

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇATLAKLI KOMPOZİT EĞRİ KİRİŞLERİN STATİK VE
DİNAMİK DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

ERHAN ÖZÇARE
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2017

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇATLAKLI KOMPOZİT EĞRİ KİRİŞLERİN
STATİK VE DİNAMİK DAVRANIŞININ
İNCELENMESİ

ERHAN ÖZÇARE
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
PROF. DR. HASAN KURTARAN

GEBZE

2017

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

**INVESTIGATION OF STATIC AND
DYNAMIC BEHAVIOR OF CRACKED
COMPOSITE CURVED BEAM**

ERHAN ÖZÇARE
**A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE**
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

THESIS SUPERVISOR
PROF. DR. HASAN KURTARAN

GEBZE
2017



GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 22/06/2017 tarih ve 2017/34 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 20/07/2017 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Erhan ÖZÇARE 'nin tez çalışması Makine Mühendisliği Bölümü Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. Hasan KURTARAN

ÜYE

: Prof. Dr. Halit S. TÜRKMEN

ÜYE

: Doç. Dr. Ahmet Sinan ÖKTEM

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

Doç. Dr. Arif Çağdaş AYDINOĞLU
Gebze Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖZET

Bu tez kapsamında farklı eğrilik değerlerine sahip çatlaklı kirişlerin statik ve dinamik davranışları incelenmiştir. Kirişlerin statik ve dinamik analizleri sonlu elemanlar yazılımı olan Abaqus kullanılarak yapılmıştır. Farklı eğrilik değerlerine sahip çatlaklı izotropik yapıdaki kirişler için gerilme yoğunluk faktörü, yer değiştirme, ve gerilme değerleri elde edilmiştir. Elde edilen değerler literatürle karşılaştırılmış ve sonuçların uyumlu olduğu gözlenmiştir. Farklı eğrilik değerlerine sahip kompozit çatlaklı kirişlerde farklı kompozit açıları ve çatlak derinliği oranı (çatlak derinliği/kiriş yüksekliği) için yer değiştirme, gerilme ve doğal frekans değerleri incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çatlak, Kompozit Eğri Kiriş, Dinamik Analiz, Kırılma Mekaniği, Gerilme Yoğunluğu Faktörü.

SUMMARY

In this work, static and dynamic behavior of cracked composite beams with different curvature are investigated. Static and dynamic analyses of the cracked beams are conducted using finite element software Abaqus. Stress intensity factor, displacement and stress values are obtained for isotropic cracked beams with different curvatures. Results are compared with literature and good agreement is obtained. Then, cracked composite beam with different curvatures is analyzed. Effect of crack depth ratio (crack depth / beam height), layer orientation and curvature on static and dynamic behavior is investigated.

Key Words: Cracked, Composite Curved Beam, Dynamic Analysis, Fracture Mechanics, Stress Intensity Factor.

TEŞEKKÜR

Bu tezi yazmamda bana yol gösteren ve yardım eden danışmanım Prof. Dr. Hasan KURTARAN'a teşekkür ederim.

Tez çalışmam sırasında tecrübelerinden yararlandığım Arş. Gör. Gökçe AKGÜN, Arş. Gör. Özgür KALBARAN ve dostum Makine Mühendisi Fazıl KÖPRÜ'ye teşekkür ederim.

Hayatım boyunca bugünlere gelebilmemde maddi ve manevi desteklerini hiç eksik etmeyen anne ve babama çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
TABLolar DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Genel	1
1.2. Literatür Araştırması	2
1.3. Tezin Amacı ve Bölümleri	3
2. KIRILMA MEKANİĞİ	5
2.1. Lineer Elastik Kırılma Mekanikği	6
2.1.1. Enerji Yaklaşımı	6
2.1.2. Gerilme Yoğunluğu Yaklaşımı	7
2.2. Elasto-Plastik Kırılma Mekanikği	9
3. ÇÖZÜM METODU	10
3.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi	10
3.2. Çatlaklı Bölgenin Modellenmesi	11
4. SAYISAL ÇALIŞMALAR	16
4.1. İzotrop Düz Kiriş İçin Gerilme Yoğunluğu Faktörünün Doğrulanması	16
4.2. İzotrop Eğri Kiriş İçin Gerilme Yoğunluğu Faktörünün Doğrulanması	17
4.3. Çok Çatlaklı İzotrop Düz Kirişin Statik Doğruluk Analizi	25
4.4. Çok Çatlaklı İzotrop Düz Kirişin Dinamik Doğruluk Analizi	26
4.5. Farklı Eğrilik Değerlerine Sahip Çatlaklı Kompozit Kirişlerin Statik Analizi	29

4.6. Farklı Eğrilik Değerlerine Sahip Çatlaklı Kompozit Kirişlerin Dinamik Analizi	36
5. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME	47
KAYNAKLAR	49
ÖZGEÇMİŞ	52

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler ve Açıklamalar

Kısaltmalar

$\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{xy}$	: Gerilmeler
E	: Elastik modülü
G	: Kayma modülü
ν	: Poisson oranı
β	: Düzeltme faktörü
K	: Gerilme yoğunluk faktörü
K_{IC}	: Kırılma tokluğu
θ	: Eğrilik açısı
R	: Eğrilik yarıçapı
L	: Kiriş uzunluğu
W	: Kiriş yüksekliği
B	: Kiriş genişliği
a	: Çatlak derinliği
u_x, u_y, u_z	: Yer değiştirmeler
ϕ	: Kompozit açısı

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
1.1: Farklı yapılarda kırılma hasarları.	1
2.1: Çekme gerilmesi altında eliptik çatlaklı levha.	5
2.2: Çekme gerilmesi uygulanan eliptik çatlaklı sonsuz kalınlıkta ($W \gg 2a$) levha.	7
2.3: Çatlak bölgesinde oluşan gerilmeler.	8
2.4: Kırılma türleri.	8
3.1: Kiriş sınır koşulları.	10
3.2: Üç boyutlu ve 8 nodlu lineer eleman.	11
3.3: İki ve üç boyutta çatlak modelleme.	11
3.4: Dikiş (seam) komutu.	12
3.5: Çatlak bölgesinde gerilme hesabı için yöntem seçimi.	12
3.6: Gerilme yoğunluğu faktörü hesabı için ayarlar.	13
3.7: Çatlaklı bölge.	14
3.8: Çatlaklı bölgenin incelenmesi.	14
3.9: Gerilme yoğunluğu faktörü hesabı için çatlaklı bölgenin ağ (mesh) yapısı.	15
3.10: İlk 10 kontur için gerilme yoğunluğu faktörleri.	15
4.1: Çatlaklı düz kirişin geometri ve boyut özellikleri.	16
4.2: Çatlaklı eğri kirişin geometri ve boyut özellikleri.	18
4.3: Eğrilik yarıçapının gerilme yoğunluğu faktörüne etkisi ($a/W = 0,125$).	18
4.4: Eğrilik yarıçapının gerilme yoğunluğu faktörüne etkisi ($a/W = 0,25$).	18
4.5: Eğrilik yarıçapının gerilme yoğunluğu faktörüne etkisi ($a/W = 0,375$).	19
4.6: Eğrilik yarıçapının gerilme yoğunluğu faktörüne etkisi ($a/W = 0,5$).	19
4.7: Farklı çatlak derinliği oranlarında ve eğrilik değerlerinde gerilme yoğunluğu faktörü.	20

4.8:	Farklı çatlak boyutlarında ve eğrilik değerlerinde orta noktanın yer değiştirmesi.	20
4.9:	Farklı çatlak boyutlarında ve eğrilik değerlerinde orta noktadaki gerilme.	21
4.10:	Eğrilik açısının gerilme yoğunluğu faktörüne etkisi ($a/W = 0,125$).	21
4.11:	Eğrilik açısının gerilme yoğunluğu faktörüne etkisi ($a/W = 0,25$).	22
4.12:	Eğrilik açısının gerilme yoğunluğu faktörüne etkisi ($a/W = 0,375$).	22
4.13:	Eğrilik açısının gerilme yoğunluğu faktörüne etkisi ($a/W = 0,5$).	23
4.14:	Farklı çatlak boyutlarında ve eğrilik açılarında gerilme yoğunluğu faktörü.	23
4.15:	Farklı çatlak boyutlarında ve eğrilik açılarında orta noktanın yer değiştirmesi.	24
4.16:	Farklı çatlak boyutlarında ve eğrilik açılarında orta noktadaki gerilme.	24
4.17:	Çoklu çatlaklı ankastre düz kiriş için geometri ve boyut özellikleri.	25
4.18:	Çoklu çatlaklı ankastre düz kirişin statik doğruluk analizi.	26
4.19:	Çoklu çatlaklı ankastre izotrop düz kirişin dinamik doğruluk analizi.	27
4.20:	Düz, izotrop kirişin birinci doğal frekansı.	27
4.21:	Düz, izotrop kirişin ikinci doğal frekansı.	28
4.22:	Düz, izotrop kirişin üçüncü doğal frekansı.	28
4.23:	Eğri kompozit kiriş için geometri ve boyut özellikleri.	29
4.24:	Eğri kiriş için yükleme ve sınır koşulları.	30
4.25:	Çatlak derinliği oranı ve eğrilik oranına göre orta noktanın yer değiştirmesi ([0/0/0/0]).	30
4.26:	Çatlak derinliği oranı ve eğrilik oranına göre orta noktanın yer değiştirme oranı ([0/0/0/0]).	31
4.27:	Çatlak derinliği oranı ve eğrilik oranına göre orta noktanın yer değiştirmesi ([0/90/90/0]).	31
4.28:	Çatlak derinliği oranı ve eğrilik oranına göre orta noktanın yer değiştirme oranı ([0/90/90/0]).	32
4.29:	Çatlak derinliği oranı ve eğrilik oranına göre orta noktanın yer değiştirmesi ([-45/45/45/-45]).	32

4.30:	Çatlak derinliği oranı ve eğrilik oranına göre orta noktanın yer değiştirme oranı ($[-45/45/45/-45]$).	33
4.31:	Çatlak derinliği oranı ve kompozit açılarına göre orta noktanın yer değiştirmesi ($R/L = \infty$).	33
4.32:	Çatlak derinliği oranı ve kompozit açılarına göre orta noktanın yer değiştirme oranı ($R/L = \infty$).	34
4.33:	Çatlak derinliği oranı ve kompozit açılarına göre orta noktanın yer değiştirmesi ($R/L = 0,636$).	34
4.34:	Çatlak derinliği oranı ve kompozit açılarına göre orta noktanın yer değiştirme oranı ($R/L = 0,636$).	35
4.35:	Çatlak derinliği oranı ve kompozit açılarına göre orta noktanın yer değiştirmesi ($R/L = 0,337$).	35
4.36:	Çatlak derinliği oranı ve kompozit açılarına göre orta noktanın yer değiştirme oranı ($R/L = 0,337$).	36
4.37:	Eğri kompozit giriş için geometri ve boyut özellikleri.	37
4.38:	Eğri kompozit giriş dinamik analizi için çatlak konumları.	37
4.39:	Üçüncü çatlak konumunun birinci doğal frekansa etkisi ($[0/0/0/0]$).	38
4.40:	Üçüncü çatlak konumunun ikinci doğal frekansa etkisi ($[0/0/0/0]$).	38
4.41:	Üçüncü çatlak konumunun üçüncü doğal frekansa etkisi ($[0/0/0/0]$).	39
4.42:	Üçüncü çatlak konumunun birinci doğal frekansa etkisi ($[0/90/90/0]$).	39
4.43:	Üçüncü çatlak konumunun ikinci doğal frekansa etkisi ($[0/90/90/0]$).	40
4.44:	Üçüncü çatlak konumunun üçüncü doğal frekansa etkisi ($[0\ 90\ 90\ 0]$).	40
4.45:	Üçüncü çatlak konumunun birinci doğal frekansa etkisi ($[-45/45/45/-45]$).	41
4.46:	Üçüncü çatlak konumunun ikinci doğal frekansa etkisi ($[-45/45/45/-45]$).	41
4.47:	Üçüncü çatlak konumunun üçüncü doğal frekansa etkisi ($[-45/45/45/-45]$).	42
4.48:	Üçüncü çatlak konumunun birinci doğal frekansa etkisi ($R/L = \infty$).	42
4.49:	Üçüncü çatlak konumunun ikinci doğal frekansa etkisi ($R/L = \infty$).	43
4.50:	Üçüncü çatlak konumunun üçüncü doğal frekansa etkisi ($R/L = \infty$).	43
4.51:	Üçüncü çatlak konumunun birinci doğal frekansa etkisi ($R/L = 0,636$).	44

4.52:	Üçüncü çatlak konumunun ikinci doğal frekansa etkisi ($R/L = 0,636$).	44
4.53:	Üçüncü çatlak konumunun üçüncü doğal frekansa etkisi ($R/L = 0,636$).	45
4.54:	Üçüncü çatlak konumunun birinci doğal frekansa etkisi ($R/L = 0,337$).	45
4.55:	Üçüncü çatlak konumunun ikinci doğal frekansa etkisi ($R/L = 0,337$).	46
4.56:	Üçüncü çatlak konumunun üçüncü doğal frekansa etkisi ($R/L = 0,337$).	46

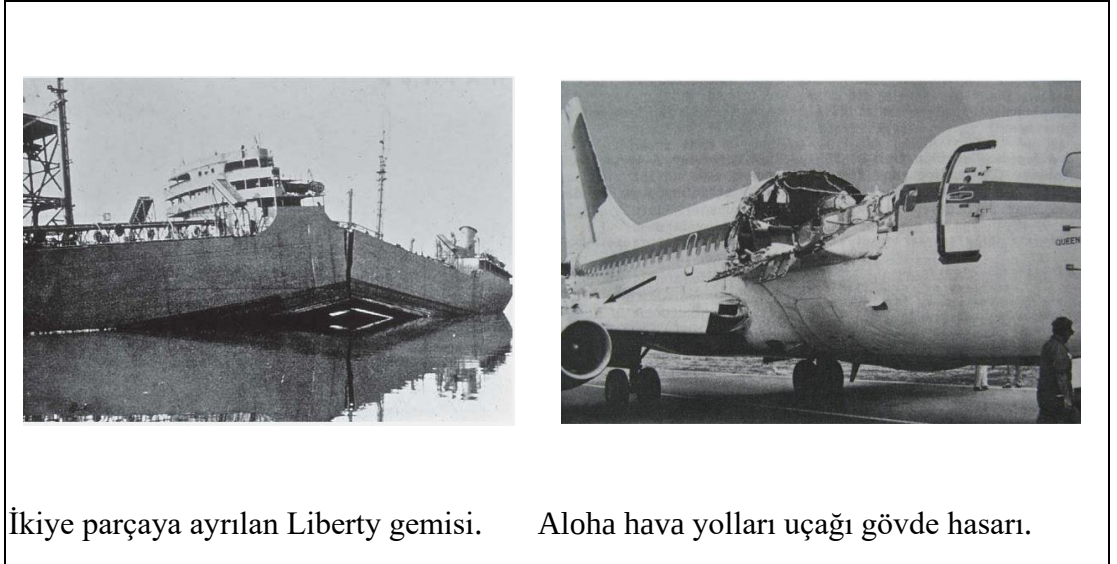
TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
4.1: Gerilme Yoğunluğu Karşılaştırma.	41

1. GİRİŞ

1.1. Genel

Kırılma olayı insanoğlu için ilk çağlardan günümüze kadar geçen süreçte araştırma konusu olmuştur. Eski çağlarda taşların yontulup el aleti yapılması, günümüzde madenlerin çıkarılması, nükleer enerji santralleri, havacılık ve uzay araçları için önemli bir yer teşkil etmektedir. Farklı nedenlerden dolayı çatlak oluşumu ve ilerlemesi nedeniyle tarihte birçok kaza meydana gelmiştir. Bunlardan ikisi Şekil 1.1’de gösterilen kazalardır [1].



Şekil 1.1: Farklı yapılarda kırılma hasarları.

Mühendislik yapıları gerçekte mikro düzeyde çatlaklar içermektedir. Yükleme koşulları altında mikro çatlaklar birleşerek büyür ve yapıda hasar meydana getirirler. Geleneksel mukavemet tasarımlarında yapı homojen ve hatasız olduğu varsayımıyla hareket edilip ilgili deneysel testlerden elde edilen gerilme değeri (akma gerilmesi veya çekme gerilmesi) yapıda yükleme durumunda oluşan en yüksek gerilme değeriyle karşılaştırılır. Bu karşılaştırma yapılırken malzeme yapısından, üretim hatalarından, farklı yükleme tiplerinden ve çevre koşullarından dolayı meydana gelebilecek beklenmedik hasarların önüne geçmek için güvenlik faktörü hesaba katılır.

Çatlaklı yapıların yükler altında nasıl davrandığını incelemek için ise ‘Kırılma Mekanîği’ adlı bilim dalı ortaya çıkmıştır. Bu konu ile ilgili bilgi Kırılma Mekanîği adlı bölümde verilecektir.

Bu çalışma kapsamında izotrop eğri kirişler için farklı çatlak derinlikleri ve farklı eğrilik değerlerinde gerilme yoğunluğu faktörleri elde edilmektedir. Kompozit açıları, çatlak derinliği oranı ve farklı eğrilik değerlerinin kirişlerin statik ve dinamik davranışına etkileri parametrik olarak incelenmektedir.

1.2. Literatür Araştırması

Birçok araştırmacı çatlaklı yapıların davranışını son 50 yıldır artan bir şekilde araştırmaya devam etmektedir. Yapılan bu araştırmaları çatlak tipleri (yüzey, kenar, merkezi iç çatlak vb.), farklı mekanik ve termal yüklemeler, geometriler, malzeme tipleri için teorik ve deneysel çalışmalar oluşturmaktadır.

Müller et al., çalışmalarında düz kirişler için enerji boşalım hızı yöntemini kullanarak gerilme yoğunluğu faktörünü tahmin etmişlerdir. Hesaplamaları üç temel yükleme altında (eğme, çekme, burulma) yapmışlardır. Deneysel kırılma mekanîğinde yer alan test durumları için elde edilen gerilme yoğunluğu faktörlerini (bu test durumları 3 ve 4 noktadan eğme ve kompakt çekme deneylerini içermektedir) teorik olarak elde etmişlerdir. Gerilme yoğunluğu faktörünün hesabı için geometri ve yükleme koşullarına bağlı olarak değişen bir düzeltme faktörü belirleyip kullanmışlardır [2].

Müller et al., yayınlarında çatlaklı eğri kirişlerin gerilme yoğunluğu faktörü tahmini için temel kiriş teoremi ile gerinim enerjisi boşalım hızı yaklaşımını kullanmışlardır. Hesaplamalar basit çekme ve üç noktadan eğilme durumları için yapılmıştır. Düz kirişler için geliştirdikleri düzeltme faktörü ifadesini eğri kirişlerde de kullanmışlardır [3].

Yapılan araştırmada referans gerilme yoğunluğu faktöründen ağırlık fonksiyonları belirlenmesi ile ilgili çalışmalar görülmüştür [4]-[7].

Skrinar yaptığı çalışmalarda, yapısındaki çatlaklı kütlesiz dönel lineer yay olarak modelleyip iki boyutlu elemanlar kullanarak sonlu elemanlar yöntemiyle kirişin statik analizini yapmıştır. Analiz edilen yapılar birden fazla çatlak içermektedir. Kirişlerde

izotrop malzeme kullanıp, kirişleri sabit ve değişken kesitli olarak modelleyip analizler yapmıştır [8]-[10].

Literatürde bir veya birden fazla çatlak içeren izotrop düz kirişlerin doğal frekanslarının incelendiği çalışmalar çok sayıda mevcuttur [11]-[20].

Krawczuk yayınında ankastre, kompozit ve tek çatlak içeren düz kiriş modellemiştir. Çalışmasında fiber hacim yoğunluğunun, çatlak derinliği oranının ve fiber açılarının statik çökmeye ve doğal frekansa olan etkisini sonlu elemanlar yöntemi kullanarak incelemiştir [21].

Krawczuk et al., ankastre, kompozit, düz kiriş yorulma çatlaklarının doğal frekans üzerindeki etkisini sonlu elemanlar yöntemiyle fiber açısına ve fiber yoğunluğuna bağlı olarak hesaplamışlardır [22].

Anlas et al., yayınlarında çatlaklı fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme özellikli levhaya uygulanan sabit yük veya yer değiştirme için birkaç farklı sayısal yöntem kullanarak gerilme yoğunluğu faktörü hesaplamışlardır. Çalışmalarında gerinim enerji yoğunluğu oranı ve J-integral yöntemlerini kullanmışlardır [23].

1.3. Tezin Amacı ve Bölümleri

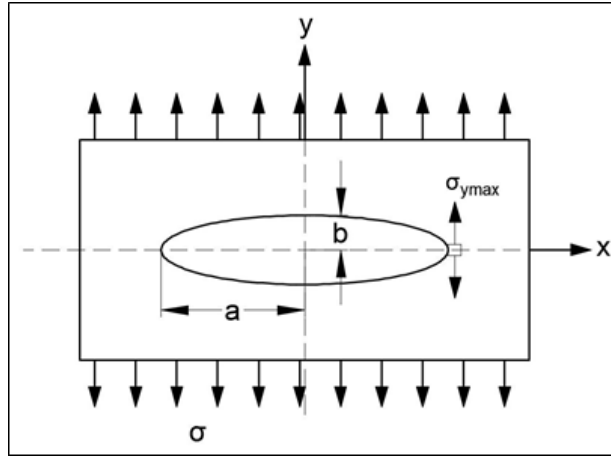
Bu çalışmada çatlaklı yapıların statik ve dinamik davranışları incelenmektedir. Yapılan literatür taraması sonucunda üç boyutlu çatlaklı eğri kompozit kirişlerin statik ve dinamik analizleriyle ilgili yayınların oldukça sınırlı sayıda olduğu görülmektedir. İlk olarak literatürde yaygın olarak karşılaşılan problem tipleri ele alınıp incelenmekte ve Abaqus sonlu elemanlar yazılımı ortamında modellenip analizleri yapılmaktadır. Analiz parametreleri, kompozit açısı, çatlak derinliği oranı ve eğrilik değeridir. Sonuçlar literatürle karşılaştırılıp yorumlanmaktadır.

Bu tez altı bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm genel olarak kırılma olayı ve literatürde karşılaşılan yayınlar hakkında bilgi içermektedir. İkinci bölümde çatlaklı yapıların davranışını inceleyen bilim dalı olan kırılma mekaniği konusunda genel bilgilere yer verilmektedir. Üçüncü bölümde ise çatlaklı yapıların analizlerini yapan sonlu elemanlar yazılımları hakkında kısa bilgi verilip çatlaklı bölgenin Abaqus yazılımında modellenmesi gösterilmektedir. Dördüncü bölümde literatürde karşılaşılan problemler modellenip karşılaştırılmakta ve farklı problem tipleri

incelenmektedir. Beşinci bölümde elde edilen sonuçlar yorumlanıp tezin literatüre katkısı ve gelecek çalışmalar hakkında bilgi verilmektedir.

2. KIRILMA MEKANİĞİ

Bu bölümde kırılma mekaniği hakkında kısaca bilgi verilmektedir. Kırılma olayı bir yapının iki veya daha fazla parçaya ayrılması olarak tanımlanabilir. Kırılma mekaniği için ilk matematiksel ifade Inglis tarafından 1913'te verilmiştir. Bu ifadeye göre Şekil 2.1'deki gibi uniform çekme gerilmesi uygulanan ortasında eliptik delik içeren levhada en yüksek gerilme değeri, büyük eksenin uç noktasında eğrilik yarıçapının ($\rho = b^2 / a$) en az olduğu durumda meydana gelir. Meydana gelen en yüksek gerilme Denklem 2.1 ve Denklem 2.2'deki gibi ifade edilir [24].



Şekil 2.1: Çekme gerilmesi altında eliptik çatlaklı levha.

$$\sigma_{y\max} = \sigma \left(1 + \frac{2a}{b} \right) \quad (2.1)$$

$$\sigma_{y\max} = 2\sigma \left(\frac{a}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.2)$$

Çatlak gerilmesi ve çatlak boyu arasındaki bağlantı 1920'de Griffith tarafından verilmiştir. Griffith cisimlerin küçük çatlaklar içerdiğini ve bunların büyümesi için yeni yüzeylerin yaratılması gerektiğini, gereken enerjinin ise çatlakın büyümesi ile serbest kalan elastik enerji tarafından sağlandığını savunmuştur [25]. Griffith çalışmasını cam elyaf malzemeler üzerinde yapmıştır ve bu model gevrek malzemeler için geçerlidir. George Irwin 1958'de Griffith'in enerji boşalım hızıyla ilgili modelini geliştirerek birçok mühendislik probleminin çözümü için kullanışlı bir model

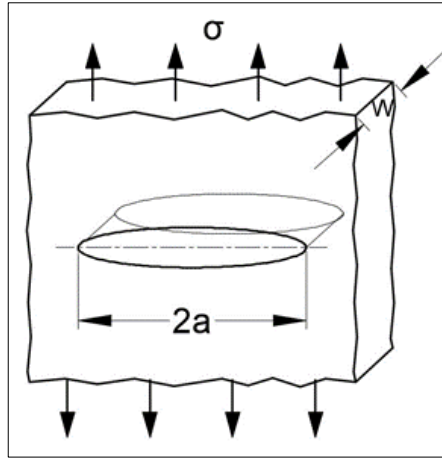
oluşturdu. Bu model lineer elastik kırılma mekaniğinin temelini atmıştır. 1960'da Paris ve çalışma arkadaşları kritik çatlak uzunluğu ve yorulma arasında bağlantı elde edip, yorulma çatlak ilerlemesi konusunda araştırmalar yapmışlardır. Bu bağlantı Paris-Erdoğan yasası olarak literatürde geçmektedir. Lineer elastik kırılma mekaniği yapıda meydana gelen şekil değişiminin az ve elastik bölgede kaldığı durumlarda doğru sonuç vermekten kalıcı şekil değişimi olduğu takdirde doğru sonuç vermemektedir. Çatlaklı yapıda kalıcı şekil değişimini inceleyen Wells Çatlak Ucu Yer Değiştirme Kriterini geliştirdi. 1968'de Rice J-integral Metodunu geliştirerek lineer olmayan malzeme davranışı gösteren çatlaklı yapılar için çözüm elde etti.

2.1. Lineer Elastik Kırılma Mekaniği

Kırılma mekaniğinin bu alanı lineer elastik malzeme davranışı gösteren yapılar için kullanılmaktadır. Çatlağın gelişmesinin tahmini enerji dengesi yaklaşımına dayanır. Lineer elastik davranış gösteren malzemelere yüksek dayanımlı çelikler (havacılık ve uzay endüstrisinde), çökeltme sertleştirilmesi yapılmış alüminyum alaşımlarında, temper geçiş sıcaklığının altındaki polimerler, seramik ve seramik kompozitleri örnek verilebilir.

2.1.1. Enerji Yaklaşımı

Enerji dengesi yaklaşımına göre çatlak genişlemesi için gerekli enerjinin malzeme direncini aşır çatlak gelişimini sağlayacak kadar enerji açığa çıktığında meydana gelmektedir. Malzeme direnci yüzey çatlağı, plastik iş ya da çatlağın ilerlemesi için ilgili enerji türlerini içerebilir. İlk Griffith tarafından ortaya atılan kırılma kriteri Irwin tarafından geliştirilmiştir. Bu kriterde enerji boşalım hızı, G , lineer elastik malzeme için çatlaklı bölgedeki potansiyel enerjinin değişimi olarak tanımlanmıştır. Kırılma anında kritik enerji boşalım hızı, $G = G_c$ 'ye eşit olduğunda, çatlağın genişlemesi başladığı kabul edilmektedir. Kritik enerji boşalım hızı boyut ve çatlaklı yapının geometrisinden bağımsız olup deneysel olarak bulunur. Şekil 2.2'de gösterilen merkezi iç çatlaklı ve çatlak uzunluğu $2a$ olan sonsuz büyüklükteki levhaya basit çekme gerilmesi uygulandığında oluşan enerji boşalım hızı Denklem 2.3'te verilmiştir.



Şekil 2.2: Çekme gerilmesi uygulanan eliptik çatlaklı sonsuz kalınlıkta ($W \gg 2a$) levha.

$$G = \frac{(\pi \sigma^2 a)}{E} \quad (2.3)$$

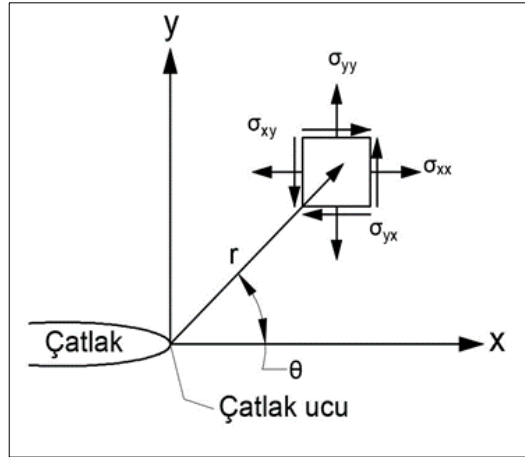
Elastisite modülü E , uygulanan gerilme σ , yarı çatlak uzunluğu a 'dır. Kritik enerji boşalım hızı kritik çatlak boyundaki değerde oluşacağından Denklem 2.4'teki gibi ifade edilir [26].

$$G_c = \frac{(\pi \sigma_f^2 a_c)}{E} \quad (2.4)$$

Kritik gerilme ve çatlak uzunluğu σ_f ve a_c , kritik enerji boşalım hızı G_c , malzemenin kırılmaya karşı gösterdiği direnç olduğundan bu değer aşıldığında malzeme hasara uğrayacaktır. Bu değer geleneksel mukavemet tasarımlarında kullanılan akma gerilmesiyle benzerlik kurulabilir.

2.1.2. Gerilme Yoğunluğu Yaklaşımı

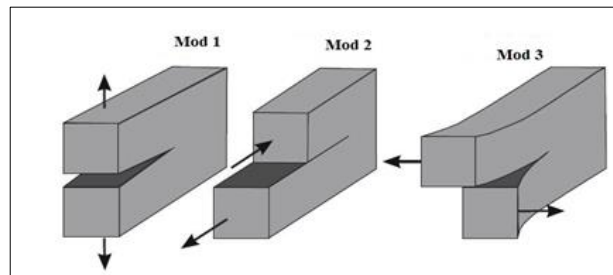
Gerilme yoğunluğu yaklaşımı çatlak ucunda meydana gelen gerilme dağılımıyla ilgilenir. Çatlak ucundaki gerilmeler Şekil 2.3'teki gibi polar koordinatlarda gösterilmekte ve sonsuz büyüklükteki bir levhada düzlem gerilme halinde herhangi bir r noktasındaki gerilmeler Denklem 2.6'da ifade edilmektedir.



Şekil 2.3: Çatlak bölgesinde oluşan gerilmeler.

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} &= \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 - \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right] \\ \sigma_{yy} &= \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 + \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right] \\ \sigma_{xy} &= \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right)\end{aligned}\tag{2.6}$$

Farklı çatlak geometrileri için gerilme yoğunluğu faktörünün (K) hesaplanması lineer elastik kırılma mekaniğinin konusudur. Malzemedeki çatlaklar Şekil 2.4'teki gibi yükleme durumuna göre, mod 1 veya açılma modu (K_1), mod 2 veya düzlem içi kayma (K_2) ve mod 3 veya düzlem dışı kayma modu (K_3) olarak üç şekilde ilerlemektedir. Yükleme durumuna ve çatlakın konumuna bağlı olarak çatlak sadece tek tipte ilerleyebileceği gibi diğer ilerleme tiplerinin birleşimi olarak da ilerleyebilir [25].



Şekil 2.4: Kırılma türleri.

Gerilme yoğunluğu faktörünün açılma modu için en genel ifadesi Denklem 2.7’de verilmiştir.

$$K_1 = \beta \sigma \sqrt{\pi a} \quad (2.7)$$

Yapıya uygulanan gerilme, σ , çatlak uzunluğu, a , β ise çatlak ve yapının geometrisine bağlı birimsiz bir katsayıdır. Gerilme yoğunluğu faktörü, kritik seviyeye ulaştığında ($K = K_{IC}$) hasar meydana geldiği kabul edilir. Kırılma tokluğu (K_{IC}) malzemenin kırılmaya karşı gösterdiği direnç olup, bir önceki bölümde kritik enerji boşalım hızı ile akma gerilmesi arasında kurulan benzerlik burada da geçerlidir. K_{IC} ve G_C malzeme özelliğinden bağımsız sadece yapının boyutları ile ilgilidir ve deneysel olarak belirlenir. Literatürde gerilme yoğunluğu faktörünün farklı yapı, çatlak tipi ve yükleme durumlarındaki hesabını veren birçok çalışma mevcuttur [27]-[30].

2.2. Elasto-Plastik Kırılma Mekaniği

Lineer elastik kırılma mekaniği çatlak ucunda elastik şekil değişimi koşuluyla sonuç vermektedir ve daha çok gevrek malzeme davranışı gösteren yapılar için kullanılmaktadır. Çatlak ucunda plastik deformasyon değerinin fazla olması ve bu kalıcı şekil değişimi sırasında gerilme-gerinim ilişkilerinin nonlinear olması durumunda kullanılmak üzere Elasto-Plastik Kırılma Mekaniği kriteri geliştirilmiştir. Bu kriter nonlinear kırılma mekaniği adıyla da bilinmektedir.

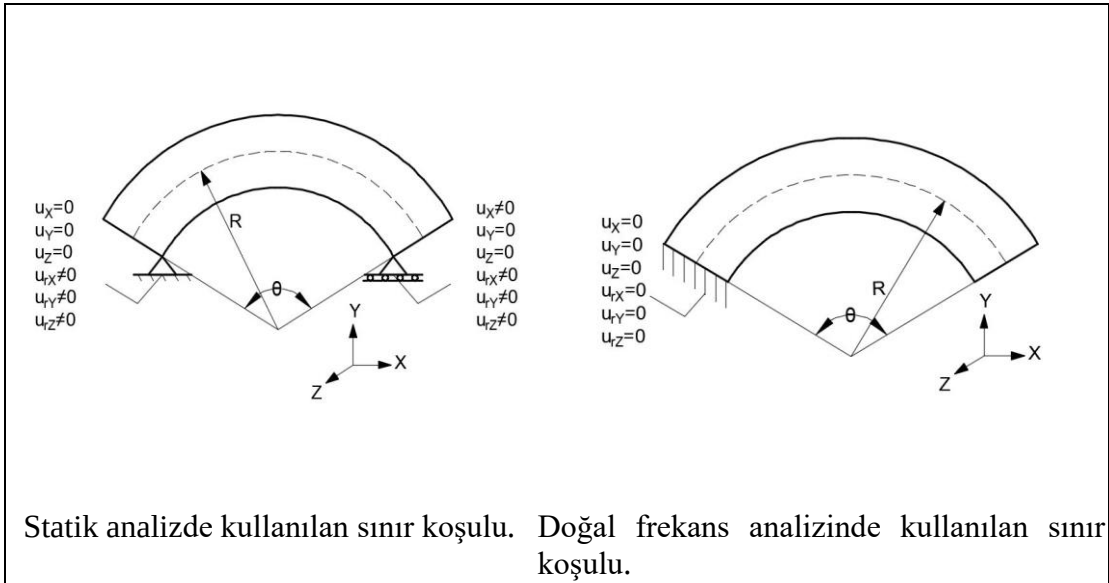
Genel olarak iki farklı metotla gerçekleştirilir. Birincisi Rice tarafından ortaya atılmış ve elasto-plastik kırılma mekaniğinin temelini oluşturan J-İntegral yaklaşımıdır. Diğeri ise Çatlak Ucu Yer Değiştirme yaklaşımıdır. Bu yaklaşımlar çatlak ilerlemesinin başlamasını tanımlamaktadır. Elasto-Plastik kırılma mekaniği az ve orta karbonlu çelikler, yüksek sıcaklıkta veya yüksek gerinim hızlarına maruz kalan metaller, camsı geçiş sıcaklığının üzerinde çalışan polimerler ve yüksek sıcaklıkta çalışan seramik malzemeler için kullanılır.

3. ÇÖZÜM METODU

Çatlaklı yapıların analizini yapabilen birçok ticari sonlu elemanlar programı vardır [31]-[36]. Genel olarak incelendiğinde bu programların benzer kapasiteleri, kırılma mekaniğinin temel parametreleri olan enerji değişim oranı ve gerilme şiddeti faktörü hesaplamasının yanı sıra yorulma çatlakları için çatlak ilerlemesini hesaplayabilir olmalarıdır. Bu kısımda sonlu elemanlar programı olan Abaqus'te kirişteki çatlak bölgesinin nasıl modelleneceği, kullanılan eleman tipi ve sınır şartları hakkında bilgi verilmektedir.

3.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi

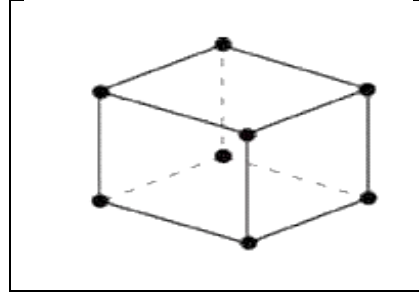
Bu kısımda kullanılan eleman tipi, sınır koşulları ve çatlak kısmının modellenmesi hakkında genel bilgi verilecektir. Yapılan analizlerde iki farklı tip sınır koşulları kullanılmıştır. Şekil 3.1'de sınır koşulları gösterilmektedir.



Şekil 3.1: Kiriş sınır koşulları.

Burada u_x , u_y , u_z , sırasıyla x, y ve z yönlerindeki yer değiştirmeleri ifade ederken u_{rx} , u_{ry} , u_{rz} bu yönlerdeki dönmeleri göstermektedir. Yer değiştirme sonuçları eksiyle çarpılarak (yük -y yönünde uygulandığı için) grafikler çizilmiştir.

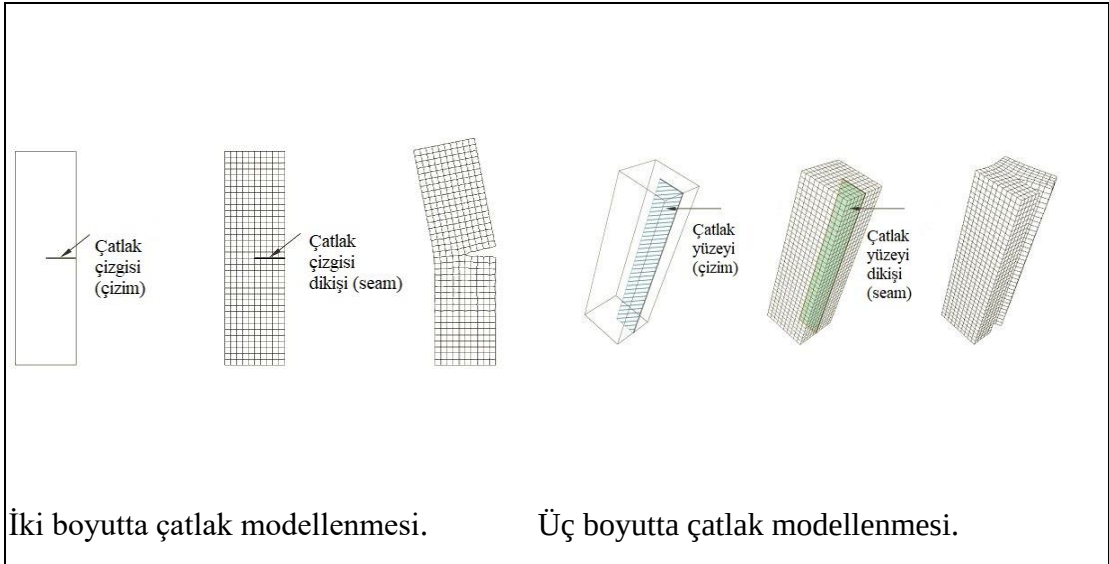
Analizlerde eleman tipi olarak Şekil 3.2’de gösterilen 3 boyutlu, 8 düğüm noktalı lineer elemanlar (C3D8) kullanılmıştır.



Şekil 3.2: Üç boyutlu ve 8 nodlu lineer eleman.

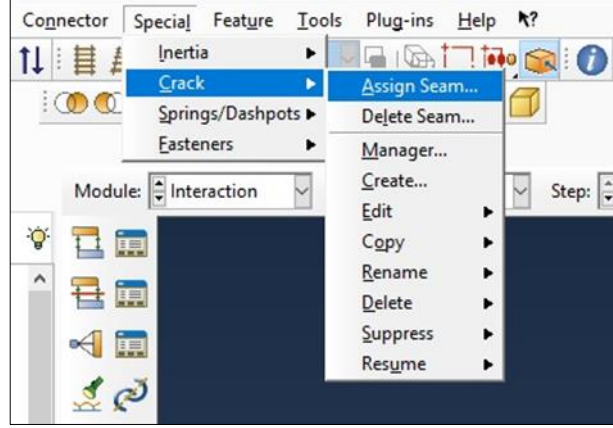
3.2. Çatlaklı Bölgenin Modellenmesi

Abaqus’ te çatlak Şekil 3.3’teki gibi iki boyutlu veya üç boyutlu yapılarda modellenebilir. Öncelikle yapıda istenilen çatlak geometrisi ve çatlağın konumuna bağlı olarak çizim yapılır. Daha sonra bu çatlak çizimine dikiş (seam) komutuyla çatlak özelliği kazandırılır. Bu komut birbirinden bağımsız hareket edebilen kenarlar (iki boyutta) veya yüzeyler (üç boyutta) oluşturur [37].



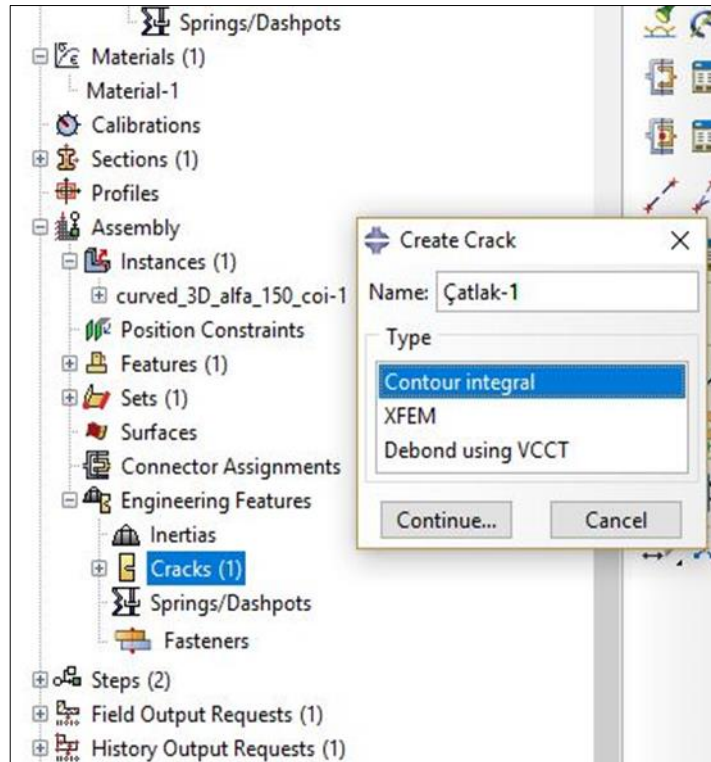
Şekil 3.3: İki ve üç boyutta çatlak modelleme.

Dikiş (seam) komutu Şekil 3.4’te gösterildiği gibi ana menü araç çubuğu üzerindeki Interaction modülünde “Special => Crack => Assign Seam” komutu kullanılarak çizilen çatlak kenarları veya yüzeyleri seçilerek kullanılır.



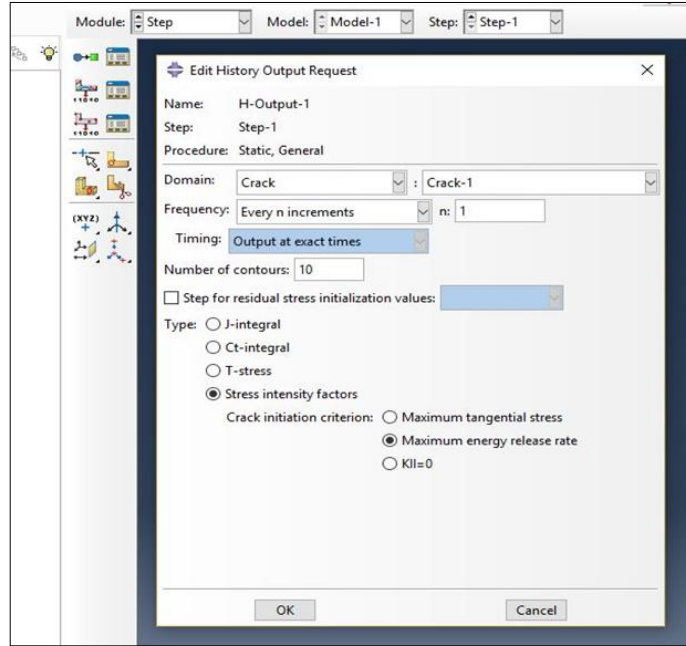
Şekil 3.4: Dikiş (Seam) komutu.

Gerilme yoğunluğu faktörünün hesaplanabilmesi için model ağacında “Assembly => Engineering Features=>Cracks” sırasıyla tıklanarak Şekil 3.5’te görüldüğü gibi kontur integral sekmesi seçilir.



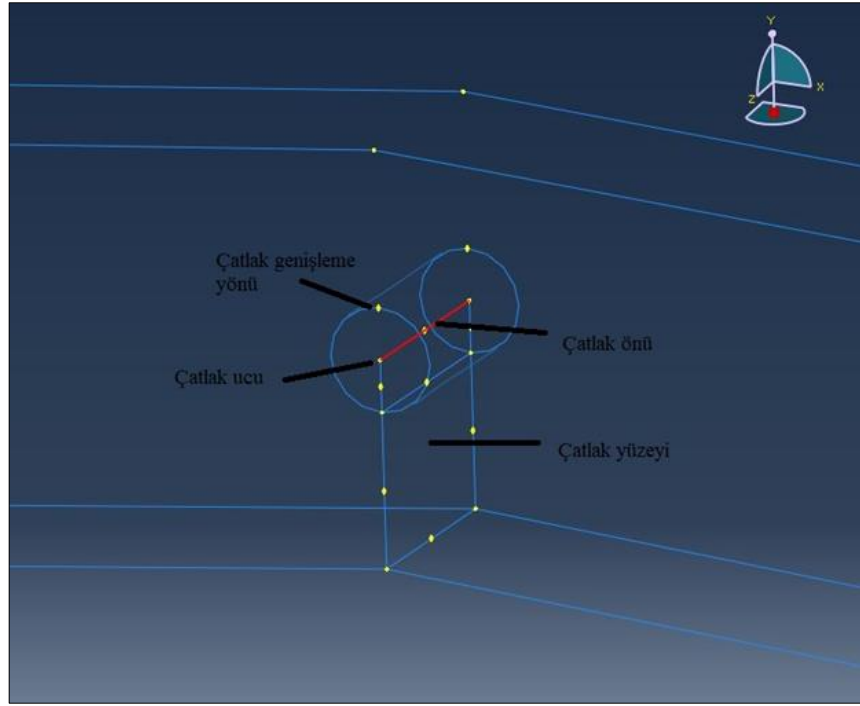
Şekil 3.5: Çatlak bölgesinde gerilme hesabı için yöntem seçimi.

Şekil 3.6'daki gibi kontur sayısı 10, hesaplanacak method tipi gerilme yoğunluğu faktörü ve maksimum enerji boşalım hızı olacak şekilde seçilir.



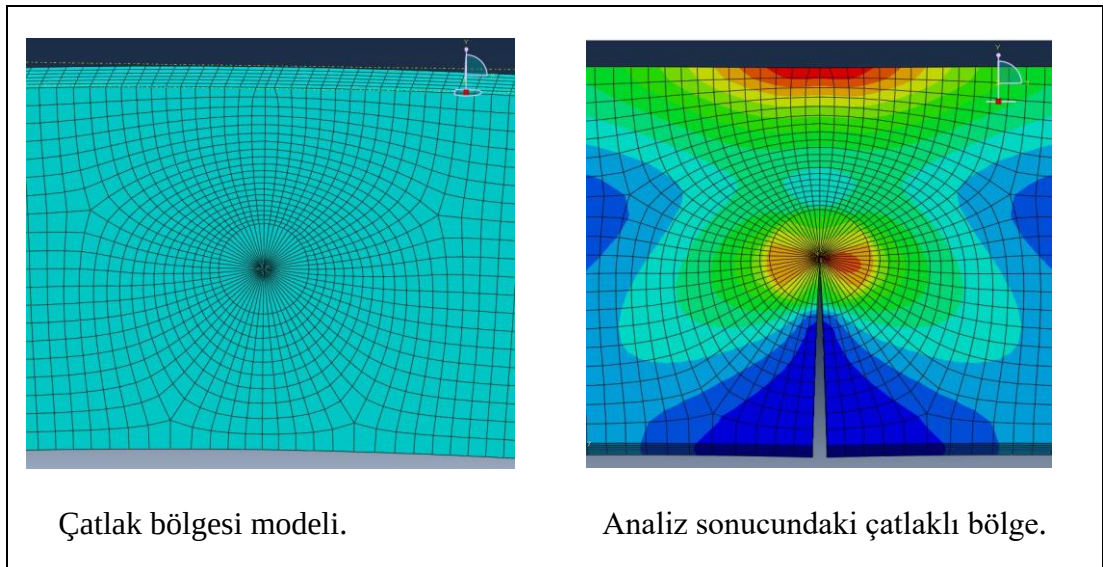
Şekil 3.6: Gerilme yoğunluğu faktörü hesabı için ayarlar.

Çatlak açılma yönünün tayini için Şekil 3.7'de gösterildiği gibi çatlak önü seçilir. Sonra açılan q vektör komutu kullanılarak çatlak ucu ve genişleme yönündeki nokta sırasıyla seçilerek işlem bitirilir.



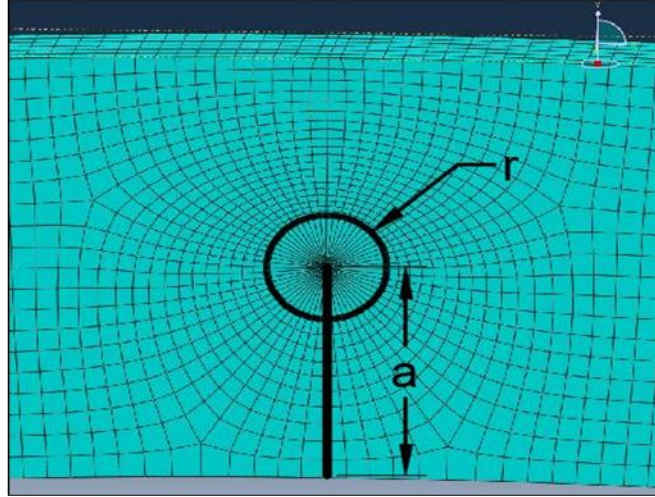
Şekil 3.7: Çatlaklı bölge.

Şekil 3.8’de mesh yapılmış çatlaklı bölge ve yük uygulandıktan sonraki çatlak açılması ile gerilme dağılımı görülmektedir.



Şekil 3.8: Çatlaklı bölgenin incelenmesi.

Gerilme yoğunluğu faktörünün hassas bir şekilde hesaplanabilmesi için çatlak ucu merkez olacak şekilde Şekil 3.9'daki gibi daire çizilerek mesh ağı örülür. Daire 60 parçaya bölünmüş ve $r = a/4$ olarak alınmaktadır.



Şekil 3.9: Gerilme yoğunluğu faktörü hesabı için çatlaklı bölgenin ağ (mesh) yapısı.

Gerilme yoğunluğu faktörü ilk 10 kontur için Şekil 3.10'da verilmiştir. İlk üç değer çatlak ucuna yakın olduğu için farklı çıkabilmektedir. Bu tez kapsamında ilk 10 kontur gerilme yoğunluğu faktörü değerlerinin aritmetik ortalaması alınmıştır.

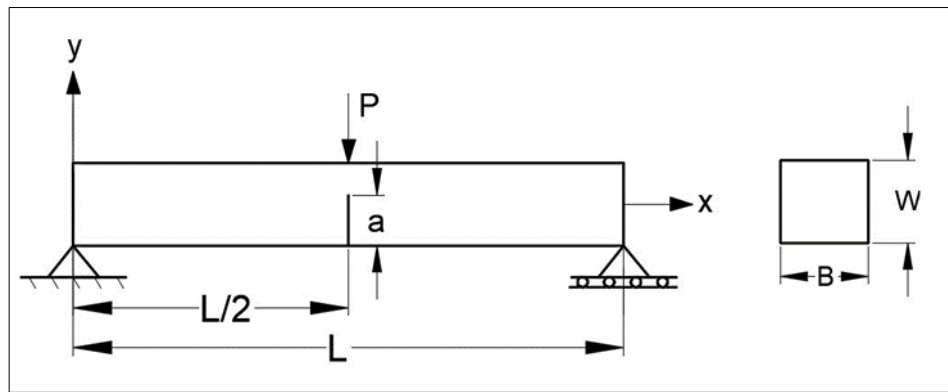
-8-	K1:	2.1369E+07	2.2671E+07	2.2676E+07	2.2673E+07	2.2673E+07
	K2:	-67.67	-103.8	-112.4	-99.25	-121.9
	K3:	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
MERR	DIRECTION (DEG):	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	J from Ks:	2078.	2339.	2340.	2339.	2339.
	K1:	2.2672E+07	2.2671E+07	2.2669E+07	2.2666E+07	2.2663E+07
	K2:	-36.97	74.04	-62.75	-32.51	-66.40
	K3:	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
MERR	DIRECTION (DEG):	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	J from Ks:	2339.	2339.	2338.	2338.	2337.

Şekil 3.10: İlk 10 kontur için gerilme yoğunluğu faktörleri.

4. SAYISAL HESAPLAMALAR

4.1. İzotrop Düz Kiriş İçin Gerilme Yoğunluğu Faktörünün Doğrulanması

Bu kısımda izotrop çelik malzemeden oluşan düz kiriş için elde edilen gerilme yoğunluğu faktörü literatürle karşılaştırılmakta ve Tablo.4.1’de gösterilmektedir. Çelik malzeme özellikleri $E = 210 \text{ GPa}$, $G = 80 \text{ GPa}$, $\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$, $\nu = 0,3$. Bu malzeme özellikleri diğer bölümlerde kullanılan tüm izotrop çelik malzeme için kullanılmaktadır. Şekil 4.1’de çatlaklı düz kirişin geometri ve boyut özellikleri verilmiştir. Kiriş uzunluğu, $L = 0,1 \text{ m}$, kiriş yüksekliği, $W = 0,02 \text{ m}$, kiriş genişliği, $B = 0,001 \text{ m}$, çatlak uzunluğu, $a = 0,004 \text{ m}$, uygulanan kuvvet $P = 100 \text{ N}$.



Şekil 4.1: Çatlaklı düz kirişin geometri ve boyut özellikleri.

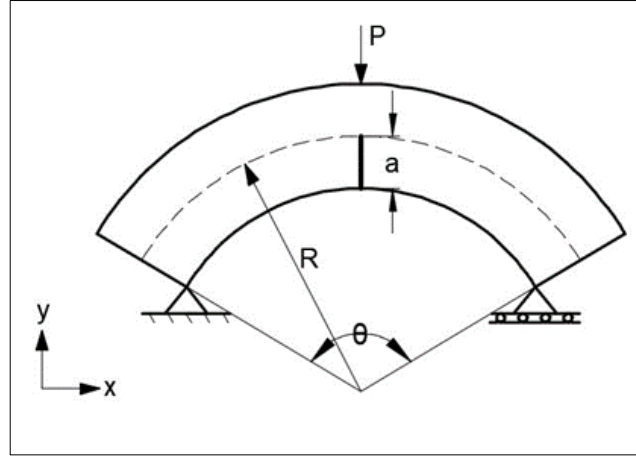
Karşılaştırılan gerilme yoğunluğu faktörleri aşağıdaki Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1: Gerilme yoğunluğu faktörü karşılaştırma.

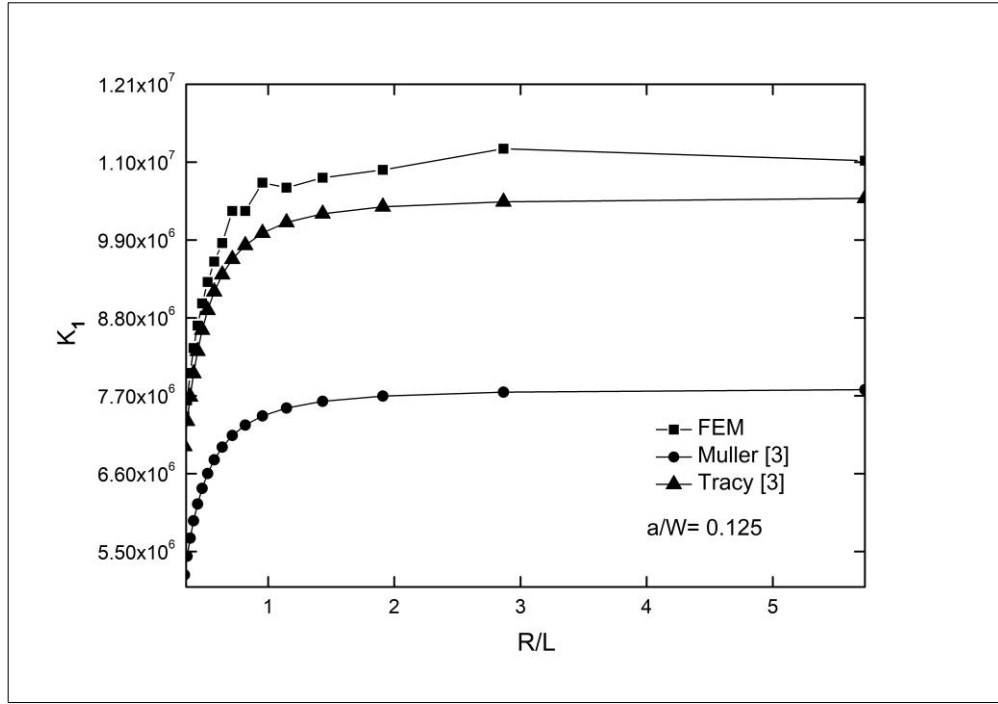
Gerilme Yoğunluğu Karşılaştırma	$K_1 \text{ (MPa.m}^{-3/2}\text{)}$
FEM	4,178
Muller [3]	4,137
T. L. Anderson [26]	4,153

4.2. İzotrop Eğri Kiriş İçin Gerilme Yoğunluğu Faktörünün Doğrulanması

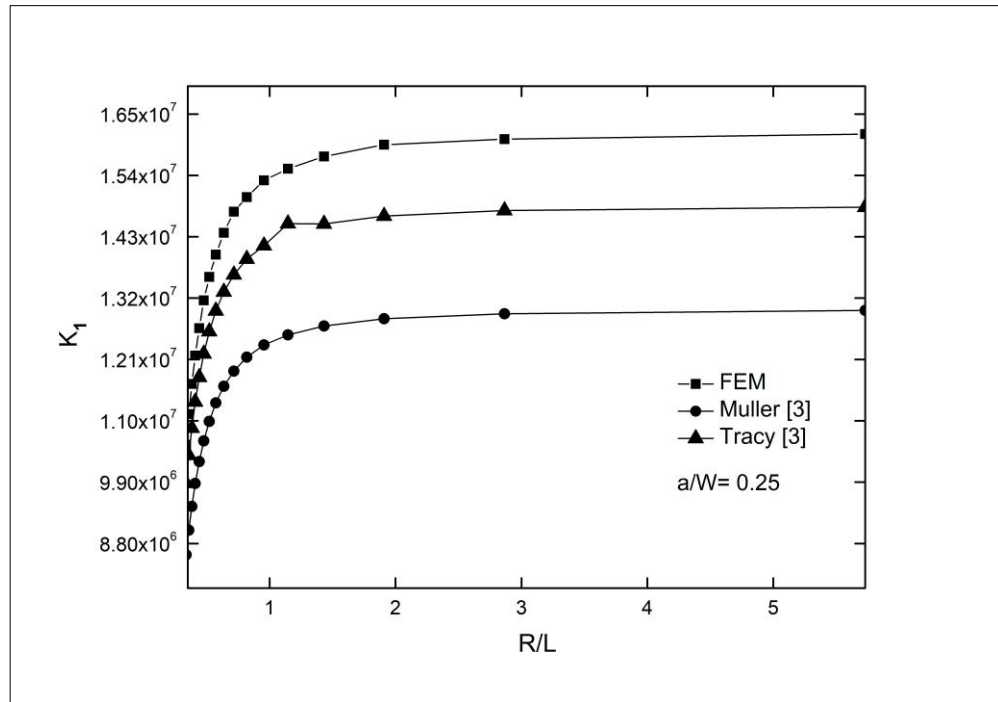
Eğri kirişin geometri ve boyut özellikleri Şekil 4.2’de verilmiştir. İzotrop çelik malzemeden oluşan eğri kiriş için elde edilen gerilme yoğunluğu faktörü literatürle karşılaştırılmıştır. Kiriş uzunluğu $L = 10\text{ m}$, kiriş yüksekliği $W = 0,2\text{ m}$, kiriş genişliği $B = 0,1\text{ m}$, uygulanan kuvvet $P = 10^4\text{ N}$. Dört farklı çatlak derinliği oranı (a/w) ve farklı eğrilik değerlerinde analizler gerçekleştirilmektedir. Çatlak derinliği oranları sırasıyla; 0,125, 0,25, 0,375, 0,5’tir. Gerilme yoğunluğu faktörünün literatürle karşılaştırılmasının yanı sıra orta noktanın yer değiştirmesi ve ortadaki gerilme değeri Şekil 4.3-16’da verilmektedir.



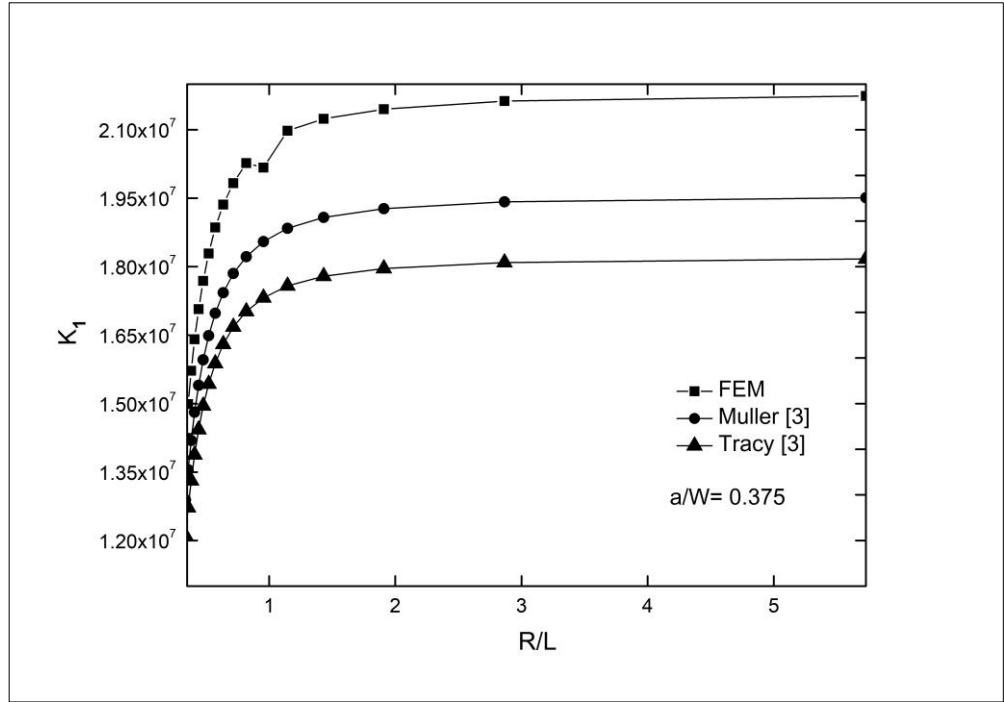
Şekil 4.2: Eğri kirişin geometri ve boyut özellikleri.



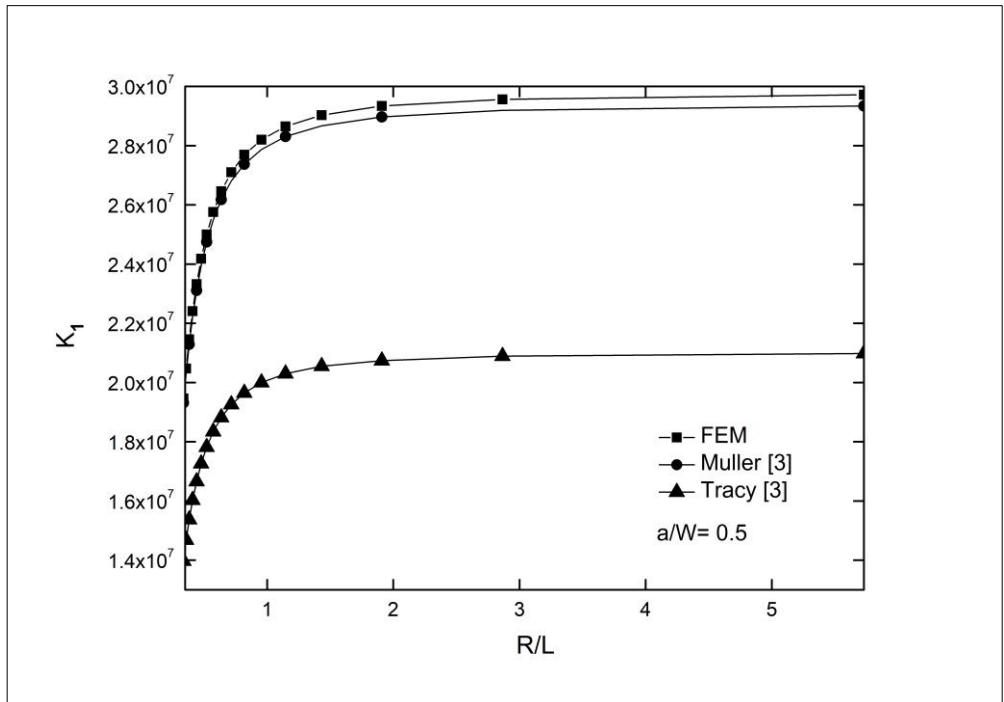
Şekil 4.3: Eğrilik yarıçapının gerilme yoğunluğu faktörüne etkisi ($a/w = 0,125$).



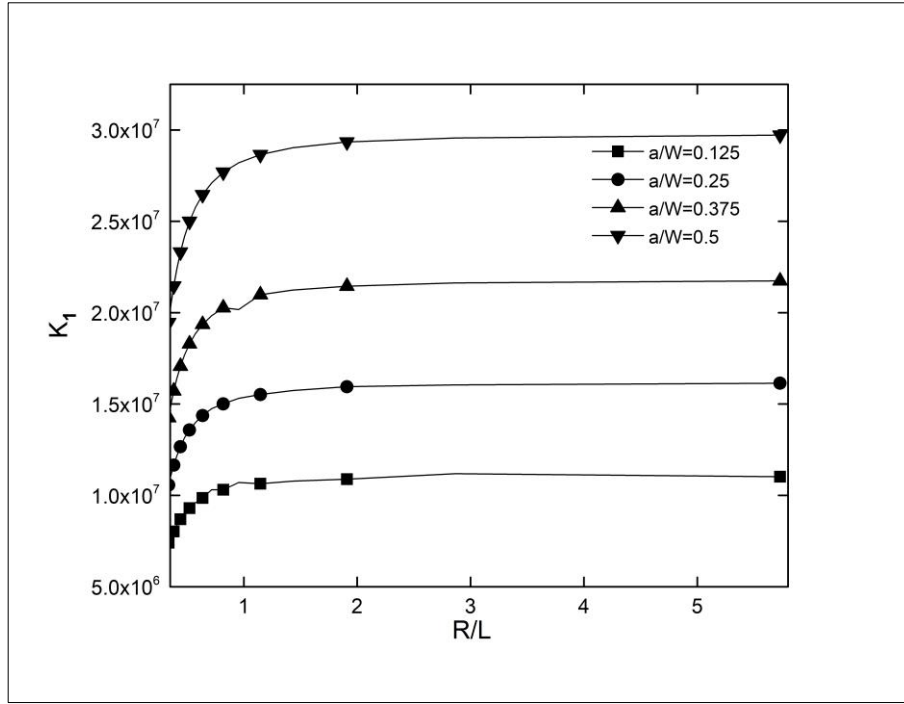
Şekil 4.4: Eğrilik yarıçapının gerilme yoğunluğu faktörüne etkisi ($a/w = 0,25$).



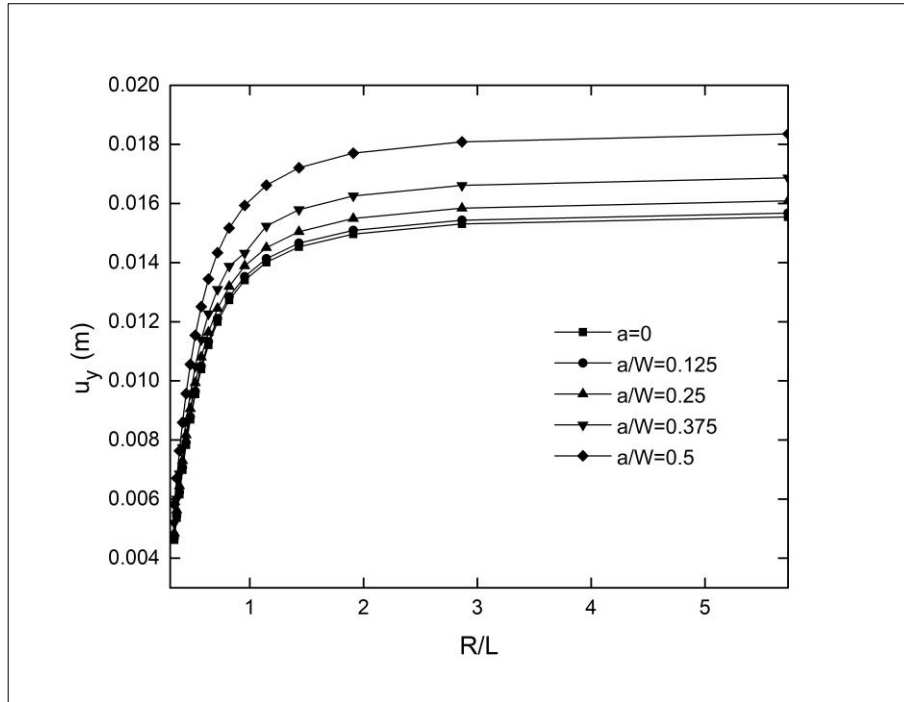
Şekil 4.5: Eğrilik yarıçapının gerilme yoğunluğu faktörüne etkisi ($a/w = 0,375$).



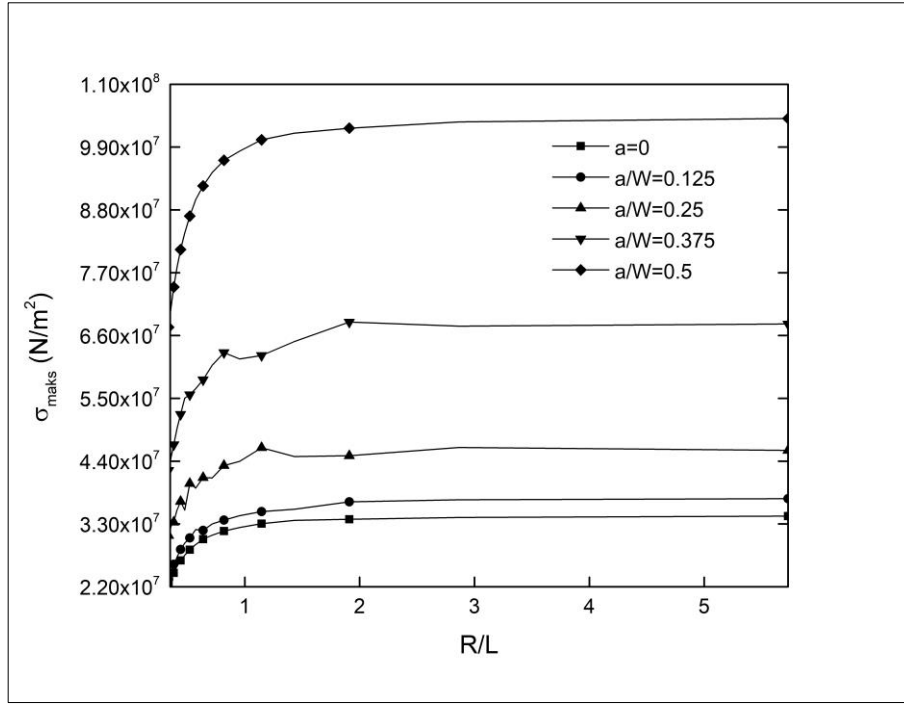
Şekil 4.6: Eğrilik yarıçapının gerilme yoğunluğu faktörüne etkisi ($a/w = 0,5$).



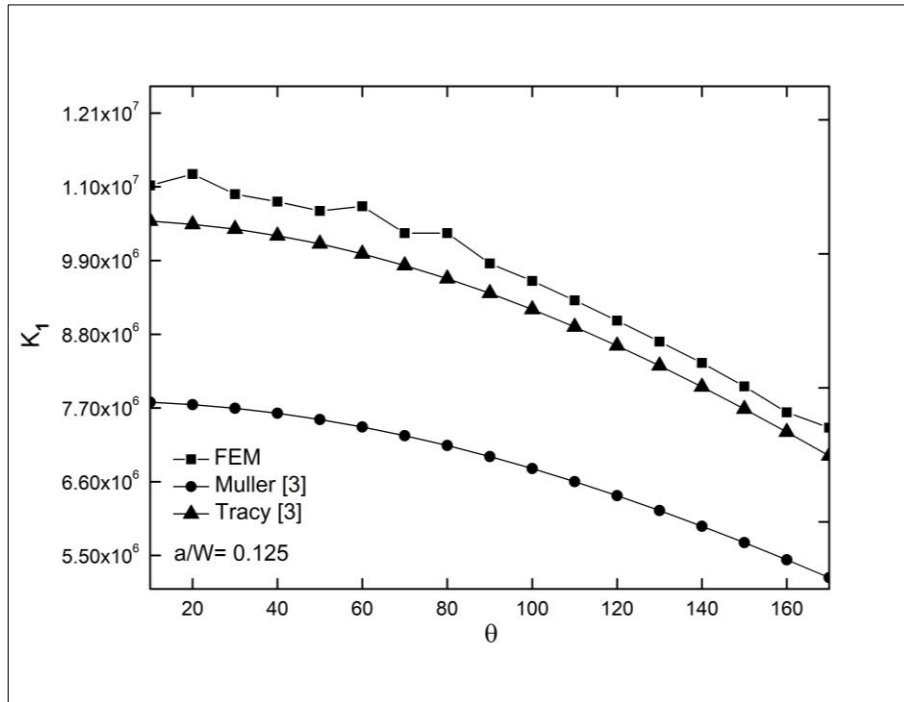
Şekil 4.7: Farklı çatlak boyutlarında ve eğrilik değerlerinde gerilme yoğunluğu faktörü.



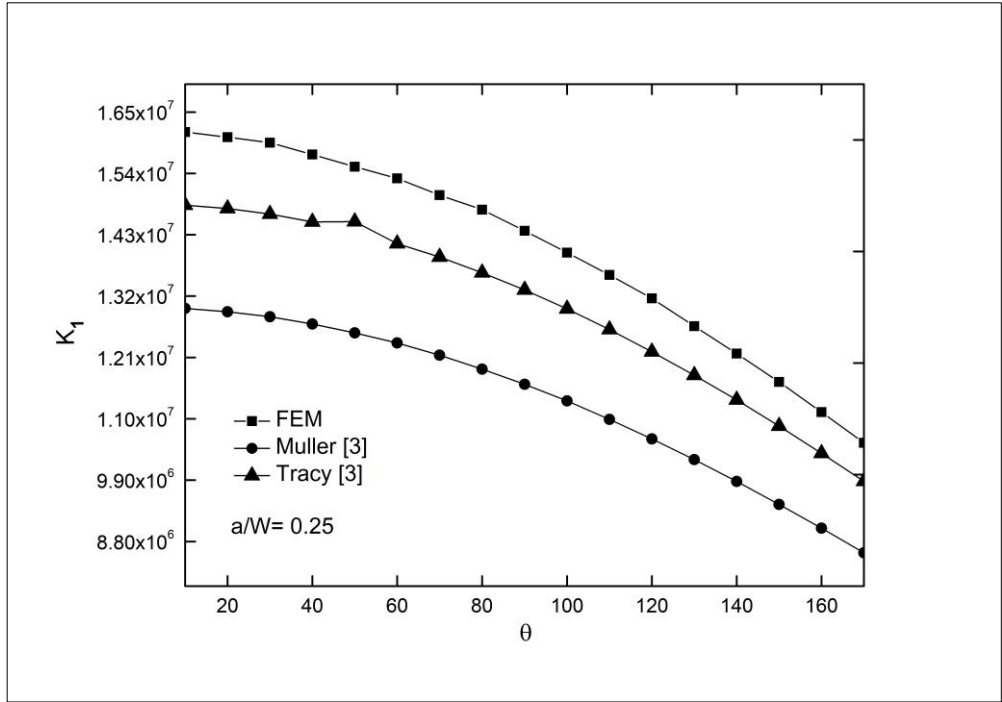
Şekil 4.8: Farklı çatlak boyutlarında ve eğrilik değerlerinde orta noktanın yer değiştirmesi.



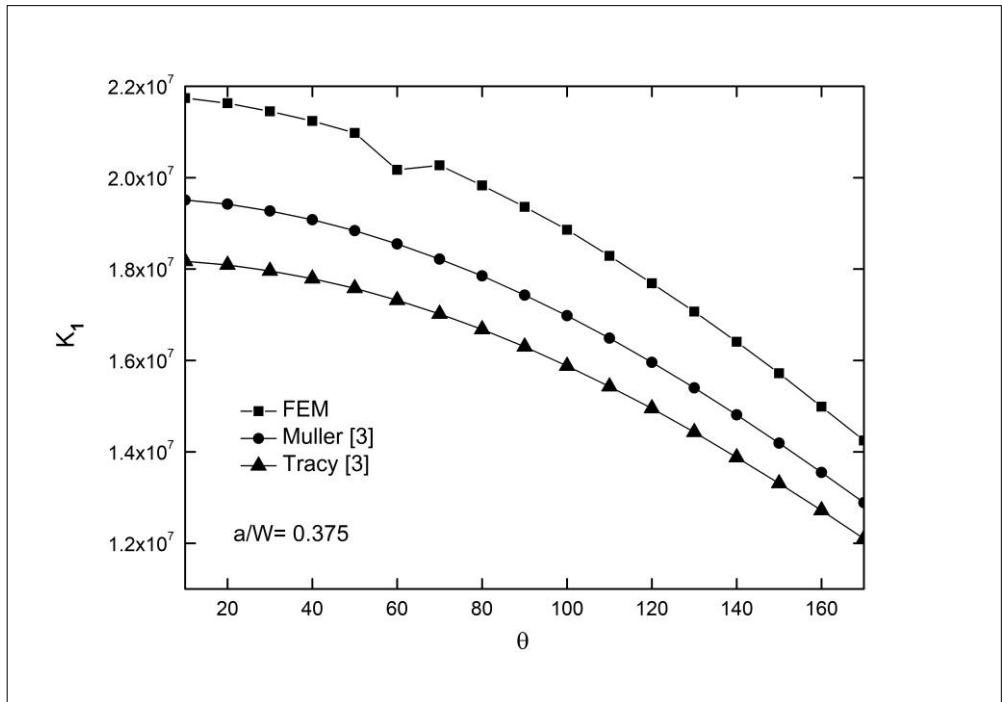
Şekil 4.9: Farklı çatlak boyutlarında ve eğrilik değerlerinde orta noktadaki gerilme.



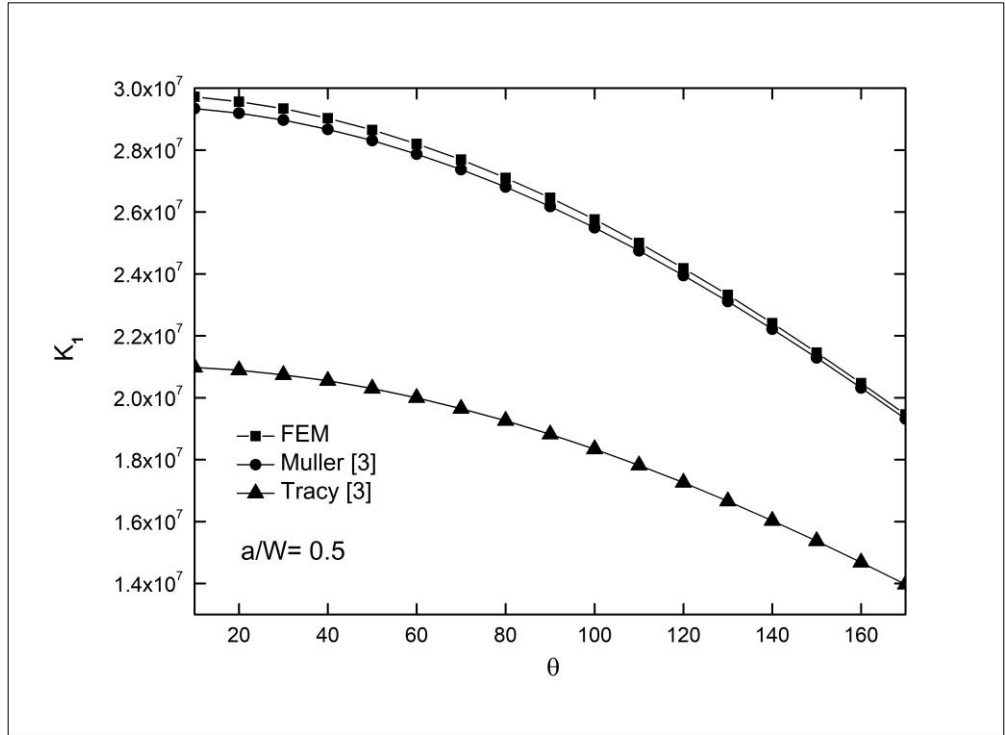
Şekil 4.10: Eğrilik açısının gerilme yoğunluğu faktörüne etkisi ($a/w = 0,125$).



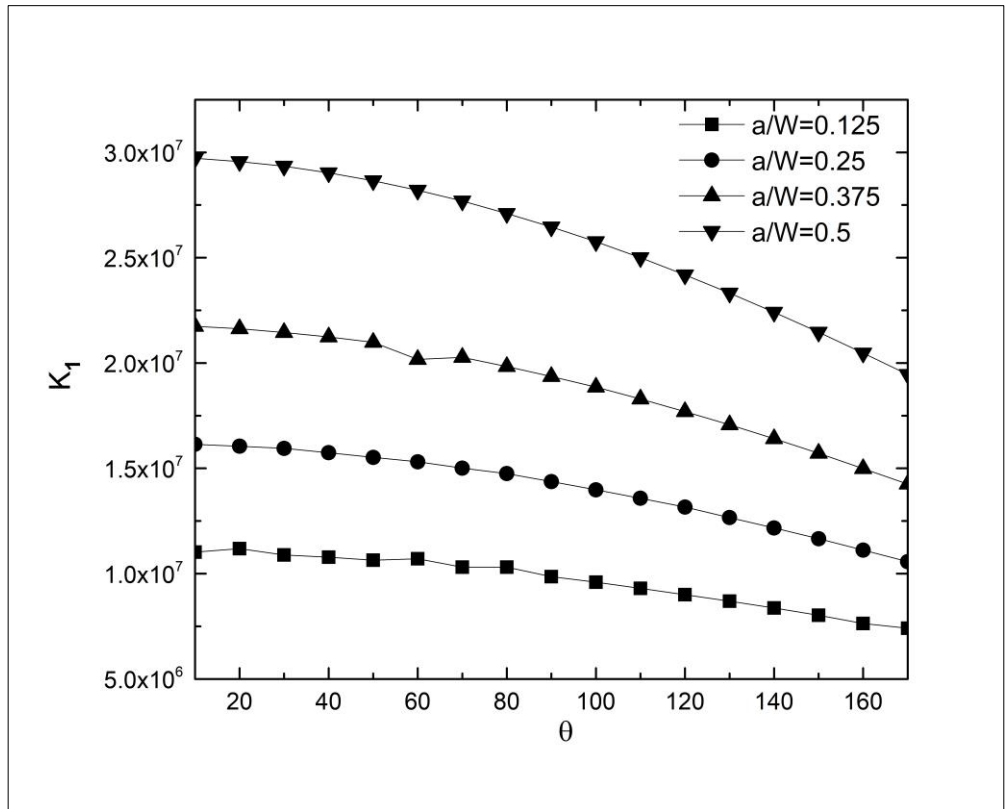
Şekil 4.11: Eğrilik açısının gerilme yoğunluğu faktörüne etkisi ($a/w = 0,25$).



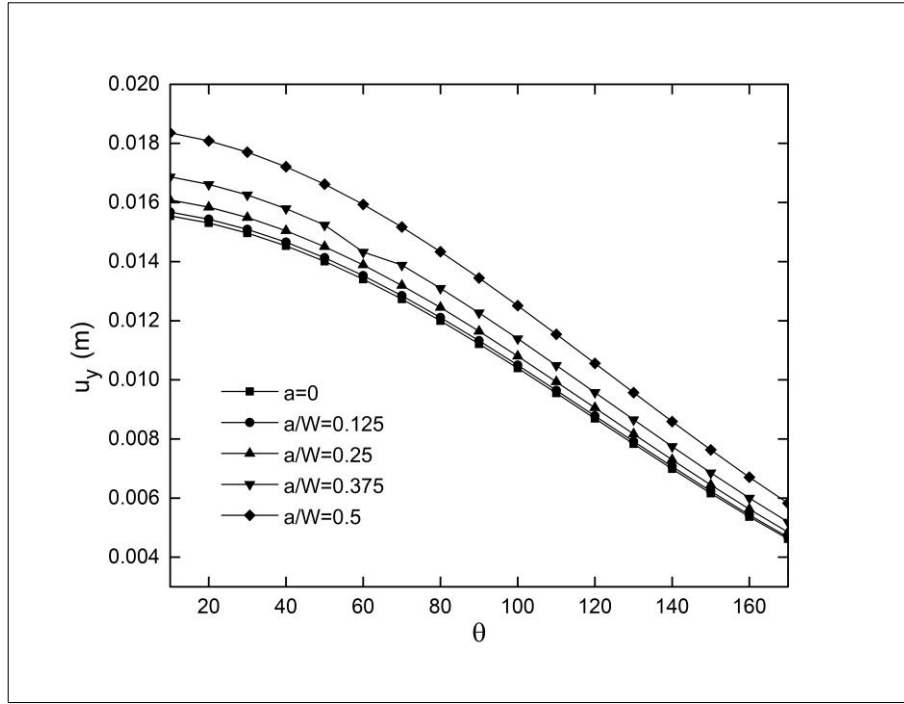
Şekil 4.12: Eğrilik açısının gerilme yoğunluğu faktörüne etkisi ($a/w = 0,375$).



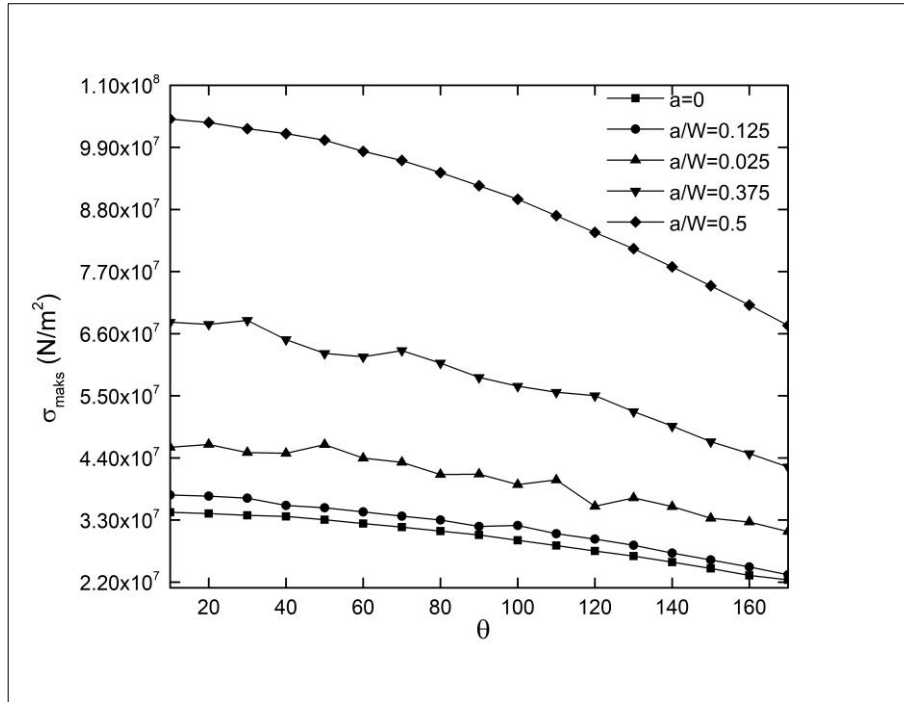
Şekil 4.13: Eğrilik açısının gerilme yoğunluğu faktörüne etkisi ($a/w = 0,5$).



Şekil 4.14: Farklı çatlak boyutlarında ve eğrilik açılarında gerilme yoğunluğu faktörü.



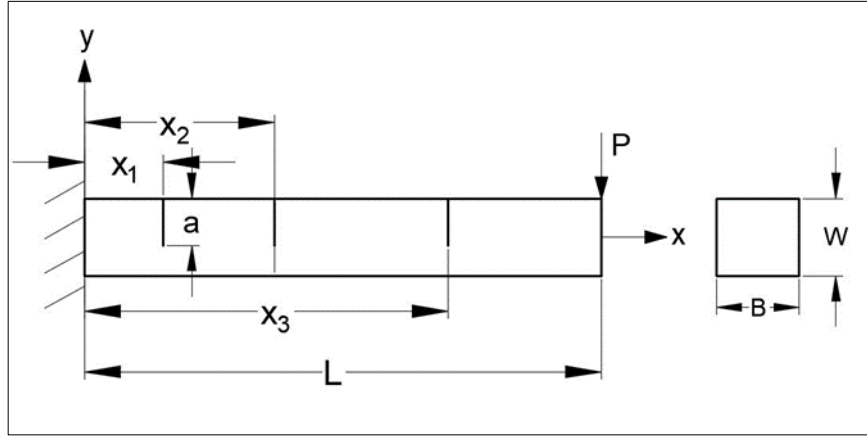
Şekil 4.15: Farklı çatlak boyutlarında ve eğrilik açılarında orta noktanın yer değiştirmesi.



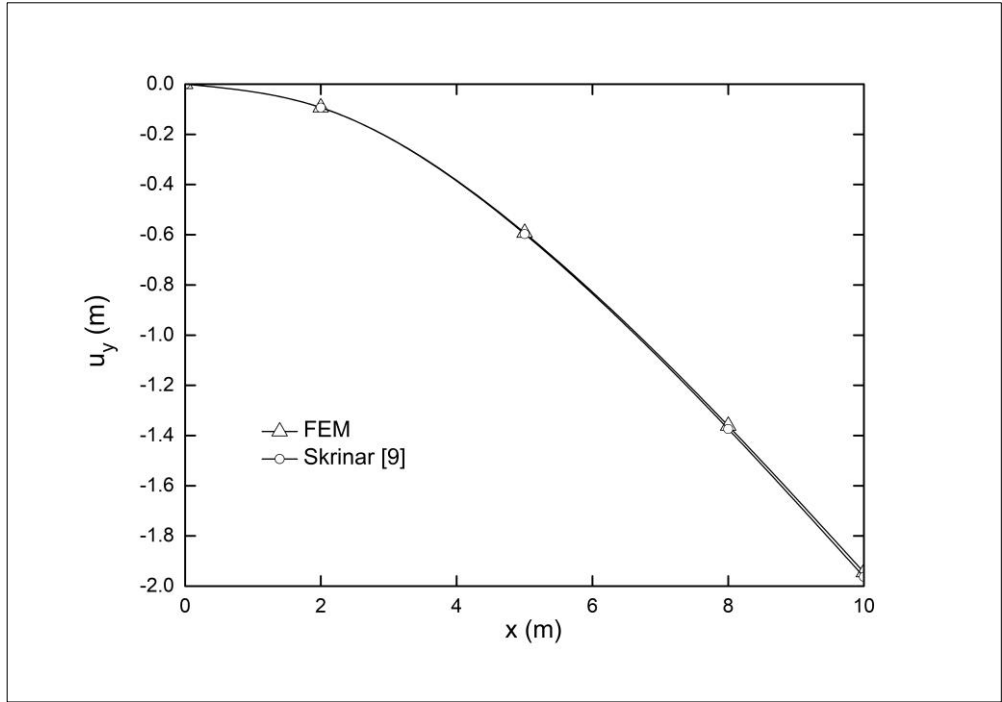
Şekil 4.16: Farklı çatlak boyutlarında ve eğrilik açılarında orta noktadaki gerilme.

4.3. Çok Çatlaklı İzotrop Düz Kirişin Statik Doğruluk Analizi

Bu kısımda literatürdeki problem ele alınıp sonlu elemanlar yöntemiyle doğrulanmaktadır. Şekil 4.17’de ankastre, birden fazla çatlak içeren düz kirişin statik analizi için yükleme durumu, geometri ve boyut özellikleri verilmiştir. Malzeme özellikleri $E = 30 \text{ GPa}$, $\nu = 0,3$. Kiriş uzunluğu $L = 10 \text{ m}$, genişliği $B = 0,1 \text{ m}$, yüksekliği $W = 0,2 \text{ m}$. Çatlak konumları sırasıyla $x_1 = 2 \text{ m}$, $x_2 = 5 \text{ m}$, $x_3 = 8 \text{ m}$, tüm çatlak uzunlukları $a = 0,1 \text{ m}$, uygulanan kuvvet $P = 10^4 \text{ N}$. Şekil 4.18’de analiz sonuçları verilmektedir.



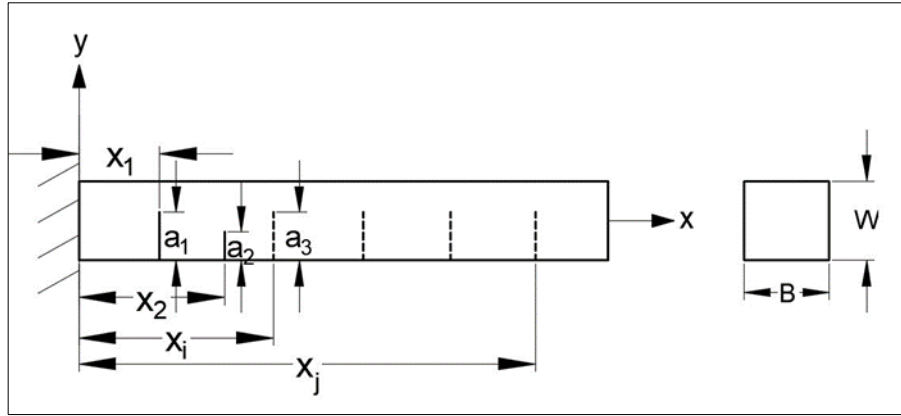
Şekil 4.17: Çoklu çatlaklı ankastre düz kiriş için geometri ve boyut özellikleri.



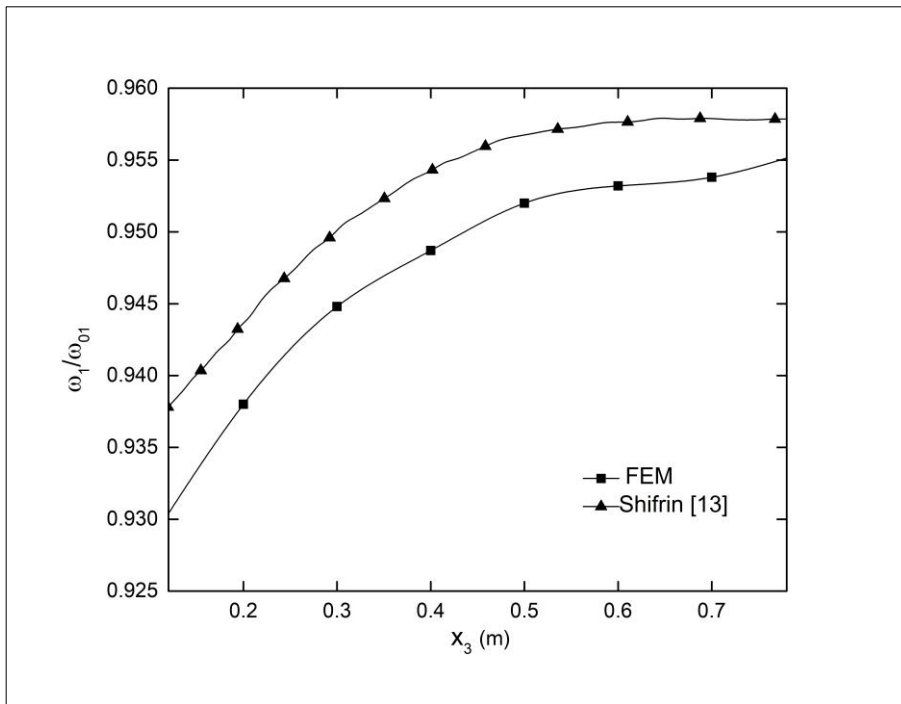
Şekil 4.18: Çoklu çatlaklı ankastre izotrop düz kirişin statik doğruluk analizi.

4.4. Çoklu Çatlaklı İzotrop Düz Kirişin Dinamik Doğruluk Analizi

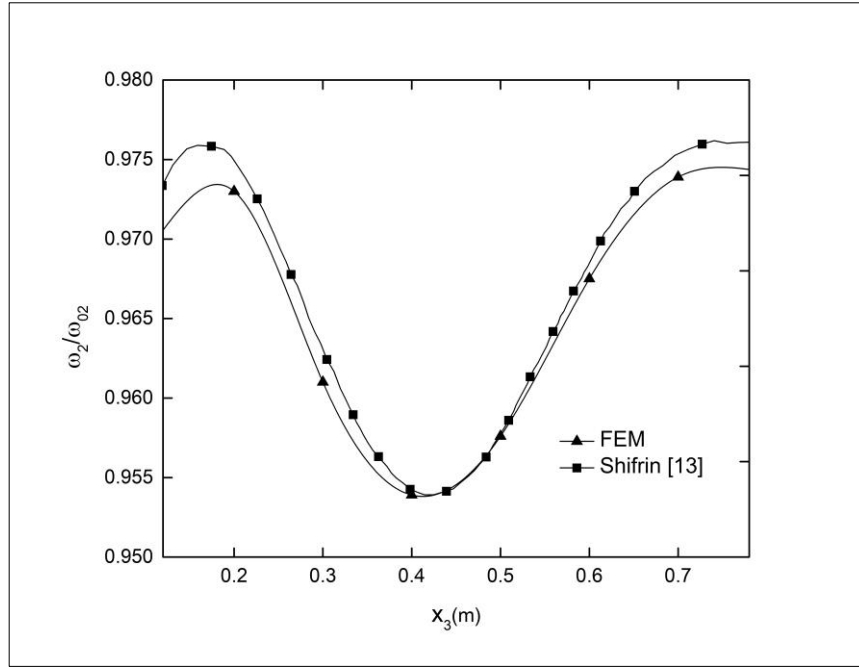
Bu kısımda literatürdeki problem ele alınıp sonlu elemanlar yöntemiyle doğrulanmıştır. Şekil 4.19’da geometri ve boyut özellikleri gösterilen ankastre, birden fazla çatlak içeren düz kirişin dinamik analizi gerçekleştirilmiştir. Malzeme özellikleri $E = 210 \text{ GPa}$, $G = 80 \text{ GPa}$, $\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$, $\nu = 0,3$. Kiriş uzunluğu $L = 0,8 \text{ m}$, genişliği $B = 0,02 \text{ m}$, yüksekliği $W = 0,02 \text{ m}$. Çatlak konumları ve uzunlukları sırasıyla $x_1 = 0,04 \text{ m}$, $a_1 = 0,006 \text{ m}$, $x_2 = 0,08 \text{ m}$, $a_2 = 0,004 \text{ m}$, $x_3 = 0,1 \text{ m}$ ’den $0,75 \text{ m}$ ’ye kadar, $a_3 = 0,006 \text{ m}$. Problemden ilk iki çatlak konumu sabitken üçüncü çatlak her bir analizde yer değiştirmektedir. Sonuçlarda XY düzlemindeki ilk üç doğal frekans değerleri alınmakta ve Şekil 4.20-22’de gösterilmektedir.



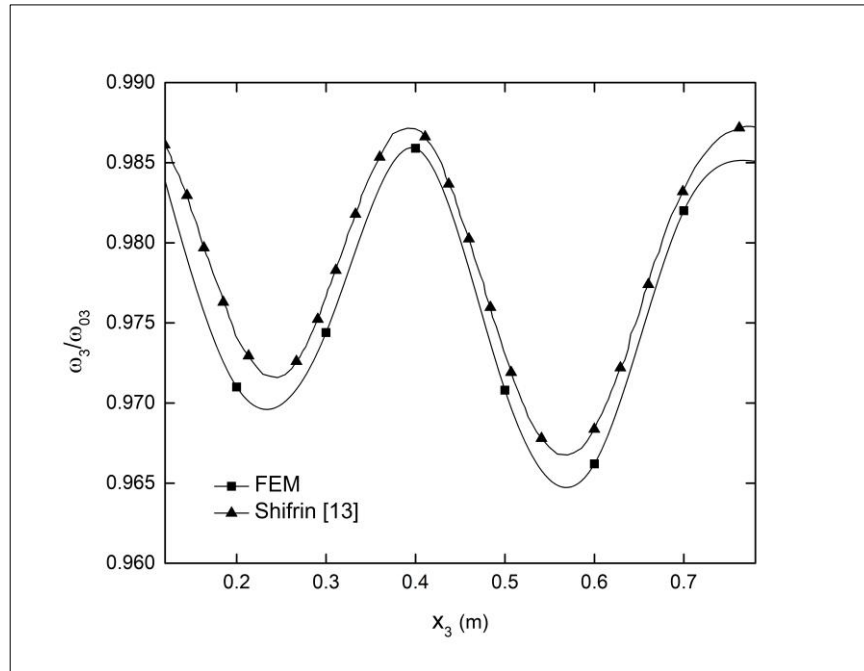
Şekil 4.19: Çoklu çatlaklı ankastre izotrop düz kirişin dinamik doğruluk analizi.



Şekil 4.20: Düz, izotrop kirişin birinci doğal frekans oranı.



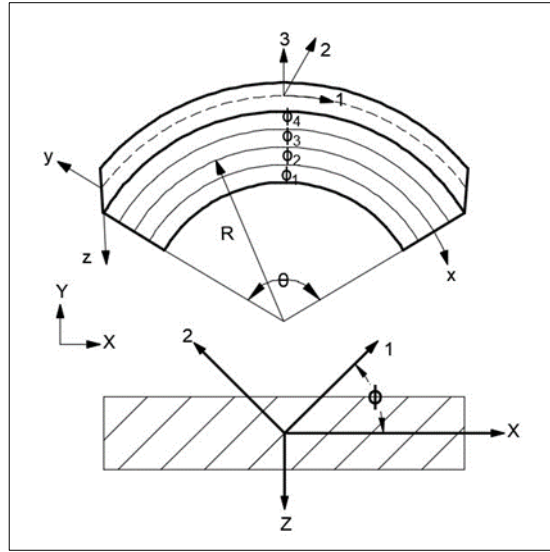
Şekil 4.21: Düz, izotrop kirişin ikinci doğal frekans oranı.



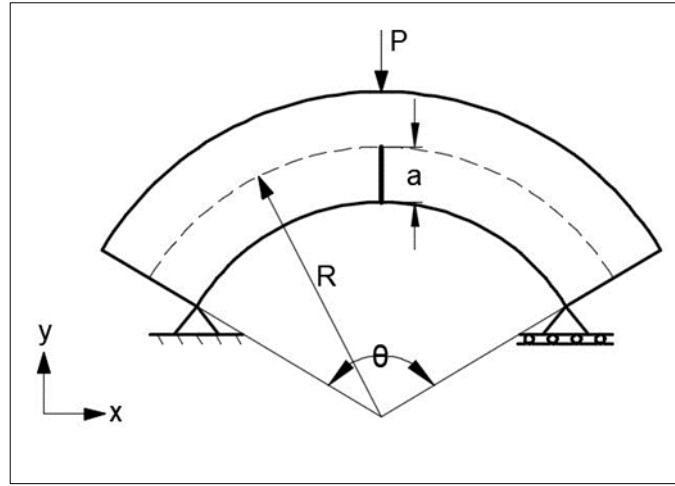
Şekil 4.22: Düz, izotrop kirişin üçüncü doğal frekans oranı.

4.5. Farklı Eğrilik Değerlerine Sahip Çatlaklı Kompozit Kirişlerin Statik Analizi

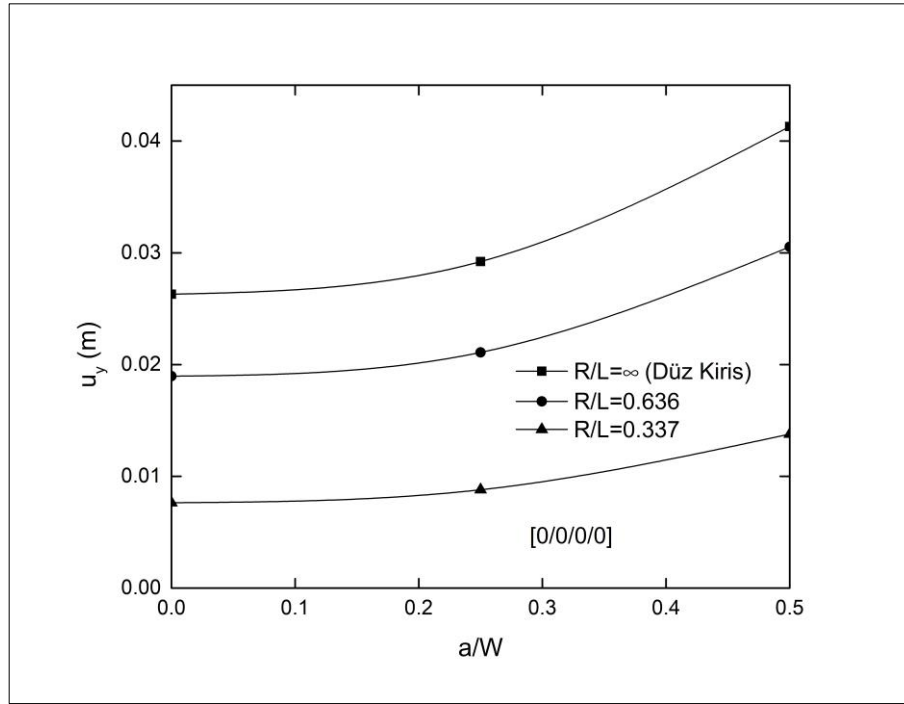
Bu kısımda farklı eğrilik değerlerine (R/L), çatlak derinlik oranlarına (a/w) ve kompozit açılara (ϕ) göre statik analiz yapılmıştır. Çatlak derinlik oranları sırasıyla, 0, 0,25, 0,5. Kompozit eşit kalınlıklarda dört tabakadan oluşmaktadır ve Şekil 4.23'te tabakalar ve açılar gösterilmiştir. Referans fiber yönü 1, matris yönü 2 ve tabakalar 3 yönünde dizilmiştir. Kompozit açılara göre üç farklı diziliş incelenmiştir. Bunlar sırasıyla $[0/0/0/0]$, $[0/90/90/0]$ ve $[-45/45/45/-45]$. Kompozit eğri kirişin geometri ve boyut özellikleri Şekil 4.24'te verilmiştir. Kiriş uzunluğu, $L = 10\text{ m}$, yüksekliği, $W = 0,2\text{ m}$, genişliği, $B = 0,1\text{ m}$, uygulanan kuvvet $P = 10^7\text{ N}$. Malzeme özellikleri $E_1 = 121\text{ GPa}$, $E_2 = E_3 = 8,96\text{ GPa}$, $\nu_{12} = \nu_{13} = 0,27$, $\nu_{23} = 0,4$, $G_{12} = G_{13} = 4,7\text{ GPa}$, $G_{23} = 3,1\text{ GPa}$, $\rho = 1490\text{ kg/m}^3$. Çatlaklı yapıda orta noktadaki (y ekseninde) yer değiştirme, u_y , çatlaksız yapıda ise u_{0y} olarak gösterilmektedir. Sonuçlar Şekil 4.25-36'da verilmektedir.



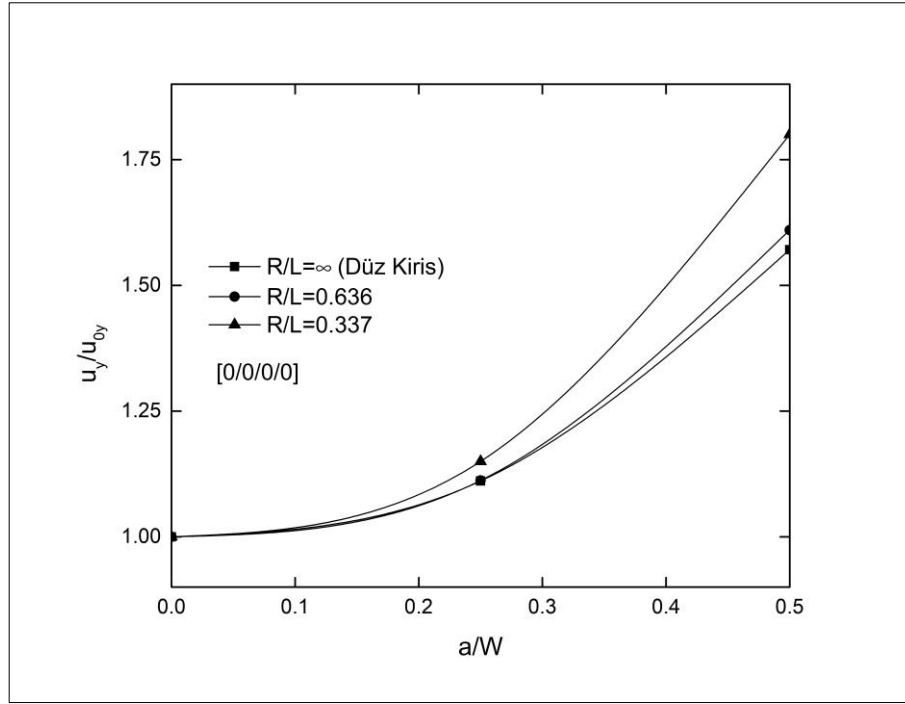
Şekil 4.23: Eğri kompozit kiriş için geometri ve boyut özellikleri.



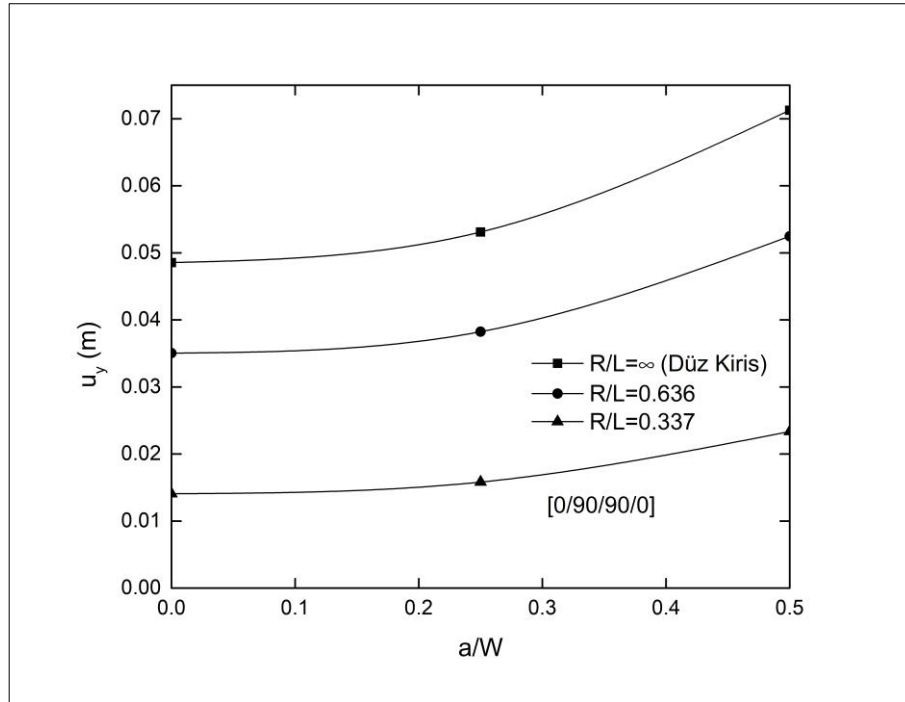
Şekil 4.24: Eğri kiriş için yükleme ve sınır koşulları.



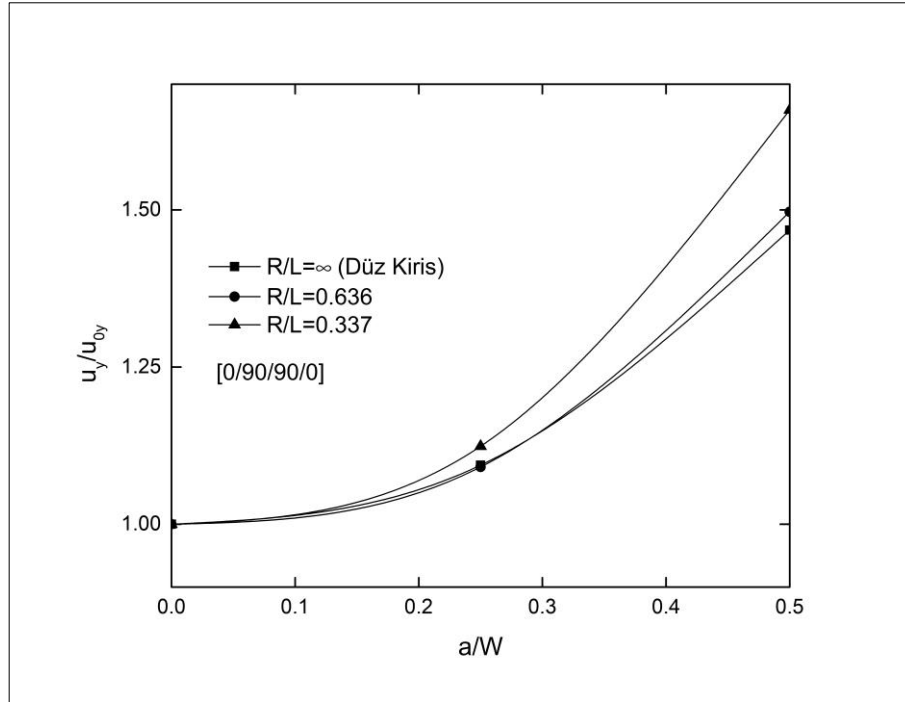
Şekil 4.25: Çatlak derinliği oranı ve eğrilik oranına göre orta noktanın yer değiştirmesi ([0/0/0/0]).



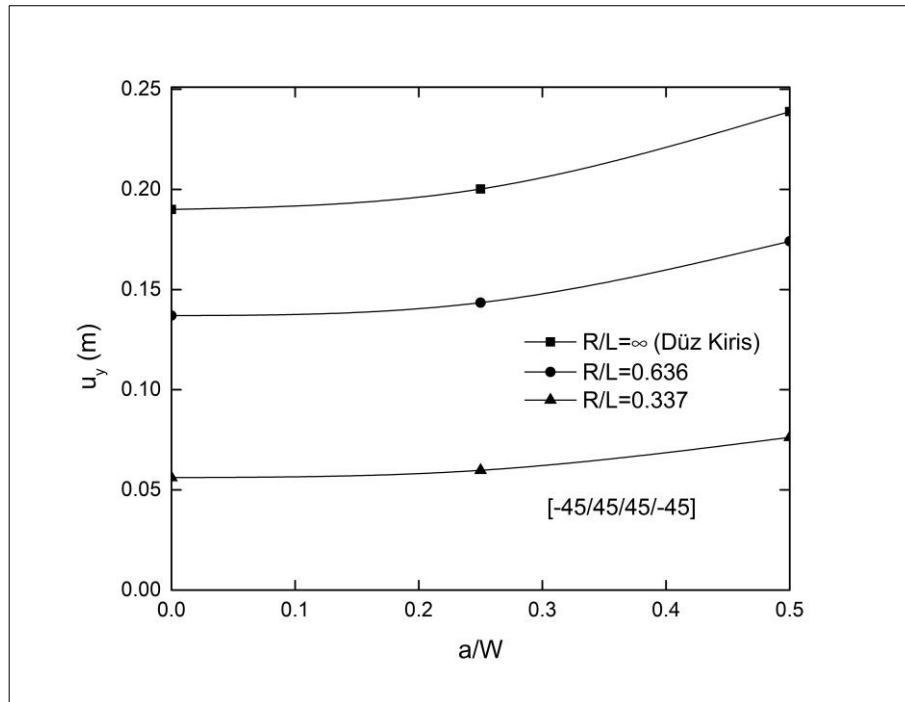
Şekil 4.26: Çatlak derinliği oranı ve eğrilik oranına göre orta noktanın yer değiştirme oranı ($[0/0/0/0]$).



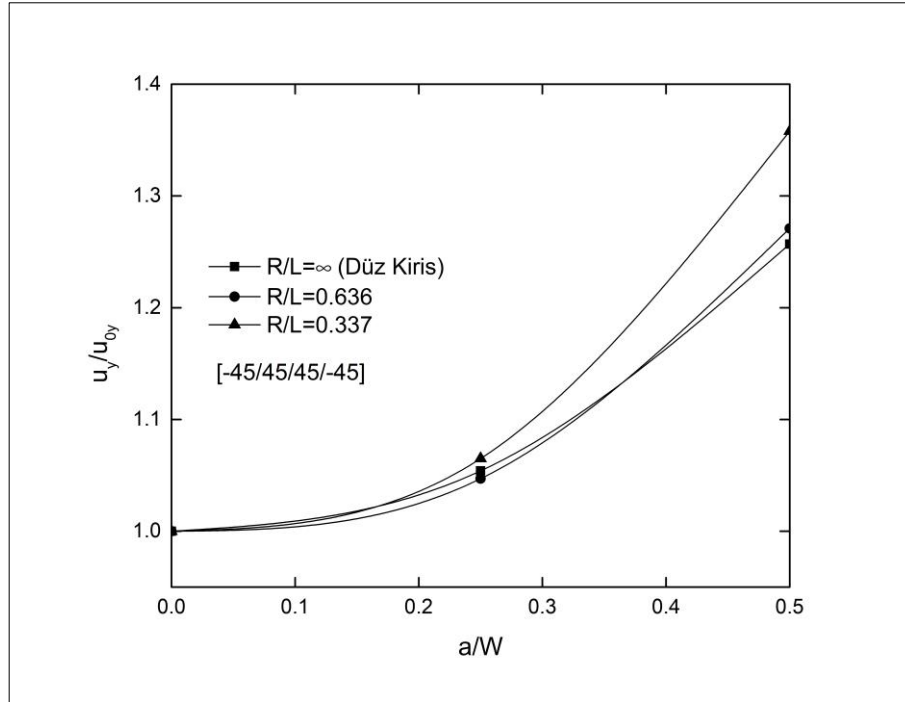
Şekil 4.27: Çatlak derinliği oranı ve eğrilik oranına göre orta noktanın yer değiştirmesi ($[0/90/90/0]$).



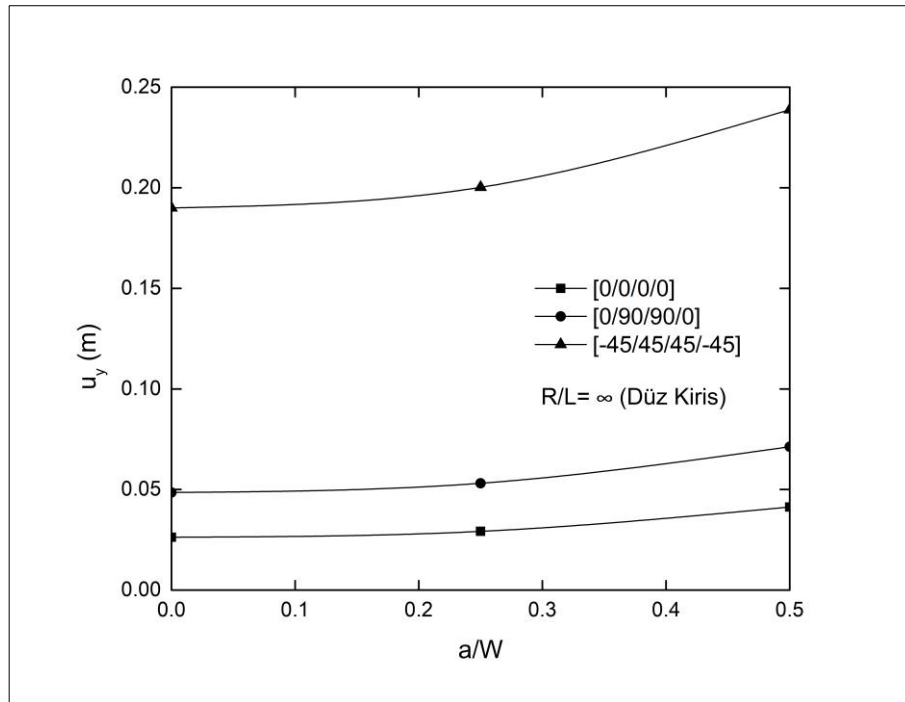
Şekil 4.28: Çatlak derinliği oranı ve eğrilik oranına göre orta noktanın yer değiştirme oranı ($[0/90/90/0]$).



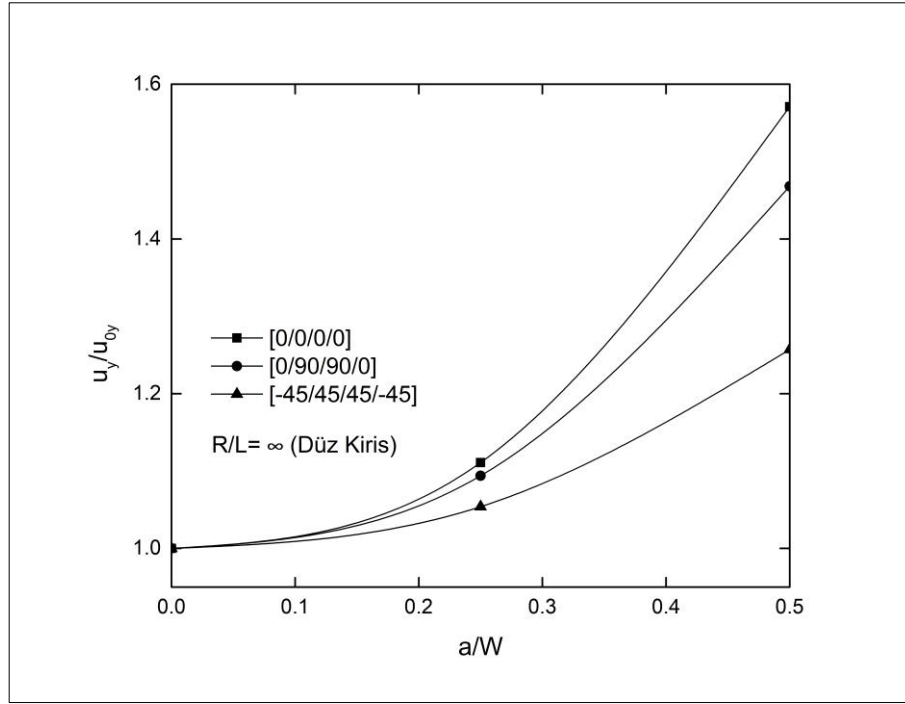
Şekil 4.29: Çatlak derinliği oranı ve eğrilik oranına göre orta noktanın yer değiştirmesi ($[-45/45/45/-45]$).



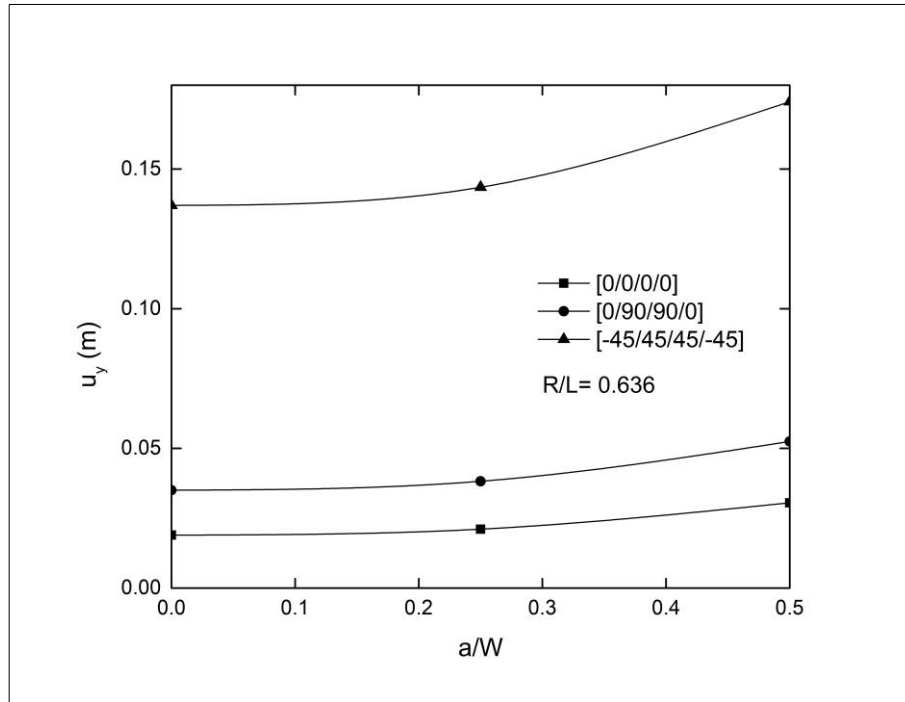
Şekil 4.30: Çatlak derinliği oranı ve eğrilik oranına göre orta noktanın yer değiştirme oranı ($[-45/45/45/-45]$).



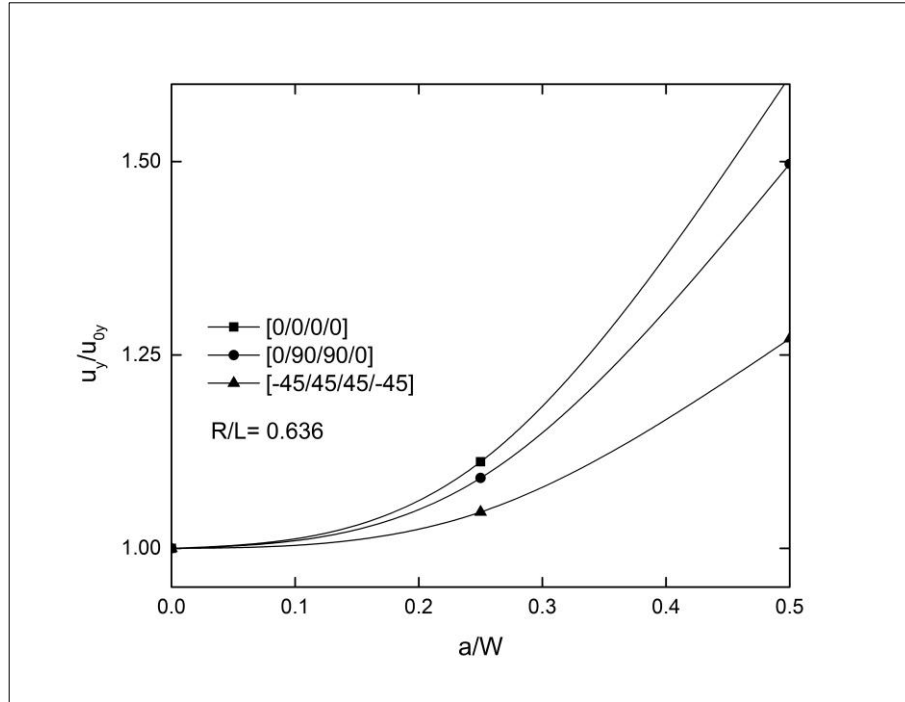
Şekil 4.31: Çatlak derinliği oranı ve kompozit açılarına göre orta noktanın yer değiştirmesi ($R/L = \infty$).



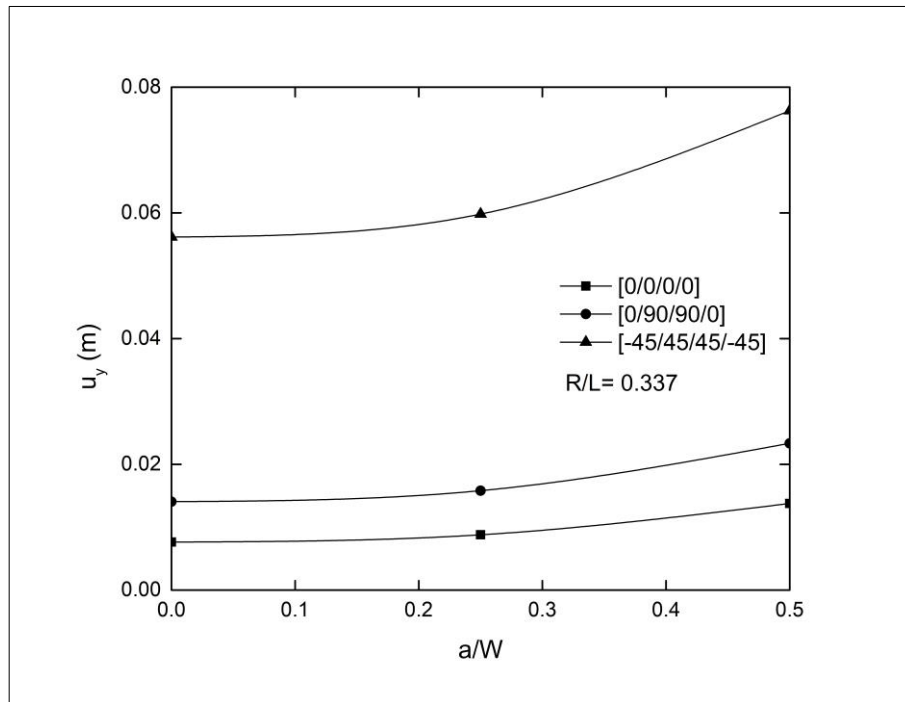
Şekil 4.32: Çatlak derinliği oranı ve kompozit açılarına göre orta noktanın yer değıştirme oranı ($R/L = \infty$).



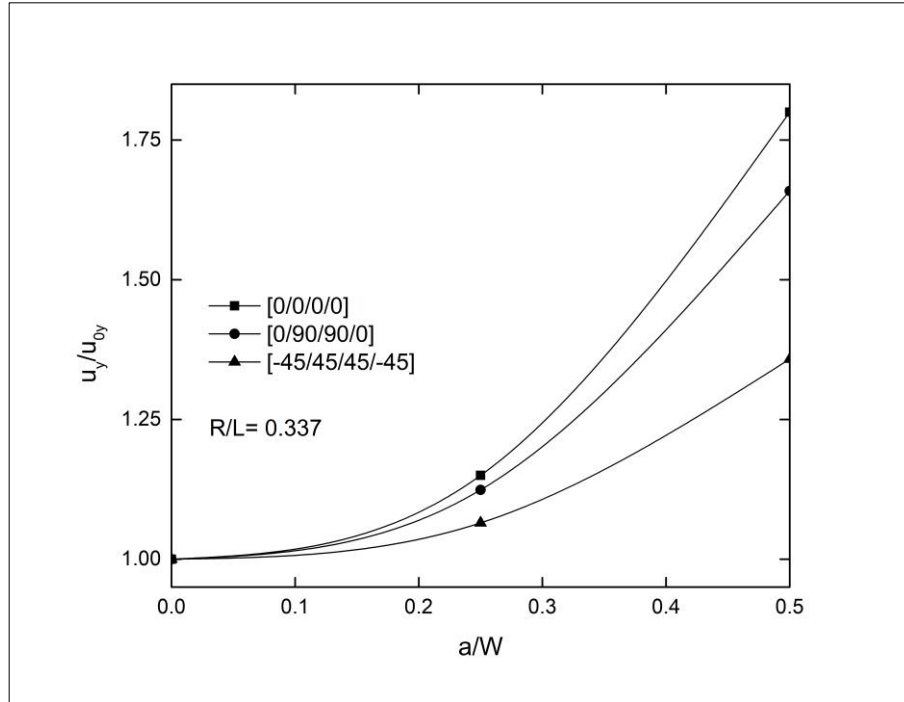
Şekil 4.33: Çatlak derinliği oranı ve kompozit açılarına göre orta noktanın yer değıştirmesi ($R/L = 0,636$).



Şekil 4.34: Çatlak derinliği oranı ve kompozit açılarına göre orta noktanın yer değiştirme oranı ($R/L = 0,636$).



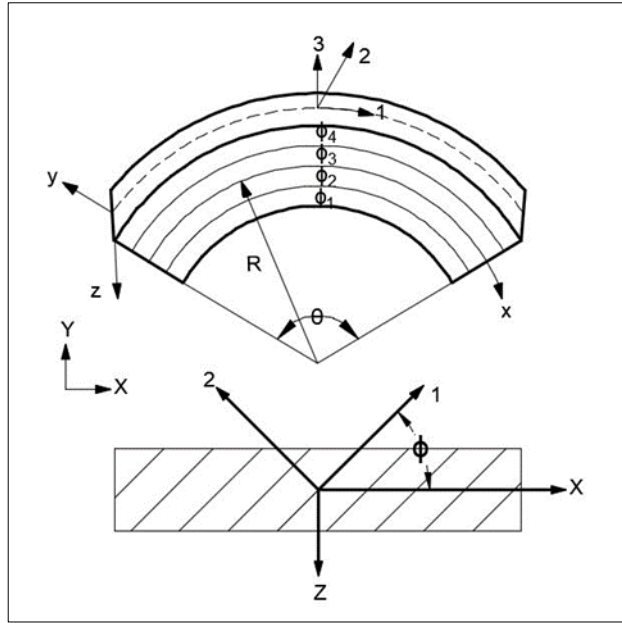
Şekil 4.35: Çatlak derinliği oranı ve kompozit açılarına göre orta noktanın yer değiştirmesi ($R/L = 0,337$).



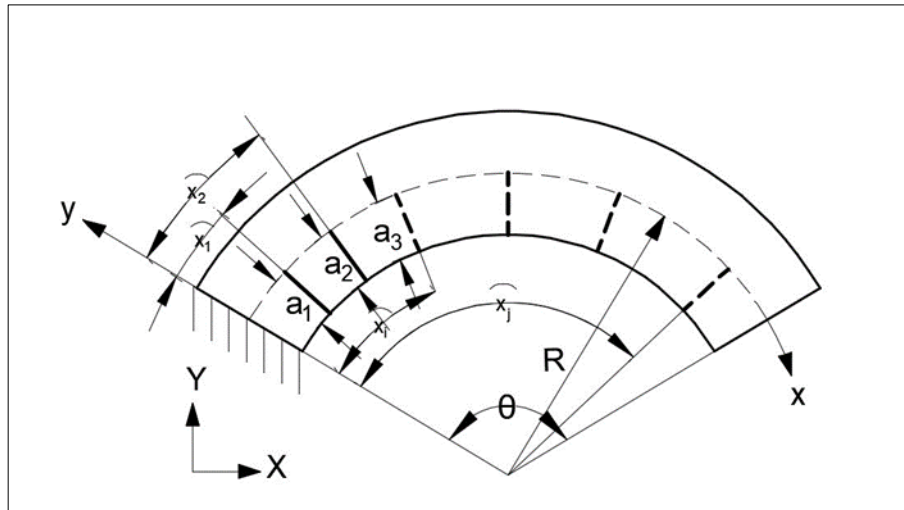
Şekil 4.36: Çatlak derinliği oranı ve kompozit açılara göre orta noktanın yer değiştirme oranı ($R/L = 0,337$).

4.6. Farklı Eğrilik Değerlerine Sahip Çatlaklı Kompozit Kirişlerin Dinamik Analizi

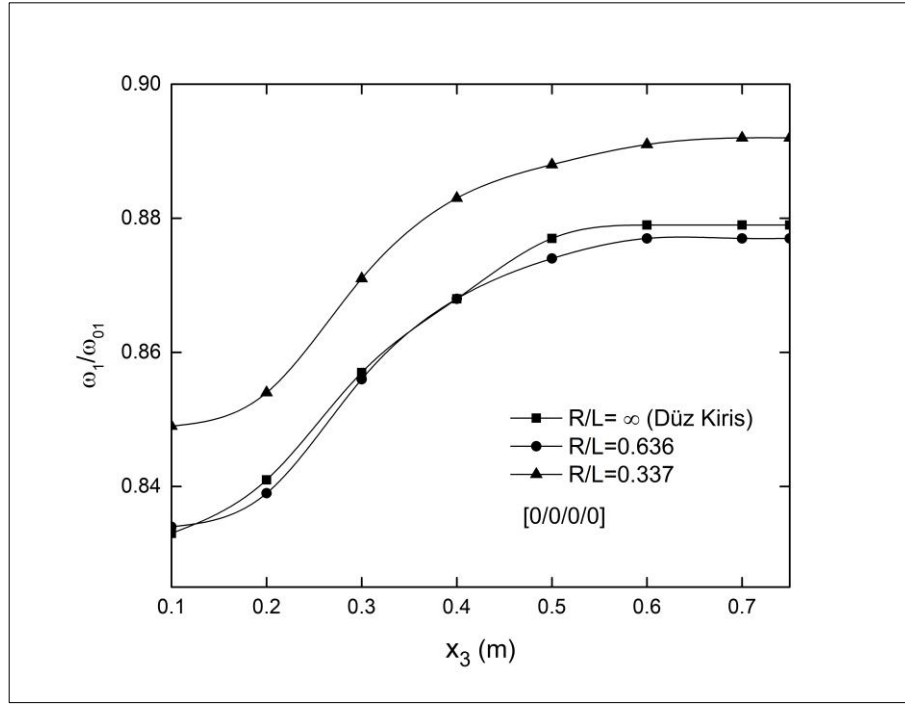
Bu kısımda farklı eğrilik değerlerine (R/L), çatlak uzunluk oranlarına (a/w) ve kompozit açılara (ϕ) göre dinamik analiz yapılmıştır. Kompozit eşit kalınlıklarda dört tabakadan oluşmaktadır ve Şekil 4.37’de tabakalar ve açıları gösterilmiştir. Üç farklı dizilişteki yapı incelenmiştir. [0/0/0/0], [0/90/90/0] ve [-45/45/45/-45]. Şekil 4.38’de kompozit eğri kirişin geometri ve boyut özellikleri verilmiştir. Kiriş uzunluğu, $L = 0,8 \text{ m}$, yüksekliği, $W = 0,2 \text{ m}$, genişliği, $B = 0,1 \text{ m}$, uygulanan kuvvet $P = 10^7 \text{ N}$. Malzeme özellikleri $E_1 = 121 \text{ GPa}$, $E_2 = E_3 = 8,96 \text{ GPa}$, $\nu_{12} = \nu_{13} = 0,27$, $\nu_{23} = 0,4$, $G_{12} = G_{13} = 4,7 \text{ GPa}$, $G_{23} = 3,1 \text{ GPa}$, $\rho = 1490 \text{ kg/m}^3$. Çatlak konumları ve uzunlukları sırasıyla, $x_1 = 0,04 \text{ m}$, $a_1 = 0,006 \text{ m}$, $x_2 = 0,08 \text{ m}$, $a_2 = 0,004 \text{ m}$, $x_3 = 0.1 \text{ m}$ ’den 0.75 m ’ye kadar, $a_3 = 0,006 \text{ m}$. Problemden ilk iki çatlak konumu sabitken üçüncü çatlak her bir analizde yer değiştirmektedir. Sonuçlarda XY düzlemindeki ilk üç doğal frekans değerleri alınmıştır. Çatlaklı yapıdaki i. doğal frekans, ω_i , çatlaksız yapının i. frekansı ise ω_{0i} olarak gösterilmektedir. Sonuçlar Şekil 4.39-56’da verilmektedir.



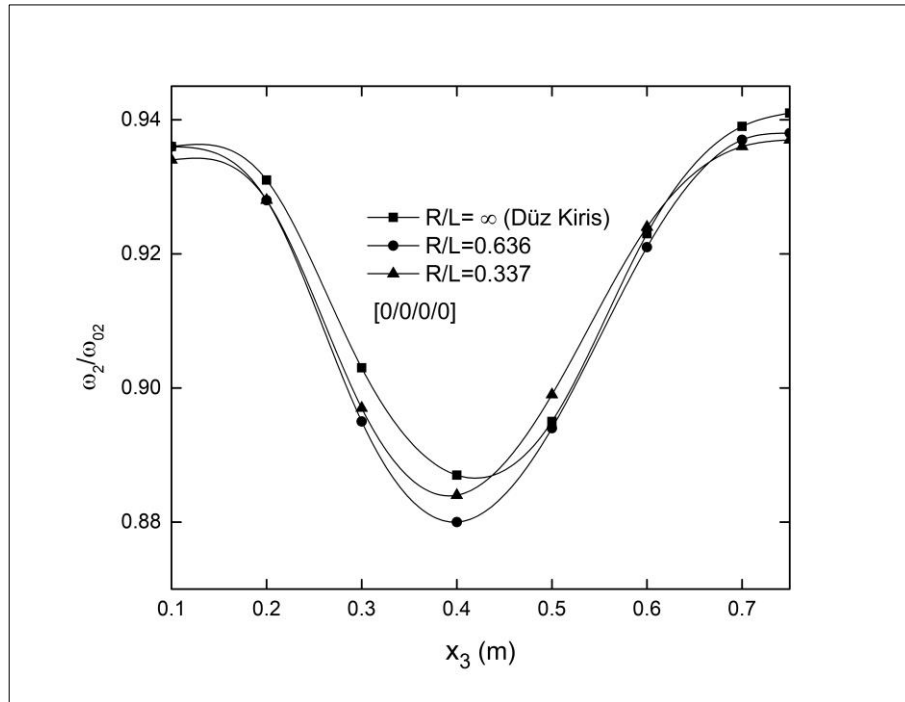
Şekil 4.37: Eğri kompozit kiriş için geometri ve boyut özellikleri.



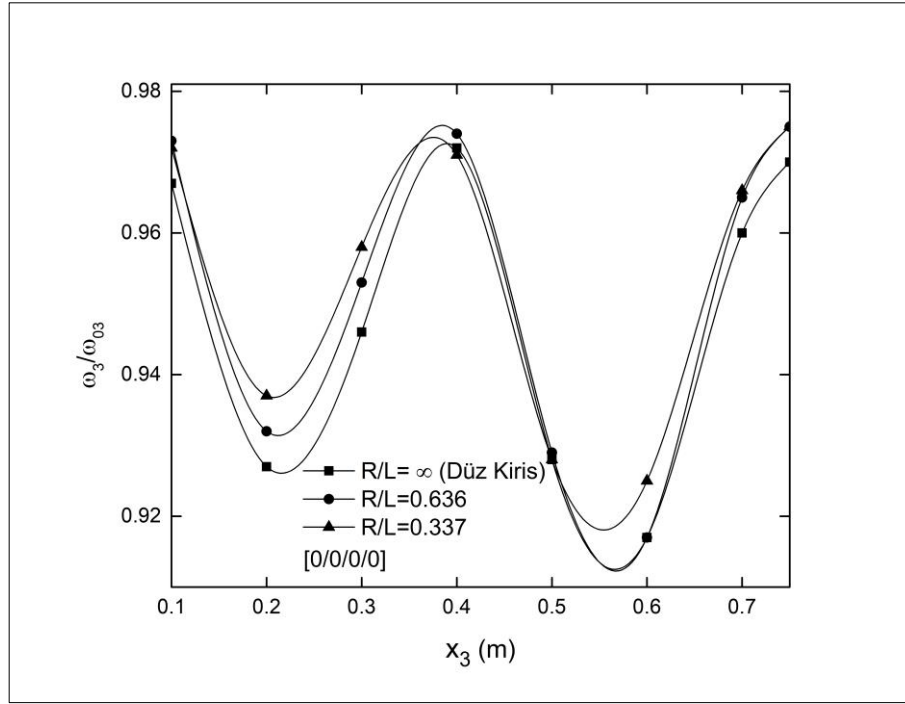
Şekil 4.38: Eğri kompozit kiriş dinamik analizi için çatlak konumlarının gösterimi.



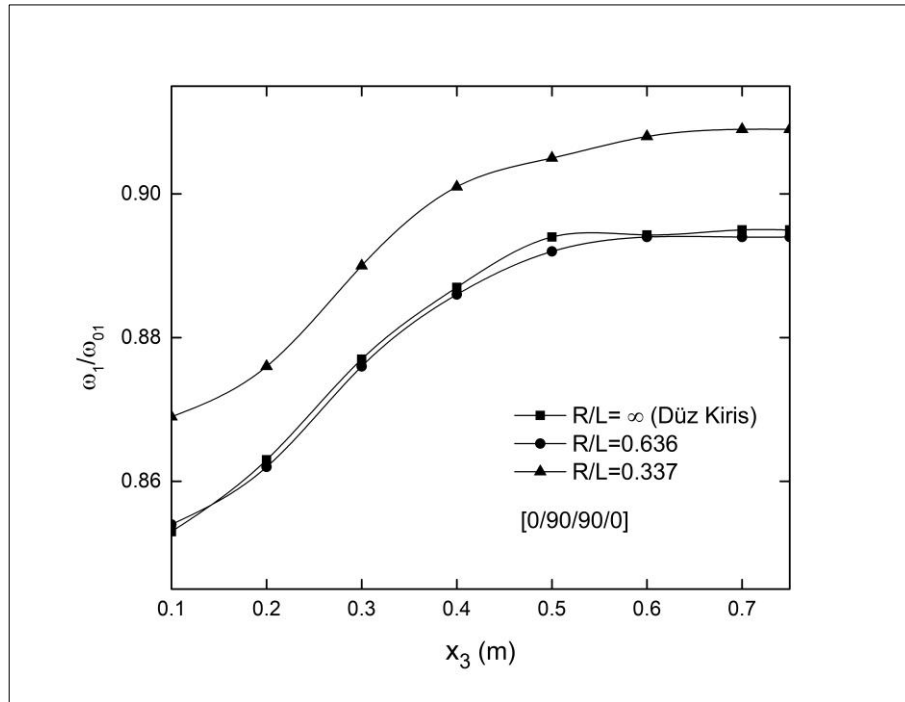
Şekil 4.39: Üçüncü çatlak konumunun birinci doğal frekansa etkisi ([0/0/0/0]).



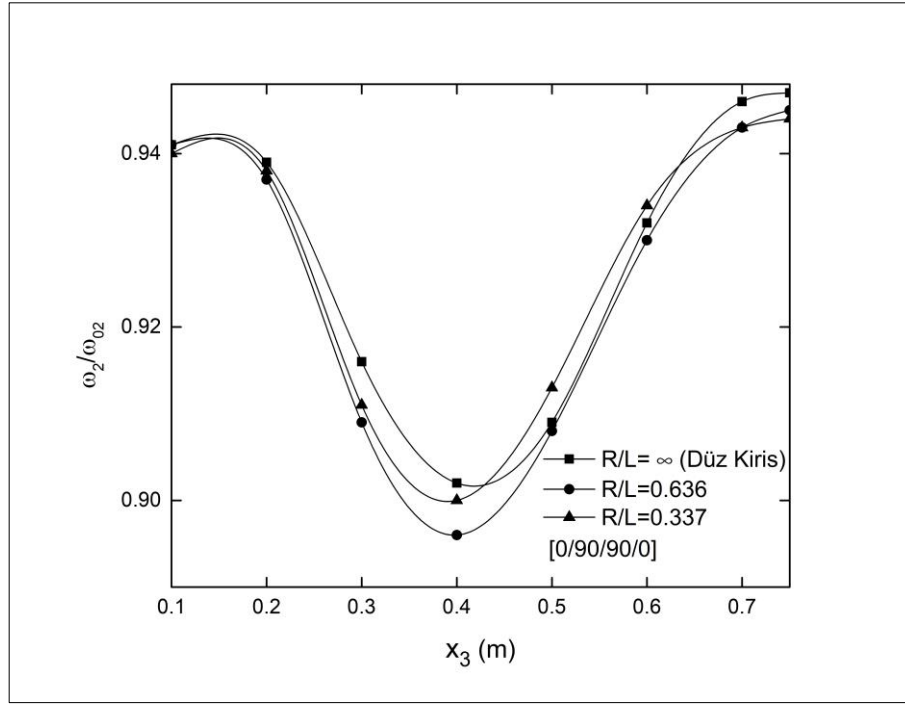
Şekil 4.40: Üçüncü çatlak konumunun ikinci doğal frekansa etkisi ([0/0/0/0]).



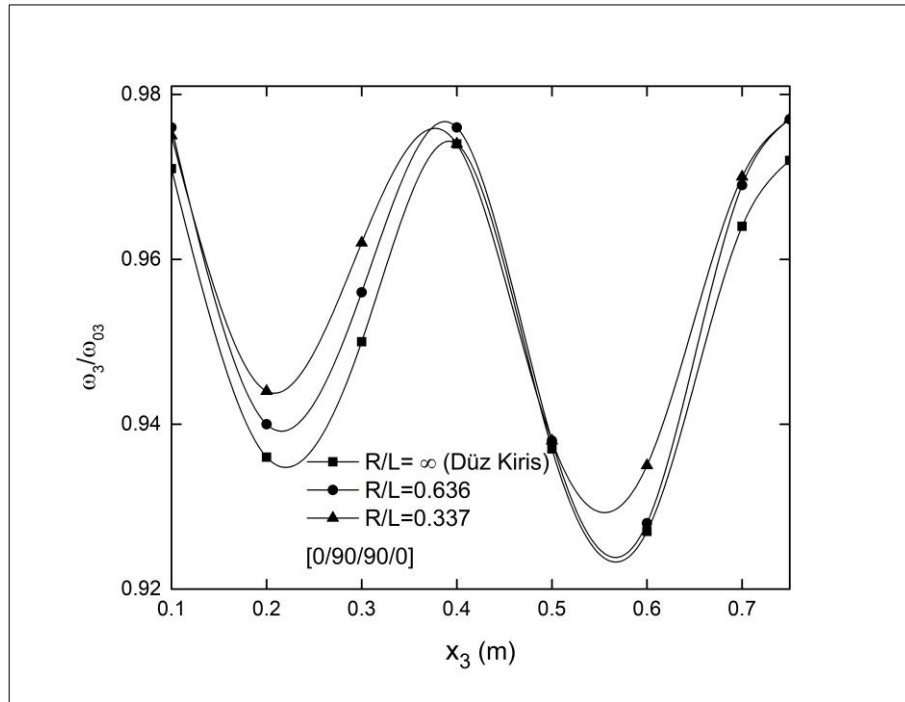
Şekil 4.41: Üçüncü çatlak konumunun üçüncü doğal frekansa etkisi ([0/0/0/0]).



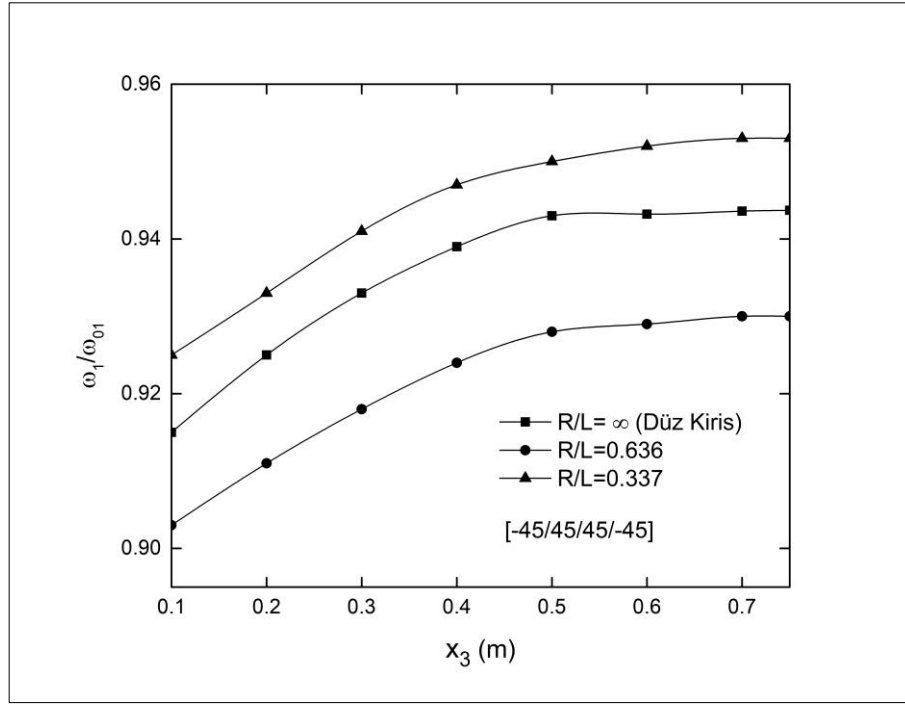
Şekil 4.42: Üçüncü çatlak konumunun birinci doğal frekansa etkisi ([0/90/90/0]).



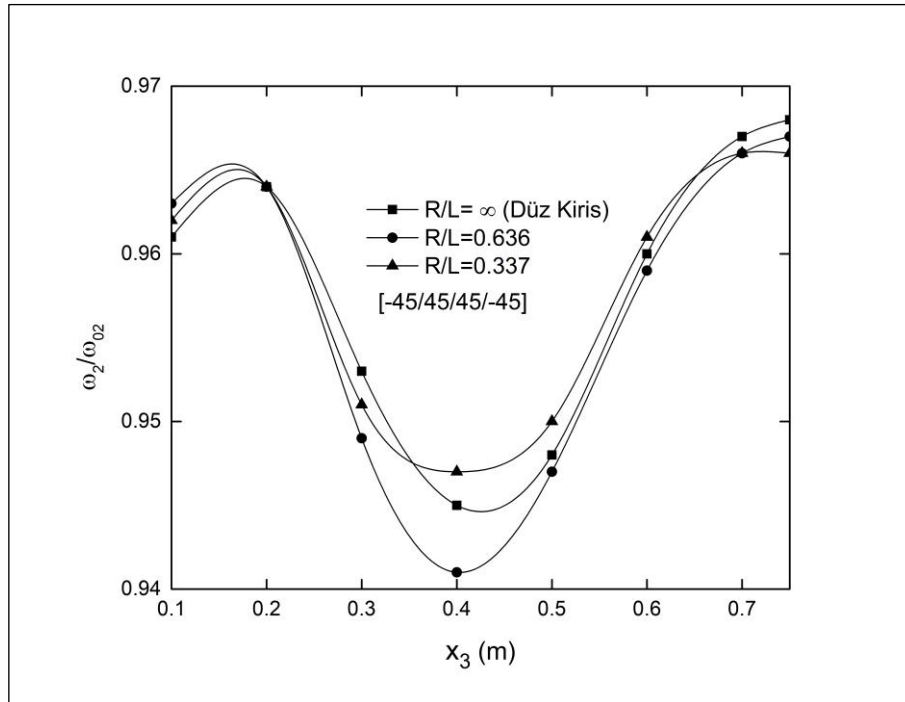
Şekil 4.43: Üçüncü çatlak konumunun ikinci doğal frekansa etkisi ([0/90/90/0]).



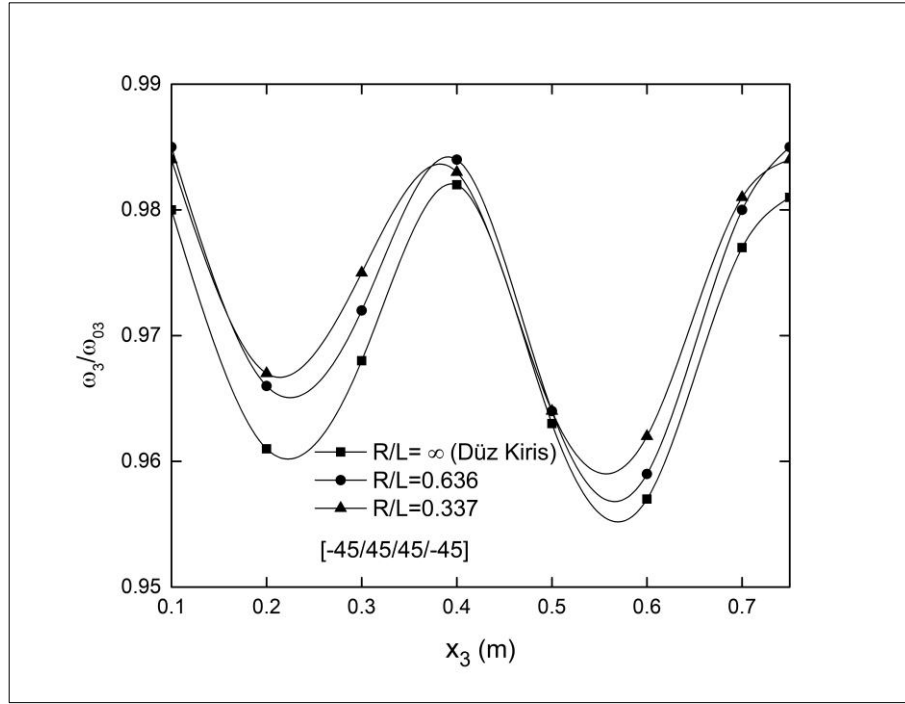
Şekil 4.44: Üçüncü çatlak konumunun üçüncü doğal frekansa etkisi ([0/90/90/0]).



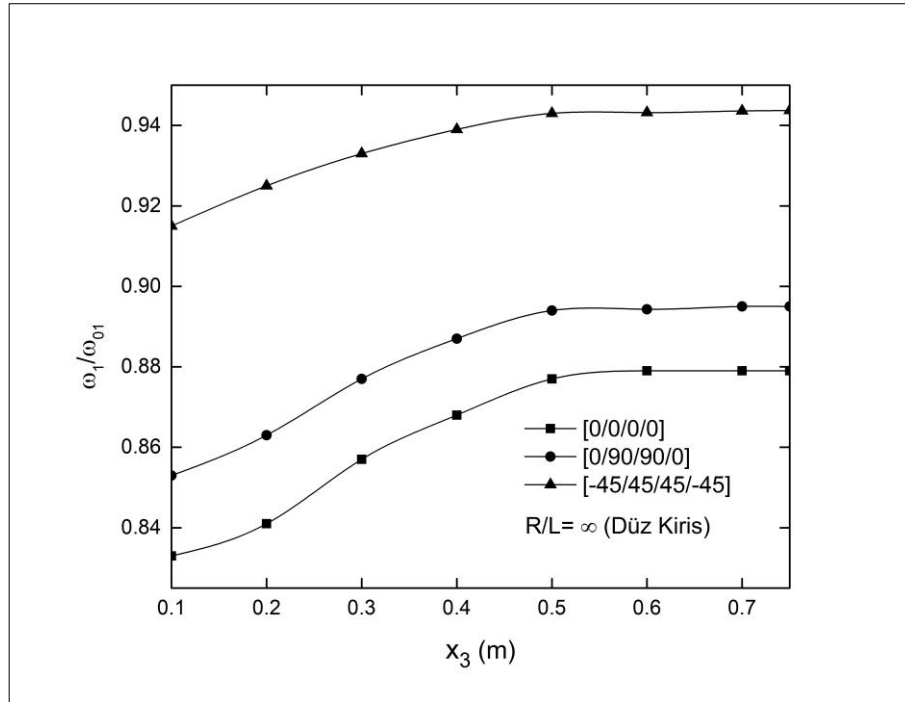
Şekil 4.45: Üçüncü çatlak konumunun birinci doğal frekansa etkisi ([-45/45/45/-45]).



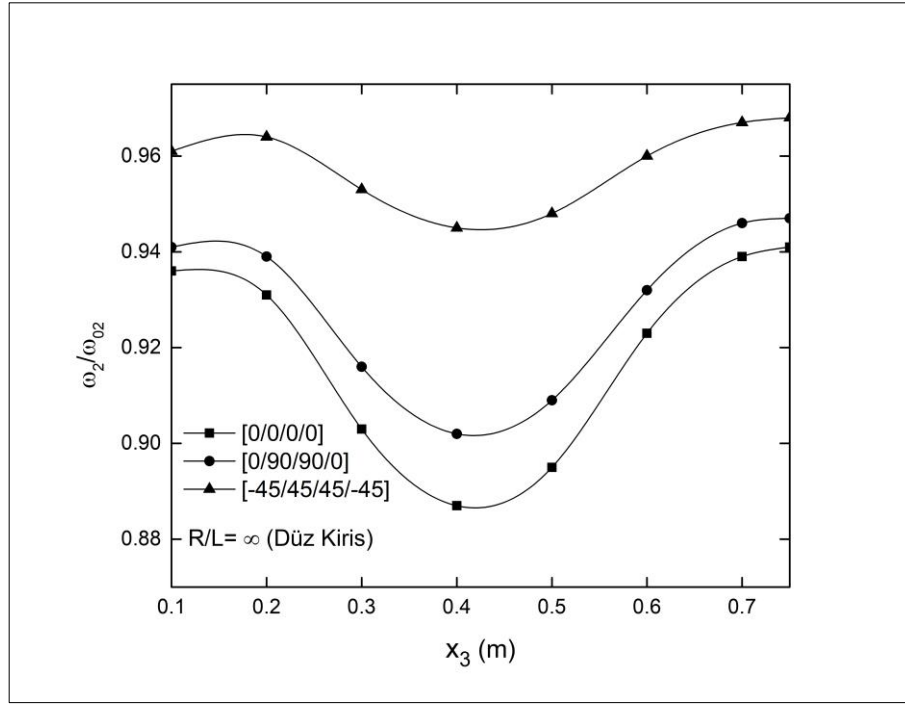
Şekil 4.46: Üçüncü çatlak konumunun ikinci doğal frekansa etkisi ([-45/45/45/-45]).



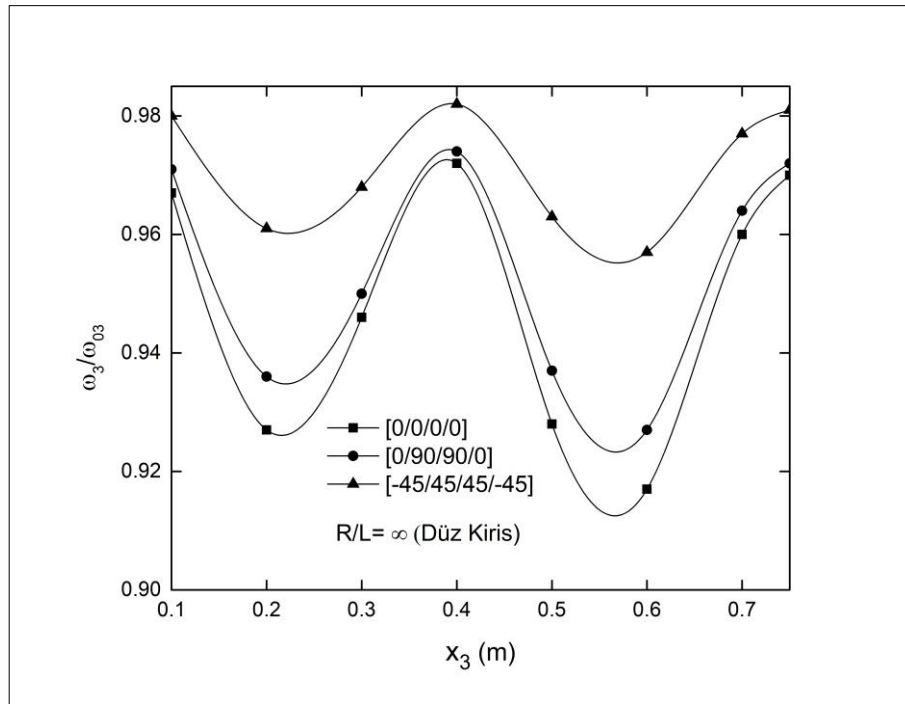
Şekil 4.47: Üçüncü çatlak konumunun üçüncü doğal frekansa etkisi ($[-45/45/45/-45]$).



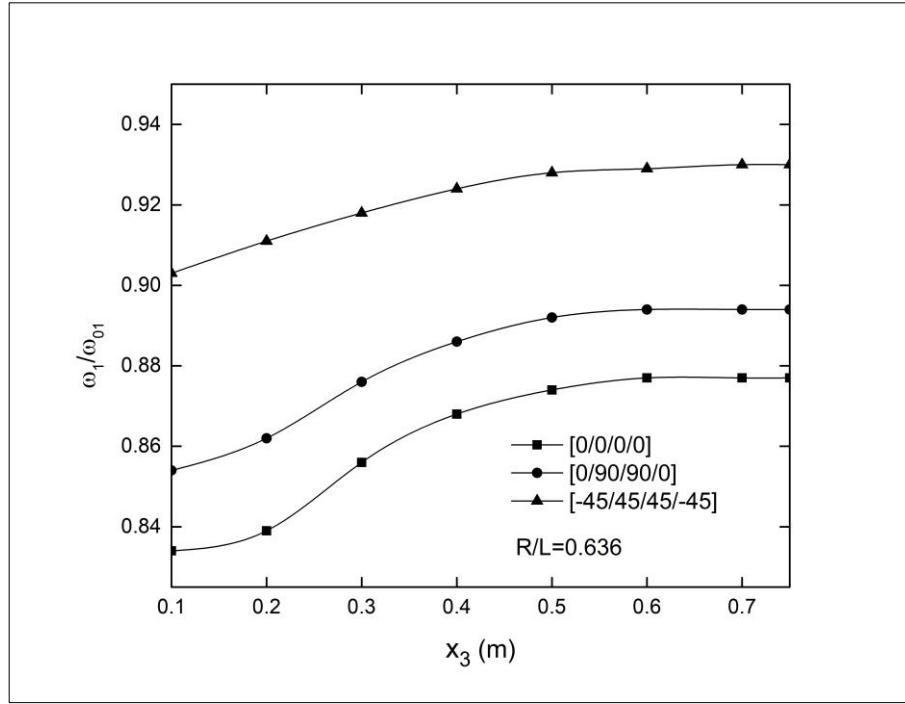
Şekil 4.48: Üçüncü çatlak konumunun birinci doğal frekansa etkisi ($R/L = \infty$).



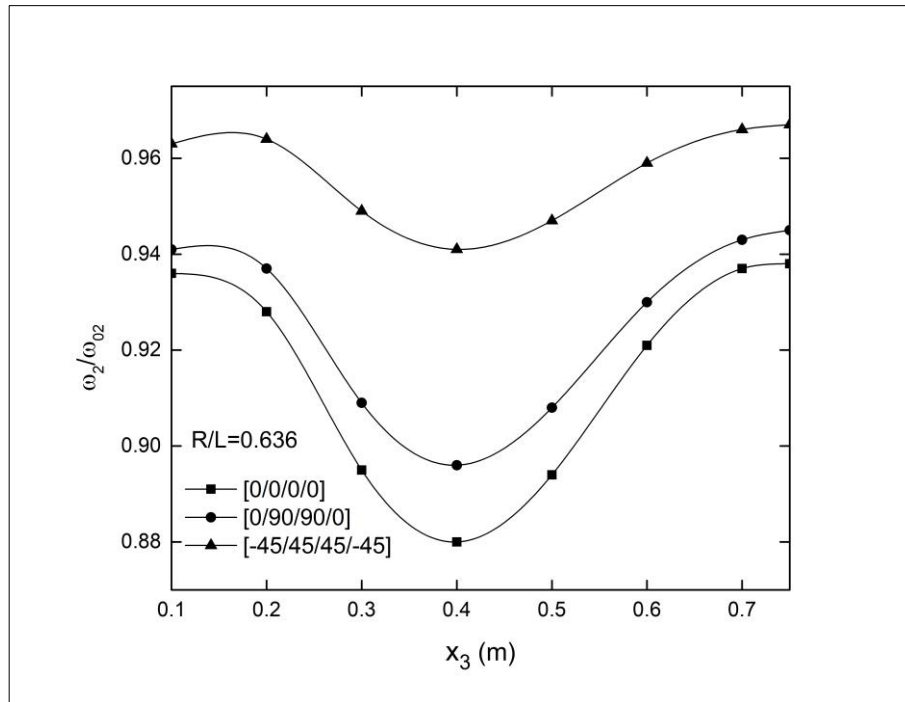
Şekil 4.49: Üçüncü çatlak konumunun ikinci doğal frekansa etkisi ($R/L = \infty$).



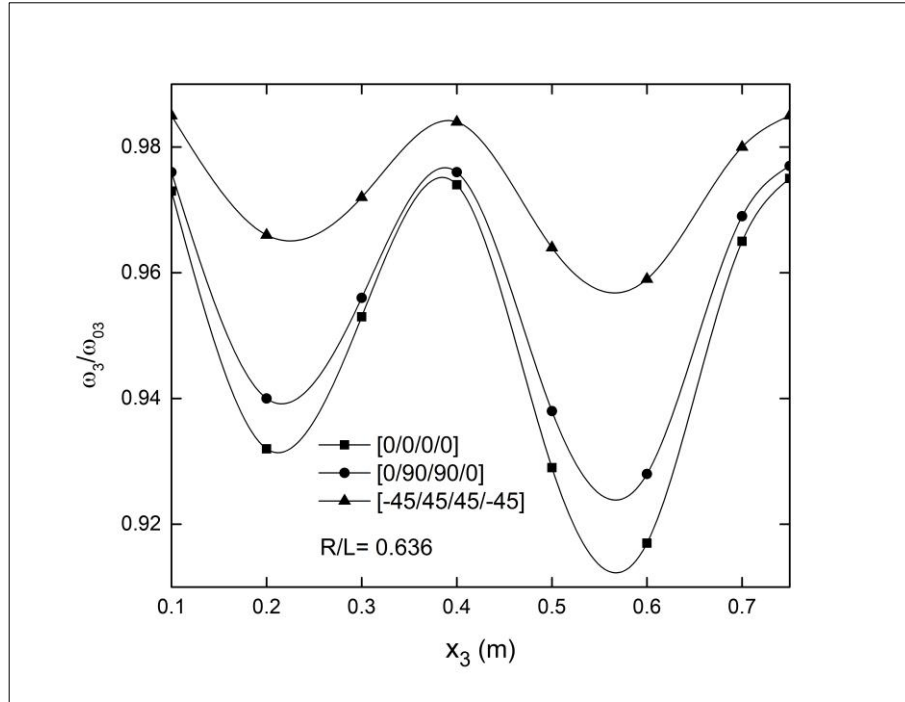
Şekil 4.50: Üçüncü çatlak konumunun üçüncü doğal frekansa etkisi ($R/L = \infty$).



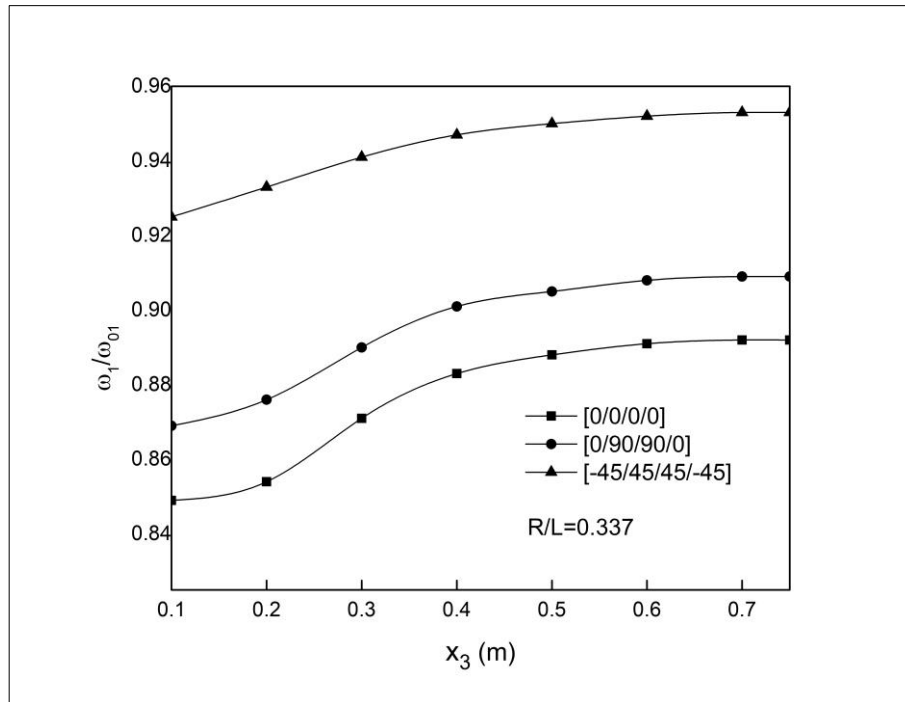
Şekil 4.51: Üçüncü çatlak konumunun birinci doğal frekansa etkisi ($R/L = 0,636$).



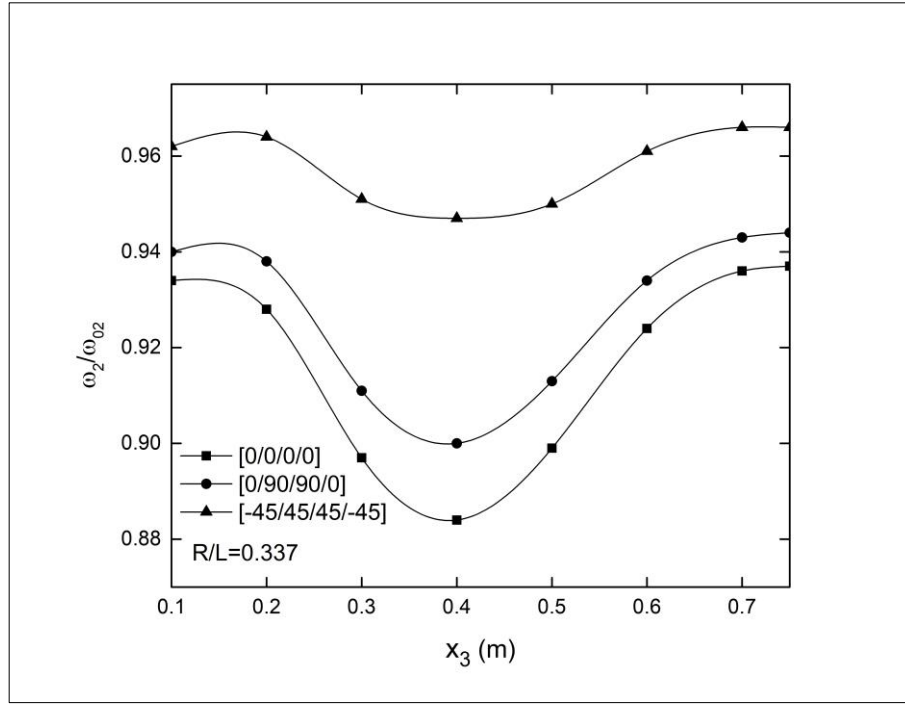
Şekil 4.52: Üçüncü çatlak konumunun ikinci doğal frekansa etkisi ($R/L = 0,636$).



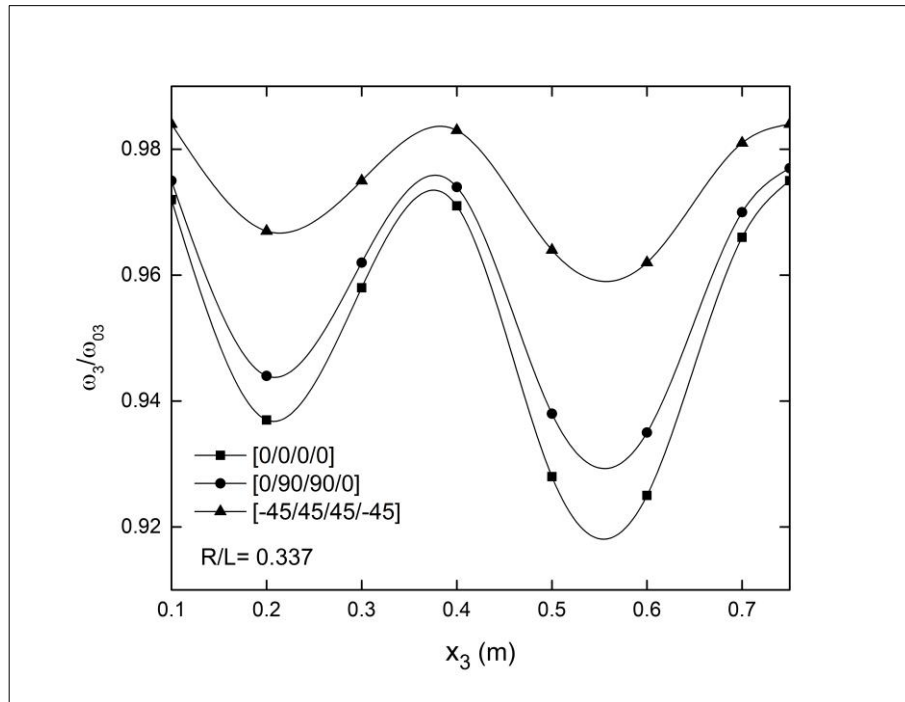
Şekil 4.53: Üçüncü çatlak konumunun üçüncü doğal frekansa etkisi ($R/L = 0,636$).



Şekil 4.54: Üçüncü çatlak konumunun birinci doğal frekansa etkisi ($R/L = 0,337$).



Şekil 4.55: Üçüncü çatlak konumunun ikinci doğal frekansa etkisi ($R/L = 0,337$).



Şekil 4.56: Üçüncü çatlak konumunun üçüncü doğal frekansa etkisi ($R/L = 0,337$).

5. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Bu tez kapsamında izotropik ve kompozit çatlaklı kirişlerin statik ve dinamik analizleri sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Bir önceki bölümde elde edilen sonuçlar kısaca özetlenirse:

- İzotropik düz kiriş için hesaplanan gerilme yoğunluğu faktörü Tablo 4.1’de görüldüğü üzere literatürle uyumlu sonuçlar vermiştir.
- İzotrop eğri kiriş için Şekil 4.3-16 incelendiğinde gerilme yoğunluğu faktörünün çatlak derinliği oranının artmasıyla arttığı, eğrilik açısının (θ) artmasıyla azaldığı görülmektedir. Gerilme yoğunluğu faktörünün R/L değeri 1.5’e kadar arttığı ve bunun üzerindeki değerlerde sabit kaldığı görülmüştür. Literatürle karşılaştırıldığında farklılıklar görülmektedir. Çatlak derinlik oranı arttıkça Muller’in sonucuna yaklaşılmakta ve çatlak derinlik oranı azaldıkça Tracy’e yakın sonuçlar elde edilmektedir [3]. Yer değiştirme ve gerilmenin, çatlak derinlik oranı arttıkça arttığı gözlemlenmiştir. Yer değiştirmenin ve gerilmenin R/L değeri 1,5 ‘e kadar arttığı ve sonrasında sabit kaldığı görülmüştür.
- Çoklu çatlaklı izotrop düz kirişin statik analiz sonuçları Şekil 4.18 incelendiğinde literatürle uyumlu sonuçlar verdiği görülmektedir.
- Çoklu çatlaklı izotrop düz kiriş için dinamik analiz sonuçları Şekil 4.20-22’de görüldüğü üzere literatürle uyumlu sonuçlar vermektedir.
- Farklı eğrilik değerlerine sahip çatlaklı kompozit kirişlerin Şekil 4.25-36’daki statik analiz sonuçları incelendiğinde, eğrilik oranı (R/L) ve çatlak derinlik oranı (a/W) arttıkça yer değiştirmenin de arttığı görülmektedir. Herhangi bir eğrilik oranı ve çatlak derinlik oranında en yüksek yer değiştirme sırasıyla [-45/45/45/-45], [0/90/90/0], [0/0/0/0] yapılarında meydana geldiği ve yer değiştirme oranı çatlak derinlik oranının artışıyla arttığı görülmektedir. Yer değiştirme oranının (incelenmiş olan üç farklı kompozit açılarına sahip yapıda eğrilik oranına (R/L) bağlı olarak) en büyükten en küçüğe, 0,337, 0,636 ve ∞ (düz kiriş) eğrilik oranı değerlerinde sıralandığı görülmektedir.
- Farklı eğrilik değerlerine sahip çatlaklı kompozit kirişlerin dinamik analiz sonuçları Şekil 4.39-56’da görüldüğü üzere birinci doğal frekans oranı üçüncü çatlak konumu uzaklığı arttıkça artmakta ve en büyükten küçüğe doğru

sıralamanın, 0,337, 0.636, ∞ (düz kiriş), eğrilik oranlarında olduğu gözükmemektedir. İkinci doğal frekans oranının (herhangi bir kompozit açılı yapıda ve eğrilik oranında) $x_3 = 0,4 m$ 'de en düşük değeri aldığı görülmektedir. Üçüncü doğal frekans oranı ise (herhangi bir kompozit açılı yapıda ve eğrilik oranında) $x_3 = 0,4 m$ 'de en yüksek değerini aldığı ve en düşük değerleri $x_3 = 0,2 m$ ve $x_3 = 0,57 m$ de aldığı görülmektedir.

Yapılan bu çalışmada çatlaklı kompozit eğri kirişlerin statik ve dinamik davranışları incelenmiştir. Bu çalışmaya ek olarak gelecekte çatlaklı kompozit eğri kirişlerin termomekanik ve farklı yük tipleri (darbe, patlama yükleri) altında dinamik analizleri yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Web 1, (2015),<https://metallurgyandmaterials.wordpress.com/2015/12/25/liberty-ship-failures/>, (Erişim Tarihi: 12/12/2016).
- [2] Müller W. H., Hermann G., Gao H., (1993), “Elementary strength theory of cracked beams”, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 18 (2), 163-177.
- [3] Müller W. H., Hermann G., Gao H., (1993), “A note on curved cracked beams”, International Journal of Solids and Structures, 30 (11), 163-177.
- [4] Shen G., Glinka G., (1991), “Determination of weight functions from reference stress intensity factors”, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 15 (3), 237-245.
- [5] Petroski H. J., Achenbach J. D., (1978), “Computation of the weight functions from a stress intensity factors”, Engineering Fracture Mechanics, 10 (2), 257-266.
- [6] Glinka G., Shen G., (1991), “Universal features of weight functions for cracks in mode I”, Engineering Fracture Mechanics, 40 (6), 1135-1146.
- [7] Rice J. R., (1972), “Some remarks on elastic crack-tip stress fields”, International Journal of Solids and Structures, 8 (6), 751-758.
- [8] Skrinar M., (2009), “Elastic beam finite element with an arbitrary number of transverse cracks”, Finite Elements in Analysis and Design, 45 (3), 181-189.
- [9] Skrinar M., Plibersek T., (2012), “On the derivation of symbolic form of stiffness matrix and load vector of a beam with an arbitrary number of transverse cracks”, Computational Materials Science, 52 (1), 253-260.
- [10] Skrinar M., (2013), “On the derivation of symbolic form of stiffness matrix and load vector of a beam with an arbitrary number of transverse cracks”, International Journal of Solids and Structures, 50 (14-15), 2527-2541.
- [11] Chondros T. G, Dimarogonas A. D., Yao J., (1997), “A consistent cracked bar vibration theory”, Journal of Sound and Vibrations, 200 (3), 303-313.
- [12] Chondros T. G, Dimarogonas A. D., Yao J., (1998), “A continuous cracked beam vibration theory”, Journal of Sound and Vibrations, 215 (1), 17-34.
- [13] Shifrin E. I., Ruotolo R., (1999), “Natural frequencies of a beam with an arbitrary number of cracks”, Journal of Sound and Vibrations, 222 (3), 409-423.

- [14] Kısa M., Brandon J., Topçu M., (1998), “Free vibration analysis of cracked beams by a combination of finite elements and component mode synthesis methods”, *Computers and Structures*, 67 (4), 215-223.
- [15] Kısa M., Gürel M. A., (2007), “Free vibration analysis of uniform and stepped cracked beams with circular cross sections”, *International Journal of Engineering Science*, 645 (2-8), 364-380.
- [16] Saavedra P. N., Cuitino L. A., (2001), “Crack detection and vibration behavior of cracked beams”, *Computers and Structures*, 79 (16), 1451-1459.
- [17] Viola E., Federici L., Nobile L., (2001), “Detection of crack location using cracked beam element method for structural analysis”, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 36 (1), 23-35.
- [18] Kessissoglou N. J., Zheng D. Y., (2004), “Free vibration analysis of a cracked beam by finite element method”, *Journal of Sound and Vibration*, 273 (63), 457-475.
- [19] Krawczuk M., (2002), “Application of spectral beam finite element with a crack and iterative search technique for damage detection”, *Finite Elements in Analysis and Design*, 38 (6), 537-548.
- [20] Krawczuk M., Ostachowicz W. M., (1995), “Modelling and vibration analysis of a cantilever composite beam with transverse open crack”, *Journal of Sound and Vibration*, 183 (1), 69-89.
- [21] Krawczuk M., (1994), “A new finite element for the static and dynamic analysis of cracked composite beams”, *Computers and Structures*, 52 (3), 551-561.
- [22] Krawczuk M., Ostachowicz W., Zak A., (1997), “Modal analysis of cracked, unidirectional composite beam”, *Composites part b: engineering*, 28 (5-6), 641-650.
- [23] Anlas G., Santare M. H., Lambros J., (2000), “Numerical calculation of stress intensity factors in functionally graded materials”, *International Journal of Fracture*, 104, 131-143.
- [24] Owen D. R. J., (1983), “Engineering Fracture Mechanics: Numerical Methods and Applications”, 1st Edition, Pineridge Press.
- [25] Web 2, (2017), <http://www2.isikun.edu.tr/personel/ahmet.aran/km.pdf>, (Erişim Tarihi: 13/03/2017).
- [26] Anderson T. L., (2004), “Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications”, 3rd Edition, CRC Press.
- [27] Tada H., Paris P. C., Irwin G. R., (2000), “The Stress Analysis of Cracks Handbook”, 3rd Edition, ASME Press.

- [28] Murakami Y., (1986), “Stress Intensity Factors Handbook”, 1st Edition, Pergamon Pr.
- [29] Rooke D. P., (1976), “Compendium of Stress Intensity Factors”, 1st Edition, H.M.S.O.
- [30] Sih G. C., (1973), “Handbook of Stress Intensity Factors”, 1st Edition, Lehigh University, Institute of Fracture and Solid.
- [31] Web 3, (2016), <http://www.swri.org/consortia/nasgro>, (Erişim Tarihi: 25/07/2016).
- [32] Web 4, (2016), <http://www.twisoftware.com/software/crackwise/>, (Erişim Tarihi: 25/07/2016).
- [33] Web 5, (2016), <http://www.fracanalysis.com/index.html>, (Erişim Tarihi: 25/07/2016).
- [34] Web 6, (2016), <https://www.esrd.com/applications/fracture-mechanics-apps/>, (Erişim Tarihi: 25/07/2016).
- [35] Web 7, (2016), <http://www.afgrow.net/about/capabilities.aspx>, (Erişim Tarihi: 25/07/2016).
- [36] Web 8, (2016), http://www.zentech.co.uk/zencrack_overview_what.htm, (Erişim Tarihi: 25/07/2016).
- [37] Web 9, (2016), <http://abaqus.software.polimi.it/v6.14/books/usi/default.htm>, (Erişim Tarihi: 10/08/2016).

ÖZGEÇMİŞ

Erhan Özçare 1991 yılında İzmir’de doğdu. 2009 yılında başladığı Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümünü 2013 yılında başarıyla tamamladı. 2013 yılında başladığı İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümündeki yüksek lisans eğitimini 2015 yılında bıraktı. Aynı yılda yüksek lisans eğitimine Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalında başladı. 2015 yılından beri Gebze Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.