

T.C.
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI



**İZOTROPİK ve KOMPOZİT PLAKLARDA MİKRO ÇATLAK
TOKLAŞMASININ PERİDİNAMİK TEORİSİYLE İNCELENMESİ**

Doktora Tezi

Muhammed Fatih BAŞOĞLU

Danışman

Prof. Dr. Zihni ZERİN

II. Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Adnan KEFAL

SAMSUN

2021

TEZ KABUL VE ONAYI

Muhammed Fatih BAŞOĞLU tarafından, Prof. Dr. Zihni ZERİN ve Dr. Öğr. Üyesi Adnan KEFAL danışmanlığında hazırlanan “İzotropik ve Kompozit Plaklarda Mikro Çatlak Toklaşmasının Peridinamik Teorisiyle İncelenmesi” başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından 02.08.2021 tarihinde yapılan sınav sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

	Unvanı Adı Soyadı Üniversitesi Ana Bilim/Ana Sanat Dalı	İmza	Sonuç
Başkan	Prof. Dr. Zeki KARACA Ondokuz Mayıs Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
Üye (Danışman)	Prof. Dr. Zihni ZERİN Ondokuz Mayıs Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
Üye	Prof. Dr. Mehmet YILDIZ Sabancı Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Nano Mühendislik Programı		☒ Kabul ☐ Ret
Üye	Prof. Dr. Fethi KADIOĞLU İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
Üye	Doç. Dr. Burçin Şenol ŞEKER Amasya Üniversitesi Yapı Bilgisi Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunca belirlenen ve yukarıda adları yazılı jüri üyeleri tarafından uygun görülmüştür.

ONAY

... / ... / ...

Prof. Dr. Ali BOLAT
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Hazırladığım Doktora tezinin bütün aşamalarında bilimsel etiğe ve akademik kurallara riayet ettiğimi, çalışmada doğrudan veya dolaylı olarak kullandığım her alıntıya kaynak gösterdiğimi ve yararlandığım eserlerin Kaynaklar'da gösterilenlerden oluştuğunu, her unsurun enstitü yazım kılavuzuna uygun yazıldığını ve TÜBİTAK Araştırma ve Yayın Etiği Kurulu Yönetmeliği'nin 3. bölüm 9. maddesinde belirtilen durumlara aykırı davranılmadığını taahhüt ve beyan ederim.

02/08/2021

Muhammed Fatih BAŞOĞLU

TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI

Tez Başlığı : İzotropik ve Kompozit Plaklarda Mikro Çatlak Toklaşmasının Peridinamik Teorisiyle İncelenmesi

Yukarıda başlığı belirtilen tez çalışması için şahsım tarafından 23/06/2021 tarihinde intihal tespit programından alınmış olan özgünlük raporu sonucunda;

Benzerlik oranı : % 4

Tek kaynak oranı : % 2 çıkmıştır.

02/08/2021

Prof. Dr. Zihni ZERİN

ÖZET

İZOTROPİK ve KOMPOZİT PLAKLARDA MİKRO ÇATLAK TOKLAŞMASININ PERİDİNAMİK TEORİSİYLE İNCELENMESİ

Muhammed Fatih BAŞOĞLU

Ondokuz Mayıs Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Doktora, Ağustos/2021

Danışman: Prof. Dr. Zihni ZERİN

II. Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Adnan KEFAL

Mühendislikte yaygın olarak kullanılan beton, kompozit, seramik gibi malzemeler aşınma direnci, oksidasyon direnci, yüksek ısı direnci ile birlikte rijit ve gevrek bir yapıya sahiptirler. Sayılan üstünlüklerinin yanında gevrek karakteristikleri bu malzemeleri ani çatlak oluşumlarına karşı savunmasız bırakmaktadır. Gevrek yapılardaki bu tür ani hasar oluşumuna karşı direncin (tokluğun) yapı içerisinde mikro çatlak mevcudiyeti ile arttığı bilinen bir gerçektir. Ama böylesine kompleks çoklu mikro süreksizlikleri (çatlakları) modellemede mevcut klasik metotlar yetersiz kalmakta veya sınırlı çözümler sunmaktadır. Yakın geçmişte ortaya konan Peridinamik Teorisi ile bu tür süreksizliklerin dinamik kırılma modellemeleri sorunsuz şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Tez çalışması kapsamında Peridinamik Teorisi kullanılarak gevrek yapıdaki izotropik ve kompozit malzemelerin tokluk artırımının geliştirilmesinde mikro çatlak dağılımlarının etkisi incelenmiştir.

İlk olarak izotropik bir plakta mevcut ana çatlak ucu ve doğrultusu civarına konumlandırılan çoklu mikro çatlak uygulaması ile ana çatlağın doğrultusundan sapması ve yeni dallanmalar oluşturması üzerine etkisi incelenmiştir. Mikro çatlakların sağladığı tokluk artırım etkisini daha iyi anlayabilmek için doğrusal veya eğrisel formda konumlanmış mikro çatlak kümelerine sahip çeşitli durumlar modellenmiştir. Sonuçlar arasında ana çatlak ucunu eğrisel olarak çevreleyen mikro çatlak konumlandırmasının tokluk artırımında en etkin form olduğu görülmüştür.

Ardından tek doğrultulu kompozit tabakalarda üç farklı fiber yönelimi (0° , 45° , 90°) için çeşitli mikro çatlak konumlandırmaları tasarlanarak tokluk artırım modelleri oluşturulmuştur. Mikro çatlak modellerinin tokluk artırımına etkileri, ana çatlak ilerleme hızı ve çatlak ucu birim şekil değiştirme enerji yoğunluğu üzerinden kapsamlı karşılaştırmalar yapılarak analiz edilmiştir. Ana çatlak hattı etrafında yaygın konumlandırmaların etkin olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Peridinamik, Mikro çatlak, Çatlak etkileşimleri, Malzeme tokluğu, Çatlak ilerlemesi, Kompozit malzeme

ABSTRACT

INVESTIGATION OF MICRO CRACK TOUGHENING IN ISOTROPIC AND COMPOSITE PLATES BY UTILIZING PERIDYNAMIC THEORY

Muhammed Fatih BAŞOĞLU

Ondokuz Mayıs University

Institute of Graduate Studies

Department of Civil Engineering

PhD, August/2021

Supervisor: Prof. Dr. Zihni ZERİN

Co-Supervisor: Asst. Prof. Dr. Adnan KEFAL

Materials widely used in engineering such as concrete, composite and ceramic have a rigid and brittle structure with wear resistance, oxidation resistance, high heat resistance. Besides these advantages, their brittle characteristics make these materials vulnerable to sudden crack formation. By the presence of micro cracks in a brittle structure, the toughness enhancement that occurs against sudden damage formation is a known fact. However, existing classical methods are insufficient or offer limited solutions in modeling such complex multiple micro discontinuities (cracks). Dynamic fracture modeling of such discontinuities included structures can be performed without any challenge by the Peridynamic Theory, which has been put forward in the recent past. Within the scope of the thesis, the effect of micro crack distributions on the toughness enhancement of brittle isotropic and composite materials by utilizing Peridynamic Theory was investigated.

Firstly, the effect of multiple micro crack positioning around the tip and direction of the existing main crack in an isotropic plate on the deviation from its direction and the formation of new branches was investigated. To better understand the toughness enhancement effect provided by micro cracks, various cases included micro crack clusters placed in the linear or curvilinear form are modeled. Among the results, it was observed that micro crack positioning curvilinearly surrounding the main crack tip is an effective form in toughness enhancement.

Subsequently, various micro crack positionings were applied in unidirectional composite laminae for three different fiber orientations (0° , 45° , 90°), and toughness enhancement effects were examined. The effects of micro crack patterns on the toughness enhancement were investigated by making extensive comparisons over the main crack propagation rate and the strain energy density of the main crack tip. Extensive micro crack positioning along the main crack path has been found to be an effective strategy.

Keywords: Peridynamics, Micro cracks, Interactions of cracks, Material toughness, Crack propagation, Composite material

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Çalışmam boyunca, bilgisi, yardımları ve desteğini esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Zihni ZERİN'e; birikim ve tecrübeleri ile destek ve ilgisini eksik etmeyen ikinci danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Adnan KEFAL'e saygılarımı sunar, teşekkürü bir borç bilirim.

Leibniz Üniversitesi Sürekli Ortam Mekaniği Enstitüsünde bulunduğum süreç zarfında haberdar olduğum Peridinamik Teorisi üzerine çalışmam konusunda beni cesaretlendiren ve ihtiyaç durumunda vaktini ve rehberliğini esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Erkan ÖTERKUŞ'a; ayrıca Tez İzleme Komitemde yer alarak katkılarını sunan Sayın Prof. Dr. Zeki KARACA'ya ve Sayın Doç. Dr. Burçin Şenol ŞEKER'e; ve diğer bütün hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Lisansüstü eğitimim süresince güzel anılar biriktirdiğimiz halen görevde olan veya farklı vesilelerle ayrılan bütün Araştırma Görevlisi mesai arkadaşlarıma; yedi yılı aşkın süre aynı odayı benimle paylaşan bilim aşığı değerli kardeşim Dr. Ferruh TURAN'a teşekkür ederim.

Merhamet ve sevgileriyle kuşatıp beni bugünlere getiren anneme, babama ve kardeşlerime; sevgisi ve sabrıyla hep yanımda olan sevgili eşim Büşra'ya; yaklaşık bir buçuk sene önce ailemize katılan mutluluk kaynağımız sevgili kızımız Nil'e sonsuz sevgilerimi ve şükranlarımı sunarım.

Şüphesiz ki ismini burada zikredemediğim daha birçok kişinin sürece direkt veya dolaylı katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunmak; sürecin yorucu ve stresli safhalarında gönlünü kırmış olabileceklerimin aflarına sığınmak isterim.

Muhammed Fatih BAŞOĞLU

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iii
ABSTRACT	iv
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
TABLolar DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Amaç ve Kapsam	3
1.2. Literatür Taraması	4
1.3. Özgünlük ve Yapılan Çalışmalar	7
1.4. Tezin İçeriği	9
2. KLASİK KIRILMA MEKANIĞI.....	10
2.1. Griffith Enerji Dengesi.....	10
2.2. Enerji Salınım Oranı.....	11
2.3. Kararsızlık Durumu ve R -Eğrisi.....	14
2.4. Gerilme Analizi ve J -Kontur İntegrali	16
2.5. Dinamik ve Zamana Bağlı Kırılma	18
3. PERİDİNAMİK TEORİSİ	19
3.1. Bağ Tabanlı Peridinamik Teorisi	19
3.2. Kompozit Malzemeler için Gereken Düzenlemeler.....	24
3.3. Peridinamik Analiz Kodu Algoritması.....	27
4. PERİDİNAMİK MODELİNİN SAYISAL ve DENEYSEL DOĞRULAMA ANALİZLERİ.....	31
4.1. Ayatollahi and Aliha (2009) Çalışması ile Doğrulama Analizleri.....	31
4.2. Vazic et al. (2017) Çalışması ile Doğrulama Analizleri	34
4.3. Oterkus and Madenci (2012) Çalışması ile Doğrulama Analizleri	35
4.4. Shang et al. (2019) Çalışması ile Doğrulama Analizleri.....	38
5. İZOTROPİK PLAKLARDA MİKRO ÇATLAK ETKİSİ.....	41
5.1. Analizler	42
5.1.1. Mikro Çatlaksız Referans Durum	42
5.1.2. Çatal Mikro Çatlaklı Durum	43
5.1.3. Lineer Eğimli Mikro Çatlaklı Durum	44
5.1.4. Eğrisel ve Çatal Mikro Çatlaklı Durum	45

5.1.5. 45°'lik Yörünge Dizilimli Mikro Çatlak Durumu	47
5.1.6. 80°'lik Yörünge Dizilimli Mikro Çatlak Durumu	48
5.1.7. Hilal Dizilimli Mikro Çatlak Durumu.....	49
5.2. Mikro Çatlaklar ile Tokluk Artırım Mekanizmasının Değerlendirilmesi	52
6. KOMPOZİT TABAKADA MİKRO ÇATLAK ETKİSİ.....	56
6.1. Analizler	57
6.1.1. Fiber Açısı 0° Olan Durumlar	57
6.1.2. Fiber Açısı 45° Olan Durumlar	64
6.1.3. Fiber Açısı 90° Olan Durumlar	70
7. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	78
7.1. Tezin Çıktıları	81
KAYNAKLAR	82
ÖZ GEÇMİŞ.....	90

SİMGELER VE KISALTMALAR

t	Zaman
Δt	Zaman adım aralığı
ρ	Özkütle
$\mathbf{b}(\mathbf{x}, t)$	$\mathbf{x}$ parçacığına t anında etkiyen dış kuvvet
$\ddot{\mathbf{u}}(\mathbf{x}, t)$	$\mathbf{x}$ parçacığının t anındaki ivmesi
V	Hacim
ξ	Referans bağ vektörü
η	Referans bağın boy değişimi
s	Bağ uzama oranı
δ	Ufuk yarıçapı
H	Peridinamik ufku veya lokal olmayan etkileşim bölgesi
Δx	Materyal parçacıklarının dizilim aralığı
E	Elastisite modülü
E_i ($i = 1, 2$)	Kompozit malzemenin fiber doğrultusunda ve fibere dik doğrultudaki elastik sabitleri
ν	Poisson oranı
G	Enerji salınım oranı
G_c	Kırılma enerjisi veya Kritik enerji salınımı
θ	Fiber yönelim açısı
c	Bağ sabiti
s_0	Kritik bağ uzama oranı
ϕ	Parçacıklar arası bağın açısı
c_f	Fiber bağ sabiti
s_f	Kritik fiber bağ uzama oranı
c_m	Matris bağ sabiti
s_m	Kritik matris bağ uzama oranı
$w(\eta, \xi)$	Mikro potansiyel
W	Birim şekil değiştirme enerji yoğunluğu
$\mathbf{f}(\eta, \xi)$	Bağ kuvveti
$f(\xi + \eta , \xi)$	Bağ kuvvetinin skaler fonksiyonu
$\mu(t, \xi)$	Hasar fonksiyonu
φ	Hasar parametresi
$\nabla \sigma$	Gerilme tansörü diverjansı
$\mathbf{u}_k^n$	k parçacığının n zaman adımındaki yer değiştirmesi
N	$\mathbf{x}_k$ parçacığının ufku içerisindeki toplam parçacık sayısı
γ_s	Çatlak yüzey enerjisi
σ_f	Kırılma gerilmesi
K	Gerilme yoğunluk faktörü
2-B	İki boyutlu
3-B	Üç boyutlu

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Sürekli ortam mekaniğinde birim elemanların lokal etkileşimi	1
Şekil 1.2.	Peridinamikte birim parçacıkların lokal olmayan etkileşimi	2
Şekil 2.1.	Sonsuz genişlikli plakta çekme etkisi altındaki çatlak	11
Şekil 2.2.	(a) Sabit yük etkisindeki çatlak plak ve (b) yük-yer değiştirme grafiği	12
Şekil 2.3.	(a) Sabit yer değiştirme etkisindeki çatlak plak ve (b) yük-yer değiştirme grafiği	13
Şekil 2.4.	İlerleme kuvveti ve R eğrisi diyagramları: (a) düz R eğrisi ve (b) yükselen R eğrisi	15
Şekil 2.5.	Çatlak ucundaki kutupsal koordinat takımı ve civarındaki bir birim eleman üzerinde gerilme bileşenlerinin gösterimi	16
Şekil 2.6.	Çatlak yükleme modları	17
Şekil 3.1.	Parçacıkların kinematiki	20
Şekil 3.2.	Bağ Tabanlı Peridinamik kuvvet fonksiyonu	21
Şekil 3.3.	Bir parçacığın ufku içinde kalan diğer parçacıklarla olan etkileşimi	21
Şekil 3.4.	Peridinamik parçacıklarının deformasyon öncesi ve sonrası etkileşimleri	22
Şekil 3.5.	Bağ elastik davranış modeli ve s_0 kritik bağ uzama oranı	23
Şekil 3.6.	θ fiber yönelim açısına sahip kompozit tabaka	25
Şekil 3.7.	k parçacığının ufku içerisindeki fiber ve matris bağları	25
Şekil 3.8.	Kompozit bileşenlerinin bağ elastik davranış modelleri ve kritik bağ uzama oranları	26
Şekil 4.1.	Deney düzeneğinin şematik gösterimi (Ayatollahi and Aliha, 2009)	32
Şekil 4.2.	Deney düzeneği ve akrilik malzemenin kırılma formu (Ayatollahi and Aliha, 2009)	32
Şekil 4.3.	Deney (Ayatollahi and Aliha, 2009) ve Peridinamik Teorisi ile elde edilen çatlak formlarının kıyaslaması	33
Şekil 4.4.	Deney (Ayatollahi and Aliha, 2009) ve Peridinamik ile elde edilen Kritik Yük P_{cr} değerleri	33
Şekil 4.5.	Doğrulama analizi problemine ait geometrik ve parametrik detaylar (Vazic et al., 2017)	34
Şekil 4.6.	$h = 1,25 \cdot l$ ve ilgili d/l değerleri için referans çalışma* (Vazic et al., 2017) ve doğrulama analizine ait çatlak ilerleme hasar (φ) sonuçları (1000. zaman adımı)	35
Şekil 4.7.	Kompozit tabakanın geometrik özellikleri ve yükleme koşulları (Oterkus and Madenci, 2012)	36
Şekil 4.8.	x ve y eksenleri boyunca yatay (a) ve düşey (b) yer değiştirmeler	36
Şekil 4.9.	Merkezi çatlığa sahip kompozit tabakanın geometrik özellikleri ve yükleme koşulları (Oterkus and Madenci, 2012)	37
Şekil 4.10.	Merkezi çatlığa sahip kompozit tabakanın (a) $\theta = 0^\circ$, (b) $\theta = 90^\circ$ ve (c) $\theta = 45^\circ$ fiber açıları için hasar tahmin görselleri	37
Şekil 4.11.	Oterkus and Madenci (2012) çalışmasındaki merkezi çatlığa sahip kompozit tabakanın (a) $\theta = 0^\circ$, (b) $\theta = 90^\circ$ ve (c) $\theta = 45^\circ$ fiber açıları için hasar tahmin görselleri	38

Şekil 4.12. Deney düzeneğinin şematik gösterimi (Shang et al., 2019).....	39
Şekil 4.13. (a) $\theta=0^\circ$, (b) $\theta=45^\circ$ ve (c) $\theta=90^\circ$ fiber açılı durumlar için Shang et al. (2019) çalışmasındaki deneysel çatlak ilerleme sonuçları.....	39
Şekil 4.14. (a) $\theta=0^\circ$, (b) $\theta=45^\circ$ ve (c) $\theta=90^\circ$ fiber açılı durumlar için çatlak ilerleme analizi sonuçları	40
Şekil 5.1. Problemin geometrik özellikleri ve yükleme sınır koşulları	41
Şekil 5.2. Ayırıştırılmış model ve virtüel sınır koşulları	42
Şekil 5.3. Referans durumun geometrik özellikleri.....	43
Şekil 5.4. Referans durumun 1700. zaman adımındaki (a) çatlak ilerleme hasar (φ) sonuçları; (b) hız alan değerleri (m/s).....	43
Şekil 5.5. Çatal mikro çatlaklı durumun genel görünüşü ve mikro çatlak detay görüntüsü.....	44
Şekil 5.6. Çatal mikro çatlaklı durumun 1700. zaman adımındaki (a) çatlak ilerleme hasar (φ) sonuçları; (b) hız alan değerleri (m/s)	44
Şekil 5.7. Lineer eğimli mikro çatlaklı durumun genel görünüşü ve mikro çatlak detay görüntüsü .	45
Şekil 5.8. Lineer eğimli mikro çatlaklı durumun 1700. zaman adımındaki (a) çatlak ilerleme hasar (φ) sonuçları; (b) hız alan değerleri (m/s)	45
Şekil 5.9. Eğrisel ve çatal mikro çatlaklı durumun genel görünüşü ve mikro çatlak detay görüntüsü	46
Şekil 5.10. Eğrisel ve çatal mikro çatlaklı durumun 1700. zaman adımındaki (a) çatlak ilerleme hasar (φ) sonuçları; (b) hız alan değerleri (m/s)	46
Şekil 5.11. 45° 'lik yörünge dizilimli mikro çatlak durumunun genel görünüşü ve mikro çatlak detay görüntüsü	47
Şekil 5.12. 45° 'lik yörünge dizilimli mikro çatlak durumunun 1700. zaman adımındaki (a) çatlak ilerleme hasar (φ) sonuçları; (b) hız alan değerleri (m/s)	48
Şekil 5.13. 45° 'lik yörünge dizilimli mikro çatlak durumunun 1700. zaman adımındaki ana çatlak dalının ortalama ilerleme eğimi.....	48
Şekil 5.14. 80° 'lik yörünge dizilimli mikro çatlak durumunun genel görünüşü ve mikro çatlak detay görüntüsü	49
Şekil 5.15. 80° 'lik yörünge dizilimli mikro çatlak durumunun 1700. zaman adımındaki (a) çatlak ilerleme hasar (φ) sonuçları; (b) hız alan değerleri (m/s)	49
Şekil 5.16. 80° 'lik yörünge dizilimli mikro çatlak durumunun 1700. zaman adımındaki ana çatlak dalının ortalama ilerleme eğimi.....	49
Şekil 5.17. Hilal dizilimli mikro çatlak durumunun genel görünüşü ve mikro çatlak detay görüntüsü	50
Şekil 5.18. Hilal dizilimli mikro çatlak durumunun çeşitli. zaman adımlarındaki (a) çatlak ilerleme hasar (φ) sonuçları; (b) hız alan değerleri (m/s).....	51
Şekil 5.19. Hilal dizilimli mikro çatlak durumunun 1700. zaman adımındaki (a) çatlak ilerleme hasar (φ) sonuçları; (b) hız alan değerleri (m/s)	52
Şekil 5.20. Hilal dizilimli mikro çatlak durumunun 1700. zaman adımındaki ana çatlak dalının ortalama ilerleme eğimi.....	52

Şekil 5.21. Bütün durumlar için ana çatlak ucu yatay konumunun zaman adımına göre değişim grafiği	53
Şekil 5.22. Bütün durumlar için ana çatlak ilerlemesinin 1400, 1600 ve 1700. zaman adımlarındaki değerleri.....	55
Şekil 6.1. Problemin geometrik özellikleri ve yükleme sınır koşulları	56
Şekil 6.2. Ayırıştırılmış model ve virtüel sınır koşulları	57
Şekil 6.3. Fiber açısı 0° olan durumların mikro çatlak dağılım şekilleri ve detayları	58
Şekil 6.4. Fiber açısı 0° olan durumların 5600. zaman adımında ana çatlak ucu şekil değiştirme enerji yoğunluğu sonuçları ve referans duruma göre % değişim grafiği	59
Şekil 6.5. Fiber açısı 0° olan durumların 5600. zaman adımında şekil değiştirme enerji yoğunluğu sonuçları	60
Şekil 6.6. Fiber açısı 0° olan referans durumun ana çatlak ucu konum-zaman grafiği	61
Şekil 6.7. Fiber açısı 0° olan referans durumun 20800. zaman adımında hasar ilerleme sonucu	61
Şekil 6.8. Fiber açısı 0° olan durumların ana çatlak ucu konum-zaman grafiği	62
Şekil 6.9. Fiber açısı 0° olan durumların 20800. zaman adımında ana çatlak ilerleme boyunun referans duruma göre % değişim grafiği	62
Şekil 6.10. Fiber açısı 0° olan durumların 20800. zaman adımında hasar ilerleme sonuçları	63
Şekil 6.11. Fiber açısı 45° olan durumların mikro çatlak dağılım şekilleri ve detayları	65
Şekil 6.12. Fiber açısı 45° olan durumların 6800. zaman adımında ana çatlak ucu şekil değiştirme enerji yoğunluğu sonuçları ve referans duruma göre % değişim grafiği	65
Şekil 6.13. Fiber açısı 45° olan durumların 6800. zaman adımında şekil değiştirme enerji yoğunluğu sonuçları	66
Şekil 6.14. Fiber açısı 45° olan referans durumun ana çatlak ucu konum-zaman grafiği	67
Şekil 6.15. Fiber açısı 45° olan referans durumun 13600. zaman adımında hasar ilerleme sonucu	68
Şekil 6.16. Fiber açısı 45° olan durumların ana çatlak ucu konum-zaman grafiği	68
Şekil 6.17. Fiber açısı 45° olan durumların 13600. zaman adımında ana çatlak ilerleme boyunun referans duruma göre % değişim grafiği	69
Şekil 6.18. Fiber açısı 45° olan durumların 13600. zaman adımında hasar ilerleme sonuçları	70
Şekil 6.19. Fiber açısı 90° olan durumların mikro çatlak dağılım şekilleri ve detayları	71
Şekil 6.20. Fiber açısı 90° olan durumların 4000. zaman adımında ana çatlak ucu şekil değiştirme enerji yoğunluğu sonuçları ve referans duruma göre % değişim grafiği	72
Şekil 6.21. Fiber açısı 90° olan durumların 4000. zaman adımında şekil değiştirme enerji yoğunluğu sonuçları	73
Şekil 6.22. Fiber açısı 90° olan referans durumun ana çatlak ucu konum-zaman grafiği	74
Şekil 6.23. Fiber açısı 90° olan referans durumun 16800. zaman adımında hasar ilerleme sonucu	74
Şekil 6.24. Fiber açısı 90° olan durumların ana çatlak ucu konum-zaman grafiği	75
Şekil 6.25. Fiber açısı 90° olan durumların 16800. zaman adımında ana çatlak ilerleme boyunun referans duruma göre % değişim grafiği	75

Şekil 6.26. Fiber açısı 90° olan durumların 16800. zaman adımında hasar ilerleme sonuçları	76
Şekil 6.27. Fiber açısı 90° olan durumların hasarlı parçacık sayısını zamana göre değişim grafiği	77
Şekil 7.1. 90° fiber açılı kompozit tabakada 16800. zaman adımında mikro çatlak uçlarından başlayan fiber-matris sıyrılması	80



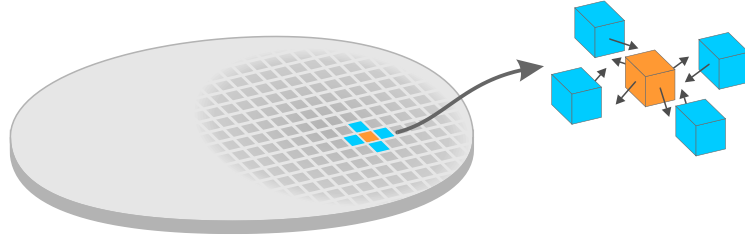
TABLÖLER DİZİNİ

Tablo 3.1. Peridinamik çözüm algoritması.....	27
Tablo 3.2. Yapının ayrıklaştırılma algoritması.....	28
Tablo 3.3. Parçacık bağlarının tanımlanma algoritması.....	28
Tablo 3.4. Mevcut çatlakları tanımlama algoritması.....	29
Tablo 3.5. Düzeltme faktörlerini hesaplama algoritması	29
Tablo 3.6. Tek bir zaman adımı için Peridinamik çözüm algoritması	30
Tablo 4.1. Akirik (PMMA) malzeme mekanik özellikleri (Ayatollahi and Aliha, 2009).....	32
Tablo 5.1. 500 ila 1600. zaman adımları arasında bütün durumlar için ana çatlak ucu ortalama hız değerleri.....	54



1. GİRİŞ

Üç boyutlu lineer elastisite teorisi ilk olarak 1820'lerin başında Cauchy tarafından, ortaya konulmuştur. Kırılma mekaniği üzerine çalışmalar ise 1920'lerin başında Griffith ve diğer pek çok araştırmacı tarafından gerçekleştirilmiştir. Bilgisayar teknolojisinin 1950'lerde gelişmesiyle de gerçek problemlerin lineer elastisite teorisi çözümlerine olanak sağlayan sonlu elemanlar metodu ortaya çıkmıştır. Sonlu elemanlar metodu, lineer elastisite teorisi problemlerindeki üstün başarısı sayesinde günümüzde sayısız alanda kullanılmaktadır. Ardından plastisite, sünme, kırılma gibi doğrusal olmayan problemler için çözüm arayışları başlamıştır. Ancak kırılma ve diğer süreksizliklerin mevcudiyetinde sürekli ortam mekaniği yetersiz kalmaktadır (Gerstle, 2015). Bunun sebebi, sürekli ortam mekaniğinin temel ifadelerinin oluşturulabilmesi için yapılan bazı kabullerdir. Malzemenin doğasına aykırı olan bu kabuller; yapının sürekli olduğunu ve birim eleman etkileşimlerinin lokal olduğunu (yani sadece bitişindeki elemanlarla etkileştiğini) ifade etmektedir (Şekil 1.1.). Halbuki gerçekte bütün malzemeler süreksizdir ve temas kuvvetinin ötesinde iç kuvvet etkileşimleri mevcuttur (Şekil 1.2.). Bu gerçeğe rağmen yıllar boyu çoğu araştırmacı sürekli ortam mekaniğinin dışına çıkmayıp, mevcut teoriyi eklentilerle onarma yoluna gitmişlerdir. Genellikle bu çözümler belli malzeme ve durumlar için sınırlı olacak şekilde olmuştur. (Bobaru et al., 2016)



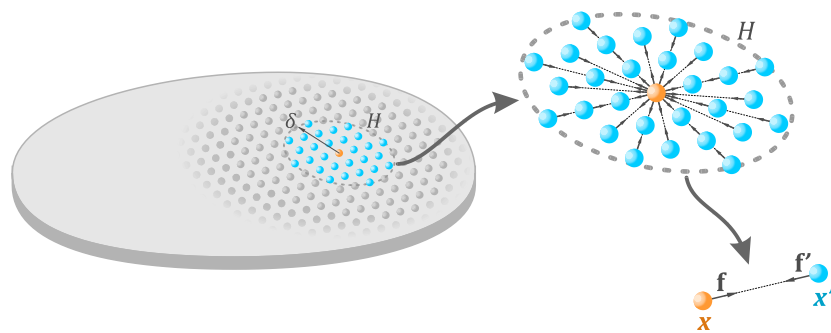
Şekil 1.1. Sürekli ortam mekaniğinde birim elemanların lokal etkileşimi

Sonlu elemanlar metodu gibi tekniklerin teorik esasları süreklilik kabulü üzerine kurulu matematiksel ifadelerle dayandığından hasar analizlerinde yetersiz kalmaktadır. Mevcut kırılma mekaniği için geliştirilen metotların da temeli kısmi türevli diferansiyel ifadelerden oluşan sürekli ortam mekaniğine dayanmaktadır. Türevlerin tanımsız olduğu çatlaklarda temel matematiksel ifadeler geçersiz kaldığından kırılma mekaniği için çeşitli özel teknikler geliştirilerek bu kısıtlamalar aşılmaya çalışılmaktadır. Ayrıca bu kırılma mekaniği metotlarında çatlakların büyüme

kriterlerinin önceden tanımlanması ve çatlak ucunun muhtemel gelişim şekillerinin matematiksel olarak ifade edilmesi gerekmektedir. Dolayısıyla bu kadar fazla harici kriter ve kısıtlamalar ile yapılan çatlak tahminlerinin doğruluk oranları da oldukça sınırlı kalmaktadır. (Madenci and Oterkus, 2014)

Bu işleyiş içinde gerçekleşen diğer bir durum ise sürekli ortam mekaniği ifadelerini bilgisayar yardımı ile çözümlerken sonlu elemanlar modeli ile ayırklaştırmaktır. Burada dikkat çekici olan, gerçekte süreksizlikler barındıran bir yapı bir dizi kısmi türevli diferansiyel ifadeye dönüştürülerek sürekli kabul ediliyor, ardından da bu problemleri bilgisayar ortamında çözümleyebilmek için yine bir dönüşümle cebirsel ifadelere çevirerek ayırklaştırılıyor olmasıdır. Elbette bu dönüşümlerde yapılan varsayımlar ister istemez belli bilgi kayıplarına neden olmakta ve gerçekçi olmayan malzeme davranış sonuçları ortaya çıkarabilmektedir. (Gerstle, 2015)

2000 yılında Stewart Silling bu bakış açısının dışına çıkmıştır; ayrık parçacık mekaniği, sürekli ortam ve sürekli ortamda gelişen süreksizlik olgularını özünde barındıran Peridinamik Teorisini ortaya koyarak bu çıkmaza bir çözüm sunmuştur (Bobaru et al., 2016). Yani matematiksel modelinde her yerde aynı temel denklemler ile sürekli veya süreksiz (çatlak gibi) bir ortamın ayrımı olmaksızın uygulanabilmesine olanak sağlayan bir teoridir. Dolayısıyla süreksizliklerin mevcudiyetinde de temel denklemlerle uyumsuzlukları gidermek için eklentilere gerek kalmadan çözüm için tutarlı bir ortam sağlanmaktadır. (Bobaru et al., 2016)



Şekil 1.2. Peridinamikte birim parçacıkların lokal olmayan etkileşimi

Peridinamik Teorisi, temel olarak süreksizlik durumunda da tanımlı olabilmesi için mevcut katı cisim mekaniğindeki hareket denkleminin (3.1) yeniden formüle edilmesi olarak ifade edilebilir (Madenci and Oterkus, 2014). İlk olarak, modelde bütün birim malzeme parçacıkları için Newton'un ikinci hareket yasasının geçerli olduğu kabulü ile başlanır (Silling, 2000). Her bir parçacığın belli bir ufuk yarıçapı, δ ,

içinde kalan bütün parçacıklarla etkileştiği kabul edilir ve bu etkileşim bir kuvvet yoğunluk fonksiyonu, f , ile tanımlanır (Şekil 1.2.). Her bir zaman adımı için integrasyon ile her bir parçacığa etkiyen iç kuvvet belirlenmekte ve zaman integrasyonu ile de parçacığın yüke bağlı yer değiştirmesi belirlenmektedir (Gerstle, 2015). Temel denklemde (3.10), kısmi türevli diferansiyel ifadeler yerine integrasyon ifadelerinin yer almasından dolayı herhangi bir özel teknik gerekmez. Çatlak oluşumu, çatlak ucu gelişim güzergahı vb. durumlar için model yapının her yerinde geçerli olmaktadır (Madenci and Oterkus, 2014).

1.1. Amaç ve Kapsam

Günümüz mühendislik yapılarının birçoğunda mikro/makro düzeyde çatlakların veya kusurların oluşup büyümesi önemli bir risk faktörüdür. Yapısal bir sistemin kritik bir elamanında anisotropi kırılma neticesinde meydana gelebilecek işlev kaybı ile tüm sistemin işlevsiz kalması ve beraberinde hayati risklerin oluşması ile sonuçlanabilmektedir (Cui et al., 2010; Infante et al., 2013; Moan and Amdahl, 1989).

Beton, seramik ve kaya gibi gevrek malzemeler, rijitlik, aşınma direnci, yüksek ısı direnci ve oksidasyon direnci gibi üstün mekanik özelliklere sahiptirler. Diğer taraftan, düşük tokluk ve yüksek kırılma dayanıklılığı gibi olumsuz özellikleri, bu tür malzemelerin mühendislik uygulamalarını önemli ölçüde sınırlamaktadır. Benzer şekilde kompozit malzemeler de üstün çekme rijitliği ve düşük ağırlık/sertlik oranları nedeniyle günümüzün mühendislik uygulamalarında önemli bir yere sahiptir. Yalnız, matris bileşeninin gevrek yapısı, kompozit malzemede herhangi bir hasar oluşması durumunda hasarın yapıda fiber doğrultusu boyunca hızla yayılmasına neden olmaktadır. Kompozit malzemenin böylesine kritik bir bileşeninin beklenmedik hasar durumu, tüm fiber-matris sisteminin tamamen işlevsiz hale gelmesi sonucunu doğurabilir. Bu gibi beklenmedik durumlardan kaçınmak için alışıldığı üzere yapı, güvenlik sınırlarının üstünde tasarlanırsa da genellikle ufak bir hasarın başlamasının ardından bu hasarın büyümesi önlenememektedir. Bu hasarların oluşması önlenemez olsa da başlamasını geciktirmek ve ilerleyişini yavaşlatmak için gevrek yapının tokluğunu artırmak hayati önlemleri almada ve erken müdahaleye olanak sağlamada önemli bir faktördür.

1.2. Literatür Taraması

Yukarıda sayılan sebeplerden ötürü gevrek malzemelerin tokluğunun araştırılması ve geliştirilmesi, birçok araştırmacı için ilgi odağı olmuştur (Hutchinson, 1987; Loehnert and Belytschko, 2007; Zhou et al., 2012). Gevrek malzemelerdeki mikro çatlak ve kusurlar olağan durumlardır. Büyük gerilme yığılmaları da bu kusurların kolaylıkla oluşmasını sağlamaktadır. Dolayısıyla gevrek malzemelerde bu tür mikro kusurların oluşumu kaçınılmazdır (Li et al., 2018). Bununla birlikte, mikro çatlakların varlığında gevrek malzemelerin tokluğunun arttığını gösteren çalışmalar mevcuttur ve bu durum “mikro çatlak toklaşması” olarak adlandırılmaktadır (Bleyer et al., 2017; Brencich and Carpinteri, 1998; Kachanov, 1986; Ravi-Chandar and Yang, 1997). Ayrıca işin içinde ana çatlak olması durumunda çatlak ucu gerilme yığılmasını etkileyen mikro çatlakların konumlandırma, yönelim ve sıklık gibi parametreleri ana çatlakla ilerleme eğilimini önemli ölçüde etkilediği bilinmektedir (Li et al., 2017; Rose, 1986; Xiaotao et al., 2017; Zhou et al., 2012).

Makro çatlak ve mikro kusurlar arasındaki etkileşim, literatürde deneysel olarak araştırılmıştır (Bocca et al., 1991; Malvar and Warren, 1988; Petersson, 1981; Wawersik and Fairhurst, 1970). Deneysel analizler oldukça önemli olmasına rağmen, maliyetli ve zorlu bir süreci olması nedeniyle numerik metotlar kırılma mekaniği ile ilgili çalışmalarda deneylere önemli bir alternatiftir. Analitik yaklaşımlarda kullanılan homojenizasyon tekniğinde mikro kusurlar, elastik sabitlerin azaltılması ile modellenmektedir (Benedetti et al., 2015; Feng et al., 2003). Homojenizasyon tekniğinde hasarlı bölgenin mekanik davranışını tanımlamak için mikro kusur kümesinin yönü, yoğunluğu ve formu gibi karakteristik özellikleri kullanılır (Brencich and Carpinteri, 1998; Xie et al., 2013). Tekli veya çoklu mikro çatlakların makro çatlaklarla etkileşimini araştıran analitik birçok çalışma mevcuttur (Kachanov, 1986; Rose, 1986; Rubinstein, 1985; Shum and Hutchinson, 1990). Yalnız, karmaşık çatlak etkileşim problemlerinin çözümünde, klasik sürekli ortam mekaniğine dayalı yaklaşımlarda problemi basitleştirmek için varsayımlar yapılır. Örneğin, analitik hesaplamalarda ana çatlaklar ile mikro çatlaklar arasındaki etkileşim incelenirken, mikro çatlakların birbirleri arasındaki etkileşimi ihmal edilmektedir (Petrova et al., 2000; Tamuzs et al., 1993).

Çatlak ilerleme modellemesinde numerik yaklaşım olarak ise eleman erozyonu, kohezif bölge ve xFEM (genişletilmiş sonlu eleman metodu) gibi sonlu eleman

metodunun bazı özel versiyonları kullanılmaktadır. Eleman erozyonu ve kohezif bölge tekniklerinde çatlak ilerleme güzergahı eleman sınırları ile kısıtlıdır, bu da çoğunlukla yeterli doğruluğu sağlayamamaktadır (Zhou et al., 2016). xFEM’de ise, ağ oluşturma işlemini yenilemeye gerek duymadan keyfi çatlak ilerlemesi güzergahları modellenabilmektedir (Budyn et al., 2004; Moës et al., 1999; Wang et al., 2016; Zhuang and Cheng, 2011a; Zhuang and Cheng, 2011b; Zhuang and Cheng, 2011c). Diğer taraftan, xFEM ile dinamik kırılma analizlerinde doğru sonuç elde edebilmek için kırılma enerjisinin girdi ve çıktıların ayarlanması gerekmektedir (Bobaru and Zhang, 2015; Zhou et al., 2016). Ayrıca, xFEM ile çatlak modellemesinde diğer dezavantajlı durumlar ise seviye kümesi yöntemine bağımlılık, çatlak çekirdeklenmesini (kendiliğinden oluşumunu) modelleyememe ve çatlak dallanmasını simüle etmek için harici teknik gerekliliğidir (Bobaru and Zhang, 2015).

Mikro çatlaklar (Ducourthial et al., 2000; Evans and Faber, 1984; Evans and Fu, 1985; Faber and Evans, 1983; Kumar and Curtin, 2007; Soh and Yang, 2004; Vashishth et al., 1997), boşluklar (Fanni et al., 2015; Ferdous et al., 2015; Wu et al., 2010) ve malzeme faz geçişleri (Huang and Kinloch, 1992) gibi çeşitli süreksizliklerin etkisinde çatlak ilerlemesi (Broek, 1982; Hannink, 1994; Miyagawa and Nishitani, 1985) üzerine daha pek çok araştırma ortaya konmuştur. Yalnız bu çalışmaların büyük kısmı klasik sürekli ortam mekaniğini esas alan yaklaşımlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Klasik sürekli ortam mekaniğinin temel denklemi kısmi türevli diferansiyel ifadelerden oluşması sebebiyle çatlak ucu ve süreksizliklerde tanımsız olmakta, bu da çatlak ucu tekilliği sorununu ortaya çıkarmaktadır (Griffith, 1921). Bu tür sorunlara çözümler üreten birçok çalışma ortaya konmuştur (Belytschko and Black, 1999; Dugdale, 1960; Hillerborg et al., 1976). Ancak hiçbir çözüm harici parametre ve/veya belirli sınırlı koşullarına bağımlılığı engelleyememiştir.

Mikro kusur veya faz değişimi gibi etkenlere bağlı kompleks durumlar için tokluk artırımı, klasik sürekli ortam mekaniğinin mevcut temel denklemleri ile modellenememektedir. Bu nedenle, çatlak çekirdeklenmesi, yayılması ve gelişigüzel konumlanmış mikro kusurlar ile etkileşimleri gibi malzemenin kompleks mekanik davranışlarını modellemede daha üstün bir yaklaşım gerekmektedir. Mevcut yaklaşımların bahsi geçen noksanlıkları, Peridinamiğin lokal olmayan yapısı sayesinde herhangi özel tanımlamaya gerek kalmaksızın çözümlenebilmektedir (Silling, 2000; Silling and Askari, 2005). Klasik sürekli ortam mekaniğinin lokal olmayan bir formu olan Peridinamik Teorisinin temel denkleminde gerilme diverjansının yerine integral

ifadesi kullanılması sebebiyle denklem süreksizliklerde de geçerlidir (Silling, 2000). Burada iç kuvvet, bir materyal parçacığının belli bir ufuk yarıçapı içinde etkileştiği diğer parçacıklarla aralarındaki uzunluk parametresine bağlı f kuvvet yoğunluğu fonksiyonlarının integrasyonu ile elde edilmektedir. Bu özelliği sayesinde klasik gerilme diverjansı ortadan kalkmakta ve Peridinamik denklemleri süreksizliklerde de geçerli olmaktadır (Silling, 2000). Böylelikle, yapıya gelişigüzel boyut, yön ve konumlandırma ile dahil edilen çatlakların kompleks etkileşimleri Peridinamikle kolaylıkla modellenmektedir.

Teorinin ilk versiyonu Bağ Tabanlı Peridinamik olarak adlandırılmaktadır ve bu versiyonunda iki ve üç boyutlu yapılarda Poisson oranları sırasıyla $\frac{1}{3}$ ve $\frac{1}{4}$ değerleriyle sabittir (Silling and Askari, 2005). Silling et al. (2007) tarafından sunulan Durum Tabanlı Peridinamik ile bu kısıtlama ortadan kalkmıştır. Ardından teorinin doğrusallaştırılmış versiyonu Silling (2010) tarafından sunulmuştur. Peridinamiğin kırılma ve hasar gelişimi modellemesindeki üstünlüğü kısa süre içinde araştırmacıların ilgisini çekmiş ve birçok farklı alanda uygulamalar gerçekleştirilmiştir. Şimdiye kadar Bağ Tabanlı Peridinamik, çatlak çekirdeklenmesi, yayılması ve etkileşimini içeren çeşitli gevrek kırılma problemlerinde başarıyla uygulanmıştır (Basoglu et al., 2019b; Bobaru and Hu, 2012; Ha and Bobaru, 2011; Huang et al., 2015; Silling et al., 2010; Vazic et al., 2017; Yang et al., 2019).

Peridinamik Teorisinin etkinliğini ve yeterliliğini göstermek için çeşitli malzeme sınıflarını da içeren birçok çalışma ortaya konmuştur. Örneğin, Peridinamik kuvvet yoğunlukları ve klasik elastisite teorisi kuvvetleri arasında bir yakınsama çalışması gerçekleştirilmiştir (Silling and Lehoucq, 2008). Ayrıca, termal ve mekanik yükler altında fiber kompozitlerin davranışı Peridinamik Teorisi kullanılarak incelenmiştir (Oterkus and Madenci, 2012). Deneysel bir çalışmada (Shang et al., 2019), fiber kompozitlerin hasar yayılım tahminleri, Peridinamik Teorisi kullanılarak doğrulanmıştır. Ayrıca, kompozitlerde çatlak etkileşimlerinin Durum Tabanlı Peridinamik modeli deneysel verilerle doğrulanmıştır (AlKhateab et al., 2020). Polikristalin mikroyapıda dinamik kırılma analizleri Bağ Tabanlı Peridinamik model kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Ghajari et al., 2014). Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin (FDM) kırılma mekaniği analizleri Durum Tabanlı Peridinamik modeli sunulmuştur (Ozdemir et al., 2020; Rahimi et al., 2021). Ayrıca, FDM'ler için tokluk artırıcı stratejiler de önerilmiştir (Rahimi et al., 2021). Kompleks yapıların hasar tahmini için, Peridinamik ve sonlu eleman metodunun bir arada kullanıldığı bir

yaklaşım sunulmuştur (Kilic and Madenci, 2010; Madenci et al., 2018; Oterkus et al., 2012). Çoklu fizik problemlerinin ve çok ölçekli uygulamalarının Peridinamik kullanılarak hasar tahminleri incelenmiştir (Askari et al., 2008; De Meo et al., 2016). Peridinamik termo mekanik ve ısı iletim denklemleri türetilmiş ve çeşitli problemlere uygulanmıştır (Oterkus et al., 2014a, 2014b). Von Mises akma kriteri ve izotropik sertleşmeye dayalı bir Peridinamik plastisite modeli sunulmuştur (Madenci and Oterkus, 2016). Yakın geçmişte, Peridinamik ile optimizasyon algoritmaları bir arada kullanılarak, mevcut bir yükleme altında ve süreksizlik barındıran yapıların en ideal yapısal formları belirlenmiştir (Kefal et al., 2019). Bu yaklaşım ayrıca, çatlaklı yapıların çoklu malzemeli (Habibian et al., 2021) ve sürekli yoğunluk esaslı (Sohouli et al., 2020) topoloji optimizasyonlarında da kullanılmıştır. Teoriyi daha detaylı incelemek ve kapsamlı literatür taraması için Madenci and Oterkus (2014) ve Javili et al. (2019) kaynaklarına başvurulabilir.

1.3. Özgünlük ve Yapılan Çalışmalar

Gevrek kırılma, mühendislik yapılarında yaygın görülen mekanik sorunların başında gelir ve en kritik olanlarından biridir. Bu tür gevrek yapılarda mikro çatlakların mevcudiyetinin sağladığı tokluk, bilinen önemli bir olgudur (Bleyer et al., 2017; Brencich and Carpinteri, 1998; Kachanov, 1986; Ravi-Chandar and Yang, 1997). Elbette bu mikro kusurların gereğinden fazla ya da az oluşu yapıda beklenmedik bir şekilde taşıma gücü kaybına sebebiyet vermektedir. Bu nedenle bu olgunun yeterince araştırılıp gerekli birikimin elde edilmesi önem arz etmektedir.

Bu hedef doğrultusunda elde deneysel ve sayısal yöntemler olmak üzere iki alternatif mevcuttur. Fakat durum kırılma mekaniği olduğu zaman hem deneysel olarak hem de sayısal modelleme yöntemlerinin kullanılmasında birçok problemle karşılaşmaktadır. Deneysel yöntem tercih edilmesi durumunda gerçek yapıların kullanım koşullarına benzer çatlak etrafı gerilmelerin oluşturulduğu numuneler basit yapıda ve kolay hazırlık prosedürüne sahip olacak şekilde dikkatlice tasarlanmalıdır (Han et al., 1992; Shin et al., 1999; Vashishth et al., 2003; Wang et al., 2019). Bu birçok etkene bağlı, maliyetli ve zorlu bir süreç anlamına gelmektedir. Beraberinde deneysel imkanlar ölçüsünde birçok sınırlayıcı koşula bağlı kalınması gerekmektedir. Örneğin konu mikro çatlak olduğu zaman numunelerin oluşturulmasında ileri teknoloji eklemeli imalat cihazlarından faydalanmak gerekmektedir (Jia and Wang, 2019). Burada da cihaz kapasitesi ve bütçe gibi birçok sınırlayıcı etken ile karşılaşılır. Sayısal

yöntem tercih edilmesi durumunda ise klasik metotların süreksizliklerde yeterli doğruluğu sağlayamamasından dolayı özel tanımlamalar ve teknikler ile çözüm elde edilmeye çalışılmaktadır (Benedetti et al., 2015; Brencich and Carpinteri, 1998; Feng et al., 2003; Xie et al., 2013). Bu yaklaşımların kısmi müdahaleleri de sadece sorunun etrafından dolaşmakta ve yapıdaki süreksizliklerin bütüncül etkileşimlerini ifade etmede yetersiz kalmaktadır (Petrova et al., 2000; Tamuzs et al., 1993). Dolayısıyla, bu alandan da şimdiye kadar etkin şekilde ilerleme gerçekleşmemiştir.

Yakın geçmişte kırılma mekaniği modellemesindeki üstünlüğü ile bilinen Peridinamik Teorisinin ortaya çıkışıyla, sayısal yöntem tercihinin önü yeniden açılmıştır. Peridinamiği kullanmanın sağladığı en büyük avantaj, model şekli ve analiz sayısı sınırlaması olmaksızın incelemelerin gerçekleştirilebiliyor olmasıdır. Bu nedenlerden ötürü çalışmamızda izotropik ve kompozit plaklarda mikro çatlak toklaşması durumu Bağ Tabanlı Peridinamik kullanılarak incelenmiştir. Çalışmada elde edilen sonuç kurguları ve çıkarımları için 200'ün üzerinde analiz gerçekleştirilmiş ve bunlardan oluşan sentezle mevcut stratejiler ortaya konulmuştur. Böyle bir konu üzerine yapılacak deneysel bir çalışmada bu sayıda ve bu düzeyde karmaşık mikro çatlak etkileşim testinin uygulanması neredeyse imkansızdır. Bu nedenlerden dolayı ne deneysel ne de sayısal yöntemlerle mikro çatlak toklaşması bu kompleks formları ile şimdiye kadar ele alınmamıştır. Dolayısıyla, çalışmaya özgünlüğünü katan etken mikro çatlak toklaşması durumunun kapsamlı bir şekilde Peridinamik Teorisi kullanılarak inceleniyor olmasıdır.

İlk olarak doğrulama analizleri ile oluşturulan Peridinamik analiz kodlarını kontrol için literatürde yer alan referans çalışmalarda (Ayatollahi and Aliha, 2009; Oterkus and Madenci, 2012; Shang et al., 2019; Vazic et al., 2017) ele alınan problemler ve deneysel sonuçlar yeniden analiz edilerek kıyaslanmıştır. Ardından sırasıyla izotropik ve kompozit plaklarda mikro çatlak etkisi incelenmiştir.

İlk çalışmada, izotropik gevrek malzemelerde çeşitli formlarda konumlandırılmış mikro çatlakların ana çatlağı doğrultusundan saptırma ve dallandırma üzerine etkileri Peridinamik ile modellenerek incelenmiştir. Çatlak etkileşimleri, sınırlı sayıda çatlak içeren tek tip mikro çatlak dağılımına sahip durumlar için detaylı olarak incelenmişti şimdiye kadar (Brencich and Carpinteri, 1998; Rose, 1986; Rubinstein, 1985). Bu durumun temel mekanizmaları tartışılmış olsa da, çok sayıda mikro kusurlu karmaşık çatlak modelleriyle ilgili çalışmalar güncel literatürde yaygın olarak bulunmamaktadır (Soh and Yang, 2004). Vazic et al. (2017), ana çatlak

ve buna paralel çatlak kümesi arasındaki etkileşimler ve çatlak ilerleme şekli ile ilgili bir Peridinamik modeli sunmuştur. Yalnız burada, kullanılan çatlaklar ile tokluk artırımına yönelik sistematik bir strateji uygulanmamıştır (Vazic et al., 2017). Çalışmamızda literatürde ilk kez eğrisel formlardaki yönelimlere sahip çeşitli mikro çatlak dizilim modellerinin mekanik davranışı Bağ Tabanlı Peridinamik ile analiz edilmiştir. Malzeme mimarisinin çatlak davranışı üzerindeki önemli etkisi göz önüne alındığında gevrek malzemelerde tokluk artırımının çeşitli konumlama ve yönetime sahip mikro çatlaklar ile nasıl değiştiğini gösterir durumlar mevcut çalışmada ortaya konmuştur. Bu çalışmanın özgünlüğü, Peridinamik teorisini kullanarak ana çatlak ucu etrafında yeni bir mikro çatlak dağılımı şeması ortaya koymaktır. Tezin 5. bölümünde sunulan bu çalışmadan elde edilen çıktılar Q2 kategorisinde yer alan SCI kapsamında uluslararası bir dergide yayınlanmıştır (Basoglu et al., 2019b).

İkinci çalışmada, fiber kompozitler için de benzer bir stratejinin uyarlanması ve mikro çatlakların yapısal davranış üzerindeki etkileri Bağ Tabanlı Peridinamik model kullanılarak incelenmiştir. Mikro kusurların gevrek kırılma üzerindeki etkisi sadece izotropik malzemelerde incelenmişti şimdiye kadar (Basoglu et al., 2019b; Karpenko et al., 2020; Rahimi et al., 2020; Vazic et al., 2017). Çalışmada, mikro çatlakların ana çatlak ilerlemesine olan etkileri ve tek doğrultulu kompozitlerde oluşturdukları tokluk artırma performansı incelenmiştir. Üretim esnasında sıklıkla tercih edilen 0° , 45° ve 90° fiber oryantasyonları için, çeşitli mikro çatlak dağılımlarının tokluk üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Bu çalışmanın özgünlüğü, literatürde ilk kez tek doğrultulu kompozitlerde mikro çatlak toklaşmasının Bağ Tabanlı Peridinamik ile inceleniyor olmasıdır. Tezin 6. bölümünde sunulan ve en önemli çıktılardan biri olan bu çalışma da kompozit alanında öncü uluslararası bir dergide değerlendirme aşamasındadır.

1.4. Tezin İçeriği

Tezin bundan sonraki bölümlerinde sırasıyla Klasik Kırılma Mekaniği, Bağ Tabanlı Peridinamik Teorisi, kompozit malzemeler için gerekli formülasyonlar ve analiz kodu algoritmaları verilmiştir. Ardından literatürde yer alan çalışmalar ile oluşturulan analiz kodunun sonuçları doğrulanmıştır. Beşinci ve altıncı bölümlerde de izotropik plaklarda ve kompozit tabakalarda mikro çatlakların tokluk artırımını üzerine etkisi incelenmiştir. Sonuçlar ve öneriler bölümü ile de çalışma tamamlanmıştır.

2. KLASİK KIRILMA MEKANİĞİ

Klasik Kırılma Mekaniği ve Peridinamik Teorisi arasındaki ilişki ve farklılıkların anlaşılabilmesi adına bu bölümde kırılma mekaniği kavramları ve ilgili temel matematiksel denklemler ele alınacaktır. Daha detaylı matematiksel dönüşümler ve bilgi için Anderson (2017) çalışmasına başvurulabilir.

2.1. Griffith Enerji Dengesi

Termodinamiğin Birinci Yasasına göre, dengede olmayan bir sistemin denge haline geçişiyle toplam enerjide bir azalma meydana gelir. Griffith (1921) de çatlak oluşumunun modellenmesinde bu prensipten yararlanmıştır. Bu kapsamda çatlak oluşumunun, karşılıklı yüzeyleri bir arada tutan çekme etkisinin ortadan kalkması ile oluştuğu varsayılmaktadır. Bu sürecin ilk anında birim şekil değiştirmeler ve dolayısıyla söz konusu potansiyel enerji olağan değerlere sahiptir; fakat oluşan bu yeni durum genelde bir denge hali değildir. Eğer bu yeni durum denge durumu değilse, o zaman minimum potansiyel enerji teoremi ile, potansiyel enerji azalarak denge sağlanır; eğer bir denge durumu ise herhangi bir enerji değişimi meydana gelmez (Anderson, 2017).

Ancak, toplam enerjinin azalması veya sabit kalması durumunda ya yeni bir çatlak oluşur ya da mevcut çatlakta ilerleme gerçekleşir. Dolayısıyla, kırılma için kritik koşul, toplam enerjide net bir değişiklik olmaksızın, denge durumunda çatlak ilerlemesinin meydana geldiği nokta olarak tanımlanabilir (Anderson, 2017).

$2a$ uzunluğunda çatlaka sahip, σ gerilmesine maruz bir plâğı ele alalım (Şekil 2.1.). Plak genişliğinin $2a$ 'dan oldukça büyük olduğunu ve düzlem gerilme koşullarının geçerli olduğunu varsayalım. Çatlakın ilerleyebilmesi için malzemenin yüzey enerjisinden daha fazla potansiyel enerjinin mevcut olması gerekmektedir. Denge durumunda çatlak alanındaki dA kadarlık birim alan artışı için Griffith Enerji Dengesi aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\frac{dE}{dA} = \frac{d\Pi}{dA} + \frac{dW_s}{dA} \quad (2.1)$$

veya

$$-\frac{d\Pi}{dA} = \frac{dW_s}{dA} \quad (2.2)$$

buradaki E toplam enerjiyi, Π birim şekil değıştirme enerjisi ve dış kuvvetlerden kaynaklı potansiyel enerjiyi ve W_s de yeni çatlak yüzeyi oluşturmak için gereken işi ifade etmektedir (Anderson, 2017). Şekil 2.1.'deki çatlaklı plak için Griffith, Inglis (1913)'in gerilme analizini kullanarak aşağıdaki ifadeyi elde etmiştir:

$$\Pi = \Pi_0 - \frac{\pi\sigma^2 a^2 B}{E} \quad (2.3)$$

burada Π_0 çatlaksız plağın potansiyel enerjisini ve B levha kalınlığını göstermektedir. Çatlak, iki yüzeyin oluşması ile meydana geldiğinden W_s aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$W_s = 4aB\gamma_s \quad (2.4)$$

burada γ_s malzemenin yüzey enerji ifadesidir (Anderson, 2017). Böylece,

$$-\frac{d\Pi}{dA} = \frac{\pi\sigma^2 a}{E} \quad (2.5)$$

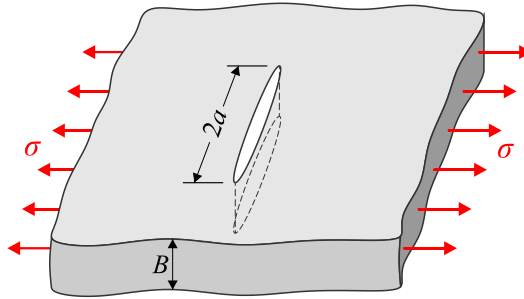
ve

$$\frac{dW_s}{dA} = 2\gamma_s \quad (2.6)$$

(2.5) ve (2.6) ifadeleri birbirine eşitlenerek kırılma gerilme ifadesi elde edilmektedir:

$$\sigma_f = \left(\frac{2E\gamma_s}{\pi a} \right)^{1/2} \quad (2.7)$$

İfade edilen çatlak ve yüzey alanı kavramlarının arasındaki fark önemlidir. Çatlak alanı, çatlağın izdüşüm alanını ifade eder ve mevcut örnek için $A = 2aB$ 'dir, yüzey alanı ise çatlağın örtüşen iki yüzeyini ifade eder ve $2A$ 'dır (Anderson, 2017).



Şekil 2.1. Sonsuz genişlikli plakta çekme etkisi altındaki çatlak

2.2. Enerji Salınım Oranı

Irwin (1956) çalışmasında, enerji yaklaşım esaslı bir kırılma modeli sunulmuştur. Irwin'in bu yaklaşımı mühendislik problemlerini çözmeye daha uygun bir form oluşu dışında, esasen Griffith modeline eşdeğer bir modeldir (Anderson,

2017). Çatlağın ilerlemesi için gerekli enerji ölçütü ifadesi olarak G enerji salınım oranı terimi Irwin tarafından ortaya koyulmuştur:

$$G = -\frac{d\Pi}{dA} \quad (2.8)$$

(2.8) ifadesindeki G terimi zamana göre türev değil, potansiyel enerjinin çatlak alanına göre değişimini ifade etmektedir. G 'nin bir potansiyelin türevi olması sebebiyle, çatlak uzama kuvveti veya çatlak ilerleme kuvveti olarak da isimlendirilebilir (Anderson, 2017). Düzlem gerilme durumunda $2a$ uzunluğunda çatlağa sahip geniş bir plağın (Şekil 2.1.) enerji salınım oranı (2.5) ifadesine göre şu şekildedir:

$$G = \frac{\pi\sigma^2 a}{E} \quad (2.9)$$

Çatlakta ilerleme meydana gelebilmesi için G 'nin G_c gibi kritik bir değere ulaşması gerekmektedir:

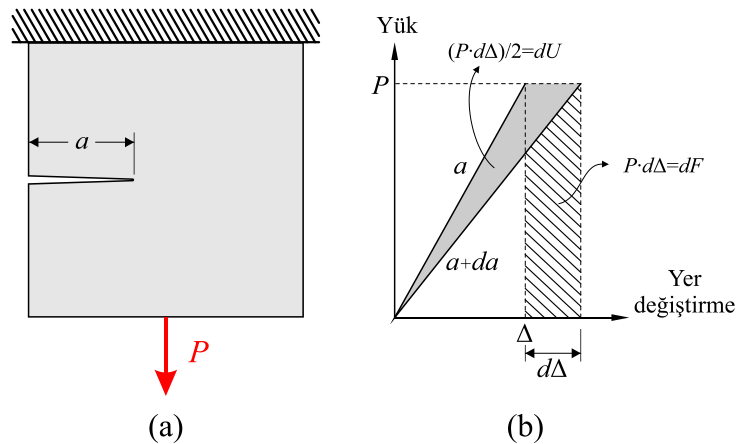
$$G_c = \frac{dW_s}{dA} = 2w_f \quad (2.10)$$

buradaki G_c ifadesi malzemenin kırılma tokluğunun bir ölçütüdür (Anderson, 2017).

Elastik bir cismin potansiyel enerjisi, Π , aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\Pi = U - F \quad (2.11)$$

buradaki U yapıda depolanan şekil değiştirme enerjisini ve F de dış kuvvetlerin yaptığı işi göstermektedir (Anderson, 2017).



Şekil 2.2. (a) Sabit yük etkisindeki çatlak plak ve (b) yük-yer değiştirme grafiği

Şekil 2.2.'deki gibi ölü yük etkisi altında çatlaklı bir plak ele alalım. Yükün sabit bir P yükü olmasından dolayı yapı yük kontrollüdür denilebilir (Anderson, 2017). Bu durum için,

$$F = P\Delta \quad (2.12)$$

ve

$$U = \int_0^\Delta P d\Delta = \frac{P\Delta}{2} \quad (2.13)$$

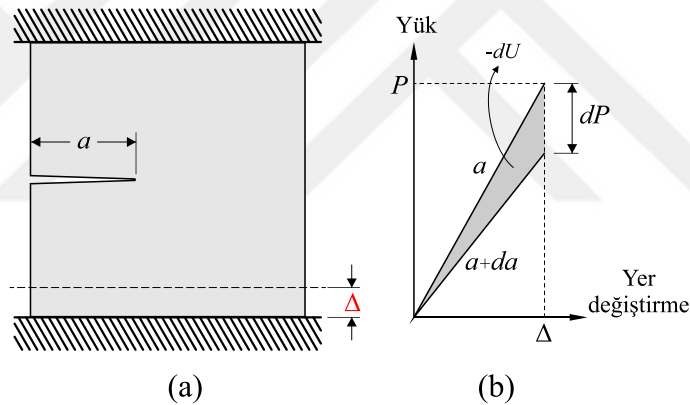
olur. Dolayısıyla,

$$\Pi = -U \quad (2.14)$$

ve

$$G = \frac{1}{B} \left(\frac{dU}{da} \right)_P = \frac{P}{2B} \left(\frac{d\Delta}{da} \right)_P \quad (2.15)$$

olur (Anderson, 2017).



Şekil 2.3. (a) Sabit yer değiştirme etkisindeki çatlak plak ve (b) yük-yer değiştirme grafiği

Yer değiştirme sabit olduğunda ise (Şekil 2.3.), plak yer değiştirmesi kontrollüdür: $F = 0$ ve $\Pi = U$. Bu durum için de,

$$G = -\frac{1}{B} \left(\frac{dU}{da} \right)_\Delta = -\frac{\Delta}{2B} \left(\frac{dP}{da} \right)_\Delta \quad (2.16)$$

olur (Anderson, 2017).

Bu durumda, plak rijitliğinin tersi olan uygunluk (kompliyans) ifadesini kullanmak doğru olacaktır:

$$C = \frac{\Delta}{P} \quad (2.17)$$

(2.17) ifadesi, (2.15) ve (2.16)'da yerine yazılırsa ifade hem yük kontrolü hem de yer değiştirme kontrolü durumları için aşağıdaki şekilde elde edilir:

$$G = \frac{P^2}{2B} \frac{dC}{da} \quad (2.18)$$

Dolayısıyla, (2.8) ifadesindeki enerji salınım oranı, yük kontrollü ve yer değiştirme kontrollü durumlar için aynıdır (Anderson, 2017). Üstelik,

$$\left(\frac{dU}{da}\right)_P = -\left(\frac{dU}{da}\right)_\Delta \quad (2.19)$$

şeklinde ifade edilir.

Şekil 2.2. ve Şekil 2.3.'de (2.19) ifadesi grafiksel olarak gösterilmiştir. Yük kontrollü durumda, da çatlak ilerlemesi, P dış kuvvetinin katkısıyla şekil değiştirme enerjisinde net bir artışa neden olmaktadır:

$$(dU)_P = Pd\Delta - \frac{Pd\Delta}{2} = \frac{Pd\Delta}{2} \quad (2.20)$$

Yer değiştirme sabit olduğunda ise, $dF = 0$ ve şekil değiştirme enerjisi azalmaktadır:

$$(dU)_\Delta = \frac{dP\Delta}{2} \quad (2.21)$$

burada dP 'nin değeri negatiftir. Şekil 2.2. ve Şekil 2.3.'ten görülebileceği gibi, bu enerjilerin mutlak değerleri arasındaki fark $dPd\Delta/2$ miktarında ihmal edilebilecek mertebede bir değerdir. Dolayısıyla, verilen P ve Δ için çatlak ilerleme artışı aşağıdaki şekilde ifade edilebilir (Anderson, 2017):

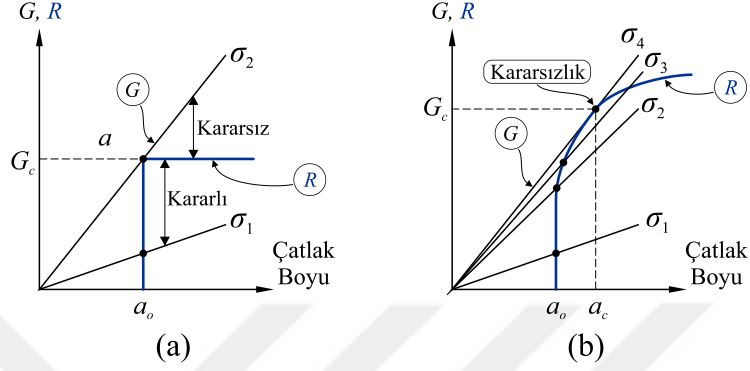
$$(dU)_P = -(dU)_\Delta \quad (2.22)$$

2.3. Kararsızlık Durumu ve R-Eğrisi

Çatlak ilerlemesi $G = 2w_f$ olması durumunda meydana gelmektedir. Çatlak ilerlemesinin kararlı veya kararsız oluşu G ve w_f değerlerinin çatlak boyu ile değişimine bağlıdır. Buradaki $2w_f$ 'nin, çatlak ilerlemesine karşı malzeme direnci olan R ile değiştirilmesi, kararlı ve kararsız davranışı ifade etmek için uygun olacaktır. Çatlak uzamasına göre R 'nin değişim grafiğine direnç eğrisi veya R eğrisi denilmektedir. G 'nin çatlak boyuna göre değişim grafiği ise ilerleme kuvveti eğrisini ifade etmektedir (Anderson, 2017).

Başlangıçta çatlak uzunluğu $2a_o$ olan bir plak ele alalım (Şekil 2.1.'deki gibi). (2.9) ifadesine göre sabit σ gerilmesi etkisinde enerji salınım oranı, çatlak boyutu ile doğru orantılı olarak değişir. Şekil 2.4.'te iki farklı malzeme davranışı için ilerleme kuvveti ve R eğrileri yer almaktadır (Anderson, 2017).

İlk durumda (Şekil 2.4.a) malzeme direnci çatlak ilerlemesi ile değişmeyip sabit kaldığı için düz bir R eğrisi oluşmaktadır. Gerilme σ_1 iken çatlak kararlıdır, σ_2 'ye geldiğinde ise kırılma başlar ve ilerleme kuvveti çatlak ilerlemesi ile artacağından dolayı çatlak ilerlemesi kararsızlaşır fakat malzeme direnci sabit kalmaktadır (Anderson, 2017).



Şekil 2.4. İlerleme kuvveti ve R eğrisi diyagramları: (a) düz R eğrisi ve (b) yükselen R eğrisi

Şekil 2.4.b'de yükselen bir R eğrisine sahip malzeme görülmektedir. Gerilme σ_2 'ye ulaştığında çatlak bir miktar ilerlemektedir, ancak gerilme artmadıkça daha fazla büyüyemez. Gerilme σ_2 'de sabit kaldığında ilerleme kuvveti R 'den daha yavaş bir hızda artar. Gerilme σ_3 'e yükseldiğinde ise çatlak ilerlemesi kararlı şekilde devam eder. Sonunda, gerilme σ_4 'e ulaştığında ilerleme kuvveti eğrisi R eğrisine teğet olur. Bu noktadan sonra meydana gelecek en ufak çatlak ilerlemesi ile plak kararsızlaşır çünkü ilerleme kuvveti eğimi R eğrisinin eğiminden daha büyük olacaktır (Anderson, 2017).

Kararlı çatlak ilerlemesi için koşullar:

$$G = R \quad (2.23)$$

ve

$$\frac{dG}{da} \leq \frac{dR}{da} \quad (2.24)$$

Kararsız çatlak ilerlemesi koşulu ise aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$\frac{dG}{da} > \frac{dR}{da} \quad (2.25)$$

Direnç eğrisi, Şekil 2.4.a'daki gibi düz olduğunda, enerji salınım oranının kritik bir değeri olan G_c , net şekilde belirlenebilir. Bununla birlikte, yükselen R eğrisine sahip bir malzeme, tek bir tokluk değeri ile belirgin şekilde karakterize edilemez. (2.25) ifadesine göre ilerleme kuvveti eğrisi R eğrisine teğet olduğunda çatlaklı yapı

çöker/kırılır, ancak bu teğet noktası yapının şekli ile ilgili olan ilerleme kuvveti eğrisine bağlıdır (Anderson, 2017).

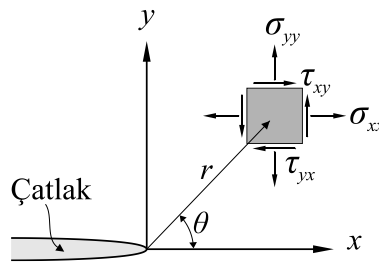
Yükselen R eğrilerine sahip malzemeler, çatlak ilerlemesinin başlangıcındaki G değeri ile karakterize edilebilir. Başlangıç tokluğu genellikle yapısal geometriye bağlı olmasa da bu ölçütle ilgili başka sorunlar da mevcuttur. Bunlardan biri, malzemede çatlak başlama anının tam olarak belirlenmesinin neredeyse imkansız oluşudur. Başlangıç tokluğunun başka bir kısıtlaması da yalnızca çatlak ilerlemesinin başlangıcını karakterize etmesidir; R eğrisinin şekli hakkında herhangi bir bilgi sağlamamaktadır (Anderson, 2017).

2.4. Gerilme Analizi ve J -Kontur İntegrali

İzotropik lineer elastik davranış varsayımı ile belli çatlak tipleri için yapıya ait gerilme ifadesinin kapalı formda türetiliş ve çözümleri ilk olarak Westergaard (1939), Irwin (1957), Williams (1957), Sneddon and Mott (1946) çalışmalarında sunulmuştur. Çatlak ucuna konumlandırılmış kutupsal koordinat takımına göre (Şekil 2.5.) yapıdaki gerilme aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

$$\sigma_{ij} = \left(\frac{k}{\sqrt{r}} \right) f_{ij}(\theta) + \sum_{m=0}^{\infty} A_m r^{m/2} g_{ij}^{(m)}(\theta) \quad (2.26)$$

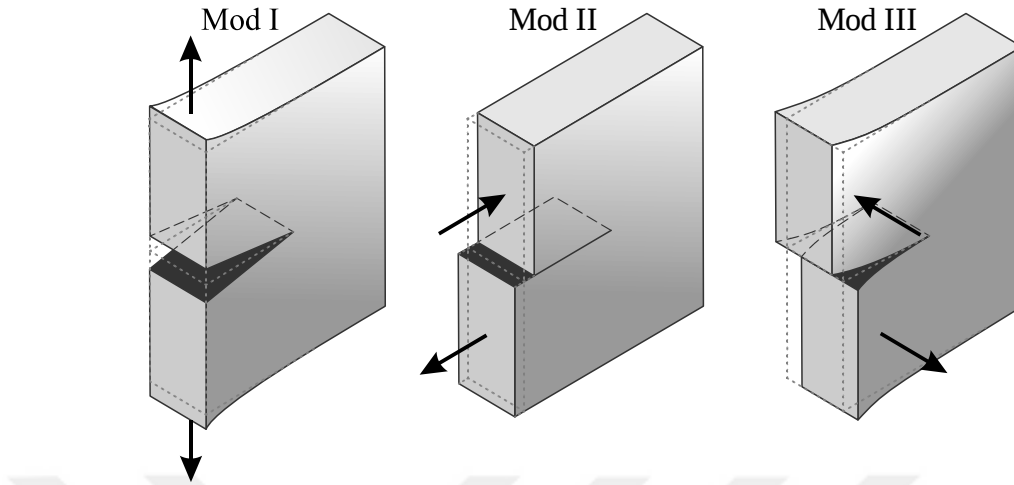
buradaki σ_{ij} gerilme tansörünü, r ve θ kutupsal koordinat parametrelerini, k orantı sabitini, f_{ij} ise θ 'nın boyutsuz bir fonksiyonunu temsil etmektedir. Yüksek mertebe terimler olan, A_m genliği ve $g_{ij}^{(m)}$ de θ 'nın boyutsuz bir fonksiyonunu ifade etmektedir (Anderson, 2017).



Şekil 2.5. Çatlak ucundaki kutupsal koordinat takımı ve civarındaki bir birim eleman üzerinde gerilme bileşenlerinin gösterimi

Çatlak oluşumunu meydana getiren üç farklı yükleme tipi tanımlanmaktadır (Şekil 2.6.). Bu yükleme tipleri çatlak düzlemlerini birbirinden ayıracak şekilde ise Mod I, birbiri üzerinde düzlem için kaydırıyorsa Mod II ve düzlem dışı kaydırıyorsa

Mod III olarak adlandırılmaktadır. Bu üç yükleme ayrı ayrı veya bir arada çeşitli kombinasyonlarla oluşabilir (Anderson, 2017).



Şekil 2.6. Çatlak yükleme modları

(2.26) ifadesindeki k orantı sabiti ve f_{ij} terimleri moda göre farklılaşırken, $1/\sqrt{r}$ terimi her mod için çatlak ucunda gerilme tekilliğine sebep olmaktadır. Bu k sabiti, gerilme yoğunluk faktörü adında bir $K = k\sqrt{2\pi}$ sabiti ile yer değiştirilecek olursa, çatlak ucu civarındaki gerilme ifadeleri üç mod için sırasıyla aşağıdaki şekilde ifade edilir (Anderson, 2017):

$$\lim_{r \rightarrow 0} \sigma_{ij}^{(I)} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^{(I)}(\theta) \quad (2.27)$$

$$\lim_{r \rightarrow 0} \sigma_{ij}^{(II)} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^{(II)}(\theta) \quad (2.28)$$

$$\lim_{r \rightarrow 0} \sigma_{ij}^{(III)} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^{(III)}(\theta) \quad (2.29)$$

Birden fazla modun bir arada olması durumunda her moda ait gerilme bileşenleri toplanmaktadır:

$$\sigma_{ij}^{(total)} = \sigma_{ij}^{(I)} + \sigma_{ij}^{(II)} + \sigma_{ij}^{(III)} \quad (2.30)$$

J -kontur integrali, doğrusal olmayan malzemelerde kırılmayı karakterize etmede önemli bir parametredir. Elastoplastik deformasyonun, doğrusal olmayan elastik olarak idealleştirilmesi Rice (1968) çalışması ile sunulmuştur. Dolayısıyla kırılma mekaniğinin kapsamı, lineer elastik kırılma mekaniği sınırlarını aşmasının önü açılmıştır. Bu sayede, doğrusal olmayan çatlaklı elastik bir cismin enerji salınım oranı, yoldan bağımsız bir J -kontur integrali ile elde edilebilmektedir (Anderson, 2017).

2.5. Dinamik ve Zamana Bağlı Kırılma

Bazı kırılma problemlerinde zaman önemli bir parametredir. Yükleme hızına bağlı olarak aynı malzeme farklı kırılma davranışları ortaya koyabilir. Lineer elastik ve elastoplastik kırılma mekaniğinin yarı-statik (quasi-static) ve hızdan bağımsız deformasyon varsayımlarından dolayı sundukları çözümler bu tür kırılma problemleri için yetersiz kalmaktadır (Anderson, 2017).

Kırılma mekaniğinin en genel halinde lineer elastik (LEFM) ve elastoplastik kırılma mekaniğinde ihmal edilen üç durum mevcuttur: atalet etkileri, hıza bağlı malzeme davranışı ve yansıyan gerilme dalgaları. Bazı problemlerde bu etkilerin bir kısmı ihmal edilebilir, ancak bu etkilerin tümünden ihmal edilmesi durumunda problem artık dinamik değil yarı-statik (quasi-static) bir problem halini alır (Anderson, 2017).

Kırılma mekaniği üzerine yapılan ilk çalışmalarda dinamik etki sadece lineer elastik malzeme davranışının belli bir durumu için dikkate alınmıştır. Son dönemde ise visko-plastisite ve visko-elastisite gibi zamana bağlı değişen malzeme davranışları için sunulan yeni yaklaşımlarda J -kontur integral genellemeleri esas alınmaktadır (Anderson, 2017).

3. PERİDİNAMİK TEORİSİ

Katı cisimlerin analizi için kullanılan geleneksel yaklaşım “sürekli ortam mekaniği” olarak bilinir. Klasik sürekli ortam mekaniğinde yapının bütünü oluşturarak sonsuz küçük parçacıkların birbirleriyle olan etkileşimi temas ettikleri parçacıklarla etki-tepki prensibi üzerinden oluşturulur. Herhangi bir $\mathbf{x}$ parçacığının doğrusal momentum korunumu çerçevesinde hareket denklemi aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\rho \ddot{\mathbf{u}}(\mathbf{x}, t) = \nabla \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{b}(\mathbf{x}, t) \quad (3.1)$$

buradaki ρ , $\mathbf{b}(\mathbf{x}, t)$ ve $\ddot{\mathbf{u}}(\mathbf{x}, t)$ ifadeleri, sırasıyla $\mathbf{x}$ 'de bulunan parçacığa ait özkütle, dış kuvvet ve ivmeyi temsil etmektedir.

Yapıda süreksizlik olması durumunda gerilme tansörü diverjansında, $\nabla \boldsymbol{\sigma}$, yer alan kısmi türevli diferansiyel ifadeler tanımsız olacaktır. Dolayısıyla, çatlak gibi yapısal süreksizliklerin mevcudiyetinde (3.1) denklemi geçersizdir.

Mevcut sorunun üstesinden gelmek için ABD Sandia Ulusal Araştırma Merkezi'nden Dr. Stewart Silling tarafından ortaya konulan Peridinamik Teorisinde (3.1) denklemindeki diverjans terimi, bir integral ifade ile değiştirilmiştir (Silling, 2000). Böylece, Peridinamik denklemleri, süreksizliklerden bağımsız olarak bir cismin her yerinde geçerliliğini korumaktadır. Bu yeni formülasyon, sürekli ortam mekaniğinin lokal olmayan bir kuramıdır. Teorinin temel varsayımı, iki parçacık arasındaki kuvvetin bu parçacıkların konumlarının ve bunların bağlı yer değiştirmelerinin bir fonksiyonu olduğudur. Daha yalın bir ifade ile parçacıklar arasında yay benzeri bir etkileşim tarif edilmektedir. Silling et al. (2007) çalışmasında “Durum Tabanlı Peridinamik” teorisinin ortaya konmasının ardından teorinin bu ilk versiyonu, “Bağ Tabanlı Peridinamik” teorisi olarak adlandırılmıştır.

3.1. Bağ Tabanlı Peridinamik Teorisi

Bir cismin $\mathbf{x}$ ve $\mathbf{x}'$ konumlarındaki herhangi iki parçacığın birbirleriyle etkileştiğini varsayalım. Deformasyon öncesi başlangıç durumunda, parçacıklar arasındaki bağlı konum vektörü $\boldsymbol{\xi} = \mathbf{x}' - \mathbf{x}$ 'tir, bu aynı zamanda “referans bağ” olarak da adlandırılır. Deformasyondan sonra $\mathbf{x}$ ve $\mathbf{x}'$ parçacıklarının yer değiştirme vektörleri sırasıyla $\mathbf{u}(\mathbf{x}, t)$ ve $\mathbf{u}(\mathbf{x}', t)$ olarak tanımlanır. Bu iki yer değiştirme vektörünün farkı, $\boldsymbol{\eta} = \mathbf{u}(\mathbf{x}', t) - \mathbf{u}(\mathbf{x}, t)$, referans bağın boy değişimini vermektedir (Şekil 3.1.). Dolayısıyla deformasyon sonrası bağlı konum vektörü, $\boldsymbol{\xi} + \boldsymbol{\eta}$, parçacıklar

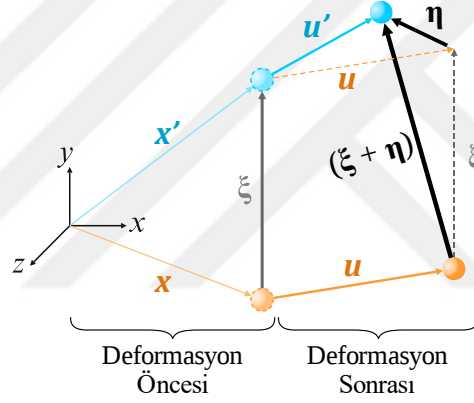
arasındaki “deforme bağı” tarifler (Madenci and Oterkus, 2014; Silling and Askari, 2005). Parçacıklar arasındaki “bağ uzama oranı” aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$s = \frac{|\xi + \eta| - |\xi|}{|\xi|} \quad (3.2)$$

Bağ Tabanlı Peridinamik Teorisine göre, herhangi iki parçacık arasındaki bağ etkileşimi, elastik malzemeler için (doğrusal veya doğrusal olmayan) elastik bir yay olarak tanımlanabilir. Burada bağıl yer değiştirme vektörünün, η , skaler büyüklüğü ile elde edilen bağ enerjisi fonksiyonu “mikro potansiyel”, w , olarak adlandırılır (Şekil 3.4.):

$$w(\eta, \xi) = \frac{1}{2} c s^2 |\xi| \quad (3.3)$$

buradaki c , bağ sabitidir.



Şekil 3.1. Parçacıkların kinematığı

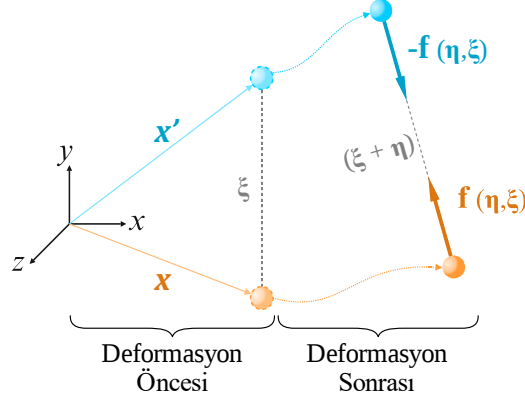
Aşağıda ifade edildiği şekilde bağ kuvveti, $\mathbf{f}$, mikro potansiyelden türetilmektedir (Şekil 3.2.) (Madenci and Oterkus, 2014; Silling, 2000; Silling and Askari, 2005):

$$\mathbf{f}(\eta, \xi) = \frac{\partial w}{\partial \eta}(\eta, \xi) = \frac{\xi + \eta}{|\xi + \eta|} f(|\xi + \eta|, \xi) \quad \forall \eta, \xi \quad (3.4)$$

Bağ kuvvetinin skaler fonksiyonu, f , elastik ve izotrop bir malzeme için aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$f(|\xi + \eta|, \xi) = c s \quad (3.5)$$

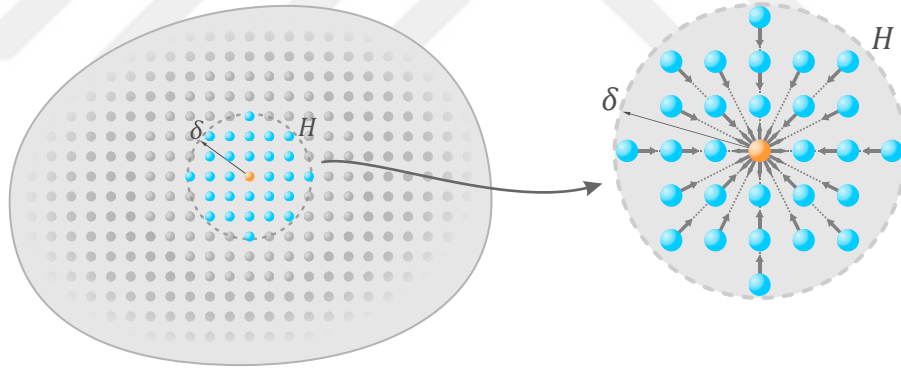
buradaki c , Peridinamik malzeme parametresi olan bağ sabitini, s ise $\mathbf{x}$ ve $\mathbf{x}'$ parçacıkları arasındaki bağ uzama oranını ifade etmektedir.



Şekil 3.2. Bağ Tabanlı Peridinamik kuvvet fonksiyonu

Cisme ait herhangi iki parçacık arasındaki bu etkileşimin olup olmadığı, “ufuk yarıçapı” adı verilen, δ , bir uzunluk parametresiyle belirlendiği kabul edilmektedir (Şekil 3.3.). Bu ufuk yarıçapı ile sınırları çizilen H bölgesi Peridinamik ufku veya lokal olmayan etkileşim bölgesi olarak adlandırılır. Diğer bir deyişle, bir parçacık ufuk yarıçapının taradığı bölge, H , dışında kalan başka bir parçacıkla bağ kuramaz (Silling and Askari, 2005):

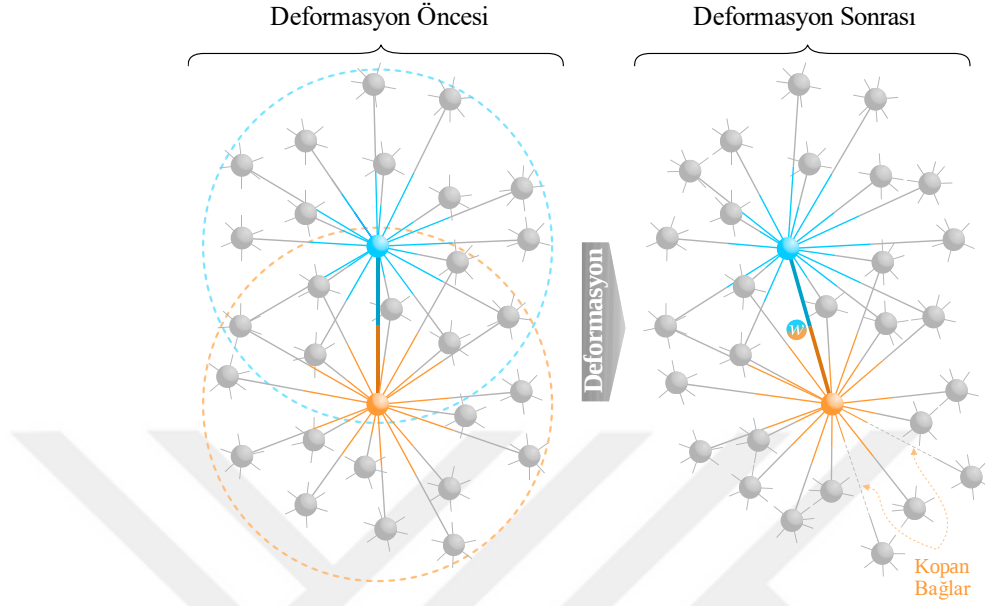
$$|\xi| > \delta \Rightarrow \mathbf{f}(\eta, \xi) = 0 \quad \forall \eta \quad (3.6)$$



Şekil 3.3. Bir parçacığın ufku içinde kalan diğer parçacıklarla olan etkileşimi

(3.3) ifadesinde verilen mikro potansiyel, w , bağa ait mikro elastik potansiyel enerjisidir. Önceden de ifade edildiği üzere, bir parçacık ufku, H , içerisindeki parçacık sayısı kadar bağ etkileşimine sahiptir. Parçacığa ait bu potansiyel enerjilerin integrasyonu ile birim şekil değiştirme enerji yoğunluğu, W , elde edilir ve her bir bağdaki mikro potansiyelin, w , yarısının toplanması ile hesaplanır (Şekil 3.4.) (Madenci and Oterkus, 2014; Silling and Askari, 2005):

$$W = \frac{1}{2} \int_H w dH = \frac{1}{2} \int_H \left(\frac{1}{2} c s^2 |\xi| \right) dH \quad (3.7)$$



Şekil 3.4. Peridinamik parçacıklarının deformasyon öncesi ve sonrası etkileşimleri

Peridinamik malzeme parametresi c bağ sabitini, E elastisite modülü, h kalınlığı ve δ ufuk yarıçapı cinsinden elde edebilmek için yapının üniform genleşme durumuna ait sürekli ortam mekaniği ve Peridinamik Teorisinin birim şekil değiştirme enerji yoğunluğu ifadelerinin birbirine eşitlenmesiyle türetilmektedir (Madenci and Oterkus, 2014; Silling and Askari, 2005). İki boyutlu (2-B, düzlem gerilme durumu) ve üç boyutlu (3-B) durumlar için c parametresi, izotropik bir malzemeye ait sabitlerle aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir:

$$c = \frac{9E}{\pi h \delta^3} \quad (2\text{-B için}) \quad (3.8)$$

$$c = \frac{12E}{\pi \delta^4} \quad (3\text{-B için}) \quad (3.9)$$

Bağ Tabanlı Peridinamik Teorisinde bir parçacığa ait hareket denklemi aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir (Silling and Askari, 2005):

$$\rho \ddot{\mathbf{u}}(\mathbf{x}, t) = \int_H \mathbf{f}(\mathbf{u}(\mathbf{x}', t) - \mathbf{u}(\mathbf{x}, t), \mathbf{x}' - \mathbf{x}) dV' + \mathbf{b}(\mathbf{x}, t) \quad (3.10)$$

burada geçen $\mathbf{b}(\mathbf{x}, t)$, $\ddot{\mathbf{u}}(\mathbf{x}, t)$, ρ , ifadeleri sırasıyla $\mathbf{x}$ konumundaki parçacığa ait dış kuvveti, ivmeyi ve özkütleyi ifade etmektedir. dV' ifadesi ise $\mathbf{x}'$ konumundaki

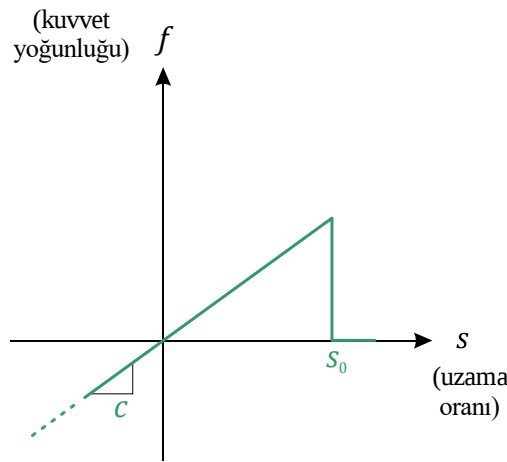
parçacığın sonsuz küçüklükteki hacmini temsil etmektedir. (3.10) denkleminin çözümü için deformasyon öncesi durumda yapı sonlu hacme sahip parçacıklara ayrıştırılmaktadır. Ayrıştırılmış durumda, bir k parçacığının n zaman adımındaki yer değiştirmesi $\mathbf{u}_k^n$ şeklinde ifade edilirse (3.10) denklemindeki integral operatörü yerine sonlu toplam operatörü kullanılarak hareket denklemi aşağıdaki gibi yeniden düzenlenebilir:

$$\rho_k \ddot{\mathbf{u}}_k^n = \sum_{j=1}^N \mathbf{f}(\mathbf{u}_j^n - \mathbf{u}_k^n, \mathbf{x}_j - \mathbf{x}_k) V_j + \mathbf{b}_k^n \quad (3.11)$$

buradaki N , $\mathbf{x}_k$ parçacığının ufku içerisindeki toplam parçacık sayısını ve V_j ise $\mathbf{x}_j$ parçacığının hacmini göstermektedir (Silling and Askari, 2005). Aynı şekilde, k parçacığının n zaman adımındaki W_k birim şekil değiştirme enerji yoğunluğunun ayrışık durum ifadesi aşağıdaki gibidir:

$$W_k^n = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N w_{kj}^n V_j \quad (3.12)$$

Lineer-elastik gevrek malzeme davranışında, $\mathbf{f}$ bağ kuvveti ve s bağ uzama oranı arasındaki ilişki Şekil 3.5.'deki gibi gerçekleşir. Bağ uzama oranı, belli bir s_0 kritik bağ uzama oranı değerine ulaştığı zaman parçacıklar arasındaki bağ etkileşimi ortadan kalkar (Şekil 3.4.). Görüldüğü üzere, Peridinamikte hasar oluşum modeli oldukça basittir. Bu sayede çatlağın meydana gelmesi ve yayılması durumu herhangi bir başlangıç hasarı tarifine gereksinim duymadan kolaylıkla modellenmektedir (Madenci and Oterkus, 2014; Silling and Askari, 2005).



Şekil 3.5. Bağ elastik davranış modeli ve s_0 kritik bağ uzama oranı

Hasar gelişimini modelleyebilmek için geçmişe bağlı skaler bir hasar fonksiyonu, (3.5) skaler bağ kuvveti ifadesine katsayı olarak dahil edilir:

$$f(|\xi + \eta|, \xi) = c s \mu(t, \xi) \quad (3.13)$$

$\mu(t, \xi)$, her bir etkileşimin hasar durumunu tanımlayan bir adım fonksiyonudur:

$$\mu(t, \xi) = \begin{cases} 1 & \text{eğer } s(t', \xi) < s_0, \quad \forall (0 < t' < t) \\ 0 & \text{aksi takdirde} \end{cases} \quad (3.14)$$

burada ifade edilen s_0 kritik bağ uzama oranı, izotropik malzeme için aşağıdaki bağıntı ile elde edilir (Ha and Bobaru, 2010):

$$s_0 = \sqrt{\frac{4\pi G_c}{9E\delta}} \quad (3.15)$$

G_c , malzemenin kırılma tokluğu ile ilgili kritik enerji salınım oranı ve E ise malzemenin elastisite modülünü ifade etmektedir. 2.2. bölümünde tarif edilen birim çatlak alanının oluşması için gereken enerji ifadesi G_c kritik enerji salınım oranı ile s_0 kritik bağ uzama oranı arasındaki ilişki (3.15) bağıntısı ile kurulmaktadır.

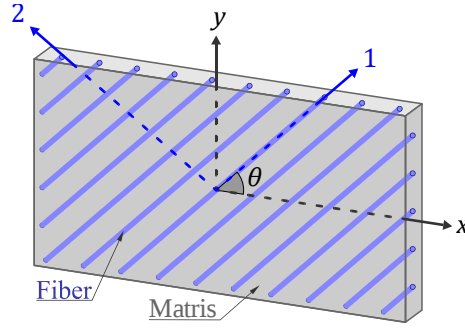
Bir parçacığa ait kopan bağ sayısının toplam bağ sayısına oranını kullanarak, parçacığa ait lokal bir hasar parametresi tanımlanabilir (Oterkus et al., 2012; Silling and Askari, 2005):

$$\varphi(\mathbf{x}, t) = 1 - \frac{\int_H \mu(\mathbf{x}, t, \xi) dV'}{\int_H dV'} \quad (3.16)$$

Böylece, oluşan hasarın mertebesi, 0 ile 1 arasında bir değer ile ifade edilir ve burada, 0 değeri, parçacığın bağlarının hiç hasar görmediğini, 1 ise tamamen koptuğunu ifade eder. 0,5 ve daha büyük hasar değerleri ise olası çatlak yüzeyi oluşumunun göstergesidir.

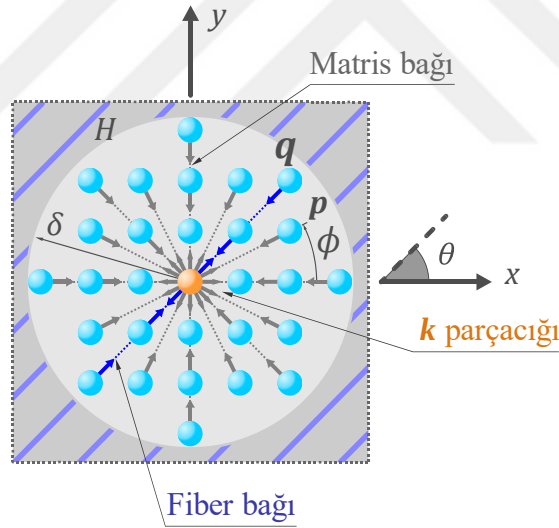
3.2. Kompozit Malzemeler için Gereken Düzenlemeler

Kompozit bir yapının Peridinamik ile modellenmesinde doğrultuya göre farklılaşan bağ sabiti ve kritik bağ uzama oranı parametrelerinin tanımlanması gerekmektedir. Şekil 3.6.'daki gibi fiber yönelim açısı θ olan bir kompozit tabakanın modellenmesinde fiber ve matris bileşenlerinin her biri için bu parametrelerin belirlenmesi gerekmektedir.



Şekil 3.6. θ fiber yönelim açısına sahip kompozit tabaka

Fiber doğrultusuna paralel olan etkileşimler fiber bağı olarak tanımlanır; hesaplamada c_f fiber bağı sabiti ve s_f kritik fiber bağı uzama oranı ile karakterize edilir. Örneğin, Şekil 3.7.'de k parçacığının ufku içerisindeki q parçacığı ile yaptığı bağı etkileşimi θ fiber doğrultusuna paralel olduğu için fiber bağı olarak tanımlanır. Matris için ise k parçacığının ufku içerisindeki fiber yönü de dahil bütün etkileşimleri için matris bağları tanımlanır; hesaplamada c_m matris bağı sabiti ve s_m kritik matris bağı uzama oranı ile karakterize edilir.



Şekil 3.7. k parçacığının ufku içerisindeki fiber ve matris bağları

Kompozit malzemeler için bağı sabiti, doğrultuya bağlı bir fonksiyon olarak ifade edilebilir. Oterkus and Madenci (2012) tarafından iki boyutlu kompozit tabaka yapıların düzlem gerilme durumu için c bağı sabiti fonksiyonu aşağıdaki gibi ifade edilmiştir:

$$c(\phi) = \begin{cases} c_f + c_m & \phi = \theta \\ c_m & \phi \neq \theta \end{cases} \quad (3.17)$$

buradaki ϕ , parçacıklar arasındaki bağıın doğrultusunu göstermektedir (Şekil 3.7.).

Fiber c_f ve matris c_m bağ sabitlerinin malzeme sabitleri cinsinden ifadeleri, sürekli ortam mekaniği ve Peridinamik Teorisi şekil değiştirme enerji yoğunluklarının birbirine eşitlenmesiyle türetilmektedir (Şekil 3.8.):

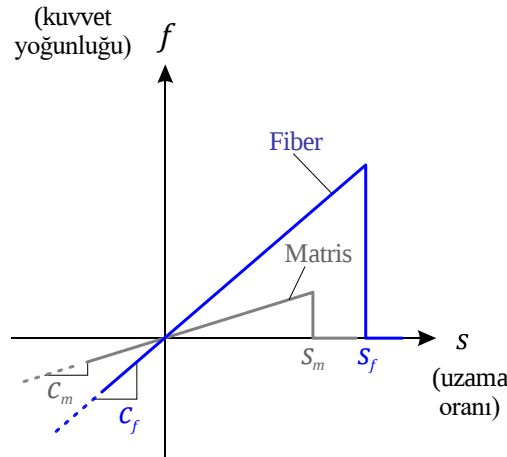
$$c_f = \frac{2E_1(E_1 - E_2)}{\left(E_1 - \frac{1}{9}E_2\right) \frac{\pi h \delta^2}{N} \sum_{j=1}^q \xi_j} \quad (3.18)$$

$$c_m = \frac{8E_1E_2}{\left(E_1 - \frac{1}{9}E_2\right) \pi h \delta^3} \quad (3.19)$$

(3.18) ifadesinde yer alan ξ_j , bir k parçacığının ufku içerisinde fiber doğrultusunda etkileştiği parçacıklarla arasındaki mesafeyi ve q ise bu fiber bağlarının toplam sayısını ifade etmektedir. Ayrıca, N ufku içerisinde bulunan toplam parçacık sayısını; E_i ($i = 1, 2$) ise kompozit malzemenin fiber doğrultusunda ve fibere dik doğrultudaki elastik sabitlerini göstermektedir.

Örneğin, k parçacığının ufku içerisinde bulunan parçacık sayısının $N = 29$ olduğu ve fiber doğrultusunun $\theta = 0^\circ$ olduğu durum için $\sum_{j=1}^q \xi_j = 4\delta$ olarak hesaplanır. Dolayısıyla fiber doğrultusu $\theta = 0^\circ$ için c_f fiber bağ sabiti aşağıdaki şekilde düzenlenebilir:

$$c_f = \frac{2E_1(E_1 - E_2)}{\left(E_1 - \frac{1}{9}E_2\right) \frac{4\pi h \delta^3}{29}} \quad (3.20)$$



Şekil 3.8. Kompozit bileşenlerinin bağ elastik davranış modelleri ve kritik bağ uzama oranları

Öte yandan, (3.13) bağ kuvveti ifadesinde katsayı olarak bulunan $\mu(t, \xi)$ hasar fonksiyonu, kompozit malzeme durumu için yeniden düzenlenerek aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\mu(t, \xi, \phi) = \begin{cases} 1 & \text{eğer } \phi = \theta \text{ ve } s(t', \xi) < s_f, \quad (0 < t' < t) \\ 1 & \text{eğer } \phi \neq \theta \text{ ve } s(t', \xi) < s_m, \quad (0 < t' < t) \\ 0 & \text{aksi takdirde} \end{cases} \quad (3.21)$$

burada geçen s_f ve s_m , ifadeleri sırasıyla fiber ve matris kritik bağ uzama oranlarını göstermektedir (Şekil 3.8.). Bu kritik bağ uzama oranlarının belirlenmesi için gereken deneysel prosedür Oterkus et al. (2012) çalışmasında yer almaktadır.

3.3. Peridinamik Analiz Kodu Algoritması

Bağ Tabanlı Peridinamik analiz kodunun iki temel aşaması mevcuttur (Tablo 3.1.). Bunlar, hazırlık ve zaman integrasyonu aşamalarıdır. Hazırlık aşamasında gerekli girdiler, ayırıklaştırma, bağ tanımlama, çatlak tanımlama ve belli düzeltme faktörü hesapları gerçekleştirilir. Bu aşamada girdilerin tanımlanmasından sonra ilk olarak Algoritma 2 ile yapının arıklaştırılması işlemi gerçekleştirilir. Algoritma 2'den anlaşılacağı üzere ayırıklaştırma sonrası sıfır koordinat noktası plağın tam merkezinde yer almaktadır (Tablo 3.2.). Algoritma 3 ile ayırıklaştırma sonucu oluşan parçacıkların her birinin ufku içinde kalan parçacıklar ile aralarındaki Peridinamik bağ tanımlamaları gerçekleştirilmektedir (Tablo 3.3.). Algoritma 4 ile mevcut çatlakların bulunduğu konumlardaki parçacık bağlarının kaldırılması ile model içinde çatlaklar oluşturulmaktadır (Tablo 3.4.). Algoritma 5 ile gerekli düzeltme faktörleri hesaplanmaktadır (Tablo 3.5.). Zaman integrasyonu aşamasında ise Algoritma 6'da yer alan tek bir zaman adımı için gerekli hesaplamalar döngü halinde uygulanarak dinamik analiz gerçekleştirilmektedir (Tablo 3.6.).

Tablo 3.1. Peridinamik çözüm algoritması

Algoritma 1

```
% % Hazırlık
% Girdiler
% Yapının ayırıklaştırılması (Algoritma 2)
% Parçacık bağlarının tanımlanması (Algoritma 3)
% Mevcut çatlakların tanımlanması (Algoritma 4)
% Düzeltme faktörlerinin hesaplanması (Algoritma 5)
% % Zaman İntegrasyonu
for t = 1 : toplam-zaman-adımı
    % Tek bir zaman adımı için Peridinamik çözümü (Algoritma 6)
    % Zaman adımına ait sonuçların saklanması
end
```

Tablo 3.2. Yapının ayrıklaştırılma algoritması

Algoritma 2

```

ndivx = Lx/ $\Delta x$  ;           % x doğrultusundaki parçacık sayısı
ndivy = Ly/ $\Delta x$  ;           % y doğrultusundaki parçacık sayısı
nnum = 0;                     % parçacık no
for i = 1 : ndivx
    for j = 1 : ndivy
        nnum = nnum + 1;
        coord(nnum,1) = -Lx/2 +  $\Delta x/2$  + (i-1)* $\Delta x$ ;           % parçacığın x koordinatı
        coord(nnum,2) = -Ly/2 +  $\Delta x/2$  + (j-1)* $\Delta x$ ;           % parçacığın y koordinatı
    end
end

```

Tablo 3.3. Parçacık bağlarının tanımlanma algoritması

Algoritma 3

```

bondnum           % parçacığın bağ sayısı
indexbondlist     % parçacığın bondlist'deki başlangıç satırı
bondlist          % parçacıklar arası bağ ilişkileri
for i = 1 : toplam-parçacık-sayısı
    if i == 1
        indexbondlist(i,1) = 1;
    else
        indexbondlist(i,1) = indexbondlist(i-1,1) + bondnum(i-1,1);
    end
    for j = 1 : toplam-parçacık-sayısı
         $\xi(i,j) = \sqrt{(coord(j,1) - coord(i,1))^2 + (coord(j,2) - coord(i,2))^2}$ ;
        if  $i \sim j$ 
            if  $\xi(i,j) \leq \delta$            % ufuk içi parçacı kontrolü
                bondnum(i,1) = bondnum(i,1) + 1;
                bondlist(indexbondlist(i,1)+ bondnum(i,1)-1,1) = j;
            end
        end
    end
end

```

Tablo 3.4. Mevcut çatlakları tanımlama algoritması

Algoritma 4

```

crack                % mevcut çatlak uçları koordinatları
fail                % bağ hasar durumu
for k = 1 : çatlak-sayısı
    % k(k1,k2) çatlağının Plücker koordinat Lk[q] (q=1,2,3,4,5,6) dönüşümü
    for i = 1 : toplam-parçacık-sayısı
        for j = 1 : parçacığın bağ sayısı
            % (i,j) bağının Plücker koordinat Lij[q] (q=1,2,3,4,5,6) dönüşümü
            % (o,i) doğrusunun Plücker koordinat Loi[q] (q=1,2,3,4,5,6) dönüşümü
            % (j,o) doğrusunun Plücker koordinat Ljo[q] (q=1,2,3,4,5,6) dönüşümü
            % (o,k1) doğrusunun Plücker koordinat Lok1[q] (q=1,2,3,4,5,6) dönüşümü
            % (k2,o) doğrusunun Plücker koordinat Lk2o[q] (q=1,2,3,4,5,6) dönüşümü
            side1 = side(k1,k2 ; o,i);
            side2 = side(k1,k2 ; j,o);
            if side1 * side2 >= 0                % (i,j) bağı ile k çatlağının kesişim kontrolü
                side1 = side(i,j ; o,k1);
                side2 = side(i,j ; k2,o);
                if side1 * side2 >= 0                % (i,j) bağı ile k çatlağının kesişim kontrolü
                    fail(i,j) = 0;                % kesişen (i,j) bağının kaldırılması
                end
            end
        end
    end
end

```

Tablo 3.5. Düzeltme faktörlerini hesaplama algoritması

Algoritma 5

```

% Sisteme üniform genleşme yer değiştirmesi yükü uygulama
for i = 1 : toplam-parçacık-sayısı
    for j = 1 : parçacığın bağ sayısı
        
$$\xi(i,j) = \sqrt{(coord(j,1) - coord(i,1))^2 + (coord(j,2) - coord(i,2))^2}$$

        
$$\xi(i,j) + \eta(i,j) = \sqrt{(coord(j,1) - coord(i,1) + disp(j,1) - disp(i,1))^2 + (coord(j,2) - coord(i,2) + disp(j,2) - disp(i,2))^2}$$

        
$$V_{fac}(i,j) = \frac{\delta + \Delta x / 2 - \xi(i,j)}{\Delta x}$$
                % hacim düzeltme faktörü hesabı
    end
    
$$W(i) = \frac{1}{2} \int_H \left( \frac{1}{2} c s^2 |\xi| \right) dH$$
                % şekil değiştirme enerji yoğunluğu hesabı
    
$$G_i = W_{klasik} / W(i)$$
                % yüzey düzeltme faktörü hesabı
end

```

Tablo 3.6. Tek bir zaman adımı için Peridinamik çözüm algoritması

Algoritma 6

```

% Kuvvet ve/veya yer değiştirme sınır koşullarının uygulanması
for i = 1 : toplam-parçacık-sayısı
    for j = 1 : parçacığın bağ sayısı
        
$$\xi(i,j) = \sqrt{(coord(j,1) - coord(i,1))^2 + (coord(j,2) - coord(i,2))^2}$$

        
$$\xi(i,j) + \eta(i,j) = \sqrt{(coord(j,1) - coord(i,1) + disp(j,1) - disp(i,1))^2 + (coord(j,2) - coord(i,2) + disp(j,2) - disp(i,2))^2}$$

        % hacim düzeltme faktörü hesabı
        % yüzey düzeltme faktörü hesabı
        
$$s = \frac{|\xi + \eta| - |\xi|}{|\xi|}$$
 % bağ-uzama oranı hesaplanır
        
$$f(|\xi + \eta|, \xi) = c s$$
 % kuvvet yoğunluğu hesaplanır
        if s > s0 % bağ-uzama oranı kritik değerden büyükse
            fail(i,j) = 0; % (i,j) bağı kaldırılır
        end
    end
end
for i = 1 : toplam-parçacık-sayısı
    % (i) parçacığının ivme, hız ve yer değiştirme değerleri hesaplanır
end

```

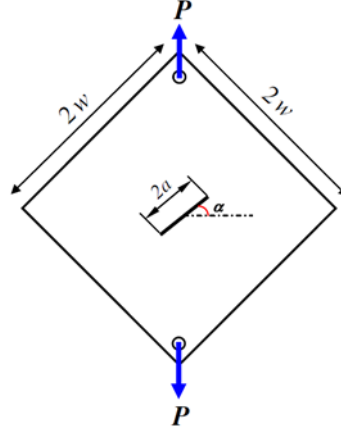
4. PERİDİNAMİK MODELİNİN SAYISAL VE DENEYSEL DOĞRULAMA ANALİZLERİ

Bu bölümde, oluşturulan analiz kodunun doğruluğunu teyit etmek için literatürde yer alan sayısal ve deneysel dört farklı çalışma (Ayatollahi and Aliha, 2009; Oterkus and Madenci, 2012; Shang et al., 2019; Vazic et al., 2017) ile doğrulama analizleri gerçekleştirilmiştir. İlk ikisi izotropik ve diğer ikisi de kompozit durum için geçerli analizlerdir. İlk doğrulama analizinde, Ayatollahi and Aliha (2009) çalışmasında gerçekleştirilen izotropik bir plakta çekme kırılması deneyleri modellenmiştir. Ardından Vazic et al. (2017)'a ait numerik çalışmada yine izotropik plakta çatlak etkileşim modelleri yeniden analiz edilip doğrulanmıştır. Üçüncü olarak Oterkus and Madenci (2012) çalışmasındaki çekme yükü etkisindeki hasarsız tabakanın analitik deformasyon sonuçları ile Peridinamik analiz sonuçlarımız karşılaştırılmıştır. Ardından yine aynı çalışmada çatlaklı kompozit tabakaların numerik çekme kırılma analiz modelleri yeniden çözülmüştür. Son olarak Shang, Qin [68] çalışmasında yer alan ortası dairesel boşluklu tabakaların çekme etkisinde oluşan deneysel kırılma sonuçları fiber kompozitler için oluşturulan Peridinamik analiz kodunu kullanarak analiz edilmiş ve kodun sonuçları doğrulanmıştır.

4.1. Ayatollahi and Aliha (2009) Çalışması ile Doğrulama Analizleri

Doğrulamalar, Ayatollahi and Aliha (2009) çalışmasında yer alan deneylerin modellenmesi ile sağlanmıştır. İzotropik malzemeler için 3. bölümde sunulan matematiksel modeli doğrulamak amacıyla ortasında çeşitli doğrultularda çatlağı bulunan kare plakların diyagonal çekme kırılma deneyleri Peridinamik Teorisi yardımı ile modellenerek analizleri gerçekleştirilmiştir.

Geometrisi ve yükleme koşulları Şekil 4.1.'de görüldüğü üzere, diyagonal olarak yüklenmiş kare plaka numune ile düzenek oluşturulmuştur. Burada, $2a$ uzunluğu plak merkezine konumlanmış çatlak boyunu, $2w$ uzunluğu kare plağın kenar boyunu, P diyagonal doğrultudaki yüklemeyi ve α da çatlak doğrultusunun yatayla yaptığı açığı ifade etmektedir. α açısı değiştirilerek de çatlak üzerinde mod I, mod II ve iki modun birlikte olduğu koşullar meydana getirilmiştir.



Şekil 4.1. Deney düzeneğinin şematik gösterimi (Ayatollahi and Aliha, 2009)

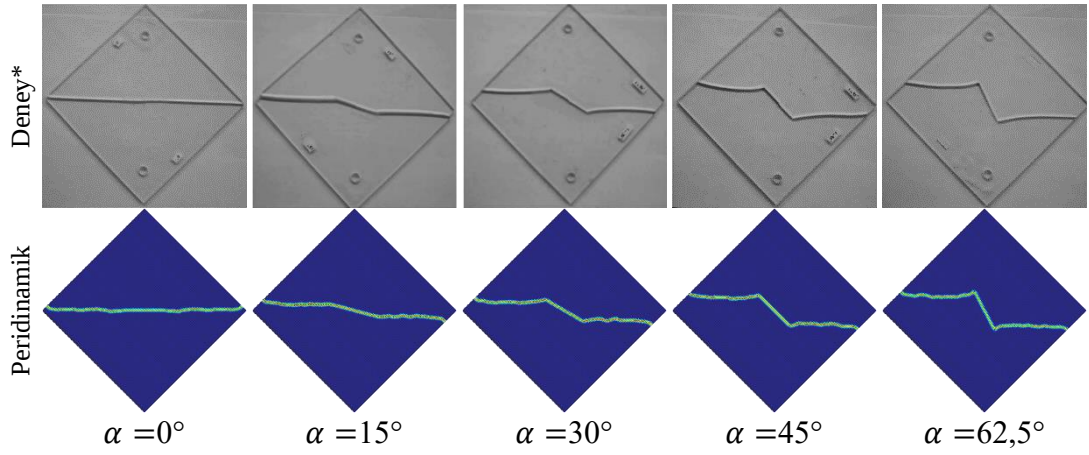
Tablo 4.1.'de sunulan mekanik özelliklere sahip gevrek bir polimer olan akrilik (PMMA) malzemeden 5 mm kalınlığında 20 adet numune ile kırılma testleri gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan numunenin boyutları: $2w = 150\text{mm}$, $2a = 45\text{mm}$ ve $t = 5\text{mm}$ 'dir. Belirlenen α açıları, mod I için 0° , mod II için $62,5^\circ$, iki modun birlikte olduğu durumlar için ise 15° , 30° ve 45° 'dir. Yükleme 1mm/dk 'lık bir hızla gerçekleştirilmiştir. Bütün numunelerde kırılma çatlak uçlarından başlayarak gevrek kırılmaya uygun olarak ani ve lineer olmayan şekilde gerçekleşmiştir. Şekil 4.2.'de deney düzeneği ve kırılma formu görülebilir. Şekil 4.3.'te görüldüğü üzere bütün α çatlak açısı durumları için deney ve Peridinamik Teorisi ile elde edilen çatlak ilerleme formları birbirleriyle örtüşmektedir.

Tablo 4.1. Akrilik (PMMA) malzeme mekanik özellikleri (Ayatollahi and Aliha, 2009)

Yoğunluk (ρ)	Elastisite Modülü (E)	Poisson Oranı (ν)	Kırılma Enerjisi (G_c)
1200 [kg/m^3]	2940 [MPa]	0,38	602 [J/m^2]



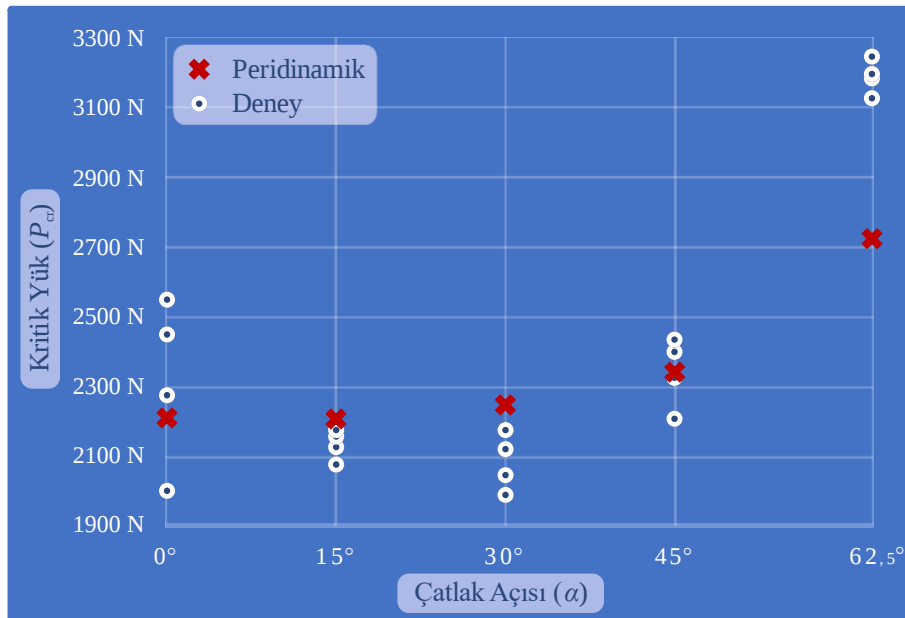
Şekil 4.2. Deney düzeneği ve akrilik malzemenin kırılma formu (Ayatollahi and Aliha, 2009)



*(Ayatollahi and Aliha, 2009)

Şekil 4.3. Deney (Ayatollahi and Aliha, 2009) ve Peridinamik Teorisi ile elde edilen çatlak formlarının kıyaslaması

Kritik yük (P_{cr}) değerleri açısından değerlendirildiğinde, Peridinamik analizinden elde edilen değerler ile deney değerlerinin ortalamaları arasında $62,5^\circ$ çatlak eğimi için %14 ile en fazla fark, 45° çatlak eğimi içinse %0,1 ile de en düşük fark elde edilmiştir. Diğer durumlarda ise bu fark oranının %3 ile %8 arasında değiştiği görülmektedir (Şekil 4.4.). Oluşan bu farkların sebebi numunelerde oluşturulan açılı çatlak uçlarının analizde modellendiği şekilde kusursuz/keskin olamayışına bağlanabilir.



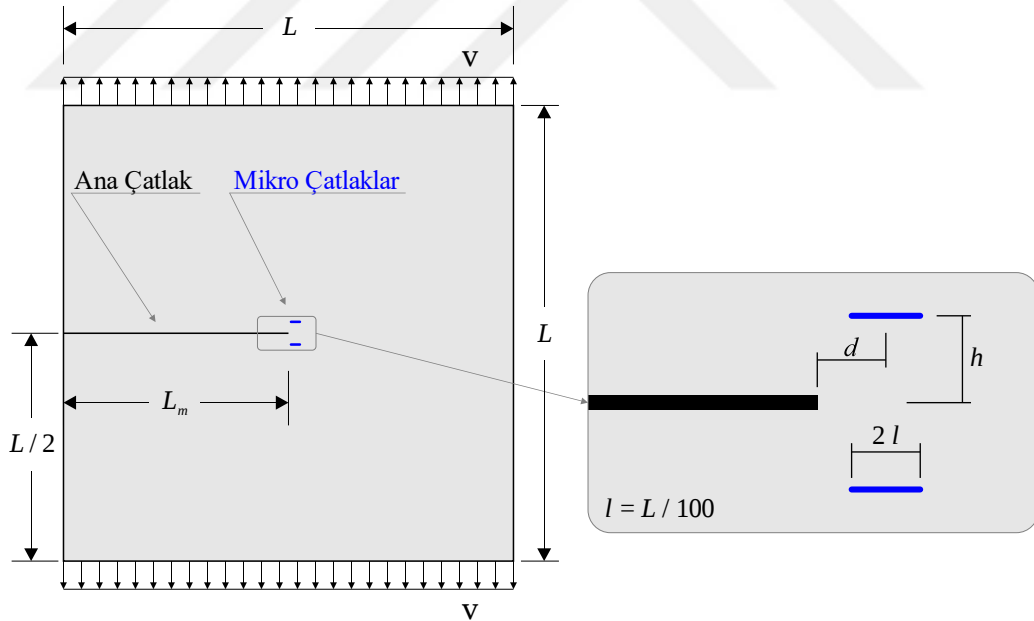
Şekil 4.4. Deney (Ayatollahi and Aliha, 2009) ve Peridinamik ile elde edilen Kritik Yük (P_{cr}) değerleri

Sonuç olarak, elde edilen bu verilere göre Peridinamik analiz sonuçları deneysel sonuçlarla kıyaslandığında genel anlamda başarılı bir performans ortaya koyduğu söylenebilir.

4.2. Vazic et al. (2017) Çalışması ile Doğrulama Analizleri

Doğrulamalar, Vazic et al. (2017) çalışmasında yer alan problemlerin yeniden çözümü ile sağlanmıştır. İzotropik malzemeler için 3. bölümde sunulan matematiksel modeli doğrulamak amacıyla çekme etkisindeki kare plakta paralel çatlakların etkileşimleri Peridinamik modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

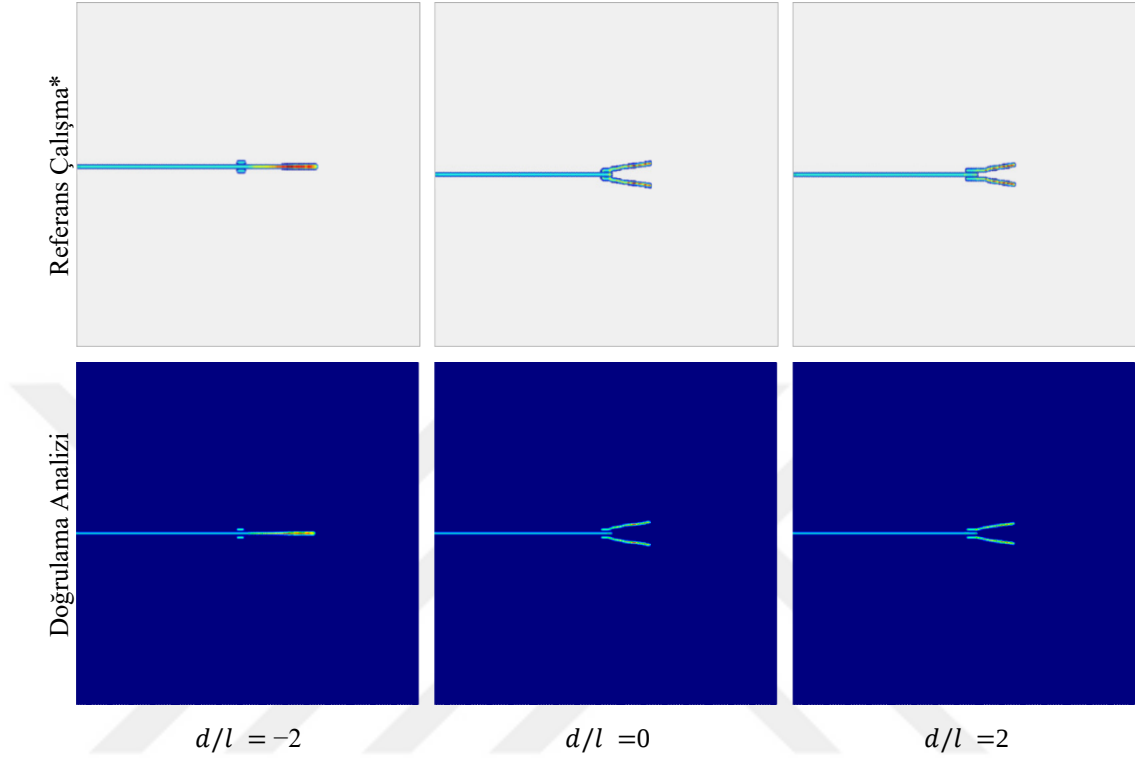
Şekil 4.5.'deki gibi bir başlangıç hasarına sahip $L \times L = 50\text{mm} \times 50\text{mm}$ boyutlarında kare Akrilik (PMMA) plak alt ve üst kenarlarında sabit $v = 5\text{m/s}$ hız ile çekme yükü etkisindedir. Başlangıç hasarı olarak tarif edilen çatlak boyu $L_m = 25\text{mm}$ 'dir ve malzeme özellikleri Tablo 4.1.'de yer almaktadır. Peridinamik model, ağ sıklık boyutu $\Delta x = 10^{-1}\text{mm}$ olan tek bir parçacık katmanını kullanarak oluşturulmuştur. Ufuk yarıçapı $\delta = 3,015 \cdot \Delta x$ olarak belirlenmiştir. Zaman adım aralığı değeri $\Delta t = 4 \cdot 10^{-8}\text{sn}$ ve kritik uzama oranı $s_0 = 0,0308$ 'dir.



Şekil 4.5. Doğrulama analizi problemine ait geometrik ve parametrik detaylar (Vazic et al., 2017)

Çözülen problemde mevcut çatlakın alt ve üstünde simetrik olarak yer alacak şekilde $2l$ boyunda iki çatlak eklenmiştir (Şekil 4.5.). Burada yer alan l boyu, plak kenar uzunluğuna bağlı olarak ifade edilerek $L/100$ mertebesinde dir. Mevcut çatlakla göre sonradan eklenen çatlakların yatay konumlamasını ifade eden d parametresi için

$-2l$, 0 , $2l$ olmak üzere üç farklı değer seçilmiştir. Çatlakların mevcut çatlığa göre düşey mesafeleri $h = 1,25 \cdot l$ olarak belirlenmiştir. Şekil 4.6.'da elde edilen sonuçlardan görüldüğü üzere, bu parametrelere bağlı olarak yapılan üç ayrı analizin sonucu, elde edilen çatlak ilerleme şekilleri ile örtüşmektedir.



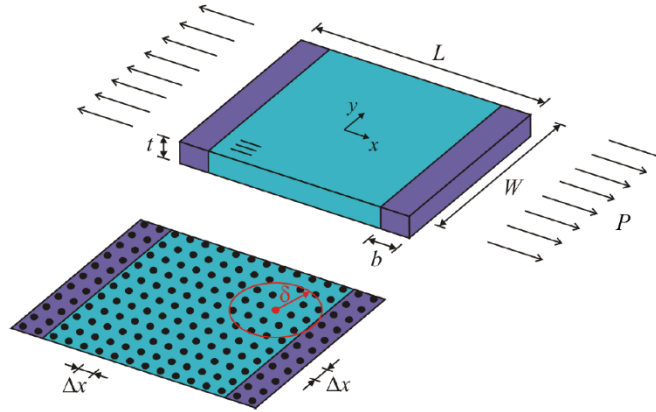
Şekil 4.6. $h = 1,25 \cdot l$ ve ilgili d/l değerleri için referans çalışma* (Vazic et al., 2017) ve doğrulama analizine ait çatlak ilerleme hasar (φ) sonuçları (1000. zaman adımı)

4.3. Oterkus and Madenci (2012) Çalışması ile Doğrulama Analizleri

Doğrulamalar, Oterkus and Madenci (2012) çalışmasında yer alan problemlerin yeniden çözümü ile sağlanmıştır. Kompozit malzemeler için 3. bölümde sunulan matematiksel modeli doğrulamak amacıyla çatlaksız ve çatlaklı kompozit tabakaların çekme analizleri kompozit Peridinamik modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

İlk olarak çatlaksız kompozit tabaka çekme analizi için Şekil 4.7.'de gösterildiği gibi, tek doğrultuda çekme etkisinde olan x doğrultusu ile $\theta = 0^\circ$ fiber açılı bir kompozit tabaka kullanılmıştır. Plâğın uzunluğu ve genişliği sırasıyla $L = 152,4\text{mm}$ ve $W = 76,2\text{mm}$ olarak belirtilmiştir. Kalınlığı $t = 0,1651\text{mm}$ 'dir. Fiber ve fibere dik doğrultudaki elastisite modülleri sırasıyla $E_1 = 159,96\text{GPa}$ ve $E_2 = 8,96\text{GPa}$ ve Poisson oranı da $\nu = 1/3$ 'tür. Peridinamik model, ağ sıklık boyutu $\Delta x = 0,635\text{mm}$ olan tek bir parçacık katmanı kullanılarak oluşturulmuştur. Ufuk yarıçapı $\delta = 3,015 \cdot \Delta x$

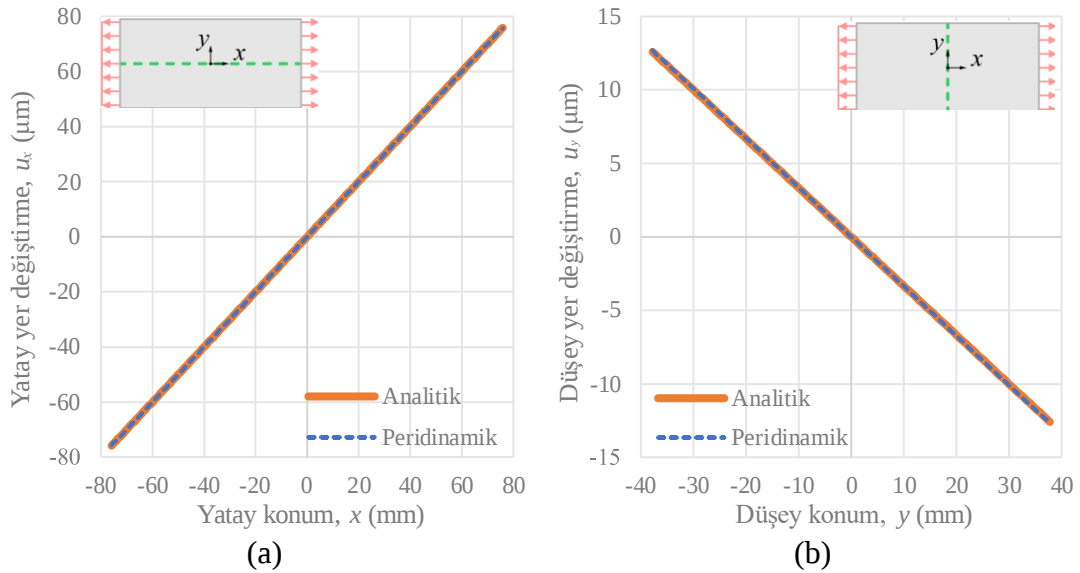
olarak belirlenmiştir. Klasik sürekli ortam mekaniğine dayanan analitik çözümlerle kıyaslayabilmek için analizde çatlak oluşumu engellenmiştir.



Şekil 4.7. Kompozit tabakanın geometrik özellikleri ve yükleme koşulları (Oterkus and Madenci, 2012)

Plağın kenarlarından çekme yükü olarak $P = 159,96\text{MPa}$ uygulanmaktadır. Yatay ve düşey yer değiştirme bileşenlerinin sırasıyla eksenler boyunca, x ve y eksenleri doğrultularındaki değişimi, Şekil 4.8.'de gösterildiği gibi analitik sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Klasik sürekli ortam mekaniğine dayanan analitik sonuçlar, aşağıdaki bağıntılar kullanılarak hesaplanmıştır. Her iki yer değiştirme bileşeni için de analitik ve Peridinamik Teorisi sonuçları arasında yeterli bir uyum mevcuttur.

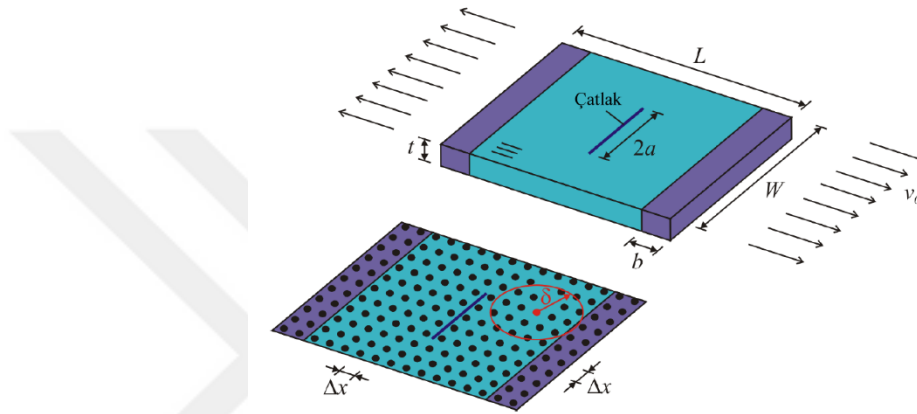
$$u_x = \frac{P}{E_1} x \quad , \quad u_y = -v_{12} \frac{P}{E_1} y$$



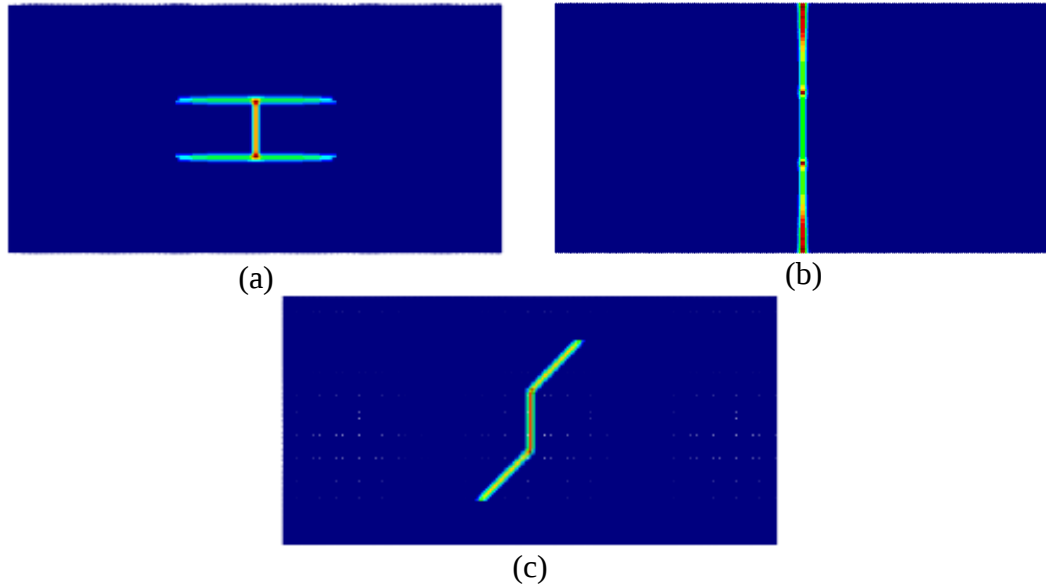
Şekil 4.8. x ve y eksenleri boyunca yatay (a) ve düşey (b) yer değiştirmeler

İkinci olarak çatlaklı kompozit tabaka çekme analizi için önceki problemde yer alan kompozit tabakaya merkezi bir çatlak eklenerek üç farklı fiber yönelimi

($\theta=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$) için analizler gerçekleştirilmiştir. Çatlak, Şekil 4.9.'da gösterildiği gibi y eksenine doğrultusundadır ve $2a = 17,78\text{mm}$ uzunluğundadır. Plâğin y eksenine paralel kenarlarından $4\cdot\Delta x$ derinlikli hacimsel bölge boyunca $v_0 = 2,02 \times 10^{-7}\text{m/s}$ 'lik bir hızla çekme etkisi uygulanmaktadır. Kompozit malzemelerde fiber ve matris bağları için kritik uzama oranı değerleri, Oterkus et al. (2012) çalışmasında açıklandığı gibi çeşitli deneyler yapılarak elde edilmektedir. Dolayısıyla burada kullanılan matris ve fiber bağlarının kritik uzama oranları, Oterkus and Madenci (2012) çalışmasından sırasıyla $s_m = 0,0135$ ve $s_f = 0,027$ olarak alınmıştır.



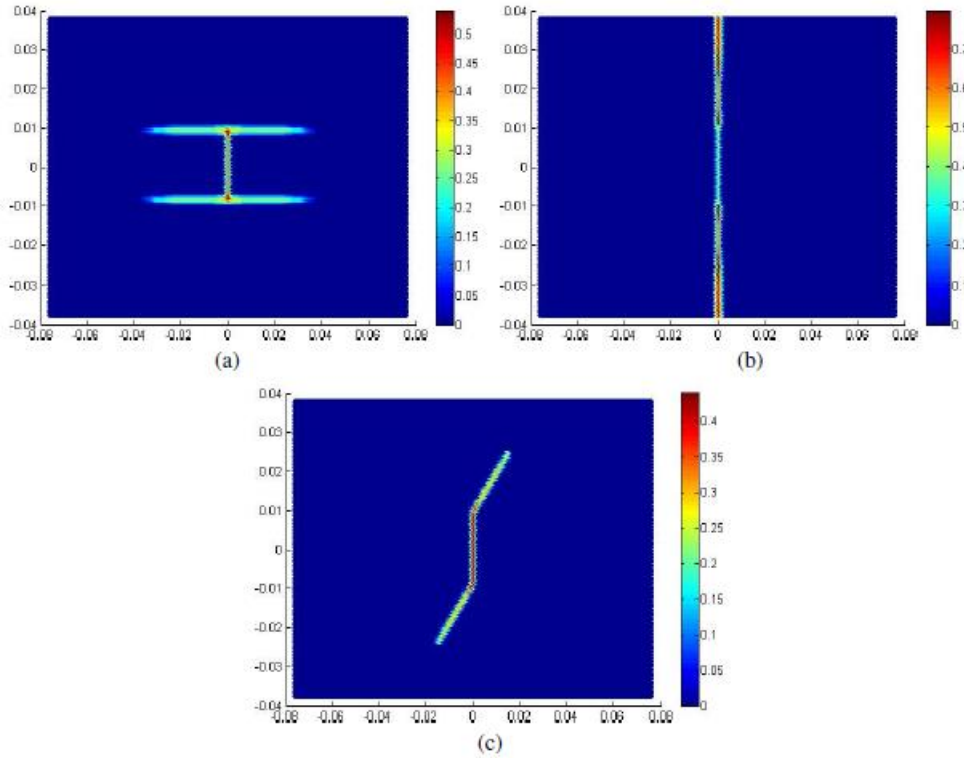
Şekil 4.9. Merkezi çatlığa sahip kompozit tabakanın geometrik özellikleri ve yükleme koşulları (Oterkus and Madenci, 2012)



Şekil 4.10. Merkezi çatlığa sahip kompozit tabakanın (a) $\theta=0^\circ$, (b) $\theta=90^\circ$ ve (c) $\theta=45^\circ$ fiber açıları için hasar tahmin görselleri

Şekil 4.10.'da gösterildiği gibi, bütün durumlar için çatlak ilerleme sonuçları ilgili fiber doğrultuları ile paralel ve Oterkus and Madenci (2012) çalışmasındaki

sonuçlar (Şekil 4.11.) ile örtüşür vaziyettedir. Benzer deneysel gözlemler, mevcut Peridinamik modelin hasar durumlarını doğru şekilde tahmin ettiğini göstermektedir.

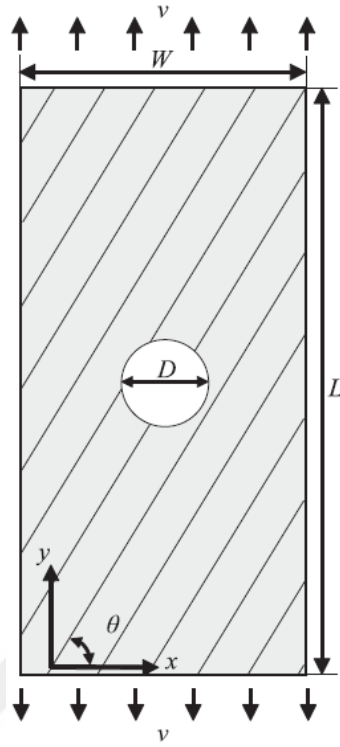


Şekil 4.11. Oterkus and Madenci (2012) çalışmasındaki merkezi çatlığa sahip kompozit tabakanın (a) $\theta = 0^\circ$, (b) $\theta = 90^\circ$ ve (c) $\theta = 45^\circ$ fiber açıları için hasar tahmin görselleri

4.4. Shang et al. (2019) Çalışması ile Doğrulama Analizleri

Doğrulamalar, Shang et al. (2019) çalışmasında yer alan deneylerin modellenmesi ile sağlanmıştır. Kompozit malzemeler için 3. bölümde sunulan matematiksel modeli doğrulamak amacıyla ortasında dairesel boşluğu sahip kompozit laminanın çeşitli fiber doğrultuları için kırılma deneyleri kompozit Peridinamik ile modellenerek analizleri gerçekleştirilmiştir.

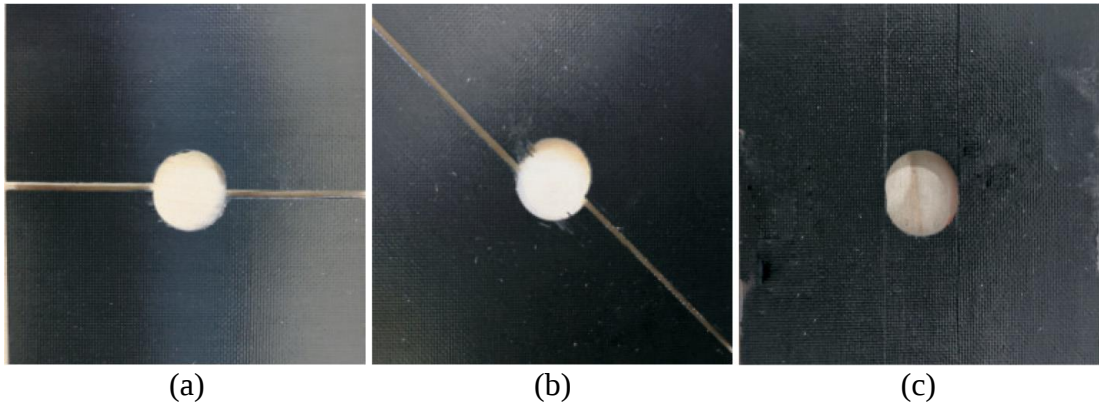
Deneylerde boyu $L = 100\text{mm}$, genişliği $W = 50\text{mm}$, kalınlığı $t = 1\text{mm}$ olan ve merkezinde $D = 10\text{mm}$ çaplı dairesel boşluğu bulunan tek doğrultulu T300 karbon fiber/epoksi kompozit numuneler üç farklı fiber açısı ($\theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$) için $v = 1\text{mm/dk}$ hız ile çekme testine tabi tutulmuş (Şekil 4.12.) ve kırılma modları gözlemlenmiştir.



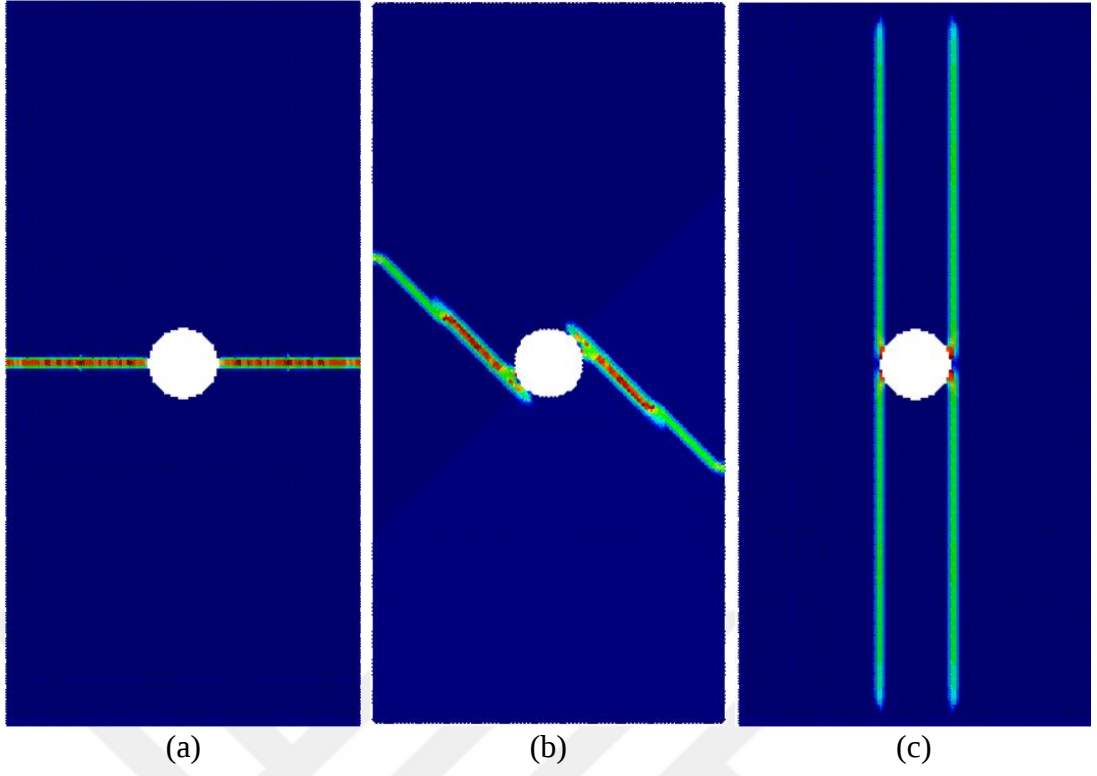
Şekil 4.12. Deney düzeneğinin şematik gösterimi (Shang et al., 2019)

Deney düzeneğinin Peridinamik modeli ağ sıklık boyutu $\Delta x = 0,403\text{mm}$ olan tek parçacık katmanı kullanılarak oluşturulmuştur. Ufuk yarıçapı $\delta = 3,015 \cdot \Delta x$ olarak belirlenmiştir. Plağa alt ve üst kenarlarından sabit hız ile çekme yükü uygulanmıştır.

Şekil 4.14.'te görüldüğü gibi bütün durumlar için çatlak ilerleme analizi sonuçları, ilgili fiber doğrultuları ile paralel ve Shang et al. (2019) çalışmasındaki deneysel sonuçlar (Şekil 4.13.) ile örtüşür vaziyettedir. Elde edilen sonuçlar mevcut Peridinamik modelin hasar durumlarını doğru şekilde tahmin ettiğini göstermektedir.



Şekil 4.13. (a) $\theta=0^\circ$, (b) $\theta=45^\circ$ ve (c) $\theta=90^\circ$ fiber açılı durumlar için Shang et al. (2019) çalışmasındaki deneysel çatlak ilerleme sonuçları

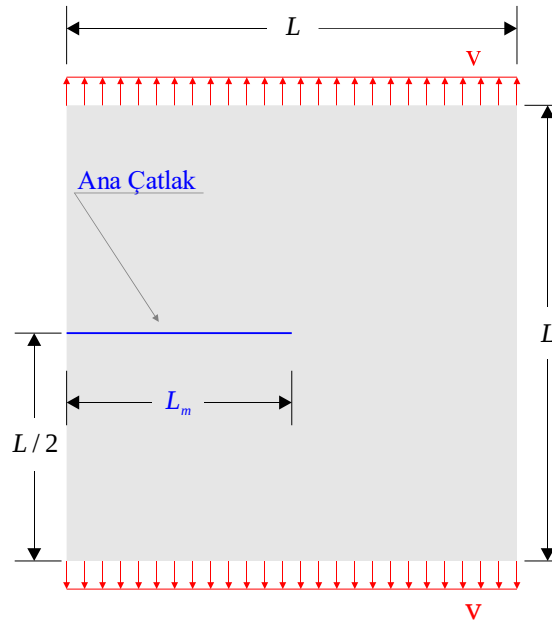


Şekil 4.14. (a) $\theta=0^\circ$, (b) $\theta=45^\circ$ ve (c) $\theta=90^\circ$ fiber açılı durumlar için çatlak ilerleme analizi sonuçları

5. İZOTROPİK PLAKLARDA MİKRO ÇATLAK ETKİSİ

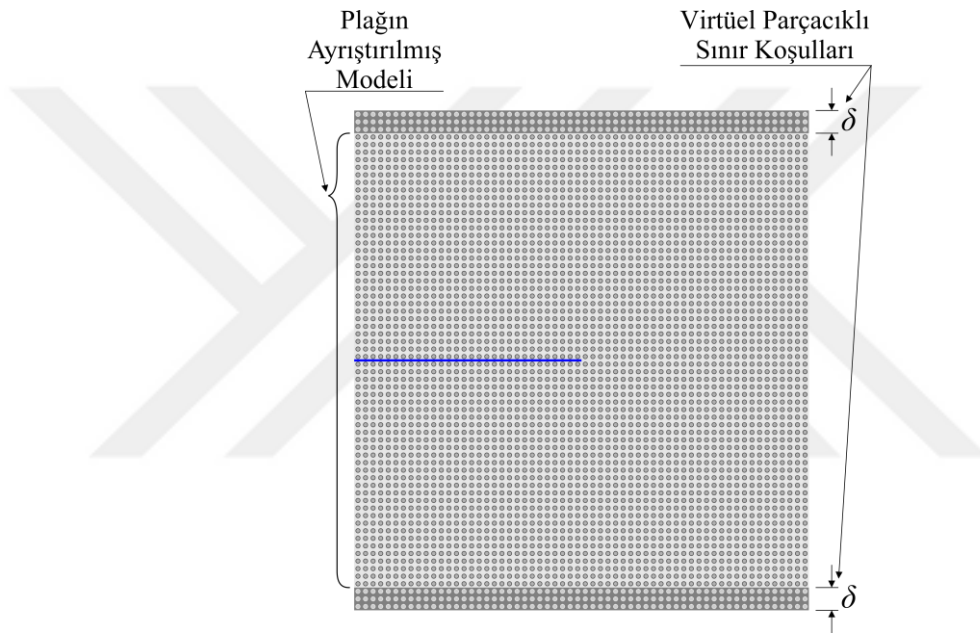
Bu bölümde, izotropik gevrek bir malzemede ana çatlak ve mikro çatlaklar arasındaki etkileşim Bağ Tabanlı Peridinamik Teorisi ile modellenmiştir. Analizler için altı farklı durum, çeşitli yönelim açıları ve konumlandırmalara sahip mikro çatlaklar kullanılarak tasarlanmıştır. Oluşturulan bu durumlardaki temel amaç, eğimli ve/veya eğrisel formlara sahip mikro çatlakların kullanılması ile ana çatlağı güzergahından dallandırarak saptırmak ve böylece ana çatlak ilerleme potansiyelini azaltarak plağın tam kopmasını geciktirmektir.

Şekil 5.1.'de görüldüğü gibi, $L \times L = 50\text{mm} \times 50\text{mm}$ ebatlarında kare formunda bir akrilik (PMMA) plak alt ve üst kenarlarından $v = 5\text{m/s}$ hızında çekme yükü etkisindedir. Bu etki analiz boyunca etkiyen sabit hızlı yer değiştirme yüküdür. Başlangıç kusuru olarak, yüklemeye dik doğrultuda ve $L_m = L/2$ boyunda bir ana çatlak plağın yatayda soluna, düşeyde ise ortasına denk gelecek şekilde konumlandırılmıştır. Akrilik (PMMA) malzemeye ait özellikler doğrulama analizleri bölümünde Tablo 4.1.'de verilmiştir. Malzemenin 0,38 olan Poisson oranı değeri, Bağ Tabanlı Peridinamiğin kabulü olan sabit 0,33 Poisson oranı değerinden bir miktar yüksek olduğu görülmektedir. Fakat, bu küçük fark, dinamik kırılma problemlerinde çatlak hızı veya yayılması üzerinde ihmal edilebilir bir etkiye sahip olduğundan (Ha and Bobaru, 2010), 0,33 değeri mevcut Peridinamik analizinde güvenle kullanılabilir.



Şekil 5.1. Problemin geometrik özellikleri ve yükleme sınır koşulları

Analiz için sistemin ayrıştırma işlemi $500 \times 500 \times 1$ adet materyal parçacığı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.2.). Bu ayrıştırma ile materyal parçacıkların dizilim aralığı $\Delta x = 10^{-1} \text{ mm}$ olarak hesaplanmıştır ve bu aralık değeri üzerinden ufuk yarıçapı değerimiz $\delta = 3,015 \cdot \Delta x$ olarak tayin edilmiştir. Bununla birlikte zaman adım aralığı, kritik zaman adım aralığı değerinden küçük olacak şekilde $\Delta t = 4 \cdot 10^{-8} \text{ sn}$ olarak belirlenmiştir (Silling and Askari, 2005). Kritik bağ uzama oranı (3.15) ifadesinden yararlanarak $s_0 = 0,0308$ olarak hesaplanmıştır. Şekil 5.2.'de de görüleceği üzere teörinin lokal olmayan yapısından ötürü sistemin yükleme sınır koşullarında δ kadar virtüel materyal parçacık katmanları eklenmektedir.



Şekil 5.2. Ayrıştırılmış model ve virtüel sınır koşulları

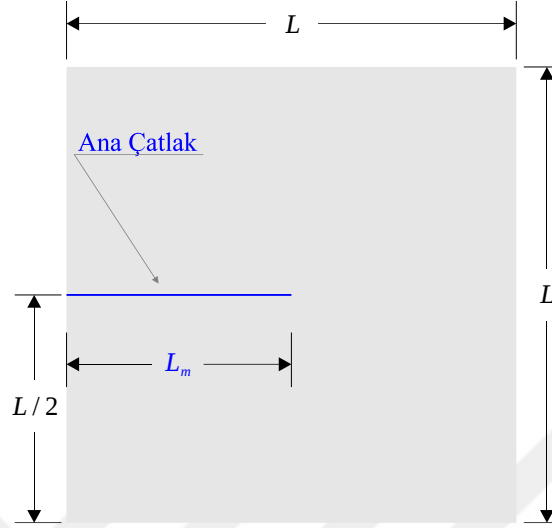
5.1. Analizler

5.1.1. Mikro Çatlaksız Referans Durum

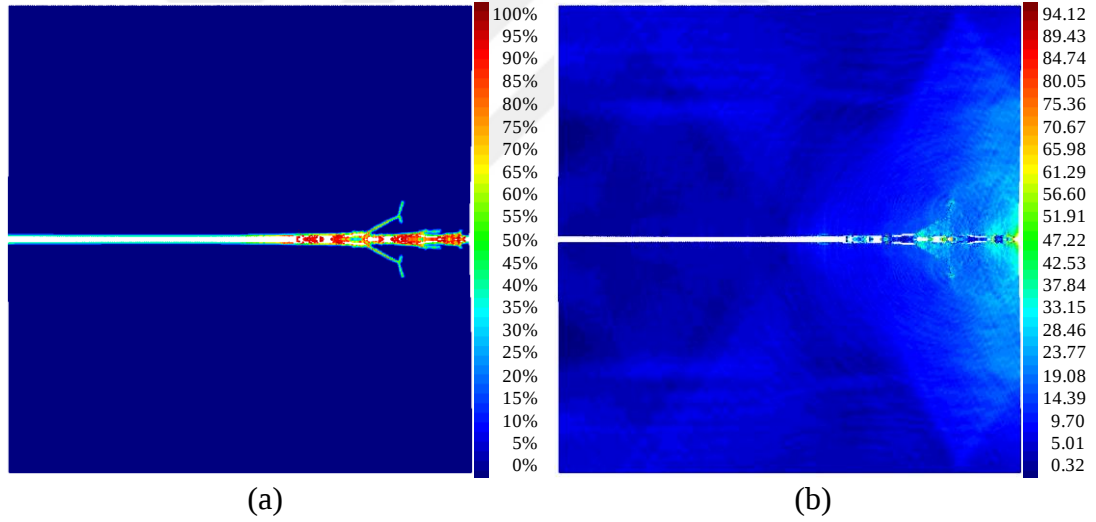
İlk olarak, ana çatlak ilerleme şeklinin ve plağın tamamen koptuğu zaman adımının tespiti için mikro çatlakların dahil edilmediği, sadece ana çatlakın bulunduğu durumun analizleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.3.). Bu tespit edilen zaman adımı mikro çatlakların dahil edildiği durumlarda toklaşma etkisini kıyaslamak için referans olarak kullanılacaktır.

Şekil 5.4.a'da görüldüğü gibi ana çatlak ilerleyişinde kısmen dallanmalar meydana gelse de ana çatlak doğrultusunda ilerleyerek plağın sağ kenarına ulaşmaktadır. Dallanan yan çatlak uçlarındaki hız potansiyelleri yeterli büyüklükte

olmadığı için kısa süre sonra ilerlemeleri durmuştur (Şekil 5.4.b). Bununla birlikte ana çatlak ucu stabilitesi 500. zaman adımı civarında bozularak ilerleme başlamakta ve yaklaşık 1700. zaman adımı civarında da tam kopma meydana gelmektedir.



Şekil 5.3. Referans durumun geometrik özellikleri

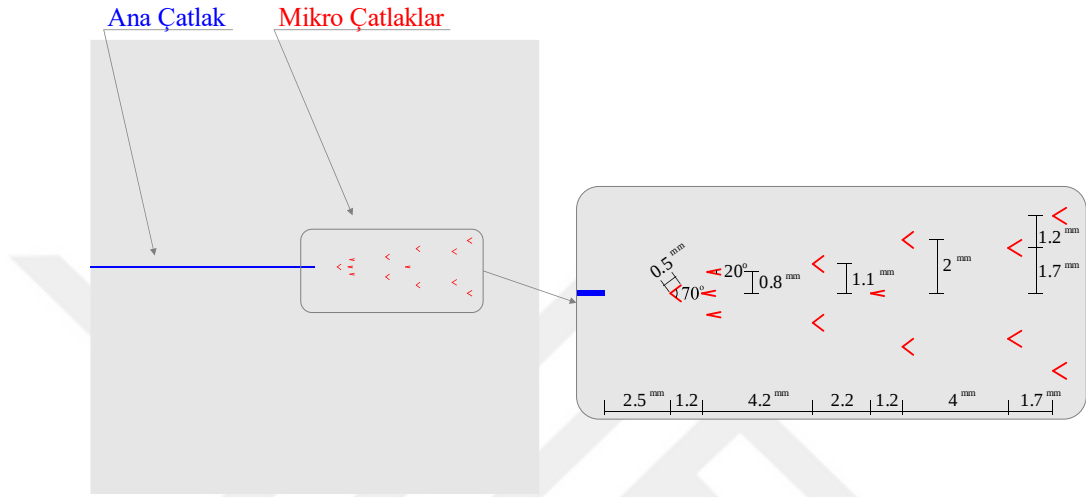


Şekil 5.4. Referans durumun 1700. zaman adımındaki (a) çatlak ilerleme hasar (ϕ) sonuçları; (b) hız alan değerleri (m/s)

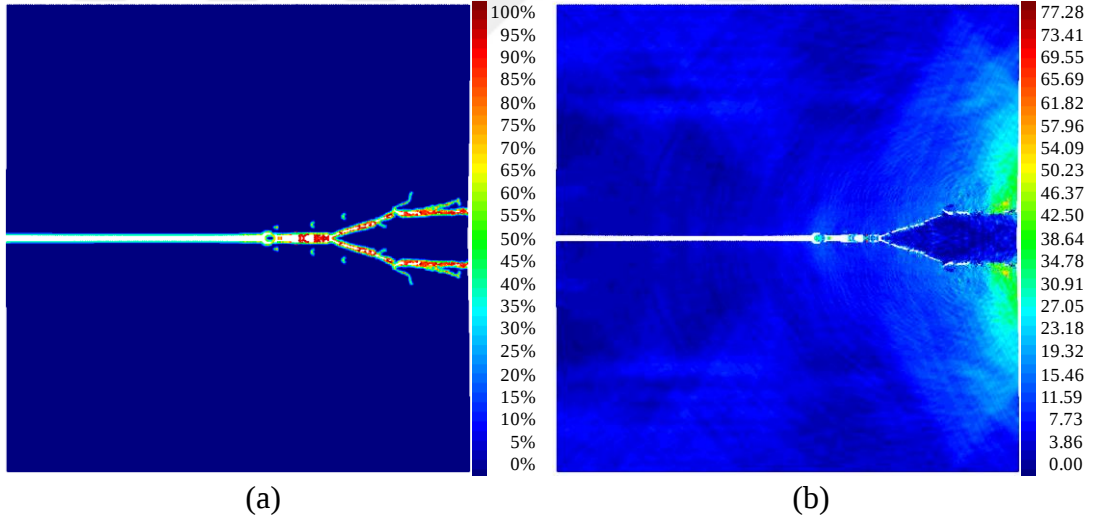
5.1.2. Çatal Mikro Çatlaklı Durum

Bu durumda daha hızlı enerji sönmülmesi elde etmek üzere çatal formundaki mikro çatlaklar ile ana çatlağı peş peşe dallandırarak saptırmak üzere mikro çatlak konumlandırmaları tasarlanmıştır (Şekil 5.5.). Elde edilen sonuçlarda, ana çatlak ucuna 2,5mm mesafedeki çatal mikro çatlaklar dallanmayı tetiklese de devamı gelmemiştir. Ama yaklaşık plak boyunun son çeyreğine yakın konumdaki mikro çatlak dallanmayı tetiklemeyi başarmıştır (Şekil 5.6.a). Bu dallanma noktası, referans

durumda oluşan yan dallanma bölgesinin hemen öncesinde yer almaktadır. Ayrıca, gerçekleşen dallanmanın ardından sonraki mikro çatlaklar sayesinde birkaç yan çatlak meydana gelmiştir. Bu yan çatlaklardan kenara yakın olanların uç hız potansiyelinin yüksek oluşu yayılma potansiyelinin de yüksek olduğunun göstergesidir (Şekil 5.6.b). Nihayetinde birçok dallanma meydana gelmesine rağmen, plağın tam kopma süresinde referans duruma göre herhangi bir gecikme meydana gelmemiştir.



Şekil 5.5. Çatal mikro çatlaklı durumun genel görünüşü ve mikro çatlak detay görüntüsü

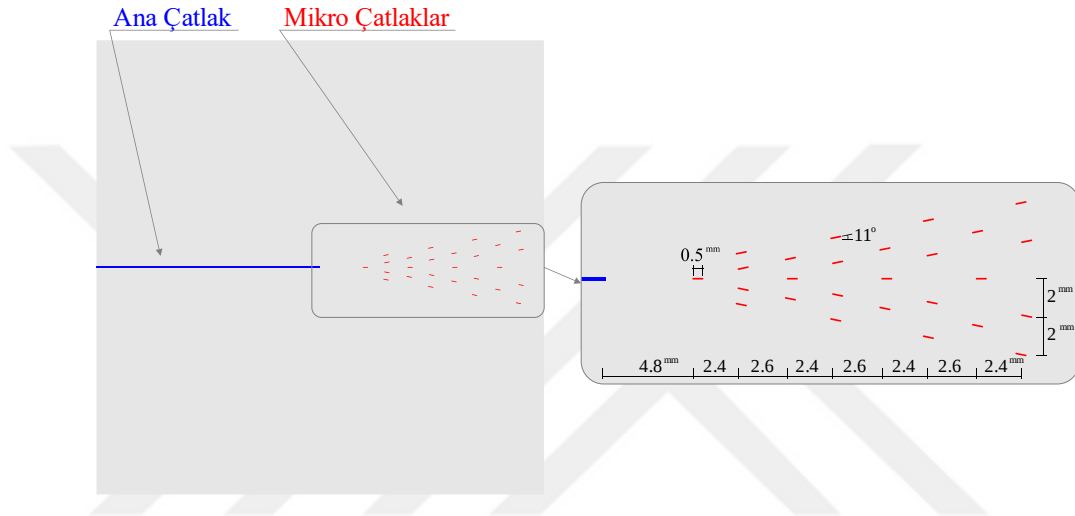


Şekil 5.6. Çatal mikro çatlaklı durumun 1700. zaman adımındaki (a) çatlak ilerleme hasar (ϕ) sonuçları; (b) hız alan değerleri (m/s)

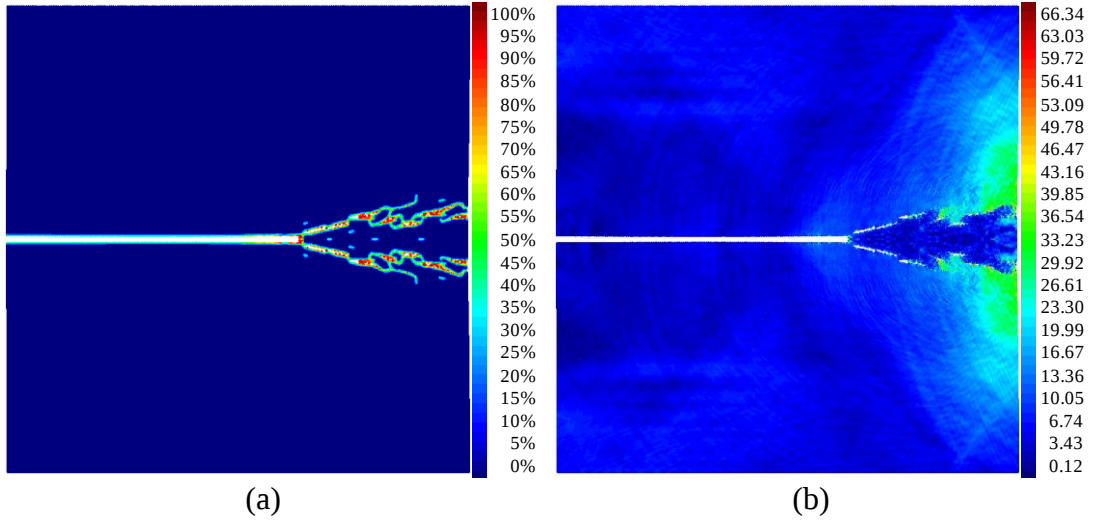
5.1.3. Lineer Eğimli Mikro Çatlaklı Durum

Bu durumda mikro çatlaklar, tek parçalı lineer eğimli bir formdadır. Bir önceki çatal mikro çatlaklı duruma göre bu durumda dallanmayı artırmaya yönelik kullanılan mikro çatlak sayısı artırılmış ve mikro çatlak kümesi hafifçe sağa kaydırılmıştır (Şekil 5.7.). Beklendiği gibi ana çatlak dallanması mikro çatlak kümesi ile karşılaşınca

başlamış ve sonrasında diğer mikro çatlakların yönlendirmesine uygun dallanmaya devam etmiştir (Şekil 5.8.a). Bununla birlikte, ana çatlak yayılması birçok mikro çatlağın dahil olduğu yoğun bir etkileşim ile gerçekleşmiştir. Bu etkileşimlerin sağladığı enerji sönümlemesi, Şekil 5.8.b görülen maksimum hız değerinin diğer durumlara göre belirgin şekilde daha düşük oluşundan anlaşılmaktadır. Bu yoğun etkileşimin doğal sonucu olarak da çok parçalı bir kırılma meydana gelmektedir. Mevcut tasarımla, etkileşim ve çatlak yüzey artışı diğer durumlara göre oldukça fazla olmasına rağmen, yine de plağın tam kırılma zamanını ötelemede yetersiz kalmıştır.



Şekil 5.7. Lineer eğimli mikro çatlaklı durumun genel görünüşü ve mikro çatlak detay görüntüsü

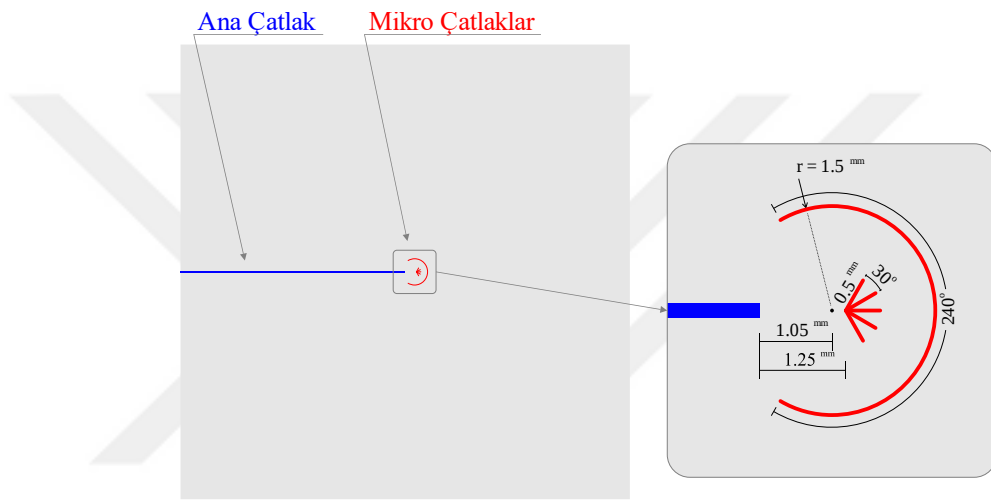


Şekil 5.8. Lineer eğimli mikro çatlaklı durumun 1700. zaman adımındaki (a) çatlak ilerleme hasarı (ϕ) sonuçları; (b) hız alan değerleri (m/s)

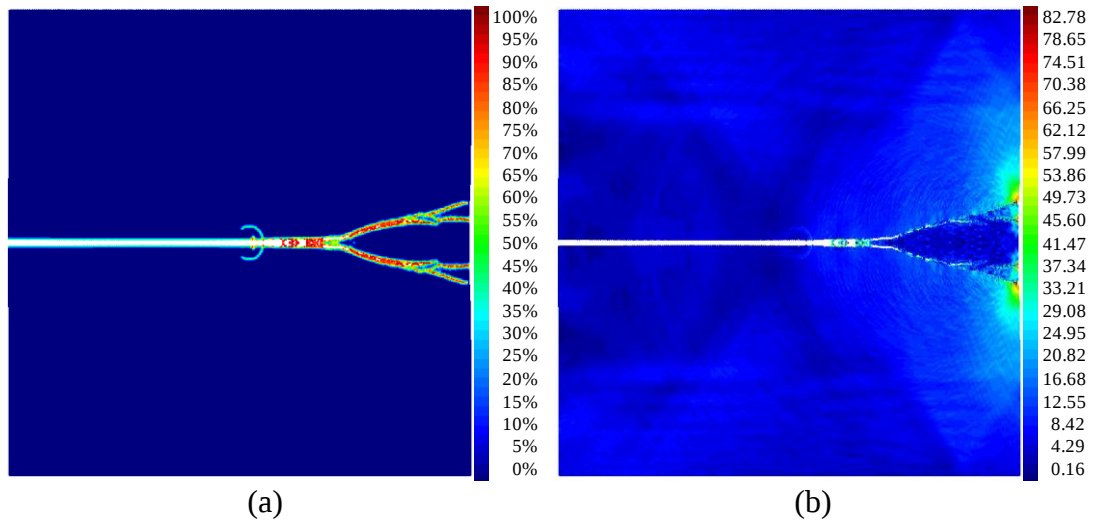
5.1.4. Eğrisel ve Çatal Mikro Çatlaklı Durum

Bu durumda, çok sayıda mikro çatlağın kullanıldığı önceki durumların aksine, ana çatlak ucu yakınında sadece beş kollu çatal mikro çatlak ve bunu çevreleyen

eğrisel bir çatlak kullanılmıştır (Şekil 5.9.). Bu konumlandırmadaki temel amaç, ana çatlak ucuna olabildiğince yakın bir noktada iki veya daha fazla dallanmanın başlamasını sağlamaya çalışmaktır. İstenen dallanma, beş kollu çatal mikro çatlak tarafından başlatılamasa da bir önceki çatal mikro çatlaklı durumundaki (5.1.2 başlığındaki) ile hemen hemen aynı noktada dallanma başlamakta ve ardından iki yan çatlak dalı daha ortaya çıkmaktadır (Şekil 5.10.a). Ayrıca, bu yan çatlak uçlarındaki yoğun hız potansiyeli, ilerlemenin devam ettiğinin göstergesidir (Şekil 5.10.b). Sonuç olarak diğer ana dalların sağ kenara ulaşması ile tam kopma gerçekleşmiş ve bu süreçte yine herhangi bir gecikme elde edilememiştir.



Şekil 5.9. Eğrisel ve çatal mikro çatlaklı durumun genel görünüşü ve mikro çatlak detay görüntüsü

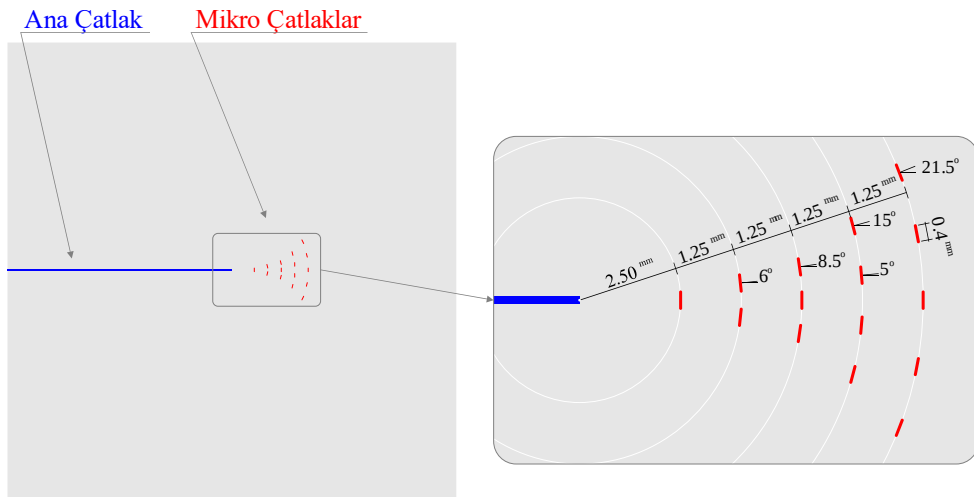


Şekil 5.10. Eğrisel ve çatal mikro çatlaklı durumun 1700. zaman adımındaki (a) çatlak ilerleme hasar (ϕ) sonuçları; (b) hız alan değerleri (m/s)

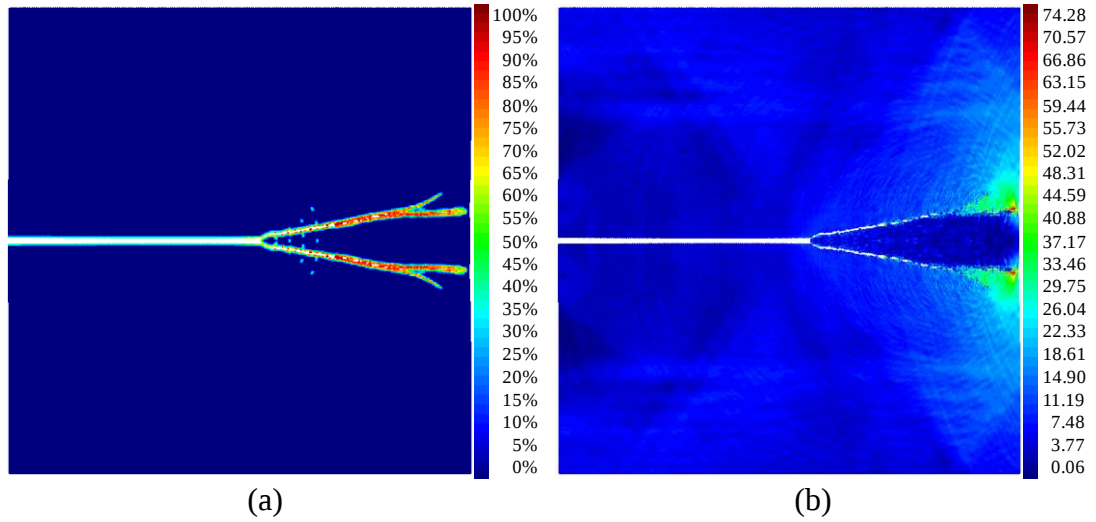
5.1.5.45°'lik Yörünge Diziliimli Mikro Çatlak Durumu

Bu durumda mikro çatlaklar, 45°'lik bir daire dilimi şeklinde ana çatlak ucuna odaklı yörüngeler üzerine konumlandırılmıştır (Şekil 5.11.). Önceki durumlar ile arasındaki en önemli fark, mikro çatlakların Şekil 5.11.'de görüldüğü gibi ana çatlak ilerleme doğrultusuna dik olarak yönlendirilmesidir. 5.1.3 başlığındaki eğimli mikro çatlaklı durumda gözlemlendiği gibi sağ kenara yakın konumlanmış mikro çatlakların sonlara doğru yapıdaki gerilmenin daha da artması ile ana çatlak ilerleyişini ve tam kopma sürecini daha da hızlandırmaktadır. Bu tespite dayanarak mevcut durumda mikro çatlak konumlandırma formu ana çatlak ucuna odaklı olarak düzenlenmiştir.

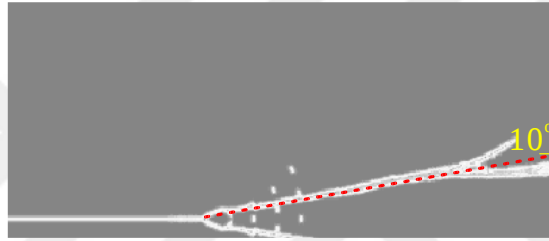
Şekil 5.12.a'da görüldüğü gibi ana çatlak dallanması mikro çatlak kümesine ulaşması ile başlamış ve üçüncü yörüngeye kadar mikro çatlak kümesinin yönlendirmesine uygun ilerleme devam etmiştir. Böylece ortalama 10°'lik bir açı ile ilerleme gerçekleşmiştir (Şekil 5.13.). Ayrıca yan çatlak dallarındaki yüksek hız potansiyeli ilerlemenin buralarda da devam ettiğini göstermektedir (Şekil 5.12.b). Sonuç itibarıyla, 1700. referans zaman adımıyla toplam çatlak boyunda %0,9'luk bir azalma ortaya çıkmaktadır. Elde edilen bu sonuç, mikro çatlak kümelerini ana çatlak ucuna odaklı yörüngeler üzerine konumlandırılmasının ana çatlak yavaşlatarak tokluk artışının elde edilmesini sağlamaktadır.



Şekil 5.11. 45°'lik yörünge diziliimli mikro çatlak durumunun genel görünüşü ve mikro çatlak detay görüntüsü



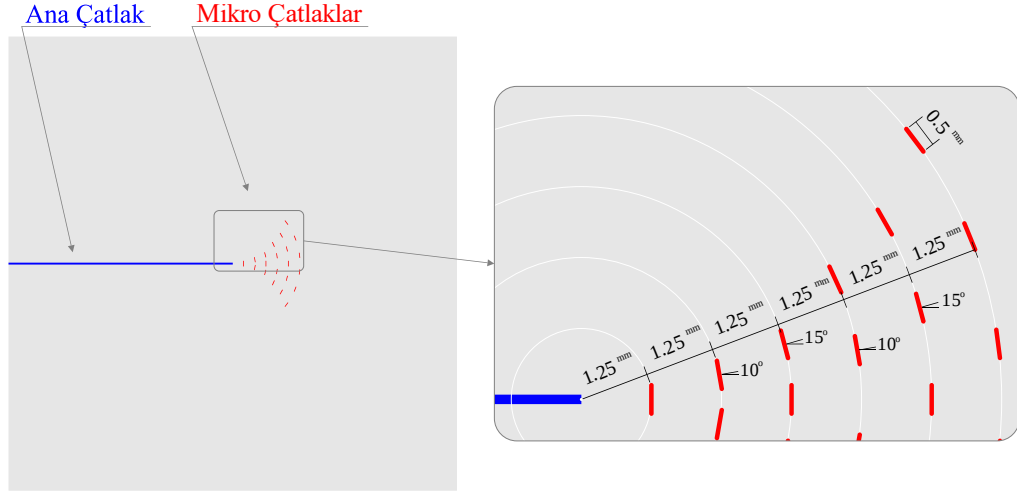
Şekil 5.12. 45°'lik yörünge dizilimli mikro çatlak durumunun 1700. zaman adımındaki (a) çatlak ilerleme hasar (φ) sonuçları; (b) hız alan değerleri (m/s)



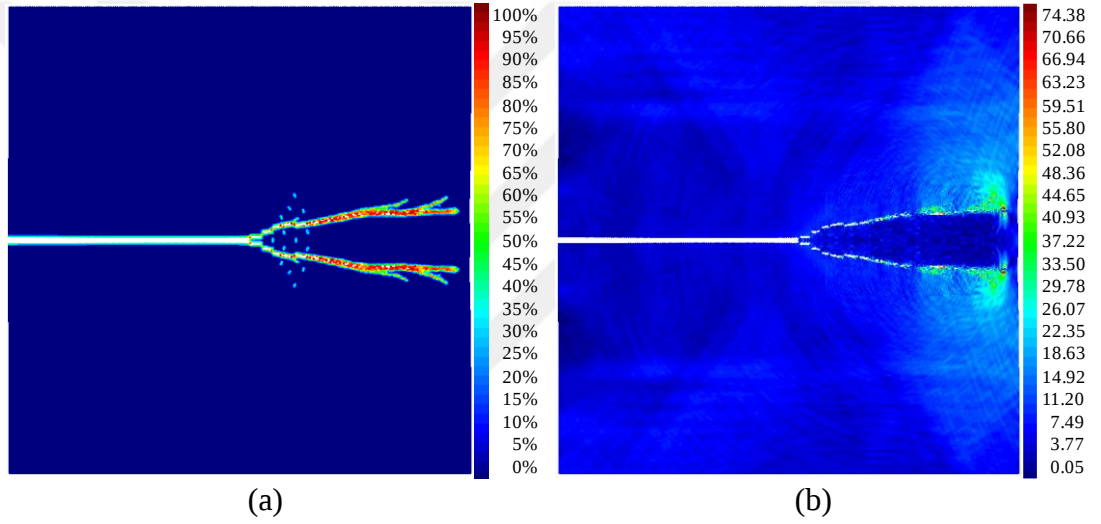
Şekil 5.13. 45°'lik yörünge dizilimli mikro çatlak durumunun 1700. zaman adımı ana çatlak dalının ortalama ilerleme eğimi

5.1.6. 80°'lik Yörünge Dizilimli Mikro Çatlak Durumu

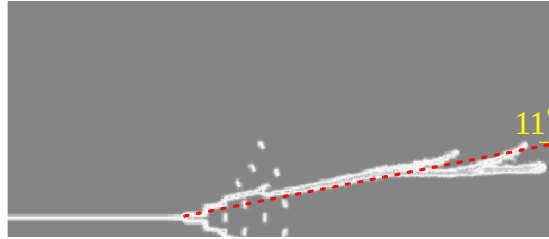
Elde edilen tokluk artışının daha derinlemesine incelemek için bir önceki durumdan farklı olarak daire dilim formundaki mikro çatlak diziliminin açısı 80°'ye çıkartılmış ve bir yörünge daha eklenmiştir (Şekil 5.14.). Ana çatlak, mikro çatlak kümesi ile karşılaşınca dallanma meydana gelmiştir ve beşinci yörüngeye kadar mikro çatlak kümesinin yönlendirmesine uygun ilerleme devam etmiştir (Şekil 5.15.a). Ortalama 11°'lik bir açı ile ilerleme gerçekleşmiştir (Şekil 5.16.). Ayrıca, plağın son çeyreğinde dört yan çatlak ortaya çıkmıştır ve bu yan çatlak dallarındaki hız potansiyelinin yüksek oluşu devam eden ilerlemeyi göstermektedir (Şekil 5.15.b). Sonuç olarak bu durumda tam kopma anı daha da ötelenmiş olup ana çatlak boyundaki kısalma %4,5 civarındadır. Bu değer bir önceki duruma göre 5 kat daha büyük bir sonuçtur. Bu formdaki mikro çatlak dizilimleri için ifade edilen daire dilimi formu açısının büyüklüğü ve yörünge sayısının fazlalığı malzemenin tokluğunu belirgin bir şekilde arttırmıştır.



Şekil 5.14. 80°'lik yörünge diziliimli mikro çatlak durumunun genel görünüşü ve mikro çatlak detay görüntüsü



Şekil 5.15. 80°'lik yörünge diziliimli mikro çatlak durumunun 1700. zaman adımındaki (a) çatlak ilerleme hasar (φ) sonuçları; (b) hız alan değerleri (m/s)



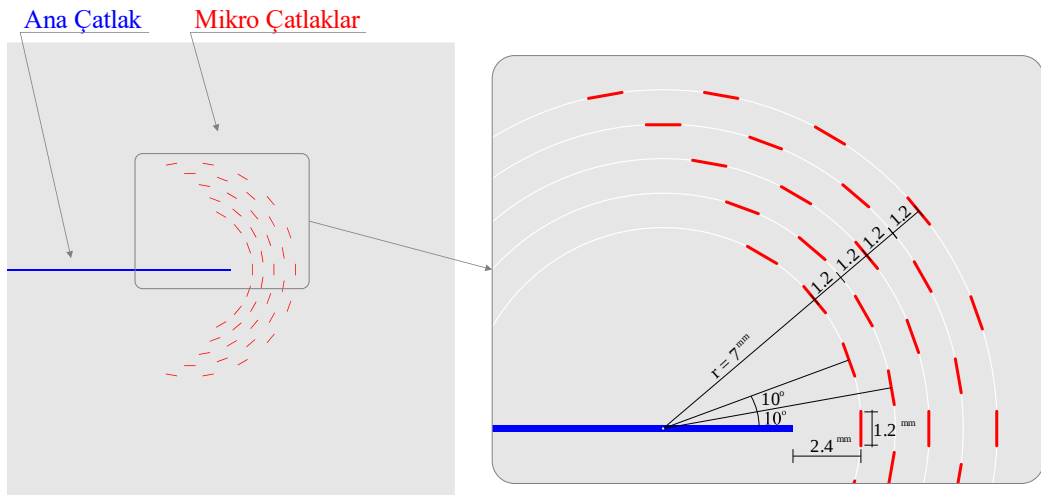
Şekil 5.16. 80°'lik yörünge diziliimli mikro çatlak durumunun 1700. zaman adımındaki ana çatlak dalının ortalama ilerleme eğimi

5.1.7. Hilal Diziliimli Mikro Çatlak Durumu

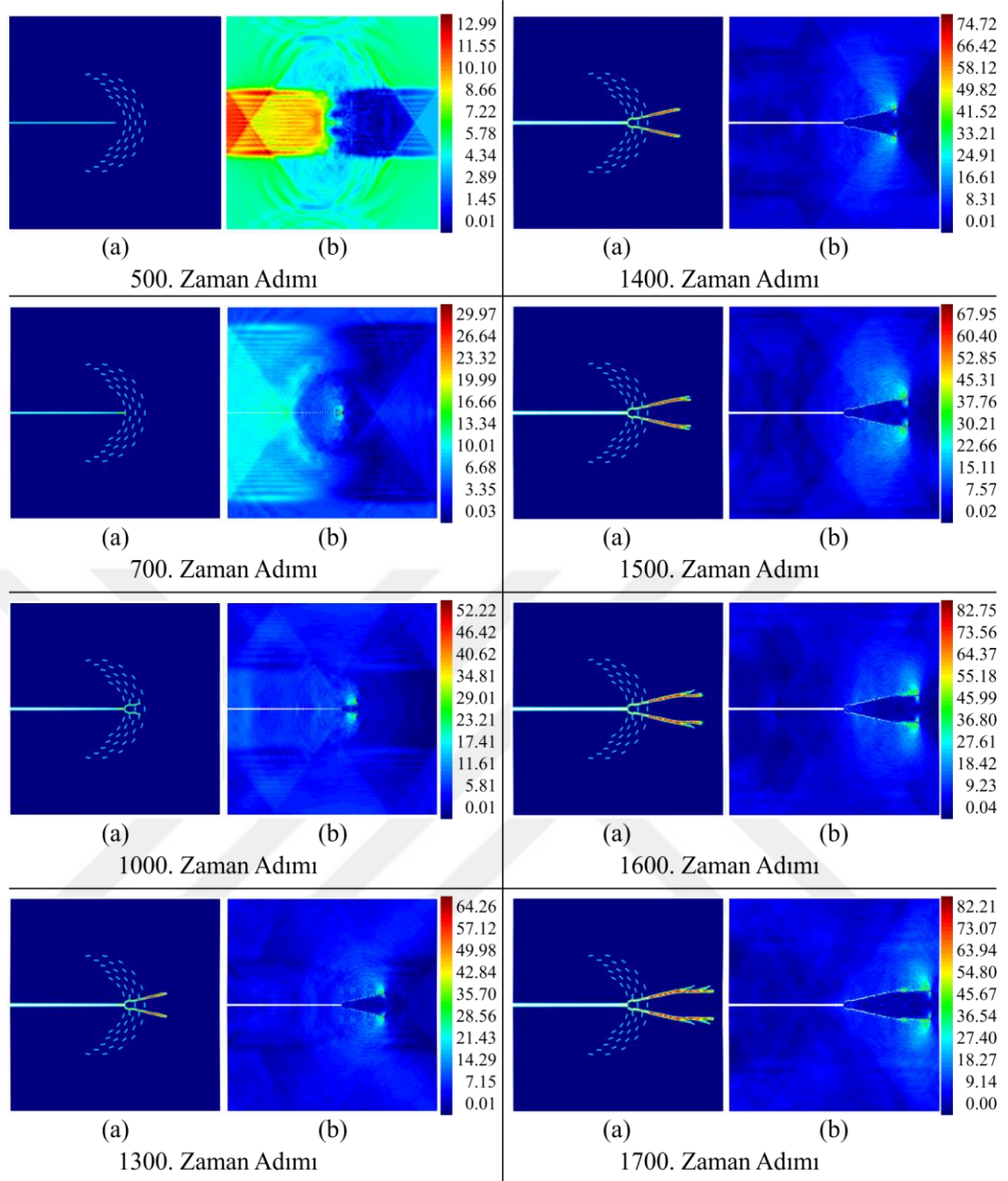
Önceki iki durumun sonuçları ışığında geliştirilerek oluşturulan bu durumda hilal formunda dizilime sahip bir mikro çatlak kümesi tasarlanmıştır (Şekil 5.17.). En temel farklılık hilal formunun uç bölgelerinde yer alan mikro çatlakların ana çatlak

ucunun gerisine doğru uzanması olmuştur. Bu form sayesinde ana çatlakın alt ve üstünde kalan mikro çatlaklar paralelliğe yaklaşmakta, ileriye doğru ise diklik artmaktadır. Ana çatlak ucunun bu şekilde hilal formu ile çevrelenmesi ile uçta oluşacak enerji yığılması azaltılarak daha uzun süre stabil kalması ve stabilitenin bozulmasından sonra da ilerleme yönündeki dik mikro çatlaklar ile dallanmanın oluşturulması hedeflenmektedir.

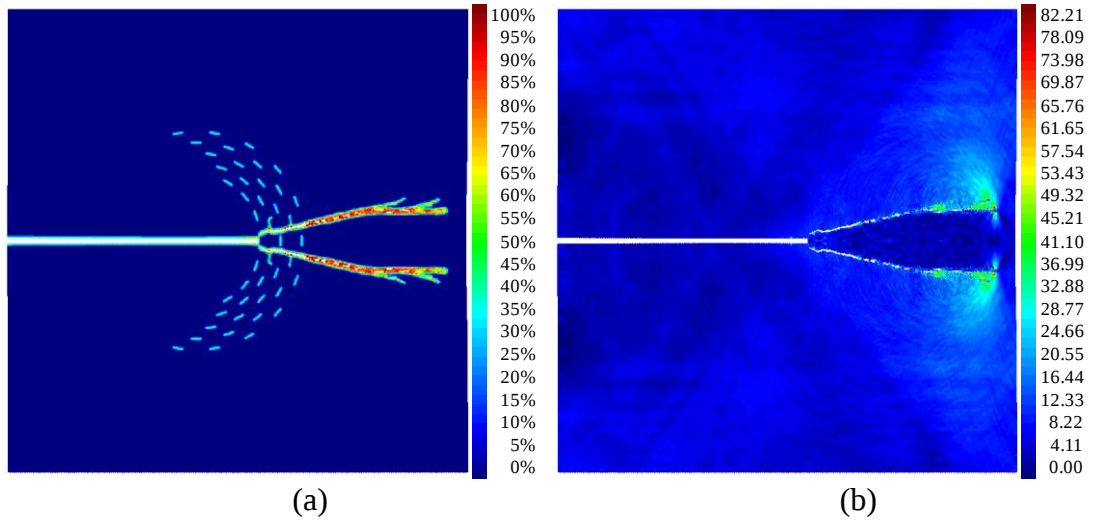
Şekil 5.19.a'da görüldüğü üzere, ana çatlakın ilk mikro çatlakla ulaşması ile dallanma meydana gelmekte ve ortalama 13° 'lik açı ile ilerlemektedir (Şekil 5.20.). Bununla birlikte plağın son çeyreğinde dört yan çatlak dalı oluşmakta ve bu yan çatlakların hız potansiyellerinin yoğunluğundan ilerlemenin buralarda da devam ettiği anlaşılmaktadır (Şekil 5.19.b). Ana çatlakın ilerleme ve dallanma sürecinin daha iyi gözlemlenebilmesi için belirli zaman adımları için hasar durumu ve hız alan görselleri Şekil 5.18.'de sunulmuştur. Şekil 5.18. ve Şekil 5.19.'daki sonuçlardan önceki iki duruma kıyasla bu durumda tam kopma anı daha da ötelenmiş olup çatlak boyundaki kısalma %7,7 civarındadır. Tüm durumlar içerisinde en etkin tokluk kazanımı bu durumda elde edilmiştir. Özetle, potansiyel çatlak oluşum bölgelerinin hilal formunda mikro çatlak kümesi ile çevrelemek önemli bir malzeme toklaştırma tasarımı olarak kabul edilebilir.



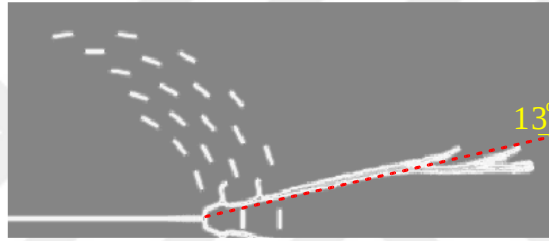
Şekil 5.17. Hilal diziliimli mikro çatlak durumunun genel görünüşü ve mikro çatlak detay görüntüsü



Şekil 5.18. Hilal dizimli mikro çatlak durumunun çeşitli. zaman adımlarındaki (a) çatlak ilerleme hasar (φ) sonuçları; (b) hız alan değerleri (m/s)



Şekil 5.19. Hilal diziliimli mikro çatlak durumunun 1700. zaman adımındaki (a) çatlak ilerleme hasar (φ) sonuçları; (b) hız alan değerleri (m/s)

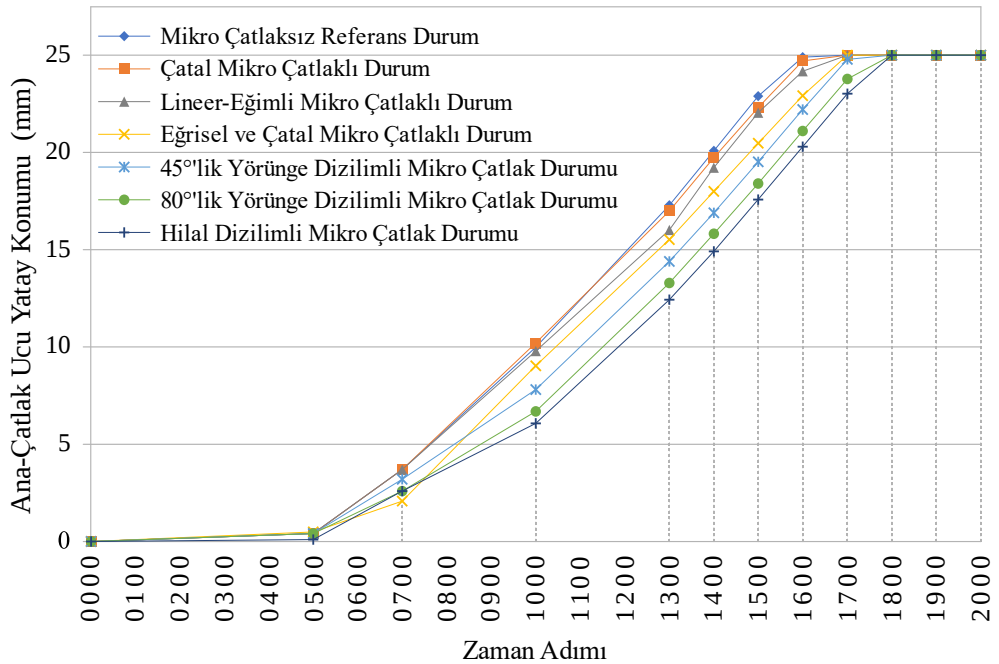


Şekil 5.20. Hilal diziliimli mikro çatlak durumunun 1700. zaman adımında ana çatlak dalının ortalama ilerleme eğimi

5.2. Mikro Çatlaklar ile Tokluk Artırım Mekanizmasının Değerlendirilmesi

Mikro çatlak barındıran bir yapıda yüklemekten kaynaklı oluşan enerji girdisi, ana çatlakın ilerlemesi, mikro çatlakların açılma deformasyonları ve çatlakların birbirleri ile etkileşimi ile sönmölenmektedir. Mikro çatlakların açılma deformasyonlarının sağladığı elastiklik ve enerji yığılmasındaki azalma ana çatlakın daha büyük yükler altında da stabil kalmasına olanak sağlamaktadır. Ana çatlak civarında oluşturulan bu malzeme yumuşama etkisi ile tokluk mekanizması meydana gelmektedir. Örneğin, hilal formundaki mikro çatlak durumunda ana çatlak ucunu çevreleyen mikro çatlak kümesi sayesinde ana çatlak ucundaki enerji birikimi en etkin şekilde yavaşlatılmıştır. Ayrıca yörünge diziliimli diğer iki durumda da açı büyütüldükçe yine yumuşama etki bölgesi genişlemiştir. Böylece tokluk artışı sağlanmıştır. Dolayısıyla, hasar gelişiminin hızlanması veya yavaşlaması, mikro çatlakların dağılımları, doğrultuları ve aralıkları gibi birçok parametreye bağlıdır (Rao and Murthy, 2001).

Sunulan analizlerde çeşitli boyut, form ve doğrultularda mikro çatlaklar ile farklı tokluk artırım mekanizmaları oluşmaktadır. Burada mikro çatlakların mevcudiyeti ile oluşan tokluk artırım etkilerini nicel olarak kıyaslamak için ana çatlak ucunun analiz süresince belli zaman adımlarındaki x koordinatı bilgileri elde edilerek kat ettiği mesafeler hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar, mikro çatlaksız referans durum da dahil olmak üzere yedi durum için gerçekleştirilmiştir. Bu değerler ana çatlak uçlarının konum-zaman grafiği olarak görselleştirilerek Şekil 5.21.'de sunulmuştur. Grafikten belli bir zaman adımı için durumların birbirlerine veya referans duruma göre tokluk kazanım durumlarını değerlendirmek mümkündür. Burada seçilen zaman adımına kadarki süreç için durumların referans duruma göre kat ettikleri mesafenin azlığı mertebesinde tokluk kazandığı değerlendirilmesi yapılabilmektedir. Diğer bir deyişle ana çatlak ne kadar hızlı ilerlerse o kadar çabuk tam kopma meydana gelecektir. Tablo 5.1.'de 500 ile 1600. zaman adımları arasında ana çatlakların hesaplanan ortalama hızları verilmiştir. Burada her bir duruma ait tokluk kazanım durumu açık şekilde görülmektedir. Bu değerlere göre bütün mikro çatlaklı durumlarda mikro çatlaksız duruma göre yavaşlama gerçekleşmiştir (Tablo 5.1.). Bununla birlikte hilal formundaki mikro çatlak durum tokluk kazanımının en yüksek olduğu durum iken, çatal mikro çatlaklı durum tokluk kazanımı en düşük olan durumdur.

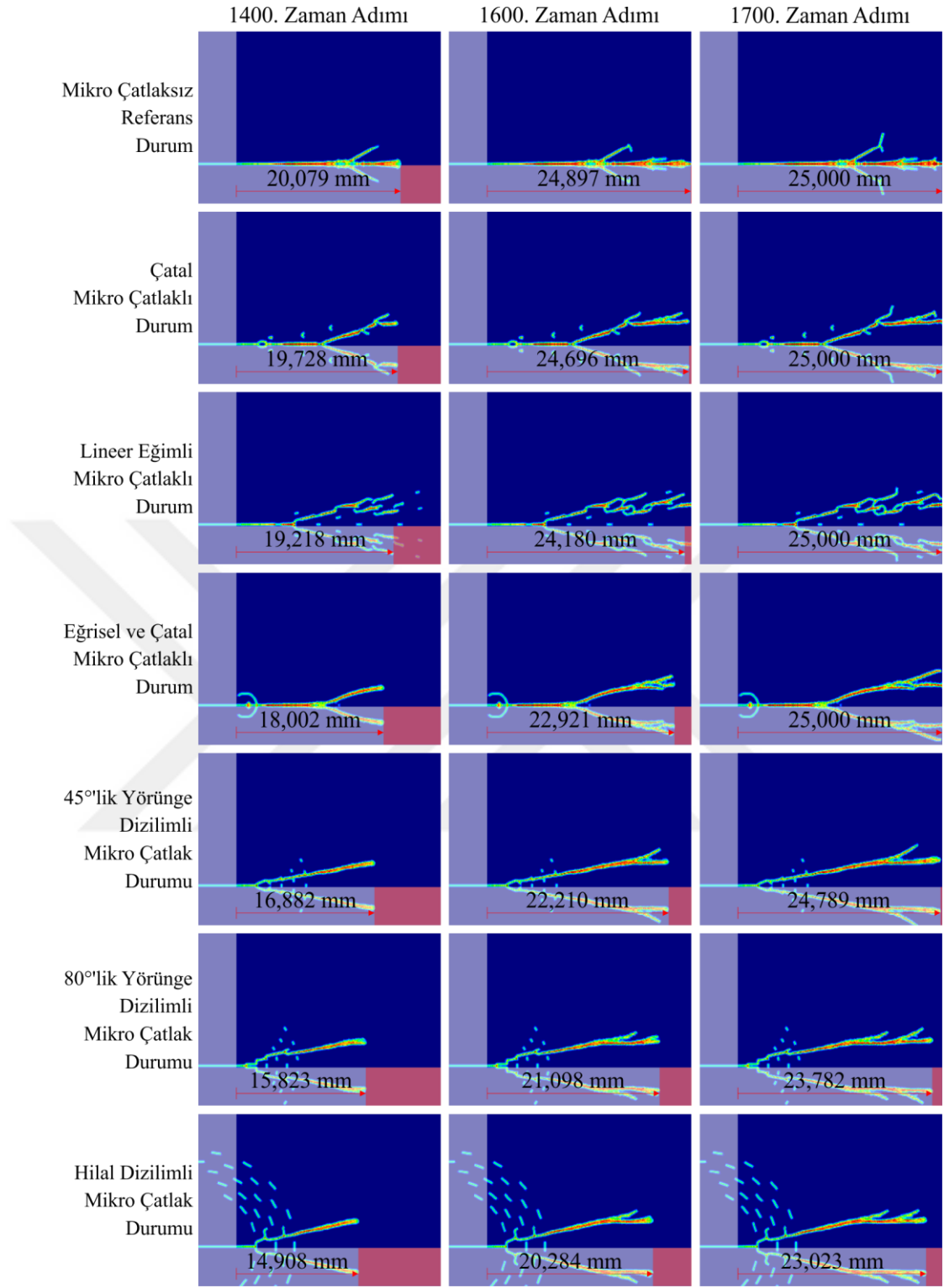


Şekil 5.21. Bütün durumlar için ana çatlak ucu yatay konumunun zaman adımına göre değişim grafiği

Tablo 5.1. 500 ila 1600. zaman adımları arasında bütün durumlar için ana çatlak ucu ortalama hız değerleri

	500. zaman adımına ait x konumu (mm)	1600. zaman adımına ait x konumu (mm)	Bu zaman adımları aralığındaki ortalama hız (mm/zaman adımı)
Mikro Çatlaksız Referans Durum	0,403	24,897	0,0223
Çatal Mikro Çatlaklı Durum	0,403	24,696	0,0221
Lineer Eğimli Mikro Çatlaklı Durum	0,405	24,180	0,0216
Eğrisel ve Çatal Mikro Çatlaklı Durum	0,499	22,921	0,0204
45°'lik Yörünge Dizilimli Mikro Çatlak Durumu	0,404	22,210	0,0198
80°'lik Yörünge Dizilimli Mikro Çatlak Durumu	0,404	21,098	0,0188
Hilal Dizilimli Mikro Çatlak Durumu	0,096	20,284	0,0184

Daha bütüncül bir gözlem sağlanması için durumlar arasındaki konum farkının belirgin olduğu süreç içerisinde (Şekil 5.21.) üç zaman adımı seçilmiş ve bu zaman adımlarında bütün durumların çatlak ilerleme sonuçları bir arada Şekil 5.22.'de kıyaslanarak sunulmuştur. Seçilen bütün zaman adımları için çatlak boyları sıralamasının Tablo 5.1.'deki ortalama hız sıralaması ile aynı olduğu görülmektedir.

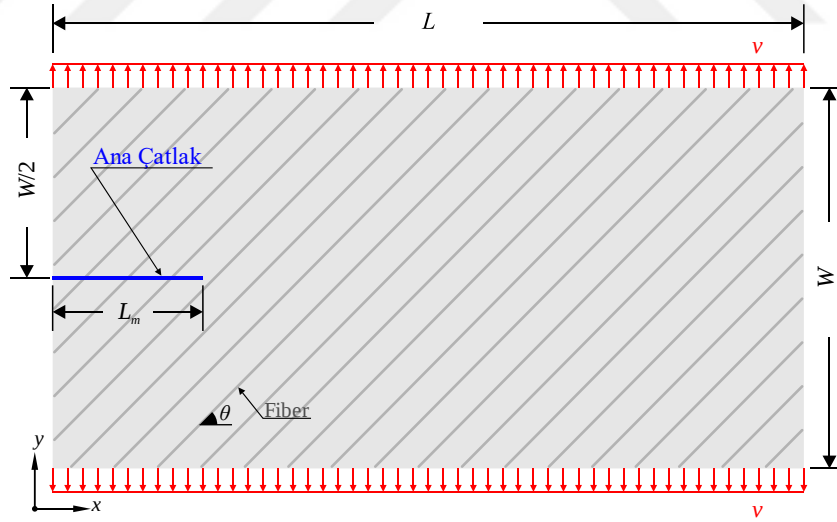


Şekil 5.22. Bütün durumlar için ana çatlak ilerlemesinin 1400, 1600 ve 1700. zaman adımlarındaki değerleri

6. KOMPOZİT TABAKADA MİKRO ÇATLAK ETKİSİ

Bu bölümde, kompozit tabakalarda mikro çatlakların tokluk artırımı üzerine etkileri Bağ Tabanlı Peridinamik model kullanılarak incelenmektedir. Çalışmada 0° , 45° ve 90° olmak üzere üç farklı tabaka yönelimi için toplam 15 mikro çatlak konumlandırması tasarlanmış ve analizleri gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan bu mikro çatlak konumlandırma şekillerinin esas amacı, mikro çatlakların ana çatlak ilerleyiş hızı üzerindeki etkisini göstermektir. Oluşturulan durumlarda mikro çatlakların hepsi $3 \cdot \Delta x$ boyunda olup, konumlandırma şekli ve sayılarında değişiklik yapılarak varyasyonlar oluşturulmuştur.

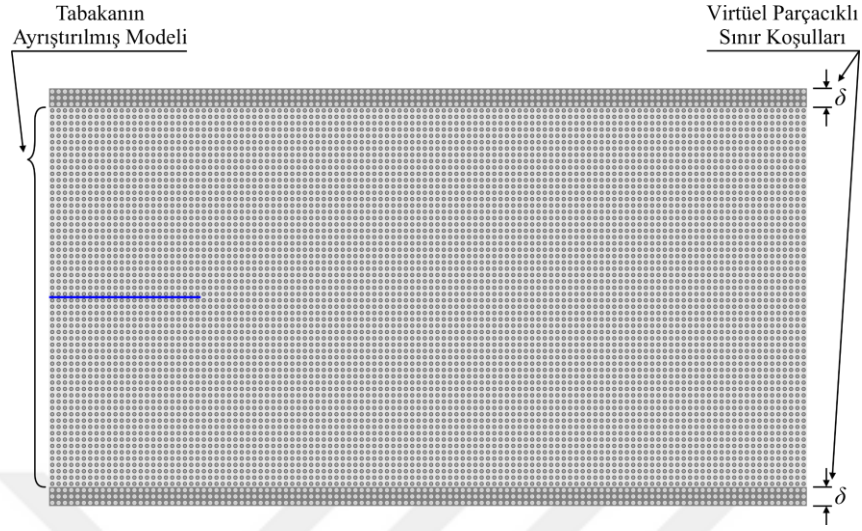
Şekil 6.1.'de görüldüğü gibi, uzunluğu, genişliği ve kalınlığı sırasıyla $L = 152,4\text{mm}$, $W = 76,2\text{mm}$ ve $t = 0,1651\text{mm}$ olan dikdörtgen kompozit tabakanın üst ve alt kenarlarından yarı-statik (quasi-static) olarak y eksenine doğrultusunda $v = 1,5 \cdot 10^{-8}\text{m/s}$ hızında çekme yükü etkimektedir. Bu etki analiz boyunca sabit hızlı bir yer değiştirme yüküdür. Başlangıç kusuru olarak, yüklemeye dik doğrultuda ve $L_m = L/5$ boyunda bir ana çatlak plağın yatayda soluna, düşeyde ise ortasına denk gelecek şekilde konumlandırılmıştır.



Şekil 6.1. Problemin geometrik özellikleri ve yükleme sınır koşulları

Analiz için sistemin ayrıştırma işlemi $240 \times 120 \times 1$ adet materyal parçacığı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.2.). Bu ayrıştırma ile materyal parçacıklarının dizilim aralığı $\Delta x = 0,635\text{mm}$ olarak hesaplanmıştır ve bu aralık değeri üzerinden ufuk yarıçapı değerimiz $\delta = 3,015 \cdot \Delta x$ olarak tayin edilmiştir. Teorinin lokal olmayan

yapısından ötürü yükleme sınır koşullarında δ uzunluğu kadar sisteme virtüel materyal parçacık katmanları (yani $240 \times 3 \times 1$ adet parçacık) eklenmiştir (Şekil 6.2.).



Şekil 6.2. Ayrıştırılmış model ve virtüel sınır koşulları

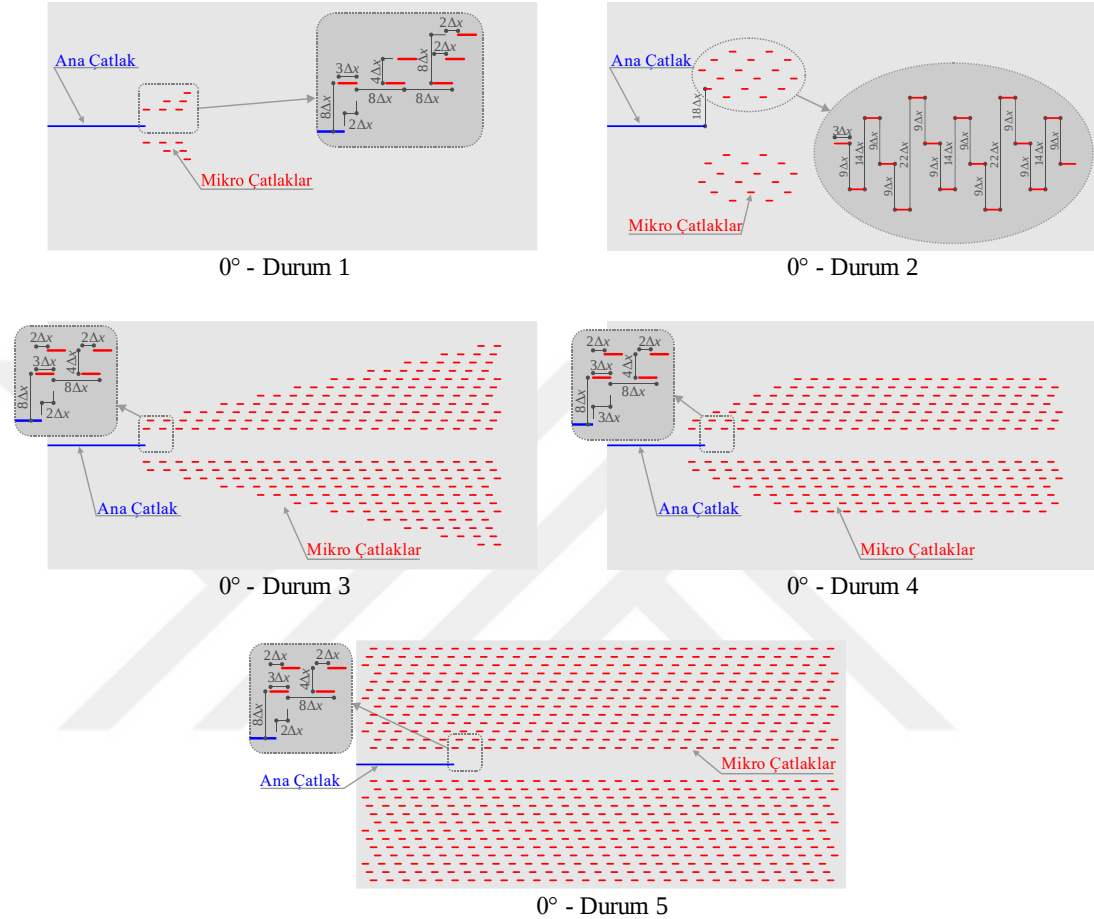
Kullanılan kompozit tabakanın fiber ve fibere dik doğrultudaki elastisite modülleri sırasıyla $E_1 = 159,96 \text{ GPa}$ ve $E_2 = 8,96 \text{ GPa}$ ve Poisson oranı da $\nu = 1/3$ 'tür. Kompozit malzemelere ait kırılma parametresi olan fiber ve matris bağları için kritik uzama oranı değerleri, Oterkus et al. (2012) çalışmasında açıklandığı gibi çeşitli deneyler yapılarak elde edilmektedir. Dolayısıyla bu kritik uzama oranları, Oterkus and Madenci (2012)'nin aynı malzeme ile yaptığı çalışmadan sırasıyla $s_m = 0,0135$ ve $s_f = 0,027$ olarak alınmıştır. Yarı-statik (quasi-static) yükleme olmasından dolayı analizlerde Uyarlanabilir Dinamik Yavaşlama (Adaptive Dynamic Relaxation) tekniği kullanılmıştır (Kilic, 2008). Zaman adım aralığı (Δt), 1 saniyedir ve stabil kütle yoğunluğu da $7,005 \times 10^{18} \text{ kg/m}^3$ 'tür (Oterkus and Madenci, 2012).

6.1. Analizler

6.1.1. Fiber Açısı 0° Olan Durumlar

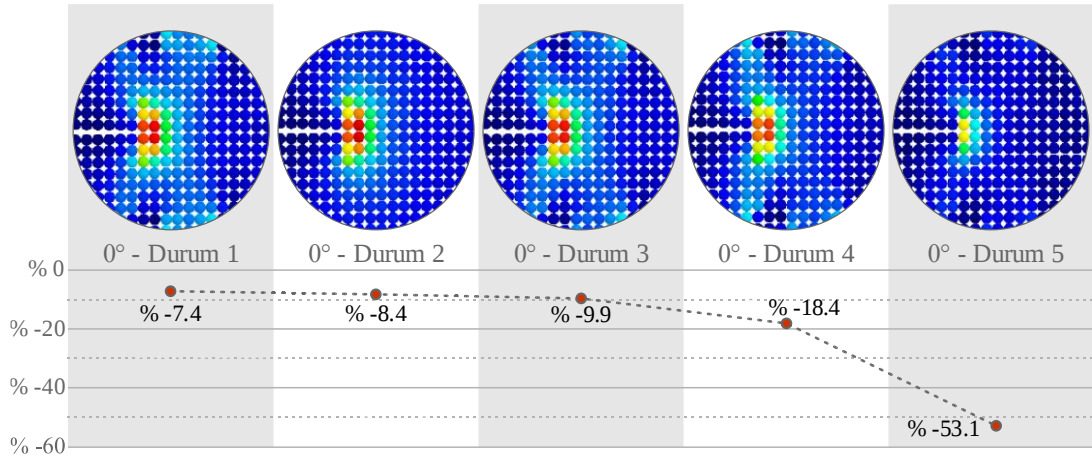
0° fiber yönelimine sahip kompozit tabakaya herhangi bir mikro çatlak dahil edilmediği zaman ilerleme ana çatlak doğrultusunda devam ederek plağın sağ kenarına ulaşmaktadır (Şekil 6.7.). Analizlerde oluşturulan mikro çatlak tasarımlarıyla ana çatlak ucundaki şekil değiştirme enerji yoğunluğunun artış hızı düşürülerek çatlağın stabilitesinin bozulma anını, yani ilerlemeye başlayacağı anı, ötelemek ve devamında da ilerleyişini yavaşlatmak hedeflenmiştir. Durumlar, elde edilen sonuçlara göre mikro çatlak sayıları artırılarak ve konumlanmaları düzenlenerek tasarlanmıştır.

Şekil 6.3.'deki gibi sırasıyla 12, 32, 280, 282 ve 754 adet mikro çatlğa sahip beş durum ele alınmıştır. Bütün durumlarda mikro çatlaklar ana çatlak doğrultusuna simetriktir ve konumlandırmalar da belli bir dizilimin tekrarı şeklinde olduğundan dolayı gösterimde yalınlık açısından sadece dizilime ait ölçüler verilmiştir.



Şekil 6.3. Fiber açısı 0° olan durumların mikro çatlak dağılım şekilleri ve detayları

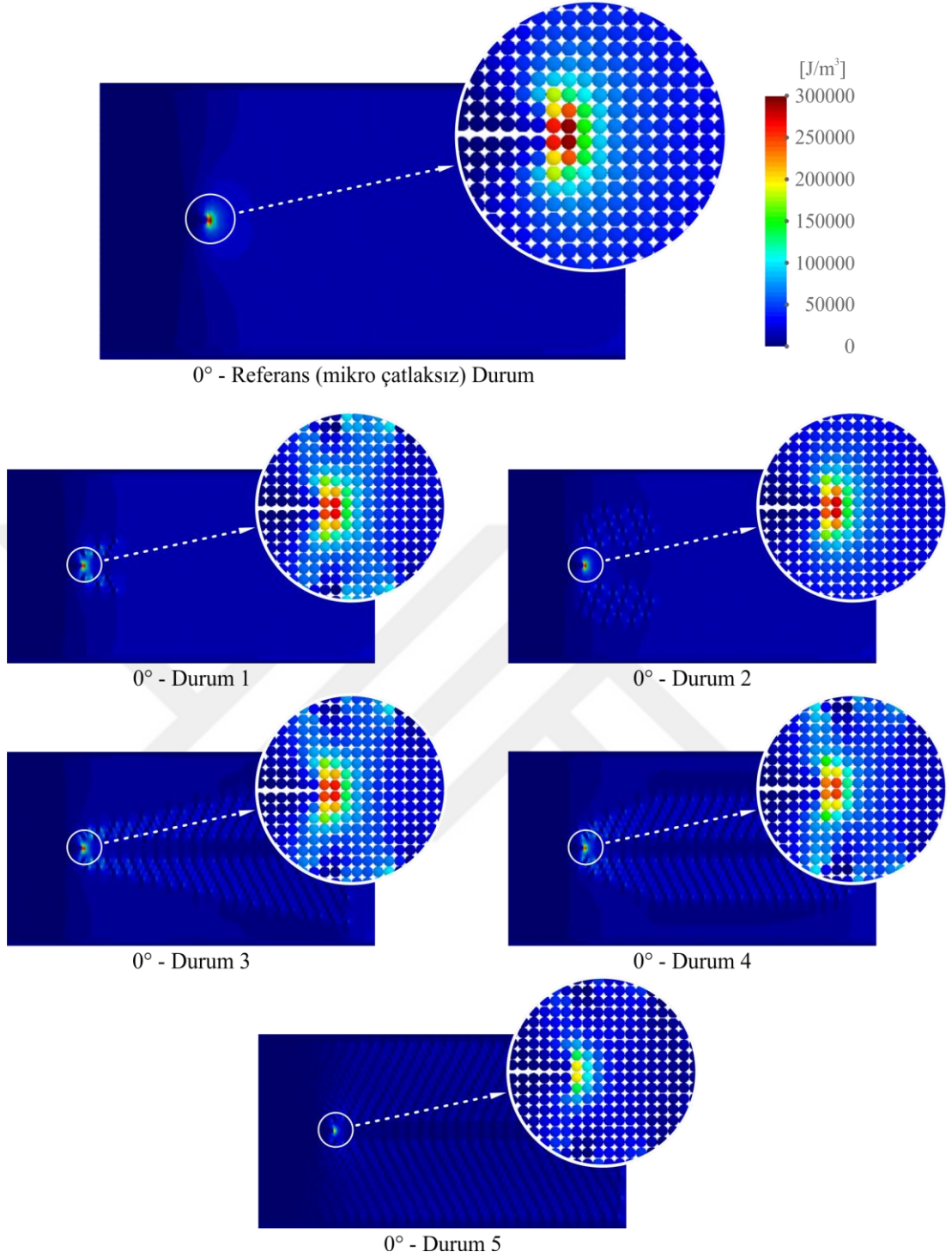
İlk olarak ana çatlak ucundaki şekil değiştirme enerji yoğunluğunun mikro çatlaklar dahil edildiğinde nasıl değiştiği değerlendirilmiştir. Referans durum olan mikro çatlaksız durumda ana çatlak stabilitesinin bozulmadan, yani ilerlemeye başlamadan, hemen önce ana çatlak ucundaki şekil değiştirme enerji yoğunluğu aynı zaman adımı (5600. zaman adımı) için diğer bütün durumlardaki değerleri ile kıyaslanarak mikro çatlak dağılımlarının etkileri değerlendirilmiştir. Ana çatlağın ucundaki ortalama şekil değiştirme enerji yoğunluğu değerlerinin referans duruma göre % değişimi Şekil 6.4.'de sunulmuştur.



Şekil 6.4. Fiber açısı 0° olan durumların 5600. zaman adımında ana çatlak ucu şekil değiştirme enerji yoğunluğu sonuçları ve referans duruma göre % değişim grafiği

İlk üç durumda elde edilen azalma oranları birbirlerine yakın ve ortalama %-8,5 civarlarındadır (Şekil 6.4. ve Şekil 6.5.). Diğer taraftan sonraki iki durumda bu oran daha etkin şekilde, sırasıyla %-18,4 ve %-53,1 oranlarında, değişmektedir (Şekil 6.4. ve Şekil 6.5.). Buradaki değişimlerde temel olarak iki parametre mevcuttur birincisi dahil edilen mikro çatlak sayısı ve diğeri ise ana çatlak ucunun gerisine konumlandırılan mikro çatlak mevcudiyet durumudur.

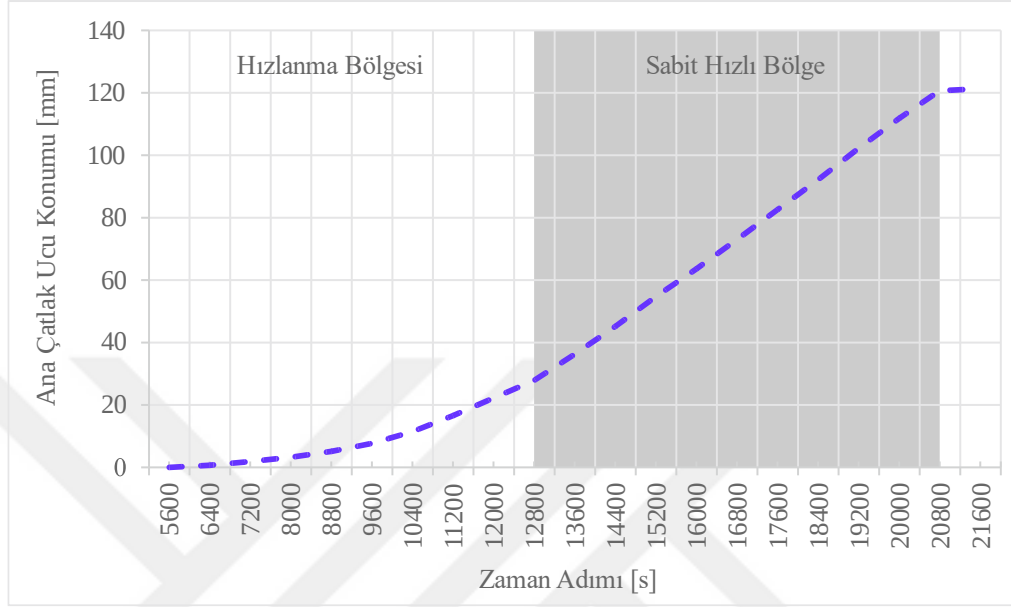
Mikro çatlak sayısı artışının ana çatlak ucundaki şekil değiştirme enerji yoğunluğu değişimine katkısı ilk üç durumdan da görüleceği üzere en fazla %-9,9 oranında olmuştur. Bu oranlarda dikkat çekici olan ise neredeyse aynı sayıda mikro çatlakla sahip olan üçüncü ve dördüncü durumlar arasındaki iki kata yakın (%-18,4) değişim oranı farkıdır. Bu iki durum arasındaki mikro çatlak sayısındaki değişim sadece 2 adettir. Sırasıyla üçüncü ve dördüncü durumlarda 280 ve 282 adet mikro çatlak kullanılmaktadır. Dördüncü durumda bu sonucun elde edilmesini sağlayan temel etkenin ana çatlak ucu hizasının gerisine doğru mikro çatlakların konumlandırılması olduğu düşünülmektedir. Bu belirgin düşüşte önceki durumlardan farklı olarak yapılan bu konumlandırma stratejisinin etkisi olduğu görülmektedir. Son olarak beşinci durumda ise plak geneline dağılan mikro çatlak konumlandırması ile, her iki etken parametre en uç düzeyde kullanılarak, elde edilen azalma %-53,1 oranına kadar ulaşmıştır.



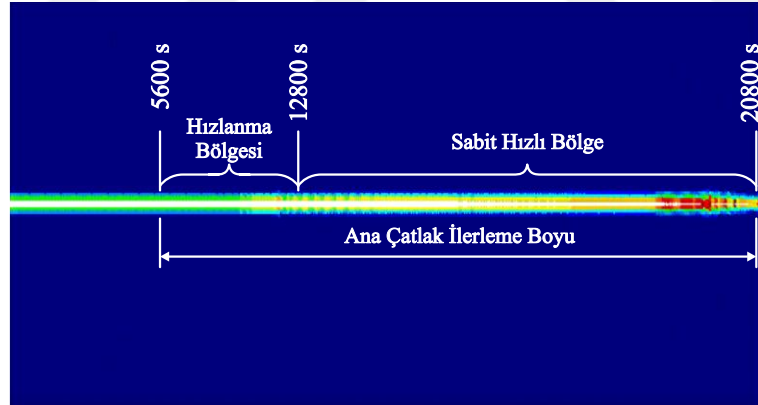
Şekil 6.5. Fiber açısı 0° olan durumların 5600. zaman adımında şekil değiştirme enerji yoğunluğu sonuçları

Sonraki aşamada ise ana çatlak stabilitesinin bozulup ilerlemeye başlamasının ardından ana çatlak ucunun konum-zaman değişimine mikro çatlakların etkisi değerlendirilmiştir (Şekil 6.8.) Mikro çatlaksız referans durumun ana çatlak ucunun konum-zaman grafiğini inceleyecek olursak hızlanma (ivmelenme) ve sabit hızlı bölge olmak üzere iki majör bölge gözlemlenmektedir (Şekil 6.6. ve Şekil 6.7.). Burada ana

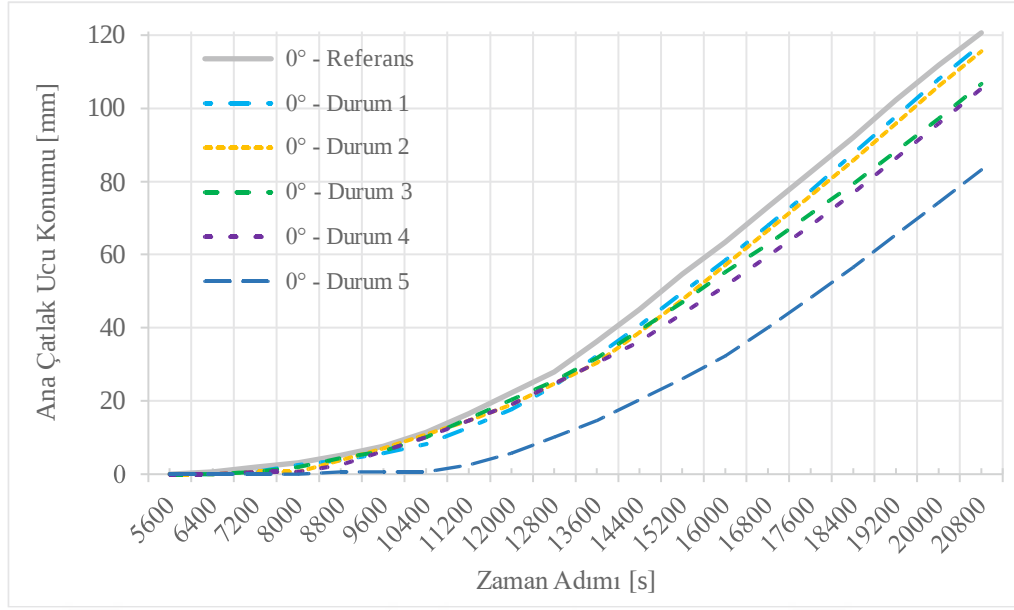
çatlak ucu stabilitesinin bozulana kadar geçen sürede biriken enerji sebebiyle başlangıçta bir hızlanma (ivmelenme) bölgesi olduğu düşünülmektedir. Biriken enerjinin sönümlenmesi ile sabit hızlı yüklemeye uygun şekilde ana çatlak ucu ilerleyişi de neredeyse sabit hızlı olarak devam etmektedir.



Şekil 6.6. Fiber açısı 0° olan referans durumun ana çatlak ucu konum-zaman grafiği

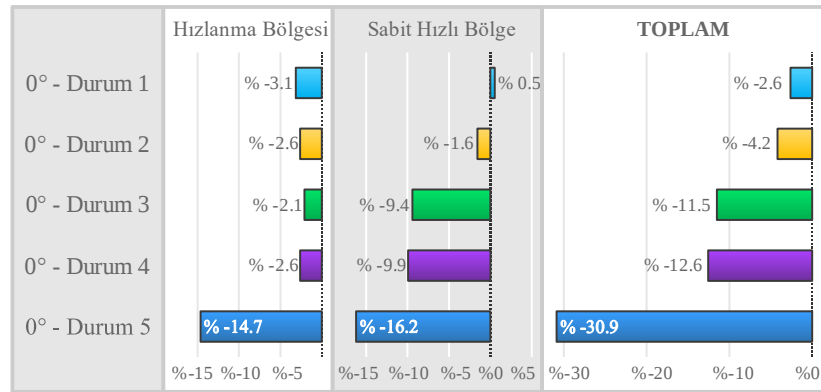


Şekil 6.7. Fiber açısı 0° olan referans durumun 20800. zaman adımında hasar ilerleme sonucu



Şekil 6.8. Fiber açısı 0° olan durumların ana çatlak ucu konum-zaman grafiği

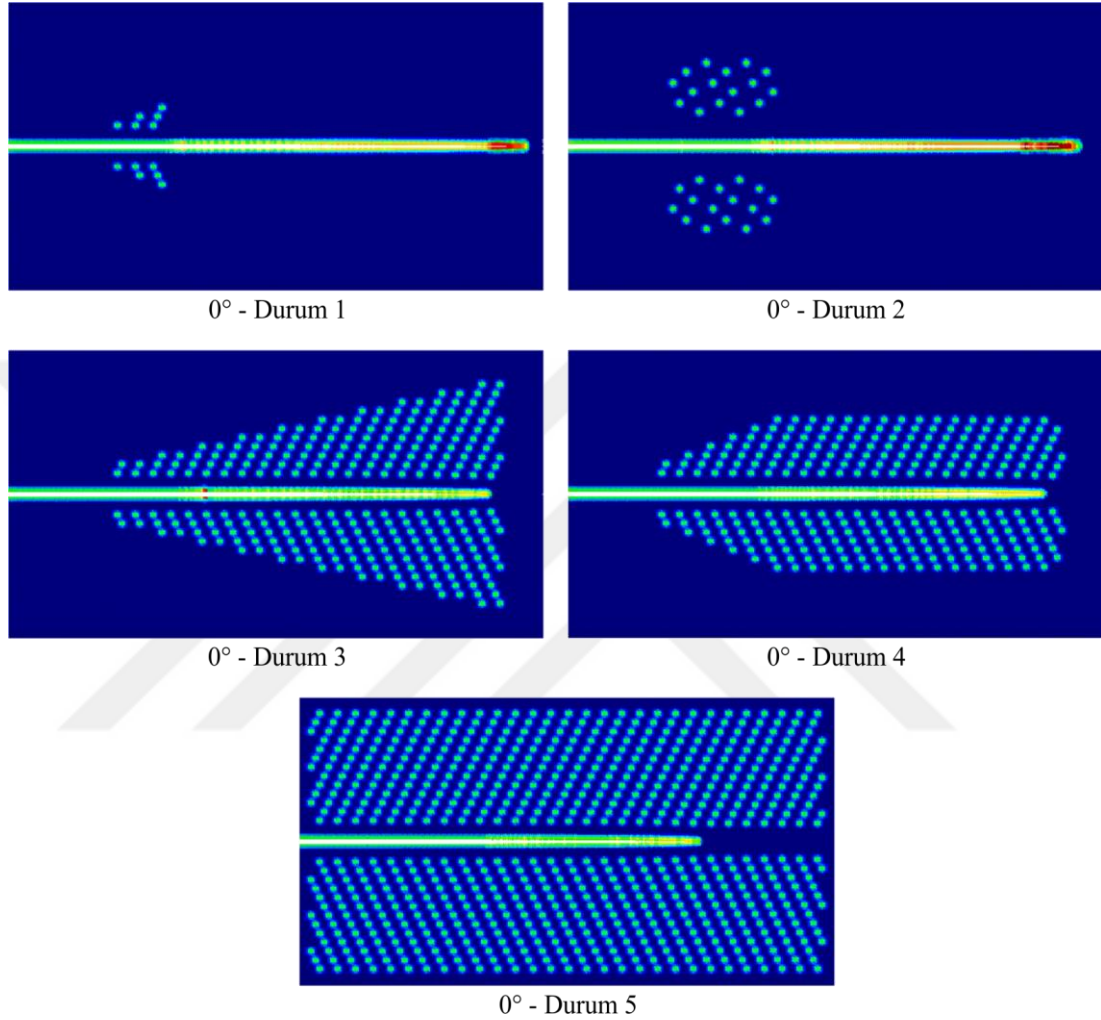
Mikro çatlaksız referans durum için harekete başlangıcın ardından 12800. zaman adımına kadar hızlanmanın (ivmelenmenin) gerçekleştiği ve ardından da 20800. zaman adımına kadar neredeyse sabit bir hızla devam eden bir gidişat ortaya koyduğu gözlemlenmektedir (Şekil 6.6. ve Şekil 6.7.). 20800. zaman adımından sonra ise ana çatlak ucu kenara oldukça yaklaştığı için ilerleyiş stabilitesi bozulmakta ve kopma meydana gelmektedir. Dolayısıyla referans duruma ait 20800. zaman adımı kıyas noktası olarak belirlenmiştir. Diğer durumların 20800. zaman adımındaki ana çatlak boylarının referans duruma göre % değişim grafiği ve sonuç görselleri sırasıyla Şekil 6.9. ve Şekil 6.10.'da sunulmaktadır.



Şekil 6.9. Fiber açısı 0° olan durumların 20800. zaman adımında ana çatlak ilerleme boyunun referans duruma göre % değişim grafiği

Başlangıçta ana çatlak ucuna odaklı konumlandırmaya sahip olan ilk iki durumda ana çatlak boyu ortalama %-3,4 civarında azalmıştır. Konumlandırmanın

çatlak yolu boyunca genişletildiği üçüncü ve dördüncü durumlarda ise ana çatlak boyundaki azalmalar ortalama %-12 civarındadır. Plağın genelini kaplayan mikro çatlak konumlandırmasına sahip son durumda ise ana çatlak boyundaki azalma %-30,9'a kadar ulaşmıştır.



Şekil 6.10. Fiber açısı 0° olan durumların 20800. zaman adımında hasar ilerleme sonuçları

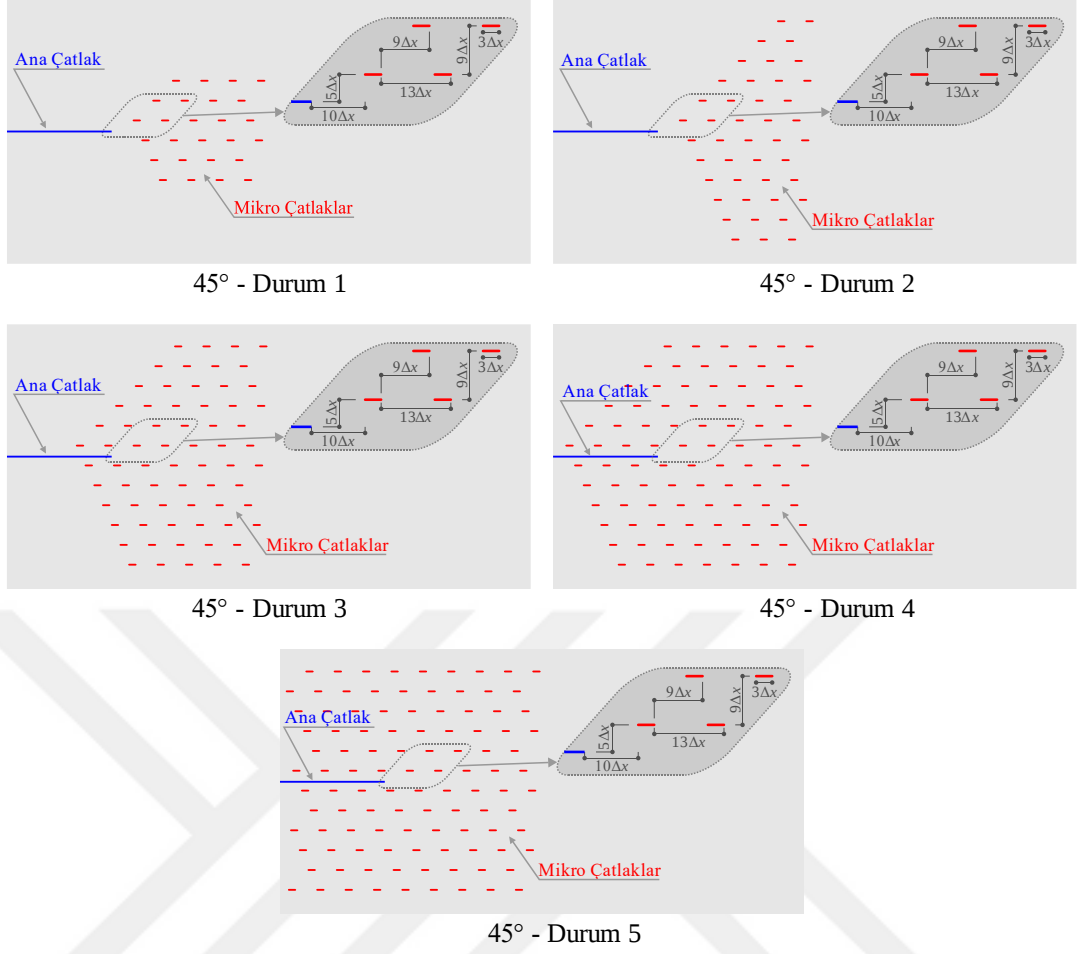
İlerleyiş süreci boyunca mikro çatlak dağılımlarının etkilerini etrafıca değerlendirmek için hızlanma (ivmelenme) ve sabit hız bölgelerinde gerçekleşen çatlak boyu değişiminin payları Şekil 6.9.'da sunulmaktadır. Ana çatlak ucuna odaklı olan ilk iki durumda ana çatlak boyundaki toplam kısaltmaların tamamına yakın kısmı hızlanma (ivmelenme) bölgesinin sonuna kadar gerçekleşmiş olmaktadır. Üçüncü ve dördüncü durumda ise hızlanma (ivmelenme) ve sabit hızlı bölgelerde bu kısalma oranlarının dağılımı sırasıyla ortalama %2,4 ve %9,7 civarlarındadır. Son durumda ise bu dağılım %14,7 ve %16,2 olarak gerçekleşmektedir.

Sonuç olarak mikro çatlak konumlandırmasının güzergah boyunca yaygın olması tokluk performansını belirgin şekilde artırdığı görülmektedir. Bunun yanında ana çatlak stabilitesinin bozulup ilerlemeye başlamasını geciktirmede ana çatlak ucu hizasının gerisine yapılacak mikro çatlak konumlandırmaları oldukça etkin olmasına rağmen ilerleme sonrası oluşacak ana çatlak boyu üzerinde sınırlı etki göstermektedir.

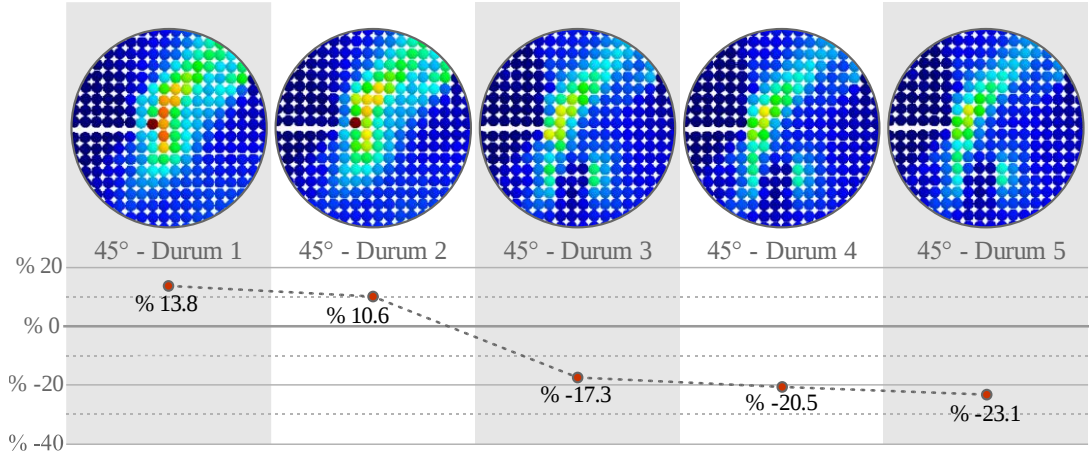
6.1.2. Fiber Açısı 45° Olan Durumlar

45° fiber oryantasyonuna sahip kompozit tabakada herhangi bir mikro çatlak dahil edilmediği zaman ilerleme fiber doğrultusunda devam ederek plağın st kenarına ulaşmaktadır (ekil 6.15.). Oluşturulan mikro çatlak tasarımlarıyla ana çatlak ucundaki ekil değiştirme enerji yoğunluğunun artış hızı yavaşlatılarak çatlağın stabilitesinin bozulma anını (ilerlemeye başlayacağı anı) telemek ve devamında da ilerleyişini yavaşlatmak hedeflenmiştir. Durumlar, elde edilen sonuçlara göre mikro çatlak sayıları kademeli olarak artırılarak ve konumlanmaları düzenlenerek tasarlanmıştır. Şekil 6.11.’deki gibi sırasıyla 26, 43, 67, 91 ve 105 adet mikro atlağa sahip beş durum ele alınmıştır. Bütün durumlarda mikro çatlaklar konumlandırmaları belli bir dizilimin tekrarı şeklinde olduğundan gösterimde yalınlık açısından sadece dizilime ait ölçüler verilmiştir.

İlk olarak ana çatlak ucundaki ekil değiştirme enerji yoğunluğunun mikro çatlaklar dahil edildiğinde nasıl değiştii değerlendirilmiştir. Referans durum olan mikro çatlaksız durumda ana çatlak stabilitesinin bozulmadan, yani ilerlemeye başlamadan, hemen önce ana çatlak ucundaki ekil değiştirme enerji yoğunluğu aynı zaman adımı (6800. zaman adımı) için diğer bütün durumlardaki değerleri ile kıyaslanarak mikro çatlak dağılımlarının etkileri değerlendirilmiştir. Ana atlağın ucundaki ortalama ekil değiştirme enerji yoğunluğu değerlerinin referans duruma göre değişimi ekil 6.12.’de sunulmuştur.



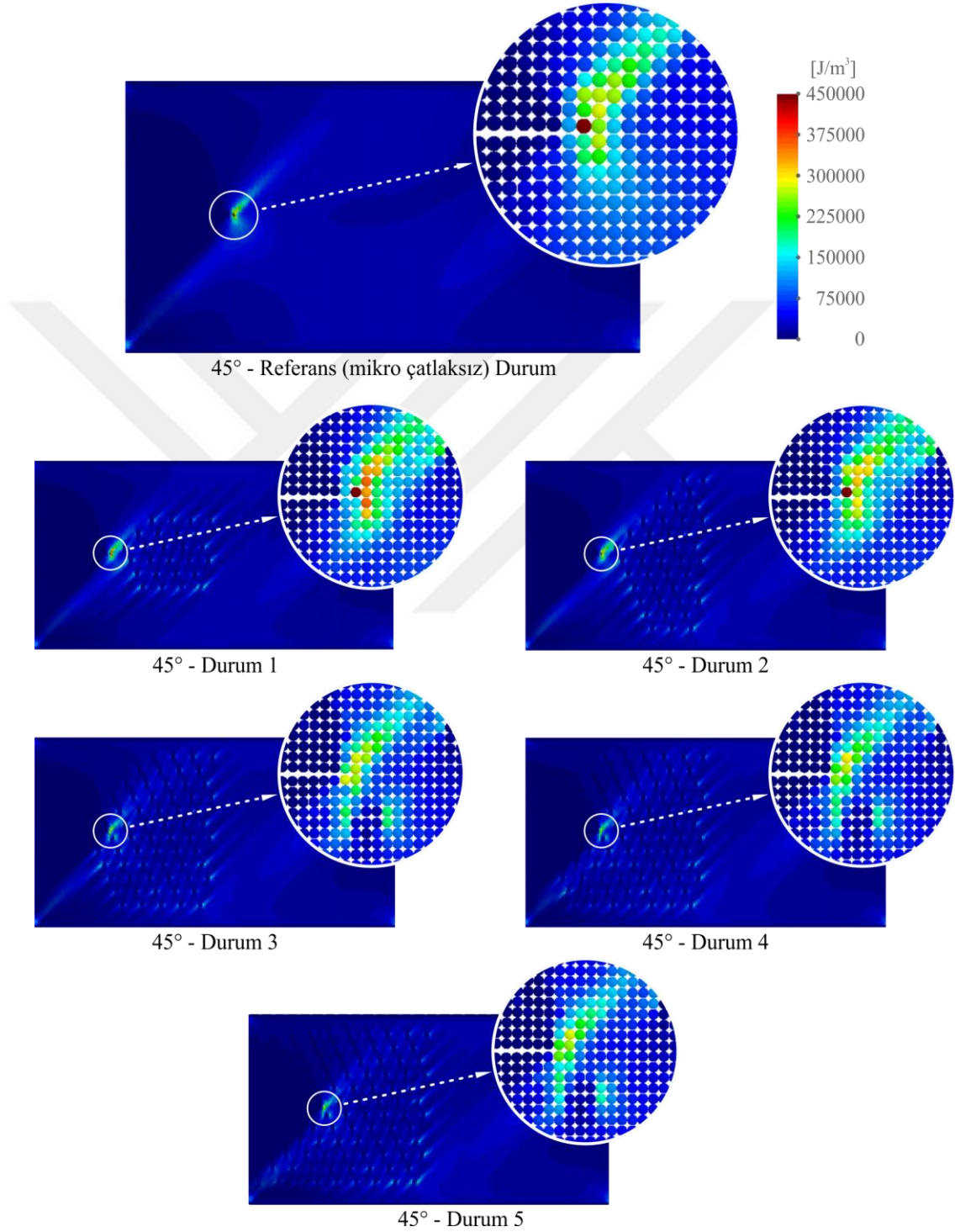
Şekil 6.11. Fiber açısı 45° olan durumların mikro çatlak dağılım şekilleri ve detayları



Şekil 6.12. Fiber açısı 45° olan durumların 6800. zaman adımında ana çatlak ucu şekil değiştirme enerji yoğunluğu sonuçları ve referans duruma göre % değişim grafiği

İlk iki durumda ortalama %12,2 bir artış ortaya çıkarken, sonraki üç durumda ise ortalama %-20,3 azalma meydana gelmektedir (Şekil 6.12. ve Şekil 6.13.). Buradaki sonuçlar arasında artan ve azalan olarak grupların oluşmasına neden olan temel faktör ana çatlak güzergahının her iki yanında da mikro çatlak

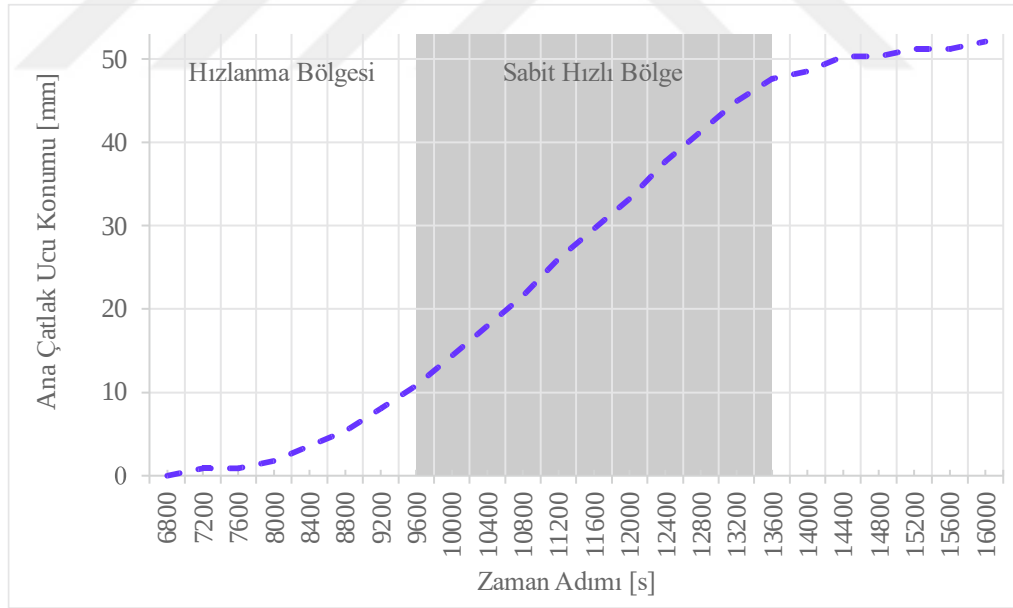
konumlandırmasının olup olmaması ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. Ana çatlak güzergahının her iki yanında mikro çatlak mevcudiyeti ile karşılıklı fiber gerilmelerinde denge sağlanmakta ve mikro çatlakların ana çatlak ucu matris şekil değiştirme enerji yoğunluğundaki düşüşe katkısı ortaya çıkmaktadır.



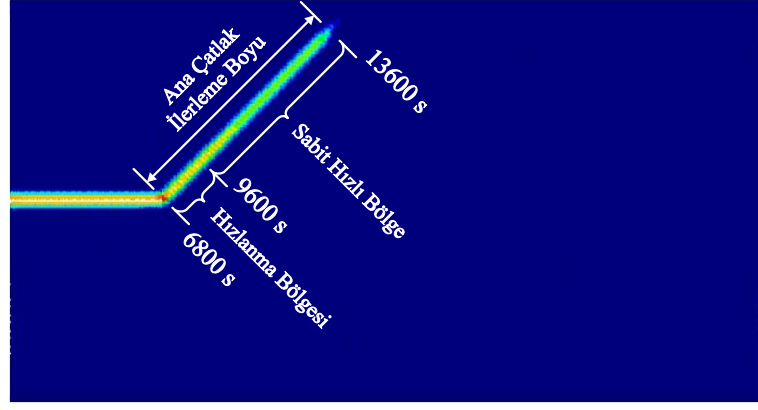
Şekil 6.13. Fiber açısı 45° olan durumların 6800. zaman adımında şekil değiştirme enerji yoğunluğu sonuçları

İlk iki durumda meydana gelen artışın sebebi mikro çatlaklardan dolayı kopan fiberlerin taşınması gereken yükün komşu fiberlere yayılması ile civar matrise ek yük getirmesinden dolayı ana çatlak ucu matris şekil değiştirme enerjisinin arttığı düşünülmektedir. İkinci durumda mikro çatlakların sayısı ve yaygınlığı artınca fiberlerdeki bu enerji konsantrasyonu kısmen azalmaya başlamakta ve ana çatlak ucu matris şekil değiştirme enerji yoğunluğu birinci durumuna göre bir miktar azalsa da yine referans duruma göre %10,6 oranında artmaktadır.

Sonraki aşamada ise ana çatlak stabilitesinin bozulup ilerlemeye başlamasının ardından ana çatlak ucunun konum-zaman değişimine mikro çatlakların etkisi değerlendirilmiştir (Şekil 6.16.). Mikro çatlaksız (referans) durumun ana çatlak ucunun konum-zaman grafiğini inceleyecek olursak, hızlanma (ivmelenme) ve sabit hızlı bölge olmak üzere iki majör bölge gözlemlenmektedir (Şekil 6.14. ve Şekil 6.15.). Yine burada ana çatlak ucu stabilitesinin bozulmasına kadar geçen sürede biriken enerji sebebiyle başlangıçta bir hızlanma (ivmelenme) bölgesi olduğu düşünülmektedir. Biriken enerjinin sönmelenmesi ile sabit hızlı yüklemeye uygun şekilde ana çatlak ucu ilerleyişi de neredeyse sabit hızlı olarak devam etmektedir.

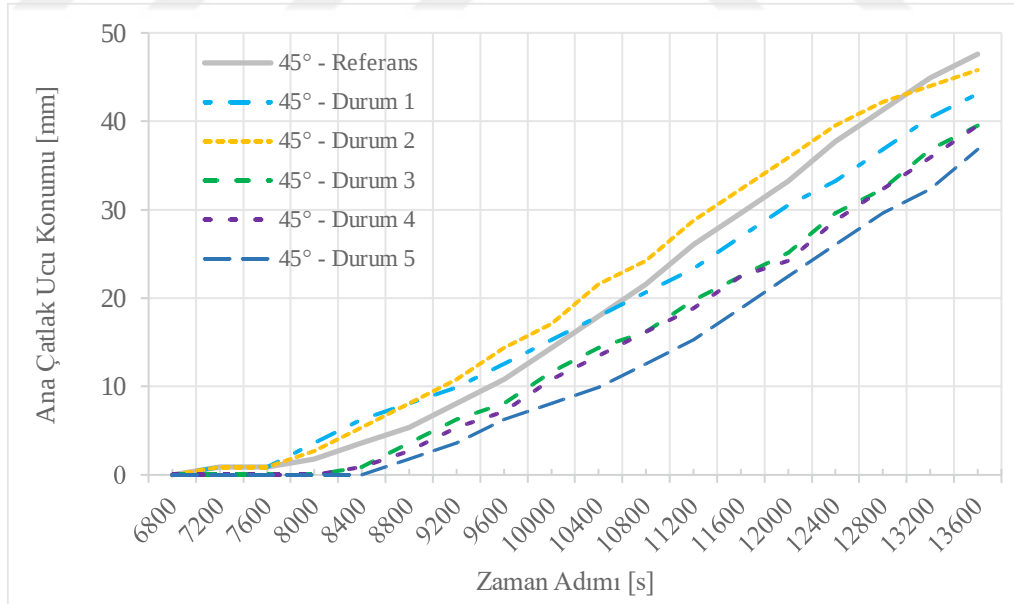


Şekil 6.14. Fiber açısı 45° olan referans durumun ana çatlak ucu konum-zaman grafiği

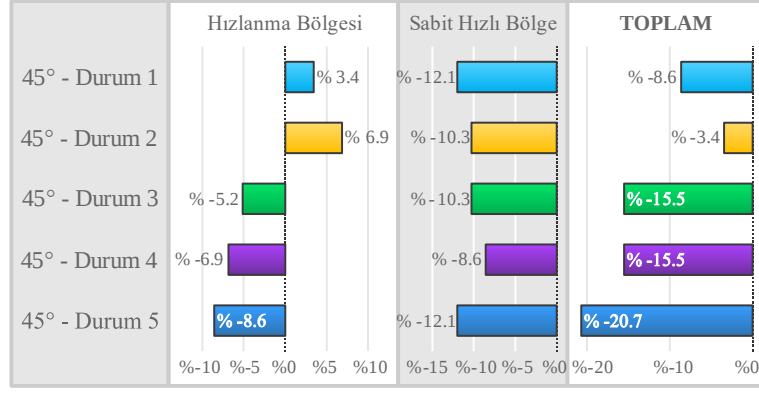


Şekil 6.15. Fiber açısı 45° olan referans durumun 13600. zaman adımında hasar ilerleme sonucu

Mikro çatlaksız referans durumda ana çatlak ilerleme hızı 9600. zaman adımı civarlarına kadar artmakta sonra neredeyse sabit bir hızla devam etmektedir (Şekil 6.14. ve Şekil 6.15.). 13600. zaman adımı civarlarında ise çatlakın plağın üst kenarına yaklaşmasından dolayı sabit hızlı gidişat bozulmaktadır (Şekil 6.14. ve Şekil 6.15.). Dolayısıyla referans duruma ait 13600. zaman adımı kıyas noktası olarak belirlenmiştir. Diğer durumların 13600. zaman adımıdaki ana çatlak boylarının referans duruma göre değişim oranları grafiği ve sonuç görselleri sırasıyla Şekil 6.17. ve Şekil 6.18.'de sunulmaktadır.



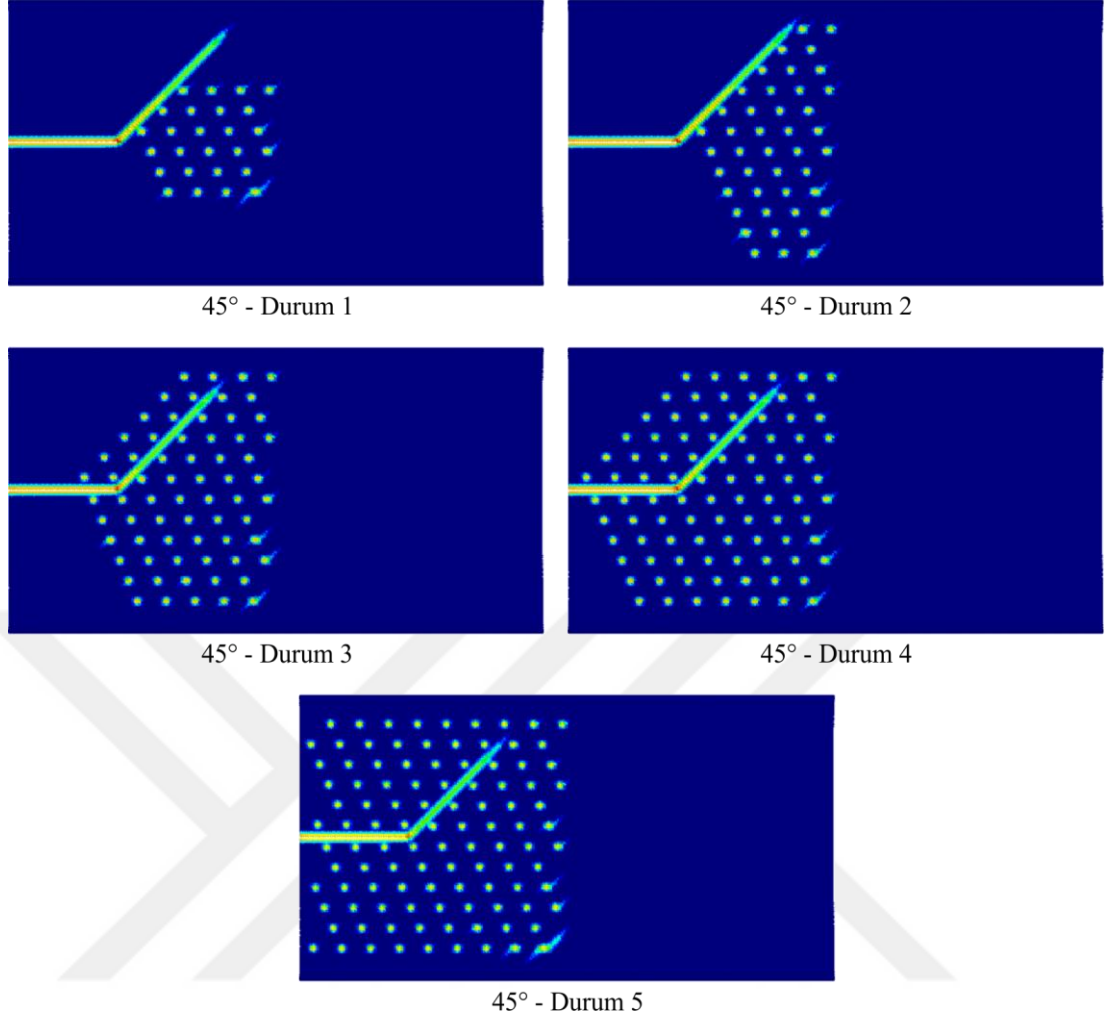
Şekil 6.16. Fiber açısı 45° olan durumların ana çatlak ucu konum-zaman grafiği



Şekil 6.17. Fiber açısı 45° olan durumların 13600. zaman adımında ana çatlak ilerleme boyunun referans duruma göre % değişim grafiği

İlk iki durumda mikro çatlakların tamamı ana çatlak ilerleme güzergahının altında kalacak şekilde yerleştirilmiştir. Ana çatlak ilerleyişi mikro çatlak alanlarının yakınından geçerken referans duruma göre daha hızlı ilerlemekte ve bu alanların bitimine yakın referans duruma göre daha yavaş ilerleyerek sırasıyla %-8,6 ve %-3,4 ana çatlak boyunda azalma elde edilmektedir. Buradaki bölgesel hızlanmalar ana çatlak ilerleme güzergahının her iki yanındaki fiber dengesinin mikro çatlaklardan dolayı bozulmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Sonraki üç durumda bu dengeyi sağlayacak şekilde mikro çatlak bölgesi ana çatlak ilerleme güzergahının üstünde ve gerisinde olacak şekilde genişletilmiştir ve sonuç olarak ana çatlak boyunda ortalama %-17,2 azalma gerçekleşmiştir.

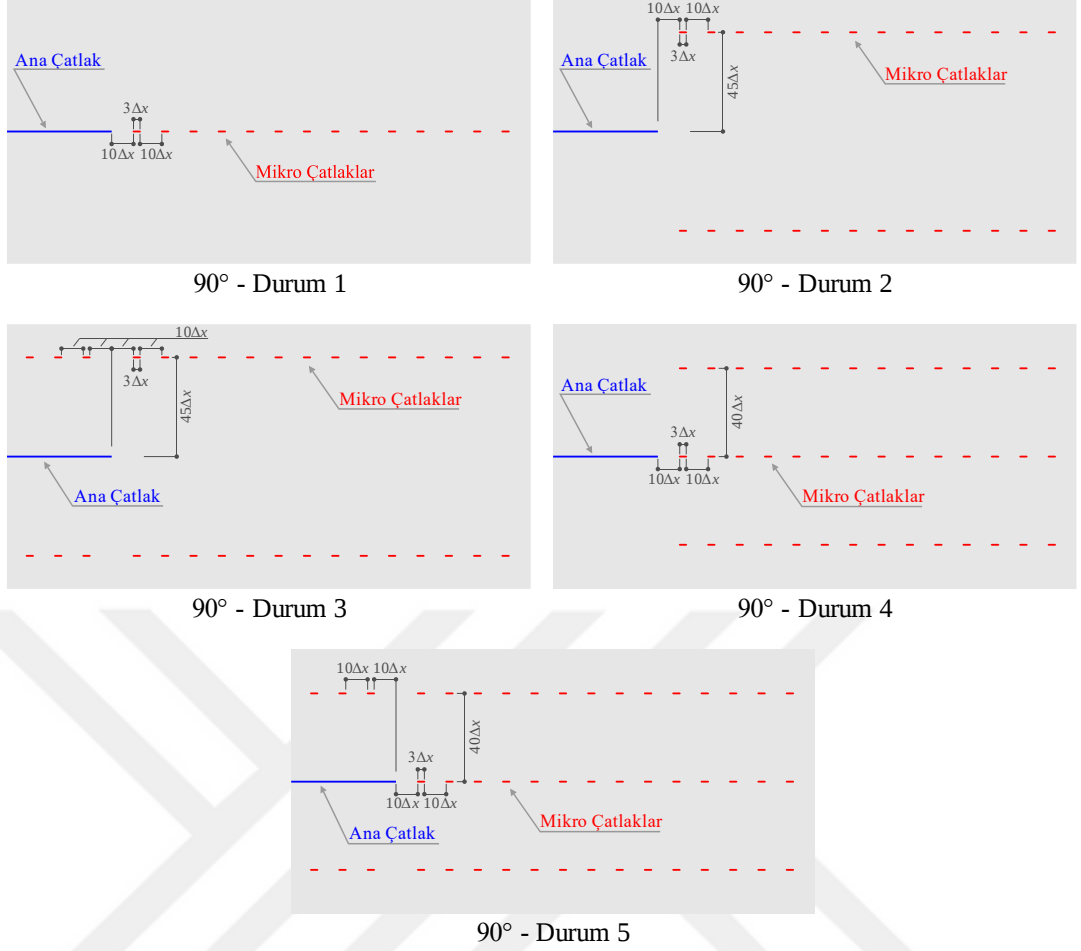
İlk iki durumda ana çatlak ilerleme güzergahının her iki yanındaki mikro çatlak dengesi sağlanmadığı için başlangıçta ana çatlak referans duruma göre daha hızlı ilerlemektedir. Sonrasında bu kayıplarda toparlanma meydana gelmekte ve 13600. zaman adımına gelindiğinde ana çatlak boyunda kısalmaya sonucu elde edilmektedir. Diğer üç durumda ise ana çatlak stabilitesinin bozulma anının (ilerlemeye başladığı anın) 1200 ile 1600 adım ötelenmesinin ardından benzer ilerleme gidişatı ortaya çıkmaktadır. Sonuç olarak mikro çatlak konumlandırmasının ana çatlak ilerleme güzergahının her iki yanında dengeli olması bu olumsuz etkiyi gidermektedir. Bunun yanında ana çatlak stabilitesinin bozulup ilerlemeye başlamasını geciktirmede ana çatlak ucu hizasının gerisine yapılacak mikro çatlak konumlandırmalarının oldukça etkin olduğu görülmektedir.



Şekil 6.18. Fiber açısı 45° olan durumların 13600. zaman adımında hasar ilerleme sonuçları

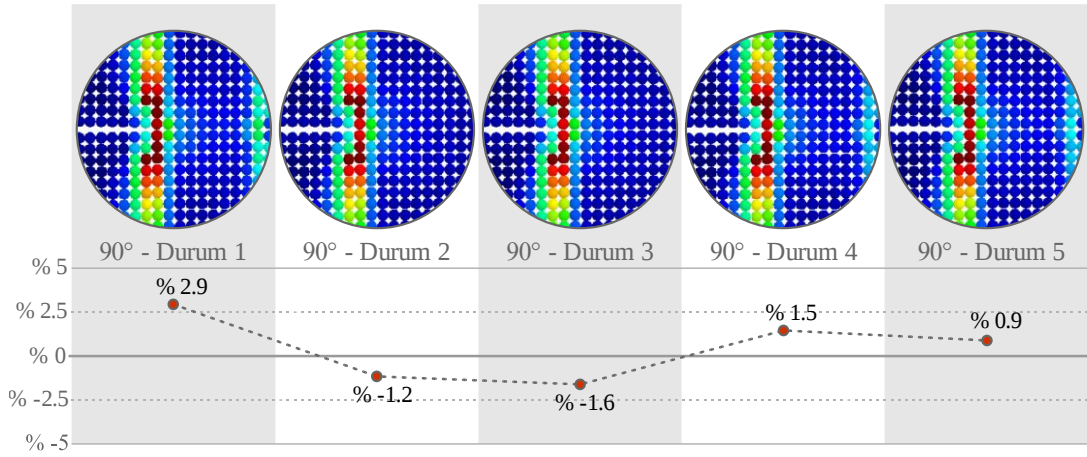
6.1.3. Fiber Açısı 90° Olan Durumlar

90° fiber yönelimine sahip kompozit tabakada herhangi bir mikro çatlak olmadığı durumda ilerleme fiber doğrultusunda her iki yönde devam ederek plağın alt ve üst kenarına ulaşmaktadır (Şekil 6.23.). Mikro çatlaksız referans durum için ilerleme hızı 6400. zaman adımı civarlarına kadar artmakta ve ardından diğer fiber yönelimli durumlardan farklı olarak da yavaşlama meydana gelmektedir. Ana çatlakın ilerlemeye başlamasını geciktirmek için çatlak ucundaki gerilme yığılması artışını yavaşlatmaya yönelik mikro çatlak tasarımları oluşturulmaya çalışılmıştır. Şekil 6.19.’daki gibi sırasıyla 14, 28, 34, 42 ve 48 adet mikro çatlakla sahip beş durum ele alınmıştır. Bütün durumlarda mikro çatlaklar ana çatlak doğrultusuna simetriktir ve konumlandırmalar da belli bir dizilimin tekrarı şeklinde olduğundan dolayı gösterimde yalınlik açısından sadece dizilime ait ölçüler verilmiştir.



Şekil 6.19. Fiber açısı 90° olan durumların mikro çatlak dağılım şekilleri ve detayları

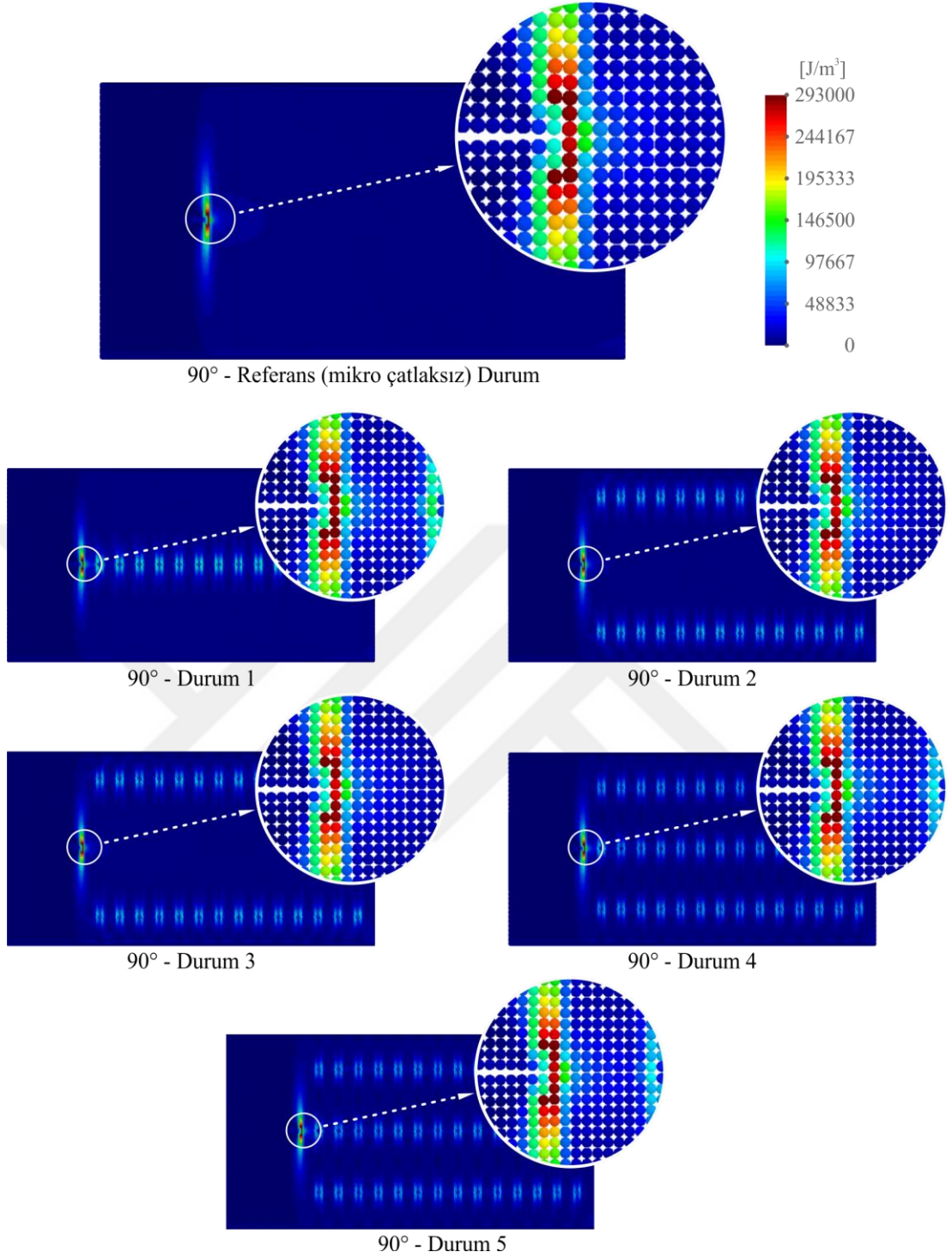
İlk olarak ana çatlak ucundaki şekil değiştirme enerji yoğunluğunun mikro çatlaklar dahil edildiğinde nasıl değiştiği değerlendirilmiştir. Referans durum olan mikro çatlaksız durumda ana çatlak stabilitesi bozulmadan önce (4000. zaman adımında) ana çatlak ucu şekil değiştirme enerji yoğunluğu değeri, aynı zaman adımı için diğer bütün durumlardaki değerler ile kıyaslanarak mikro çatlak dağılımlarının etkileri değerlendirilmiştir. Ana çatlak ucundaki ortalama şekil değiştirme enerji yoğunluğu değerlerinin referans duruma göre değişimi Şekil 6.20.'de sunulmuştur.



Şekil 6.20. Fiber açısı 90° olan durumların 4000. zaman adımında ana çatlak ucu şekil değiştirme enerji yoğunluğu sonuçları ve referans duruma göre % değişim grafiği

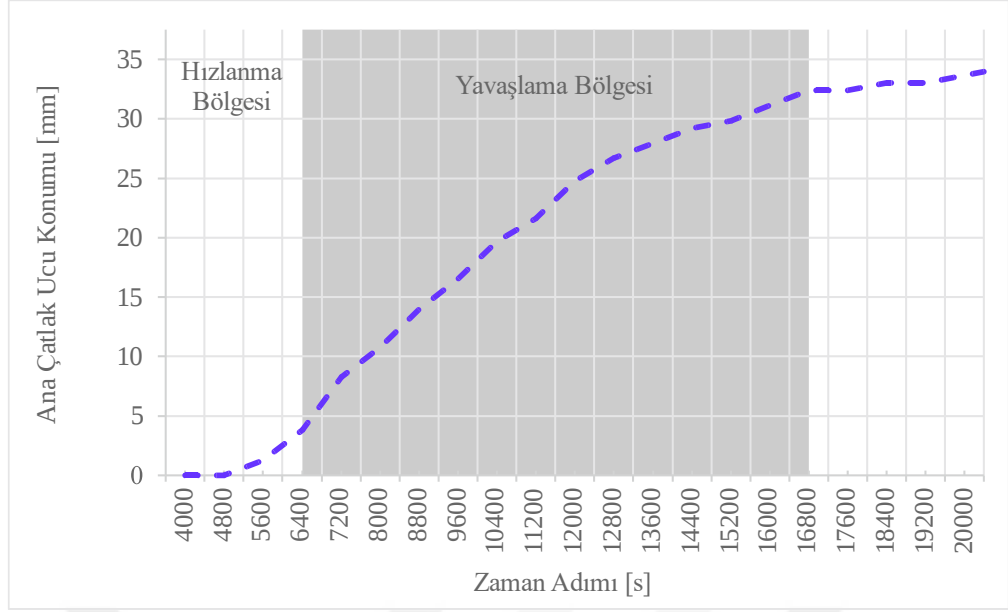
Mikro çatlakların, ana çatlak ucu şekil değiştirme enerji yoğunluklarını azaltmada sınırlı kaldığı hatta bazı durumlarda olumsuz etkilediği söylenebilir. Sonuçlara göre sadece ikinci ve üçüncü durumlarda ortalama %-1,4'lük azalama var iken, diğer üç durumda %0,9 ile %2,9 arasında artışlar meydana gelmiştir (Şekil 6.20. ve Şekil 6.21.). Bu üç durumda meydana gelen artışın sebebi ana çatlak ucu yakınındaki mikro çatlaklardan dolayı kopan fiberlerin taşınması gereken yükün, komşu fiberlere dağılması ile civar matrise ek yük getirmesinden kaynaklı olduğu düşünülmektedir.

Mikro çatlakların, ana çatlak ucu şekil değiştirme enerji yoğunluklarını azaltmada yetersiz kalmasında fiber doğrultusu ile yükleme doğrultusunun çakışmasının etkin olduğu düşünülmektedir. Bütün yük fiberlerin üzerindeyken mikro çatlaklardan dolayı süreksizliğe uğrayan fiberlerin oluşturdukları dilimlerin sınırlarında matris-fiber sıyrılması kolaylıkla meydana gelmektedir (Şekil 6.26.). Bu da mikro çatlakların ana çatlak ucu enerji yoğunluklarını azaltmak yerine, yeni çatlakların oluşup ilerlemesine ve dolayısıyla plakta daha fazla hasarın oluşmasına sebep olmaktadır.



Şekil 6.21. Fiber açısı 90° olan durumların 4000. zaman adımında şekil değiştirme enerji yoğunluğu sonuçları

Sonraki aşamada ise ana çatlak stabilitesinin bozulup ilerlemeye başlamasının ardından ana çatlak ucunun konum-zaman değişimi üzerine mikro çatlakların etkisi değerlendirilmiştir. Ana çatlak ucunun konum-zaman grafiklerini inceleyecek olursak, hızlanma (ivmelenme) ve yavaşlama bölgesi olmak üzere iki majör bölge gözlemlenmektedir.

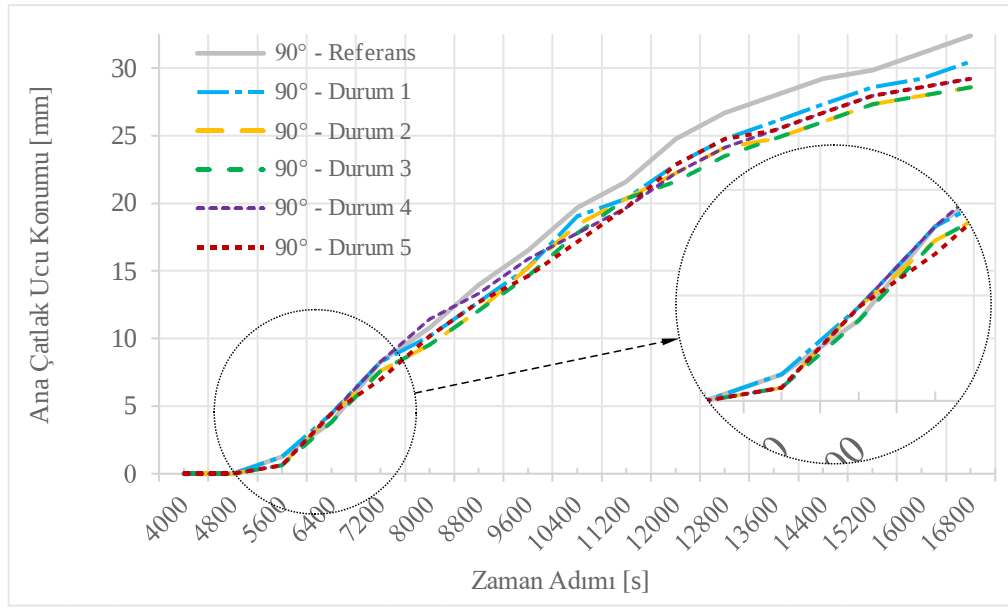


Şekil 6.22. Fiber açısı 90° olan referans durumun ana çatlak ucu konum-zaman grafiği

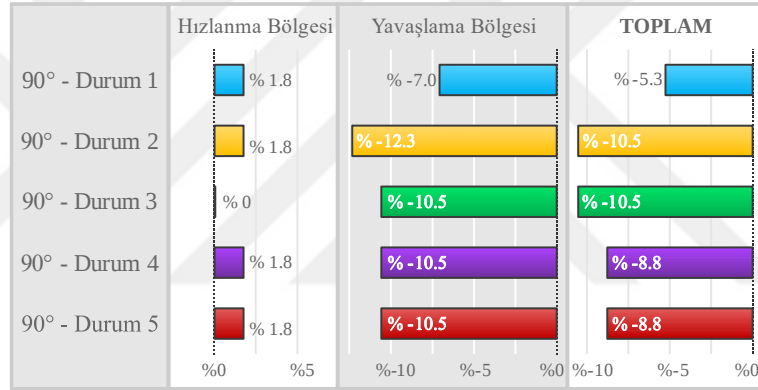


Şekil 6.23. Fiber açısı 90° olan referans durumun 16800. zaman adımında hasar ilerleme sonucu

Mikro çatlaksız durumda ana çatlak ilerleme hızı 6400. zaman adımı civarlarına kadar artmakta, sonra yavaşlamaya başlamaktadır (Şekil 6.22. ve Şekil 6.23.). 16800. zaman adımı civarlarında ise çatlak plağın üst kenarına yaklaşmasından dolayı duraksamalar meydana gelmektedir (Şekil 6.22. ve Şekil 6.23.). Dolayısıyla bu duraksamaların başladığı referans duruma ait 16800. zaman adımı kıyas noktası olarak belirlenmiştir. Diğer durumların 16800. zaman adımıdaki ana çatlak boylarının referans duruma göre değişim oranları grafiği ve sonuç görselleri sırasıyla Şekil 6.25. ve Şekil 6.26.'de sunulmaktadır.

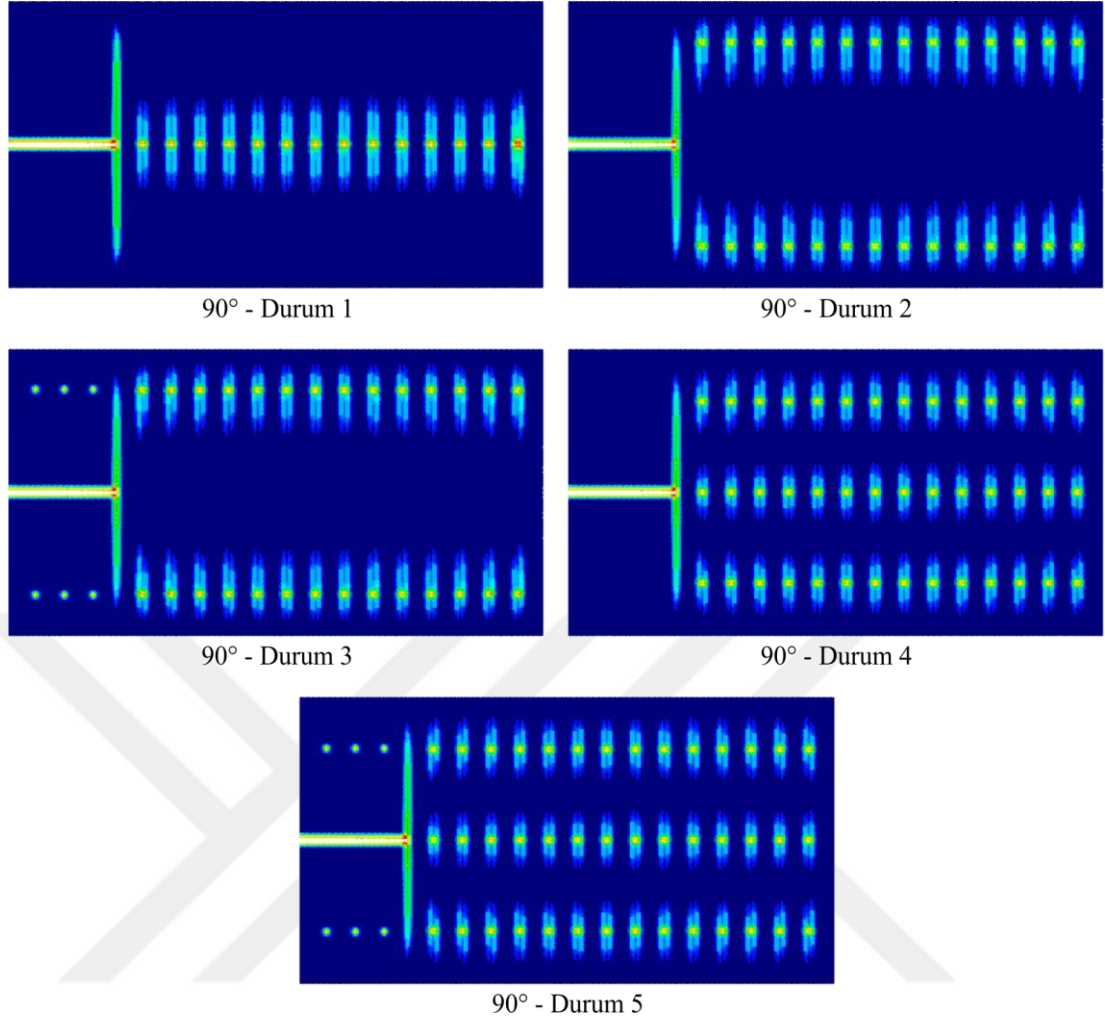


Şekil 6.24. Fiber açısı 90° olan durumların ana çatlak ucu konum-zaman grafiği



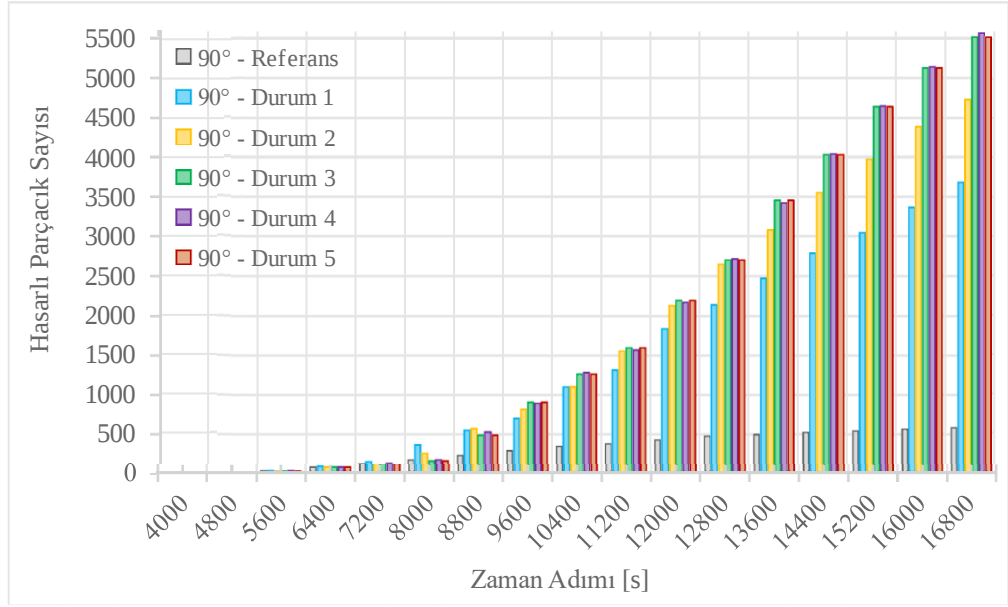
Şekil 6.25. Fiber açısı 90° olan durumların 16800. zaman adımında ana çatlak ilerleme boyunun referans duruma göre % değişim grafiği

Diğer fiber yönelim durumlarına ait sonuçlardan farklı olarak burada hiçbir durumun ivmelenme bölgesinde kısılma meydana gelmemiş, kısılmaların tamamı yavaşlama bölgesinde oluşmuştur. Oluşan bu kısılmaların nedeni de mikro çatlak uçlarından ilerleyen hasarların ana çatlak ilerlemesinden oluşan hasardan 6 ila 9 kat daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır (Şekil 6.27.).



Şekil 6.26. Fiber açısı 90° olan durumların 16800. zaman adımında hasar ilerleme sonuçları

Mikro çatlaklardan dolayı oluşan bu hasarlı parçacık sayısı 8800. zaman adımına gelindiğinde referansa göre bütün durumlarda ortalama 2 kat daha fazladır (Şekil 6.27.). 16800. zaman adımına gelindiğinde ise bu rakam ortalama 8 kata ulaşmaktadır (Şekil 6.27.). Ana çatlak boyunca meydana gelen kısaltmalar mikro çatlaklardan kaynaklı yaygın hasarların enerji sönümlenmesi sonucu ortaya çıktığı düşünülmektedir. Mikro çatlakların yapıya elastiklik katma işlevini yerine getirememesi sebebiyle herhangi bir toklaşma gelişmemekte ve plak bütünlüğünü tehdit edecek mertebelerde hasar meydana gelmektedir. Dolayısıyla, yaygın hasar kaynaklı ortaya çıkan ana çatlak boyundaki kısaltmalar ile tokluk elde edildiği sonucunu söylemek pek mümkün değildir. Mikro çatlak sayısının artmasıyla genel hasar daha da artmakta ve istenen amaçtan gittikçe uzaklaşmaktadır. Sonuç olarak 90° fiber yönelimli durumda mikro çatlak ile tokluk artırımının etkin olmadığı ortaya çıkmaktadır.



Şekil 6.27. Fiber açısı 90° olan durumların hasarlı parçacık sayısını zamana göre değişim grafiği

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

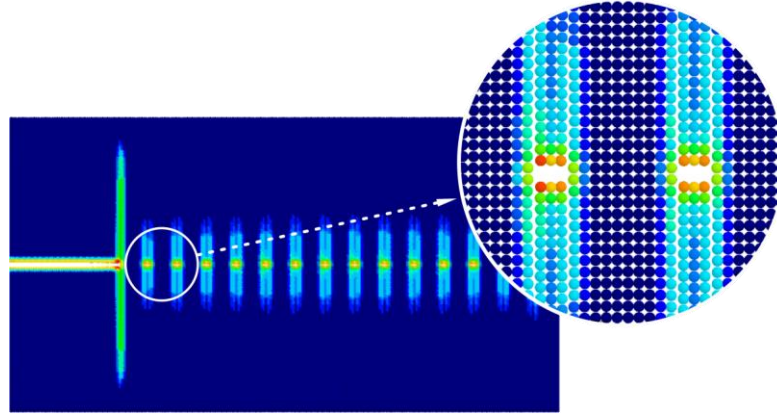
Birçok disiplinde ve çeşitli problemlerde Peridinamik yaygın olarak kullanılmasına rağmen, mikro çatlak ile tokluk artırım stratejilerine yönelik literatürde herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Dolayısıyla, tez kapsamında gevrek malzemelerde mikro çatlakların, yapının tokluğu ve mevcut bir ana çatlağın davranışı üzerine etkisi Bağ Tabanlı Peridinamik model kullanılarak incelenmiştir. İzotropik ve kompozit olmak üzere iki farklı malzeme türü ele alınmıştır. Bu amaca yönelik analizler MatLab üzerinden oluşturulan kodlar ile gerçekleştirilmiş ve sonuçlar GiD yazılımı ile görselleştirilmiştir.

İlk çalışmada, Bağ Tabanlı Peridinamik model kullanılarak eğimli ve/veya eğrisel formlara sahip kompleks mikro çatlak dizilimlerinin izotropik plakların tokluk artırımına yönelik dinamik analizleri literatürde ilk defa ele alınmıştır. Sonuçlardan özetle yapılabilecek çıkarım, ana çatlak ucuna olabilecek en yakın noktada dallanmanın gerçekleşmesiyle enerji sönümlemesi hızlanmakta ve tam kopma için gereken süreyi uzatmaktadır. Bu dallanma ne kadar artarsa enerji sönümlemesi de o kadar hızlanmaktadır. Ayrıca mikro çatlakların yönelim açılarının ilerleyiş şekli üzerinde önemli etkisi mevcuttur. Ana çatlak önünde kalan bölgede ilerleme yönüne dik mikro çatlaklar daha etkin şekilde dallanmayı sağlamakta ama bu açı paralelliğe yaklaştığında ana çatlağın daha hızlı ilerlemesine sebep olmaktadır. Diğer taraftan paralel mikro çatlakların, ana çatlağın alt ve üst bölgelerinde konumlanması çatlak ucu enerji yığılmasını yavaşlatmakta ve ana çatlağın stabilitesi daha büyük yüklere kadar korunabilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre, ana çatlak boyunda %-7,7 kısalma ile en etkin toklaştırma etkisi ana çatlak ucunun gerisine doğru sarkan hilal formundaki mikro çatlak dağılımına ait olduğu görülmüştür.

İlk çalışma için yukarıda yapılan temel tespitlerin yanı sıra değinilmesi gereken diğer bir husus ise, referans durumda yapı mikro çatlaksız olmasına rağmen ana çatlağın belli bir süreden sonra dallanmasının, 2.5. bölümünde de ifade edildiği üzere dinamik kırılmanın özelliklerinden biri olan yansıyan gerilme dalgalarının mevcudiyetinden kaynaklı olduğu anlaşılmaktadır. Bu dalga etkisi, dikkat edilirse bütün durumların hız alan değerleri sonuçlarında gözlemlenebilir. Bununla birlikte deneme analizleri sırasında aynı duruma ait farklı materyal parçacık yoğunluğu için yapılan çözümlerinde dallanma formlarında kısmi farklılıkların olduğu tespit edilmiştir. Bunun da teoremin minör bir kusuru olduğu düşünülmektedir.

İkinci çalışmada, yarı-statik (quasi-static) yükleme etkisi altındaki çeşitli fiber yönelimlerine sahip kompozit tabakaları mikro çatlak ile tokluk artırım stratejileri Bağ Tabanlı Peridinamik ile modellenmiştir. Kompozitin yapısı itibari ile herhangi bir hasar/çatlak mevcudiyetinde çatlak ilerlemesi zayıf ara yüz olan matris üzerinde yani fiber doğrultusuna paralel olmaktadır. Dolayısıyla ana çatlağı saptırmaya ve dallandırmaya yönelik eğimli mikro çatlak toklaştırma stratejisi sonuç vermemektedir. Bu nedenle, mikro çatlakları yüklemeye dik doğrultuda yönlendirerek açılma deformasyonlarından olabildiğince faydalanarak tabakaya elastiklik kazandırılması hedeflenmiş ve böylece literatürde ilk kez kompozit tabakalarda mikro çatlak toklaşması Peridinamik modelleri ortaya konmuştur. Sonuçlar incelendiğinde 0° ve 45° için mikro çatlak ile tokluk artırımı sağlanabiliyorken, 90° için aynı durum söz konusu değildir. 90° 'de mikro çatlak kullanımı sadece hasarın kontrolsüz şekilde artmasına ve istenmeyen boyutlara ulaşmasına neden olmaktadır. Oluşan bu hasar referans durumun 9 katı mertebesine kadar ulaşmaktadır (Şekil 6.27.). Bunun sebebi, yükün doğrudan fiberlere etkimesi sonucu mikro çatlakların kopardığı fiber demetlerinin zayıf ara yüz olan matris boyunca blok halinde sıyrılmasıdır (Şekil 7.1.). Sonuç olarak, elastikliği artırmak amacıyla kullanılan mikro çatlakların, bu fonksiyonu ile toklaşma sağlamadığı ve mikro çatlakların dallanmaları neticesinde yüksek mertebede hasar meydana getirdiği görülmektedir. Dolayısıyla yapının toklaşma evresine erişmeden önce hasara maruz kaldığı gözlenmiştir. Diğer taraftan, 0° ve 45° 'lik diğer iki açı durum için ana çatlak gerisine yapılan konumlandırmalarla stabilitesinin bozulma anını öteleyecek tespitler ortaya konulmuştur. Stabilitesinin bozulup ana çatlağın ilerlediği süreçte de ilerleme hattını etrafında mikro çatlak konumlandırmasıyla ilerleme hızlarında yavaşlama elde edilmiştir. 0° ve 45° 'lik durumlar içerisinde en etkin olanlarında ana çatlak boyundaki kısalma oranları sırasıyla %-30,9 ve %-20,7 olarak elde edilmiştir.

Tez kapsamında ele alınan izotropik ve kompozit malzemelerdeki toklaştırma performansları birbirleri ile kıyaslanmamıştır. Çünkü bu iki grupta kullanılan toklaştırma stratejileri, malzemelerin iç yapısı gereğince birbirinden farklı olmasındandır.



Şekil 7.1. 90° fiber açılı kompozit tabakada 16800. zaman adımında mikro çatlak uçlarından başlayan fiber-matris sıyrılması

Tez çalışmasında özetle;

- İzotropik plakların dinamik yükleme durumunda ana çatlak ucu gerisinde yapıya elastiklik kazandırmaya yönelik; önünde ise ilerleme hattından saptırılıp dallanması sağlanarak enerji sönümlemesini artırmaya/hızlandırmaya yönelik mikro çatlak toklaştırma stratejileri uygulanmıştır.
- Kompozit tabakaların yarı-statik (quasi-static) yükleme durumları için ise ana çatlak ucu önünde izotropik durumlar ile benzer saptırma ve dallandırma stratejisi, ana çatlağın zayıf ara yüzü olan matris üzerinden ilerleme eğiliminden dolayı işe yaramamıştır. Dolayısıyla kompozit tabakaların tüm durumları için ana çatlak ucu gerisinde ve önünde mikro çatlak doğrultularını yüklemeye dik olacak şekilde konumlandırarak mikro çatlak açılma deformasyonu kapasitesinden olabildiğince yararlanılmış ve mikro çatlakların çatlak etkileşimlerine dahil olmadan tabakaya daha fazla elastiklik kazandırılarak tokluk artırım stratejisi oluşturulmuştur.

Sunulan modeller için sınırlayıcı koşulların ise Poisson oranının $\frac{1}{3}$ ile sabit olması ve iki boyutlu düzlem gerilme halindeki sistemler için geçerli olduğu ifade edilmelidir. Elde edilen sonuç ve bulguların olgunlaşabilmesi için 200'ün üstünde analiz gerçekleştirilmiştir. Peridinamiğin kırılma analizlerindeki tutarlılığı ve güvenilirliği sayesinde deneysel olarak gerçekleştirilemeyecek sayı ve formdaki bu analizler numerik olarak incelenebilmiştir. Bu analizlerle Peridinamiğin hiçbir ek koşul ve sınırlamaya bağlı kalmaksızın kompleks çatlak etkileşimini simüle etmedeki üstünlüğü ortaya konmuştur. Elde edilen sonuç ve gözlemler, sunulan modellerin,

mikro yapısal tasarım ile tokluk artırımı sağlanacak yeni nesil gevrek malzemelere fayda sağlayacağı düşünülmekte ve oluşturulan Peridinamik modelin daha birçok farklı mikro çatlak dağılımının toklaştırma mekanizmasını gözlemlemek için kullanılabileceğini göstermektedir. İleriye yönelik mikro çatlakların konumlanmalarının optimizasyon metodolojileri ile sağlanıp Peridinamik üzerinde analizlerin gerçekleştirildiği entegre çalışan bir çözüm ortaya konulabileceği düşünülmektedir.

7.1. Tezin Çıktıları

Tez çalışmasından literatüre katkı olarak üç konferans bildirisi (Basoglu et al., 2018, 2019c, 2021) ve iki makale üretilmiştir. İzotropik plaklar üzerine olan çalışmadan üretilen makale (Basoglu et al., 2019b), SCI kapsamında Q2 kategorisinde uluslararası bir dergide yayınlanmıştır. Kompozit tabakalar üzerine olan çalışmadan oluşturulan makale ise inceleme aşamasındadır. Bunların yanında, tez kapsamı dışında da üç konferans bildirisi (Atasoy et al., 2019; Basoglu et al., 2019a; Uzun et al., 2014) ve dört makale (Turan et al., 2017; Uzun et al., 2015; Zerín et al., 2017; Zerín et al., 2016) ile literatüre katkı sunulmuştur.

KAYNAKLAR

- AlKhateab, B., Tabrizi, I. E., Zanjani, J. S. M., Rahimi, M. N., Poudeh, L. H., Kefal, A. and Yildiz, M. (2020). Damage mechanisms in CFRP/HNT laminates under flexural and in-plane shear loadings using experimental and numerical methods. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 136. 105962. doi:10.1016/j.compositesa.2020.105962
- Anderson, T. L. (2017). *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications*. New York: CRC press.
- Askari, E., Bobaru, F., Lehoucq, R. B., Parks, M. L., Silling, S. A. and Weckner, O. (2008). Peridynamics for multiscale materials modeling. *Journal of Physics: Conference Series*. 125(1). 012078. doi:10.1088/1742-6596/125/1/012078
- Atasoy, O., Turan, F., Zerin, Z. and Basoglu, M. F. (2019, Nisan). "Buckling analysis of non-homogeneous orthotropic plates based on shear deformation theory". 4. *International Conference on Civil, Environmental, Geology and Mining Engineering*, Turkey, Trabzon.
- Ayatollahi, M. R. and Aliha, M. R. M. (2009). Analysis of a new specimen for mixed mode fracture tests on brittle materials. *Engineering Fracture Mechanics*. 76(11). 1563-1573. doi:10.1016/j.engfracmech.2009.02.016
- Basoglu, M. F., Kefal, A. and Hasim, K. A. (2019a, Eylül). "Modeling Of Thick Composite Structures With An Eight-Node Curved Shell Element By Using The Refined Zigzag Theory". *7th ECCOMAS Thematic Conference on the Mechanical Response of Composites: COMPOSITES 2019*, The European Community on Computational Methods in Applied Sciences, Spain, Girona.
- Basoglu, M. F., Zerin, Z., Kefal, A. and Oterkus, E. (2018, Eylül). "Peridynamics Simulations on the Deflecting Propagation of Cracks with Minor Cracks". *28th International Workshop on Computational Mechanics of Materials (IWCMM 28)*, UK, Scotland, Glasgow.
- Basoglu, M. F., Zerin, Z., Kefal, A. and Oterkus, E. (2019b). A computational model of peridynamic theory for deflecting behavior of crack propagation with micro-cracks. *Computational Materials Science*. 162. 33-46. doi:10.1016/j.commatsci.2019.02.032
- Basoglu, M. F., Zerin, Z., Kefal, A. and Oterkus, E. (2019c, Kasım). "Increasing Toughness by Introducing Micro-cracks". *IMECE 2019 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, The American Society of Mechanical Engineers, USA, Utah.
- Basoglu, M. F., Zerin, Z., Kefal, A. and Oterkus, E. (2021, Haziran). "Development of a Micro-Crack Toughening Mechanism for Unidirectional Composite Plates by using Peridynamics". *24th International Conference on Composite Structures (ICCS24)*, Portugal, Porto.
- Belytschko, T. and Black, T. (1999). Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 45(5). 601-620. doi:10.1002/(SICI)1097-0207(19990620)45:5<601::AID-NME598>3.0.CO;2-S
- Benedetti, M., Fontanari, V., Monelli, B. D. and Beghini, M. (2015). A fully parametric weight function for inclined edge cracks with a kink. *Engineering Fracture Mechanics*. 136. 195-212. doi:10.1016/j.engfracmech.2015.01.029
- Bleyer, J., Roux-Langlois, C. and Molinari, J.-F. (2017). Dynamic crack propagation with a variational phase-field model: limiting speed, crack branching and velocity-toughening mechanisms. *International Journal of Fracture*. 204(1). 79-100. doi:10.1007/s10704-016-0163-1

- Bobaru, F., Foster, J. T., Geubelle, P. H. and Silling, S. A. (2016). *Handbook of peridynamic modeling*. CRC press.
- Bobaru, F. and Hu, W. (2012). The Meaning, Selection, and Use of the Peridynamic Horizon and its Relation to Crack Branching in Brittle Materials. *International Journal of Fracture*. 176(2). 215-222. doi:10.1007/s10704-012-9725-z
- Bobaru, F. and Zhang, G. (2015). Why do cracks branch? A peridynamic investigation of dynamic brittle fracture. *International Journal of Fracture*. 196(1). 59-98. doi:10.1007/s10704-015-0056-8
- Bocca, P., Carpinteri, A. and Valente, S. (1991). Mixed mode fracture of concrete. *International Journal of Solids and Structures*. 27(9). 1139-1153. doi:10.1016/0020-7683(91)90115-V
- Brelich, A. and Carpinteri, A. (1998). Stress field interaction and strain energy distribution between a stationary main crack and its process zone. *Engineering Fracture Mechanics*. 59(6). 797-814. doi:10.1016/S0013-7944(97)00158-6
- Broek, D. (1982). "Practical problems". in: *Elementary engineering fracture mechanics* (347-376). Netherlands: Springer.
- Budyn, É., Zi, G., Moës, N. and Belytschko, T. (2004). A method for multiple crack growth in brittle materials without remeshing. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 61(10). 1741-1770. doi:10.1002/nme.1130
- Cui, H., Wang, W., Li, A., Li, M., Xu, S. and Liu, H. (2010). Failure analysis of the brittle fracture of a thick-walled 20 steel pipe in an ammonia synthesis unit. *Engineering Failure Analysis*. 17(6). 1359-1376. doi:10.1016/j.engfailanal.2010.04.002
- De Meo, D., Diyaroglu, C., Zhu, N., Oterkus, E. and Siddiq, M. A. (2016). Modelling of stress-corrosion cracking by using peridynamics. *International Journal of Hydrogen Energy*. 41(15). 6593-6609. doi:10.1016/j.ijhydene.2016.02.154
- Ducourthial, E., Bouchaud, E. and Chaboche, J. L. (2000). Influence of microcracks on a propagation of macrocracks. *Computational Materials Science*. 19(1). 229-234. doi:10.1016/S0927-0256(00)00159-2
- Dugdale, D. S. (1960). Yielding of steel sheets containing slits. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 8(2). 100-104. doi:10.1016/0022-5096(60)90013-2
- Evans, A. G. and Faber, K. T. (1984). Crack-Growth Resistance of Microcracking Brittle Materials. *Journal of the American Ceramic Society*. 67(4). 255-260. doi:10.1111/j.1151-2916.1984.tb18842.x
- Evans, A. G. and Fu, Y. (1985). Some effects of microcracks on the mechanical properties of brittle solids—II. Microcrack toughening. *Acta Metallurgica*. 33(8). 1525-1531. doi:10.1016/0001-6160(85)90053-7
- Faber, K. T. and Evans, A. G. (1983). Crack deflection processes—I. Theory. *Acta Metallurgica*. 31(4). 565-576. doi:10.1016/0001-6160(83)90046-9
- Fanni, M., Fouda, N., Shabara, M. A. N. and Awad, M. (2015). New crack stop hole shape using structural optimizing technique. *Ain Shams Engineering Journal*. 6(3). 987-999. doi:10.1016/j.asej.2015.02.010
- Feng, X.-Q., Li, J.-Y., Ma, L. and Yu, S.-W. (2003). Analysis on interaction of numerous microcracks. *Computational Materials Science*. 28(3). 454-461. doi:10.1016/j.commatsci.2003.06.001
- Ferdous, M. S., Naka, K., Makabe, C. and Miyazaki, T. (2015). A Review of Simple Methods for Arresting Crack Growth. *Advanced Materials Research*. 1110. 185-190. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.1110.185

- Gerstle, W. H. (2015). *Introduction to practical peridynamics: computational solid mechanics without stress and strain*. New Mexico: World Scientific Publishing Company.
- Ghajari, M., Iannucci, L. and Curtis, P. (2014). A peridynamic material model for the analysis of dynamic crack propagation in orthotropic media. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 276. 431-452. doi:10.1016/j.cma.2014.04.002
- Griffith, A. A. (1921). VI. The phenomena of rupture and flow in solids. *Philosophical transactions of the royal society of london. Series A, containing papers of a mathematical or physical character*. 221(582-593). 163-198.
- Ha, Y. D. and Bobaru, F. (2010). Studies of dynamic crack propagation and crack branching with peridynamics. *International Journal of Fracture*. 162(1). 229-244. doi:10.1007/s10704-010-9442-4
- Ha, Y. D. and Bobaru, F. (2011). Characteristics of dynamic brittle fracture captured with peridynamics. *Engineering Fracture Mechanics*. 78(6). 1156-1168. doi:10.1016/j.engfracmech.2010.11.020
- Habibian, A., Sohouli, A., Kefal, A., Nadler, B., Yildiz, M. and Suleman, A. (2021). Multi-material topology optimization of structures with discontinuities using Peridynamics. *Composite Structures*. 258. 113345. doi:10.1016/j.compstruct.2020.113345
- Han, L. X., Warren, R. and Suresh, S. (1992). An experimental study of toughening and degradation due to microcracking in a ceramic composite. *Acta Metallurgica et Materialia*. 40(2). 259-274. doi:10.1016/0956-7151(92)90301-T
- Hannink, R. H. J. (1994, September). "Toughening Mechanisms for Ceramics". *Proceedings of the Symposia CC: Superlattice DD: Surfaces and Interfaces HH: Superconducting Materials of the 3rd IUMRS International Conference on Advanced Materials*, Elsevier, Japan, Tokyo, Ikebukuro, Sunshine City.
- Hillerborg, A., Mod  r, M. and Petersson, P. E. (1976). Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. *Cement and Concrete Research*. 6(6). 773-781. doi:10.1016/0008-8846(76)90007-7
- Huang, D., Lu, G. and Qiao, P. (2015). An improved peridynamic approach for quasi-static elastic deformation and brittle fracture analysis. *International Journal of Mechanical Sciences*. 94-95. 111-122. doi:10.1016/j.ijmecsci.2015.02.018
- Huang, Y. and Kinloch, A. J. (1992). Modelling of the toughening mechanisms in rubber-modified epoxy polymers. *Journal of Materials Science*. 27(10). 2753-2762. doi:10.1007/BF00540702
- Hutchinson, J. W. (1987). Crack tip shielding by micro-cracking in brittle solids. *Acta Metallurgica*. 35(7). 1605-1619. doi:10.1016/0001-6160(87)90108-8
- Infante, V., Silva, J. M., Silvestre, M. A. R. and Baptista, R. (2013). Failure of a crankshaft of an aeroengine: A contribution for an accident investigation. *Engineering Failure Analysis*. 35. 286-293. doi:10.1016/j.engfailanal.2013.02.002
- Inglis, C. E. (1913). Stresses in a plate due to the presence of cracks and sharp corners. *Trans Inst Naval Archit*. 55. 219-241.
- Irwin, G. R. (1956). Onset of fast crack propagation in high strength steel and aluminum alloys. *Sagamore Research Conference Proceedings*. 2. 289-305.
- Irwin, G. R. (1957). Analysis of Stresses and Strains Near the End of a Crack Traversing a Plate. *Journal of Applied Mechanics*. 24(3). 361-364. doi:10.1115/1.4011547
- Javili, A., Morasata, R., Oterkus, E. and Oterkus, S. (2019). Peridynamics review. *Mathematics and Mechanics of Solids*. 24(11). 3714-3739. doi:10.1177/1081286518803411

- Jia, Z. and Wang, L. (2019). 3D printing of biomimetic composites with improved fracture toughness. *Acta Materialia*. 173. 61-73. doi:10.1016/j.actamat.2019.04.052
- Kachanov, M. (1986). On crack-microcrack interactions. *International Journal of Fracture*. 30(4). R65-R72. doi:10.1007/BF00019712
- Karpenko, O., Oterkus, S. and Oterkus, E. (2020). Influence of Different Types of Small-Size Defects on Propagation of Macro-cracks in Brittle Materials. *Journal of Peridynamics and Nonlocal Modeling*. 2(3). 289-316. doi:10.1007/s42102-020-00032-z
- Kefal, A., Sohoul, A., Oterkus, E., Yildiz, M. and Suleman, A. (2019). Topology optimization of cracked structures using peridynamics. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*. 31(6). 1645-1672. doi:10.1007/s00161-019-00830-x
- Kilic, B. (2008). *Peridynamic Theory for Progressive Failure Prediction in Homogeneous and Heterogeneous Materials*. Ph.D. thesis. The University of Arizona Department of Aerospace and Mechanical Engineering, 254, Arizona, Tucson.
- Kilic, B. and Madenci, E. (2010). Coupling of Peridynamic Theory and the Finite Element Method. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*. 5(5). 707-733. doi:10.2140/jomms.2010.5.707
- Kumar, S. and Curtin, W. A. (2007). Crack interaction with microstructure. *Materials Today*. 10(9). 34-44. doi:10.1016/S1369-7021(07)70207-9
- Li, X., Li, X. and Jiang, X. (2017). Influence of a micro-crack on the finite macro-crack. *Engineering Fracture Mechanics*. 177. 95-103. doi:10.1016/j.engfracmech.2017.03.037
- Li, X., Yang, H., Zan, X., Li, X. and Jiang, X. (2018). Effect of a micro-crack on the kinked macro-crack. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 96. 468-475. doi:10.1016/j.tafmec.2018.04.003
- Loehnert, S. and Belytschko, T. (2007). Crack shielding and amplification due to multiple microcracks interacting with a macrocrack. *International Journal of Fracture*. 145(1). 1-8. doi:10.1007/s10704-007-9094-1
- Madenci, E., Kefal, A., Dorduncu, M., Barut, A. and Yildiz, M. (2018, January). "Isogeometric analysis using peridynamics and XFEM". *2018 AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, USA, Florida, Kissimmee.
- Madenci, E. and Oterkus, E. (2014). *Peridynamic Theory and Its Applications*. New York: Springer.
- Madenci, E. and Oterkus, S. (2016). Ordinary state-based peridynamics for plastic deformation according to von Mises yield criteria with isotropic hardening. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 86. 192-219. doi:10.1016/j.jmps.2015.09.016
- Malvar, L. J. and Warren, G. E. (1988). Fracture energy for three-point-bend tests on single-edge-notched beams. *Experimental Mechanics*. 28(3). 266-272. doi:10.1007/BF02329022
- Miyagawa, H. and Nishitani, H. (1985). Retardation of Fatigue Crack Propagation Due to Additional Holes or Indentations in Plate Specimens. *Bulletin of JSME*. 28(244). 2219-2223. doi:10.1299/jsme1958.28.2219
- Moan, T. and Amdahl, J. (1989). Catastrophic failure modes of marine structures. *Structural failure*. 463-510.
- Moës, N., Dolbow, J. and Belytschko, T. (1999). A finite element method for crack growth without remeshing. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 46(1). 131-150. doi:10.1002/(SICI)1097-0207(19990910)46:1<131::AID-NME726>3.0.CO;2-J

- Oterkus, E. and Madenci, E. (2012). Peridynamic Analysis of Fiber-Reinforced Composite Materials. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*. 7(1). 45-84. doi:10.2140/jomms.2012.7.45
- Oterkus, E., Madenci, E., Weckner, O., Silling, S., Bogert, P. and Tessler, A. (2012). Combined finite element and peridynamic analyses for predicting failure in a stiffened composite curved panel with a central slot. *Composite Structures*. 94(3). 839-850. doi:10.1016/j.compstruct.2011.07.019
- Oterkus, S., Madenci, E. and Agwai, A. (2014a). Fully coupled peridynamic thermomechanics. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 64. 1-23. doi:10.1016/j.jmps.2013.10.011
- Oterkus, S., Madenci, E. and Agwai, A. (2014b). Peridynamic thermal diffusion. *Journal of Computational Physics*. 265. 71-96. doi:10.1016/j.jcp.2014.01.027
- Ozdemir, M., Kefal, A., Imachi, M., Tanaka, S. and Oterkus, E. (2020). Dynamic fracture analysis of functionally graded materials using ordinary state-based peridynamics. *Composite Structures*. 244. 112296. doi:10.1016/j.compstruct.2020.112296
- Petersson, P. E. (1981). *Crack growth and development of fracture zones in plain concrete and similar materials*. Ph.D. thesis. Lund University Lund Institute of Technology Division of Building Materials, 177, Sweden.
- Petrova, V., Tamuzs, V. and Romalis, N. (2000). A Survey of Macro-Microcrack Interaction Problems. *Applied Mechanics Reviews*. 53(5). 117-146. doi:10.1115/1.3097344
- Rahimi, M. N., Kefal, A. and Yildiz, M. (2021). An improved ordinary-state based peridynamic formulation for modeling FGMs with sharp interface transitions. *International Journal of Mechanical Sciences*. 197. 106322. doi:10.1016/j.ijmecsci.2021.106322
- Rahimi, M. N., Kefal, A., Yildiz, M. and Oterkus, E. (2020). An ordinary state-based peridynamic model for toughness enhancement of brittle materials through drilling stop-holes. *International Journal of Mechanical Sciences*. 182. 105773. doi:10.1016/j.ijmecsci.2020.105773
- Rao, G. M. N. and Murthy, C. R. (2001). Dual role of microcracks: toughening and degradation. *Canadian Geotechnical Journal*. 38(2). 427-440. doi:10.1139/t00-105
- Ravi-Chandar, K. and Yang, B. (1997). On the role of microcracks in the dynamic fracture of brittle materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 45(4). 535-563. doi:10.1016/S0022-5096(96)00096-8
- Rice, J. R. (1968). A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks. *Journal of Applied Mechanics*. 35(2). 379-386. doi:10.1115/1.3601206
- Rose, L. R. F. (1986). Microcrack interaction with a main crack. *International Journal of Fracture*. 31(3). 233-242. doi:10.1007/bf00018929
- Rubinstein, A. A. (1985). Macrocrack interaction with semi-infinite microcrack array. *International Journal of Fracture*. 27(2). 113-119. doi:10.1007/bf00040390
- Shang, S., Qin, X., Li, H. and Cao, X. (2019). An application of non-ordinary state-based peridynamics theory in cutting process modelling of unidirectional carbon fiber reinforced polymer material. *Composite Structures*. 226. 111194. doi:10.1016/j.compstruct.2019.111194
- Shin, Y.-S., Rhee, Y.-W. and Kang, S.-J. L. (1999). Experimental Evaluation of Toughening Mechanisms in Alumina-Zirconia Composites. *Journal of the American Ceramic Society*. 82(5). 1229-1232. doi:10.1111/j.1151-2916.1999.tb01900.x

- Shum, D. K. M. and Hutchinson, J. W. (1990). On toughening by microcracks. *Mechanics of Materials*. 9(2). 83-91. doi:10.1016/0167-6636(90)90032-b
- Silling, S. A. (2000). Reformulation of elasticity theory for discontinuities and long-range forces. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 48(1). 175-209. doi:10.1016/S0022-5096(99)00029-0
- Silling, S. A. (2010). Linearized Theory of Peridynamic States. *Journal of Elasticity*. 99(1). 85-111. doi:10.1007/s10659-009-9234-0
- Silling, S. A. and Askari, E. (2005). A meshfree method based on the peridynamic model of solid mechanics. *Computers and Structures*. 83(17). 1526-1535. doi:10.1016/j.compstruc.2004.11.026
- Silling, S. A., Epton, M., Weckner, O., Xu, J. and Askari, E. (2007). Peridynamic states and constitutive modeling. *Journal of Elasticity*. 88(2). 151-184.
- Silling, S. A. and Lehoucq, R. B. (2008). Convergence of Peridynamics to Classical Elasticity Theory. *Journal of Elasticity*. 93(1). 13. doi:10.1007/s10659-008-9163-3
- Silling, S. A., Weckner, O., Askari, E. and Bobaru, F. (2010). Crack nucleation in a peridynamic solid. *International Journal of Fracture*. 162(1). 219-227. doi:10.1007/s10704-010-9447-z
- Sneddon, I. N. and Mott, N. F. (1946). The distribution of stress in the neighbourhood of a crack in an elastic solid. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*. 187(1009). 229-260. doi:doi:10.1098/rspa.1946.0077
- Soh, A. K. and Yang, C. H. (2004). Numerical modeling of interactions between a macro-crack and a cluster of micro-defects. *Engineering Fracture Mechanics*. 71(2). 193-217. doi:10.1016/S0013-7944(03)00097-3
- Sohouli, A., Kefal, A., Abdelhamid, A., Yildiz, M. and Suleman, A. (2020). Continuous density-based topology optimization of cracked structures using peridynamics. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 62(5). 2375-2389. doi:10.1007/s00158-020-02608-1
- Tamuzs, V., Romalis, N. and Petrova, V. (1993). Influence of microcracks on thermal fracture of macrocrack. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 19(3). 207-225. doi:10.1016/0167-8442(93)90022-4
- Turan, F., Basoglu, M. F. and Zerín, Z. (2017). Analytical solution for bending and buckling response of laminated non-homogeneous plates using a simplified-higher order theory. *Challenge Journal of Structural Mechanics*. 3(1). 1-16. doi:10.20528/cjsmec.2017.02.001
- Uzun, İ., Güler, B., Özyürek, T. and Basoglu, M. F. (2014, Mayıs). "Mandibular premolar dişlerin kanal çaplarında görülen düzensizliklerin değerlendirilmesi". *Türk Endodonti Derneği 12. Uluslararası Kongresi*, Turkey, Istanbul.
- Uzun, İ., Güler, B., Özyürek, T. and Basoglu, M. F. (2015). Mandibular premolar dişlerin kanal çaplarında görülen düzensizliklerin değerlendirilmesi. *Atatürk Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Dergisi*. 25(1). 40-46. doi:10.17567/dfd.34850
- Vashishth, D., Behiri, J. C. and Bonfield, W. (1997). Crack growth resistance in cortical bone: Concept of microcrack toughening. *Journal of Biomechanics*. 30(8). 763-769. doi:10.1016/S0021-9290(97)00029-8
- Vashishth, D., Tanner, K. E. and Bonfield, W. (2003). Experimental validation of a microcracking-based toughening mechanism for cortical bone. *Journal of Biomechanics*. 36(1). 121-124. doi:10.1016/S0021-9290(02)00319-6

- Vazic, B., Wang, H., Diyaroglu, C., Oterkus, S. and Oterkus, E. (2017). Dynamic propagation of a macrocrack interacting with parallel small cracks. *AIMS Materials Science*. 4(1). 118-136. doi:10.3934/matricsci.2017.1.118
- Wang, H., Liu, Z., Xu, D., Zeng, Q. and Zhuang, Z. (2016). Extended finite element method analysis for shielding and amplification effect of a main crack interacted with a group of nearby parallel microcracks. *International Journal of Damage Mechanics*. 25(1). 4-25. doi:10.1177/1056789514565933
- Wang, X., Li, D. and Hao, R. (2019). Experimental Study of Cortical Bone Microstructure and Its Toughening Mechanism. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 563. 032052. doi:10.1088/1757-899x/563/3/032052
- Wawersik, W. R. and Fairhurst, C. (1970). A study of brittle rock fracture in laboratory compression experiments. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 7(5). 561-575. doi:10.1016/0148-9062(70)90007-0
- Westergaard, H. M. (1939). Bearing Pressures and Cracks: Bearing Pressures Through a Slightly Waved Surface or Through a Nearly Flat Part of a Cylinder, and Related Problems of Cracks. *Journal of Applied Mechanics*. 6(2). A49-A53. doi:10.1115/1.4008919
- Williams, M. L. (1957). On the Stress Distribution at the Base of a Stationary Crack. *Journal of Applied Mechanics*. 24(1). 109-114. doi:10.1115/1.4011454
- Wu, H., Imad, A., Benseddiq, N., Tupiassú Pinho de Castro, J. and Antonio Meggiolaro, M. (2010). On the prediction of the residual fatigue life of cracked structures repaired by the stop-hole method. *International Journal of Fatigue*. 32(4). 670-677. doi:10.1016/j.ijfatigue.2009.09.011
- Xiaotao, L., Xu, L., Hongda, Y. and Xiaoyu, J. (2017). Effect of micro-cracks on plastic zone ahead of the macro-crack tip. *Journal of Materials Science*. 52(23). 13490-13503. doi:10.1007/s10853-017-1440-8
- Xie, Y. J., Li, J., Hu, X. Z., Wang, X. H., Cai, M. and Wang, W. (2013). Modelling of multiple crack-branching from Mode-I crack-tip in isotropic solids. *Engineering Fracture Mechanics*. 109. 105-116. doi:10.1016/j.engfracmech.2013.01.009
- Yang, D., He, X., Yi, S. and Liu, X. (2019). An improved ordinary state-based peridynamic model for cohesive crack growth in quasi-brittle materials. *International Journal of Mechanical Sciences*. 153-154. 402-415. doi:10.1016/j.ijmecsci.2019.02.019
- Zerin, Z., Basoglu, M. F. and Turan, F. (2017). Curvilinear free-edge form effect on stability of perforated laminated composite plates. *Structural Engineering and Mechanics*. 61(2). 255-266. doi:10.12989/sem.2017.61.2.255
- Zerin, Z., Turan, F. and Basoglu, M. F. (2016). Examination of non-homogeneity and lamination scheme effects on deflections and stresses of laminated composite plates. *Structural Engineering and Mechanics*. 57(4). 603-616. doi:10.12989/sem.2016.57.4.603
- Zhou, T., Huang, C., Liu, H., Wang, J., Zou, B. and Zhu, H. (2012). Crack propagation simulation in microstructure of ceramic tool materials. *Computational Materials Science*. 54. 150-156. doi:10.1016/j.commatsci.2011.10.039
- Zhou, X., Wang, Y. and Qian, Q. (2016). Numerical simulation of crack curving and branching in brittle materials under dynamic loads using the extended non-ordinary state-based peridynamics. *European Journal of Mechanics - A/Solids*. 60. 277-299. doi:10.1016/j.euromechsol.2016.08.009

- Zhuang, Z. and Cheng, B.-B. (2011a). Development of X-FEM methodology and study on mixed-mode crack propagation. *Acta Mechanica Sinica*. 27(3). 406-415. doi:10.1007/s10409-011-0436-x
- Zhuang, Z. and Cheng, B. (2011b). A novel enriched CB shell element method for simulating arbitrary crack growth in pipes. *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*. 54(8). 1520-1531. doi:10.1007/s11433-011-4385-y
- Zhuang, Z. and Cheng, B. B. (2011c). Equilibrium state of mode-I sub-interfacial crack growth in bi-materials. *International Journal of Fracture*. 170(1). 27-36. doi:10.1007/s10704-011-9599-5



ÖZ GEÇMİŞ

Muhammed Fatih BAŞOĞLU, 2007 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. Yaklaşık 4 sene özel sektörde çalıştı. 2015 yılında OMÜ FBE İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı Mekanik Bilim Dalında Yüksek Lisans derecesini aldı. Lisansüstü eğitimi süresince OMÜ İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında Araştırma Görevlisi olarak görev yapmıştır. (02/08/2021).

ORCID ID: 0000-0002-6994-8225

Akademik Çalışmalar:

Makaleler

- Basoglu, M. F., Kefal, A., Zerin, Z., Oterkus, E. (İnceleme Aşamasında). Peridynamic Modeling of Toughening Enhancement in Unidirectional Fiber-Reinforced Composites with Micro-Cracks.
- Basoglu, M. F., Zerin, Z., Kefal, A., Oterkus, E. (2019). A computational model of peridynamic theory for deflecting behavior of crack propagation with micro-cracks. *Computational Materials Science*, 162, 33-46. doi:10.1016/j.commatsci.2019.02.032
- Turan, F., Basoglu, M. F., Zerin, Z. (2017). Analytical solution for bending and buckling response of laminated non-homogeneous plates using a simplified-higher order theory. *Challenge Journal of Structural Mechanics*, 3(1), 1-16. doi:10.20528/cjsmec.2017.02.001
- Zerin, Z., Basoglu, M. F., Turan, F. (2017). Curvilinear free-edge form effect on stability of perforated laminated composite plates. *Structural Engineering and Mechanics*, 61(2), 255-266. doi:10.12989/sem.2017.61.2.255
- Zerin, Z., Turan, F., Basoglu, M. F. (2016). Examination of non-homogeneity and lamination scheme effects on deflections and stresses of laminated composite plates. *Structural Engineering and Mechanics*, 57(4), 603-616. doi:10.12989/sem.2016.57.4.603
- Uzun, İ., Güler, B., Özyürek, T., Basoglu, M. F. (2015). Mandibular premolar dişlerin kanal çaplarında görülen düzensizliklerin değerlendirilmesi. *Atatürk Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Dergisi*, 25(1), 40-46. doi:10.17567/dfd.34850

Bildiriler

- Başoğlu, M. F., Zerin, Z., Kefal, A., Oterkus, E. (2021, Haziran) "Development of a Micro-Crack Toughening Mechanism for Unidirectional Composite Plates by using Peridynamics", *24th International Conference on Composite Structures (ICCS24)*, Portekiz, Porto
- Başoğlu, M. F., Zerin, Z., Kefal, A., Oterkus, E. (2019, Kasım) "Increasing Toughness by Introducing Micro-cracks", *ASME 2019 International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE)*, Amerika Birleşik Devletleri, Utah
- Başoğlu, M. F., Kefal, A., Haşim, K. A. (2019, Eylül) "Modeling Of Thick Composite Structures With An Eight-Node Curved Shell Element By Using The Refined Zigzag Theory", *7th ECCOMAS Thematic Conference on the Mechanical Response of Composites: COMPOSITES 2019*, İspanya, Girona
- Atasoy, Ö., Turan, F., Zerin, Z., Başoğlu, M. F. (2019, Nisan) "Buckling analysis of non-homogeneous orthotropic plates based on shear deformation theory", *4. International conference on civil, environmental, geology and mining engineering*, Türkiye, Trabzon
- Başoğlu, M. F., Zerin, Z., Kefal, A., Oterkus, E. (2018, Eylül) "Peridynamics Simulations on the Deflecting Propagation of Cracks with Minor Cracks", *28th International Workshop on Computational Mechanics of Materials (IWCMM 28)*, İskoçya, Glasgow
- Uzun, İ., Güler, B., Özyürek, T., Başoğlu, M. F. (2014, Mayıs) "Mandibular premolar dişlerin kanal çaplarında görülen düzensizliklerin değerlendirilmesi", *Türk Endodonti Derneği 12. Uluslararası Kongresi*, Türkiye, İstanbul