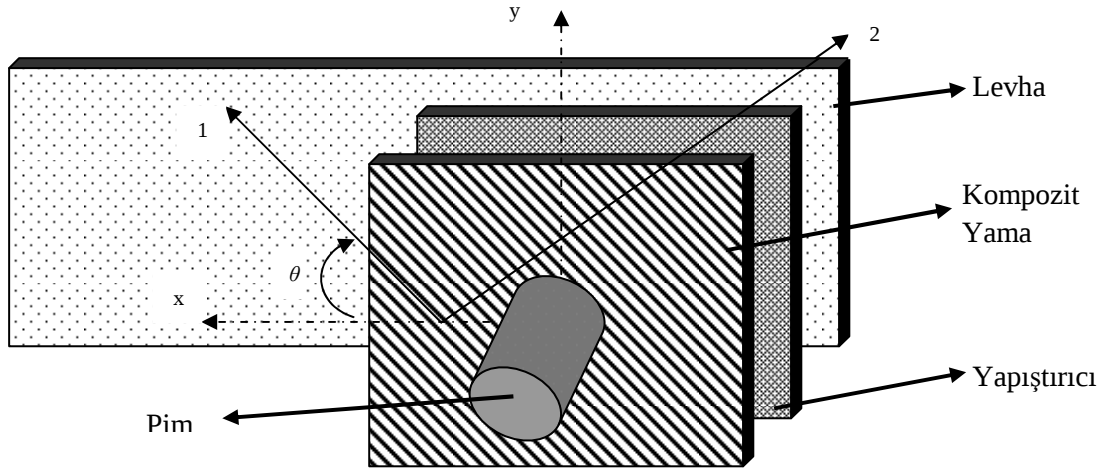
şeklinde verilir. Bu durumda;

$$M_{i,j} = \overline{S_{i,j}} - \frac{\bar{S}_{i,3} - \bar{S}_{j,3}}{\bar{S}_{3,3}}, (i,j = 1, \dots, 6) \quad (5.26)$$

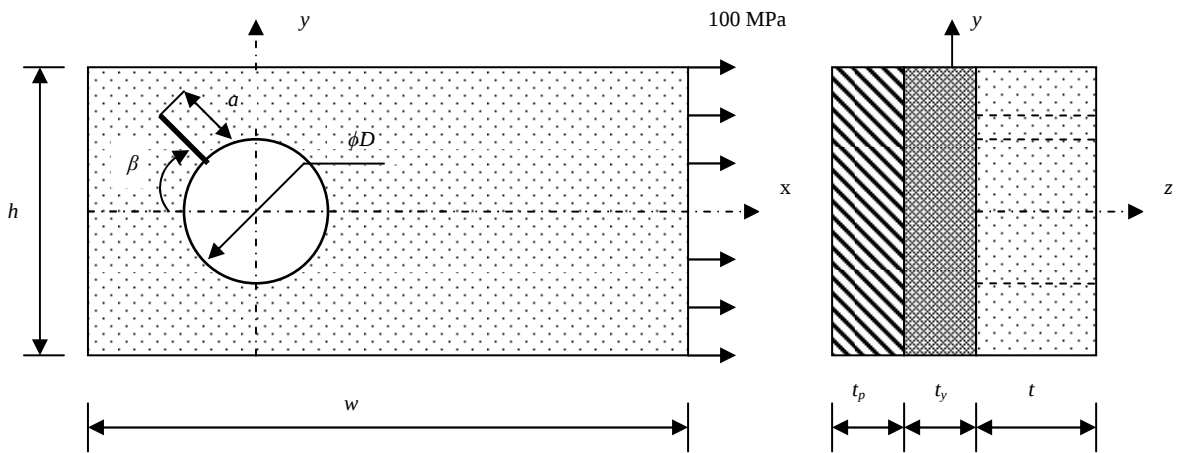
şeklinde yazılır [49].

6. PROBLEM TANIMI

Bu çalışmada Şekil 6.1 ve Şekil 6.2’de gösterilen ve boyutları verilen bir levhanın sağ tarafından 100 MPa çekme yükü uygulanarak gerilme şiddet faktörü hesaplanmış ve geometri ve malzeme gibi değişken parametrelerin gerilme şiddet faktörü üzerindeki etkisi araştırılmıştır (Tablo 6.1). Levha ve yama malzemesi için kullanılan malzemelerin ise mekanik özellikleri Tablo 6.2’de verilmiştir. Çözümde çekme yükü etkisi altında çatlak ucu yer değiştirmeleri sonlu elemanlar paket programı *ANSYS,12.1* ile bulunmuştur ve tamir edilmiş levha üç boyutlu olarak modellenmiştir.



Şekil 6.1. Kompozit yama ile tamir edilmiş pim delikli kompozit levhanın arkadan görünüşü



Şekil 6.2. Kompozit yama ile tamir edilmiş pim delikli kompozit levhanın önden görünüşü ve boyutları.

Tablo 6.1 Modelin geometrik ve malzeme özellikleri.

Özellik	Sembol	Birim	Değer
Levha Boyutları	$w \times h \times t$	mm^3	100x200x3
Çatlak Boyu	a	mm	5,10,15,20,25,30,35
Çatlak Açısı	β	°	0,15,30
Pim Çapı	D	mm	10,20,30,40,50,60,70
Çekme Gerilmesi	σ	MPa	100
Yama Kalınlığı	t_p	mm	0.5,1,1.5,2,2.5,3
Yama Fiber Takviye açısı	ϕ	°	0,15,30,45,60,75,90
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
Levha Fiber Takviye Açısı	α	°	0,15,30,45,60,75,90
Levha Malzemesi	-	Karbon, Boron,Cam, ve Grafit Epoksi	-
Yama malzemesi	-	Karbon, Boron,Cam, ve Grafit Epoksi	-

Tablo 6.2 Karbon, Boron, Grafit ve Cam epoksi kompozitlerin mekanik özellikleri

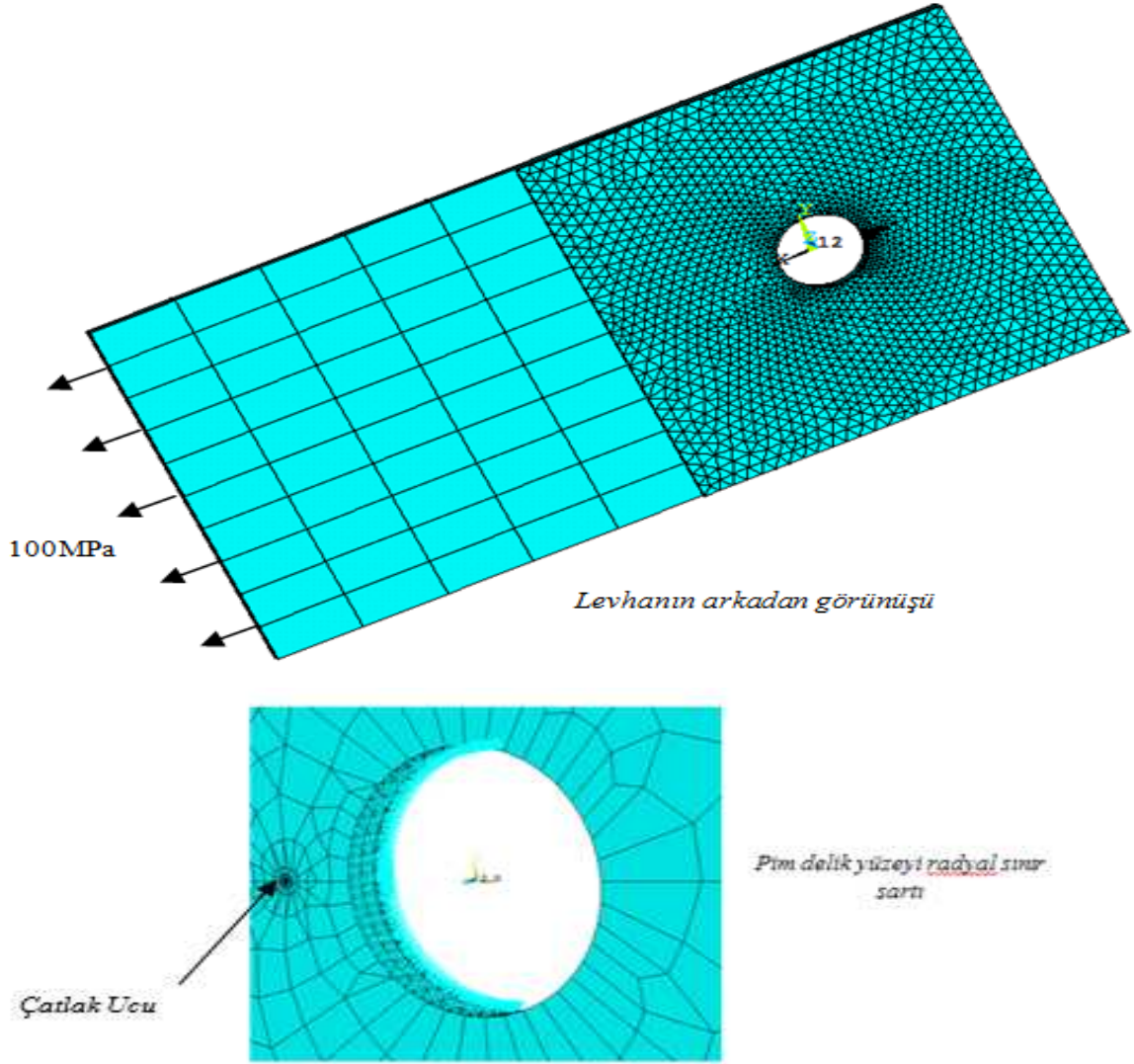
Malzeme	E_1^* (MPa)	E_2, E_3 (MPa)	G_{12}, G_{13} (MPa)	G_{23} (MPa)	ν_{12}, ν_{13} (-)	ν_{23} (-)
Boron Epoksi [43]	195120	25421	7234	4933	0.168	0.035
Grafit Epoksi [44]	172400	10340	4820	3100	0.3	0.18
Cam Epoksi [45]	27820	5830	2560	2240	0.31	0.41
Karbon Epoksi [46]	145000	10000	7000	3700	0.25	0.5

*E, G ve ν : Sırasıyla malzemelerin Elastisite modülü, Kayma modülü, Poisson oranıdır.

1-fiber doğrultusu, 2-fibere dik doğrultu, 3-kalınlık doğrultusudur.

Problemin üç boyutlu sonlu elemanlar modeli Şekil 6.3’de verilmiştir. Çatlağa sahip levha, yama ve yapıştırıcı 20 düğümlü *Solid95* elaman tipi kullanılarak model oluşturulmuştur. Geometri ve malzeme gibi değişken parametreler ile toplamda 38 model hazırlanmıştır. Şekil 6.2’de verilmiş olan kompozit yama ile tamir edilmiş

levhanın önden görünüşüne göre, 100 MPa’lık çekme yükü uygulanan alanda $u_y=u_z=0$ olarak seçilmiştir. Ayrıca rijit pim etkisini sağlayabilmek için delik yüzeyine radyal sınır şartı uygulanmıştır. Çatlak ucu deplasmanları serbest yüzeyden alınmıştır.



Şekil 6.3 Problemin sonlu elemanlar modeli

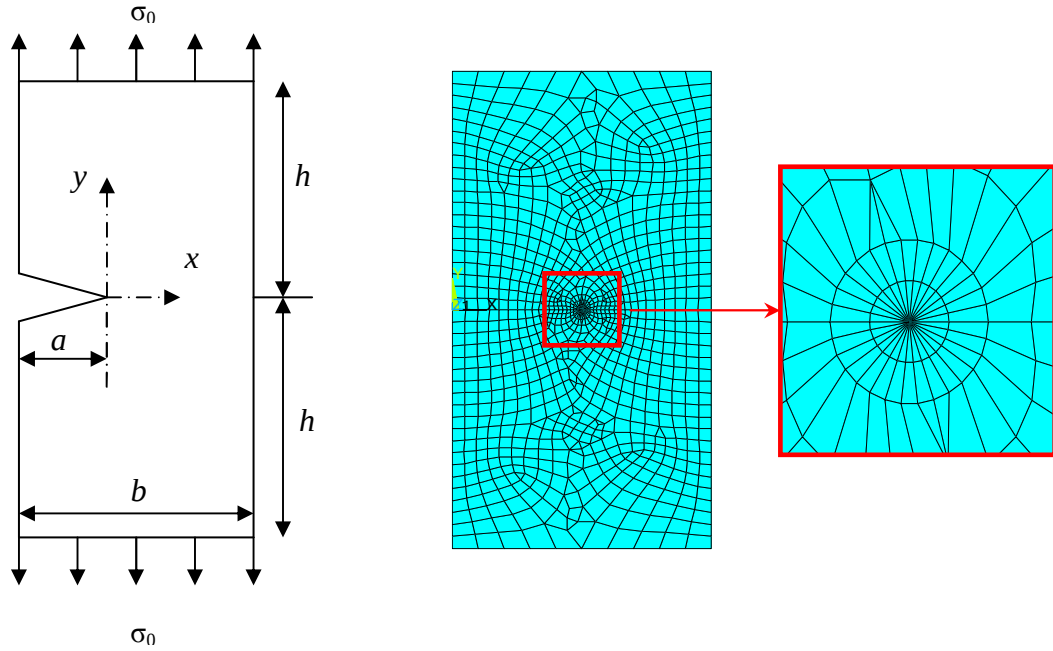
Elde edilen sonuçların daha düzgün olmaları için modelin mümkün olan en fazla sonlu elemana yani düğüme bölünmesi önemlidir. Düğüm sayısı dolayısı ile eleman sayısı değiştirilerek tekrar edilen çözümlerde elde edilen sonuçlarda değişiklik olmadığı noktada artık modeli daha fazla sonlu elemana bölmek gereksizdir. Sonlu eleman modeline göre kullanılacak düğüm sayısı için yapılan analiz sonuçlarında elde edilen düğüm sayıları Tablo 6.3’de verilmiştir.

Tablo 6.3 Problemin sonlu eleman modeline göre düğüm sayıları

Düğüm Sayısı	$K_I (MPa\sqrt{mm})$	$K_{II} (MPa\sqrt{mm})$
23892	326.79	-170.99
20747	326.70	-171.42
19682	321.81	-167.49
18528	327.71	-176.20

Sayısal çözüm tekniğinin kontrolü için literatürde bulunan tamir edilmemiş çatlak içeren bir levha örnek olarak ele alınmıştır. Levha 1397 düğümden 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 ve $\sigma_0=0.007$ MPa'dır. Kenar çatlak içeren ortotropik levha Şekil 6.4'de gösterilmiştir. Buna göre boyutları $a/b=0.5$, $h=10a$ 'dır [47].

Literatürde tamir edilmemiş ortotropik levhada kenar çatlak problemi için gerilme şiddet faktörü $K_I=0.1674877 MPa\sqrt{mm}$ olarak hesaplanmış [47], buna karşılık bu çalışmada $0.1673049 MPa\sqrt{mm}$ olarak hesaplanmıştır.

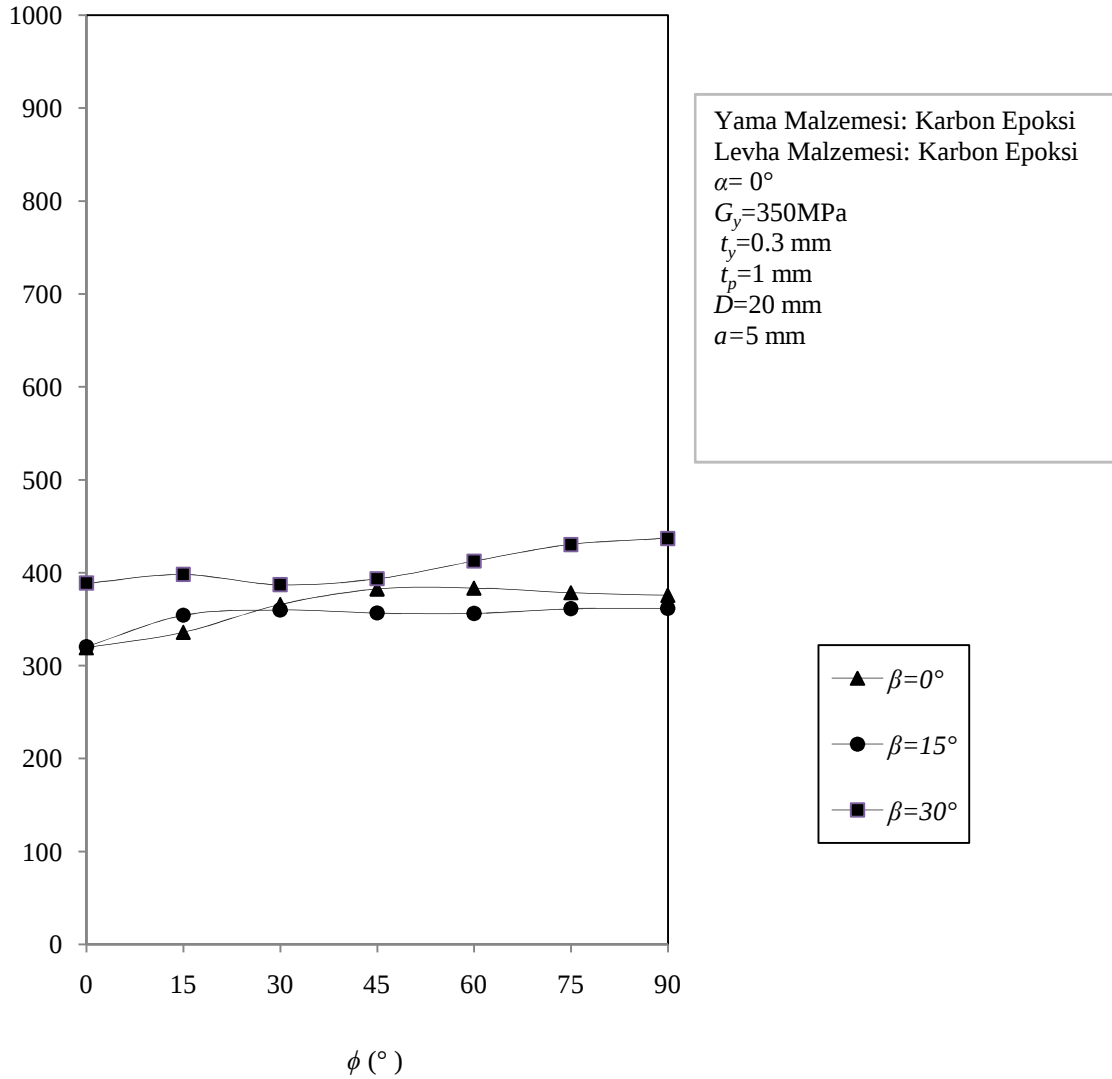


Şekil 6.4 Kenar çatlaklı ortotropik levha problemi ve sonlu elemanlar modeli.

7. SONUÇLAR

Bu çalışmada, kompozit yama ile tamir edilmiş pim delikli çatlak içeren kompozit levha problemi sayısal olarak incelenmiştir. Kompozit yama, levhanın tek yüzeyine yapıştırıcı ile birleştirilmiştir. Sonlu eleman modeli üç boyutlu olarak hazırlanmış olup, kompozit levhada çatlak ucu yer değiştirmeleri *ANSYS* programı ile elde edilmiştir. Tamir edilmiş çatlak içeren levhada pim bağlantısı rijit olarak kabul edilmiş olup, levhanın diğer ucu üniform çekme yükü altındadır. Sonlu eleman modelinde rijit pim etkisi, pim delik yüzeyine radyal sınır şartı uygulanarak sağlanmıştır. Gerilme şiddet faktörü ise çatlak ucu yerdeğiştirmelerini kullanarak anizotropik malzemelere uygulanabilen yerdeğiştirme korelasyon metodu ile hesaplanmıştır.

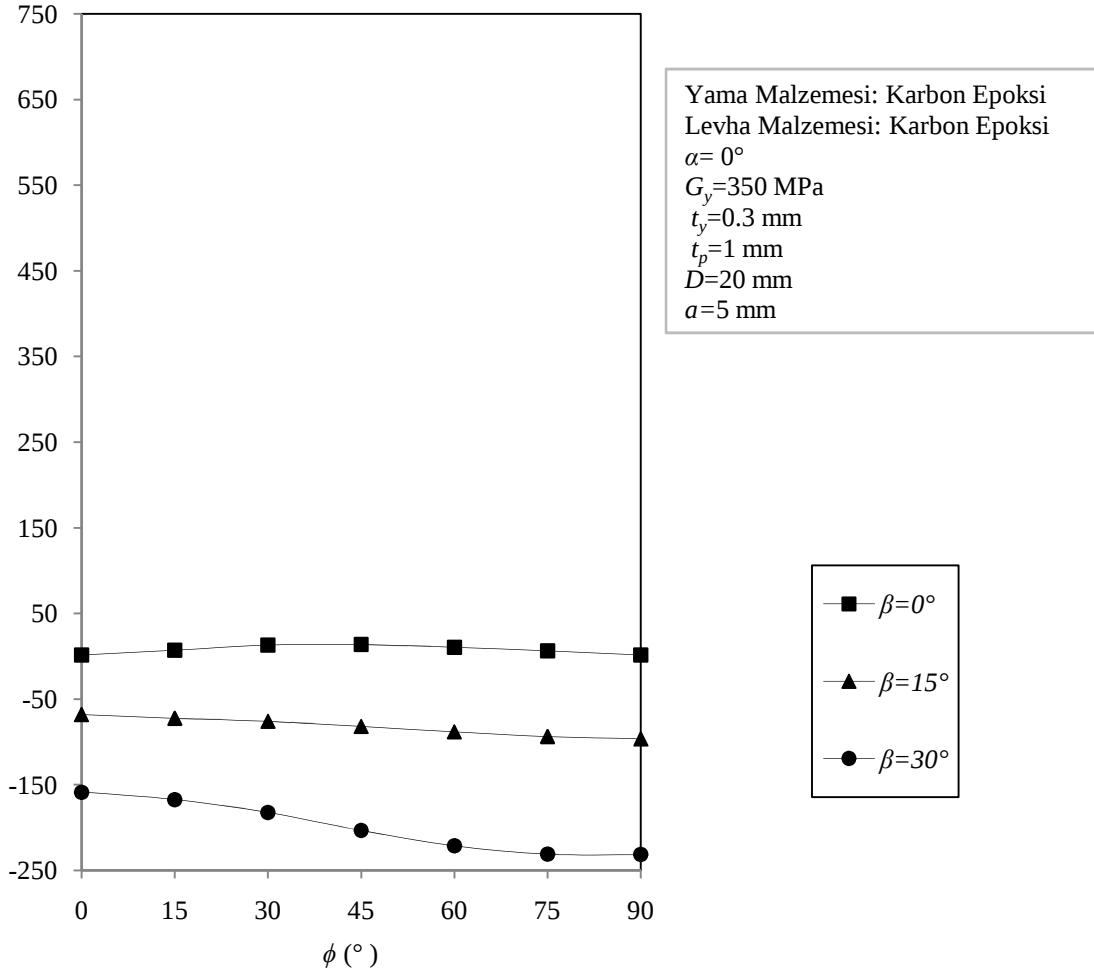
Çatlak boyu ve açısı, pim çapı, yama kalınlığı, fiber takviye açısı ve malzemesi, yapıştırıcı kalınlığı ve Kayma modülü, levha fiber takviye açısı ve malzemesinin gerilme şiddet faktörüne etkisi grafikler halinde sunulmuştur. Levha boyutları 100x50x3 mm olarak sabit tutulmuştur



Şekil 7.1 Farklı β çatlak açısı için K_I gerilme şiddet faktörünün ϕ yama açısı ile değişimi ($\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$).

Şekil 7.1’de farklı β çatlak açıları için K_I gerilme şiddet faktörünün ϕ yama açısı ile değişimi verilmiştir. Yama ve levha malzemesinin her ikisi de Karbon Epoksidir. Levha açısı $\alpha=0^\circ$ olup, geometrik boyutlar tablo 6.1’de gösterilmiştir.

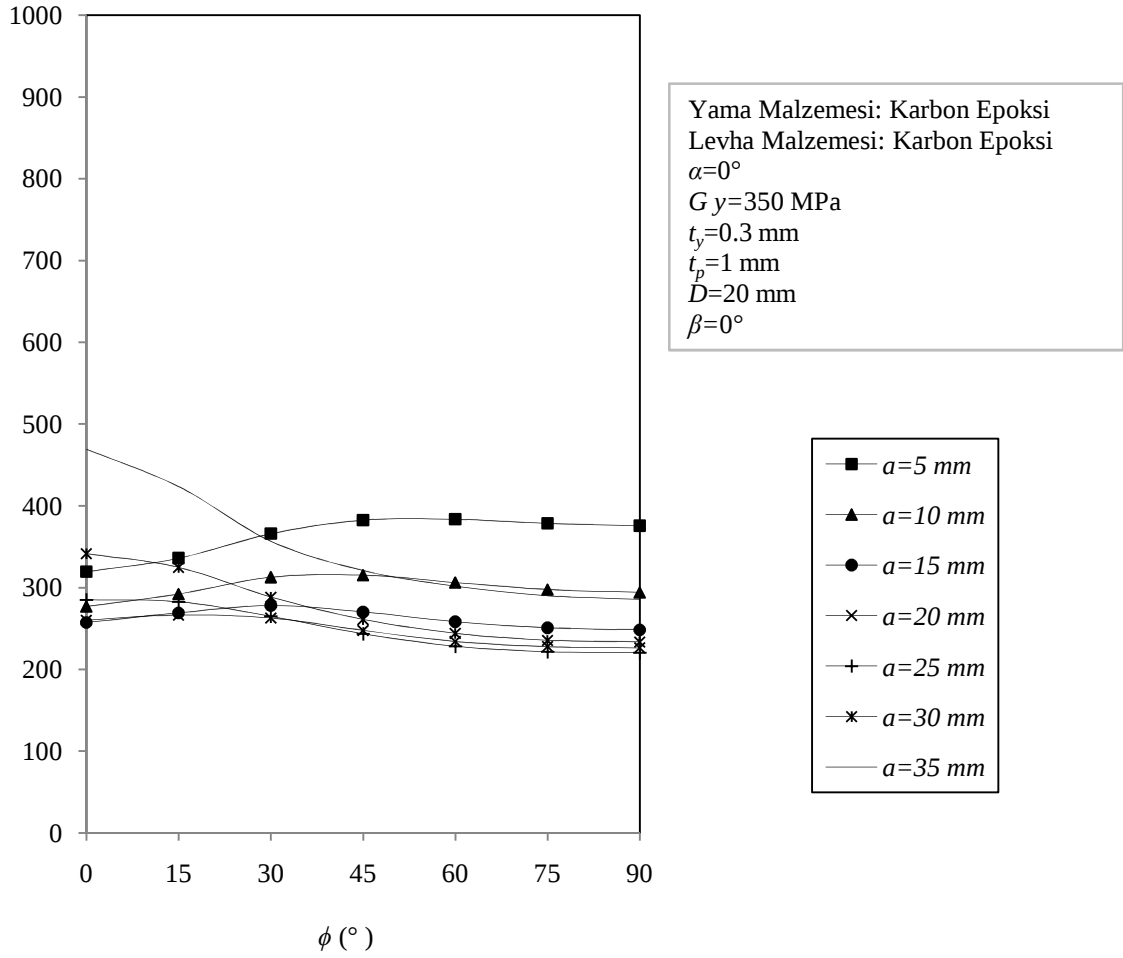
Şekil 7.1’den görüleceği gibi yama açısının artması K_I gerilme şiddet faktörünü arttırmıştır. Bunun nedeni fiber açısı 90° olduğunda yama mukavemetinin düşmesidir. Yüklemeden dolayı tüm ϕ değerleri için maksimum K_I değeri $\beta=30^\circ$ için elde edilmiştir. Buna karşılık minimum K_I değeri ise $\phi=15^\circ$ haricinde $\beta=15^\circ$ için elde edilmiştir.



Şekil 7.2 Farklı β çatlak açısı için K_{II} gerilme şiddet faktörünün ϕ yama açısı ile değişimi ($\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$).

$\beta=0^\circ$ ve $\phi=0^\circ$ ve 90° için Mod I yükleme durumu geçerli olduğundan K_{II} değerleri yoktur. β ve ϕ 'nin 0° 'den farklı alacağı değerler için karışık mod yükleme hali geçerli olacağından K_I 'in yanında K_{II} değerleri de görülmeye başlanmıştır. Ancak bu değerler K_{II} 'ye göre çok daha küçüktür.

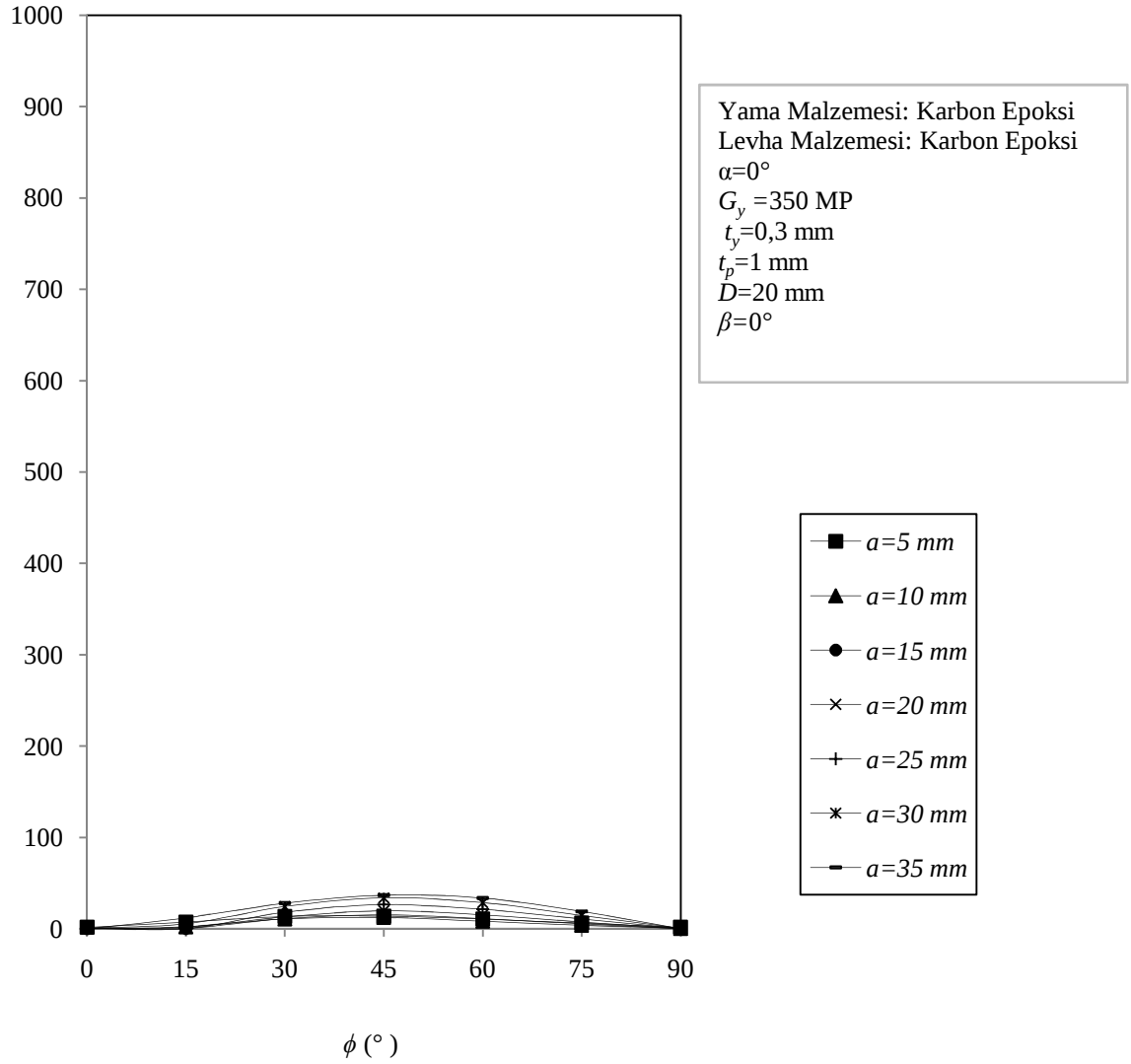
Tüm ϕ değerlerinde çatlak açısı β 'nin artması mutlak değerce K_{II} değerini artırmıştır. ϕ 'nin artması $\beta=15^\circ$ ve 30° için K_{II} değerini artırmıştır. Bu artış $\beta=30^\circ$ için $\phi=0^\circ$ ile 90° arasında $\beta=15^\circ$ 'ye göre çok daha fazla olmuştur ve K_I 'in yanında önemli bir değere sahiptir.



Şekil 7.3 Farklı a çatlak boyu için K_I gerilme şiddet faktörünün ϕ yama açısı ile değişimi ($\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$).

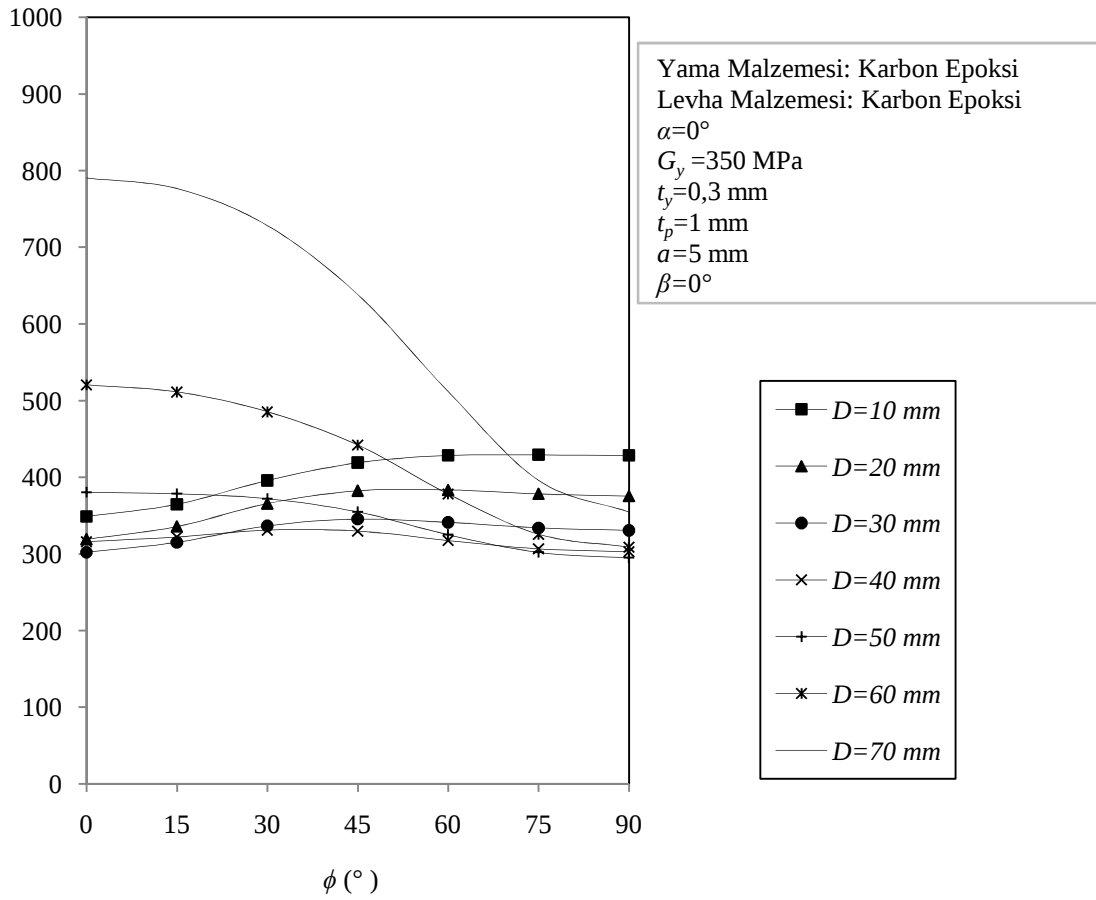
Çatlak boyunun artması K_I değerini $a=20 \text{ mm}$ 'ye kadar azaltmış, daha sonra da arttırmıştır (Şekil 7.3). Yükleme tipine bağlı olarak delik kenarına yakın bölgede çatlak boyu küçüktür. Buna bağlı olarak K_I bu durumdan etkilenir, a 'nın artması çatlak ucunun pim deliği kenarından uzaklaşmasına neden olacağından K_I değeri düşecektir. $a=20 \text{ mm}$ 'den sonra K_I değeri levha serbest kenarına yaklaşacağından dolayı artmaya başlayacaktır.

Yama açısının artması $a=10 \text{ mm}$ 'ye kadar K_I değerini artırırken $a=15 \text{ mm}$ '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 $a=35 \text{ mm}$ için $469.5 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 7.4 Farklı a çatlak boyu için K_{II} gerilme şiddet faktörünün ϕ yama açısı ile değişimi ($MPa\sqrt{mm}$).

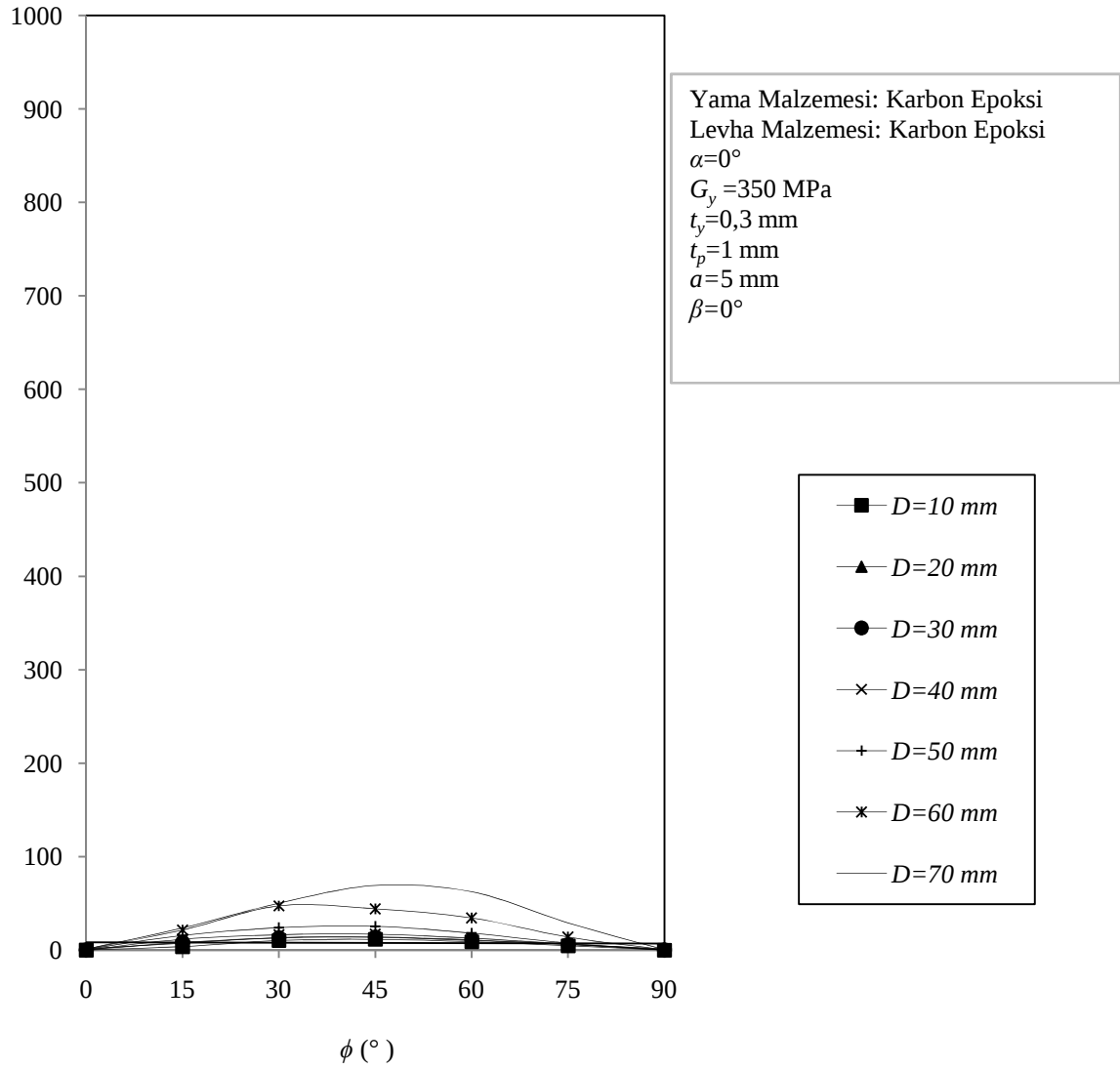
Farklı çatlak boylarında ϕ yama açısının K_{II} ile değişimi Şekil 7.4’de verilmiştir. $\phi=0^\circ$ ve 90° için Mod I yükleme durumu geçerli olduğundan K_{II} değeri sıfırdır. Tüm a çatlak boy değerlerinde $\phi=45^\circ$ de K_{II} maksimum değere ulaşmış olup, a değerinin artması $a=20 \text{ mm}$ ’den sonra K_{II} değerini arttırmıştır. Anca bu değerler K_I ’e göre oldukça küçüktür.



Şekil 7.5 Farklı pim deliği çapları için K_I gerilme şiddet faktörünün ϕ yama açısı ile değişimi ($\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$).

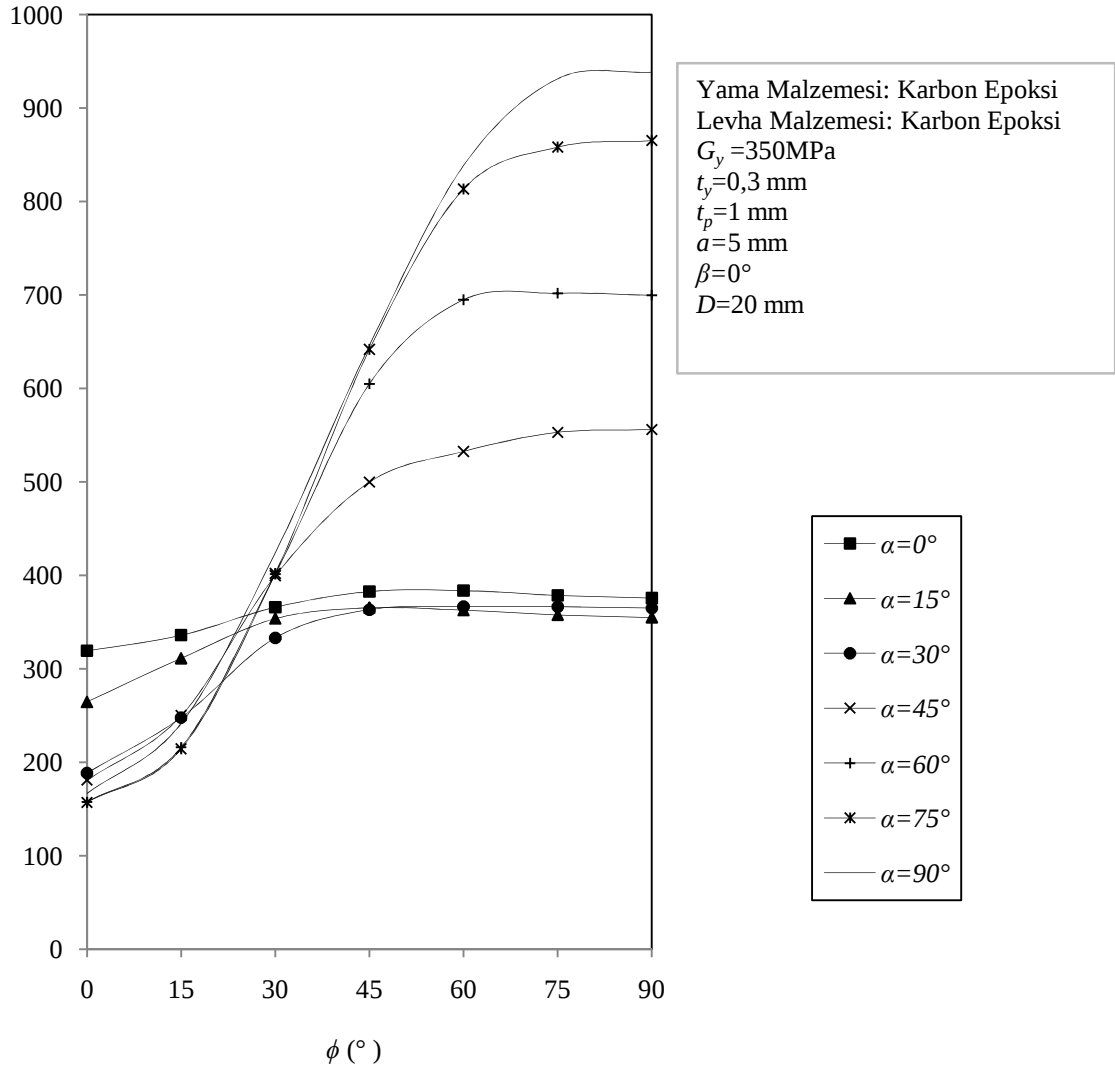
Farklı çatlak boyları için yama açısının K_I ile değişimi Şekil 7.5’de verilmiştir. Pim delik çapındaki değişimin, K_I üzerindeki etkisi çatlak boyundaki değişim ile aynı karakteri göstermektedir. Küçük delik çapı çentik etkisi yaratacağından, delik çapının artması K_I ’i azaltmış, daha sonra ise levha kenarına çatlak ucunun yaklaşmasından dolayı arttırmıştır.

Özellikle büyük delik çaplarında ($D=60 \text{ mm}$) ϕ ’nin K_I üzerindeki etkisi çok daha fazladır. $\phi=0^\circ$ ile 90° arasında fark $D=60 \text{ mm}$ ’de $211.00 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$ olup, maksimum $\phi=0^\circ$ ’de $D=60 \text{ mm}$ için $520.75 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$ olarak hesaplanmıştır.



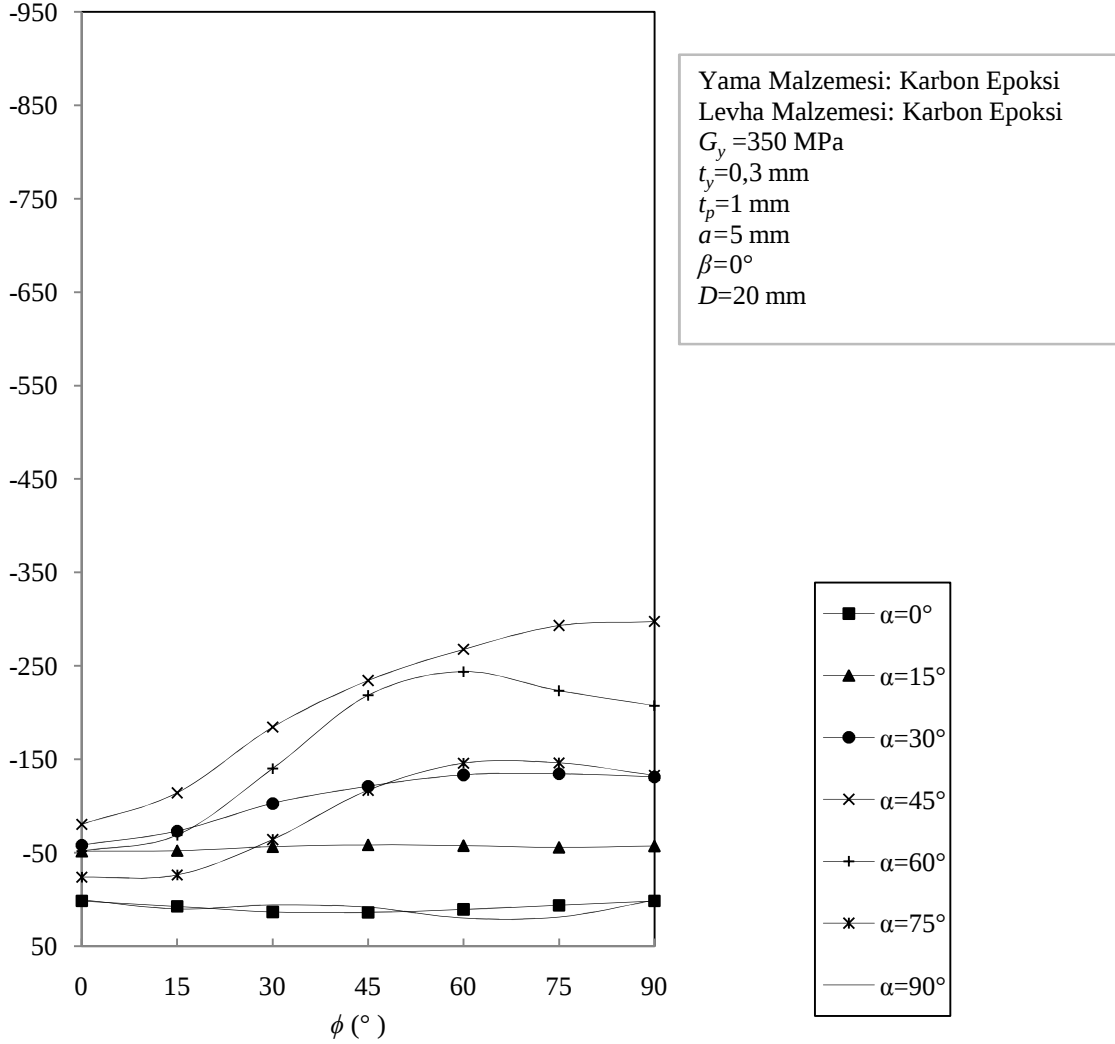
Şekil 7.6 Farklı pim deliği çapları için K_{II} gerilme şiddet faktörünün ϕ yama açısı ile değişimi ($\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$).

K_I değerinde olduğu gibi K_{II} değerleri üzerinde de delik çapının etkisi a çatlak boyunun etkisine benzer bir davranış göstermektedir. Delik çapının artması $\phi=0^\circ$ ve 90° dışında K_{II} değerini arttırmıştır (Şekil 7.6). $(D/2=10)+(a=25)=35 \text{ mm}$ veya $(D/2=30)+(a=5)=35 \text{ mm}$ olarak seçildiğinde aynı koordinattaki gerilme şiddet faktörü mukayese edildiğinde büyük delik çapının K_I üzerinde, büyük çatlak boyuna göre fazla etkili olduğu görülmektedir. Çünkü büyük delik çapındaki küçük çatlak, delik çevresindeki gerilmeden daha fazla etkilendir.



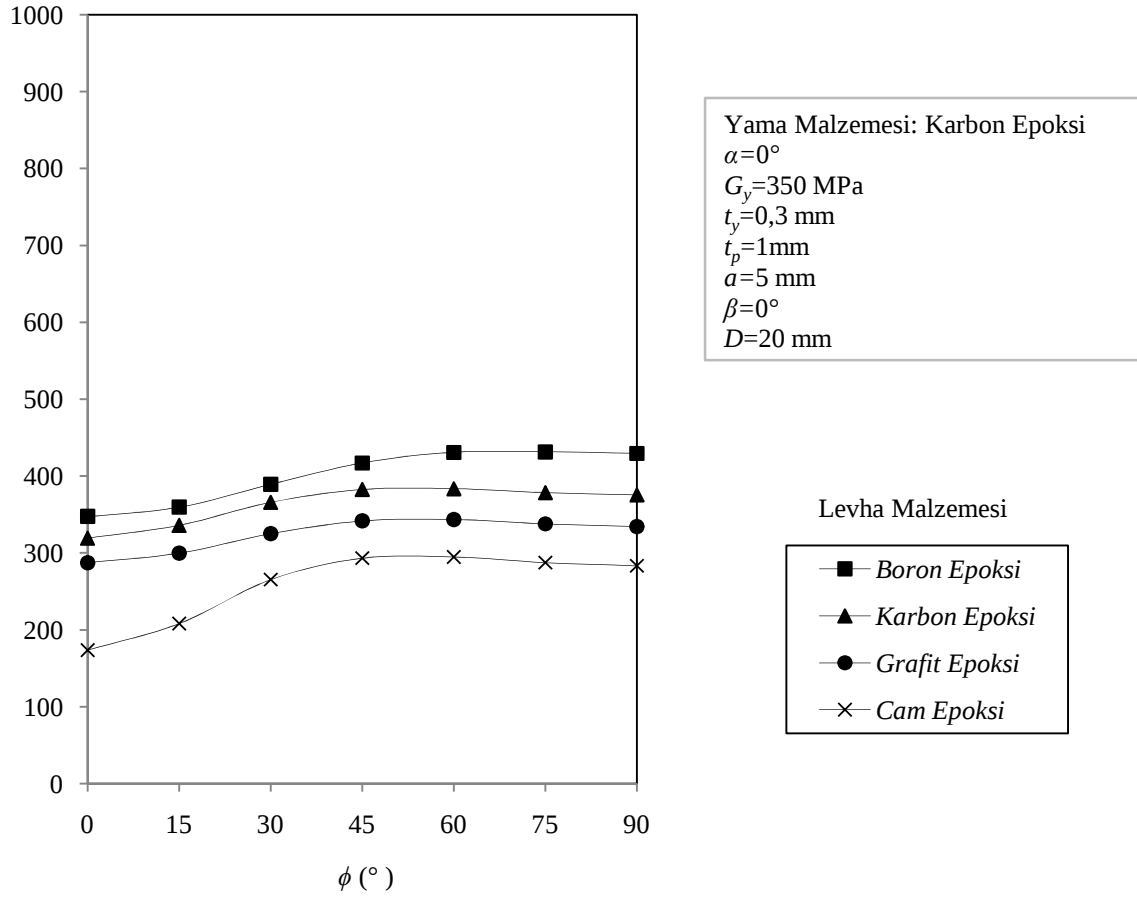
Şekil 7.7 Farklı α levha açısı için K_I gerilme şiddet faktörünün ϕ yama açısı ile değişimi ($\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$).

Farklı levha açılarında yama açısının K_I ile değişimi Şekil 7.7’de verilmiştir. Levha açısı $\alpha=0^\circ$ için yükleme doğrultusunda en fazla dayanıma sahiptir. Levha açısının artması $\alpha=30^\circ$ ’den sonra K_I değerini arttırmıştır. Dolayısıyla düşük levha açıları için ($\alpha < 30^\circ$ için) ϕ yama açısının değişiminden K_I daha düşük oranda etkilenmektedir. Ancak levha açısının artmasına bağlı olarak, Elastisite modülünün düşmesi sonucu ϕ ’nin artması $\phi=30^\circ$ ’den sonra K_I değerini önemli ölçüde arttırmıştır. Bu artış pim çapı, çatlak boyu ve çatlak açısının etkisine oranla çok daha fazla olmuştur. $\phi=90^\circ$ ’de ise en yüksek değere ulaşmıştır.



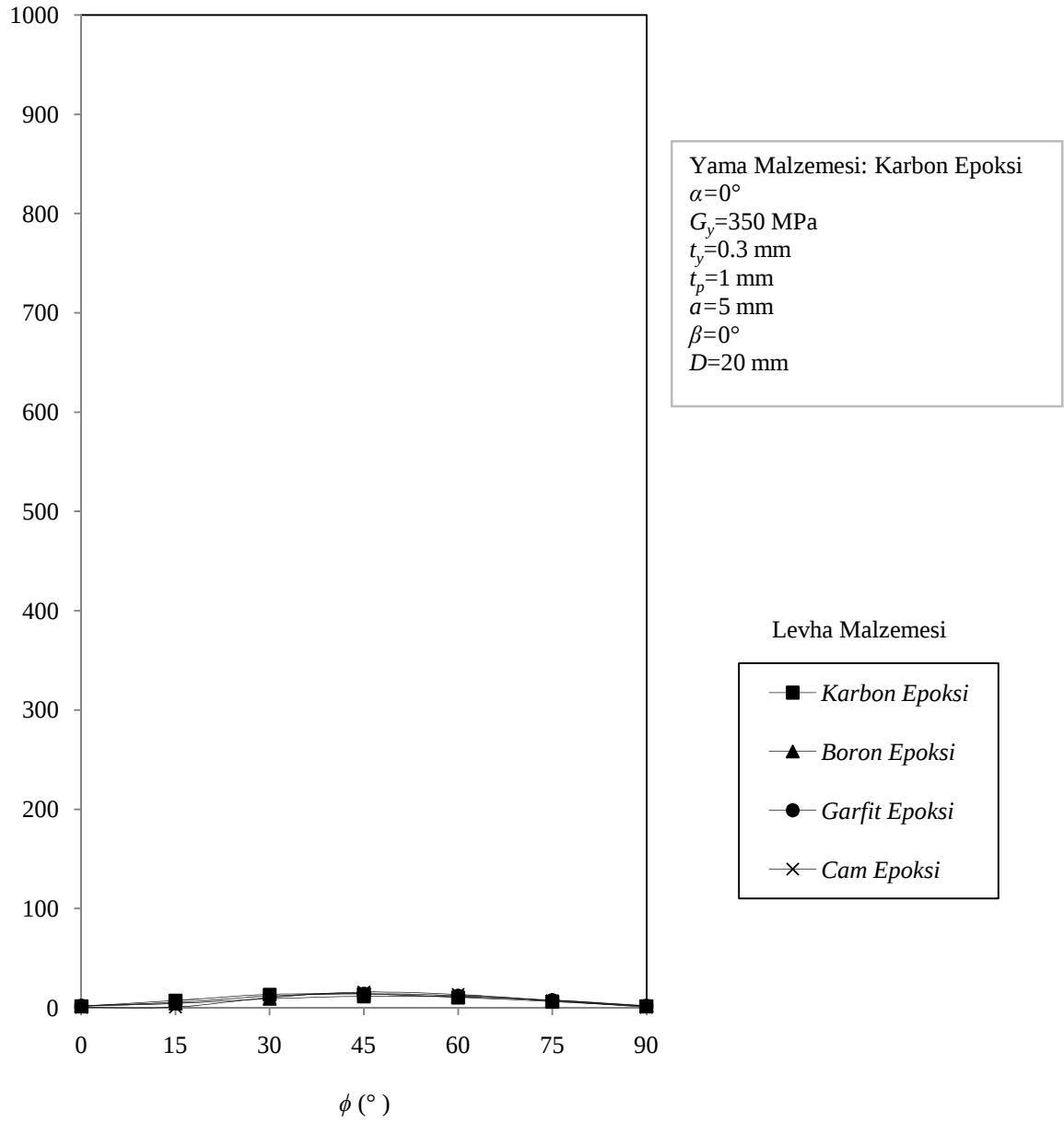
Şekil 7.8 Farklı α levha açısı için K_{II} gerilme şiddet faktörünün ϕ yama açısı ile değişimi ($\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$).

Farklı levha açıları için K_{II} gerilme şiddet faktörünün yama açısı ile değişimi Şekil 7.8’de verilmiştir. Levha açısının artması K_{II} değerini $\alpha=45^\circ$ ’ye kadar arttırmış, sonrasında ise azaltmıştır. $\alpha=0^\circ$ ve 90° için Mod I yüklemesi geçerli olduğundan, belirtilen bu değerler için $K_{II}=0$ dır. En büyük K_{II} değeri $\alpha=45^\circ$ için $\phi=90^\circ$ ’de $-297.43 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$ olarak hesaplanmıştır.



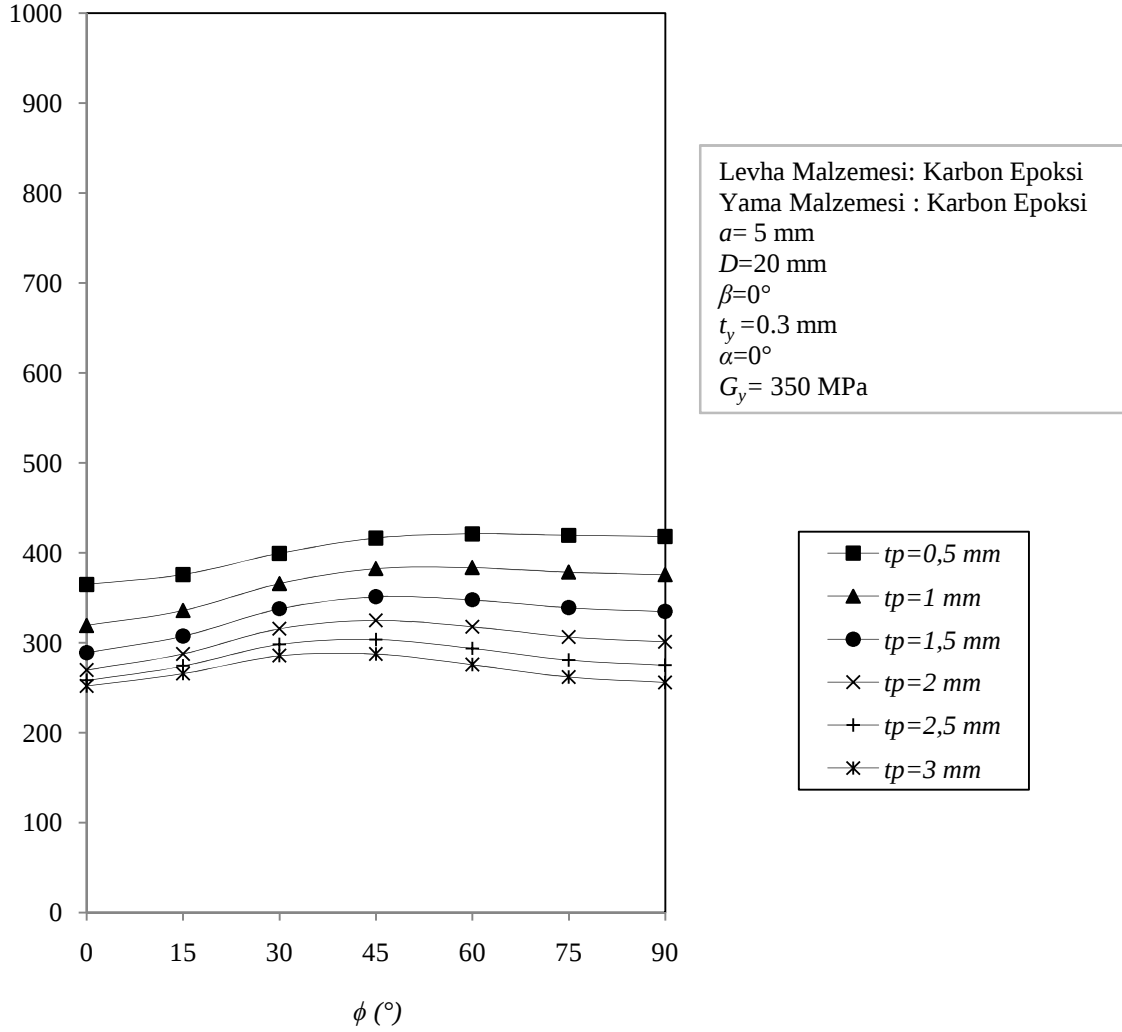
Şekil 7.9 Farklı levha malzemeleri için K_I gerilme şiddet faktörünün ϕ yama açısı ile değişimi ($\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$).

Farklı levha malzemeleri için gerilme şiddet faktörü K_I 'in yama açısı ϕ ile değişimi Şekil 7.9'da gösterilmiştir. Maksimum K_I değeri tüm ϕ değerlerinde Boron Epoksi için daha sonra sırasıyla Karbon Epoksi, Grafit Epoksi için elde edilmiştir. ϕ 'nin artması ile tüm malzemelerde K_I artmıştır. Ancak bu artış Cam Epoksi için en yüksek olup, $\phi=0^\circ$ ile 90° arasındaki gerilme şiddet faktörü farkı $110.00 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$ olarak hesaplanmıştır. Levha açısı 0° olduğunda yükleme doğrultusundaki Elastisite modülü en yüksek malzeme Boron Epoksidir. Yama malzemesi ise Karbon Epoksi seçilmiştir. Boron Epoksiye göre daha düşük bir Elastisite modülüne sahip Karbon Epoksi ile yapıştırılıp tamir edilmesi çatlak ucu açılımını daha az engellemiştir. Bundan dolayı en büyük K_I Boron Epoksi için elde edilmiştir. En düşük Elastisite modülüne sahip Cam Epoksinin buna göre daha sert bir malzeme olan Karbon Epoksi ile tamir edilmesi ise çatlak ucunun açılmasını engellemiş ve en düşük K_I değeri elde edilmiştir.



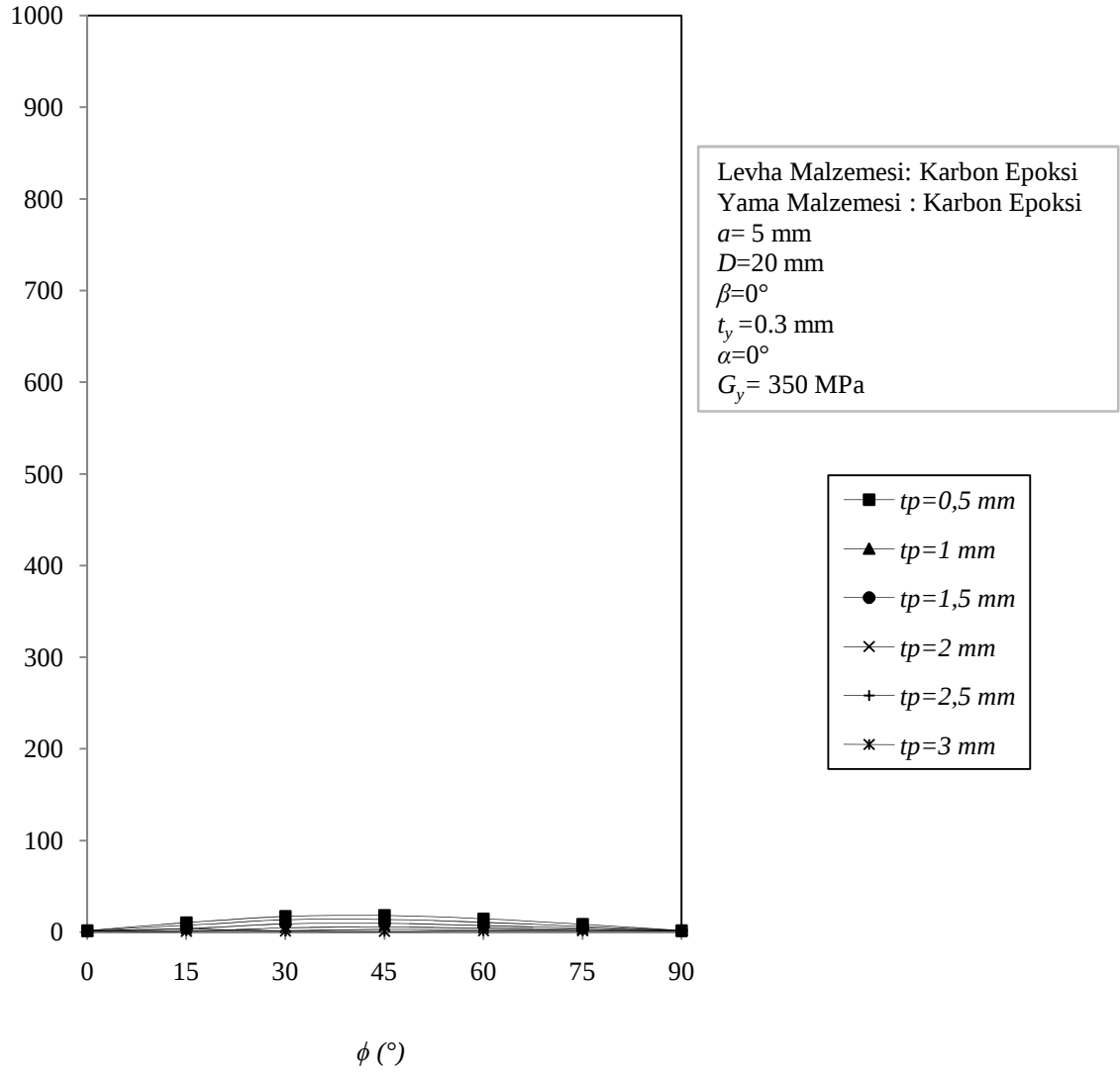
Şekil 7.10 Farklı levha malzemeleri için K_{II} gerilme şiddet faktörünün ϕ yama açısı ile değişimi ($\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$).

Farklı levha malzemeleri için gerilme şiddet faktörü K_{II} 'nin yama açısı ile değişimi Şekil 7.10'da gösterilmiştir. K_{II} değerinin K_I 'e göre çok küçük olduğu görülmektedir. Malzeme değişiminin K_{II} üzerindeki etkisi ihmal edilebilecek kadar küçüktür.



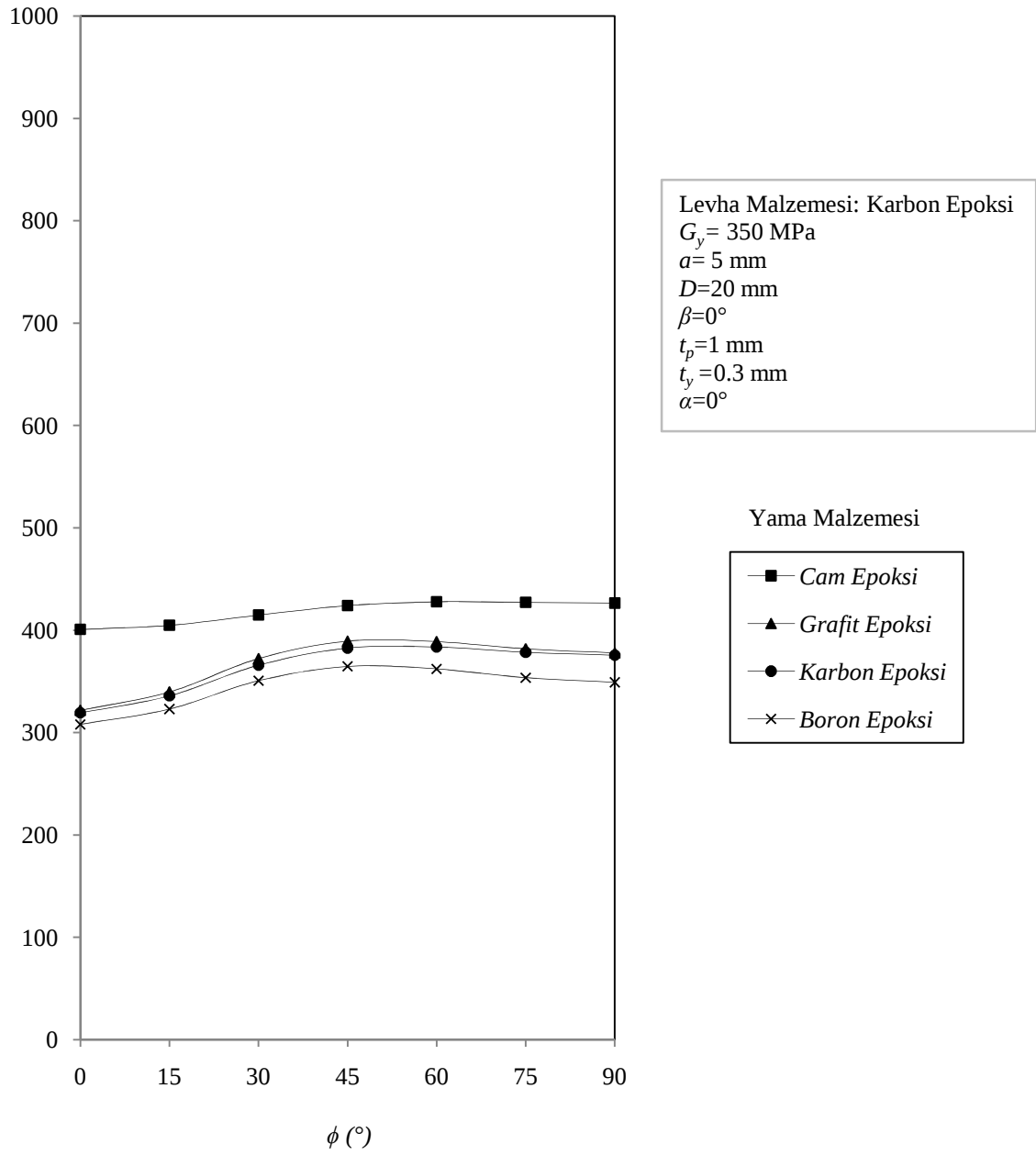
Şekil 7.11 Farklı yama kalınlıkları için K_I gerilme şiddet faktörünün yama açısı ile değişimi ($\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$).

Farklı yama kalınlıkları için gerilme şiddet faktörü K_I 'in yama açısı ile değişimi Şekil 7.11'de gösterilmiştir. Buna göre yama kalınlığının artması K_I değerini azaltmaktadır. Yama açısının artması ise, fiber 0° 'den 90° 'ye doğru gidildikçe yükleme doğrultusunda E modülü düştüğünden dolayı K_I artmaktadır. Bu artış özellikle düşük yama kalınlılarında daha fazladır. Dolayısı ile ince kalınlıkta yama kalınlığı seçildiğinde, yama fiber açılarının konstrüksiyona uygun seçilmesi gerekir. $t_p=0.5\text{ mm}$ için yamadaki fiber açısı 0° yerine 90° seçilir ise K_I 'deki değişim $53.36\text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$ iken, $t_p=3\text{ mm}$ 'lik bir yama kalınlığı için değişim $4.03\text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$ 'da kalmaktadır.



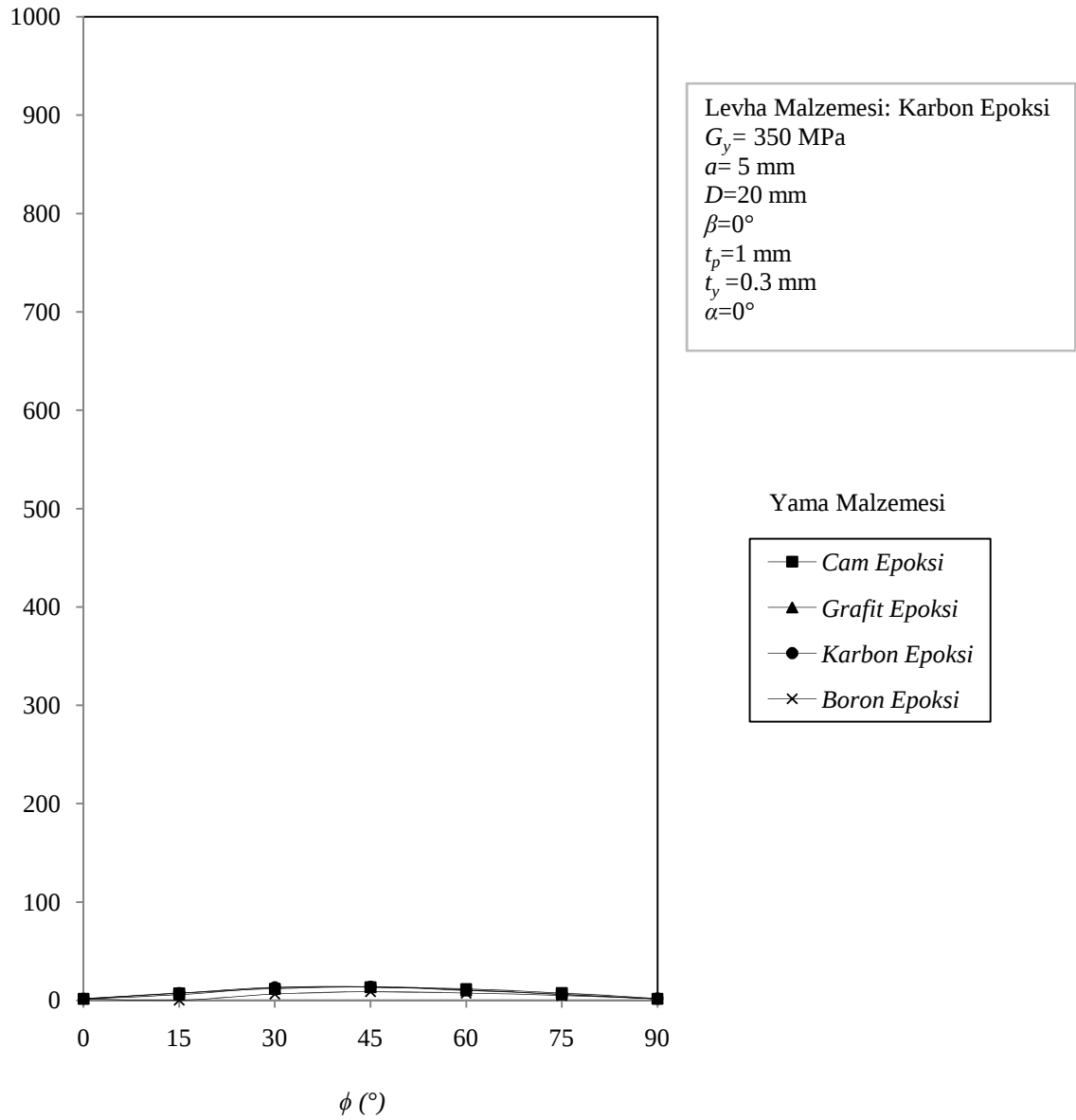
Şekil 7.12 Farklı yama kalınlıkları için K_{II} gerilme şiddet faktörünün yama açısı ile değişimi ($\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$).

Farklı yama kalınlıkları için gerilme şiddet faktörü K_{II} 'nin yama açısı ile değişimi Şekil 7.12'de verilmiştir. 0° ve 90° 'de $K_{II}=0$ 'dır. Yama açısı 45° 'de K_{II} maksimum değere ulaşmaktadır. Yama kalınlığının azalması ise gerilme şiddet faktörünü arttırmıştır. $\phi=45^\circ$ ve $t_p=0.5 \text{ mm}$ için en büyük gerilme şiddet faktörü $18.16 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$ olarak hesaplanmıştır.



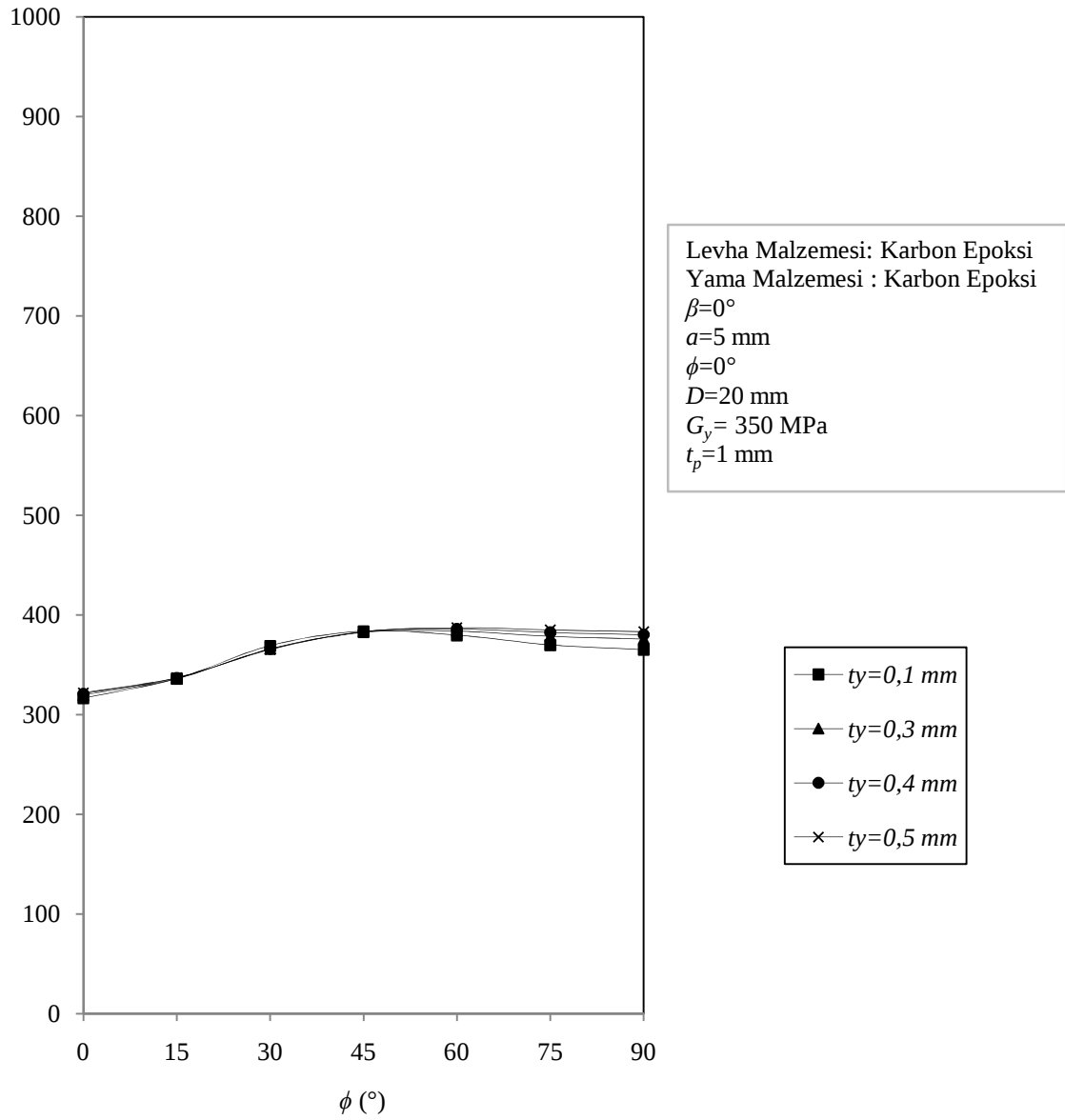
Şekil 7.13 Farklı yama malzemeleri için K_I gerilme şiddet faktörünün yama açısı ile değişimi ($\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$).

Şekil 7.13’de farklı yama malzemeleri için gerilme şiddet faktörü K_I ’in yama açısı ile değişimi verilmiştir. Yama açısının artması K_I değerini arttırmıştır. Yama malzemesinde E_1 Elastisite modülünün artması gerilme şiddet faktörünü azaltmıştır.



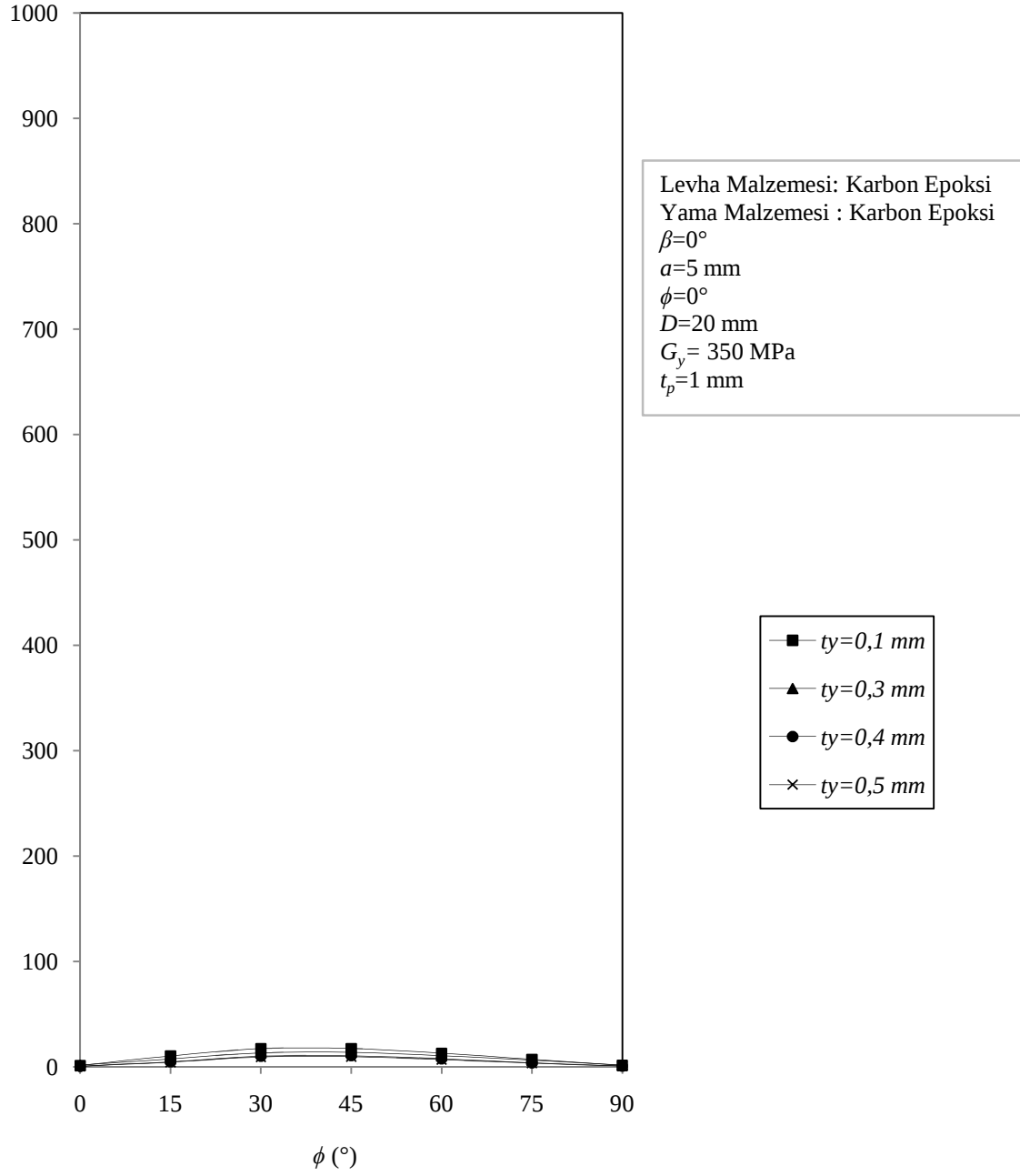
Şekil 7.14 Farklı yama malzemeleri için K_{II} gerilme şiddet faktörünün yama açısı ile değişimi ($\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$).

Farklı yama malzemeleri için gerilme şiddet faktörü K_{II} 'nin yama açısı ile değişimi Şekil 7.14'de verilmiştir. Yama açısı 45° için gerilme şiddet faktörü K_{II} 'nin maksimum olduğu daha önce belirtilmiş idi. Yama malzemesinin türünün K_{II} 'in ϕ ile olan değişimini etkilemediği söylenebilir.



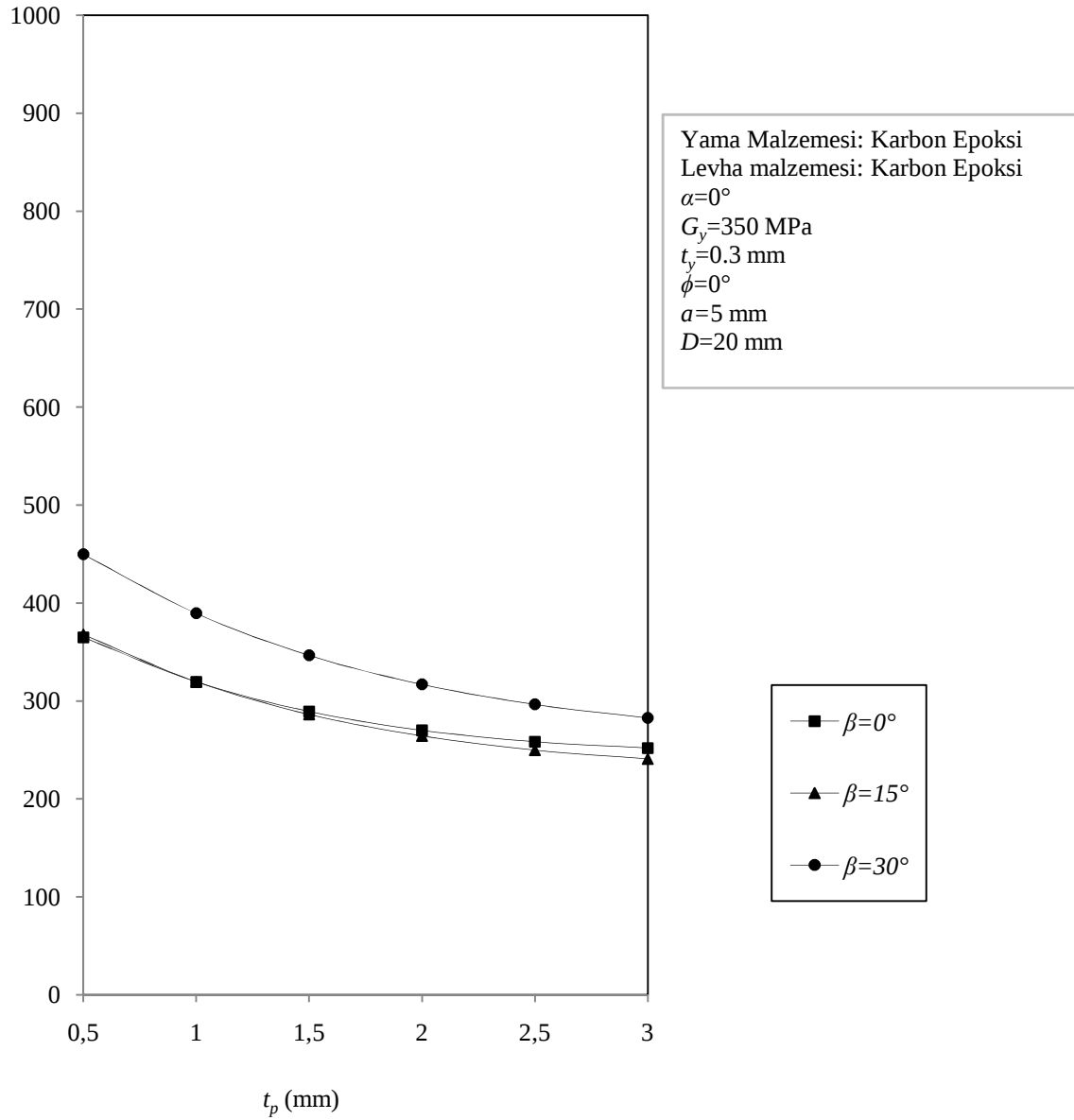
Şekil 7.15 Farklı yapıştırıcı kalınlıkları için K_I gerilme şiddet faktörünün yama açısı ile değişimi ($\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$).

Şekil 7.15’den görüleceği üzere, $\phi=45^\circ$ ’ye kadar K_I yapıştırıcı kalınlığının değişiminden etkilenmez $\phi>45^\circ$ için ise, yapıştırıcı kalınlığı arttıkça K_I artmıştır. Çünkü bu durumda yama levha malzemesine göre daha zayıf bir malzeme konumundadır ve dolayısıyla da yapıştırıcı malzemesinin kalınlığının etkisini çatlak ucu açılmasında daha fazla ön plana çıkmıştır.



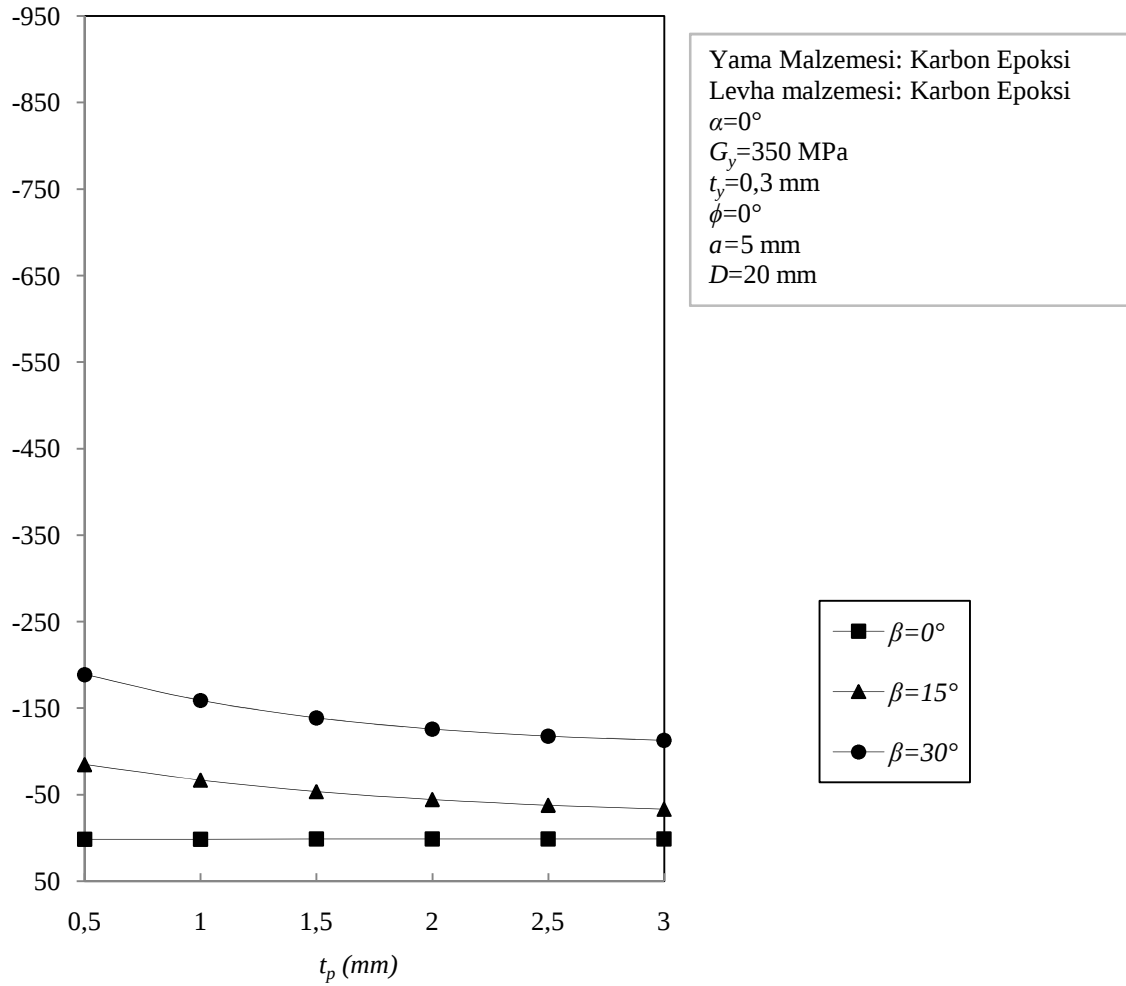
Şekil 7.16 Farklı yapıştırıcı kalınlıkları için K_{II} gerilme şiddet faktörünün yama açısı ile değişimi ($MPa\sqrt{mm}$).

Şekil 7.16'dan görüldüğü gibi, $\phi=45^\circ$ 'de K_{II} maksimum değere ulaşır. Bu değer $t_y=0.5\text{ mm}$ için $17.16\text{ MPa}\sqrt{mm}$ dır. Yapıştırıcı kalınlığının artması gerilme şiddet faktörü K_{II} 'yi azaltmıştır.



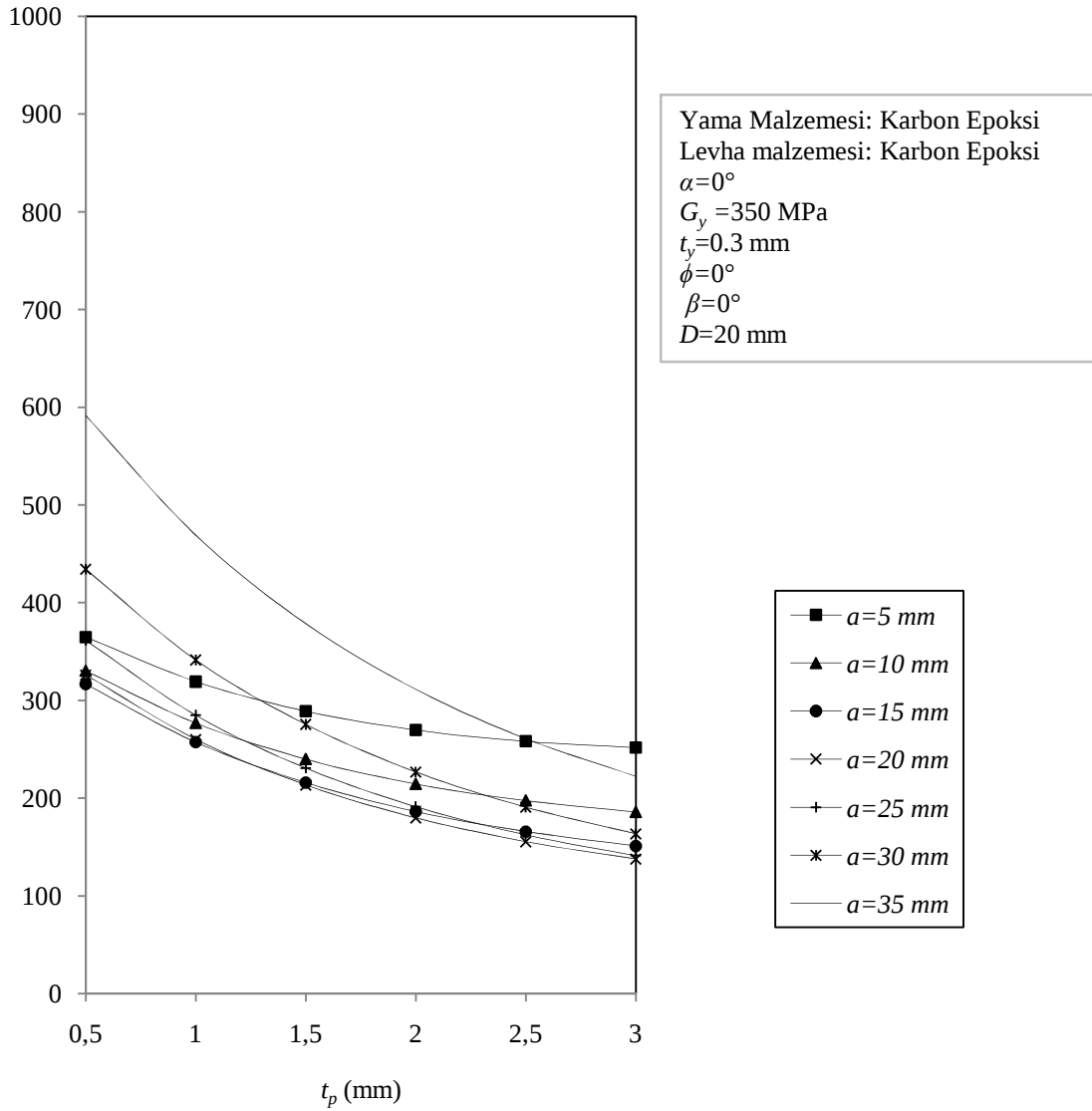
Şekil 7.17 Farklı çatlak açıları için K_I gerilme şiddet faktörünün yama kalınlığı (t_p) ile değişimi ($MPa\sqrt{mm}$).

Şekil 7.17’den görüldüğü gibi yama kalınlığının artması K_I ’i önemli ölçüde azaltmıştır. Çatlak açısının artması ile de yama kalınlığının etkisi artmıştır. $\beta=0^\circ$ ’de $t_y=3$ mm ile $t_y=0.5$ mm arasındaki fark $112.98 MPa\sqrt{mm}$ iken $\beta=30^\circ$ ’de bu fark $167.05 MPa\sqrt{mm}$ değerine ulaşmıştır.



Şekil 7.18 Farklı çatlak açıları için K_{II} gerilme şiddet faktörünün yama kalınlığı (t_p) ile değişimi
 ($MPa\sqrt{mm}$).

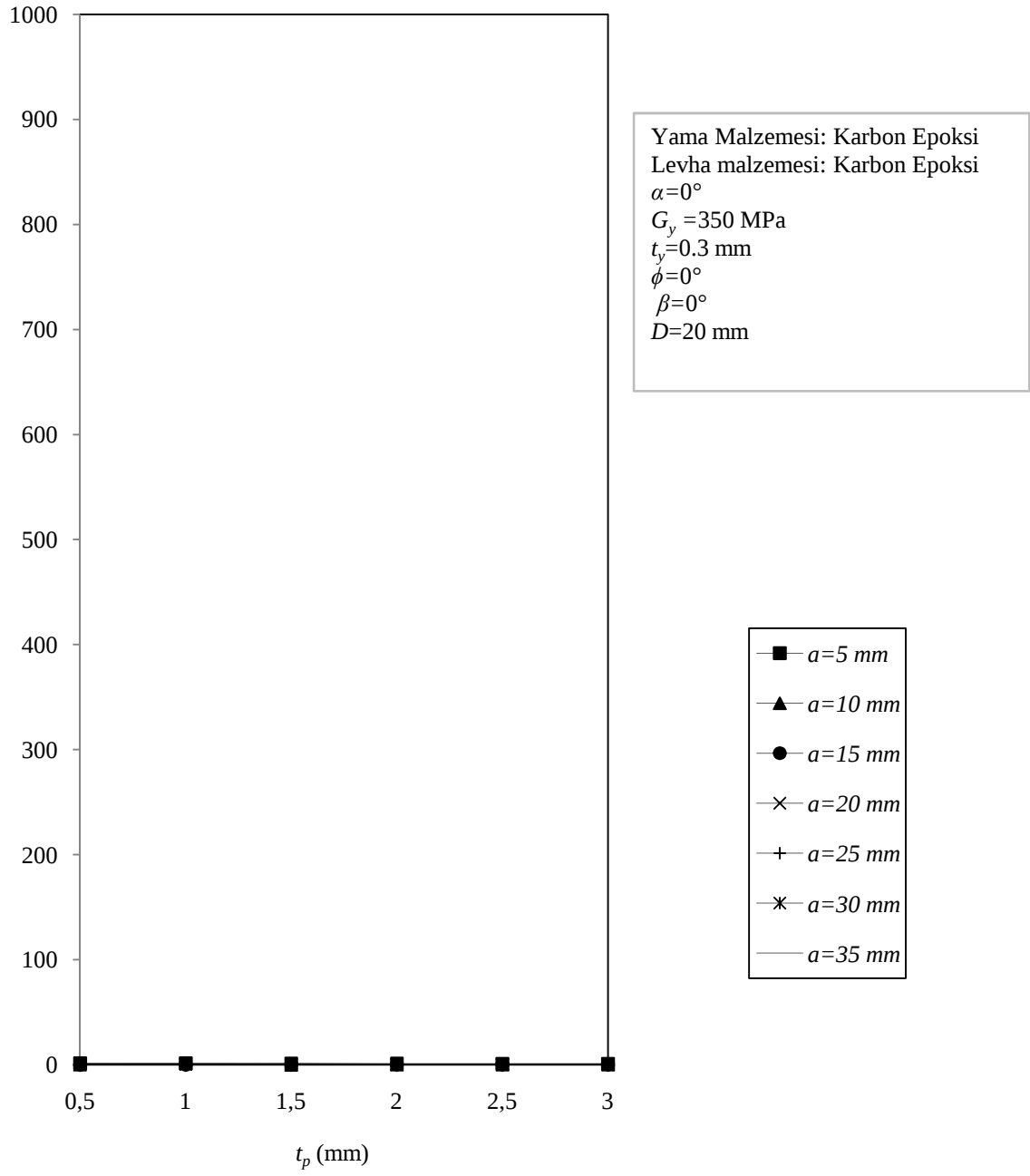
Farklı çatlak açıları için gerilme şiddet faktörü K_{II} 'nin yama kalınlığı ile değişimi Şekil 7.18'de verilmiştir. K_I 'e benzer olarak yama kalınlığının artması K_{II} değerini mutlak değerce azaltmıştır. Çatlak açısının artmasına bağlı olarak yama kalınlığının K_{II} değerini daha fazla düşürdüğü görülmektedir.



Şekil 7.19 Farklı çatlak boyları için K_I gerilme şiddet faktörünün yama kalınlığı (t_p) ile değişimi

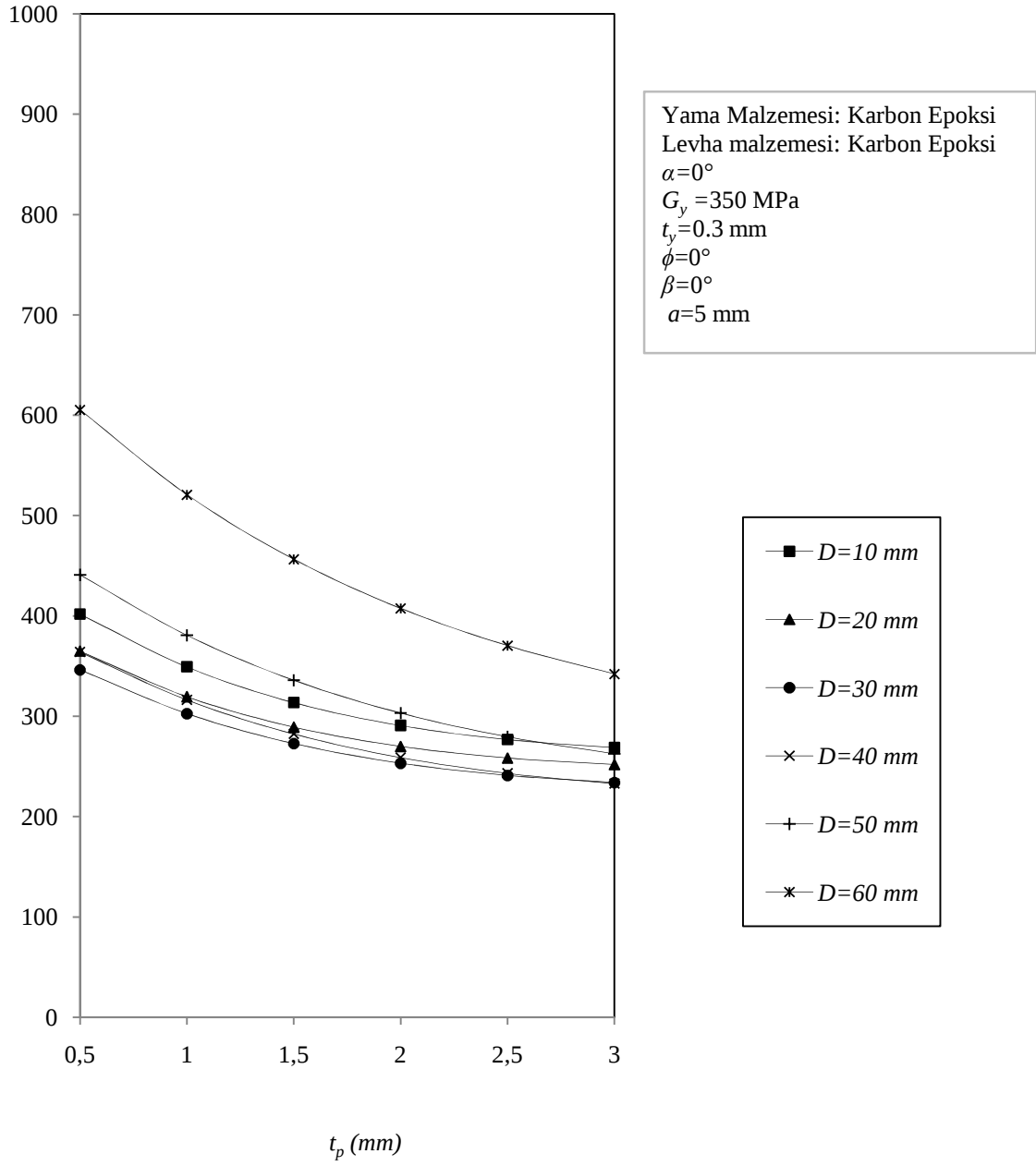
($\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$).

Farklı çatlak boyları için gerilme şiddet faktörü K_I 'in yama kalınlığı ile değişimi Şekil 7.19'da verilmiştir. Çatlak boyunun artışı K_I değerini $a=20 \text{ mm}$ 'ye kadar azaltıp, daha sonra artırdığı Şekil 7.3'de gösterilmişti. Çatlak boyunun K_I üzerinde yama kalınlığına etkisi incelendiğinde ise çatlak boyunun artması ile yama kalınlığının etkisinin daha fazla olduğu söylenebilir. $a=35 \text{ mm}$ 'de $t_p=0.5 \text{ mm}$ için $K_I=591.59 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$ iken $t_p=3 \text{ mm}$ 'de $K_I=222.22 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$ olarak elde edilmiştir.



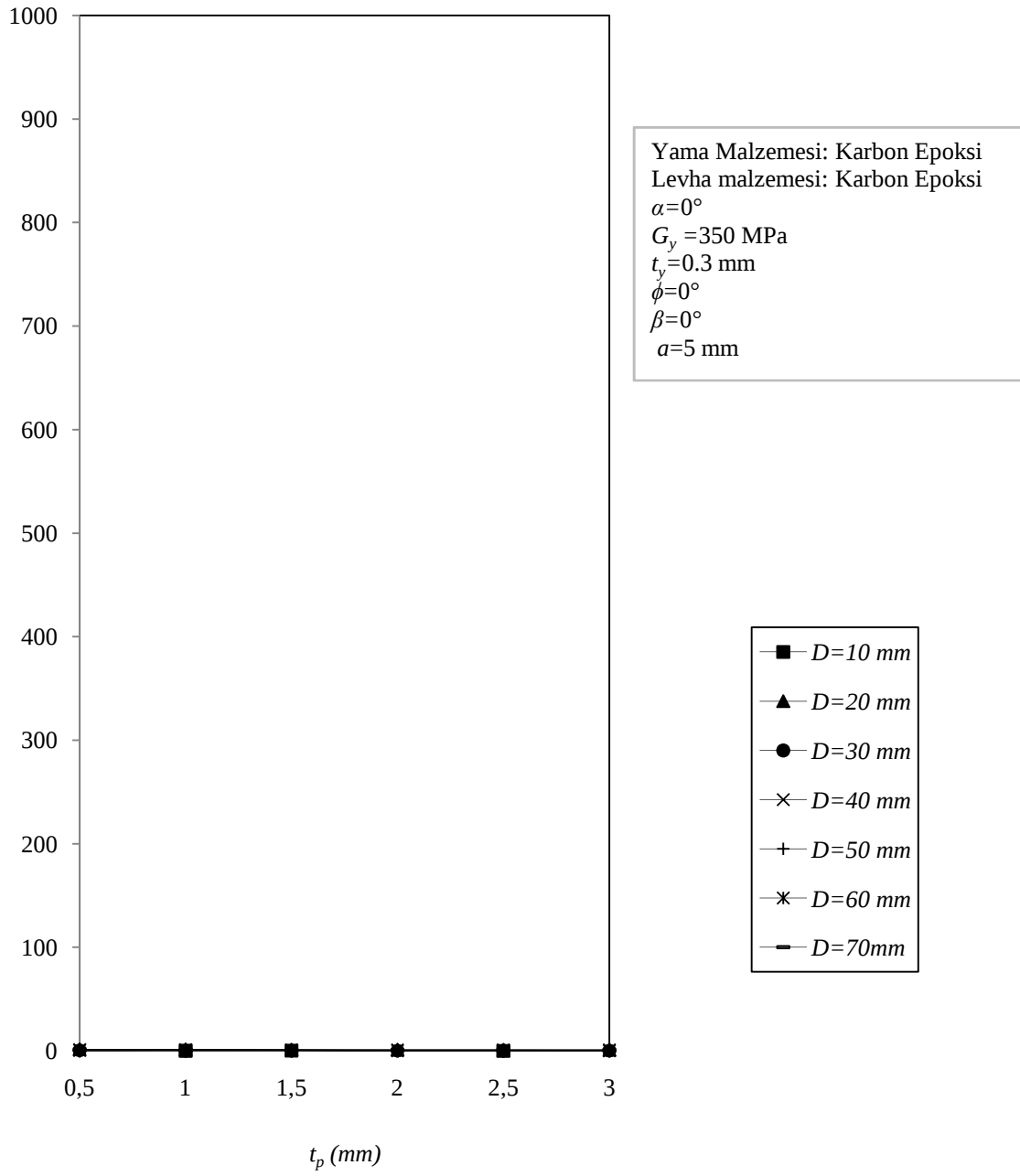
Şekil 7.20 Farklı çatlak boyları için K_{II} gerilme şiddet faktörünün yama kalınlığı (t_p) ile değişimi ($MPa\sqrt{mm}$).

Şekil 7.20'den görüleceği üzere $\beta=0^\circ$, $\alpha=0^\circ$ ve $\phi=0^\circ$ olduğu zaman K_{II} değeri 0 olarak elde edilmiştir.



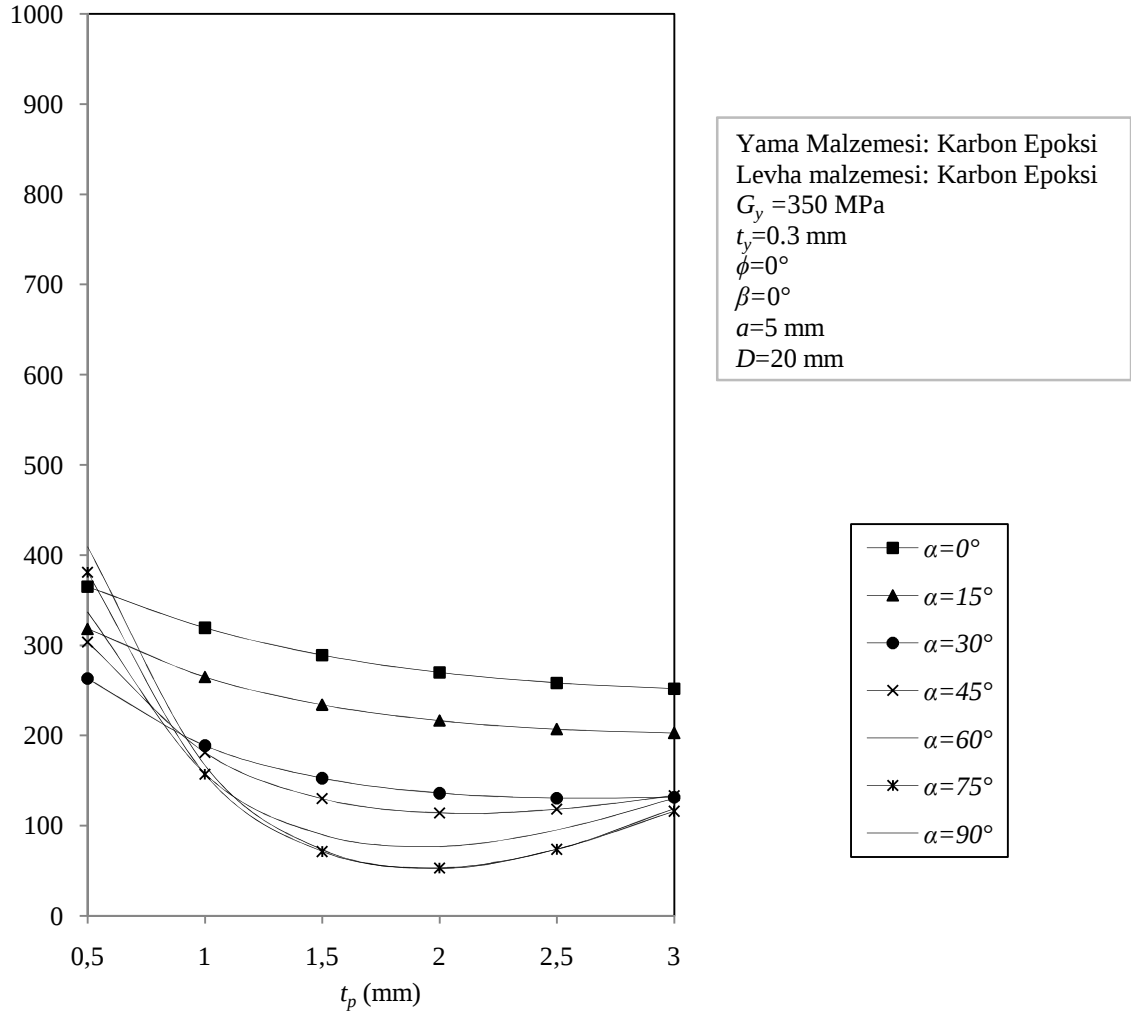
Şekil 7.21 Farklı pim deliği çapları için K_I gerilme şiddet faktörünün yama kalınlığı (t_p) ile değişimi ($MPa\sqrt{mm}$).

Farklı pim delik çapları için gerilme şiddet faktörü K_I 'in yama kalınlığı ile olan değişimi şekil 7.21'de verilmiştir. Pim çapının artması K_I değeri üzerinde yama kalınlığının etkisini arttırmaktadır. Büyük delik çapları için daha kalın yamalar kullanmak çatlak için daha etkilidir.



Şekil 7.22 Farklı pim deliği çapları için K_{II} gerilme şiddet faktörünün yama kalınlığı (t_p) ile değişimi ($MPa\sqrt{mm}$).

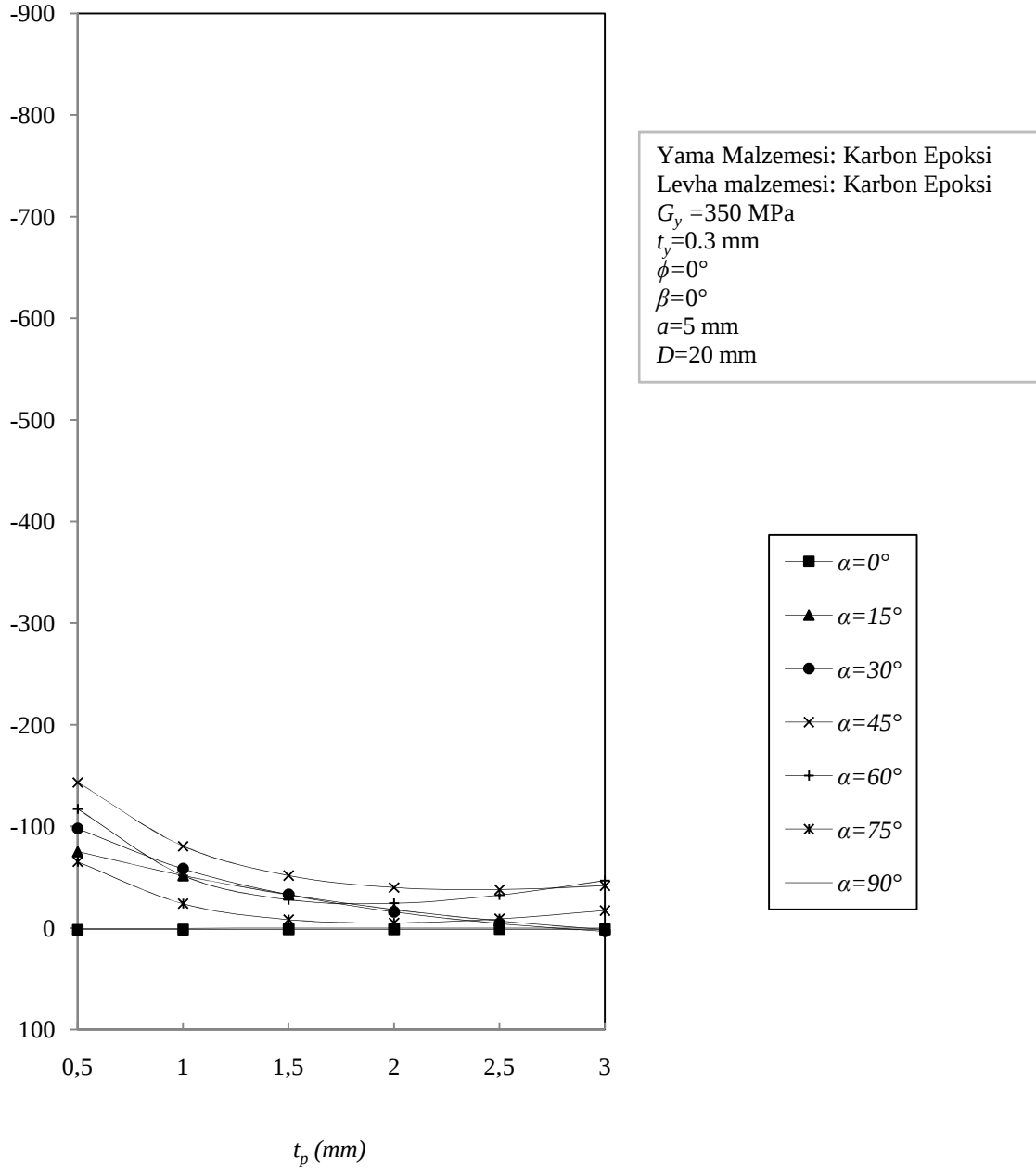
Farklı pim çapları için K_{II} üzerinde yama kalınlığının herhangi bir etkisi $\beta=\alpha=\phi=0^\circ$ için yoktur (Şekil 7.22).



Şekil 7.23 Farklı α levha açısı için K_I gerilme şiddet faktörünün yama kalınlığı (t_p) ile değişimi ($\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$).

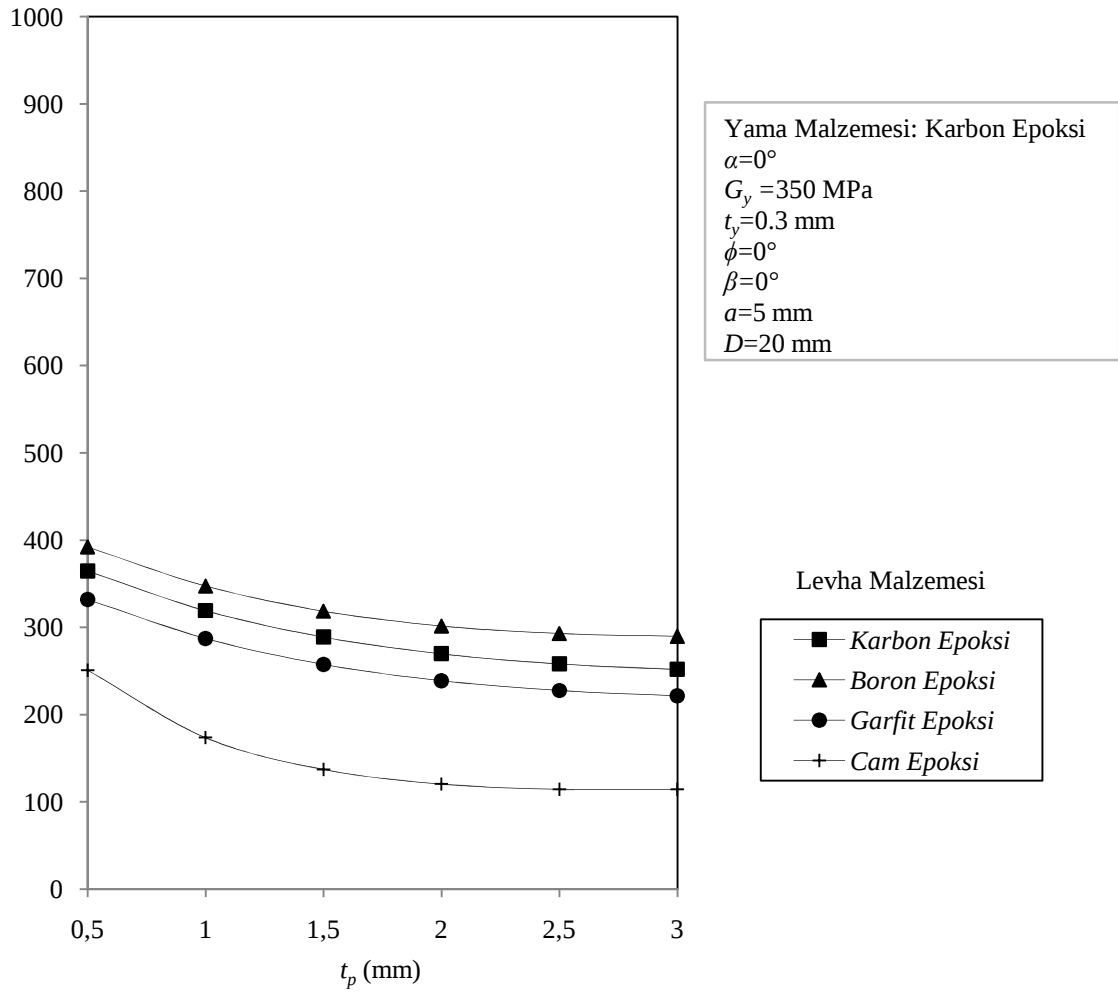
Farklı levha açıları için gerilme şiddet faktörü K_I 'in yama kalınlığı ile değişimi Şekil 7.23'de gösterilmiştir. $\phi = \beta = 0^\circ$ 'de sabit tutulmuştur. α açısının artmasına bağlı olarak levhanın çekme doğrultusundaki Elastisite modülü düşmektedir. Dolayısı ile levha malzemesi ile aynı malzemeden yapılmış yamanın E_1 değeri α 'nın artmasına bağlı olarak daha yüksek kalır. Bu durumda da α 'nın artışı K_I değerini düşürecektir. Bu davranış Şekil 7.7'de de görülmektedir.

Yama kalınlığının artışı ile α açısının değişimi ilişkilendirildiğinde ise $\alpha = 45^\circ$ 'den sonra $t_p = 2 \text{ mm}$ 'ye kadar K_I değerini düşürmüş sonrasında bir miktar arttırmıştır. Ancak bu artış $t_p = 0.5 \text{ mm}$ 'ye göre çok daha düşüktür. Dolayısı ile levha açısının büyük değerleri için ($\alpha > 45^\circ$) yama kalınlığını belirli bir değer üzerinde arttırmak dayanımı azaltır.



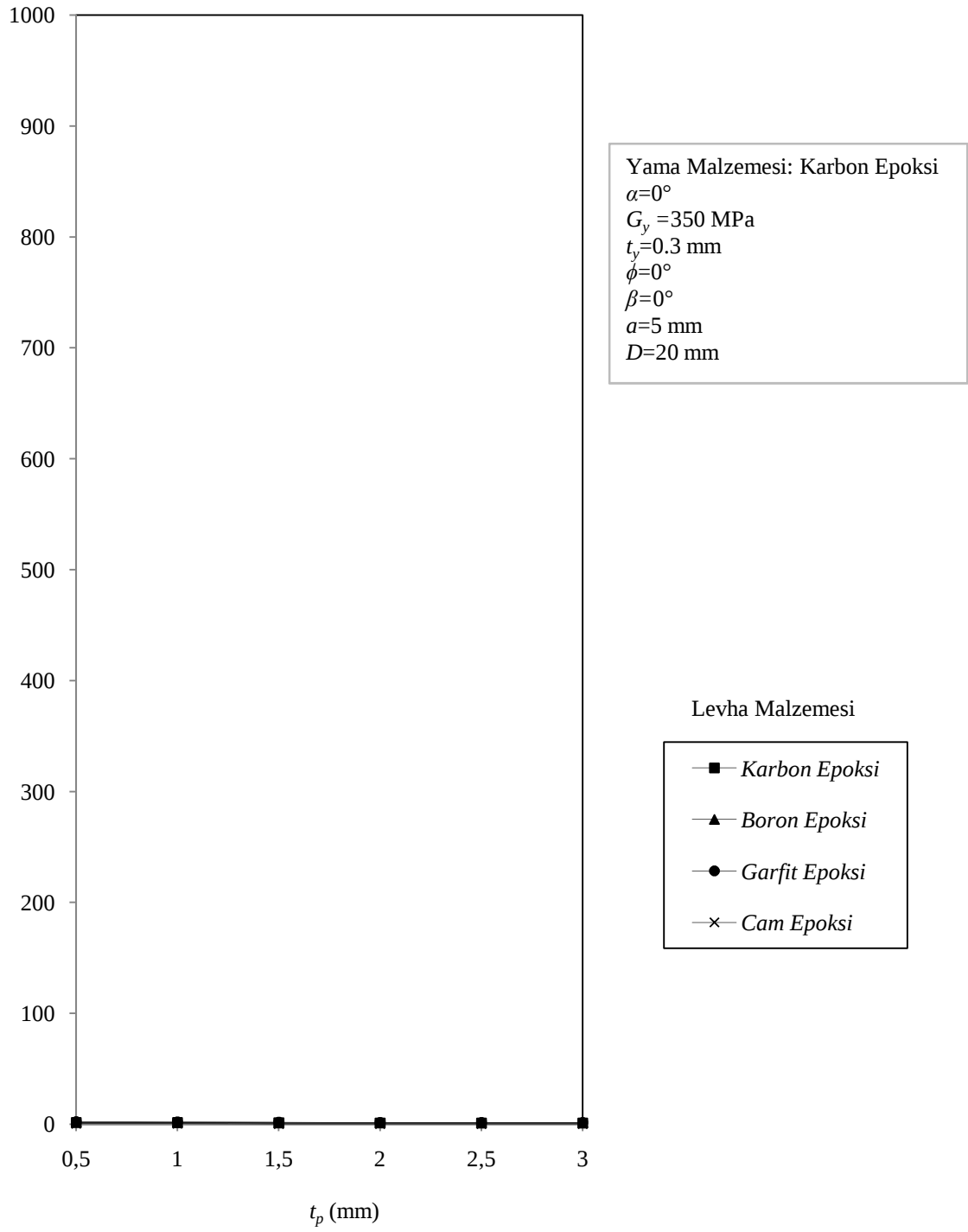
Şekil 7.24 Farklı α levha açısı için K_{II} gerilme şiddet faktörünün yama kalınlığı (t_p) ile değişimi ($\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$).

$\alpha = 0^\circ$ ve 90° için K_{II} değerinin sıfır olduğu Şekil 7.24'den görülmektedir. $\alpha = 45^\circ$ 'ye kadar K_{II} artmış, daha sonra azalmıştır. K_{II} değeri K_I değerine göre çok daha küçüktür. Yama kalınlığının artması ile tüm α levha açılarındaki K_{II} azalmıştır.



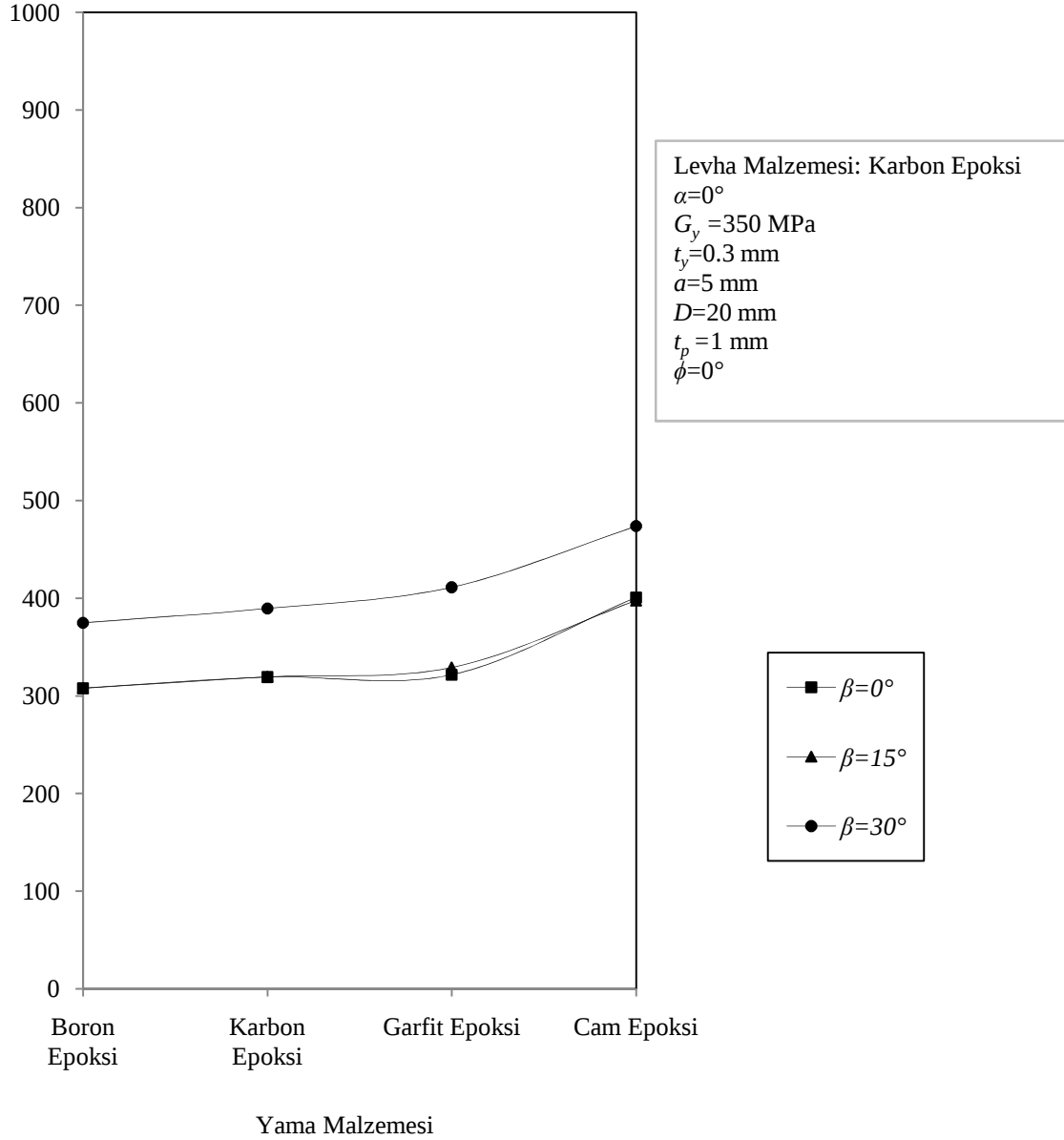
Şekil 7.25 Farklı levha malzemeleri için K_I gerilme şiddet faktörünün yama kalınlığı (t_p) ile değişimi ($\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$).

Farklı levha malzemeleri için gerilme şiddet faktörü K_I 'in yama kalınlığı ile değişimi Şekil 7.25'de gösterilmiştir. Levha malzemesinin K_I üzerindeki etkisi daha önce şekil 7.9'da incelenmişti. Levha malzemesi ile yama kalınlığı arasındaki ilişkiye bakıldığında ise elde edilen sonuç aşağıdaki gibidir; yama malzemesine göre levha malzemesinin çekme doğrultusunda Elastisite modülü düşer ise yama kalınlığının etkisi daha fazla önem kazanmaktadır. E_I değeri düşük olan Cam Epoksi levha malzemesinin tamirinde Karbon Epoksi yama malzemesi kullanıldığında kalınlığının artırılması K_I değerini diğer levha malzemelerine göre önemli ölçüde düşürmektedir. Cam Epoksi levha için, $t_p=0.5 \text{ mm}$ yerine 3 mm kullanılması sonucu elde edilen değer $136.55 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$ iken, Boron Epoksi için bu değer $102.27 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$ dir.



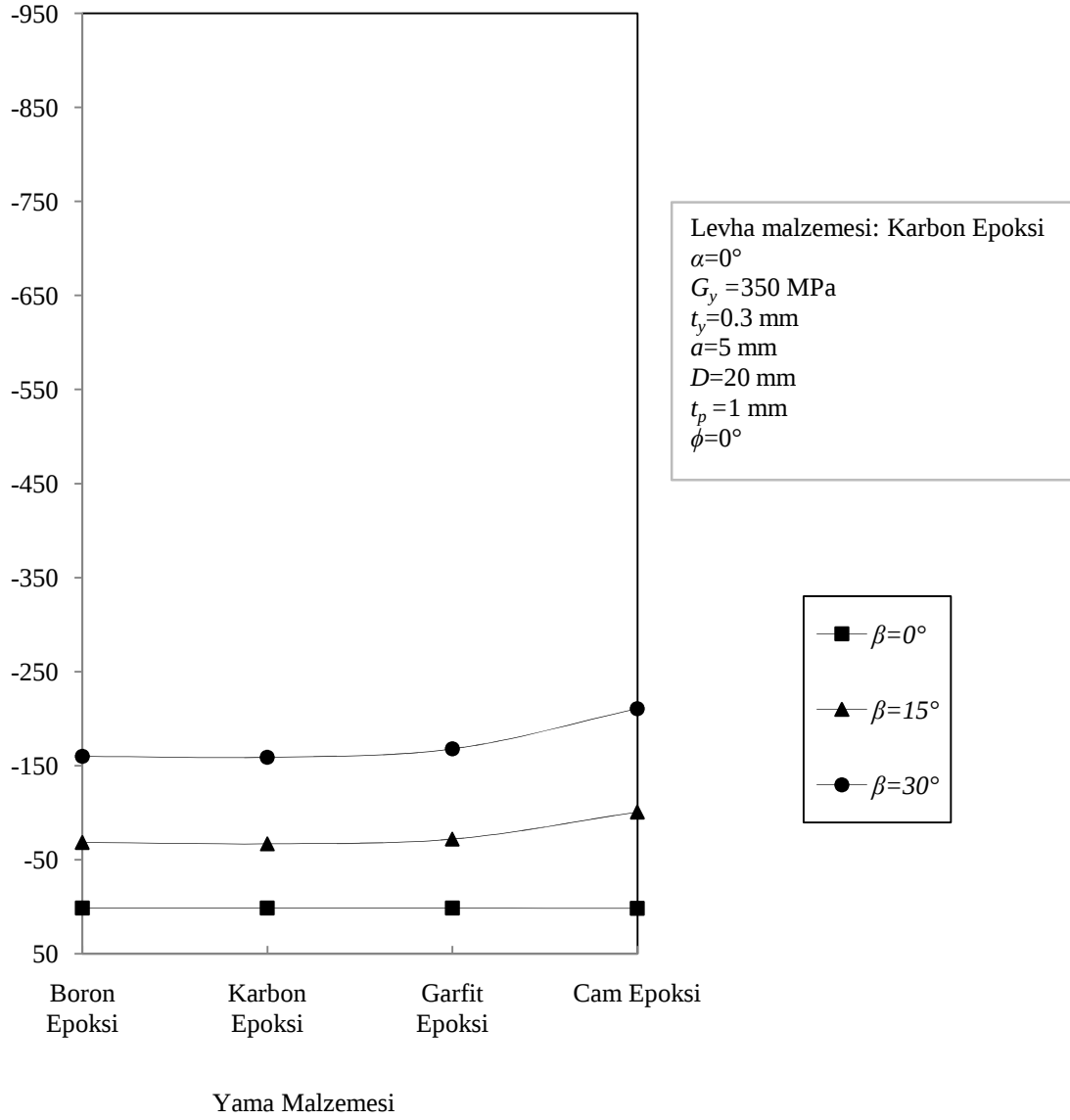
Şekil 7.26 Farklı levha malzemeleri için K_{II} gerilme şiddet faktörünün yama kalınlığı (t_p) ile değişimi ($MPa\sqrt{mm}$).

Şekil 7.26'dan görüleceği gibi $\alpha, \beta, \phi=0^\circ$ olduğunda K_{II} değeri 0 olarak elde edilmiştir.



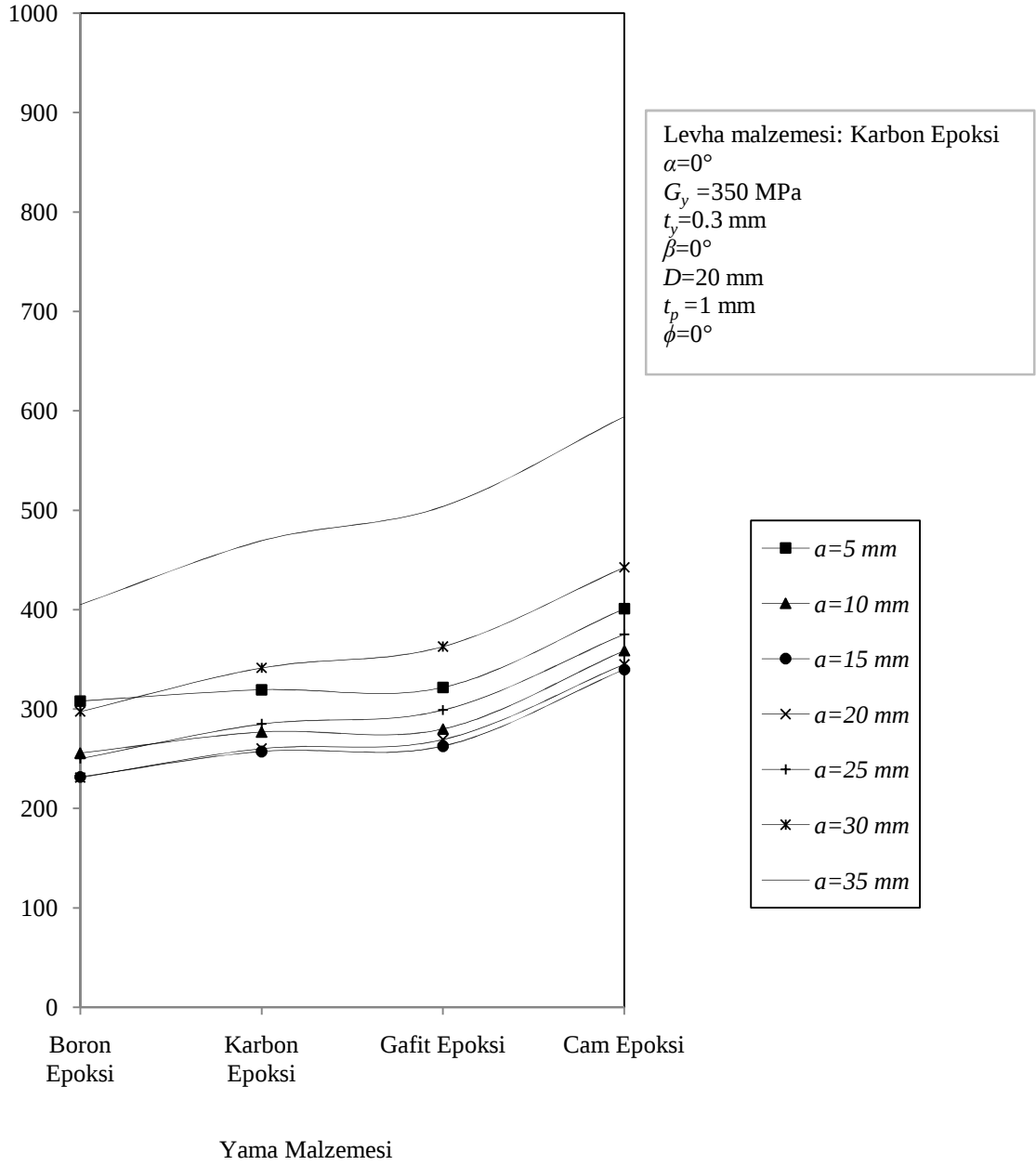
Şekil 7.27 Farklı çatlak açıları için K_I gerilme şiddet faktörünün yama malzemesi ile değişimi ($MPa\sqrt{mm}$).

Farklı çatlak açıları için gerilme şiddet faktörü K_I 'in yama malzemesi ile değişimi Şekil 7.27'de gösterilmiştir. Buna göre yama malzemesinin çekme doğrultusundaki Elastisite modülü düştükçe çatlak ucu açılma miktarı artmakta, dolayısı ile K_I değeri artmaktadır. Ayrıca β çatlak açı değerinin artması da K_I değerini arttırmıştır. Maksimum K_I değeri Cam Epoksi yama malzemesi için $\beta=30^\circ$ 'de $473.80 MPa\sqrt{mm}$ olarak elde edilmiştir.



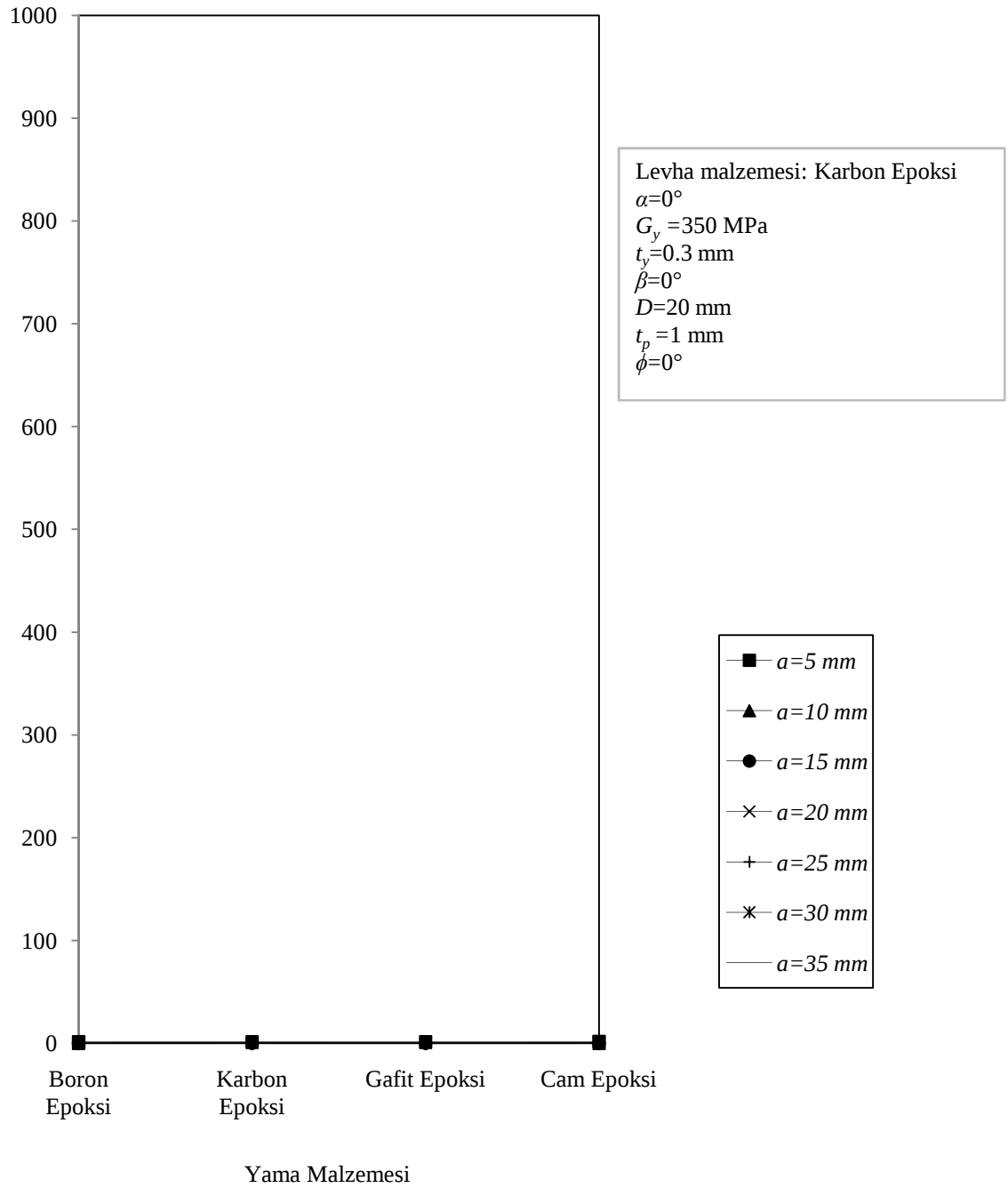
Şekil 7.28 Farklı çatlak açıları için K_{II} gerilme şiddet faktörünün yama malzemesi ile değişimi ($\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$).

Şekil 7.28’den görüleceği gibi yama malzemesi olarak Cam Epoksi kullanılması halinde tüm çatlak açı değerleri için en büyük K_{II} değerleri elde edilmiştir.



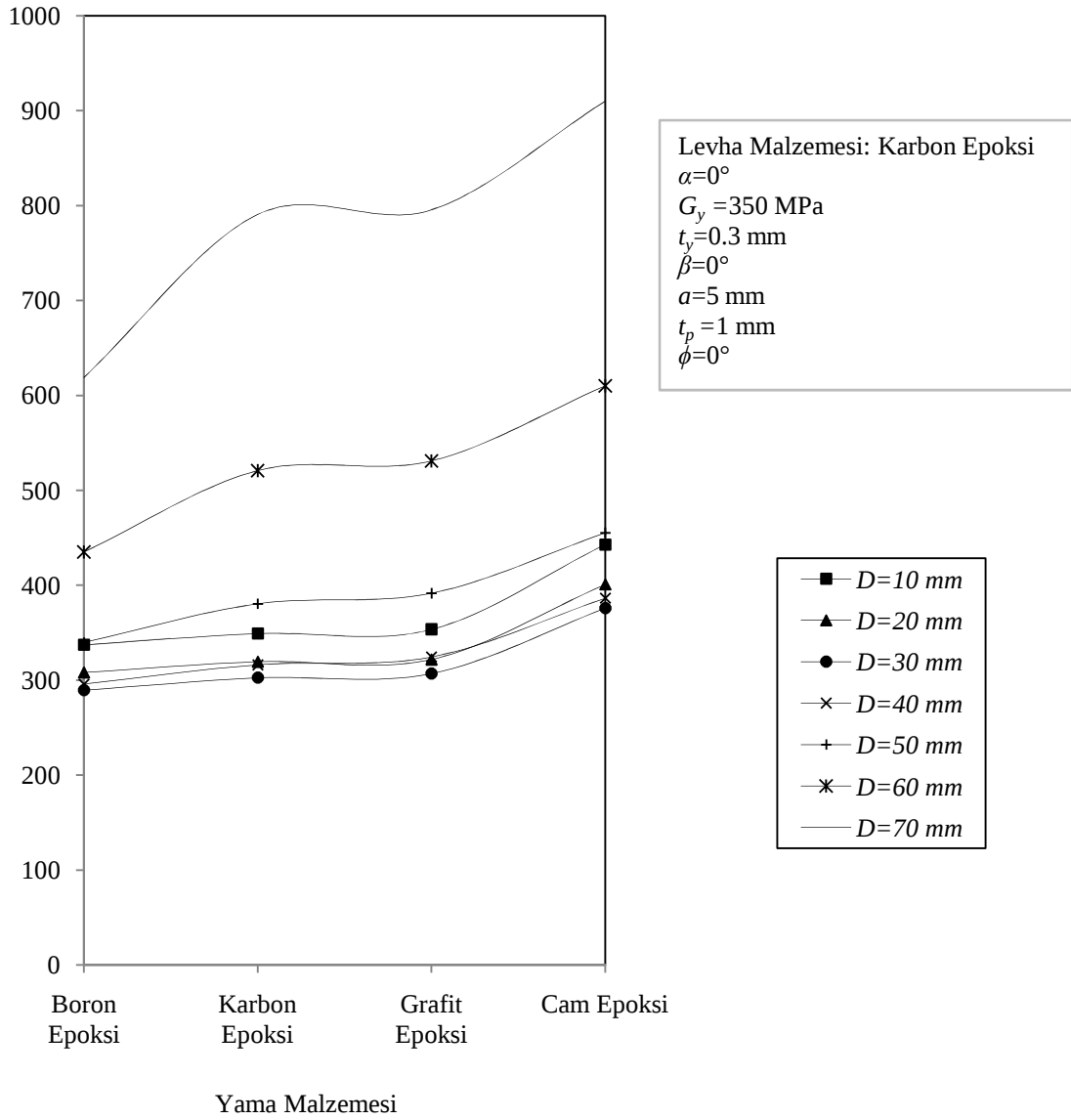
Şekil 7.29 Farklı çatlak boyları için K_I gerilme şiddet faktörünün yama malzemesi ile değişimi ($\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$).

Şekil 7.29’da büyük çatlak boyları için yama malzemesi değişiminin K_I üzerinde etkisinin büyük olduğu görülebilir. $a=5 \text{ mm}$ ’de Boron Epoksi yerine Cam Epoksi yama kullanılması durumunda K_I değeri $92.75 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$ artarken, $a=35 \text{ mm}$ çatlak boyunda bu değer $189.12 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$ değerine ulaşmaktadır.



Şekil 7.30 Farklı çatlak boyları için K_{II} gerilme şiddet faktörünün yama malzemesi ile değişimi ($\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$).

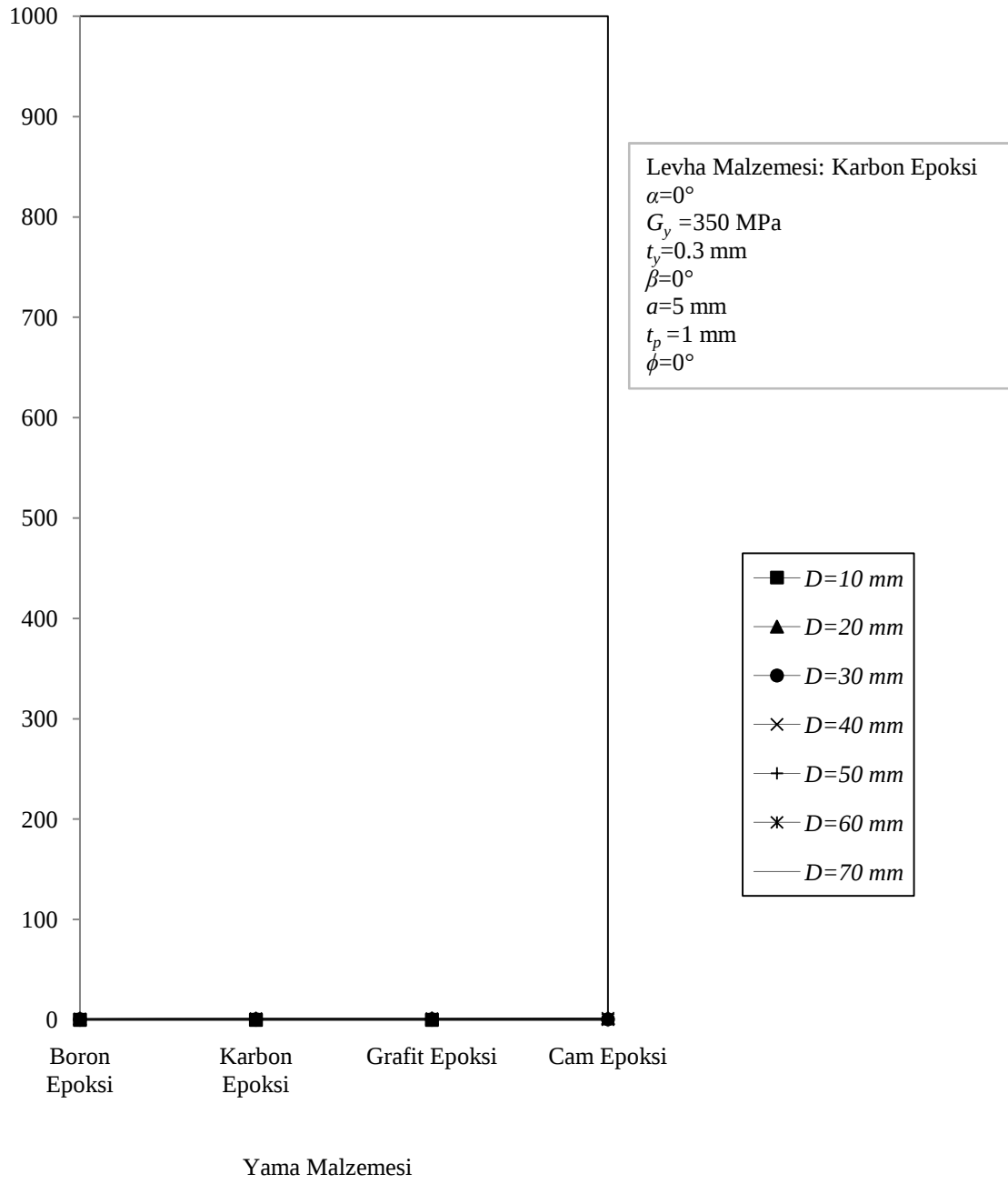
Farklı çatlak boylarında gerilme şiddet faktörü K_{II} 'nin yama malzemesi ile ilgili değişimi Şekil 7.30'da görülmektedir. Buna göre, $\alpha=\beta=\phi=0^\circ$ için tüm yama malzemelerinde K_{II} değeri 0 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 7.31 Farklı pim çapları için K_I gerilme şiddet faktörünün yama malzemesi ile değişimi ($\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$).

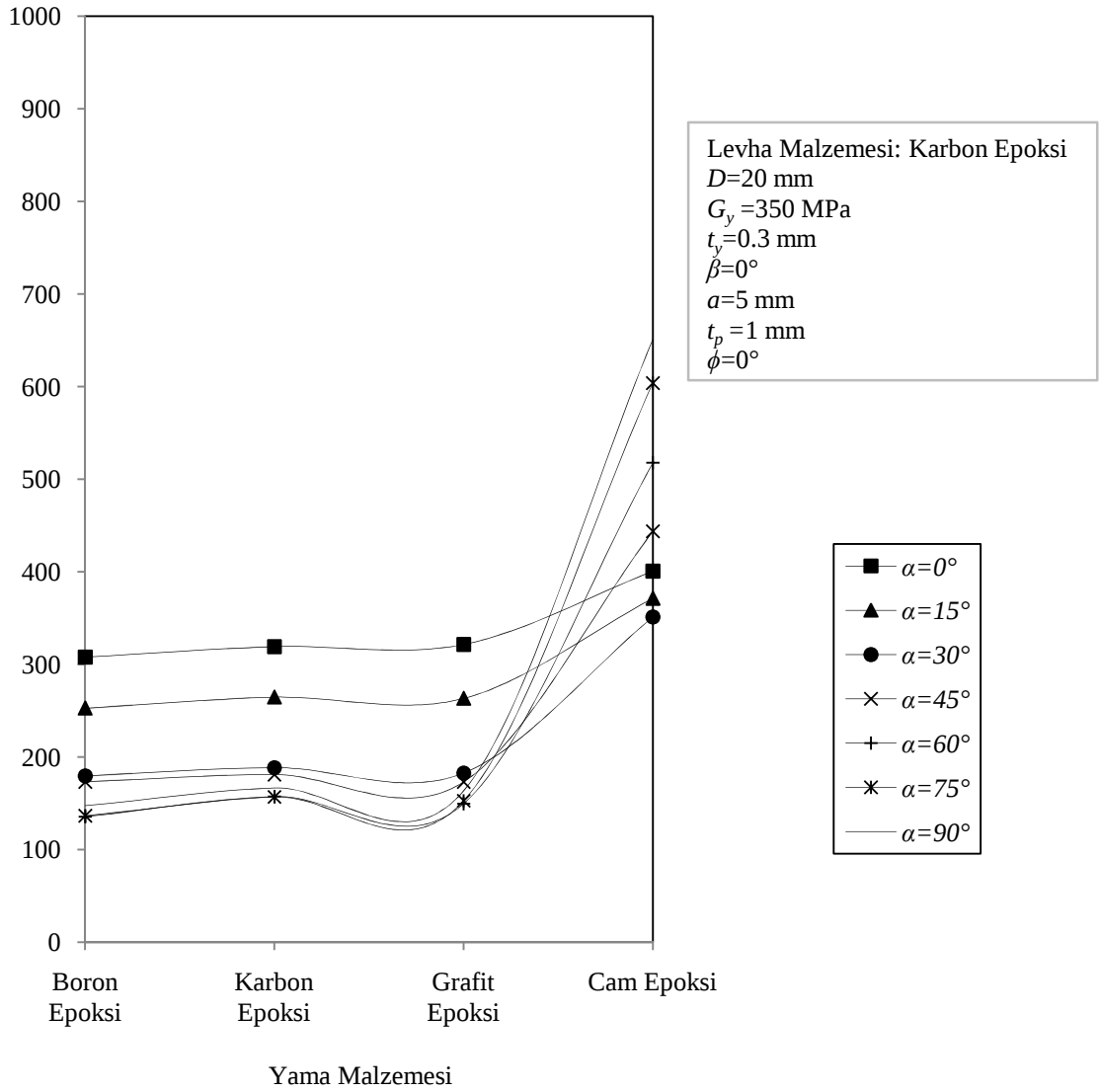
Farklı pim çapları için gerilme şiddet faktörü K_I 'in yama malzemesine bağlı olarak değişimi Şekil 7.31'de verilmiştir. Çatlak uzunluğunun etkisine benzer olarak büyük delik çaplarında da yama malzemesinin K_I üzerindeki etkisinin büyük önem kazandığı görülmektedir.

$D=10 \text{ mm}$ için Bron Epoksi yerine Cam Epoksi kullanıldığında K_I artışı $105.57 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$ iken, bu değer $D=70 \text{ mm}$ için $290.98 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 7.32 Farklı pim çapları için K_{II} gerilme şiddet faktörünün yama malzemesi ile değişimi ($\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$).

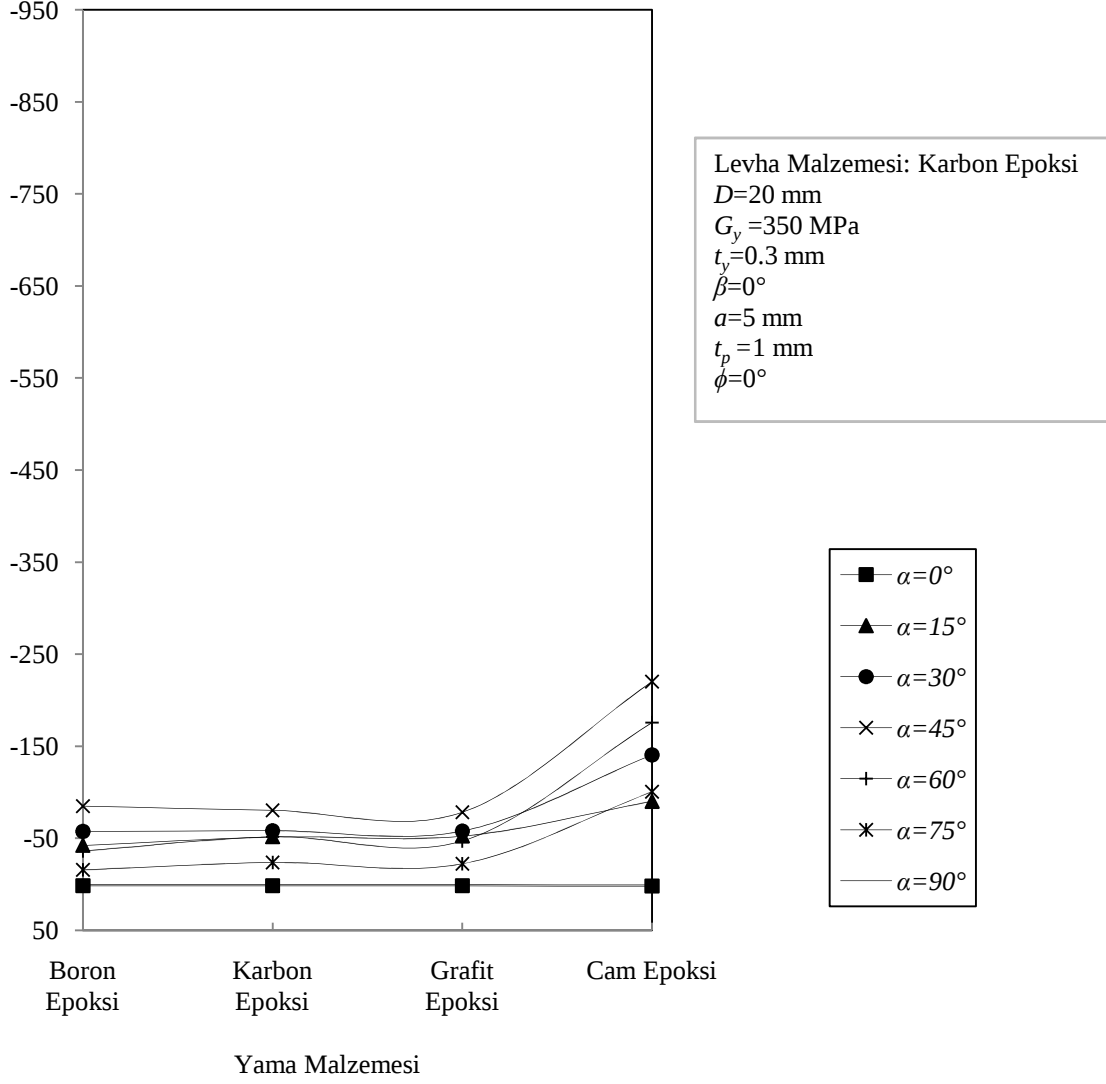
Farklı pim çaplarında gerilme şiddet faktörü K_{II} 'nin yama malzemesi ile ilgili değişimi Şekil 7.32'de görülmektedir. Buna göre, $\alpha=\beta=\phi=0^\circ$ için K_{II} değeri 0 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 7.33 Farklı levha açıları için K_I gerilme şiddet faktörünün yama malzemesi ile değişimi ($MPa\sqrt{mm}$).

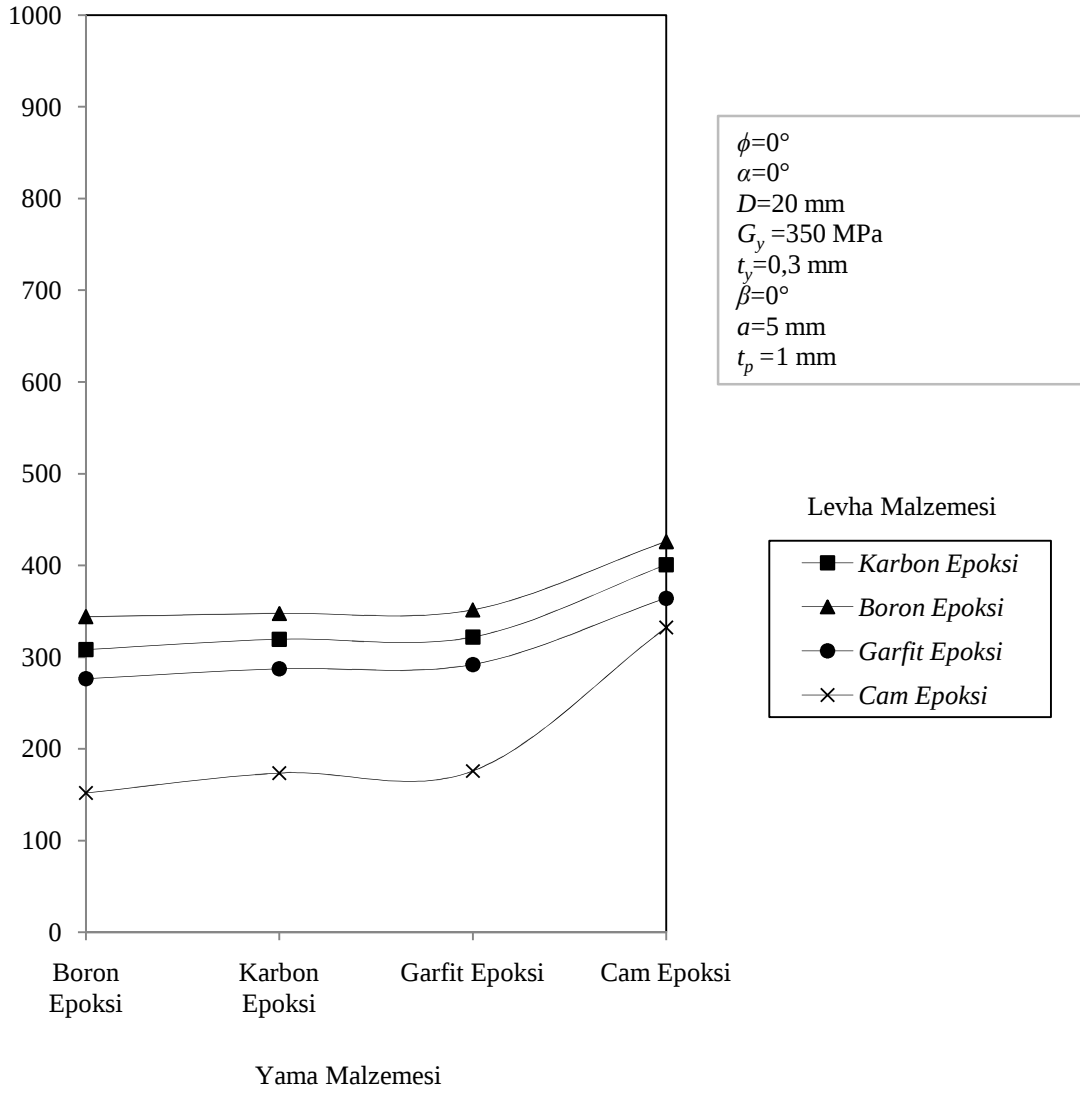
Şekil 7.33’de farklı levha açıları için gerilme şiddet faktörü K_I ’in yama malzemesi ile değişimi verilmiştir. α açısının artması çekme doğrultusunda E_I ’i düşürmektedir. Buna bağlı olarak da yüksek α değerleri için yama malzemesinin seçimi K_I üzerinde daha fazla önem kazanmaktadır.

$\alpha = 0^\circ$ ’de yama olarak Boron Epoksi yerine Cam Epoksi kullanılması durumunda K_I artışı $92.76 MPa\sqrt{mm}$ iken, $\alpha=90^\circ$ ’de bu artış $503.78 MPa\sqrt{mm}$ olarak elde edilmiştir. Bu artış özellikle çatlak boyu ve pim deliği çapı yanında yama malzemesinin K_I üzerinde daha önemli bir parametre olduğunu göstermektedir.



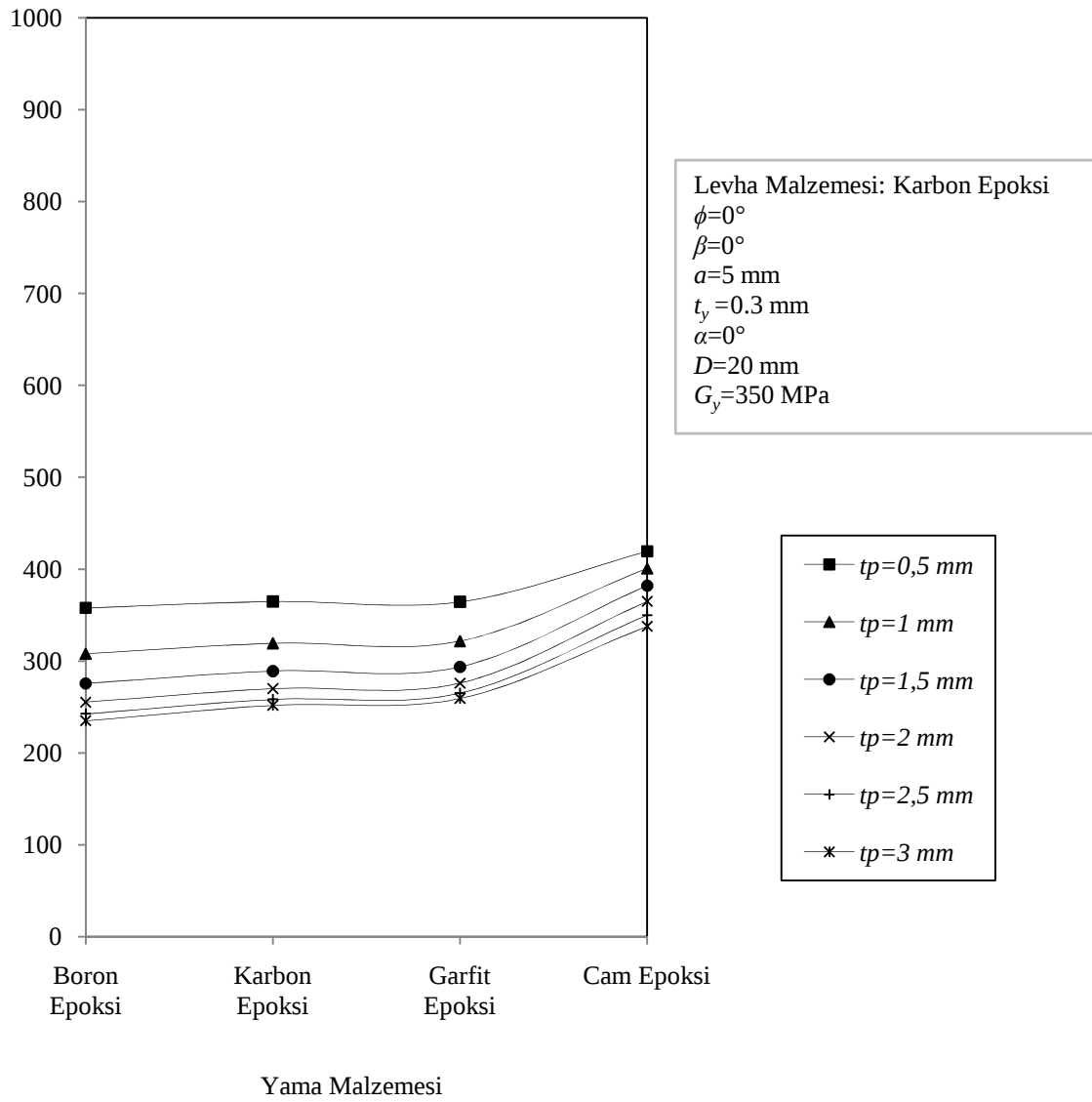
Şekil 7.34 Farklı levha açıları için K_{II} Gerilme şiddet faktörünün yama malzemesi ile değişimi ($MPa\sqrt{mm}$).

Şekil 7.34'den görüleceği üzere $\alpha=45^\circ$ için kayma davranışı maksimum değere ulaşacağından, bu açı değerinde yama malzemesinin K_{II} üzerinde daha fazla öneme sahip olduğu görülmektedir. K_{II} değeri K_I değerine göre çok daha küçük elde edilmiştir.



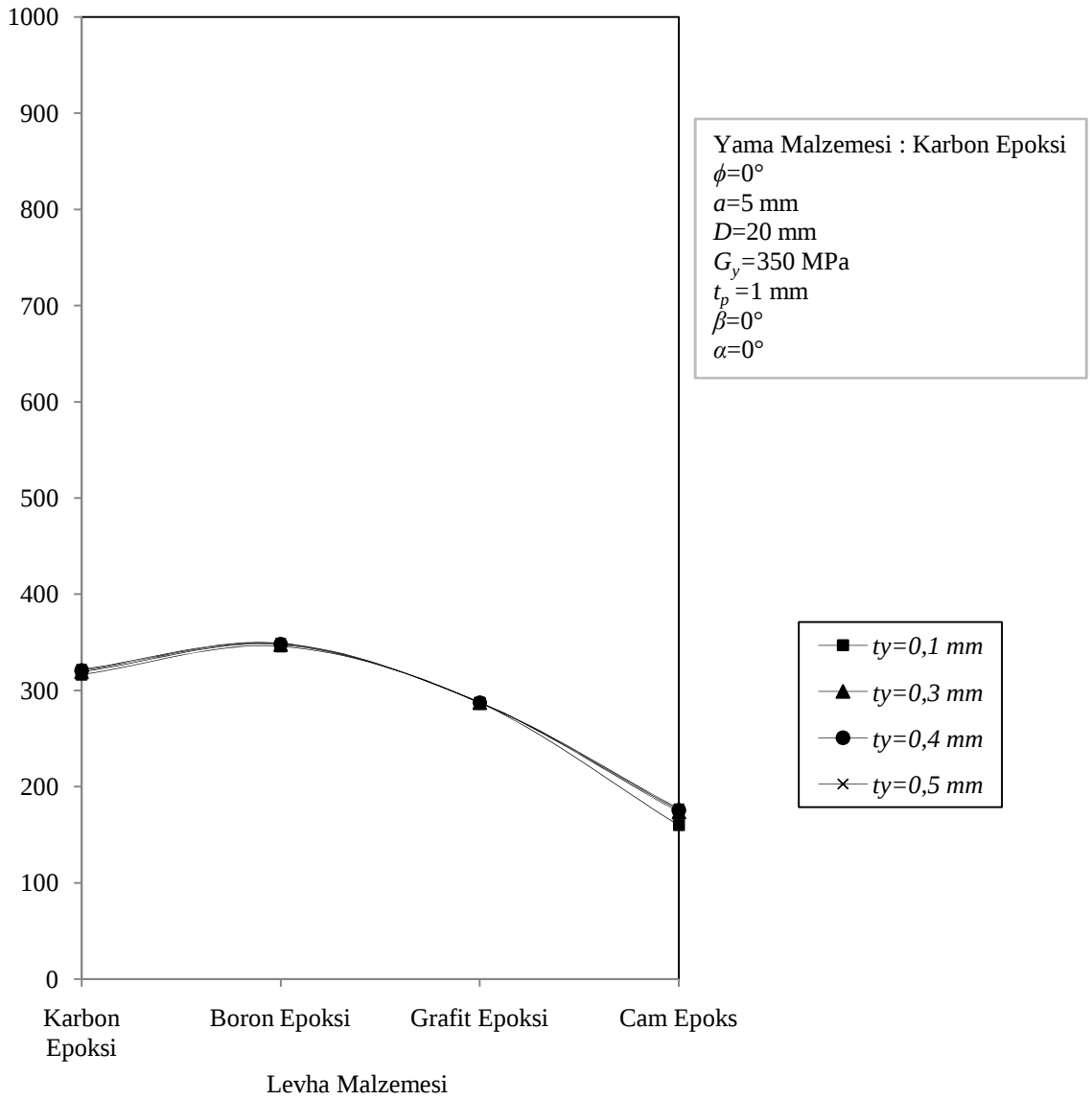
Şekil 7.35 Farklı levha malzemeleri için K_I gerilme şiddet faktörünün yama malzemesi ile değişimi ($\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$).

Şekil 7.35’de farklı levha malzemeleri için gerilme şiddet faktörü K_I ’in yama malzemesi ile ilgili olan değişimi görülmektedir. Çekme doğrultusunda daha düşük Elastisite modülüne sahip levha malzemesi kullanıldığında, yama malzemesinin tipi önem kazanmaktadır. Çünkü levhaya göre yamanın Elastisite modülü büyüdükçe çatlak ucunun açılımı engellenir. Cam Epoksi malzemesinden üretilen bir levha için, Boron Epoksi yama kullanıldığında $K_I=151.86 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$ olarak elde edilir iken, Cam Epoksi yama kullanıldığında $K_I=332.21 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$ olarak hesaplanmıştır. Boron Epoksi levha malzemesinin tamirinde ise Cam ile Boron Epoksi yama malzemesi kullanılması durumundaki K_I değişikliği ancak $81.85 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$ olarak kalmaktadır.



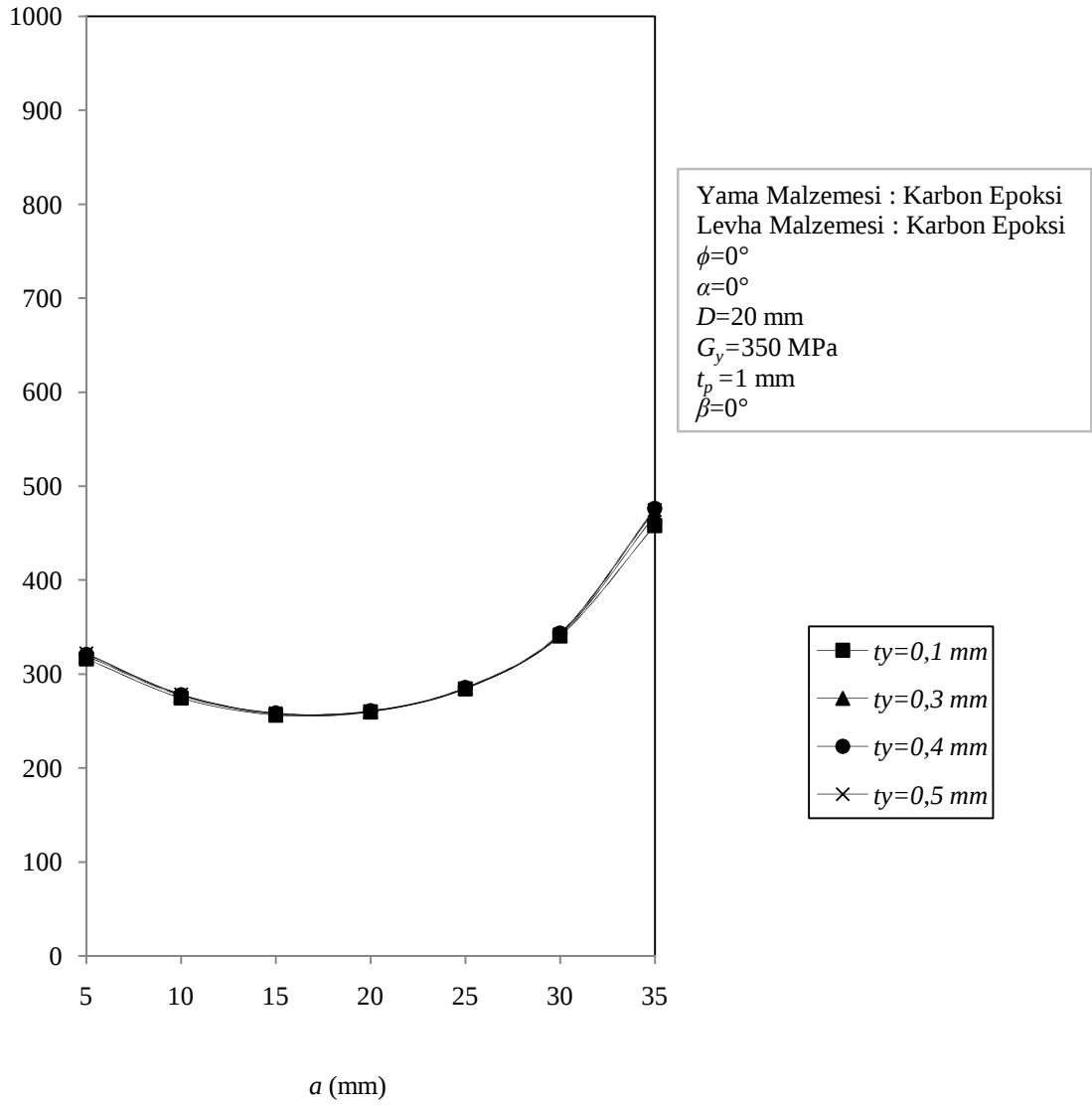
Şekil 7.36 Farklı yama kalınlıkları için K_I gerilme şiddet faktörünün yama malzemesi ile değişimi ($\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$).

Farklı yama kalınlıkları için gerilme şiddet faktörü K_I 'in yama malzemesi ile değişimi Şekil 7.36'de verilmiştir. Yama malzemesinin K_I üzerindeki etkisi Şekil 7.35'de verilmişti. $\alpha=0^\circ$ için E 'nin artması K_I değerini düşürdüğü görülebilir. ($E_{\text{Boron}} > E_{\text{Karbon}} > E_{\text{Grafit}} > E_{\text{Cam}}$) Yama kalınlığının artışı ise; yama malzemesinin etkisine paralel olarak K_I 'i azaltmaktadır. Yüksek Elstisite modülüne sahip malzemeler için yama kalınlığının artışı, K_I 'i daha fazla etkilemektedir.



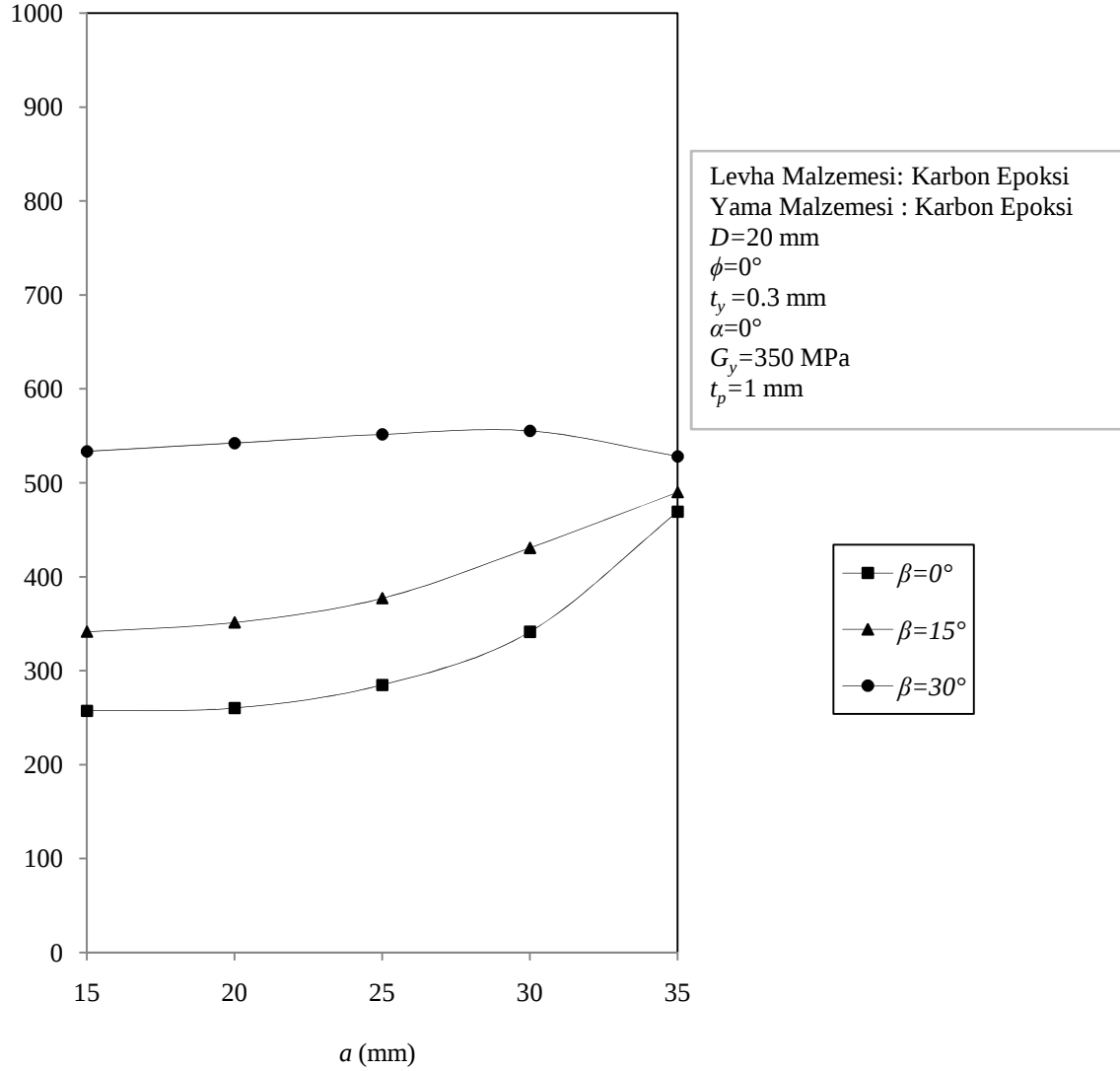
Şekil 7.37 Farklı yapıştırıcı kalınlıkları için K_I gerilme şiddet faktörünün levha malzemesi ile değişimi ($\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$).

Farklı yapıştırıcı kalınlıkları için gerilme şiddet faktörü K_I 'in levha malzemesi ile değişimi Şekil 7.37'de gösterilmiştir. Levha malzemesinin çekme doğrultusundaki Elastisite modülü azaldıkça K_I azalmaktadır. Yapıştırıcı kalınlığının değişiminin K_I üzerinde $\alpha=0^\circ$ için etkisi yoktur. Yama malzemesinin değişimi, yama kalınlığının K_I üzerindeki etkisini değiştirmemektedir.



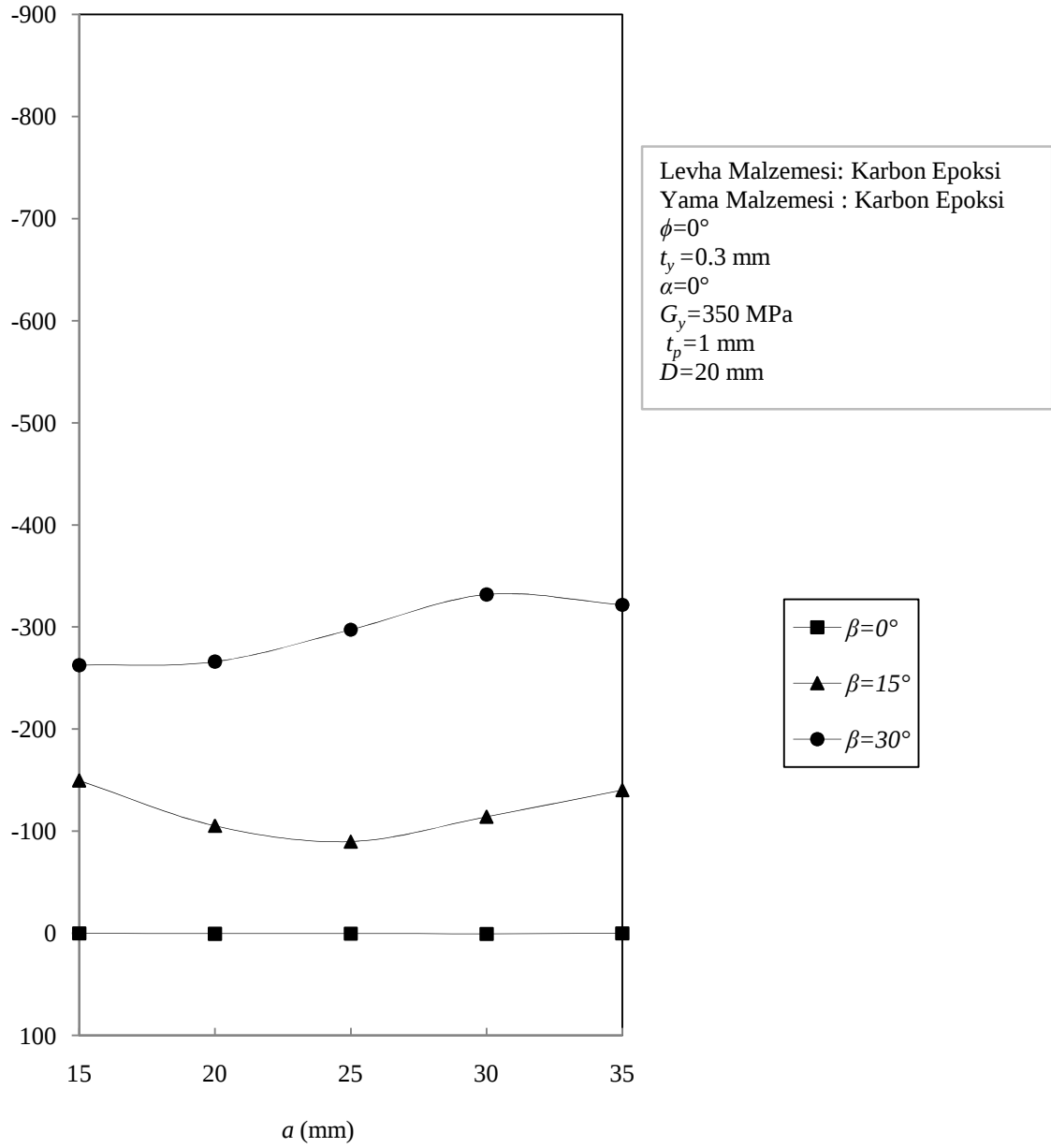
Şekil 7.38 Farklı yapıştırıcı kalınlıkları için K_I gerilme şiddet faktörünün çatlak boyu ile değişimi ($MPa\sqrt{mm}$).

Farklı yapıştırıcı kalınlıkları için K_I gerilme şiddet faktörünün çatlak boyu ile değişimi Şekil 7.38’de verilmiştir. Çatlak boyu 15 mm’ye kadar K_I değeri azalmış sonrasında çatlak boyu arttıkça serbest kenara yaklaştığından artmıştır. Maksimum değere $a=35$ mm ve $t_y=0.5$ mm de ulaşmış olup, $474.78 MPa\sqrt{mm}$ dir. Aynı çatlak boyunda yapıştırıcı kalınlığının artması K_I değerini az da olsa artırmıştır.



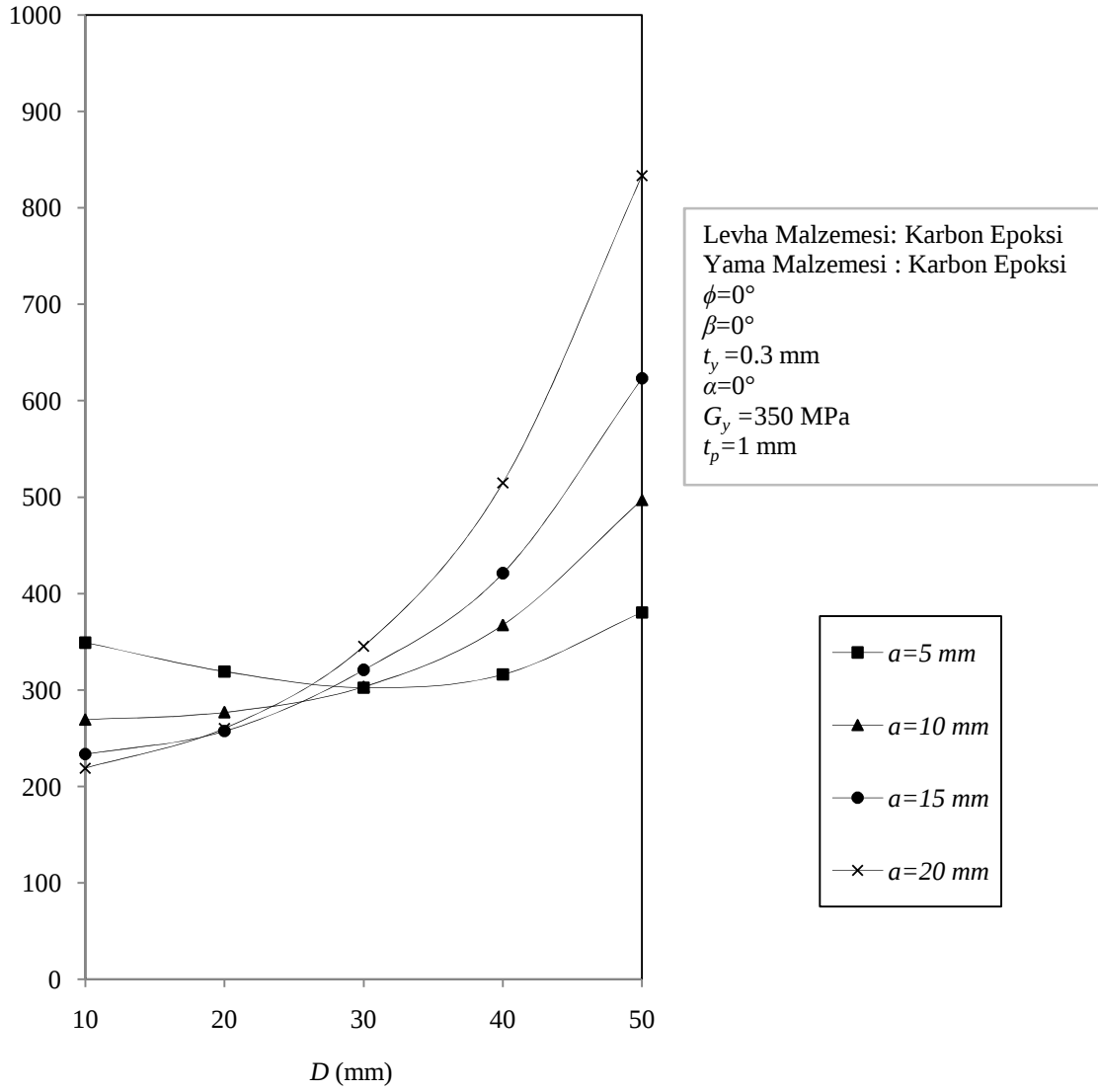
Şekil 7.39 Farklı çatlak açıları için K_I gerilme şiddet faktörünün çatlak boyu ile değişimi ($MPa\sqrt{mm}$).

Farklı çatlak açıları için gerilme şiddet faktörü K_I 'in çatlak boyu ile değişimi Şekil 7.39'da gösterilmiştir. Çatlak boyunun artması ($\beta=0^\circ$ ve 15° için) K_I değerini arttırmıştır. $\beta=30^\circ$ olduğunda çatlak boyunu K_I üzerindeki etkisi diğer açılardaki davranışına göre daha azdır. Çatlak boyunun artması ile gerilme şiddet faktörü K_I üzerinde çatlak açısının etkisi azalmaktadır.



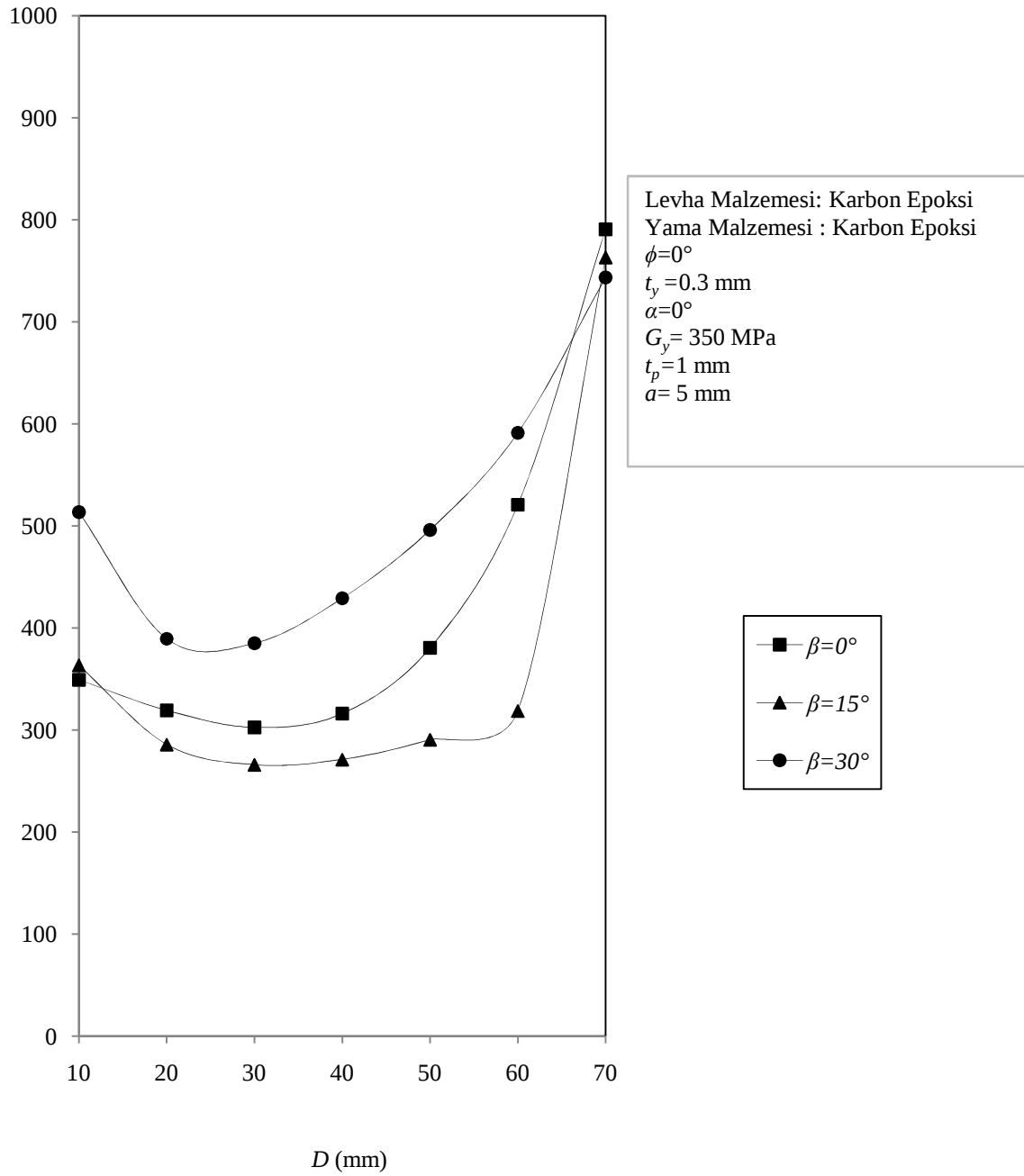
Şekil 7.40 Farklı çatlak açıları için K_{II} gerilme şiddet faktörünün çatlak boyu ile değişimi($MPa\sqrt{mm}$).

Şekil 7.40'dan görüleceği üzere, K_I 'e benzer olarak çatlak açısının artması K_{II} 'yi de arttırmıştır.



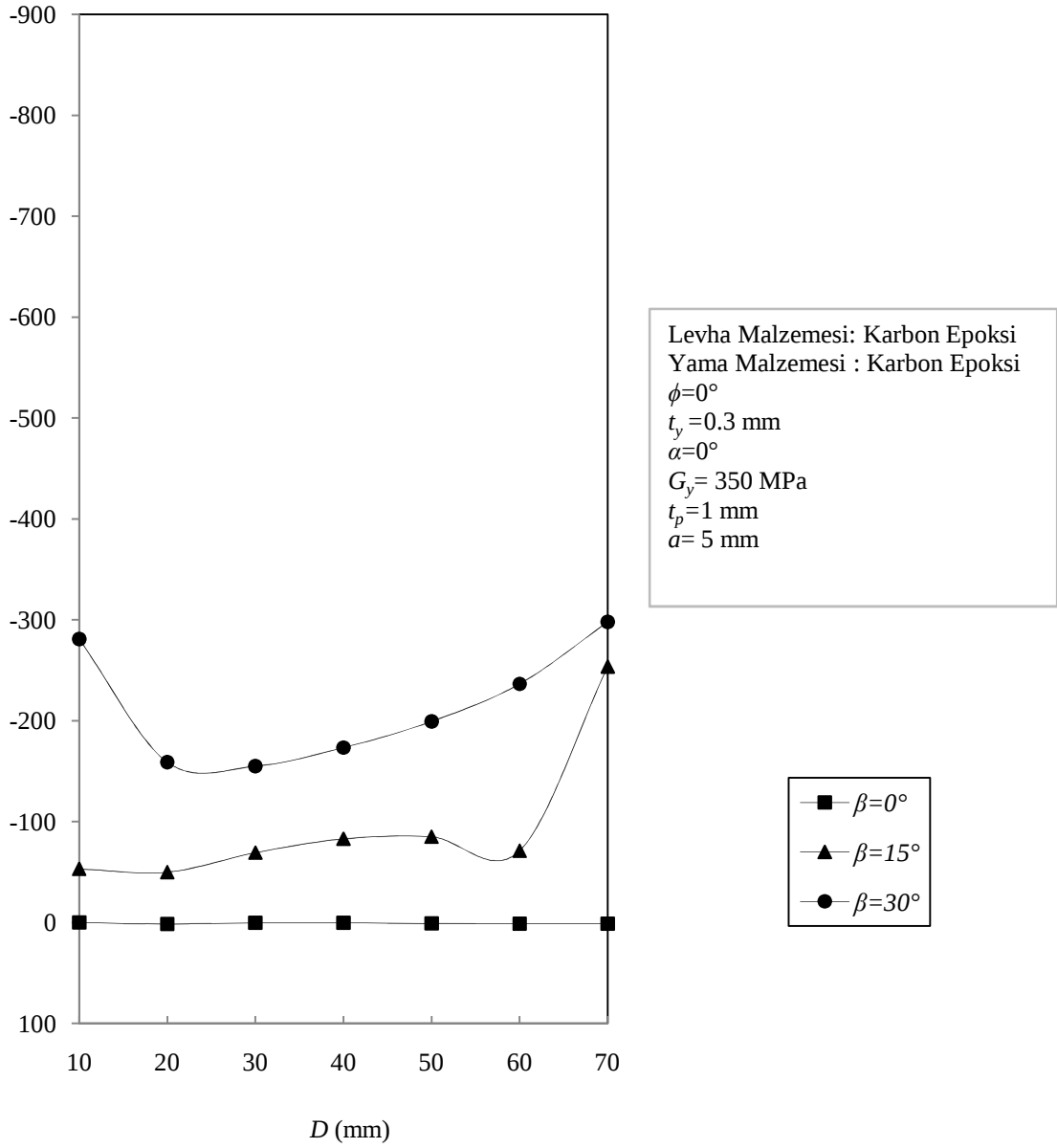
Şekil 7.41 Farklı çatlak boyları için K_I gerilme şiddet faktörünün pim çapı ile değişimi ($\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$).

Şekil 7.41'den görüleceği gibi çatlak boyu belirli bir değerde iken pim çapının artması ile çatlak serbest kenara yaklaşacağından K_I artmıştır. Maksimum K_I değeri $a=20 \text{ mm}$ için $D=50\text{mm}$ 'de $833.30 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$ olarak hesaplanmıştır. Buna karşılık pim çapı sabit bir değer için çatlak boyu arttığında ise $D<30 \text{ mm}$ için K_I azalmış, $D>30 \text{ mm}$ için ise artmıştır.



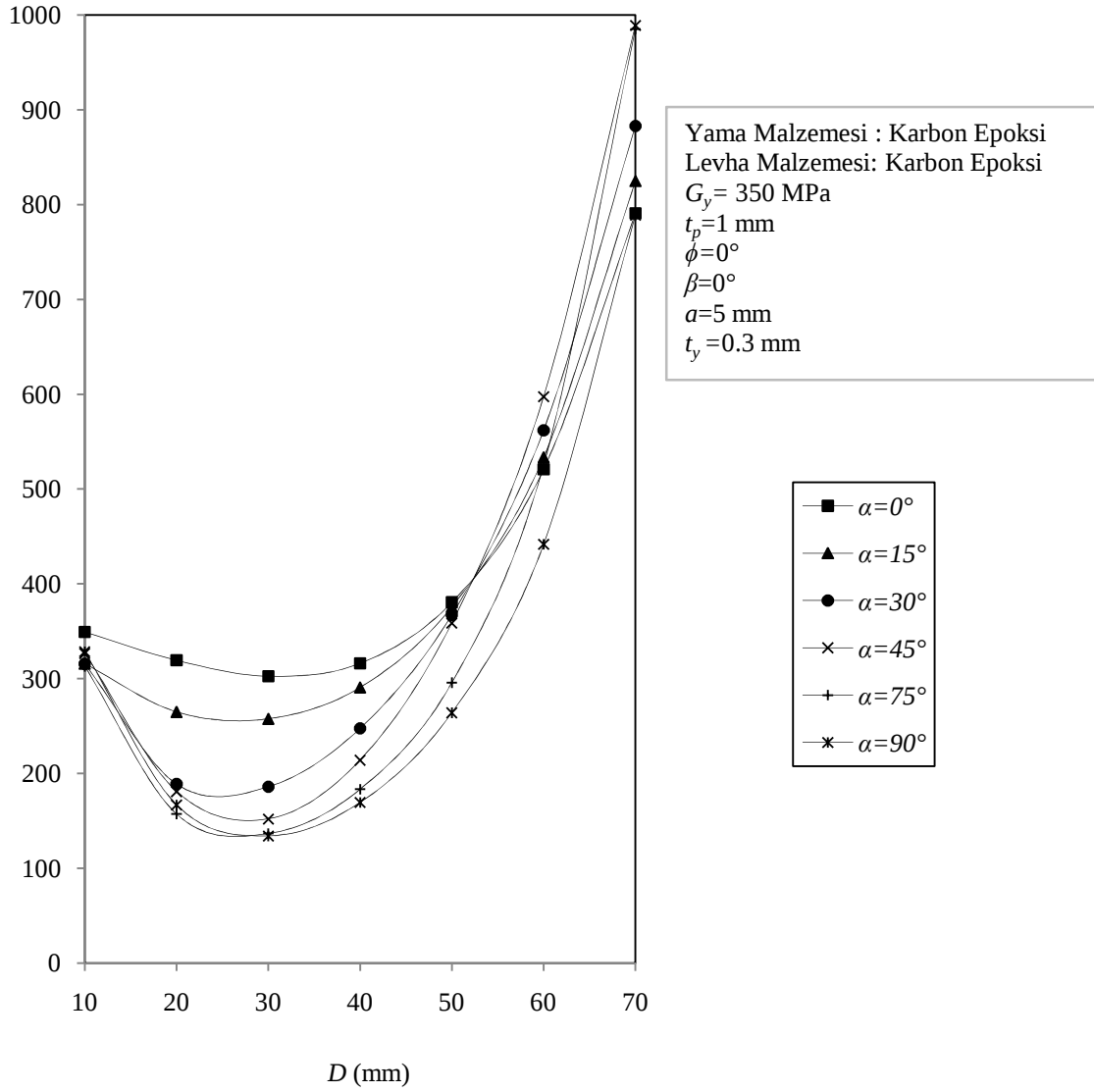
Şekil 7.42 Farklı çatlak açıları için K_I gerilme şiddet faktörünün pim çapı ile değişimi ($MPa\sqrt{mm}$).

Farklı çatlak açıları için gerilme şiddet faktörü K_I 'in pim çapı ile değişimi Şekil 7.42'de gösterilmiştir. Buna göre, pim çapı arttıkça çatlak açısının K_I üzerindeki etkisi azalmaktadır. $D=70$ mm maksimum değerine ulaşıldığında ise, çatlak açısı değişimi K_I değerini etkilememektedir.



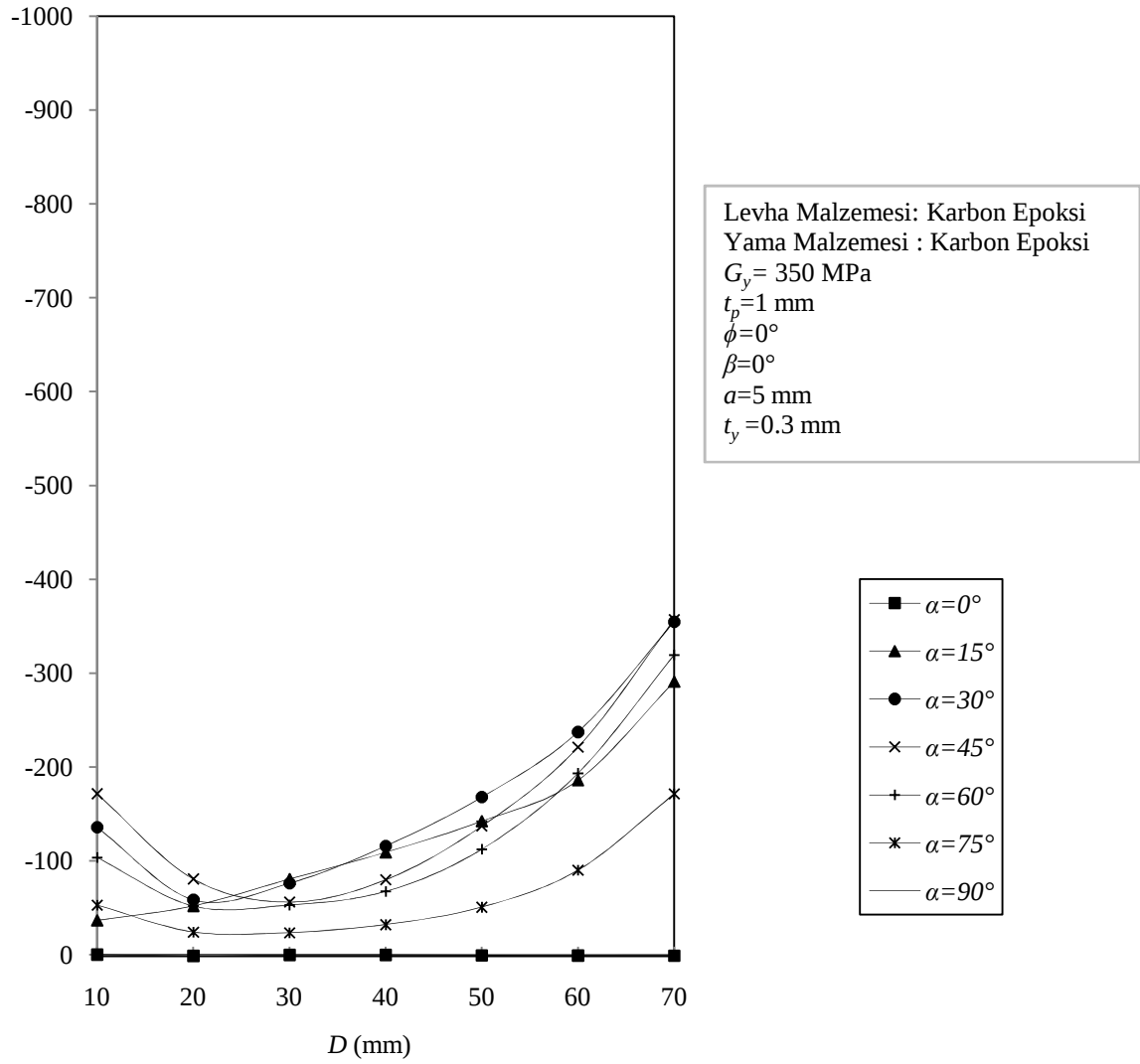
Şekil 7.43 Farklı çatlak açıları için K_{II} gerilme şiddet faktörünün pim çapı ile değişimi (MPa√mm).

Şekil 7.43'den görüldüğü üzere $\beta=0^\circ$ 'de $K_{II}=0$ 'dır. β 'nin artması K_{II} 'yi arttırmıştır. D çapının artması ile β 'nin K_{II} üzerindeki etkisi azalmıştır.



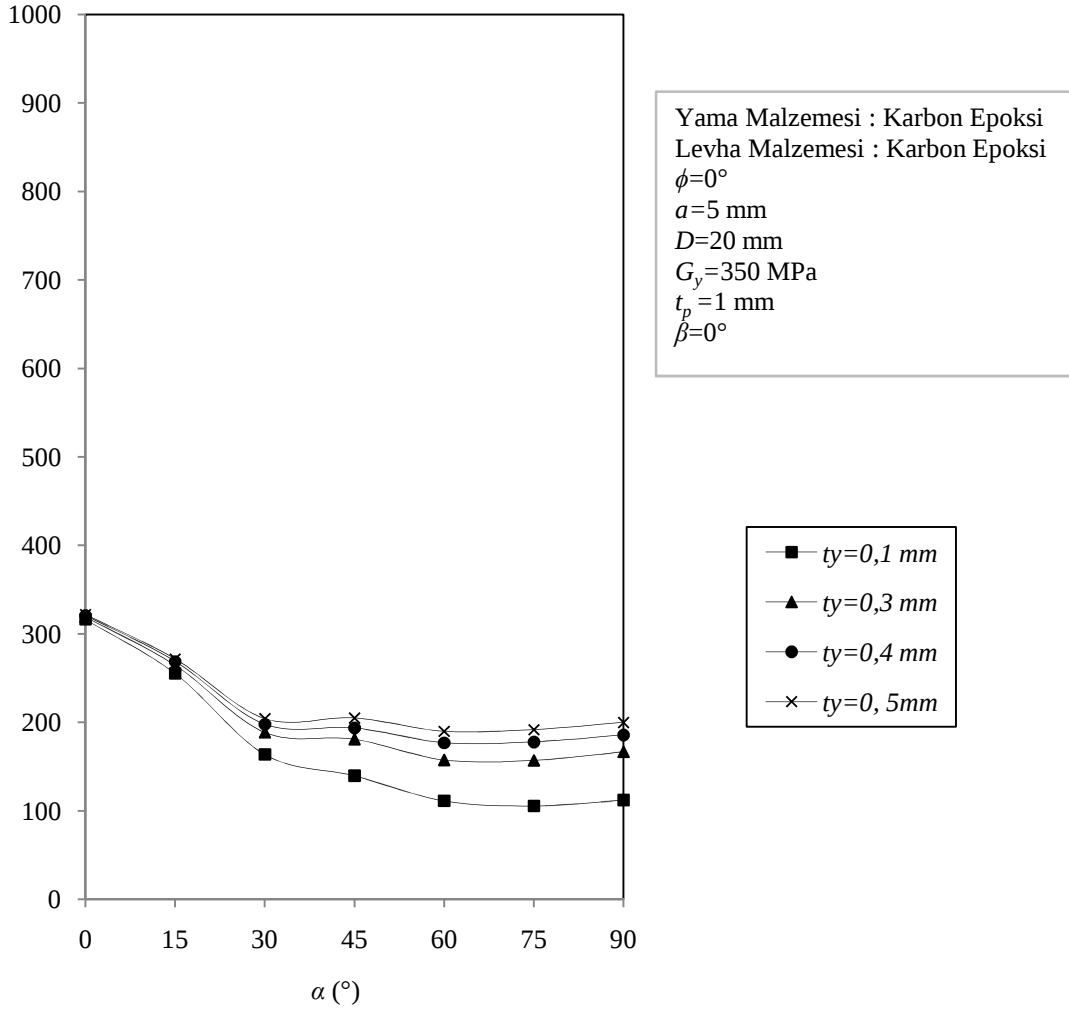
Şekil 7.44 Farklı levha açıları için K_I gerilme şiddet faktörünün pim çapı ile değişimi ($\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$).

Şekil 7.44’de farklı levha açıları için gerilme şiddet faktörü K_I ’in pim çapı ile değişimi gösterilmiştir. Çatlak boyunda olduğu gibi pim çapının artması K_I değerini arttırmıştır. Ancak levha açısının K_I üzerindeki etkisi, $D > 50 \text{ mm}$ ’den sonra azalmaktadır.



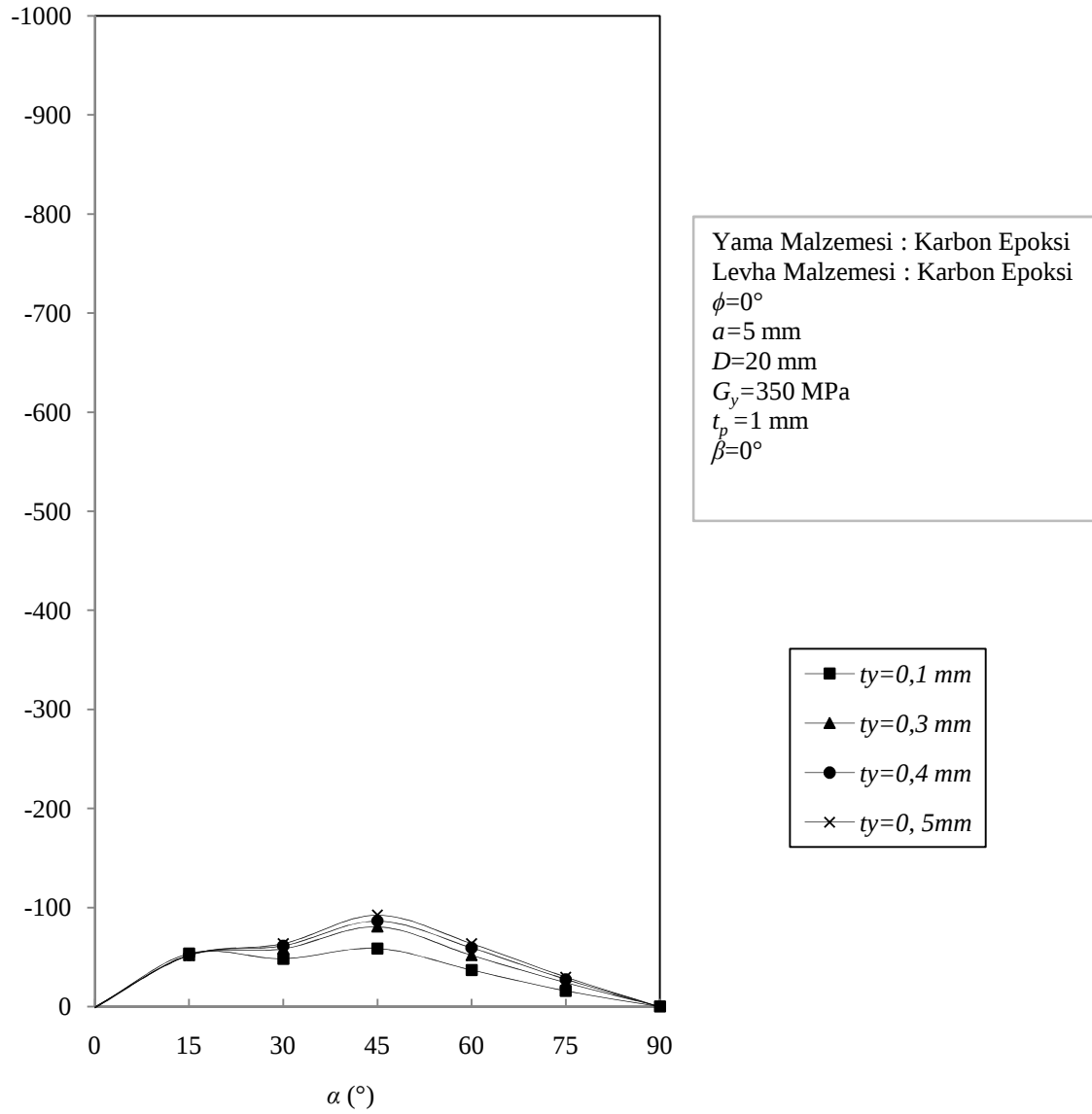
Şekil 7.45 Farklı levha açıları için K_{II} gerilme şiddet faktörünün pim çapı ile değişimi ($\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$).

Şekil 7.45’den görüleceği gibi, $\alpha=45^\circ$ ’ye kadar artar ise K_{II} üzerinde pim çapının etkisi artar. Daha sonra ise $\alpha=90^\circ$ ’de 0 olur.



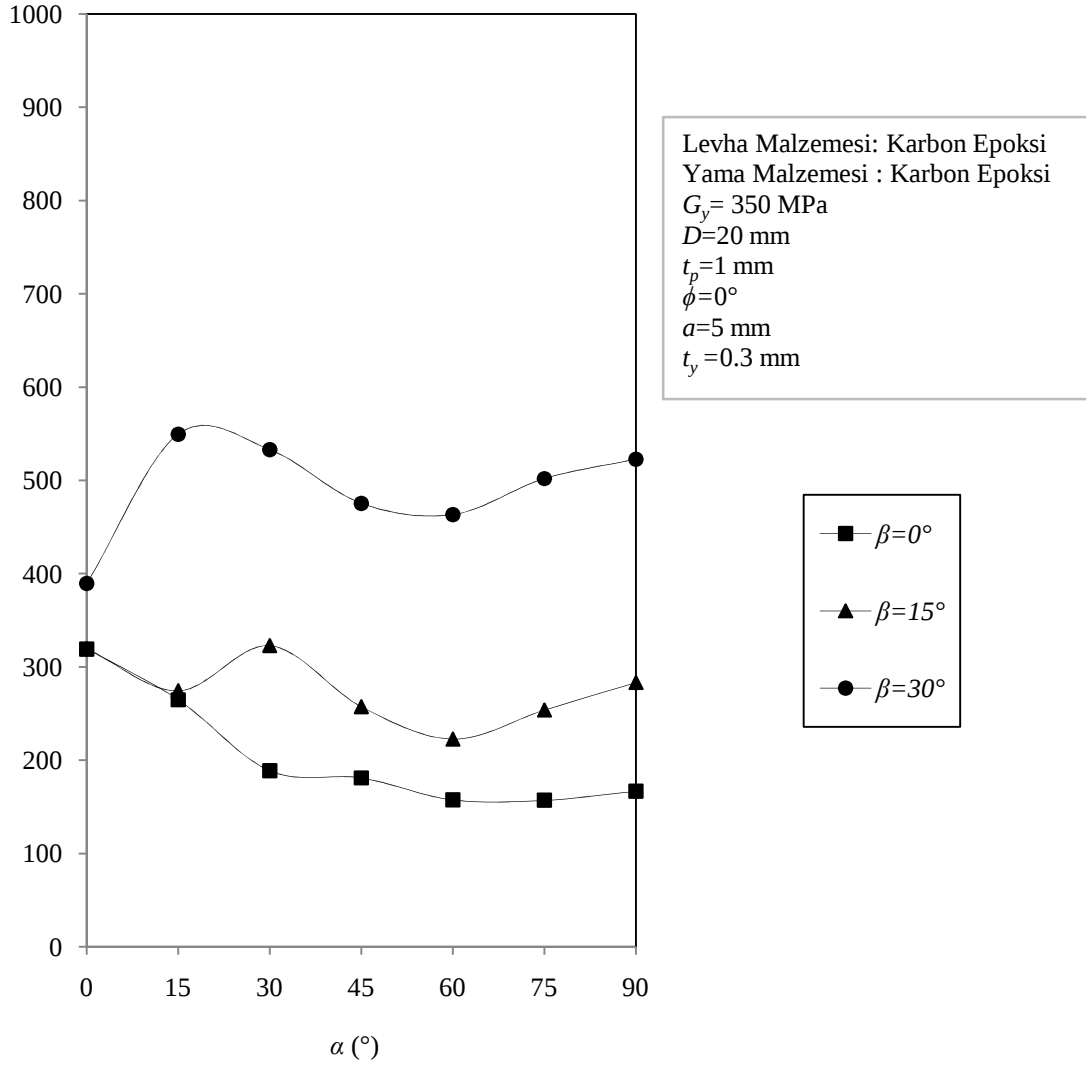
Şekil 7.46 Farklı yapıştırıcı kalınlıkları için K_I gerilme şiddet faktörünün levha açısı ile değişimi ($\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$).

Farklı yapıştırıcı kalınlıkları için gerilme şiddet faktörü K_I 'in levha açısı ile değişimi Şekil 7.46'da gösterilmiştir. Buna göre $\alpha=30^\circ$ 'ye kadar levha açısının artması gerilme şiddet faktörünü daha çok etkileyerek azalmıştır. $\alpha=30^\circ$ 'den büyük açılarda gerilme şiddet faktörü azalma oranı daha düşüktür. Buna göre $t_y=0.5\text{ mm}$ ve $\alpha=0^\circ$ iken $K_I=321.94\text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$ iken bu değer $\alpha=30^\circ$ 'de $204.26\text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$, $\alpha=90^\circ$ 'de $199.94\text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$ olarak hesaplanmıştır. Bunun yanında belirli bir levha açısı değeri için yapıştırıcı kalınlığının artması ise, K_I değerinin artmasını sağlamıştır. Büyük levha açılarında yapıştırıcı kalınlığı gerilme şiddet faktörü üzerinde daha etkilidir. $\alpha=0^\circ$, $t_y=0.1\text{ mm}$ ile 0.5 mm arasındaki fark $5.6\text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$ iken $\alpha=90^\circ$ 'de bu fark $87.65\text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$ olarak hesaplanmıştır.



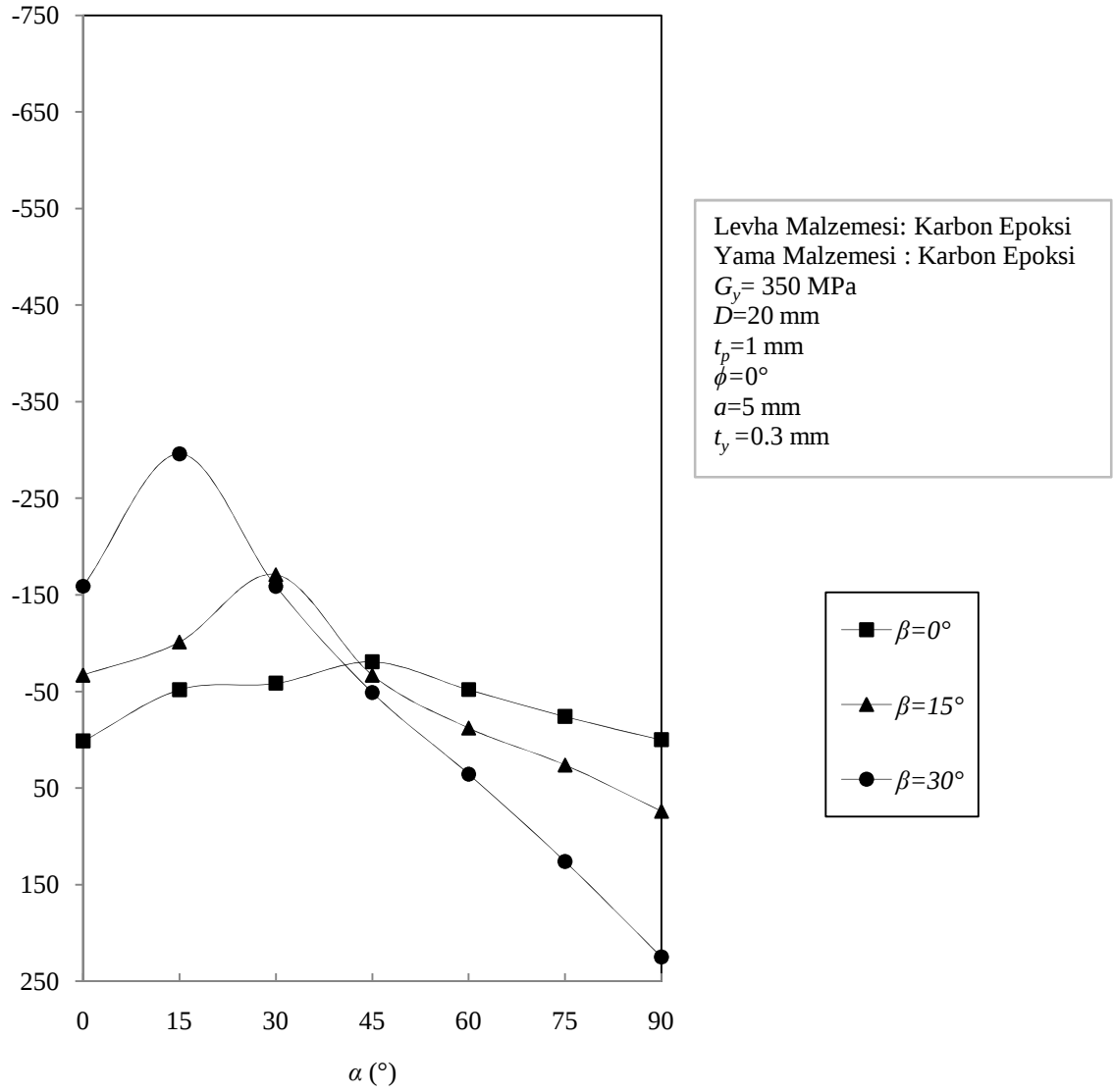
Şekil 7.47 Farklı yapıştırıcı kalınlıkları için K_{II} gerilme şiddet faktörünün levha açısı ile değişimi ($\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$).

Şekil 7.47’de farklı yapıştırıcı kalınlıkları için gerilme şiddet faktörü K_{II} ’nin levha açısı ile değişimi gösterilmiştir. Buna göre levha açısı 45° ’ye kadar K_{II} değeri mutlak değerce artmış sonrasında azalma göstermiştir. Belirli bir levha açısı değerinde, yapıştırıcı kalınlığının artması K_{II} değerini mutlak değerce arttırmıştır.



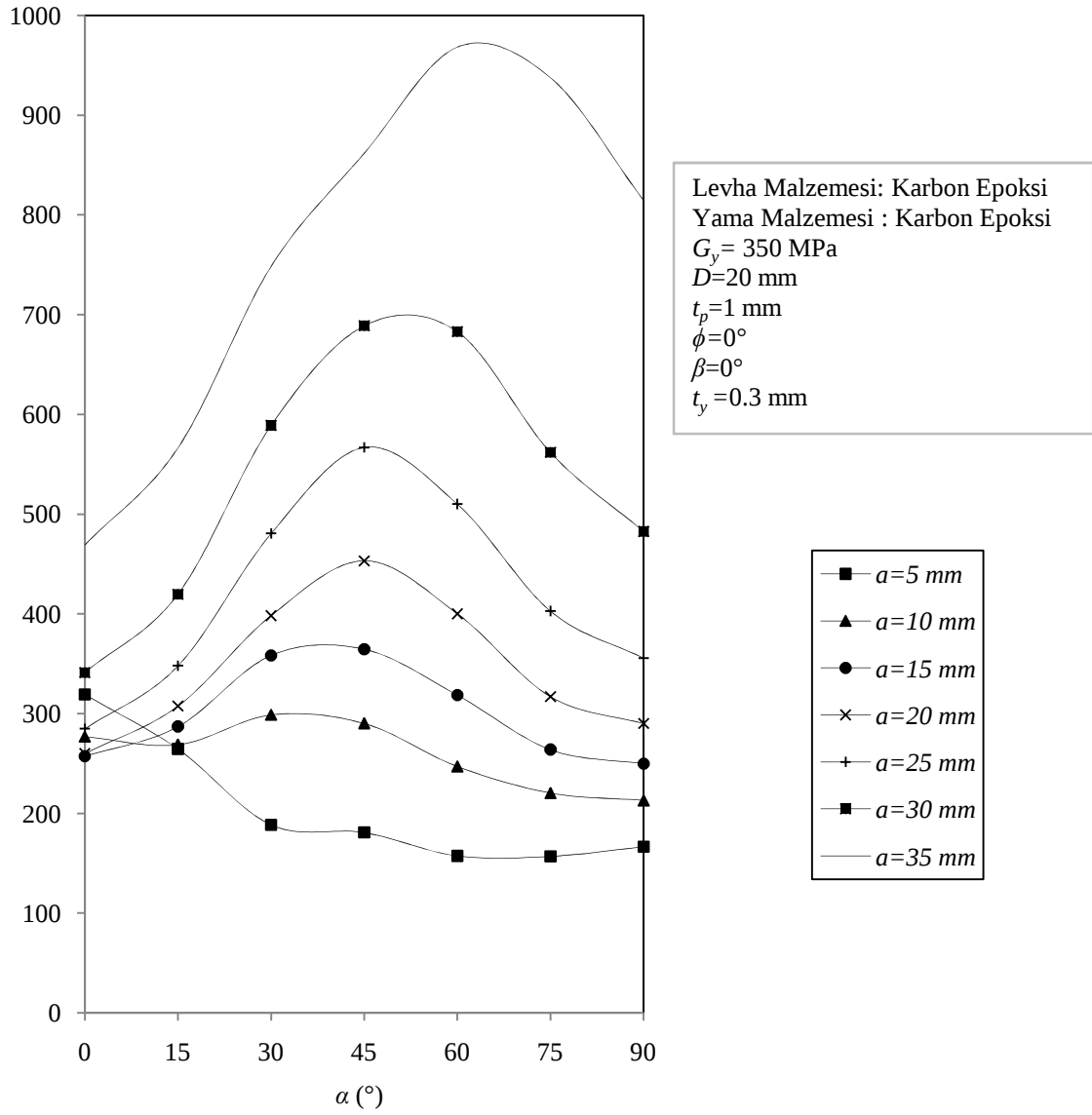
Şekil 7.48 Farklı çatlak açıları için K_I gerilme şiddet faktörünün levha açısı ile değişimi ($MPa\sqrt{mm}$).

Şekil 7.48’de farklı çatlak açıları için gerilme şiddet faktörü K_I ’in levha açısı ile değişimi verilmiştir. Çatlak açısı β ’nın artışı K_I ’i artırmıştır. Levha açısının artması ile çekme doğrultusundaki Elastisite modülü E_1 azalacağından; yama malzemesinin etkisi ön plana çıkmış ve K_I değerini $\beta=0^\circ$ ve 15° ’de düşürmüştür. Ancak $\beta=30^\circ$ ’de ise α açısı artsa bile çatlak açısının yanında yamanın etkisiz kalmasından dolayı K_I artmıştır.



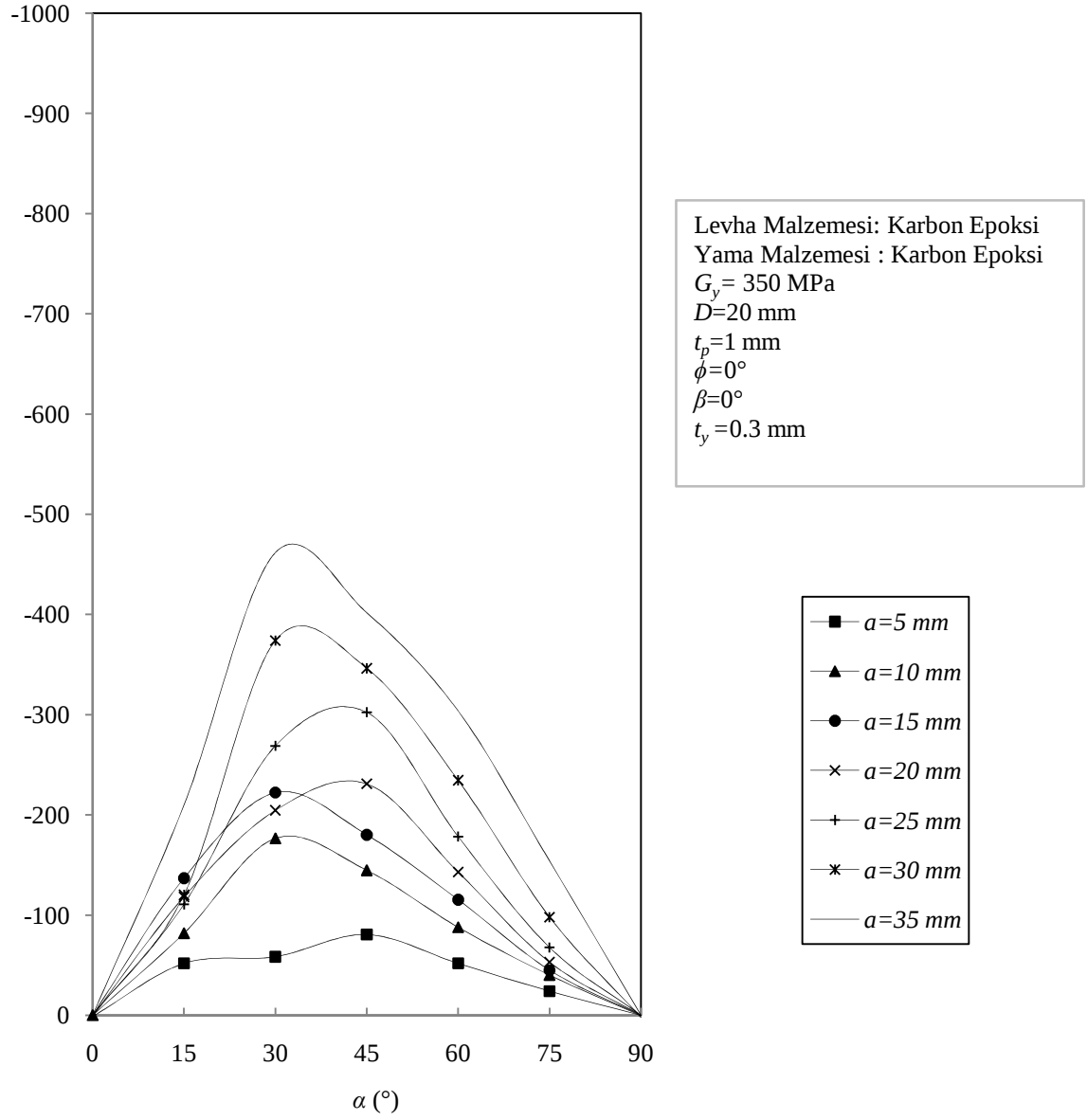
Şekil 7.49 Farklı çatlak açıları için K_{II} gerilme şiddet faktörünün levha açısı ile değişimi ($MPa\sqrt{mm}$).

Şekil 7.49'da farklı çatlak açıları için gerilme şiddet faktörü K_{II} 'nin levha açısı ile değişimi verilmiştir. β açısı arttıkça, levha açısının K_{II} üzerindeki etkisi artmaktadır. $\beta = 30^\circ$ için $\alpha = 15^\circ$ ile 90° arasındaki K_{II} farkı maksimuma ulaşmıştır.



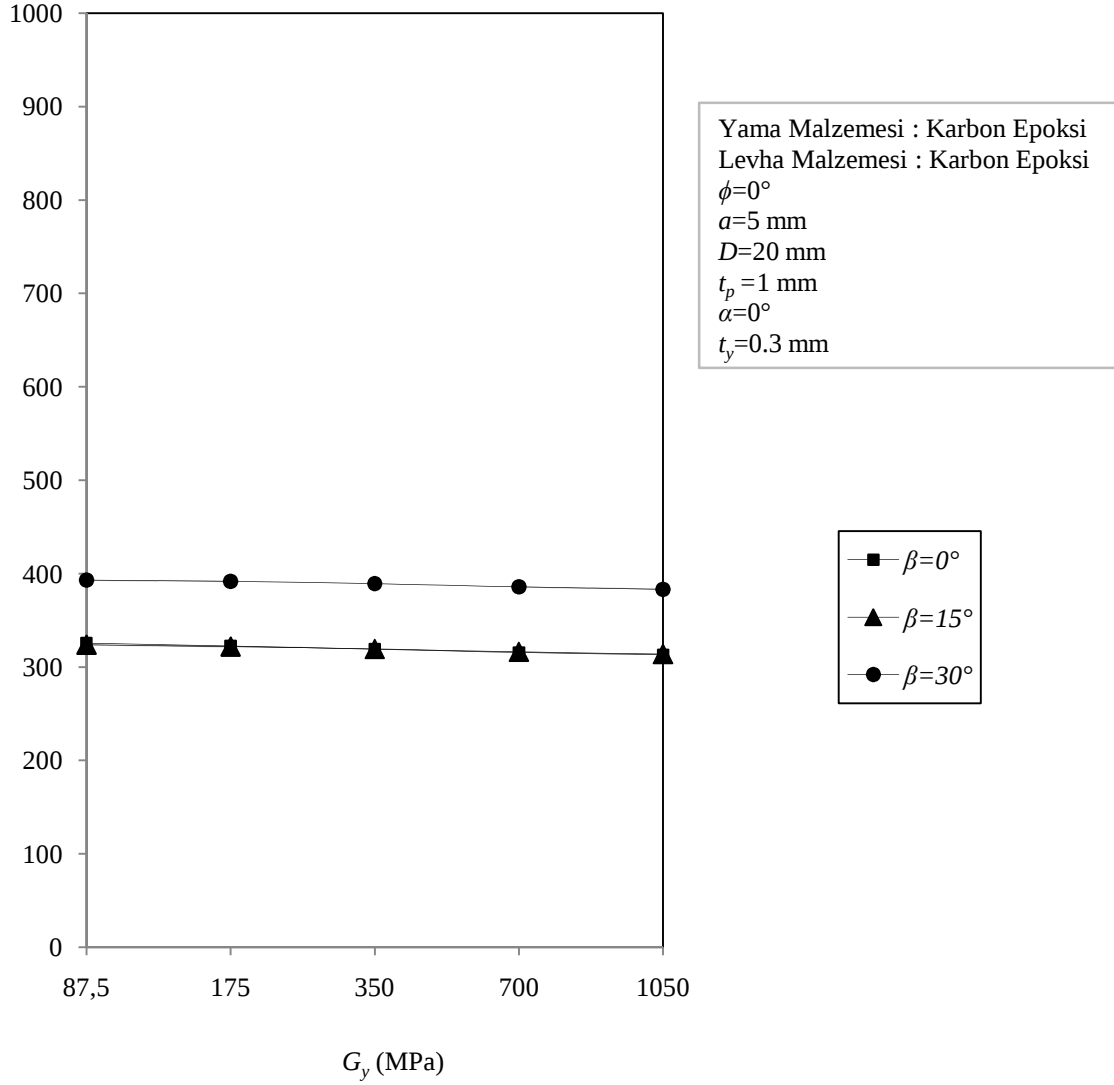
Şekil 7.50 Farklı çatlak boyları için K_I gerilme şiddet faktörünün levha açısı ile değişimi ($\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$).

Farklı çatlak boyları için gerilme şiddet faktörü K_I 'in levha açısı ile değişimi Şekil 7.50'de verilmiştir. Buna göre, çatlak boyunun artması K_I değerini arttırmıştır. Büyük çatlak boylarında levha açısının K_I üzerine etkisinin daha fazla olduğu görülmüştür



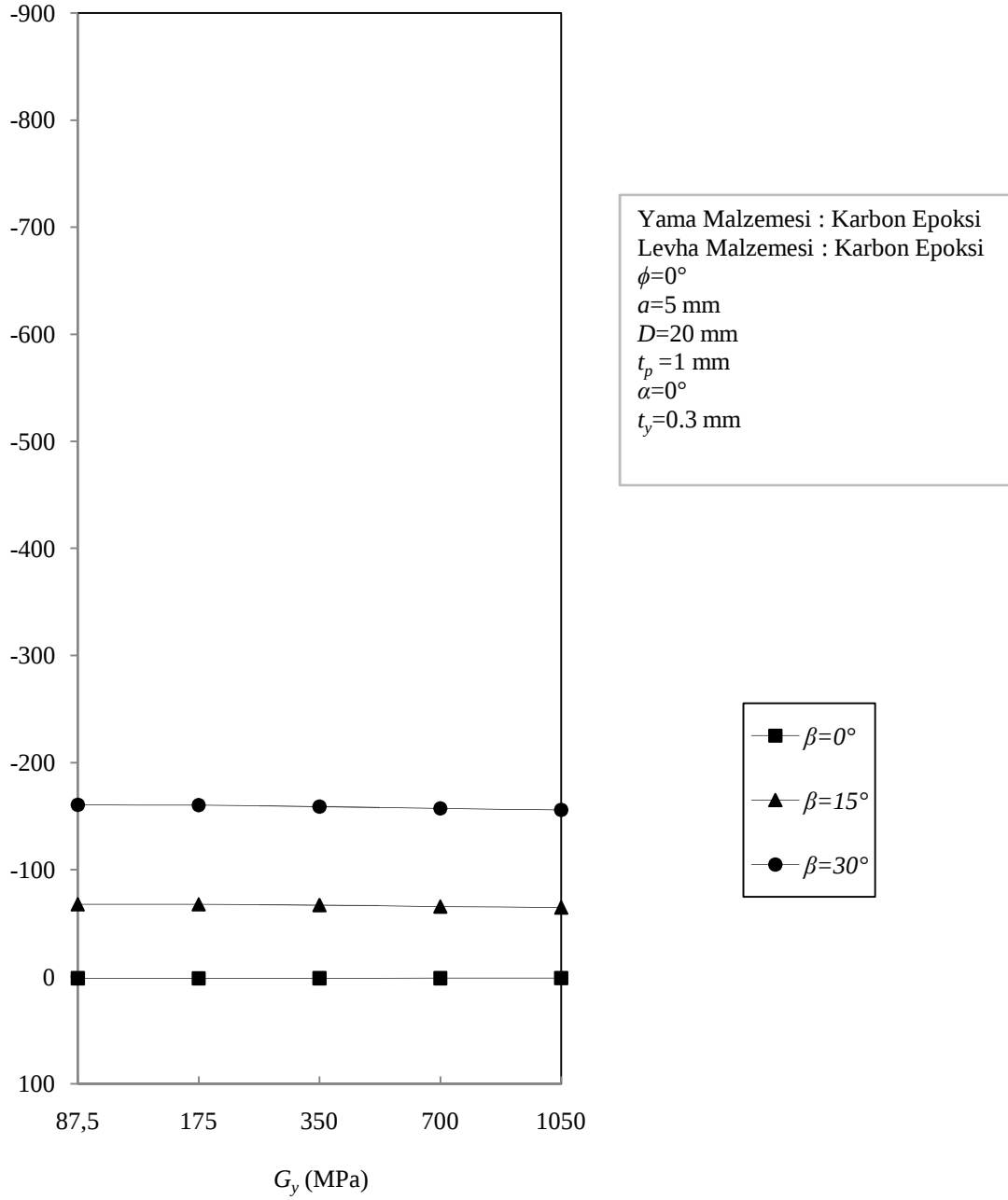
Şekil 7.51 Farklı çatlak boyları için K_{II} gerilme şiddet faktörünün levha açısı ile değişimi ($\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$).

Şekil 7.51’de farklı çatlak boyları için gerilme şiddet faktörü K_{II} ’nin levha açısı ile değişimi verilmiştir. $\alpha = 45^\circ$ ’ye kadar artırıldığında K_{II} üzerinde çatlak boyunun etkisi daha fazla ön plana çıkar. Daha sonra ise $\alpha = 90^\circ$ ’de bu etki ortadan kalkmış olur.



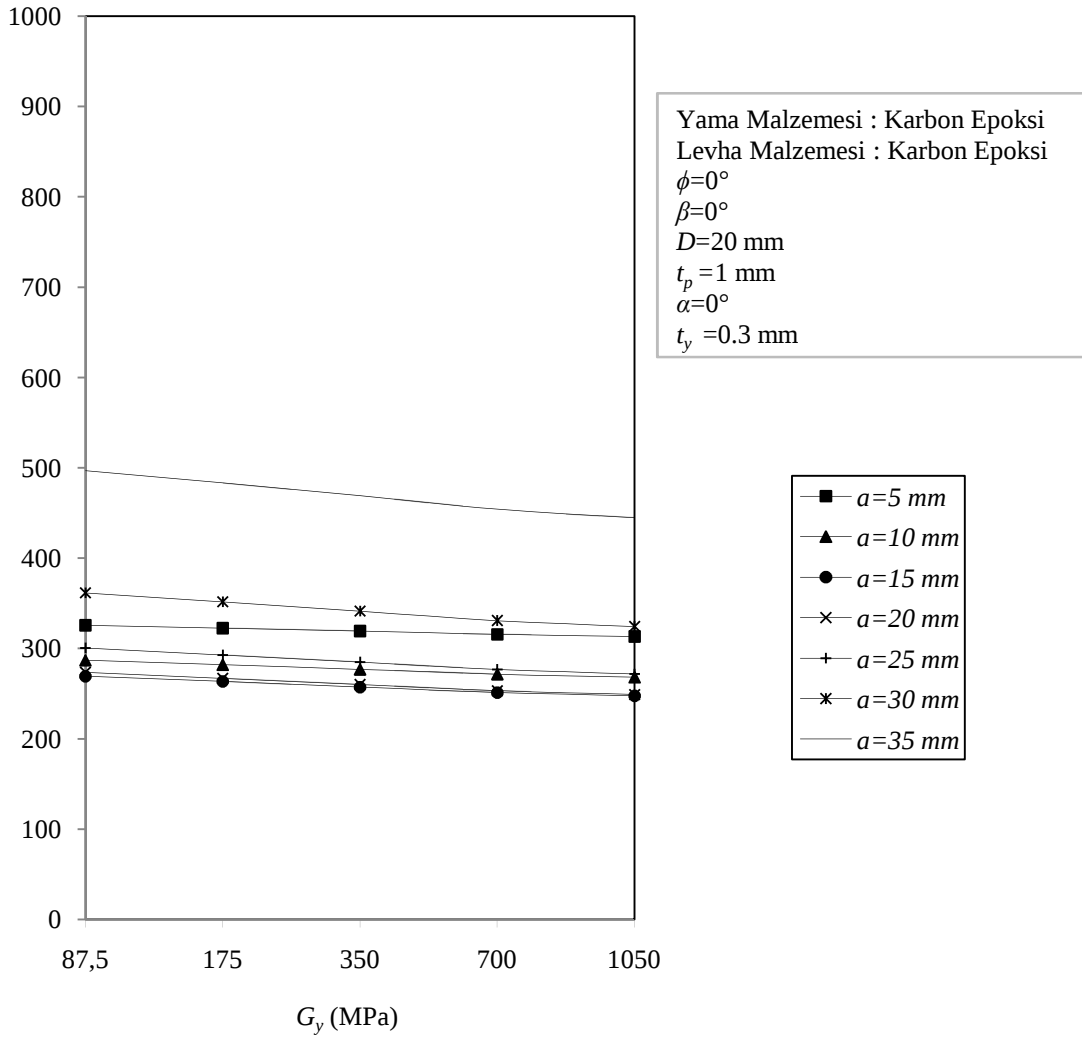
Şekil 7.52 Farklı çatlak açıları için K_I gerilme şiddet faktörünün yapıştırıcı Kayma modülü ile değişimi
 ($\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$).

Şekil 7.52’de farklı çatlak açıları için gerilme şiddet faktörü K_I ’in yapıştırıcı kayma modülü ile değişimi verilmiştir. Çatlak açısının artması K_I değerini arttırmıştır. Yapıştırıcı kayma modülünün artması ise K_I değerini düşürmektedir. Bütün çatlak açıları için bu düşüş vardır. Çatlak açısının artmasına bağlı olarak yapıştırıcı kayma modülünün etkisi incelendiğinde ise, çatlak açısının artması ile K_I üzerinde kayma modülünün etkisinin değişmediği görülmektedir. Bütün çatlak açılarında kayma modülünün gerilme şiddet faktörü değerini aynı oranda azalttığı söylenebilir.



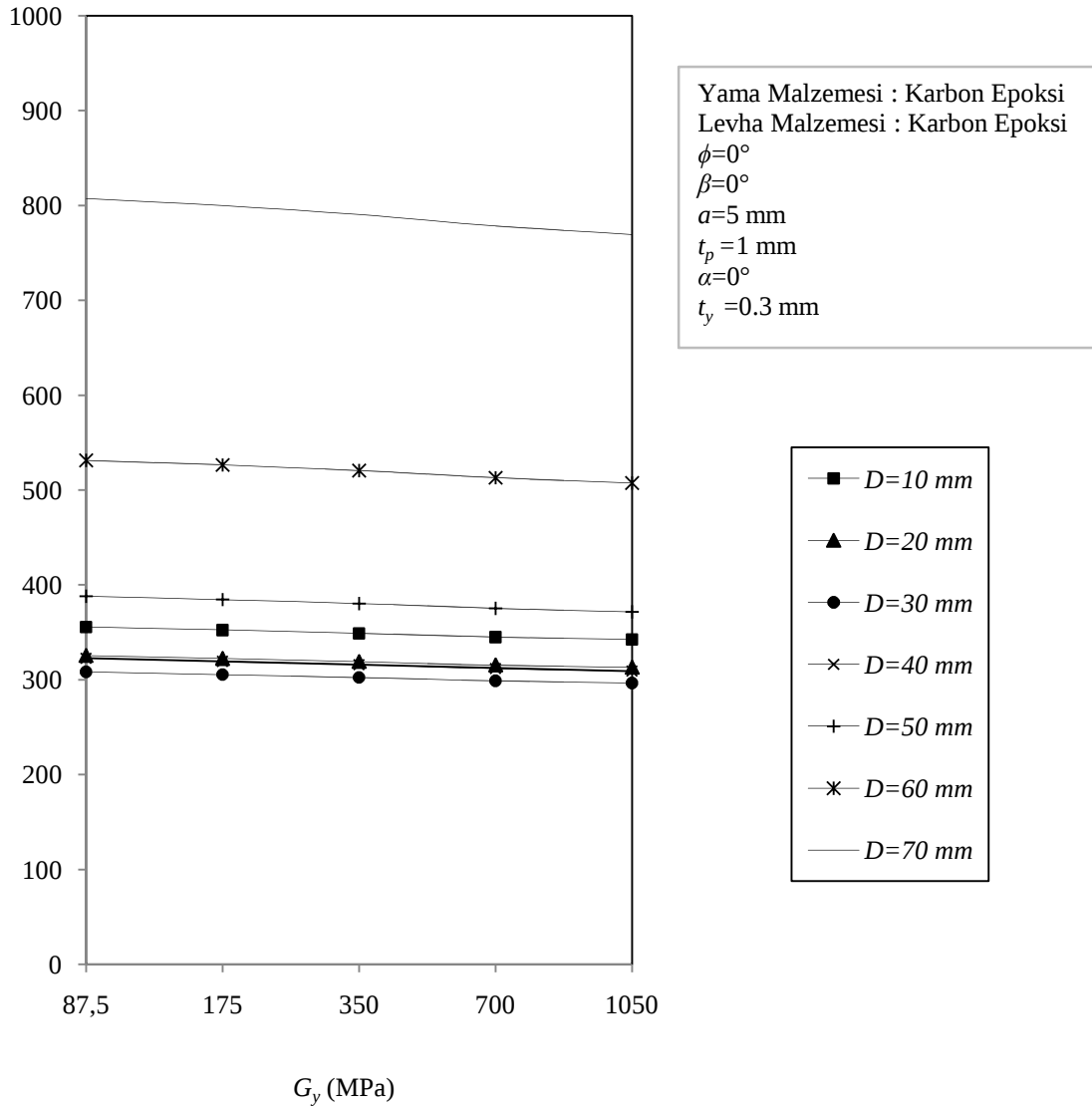
Şekil 7.53 Farklı çatlak açıları için K_{II} gerilme şiddet faktörünün yapıştırıcı Kayma modülü ile değişimi
 ($MPa\sqrt{mm}$).

Şekil 7.53'den görüldüğü gibi K_{II} değeri çatlak açısının artması ile artmıştır. K_I 'e paralel olarak G 'nin artması K_{II} 'yi de belirli bir oranda azaltmış olup, bu azalma miktarı çatlak açısından etkilenmemektedir.



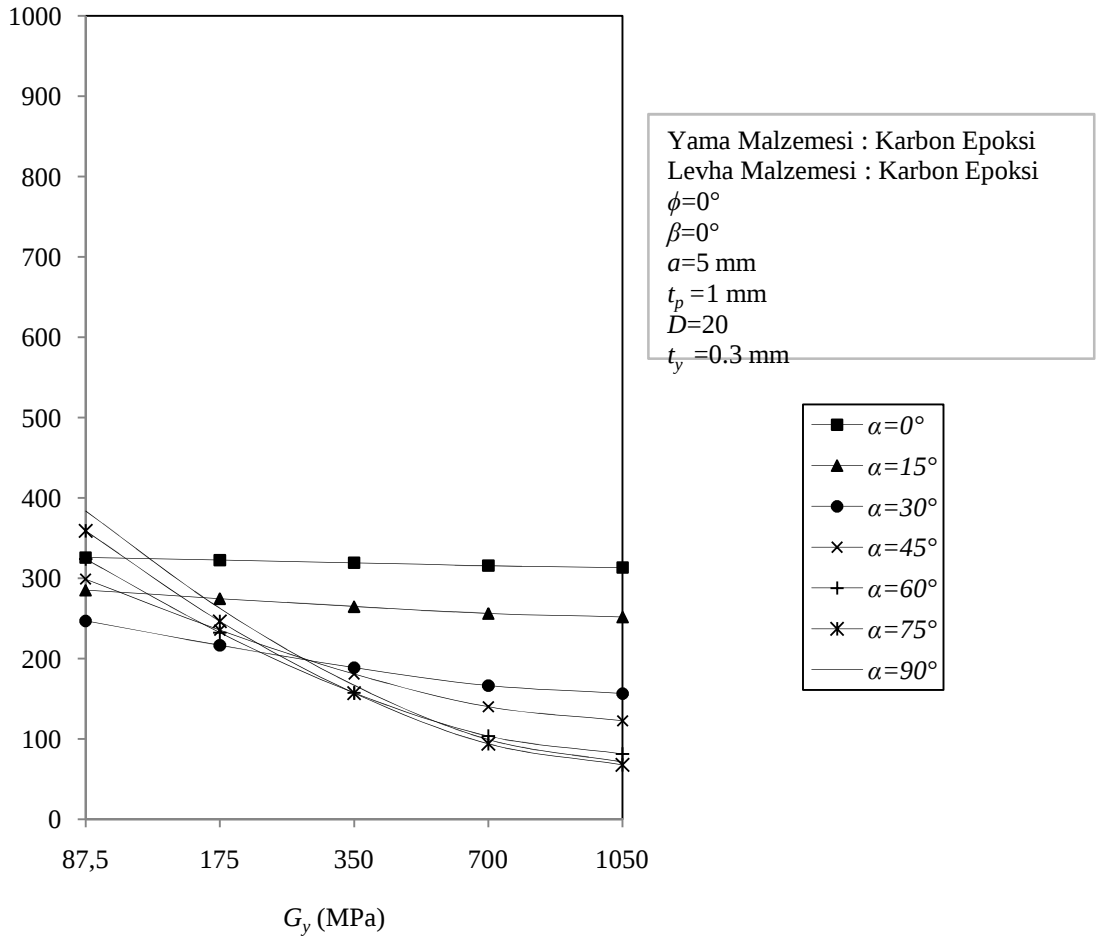
Şekil 7.54 Farklı çatlak boyları için K_I gerilme şiddet faktörünün yapıştırıcı kayma modülü ile değişimi
 ($\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$).

Şekil 7.54’de farklı çatlak boyları için K_I ile yapıştırıcı kayma modülünün değişimi verilmiştir. Çatlak boyunun artması ile K_I $a=20 \text{ mm}$ ’ye kadar azalmış, sonrasında ise çatlak boyunun artması ile çatlak levhanın serbest kenarına yaklaşmasından dolayı artış olmuştur. Yapıştırıcı kayma modülünün artması ile gerilme şiddet faktöründeki azalmanın özellikle büyük çatlak boylarında daha fazla olduğu görülmüştür. $a=5 \text{ mm}$ için $G_y=87.5 \text{ MPa}$ yerine $G_y=1050 \text{ MPa}$ kayma modülüne sahip bir yapıştırıcı kullanıldığında gerilme şiddet faktöründeki azalma $12.45 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$ iken, $a=35 \text{ mm}$ olduğu zaman bu azalma $52.08 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$ değerine ulaşmıştır.



Şekil 7.55 Farklı pim çapları için K_I gerilme şiddet faktörünün yapıştırıcı kayma modülü ile değişimi
 ($\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$).

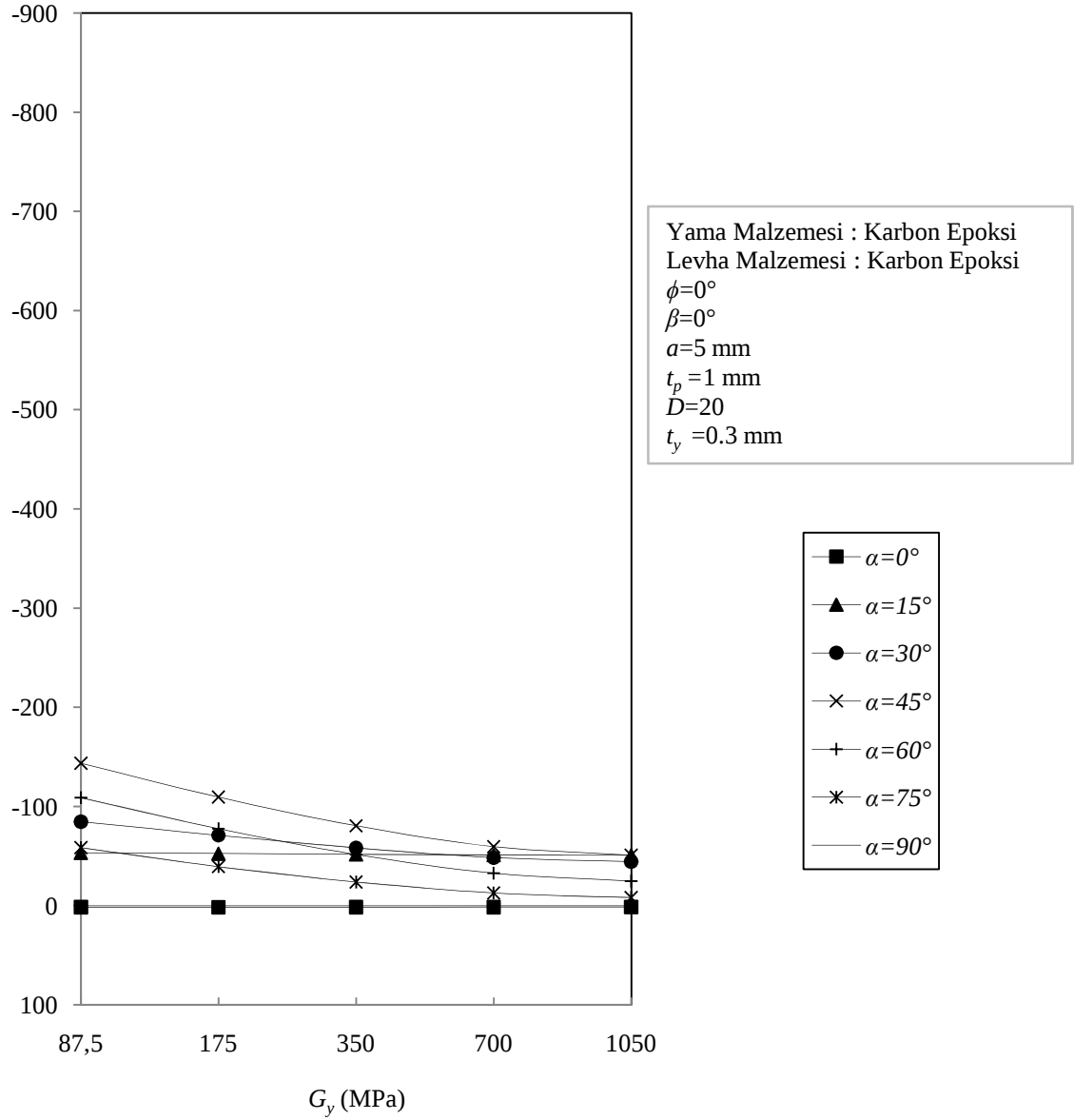
Şekil 7.55’de farklı pim çapları için gerilme şiddet faktörü K_I ’in yapıştırıcı kayma modülü ile değişimi verilmiştir. Pim çapının artması ile, G_y ’nin artmasına bağlı olarak K_I ’deki azalma daha fazla olmaktadır. Dolayısı ile özellikle büyük pim deliği çaplarında yapıştırıcı türü önem kazanmaktadır. $D=10\text{ mm}$ ’de $G_y=87.5\text{ MPa}$ yerine $G_y=1050\text{ MPa}$ Kayma modülüne sahip bir yapıştırıcı kullanıldığında K_I değeri $12.95\text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$ azalırken $D=70\text{ mm}$ ’de K_I ’deki azalma miktarı $38.08\text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$ ’dir.



Şekil 7.56 Farklı levha açıları için K_I gerilme şiddet faktörünün yapıştırıcı kayma modülü ile değişimi
 ($\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$).

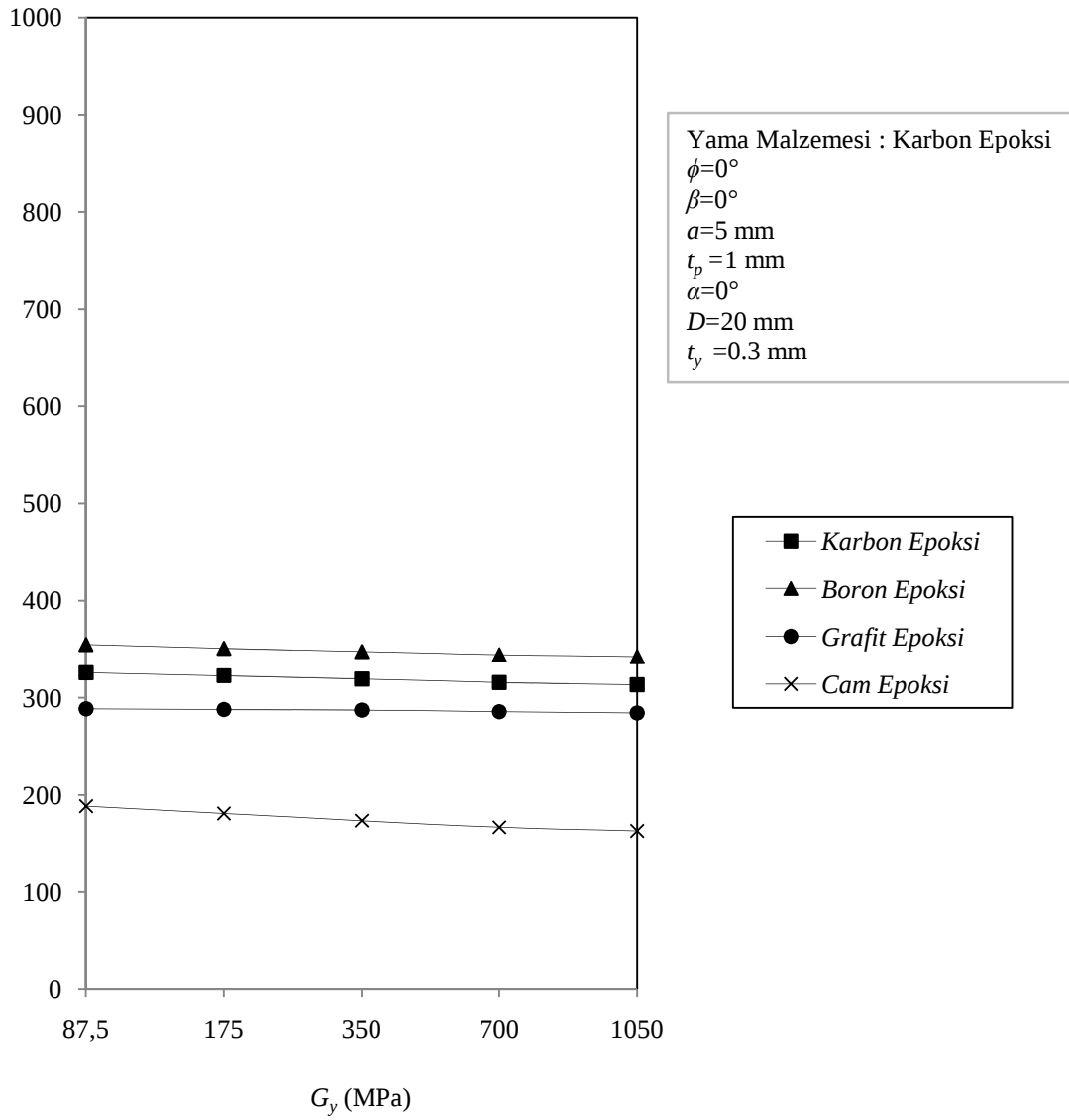
Şekil 7.56’da farklı levha açıları için gerilme şiddet faktörü K_I ’in yapıştırıcı kayma modülü ile değişimi gösterilmiştir. Buna göre levha açısının artması ile levha malzemesinin 1-doğrultusundaki Elastisite modülü düşmektedir. Buna bağlı olarak da yama malzemesinin çekme doğrultusundaki Elastisite modülü levhaya göre yüksek kalmakta ve çatlak açılma miktarı azalmaktadır. Levha açısının artması ile yapıştırıcı Kayma modülünün K_I üzerindeki etkisi de artmaktadır.

Yapıştırıcı Kayma modülünün K_I üzerindeki azalma etkisi üzerinde çatlak açısı ve çatlak boyu yanında, levha açısı daha büyük öneme sahiptir. Sonuçta Elastisite modülünün düşük olduğu malzemeler için, çatlak şekli ve boyutuna bakılmaksızın yüksek Kayma modülüne sahip yapıştırıcı kullanmak konstrüksiyon için büyük öneme sahiptir.



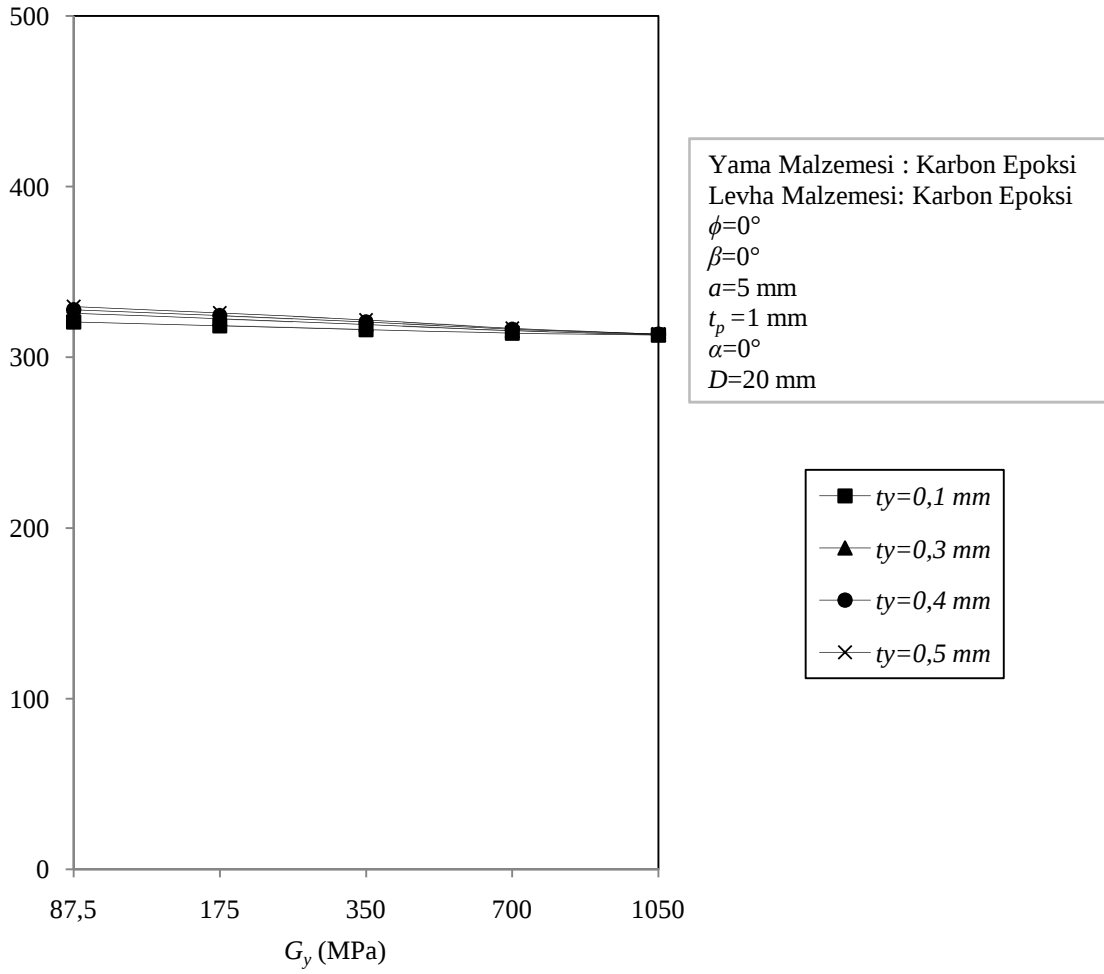
Şekil 7.57 Farklı levha açıları için K_{II} gerilme şiddet faktörünün yapıştırıcı kayma modülü ile değişimi
 ($\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$).

K_I 'de olduğu gibi yapıştırıcı Kayma modülünün artması K_{II} 'yi de azaltmıştır. Şekil 7.57'den görüleceği üzere $\alpha=45^\circ$ 'de K_{II} maksimum olup, $\alpha=0^\circ$ ve 90° 'de Mod I yüklemesi geçerli olduğundan değeri sıfırdır. K_{II} 'nin maksimum olduğu değer $\alpha=45^\circ$ için $G_y=87.5$ MPa iken $-143.69 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$ olarak hesaplanmıştır. $\alpha=45^\circ$ için $G_y=87.5$ MPa ile 1050 MPa arasındaki K_{II} farkı $92.83 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$ olarak elde edilmiştir.



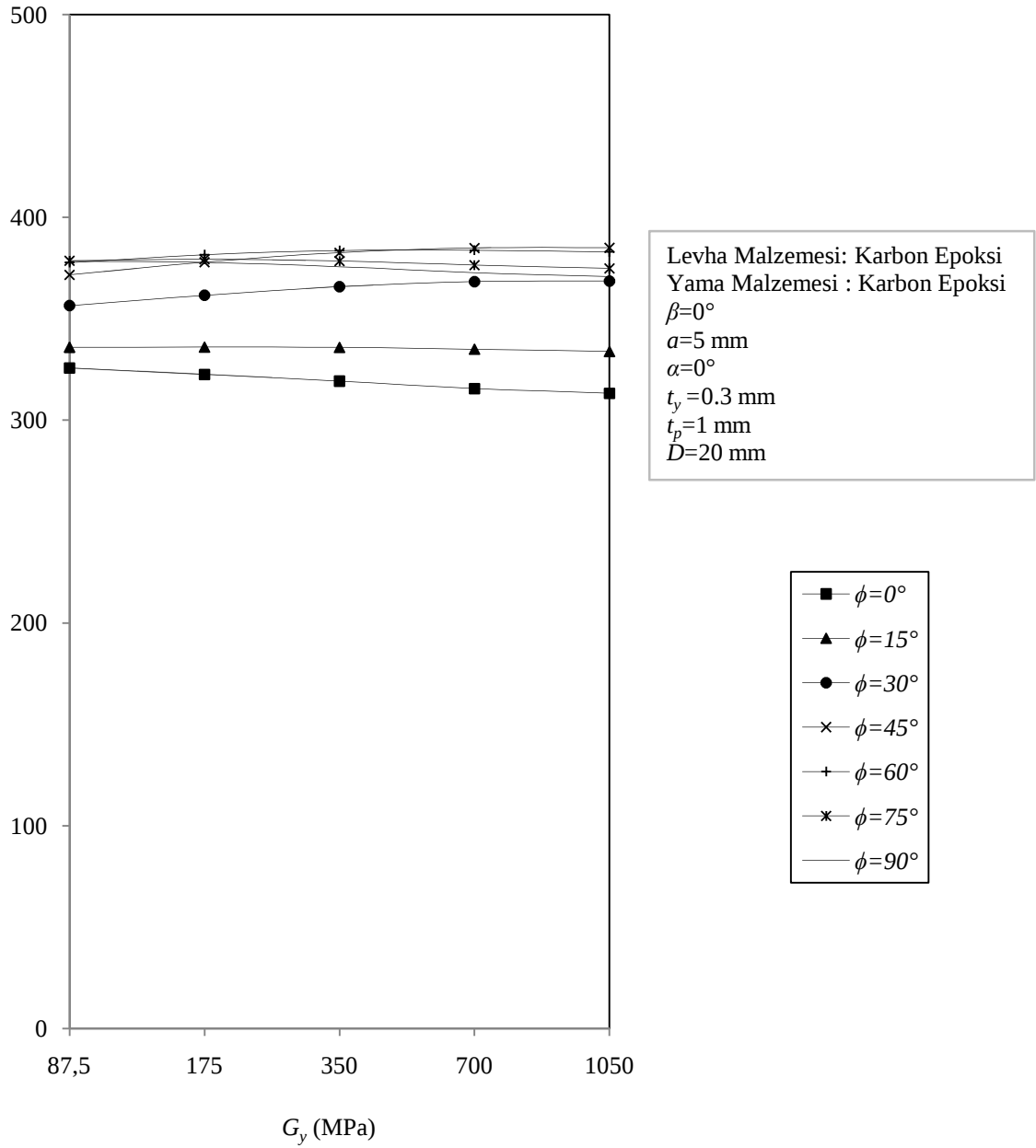
Şekil 7.58 Farklı levha malzemeleri için K_I gerilme şiddet faktörünün yapıştırıcı kayma modülü ile değişimi ($\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$).

Farklı levha malzemeleri için gerilme şiddet faktörü K_I 'in yapıştırıcı Kayma modülü ile değişimi Şekil 7.58'de gösterilmiştir. Yükleme doğrultusunda en düşük Elastisite modülüne sahip levha malzemesi Cam Epoksidir. $\alpha=0^\circ$ olduğundan dolayı yapıştırıcı kayma modülünün artışı ile K_I 'deki azalma miktarı en fazla Cam Epoksi için elde edilmiştir. Yapıştırıcı Kayma modülünün etkisinin en az olduğu malzeme Boron Epoksidir.



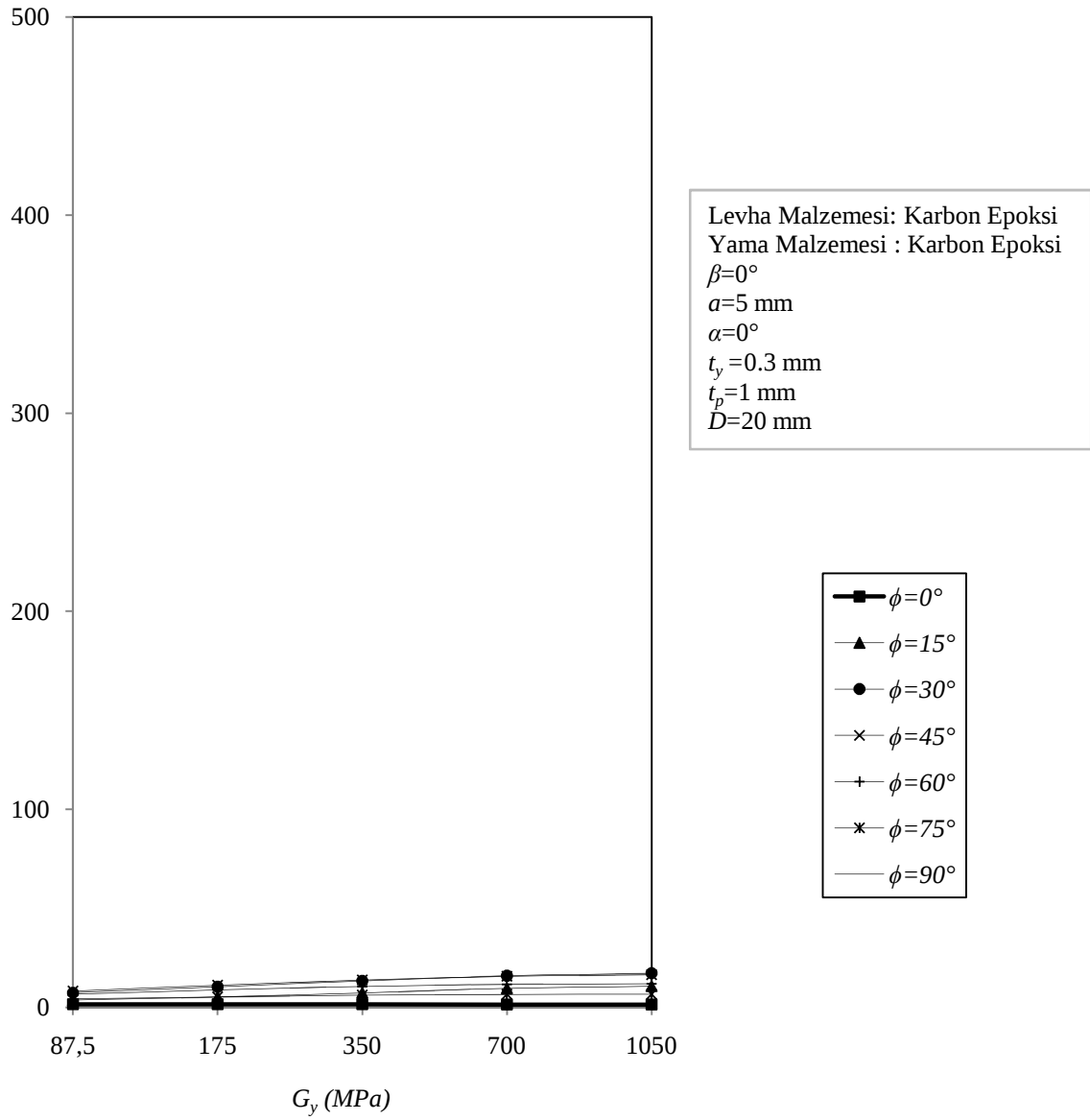
Şekil 7.59 Farklı yapıştırıcı kalınlıkları için K_I gerilme şiddet faktörünün yapıştırıcı kayma modülü ile değişimi ($\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$).

Yapıştırıcı kalınlığının K_I üzerindeki etkisi diğer parametreler yanında ihmal edilebilecek kadar düşüktür (Şekil 7.59). Ancak özellikle küçük yapıştırıcı Kayma modülü değerleri için bu etki biraz daha belirgindir. G_y 'nin artması ile bu değişim azalmaktadır. $G_y=1050\text{ MPa}$ maksimum değeri için t_y 'nin gerilme şiddet faktörü üzerinde bir etkisinin olmadığı görülmektedir. Yapıştırıcı Kayma modülünün gerilme şiddet faktörü üzerindeki azalma etkisi özellikle büyük yapışma kalınlığı için daha fazla olduğu söylenebilir. $t_y=0.5\text{ mm}$ için $G_y=87.5\text{ MPa}$ ile 1050 MPa arasındaki K_I farkı $16.5\text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$ iken $t_y=0.1\text{ mm}$ için bu fark $7.71\text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$ olarak hesaplanmıştır. Bu durumda yapıştırıcı kalınlığı ve yapıştırıcı malzeme seçiminde optimum şartların dikkate alınması gerekliliği ortaya çıkmaktadır.



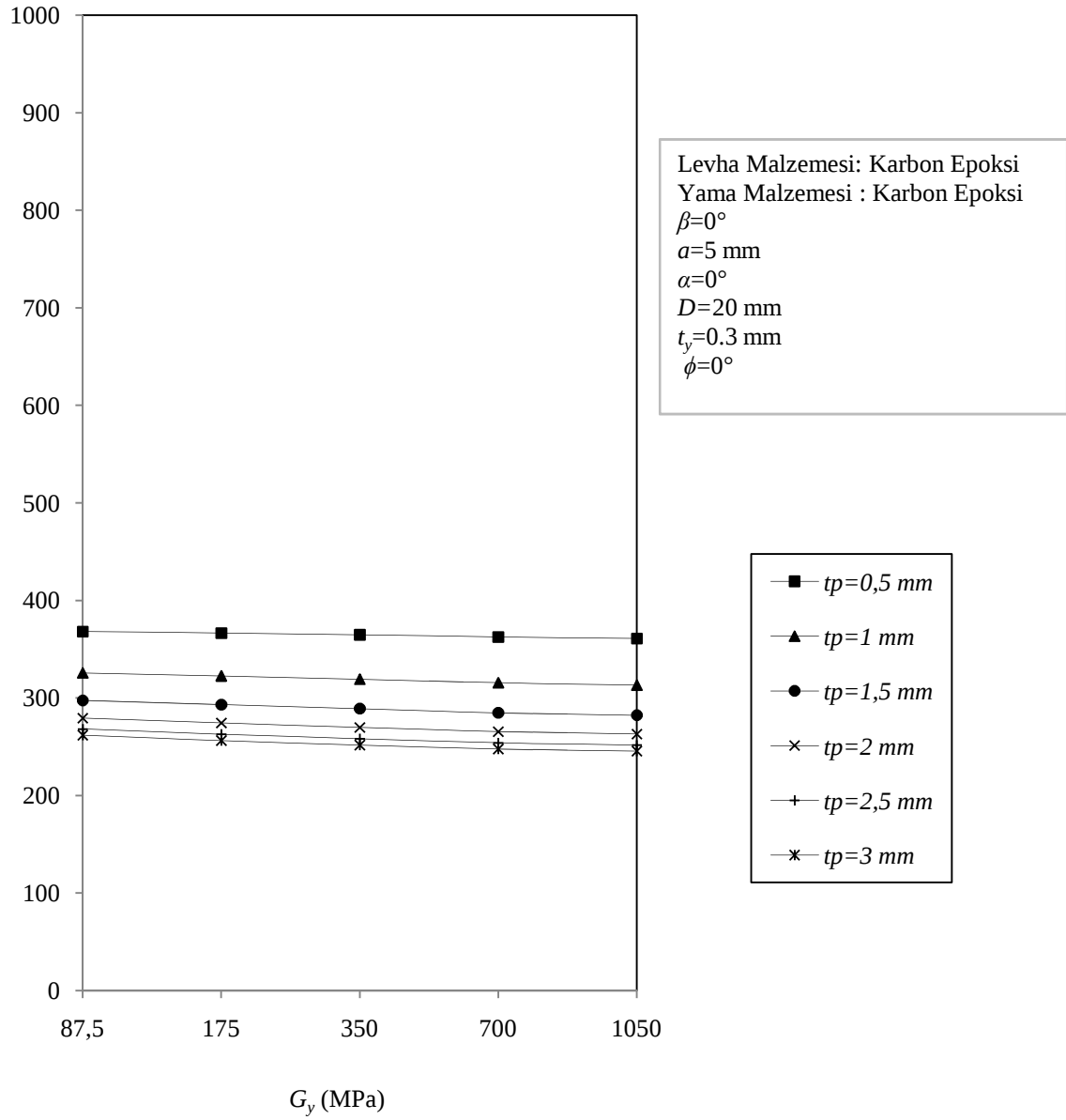
Şekil 7.60 Farklı yama açıları için K_I Gerilme şiddet faktörünün yapıştırıcı kayma modülü ile değişimi ($\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$).

Farklı yama açıları için gerilme şiddet faktörü K_I 'in yapıştırıcı Kayma modülü ile değişimi Şekil 7.60'da verilmiştir. Buna göre, yama açısı artar ise K_I yapıştırıcı Kayma modülü değişiminden daha az etkilenmektedir ve ihmal edilebilir seviyede düşüktür.



Şekil 7.61 Farklı yama açıları için K_{II} gerilme şiddet faktörünün yapıştırıcı kayma modülü ile değişimi
(MPa $\sqrt{mm}$).

Şekil 7.61’de farklı yama açıları için gerilme şiddet faktörü K_{II} ’nin yapıştırıcı Kayma modülü ile değişimi gösterilmiştir. Ancak K_{II} değeri K_I değerinin yanında ihmal edilebilecek derecede düşüktür. Ancak yapıştırıcı Kayma modülünün artması K_{II} değerinin $\phi=45^\circ$ ’ye kadar arttığı sonrasında ise azaldığı görülmektedir.



Şekil 7.62 Farklı yama kalınlıkları için K_I gerilme şiddet faktörünün yapıştırıcı kayma modülü ile değişimi ($MPa\sqrt{mm}$).

Farklı yama kalınlıkları için gerilme şiddet faktörü K_I 'in yapıştırıcı Kayma modülü ile değişimi Şekil 7.62'de gösterilmiştir. Buna göre, G_y 'nin artması K_I değerini az da olsa azaltmıştır. Bu değişimin üzerinde yama kalınlığının etkisi yoktur.

8. TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Yama ile tamir edilmiş çatlak içeren pim delikli levhada gerilme şiddet faktörleri, üç boyutlu sonlu elemanlar metodu ile hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir;

- Çatlak açısının değişimi incelendiğinde maksimum K_I değeri tüm ϕ değerleri için $\beta=30^\circ$ 'de elde edilmiştir. Ayrıca çatlak açısının artması mutlak değerce K_{II} değerini arttırmıştır.
- ϕ yama açısının artması $a=10$ mm'ye kadar K_I değerini artırırken daha sonra azaltmıştır.
- Çatlak boyunun artması ise K_I değerini 20 mm'ye kadar azaltmış daha sonra ise arttırmıştır. a 'nın artması K_{II} değerini $a=10$ mm'den sonra arttırmış olup, bu artışı K_I 'in yanında oldukça küçüktür.
- Pim delik çapının artması $D=40$ mm'ye kadar K_I değerini azaltmış, sonrasında ise arttırmıştır. Ancak ϕ 'nin artması ise a 'nın değişimine paralel olarak K_I 'i $D=40$ mm'ye kadar arttırıp, sonrasında azaltmıştır. K_{II} ise daha küçük değere sahip olup, pim çapı ile artmıştır.
- Pim ekseninden aynı uzaklıktaki çatlak uçları için hesaplanan gerilme şiddet faktörü değerleri karşılaştırıldığında, büyük delik çapının, büyük çatlak uzunluğu yanında daha önemli olduğu görülmüştür.
- Levha açısının artması K_I değerini arttırmış olup, $\alpha=15^\circ$ 'den sonra ϕ yama açısının K_I üzerindeki etkisi çok daha fazladır. Çatlak boyu ve pim çapının yanında levha açısı gerilme şiddet faktörü açısından önemli bir parametredir. Ayrıca $\alpha=45^\circ$ 'ye kadar K_{II} değeri artmış ve sonrasında azalmıştır.
- Karbon Epoksi yama malzemesi kullanıldığı zaman levha malzemeleri karşılaştırılırsa, en büyük K_I değeri Boron Epoksi için, en düşük ise Cam Epoksi için elde edilmiş olup, K_{II} üzerinde levha malzemesi değişiminin etkisi ihmal edilebilecek seviyede düşüktür.
- Düşük yama kalınlığında, yama açısındaki değişim K_I değerini daha fazla etkilemektedir. $\phi=45^\circ$ 'de K_{II} maksimum değere ulaşmıştır. Yama kalınlığının azalması K_{II} 'yi arttırmaktadır.

- Yama malzemesinde çekme doğrultusundaki Elastisite modülünün artması sonucu, yüksek değerler için (örneğin Boron Epoksi) yama açısının değişiminden K_I daha fazla etkilenmektedir. K_{II} 'nin yama açısı ile ilişkisi ise yama malzemesinin değişiminden etkilenmemektedir.
- $\phi=45^\circ$ 'ye kadar K_I yapıştırıcı kalınlığının değişiminden etkilenmez $\phi>45^\circ$ için ise yapıştırıcı kalınlığı arttıkça K_I artar. K_{II} ise K_I 'e göre çok küçük değerlerde kalmıştır.
- Yama kalınlığının artması K_I değerini azaltmıştır. Büyük çatlak açılarında yama kalınlığının artması K_I değerini daha fazla düşürmektedir. K_{II} içinde aynı durum söz konusudur.
- Büyük çatlak boylarında yama kalınlığının artması K_I değerini daha fazla etkileyerek önemli ölçüde azaltmıştır.
- Benzer şekilde delik çapının artması ile yama kalınlığının etkisi K_I üzerinde önem kazanmaktadır.
- Levha açısının artması çekme doğrultusundaki Elastisite modülünü düşürür. Dolayısı ile büyük levha açılarında yama kalınlığının etkisi daha fazladır. Ancak bu açılarda ($\alpha>60^\circ$) belirli bir kalınlık değerine kadar K_I değeri azalmakta ($t_p=2$ mm) daha sonra ise küçükte olsa bir artış göstermektedir.
- Levha açısına paralel olarak levha malzemesinin çekme doğrultusundaki Elastisite modülünün düşmesi, yama kalınlığının K_I üzerindeki etkisini arttırmaktadır.
- Yama malzemesinin çekme doğrultusunda Elastisite modülünün artması K_I değerini düşürmektedir. Maksimum K_I değerleri Cam Epoksi için elde edilmiştir. Çatlak açısındaki artış bu etkiyi değiştirmemiştir. K_{II} değeri K_I değerinden küçüktür ve K_I 'e benzer davranış göstermektedir.
- Büyük çatlak boyları ve pim çapları için yama malzemesi değişiminin K_I üzerindeki etkisi önem kazanmaktadır.
- Levha açısının artması ile çekme doğrultusundaki Elastisite modülü azalacağından büyük α değerleri için yama malzemesinin seçimi K_I üzerinde daha önemli bir parametredir. Büyük çatlak boyu ve pim çapı yanında yama malzemesinin değişiminin K_I üzerindeki etkisi daha fazladır.
- Elastisite modülü çekme doğrultusunda düşük levha malzemelerinde, yama malzemesinin K_I üzerindeki etkisini çok daha fazla artırır.

- Yama kalınlığının artması K_I değerini azaltmaktadır. Yama kalınlığının K_I üzerindeki azalma etkisi en fazla Boron Epoksi yama malzemesi için elde edilmiştir. Çekme doğrultusunda en büyük E değerine sahip Cam Epoksi yama malzemesinde ise yama kalınlığının etkisi en yüksektir.
- Yama malzemesinin değişimi, yama kalınlığının K_I üzerindeki etkisini değiştirmemektedir.
- Çatlak boyunun artması çatlak ucunu serbest kenara yaklaştıracığından K_I değerini arttıracaktır. Aynı şekilde yapıştırıcı kalınlığının artması da aynı şekilde gerilme şiddet faktörünü arttırmıştır. Ancak bu etki çok düşüktür.
- Çatlak açısı arttıkça, çatlak boyunun K_I üzerindeki etkisi ortadan kalkmaktadır. ($\beta=30^\circ$). Çatlak açısının artması hem K_I , hem de K_{II} değerini arttırmıştır.
- Bütün çatlak boylarında delik çapının artması değerini artırmıştır. $D<30$ mm için α 'nın artışı K_I 'i azaltmış, $D>30$ mm için ise artırmıştır.
- Pim çapı arttıkça çatlak açısının K_I üzerindeki etkisi azalmaktadır.
- $D>\sim 50$ mm'den sonra levha açısının K_I üzerindeki etkisi ortadan kalkmaktadır.
- $\alpha>30^\circ$ 'den sonra yapıştırıcı kalınlığının K_I üzerindeki etkisi daha fazladır. K_{II} üzerinde ise bu etki sadece $\alpha=45^\circ$ için vardır.
- Levha açısının büyük değerlerinde çatlak boyunun artışı K_I 'i daha fazla artırır. K_{II} 'de ise aynı durum $\alpha=45^\circ$ için maksimum değere kadar geçerlidir.
- K_I ve K_{II} için yapıştırıcı Kayma modülünün artması gerilme şiddet faktörünü azaltmaktadır. Çatlak açısının artması bu azalma oranını etkilememektedir.
- Büyük çatlak boylarında yapıştırıcı Kayma modülünün etkisi daha fazladır. Çatlak boyu arttıkça K_I 'deki azalma miktarı daha fazla olmaktadır.
- Benzer olarak pim çapının artması ile yapıştırıcı Kayma modülünün K_I üzerindeki etkisi artmaktadır.
- Büyük levha açılarında yapıştırıcı Kayma modülünün büyük olması K_I değerini daha fazla azaltmaktadır. Yapıştırıcı Kayma modülünün artması ile en büyük K_{II} değerleri $\alpha=45^\circ$ için elde edilmiştir.
- Cam epoksi levha malzemesi kullanıldığında yapıştırıcı Kayma modülünün K_I üzerindeki etkisi, diğer levha malzemelerine göre en fazladır.
- Yapıştırıcı kalınlığının artması K_I değerini arttırmaktadır. Düşük G_y değerleri için bu durum daha fazladır. G_y 'nin artması yapıştırıcı kalınlığının K_I üzerindeki etkisini

azaltmaktadır. $G_y=1050$ MPa maksimum değere ulaştığı zaman, yapıştırıcı kalınlığının K_I üzerindeki etkisi kalmamıştır.

- Yama açısı artar ise K_I , yapıştırıcı Kayma modülü değişiminden daha az etkilenir. Ancak bu etki ihmal edilebilecek seviyede düşüktür.
- Yapıştırıcı Kayma modülü artışının K_I 'i azaltması üzerinde yama kalınlığının herhangi bir etkisi yoktur.

Sayısal olarak yapılan bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda belirtilen maddeler için de tekrarlanabilir.

- Tek yüz yama çift yüz yama yapılabilir.
- Tabakalı kompozit malzemeler için analizler tekrarlanabilir.
- Seri ve paralel pimli bağlantılar için analizler tekrarlanabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Kılıç,E.**, “Kompozit Malzemelerden Yapılan Yaprak Yayların Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İzmir, (2006).
- [2] **Aktaş,A.,Demircioğlu, K.T., Arslan, M., Soutis, C.**, “Cıvata Bağlantılı Karbon/Epoksi Kompozit Plakaların Kademeli Hasar Analizi”, 2. Ulusal Tasarım İmalatve Analiz kongresi, 11-12 Kasım 2010, Balıkesir.
- [3] **Chang, F.K., Chang, K.Y.**, “A Progresive Damage Model for Laminated Composites Containing Stress Concentrations”, Journal of Composite Materials, 21;834-855, (1987).
- [4] **Chang, F.K., Chang, K.Y.**, “Post-Failure Analysis of Bolted Composite Joints in Tension or Shear-out Mode Failure”, Journal of Composite Materials, 21; 809-833, (1987).
- [5] **Dano, M.L., Gendron, G., Picard, A.**, “Stress and Failure Analysis of Mechanically Fastened Joints in Composite Laminates”, Composite Structures, 50, 287-296, (2000).
- [6] **Lessard, L., Shokrieh, M.M.**, “Two-Dimensional Modelling of Composite Pinned-Joint Failure”, Journal of Composite Materials, 29: 671-697, (1995).
- [7] **Ayatollahi, M.R., Hashemi, R.**, “Mixed Mode Fracture in an Inclined Center Crack Repaired by Composite Patching”, Composite Structures, 81, 2, 264-273, (2007).
- [8] **Belhouari, M., Bouiadjra, B.B., Megueni, A., Kaddouri, K.**, “Comparison of Double and Single Bonded Repairs to Symmetric Composite Structures: A Numrical Analysis”, Composite Structures, 65, 1, 47-53, (2004).
- [9] **Bouiadjra, B.B., 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).
- [10] **Seo, D.C., Lee, J.J.**, “Fatigue Crack Growth Behavior of Cracked Aluminum Plate Repaired With Copposite Patch”, Composite Structures, 57, 1-4, 323-330, (2002).

- [11] **Schubbe, J.J., Mall, S.**, “Investigation of a Cracked Thick Aluminum Panel Repaired With a Bonded Composite Patch”, *Engineering Fracture Mechanics*, 63, 3, 305-323, (1999).
- [12] **Jones, R., Chiu, W.K.**, “Composite Repairs to Cracks in Thick Metallic Components”, *Composite Structures*, 44, 1, 17-29, (1999).
- [13] **Aktaş, A., Orhan, S.**, “Pimli Bağlantılarda Çatlak İlerleme Yönünün Sonlu Elemanlar Metodu ile Bulunması”, *G.Ü. Fen Bilimleri Dergisi*, 16, 4: 751-757, (2003).
- [14] **Liging, W., Bingzheng, G.**, Numerical Computation of Stress Intensity Factor for Bolt-hole Corner Crack in Mechanical Joints”, *Chinese Journal of Aeronautics*, 21, 411-416, (2008).
- [15] **Fawaz, A.S., Anderson, B.**, “ Accurate Stress Intensity Factor Solutions for Corner Cracks at a Hole”, *ScienceDirect, Engineering Fracture Mechanics*, 71, 1235-1254, (2004).
- [16] **Horng, L.T., Ju, H.S.**, “Behaviors of a Single Crack in Multiple Bolted Joints”, *International Journal of Solids and Structures*, International Journal of Solids and Structures, 36, 4055-4070, (1999).
- [17] **Pekbey, Y.**, “ Pim Bağlantılı Tabakalı Kompozit Plakada Ön Gerilme Momenti ile Geometrik Parametre Değişiminin Hasar Analizine Etkisi”, 8. Uluslar arası Kırılma Konferansı Bildiriler Kitabı, 7-9 Kasım 2007.
- [18] **Oudad, W., Bouiadjra, B.B., Belhouari, M., Touzain, S., Feaugas, X.**, “Analysis of the Plastic Zone Size ahead of Repaired Cracks with Bonded Composite Patch of Metallic Aircraft Structures”, *Computational Materials Science*, 46, 4, 950-954, (2011).
- [19] **Albedah, A., Bouiadjra, B.B., Mhamdia, R., Benyahia, F., Es-Saheb, M.**, “Comparison Between Double and Single Sided Bonded Composite Repair With Circular Shape”, *Materials and Design*, 32, 2, 996-1000, (2011).
- [20] **Ouinass, D., Hebbbar, A., Bouiadjra, B.B., Belhouari, M., Serier, B.**, “Numerical Analysis of The Stress Intensity Factors for Repaired Cracks From a Notch With Bonded Composite Semicircular Patch”, *Composites: Part B*, 40, 8, 804-810, (2009).

- [21] **Gu, L., Kasavajhala, A.R.M., Zhao, S.,** “Finite Element Analysis of Cracks in Aging Aircraft Structures with Bonded Composite-Patch Repairs”, *Composites: Part B*, 42, 3, 505-510, (2011).
- [22] **Ouinas, D., Bouiadjra, B.B., Achour, B., Benderdouche, N.,** “Modelling of a Cracked Aluminium Plate Repaired with Composite Octagonal Patch in Mod I and Mixed Mode”, *Materials and Desing*, 30, 3, 590-595, (2009).
- [23] **Bezzrouki, M., Bouiadjra, B.B., Ouinas, D.,** “SIF for Cracks Repaired with Single Composite Patch Having Two Adhesive Bands and Double Symmetric One in Aircraft Structures”, *Computational Materials Science*, 44, 2, 542-546, (2008).
- [24] **Madani, K., Touzain, S., Feaugas, X., Benguediab, M., Ratwani, M.,** “Numerical Analysis for The Determination of The Stress Intensity factors and Crack Opening Displacements in Plates Repaired with Single and Double Composite Patches”, *Computational Materials Science*, 42, 3, 385-393, (2008).
- [25] **Bouiadjra, B.B., fekirini, H., Serier, B., Benguediab, M.,** “Numerical Analysis of the Beneficial Effect Of The Double Synnetric Patch Repair Compored to Single One in Aircraft Structures”, *computational Materials science*, 38, 824, (2007).
- [26] **Turaga, V.R.S., Ripudaman, S.,** “Modelling of Patch Repairs to A Thin Cracked Sheet”, *Engineering Fracture Mechanics*, 62, 267, (1999).
- [27] **Turan, K.,** “Çözülebilien Bağlantılı Kompozit Plakaların Mekanik Davranışlarının Analizi”, *Doktora Tezi, Elazığ*, (2009).
- [28] **Okutan, B.,** “Stress and Failure Analysis of Laminated Composite Pinned Joints”, *İzmir*, (2001).
- [29] **Turgut, A. Geçit, R.,** “Extention of Finite Strip Bonded to Rigid Support”, *Computational Mechanics*, v.3, 398-410,(1987).
- [30] **Kaman, M.O.,** “Fracture Toughness Analysis of Carbon Fiber Reinforced Composite Plates”, *13.th International Materials Symposium*, 13-15 October, Denizli, Turkey, 671-679, (2010).
- [31] **Şahin, Y.,** “Kompozit Malzemelere Giriş”, *Seçkin yayıncılık, Ankara* (2006).
- [32] **Saçak, M.,** “Polimer Teknolojisi”, *Gazi Kitapevi, Ankara*, 277-278, 292-294, 226-227, (2005).

- [33] **Yayla, P.**, “Kırılma Mekaniği”, Çağlayan Kitapevi, (2007).
- [34] **Ersoy, Y.H.**, “Kompozit Malzeme”, Literatür Yayıncılık, İstanbul, (2001).
- [35] **Uğuz, A.**, “ Kırılma Mekaniğine Giriş”, Uludağ Üniversitesi Basımevi, Bursa, (1996).
- [36] **Aydın, S.**, “Kırılma Mekaniği Problemlerinin Sonlu Elmanlar Metodu ile Analizi”, Doktora Semineri, Elazığ, (2009).
- [37] **Kinloch, A.J., Wong, Y., Williams, J.G., Yayla, P.**, “The Mixed Mode Delemination of Fibre Composite Materials”, Composite Science and Technology, vol.47, pp.225-237, (1993).
- [38] **Yayla, P.**, “ Elyaf Takviyeli Polimer Esaslı Kompozit Malzemelerde Değişik Yükleme Koşullarında Oluşan kırılma Yüzeylerinin İncelenmesi”, 6.Denizli Malzeme sempozyumu, Denizli, 12-14 Nisan 1995.
- [39] **Kim, Jeong-Ho., Paulino, H.G.**, “Finite Element Evaluation of Mixed Mode Stress Intensity Factrors in Functionally Graded Materials”, International Journal for Numerical Methods in Engineering, .2002;53:1903-1935.
- [40] **ANSYS.12.1**, “ Academic Teaching Introductory Help Menu”, (2009).
- [41] **Bao, R., Zhang, X., Yahya, M.A.**, “Evaluating Stress Intensity Factors Due to WeLd Residual Stress by The Weight Function and Finite Element Methods”, Emgineering Fracture Mechanic, 77(2010) 2550-2566.
- [42] **Ozkan, U. Kaya, A.c.Loghin, A.Ayhan, A.O.Nied,H.F.**, “ Fracture Analysis of Cracks in Anisotropic Materials Using 3DAF of ANSYS”, IMECE2006-15539, Proceedings of IMECE 2006, ASME Applied Mechanics Division 257 (2006), 569-580.
- [43] **Chukwujekwu Okafor, Hari Bhogapurapu**, “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 Volume 76, Pages 138-50, Issues 1-2, October 2006.
- [44] **M.R. Ayatollahi, R. Hashemi**, “Mixed mode fracture in an inclined center crack repaired by composite patching”, Compos Struct 81 (2007) 264–273.
- [45] **H. Hosseini-Toudeshkya,* M.A. Ghaffaria and B. Mohammadib**, “Fatigue propagation of induced cracks by stiffeners in repaired panels with composite patches”, Procedia Engineering 10 (2011) 3285–3290.

- [46] **Gu, L., Kasavajhala, A.R.M., Zhao, S.**, “Finite Element Analysis of Cracks in Aging Aircraft Structures with Bonded Composite-Patch Repairs”, Composites: Part B, Vol. 42, p. 505, 2011.
- [47] **Kaya, A. C. and Erdogan, F.**, “Stress intensity factors and COD in an orthotropic strip,” International Journal of Fracture, Vol. 16, No. 2, pp. 171-190, (1980).
- [48] **Kaman, M. O., Gündüz, Y., Turan, K.**, “Kompozit Yama İle Tamir Edilmiş Pim Delikli Levhalarda Çatlak Problemi”, I.Ulusal Ege Kompozit Malzemeler Sempozyumu, 17-19 Kasım 2011.
- [49] **Kaman, M. O., Cetişli, F.**, “Yama ile Tamir Edilmiş Kenar Çatlak İçeren Kompozit Levha Probleminin Sayısal Analizi”, 9.Uluslararası Kırılma Konferansı, 19-21 Ekim 2011

ÖZGEÇMİŞ

Yunus Gündüz 1974 yılında Elazığ'da doğdu. İlk, Orta ve Lise öğrenimini Adana'da tamamladı. 1993 yılında Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi makine Mühendisliği bölümünü kazanarak; 1997 yılında mezun oldu.

İlk olarak 1997-1998 yılları arasında Elazığ Toyota Elpa Plaza'da Servis Müdürü olarak çalıştı. Sonrasında 2000-2005 yılları arasında Sezgin Elektrik Enerji A.Ş'de Üretim ve Planlama Mühendisi olarak çalıştı. 2005 yılından itibaren Mey Alkollü İçkiler San. Tic. A.Ş Elazığ Şarap Fabrikasında Teknik Sorumlu olarak halen çalışmaktadır.

Evli ve iki çocuk babasıdır.