

T.C.
SİNOP ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



**ÇENTİKLİ ÇELİK NUMUNELERİN PERİDİNAMİK
YÖNTEMİYLE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

EMRE SAĞLAM

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DANIŞMAN

DOÇ. DR. YUNUS ONUR YILDIZ

SİNOP- 2024

TEZ KABUL

Emre SAĞLAM tarafından hazırlanan “**ÇENTİKLİ ÇELİK NUMUNELERİN PERİDİNAMİK YÖNTEMİYLE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**” başlıklı bu çalışma, 28.10.2024 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak, jürimiz tarafından **YÜKSEK LİSANS tezi** olarak kabul edilmiştir.

Başkan

Doç. Dr. Mustafa Kemal BALKİ
Sinop Üniversitesi / Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi

İmza

**Üye
(Danışman)**

Doç. Dr. Yunus Onur YILDIZ
Bursa Teknik Üniversitesi / Denizcilik Fakültesi

İmza

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Serkan ERDEM
Fırat Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi

İmza

Enstitü Müdürü

Doç. Dr. Hüseyin Turan ARAT

.....

ETİK BEYANI

Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Emre SAĞLAM

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÇENTİKLİ ÇELİK NUMUNELERİN PERİDİNAMİK YÖNTEMİYLE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

EMRE SAĞLAM

SİNOP ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
DANIŞMAN: DOÇ. DR. YUNUS ONUR YILDIZ

Günümüzde, malzemelerin davranışı, hasarı ve hasar seviyesinin belirlenmesi genellikle sonlu elemanlar yöntemiyle yapılmaktadır. Ancak sonlu elemanlar yöntemi tek başına yeterli olmadığından hasarın yönü ve şiddeti gibi bilgilerin belirlenmesinde deneysel metotlara başvurulmaktadır. Bunun yanı sıra, kırılma mekaniği metotları hasar başlangıcını, şiddetini, hızını ve dallanmasını tahmin etmekte zorluklar yaşayabilmektedir. Klasik sürekli ortamlar mekaniği, yerel kısmi diferansiyel denklemlere dayanırken, Peridinamik teori yerel olmayan ve integral tabanlı denklemlere dayanan bir formülasyon sunmaktadır. Bu nedenle, malzemelerde oluşabilecek hasarın tahmininde, klasik sonlu elemanlar yöntemine kıyasla üstün özelliklere sahiptir. Bu çalışmada; ilk etapta, farklı malzeme bozukluklarına sahip iki model üzerinde Peridinamik teorisinin sağladığı olanaklar kullanılarak, çekme yükleri altında analizleri yapılmıştır. Sonraki etapta, uygun hesap modelleri belirlendikten sonra tasarlanan çentikli ve çentiksiz modeller çekme yükleri altında analiz edilerek sonuçlar elde edilmiştir. Seçilen bir çentikli model ise, karşılaştırma yapılma amacıyla sonlu elemanlar yönteminde analizi yapılmıştır. Analizler, Peridinamik yöntemin kullanıldığı Peridigm isimli yazılım aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar daha sonra karşılaştırılarak değerlendirilmiş ve yorumlanmıştır.

ANAHTAR KELİMELEER: Peridinamik teori; Çentik; Peridigm; Kırılma

Ekim 2024, 204 Sayfa

ABSTRACT

MSC THESIS

INVESTIGATION OF NOTCHED STEEL SAMPLES' MECHANICAL PROPERTIES USING BY PERIDYNAMIC METHOD

EMRE SAĞLAM

**SINOP UNIVERSITY INSTITUTE OF GRADUATE PROGRAMS
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
SUPERVISOR: ASSOC. PROF. DR. YUNUS ONUR YILDIZ**

Nowadays, the behavior, damage, and damage level of materials are generally determined using the finite element method. However, since the finite element method alone is not sufficient, experimental methods are employed to determine information such as the direction and severity of the damage. Additionally, fracture mechanics methods can face challenges in predicting the initiation, severity, speed, and branching of the damage. While classical continuum mechanics relies on local partial differential equations, peridynamic theory offers a formulation based on non-local and integral equations. Therefore, it has superior properties in predicting potential damage in materials compared to the classical finite element method. In this study, the capabilities of peridynamic theory were initially utilized to analyze two models with different material defects under tensile loads. In the next stage, after determining appropriate computational models, designed notched and unnotched models were analyzed under tensile loads, and the results were obtained. One selected notched model was also analyzed using the finite element method for comparison purposes. The analyses were conducted using Peridigm software, which employs the peridynamic method. The obtained results were subsequently compared, evaluated, and interpreted.

KEYWORDS: Peridynamic theory; Notch; Peridigm; Fracture

October 2024, 204 Pages

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamda değerli bilgi, tecrübe ve birikimleriyle bana yol gösterici ve destek olan değerli danışmanım Sayın Doç. Dr. Yunus Onur YILDIZ'a; ilgisini, desteğini ve sonsuz sevgisini esirgemeyen sevgili aileme ve eşim Viktoria'ya, Sinop Üniversitesi'nde bana yardımcı olan tüm akademisyenlere ve arkadaşlarıma sonsuz teşekkür ve saygılarımı sunarım.



Emre SAĞLAM

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEZ KABUL	ii
ETİK BEYANI.....	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
TABLolar DİZİNİ.....	xii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xx
1. GİRİŞ	1
1.1 Yerel Teoriler.....	4
1.2 Yerel Olmayan Teoriler	8
1.3 Kırılma Mekanîği.....	10
1.3.1 Malzemede hasar.....	10
1.3.2 Kırılma çeşitleri.....	15
1.3.3 İdeal kırılma mukavemeti	16
1.3.4 Lineer elastik kırılma mekanîği	17
1.3.4.1 Enerji dengesi yaklaşımı	17
1.3.4.2 Gerilme şiddeti faktörü yaklaşımı.....	21
1.3.5 Elastik-plastik kırılma mekanîği	28
1.3.5.1 Çatlak ucu açılma miktarı metodu	31
1.3.5.2 J-integral metodu	33
1.3.6 Kırılma tokluğu	35
2. PERİDİNAMİK TEORİSİ.....	39
2.1 Bağ Bazlı Peridinamik (BB PD).....	41

2.2 Sıradan Durum Bazlı Peridinamik (SDB PD)	42
3. PERIDIGM YAZILIMI	45
3.1 Malzeme Modelleri.....	48
3.1.1 Bağ bazlı (Bond-Based) malzeme modelleri	48
3.1.1.1 Peridinamik mikro kırılğan (PD Micro-Brittle-PMB)	49
3.1.2 Durum bazlı (State-Based) malzeme modelleri	49
3.1.2.1 Karşılaştırmaz (Non-Correspondence) malzeme modelleri	50
3.1.2.2 Karşılaştırmalı (Correspondence-Cp) malzeme modelleri	52
3.2 Hasar Modelleri (Damage Models – Bond Failure Models)	53
3.2.1 Kritik bağ uzama hasar modeli (Critical stretch damage model).....	53
3.2.2 Zaman bağımlı kritik bağ uzama hasar modeli (Time dependent critical stretch damage model).....	54
3.2.3 Arayüz farkındalıklı hasar modeli (Interface aware damage model).....	55
3.2.4 Kritik enerji hasar modeli (Critical energy damage model)	57
3.3 Sınır Şartları (Boundary Conditions).....	58
3.4 Çözücüler (Solver).....	58
3.4.1 Açık (Explicit) – Verlet.....	59
3.4.2 (Kapalı) Implicit.....	59
3.4.3 Yarı-statik (QuasiStatic)	60
3.4.4 NOXQuasiStatic (lineer olmayan-nonlinear).....	60
4. KULLANILAN YARDIMCI YAZILIMLAR.....	61
4.1 Docker.....	61
4.2 Coreform Cubit.....	64
4.3 Autodesk Fusion	65
4.4 ParaView.....	66
4.5 Abaqus	67
5. ANALİZ SÜRECİ	69
5.1 Birinci Modelin Analizi	70
5.1.1 Birinci modelin elastik malzeme modelinde analizi	73

5.1.2	Birinci modelin elastik karşılaştırmalı (correspondence-cp.) malzeme modelinde analizi	79
5.1.3	Birinci modelin elastik plastik malzeme modelinde analizi	79
5.1.4	Birinci modelin elastik plastik karşılaştırmalı (correspondence-cp.) malzeme modelinde analizi	81
5.1.5	Birinci modelin elastik plastik sertleşme (hardening) karşılaştırmalı (correspondence-cp.) malzeme modelinde analizi	82
5.2	İkinci Modelin Analizi	83
5.2.1	İkinci modelin elastik karşılaştırmalı (correspondence-cp.) malzeme modelinde analizi	86
5.2.2	İkinci modelin elastik plastik karşılaştırmalı (correspondence-cp.) malzeme modelinde analizi	89
5.3	Üçüncü Modelin Analizi	90
5.3.1	Üçüncü modelin elastik karşılaştırmalı (correspondence-cp.) malzeme modelinde analizi	92
5.3.2	Üçüncü modelin elastik plastik karşılaştırmalı (correspondence-cp.) malzeme modelinde analizi	95
5.3.3	Üçüncü modelin sonlu elemanlar yöntemiyle tasarımı ve analizi	96
5.4	Dördüncü Modelin Analizi	96
5.4.1	Dördüncü modelin elastik karşılaştırmalı (correspondence-cp.) malzeme modelinde analizi	98
5.4.2	Dördüncü modelin elastik plastik karşılaştırmalı (correspondence-cp.) malzeme modelinde analizi	99
5.5	Beşinci Modelin Analizi	100
5.5.1	Beşinci modelin elastik karşılaştırmalı (correspondence-cp.) malzeme modelinde analizi	101
5.5.2	Beşinci modelin elastik plastik karşılaştırmalı (correspondence-cp.) malzeme modelinde analizi	103
6.	BULGULAR VE TARTIŞMA	105
6.1	Birinci Modelin Analiz Sonuçları ve Yorumlanması	105
6.1.1	Birinci modelin elastik malzeme modelinde analiz sonuçları	106
6.1.2	Birinci modelin elastik karşılaştırmalı (correspondence-cp.) malzeme modelinde analiz sonuçları	106
6.1.3	Birinci modelin elastik plastik malzeme modelinde analiz sonuçları	109

6.1.4	Birinci modelin elastik plastik karşılaştırmalı (correspondence-cp.) malzeme modelinde analiz sonuçları.....	110
6.1.5	Birinci modelin elastik plastik sertleşme (hardening) karşılaştırmalı (correspondence-cp.) malzeme modelinde analiz sonuçları	111
6.2	İkinci Modelin Analiz Sonuçları ve Yorumlanması	113
6.2.1	İkinci modelin elastik karşılaştırmalı (correspondence-cp.) malzeme modelinde analiz sonuçları	115
6.2.2	İkinci modelin elastik plastik karşılaştırmalı (correspondence-cp.) malzeme modelinde analiz sonuçları.....	117
6.3	Üçüncü Modelin Analiz Sonuçları ve Yorumlanması	120
6.3.1	Üçüncü modelin elastik karşılaştırmalı (correspondence-cp.) malzeme modelinde analiz sonuçları	120
6.3.2	Üçüncü modelin elastik plastik karşılaştırmalı (correspondence-cp.) malzeme modelinde analiz sonuçları.....	124
6.4	Dördüncü Modelin Analiz Sonuçları ve Yorumlanması	127
6.4.1	Dördüncü modelin elastik (correspondence-cp.) malzeme modelinde analiz sonuçları	128
6.4.2	Dördüncü modelin elastik plastik karşılaştırmalı (correspondence-cp.) malzeme modelinde analiz sonuçları.....	131
6.5	Beşinci Modelin Analiz Sonuçları ve Yorumlanması	134
6.5.1	Beşinci modelin elastik karşılaştırmalı (correspondence-cp.) malzeme modelinde analiz sonuçları.....	135
6.5.2	Beşinci modelin elastik plastik karşılaştırmalı (correspondence-cp.) malzeme modelinde analiz sonuçları.....	138
6.6	Üçüncü Modelin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Tasarımının Analiz Sonuçları ve Yorumlanması.....	141
7.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	146
	KAYNAKLAR	153
	EKLER	155
EK 1.....		155
EK 2.....		157
EK 3.....		159
EK 4.....		161

EK 5.....	163
EK 6.....	165
EK 7.....	167
EK 8.....	169
EK 9.....	171
EK 10.....	173
EK 11.....	175
EK 12.....	177
EK 13.....	177
ÖZGEÇMİŞ	181

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 6.1 Birinci model elastik malzeme modelinde seçilen noktaların son adımdaki değerleri.....	106
Tablo 6.2 Birinci model elastik cp. malzeme modelinde seçilen noktaların son adımdaki değerleri.....	107
Tablo 6.3 Birinci model elastik plastik malzeme modelinde seçilen noktaların son adımdaki değerleri.....	109
Tablo 6.4 Birinci model elastik plastik cp. malzeme modelinde seçilen noktaların son adımdaki değerleri.....	110
Tablo 6.5 Birinci model elastik plastik sertleşme cp. malzeme modelinde seçilen noktaların son adımdaki değerleri	112
Tablo 6.6 İkinci modelin elastik cp. malzeme modelinde seçilen noktaların son adımdaki değerleri.....	115
Tablo 6.7 İkinci modelin elastik plastik cp. malzeme modelinde seçilen noktaların son adımdaki değerleri.....	118
Tablo 6.8 Üçüncü modelin elastik malzeme cp. modeli hesabında sol cephesine ait her hesap adımdaki ortalama değerler.....	121
Tablo 6.9 Üçüncü modelin elastik-plastik cp. malzeme modeli hesabında sol cephesine ait her hesap adımdaki ortalama değerler.....	124
Tablo 6.10 Dördüncü modelin elastik malzeme cp. modeli hesabında sol cephesine ait her hesap adımdaki ortalama değerler.....	128
Tablo 6.11 Dördüncü modelin elastik-plastik cp. malzeme modeli hesabında sol cephesine ait her hesap adımdaki ortalama değerler.....	131
Tablo 6.12 Beşinci modelin elastik cp. malzeme modeli hesabında sol cephesine ait her hesap adımdaki ortalama değerler.....	135
Tablo 6.13 Beşinci modelin elastik-plastik cp. malzeme modeli hesabında sol cephesine ait her hesap adımdaki ortalama değerler.....	138

Tablo 6.14 Üçüncü modelin sonlu elamanlar yöntemiyle hesaplanmasının analizinden elde edilen ortalama değerler	143
---	-----



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1 Sürekli ortam mekaniğinde birim elemanların lokal etkileşimi (Başoğlu, 2021)	1
Şekil 1.2 Peridinamikte birim parçacıkların lokal olmayan etkileşimi (Başoğlu, 2021) ..	2
Şekil 1.3 Yerel ve yerel olmayan teoriler arasındaki ilişki (Madenci ve Oterkus, 2014). 9	
Şekil 1.4 F kuvveti etkisi altındaki levhanın v kadar uzaması (Yayla, 2007)	19
Şekil 1.5 Bir levhanın gerilme altında çatlak oluşumu (Janssen vd., 2005)	20
Şekil 1.6 Yükleme (Kuvvet) altında çatlak ilerleme modları; Mod I (Açılma veya çekme modu), Mod II (Kayma modu), Mod III (Yırtılma veya makaslama modu) (Janssen vd., 2005)	22
Şekil 1.7 Çatlak dibinde gerilim dağılımı (sağda), koordinat isteminde gerilim birleşenleri (solda) (Lewicki, 1995)	23
Şekil 1.8 Çatlak ucunda bir noktada gerilme (Janssen vd., 2005)	23
Şekil 1.9 Sonsuz levhanın merkezinde bulunan 2a uzunluğundaki çatlak (Janssen vd., 2005).....	24
Şekil 1.10 Çatlak ucunda oluşan elastik gerilme alanı (O'Dowd, 2002).....	25
Şekil 1.11 Malzemelerde çatlak ucunda plastisite, mikro çatlama ve sır çatlağı sonucu oluşan deformasyon (Yayla, 2007)	29
Şekil 1.12 Çatlak ucu plastik bölgenin ifade edilmesi (Armağan, 2011)	30
Şekil 1.13 Düzlem genleme ve düzlem gerilme durumlarında çatlak ucu plastik bölgenin şekli (Janssen vd., 2005)	30
Şekil 1.14 Düzlem gerilme ve düzlem genleme durumlarında çatlak ucu plastik bölgenin kalınlık boyunca değişimi (Janssen vd., 2005)	31
Şekil 1.15 Çatlak ucu açılma miktarı (Armağan, 2011)	32
Şekil 1.16 J-İntegral Kontrolü (Yayla, 2007)	33
Şekil 1.17 JIC'yi elde etmek için test prosedürü	35

Şekil 1.18 Kırılma tokluğunun değerlendirilmesi için kompakt numune.....	37
Şekil 1.19 P-Δ davranışları (Anderson, 2005).	37
Şekil 2.1 x ve α malzeme noktalarının etkileşim alanları (Olmuş, 2022)	40
Şekil 2.2 BB PD teorisine ait kuvvet yoğunluğu vektörleri (Olmuş, 2022)	41
Şekil 2.3 SDB PD teorisine ait kuvvet yoğunluğu vektörleri (Olmuş, 2022).....	42
Şekil 2.4 PD etkileşim alanı üzerindeki yüzey etkileri (Olmuş, 2022).....	43
Şekil 2.5 x_i PD malzeme noktasının etkileşimi alanı için hacim düzeltme (Olmuş, 2022)	44
Şekil 5.1 yarık adlı modelin Autodesk Fusion yazılımında tasarımı	70
Şekil 5.2 CoreForm Cubit yazılımda yirtik.sat dosyasının modellenmesi	71
Şekil 5.3 Birinci Modelin Malzeme noktalarının analizden önceki görünümü	72
Şekil 5.4 yirtik_out7Bet.e çıktısının ParaView yazılımında görüntülenmesi.....	77
Şekil 5.5 yirtik_out7Bet50.e çıktısının ParaView yazılımında görüntülenmesi.....	78
Şekil 5.6 yirtik_out7Betds.e çıktısının ParaView yazılımında görüntülenmesi	78
Şekil 5.7 yirtik_out7Bect.e çıktısının ParaView yazılımında görüntülenmesi	79
Şekil 5.8 yirtik_out7Bept.e çıktısının ParaView yazılımında görüntülenmesi.....	80
Şekil 5.9 yirtik_out7Bepct.e çıktısının ParaView yazılımında görüntülenmesi	81
Şekil 5.10 yirtik_out7Bephct.e çıktısının ParaView yazılımında görüntülenmesi	82
Şekil 5.11 yirtik3 adlı modelin Autodesk Fusion yazılımında tasarımı	83
Şekil 5.12 Coreform Cubit yazılımda yirtik3.sat dosyasının modellenmesi	84
Şekil 5.13 İkinci Modelin Malzeme noktalarının analizden önceki görünümü.....	85
Şekil 5.14 yirtik_out6ect.e çıktısının ParaView yazılımında görüntülenmesi.....	89
Şekil 5.15 yirtik_out7Bepct.e çıktısının ParaView yazılımında görüntülenmesi	90
Şekil 5.16 centik_1 adlı modelin Autodesk Fusion yazılımında tasarımı	91
Şekil 5.17 Coreform Cubit yazılımda centik_1.sat dosyasının modellenmesi	91
Şekil 5.18 yirtik_out11ec.e çıktısının ParaView yazılımında görüntülenmesi.....	95

Şekil 5.19 yirtik_out11epc.e çıktısının ParaView yazılımında görüntülenmesi.....	96
Şekil 5.20 Üçüncü modelin Abaqus programında tasarlaması	96
Şekil 5.21 centik_2 adlı modelin Autodesk Fusion yazılımında tasarımı	97
Şekil 5.22 Coreform Cubit yazılımında centik_2.sat dosyasının modellenmesi	97
Şekil 5.23 yirtik_out12ec.e çıktısının ParaView yazılımında görüntülenmesi.....	99
Şekil 5.24 yirtik_out12epc.e çıktısının ParaView yazılımında görüntülenmesi.....	100
Şekil 5.25 centikduz adlı modelin Autodesk Fusion yazılımında tasarımı.....	100
Şekil 5.26 Coreform Cubit yazılımında centikduz.sat dosyasının modellenmesi	101
Şekil 5.27 yirtik_out13ec.e çıktısının ParaView yazılımında görüntülenmesi.....	102
Şekil 5.28 yirtik_out13epc.e çıktısının ParaView yazılımında görüntülenmesi.....	103
Şekil 6.1 Birinci model üzerinde belirlenen malzeme noktaları.....	105
Şekil 6.2 Çatlağa ait seçilmiş malzeme noktalarının Zaman- Yer değiştirme grafiği ..	108
Şekil 6.3 Çatlağa ait seçilmiş malzeme noktalarının Kuvvet- Yer değiştirme-Kuvvet Yoğunluğu grafiği	108
Şekil 6.4 Çatlağa ait seçilmiş malzeme noktalarının Zaman- Yer değiştirme grafiği ..	111
Şekil 6.5 Birinci modelin elastik plastik sertleşme (hardening) cp. malzeme modelindeki davranışı	112
Şekil 6.6 Birinci modelin elastik plastik sertleşme (hardening) cp. malzeme modelindeki Alt ve Üst olarak adlandırılan noktaların Zaman-Yer değiştirme Grafiği.....	113
Şekil 6.7 Birinci model üzerinde belirlenen malzeme noktaları.....	114
Şekil 6.8 Çatlağa ait seçilmiş malzeme noktalarının Zaman- Yer değiştirme grafiği ..	116
Şekil 6.9 Modelin sol kenarına ait seçilmiş malzeme noktalarının Zaman- Yer değiştirme grafiği	117
Şekil 6.10 Çatlağa ait seçilmiş malzeme noktalarının Zaman- Yer değiştirme grafiği	118
Şekil 6.11 Modelin sol kenarına ait seçilmiş malzeme noktalarının Zaman- Yer değiştirme grafiği.....	120

Şekil 6.12 Üçüncü modelin elastik cp. malzeme modeli hesaplamasına ait ortalama yer değişimin hesap adım sırasına göre değişim grafiği	122
Şekil 6.13 Üçüncü modelin elastik cp. malzeme modeli hesaplamasına ait uygulanan ortalama kuvvetin hesap adım sırasına göre değişim grafiği	123
Şekil 6.14 Üçüncü modelin elastik cp. malzeme modeli hesaplamasına ait gerinim-gerilme grafiği	123
Şekil 6.15 Üçüncü modelin elastik cp. malzeme modeli hesaplamasına ait ortalama yer değiştirme-gerilme grafiği.....	124
Şekil 6.16 Üçüncü modelin elastik-plastik cp. malzeme modeli hesaplamasına ait ortalama yer değişimin hesap adım sırasına göre değişim grafiği	126
Şekil 6.17 Üçüncü modelin elastik-plastik cp. malzeme modeli hesaplamasına ait uygulanan ortalama kuvvetin hesap adım sırasına göre değişim grafiği.....	126
Şekil 6.18 Üçüncü modelin elastik-plastik cp. malzeme modeli hesaplamasına ait gerinim-gerilme grafiği	127
Şekil 6.19 Üçüncü modelin elastik-plastik cp. malzeme modeli hesaplamasına ait ortalama yer değiştirme-gerilme grafiği.....	127
Şekil 6.20 Dördüncü modelin elastik cp. malzeme modeli hesaplamasına ait ortalama yer değişimin hesap adım sırasına göre değişim grafiği	129
Şekil 6.21 Dördüncü modelin elastik cp. malzeme modeli hesaplamasına ait uygulanan ortalama kuvvetin hesap adım sırasına göre değişim grafiği	130
Şekil 6.22 Dördüncü modelin elastik cp. malzeme modeli hesaplamasına ait gerinim-gerilme grafiği	130
Şekil 6.23 Dördüncü modelin elastik cp. malzeme modeli hesaplamasına ait ortalama yer değiştirme-gerilme grafiği.....	131
Şekil 6.24 Dördüncü modelin elastik-plastik cp. malzeme modeli hesaplamasına ait ortalama yer değişimin hesap adım sırasına göre değişim grafiği	133
Şekil 6.25 Dördüncü modelin elastik-plastik cp. malzeme modeli hesaplamasına ait uygulanan ortalama kuvvetin hesap adım sırasına göre değişim grafiği.....	133
Şekil 6.26 Dördüncü modelin elastik-plastik cp. malzeme modeli hesaplamasına ait gerinim-gerilme grafiği	134

Şekil 6.27 Dördüncü modelin elastik-plastik cp. malzeme modeli hesaplamasına ait ortalama yer değiştirme-gerilme grafiği.....	134
Şekil 6.28 Beşinci modelin elastik cp. malzeme modeli hesaplamasına ait ortalama yer değişimin hesap adım sırasına göre değişim grafiği	136
Şekil 6.29 Beşinci modelin elastik cp. malzeme modeli hesaplamasına ait uygulanan ortalama kuvvetin hesap adım sırasına göre değişim grafiği	137
Şekil 6.30 Beşinci modelin elastik cp. malzeme modeli hesaplamasına ait gerinim-gerilme grafiği	137
Şekil 6.31 Beşinci modelin elastik cp. malzeme modeli hesaplamasına ait ortalama yer değiştirme-gerilme grafiği.....	138
Şekil 6.32 Beşinci modelin elastik-plastik cp. malzeme modeli hesaplamasına ait ortalama yer değişimin hesap adım sırasına göre değişim grafiği	140
Şekil 6.33 Beşinci modelin elastik-plastik cp. malzeme modeli hesaplamasına ait uygulanan ortalama kuvvetin hesap adım sırasına göre değişim grafiği.....	140
Şekil 6.34 Beşinci modelin elastik-plastik cp. malzeme modeli hesaplamasına ait gerinim-gerilme grafiği	141
Şekil 6.35 Beşinci modelin elastik-plastik cp. malzeme modeli hesaplamasına ait ortalama yer değiştirme-gerilme grafiği.....	141
Şekil 6.36 Üçüncü modelin sonlu elamanlar yöntemiyle hesaplanmasının analizinden elde edilen görüntü ve çentik üzerindeki gerilme diyagramı	142
Şekil 6.37 Üçüncü modelin elastik cp. malzeme modeli hesaplanmasının analizinden elde edilen görüntü ve çentik üzerindeki gerilme diyagramı	142
Şekil 6.38 Üçüncü modelin sonlu elamanlar yöntemiyle hesaplanmasının analizinden elde edilen çentik üzerindeki gerilme diyagramı	143
Şekil 6.39 Üçüncü modelin sonlu elamanlar yöntemiyle hesaplanmasının analizinden elde edilen ortalama yer değişimin hesap adım sırasına göre değişim grafiği	144
Şekil 6.40 Üçüncü modelin sonlu elamanlar yöntemiyle hesaplanmasının analizinden elde edilen uygulanan ortalama kuvvetin hesap adım sırasına göre değişim grafiği	144

Şekil 6.41 Üçüncü modelin sonlu elamanlar yöntemiyle hesaplanmasının analizinden elde edilen gerinim-gerilme grafiği	145
Şekil 6.42 Üçüncü modelin sonlu elamanlar yöntemiyle hesaplanmasının analizinden elde edilen ortalama yer değiştirme-gerilme grafiği	145
Şekil 7.1 Üçüncü, dördüncü ve beşinci modellerin elastik cp. malzeme model hesaplamasındaki ortalama yer değiştirme-gerilme grafiği karşılaştırılması	148
Şekil 7.2 Üçüncü, dördüncü ve beşinci modellerin elastik cp. malzeme model hesaplamasındaki ortalama yer değiştirme - ortalama yer değiştirme grafiği karşılaştırılması	149
Şekil 7.3 Üçüncü, dördüncü ve beşinci modellerin elastik plastik cp. malzeme model hesaplamasındaki ortalama yer değiştirme-gerilme grafiği karşılaştırılması	149
Şekil 7.4 Üçüncü, dördüncü ve beşinci modellerin elastik plastik cp. malzeme model hesaplamasındaki ortalama yer değiştirme - ortalama kuvvet grafiği karşılaştırılması	150
Şekil 7.5 Üçüncü modelin peridinamik yöntemle elastik malzeme model hesaplamasındaki ortalama yer değiştirme-gerilme grafiğinin sonlu elemanlar yöntemiyle karşılaştırılması (3EC: üçüncü modelin elastik cp. malzeme modelinde hesabı, 3SE: üçüncü modelin sonlu elemanlar yöntemiyle hesabı)	151

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

ρ	: Yoğunluk
Σ	: Toplam simgesi
σ	: Gerilme
θ	: Yüzey çatlağı parametrik açısı
$\theta_{(i)}$	: Malzeme noktasına ait dilatasyon değeri
δ	: Bir malzeme noktasının küresel komşuluğu – ufuk yarıçapı (horizon), çatlak açılma mesafesi
ξ	: x ve $\acute{x}$ malzeme noktalarının deforme olmamış geometri üzerindeki referans mesafesi
ν	: Poisson oranı
μ	: Kayma modülü
τ	: Kayma gerilmesi
ε	: Gerinim (genleme)
a	: Çatlak derinliği
A	: Alan
b	: Hacimsel kuvvet
C	: Komplians
d	: Yapı elemanının kalınlığı
E	: Elastisite modülü
$f_{(i)(j)}, f_{(j)(i)}$	: Kuvvet yoğunluğu vektörleri
F	: Kuvvet
G	: Kayma modülü, Çatlak ilerleme enerjisi, Enerji boşalma miktarı
H_x	: İçerisinde bulunan komşu malzeme noktası
J	: J integral
K	: Gerilme şiddeti faktörü
K_{IC}	: Kritik gerilme şiddeti faktörü
K_I	: Mod I gerilme şiddeti faktörü
K_{II}	: Mod II gerilme şiddeti faktörü
K_{III}	: Mod III gerilme şiddeti faktörü
$\max$	: Maksimum
N	: Newton
r	: Çatlağa olan mesafe

R	: Çatlak ilerleme direnci
$s_{(i)(j)}$	: Malzeme noktaları arasındaki birim uzama
t	: Belirli bir malzeme noktasının zamanı
$\dot{t}$	: Kuvvet yoğunluğu vektörü
u	: İvme vektörünü
$\dot{u}$	: Yer değiştirme vektörü
U_d	: Kaybolan enerji
U_e	: Dış enerji
U_k	: Kinetik enerji
U_s	: Genleme enerjisi
x	: Belirli bir malzeme noktasının konum vektörü
$\dot{x}$	: x malzeme noktasının etkileşim alanı
W, w	: Yapılan iş
W_(i)	: Malzeme noktasına ait şekil değiştirme enerjisi yoğunluğu
$y_{(i)}, y_{(j)}, x_{(i)}, x_{(j)}$	: Malzeme noktalarının deforme olmuş geometrideki konumları

Kısaltmalar

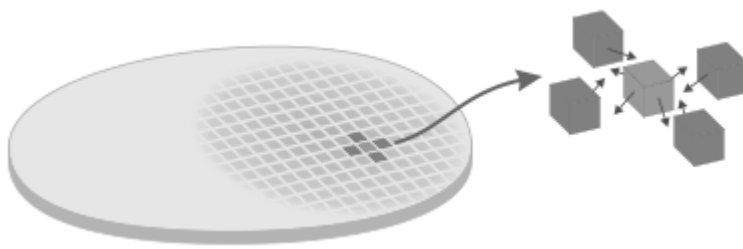
APT	: Gelişmiş Paket Aracı (Advanced Package Tool)
ASTM	: Amerikan Malzeme Test Topluluğu (American Society for Testing Materials)
BB PD	: Bağ Bazlı Peridinamik
CAD	: Bilgisayar Destekli Tasarım (Computer Aided Design)
CAE	: Bilgisayar Destekli Mühendislik (Computer Aided Engineering)
CAM	: Bilgisayar Destekli Üretim (Computer Aided Manufacturing)
CD	: Sürekli Teslimat (Continuous Delivery)
CFD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (Computational Fluid Dynamics)
CGS	: santimetre, gram, saniye (centimeter, gram, second) birim sistemi
CI	: Sürekli Entegrasyon (Continuous Integration)
CLI	: Komut Satırı Arayüzü (Command Line Interface)
CNC	: Sayısal Kontrollü Bilgisayar (Computer Numerical Control)
COD	: Çatlak açılma mesafesi (Crack Opening Displacement)
Cs	: Karşılaştırmalı (correspondence)
CTOD	: Çatlak ucu açılma mesafesi (Crack Tip Opening Displacement)

EPKM	: Elastik plastik kırılma mekaniği
EWf	: Esas kırılma işi (Essential Work of Fracture)
GNOME	: GNU Ağ Nesne Modeli Ortamı (GNU Network Object Model Environment)
GSEY	: Genişletilmiş sonlu elemanlar yöntemini
GŞF	: Gerilme şiddeti faktörü
GUI	: Grafik Kullanıcı Arayüzü (Graphical User Interface)
IoT	: Nesnelerin İnterneti (Internet of Things)
KBE	: Kohezif bölge elemanları
KSOM	: Klasik Sürekli Ortamlar Mekaniği
LEKM	: Lineer Elastik Kırılma Mekaniği
LTS	: Uzun Vadeli destek (Long Term Support)
PC	: Personal Computer (kişisel bilgisayar-masaüstü bilgisayar)
PCB	: Baskı devre Kartı (Printed Circuit Board)
PD	: Peridinamik
PDDM	: Parallel Discrete Dislocation Model (Paralel Diskret Cisimler Modeli)
PUFEM	: Partially Uniform Finite Element Method (Kısmen Düzgün Sonlu Elemanlar Yöntemi)
SDB PD	: Sıradan Durum Bazlı Peridinamik
SE	: Sonlu elemanlar
SEY	: Sonlu elemanlar yöntemi
SI	: Uluslararası birimler sistemi

1. GİRİŞ

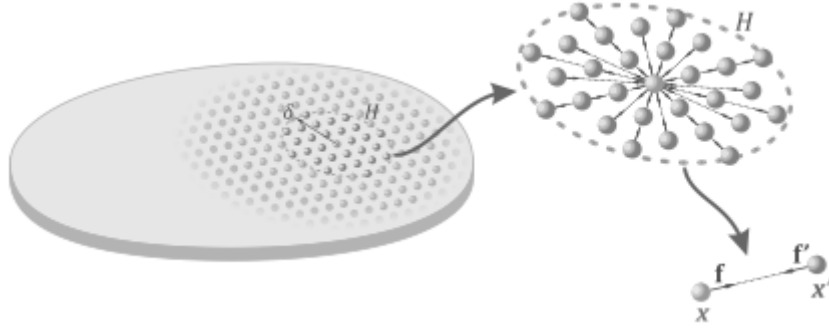
Üç boyutlu lineer elastisite teorisi, ilk kez 1820'lerin başında Cauchy tarafından geliştirilmiştir. 1920'lerin başında ise Griffith ve diğer araştırmacılar, kırılma mekaniği üzerine çalışmalar yapmışlardır. 1950'lerde bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle birlikte, gerçek problemlerin lineer elastisite teorisi çözümlerine imkan tanıyan sonlu elemanlar yöntemi ortaya çıkmıştır. Bu yöntem, lineer elastisite teorisi problemlerinde üstün başarı sağladığı için günümüzde birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır (Başoğlu, 2021).

Ancak daha sonra, plastisite, sünme, kırılma gibi doğrusal olmayan problemler için çözüm arayışları başlamıştır. Bu tür durumlarda, sürekli ortam mekaniği yetersiz kalmaktadır, çünkü sürekli ortam mekaniğinin temel ifadeleri için yapılan bazı varsayımlar malzemenin gerçek doğasına uymamaktadır. Bu varsayımlar, yapıyı sürekli kabul etmek ve birim eleman etkileşimlerinin lokal olduğunu ifade etmektedir, yani Şekil 1.1'de gösterildiği gibi sadece bitişindeki elemanlarla etkileştiğini varsaymaktadır. Oysa gerçekte, Şekil 1.2'de gösterildiği gibi tüm malzemeler süreksizdir ve temas kuvvetinin ötesinde iç kuvvet etkileşimleri mevcuttur (Başoğlu, 2021).



Şekil 1.1 Sürekli ortam mekaniğinde birim elemanların lokal etkileşimi (Başoğlu, 2021)

Bu gerçeğe rağmen, birçok araştırmacı sürekli ortam mekaniğinin sınırlarını genişletmeyi reddederek, mevcut teoriyi eklemelerle tamir etmeyi tercih etmiştir. Ancak genellikle bu çözümler, belirli malzemeler ve durumlar için sınırlı olmaktadır.



Şekil 1.2 Peridinamikte birim parçacıkların lokal olmayan etkileşimi (Başoğlu, 2021)

Sonlu elemanlar metodu gibi tekniklerin hasar analizlerinde yetersiz kalmasının temel sebebi, teorik esaslarının süreklilik kabulü üzerine kurulu matematiksel ifadelerle dayanmasıdır. Bu metotlar, sürekli ortam mekaniğinin temel prensiplerini kullanarak matematiksel modellemeler yapmaktadırlar. Ancak bu yaklaşım, türevlerin tanımsız olduğu çatlaklar gibi durumlarda geçerliliğini kaybetmektedir. Bu nedenle, kırılma mekaniği için çeşitli özel teknikler geliştirilmiştir, bu tekniklerde temel matematiksel ifadeler yerine çatlakların büyüme kriterleri ve çatlak uçlarının potansiyel gelişim şekilleri gibi özelliklerin matematiksel olarak ifade edilmesi üzerine odaklanılmıştır (Madenci ve Oterkus, 2014).

Ancak bu kırılma mekaniği metotlarında bile çeşitli kısıtlamalar ve harici kriterler bulunmaktadır. Çatlakların büyüme kriterlerinin önceden tanımlanması ve çatlak uçlarının muhtemel gelişim şekillerinin matematiksel olarak ifade edilmesi gerekmektedir. Bu durum, çatlak tahminlerinin doğruluğunu sınırlayan birçok kısıtlama ve belirsizlikle sonuçlanmaktadır. Bu nedenle, çatlakların gerçek davranışını tam olarak modellemek ve tahmin etmek oldukça zorlu bir görev olmakta ve mevcut yöntemlerin doğruluk oranları sınırlı kalabilmektedir.

Bu süreçte dikkat çekici olan bir diğer durum, sürekli ortam mekaniği ifadelerinin bilgisayar yardımıyla çözülmesi için sonlu elemanlar modeliyle ayrıklaştırılmasıdır. Bu ayrıklaştırma sürecinde, aslında süreksizlikler içeren bir yapı, bir dizi kısmi türevli diferansiyel ifadeye dönüştürülerek sürekli olarak kabul edilmektedir. Ardından, bu problemler bilgisayar ortamında çözülebilmesi için cebirsel ifadelere dönüştürülerek ayrıklaştırılmaktadır.

Ancak bu dönüşümler sırasında yapılan varsayımlar kaçınılmaz olarak belirli bilgi kayıplarına neden olmakta ve gerçekçi olmayan malzeme davranış sonuçlarına yol

açabilmektedir. Sürekli ortam mekaniğindeki kesikli modelleme, gerçek yapının bazı özelliklerini veya süreksizliklerini tam olarak yansıtmayabilmektedir. Bu nedenle, sonlu elemanlar metodu gibi yaklaşımların doğrulukları ve güvenilirlikleri, yapılan varsayımların geçerliliği ve modelin gerçek yapıya ne kadar yakın olduğu gibi faktörlere bağlı olarak değişebilmektedir.

Sonuç olarak, sürekli ortam mekaniği ifadelerinin sonlu elemanlar modeliyle ayrıştırılması, bilgisayar tabanlı çözümler sağlamak için yaygın bir yaklaşım olmaktadır. Ancak bu yöntemdeki varsayımlar ve dönüşümler, gerçek malzeme davranışının tam bir yansıması olmaktan uzak olabilmekte ve sonuçta gerçeklikten uzak sonuçlara neden olabilmektedir.

2000 yılında Stewart Silling, bu sınırlamalardan kaçınarak yeni bir yaklaşım geliştirmiş ve Peridinamik Teorisini ortaya koymuştur. Bu teori, ayrık parçacık mekaniği, sürekli ortam mekaniği ve sürekli ortamda gelişen süreksizlik olgularını bir araya getirerek çözüm sunmaktadır. Peridinamik, matematiksel modelinde her yerde aynı temel denklemleri kullanarak sürekli veya süreksiz (örneğin çatlak gibi) ortamların ayrımını yapmadan uygulanabilme özelliğine sahip bir teoridir.

Bu yaklaşım, süreksizliklerin mevcudiyetinde dahi temel denklemlerle uyumsuzlukların giderilmesini sağlamakta ve ek bileşenlere ihtiyaç duymadan tutarlı bir çözüm ortamı sunmaktadır. Peridinamik, sürekli ortam mekaniğinin sınırlamalarını aşarak gerçek yapıların davranışını daha doğru bir şekilde modellemektedir. Bu sayede çatlaklar, kırılmalar ve diğer süreksizlikler gibi zorlu durumlarla daha etkin bir şekilde başa çıkabilmektedir.

Silling'in Peridinamik Teorisi, malzeme davranışının daha gerçekçi bir şekilde modellenmesini sağlayarak, sürekli ve süreksiz ortamlar arasında ayrım yapmadan tutarlı bir matematiksel çözüm ortamı sunmaktadır. Bu, malzeme mühendisliği, kırılma mekaniği ve diğer alanlarda daha kesin ve güvenilir analizler yapılmasına olanak tanımaktadır.

Doğada bulunan bazı malzemeler, özellikle kompozit yapılar, mekanik özelliklerinden dolayı çeşitli deformasyon tiplerine maruz kalabilmektedir. Bu deformasyon tipleri elastik olabileceği gibi, malzeme içinde geri dönülmez hasarlar olan çatlakların oluşumu, ilerlemesi ve dallanması şeklinde de olabilmektedir. Deformasyon sürecinde malzeme

içinde meydana gelen bu farklı hasar davranışlarının sayısal modellemesi, yerel ve yerel olmayan teoriler kullanılarak farklı şekillerde gerçekleştirilebilmektedir.

Yerel teoriler, hasarın sadece belirli bir bölgede yoğunlaştığı ve çatlakların yerel etkileriyle sınırlı olduğu varsayımına dayanmaktadır. Bu teoriler genellikle elastik çatlak mekaniği prensiplerini kullanmakta ve çatlakların büyüme davranışını analiz etmeyi amaçlamaktadır.

Öte yandan, yerel olmayan teoriler, malzeme içinde hasarın daha geniş bir alanda yayıldığını ve çatlakların dallandığı veya birleştiği durumları da içermektedir. Bu teoriler, malzeme davranışının daha karmaşık ve gerçekçi bir şekilde modellenmesine olanak tanımaktadır. Yerel olmayan teoriler genellikle süreksizlikleri ve malzeme mikroyapısındaki değişiklikleri hesaba katarak daha detaylı analizler yapmaktadır.

Her iki yaklaşım da malzeme hasarının sayısal modellemesinde kullanılan yöntemlerdir ve seçimleri, incelenen malzemenin özelliklerine ve analiz amacına bağlı olarak değişebilmektedir. Yerel teoriler daha basit ve hesaplama açısından daha kolay uygulanabilirken, yerel olmayan teoriler daha gerçekçi sonuçlar elde etmek için daha kapsamlı bir analiz sağlamaktadır.

1.1 Yerel Teoriler

Hasarın önceden tahmin edilmesi, mühendisliğin kritik ve önemli alanlarından biridir. Özellikle uçak gövdelerinde yaygın olarak kullanılan kompozit malzemelerde, mekanik bağlantı bölgelerindeki bağlantı elemanları dayanımı azaltabilmektedir. Bu düşük dayanımlı bölgelerde yüksek gerilmeler meydana gelmekte ve bu da hasara yol açmaktadır. Ancak, malzemenin karmaşık kırılma mekaniğini göz ardı eden bir hasar tahmin yöntemi, çatlak oluşumu ve ilerlemesiyle ilgili doğru sonuçlar vermeyebilmektedir.

Griffith, camdaki hasarın başlangıcını incelemek için enerjinin korunumu ilkesini kullanmıştır. Bu araştırmasında, cam atomları arasındaki bağları kırmak için gerekli olan teorik gerilme ile ölçülen gerilme değerlerini karşılaştırmıştır. Gerilme değerleri arasındaki farkların açıklanması, Lineer Elastik Kırılma Mekaniğinin (LEKM) temellerini oluşturmuştur (Williams, 1961).

LEKM, malzemelerin kırılma davranışını analiz etmek için kullanılan bir teoridir. Bu teori, malzemenin elastik davranışını temel almakta ve çatlakların oluşumu ve büyümesiyle ilgili fenomenleri açıklamayı amaçlamaktadır. LEKM, malzeme içindeki gerilmelerin çatlak büyüklüğü, malzeme özellikleri ve çevresel etkiler gibi faktörlere bağlı olarak nasıl değiştiğini incelemektedir (Williams, 1961).

Griffith'in çalışmaları, hasar tahmini ve çatlak analizi gibi mühendislik uygulamalarında önemli bir rol oynamış ve daha sonra kırılma mekaniği alanının gelişimine katkıda bulunmuştur. Bugün, malzemelerin dayanımı ve hasar davranışının tahmin edilmesinde çeşitli analiz yöntemleri ve modelleri kullanılmaktadır, ancak LEKM, temel bir yaklaşım olarak hala yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Williams, Lineer Elastik Kırılma Mekaniği (LEKM) temellerini oluşturan çalışmalardan yola çıkarak kırılma mekaniği üzerine araştırmalar yapmıştır. Bu araştırmalarda, elastik ve izotropik bir malzemede çatlakların uç kısımlarındaki gerilme alanının sonsuza yaklaştığını belirlemek için Klasik Sürekli Ortamlar Mekaniği (KSOM) denklemlerini kullanmıştır. Buna bağlı olarak, çatlak başlangıcını tahmin etmek için gerilme yoğunluk faktörü adı verilen bir parametreye ve ek bir kritere ihtiyaç duyulduğunu ortaya koymuştur.

Williams'ın çalışmaları, çatlak ilerlemesi üzerine yapılan araştırmalarda önemli bir adımdır. Gerilme yoğunluk faktörü, çatlak uçlarında gerilmelerin yoğunluğunu tanımlayan bir kavramdır ve kırılma başlangıcını tahmin etmek için kullanılan bir ölçüdür. Bu faktör, çatlak ilerlemesi için gerekli gerilme enerjisinin bir göstergesi olarak kullanılmaktadır.

Williams'ın çalışmaları, kırılma mekaniği alanında çatlak davranışının daha iyi anlaşılmasına ve hasar tahmini yöntemlerinin geliştirilmesine katkıda bulunmuştur. Bu çalışmalar, malzemelerin çatlaklara maruz kaldığı durumlarda gerilme ve hasar dağılımını analiz etmek için kullanılan çeşitli analitik ve sayısal tekniklerin temelini oluşturmuştur. Bugün, çatlak ilerlemesiyle ilgili birçok araştırma ve deney, Williams'ın çalışmalarından ilham alarak gerçekleştirilmektedir.

Günümüzde, kompozit malzemelerin davranışının, hasarının ve hasar seviyesinin belirlenmesi için genellikle sonlu elemanlar yöntemi (SEY) kullanılmaktadır. SEY, yerel teori denklemlerini temel alarak malzemenin davranışını ve hasarını modellerken sayısal

yaklaşımlar kullanılmaktadır. Ancak SEY tek başına yeterli olmadığından, hasarın yönünü ve şiddetini belirlemek için deneysel metotlardan da faydalanılmaktadır.

Kırılma mekaniği metotları, hasarın başlangıcını, şiddetini, hızını ve dallanmasını tahmin etme konusunda bazı zorluklarla karşılaşmaktadır. Kompleks geometrilerde gerçeğe yakın tahminler yapabilmek için deneysel sonuçlardan yararlanılarak ek matematiksel modellere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durum, hasar davranışının tahmin edilmesini karmaşık hale getirmekte ve bazı durumlarda tam olarak gerçeği yansıtmaktan uzak kalabilmektedir.

Bu nedenle, hasarın tahmin edilmesi ve analiz edilmesi için deneysel sonuçlarla birlikte sayısal ve matematiksel modellerin bir arada kullanılması gerekmektedir. Deneysel veriler, hasarın ilerlemesi, şiddeti ve yönü gibi önemli bilgileri sağlayabilirken, matematiksel modeller sayesinde kompleks yapıların analizi yapılabilmektedir. Bu bütünsel yaklaşım, kompozit malzemelerin hasarının daha doğru bir şekilde tahmin edilmesine ve analiz edilmesine olanak sağlamaktadır.

Melenk ve Babuska tarafından geliştirilen PUFEM (Partially Uniform Finite Element Method), özellikle sonlu elemanlar (SE) ağının sık sık yeniden oluşturulması gereken problemler için etkili sonuçlar veren bir yöntemdir. Bu yöntem, SE ağının yeniden oluşturulması gereken durumlarda daha iyi performans göstermektedir.

Belytschko ve Black ise PUFEM modelini temel alarak çatlak oluşumu ve büyümesini modellenmesi için genişletilmiş sonlu elemanlar yöntemini (GSEY) geliştirmişlerdir. GSEY, çatlakların ve çatlak büyümelerinin SE ağı yeniden oluşturulmadan modellenmesine olanak sağlamaktadır. Bu yöntemde, çatlakların geometrisi sürekli olarak eleman yüzeyine eklenerek bütün çatlak geometrisi yeniden oluşturulmakta ve SE ağı tekrar tekrar oluşturulmamaktadır (Belytschko ve Black, 1999).

GSEY'nin bu avantajı, basit kırılma mekaniği problemlerinin çözümlenmesini sağlamaktadır. Ancak çatlak ilerlemesinin tahmin edilebilmesi için ek bir kriter gerekmektedir. Bu, çatlak büyümesiyle ilgili ek matematiksel modellerin kullanılmasını veya özel kırılma kriterlerinin belirlenmesini gerektirebilmektedir.

GSEY, daha karmaşık çatlakların ve çatlak büyümelerinin analizinde SEY'ye kıyasla daha uygun bir yöntem olabilmektedir. Ancak her bir problem için uygun yöntemin

seçilmesi, analiz edilen malzemenin özelliklerine, çatlakların karmaşıklığına ve analiz gereksinimlerine bağlıdır.

Çatlak hasarının tahmininde sıkça kullanılan bir model, kohezif bölge konseptidir. Bu model, çatlak uçlarındaki sonsuz gerilmeleri matematiksel olarak modellemek amacıyla, birbirinden ayrılan iki yüzey arasındaki gerilme değerine bir sınırlama getirmektedir (Hillerborg vd., 1976).

Kohezif modelleme üzerine çalışmalar, Dugdale ve Barenblatt tarafından başlatılmıştır. Bu araştırmaların temelini kullanarak, Hillerborg ve diğerleri mod I yükleme durumunda kırılmayı açıklamak için kohezif bölge elemanlarını (KBE) tanımlamışlardır. Benzer şekilde, Xu ve Needleman karma yükleme koşullarında kırılmayı tanımlamak amacıyla KBE'leri geliştirmişlerdir. KBE'ler, sonlu elemanlar ağı içindeki elemanların sınırlarında bulunan yüzey elemanlarıdır ve çatlak ilerlemesi sadece KBE'lerin sınırlarında gerçekleşmektedir (Hillerborg vd., 1976).

Zhang ve diğerleri, GSEY'ye benzer bir şekilde, SE ağının tekrar oluşturulmasına ihtiyaç duymadan KBE'leri tanımlamıştır. Ancak bu yöntemde de çatlak ilerlemesinin tahmin edilebilmesi için ek kriterlere ihtiyaç vardır.

Kohezif bölge konsepti, çatlak ilerlemesi ve hasar tahmini için önemli bir araç olabilmektedir. Ancak her bir modelin avantajları, kısıtlamaları ve uygunlukları göz önünde bulundurularak doğru şekilde seçilmelidir.

Klasik Sürekli Ortamlar Mekaniği (KSOM) temelli yöntemlerin hasar davranışını modellemede zorluklar içerdiği ifade edilmiştir. Bu zorluklara alternatif olarak, moleküler dinamik konsepti ve atomik kafes modeli, malzemelerdeki hasar tahmini için farklı bir yaklaşım sunmuştur. Bu yöntemler, çatlak başlangıcı ve ilerlemesini izlemek amacıyla atomlar arası kuvvetleri kullanan bir model kullanmaktadır (Abraham, 2002).

Atomik kafes modeli ile yapılan simülasyonlar, çok küçük zaman adımları gerektirdiğinden yüksek hesaplama gücü talep etmektedir. Bu yüksek hesaplama yükünü azaltmak için Ostoja ve Starzewski, yay kafes modelini geliştirmişlerdir. Yay kafes modelinde, malzeme içindeki noktalar temsili yay elemanları ile etkileşim halindedir. Ancak, malzeme özelliklerinin yay elemanlarına uyarlanması her problem için ayrı bir zorluk oluşturmaktadır. (Eringen, 1972).

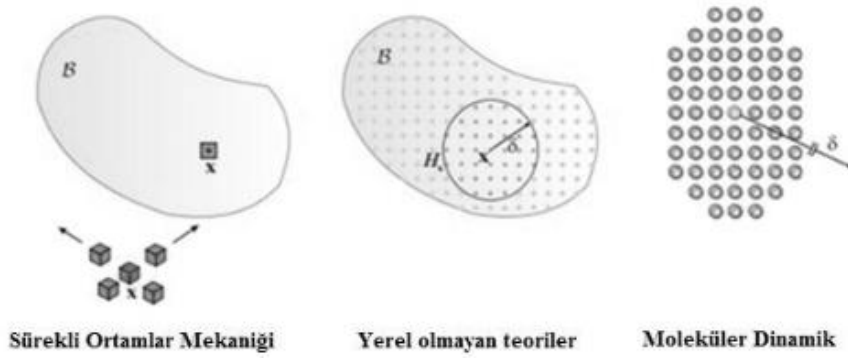
Bu kafes modelleri, belirli malzemeler için başarılı sonuçlar verebilse de gerçeğe yakın hasar tahmini için pratik bir modelleme aracı olarak yetersiz ve kullanışsız olabilmektedir. Eringen, KSOM'yi kullanan yöntemlerin farklı ölçeklerdeki kuvvetleri dikkate almadığını ve KSOM'nin yalnızca geniş dalga boylarında geçerli sonuçlar verdiğini göstermiştir.

KSOM'yi kullanan metodlar ve atomik kafes modelleri farklı avantajlar ve sınırlamalar sunmaktadır. Her bir yöntemin kendi uygulama alanları ve kısıtlamaları olduğunu göz önünde bulundurarak, hasar tahmini için en uygun yöntemi seçmek önemlidir.

Özetlemek gerekirse; KSOM, sürekli bir deformasyon ortamını inceleyen bir yaklaşımdır ve KSOM'yi kullanan modellerde bir malzeme noktası, komşu noktalarıyla etkileşim halindedir. Bu nedenle, KSOM'in yerel teoriler grubuna dahil olmasıyla birlikte, çatlak hasarının başlangıcını, ilerlemesini ve dallanmasını sayısal olarak modellemek büyük bir zorluktur. Bunun temel sebebi, KSOM formülasyonunda mekânsal türevlerin kullanılmasıdır ve bu da malzeme içindeki süreksizliklerin sayısal olarak modellemesini sınırlamaktadır.

1.2 Yerel Olmayan Teoriler

Kroner, Eringen ve Edelen gibi araştırmacılar, yerel olmayan teoriler üzerine ilk çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Yerel olmayan teoriler, uzun mesafeli etkilerin modellenmesine imkan tanımaktadır. Bu teorilerde, bir malzeme noktasının belirli bir yarıçap içerisindeki diğer noktalarla etkileşim halinde olduğu varsayılmaktadır. Yerel olmayan teoriler, Klasik Sürekli Ortamlar Mekaniği (KSOM) ile moleküler dinamik arasında bir köprü kurmaktadır. Moleküler dinamik, KSOM denklemlerini tam olarak karşılamamaktadır. Bu nedenle, yerel olmayan teorideki sonlu yarıçapın sonsuza yakınsaması, moleküler dinamiğin sürekli halini temsil etmektedir (Madenci ve Oterkus, 2014).



Şekil 1.3 Yerel ve yerel olmayan teoriler arasındaki ilişki (Madenci ve Oterkus, 2014)

Şekil 1.3'te gösterildiği gibi, yerel olmayan bir teoriye göre x malzeme noktası, δ yarıçapı komşuluğundaki bütün malzeme noktalarıyla etkileşim içindedir. Burada δ , o malzeme noktasının ortamın boyutuna göre dairesel veya küresel komşuluğunu ifade etmektedir.

Yerel olmayan teorilerde, bünye denklemleri yerel olmayan etkileri hesaba katmaktadır. Bu nedenle, yerel olmayan bünye denklemleri sürekli ortamı kabul eden ve yerel olmayan sürekli ortamlar teorisi olarak bilinen bir yaklaşımı temsil etmektedir. Yerel olmayan bünye denklemleri hem makro ölçekteki etkileri hem de moleküler ve atomik ölçekteki etkileri modelleme yeteneğine sahiptir. Eringen, yerel olmayan bir modelin farklı dalga boyları aralıklarında geçerli sonuçlar verdiğini göstermiştir. Bu sayede, yerel olmayan teoriler malzeme davranışının çeşitli ölçeklerde daha kapsamlı bir şekilde analiz edilmesini sağlamaktadır.

KSOM'de çatlak ilerlemesinin önceden tahmin edilebilmesi için ekstra bir kritere ihtiyaç duyulmuş ve bu kriter, yerel olmayan teorilerde bünye denkleminin içine entegre edilmiştir. Eringen ve Kim, yerel olmayan teori kullanarak çatlak ucu gerilme alanının KSOM'deki tekilliğin aksine asimptotik yaklaşımla sınırlandırılabilirliğini göstermişlerdir. Daha sonra, atomik ölçek yaklaşımını kullanarak kohezif gerilme değerlerinden faydalanarak bünye denkleminde kırılma kriteri önermişlerdir. Bu kırılma kriteri, Lineer Elastik Kırılma Mekaniği (LEKM) kullanan yöntemlerden farklı olarak kırılmanın olabileceği bölgeyi ayrı bir şekilde tanımlamak yerine sürekli ortamın her noktası için geçerlidir. Ari ve Eringen, yerel olmayan elastisite denklemlerini kullanan LEKM problemlerinin Elliott'un kafes modelinden elde edilen sonuçlarla tutarlı olduğunu göstermişlerdir. Ancak genel olarak, yerel olmayan teorilerde hareket denkleminde mekânsal türevler olduğu için sürekli ortamda meydana gelen çatlak gibi süreksizliklerde model geçerli olmayabilmektedir (Cemal Eringen ve Kim, 1974).

Söz konusu çatlak gibi süreksizliklerin davranışlarının tahmini, yerel bir teori olan KSOM denklemlerini kullanan LEKM ve SEY gibi benzer metodlarda temel bir sorun oluşturmaktadır. Son yıllarda, Silling yerel KSOM'den farklı olarak yerel olmayan Peridinamik teorisini geliştirmiştir. Yerel teorilerin hasar davranışını modellemede yetersiz kaldığı durumlarda, Peridinamik'in büyük avantajları bulunmaktadır.

1.3 Kırılma Mekaniği

Kırılma mekaniği, malzemelerin çatlak veya kusur içerdiği durumlarda nasıl davrandığını inceleyen bilim dalıdır. Malzemelerin çatlakların oluşumu, ilerlemesi ve sonunda kırılmaya yol açan süreçler üzerindeki etkilerini anlamak için teorik ve deneysel yöntemler kullanılmaktadır. Bu alan, mühendislik yapılarının güvenliğini ve dayanıklılığını artırmak amacıyla geliştirilmiştir.

1.3.1 Malzemede hasar

Malzemede hasar, malzemenin mekanik özelliklerini olumsuz etkileyen herhangi bir değişiktir. Bu değişiklikler, malzemenin mukavemetini, sünekliğini ve diğer özelliklerini zayıflatabilmekte ve kırılma riskini artırabilmektedir.

Malzemede hasar çeşitli şekillerde oluşabilmektedir. En yaygın hasar türleri şunlardır:

Çatlaklar: Malzemenin yüzeyinde veya içinde oluşan dar çatlaklardır. Çatlaklar, yorulma, aşınma, darbe veya aşırı yüklenme gibi çeşitli faktörlerden kaynaklanabilmektedir. Malzemenin iç yapısında oluşan ve ilerleyerek malzemenin mekanik bütünlüğünü zayıflatan ince ayrılmalardır. Çatlaklar, genellikle malzemeye uygulanan yükler veya çevresel etkiler sonucunda oluşmaktadır. Çatlakların oluşumu ve ilerlemesi, malzemenin dayanıklılığını ve ömrünü belirleyen kritik faktörlerdir. Çatlaklar, çeşitli türlere ayrılabilen ve her bir tür farklı mekanizmalarla gelişmektedir. Başlıca çatlak türleri:

- **Mikro çatlaklar;** malzeme içinde mikroskopik seviyede oluşan küçük çatlaklardır. Malzemenin üretim sürecinde, soğuma sırasında veya kullanım sırasında mikro yapısal düzensizlikler nedeniyle oluşabilmektedir. Genellikle gözle görülmez ve sadece mikroskop altında incelenebilmektedir. Mikro çatlaklar zamanla birleşerek daha büyük çatlaklara dönüşebilmektedir.

- **Yorulma çatlakları;** tekrarlayan yükler altında malzemede oluşan çatlaklardır. Sürekli değişen yükler (örneğin, titreşim, salınım veya tekrarlayan gerilme) malzemede yorulma çatlaklarına yol açmaktadır. Çatlak yüzeyinde striasyonlar (yorulma çizgileri) bulunmakta ve genellikle yavaş ilerlemektedir. Yorulma çatlakları belirli bir noktaya ulaştığında hızla büyüyerek ani kırılmalara neden olabilmektedir.
- **Gerilme korozyonu çatlakları;** kimyasal olarak aktif bir ortamda, malzemeye uygulanan gerilme nedeniyle oluşan çatlaklardır. Korozyon ortamı ve mekanik gerilmenin birleşik etkisi bu tür çatlaklara yol açmaktadır. Çatlak yüzeyinde korozyon ürünleri bulunmakta ve çatlaklar genellikle ince ve uzun olmaktadır. Malzemenin mekanik dayanımını önemli ölçüde azaltır ve ani kırılmalara yol açabilmektedir.
- **Termal çatlaklar;** ani sıcaklık değişimleri nedeniyle malzemede oluşan çatlaklardır. Sıcaklık değişimleri sonucu malzemede oluşan termal genleşme ve büzülme farkları bu tür çatlaklara yol açmaktadır. Çatlaklar genellikle belirli bir sıcaklık gradyanına paralel olarak ilerlemektedir. Termal çatlaklar malzemenin termal şok direncini azaltmakta ve kırılğan hale getirmektedir.
- **Hidrojenden kaynaklanan çatlaklar;** malzemeye sızan hidrojen atomlarının, malzemenin yapısında çatlaklara neden olmasıdır. Hidrojenin malzemeye difüzyonu, yüksek basınç veya korozyon gibi süreçler bu tür çatlaklara yol açmaktadır. Çatlaklar genellikle malzemenin iç yapısında aniden oluşmaktadır. Hidrojen gevrekliği malzemenin dayanımını ve sünekliğini önemli ölçüde azaltmaktadır.
- **Radyasyon çatlakları;** yüksek enerjili radyasyonun malzemeye zarar vererek çatlaklara neden olmasıdır. Nükleer reaktörler veya uzay araçları gibi ortamlarda yüksek enerjili parçacıkların malzemeye çarpması sonucu oluşmaktadır. Çatlaklar genellikle mikro yapısal değişiklikler ve malzemenin kırılğan hale gelmesi ile ilişkilidir. Radyasyon çatlakları malzemenin mekanik ve fiziksel özelliklerini olumsuz etkilemektedir.
- **Soğuk çatlak kaynağı;** kaynak işlemi sırasında veya sonrasında oluşan çatlaklardır. Kaynaklı yapılarda yaygındır.

Çatlaklar, malzemenin mukavemetini, sünekliğini ve diğer mekanik özelliklerini zayıflatabilmektedir. Malzemenin kırılmasına yol açabilmektedir. Malzemenin

korozyona karşı direncini azaltabilmektedir. Malzemenin sızdırmazlığını bozabilmektedir.

Malzeme seçimi ve tasarımı yoluyla çatlak oluşumunu önlemek mümkündür. Nondestructive test (NDT) ve diğer muayene teknikleri ile çatlaklar erken aşamada tespit edilebilmekte ve onarılabilmektedir. Malzeme işleme teknikleri, çatlak oluşumunu önlemeye yardımcı olabilmektedir. Kırılma mekaniği analizleri kullanarak yapıların ve parçaların değerlendirilmesi, çatlak oluşum riskini azaltabilmektedir.

Gözenekler: Malzemede gaz veya sıvı ile dolu küçük boşluklardır. Gözenekler, döküm sırasında oluşabilmektedir veya malzemenin bozulmasından kaynaklanabilmektedir. Gözenekler, malzemenin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkileyebilmekte ve hasarın başlıca nedenlerinden biri olabilmektedir. Gözeneklerin oluşumu, büyüklüğü, dağılımı ve şekli, malzemenin üretim sürecine, bileşimine ve çalışma koşullarına bağlı olarak değişmektedir. Başlıca gözenek türleri:

- **Mikro gözenekler;** malzeme içindeki mikroskobik seviyedeki küçük boşluklardır. Genellikle döküm ve katılaşma süreçlerinde gaz hapsolması veya büzülme sonucu oluşmaktadır. Mikroskop altında gözlemlenebilir ve malzemenin homojenliğini bozmaktadır. Malzemenin mekanik dayanıklılığını ve yorulma direncini azaltmaktadır.
- **Makro gözenekler;** malzeme içinde makroskobik seviyede görülebilen büyük boşluklardır. Döküm hataları, gaz hapsolması ve büzülme gibi üretim süreci hatalarından kaynaklanmaktadır. Gözle görülebilir ve malzemenin yapısal bütünlüğünü ciddi şekilde zayıflatmaktadır. Malzemenin mukavemetini ve dayanıklılığını önemli ölçüde azaltmaktadır.
- **Gaz gözenekleri;** malzeme içinde gaz kabarcıklarının hapsolmasıyla oluşan gözeneklerdir. Döküm sırasında çözünmüş gazların malzeme içinde kalması veya gaz kabarcıklarının birleşmesi sonucu oluşmaktadır. Genellikle yuvarlak veya düzensiz şekillidir ve gazın türüne bağlı olarak farklı büyüklüklerde olabilmektedir. Malzemenin çekme dayanımını ve sünekliğini azaltmaktadır.
- **Çekilme gözenekleri;** katılaşma sırasında malzemenin büzülmesiyle oluşan boşluklardır. Döküm ve katılaşma süreçlerinde malzemenin hacim değişikliği nedeniyle oluşmaktadır. Düzensiz şekilli ve genellikle bir arada bulunan

boşluklardır. Malzemenin yapısal bütünlüğünü ve mekanik özelliklerini zayıflatmaktadır.

- **Bağlanma gözenekleri;** malzemenin farklı bileşenleri arasındaki bağlanma yüzeylerinde oluşan boşluklardır. Yetersiz sinterleme, kaynaşma veya bağlanma işlemleri nedeniyle oluşmaktadır. Bağlanma yüzeylerinde görülür ve genellikle ince, uzun boşluklar şeklindedir. Malzemenin bütünlüğünü ve mekanik dayanımını olumsuz etkilemektedir.
- **Büzülme gözenekleri;** malzeme soğurken veya kururken hacim değişikliği sonucu oluşan gözeneklerdir.
- **Sinterleme gözenekleri;** toz metalurjisi işleminde sinterleme sırasında kalan gözeneklerdir.
- **Korozyon gözenekleri;** korozyon sonucu malzemede oluşan gözeneklerdir.
- **Yorulma gözenekleri;** tekrarlayan yüklemeler sonucu oluşan gözeneklerdir.

Gözenekler, malzemenin mukavemetini, sünekliğini ve diğer mekanik özelliklerini zayıflatabilmektedir. Malzemenin korozyona karşı direncini azaltabilmektedir. Malzemenin sızdırmazlığını bozabilmektedir. Malzemenin ısı iletkenliğini azaltabilmektedir. Malzemenin elektriksel direncini artırabilmektedir.

Malzeme seçimi ve tasarımı yoluyla gözenek oluşumunu önlemek mümkündür. Malzeme işleme teknikleri, gözenek oluşumunu önlemeye yardımcı olabilmektedir. Nondestructive test (NDT) ve diğer muayene teknikleri ile gözenekler erken aşamada tespit edilebilmektedir ve onarılabilmektedir.

Eğilmeler: Eğilmeler, malzemede gerilim altında kaldığında oluşan kalıcı deformasyonlardır. Aşırı yüklenme, darbe veya aşırı sıcaklık değişimlerinden kaynaklanabilmektedirler ve malzemenin mukavemetini ve işlevini zayıflatabilmektedirler. Başlıca eğilme türleri:

- **Esnek eğilme;** malzeme gerilimden sonra orijinal şekline geri dönmektedir.
- **Plastik eğilme;** malzeme kalıcı olarak deforme olmakta ve orijinal şekline geri dönmemektedir.
- **Kırılma;** malzeme aşırı eğilmekte ve kopmaktadır.

Eğilmeler, malzemenin mukavemetini ve sünekliğini zayıflatabilmektedir. Malzemenin boyutlarını ve şeklini değiştirebilmektedir. Malzemenin işlevini bozabilmektedir. Malzemenin korozyona karşı direncini azaltabilmektedir.

Malzeme seçimi ve tasarımı yoluyla eğilme oluşumunu önlemek mümkündür. Uygun üretim teknikleri kullanarak eğilme oluşumu önlenabilmektedir. Gerilim sınırlarına uymak eğilme oluşumunu önlemeye yardımcı olabilmektedir. Düzenli muayene ve bakım ile eğilmeler erken aşamada tespit edilebilmekte ve onarılabilmektedir.

Korozyon: Korozyon, elektrokimyasal reaksiyonlar sonucu metallerin ve alaşımların bozulması ve aşınmasıdır. Bu reaksiyonlar, metallerin atmosferdeki oksijen, su ve diğer kimyasallarla etkileşime girmesi sonucu oluşmaktadır. Korozyon, malzemede çeşitli hasarlara yol açabilmekte ve mekanik özelliklerini, işlevini ve estetik görünümünü bozabilmektedir. Korozyon, metallerde ve diğer metal alaşımlarda yaygındır. Başlıca korozyon türleri:

- **Tekdüze korozyon;** malzemenin tüm yüzeyinde eşit olarak ilerleyen bir korozyon türüdür.
- **Çukurlaşma korozyon;** malzemenin yüzeyinde lokalize olarak oyuklar ve delikler oluşturan bir korozyon türüdür.
- **Galvanik korozyon;** farklı metallerin birbiri ile temas halinde olması durumunda oluşan bir korozyon türüdür.
- **Gerilim korozyonu;** mekanik gerilimin varlığında oluşan bir korozyon türüdür.
- **Yorgunluk korozyonu;** tekrarlayan yüklemeler sonucu oluşan bir korozyon türüdür.
- **Korozyon yıpranması;** korozyon ve aşınmanın birlikte etkisiyle oluşan bir hasar türüdür.

Korozyon, malzemenin mukavemetini, sünekliğini ve diğer mekanik özelliklerini zayıflatabilmektedir. Malzemenin boyutlarını ve şeklini değiştirebilmektedir. Malzemenin işlevini bozabilmektedir. Sızıntılara ve arızalara yol açabilmektedir. Estetik açıdan hoş olmayan bir görünüme yol açabilmektedir.

Korozyona dayanıklı malzemeler seçilerek korozyon önlenabilmektedir. Metaller, boya, plastik veya seramik gibi kaplamalar ile kaplanarak korozyondan korunabilmektedir. Katodik koruma ile metale, anot görevi gören bir başka metal bağlanarak korozyon önlenabilmektedir. Anot koruması ile metale, akım sağlayarak korozyon önlenabilmektedir. İnhibitör kullanımı ile korozyon reaksiyonunu yavaşlatan kimyasallar kullanılabilmektedir. Korozyona neden olabilecek gerilimler ve temaslardan kaçınılarak tasarım yapılabilir.

1.3.2 Kırılma çeşitleri

Kırılma, bir malzemenin gerilim altında kaldığında iki veya daha fazla parçaya ayrılmasıdır. Kırılma olayı çatlağın oluşumu ve çatlağın ilerlemesi olmak üzere iki aşamada gerçekleşen bir süreçtir. Kırılma türü, malzemenin türüne, uygulanan yükleme şartlarına, sıcaklığa ve diğer faktörlere bağlı olarak değişebilir. Kırılma; gevrek kırılma, sünek kırılma ve diğer kırılma türleri olarak sınıflandırılabilir.

Gevrek kırılma: Çok az veya hiç plastik deformasyon olmadan ani ve yıkıcı bir şekilde gerçekleşmektedir. Bu, kırılmadan önce malzemede gözle görülür bir şekil değişimi olmadığı anlamına gelmektedir. Gevrek kırılmada, kırılma yüzeyi parlak ve kristalize görünmektedir. Bu, kırılmanın atomik düzlemde nasıl gerçekleştiğini göstermektedir. Gevrek malzemeler, sünek malzemelere kıyasla daha az enerji emme kapasitesine sahiptir. Bu nedenle, gevrek kırılma genellikle daha tehlikelidir. Yüksek sıcaklıklarda ve kusursuz malzemelerde gevrek kırılma daha yaygındır.

Gevrek kırılma, malzeme üzerinde delikler, çatlaklar veya yarıklar gibi kusurların bulunmasından dolayı, kesite düşen yükün homojen dağılmaması sonucu çok eksenli gerilme durumunda ortaya çıkabilmektedir. Bu tür kırılmaya etki eden faktörlerden biri de yüksek deformasyon hızıdır. Malzeme içindeki mikro çatlaklar, dış etkenler nedeniyle hareket etmekte ve deformasyon hızı arttıkça çatlakların yayılma hızı da artmaktadır. Deformasyon hızının daha da artması, bu çatlakların ani kırılmalara yol açmasına neden olmaktadır. Ayrıca, düşük sıcaklık da gevrek kırılmaya sebep olan bir faktördür. Düşük sıcaklıkta, malzeme içindeki çatlak yayılımının yavaşlaması nedeniyle gevrekleşme ortaya çıkmakta ve mukavemet artışı gözlenmektedir. Ancak, gerilmenin belirli bir değerin üzerinde olduğu durumlarda düşük sıcaklık altında da gevrek kırılma görülebilmektedir (Kaya, 2022).

Sünek kırılma: Önemli bir plastik deformasyon sonucu gerçekleşmektedir. Bu, kırılmadan önce malzemenin belirgin bir şekilde şekil değiştirmesi ve eğilmesi anlamına gelmektedir. Sünek kırılmada, kırılma yüzeyi mat ve lifli görünmektedir. Bu lifler, malzemenin plastik deformasyon sırasında nasıl şekil değiştirdiğini göstermektedir. Sünek malzemeler, gevrek malzemelere kıyasla daha fazla enerji emme kapasitesine sahiptir. Bu nedenle, sünek kırılma genellikle daha güvenlidir. Düşük sıcaklıklarda ve çentikli malzemelerde sünek kırılma, gevrek kırılmaya dönüşebilmektedir.

Kırılmadan önce malzemede plastik deformasyon meydana gelmektedir. Bu kırılmanın oluşabilmesi için gerilmenin plastik deformasyon (akma gözlenmesi) oluşturabilecek seviyede malzemeye etki etmesi gerekmektedir (Kaya, 2022).

Diğer kırılma türlerinden bahsedilmek istenirse;

Sürünme kırılması: Yüksek sıcaklıklarda ve uzun süreli yükler altında oluşan zamanla artan deformasyon ve kopma ile gerçekleşmektedir. Türbin kanatları ve borular gibi yüksek sıcaklıklarda çalışan parçalarda yaygındır.

Sabit bir yük altında yüksek sıcaklığa maruz bir malzeme sürünme deformasyonu etkisi ile kırılmaktadır. Sünek kırılmadan farkı kırılma olayının daha yüksek sıcaklıkta olmasıdır (Kaya, 2022).

Yorulma kırılması: Tekrarlayan yüklemeler sonucu oluşan kademeli bir çatlak büyümesi sonucu gerçekleşmektedir. Uçak kanatları ve akslar gibi yorulmaya maruz kalan parçalarda yaygındır.

Malzemeler maksimum çekme dayanımı veya elastik limitlerin altında yüklense de değişken yüklere maruz kaldıklarında kırılma gözlenebilmektedir. Kırılma plastik deformasyondan önce de olabilmektedir. Malzemedeki çatlak yorulma yükünün her periyodunda daha da ilerlemektedir (Sorucu, 2007).

Kayma Kırılması: Atom katmanlarının birbirine göre kayması sonucu gerçekleşmektedir. Metallerde yaygındır.

Klivaj Kırılması: Atomik bağların kopması sonucu düz bir yüzey boyunca gerçekleşmektedir. Cam ve bazı kristallerde yaygındır.

1.3.2.1 İdeal kırılma mukavemeti

Bir malzemenin kırılmadan önce dayanabileceği maksimum gerilimi temsil etmektedir. Bu değer, malzemenin mekanik özelliklerinin ve mikro yapısının bir fonksiyonudur ve teorik bir kavramdır. Gerçekte, malzemede kusurlar ve diğer faktörler kırılma mukavemetini ideal değerinin altında tutabilmektedir.

İdeal kırılma mukavemeti hesaplamak için çeşitli yöntemler kullanılabilmektedir:

- **Mohs Sertlik Ölçeği:** Bu ölçek, minerallerin çizilmeye karşı direncini ölçmekte ve ideal kırılma mukavemetini tahmin etmek için kullanılabilmektedir.

- **Brinell Sertlik Testi:** Bu test, bir malzemenin bir nüfuz edici tarafından ne kadar kolay deforme olduğunu ölçmekte ve ideal kırılma mukavemetini tahmin etmek için kullanılabilir.
- **Vickers Sertlik Testi:** Bu test, bir piramidal nüfuz edici tarafından yapılan girintinin boyutunu ölçmekte ve ideal kırılma mukavemetini tahmin etmek için kullanılabilir.
- **Young Modülü (Elastikte Modülü):** Bu modül, bir malzemenin elastik deformasyona karşı direncini ölçmekte ve ideal kırılma mukavemetini tahmin etmek için kullanılabilir.

İdeal kırılma mukavemeti, mühendislik ve malzeme biliminde önemli bir parametredir. Bir malzemenin kırılma riskini değerlendirmek ve güvenli ve dayanıklı tasarımlar oluşturmak için kullanılabilir.

Ancak, ideal kırılma mukavemetinin teorik bir değer olduğunu ve gerçekte malzemenin kırılma mukavemetinin ideal değerinin altında olabileceğini unutmamak önemlidir. Mühendisler, tasarımlarında bu gerçeği dikkate almalı ve kırılma riskini azaltmak için ek önlemler almalıdır.

1.3.3 Lineer elastik kırılma mekaniği

Malzemelerde doğal olarak mikro çatlaklar ve benzeri kusurlar bulunmaktadır. Kırılma mekaniğinin incelenmesinde, malzemenin tüm davranışlarının elastik sınırlar içinde kalması prensibine dayanan analitik ifadelerin tamamı Lineer Elastik Kırılma Mekaniği (LEKM) olarak adlandırılmaktadır. Bu metodun temel prensibi, çatlak ucunda oluşan gerilmelerin, malzemeye uygulanan gerilme, çatlağın uzunluğu ve yönü ile ilişkili olarak ifade edilmesidir. Bu bağlamda, bir çatlağın ilerleyişi iki farklı şekilde hesaplanabilmektedir. Yükleme sonucu parçada depolanan enerji kritik bir değeri aşmış ve çatlak ucundaki gerilmenin değeri kritik bir değere ulaşmış ise hesaplama yapılabilmektedir. Bu iki metodun uygulanmasına iki yaklaşım söz konusudur. Bu yaklaşımlar; enerji dengesi yaklaşımı ve gerilme şiddeti faktörü yaklaşımıdır.

1.3.3.1 Enerji dengesi yaklaşımı

Kırılma, oldukça karmaşık bir süreçtir ve bu süreçte mikro ve makro boşlukların ya da çatlakların oluşumu ve ilerlemesi, dislokasyon mekanizması, kayma bantları ve malzeme geometrisi gibi faktörlerin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Kırılma olayını tam

anlamıyla açıklayan kesin bir genel teori olmamakla birlikte, malzemelerdeki kırılma olaylarını anlamak ve açıklamak için kullanılan çeşitli teoriler vardır. Bu teorilerden biri de Enerji Teorisi'dir.

Basit çekme durumunda uygulanan gerilmenin cismin birim hacminde depolanan elastik enerjisi;

$$U_0 = \frac{\sigma^2}{2E} \quad (1.1)$$

şeklindedir.

İçinde çatlak bulunan bir sistemin bir F kuvveti etkisi altında tutulması durumunda sistemin toplam enerji dengesi Denklem 1.2'de gösterilmiştir;

$$U_0 = U_s + U_k + U_d \quad (1.2)$$

Denklem 1.2'de U_e Dış enerji, U_s Genleme enerjisi, U_k Kinetik enerji, U_d Kaybolan enerjisini (Kırılma enerjisi) ifade etmektedir.

Statik veya yarı statik durumda $U_k = 0$ alınabileceğinden birim genişliğinde bir levhada çatlağın ilerlemesi durumunda;

$$\frac{\partial}{\partial a}(U_e - U_s) = \frac{dU_d}{da} = G \quad (1.3)$$

yazılabilmektedir. Burada G değerine sistemde enerji salıverme miktarı veya çatlak ilerleme enerjisi denir. Ayrıca $R = dU_d/da$ değeri de çatlak ilerleme direnci olarak bilinmektedir. Kırılma mekaniğinde G değeri çatlağın birim alanı kadar ilerlemesi sonucu harcanan enerji olmak üzere $2\gamma = G$ yazılabilmektedir.

$$\frac{\partial}{\partial a}(U_e - U_s) = \gamma \frac{\partial A}{\partial a} \quad (1.4)$$

burada ∂A , çatlağın ∂a kadar ilerlemesi sonucu oluşan çatlak yüzeylerinin alanıdır. Şekil 1.4'teki gibi genişliği B olan bir levha bir F kuvveti etkisi altında kuvvetin uygulandığı nokta v kadar yer değiştirecektir. Bu durumda çatlak da kadar uzama gösterdiğinde kuvvetin uygulama noktası dv kadar yer değiştirecektir. Böylece dış kuvvetler tarafından yapılan iş $U_e = F \cdot dv$ olacaktır. Denklem 1.4 birim genişliğinde bir levha için yazılmıştır. B genişliğindeki bir levhada çatlağın ilerlemesi durumunda çatlak ilerleme enerjisi (G) Denklem 1.5'te gösterilmektedir.

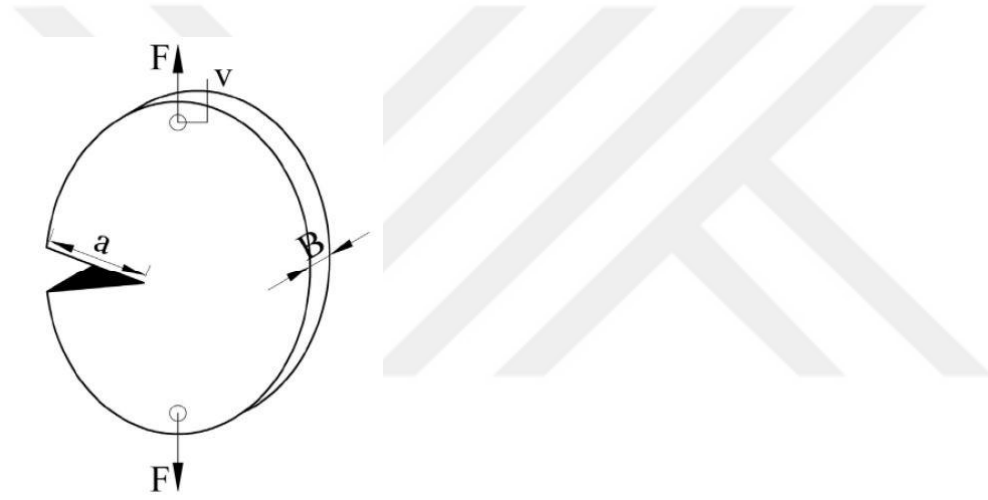
$$G = \frac{\partial}{\partial a}(U_e - U_s) = \frac{1}{B} \left(F \frac{\partial v}{\partial a} - \frac{\partial U_s}{\partial a} \right) \quad (1.5)$$

Şekil 1.4'teki gibi yük altında bulunan bir sistemde çatlak ilerlemediği sürece meydana gelen v uzaması uygulanan kuvvetle doğru orantılıdır. Komplians olarak da bilinen bu ilişkiyi şu şekilde ifade etmek mümkündür;

Kuvvet= Rijitlik x Deplasman

$$F = k \cdot v = \frac{1}{C} v \text{ veya } v = C \cdot F \quad (1.6)$$

Burada C ye levhanın kompliansı denir.



Şekil 1.4 F kuvveti etkisi altındaki levhanın v kadar uzaması (Yayla, 2007)

Böylece bir elastik plakanın şekil değişim enerjisi;

$$U_s = \frac{1}{2} F v = \frac{1}{2} C F^2 \quad (1.7)$$

şeklinde yazılmaktadır. Denklem 1.5 ve 1.6'dan;

$$G = \frac{1}{B} \left(F^2 \frac{\partial C}{\partial a} + C F \frac{\partial F}{\partial a} - \frac{1}{2} F^2 \frac{\partial C}{\partial a} - C F \frac{\partial F}{\partial a} \right) = \frac{F^2}{2B} \frac{\partial C}{\partial a} \quad (1.8)$$

Böylece çatlak boyuna bağlı olarak C değeri elde edildiğinde bu noktaların oluşturduğu eğrinin eğimi $\partial C / \partial a$ hesaplanarak G_c değeri hesaplanmış olmaktadır. Burada verilen enerji boşalma miktarı (G) kritik bir değere ulaştığı zaman çatlak hareket etmeye başlamaktadır. Bu G_c değerinin birimi kJ/m^2 'dir.

Dolayısıyla kuvvet altında çatlağın davranışı şu şekilde ifade edilebilmektedir;

$G=R$ ise kararlı çatlak ilerlemesi var,

$G<R$ ise çatlak ilerlemesi yok,

$G>R$ ise kararsız çatlak ilerlemesi var (Yayla, 2007).

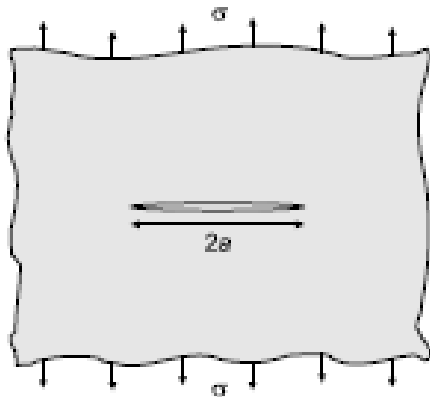
Griffith'in çatlak ilerlemesi için öne sürdüğü enerji yaklaşımı, gevrek malzemeler için oldukça başarılı sonuçlar vermektedir. Bu tür malzemelerin kırılması elastik kırılma olarak adlandırılmaktadır. Ancak, görünüşte gevrek kırılan kristal malzemelerde bile, kırılma yüzeyi etrafında bir miktar yerel plastik deformasyon meydana gelmektedir. Bu tür malzemelerde, sadece yeni çatlak yüzeyleri oluşturmak için gereken enerjiyi değil, aynı zamanda çatlak etrafında oluşacak plastik deformasyon enerjisini de hesaba katmak gerekmektedir. Irwin ve Orowan, elastik yüzey enerjisinin yanı sıra plastik deformasyon enerjisini de dikkate alarak Griffith teorisini gerçek malzeme davranışlarına daha uygun hale getirmişlerdir (Uğuz, 1996).

Griffith'in gerilme analizinin uygulanmasıyla, kuvvet altında tutulan birim kalınlıktaki bir levhada a uzunluğunda bir çatlak oluşması durumunda sistemde meydana gelen elastik enerji değişikliği, düzlem gerilme koşullarında şu şekilde ifade edilmektedir:

$$\frac{\partial U_d}{\partial a} = G = \frac{\pi a \sigma^2}{E} \quad (1.9)$$

şeklinde olup, E yerine $E/(1 - \nu^2)$ yazılabileceğinden, düzlem genleme bağıntısı Denklem 1.10 ile ifade edilmektedir.

$$\frac{\partial U_d}{\partial a} = G = (1 - \nu^2) \frac{\pi a \sigma^2}{E} \quad (1.10)$$



Şekil 1.5 Bir levhanın gerilme altında çatlak oluşumu (Janssen vd., 2005)

Benzer şekilde Şekil 1.5’de gösterilen bir levha içinde bulunan ve levhaya etki eden σ gerilmesi altında gerilmeye dik durumunda $2a$ uzunluğunda çatlak oluşumunda elastik enerjideki azalma;

$$U_d = \frac{\pi^2 a^2 \sigma^2}{E} \quad (1.11)$$

şeklindedir. $2a$ uzunluğundaki çatlağın oluşmasında iki yüzey meydana gelecektir (Yayla, 2007).

Elastik yüzey enerjisinin değişimi U_s , malzemenin elastik yüzey enerjisi γ_s ile çatlağın yeni yüzey alanının çarpımına eşittir.

$$U_s = 2(2a)\gamma_s \quad (1.12)$$

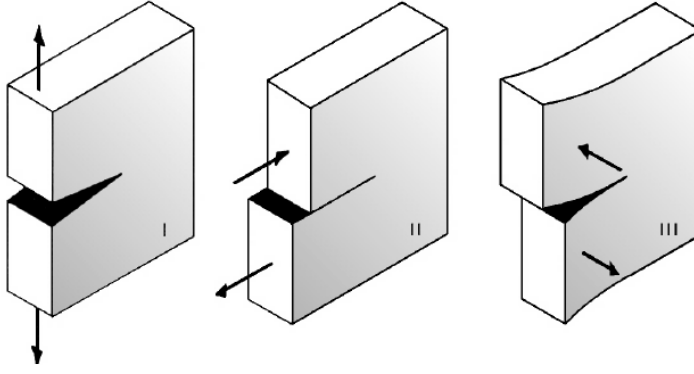
Çatlak ilerlemesi durumundaki kritik gerilme;

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2E\gamma_s}{\pi a}} \quad (1.13)$$

şeklindedir. Bu denklem gösteriyor ki, ideal gevrek malzemelerde çatlak ilerlemesi, uygulanan gerilmeye çatlak boyunun kareköküne ve ayrıca malzeme özelliklerine bağlıdır. E ve γ_s , malzeme özellikleri olduğunu göre eşitliğin karşı tarafına göndereceğimiz çatlak boyunun karekökü olan çarpımın kritik bir değere ($\sigma\sqrt{a}$) ulaşmasıyla çatlak ilerlemesi olmaktadır (Uğuz, 1996).

1.3.3.2 Gerilme şiddeti faktörü yaklaşımı

Malzemelerde bulunan çatlakların yükleme koşulları altında ilerlemesi üç farklı şekilde gerçekleşmektedir. Bu üç ilerleme modu, Şekil 1.6’da gösterilmiştir. Çatlak ilerlemesi, yükleme durumuna bağlı olarak, bu modlardan sadece biri ile ya da farklı modların birleşimi şeklinde olabilir. Çatlağın gerilme analizini yapabilmek için bu modların bilinmesi önemlidir.

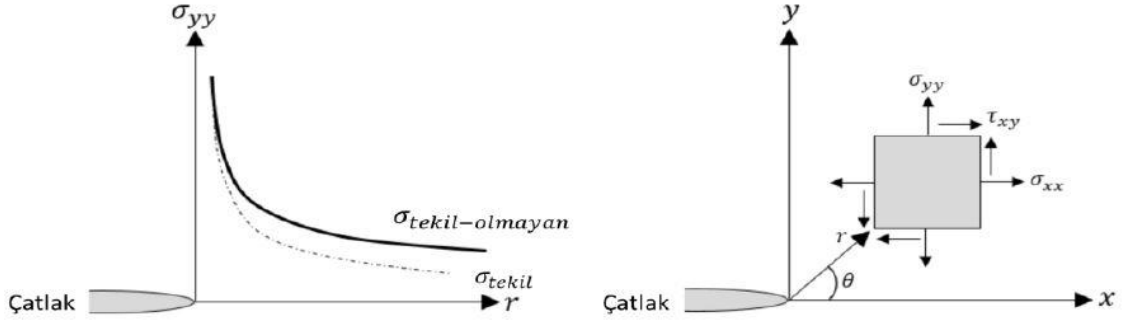


Şekil 1.6 Yükleme (Kuvvet) altında çatlak ilerleme modları; Mod I (Açılma veya çekme modu), Mod II (Kayma modu), Mod III (Yırtılma veya makaslama modu) (Janssen vd., 2005)

Çatlak ilerlemesinde en yaygın ve en fazla deformasyona neden olan tür, Mod I'dir. Bu modda, uygulanan yük, çatlak yüzeyine dik (y eksenı yönünde) etki etmekte ve kırılma yüzeyleri birbirine zıt yönde (açılma hareketi etkisi) ayrılmaktadır. Açma yönlü yük tipli yük olarak ifade edilmektedir. Mod II'de ise, uygulanan yük çatlak yüzeyine paralel (x eksenı yönünde) etkilemekte ve kırılma yüzeyleri birbirine paralel yönde (kayma hareketi etkisi) ayrılmaktadır. Bir yüzeyin diğer yüzeyinde tersi yönünde çekilmesi yönünde bir davranış söz konusu olmaktadır. Mod III'te, uygulanan yük çatlak yüzeyine x-y ve x-z düzlemleri yönünde simetrik olarak etki etmekte ve kırılma yüzeyleri z eksenı doğrultusunda çatlakın dik kenarına paralel şekilde (yırtılma hareketi etkisi) ayrılmaktadır. Çatlak ucundaki elastik alanın büyüklüğünü tanımlamak için 'K' harfiyle ifade edilen gerilme şiddeti faktörü (GŞF) kullanılmaktadır. Lineer elastik kırılma davranışının olduğu bir ortamda, K, malzemelerdeki çatlak ilerleyişiyle kırılma davranışı arasındaki ilişkiyi incelemektedir.

Çatlak dibindeki gerilim dağılımı Şekil 1.7'de şematik olarak gösterilmiştir. İki gerilme bileşeni, tekil ve tekil olmayan gerilme bileşenleri olarak kabul edilmiştir. Tekil bileşen, çatlak ucunun yakınındaki gerilmeleri ifade ederken, tekil olmayan bileşenler çatlak ucundan uzaktaki gerilmeleri ifade etmektedir (Kundi, 2018).

Griffith, tekil gerilim değişimi ile çatlak dibi $-1/\sqrt{r}$ noktası arasındaki mesafe ($r \rightarrow 0$ olduğunda, gerilimin sonsuza gitmesi) arasındaki ilişkiyi bulmuştur. Irwin, Westergaard ve Williams'ın gerilim fonksiyonlarını değiştirerek bu tekil gerilim alanını yeniden formüle etmiştir. Irwin, gerilim, deformasyon ve çatlak dibinde meydana gelen yer değiştirme ilişkili çatlak dibi koşullarını Gerilme Şiddet Faktörü (K) ile ifade eden bir formül geliştirmiştir (Anderson, 2005).

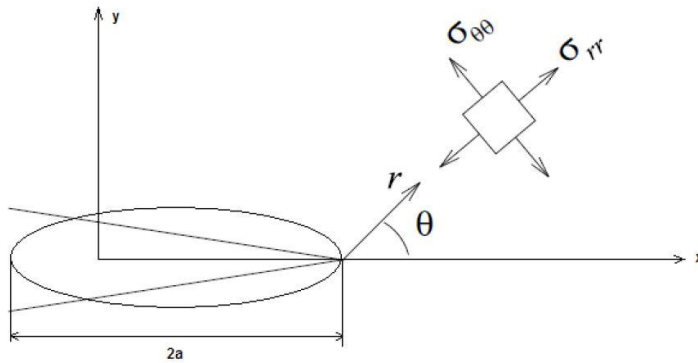


Şekil 1.7 Çatlak dibinde gerilim dağılımı (sağda), koordinat isteminde gerilim birleşenleri (solda) (Lewicki, 1995)

Irwin, bir çatlak civarındaki gerilmelerin Şekil 1.7 ve Şekil 1.8’de gösterildiği gibi;

$$\sigma_{ij} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f(\theta) + \dots \quad (1.14)$$

şeklinde verilebileceğini göstermiştir. Burada r ve θ çatlak ucuna göre bir noktanın koordinatlarını göstermektedir.



Şekil 1.8 Çatlak ucunda bir noktada gerilme (Janssen vd., 2005)

Boyutsal analizler, K ’nın gerilmeyle doğrusal olarak, karakteristik bir uzunluğa da kareköküyle ilişkili olduğunu göstertmiştir. Bu karakteristik uzunluk çatlak boyudur ve gerilme şiddeti faktörü (GŞF) Denklem 1.15’te gösterilmiştir.

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \cdot f\left(\frac{a}{w}\right) \quad (1.15)$$

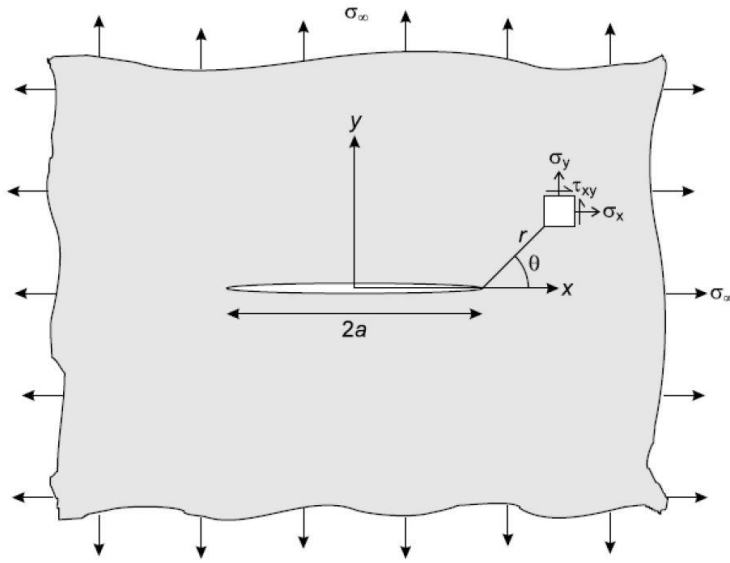
Burada $f\left(\frac{a}{w}\right)$ numunenin ve çatlağın geometrilerine bağlı boyutsuz bir parametredir (Uğuz, 1996).

Şekil 1.9’teki gibi sonsuz uzunluktaki bir levhanın merkezinde bulunan $2a$ uzunluğunda sonsuz keskinlikte bir çatlakın iki ekseninde sonsuz gerilmede, ideal geometri için çatlak ağzındaki gerilme Şiddeti faktörü (GŞF);

$$K_I = \sigma_I \sqrt{\pi a}, \quad K_{II} = \tau_{II} \sqrt{\pi a}, \quad K_{III} = \tau_{III} \sqrt{\pi a} \quad (1.16)$$

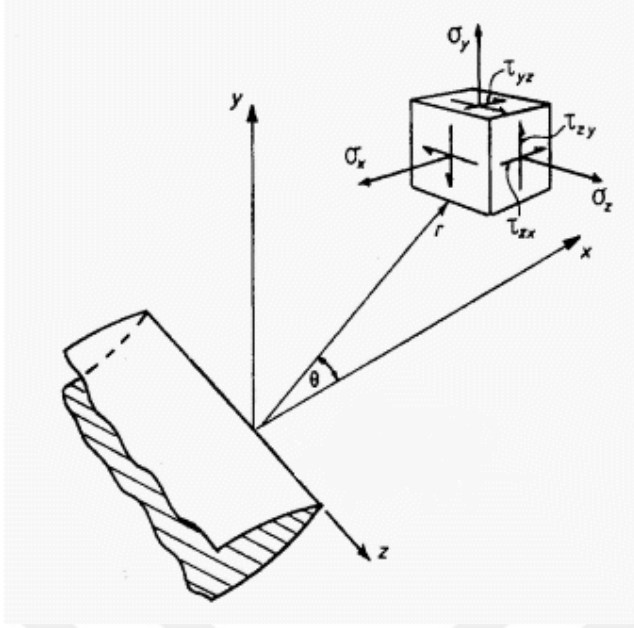
her üç mod durumu için bu şekilde olmaktadır.

K’nın kesin çözümü kararlı çözülebilmesine bağlıdır. Homojen malzemelerde çatlak modları genellikle ayrılamamıştır (O’Dowd, 2002).



Şekil 1.9 Sonsuz levhanın merkezinde bulunan $2a$ uzunluğundaki çatlak (Janssen vd., 2005)

Irwin’in geliştirmiş olduğu gerilme şiddeti faktörü (GŞF), bir levhada Mod I çatlak ilerlemesi tipinde sonsuz keskinlikte çatlak ucunda oluşan elastik gerilme alanı şekli Şekil 1.10’da gösterilmiştir.



Şekil 1.10 Çatlak ucunda oluşan elastik gerilme alanı (O'Dowd, 2002)

Çatlak ucunda oluşan gerilme alanının her üç mod türünde de gerilme şiddeti faktörü değerinin bilinmesiyle çatlak ucundaki gerilmeler bulunabilmektedir.

Şekil 1.10'da Mod I çatlak ilerlemesi türünde r ve θ değerleri için çatlak ucuna göre bir noktanın koordinatındaki gerilmeler aşağıdaki denklemler ile bulunmaktadır;

$$\sigma_{xx} = \frac{K_I}{(2\pi r)^{\frac{1}{2}}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 - \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right] \quad (1.17)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K_I}{(2\pi r)^{\frac{1}{2}}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 + \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right] \quad (1.18)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{(2\pi r)^{\frac{1}{2}}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right) \quad (1.19)$$

$$\sigma_{zz} = \nu(\sigma_x + \sigma_y) \quad (1.20)$$

$$\sigma_{xz} = \sigma_{yz} = 0 \quad (1.21)$$

Denklemlerdeki semboller; ν poisson oranını, $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}$ x, y, z yönündeki asal gerilmeleri, E Elastisite modülünü, θ r 'nin x eksenine yaptığı açığı, K_I Mod I için gerilme şiddeti faktörünü temsil etmektedir.

$$u = \frac{K_I}{2\mu} \left[\frac{r}{2\pi}\right]^{\frac{1}{2}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[\kappa - 1 + 2\sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)\right] \quad (1.22)$$

$$v = \frac{K_I}{2\mu} \left[\frac{r}{2\pi} \right]^{\frac{1}{2}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[\kappa + 1 - 2\cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \right] \quad (1.23)$$

$$w = 0$$

Gerilmenin etkisiyle malzemede oluşan şekil değişimleri (deplasmanlar) x yönünde u, y yönünde v, z yönünde w olarak ifade edilmektedir. Mod I çatlak ilerlemesi olduğu için z yönündeki deplasman 0'dır. μ kayma modülünü ifade etmektedir. Ayrıca κ değerleri düzlem genleme ve düzlem gerilme için farklılık göstermektedir.

Düzlem genleme durumunda;

$$\kappa = 3 - 4\nu \quad (1.24)$$

Düzlem gerilme durumunda;

$$\kappa = \frac{(3 - \nu)}{(1 + \nu)} \quad (1.25)$$

kullanılmaktadır.

Kalınlığı az olan ince levhalar gibi malzemeler gerilmeye maruz kaldığında, x ve y eksenlerinde gerilme oluşurken, z ekseninde gerilme meydana gelmez. Bu iki eksenli gerilme durumu düzlem gerilme olarak adlandırılmaktadır. Kalın malzemelerde ise şekil değişimi x-y düzleminde gerçekleşmektedir. Bunun nedeni, malzeme yüzeyinde oluşan üç eksenli şekil değişiminin malzemenin içinde sağlanamamasıdır. Z eksenindeki deformasyonun engellenmesi sonucunda düzlem genleme durumu ortaya çıkmaktadır.

Mod II çatlak ilerlemesi türünde r ve θ değerleri için çatlak ucuna göre bir noktanın koordinatındaki gerilmeler aşağıdaki denklemler ile bulunmaktadır;

$$\sigma_{xx} = -\frac{K_{II}}{(2\pi r)^{\frac{1}{2}}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[2 + \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right] \quad (1.26)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K_{II}}{(2\pi r)^{\frac{1}{2}}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right) \quad (1.27)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_{II}}{(2\pi r)^{\frac{1}{2}}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 - \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right] \quad (1.28)$$

$$\sigma_{zz} = \nu(\sigma_x + \sigma_y) \quad (1.29)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{yz} = 0 \quad (1.30)$$

Mod II çatlak ilerleme türünde çatlak ucunda oluşan deplasman alanı;

$$u = \frac{K_{II}}{2\mu} \left[\frac{r}{2\pi} \right]^{\frac{1}{2}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[\kappa + 1 + 2\cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \right] \quad (1.31)$$

$$v = \frac{K_{II}}{2\mu} \left[\frac{r}{2\pi} \right]^{\frac{1}{2}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[\kappa - 1 + 2\sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \right] \quad (1.32)$$

$$w = 0$$

bulunmaktadır.

Mod III çatlak ilerlemesi türünde r ve θ değerleri için çatlak ucuna göre bir noktanın koordinatındaki gerilmeler ve çatlak ucunda oluşan deplasman alanı aşağıdaki denklemler ile bulunmaktadır;

$$\tau_{xz} = -\frac{K_{III}}{(2\pi r)^{\frac{1}{2}}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (1.33)$$

$$\tau_{yz} = \frac{K_{III}}{(2\pi r)^{\frac{1}{2}}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (1.34)$$

$$\sigma_{xx} = \sigma_y = \sigma_z = \tau_{xy} = 0 \quad (1.35)$$

$$w = \frac{K_{III}}{2\mu} \left[\frac{2r}{\pi} \right]^{\frac{1}{2}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (1.36)$$

$$u = v = 0$$

Gerilme şiddeti faktörleri (K_I , K_{II} , K_{III}), seçilen malzemenin tasarlanan geometrisinde belirli bir gerilme değerinde sabit kalmaktadır. Bu durum, gerilme şiddeti faktörlerinin malzeme için karakterize edilebilecek bir değer olmadığını göstermektedir. Çatlak ucunda oluşan tüm gerilme ve genleme büyüklüklerinin gerilme şiddeti faktörü ile belirlenebilmesi, kritik gerilme şiddeti faktörünün (K_{IC}) bulunmasını mümkün kılmıştır. Kritik gerilme şiddeti faktörü, gerilme ve genleme altında çatlak ilerlemesini tetikleyen kritik değerde ölçülebilen gerilme yoğunluğudur. Pratikte, bu değer kırılma tokluğu olarak da adlandırılmaktadır. Kırılma tokluğu, seçilecek malzemenin bir özelliği olup, kullanılan hesaplama yöntemine bağlı olarak sabit bir değerdir.

Lineer elastik kırılma mekaniğinde ele alınan iki yaklaşım arasında bir ilişki kurulduğunda, kadar çatlak ilerlemesi durumunda gerilme enerjisindeki (elastik enerji)

serbest bırakılma (enerji değişimi) durumu üzerinde durulmaktadır. K ve G değerleri arasındaki ilişki (Lineer elastik malzemelerde) Denklem 1.37’de gösterilmiştir;

$$K^2 = EG \text{ (Düzlem gerilme)}, \quad K^2 = \frac{EG}{1 - \nu^2} \text{ (Düzlem gerilme)} \quad (1.37)$$

K_I, K_{II}, K_{III} değerleri arasında ilişki kurulduğunda;

$$\psi = \frac{K_I^2 + K_{II}^2}{\dot{E}} + \frac{K_{III}^2}{2G} \quad (1.38)$$

$$\dot{E} = \left\{ \frac{E}{1 - \nu^2} \right\} \text{ (Düzlem genleme)} \quad (1.39)$$

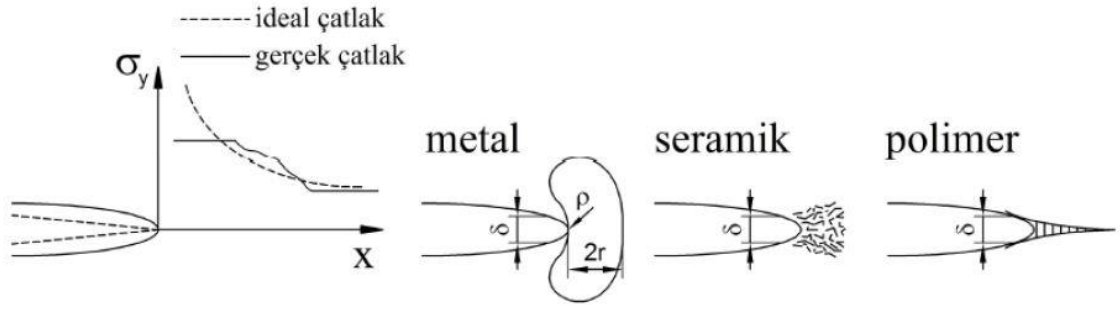
$$\dot{E} = \{E\} \text{ (Düzlem gerilme)}$$

şeklindedir. ψ Kayma modülü olup $\dot{E}$ değeri düzlem gerilme ve düzlem gerilme durumuna göre değişmektedir.

1.3.4 Elastik-plastik kırılma mekaniği

Lineer elastik kırılma mekaniği (LEKM), kırılma bölgesindeki lineer olmayan düşük etkilerden (plastisite) ziyade çatlak boyutunun etkisinin belirgin olduğu durumlarda kırılma davranışını başarılı bir şekilde analiz edebilmektedir. Başka bir deyişle, LEKM büyük ölçüde elastik koşullarda çatlak ilerlemesi ve kırılmayı incelemek için geliştirilmiştir. Bu koşullar, yüksek mukavemetli metalik malzemeler (örneğin, alüminyum alaşımları) ile cam ve seramik gibi çok gevrek malzemelerde geçerlidir. Gelişen dünyada malzemelerin çeşitliliği arttıkça, LEKM ile incelenemeyecek kadar büyük plastisiteye sahip malzemeleri incelemek amacıyla Elastik-plastik kırılma mekaniği (EPKM) geliştirilmiştir.

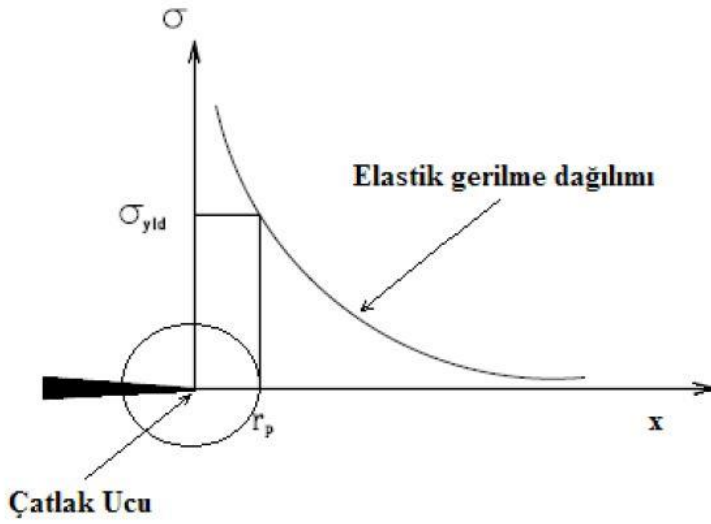
Teorik olarak çatlak ucunda oluşan gerilme sonsuz değerlere ulaşabilse de pratikte malzemelerde bu mümkün değildir. Eğer uygulanan gerilme çok fazla değilse, yani çatlak ucunda oluşan maksimum gerilme malzemenin akma mukavemetini aşmıyorsa, malzeme çatlağın varlığına izin verebilmektedir. Sünek malzeme grubuna giren metalik malzemelerde, çatlağın etrafında geniş plastik deformasyon bölgeleri oluşmaktadır. Bu plastik deformasyona uğramış bölgeye çatlak ucu plastik bölgesi denmektedir. Keskin çatlak uçlarında oluşan aşırı deformasyon nedeniyle çatlak ucu körelmekte ve keskinliği azalmaktadır. Bu bölgede gerilme artık sonsuz olmamakta ve çatlak ucu δ kadar açılmaktadır. Bu δ değerine çatlak ucu açılma mesafesi (CTOD) denmektedir.



Şekil 1.11 Malzemelerde çatlak ucunda plastisite, mikro çatlama ve sır çatlağı sonucu oluşan deformasyon (Yayla, 2007)

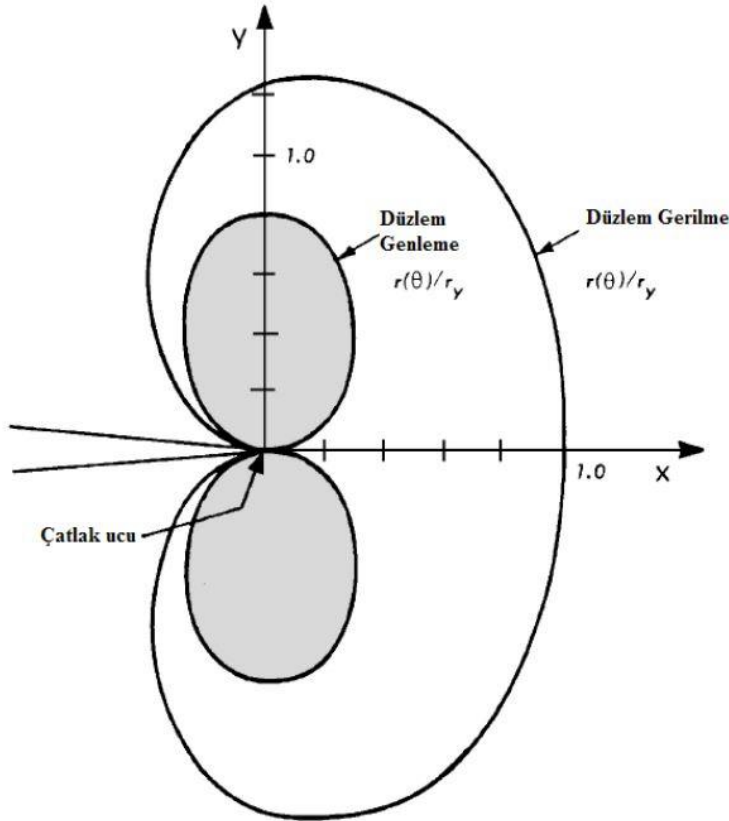
Çatlak ucunda oluşan sonsuz gerilme karşısında, farklı malzemeler farklı tepkiler göstermektedir. Şekil 1.11'de görüldüğü gibi, bazı polimerlerde çatlak ucunda boşluklar ve bu boşluklar arasında çekilmiş lifler oluşmaktadır. Bu bölgeye sır çatlağı bölgesi denmektedir. Seramik gibi gevrek malzemelerde ise, bu bölgede küçük boyutta ve farklı yönlerde yoğun küçük çatlakların bulunduğu bir proses bölgesi oluşmaktadır. Her üç durumda da çatlak ucu aşırı deformasyona maruz kalmakta ve yakın bölgelerde ayrılmalar meydana gelmektedir. Teorik olarak çatlak ucunda oluşması beklenen yüksek gerilme, daha geniş bir alana yayılarak yeniden dağılım göstermektedir.

Gerilme şiddeti faktörü yaklaşımında, iki ekseninde yüklenmiş ve ortasında $2a$ uzunluğunda çatlak bulunan sonsuz bir levhanın elastik gerilme denklemleri ele alınmaktadır. Bu denklemler, tüm gerilmelerin $r = 0$ 'da (çatlak ucu) sonsuza gittiğini göstermektedir. Ancak, gerçek malzemeler akma gerilmesine sahip olduğundan, çatlak ucu yakınlarındaki teorik olarak çok yüksek gerilmeler malzemenin akma gerilmesinin üzerine çıkmaktadır. Bu durum özellikle sünek malzemelerde yaygındır. Gerçek malzemeler akma gerilmesinin üzerinde plastik olarak deforme olduğundan, çatlak ucunu çevreleyen plastik bölgeler oluşmaktadır. Bu plastik deformasyona uğramış bölge, çatlak ucu plastik bölgesi olarak adlandırılmakta ve r_p ile gösterilmektedir.



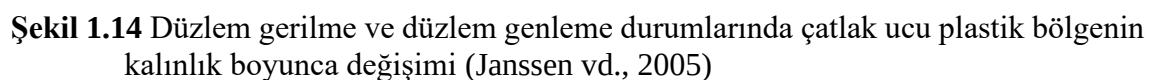
Şekil 1.12 Çatlak ucu plastik bölgenin ifade edilmesi (Armağan, 2011)

Şekil 1.12'de gösterildiği gibi, plastik bölge dairesel olarak kabul edilmiş ve plastik bölgenin boyutu x ekseninde etkili olmaktadır. Ancak, gerçekte durum çok daha karmaşıktır. Plastik bölgenin boyutu ve şekli, belirlenen akma durumuna, malzemenin şekil değiştirme özelliklerine ve kalınlığına bağlı olarak değişmektedir (Armağan, 2011).



Şekil 1.13 Düzlem genleme ve düzlem gerilme durumlarında çatlak ucu plastik bölgenin şekli (Janssen vd., 2005)

Belirli bir kalınlıktaki levha için gerilme durumu dağılımının hesaplanması her zaman mümkün değildir. Ancak, düzlem gerilmenin mi yoksa düzlem şekil değiştirmenin mi baskın olduğunu tahmin etmek için kullanılan bazı kurallar bulunmaktadır. Düzlem gerilme plastik bölgesinin hesaplanmış boyu, levha kalınlığı kadar ise bütünüyle düzlem gerilme durumu beklenmektedir. Eğer levhanın yüzeyinde mevcut düzlem gerilme plastik bölgesinin hesaplanmış boyu levha kalınlığının $1/10$ 'undan fazla değilse, düzlem şekil değiştirmenin baskın olması beklenmektedir, bu durum Şekil 1.14'te gösterilmiştir.



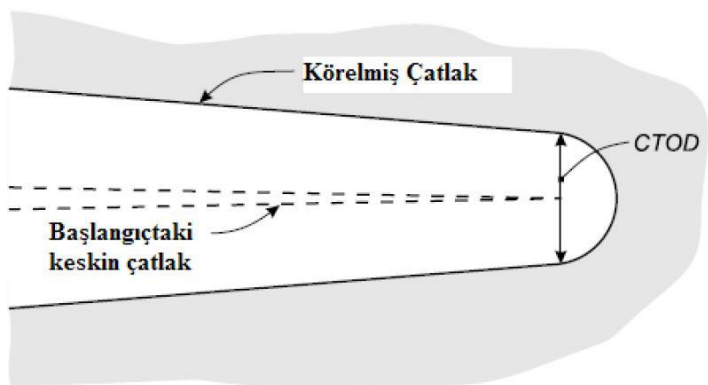
1.3.4.1 Çatlak ucu açılma miktarı metodu

31

belirlenmesi için kalın numunelerin kullanılması gerekebilmektedir. Wells, yapısal çeliklerin kritik gerilme şiddeti faktörünü incelemiş ve malzemenin mevcut tokluğunun Lineer Elastik Kırılma Mekaniği (LEKM) ile doğru bir şekilde incelenemeyeceğini fark etmiştir. Bu nedenle, 1961 yılında Wells tarafından çatlak ucu açılma miktarı (CTOD) yaklaşımı ortaya konmuştur. Irwin'ın dairesel plastik bölge analizine dayanan bu yaklaşım, Dugdale tarafından geliştirilmiştir. Daha sonra, 1966 yılında Burdekin ve Stone, Dugdale analizi üzerine inşa edilerek CTOD yaklaşımını ilerletmişlerdir.

Wells, çatlak ucundaki gerilmenin her zaman belirli bir kritik değere ulaştığını iddia etmiştir. Dolayısıyla, kırılmayı kontrol eden faktör olarak çatlak ucu bölgesindeki plastik şekil değişimi gösterilebilir.

Şekil 1.15'te gösterilen bir çatlağın ucu, plastik şekil değiştirmenin bir ölçüsüdür; çatlak ucunun (çatlağa çok yakın olan kısmı) y eksenindeki yer değiştirme miktarı bir malzeme için karakteristik bir kritik değer olarak tanımlanmakta ve çatlak ucu açılma miktarı (CTOD) olarak adlandırılmaktadır. Bu açılma miktarı genellikle δ sembolü ile ifade edilmektedir.



Şekil 1.15 Çatlak ucu açılma miktarı (Armağan, 2011)

Şekil 1.15'te gösterildiği gibi, çatlağın tam ucunda çatlak ucu açılmasının sıfır olduğu görülmektedir. Plastik deformasyon durumlarında, çatlak yüzeyi kırılma öncesinde hareket etmekte ve plastik deformasyon, keskin çatlağı köreltmektedir.

Irwin'ın dairesel plastik bölge analizi çözümü ile çatlak açılma mesafesi Denklem 1.40'ta gösterilmiştir;

$$CTOD = \frac{4}{\pi} \frac{K_I^2}{E \sigma_y} \quad (1.40)$$

Dugdale çözümü ile çatlak açılma mesafesi Denklem 1.41'de gösterilmiştir;

$$CTOD = \frac{K_I^2}{E\sigma_y} \quad (1.41)$$

Stone ve Burdekin'in çatlak açılma mesafesi denklemi, Denklem 1.42'de gösterilmiştir;

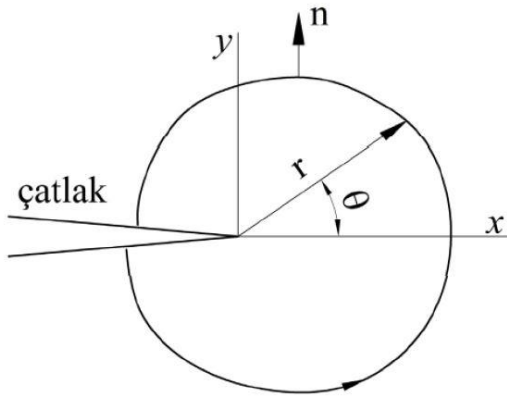
$$CTOD = \frac{8a\sigma_y}{\pi E} \ln \left[\sec \left(\frac{\pi\sigma}{2\sigma_y} \right) \right] \quad (1.42)$$

Dudgale çözümünü kullanan Kanninen'in çatlak açılma mesafesi Denklem 1.43'te gösterilmiştir (Saouma, 2000).

$$CTOD = \frac{K_I^2}{E\sigma_y} \left[1 + \frac{\pi^2 \sigma^2}{24 \sigma_y} + \dots \right] \quad (1.43)$$

1.3.4.2 J-integral metodu

J integrali, lineer olmayan malzemeler için kırılmayı karakterize eden bir parametre olarak kullanılmaktadır. Elastik-plastik deformasyon, idealize edilerek lineer olmayan elastik davranış şeklinde ele alınmaktadır. Elastik plastik deformasyon davranışı gösteren malzemelerde çatlak kararsızlığını ya da çatlak büyümesini karakterize etmek için Rice tarafından ortaya konulmuştur. Rice, LEKM limitlerinin doğrulandığı sınırlarda bu konunun temellenmesini sağlamıştır. Bu yöntem, plastik şekil değişimi gösteren malzemelerde kırılma tokluğunu belirlemek amacıyla CTOD tekniğine alternatif olarak geliştirilmiştir. Yöntemin temel prensibi, iki boyutlu çatlak problemlerinde, çatlak ucunu çevreleyen bölgedeki gerilme enerji yoğunluğu ve iş terimlerinin seçilecek çatlak yönünden bağımsız kabul edilmesidir. Bu yöntemde, birbirine çok az farklı çatlak uzunluklarına sahip numunelere ait yük-uzama diyagramlarının karşılaştırılması esas alınmaktadır.



Şekil 1.16 J-İntegral Kontrolü (Yayla, 2007)

Şekil 1.16’da göz önüne alınarak düz çizgi integrali J hem elastik hem de elastik-plastik davranışlar için aşağıda gösterildiği gibidir.

$$J = \int_p w dy - T \left(\frac{du}{dx} \right) ds \quad (1.44)$$

Bu denklemde; p-çatlağı saran herhangi bir yönü, w-genleme enerjisi yoğunluğunu, T- p boyunca n normali doğrultusunda oluşan çekme vektörünü, u- şekil değişimi vektörünü ve ds-ark boyunu ifade etmektedir. W ise birim hacmin yaptığı iş olup elastik alandaki gerilme enerjisi yoğunluğu olarak da tarif edilebilir. W aşağıdaki denklemle verilmektedir.

$$W = \int_p \sigma d\varepsilon \quad (1.45)$$

Çatlağın en uç noktası istendiğinde J değeri aşağıdaki denklem ile verilmektedir.

$$J = \int_p W dy \quad (1.46)$$

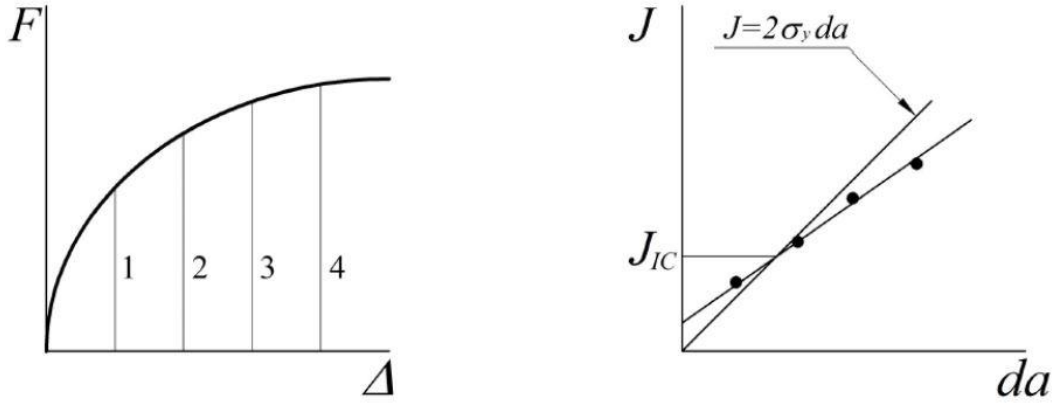
Denklem (1.9)’dan görüldüğü üzere, p ile çevrelenmiş olan alan içerisinde malzeme tarafından herhangi bir enerji harcanmıyorsa (depolanmıyorsa) J değeri 0 olacaktır. Eğer büyümekte olan bir çatlak, bu p çizgisi tarafından çevreleniyorsa, J değeri bize birim alanda çatlak büyümesi için gereken iş miktarını vermektedir. Yani, kalınlığı B olan bir malzemedeki herhangi bir çatlağın büyümesi için birim alanda harcanan iş miktarı, yani J en geniş anlamı ile aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$J = \frac{1}{B} \frac{dU}{da} \quad (1.47)$$

Denklem 1.48’de B malzeme genişliğini, a çatlak uzunluğunu, U yapılan iş veya genleme enerjisini ifade etmektedir. Bu değer bir enerji absorpsiyonu olmakla birlikte LEKM’de olduğu gibi gerçekte G=J olmaktadır. Bu testten sağlıklı sonuçlar elde edilebilmesi için $B \geq 25J_{IC}/\sigma_y$ ’yi sağlamalıdır. J_{IC} ’yi elde etmek için en yaygın kullanılan test yöntemi kompakt çekme deneyi veya üç nokta eğme deneyi olmaktadır. Bu deneylerden aşağıdaki denklem kullanılarak J hesaplanmaktadır.

$$J = \frac{U}{B(w - a)} \quad (1.48)$$

Bu denklemdeki U yük uzama diyagramı altındaki toplam enerjiyi, w numunenin genişliğini, a ise çatlak uzunluğunu ifade etmektedir. Çatlak ilerleyişi sırasında yeni oluşan çatlak yüzeylerine hiçbir gerilme etkimemektedir. Bundan dolayı J , çatlak ilerleyişinin başlangıcına kadar geçerlidir.



Şekil 1.17 J_{IC} 'yi elde etmek için test prosedürü

Testin yapılışında aşağıdaki sıra takip edilmektedir.

- Numuneyi belli bir uzama değerine kadar yüklenmekte,
- Yük boşaltılır ve çatlakın ilerleme uzunluğu (ac) ölçülmekte,
- Her bir numuneyi çok düşük sıcaklıklarda (-150) soğutulur ve çatlak ilerlemesi ölçülmekte,
- J denklemini kullanarak değer hesaplanmakta,
- J ve çatlak ilerleme miktarı (da) arasındaki ilişki Şekil 1.17'deki gibi grafik olarak çizilmekte,
- da doğrusu Şekil 1.17'deki gibi orijinden geçecek şekilde çizilmekte,
- Bu doğruyla deneysel noktalardan geçen doğrunun kesiştiği nokta J_{IC} 'yi vermektedir.

1.3.5 Kırılma tokluğu

Kırılma tokluğu, malzemenin çatlak oluşumuna ve yayılmasına karşı direncini ifade eden bir özelliktir. Bu özellik, malzemenin sıcaklığına ve maruz kaldığı korozif ortama bağlı olmaktadır. Ayrıca, çatlak genişliği ve stres değişimi gibi faktörler de kırılma tokluğunu etkileyen önemli unsurlardır (Anderson, 2005).

Kırılma tokluğu deneyleri, malzemelerin kırılma davranışlarını belirlemede önemli bir rol oynamaktadır. Bu deneyler, kırılmaya karşı direncin kritik gerilme şiddeti faktörünün

(K_{IC}) tespitinde kullanılmaktadır. Yükleme türü ve malzemenin karakteristik davranışı, deneylerin farklı açılardan geliştirilmesine ve uygulanmasına neden olmuştur. Genel hatlarıyla bu deneyler; yükleme türüne göre statik veya dinamik kırılma tokluğu deneyleri, malzemenin sünek veya gevrek oluşuna göre ise Lineer Elastik ve Elastik-Plastik kırılma tokluğu deneyleri olarak sınıflandırılmaktadır.

Denklem 1.16’da Mod I için tanımlanan gerilme şiddet faktörü kırılma tokluğu K_{IC} ; çatlak boy etkisi ve gerilim dağılımıyla yeniden ifade edilirse aşağıdaki denklem elde edilmektedir.

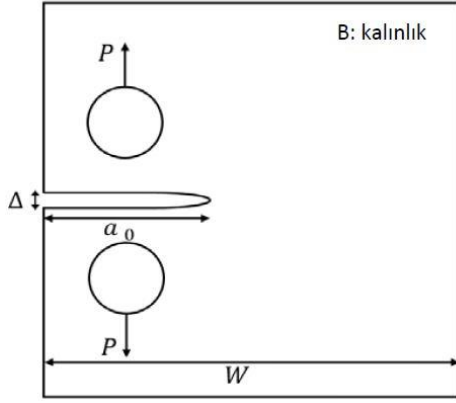
$$K_{IC} = \sigma \sqrt{\pi a} f(W, a) \rightarrow \sigma = \frac{K_{IC}^2}{2\pi a} f(w, a) \quad (1.49)$$

Yukarıda oluşturulan ifadeye göre kırılma tokluğunu çatlak uzunluğu gerilim dağılımından daha çok etkilemektedir.

Kırılma tokluğu değeri, farklı standartlarda tanımlanan test sonuçlarına göre hesaplanmaktadır ve bu standartlara göre değişiklik gösterebilmektedir. En yaygın olanı, kırılma tokluğu ve direnç eğrileri testlerinin prosedürlerini tarif eden Amerikan Test ve Malzeme Derneği’nden (American Society for Testing and Materials-ASTM) gelen standarttır. Kırılma tokluğu değeri, direnç eğrisinin kırılma tokluğunun çeşitli değerlerini temsil eden tek bir değerdir.

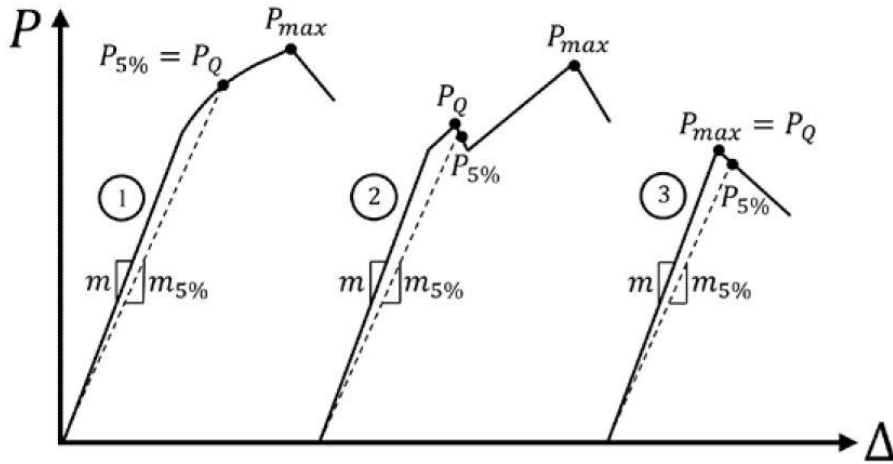
Ted L. Anderson’un “Fracture Mechanics” adlı eserinden örnek verilmek istenirse; ASTM E399’dan Mod I için kırılma tokluğunun ölçümü şu şekilde ifade edilmiştir: Kırılma tokluğunun (K_{IC}) Yük I ve yükü altında ASTM E399 standart’ına göre değerlendirilmesi aşağıda belirtilmiştir. K_{IC} değerinin değerlendirilmesinde farklı numune yapılandırmasına izin verilmektedir, bu aşamada kompakt bir örnek Şekil 1.18’de incelenmiştir. Yüzey gerginliği ve doğrusal elastik kırılma mekaniği için, plastik bölge, numune boyutuna kıyasla küçük olmalıdır ve sabit yer değiştirme hesaba katılmalı olarak kabul edilmiştir (Anderson, 2005).

Başlangıç çatlak uzunluğunun şartları; $0,45 \leq (a_0/w) \leq 0,55$ olarak belirlenmiştir.



Şekil 1.18 Kırılma tokluğunun değerlendirilmesi için kompakt numune

Test numunesine P yükü uygulanarak gerçekleştirilen testte, yarı statik şartı sağlayan bir hızla yük artırılarak numune kırılma noktasına ulaşmakta ve kırılmaktadır. Test sırasında yük ölçümü ve çatlak ağzı açılma/genişlemesi Δ ile ifade edilmiştir. Kırılma tokluğunun hesaplanması için gerekli olan yükün doğru değerinin belirlenmesinde P_Q yükü kullanılmıştır. Şekil 1.19’da üç farklı P- Δ davranışı görselleştirilmiştir (Anderson, 2005).



Şekil 1.19 P- Δ davranışları (Anderson, 2005).

Bu grafiklerde; P_{max} test sırasında ölçülmüş maksimum yükü, P_Q K_{IC} ’nin belirlenmesi için gerekli yükü, m başlangıçtaki elastik yükleme eğimini, $m_{5\%}$ %95 m-slope eğimini ve $P_{5\%}$ $m_{5\%}$ değeri ile P- Δ kesişim noktasını ifade etmektedir.

P_Q değeri elde edildiğinde örnek geometrisine göre bu değere karşılık gelen gerilme şiddet faktörü aşağıdaki denklemdeki gibi elde edilmektedir (Anderson, 2005).

$$K_Q = \frac{P_Q}{B\sqrt{W}} f(a, W) \quad (1.50)$$

K_Q değeri ancak aşağıdaki şartın sağlanması durumunda geçerli olmaktadır (Anderson, 2005).

$$B, a \geq 2,5 \left(\frac{K_Q}{\sigma_y} \right)^2 \quad (1.51)$$

$$P_{maks} = 1,10P_Q \quad (1.52)$$

Yukarıdaki denklem şartlarının sağlanması durumunda $K_Q=K_{IC}$ olmaktadır (Anderson, 2005).

Elastik-Plastik kırılma mekaniğinde kırılma tokluğunu belirlemede kullanılan iki önemli metot, Çatlak Ucu Açılması (CTOD) ve J-İntegral metodudur. J-İntegral metodundaki deneysel zorluklar nedeniyle, bu metot yerini EWF metoduna bırakmıştır. Dinamik kırılma tokluğu deneylerinde en yaygın kullanılan metot ise darbe testi metodudur.

2. PERİDİNAMİK TEORİSİ

Peridinamik (PD) teorisi, Dr. Steward Silling tarafından 2000 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nin Sandia Ulusal Laboratuvarı'nda öne sürülmüş yeni ve gelecek vaat eden bir yöntemdir. Peridinamik teorisinde, A. L. Cauchy tarafından 1800'lerde ortaya atılan Klasik Sürekli Ortamlar Mekaniği (KSOM) hareket denklemleri yeniden formüle edilmiş ve denklemlerin yapısındaki konuma bağlı türevler kaldırılarak sadece hacimsel integraller kullanılmıştır (Silling, S. A. 2000).

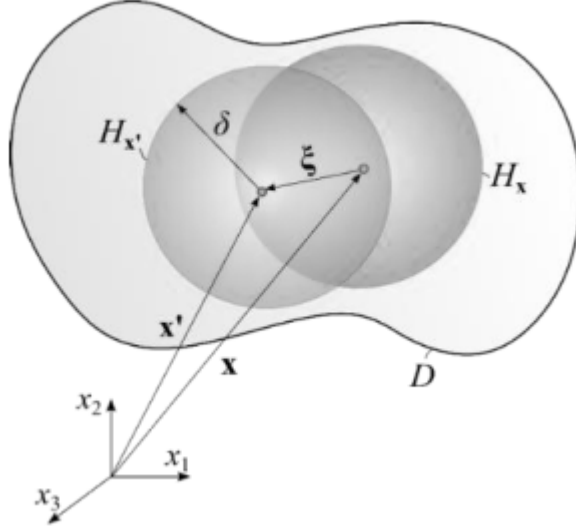
KSOM ve PD (Peridinamik) teorisi arasındaki temel fark, birinin yer değiştirme bileşenlerinin türevlerine dayanması ve diğerinin ise integral denklemlere dayanmasıdır. KSOM'de bir malzeme noktası, komşu noktalardan etkilenirken, PD teorisinde ise bir malzeme noktası, belirli bir yarıçap içindeki diğer malzeme noktalarından etkilenmektedir. PD teorisinde iç kuvvetler, malzeme noktaları arasında yerel olmayan etkileşimlerle ifade edilir ve bu teoride hasar bünye modelinin bir parçasıdır. PD teorisi, malzemelerdeki hasarı daha gerçekçi bir şekilde modellemek için kullanılır. KSOM hareket denklemleri aşağıdaki gibi ifade edilmektedir (Silling, S. A. 2000):

$$\rho(x)\ddot{u}(x, t) = \nabla \sigma + b(x, t) \quad (2.1)$$

Bu denklemde, ρ malzeme yoğunluğunu, σ Cauchy gerilme tensörünü, u ivme vektörünü, b vektörü ise hacimsel kuvveti temsil etmektedir. Ayrıca x ve t sırasıyla çözüm alanındaki belirli bir malzeme noktasının konum vektörünü ve zamanı tanımlamaktadır. PD teorisinde ise, KSOM hareket denklemlerinin sağ tarafında bulunan gerilme tensörünün diverjansı yerine ($\nabla \sigma$), aşağıda belirtilen integral ifadesi kullanılmaktadır:

$$\rho(x)\ddot{u}(x, t) = \int_{H_x} (t(\dot{u} - u, \dot{x} - x, t) - \dot{t}(u - \dot{u}, x - \dot{x}, t)) dV_x + b(x, t) \quad (2.2)$$

Burada, $\dot{x}$, x malzeme noktasının etkileşim alanı, H_x , içerisinde bulunan komşu malzeme noktasıdır. t ve $\dot{t}$ kuvvet yoğunluğu vektörlerini ifade etmektedir. u ve $\dot{u}$, x ve $\dot{x}$ malzeme noktalarına ait yer değiştirme vektörlerini tanımlamaktadır. δ ise bir malzeme noktasının küresel komşuluğunu ifade etmektedir. PD etkileşim alanı içerisinde her bir $\dot{x}$ malzeme noktasının kendisine ait bir hacmi V_x mevcuttur. Ayrıca, $\xi = \dot{x} - x$ ise x ve $\dot{x}$ malzeme noktalarının deforme olmamış geometri üzerindeki referans mesafesidir.



Şekil 2.1 x ve x' malzeme noktalarının etkileşim alanları (Olmuş, 2022)

PD hareket denklemlerinin analitik çözümlenmesinin mümkün olmaması sebebiyle, bu denklemlerin çözümleri sayısal ağırsız kollokasyon yöntemi kullanılarak elde edilebilmektedir. Bu aşamada, PD çözüm alanı sonlu sayıdaki hücrelere ayrıştırılmaktadır ve bir önceki denklemde ifade edilen PD hareket denklemleri aşağıdaki gibi yeniden yazılabilmektedir:

$$\rho_{(i)} \ddot{u}_{(i)} = \sum_{j=1}^{N_{(i)}} [t_{(i)(j)} - t_{(j)(i)}] V_{(j)} + b_{(i)} \quad (2.3)$$

Buradaki denklemde, $N_{(i)}$, $x_{(i)}$ malzeme noktasının etkileşim alanı içerisinde sahip olduğu malzeme noktalarının sayısıdır. Kuvvet yoğunluğu vektörleri $t_{(i)(j)} = t_{(i)(j)}(u_{(j)} - u_{(i)}, x_{(j)} - x_{(i)}, t)$ ve $t_{(j)(i)} = t_{(j)(i)}(u_{(i)} - u_{(j)}, x_{(i)} - x_{(j)}, t)$ ayrıklaşmış formda aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$t_{(i)(j)} = \frac{1}{V_{(i)}} \cdot \frac{\partial W_{(i)}}{\partial (|y_{(j)} - y_{(i)}|)} \cdot \frac{y_{(j)} - y_{(i)}}{|y_{(j)} - y_{(i)}|} \quad (2.4)$$

ve

$$t_{(j)(i)} = -\frac{1}{V_{(i)}} \cdot \frac{\partial W_{(j)}}{\partial (|y_{(j)} - y_{(i)}|)} \cdot \frac{y_{(j)} - y_{(i)}}{|y_{(j)} - y_{(i)}|} \quad (2.5)$$

Bu denklemlerde $y_{(i)}$ ve $y_{(j)}$ vektörleri $x_{(i)}$ ve $x_{(j)}$ malzeme noktalarının deforme olmuş geometrideki konumlarını tanımlamaktadır. $W_{(i)}$ ise $x_{(i)}$ malzeme noktasına ait şekil değiştirme enerjisi yoğunluğunu temsil etmektedir ve aşağıdaki gibi yazılmaktadır:

$$W_{(i)} = a\theta_{(i)} + \sum_{j=1}^{N_{(i)}} b_{(i)(j)} \delta_{(i)} s_{(i)(j)}^2 \xi_{(i)(j)} V_{(j)} \quad (2.6)$$

Burada $\theta_{(i)}$ ifadesi malzeme noktasına ait dilatasyon değerini temsil ederken, $s_{(i)(j)}$ ifadesi ise $x_{(i)}$ ve $x_{(j)}$ malzeme noktaları arasındaki birim uzamayı temsil etmektedir. Bu ifadeler ise aşağıdaki gibi yazılmaktadır:

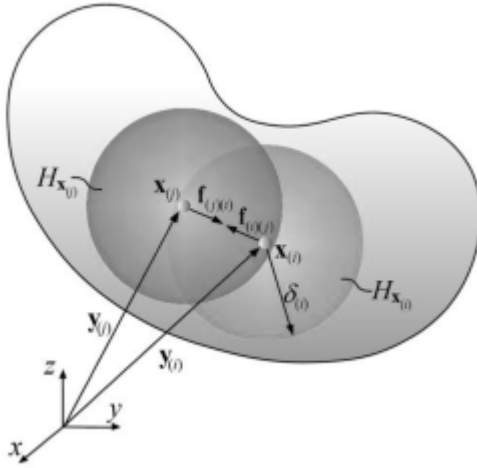
$$\theta_{(i)} = \sum_{j=1}^{N_{(i)}} d_{(i)} \delta_{(i)} s_{(i)(j)} V_{(j)} \quad (2.7)$$

ve

$$s_{(i)(j)} = \frac{|y_{(j)} - y_{(i)}| - |x_{(j)} - x_{(i)}|}{|x_{(j)} - x_{(i)}|} \quad (2.8)$$

2.1 Bağ Bazlı Peridinamik (BB PD)

BB PD teorisi ilk olarak 2000 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde Sandia Ulusal Laboratuvarı'nda araştırmacı olan Dr. S.A. Silin tarafından geliştirilmiştir. Şekil 2.2'de gösterildiği üzere, BB PD hareket denklemleri içerisinde bulunan kuvvet yoğunluğu vektörleri $f_{(i)(j)}$ ve $f_{(j)(i)}$ birbirine eşit ve zıt yöndedirler (Dorduncu vd., 2015).



Şekil 2.2 BB PD teorisine ait kuvvet yoğunluğu vektörleri (Olmuş, 2022)

Bu durum göz önünde bulundurulduğunda, BB PD teorisi için kuvvet yoğunluğu vektörleri ve hareket denklemleri sırasıyla aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir.

$$t_{(i)(j)} = 0,5 f_{(i)(j)} (u_{(j)} - u_{(i)}, x_{(j)} - x_{(i)}, t) \quad (2.9)$$

$$t_{(j)(i)} = -0,5f_{(j)(i)}(u_{(i)} - u_{(j)}, x_{(i)} - x_{(j)}, t) \quad (2.10)$$

ve

$$\rho_{(i)}\ddot{u}_{(i)} = \sum_{j=1}^{N_{(i)}} [f_{(i)(j)}(u_{(j)} - u_{(i)}, x_{(j)} - x_{(i)}, t)] V_{(j)} + b_{(i)} \quad (2.11)$$

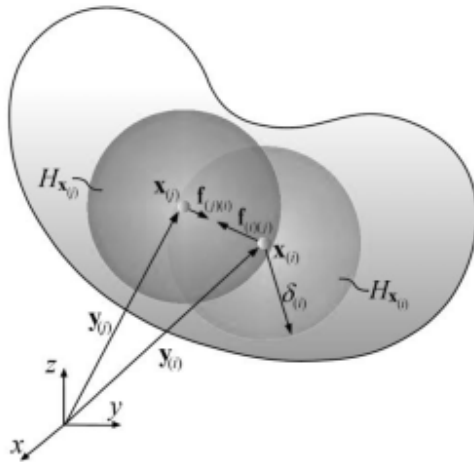
Bu denklemlerden, kuvvet yoğunluk vektörü $f_{(i)(j)}$ aşağıdaki gibi elde edilmektedir:

$$f_{(i)(j)} = s \cdot \frac{18\kappa}{\pi\delta^4} \cdot \frac{y_{(j)} - y_{(i)}}{|y_{(j)} - y_{(i)}|} \quad (2.12)$$

BB PD denklemlerinde, 2 boyutlu problemler için $\kappa = 2G$ olmaktadır. Burada κ hacim modülünü ve G kesme modülünü tanımlar. BB PD teorisi, malzemelerde meydana gelen hasarların oluşumunu ve ilerleyişini araştırmak için etkileyici bir performans sergilese de, bu yöntem sınırlandırılmış Poisson oranlarına sahiptir. BB PD denge denklemlerinde açısal momentum dengesini sağlamak için, 2 boyutlu problemlerde Poisson oranı 0,33, üç boyutlu problemlerde ise Poisson oranı 0,25 olmalıdır. Ayrıca, BB PD teorisinde, problemlerin çözüm alanları üniform olarak ayrıklaştırılmalıdır (Dorduncu vd., 2015).

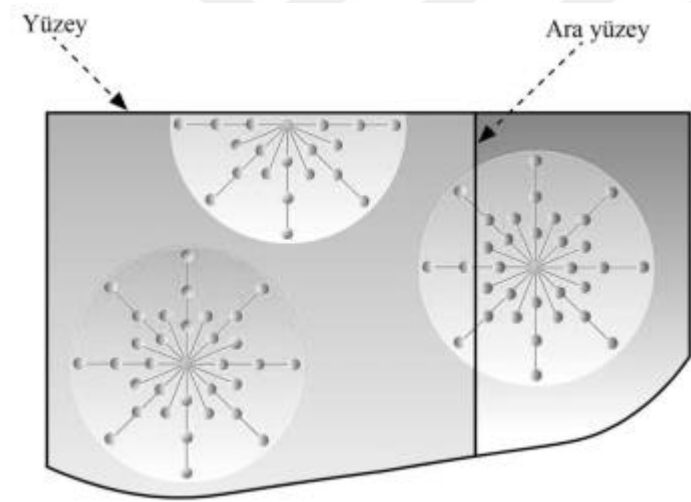
2.2 Sıradan Durum Bazlı Peridinamik (SDB PD)

Dr. Silling, 2007 yılında BB PD teorisine ait kısıtlamaları ortadan kaldırabilmek için sıradan durum bazlı (ordinary state based) PD teorisini geliştirmiştir. Şekil 2.3'te görüldüğü gibi SDB PD teorisinde kuvvet yoğunluk vektörleri birbirine zıt yönde olmasına rağmen ve şiddetleri farklı büyüklük değerlerine sahiptirler (Silling vd., 2007).



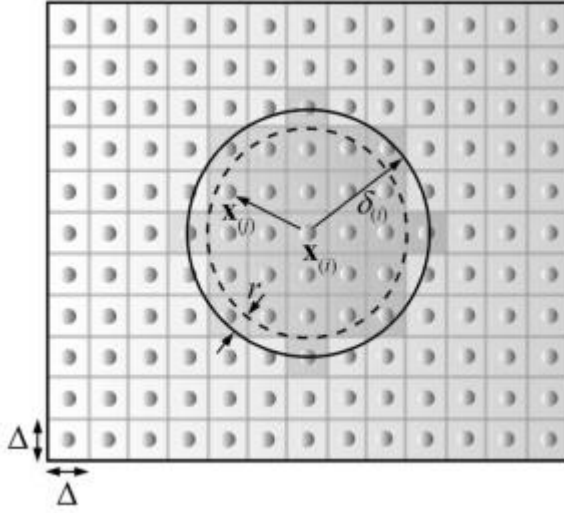
Şekil 2.3 SDB PD teorisine ait kuvvet yoğunluğu vektörleri (Olmuş, 2022)

Silling tarafından tanımlanan PD hareket denklemlerinde malzeme noktalarının etkileşim alanı simetrik olduğu kabul edilmektedir. Etkileşim alanı malzeme geometrisine bağlı olarak farklılık gösterebilmektedir. Bu durum BB ve SDB PD teorilerinde yüzey düzeltme ve hacim düzeltme katsayılarının kullanım gereksinimini meydana getirmiştir. Şekil 2.4'te görüldüğü üzere, malzeme geometrisinin kenar bölgelerine veya ara yüzeylerine yakın bölgelerde bulunan malzeme noktalarının ailesindeki toplam malzeme noktalarının sayısı değişkenlik gösterebilmektedir. Bu durum ilgili PD malzeme noktasının etkileşim alanı simetrikliğini kaybetmesine neden olmaktadır. PD değişken değerleri $b_{(i)(j)}$ ve $d_{(i)}$ etkileşim alanı boyutuna göre değişkenlik sergileyebilmektedirler. Bu tarz farklılıkların ortadan kaldırılması için kenar veya arayüzey bölgelerinde bulunan PD malzeme noktalarına ait PD değişkenleri için düzeltme katsayılarının kullanılması gerekmektedir. Bahsi geçen düzeltme katsayılarının elde edilebilmesi için PD ve KSOM şekil değiştirme enerji yoğunluğu değerlerinin farklı yüklemeler altında eşitlenmesi gerekmektedir (Madenci ve Oterkus, 2014).



Şekil 2.4 PD etkileşim alanı üzerindeki yüzey etkileri (Olmuş, 2022)

Ayrıklaştırılmış çözüm alanı içerisinde her bir PD malzeme noktasının kendisine ait bir hacim değeri mevcuttur ve PD noktaları bu hacmin merkezinde bulunmaktadır. PD hareket denklemlerinde her bir PD malzeme noktasının hacimsel integrasyonunun gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu işlem aşamasında $x_{(i)}$ PD malzeme noktasının komşularıyla olan etkileşimi dikkate alınmaktadır. Şekil 2.5'te görüldüğü üzere $x_{(i)}$ PD malzeme noktasına ait bazı komşu noktalarının hacimsel olarak kısmen etkileşim alanı içerisinde yer almaktadır ve bu durum sayısal integrasyon işlemlerinin hassasiyetini önemli ölçüde düşürmektedir (Olmuş, 2022).



Şekil 2.5 $x_{(i)}$ PD malzeme noktasının etkileşimi alanı için hacim düzeltme (Olmuş, 2022)

3. PERIDIGM YAZILIMI

Peridigm, peridinamik yöntemine dayalı olarak malzeme ve yapısal analizler yapmak için kullanılan bir yazılımdır. Bu yazılım, klasik sürekli ortamlar mekaniğinin yetersiz kaldığı durumlarda, özellikle de malzeme çatlaklarının ve hasarlarının modellenmesi gerektiğinde, daha gerçekçi ve ayrıntılı sonuçlar sağlamaktadır. Peridigm yazılımı, yerel olmayan etkileşimleri ve integral tabanlı denklemleri kullanarak, malzeme içindeki süreksizlikleri ve çatlak oluşumlarını daha etkin bir şekilde modelleyebilmektedir (Parks vd., 2012).

Peridigm, Sandia Ulusal Laboratuvarı tarafından geliştirilen bir açık kaynaklı bilimsel hesaplama yazılımıdır. Peridigm, Paralel Diskret Cisimler Modeli (Parallel Discrete Dislocation Model, PDDM) ve Peridinamik (Peridynamics, PD) teorilerini uygulamak için tasarlanmıştır. (Parks vd., 2012).

Peridigm, malzemelerin mekanik davranışını tahmin etmek için sürekli ortam yerine kesikli bir yaklaşım kullanmaktadır. PD teorisi, malzemelerin sürekli ortam yerine nokta parçacıklarından oluştuğu bir modeli temsil etmektedir. Bu yaklaşım, malzeme davranışını daha gerçekçi bir şekilde taklit etmeyi amaçlamakta, özellikle çatlak oluşumu, yayılması ve çeşitli hasar mekanizmalarının analizi gibi durumlarında uygulanmaktadır (Willberg vd.,2023).

Peridigm, parçacık tabanlı bir modelleme yaklaşımı kullanır ve parçacıklar arasındaki etkileşimleri hesaplamak için yerel olmayan bir formülasyon olan PD teorisini kullanmaktadır. Bu yazılım, yüksek performanslı hesaplama yetenekleriyle donatılmıştır ve paralel işlem mimarilerinde etkin bir şekilde çalışabilmektedir. (Parks vd., 2012).

Peridigm, malzeme mekaniği, hasar mekaniği, kırılma analizi, titreşim analizi ve benzeri alanlarda araştırmacılar ve mühendisler tarafından kullanılan bir araçtır. Ayrıca, açık kaynaklı bir yazılım olması, kullanıcıların yazılımı istedikleri şekilde özelleştirmelerine ve geliştirmelerine olanak tanımaktadır (Rädel ve Willberg, 2018).

Bu teori, klasik sonlu elemanlar yönteminin aksine, malzeme içindeki kuvvetlerin ve yer değiştirmelerin hesaplanmasında integral denklemleri kullanmaktadır. Bu sayede, çatlak

başlangıcı ve ilerlemesi gibi yerel olmayan fenomenlerin daha doğru bir şekilde modellenmesi mümkündür. (Parks vd., 2012).

Peridigm yazılımının başlıca kullanım alanları şunlardır:

1. **Çatlak Analizi:** Malzemelerdeki çatlakların oluşumu, ilerlemesi ve dallanmasının simülasyonudur.
2. **Hasar Mekaniği:** Malzemelerin hasar görme davranışının ve hasar yayılmasının analizidir.
3. **Kompozit Malzemeler:** Kompozit malzemelerdeki mikro çatlakların ve süreksizliklerin modellenmesidir.
4. **Dinamik Kırılma:** Yüksek hızda yüklemeler altında malzemelerin kırılma davranışının simülasyonudur (Willberg vd.,2023).

Peridigm, özellikle mühendislik ve malzeme bilimi alanlarında araştırma yapan akademisyenler ve endüstri profesyonelleri tarafından kullanılmaktadır. Yazılımın sunduğu ayrıntılı ve doğru analiz yetenekleri, malzeme tasarımı ve performans değerlendirmesi gibi alanlarda önemli avantajlar sağlamaktadır. Aşağıdaki başlıklarda Peridigm'in kullanım alanlarına ve örnek uygulamalarına örnekler verilebilmektedir (Rädel ve Willberg, 2018):

1. **Malzeme Mekaniği:** Peridigm, malzemelerin gerilme, deformasyon, elastisite, plastisite gibi mekanik özelliklerinin analizini yapabilmektedir. Malzemelerin davranışının zamana bağlı olarak nasıl değiştiğini, yüksek gerilme durumlarında nasıl şekil aldığını ve deformasyon alanlarının nasıl yayıldığını inceleyebilmektedir.
2. **Çatlak Analizi:** Peridigm, çatlak oluşumu, yayılması ve çatlakların malzeme içerisindeki etkilerini incelemek için kullanılabilir. Çeşitli malzemelerde çatlakların davranışını ve yayılma hızını analiz edebilmektedir.
3. **Hasar Mekaniği:** Peridigm, malzemelerin hasar mekanizmalarını ve malzeme içindeki hasarın etkilerini modellemektedir. Kırılma, delinme, plastik deformasyon gibi hasar mekanizmalarının incelenmesi için kullanılabilir.
4. **Yüksek Hızlı Etki Analizi:** Peridigm, malzemelerin yüksek hızlı etkiler altındaki davranışını incelemek için kullanılabilir. Örneğin, darbe yüklemeleri, patlamalar veya mermi etkisi altında malzemenin tepkisini analiz edebilmektedir.

5. **Geoteknik Mühendislik:** Peridigm, zemin davranışının analizi ve değişik koşullarda gerçekleşen deformasyonların incelenmesi için kullanılabilir. Yeraltı yapıları, zemin tabakaları ve temeller üzerindeki yüklerin etkisini modellemek amacıyla kullanılabilir.
6. **Titreşim Analizi:** Peridigm, yapısal titreşim analizinde kullanılan bir araç olabilir. Malzemelerin titreşim tepkilerini tahmin etmek ve titreşim kaynaklı hasarın etkilerini incelemek için kullanılabilir. Titreşim frekansları, mod şekilleri ve rezonans analizi gibi konuları ele alabilir. Bu, yapısal analizlerde, titreşimli sistemlerde ve malzeme tasarımında faydalı olabilir.

Peridigm, genel olarak malzeme mekaniği ve hasar analizinde kullanılan karmaşık problemlerin modellenmesi için kullanılan bir araçtır. Kullanıcılar, yazılımı özelleştirme ve belirli ihtiyaçlarına uygun hale getirme imkânına sahiptir.

Peridigm programını kullanmak için aşağıdaki adımlar izlenmektedir:

1. **Kurulum:** Peridigm programı indirilip bilgisayara kurulması gerekmektedir. Resmi Peridigm web sitesinden veya kaynak kodunu alarak yerel olarak kurulum yapılmaktadır. Kurulum adımları ve gereksinimler programın sürümüne bağlı olarak değişebilir. Kurulum talimatlarını ve belgeleri sağlayan bir kullanım kılavuzu genellikle programın web sitesinde bulunmaktadır.
2. **Model Hazırlığı:** Peridigm'i kullanarak bir analiz yapmadan önce, çalışma yapısını ve giriş parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu adımda, analiz yapılacak malzemenin geometrisini, yüklemeleri, sınırlayıcı koşulları ve malzeme özellikleri tanımlanması gerekmektedir. Bu aşamada, Peridigm'in giriş dosyası ve kontrol dosyası gibi yapılandırma dosyalarının oluşturulması gerekebilir.
3. **Giriş Verilerinin Hazırlanması:** Peridigm programı, gerekli giriş verilerini okuyabilmesi için belirli bir dosya formatını kullanmaktadır. Analiz için gereken verileri içeren bir giriş dosyası oluşturulması gerekmektedir. Bu dosya genellikle bir metin dosyasıdır ve malzeme geometrisi, bağlantılar, malzeme özellikleri, sınırlayıcı koşullar gibi bilgileri içermektedir.
4. **Analizin Yürütülmesi:** Peridigm programını çalıştırarak analizin yürütülmesi başlatılabilir. Analiz, giriş verilerini okumakta, gerekli hesaplamaları

yapmakta ve sonuçları üretmektedir. Analiz süreci, büyük ve karmaşık problemler için hesaplama gerektirebileceğinden, bu adımın tamamlanması biraz zaman alabilmektedir.

5. **Sonuçların İncelenmesi:** Peridigm analizinin tamamlanmasının ardından, program tarafından üretilen sonuçlar incelenebilmektedir. Bu sonuçlar, deformasyon dağılımları, gerilme dağılımları, çatlak ilerlemesi, hasar miktarı gibi bilgileri içerebilmektedir. Bu sonuçlar görselleştirebilir, analiz sonuçları çıktı dosyalarında kaydedilebilmektedir ve gerektiğinde analiz parametreleri ayarlayarak tekrar analiz yapılabilir (Rädel ve Willberg, 2019).

Tezde Peridigm yazılımı Docker yazılımı tabanı üzerinden kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir.

Peridigm yazılımını kullanabilmek için kod dizilimi oluşturmak gerekir. Kod diziliminde yapılacak analiz ve model hakkında bilgi girişlerinin ve parametrelerin yazılımın tanımlanacağı şekilde yapılması gerekmektedir. Bu parametre ve bilgilerin gruplama şekli; Ayırıştırma şekli (discretization), malzeme modelleri (material model), hasar modelleri (damage models), objenin özellikleri, sınır şartları (boundary conditions), bağlantı (contact), hesaplama sınıfı parametleri (compute class parameters), çözücü (solver) ve çıktı parametleri (output) olmaktadır. Bu gruplamalarında kendi içinde çeşitleri ve yöntemleri vardır.

3.1 Malzeme Modelleri

Peridigm yazılımı, çeşitli malzeme modellerini analiz edebilmektedir. Bu modeller iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Bunlar bağa dayalı (bond-based) ve duruma dayalı (state-based) malzeme modelleridir. Peridigm tarafından analiz edilebilen malzeme modelleri kendi arasında da sınıflandırılmaktadırlar (Rädel ve Willberg, 2018).

3.1.1 Bağ bazlı (Bond-Based) malzeme modelleri

Bond-Based (Bağ Temelli) malzeme modelleri, malzeme noktaları arasındaki bağların kuvvet ve enerji etkileşimlerine dayanmaktadır. Peridigm yazılımında kullanılan Bond-Based malzeme modelleri sadece PD Micro-Brittle (PD mikro kırılgen-PMB) modelini içermektedir (Rädel ve Willberg, 2018).

3.1.1.1 Peridinamik mikro kırılğan (PD Micro-Brittle-PMB)

PMB modeli, mikro ölçekte kırılğan davranış sergileyen malzemeler için kullanılmaktadır. Bu model, malzeme noktaları arasındaki bağların sadece çekme kuvvetlerine dayanmakta ve kesme veya basma kuvvetleri göz ardı edilmektedir. Genellikle kırılğan malzemelerin deformasyon ve kırılma analizlerinde kullanılmaktadır. Bağların belirli bir uzama miktarını aşması durumunda başarısız olduğu kabul edilmektedir. Bu kritik uzama miktarı, bağın kırılma gerilimine ulaşmasıyla ilgilidir (Rädel ve Willberg, 2018).

Bağ bazlı modeller, basit formülasyonları nedeniyle nispeten kolay uygulanmaktadır. Bu da basitliğini göstermektedir.

Bu modeller, malzeme noktaları arasındaki çekme kuvvetlerine odaklanmakta ve bu nedenle özellikle çekme dayanımı düşük, kırılğan malzemeler için uygundur. Bu özelliğiyle çekme odaklı olduğu anlaşılmaktadır.

Bağ bazlı modeller, genellikle sadece izotropik ve homojen malzemeler için geçerlidir. Ayrıca, kesme ve basma kuvvetlerini tam olarak modelleyemedikleri için bazı mühendislik uygulamaları için yeterli olmayabilmektedirler.

Bağ bazlı malzeme modelleri, Peridigm yazılımında çeşitli mühendislik ve bilimsel araştırma uygulamalarında kullanılabilir ve malzeme kırılma mekanizmalarını anlamak için güçlü bir araçtır. Ancak, bu modellerin sınırlamaları ve spesifik kullanım alanları göz önünde bulundurulmalıdır (Rädel ve Willberg, 2018).

3.1.2 Durum bazlı (State-Based) malzeme modelleri

Durum bazlı malzeme modelleri, malzeme noktaları arasındaki etkileşimleri daha geniş bir kapsamda ele almakta ve deformasyonun tüm komşu malzeme noktaları üzerindeki etkilerini dikkate alınmaktadır (Rädel ve Willberg, 2018).

Durum bazlı malzeme modelleri, Peridigm yazılımında geniş bir yelpazede mühendislik ve bilimsel araştırma uygulamaları için uygundur ve malzeme davranışlarını daha detaylı ve doğru bir şekilde modellemeye olanak tanınmaktadır. Durum bazlı modeller, daha karmaşık ve geniş kapsamlı malzeme davranışlarını modelleyebilmektedir. Tüm komşu malzeme noktalarının deformasyonlarını dikkate alarak daha doğru ve detaylı analizler sağlamaktadır.

Peridigm yazılımında durum bazlı malzeme modelleri iki ana sınıfa ayrılmaktadır. Bunlar; karşılaştırmaz (non-correspondence) ve karşılaştırmalı (correspondence) modelleridir.

3.1.2.1 Karşılaştırmaz (Non-Correspondence) malzeme modelleri

Peridinamik formülasyon kullanılarak doğrudan oluşturulan malzeme modelleridir ve klasik sürekli mekanik modellerle doğrudan bir karşılaştırma yapılamamaktadır. Karşılaştırmaz (non-correspondence) modeller, yüzey etkilerinin olmadığı durumlarda klasik modellerle aynı sonuçları vermektedir.

- **Peridinamik katı cisim (PD Solid-PS):** PS modelleri, malzemenin izotropik olduğu varsayımıyla çalışmakta, yani malzeme özellikleri tüm yönlerde aynı olmaktadır. Hem elastik hem de plastik deformasyonları modelleyebilir, bu da geniş bir malzeme davranışı yelpazesinin simülasyonunu mümkün kılmaktadır. Plastik deformasyon sırasında sertleşme ve viskoelastik davranışları içeren modelleri sayesinde, daha karmaşık malzeme davranışlarını simüle edebilmektedir. Peridinamik katı cisim modelleri, kullanıcıların belirli parametreler tanımlayarak malzeme davranışlarını simüle etmelerini sağlar. Bu parametreler, malzemenin elastik modülü, plastik akma gerilmesi, sertleşme modülü ve viskozite gibi özellikleri içerebilmektedir. PS modeli, mühendislik ve bilimsel araştırmalarda geniş bir uygulama alanına sahiptir ve malzeme davranışlarını detaylı bir şekilde analiz etmek için güçlü bir araç olmaktadır (Rädel ve Willberg, 2018).

➤ **Lineer PS (LPS):** İzotropik, lineer elastik malzeme modelidir. İzotropik ve lineer elastik malzemelerin davranışlarını modellemek için kullanılmaktadır. Basit elastik malzemeler için uygundur ve elastik deformasyonların hesaplanmasında kullanılmaktadır (Rädel ve Willberg, 2018).

➤ **Elastik:** Klasik elastik davranış sergileyen malzemeleri modellemek için kullanılmaktadır. Malzemenin sadece elastik deformasyon gösterdiği durumları modellemek için kullanılmaktadır (Rädel ve Willberg, 2018).

➤ **Elastik Plastik:** Elastik-plastik davranış sergileyen malzemeler için kullanılmaktadır. Malzemenin hem elastik hem de plastik deformasyon gösterdiği durumları modellemek için kullanılmaktadır. Elastik ve plastik deformasyonları olan malzemeler için uygundur. Plastik deformasyon sonrası kalıcı şekil değişikliklerini modellemek için de kullanılmaktadır (Rädel ve Willberg, 2018).

➤ **Elastik Plastik Sertleşme:** Elastik-plastik sertleşme gösteren malzemeleri modellemek için kullanılmaktadır. Elastik ve plastik deformasyonların yanı sıra, plastik deformasyon sırasında sertleşme (hardening) gösteren malzemeleri modellemek için kullanılmaktadır. Sertleşme özellikli elastik-plastik malzemelerin analizlerinde kullanılmaktadır. Malzemenin plastik deformasyon sırasında mukavemetinin artmasını (sertleşmesini) modellemek için uygundur (Rädel ve Willberg, 2018).

➤ **Viskoelastik:** Viskoelastik davranış sergileyen malzemeler için malzemenin hem viskoz hem de elastik davranış sergilediği durumları modellemek ve analiz etmek için kullanılmaktadır. Bu tür malzemeler, zamanla viskoz deformasyon gösterirken aynı zamanda elastik bir geri kazanım sergilemektedir (Rädel ve Willberg, 2018).

- **Konum farkındalıklı (Position-Aware-PA):** Malzeme noktalarının konum farkındalığına dayalı olarak geliştirilmiş bir durum bazlı (state-based) malzeme modelidir. PA modelleri, malzeme noktalarının etkileşimlerini ve bu noktaların konumlarına dayalı olarak deformasyonlarını daha hassas bir şekilde hesaplamaktadır (Rädel ve Willberg, 2018).

➤ **PA lineer katı cisim (PA linear solid-PALS):** Konum farkındalıklı lineer katı cisim modelidir. İzotropik, lineer elastik malzemelerin konum farkındalıklı davranışlarını modellemek için kullanılmaktadır. Malzemenin elastik deformasyonları, malzeme noktalarının konumlarına bağlı olarak hesaplanmaktadır. Bu, malzemenin homojen olmayan deformasyonlarını daha doğru bir şekilde modellemeye olanak tanımaktadır. Elastik malzemelerin deformasyon analizlerinde kullanılmaktadır. Özellikle, malzeme noktalarının konumları arasındaki farkların önemli olduğu durumlarda etkilidir (Rädel ve Willberg, 2018).

➤ **PA Viskoelastik (PAVE):** Konum farkındalıklı viskoelastik malzeme modelidir. Viskoelastik malzemelerin konum farkındalıklı davranışlarını modellemek için kullanılmaktadır. Malzemenin hem viskoz hem de elastik deformasyonları, malzeme noktalarının konumlarına dayalı olarak hesaplanmaktadır. Bu model, zamanla değişen viskoz deformasyonları ve elastik geri kazanımı içermektedir. Viskoelastik malzemelerin zamanla değişen deformasyonlarının analizlerinde kullanılmaktadır. Özellikle, viskoz

deformasyonların önemli olduğu uygulamalarda etkilidir (Rädel ve Willberg, 2018).

3.1.2.2 Karşılaştırmalı (Correspondence-Cp) malzeme modelleri

Cp modelleri, klasik sürekli mekanik formülasyon kullanılarak oluşturulan ve klasik malzeme modelleri ile uyumlu olan malzeme modelleridir. Bu modeller, klasik Cauchy gerilmeleri gibi çıktılar sağlayarak standart formülasyonlarla karşılaştırılabilir sonuçlar sunmaktadır. Peridigm yazılımında klasik sürekli mekanik (continuum mechanics) formülasyonlarını peridinamik çerçevede yeniden tanımlayarak kullanılan malzeme modelleridir. Cp modeller, klasik sürekli mekanik formülasyonla uyumlu olduğu için mühendislik uygulamalarında daha yaygın olarak kullanılmaktadır (Rädel ve Willberg, 2018).

Cp modelleri, klasik Cauchy gerilmesi gibi çıktılar sağlayarak klasik malzeme modelleriyle karşılaştırılabilir sonuçlar sunmaktadır. Bu modeller, peridinamik teori ve klasik sürekli mekanik teorileri arasında bir köprü görevi görmektedir. Geniş bir malzeme türü ve mühendislik problemi için uygundur. Farklı malzeme türleri ve deformasyon davranışları için esnek bir şekilde kullanılabilir. Klasik teorilerle uyumlu çıktılar sağlayarak, mühendislik problemlerinin analizinde karşılaştırılabilir ve güvenilir sonuçlar üretmektedir (Rädel ve Willberg, 2018).

- **Elastik Cp.:** Malzemenin sadece elastik davranış gösterdiği durumları modellemek için kullanılmaktadır. Malzemenin elastik deformasyonları hesaplanır ve bu deformasyonlar klasik elastik teori ile uyumludur. Model, Hooke yasası gibi elastik davranış kuralları ile çalışmaktadır. Sadece elastik davranış sergileyen malzemelerin analizlerinde kullanılmaktadır. Özellikle, küçük deformasyonların ve elastik geri kazanımın önemli olduğu mühendislik uygulamalarında etkilidir (Rädel ve Willberg, 2018).
- **Elastik Plastik Cp.:** Malzemenin hem elastik hem de plastik davranış gösterdiği durumları modellemek için kullanılmaktadır. Malzemenin elastik ve plastik deformasyonları hesaplanmaktadır. Model, plastik deformasyonların kalıcı şekil değişikliklerine neden olduğu ve elastik deformasyonların geri kazanılabilir olduğu durumları içermektedir. Akma kriterleri ve sertleşme kuralları gibi plastik davranış kuralları ile çalışmaktadır. Elastik-plastik davranış sergileyen

malzemelerin analizlerinde kullanılmaktadır. Özellikle, plastik deformasyonların önemli olduğu mühendislik problemlerinde etkilidir (Rädel ve Willberg, 2018).

- **Elastik Plastik Sertleşme Cp.:** Malzemelerin elastik ve plastik davranışlarını, ayrıca plastik deformasyon sırasında sertleşme özelliklerini modellemek için kullanılmaktadır. Elastik davranış, malzemenin yük kaldırıldığında orijinal şekline geri dönmesini ifade ederken, plastik davranış belirli bir gerilme seviyesini aştığında kalıcı şekil değişikliklerini içermektedir. Plastik deformasyon sırasında malzeme sertleşmekte, yani daha fazla şekil değiştirme için daha fazla gerilme gerektirmektedir. Bu model, malzemenin mikroyapısal özelliklerini dikkate alarak gerilme ve şekil değiştirme ilişkilerini tanımlamaktadır. Elastik Plastik Sertleşme modeli, mühendislik tasarımı, yapısal analiz ve kırılma mekaniği gibi alanlarda kullanılır ve sonlu elemanlar analizi (FEA) ve peridinamik analiz gibi tekniklerle uygulanmaktadır. Bu sayede malzemelerin karmaşık yükleme koşulları altındaki davranışları daha doğru bir şekilde tahmin edilebilmekte ve analiz edilebilmektedir.

3.2 Hasar Modelleri (Damage Models – Bond Failure Models)

Peridigm yazılımında hasar modelleri, malzeme başarısızlığını çeşitli koşullar altında tahmin etmek ve simüle etmek için kullanılmaktadır. Farklı hasar modelleri bulunmaktadır (Rädel ve Willberg, 2018).

3.2.1 Kritik bağ uzama hasar modeli (Critical stretch damage model)

Bir bağın kırılmadan önce ne kadar gerilebileceğini ölçen kritik bağ gerilmesine dayanmaktadır. Model sadece çekme altındaki bağlar için geçerlidir, çünkü bir bağın relatif uzaması kritik gerilme değeriyle karşılaştırılmaktadır. Diğer modellere göre daha hızlı çalışır ancak bir noktanın tamamen ayrılıp ayrılmadığını kontrol etmemektedir (Rädel ve Willberg, 2018).

Kritik bağ uzama hasar modeli, malzemelerin çekme altındaki bağlarının belirli bir gerilme değerine ulaşmadan önce ne kadar gerilebileceğini ölçen bir modeldir. Bu model, malzeme noktaları arasındaki bağların gerilme durumuna dayanarak hasarın nasıl oluştuğunu tahmin etmektedir.

Modelin temel prensibi; bağın gerilmesi belirli bir kritik değeri aştığında, bağ başarısız olur ve kırılır. Bu kritik değer, bağın ne kadar uzayabileceğini belirlemektedir. Model

sadece çekme altında olan bağlar için geçerlidir. Bağların relatif uzaması kritik gerilme değeriyle karşılaştırılmaktadır.

Modelin işleyişinde; her bir bağ için gerilme hesaplanmaktadır. Bu, bağın uzamasının orijinal uzunluğuna oranıdır. Hesaplanan gerilme, kritik gerilme değeriyle karşılaştırılmaktadır. Eğer bağın gerilmesi kritik değerden küçükse, bağ sağlam kalmaktadır. Eğer bağın gerilmesi kritik değeri aşarsa, bağ kırılır ve hasar oluşmaktadır.

Bu model diğer modellere göre daha hızlı çalışmaktadır. Çünkü sadece çekme durumunu kontrol etmektedir. Model, bir noktanın tamamen ayrılıp ayrılmadığını kontrol etmemektedir. Sadece bireysel bağların başarısızlık durumunu değerlendirmektedir. Kritik bağ uzama değeri, ufuk yarıçapı (horizon- δ) parametresine bağlıdır. Bu nedenle, kritik bağ uzama değeri saf bir malzeme parametresi değildir (Rädel ve Willberg, 2018).

Eğer termal genleşme katsayısı belirtilmemişse, termal genleşmeden kaynaklanan deformasyonlar hasar hesaplamalarına dahil edilmemektedir. Termal genleşme katsayısı, blok tanımında kullanılan malzeme modelinin termal genleşme katsayısıyla tutarlı olmalıdır.

Kritik bağ uzama hasar modeli, malzemelerin çekme altındaki gerilme durumlarını analiz etmek ve hasarın nasıl oluştuğunu tahmin etmek için etkili bir araçtır. Bu model, özellikle çekme durumunun baskın olduğu mühendislik problemlerinde kullanışlıdır (Rädel ve Willberg, 2018).

3.2.2 Zaman bağımlı kritik bağ uzama hasar modeli (Time dependent critical stretch damage model)

Malzemelerin belirli bir süre boyunca nasıl hasar gördüğünü modelleyen bir yaklaşımdır. Bu model, kritik bağ uzama hasar modelinin zamanla değişen bir kritik bağ uzama değerine uyarlanmış halidir. Böylece, malzemenin kritik bağ uzama değeri zaman içinde değişebilmekte ve bu değişiklikler bağların kırılma durumunu etkileyebilmektedir (Rädel ve Willberg, 2018).

Modelin temel prensibi; bağın zaman içinde ne kadar gerilebileceğini belirleyen kritik bağ uzama değerinin zamanla değişmesine izin vermektedir. Bu değişiklik, malzemenin yaşlanma, yorgunluk veya çevresel etkiler altında nasıl davrandığını daha doğru bir şekilde modellemeye yardımcı olmaktadır.

Modelin işleyişinde; her bir bağ için gerilme hesaplanmaktadır. Bu, bağın uzamasının orijinal uzunluğuna oranıdır. Hesaplanan gerilme, zaman bağımlı kritik bağ uzama değeriyle karşılaştırılmaktadır. Eğer bağın uzaması zamanın o anındaki kritik değerden küçükse, bağ sağlam kalmaktadır. Eğer bağın uzaması zamanın o anındaki kritik değeri aşarsa, bağ kırılmakta ve hasar oluşmaktadır (Rädel ve Willberg, 2018).

Bu model, malzemenin zaman içinde nasıl değiştiğini dikkate alarak daha dinamik ve gerçekçi bir hasar tahmini yapmaktadır. Model sadece çekme altında olan bağlar için geçerlidir ve relatif uzama değerlerine odaklanmaktadır. Kritik bağ uzama değeri, ufuk yarıçapı (horizon- δ) parametresine bağlıdır. Bu nedenle, kritik bağ uzama değeri saf bir malzeme parametresi değildir.

Eğer termal genleşme katsayısı belirtilmemişse, termal genleşmeden kaynaklanan deformasyonlar hasar hesaplamalarına dahil edilmemektedir. Termal genleşme katsayısı, blok tanımında kullanılan malzeme modelinin termal genleşme katsayısıyla tutarlı olmalıdır.

Zamanla değişen kritik bağ uzama değeri, malzemelerin uzun süreli davranışlarının ve çevresel etkilerin daha doğru bir şekilde modellenmesini sağlamaktadır. Özellikle malzemelerin yorgunluk, yaşlanma veya çevresel etkiler altında nasıl davrandığını analiz etmek için uygundur (Rädel ve Willberg, 2018).

Zaman bağımlı kritik bağ uzama hasar modeli, malzemelerin belirli bir süre boyunca nasıl hasar gördüğünü ve bu hasarın zaman içinde nasıl değiştiğini anlamak için güçlü bir araçtır. Bu model, özellikle uzun süreli yükleme durumlarının ve çevresel etkilerin önemli olduğu mühendislik problemlerinde kullanışlı olmaktadır.

3.2.3 Arayüz farkındalıklı hasar modeli (Interface aware damage model)

Malzemelerin arayüz bölgelerindeki hasar davranışlarını daha doğru bir şekilde modellemek amacıyla geliştirilmiş bir modeldir. Bu model, kritik gerilme hasar modeline dayanmakta ancak arayüz bölgelerindeki özel etkileri dikkate alarak daha hassas bir hasar tahmini yapmaktadır (Rädel ve Willberg, 2018).

Modelin temel prensibi; malzemelerin arayüz bölgelerinde, malzeme özellikleri ve bağların davranışları farklılık gösterebilmektedir. Arayüz farkındalıklı model, bu farklılıkları ve özel etkileri dikkate alarak hasarın nasıl oluştuğunu ve geliştiğini modellemeye çalışmaktadır. Bağın gerilmesi belirli bir kritik değeri aştığında, bağ

başarısız olmakta ve kırılmaktadır. Bu kritik değer, arayüz bölgelerinde özel olarak ayarlanabilmektedir.

Modelin işleyişinde; her bir bağ için gerilme hesaplanır. Bu, bağın uzamasının orijinal uzunluğuna oranıdır. Model, arayüz bölgelerindeki bağların farklı davranışlarını dikkate alarak hasar kriterlerini değerlendirmektedir. Hesaplanan gerilme, kritik gerilme değeriyle karşılaştırılmaktadır. Eğer bağın gerilmesi kritik değerden küçükse, bağ sağlam kalmaktadır. Eğer bağın gerilmesi kritik değeri aşarsa, bağ kırılmakta ve hasar oluşmaktadır (Rädel ve Willberg, 2018).

Bu model, özellikle arayüz bölgelerindeki farklı malzeme özelliklerini ve bağ davranışlarını dikkate alarak daha doğru bir hasar tahmini yapmaktadır. Kritik gerilme değeri, arayüz bölgeleri için özel olarak ayarlanabilmektedir. Bu, arayüzlerdeki özel etkileri dikkate alarak modelin hassasiyetini artırmaktadır. Kritik gerilme değeri, ufuk yarıçapı (horizon- δ) parametresine bağlıdır. Bu nedenle, kritik gerilme değeri saf bir malzeme parametresi değildir.

Eğer termal genleşme katsayısı belirtilmemişse, termal genleşmeden kaynaklanan deformasyonlar hasar hesaplamalarına dahil edilmemektedir. Termal genleşme katsayısı, blok tanımında kullanılan malzeme modelinin termal genleşme katsayısıyla tutarlı olmalıdır.

Bu model, arayüz bölgelerindeki farklı malzeme davranışlarını dikkate alarak daha hassas bir hasar tahmini yapmaktadır. Arayüz bölgelerinin önemli olduğu kompozit malzemeler, çok katmanlı malzemeler veya farklı malzemelerin birleştiği yapılar için uygundur.

Arayüz farkındalıklı hasar modeli, malzemelerin arayüz bölgelerinde meydana gelen hasarları daha doğru ve hassas bir şekilde modellemek için geliştirilmiştir. Bu model, özellikle kompozit malzemeler ve çok katmanlı yapılar gibi arayüz bölgelerinin önemli olduğu mühendislik problemlerinde kullanışlıdır (Rädel ve Willberg, 2018).

Arayüz farkındalıklı model, kritik gerilme modeline göre daha yavaştır ancak bir noktanın tamamen ayrılıp ayrılmadığını kontrol etmekte, bu sayede daha doğru sonuçlar vermektedir. Kritik gerilme değeri bağ gerilme altındayken pozitif olmalıdır, bu nedenle sıkıştırma altında bağın göreceli uzaması negatif olup pozitif kritik gerilme değerine asla ulaşmamaktadır.

3.2.4 Kritik enerji hasar modeli (Critical energy damage model)

Malzeme bağlarının kırılmasını belirlemek için kritik enerji yoğunluğunu kullanmaktadır. Bu model, izotropik sıradan elastik malzemeler için tasarlanmış olup, malzeme bağlarının kırılma enerjisi ile ilgili detaylı bir analiz sunmaktadır (Rädel ve Willberg, 2018).

Modelin temel prensibi; bağın kırılması için gereken enerji yoğunluğuna dayanmaktadır. Kritik enerji salınım oranı, malzemenin kırılma enerjisini temsil etmektedir. Mod I (çekme) ve Mod II (kesme) kırılma modları arasındaki etkileşim, belirli bir kriter kullanılarak değerlendirilmektedir (Rädel ve Willberg, 2018).

Modelin işleyişinde; her bir bağ için enerji yoğunluğu hesaplanmaktadır. Bu, bağın maruz kaldığı enerji miktarının bir ölçüsüdür. Hesaplanan enerji yoğunluğu, kritik enerji salınım oranıyla karşılaştırılmaktadır. Eğer bağın enerji yoğunluğu kritik değerden küçükse, bağ sağlam kalmaktadır. Eğer bağın enerji yoğunluğu kritik değeri aşarsa, bağ kırılmakta ve hasar oluşmaktadır.

Çekme ve kesme modları arasındaki etkileşim, belirtilen tür kriterine göre değerlendirilmektedir.

Model, sadece izotropik sıradan elastik malzemeler için geçerlidir. Kritik enerji değerleri, malzemenin kırılma enerjisini temsil eder ve bu değerler horizontan (δ) bağımsızdır. Mod I ve Mod II kırılma modları arasındaki etkileşim, belirli bir kriter kullanılarak değerlendirilmektedir. Bu kriter, enerji kriteri, güç yasası veya ayrılmış modlar şeklinde olabilmektedir (Rädel ve Willberg, 2018).

Eğer termal genleşme katsayısı belirtilmemişse, termal genleşmeden kaynaklanan deformasyonlar hasar hesaplamalarına dahil edilmemektedir. Termal genleşme katsayısı, blok tanımında kullanılan malzeme modelinin termal genleşme katsayısıyla tutarlı olmalıdır.

Malzemelerin kırılma enerjilerini detaylı bir şekilde analiz ederek hasarın nasıl oluştuğunu anlamaya yardımcı olmaktadır. Kritik enerji yoğunluğu kullanarak daha gerçekçi hasar tahminleri yapmaktadır. İzotropik sıradan elastik malzemeler ve kırılma enerjisinin önemli olduğu mühendislik problemleri için uygundur.

Kritik Enerji Hasar Modeli, malzemelerin kırılma enerjisini ve bu enerjinin hasar oluşumuna nasıl katkıda bulunduğunu anlamak için güçlü bir araçtır. Bu model, özellikle

izotropik sıradan elastik malzemeler ve kırılma enerjisinin önemli olduğu durumlarda kullanışlıdır.

3.3 Sınır Şartları (Boundary Conditions)

Sınır şartlarının genellikle serbest uç gibi belirli malzeme noktalarına uygulanması gerekmektedir. Bu nedenle, sınır şartının uygulanacağı malzeme noktalarını listelemek için bir düğüm seti tanımlanmalıdır. Eğer bir Exodus sonlu eleman ağı kullanılıyorsa, düğüm setleri ağ dosyasında önceden tanımlanmış olabilmektedir. Ancak, Peridigm giriş kartında yeni düğüm setleri tanımlamak da mümkündür. Peridigm'de tanımlanan sınır şartı türleri şunlardır (Rädel ve Willberg, 2018):

- Başlangıç yer değiştirme (initial_displacement)
- Başlangıç hızı (initial velocity)
- Başlangıç sıcaklığı (initial_temperature)
- Belirtilmiş yer değiştirme (prescribed displacement)
- Belirtilmiş hız (prescribed_velocity)
- Belirtilmiş ivme (prescribed acceleration)
- Belirtilmiş sıcaklık (prescribed_temperature)
- Kütle kuvveti (body force)

Genellikle, Peridigm'de yalnızca "Belirtilmiş Yer Değiştirme" homojen veya homojen olmayan kinematik sınır şartları için uygulanabilmektedir. Belirtilmiş hız veya ivme komutları mevcut değildir, ancak fonksiyon çözücüsü kullanılarak bu tür sınır şartları zaman değişkeni t kullanılarak uygulanabilmektedir.

3.4 Çözücüler (Solver)

Peridigm, çeşitli zaman entegrasyon şemalarını destekleyen bir çözücü (solver) sistemine sahiptir. Çözücüler, simülasyonun zaman entegrasyonunu gerçekleştiren algoritmalardır. Peridigm, hem açık (explicit) hem de kapalı (implicit) zaman entegrasyon şemalarını desteklemektedir (Rädel ve Willberg, 2018).

Çözücülerin sırası ile birden fazla çözücü, ardışık olarak kullanılabilir. Bu, farklı entegrasyon şemalarının sırasını tanımlamaktadır. Kullanıcıların simülasyonlarını daha verimli ve doğru bir şekilde gerçekleştirmelerine yardımcı olacak çözücü yapılandırmaları hakkında kapsamlı bilgi sağlamaktadır.

3.4.1 Açık (Explicit) – Verlet

Açık zaman entegrasyonlu çözücüdür. Hız (Velocity)-Verlet (leapfrog) zaman entegrasyon şeması kullanılmaktadır. Bu şema, dinamik simülasyonlar için uygundur ve Peridigm, problem için güvenli bir zaman adımı otomatik olarak tahmin etmektedir. Kullanıcı, sabit bir zaman adımı belirleyebilmekte veya güvenlik faktörü ile çarpılarak elde edilen zaman adımını kullanabilmektedir. Hız (Velocity)-Verlet şeması, dinamik simülasyonlarda yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir ve sistemin enerji korunumunu iyi bir şekilde sağlamaktadır (Rädel ve Willberg, 2018).

Temel prensipleri; çözücü, belirli bir zaman adımıyla (Δt) çalışmaktadır. Zaman adımı, simülasyonun doğruluğunu ve kararlılığını etkilemektedir. Peridigm, problem için güvenli bir zaman adımını otomatik olarak tahmin etmektedir. Kullanıcı, güvenlik faktörü ile bu zaman adımını ayarlayabilmektedir. Çözücü, sayısal sönümleme parametresi kullanarak yüksek frekanslı salınımları kontrol etmektedir (Rädel ve Willberg, 2018).

Çözücünün işleyişinde; simülasyon, başlangıç zamanında (initial time) başlamaktadır. Güvenlik faktörü kullanılarak otomatik bir zaman adımı belirlenmektedir. Eğer kullanıcı sabit bir zaman adımı belirlemişse, bu zaman adımı kullanılmaktadır. Hız (Velocity)-Verlet algoritması, her bir zaman adımında hız ve konumları güncellemektedir. Bu güncelleme, sistemin dinamik davranışını doğru bir şekilde yakalamaktadır.

Hız (Velocity)-Verlet algoritması, sistemin toplam enerjisini iyi bir şekilde korumaktadır. Açık zaman entegrasyonlu yöntemler, kapalı yöntemlere göre daha basit ve daha hızlıdır. Bu yöntem, özellikle yüksek hızlı dinamik olaylar için uygundur (Rädel ve Willberg, 2018).

Yüksek hızda deformasyon veya kırılma olaylarının simülasyonunda kullanılmaktadır. Ani yükleme koşullarının analizinde etkilidir. Açık (Explicit)-Verlet çözücü, Peridigm'de dinamik simülasyonlar için güçlü ve etkili bir yöntem sunmaktadır. Kullanıcılar, güvenli ve doğru sonuçlar elde etmek için gerekli parametreleri ayarlayarak bu çözücüye etkin bir şekilde kullanabilmektedirler.

3.4.2 (Kapalı) Implicit

Kapalı zaman entegrasyonlu çözücüdür. Bu çözücüler, sistemin dengeye ulaşması için iteratif yöntemler kullanmaktadır. Peridigm'in zaman entegrasyon şemasında kullanılan ve sabit zaman adımlarıyla çalışan bir çözümleyicidir. Bu şema, Newmark-beta yöntemi

kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Dinamik analizlerde kullanılan bir zaman entegrasyon şemasıdır. Bu yöntem, sabit zaman adımlarında çalışır ve Newmark-beta yöntemini kullanmaktadır (Rädel ve Willberg, 2018).

3.4.3 Yarı-statik (QuasiStatic)

Yarı-statik analiz için zaman entegrasyon şemasıdır. Nonlinear çözüm için NOX çözücüsü kullanılmaktadır. Bu şema, yük adımlarını kullanarak denge çözümlemesi yapmaktadır. Değiştirilmiş Newton yaklaşımıyla çalışan bir doğrusal olmayan çözücüyü içermektedir (Rädel ve Willberg, 2018).

3.4.4 NOXQuasiStatic (lineer olmayan-nonlinear)

NOXQuasiStatic, zaman entegrasyon şemasıdır ve yarı-statik analiz için kullanılmaktadır. Bu şema, Trilinos'tan NOX çözücüsünü kullanarak değiştirilmiş Newton yaklaşımı ile çalışmaktadır. NOX, Nonlinear Object-Oriented Solutions (Doğrusal Olmayan Nesne Yönelimli Çözümler) anlamına gelmekte ve $F(x) = 0$ denkleminin sağlam ve verimli bir şekilde çözülmesini sağlamaktadır. NOX, Çeşitli Newton tabanlı küreselleştirme tekniklerini içermektedir. Örnek olarak Doğrusal Arama ve Güven Bölgesi algoritmaları gösterilebilmektedir. Ayrıca, Broyden ve Tensor algoritmalarını kullanarak yüksek ve düşük dereceli modeller sağlamaktadır. NOX, Krylov altuzay teknikleri gibi kesin olmayan doğrusal çözücüler ile kullanılmak üzere özel algoritmalar geliştirmiştir. NOX, herhangi bir doğrusal cebir paketi ile çalışmak üzere tasarlanmıştır ve kolayca özelleştirilebilmektedir. Özelliklerinden bahsedilecek olunursa (Rädel ve Willberg, 2018);

- Newton tabanlı doğrusal olmayan çözücüdür,
- Trilinos doğrusal çözücülerine bağlanarak ölçeklenebilirliğe sahiptir,
- Matris-Free seçeneği mevcuttur,
- Sabit Nokta iterasyonları için Anderson Hızlandırması kullanılmaktadır,
- Artan sağlamlık için küreselleştirmeler uygulanmaktadır,
- Çizgisel Aramalar, Güven Bölgesi, Homotopi yöntemleri mevcuttur,
- Özelleştirilebilir, her seviyede C++ soyutlamaları kullanılabilmektedir,
- LOCA paketi ile genişletilmiştir.

4. KULLANILAN YARDIMCI YAZILIMLAR

Tezde Peridigm programını kullanmak için Docker adlı yardımcı platform programı kullanılmıştır. Docker programının kütüphanesinden Peridigm verileri indirilmiştir. Ubuntu işletim sistemiyle entegre çalışarak Docker platformunda yazılımı yapılan kodlar koşturularak hesaplama yapılmıştır. Yazılım kotlarında kullanılan 3 boyutlu çizimlerin tasarımı Fusion ve Coreform Cubit programlarında tasarlanmış ve yazılıma entegre edilmiştir. Yazılım kodlarının bulunduğu dosya ise text editör programı olan Notepad ++ programıyla düzenlenmesi yapılmıştır. Analizi yapılan modellerin sonuç çıktıları ise ParaView programı ile görüntülenmiş ve kontrol edilmiştir. İşletim sistemi olarak Ubuntu ve Windows işletim sistemleri kullanılmıştır.

4.1 Docker

Yazılan kodların koşturulması için kullanılan Docker programı; uygulamaları, bağımlılıklarını ve yapılandırmalarını birlikte paketleyen ve taşınabilir konteynerlerde çalıştıran açık kaynaklı bir platformdur. Konteynerler, sanallaştırma teknolojisi kullanarak uygulamaların izole ve tutarlı bir şekilde çalışmasını sağlamaktadır. Docker, geliştiricilere ve sistem yöneticilerine yazılım geliştirme, dağıtım ve çalıştırma süreçlerinde büyük kolaylıklar sunmaktadır (Docker, 2020).

Docker'ın ana bileşenleri (Miell ve Sayers, 2019);

- **Docker Engine:** Docker'ın çekirdek bileşenidir ve Docker konteynerlerini oluşturmak, çalıştırmak ve yönetmek için gerekli olan araçları içerir. Docker Engine iki ana bileşenden oluşmaktadır:
 - **Docker Daemon:** Docker konteynerlerini yöneten ve sistem üzerinde çalışan arka plan servisi.
 - **Docker CLI (Komut Satırı Arayüzü):** Kullanıcıların Docker Daemon ile etkileşime geçmesini sağlayan komut satırı arayüzüdür.
- **Docker Images (İmajlar):** Docker konteynerlerinin temelini oluşturan salt okunur şablonlardır. Bir imaj, uygulamanın çalışması için gerekli olan her şeyi (kod, kütüphaneler, bağımlılıklar, yapılandırma dosyaları) içermektedir. İmajlar, Docker Hub gibi depolarda saklanabilir ve paylaşılabilmektedir.

- **Docker Containers (Konteynerler):** İmajların çalıştırılabilir örnekleridir. Konteynerler, izole bir ortamda uygulamaların çalışmasını sağlamaktadır. Bir konteyner, aynı imajdan birden fazla kez çalıştırılabilmektedir.
- **Dockerfile:** Docker imajlarının nasıl oluşturulacağını tanımlayan metin dosyasıdır. Dockerfile, belirli talimatlar dizisi içerir ve bu talimatlar Docker imajının nasıl inşa edileceğini belirtmektedir.
- **Docker Hub:** Docker imajlarının depolanması ve paylaşılması için kullanılan çevrimiçi bir platformdur. Docker Hub, önceden oluşturulmuş imajlar barındırmaktadır ve kullanıcıların kendi imajlarını yüklemesine olanak tanımaktadır.

Docker'ın çalışma prensibi; işletim sisteminin çekirdeğini paylaşan ve birbirinden izole edilmiş konteynerler kullanarak çalışmaktadır. Her konteyner, uygulamanın bağımlılıklarını ve yapılandırmalarını içermekte, böylece uygulamalar farklı ortamlarda tutarlı bir şekilde çalışmaktadır. Konteynerler, sanal makinelerden daha hafiftir çünkü her biri kendi işletim sistemini çalıştırmak zorunda değildir; bunun yerine, ana işletim sistemi çekirdeğini paylaşmaktadırlar.

Docker'ın kullanım alanları (Miell ve Sayers, 2019);

- **Yazılım Geliştirme:** Geliştiriciler, uygulamalarını izole konteynerlerde çalıştırarak bağımlılık sorunlarını en aza indirmektedirler.
- **Test ve Sürekli Entegrasyon (CI):** Uygulamalar, sürekli entegrasyon süreçlerinde hızlı ve güvenilir bir şekilde test edilebilmektedir.
- **Dağıtım ve Ölçeklendirme:** Uygulamalar, farklı ortamlara hızlıca dağıtılabilmekte ve kolayca ölçeklendirilebilmektedir.
- **Mikro Hizmetler:** Docker, mikro hizmet mimarilerinin yönetimini ve dağıtımını kolaylaştırmaktadır.

Docker, uygulamaların taşınabilirliğini artırmakta, kaynak kullanımını optimize etmekte ve yazılım geliştirme yaşam döngüsünü hızlandırmaktadır. Bu sayede, geliştiriciler ve sistem yöneticileri daha verimli ve güvenilir yazılım çözümleri üretebilmektedirler.

Docker programının kullanılmasının başlıca nedenleri şunlardır (Miell ve Sayers, 2019):

- **Taşınabilirlik:** Docker konteynerleri, uygulamaların farklı ortamlarda (geliştirme, test, üretim gibi) aynı şekilde çalışmasını sağlamaktadır. Konteynerler, uygulamanın

tüm bağımlılıklarını içerdikleri için, "benim bilgisayarımda çalışıyor ama sunucuda çalışmıyor" sorunlarını ortadan kaldırmaktadır.

- **İzolasyon:** Docker konteynerleri, uygulamaların birbirinden izole bir şekilde çalışmasını sağlamaktadır. Bu, bir konteynerdeki bir uygulamanın diğer konteynerlerdeki uygulamalara müdahale etmesini önlemekte ve güvenliği artırmaktadır.
- **Kaynak Verimliliği:** Docker, sanal makinelerden daha hafif ve verimli bir çözümdür. Konteynerler, sanal makineler gibi ayrı bir işletim sistemi çalıştırmak yerine, aynı çekirdek üzerinde çalışmakta ve yalnızca gerekli olan kaynakları kullanmaktadır.
- **Kolay Yönetim:** Docker, uygulamaların kurulumu, yapılandırılması ve yönetimi için araçlar sağlamaktadır. Docker Compose gibi araçlar, çoklu konteyner uygulamalarını kolayca tanımlamanıza ve yönetmenize olanak tanımaktadır.
- **Sürüm Kontrolü ve Dağıtım:** Docker, uygulama sürümlerinin kolayca oluşturulmasını, dağıtılmasını ve güncellenmesini sağlamaktadır. Docker Hub gibi platformlar, uygulama imajlarını paylaşmak ve dağıtmak için kullanılabilir. Docker Hub gibi platformlar, uygulama imajlarını paylaşmak ve dağıtmak için kullanılabilir.
- **Sürekli Entegrasyon ve Sürekli Teslimat (CI/CD):** Docker, CI/CD süreçlerinde sıkça kullanılmaktadır. Uygulama geliştirme döngüsünde kod değişikliklerini hızlıca test etmek, entegre etmek ve dağıtmak için ideal bir ortam sunmaktadır.
- **Platform Bağımsızlığı:** Docker konteynerleri, uygulamaların Linux, Windows ve macOS gibi farklı işletim sistemlerinde tutarlı bir şekilde çalışmasını sağlamaktadır.

Docker programı, bu avantajları sayesinde yazılım geliştirme ve dağıtım süreçlerini daha verimli, güvenilir ve ölçeklenebilir hale getirmektedir.

Docker'ı işletim sisteminize kurmanız hangi işletim sistemine sahip olduğunuz önemlidir. Docker, Windows, macOS ve çeşitli Linux dağıtımlarında çalışabilmektedir. Docker'ın resmi web sitesinden işletim sisteminize uygun Docker'ı indirip kurmanız gerekmektedir. Bu çalışmada Windows işletim sistemi kullanılmıştır. Docker'ı Windows işletim sistemine yüklemek için Docker'ın kendine ait web sitesinden "Desktop for Windows'u" indirip yüklemek yeterlidir. Kurulum tamamlandığında, Docker Desktop'ı çalıştırarak yazılım kullanılabilir.

Mac işletim sistemi için ise Docker'ın kendine ait web sitesinden "Desktop for Mac'i" indirip yüklemek yeterlidir. Linux dağıtımlarında ise komut satırlarına aşağıdaki komutları yazarak yüklemek gerekmektedir (Docker, 2020).

- sudo apt-get update
- sudo apt-get install docker-ce docker-ce-cli containerd.io

4.2 Coreform Cubit

Coreform Cubit, karmaşık geometri modelleme, ağ oluşturma (mesh generation), simülasyon ve analiz için kullanılan güçlü bir mühendislik yazılımıdır. Eski adıyla CUBIT olan bu yazılım, hesaplamalı mühendislik ve bilimsel araştırmalar için geniş bir kullanım alanına sahiptir. Coreform Cubit, mühendislerin ve bilim insanlarının karmaşık geometrileri oluşturmaya, düzenlemesine ve bu geometriler için yüksek kaliteli ağlar (mesh) üretmesine olanak tanımaktadır. Yazılımın sunduğu parametrik ve non-parametrik geometri modelleme araçları, kullanıcıların detaylı ve hassas tasarımlar yapmasını sağlamaktadır. Ayrıca, yüzey ve hacim ağları oluşturarak sonlu elemanlar analizi (FEA) gibi sayısal simülasyonlar için optimize edilmiş çözümler sunmaktadır. Hexahedral, tetrahedral ve prism gibi farklı hücre tiplerini destekleyen bu yazılım, ağ kalitesini değerlendirme ve iyileştirme araçlarıyla daha doğru ve verimli simülasyonlar sağlamaktadır.

Coreform Cubit, geniş format desteğiyle CAD verilerinin farklı yazılımlar arasında kolayca paylaşılmasını mümkün kılmakta ve Python ile Tcl gibi programlama dilleriyle otomasyon ve skriptleme özellikleri sunmaktadır. Böylece tekrarlayan işlemler otomatikleştirilebilir. Kullanıcı dostu arayüzü sayesinde geometri modelleme ve ağ oluşturma süreçleri basit bir şekilde yönetilebilirken, ileri seviye ağlama teknikleri de adaptif ağ oluşturma ve sınır katmanları gibi karmaşık işlemlerin üstesinden gelmesine yardımcı olmaktadır. Yazılım, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD), mühendislik analizleri, biyomedikal mühendislik, havacılık ve otomotiv endüstrisi gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Enerji ve inşaat sektörlerinde de petrol sondajı ve yapı analizleri gibi projelerde kritik bir rol oynamaktadır.

Coreform Cubit, yüksek doğruluk gerektiren mühendislik ve bilimsel uygulamalar için vazgeçilmez bir araçtır. Kullanıcıların kompleks geometrileri ve ağları etkin bir şekilde yönetmelerine olanak tanımaktadır, bu da daha güvenilir ve verimli simülasyon sonuçları elde etmelerini sağlamaktadır.

Yazılım, tez çalışmasında üç boyut çizimleri yapılan modellerin analizi için ağlandırılması (mesh), kodlarda model için kullanılacak parametrelerin belirlenmesi için kullanılmıştır.

4.3 Autodesk Fusion

Autodesk Fusion, bulut tabanlı bir 3D CAD (bilgisayar destekli tasarım), CAE (bilgisayar destekli mühendislik), CAM (bilgisayar destekli üretim) ve PCB (baskı devre kartı) yazılımıdır. Fusion 360, mühendisler, tasarımcılar ve üretim profesyonelleri için entegre bir ürün geliştirme platformu sunmaktadır. Bu yazılım, endüstriyel ve mekanik tasarım, mühendislik ve üretim süreçlerini tek bir çatı altında toplamaktadır (Verma, 2018).

Autodesk Fusion 360, modern tasarım, üretim ve mühendislik süreçlerinde kullanılan güçlü bir yazılımdır ve birçok özelliği bir arada sunmaktadır. Programın 3D modelleme araçları, tasarımcıların parametrik, serbest biçimli ve poligonal ağlar kullanarak çeşitli şekillerde modeller oluşturmaya olanak tanır. Parametrik modelleme sayesinde, tasarımlar belirli matematiksel parametrelerle tanımlanabilirken, serbest biçimli modelleme, organik ve akışkan şekillerin kolayca tasarlanmasını sağlamaktadır. Mesh modelleme ise poligonlar kullanarak karmaşık modeller oluşturma imkanı tanımaktadır (Verma, 2018).

Simülasyon ve analiz özellikleri de Fusion 360'ın en önemli avantajlarından. Program, parçaların ve montajların yapısal dayanıklılığını test etmek için statik ve dinamik analizler yapabilmekte, ısı dağılımını ve termal gerilmeleri simüle edebilmektedir. Ayrıca, modal analiz ile doğal frekansları ve mod şekillerini belirleyerek ürünlerin performansını analiz etmektedir. Üretim ve CAM (bilgisayar destekli üretim) özellikleri ise özellikle CNC işleme ve 3D baskı süreçlerinde kritik bir rol oynamaktadır. CNC makineleri için farklı eksenlerde işlem yolları oluşturma ve üretim süreçlerini simüle etme gibi işlevler, üretim hatalarını ve optimizasyonları tespit etme olanağı sunmaktadır (Verma, 2018).

Elektronik tasarım alanında, Fusion 360, PCB (elektronik devre kartı) tasarımı ve elektronik simülasyon araçlarıyla elektronik mühendislerinin de ihtiyaçlarını karşılamaktadır. Devrelerin performansı analiz edilebilir ve tasarımlar optimize edilebilmektedir. Programın bulut tabanlı veri yönetimi özelliği, tasarımların her yerden erişilebilmesini ve ekip üyeleriyle iş birliği yapılmasını sağlamaktadır. Bu sistem,

versiyon kontrolü ve geri bildirimlerin kolayca yönetilmesiyle tasarım süreçlerinin verimliliğini artırmaktadır (Mugilan vd.,2022).

Fusion 360'ın render ve görselleştirme özellikleri, yüksek kaliteli fotogerçekçi renderlamakta ve animasyonlar oluşturarak tasarımların nasıl görüneceğini ve çalışacağını önceden görme imkanı sunmaktadır. Eğitim ve öğretim alanında da yaygın olarak kullanılan Fusion 360, mühendislik ve tasarım öğrencileri için önemli bir öğrenme aracı olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, ürün tasarımı, mekanik mühendislik, endüstriyel tasarım, mimarlık ve inşaat gibi birçok alanda farklı kullanım alanlarına sahiptir. Program, mimari projelerin görselleştirilmesi, inşaat bileşenlerinin prototiplenmesi ve hatta sanat ve yaratıcı projelerde kişiye özel ürünlerin tasarımı gibi çok geniş bir yelpazede kullanılmaktadır (Mugilan vd.,2022).

Yazılım tez çalışmasında analiz edilecek modellerin üç boyutlu çizimlerini hazırlamak ve hazırlanan çizimlerin Coreform Cubit programında kullanılabilecek formatta çıktı alınabilmesi için kullanılmıştır.

4.4 ParaView

ParaView, Kitware Inc. tarafından geliştirilen ve büyük veri setlerinin görselleştirilmesi, analiz edilmesi ve sunulması amacıyla kullanılan açık kaynaklı ve ücretsiz bir veri görselleştirme yazılımıdır. Özellikle bilimsel araştırma, mühendislik ve akademik çalışmalar gibi alanlarda yaygın olarak tercih edilmektedir. ParaView, kullanıcı dostu grafik arayüzü ve güçlü paralel hesaplama yetenekleri ile dikkat çekmektedir. Terabaytlarca veriyi işleyebilme kapasitesine sahip olan ParaView, büyük veri setleri ile çalışan kullanıcılar için idealdir (Ayachit, 2015).

Yazılım, Windows, MacOS ve Linux gibi çeşitli işletim sistemlerinde çalışabilmekte ve geniş bir kullanıcı kitlesi için erişilebilir olmasını sağlamaktadır. Hacimsel veri, vektör alanları, yüzeyler gibi çeşitli veri türlerini görselleştirmek için gelişmiş araçlar sunmaktadır. Kullanıcılar, görselleştirmeleri ve analizleri etkileşimli olarak gerçekleştirebilmekte veya Python betikleri kullanarak otomatikleştirebilmektedir. ParaView'in modüler yapısı, kullanıcıların yazılımı kolayca genişletmesine olanak tanımakta ve çeşitli veri formatlarını destekleyerek diğer veri kaynaklarıyla entegrasyon sağlamaktadır (Ayachit, 2015).

ParaView, bilimsel araştırmalarda karmaşık veri setlerini görselleştirmek ve analiz etmek için kullanılırken, mühendisler simülasyon verilerini analiz etmek ve tasarım süreçlerinde bu yazılımdan yararlanmaktadır. Ayrıca, akademik çalışmalarda ve endüstriyel uygulamalarda da sıklıkla tercih edilmektedir. Otomotiv, havacılık, enerji gibi endüstrilerde ürün geliştirme ve süreç iyileştirme için veri görselleştirme ve analiz yapılırken, tıbbi görüntüleme ve biyomedikal mühendislik alanlarında da ParaView kullanılmaktadır. Yer bilimciler ise jeolojik veri setlerini analiz etmek ve görselleştirmek için bu yazılımdan faydalanmaktadır. ParaView'in açık kaynaklı ve ücretsiz olması, kullanıcıların kolayca erişebilmesini ve ihtiyaçlarına göre zelleştirebilmesini sağlamaktadır (Ayachit, 2015).

Yazılım, tez çalışmasında modellerin analizinden sonra elde edilen sonuç çıktılarının görüntülenmesi için kullanılmıştır.

4.5 Abaqus

Abaqus, mühendislik ve simülasyon alanında kullanılan güçlü bir sonlu elemanlar analiz (FEA - Finite Element Analysis) yazılımıdır. İlk kez 1978 yılında piyasaya sürülen Abaqus, özellikle karmaşık mühendislik problemlerinin çözümünde kullanılmak üzere geliştirilmiştir ve bugün Dassault Systmes tarafından ticari olarak sunulmaktadır. Abaqus, mühendislerin çeşitli yapısal ve fiziksel analizler yapmasına olanak tanımaktadır; bu analizler arasında mekanik, termal, dinamik, statik ve doğrusal olmayan analizler yer almaktadır (Abaqus, 2011).

Programın en yaygın kullanım alanlarından biri yapısal analizlerdir. İnşaat mühendisliği, otomotiv ve havacılık gibi alanlarda, yapıların statik ya da dinamik yükler altında nasıl tepki vereceğini incelemek için kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra, termal analizler de yapılarak, sıcaklık dağılımı ve ısı transferi gibi problemler analiz edilmektedir. Özellikle malzemelerin yüksek sıcaklıklar altında nasıl davrandığını anlamak için bu tür analizler büyük önem taşımaktadır.

Abaqus, doğrusal olmayan analizler için de geniş bir destek sunmaktadır. Karmaşık malzeme davranışları, büyük şekil değişiklikleri ve plastik deformasyon gibi durumlar genellikle doğrusal olmayan niteliktedir ve Abaqus bu tür problemleri zebileme kapasitesine sahiptir. Ayrıca, dinamik olayları modellemek için kullanılan zaman bağımlı analizler de yazılımın önemli özelliklerindendir. Özellikle arpma ve patlama gibi ani

dinamik olaylarda sistemin nasıl tepki vereceğini simüle etmek amacıyla kullanılmaktadır.

Programın sunduğu grafiksel kullanıcı arayüzü olan Abaqus/CAE, mühendislerin modelleri oluşturmalarını, analizlerini ayarlamalarını ve sonuçları görselleştirmelerini kolaylaştırmaktadır. Abaqus'un diğer modülleri, farklı analiz türlerine özel çözümler sunmaktadır. Örneğin, Abaqus/Standard doğrusal ve doğrusal olmayan statik analizler için kullanılırken, Abaqus/Explicit daha çok karmaşık temas ve hızlı dinamik olayları simüle etmek için kullanılmaktadır (Abaqus, 2011).

Bu özellikleriyle Abaqus, otomotiv, havacılık, savunma, biyomekanik, enerji ve inşaat gibi çok çeşitli endüstrilerde karmaşık mühendislik problemlerini çözmek için yaygın olarak kullanılan bir yazılımdır. Mühendisler, bu programı kullanarak güvenli ve verimli ürünler tasarlayabilmektedir, prototip oluşturma maliyetlerini düşürebilmektedir ve tasarımlarının performansını önceden simüle ederek optimize edebilmektedirler.

Abaqus programı tezde peridinamik hesap yöntemiyle analiz edilmiş çalışmaları sonlu elemanlar hesap yöntemiyle analiz edilmiş çalışmalarla karşılaştırılması için kullanılmıştır.

5. ANALİZ SÜRECİ

Tez aşamasında; belirlenen modeller üzerinde çatlak analizi yapılmıştır. Yapılan analizlerde Peridinamik teori mantığı temelinde yazılmış olan Peridigm yazılımı kullanılmış ve sonuçlar her bir model ve her bir aşama için çıkan sonuçlar karşılaştırılıp ve yorumlanmıştır. Yapılan adımlar kısaca özetlenecek olursa;

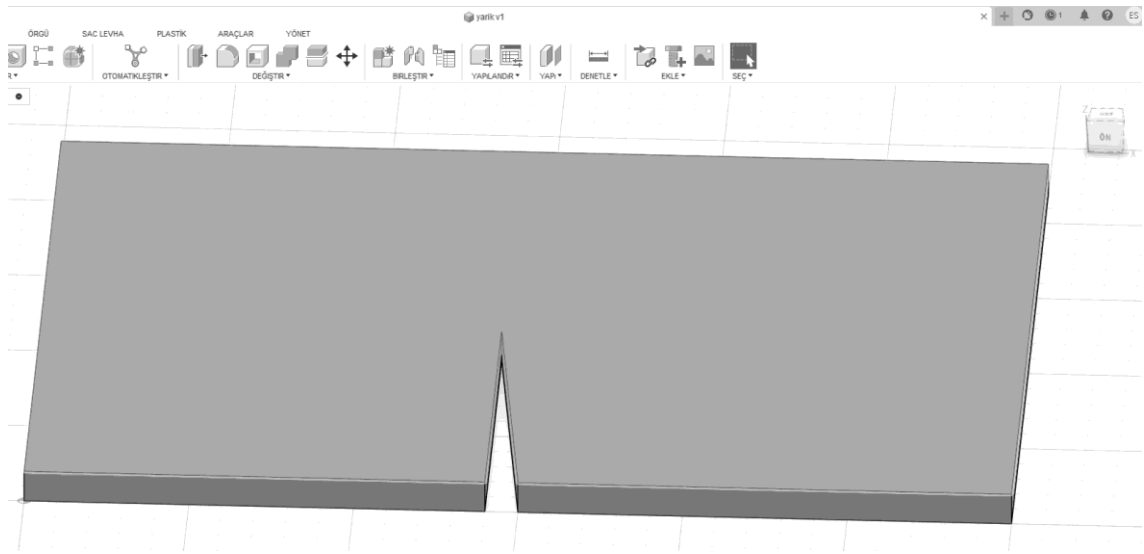
1. **Model Hazırlığı:** Modellerin analizi yapmak için, öncelikle analiz yapmak istenilen malzemenin geometrisi ve boyutlarını belirlenmiştir. Malzeme modeli uygun bir CAD yazılımı olan Fusion programı ile oluşturulmuştur. Geometrisi oluşturulan modelin tipik malzeme özellikleri ve sınırlayıcı koşullar gibi giriş parametreleri Coreform Cubit programı ve yazılan kod yazılımı yardımıyla belirlenerek malzeme bozukluklarının konumunu, boyutunu ve yönelimini kod yazılımıyla tanımlanmıştır.
2. **Malzeme Özelliklerinin Tanımlanması:** Peridigm, malzeme davranışını tanımlamak için gerekli malzeme özelliklerine ihtiyaç duymaktadır. Elastik modüller, Poisson oranı, gerilme-gerilme ilişkisi ve diğer malzeme özelliklerini belirlenmesi gerekmektedir. Bu verilerin Peridigm'in giriş dosyasında doğru bir şekilde tanımlanması önemlidir. Uygun değerler kod yazılımında seçilip tanımlanmıştır.
3. **Yüklemelerin ve Sınırlayıcı Koşulların Tanımlanması:** Modellerin analizinde, malzemeye uygulanan yüklemelerin ve sınırlayıcı koşulların belirlenmesi gerekmektedir. Bu, malzemeye etki eden dış kuvvetleri, yer değiştirme sınırlamalarını veya diğer sınırlayıcı koşulları içerir. Bu verilerin de Peridigm'in giriş dosyasında tanımlanması yapılmıştır.
4. **Analizin Yürütülmesi:** Model hazır olduğunda, Peridigm programı kullanılarak modellerin analizi yürütülebilmektedir. Peridigm çalıştırılarak giriş verileri okutulmakta ve analiz süreci başlatılmaktadır. Peridigm, malzeme noktalarının yer değişimini, gerilme dağılımını ve diğer analiz sonuçlarını hesaplayarak sonuç çıktılarını üretmiştir.
5. **Sonuçların İncelenmesi:** Peridigm analizi tamamlandıktan sonra, sonuçları incelenmiştir. Analizin sonuçları genellikle gerilme ve yer değiştirme dağılımlarını içermektedir. Analiz sonuçlarını görselleştirilebilmekte ve malzeme noktalarının zamana bağlı olarak nasıl değiştiği, gerilme yoğunluklarının nasıl

dağıldığı görülebilmektedir. Bu bilgiler, malzeme tasarımı, kırılma mekaniği çalışmaları veya yapısal sağlamlık analizleri gibi çeşitli uygulamalarda kullanılabilir.

Analiz sürecinde beş farklı model tasarlanmıştır. Birinci ve ikinci modeller, hesap sonuçları için en uygun malzeme model hesaplamalarının tespiti için farklı hasarlara sahip modeller üzerinde analizler yapılmıştır. Sonrasında hesap sonuçlarına uygun malzeme modelleri seçilmiştir. Seçilen malzeme model hesaplarıyla daha basit modellerde karşılaştırma yapılabilmesi için basit düz levha ve üzerinde farklı sayıda çentiklere sahip versiyonları olan üçüncü, dördüncü ve beşinci modeller tasarlanmıştır. Tasarlanan bu modeller üzerinden hesap değerleri incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Bu basit modellerden biri seçilerek sonlu elemanlar hesap yönteminde analiz yapılmış ve karşılaştırılması yapılmıştır.

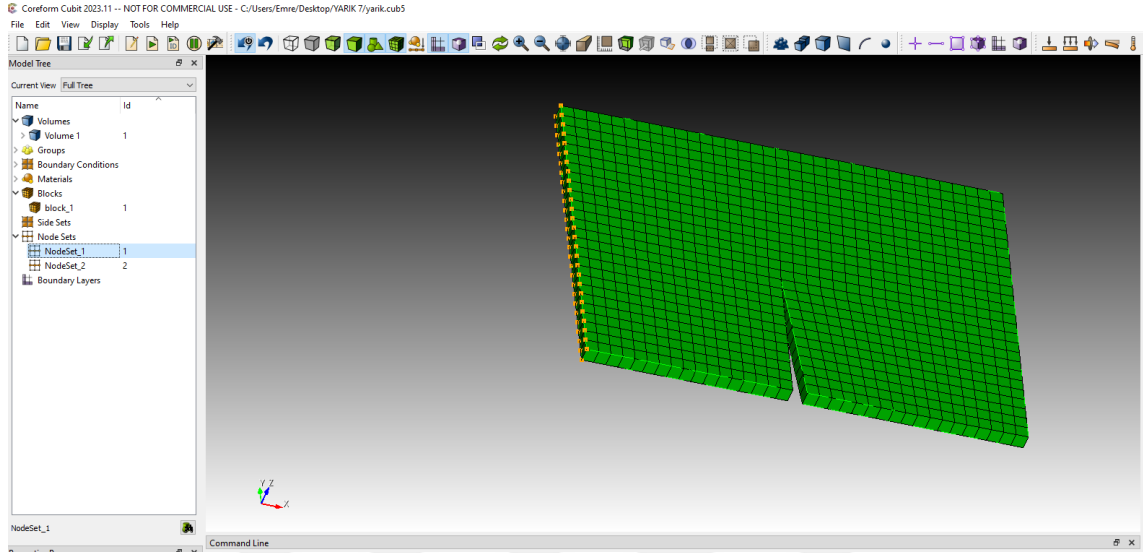
5.1 Birinci Modelin Analizi

Tezde analizlerin yapılabilmesi için öncelikle gerekli yazılımların yüklemeleri ve düzenlemeleri yapılmıştır. İlk olarak istenilen bir modelin üç boyutlu çizimi Autodesk Fusion yazılımı ile çizilmiştir. Çizilen birinci modelin adına “yarık” verilerek, Coreform Cubit yazılımında kullanılabilmesi için “.sat “ uzantısında dışa aktarım (export) yapılmıştır. Çizilen model 15*10*0,5 birim ebatlarında tasarlanarak ortasında yarık modellenmiştir. Modelin tasarımı Şekil 5.1’de gösterildiği gibidir.



Şekil 5.1 yarık adlı modelin Autodesk Fusion yazılımında tasarımı

Export edilen “yirtik.sat” dosyası Coreform Cubit yazılımında içe aktarım (import) yapılarak yazılan kod sisteminde kullanılabilmesi için ağlara bölme, blok ve nodeset tanımlama işlemleri yapılmıştır. Modellenen dosya kod sisteminde tanımlanması için Genesis formatında dışa aktarım (export) yapılarak “block_7b.g” dosyası oluşturulmuştur.



Şekil 5.2 CoreForm Cubit yazılımda yirtik.sat dosyasının modellenmesi

Modelin malzemesi için S400 çelik seçilmiştir. Çeliğin malzemesi için Elastisite modülü (E) 211×10^9 Pa, Poisson oranı (ν) 0,3, akma dayanımı 420×10^6 Pa ve Sertleşme modülü ise 630×10^6 Pa seçilmiştir. Bu seçilen değerler ile Kayma modülü (G);

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} = \frac{211 \cdot 10^9}{2(1 + 0,3)} = 81,154 \cdot 10^9 \text{ Pa} \quad (5.1)$$

ve 3 boyutlu analiz için Hacim modülü (Bulk Modulus – K);

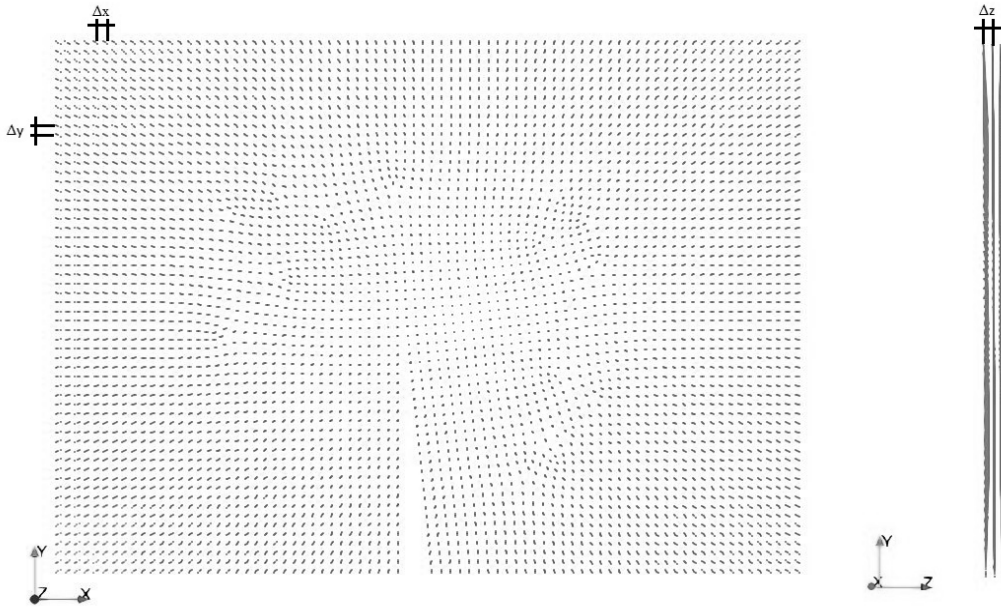
$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} = \frac{211 \cdot 10^9}{3(1 - 2 \cdot 0,3)} = 175,833 \cdot 10^9 \text{ Pa} \quad (5.2)$$

olarak hesaplanmıştır. Şekil 5.3’te görüldüğü gibi modeldeki malzeme noktaları incelendiğinde, x ekseninde tek doğrusal eksen üzerinde ortalama 79 adet, y ekseninde 58 adet ve z ekseninde ise 3 adet olduğu tespit edilmiştir. Çatlak kısmı göz ardı edildiğinde toplam nokta sayısı $79 \times 58 \times 3$ hesabından 13746 adet miktarından daha az olması beklenirken toplam nokta sayısının 13823 adet olduğu tespit edilmiştir. Bunun sebebinin modelin orta kısımlarında noktaların birbirine daha yakın olmasından kaynaklandığı tespit edilmiştir. Yaklaşık değerler üzerinden noktalar arası ortalama mesafe x ekseninde doğrultusunda 0,1923 cm (15cm/78 adet), y ekseninde doğrultusunda 0,1754

cm (10cm/57 adet) ve z eksenı doğrultusunda 2,5 cm (0,5cm/2 adet) olduğu hesaplanmıştır. Çekme kuvvetinin uygulandığı eksen doğrultusu x eksenı doğrultusu olduğu için analizde kullanılan malzeme noktaları arası mesafe (Δx) 0,1923 cm seçilmiştir. Analizlerde ufuk yarıçapı (komşuluk yarıçapı-horizon- δ) değeri;

$$\delta = m \cdot \Delta x = 3,015 \cdot 0,1923 = 0,5798 \text{ cm} \quad (5.3)$$

seçilmiştir. Bu formülden bulunan m katsayısının değeri literatürde farklı problemler için önerilen değerler 3 ve 4 değeri arasında olmaktadır. Silling ve Askari çalışmasında m katsayısının çok büyük olması aşırı dalga dağılımına sebep olduğunu belirtmiştir, bu durum PD formülasyonunda tutarsız sonuçlar elde edilmesine sebep olmaktadır (Silling ve Askari, 2005). Radel ise çalışmasında çok küçük m katsayısının malzeme davranışının doğru yansıtamayacağını belirtmiştir. Yapılan çalışmalarda en gerçekçi çözümlere ulaşmak için optimum m katsayı değeri 3,015 bulunmuştur (Radel vd., 2017).



Şekil 5.3 Birinci Modelin Malzeme noktalarının analizden önceki görünümü

Hasar analizi için kritik bağ (critical stretch) hasar modeli seçilmiştir. Kritik bağ uzama oranı (critical stretch) değeri hesaplanması gerekmektedir. Bu değerin hem malzeme modelleri hem de her boyut için farklı formülleri vardır. Analizde malzeme modelleri durum bazlı ve 3 boyutlu seçilmiştir. Bu seçimlerle. Kritik bağ uzama oranı (s_c) değeri formülü;

$$s_{C3D} = \sqrt{\frac{G_{0C}}{\left(3G + (0,75^4) \left(K - \frac{5G}{3}\right)\right) \delta}} \quad (5.4)$$

olmaktadır. Bu formüldeki G_{0C} kritik enerji salınım oranını (critical energy release rate), G kayma modülünü, K hacim modülünü ve δ ufuk yarıçapını temsil etmektedir. Kritik enerji salınım oranı çelik için 100 J/m^2 seçilmiştir. Değerler formülde yerine konduğunda;

$$s_{C3D} = \sqrt{\frac{100}{\left(3 \cdot 81,154 \cdot 10^9 + (0,75^4) \cdot \left(175,833 \cdot 10^9 - \frac{5 \cdot 81,154 \cdot 10^9}{3}\right)\right) \cdot 0,005798}} = 0,0002594 \quad (5.5)$$

bulunmuştur. SI birim sisteminde bulunan bu değer CGS birim sisteminde de aynı değer olmaktadır.

Kod diziliminde genel itibari ile analiz yapılacak modelin tanımlamak için Şekil 5.2’de görüldüğü gibi block_1 tanımlanması yapılmıştır. Sınır şartları için kuvvetin uygulanacağı noktalar Şekil 5.2’de görüldüğü gibi "NodeSet_1" ve "NodeSet_2" olarak tanımlanmıştır. Kuvvetin uygulanma yönü ise x eksenini doğrultusunda olacağı öngörülmüştür.

Çelik, mekanik özellikleri açısından elastik ve plastik davranışlar sergileyebilen bir malzemedir. Elastik davranış, çelik gibi malzemelerin küçük gerilmelere maruz kaldığında orijinal şekillerine geri dönebilmeleri anlamına gelmektedir; bu gerilme kaldırıldığında malzeme eski boyutlarına geri dönmektedir. Ancak belirli bir sınıra kadar uygulanan daha büyük gerilmelerde, çelik plastik davranış göstermektedir. Bu durumda malzeme kalıcı şekil değişikliklerine uğrayabilmektedir. Bu özelliğinden dolayı model, farklı malzeme davranışlarında Peridigm yazılımında denenmek istenmiştir. Bu sayede yazılımın hangi malzeme modelinde daha gerçekçi çözümler yaptığı araştırılmak istenmiştir. Analiz için oluşturulan kod dizilimi Peridigm kullanma kılavuzundaki tavsiye edilen kod dizimleri kullanılarak oluşturulmuştur.

5.1.1 Birinci modelin elastik malzeme modelinde analizi

İlk olarak modelin malzemesinin elastik davranış gösterdiği kabul edilmiştir. Oluşturulan “block_7b.g” dosyası gerekli tanımlamalar ve sınır şartları ile aşağıdaki belirtilen kod sistemiyle entegre edilmiştir. Kod dizilimi aşağıda gösterildiği gibidir.

“Peridigm:

Units are CGS

#	mass	g	(kütle birimi olarak gram seçilmiştir.)
#	length	cm	(uzunluk birimi olarak cm seçilmiştir.)
#	time	s	(zaman birimi olarak saniye seçilmiştir.)
#	density	g/cm ³	(yoğunluk birimi olarak g/cm ³ seçilmiştir.)
#	force	dyne	(kuvvet birimi olarak dyne seçilmiştir.)
#	pressure	dyne/cm ²	(basınç birimi olarak dyne/cm ² seçilmiştir.)
#	velocity	cm/s	(hız birimi olarak cm/s seçilmiştir.)
#	acceleration	cm/s ²	(ivme birimi olarak cm/s ² seçilmiştir.)
#	energy	erg	(enerji birimi olarak erg seçilmiştir.)

Verbose: false

Discretization:

Type: "Exodus"

Input Mesh File: "block_7B.g" (giriş ağ dosyası)

Materials:

My Material:	(malzeme olarak çelik seçilmiştir.)
Material Model: "Elastic"	(elastik malzeme olduğu seçilmiştir.)
Density: 7.8	(yoğunluğu 7,8 g/ cm ³ seçilmiştir.)
Bulk Modulus: 175.833e10	(Hacim modülü-dyne/cm ²)
Shear Modulus: 81.154e10	(Kayma modülü-dyne/cm ²)

Damage Models: (Hasar modeli)

My Damage Model:

Damage Model: "Critical Stretch"	(Kritik bağ uzama hasar modeli seçildi)
Critical Stretch: 0.0002594	(Kritik bağ uzama oranı)

Blocks:

My Block:

Block Names: "block_1" (Coreform Cubit yazılımında oluşturulan modele ait blok ismi)

Material: "My Material"

Damage Model: "My Damage Model"

Horizon: 0.5798 (Ufuk yarıçapı-cm)

Boundary Conditions: (Sınır şartları)

Prescribed Displacement Top:

Type: "Prescribed Displacement"

Node Set: "NodeSet_1" (Coreform Cubit yazılımında oluşturulan modele ait yan cephesinden çekme kuvveti uygulanacak yüzeye ait noktalar setinin ismi)

Coordinate: "x" (uygulanacak kuvvetin yönü)

Value: "-0.5*x*t" (uygulanacak kuvvetin zamana göre fonksiyonu)

Prescribed Displacement Fix Bottom Rigid Body Motion In X:

Type: "Prescribed Displacement"

Node Set: "NodeSet_2" (Coreform Cubit yazılımında oluşturulan modele ait sabit tutulacak diğer yan cephesinde ait noktalar setinin ismi)

Coordinate: "x"

Value: "0.0"

Solver: (Çözücü)

Verbose: false

Initial Time: 0.0

Final Time: 10.0

QuasiStatic: (Yarı-statik (QuasiStatic) çözücü analizi seçildi)

Number of Load Steps: 40 (Analiz 40 adımlı seçildi)

Absolute Tolerance: 1.0

Maximum Solver Iterations: 100

Compute Class Parameters:

Top Reaction Force:

Compute Class: "Block_Data"

Calculation Type: "Sum"

Block: "block_1"

Variable: "Force"

Output Label: "Top_Reaction_Force"

Bottom Reaction Force:

Compute Class: "Block_Data"

Calculation Type: "Sum"

Block: "block_1"

Variable: "Force"

Output Label: "Bottom_Reaction_Force"

Output:

(İstenen Çıktı Parametrelerinin bölümü)

Output File Type: "ExodusII"

Output Filename: "yirtik_out7Bet"

Output Frequency: 1

Output Variables:

Displacement: true

Velocity: true

Acceleration: true

Element_Id: true

Proc_Num: true

Force_Density: true

Force: true

Volume: true

Damage: true

Top_Reaction_Force: true

Bottom_Reaction_Force: true

Deformation_Gradient: true

Radius: true

Number_Of_Neighbors: true

Neighborhood_Volume: true

Sonuçların çıktısının ismi "yirtik_out7Bet" olacak şekilde ayarlanmıştır. Oluşturulan kod yazılımı "tensile_test_07Bet.yaml" ismi ile kaydedilmiştir.

Docker yazılımı açılarak peridigm yazılımı Docker'ın kütüphanesinden indirilerek yüklemesi yapılmıştır.

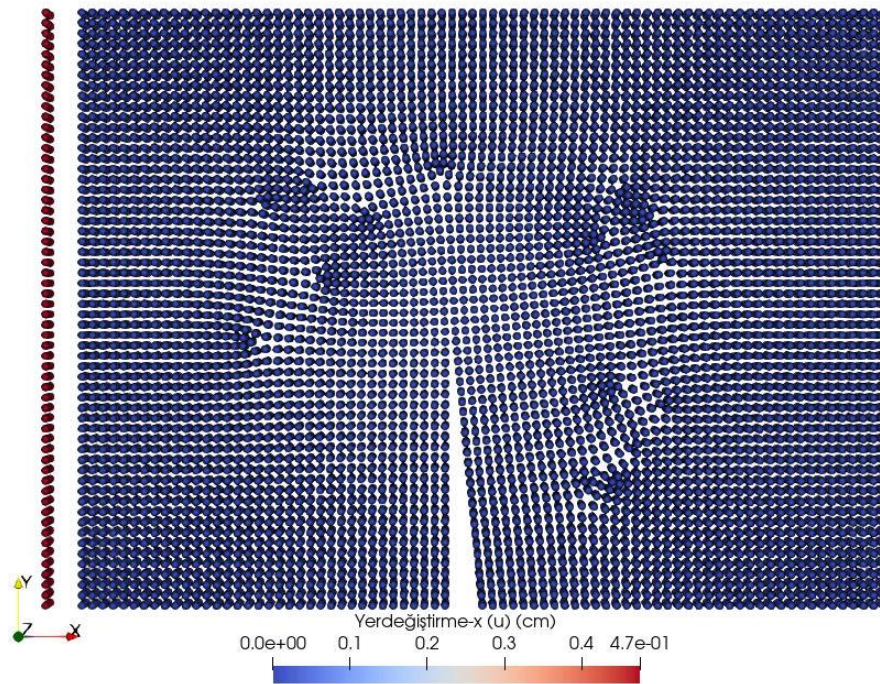
Kod yazılımı ve entegresi tamamlandıktan sonra "Kontrol Paneli" olan "Terminal" açılarak, buradan Ubuntu işletim sistemi açılmıştır. Ubuntu işletim sisteminde çalışabilmek için gereken "tensile_test_07Bet.yaml" ve "block_7b.g" dosyaları Ubuntu işletim sistemine ait ilgili peridigm\tensiletest klasörü içine kopyalanmıştır.

Ubuntu işletim sisteminde Terminalden komutlarla peridigm\tensiletest klasörüne girilmiştir. Klasör içindeki ilgili dosyaların varlığından emin olmak için kontrol edilmiştir. Ardından Docker yazılımına entegre olarak kod yazılımını çalıştırabilmek için komut satırına aşağıdaki komut yazılıp analiz Docker yazılımında başlatılmıştır.

```
➤ docker run --name tensile_plate7Bet -d -v /home/[kullanıcının  
adı]/peridigm/tensiletest:/output peridigm/peridigm Peridigm  
tensile_test_07Bet.yaml
```

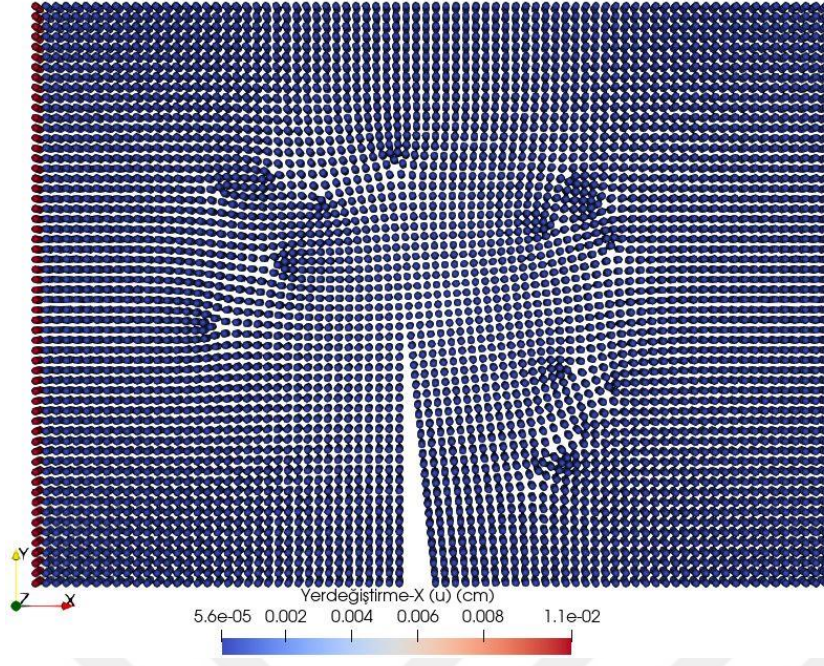
Analiz tamamlandıktan sonra “yirtik_out7Bet.e” sonuç çıktı dosyası elde edilmiştir. Elde edilen çıktı dosyasının görüntülenmesi Şekil 5.4’teki gibi ParaView yazılımında yapılmıştır. Şekil 5.4’teki görüntü analizin son adımına kadar gerçekleşen malzeme noktalarının yer değişimini göstermektedir. Diyagramdan da anlaşılabileceği gibi noktaların yer değişim miktarı arttıkça kırmızı rengine dönmektedir.

Malzemenin elastik davranış gösterdiğinde, kuvvetin uygulandığı kısım şerit halinde kopmanın meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu durum sonrası uygulanan kuvveti 10 kat azaltarak tekrar analiz denenmiş, fakat aynı davranış gözlenmiştir. Sadece noktaların yer değişimi (deplasman) azalmıştır. Kod dosyasının ismi “tensile_test_07Bet10.yaml” olarak kaydedilmiştir. Çıktı dosyasının ismi “yirtik_out7Bet10.e” olarak kaydedilmiştir. İlgili kod dizilimi EK 1’de sunulmuştur.



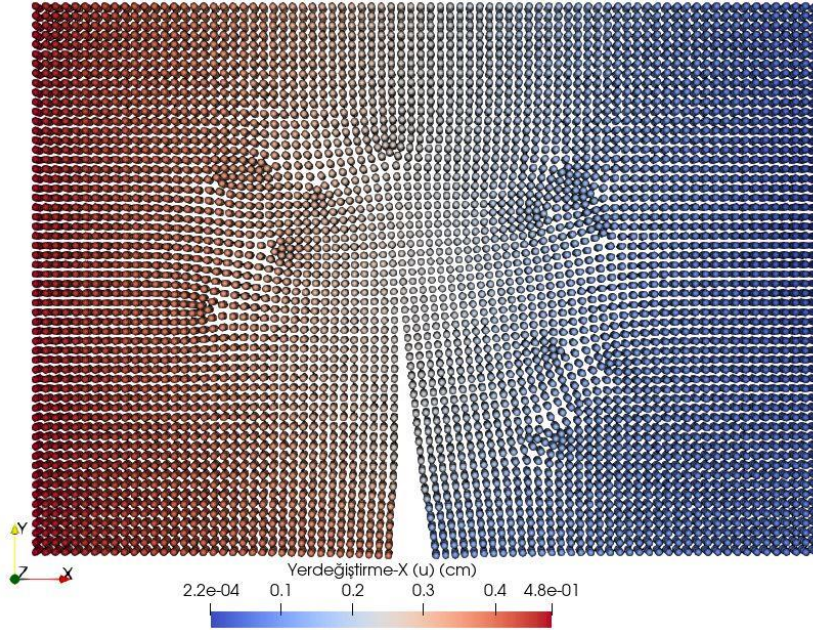
Şekil 5.4 yirtik_out7Bet.e çıktısının ParaView yazılımında görüntülenmesi

Kuvveti 50 kat küçülterek analiz yapıldığında ise Şekil 5.5’te görüldüğü gibi yer değiştirme neredeyse hiç görülmemiştir. Kod dosyasının ismi “tensile_test_07Bet50.yaml” olarak kaydedilmiştir. Çıktı dosyasının ismi “yirtik_out7Bet50.e” olarak kaydedilmiştir. İlgili kod dizilimi EK 2’de sunulmuştur.



Şekil 5.5 yirtik_out7Bet50.e çıktısının ParaView yazılımında görüntülenmesi

Aynı malzeme modelinde ilk analizdeki uygulanan çekme kuvvetiyle hasarsız model analizi yapılmak istenmiştir. Bu amaçla ilk analizdeki kod yazılımdan hasar modeli (Damage Models) kısmı kaldırılmıştır. Analizde kopmanın gerçekleşmeyerek çekme kuvvetinin yönünde malzeme noktalarının yer değiştirdiği gözlemlenmiştir. Kod dosyasının ismi “tensile_test_07Betds.yaml” olarak kaydedilmiştir. Çıktı dosyasının ismi “yirtik_out7Betds.e” olarak kaydedilmiştir. İlgili kod dizilimi EK 3’te sunulmuştur.

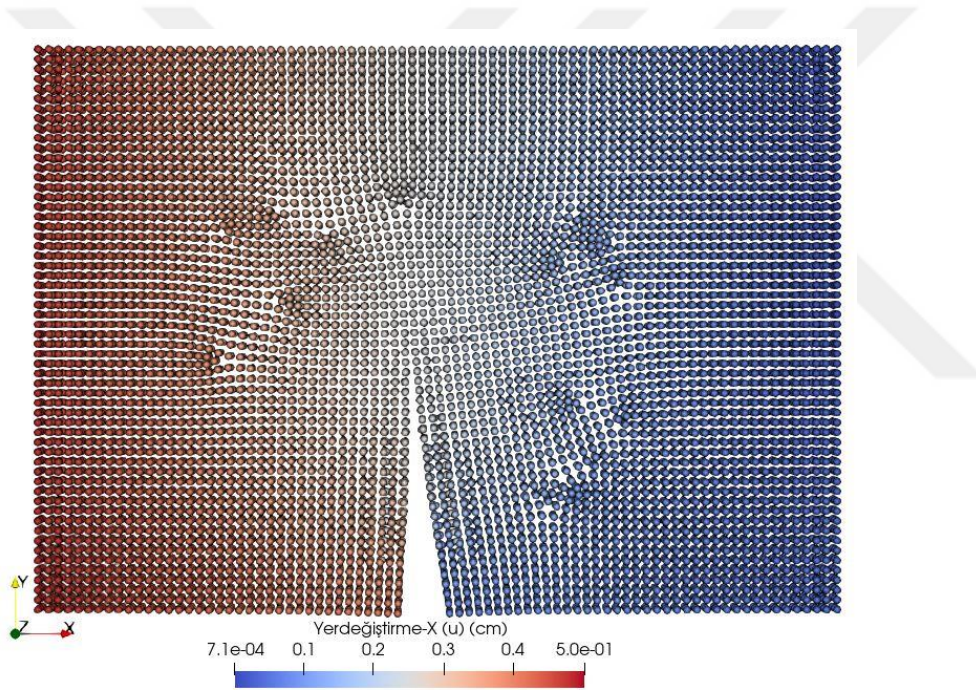


Şekil 5.6 yirtik_out7Betds.e çıktısının ParaView yazılımında görüntülenmesi

Şekil 5.6’da görüldüğü gibi hasar modeli kaldırıldığında yırtılma olmadan malzeme noktalarının yer değiştirdiği gözlemlenmiştir.

5.1.2 Birinci modelin elastik karşılaştırmalı (correspondence-cp.) malzeme modelinde analizi

Birinci modelin malzeme modeli elastik cp. olacak şekilde Peridigm kullanma kılavuzundan kod formatı alınarak modele uygun şekilde kod dizilimi yapılmıştır. Analizin hasarlı olabilmesi için hasar modeli eklenmiş ve kritik bağ uzama (critical stretch) hasar modeli seçilmiştir. Kod dosyasının ismi “tensile_test_07Bect.yaml” olarak kaydedilmiştir. Çıktı dosyasının ismi “yirtik_out7Bect.e” olarak kaydedilmiştir. İlgili kod dizilimi EK 4’te sunulmuştur.



Şekil 5.7 yirtik_out7Bect.e çıktısının ParaView yazılımında görüntülenmesi

Şekil 5.7’da görüldüğü gibi yırtılma olmadan malzeme noktalarının yer değiştirdiği gözlemlenmiştir.

5.1.3 Birinci modelin elastik plastik malzeme modelinde analizi

Birinci modelin malzeme modeli elastik plastik olacak şekilde Peridigm kullanma kılavuzundan kod formatı alınarak modele uygun şekilde kod dizilimi yapılmıştır. Analizin hasarlı olabilmesi için hasar modeli eklenmiş ve kritik bağ uzama (critical stretch) hasar modeli seçilmiştir. Kod dosyasının ismi “tensile_test_07Bept.yaml” olarak

kaydedilmiştir. Çıktı dosyasının ismi “yirtik_out7Bept.e” olarak kaydedilmiştir. İlgili kod dizilimi EK 5’te sunulmuştur.

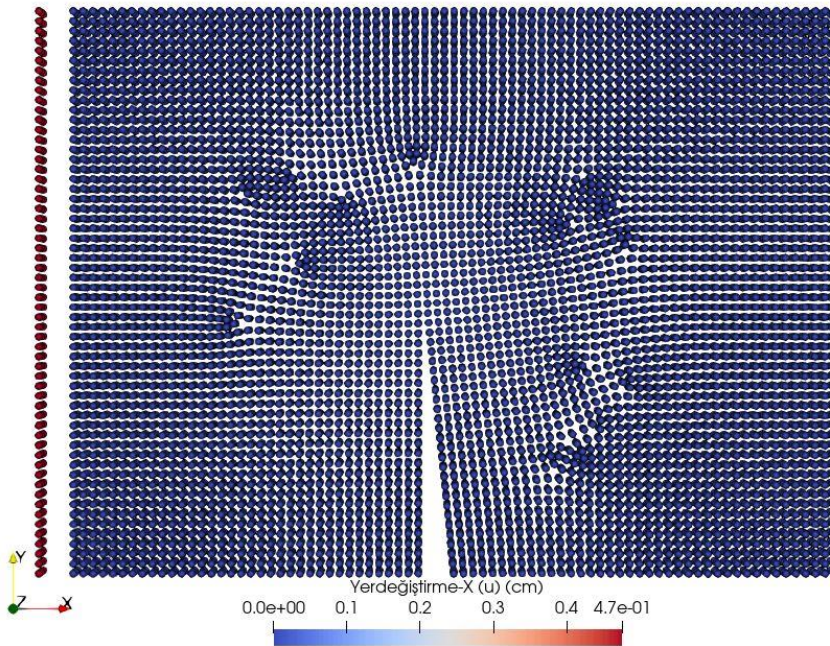
İlgili kod dizilimindeki malzeme bölümü aşağıdaki gibidir.

Materials:

My Material:

Material Model: "Elastic Plastic"	(elastik plastik malzeme olduğu seçilmiştir.)
Density: 7.8	(yoğunluğu 7,8 g/ cm ³ seçilmiştir.)
Bulk Modulus: 175.833e10	(Hacim modülü-dyne/cm ²)
Shear Modulus: 81.154e10	(Kayma modülü-dyne/cm ²)
Yield Stress: 4.2e9	(Akma dayanımı-dyne/cm ²)
Disable Plasticity: true	(plastisite devre dışı bırakmıştır.)
Apply Shear Correction Factor: false	(kayma düzeltme faktörü uygulamamıştır.)

Malzeme elastik plastik davranış gösterdiğinde, elastik davranış analizde olduğu gibi kuvvetin uygulandığı kısımda şerit halinde kopmanın meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu durum sonrası uygulanan kuvveti 10 kat azaltarak tekrar analiz denenmiş, fakat aynı davranış gözlenmiştir. Sadece noktaların yer değişimi (deplasman) azalmıştır.



Şekil 5.8 yirtik_out7Bept.e çıktısının ParaView yazılımında görüntülenmesi

Elastik malzeme modelinde denendiği gibi 50 kat kuvvet düşürerek ve hasar modeli kaldırılarak analizler yapılmış, yakın sonuçlar elde edilmiştir.

5.1.4 Birinci modelin elastik plastik karşılaştırmalı (correspondence-cp.) malzeme modelinde analizi

Birinci modelin malzeme modeli elastik plastik cp. olacak şekilde Peridigm kullanma kılavuzundan kod formatı alınarak modele uygun şekilde kod dizilimi yapılmıştır. Analizin hasarlı olabilmesi için hasar modeli eklenmiş ve kritik bağ uzama (critical stretch) hasar modeli seçilmiştir. Kod dosyasının ismi “tensile_test_07Bepct.yaml” olarak kaydedilmiştir. Çıktı dosyasının ismi “yirtik_out7Bepct.e” olarak kaydedilmiştir. İlgili kod dizilimi EK 6’da sunulmuştur.

İlgili kod dizilimindeki malzeme bölümü aşağıdaki gibidir.

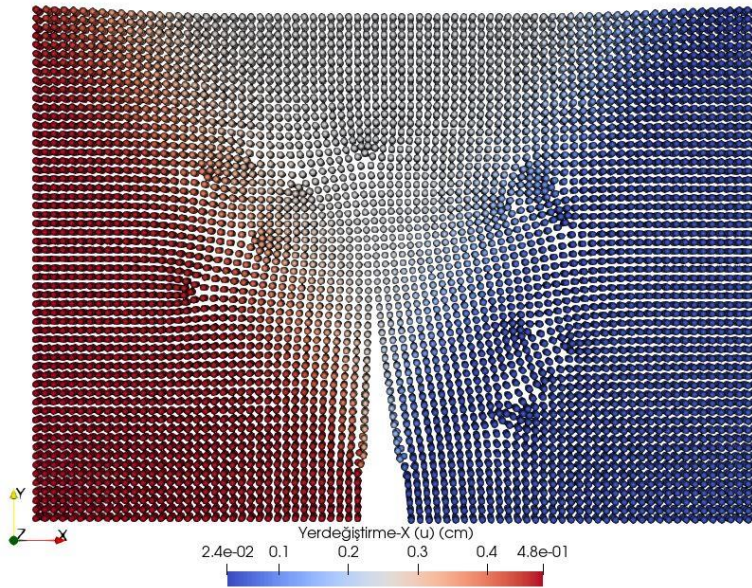
Materials:

My Material:

Material Model: "Elastic Plastic Correspondence" (Elastik plastik cp. malzeme modeli seçilmiştir.)

Density: 7.8	(yoğunluğu 7,8 g/ cm ³ seçilmiştir.)
Young's Modulus: 211.0e10	(Elastisite modülü -dyne/cm ²)
Poisson's Ratio: 0.3	(Poisson Oranı)
Hourglass Coefficient: 0.02	(Hourglass katsayısı)
Yield Stress: 4.2e9	(Akma dayanımı-dyne/cm ²)

Analiz sonucunda malzemede kopma olmamış ve malzeme noktalarında yer değişmeler Şekil 5.9’daki gibi oluşmuştur.



Şekil 5.9 yirtik_out7Bepct.e çıktısının ParaView yazılımında görüntülenmesi

5.1.5 Birinci modelin elastik plastik sertleşme (hardening) karşılaştırmalı (correspondence-cp.) malzeme modelinde analizi

Malzeme modeli için Elastik Plastik Sertleşme modeli Peridigm kullanma kılavuzundan kod formatı olmadığı için sadece karşılaştırmalı (correspondence) modeli için analiz edilebilmiştir. Birinci modelin malzeme modeli elastik plastik sertleşme cp. olacak şekilde Peridigm kullanma kılavuzundan kod formatı alınarak modele uygun şekilde kod dizilimi yapılmıştır. Analizin hasarlı olabilmesi için hasar modeli eklenmiş ve kritik bağ uzama (critical stretch) hasar modeli seçilmiştir. Kod dosyasının ismi “tensile_test_07Bephct.yaml” olarak kaydedilmiştir. Çıktı dosyasının ismi “yirtik_out7Bephct.e” olarak kaydedilmiştir. İlgili kod dizilimi EK 7’de sunulmuştur.

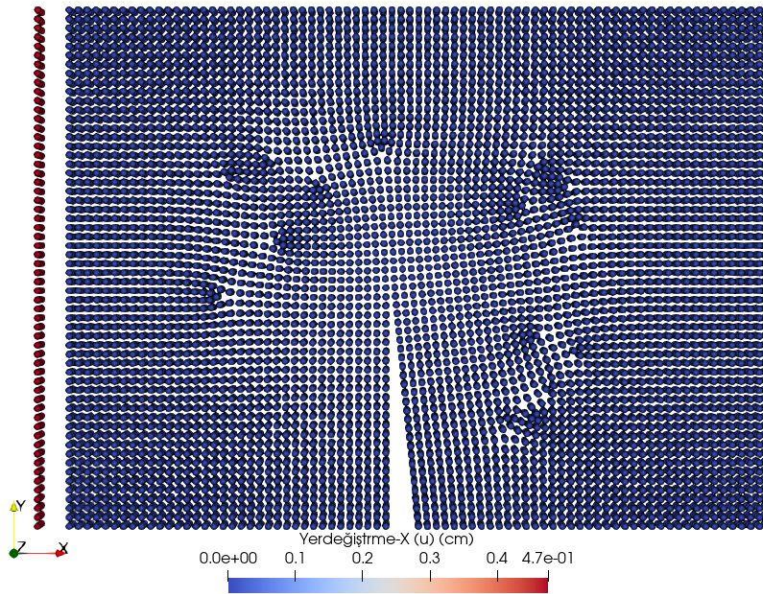
İlgili kod dizilimindeki malzeme bölümü aşağıdaki gibidir.

Materials:

My Material:

Material Model: "Isotropic Hardening Correspondence" (elastik plastik sertleşme cp. malzeme modeli seçilmiştir.)

Density: 7.8	(yoğunluğu 7,8 g/ cm ³ seçilmiştir.)
Young's Modulus: 211.0e10	(Elastisite modülü -dyne/cm ²)
Poisson's Ratio: 0.3	(Poisson Oranı)
Yield Stress: 420.0e7	(Akma dayanımı-dyne/cm ²)
Hardening Modulus: 630.0e7	(Sertleşme modülü -dyne/cm ²)
Hourglass Coefficient: 0.02	(Hourglass katsayısı)

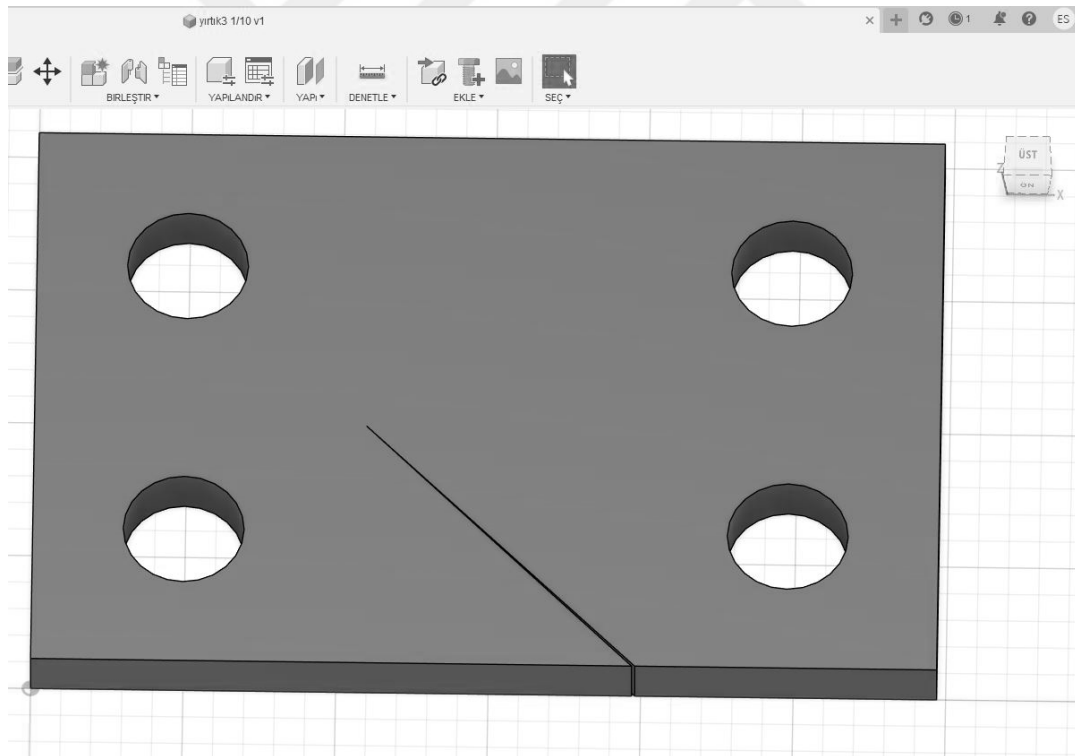


Şekil 5.10 yirtik_out7Bephct.e çıktısının ParaView yazılımında görüntülenmesi

Malzeme elastik plastik sertleşme cp. davranış gösterdiğinde kuvvetin uygulandığı kısımda şerit halinde kopmanın meydana geldiği gözlemlenmiştir. Fakat benzer durumun meydana geldiği diğer malzeme modellerine göre, ilk etapta kopmadan malzeme noktaları yer değiştirmeye başlamış, ardından koparak ana modelde kalan kısımlar elastik davranış gösterip eski konumlarına dönmüşlerdir.

5.2 İkinci Modelin Analizi

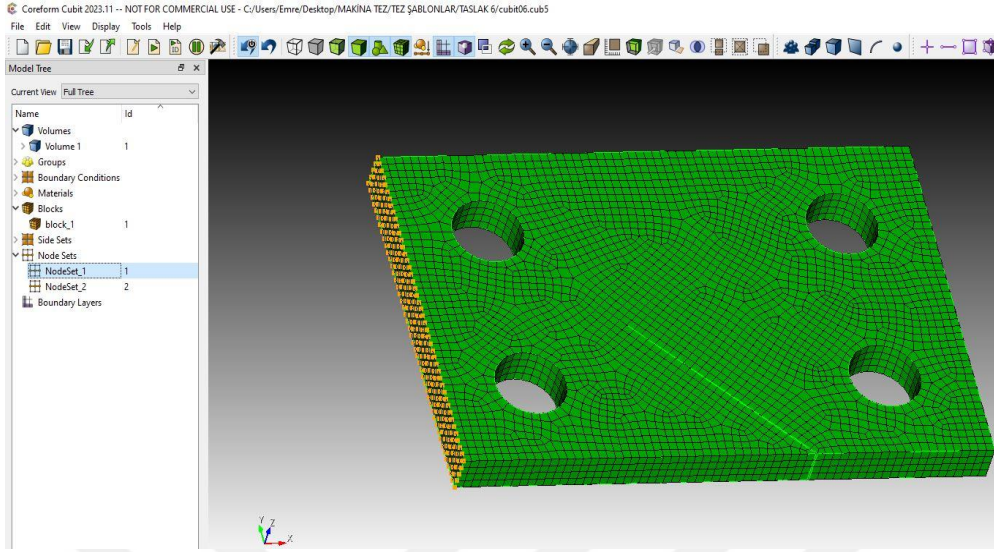
İkinci modelde ilk modeldeki malzeme ile aynı, boyutları 15*10*1 birim ebatlarında olan levhanın içinde yarıçapı 1 birim olan 4 adet delik ve levhanın alt orta kısımlarından orta kısımlarına doğru gelen çaprazlama ilerleyen çatlak gibi görev yapacak yırtık modellenerek üç boyutlu çizimi Autodesk Fusion yazılımı ile çizilmiştir. Çizilen ikinci modelin adına “yırtık3” verilerek, Coreform Cubit yazılımında kullanılabilmesi için “.sat” uzantısında dışa aktarım (export) yapılmıştır. Modelin tasarımı Şekil 5.11’de gösterildiği gibidir.



Şekil 5.11 yırtık3 adlı modelin Autodesk Fusion yazılımında tasarımı

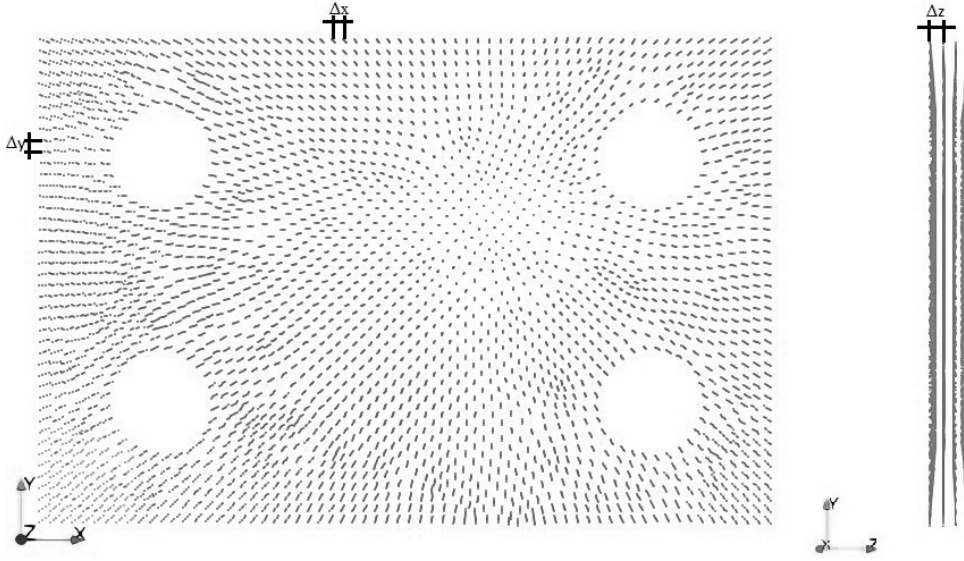
Dışa aktarım (export) yapılan “yırtık3.sat” dosyası Coreform Cubit yazılımında içe aktarım (import) yapılarak yazılan kod sisteminde kullanılabilmesi için ağlara bölme, blok ve nodeset tanımlama işlemleri yapılmıştır. Modellenen dosya kod sisteminde

tanımlanması için Genesis formatında export edilerek “block_6.g” dosyası oluşturulmuştur.



Şekil 5.12 Coreform Cubit yazılımında yirtik3.sat dosyasının modellenmesi

Modeldeki malzeme noktaları incelendiğinde, x ekseninde tek doğrusal eksen üzerinde ortalama 66 adet, y ekseninde 44 adet ve z ekseninde ise 4 adet olduğu tespit edilmiştir. Çatlak ve delik kısımları göz ardı edildiğinde toplam nokta sayısı $66 \times 44 \times 4$ hesabından 11616 adet miktarından daha az olması beklenmesiyle toplam nokta sayısının 10575 adet olduğu tespit edilmiştir. Yaklaşık değerler üzerinden noktalar arası ortalama mesafe x ekseninde doğrultusunda 0,231 cm (15cm/65 adet), y ekseninde doğrultusunda 0,233 cm (10cm/57 adet) ve z ekseninde doğrultusunda 3,333 cm (1cm/3 adet) olduğu hesaplanmıştır. Çekme kuvvetinin uygulandığı eksen doğrultusu x ekseninde doğrultusu olduğu için analizde kullanılan malzeme noktaları arası mesafe (Δx) 0,231 cm seçilmiştir.



Şekil 5.13 İkinci Modelin Malzeme noktalarının analizden önceki görünümü

Analizlerde ufuk yarıçapı (komşuluk yarıçapı-horizon- δ) değeri;

$$\delta = m \cdot \Delta x = 3,015 \cdot 0,231 = 0,6965 \text{ cm} \quad (5.6)$$

seçilmiştir. Hasar analizi için kritik bağ uzama (critical stretch) hasar modeli seçilmiştir. Kritik bağ uzama oranı (critical stretch) değerinin hesaplanması gerekmektedir. Bu değer hem malzeme modelleri hem de her boyut için farklı formülleri vardır. Analizde malzeme modelleri durum bazlı ve 3 boyutlu seçilmiştir. Bu seçimlerle. Kritik bağ uzama oranı (s_c) değeri;

$$s_{C3D} = \sqrt{\frac{100}{\left(3 \cdot 81,154 \cdot 10^9 + (0,75^4) \cdot \left(175,833 \cdot 10^9 - \frac{5 \cdot 81,154 \cdot 10^9}{3}\right)\right) \cdot 0,006965}} = 0,0002367 \quad (5.7)$$

bulunmuştur. SI birim sisteminde bulunan bu değer CGS birim sisteminde de aynı değer olmaktadır.

Kod diziliminde genel itibari ile analiz yapılacak modelin tanımlamak için Şekil 5.12’de görüldüğü gibi block_1 tanımlanması yapılmıştır. Sınır şartları için kuvvetin uygulanacağı noktalar Şekil 5.12’de görüldüğü gibi "NodeSet_1" ve "NodeSet_2" olarak tanımlanmıştır. Kuvvetin uygulanma yönü ise x eksenine doğrultusunda olacağı öngörülmüştür.

İkinci model, birinci model için uygulanan bütün malzeme modelleriyle analize sokulmuş, birinci modelle yakın davranışlar göstermiştir. Bu sebeple kopmanın gerçekleşmediği malzeme modellerinin sonuçları tezde değerlendirilmiştir.

5.2.1 İkinci modelin elastik karşılaştırmalı (correspondence-cp.) malzeme modelinde analizi

İkinci modelin malzeme modeli elastik cp. olacak şekilde Peridigm kullanma kılavuzundan kod formatı alınarak modele uygun şekilde kod dizilimi yapılmıştır. Analizin hasarlı olabilmesi için hasar modeli eklenmiş ve kritik bağ uzama (critical stretch) hasar modeli seçilmiştir. Kod dosyasının ismi “tensile_test_06ect.yaml” olarak kaydedilmiştir. Çıktı dosyasının ismi “yirtik_out6ect.e” olarak kaydedilmiştir. İlgili kod dizilimi aşağıda verilmiştir.

Peridigm:

Verbose: false

Discretization:

Type: "Exodus"

Input Mesh File: "block_6.g" (giriş ağ dosyası)

Materials:

My Material: (malzeme olarak çelik seçilmiştir.)

Material Model: "Elastic Correspondence" (elastik cp. malzeme modeli seçilmiştir.)

Density: 7.8 (yoğunluğu 7,8 g/ cm³ seçilmiştir.)

Bulk Modulus: 175.833e10 (Hacim modülü-dyne/cm²)

Shear Modulus: 81.154e10 (Kayma modülü-dyne/cm²)

Hourglass Coefficient: 0.02

Damage Models: (Hasar modeli)

My Damage Model:

Damage Model: "Critical Stretch" (Kritik bağ uzama hasar modeli seçilmiştir)

Critical Stretch: 0.0002367 (Kritik bağ uzama oranı)

Blocks:

My Block:

Block Names: "block_1" (Coreform Cubit yazılımında oluşturulan modele ait blok ismi)

Material: "My Material"

Damage Model: "My Damage Model"

Horizon: 0.6965

(Ufuk yarıçapı-cm)

Boundary Conditions:

Prescribed Displacement Top:

Type: "Prescribed Displacement"

Node Set: "NodeSet_1" (Coreform Cubit yazılımında oluşturulan modele ait yan cephesinden çekme kuvveti uygulanacak yüzeye ait noktalar setinin ismi)

Coordinate: "x" (uygulanacak kuvvetin yönü)

Value: "-0.5*x*t" (uygulanacak kuvvetin zamana göre fonksiyonu)

Prescribed Displacement Fix Bottom Rigid Body Motion In X:

Type: "Prescribed Displacement"

Node Set: "NodeSet_2" (Coreform Cubit yazılımında oluşturulan modele ait sabit tutulacak diğer yan cephesinde ait noktalar setinin ismi)

Coordinate: "x"

Value: "0.0"

Solver:

(Çözücü)

Verbose: false

Initial Time: 0.0

Final Time: 10.0

QuasiStatic: (Yarı-statik (QuasiStatic) çözücü analizi seçilmiştir)

Number of Load Steps: 40 (Analiz 40 adımlı seçilmiştir)

Absolute Tolerance: 1.0

Maximum Solver Iterations: 100

Compute Class Parameters:

Top Reaction Force:

Compute Class: "Block_Data"

Calculation Type: "Sum"

Block: "block_1"

Variable: "Force"

Output Label: "Top_Reaction_Force"

Bottom Reaction Force:

Compute Class: "Block_Data"

Calculation Type: "Sum"

Block: "block_1"

Variable: "Force"

Output Label: "Bottom_Reaction_Force"

Output: (İstenen Çıktı Parametrelerinin bölümü)

Output File Type: "ExodusII"

Output Filename: "yirtik_out6ect"

Output Frequency: 1

Output Variables:

Displacement: true

Velocity: true

Acceleration: true

Element_Id: true

Proc_Num: true

Force_Density: true

Hourglass_Force_Density: true

Force: true

Volume: true

Damage: true

Top_Reaction_Force: true

Bottom_Reaction_Force: true

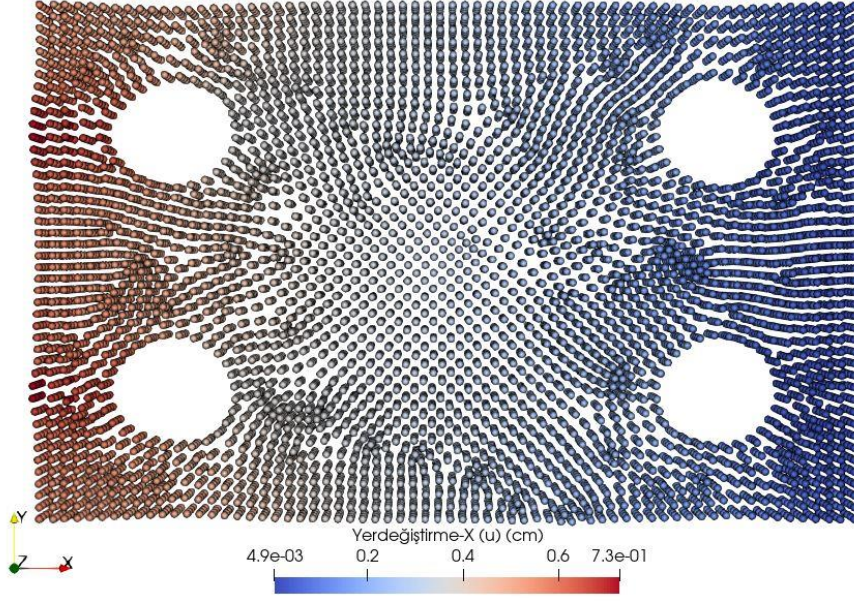
Deformation_Gradient: true

Cauchy_Stress: true

Radius: true

Number_Of_Neighbors: true

Neighborhood_Volume: true



Şekil 5.14 yirtik_out6ect.e çıktısının ParaView yazılımında görüntülenmesi

Şekil 5.14'te görüldüğü gibi yırtılma olmadan malzeme noktalarının yer değiştirdiği gözlemlenmiştir.

5.2.2 İkinci modelin elastik plastik karşılaştırmalı (correspondence-cp.) malzeme modelinde analizi

İkinci modelin malzeme modeli elastik plastik cp. olacak şekilde Peridigm kullanma kılavuzundan kod formatı alınarak modele uygun şekilde kod dizilimi yapılmıştır. Analizin hasarlı olabilmesi için hasar modeli eklenmiş ve kritik bağ uzama (critical stretch) hasar modeli seçilmiştir. Kod dosyasının ismi “tensile_test_06epct.yaml” olarak kaydedilmiştir. Çıktı dosyasının ismi “yirtik_out6epct.e” olarak kaydedilmiştir. İlgili kod dizilimi EK 8’de sunulmuştur.

İlgili kod dizilimindeki malzeme bölümü aşağıdaki gibidir.

Materials:

My Material:

Material Model: "Elastic Plastic Correspondence" (elastik plastik cp. malzeme modeli seçilmiştir.)

Density: 7.8	(yoğunluğu 7,8 g/ cm ³ seçilmiştir.)
Young's Modulus: 211.0e10	(Elastisite modülü -dyne/cm ²)
Poisson's Ratio: 0.3	(Poisson Oranı)
Hourglass Coefficient: 0.02	(Hourglass katsayısı)
Yield Stress: 4.2e9	(Akma dayanımı-dyne/cm ²)

Damage Models: (Hasar modeli)

My Damage Model:

Damage Model: "Critical Stretch" (Kritik bağ uzama hasar modeli seçildi)

Critical Stretch: 0.0002367 (Kritik bağ uzama oranı)

Blocks:

My Block:

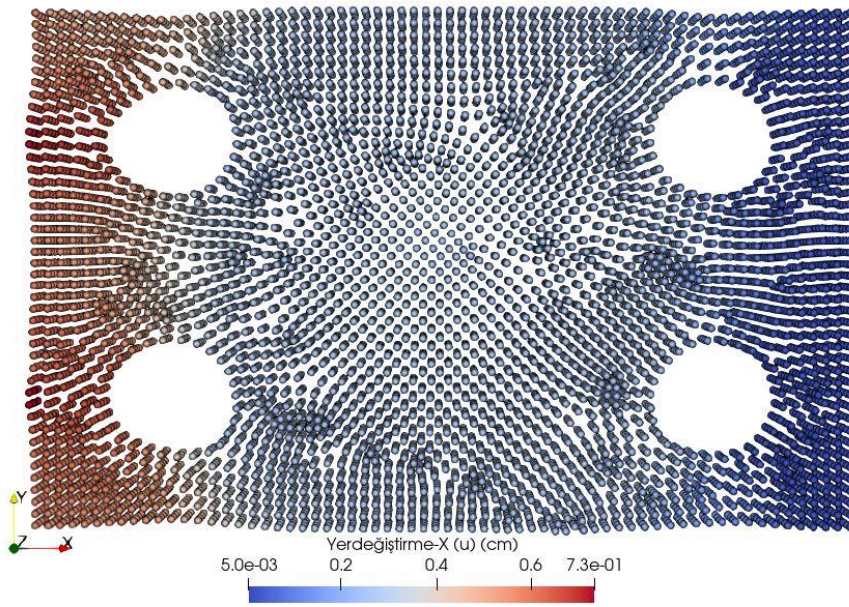
Block Names: "block_1" (Coreform Cubit yazılımında oluşturulan modele ait blok ismi)

Material: "My Material"

Damage Model: "My Damage Model"

Horizon: 0.6965 (Ufuk yarıçapı-cm)

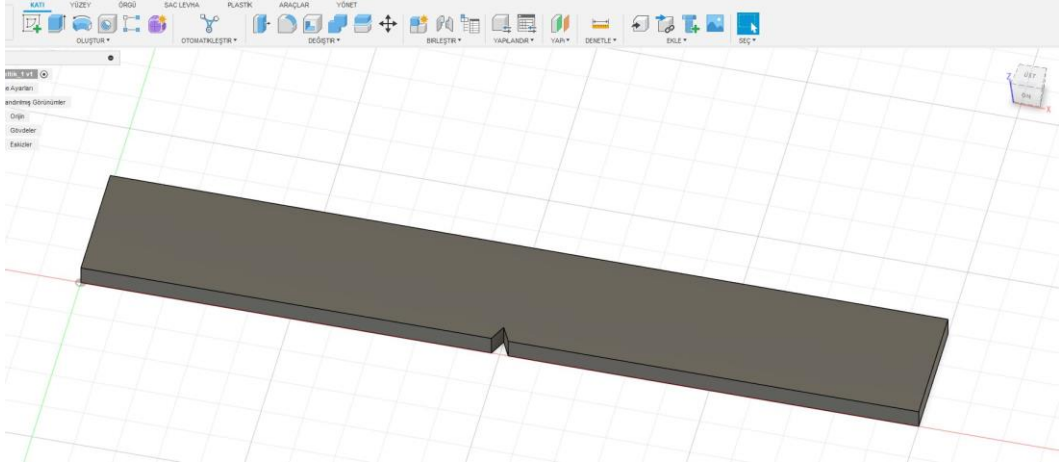
Analiz sonucunda malzemede kopma olmamış ve malzeme noktalarında yer değişimleri Şekil 5.15'teki gibi oluşmuştur.



Şekil 5.15 yirtik_out7Bepct.e çıktısının ParaView yazılımında görüntülenmesi

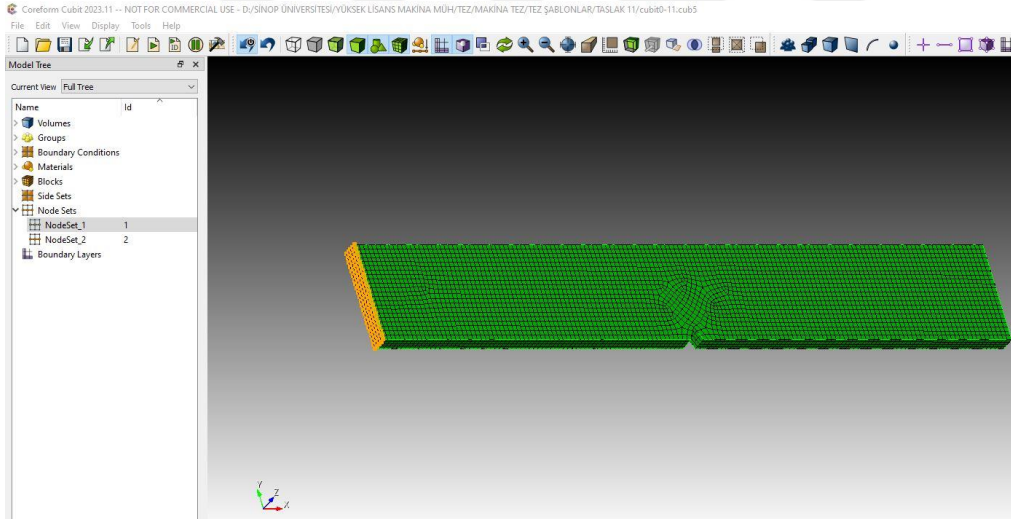
5.3 Üçüncü Modelin Analizi

Üçüncü modelde boyutları 10*1,5*0,25 birim ebatlarında olan levhanın alt orta bölgesine çentik açılıp modellenerek üç boyutlu çizimi Autodesk Fusion yazılımı ile çizilmiştir. Çentiğin konumu alt soldan ve alt sağdan 4,9 cm'şer gelecek şekilde 0,2 cm yüksekliğe sahip olacak biçimde yerleştirilmiştir. Çizilen üçüncü modelin adına "centik_1" verilerek, Coreform Cubit yazılımında kullanılabilmesi için ".sat" uzantısında dışa aktarım (export) yapılmıştır. Modelin tasarımı Şekil 5.16'da gösterildiği gibidir.



Şekil 5.16 centik_1 adlı modelin Autodesk Fusion yazılımında tasarımı

Dışa aktarım (export) yapılan “centik_1.sat” dosyası Coreform Cubit yazılımında işe aktarım (import) yapılarak yazılan kod sisteminde kullanılabilmesi için ağlara bölme, blok ve nodeset tanımlama işlemleri yapılmıştır. Modellenen dosya kod sisteminde tanımlanması için Genesis formatında dışa aktarım (export) yapılarak “block_11.g” dosyası oluşturulmuştur.



Şekil 5.17 Coreform Cubit yazılımda centik_1.sat dosyasının modellenmesi

Modeldeki malzeme noktaları incelendiğinde analizde kullanılan malzeme noktaları arası mesafe (Δx) 0,0714 cm hesaplanmıştır.

$$\delta = m \cdot \Delta x = 3,015 \cdot 0,0714 = 0,2154 \text{ cm} \quad (5.8)$$

seçilmiştir. Hasar analizi için kritik bağ uzama (critical stretch) hasar modeli seçilmiştir. Kritik bağ uzama oranı (critical stretch) değerinin hesaplanması gerekmektedir. Bu değer hem malzeme modelleri hem de her boyut için farklı formülleri vardır. Analizde

malzeme modelleri durum bazlı ve 3 boyutlu seçilmiştir. Bu seçimlerle. Kritik bağ uzama oranı (s_c) değeri;

$$s_{c3D} = \sqrt{\frac{100}{\left(3 \cdot 81,154 \cdot 10^9 + (0,75^4) \cdot \left(175,833 \cdot 10^9 - \frac{5 \cdot 81,154 \cdot 10^9}{3}\right)\right) \cdot 0,002154}} = 0,0004256 \quad (5.7)$$

bulunmuştur. SI birim sisteminde bulunan bu değer CGS birim sisteminde de aynı değer olmaktadır.

Kod diziliminde genel itibari ile analiz yapılacak modelin tanımlamak için Şekil 5.12’de görüldüğü gibi block_1 tanımlanması yapılmıştır. Sınır şartları için kuvvetin uygulanacağı noktalar Şekil 5.17’de görüldüğü gibi "NodeSet_1" ve "NodeSet_2" olarak tanımlanmıştır. Kuvvetin uygulanma yönü ise x eksenini doğrultusunda olacağı öngörülmüştür.

Üçüncü model, birinci model için uygulanan bütün malzeme modelleriyle analize sokulmuş, birinci modelle yakın davranışlar göstermiştir. Bu sebeple kopmanın gerçekleştirmediği malzeme modellerinin sonuçları değerlendirilmiştir.

5.3.1 Üçüncü modelin elastik karşılaştırmalı (correspondence-cp.) malzeme modelinde analizi

Üçüncü modelin malzeme modeli elastik cp. olacak şekilde Peridigm kullanma kılavuzundan kod formatı alınarak modele uygun şekilde kod dizilimi yapılmıştır. Analizin hasarlı olabilmesi için hasar modeli eklenmiş ve critical stretch hasar modeli seçilmiştir. Kod dosyasının ismi “tensile_test_11ec.yaml” olarak kaydedilmiştir. Çıktı dosyasının ismi “yirtik_out11ec.e” olarak kaydedilmiştir. İlgili kod dizilimi aşağıda verilmiştir.

Peridigm:

Verbose: false

Discretization:

Type: "Exodus"

Input Mesh File: "block_11.g" (giriş ağ dosyası)

Materials:

My Material: (malzeme olarak çelik seçilmiştir.)

Material Model: "Elastic Correspondence" (elastik cp. malzeme modeli seçilmiştir.)

Density: 7.8 (yoğunluğu 7,8 g/ cm³ seçilmiştir.)

Bulk Modulus: 175.833e10 (Hacim modülü-dyne/cm²)
Shear Modulus: 81.154e10 (Kayma modülü-dyne/cm²)
Hourglass Coefficient: 0.02

Damage Models: (Hasar modeli)

My Damage Model:

Damage Model: "Critical Stretch" (Kritik bağ uzama hasar modeli seçilmiştir)

Critical Stretch: 0.0004256 (Kritik bağ uzama oranı)

Blocks:

My Block:

Block Names: "block_1" (Coreform Cubit yazılımında oluşturulan modele ait blok ismi)

Material: "My Material"

Damage Model: "My Damage Model"

Horizon: 0.2154 (Ufuk yarıçapı-cm)

Boundary Conditions:

Prescribed Displacement Top:

Type: "Prescribed Displacement"

Node Set: "NodeSet_1" (Coreform Cubit yazılımında oluşturulan modele ait yan cepheden çekme kuvveti uygulanacak yüzeye ait noktalar setinin ismi)

Coordinate: "x" (uygulanacak kuvvetin yönü)

Value: "-0.5*x*t" (uygulanacak kuvvetin zamana göre fonksiyonu)

Prescribed Displacement Fix Bottom Rigid Body Motion In X:

Type: "Prescribed Displacement"

Node Set: "NodeSet_2" (Coreform Cubit yazılımında oluşturulan modele ait sabit tutulacak diğer yan cephesinde ait noktalar setinin ismi)

Coordinate: "x"

Value: "0.0"

Solver: (Çözücü)

Verbose: false

Initial Time: 0.0

Final Time: 10.0

QuasiStatic: (Yarı-statik (QuasiStatic) çözücü analizi seçilmiştir)

Number of Load Steps: 40 (Analiz 40 adımlı seçilmiştir)

Absolute Tolerance: 1.0

Maximum Solver Iterations: 100

Compute Class Parameters:

Top Reaction Force:

Compute Class: "Block_Data"

Calculation Type: "Sum"

Block: "block_1"

Variable: "Force"

Output Label: "Top_Reaction_Force"

Bottom Reaction Force:

Compute Class: "Block_Data"

Calculation Type: "Sum"

Block: "block_1"

Variable: "Force"

Output Label: "Bottom_Reaction_Force"

Output:

(İstenen Çıktı Parametrelerinin bölümü)

Output File Type: "ExodusII"

Output Filename: "yirtik_out11ec"

Output Frequency: 1

Output Variables:

Displacement: true

Velocity: true

Acceleration: true

Element_Id: true

Proc_Num: true

Force_Density: true

Hourglass_Force_Density: true

Force: true

Volume: true

Damage: true

Top_Reaction_Force: true

Bottom_Reaction_Force: true

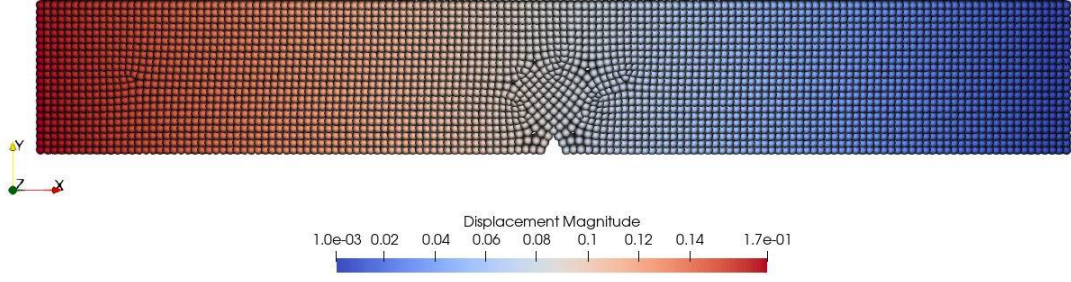
Deformation_Gradient: true

Cauchy_Stress: true

Radius: true

Number_Of_Neighbors: true

Neighborhood_Volume: true



Şekil 5.18 yirtik_out11ec.e çıktısının ParaView yazılımında görüntülenmesi

Şekil 5.18’te görüldüğü gibi yırtılma olmadan malzeme noktalarının yer değiştirdiği gözlemlenmiştir.

5.3.2 Üçüncü modelin elastik plastik karşılaştırmalı (correspondence-cp.) malzeme modelinde analizi

Üçüncü modelin malzeme modeli elastik plastik cp. olacak şekilde Peridigm kullanma kılavuzundan kod formatı alınarak modele uygun şekilde kod dizilimi yapılmıştır. Analizin hasarlı olabilmesi için hasar modeli eklenmiş ve kritik bağ uzama (critical stretch) hasar modeli seçilmiştir. Kod dosyasının ismi “tensile_test_11epc.yaml” olarak kaydedilmiştir. Çıktı dosyasının ismi “yirtik_out11epc.e” olarak kaydedilmiştir. İlgili kod dizilimi EK 9’da sunulmuştur.

İlgili kod dizilimindeki malzeme bölümü aşağıdaki gibidir.

Materials:

My Material:

Material Model: "Elastic Plastic Correspondence" (elastik plastik cp. malzeme modeli seçilmiştir.)

Density: 7.8 (yoğunluğu 7,8 g/ cm³ seçilmiştir.)

Young's Modulus: 211.0e10 (Elastisite modülü -dyne/cm²)

Poisson's Ratio: 0.3 (Poisson Oranı)

Hourglass Coefficient: 0.02 (Hourglass katsayısı)

Yield Stress: 4.2e9 (Akma dayanımı-dyne/cm²)

Damage Models: (Hasar modeli)

My Damage Model:

Damage Model: "Critical Stretch" (Kritik bağ uzama hasar modeli seçildi)

Critical Stretch: 0.0004256 (Kritik bağ uzama oranı)

Blocks:

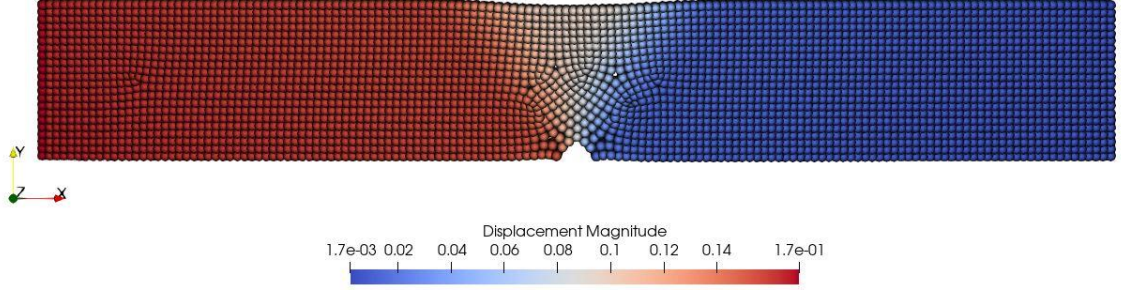
My Block:

Block Names: "block_1" (Coreform Cubit yazılımında oluşturulan modele ait blok ismi)

Material: "My Material"

Damage Model: "My Damage Model"

Horizon: 0.2154 (Ufuk yarıçapı-cm)

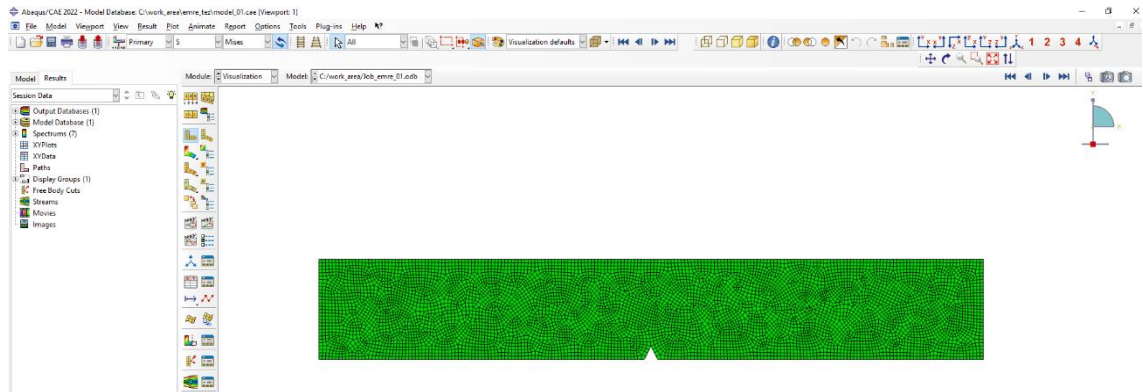


Şekil 5.19 yirtik_out11epc.e çıktısının ParaView yazılımında görüntülenmesi

Analiz sonucunda malzemede kopma olmamış ve malzeme noktalarında yer değişimleri Şekil 5.19'daki gibi oluşmuştur.

5.3.3 Üçüncü modelin sonlu elemanlar yöntemiyle tasarımı ve analizi

Peridinamik yöntemle sonlu elemanlar hesap yöntemlerinin sonuçlarının karşılaştırılması için üçüncü model seçilmiştir. Model Abaqus programında tekrar tasarlanmış ve Şekil 20'deki gibi hesap ağı (mesh) oluşturulmuştur.



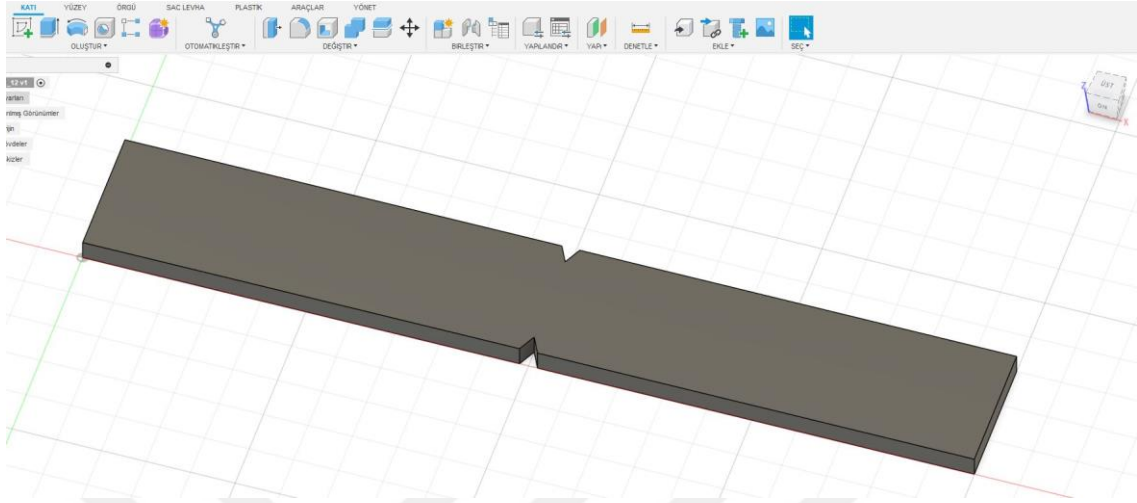
Şekil 5.20 Üçüncü modelin Abaqus programında tasarlanması

Malzeme özellikleri aynı şekilde girilip analizi yapılmıştır.

5.4 Dördüncü Modelin Analizi

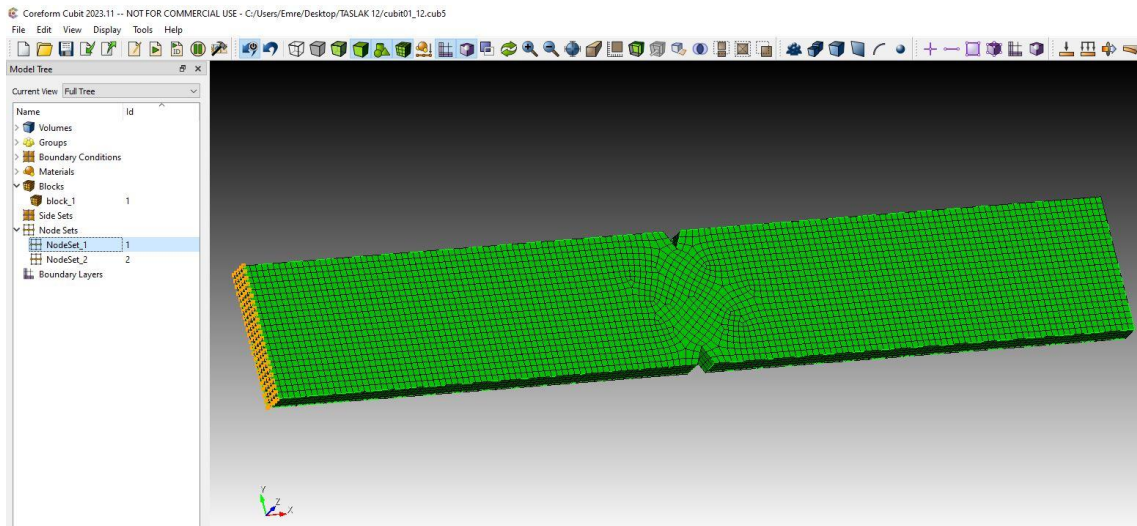
Dördüncü modelin boyutları üçüncü modelle aynı olup tek farkı model üzerindeki çentiklerin iki tane olmasıdır. Eklenen ikinci çentik ise modelin üst tarafında ilk çentik

karşısına ve aynı boyutlarda tasarlanmıştır. Çizilen dördüncü modelin adına “centik_2” verilerek, Coreform Cubit yazılımında kullanılabilmesi için “.sat “ uzantısında dışa aktarım (export) yapılmıştır. Modelin tasarımı Şekil 5.21’de gösterildiği gibidir.



Şekil 5.21 centik_2 adlı modelin Autodesk Fusion yazılımında tasarımı

Dışa aktarım (export) yapılan “centik_2.sat“ dosyası Coreform Cubit yazılımında içe aktarım (import) yapılarak yazılan kod sisteminde kullanılabilmesi için ağlara bölme, blok ve nodeset tanımlama işlemleri yapılmıştır. Modellenen dosya kod sisteminde tanımlanması için Genesis formatında dışa aktarım (export) yapılarak “block_12.g” dosyası oluşturulmuştur.



Şekil 5.22 Coreform Cubit yazılımda centik_2.sat dosyasının modellenmesi

Modeldeki tek fark çentik sayısı olduğu için ufuk yarıçapı (δ) ve kritik bağ uzama oranı (s_c) değeri aynıdır. Bu değerler sırasıyla 0,2154 cm ve 0,0004256 değerleridir.

Kod diziliminde genel itibari ile analiz yapılacak modelin tanımlamak için Şekil 5.22’de görüldüğü gibi block_1 tanımlanması yapılmıştır. Sınır şartları için kuvvetin uygulanacağı noktalar Şekil 5.22’de görüldüğü gibi "NodeSet_1" ve "NodeSet_2" olarak tanımlanmıştır. Kuvvetin uygulanma yönü ise x eksenini doğrultusunda olacağı öngörülmüştür.

Dördüncü model, birinci model için uygulanan bütün malzeme modelleriyle analize sokulmuş, birinci modelle yakın davranışlar göstermiştir. Bu sebeple kopmanın gerçekleşmediği malzeme modellerinin sonuçları değerlendirilmiştir.

5.4.1 Dördüncü modelin elastik karşılaştırmalı (correspondence-cp.) malzeme modelinde analizi

Dördüncü modelin malzeme modeli elastik cp. olacak şekilde Peridigm kullanma kılavuzundan kod formatı alınarak modele uygun şekilde kod dizilimi yapılmıştır. Analizin hasarlı olabilmesi için hasar modeli eklenmiş ve critical stretch hasar modeli seçilmiştir. Kod dosyasının ismi “tensile_test_12ec.yaml” olarak kaydedilmiştir. Çıktı dosyasının ismi “yirtik_out12ec.e” olarak kaydedilmiştir. İlgili kod dizilimi EK 10’da sunulmuştur.

İlgili kod dizilimindeki malzeme bölümü aşağıdaki gibidir.

Materials:

My Material:	(malzeme olarak çelik seçilmiştir.)
Material Model: "Elastic Correspondence"	(elastik cp. malzeme modeli seçilmiştir.)
Density: 7.8	(yoğunluğu 7,8 g/ cm ³ seçilmiştir.)
Bulk Modulus: 175.833e10	(Hacim modülü-dyne/cm ²)
Shear Modulus: 81.154e10	(Kayma modülü-dyne/cm ²)
Hourglass Coefficient: 0.02	

Damage Models: (Hasar modeli)

My Damage Model:

Damage Model: "Critical Stretch"	(Kritik bağ uzama hasar modeli seçilmiştir)
Critical Stretch: 0.0004256	(Kritik bağ uzama oranı)

Blocks:

My Block:

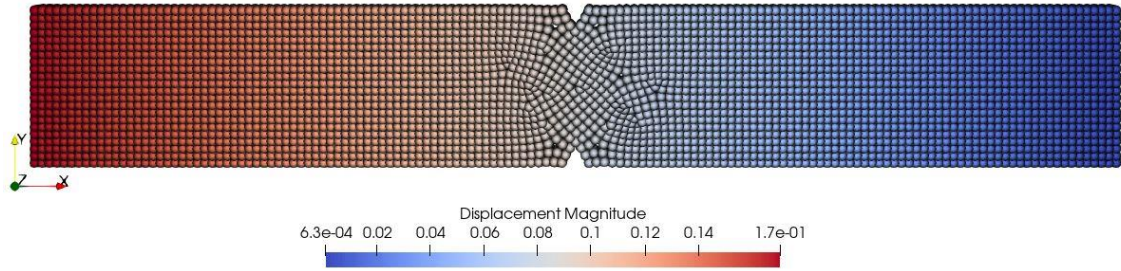
Block Names: "block_1" (Coreform Cubit yazılımında oluşturulan modele ait blok ismi)

Material: "My Material"

Damage Model: "My Damage Model"

Horizon: 0.2154

(Ufuk yarıçapı-cm)



Şekil 5.23 yirtik_out12ec.e çıktısının ParaView yazılımında görüntülenmesi

Şekil 5.23'te görüldüğü gibi yırtılma olmadan malzeme noktalarının yer değiştirdiği gözlemlenmiştir.

5.4.2 Dördüncü modelin elastik plastik karşılaştırmalı (correspondence-cp.) malzeme modelinde analizi

Dördüncü modelin malzeme modeli elastik plastik cp. olacak şekilde Peridigm kullanma kılavuzundan kod formatı alınarak modele uygun şekilde kod dizilimi yapılmıştır. Analizin hasarlı olabilmesi için hasar modeli eklenmiş ve kritik bağ uzama (critical stretch) hasar modeli seçilmiştir. Kod dosyasının ismi "tensile_test_12epc.yaml" olarak kaydedilmiştir. Çıktı dosyasının ismi "yirtik_out12epc.e" olarak kaydedilmiştir. İlgili kod dizilimi EK 11'de sunulmuştur.

İlgili kod dizilimindeki malzeme bölümü aşağıdaki gibidir.

Materials:

My Material:

Material Model: "Elastic Plastic Correspondence" (elastik plastik cp. malzeme modeli seçilmiştir.)

Density: 7.8 (yoğunluğu 7,8 g/ cm³ seçilmiştir.)

Young's Modulus: 211.0e10 (Elastisite modülü -dyne/cm²)

Poisson's Ratio: 0.3 (Poisson Oranı)

Hourglass Coefficient: 0.02 (Hourglass katsayısı)

Yield Stress: 4.2e9 (Akma dayanımı-dyne/cm²)

Damage Models: (Hasar modeli)

My Damage Model:

Damage Model: "Critical Stretch" (Kritik bağ uzama hasar modeli seçildi)

Critical Stretch: 0.0004256 (Kritik bağ uzama oranı)

Blocks:

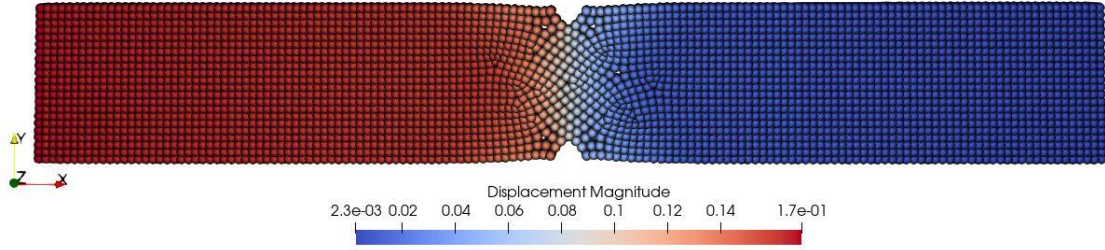
My Block:

Block Names: "block_1" (Coreform Cubit yazılımında oluşturulan modele ait blok ismi)

Material: "My Material"

Damage Model: "My Damage Model"

Horizon: 0.2154 (Ufuk yarıçapı-cm)

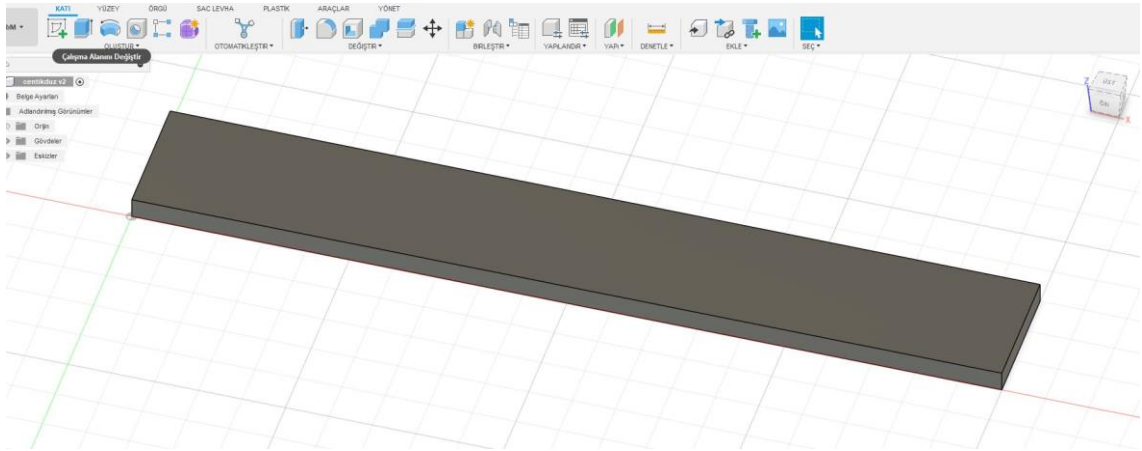


Şekil 5.24 yirtik_out12epc.e çıktısının ParaView yazılımında görüntülenmesi

Analiz sonucunda malzemede kopma olmamış ve malzeme noktalarında yer değişimleri Şekil 5.24'teki gibi oluşmuştur.

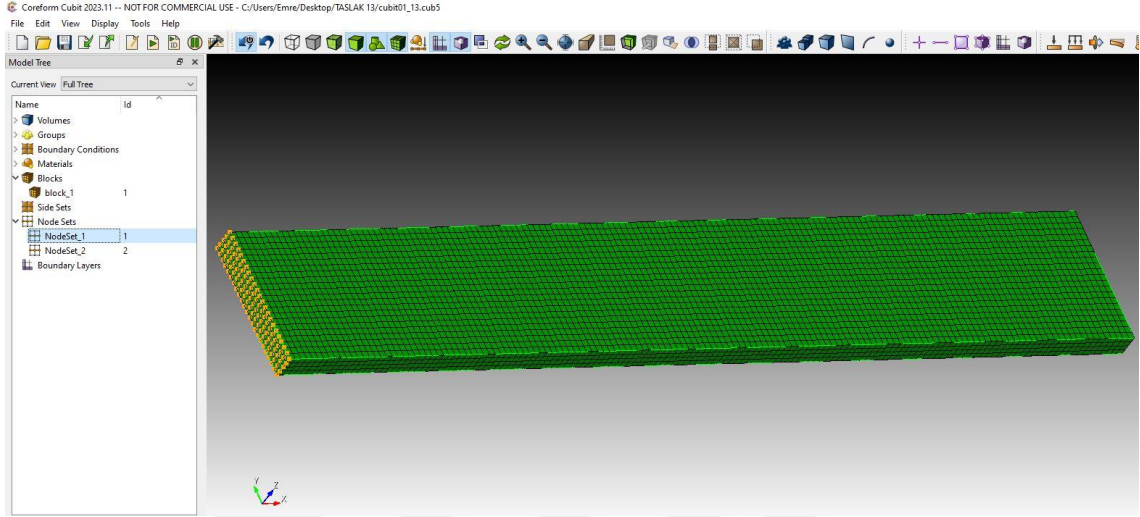
5.5 Beşinci Modelin Analizi

Beşinci modelin boyutları üçüncü ve dördüncü modellerle aynı olup, farkı önceki modellerde bulunan çentikler kaldırılarak düz levha olarak tasarlanmıştır. Çizilen üçüncü modelin adına "centikduz" verilerek, Coreform Cubit yazılımında kullanılabilmesi için ".sat" uzantısında dışa aktarım (export) yapılmıştır. Modelin tasarımı Şekil 5.25'te gösterildiği gibidir.



Şekil 5.25 centikduz adlı modelin Autodesk Fusion yazılımında tasarımı

Dışa aktarım (export) yapılan “centikduz.sat” dosyası Coreform Cubit yazılımında içe aktarım (import) yapılarak yazılan kod sisteminde kullanılabilmesi için ağlara bölme, blok ve nodeset tanımlama işlemleri yapılmıştır. Modellenen dosya kod sisteminde tanımlanması için Genesis formatında dışa katarım (export) yapılarak “block_13.g” dosyası oluşturulmuştur.



Şekil 5.26 Coreform Cubit yazılımda centikduz.sat dosyasının modellenmesi

Modeldeki fark önceki modellerde bulunan çentiklerin olmamasından ufuk yarıçapı (δ) ve kritik bağ uzama oranı (s_c) değeri aynıdır. Bu değerler sırasıyla 0,2154 cm ve 0,0004256 değerleridir.

Kod diziliminde genel itibari ile analiz yapılacak modelin tanımlamak için Şekil 5.26’da görüldüğü gibi block_1 tanımlanması yapılmıştır. Sınır şartları için kuvvetin uygulanacağı noktalar Şekil 5.26’da görüldüğü gibi "NodeSet_1" ve "NodeSet_2" olarak tanımlanmıştır. Kuvvetin uygulanma yönü ise x eksenine doğrultusunda olacağı öngörülmüştür.

Beşinci model, birinci model için uygulanan bütün malzeme modelleriyle analize sokulmuş, birinci modelle yakın davranışlar göstermiştir. Bu sebeple kopmanın gerçekleştirmediği malzeme modellerinin sonuçları değerlendirilmiştir.

5.5.1 Beşinci modelin elastik karşılaştırmalı (correspondence-cp.) malzeme modelinde analizi

Beşinci modelin malzeme modeli elastik cp. olacak şekilde Peridigm kullanma kılavuzundan kod formatı alınarak modele uygun şekilde kod dizilimi yapılmıştır.

Analizin hasarlı olabilmesi için hasar modeli eklenmiş ve kritik bağ uzama (critical stretch) hasar modeli seçilmiştir. Kod dosyasının ismi “tensile_test_13ec.yaml” olarak kaydedilmiştir. Çıktı dosyasının ismi “yirtik_out13ec.e” olarak kaydedilmiştir. İlgili kod dizilimi EK 12’de sunulmuştur.

İlgili kod dizilimindeki malzeme bölümü aşağıdaki gibidir.

Materials:

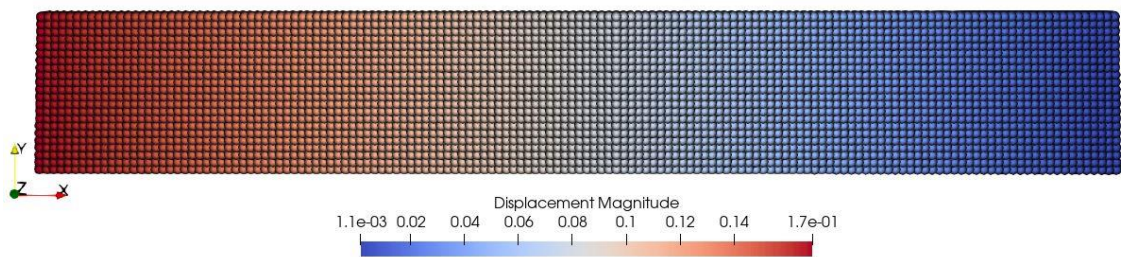
My Material: (malzeme olarak çelik seçilmiştir.)
Material Model: "Elastic Correspondence" (elastik cp. malzeme modeli seçilmiştir.)
Density: 7.8 (yoğunluğu 7,8 g/ cm³ seçilmiştir.)
Bulk Modulus: 175.833e10 (Hacim modülü-dyne/cm²)
Shear Modulus: 81.154e10 (Kayma modülü-dyne/cm²)
Hourglass Coefficient: 0.02

Damage Models: (Hasar modeli)

My Damage Model:
Damage Model: "Critical Stretch" (Kritik bağ uzama hasar modeli seçilmiştir)
Critical Stretch: 0.0004256 (Kritik bağ uzama oranı)

Blocks:

My Block:
Block Names: "block_1" (Coreform Cubit yazılımında oluşturulan modele ait blok ismi)
Material: "My Material"
Damage Model: "My Damage Model"
Horizon: 0.2154 (Ufuk yarıçapı-cm)



Şekil 5.27 yirtik_out13ec.e çıktısının ParaView yazılımında görüntülenmesi

Şekil 5.27’de görüldüğü gibi yırtılma olmadan malzeme noktalarının yer değiştirdiği gözlemlenmiştir.

5.5.2 Beşinci modelin elastik plastik karşılaştırmalı (correspondence-cp.) malzeme modelinde analizi

Beşinci modelin malzeme modeli elastik plastik cp. olacak şekilde Peridigm kullanma kılavuzundan kod formatı alınarak modele uygun şekilde kod dizilimi yapılmıştır. Analizin hasarlı olabilmesi için hasar modeli eklenmiş ve kritik bağ uzama (critical stretch) hasar modeli seçilmiştir. Kod dosyasının ismi “tensile_test_13epc.yaml” olarak kaydedilmiştir. Çıktı dosyasının ismi “yirtik_out13epc.e” olarak kaydedilmiştir. İlgili kod dizilimi EK 13’te sunulmuştur.

İlgili kod dizilimindeki malzeme bölümü aşağıdaki gibidir.

Materials:

My Material:

Material Model: "Elastic Plastic Correspondence" (elastic plastic cp. malzeme modeli seçilmiştir.)

Density: 7.8 (yoğunluğu 7,8 g/ cm³ seçilmiştir.)

Young's Modulus: 211.0e10 (Elastisite modülü -dyne/cm²)

Poisson's Ratio: 0.3 (Poisson Oranı)

Hourglass Coefficient: 0.02 (Hourglass katsayısı)

Yield Stress: 4.2e9 (Akma dayanımı-dyne/cm²)

Damage Models: (Hasar modeli)

My Damage Model:

Damage Model: "Critical Stretch" (Kritik bağ uzama hasar modeli seçildi)

Critical Stretch: 0.0004256 (Kritik bağ uzama oranı)

Blocks:

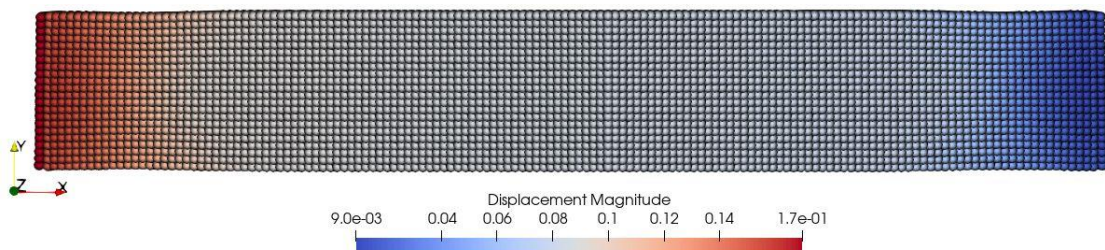
My Block:

Block Names: "block_1" (Coreform Cubit yazılımında oluşturulan modele ait blok ismi)

Material: "My Material"

Damage Model: "My Damage Model"

Horizon: 0.2154 (Ufuk yarıçapı-cm)



Şekil 5.28 yirtik_out13epc.e çıktısının ParaView yazılımında görüntülenmesi

Analiz sonucunda malzemede kopma olmamış ve malzeme noktalarında yer değişimleri Şekil 5.28'deki gibi oluşmuştur.

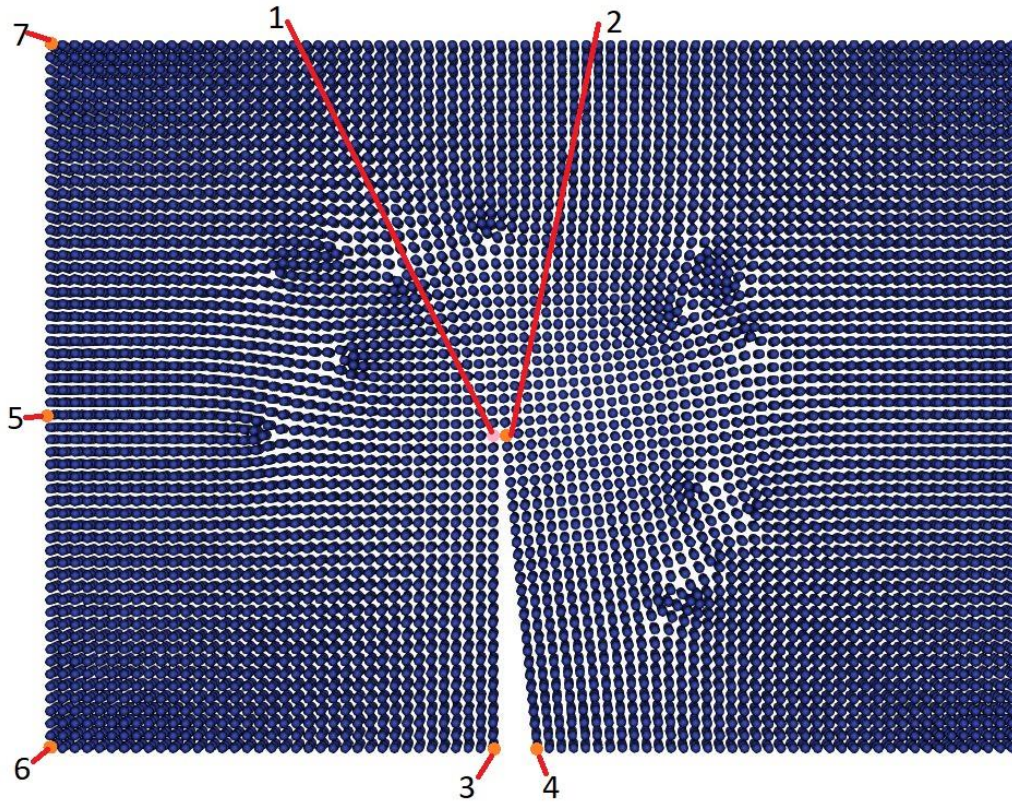


6. BULGULAR VE TARTIŞMA

Birinci ve ikinci modeller üzerinde belirlenen noktalardaki değişimler incelenmiş ve yorumlanmıştır.

6.1 Birinci Modelin Analiz Sonuçları ve Yorumlanması

Birinci Modelin analizinden elde edilen sonuçların yorumlanması için model üzerinden malzeme noktaları belirlenmiştir. Belirlenen malzeme noktaları Şekil 6.1'deki gibidir.



Şekil 6.1 Birinci model üzerinde belirlenen malzeme noktaları

1 numaralı malzeme noktası çatlak ucunun hemen alt solunda bulunan malzeme noktasıdır. 2 numaralı malzeme noktası çatlak ucunun hemen alt sağında bulunan malzeme noktasıdır. 3 numaralı malzeme noktası çatlakın sol kısmının model kenarında bittiği malzeme noktasıdır. 4 numaralı malzeme noktası çatlakın sağ kısmının model kenarında bittiği malzeme noktasıdır. 5 numaralı malzeme noktası modelin sol kısa kenarının orta noktasının malzeme noktasıdır. 6 numaralı malzeme noktası modelin sol

alt köşesinin malzeme noktasıdır. 7 numaralı malzeme noktası modelin sol alt köşesinin malzeme noktasıdır. Başlangıçta 3 ve 4 numaralı noktalar arası 5 mm’dir.

6.1.1 Birinci modelin elastik malzeme modelinde analiz sonuçları

Seçilen noktaların analizin son adımındaki yer değiştirme, kuvvet ve kuvvet yoğunluk değerleri Tablo 6.1’de gösterildiği gibidir.

Tablo 6.1 Birinci model elastik malzeme modelinde seçilen noktaların son adımdaki değerleri

Birinci Model Elastik Malzeme Modelinde Seçilen Noktaların Son Adımdaki Değerleri							
Nok. Adı	Kimliği	Yer değ.- X (cm)	Yer değ.- Y (cm)	Yer değ.- Z (cm)	Yer değ. Değ. (cm)	Kuvvet (dyne)	Kuvvet Yoğunluğu
1	13794	0	0	0	0	0	0
2	13797	0	0	0	0	0	0
3	13769	0	0	0	0	0	0
4	13823	0	0	0	0	0	0
5	13532	-0,472138	5,16E-07	-6,58E-16	0,473138	3,91E-05	0,00652396
6	13614	-0,473014	6,63E-07	-1,34E-10	0,473084	0,0064159	1,0729
7	13729	-0,468874	-4,11E-06	-1,78E-09	0,468874	0,425164	71,7711

Malzemenin elastik davranış gösterdiğinde, kuvvetin uygulandığı kısım şerit halinde kopmanın meydana gelmesi sebebiyle 1, 2, 3 ve 4 numaralı noktalarda herhangi bir değişim gözlenmemektedir.

6.1.2 Birinci modelin elastik karşılaştırmalı (correspondence-cp.) malzeme modelinde analiz sonuçları

Seçilen noktaların analizin son adımındaki yer değiştirme, kuvvet ve kuvvet yoğunluk değerleri Tablo 6.2’de gösterildiği gibidir. Elastik malzeme modelindeki gibi yırtılma olmadan malzeme noktalarının yer değiştirdiği gözlemlenmiştir.

Tablo 6.2 Birinci model elastik cp. malzeme modelinde seçilen noktaların son adımdaki değerleri

Birinci Model Elastik Cp. Malzeme Modelinde Seçilen Noktaların Son Adımdaki Değerleri							
Nok. Adı	Kimliği	Yer değ.- X (cm)	Yer değ.- Y (cm)	Yer değ.- Z (cm)	Yer değ. Değ. (cm)	Kuvvet (dyne)	Kuvvet Yoğunluğu
1	13794	-0,25423	-0,01815	-0,00226	0,254886	0,0001577	0,0257181
2	13797	-0,2477	-0,01852	-0,00221	0,248397	0,0096623	5,64E-05
3	13769	-0,40065	-0,01592	-1,1E-05	0,400961	0,0001618	0,026695
4	13823	-0,08806	-0,01132	-3,6E-05	0,0887835	0,0008847	0,151296
5	13532	-0,47414	0,018288	-0,00237	0,474496	1,62E+09	2,71E+11
6	13614	-0,47301	0,05729	-0,002	0,476475	8,70E+08	1,45E+11
7	13729	-0,46887	-0,03796	-0,00336	0,47042	1,46E+09	2,47E+11

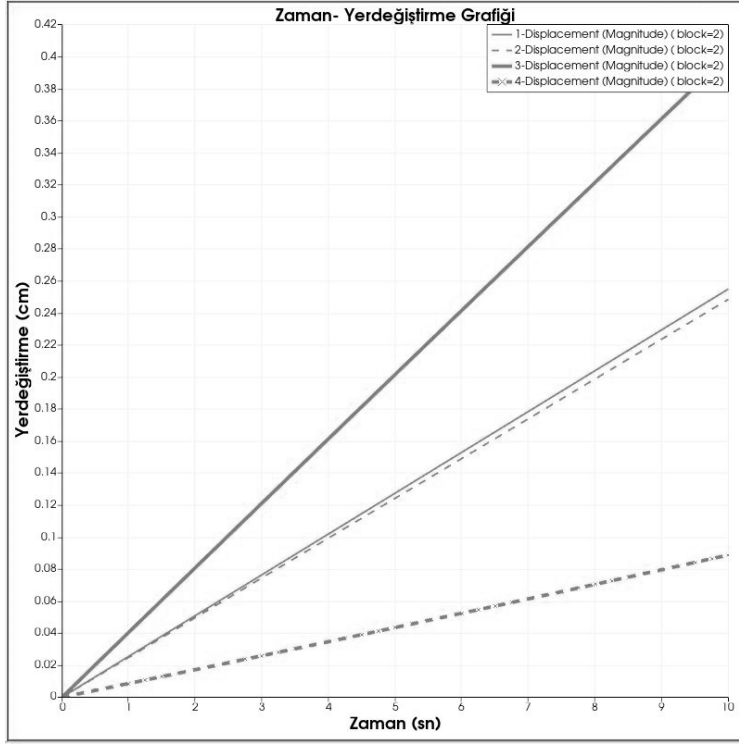
Çatlağın ilerlemesi 1, 2, 3 ve 4 numaralı malzeme noktalarının sonuçlarından yorumlanabilmektedir. 1 ve 2 numaralı malzeme noktalarında x, y ve z eksenlerinde yer değişme gerçekleşmiştir. y ve z eksenindeki değişim ihmal edilebilecek kadar küçüktür. x, y ve z eksenlerindeki bileşke yer değiştirme “yer değişme değeri” sütununda gösterilmiştir. Görüldüğü üzere x eksenindeki yer değiştirme miktarına yakın değerdir. Çatlak hakkında yorum yapılırken sadece x eksenindeki değişim miktarından yorum yapılabilir. 1 ve 2 numaralı malzeme noktalarının yer değiştirme farkları;

$$= -0,2477 - (-0,25423) = 0,006534 \text{ cm'dir.}$$

Bu değer, çatlak ucundaki açılma miktarını göstermektedir. 3 ve 4 numaralı malzeme noktalarının yer değiştirme farkları;

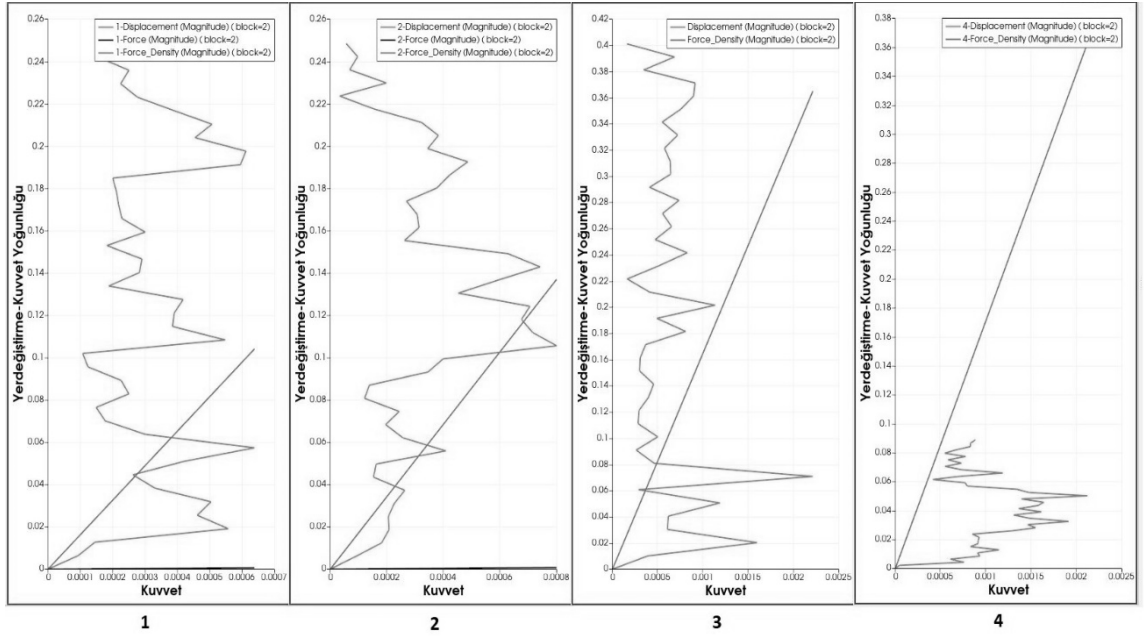
$$= -0,08806 - (-0,40065) = 0,312586 \text{ cm'dir.}$$

Bu bulunan değer ise çatlağın kenar bitindeki açıklığın ne kadar daha açıldığını göstermektedir. Başlangıçta 0,5 cm olan açıklık çekme işleminden sonra 0,812586 cm genişliğine ulaştığı anlamına gelmektedir.



Şekil 6.2 Çatlağa ait seçilmiş malzeme noktalarının Zaman- Yer değiştirme grafiği

Şekil 6.2’te görüldüğü gibi zamanla yer değişimleri artış göstermektedir. 1 ve 2 numaralı ve 3 ve 4 numaralı malzeme noktaları çiftlerinin aralarındaki farkın zamanla artış gösterdiği görülmektedir.



Şekil 6.3 Çatlağa ait seçilmiş malzeme noktalarının Kuvvet- Yer değiştirme-Kuvvet Yoğunluğu grafiği

Şekil 6.3'te çatlağa ait seçilmiş malzeme noktalarının Kuvvet- Yer değiştirme-Kuvvet Yoğunluğu grafiği gösterilmektedir. Kuvvet arttıkça yer değiştirme doğrusal olarak artması beklenirken zikzaklar yaparak artmaktadır. Bu da malzemenin kuvvete karşı direncini göstermektedir.

Kuvvetin uygulandığı sol cephenin alt, üst köşe ve orta malzeme noktaları olan 5, 6 ve 7 numaralı malzeme noktaları değerlendirildiğinde farklı yer değiştirmelerin meydana geldiği görülmektedir. Değerler üst köşeden alt köşeye doğru artmaktadır. Alt köşe ile üst köşe arasındaki yer değiştirme farkı 0.00414 cm olduğu görülmektedir. Bu durumun çatlağın varlığından kaynaklandığı düşünülmektedir. Çünkü çatlak, modelin alt yarı bölgesinde bulunmaktadır.

6.1.3 Birinci modelin elastik plastik malzeme modelinde analiz sonuçları

Seçilen noktaların analizin son adımındaki yer değiştirme, kuvvet ve kuvvet yoğunluk değerleri Tablo 6.3'te gösterildiği gibidir.

Tablo 6.3 Birinci model elastik plastik malzeme modelinde seçilen noktaların son adımdaki değerleri

Birinci Model Elastik Plastik Malzeme Modelinde Seçilen Noktaların Son Adımdaki Değerleri							
Nok. Adı	Kimliği	Yer değ.- X (cm)	Yer değ.- Y (cm)	Yer değ.- Z (cm)	Yer değ. Değ. (cm)	Kuvvet (dyne)	Kuvvet Yoğunluğu
1	13794	0	0	0	0	0	0
2	13797	0	0	0	0	0	0
3	13769	0	0	0	0	0	0
4	13823	0	0	0	0	0	0
5	13532	-0,47214	5,16E-07	-6,34E-16	0,472538	5,87E-05	9,79E-03
6	13614	-0,47301	6,63E-07	-1,34E-10	0,473014	0,006416	1,0729
7	13729	-0,46887	-4,11E-06	-1,78E-09	0,468874	0,425164	71,7712

Malzemenin elastik davranış gösterdiğinde, kuvvetin uygulandığı kısım şerit halinde kopmanın meydana gelmesi sebebiyle 1, 2, 3 ve 4 numaralı noktalarda herhangi bir değişim gözlenmemektedir.

6.1.4 Birinci modelin elastik plastik karşılaştırmalı (correspondence-cp.) malzeme modelinde analiz sonuçları

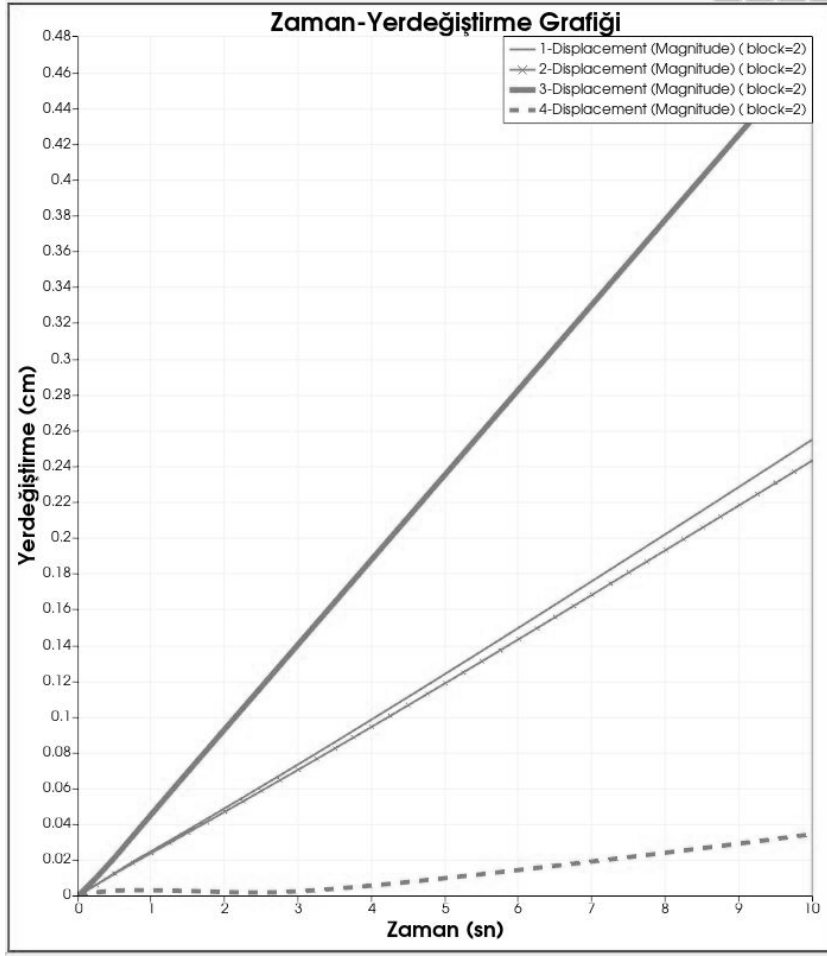
Seçilen noktaların analizin son adımındaki yer değiştirme, kuvvet ve kuvvet yoğunluk değerleri Tablo 6.4'te gösterildiği gibidir. Elastik malzeme modelindeki gibi yırtılma olmadan malzeme noktalarının yer değiştirdiği gözlemlenmiştir.

Tablo 6.4 Birinci model elastik plastik cp. malzeme modelinde seçilen noktaların son adımdaki değerleri

Birinci Model Elastik Plastik Cp. Malzeme Modelinde Seçilen Noktaların Son Adımdaki Değerleri							
Adı	Kimliği	Yer değ.-X (cm)	Yer değ.-Y (cm)	Yer değ.-Z (cm)	Yer değ. Değ. (cm)	Kuvvet (dyne)	Kuvvet Yoğunluğu
1	13794	-0,236475	-0,0950117	-0,00758346	0,254961	4,81E-05	0,00784427
2	13797	-0,222182	-0,0987217	-0,00722159	0,243234	6,37E-05	0,0109026
3	13769	-0,46881	0,0612455	6,73E-05	0,472794	1,25E-04	2,07E-02
4	13823	-0,0053602	0,0340843	7,15E-05	0,0345033	1,29E-02	7,54E-05
5	13532	-0,472138	6,42E-02	-3,05E-04	0,476467	1,05E+08	1,75E+10
6	13614	-0,473014	6,65E-02	-8,30E-05	0,477665	6,68E+09	3,99E+07
7	13729	-0,468874	4,03E-02	-7,07E-03	0,470656	8,51E+07	1,44E+10

1 ve 2 numaralı malzeme noktalarının yer değiştirme farkları 0,014293 cm'dir. Bu değer, çatlak ucundaki açılma miktarını göstermektedir. 3 ve 4 numaralı malzeme noktalarının yer değiştirme farkları ise 0,46345 cm'dir. Bu bulunan değer ise çatlağın kenar bitindeki açıklığın ne kadar daha açıldığını göstermektedir. Başlangıçta 0,5 cm olan açıklık çekme işleminden sonra 0,96345 cm genişliğine ulaştığı anlamına gelmektedir.

Şekil 6.4'te görüldüğü gibi zamanla yer değişimleri artış göstermektedir. 1 ve 2 numaralı ve 3 ve 4 numaralı malzeme noktaları çiftlerinin aralarındaki farkın zamanla artış gösterdiği görülmektedir. Garip artış gösteren malzeme noktası ise 4 numaralı malzeme noktasıdır. Bahsi geçen nokta belli bir zaman aralığında geri dönüş yapıp tekrar artış göstermektedir. Bunun sebebinin ise enerji boşalması yaparak çatlak ucunun ilerlediği düşünülmektedir.



Şekil 6.4 Çatlağa ait seçilmiş malzeme noktalarının Zaman- Yer değiştirme grafiği

Kuvvetin uygulandığı sol cephenin alt, üst köşe ve orta malzeme noktaları olan 5, 6 ve 7 numaralı malzeme noktaları değerlendirildiğinde farklı yer değiştirmelerin meydana geldiği görölmektedir. Değerler üst köşeden alt köşeye doğru azalmaktadır. Alt köşe ile üst köşe arasındaki yer değiştirme farkı 0.00414 cm olduğu görölmektedir. Bu durumun çatlağın varlığından kaynaklandığı düşünölmektedir. Çünkü çatlak, modelin alt yarı bölgesinde bulunmaktadır.

6.1.5 Birinci modelin elastik plastik sertleşme (hardening) karşılaştırmalı (correspondence-cp.) malzeme modelinde analiz sonuçları

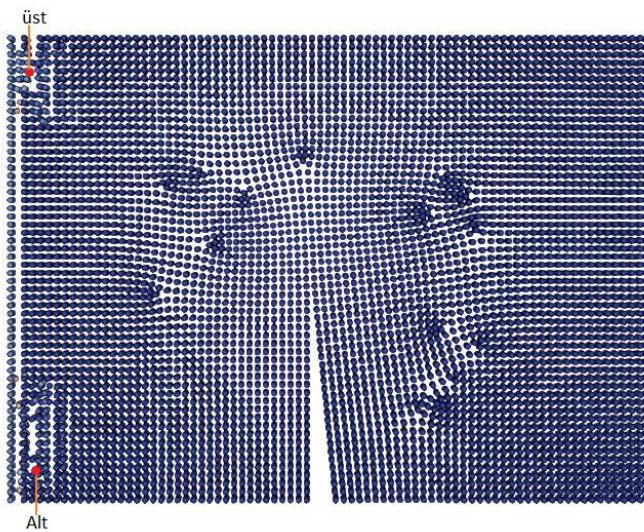
Seçilen noktaların analizin son adımındaki yer değiştirme, kuvvet ve kuvvet yoğunluk değerleri Tablo 6.5'te gösterildiği gibidir.

Tablo 6.5 Birinci model elastik plastik sertleşme cp. malzeme modelinde seçilen noktaların son adımdaki değerleri

Birinci Model Elastik Plastik Sertleşme Cp. Malzeme Modelinde Seçilen Noktaların Son Adımdaki Değerleri							
Nok. Adı	Kimliği	Yer değ.- X (cm)	Yer değ.- Y (cm)	Yer değ.- Z (cm)	Yer değ. Değ. (cm)	Kuvvet (dyne)	Kuvvet Yoğunluğu
1	13794	0	0	0	0	0	0
2	13797	0	0	0	0	0	0
3	13769	0	0	0	0	0	0
4	13823	0	0	0	0	0	0
5	13532	-0,47214	0	0	0,472138	1,12E+11	1,86E+13
6	13614	-0,47301	0	0	0,473014	1,61E+13	9,65E+10
7	13729	-0,46887	0	0	0,468874	9,76E+10	1,65E+13

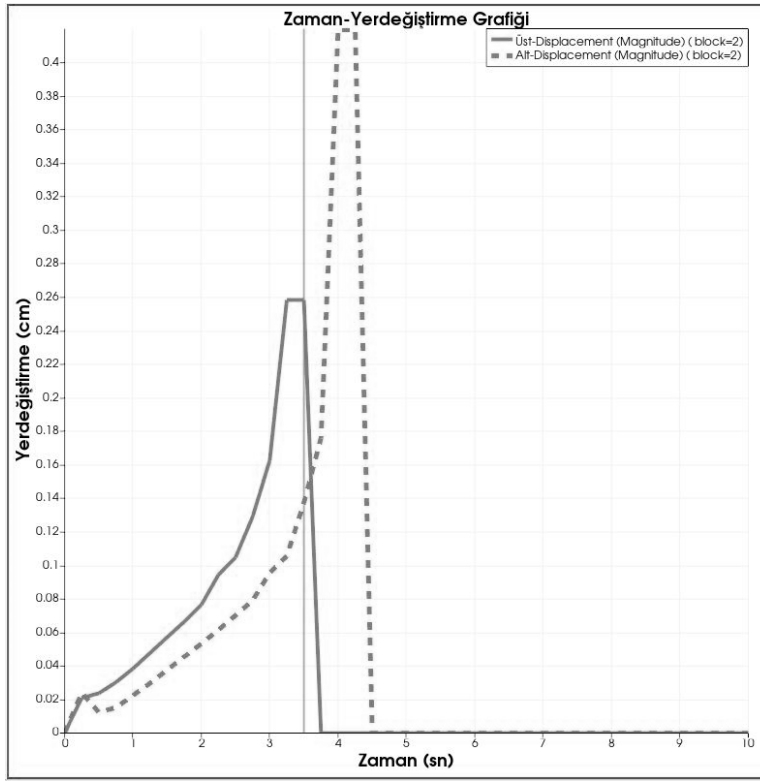
Malzemenin elastik davranış gösterdiğinde, kuvvetin uygulandığı kısım şerit halinde kopmanın meydana gelmesi sebebiyle 1, 2, 3 ve 4 numaralı noktalarda herhangi bir değişim gözlenmemektedir.

Sertleşme malzeme modelinde diğer karşılaştırmaz (non-correspondence) modellerindeki gibi yırtılma olsa da bu yırtılma hemen olmamaktadır. Kuvvetin uygulandığı sol cephede köşe kısımlarına yakın malzeme noktaları grubu ilk etapta yırtılmaya direnmek ve esnemekte sonrasında yırtılarak şerit halinde ilerlemektedir. Köşe noktalarına yakın olan bazı malzeme noktaları grubu ise yırtılmadan sonra eski konumlarına geri dönmektedir.



Şekil 6.5 Birinci modelin elastik plastik sertleşme (hardening) cp.malzeme modelindeki davranışı

Şekil 6.5'te belirtilen noktaların zamanla yer değiştirmeleri Şekil 6.6'da gösterildiği gibidir.

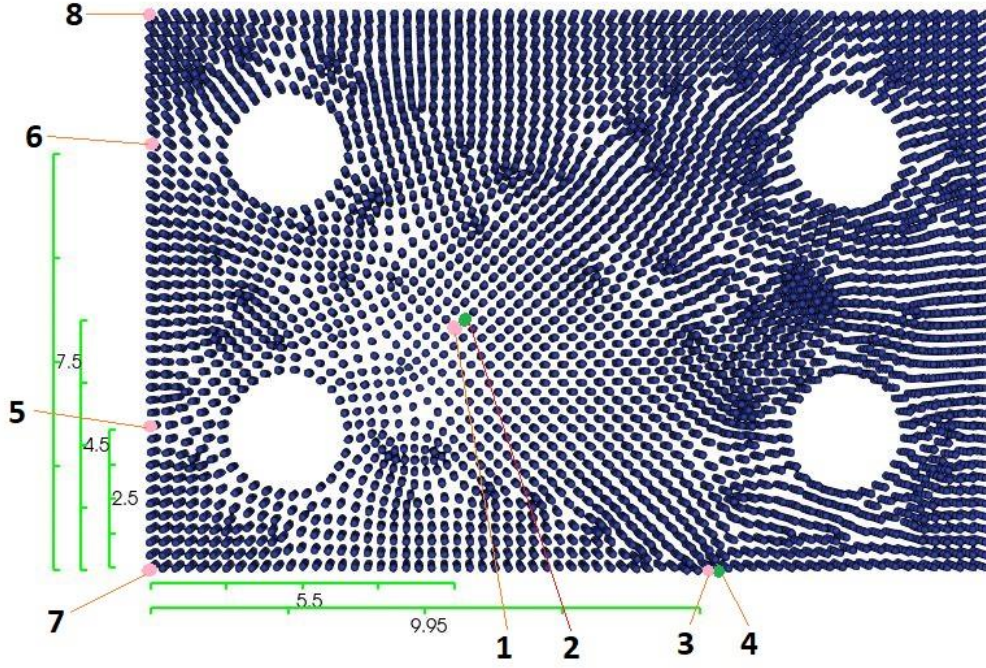


Şekil 6.6 Birinci modelin elastik plastik sertleşme (hardening) cp. malzeme modelindeki Alt ve Üst olarak adlandırılan noktaların Zaman-Yer değiştirme Grafiği

Şekil 6.6'da da görüldüğü gibi bahsedilen kısımlar, belli bir süre yer değiştirdikten sonra, yırtıldıktan sonra eski konumlarına dönerek elastik davranış göstermektedir.

6.2 İkinci Modelin Analiz Sonuçları ve Yorumlanması

İkinci Modelin analizinden elde edilen sonuçların yorumlanması için model üzerinden malzeme noktaları belirlenmiştir. Belirlenen malzeme noktaları Şekil 6.7'deki gibidir.



Şekil 6.7 Birinci model üzerinde belirlenen malzeme noktaları

Çatlak ucunun bulunduğu nokta x ekseninden 5,5 cm ve y ekseninden 4,5 cm olan koordinatlar üzerinde bulunmaktadır. Çatlakın model kenarında bittiği kısmın sol notasının koordinatı ise x ekseninde 9,95 cm bulunmakta ve 0,05 cm genişliğindedir. 1 numaralı malzeme noktası çatlak ucunun hemen alt solunda bulunan malzeme noktasıdır. 2 numaralı malzeme noktası çatlak ucunun hemen alt sağında bulunan malzeme noktasıdır. 3 numaralı malzeme noktası çatlakın sol kısmının model kenarında bittiği malzeme noktasıdır. 4 numaralı malzeme noktası çatlakın sağ kısmının model kenarında bittiği malzeme noktasıdır. 5 numaralı malzeme noktası, merkezi x ve y eksenlerinde 2,5 cm olan dairesel deliğinin merkezinin sol kenara iz düşümü olan x ekseninde 0 cm y ekseninde 2,5 cm koordinatlarında bulunan malzeme noktasıdır. 6 numaralı malzeme noktası, merkezi x ekseninde 2,5 cm ve y eksenlerinde 7,5 cm olan dairesel deliğinin merkezinin modelde sol kenara iz düşümü olan x ekseninde 0 cm y ekseninde 7,5 cm koordinatlarında bulunan malzeme noktasıdır. 7 numaralı malzeme noktası modelin sol alt köşesinin malzeme noktasıdır. 8 numaralı malzeme noktası modelin sol alt köşesinin malzeme noktasıdır.

6.2.1 İkinci modelin elastik karşılaştırmalı (correspondence-cp.) malzeme modelinde analiz sonuçları

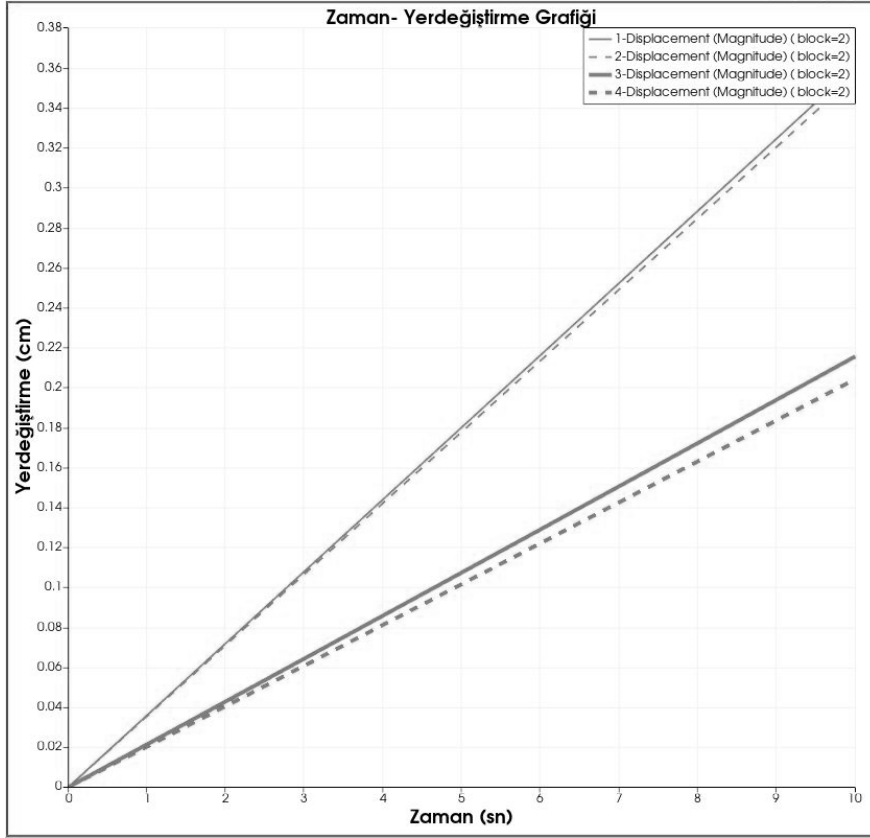
Seçilen noktaların analizin son adımındaki yer değiştirme, kuvvet ve kuvvet yoğunluk değerleri Tablo 6.6’da gösterildiği gibidir. Yırtılma olmadan malzeme noktalarının yer değiştirdiği gözlemlenmiştir.

Tablo 6.6 İkinci modelin elastik cp. malzeme modelinde seçilen noktaların son adımdaki değerleri

İkinci Model Elastik Com. Malzeme Modelinde Seçilen Noktaların Son Adımdaki Değerleri							
Nok. Adı	Kimliği	Yer değ.- X (cm)	Yer değ.- Y (cm)	Yer değ.- Z (cm)	Yer değ. Değ. (cm)	Kuvvet (dyne)	Kuvvet Yoğunluğu
1	10406	-0,36052	0,011309	-0,00315	0,360715	8,40E-04	0,0661115
2	10409	-0,35599	0,00861	-0,00325	0,35611	9,77E-04	0,0756534
3	10436	-0,21176	0,039912	-0,00532	0,215555	7,62E-04	0,0925569
4	10437	-0,19977	0,042094	-0,00481	0,204209	7,34E-04	0,0870824
5	10264	-0,72187	0,044364	-0,03304	0,723981	1,01E+10	6,02E+11
6	10242	-0,7185	-0,01275	-0,02649	0,719098	7,60E+09	4,60E+11
7	10341	-0,56537	0,040854	-0,00905	0,566919	3,07E+09	2,39E+11
8	10340	-0,56503	-0,03232	-0,01257	0,566097	4,13E+09	3,22E+11

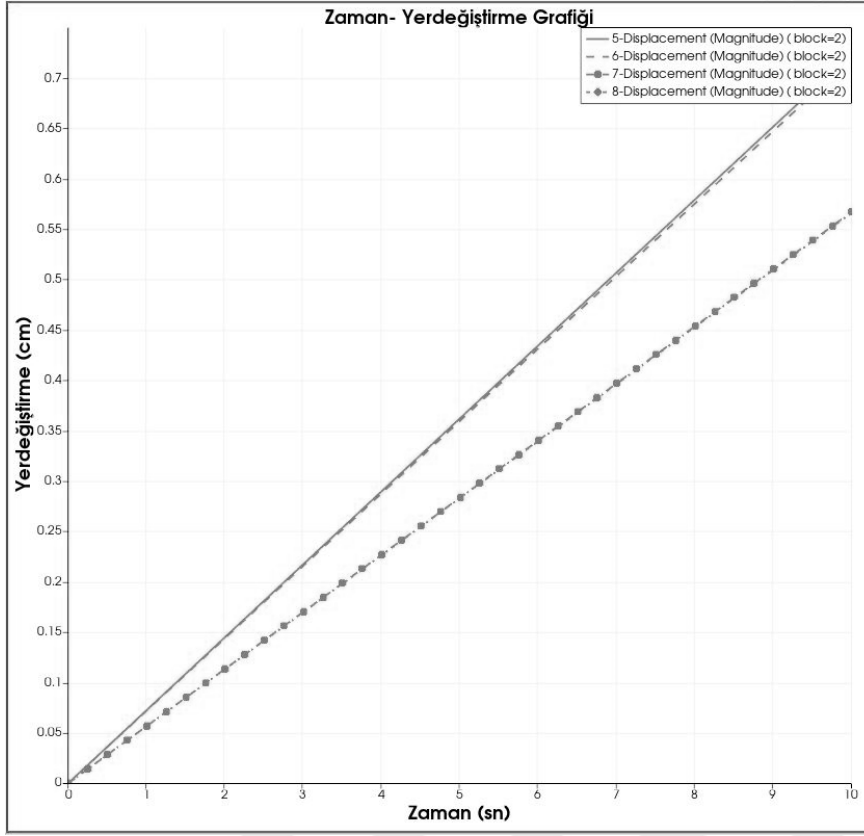
1 ve 2 numaralı malzeme noktalarının yer değiştirme farkları 0,004533 cm’dir. Bu değer, çatlak ucundaki açılma miktarını göstermektedir. 3 ve 4 numaralı malzeme noktalarının yer değiştirme farkları ise 0,0112 cm’dir. Bu bulunan değer ise çatlak kenar bitindeki açıklığın ne kadar daha açıldığını göstermektedir. Başlangıçta 0,05 cm olan açıklık çekme işleminden sonra 0,0612 cm genişliğine ulaştığı anlamına gelmektedir.

Şekil 6.8’te görüldüğü gibi zamanla yer değişimleri artış göstermektedir. 1 ve 2 numaralı ve 3 ve 4 numaralı malzeme noktaları çiftlerinin aralarındaki farkın zamanla artış gösterdiği görülmektedir. Burada diğer dikkat çeken durum ise çatlak ucundaki 1 ve 2 numaralı malzeme noktalarının 3 ve 4 numaralı malzeme noktalarına göre daha fazla yer değiştirmiş olmasıdır. Bu da modelin sol kısmındaki noktaların sağ kısmındaki malzeme noktalarına göre daha fazla yer değiştirdiğini göstermektedir. Bunun sebebinin ise çatlak modelin sol orta kısmından sağ kenar kısma doğru olmasından ve kuvvetin modelin sol kısmından uygulanmasından kaynaklandığı görülmektedir.



Şekil 6.8 Çatlağa ait seçilmiş malzeme noktalarının Zaman- Yer değiştirme grafiği

Kuvvetin uygulandığı sol cephesinde seçilen malzeme noktaları olan 5, 6, 7 ve 8 numaralı malzeme noktaları değerlendirildiğinde farklı yer değiştirmelerin meydana geldiği görülmektedir. Üst köşe ve alt köşe malzeme noktaları olan 7 ve 8 numaralı malzeme noktaları değerlendirildiğinde alt köşenin 0,000338 cm daha fazla yer değiştirdiği görülmektedir. Deliklerin merkez koordinatlarının sol kenara iz düşümleri olan 5 ve 6 numaralı malzeme noktaları incelendiğinde ise 5 numaralı malzeme noktasının 0,003368 cm daha fazla yer değiştirme yaptığı görülmektedir. Bu durumun çatlakın varlığından kaynaklandığı düşünülmektedir. Çünkü çatlak, modelin alt yarı bölgesinde bulunmaktadır. Sol kenarda seçilen noktalardan alt kısımda bulunan 5 ve 7 numaralı noktalar incelendiğine ise 5 numaralı malzeme noktasının 0,1565 cm daha fazla yer değiştirme yaptığı gözlenmektedir. Aynı durum 6 ve 8 numaralı malzeme noktalarında da mevcuttur. Bu durum göstermektedir ki dairesel deliklerin sol kenara yakın olan kısımları daha fazla ilerlemiş ve deforme olmuştur. Bu da malzemedeki hasar durumlarının malzemeyi nasıl etkilediğini göstermektedir.



Şekil 6.9 Modelin sol kenarına ait seçilmiş malzeme noktalarının Zaman- Yer değiştirme grafiği

Şekil 6.9’da görüldüğü gibi dairesel boşluktan kaynaklanan yer değiştirme miktarı daha fazladır ve her iki dairesel boşluktan kaynaklanan yer değiştirme miktarı birbirine yakındır. Köşe malzeme noktalarındaki yer değiştirme miktarı da birbirine yakındır. Bunun sebebinin ise çatlağın ince olmasından kaynaklandığı sonucuna varılmaktadır.

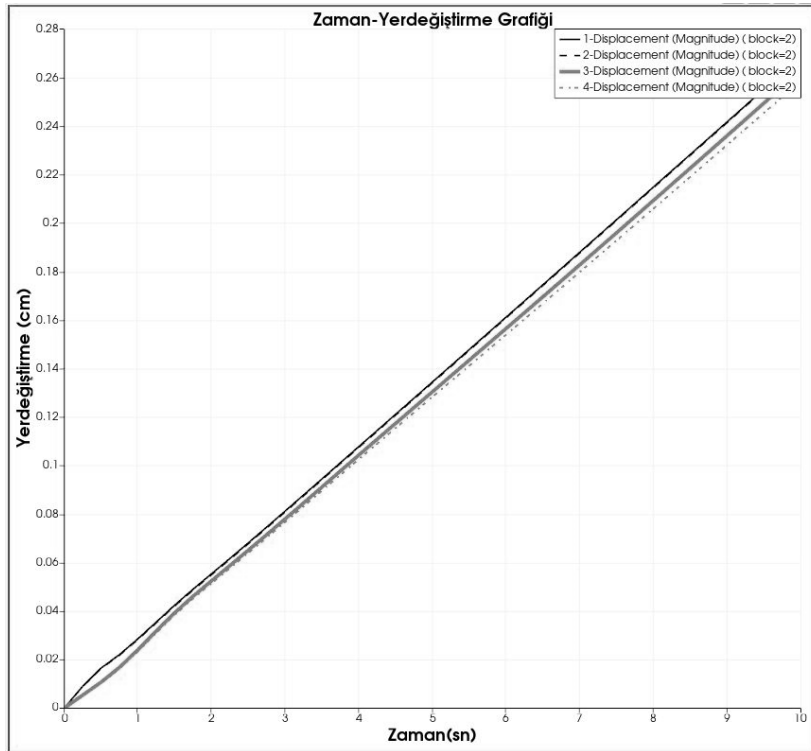
6.2.2 İkinci modelin elastik plastik karşılaştırmalı (correspondence-cp.) malzeme modelinde analiz sonuçları

Seçilen noktaların analizin son adımındaki yer değiştirme, kuvvet ve kuvvet yoğunluk değerleri Tablo 6.7’de gösterildiği gibidir. Elastik malzeme modelindeki gibi yırtılma olmadan malzeme noktalarının yer değiştirdiği gözlemlenmiştir.

Tablo 6.7 İkinci modelin elastik plastik cp. malzeme modelinde seçilen noktaların son adımdaki değerleri

İkinci Model Elastik Plastik Cp. Malzeme Modelinde Seçilen Noktaların Son Adımdaki Değerleri							
Nok. Adı	Kimliği	Yer değ.-X (cm)	Yer değ.-Y (cm)	Yer değ.-Z (cm)	Yer değ. Değ. (cm)	Kuvvet (dyne)	Kuvvet Yoğunluğu
1	10406	-0,26876	0,001155	-1,78E-05	0,268763	9,99E-06	0,0007862
2	10409	-0,26846	0,000755	-3,45E-05	0,268456	1,05E-05	0,000809
3	10436	-0,26299	0,000543	-0,00188	0,262997	1,16E-05	1,41E-03
4	10437	-0,25874	0,002674	-0,00263	0,258772	2,78E-06	0,0003303
5	10264	-0,72187	0,056468	-0,05461	0,726127	1,97E+08	1,18E+10
6	10242	-0,7185	-0,01705	-0,03542	0,719571	1,19E+08	7,23E+09
7	10341	-0,56537	0,05778	-0,0084	0,568379	1,52E+08	1,18E+10
8	10340	-0,56503	-0,04896	-0,02978	0,567932	1,62E+08	1,27E+10

1 ve 2 numaralı malzeme noktalarının yer değiştirme farkları 0,000306 cm'dir. Bu değer, çatlak ucundaki açılma miktarını göstermektedir. 3 ve 4 numaralı malzeme noktalarının yer değiştirme farkları ise 0,004246 cm'dir. Bu bulunan değer ise çatlağın kenar bitindeki açıklığın ne kadar daha açıldığını göstermektedir. Başlangıçta 0,05 cm olan açıklık çekme işleminden sonra 0,054246 cm genişliğine ulaştığı anlamına gelmektedir.

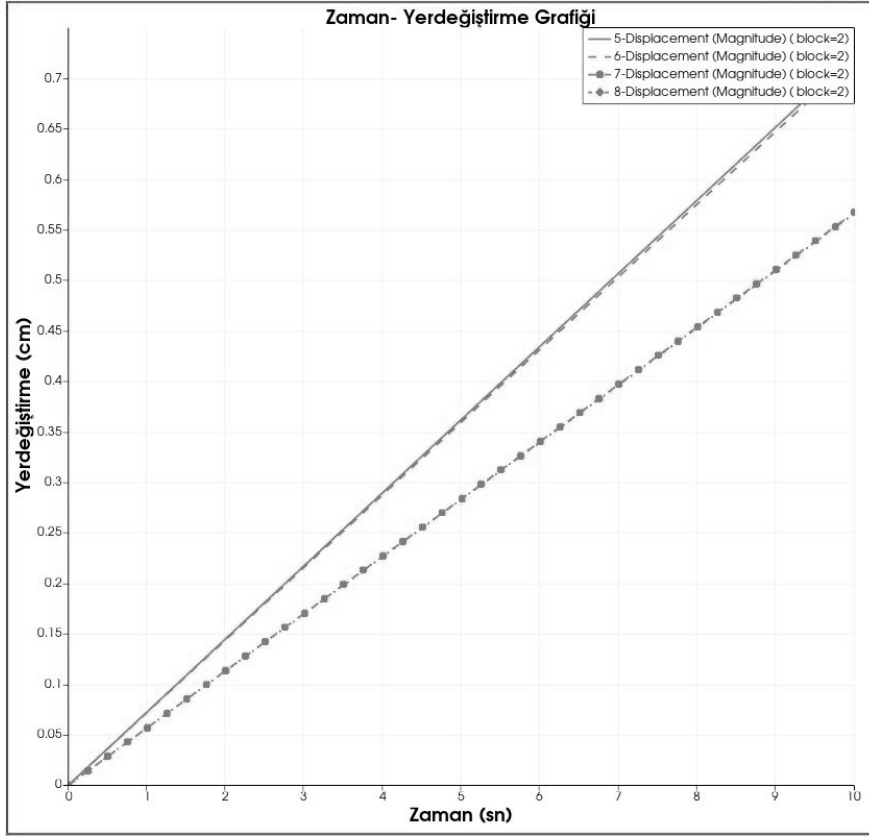


Şekil 6.10 Çatlağa ait seçilmiş malzeme noktalarının Zaman- Yer değiştirme grafiği

Şekil 6.10'te görüldüğü gibi zamanla yer değişimleri artış göstermektedir. 1 ve 2 numaralı ve 3 ve 4 numaralı malzeme noktaları çiftlerinin aralarındaki farkın zamanla artış gösterdiği görülmektedir. Burada diğer dikkat çeken durum ise çatlak ucundaki 1 ve 2 numaralı malzeme noktalarının 3 ve 4 numaralı malzeme noktalarına göre daha fazla yer değiştirmiş olmasıdır. Bu da modelin sol kısımdaki noktaların sağ kısımdaki malzeme noktalarına göre daha fazla yer değiştiğini göstermektedir. Bunun sebebinin ise çatlağın modelin sol orta kısmından sağ kenar kısma doğru olmasından ve kuvvetin modelin sol kısmından uygulanmasından kaynaklandığı görülmektedir.

Kuvvetin uygulandığı sol cephesinde seçilen malzeme noktaları olan 5, 6, 7 ve 8 numaralı malzeme noktaları değerlendirildiğinde farklı yer değiştirmelerin meydana geldiği görülmektedir. Üst köşe ve alt köşe malzeme noktaları olan 7 ve 8 numaralı malzeme noktaları değerlendirildiğinde alt köşenin 0,000338 cm daha fazla yer değiştirdiği görülmektedir. Deliklerin merkez koordinatlarının sol kenara iz düşümleri olan 5 ve 6 numaralı malzeme noktaları incelendiğinde ise 5 numaralı malzeme noktasının 0,003368 cm daha fazla yer değiştirme yaptığı görülmektedir. Bu durumun çatlağın varlığından kaynaklandığı düşünülmektedir. Çünkü çatlak, modelin alt yarı bölgesinde bulunmaktadır. Sol kenarda seçilen noktalardan alt kısımda bulunan 5 ve 7 numaralı noktalar incelendiğine ise 5 numaralı malzeme noktasının 0,1565 cm daha fazla yer değiştirme yaptığı gözlenmektedir. Aynı durum 6 ve 8 numaralı malzeme noktalarında da mevcuttur. Bu durum göstermektedir ki dairesel deliklerin sol kenara yakın olan kısımları daha fazla ilerlemiş ve deforme olmuştur. Bu da malzemedeki hasar durumlarının malzemeyi nasıl etkilediğini göstermektedir.

Şekil 6.11'de görüldüğü gibi dairesel boşluktan kaynaklanan yer değiştirme miktarı daha fazladır ve her iki dairesel boşluktan kaynaklanan yer değiştirme miktarı birbirine yakındır. Köşe malzeme noktalarındaki yer değiştirme miktarı da birbirine yakındır. Bunun sebebinin ise çatlağın ince olmasından kaynaklandığı sonucuna varılmaktadır.



Şekil 6.11 Modelin sol kenarına ait seçilmiş malzeme noktalarının Zaman- Yer değiştirme grafiği

6.3 Üçüncü Modelin Analiz Sonuçları ve Yorumlanması

Üçüncü modelin analizinden elde edilen sonuçların yorumlanması için her hesap adımında kuvvetin uygulandığı cephedeki ortalama yer değiştirme, ortalama kuvvet, gerilme ve gerinim değerleri kullanılmıştır.

6.3.1 Üçüncü modelin elastik karşılaştırmalı (correspondence-cp.) malzeme modelinde analiz sonuçları

Kuvvetin uygulandığı sol cephe üzerindeki malzeme noktalarının her hesap adımlarındaki ortalama yer değiştirme, ortalama kuvvet, gerilme ve gerinim değerleri hesaplanmış ve Tablo 6.8’de verilmiştir.

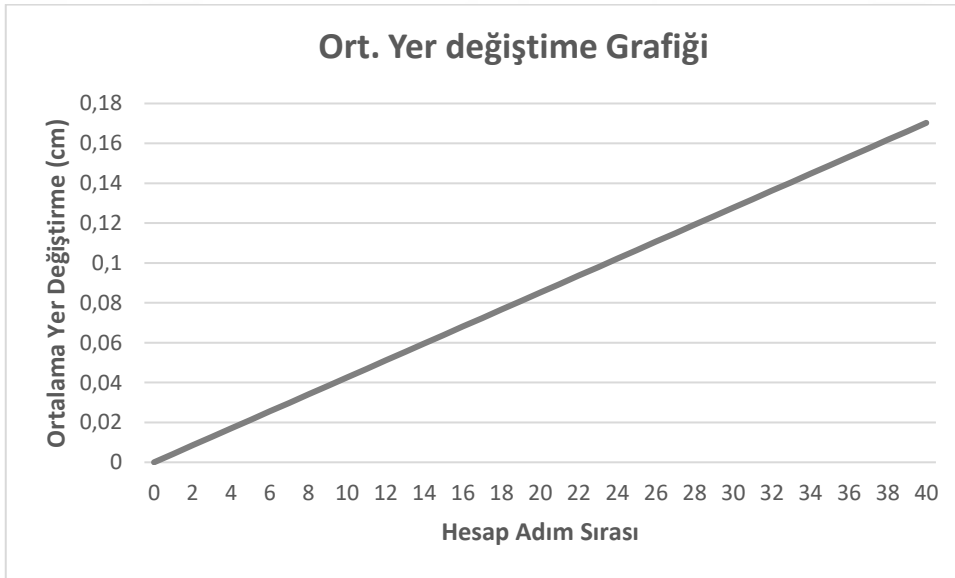
Tablo 6.8 Üçüncü modelin elastik malzeme cp. modeli hesabında sol cephesine ait her hesap adımdaki ortalama değerler

Adım Sırası	Ort. Kuvvet (F-dyne)	Ort. Y.değs. (cm)	Gerilme (σ -dyne/cm ²)	Gerinim (ϵ)
1	3,75E+06	-0,00424756	1,15E+07	0,00042476
2	7,49E+06	-0,00849512	2,30E+07	0,00084951
3	1,12E+07	-0,0127427	3,46E+07	0,00127427
4	1,50E+07	-0,0169902	4,60E+07	0,00169902
5	1,87E+07	-0,0212378	5,75E+07	0,00212378
6	2,24E+07	-0,0254853	6,90E+07	0,00254853
7	2,62E+07	-0,0297329	8,05E+07	0,00297329
8	2,99E+07	-0,0339805	9,19E+07	0,00339805
9	3,36E+07	-0,038228	1,03E+08	0,0038228
10	3,73E+07	-0,0424756	1,15E+08	0,00424756
11	4,10E+07	-0,0467231	1,26E+08	0,00467231
12	4,47E+07	-0,0509707	1,38E+08	0,00509707
13	4,84E+07	-0,0552183	1,49E+08	0,00552183
14	5,21E+07	-0,0594658	1,60E+08	0,00594658
15	5,58E+07	-0,0637134	1,72E+08	0,00637134
16	5,95E+07	-0,0679609	1,83E+08	0,00679609
17	6,32E+07	-0,0722085	1,95E+08	0,00722085
18	6,69E+07	-0,076456	2,06E+08	0,0076456
19	7,06E+07	-0,0807036	2,17E+08	0,00807036
20	7,43E+07	-0,0849512	2,29E+08	0,00849512
21	7,80E+07	-0,0891987	2,40E+08	0,00891987
22	8,16E+07	-0,0934463	2,51E+08	0,00934463
23	8,53E+07	-0,0976938	2,63E+08	0,00976938
24	8,90E+07	-0,101941	2,74E+08	0,0101941
25	9,27E+07	-0,106189	2,85E+08	0,0106189
26	9,63E+07	-0,110437	2,96E+08	0,0110437
27	1,00E+08	-0,114684	3,08E+08	0,0114684
28	1,04E+08	-0,118932	3,19E+08	0,0118932
29	1,07E+08	-0,123179	3,30E+08	0,0123179
30	1,11E+08	-0,127427	3,41E+08	0,0127427
31	1,15E+08	-0,131674	3,53E+08	0,0131674
32	1,18E+08	-0,135922	3,64E+08	0,0135922
33	1,22E+08	-0,140169	3,75E+08	0,0140169

Tablo 6.8'in devamı

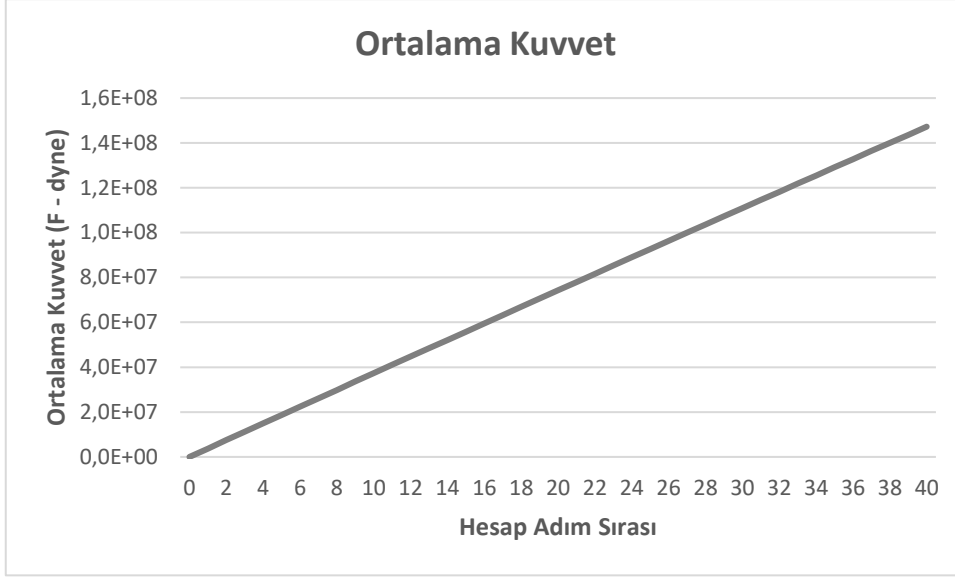
34	1,25E+08	-0,144417	3,86E+08	0,0144417
35	1,29E+08	-0,148665	3,97E+08	0,0148665
36	1,33E+08	-0,152912	4,08E+08	0,0152912
37	1,36E+08	-0,15716	4,20E+08	0,015716
38	1,40E+08	-0,161407	4,31E+08	0,0161407
39	1,44E+08	-0,165655	4,42E+08	0,0165655
40	1,47E+08	-0,169902	4,53E+08	0,0169902

Elde edilen değerlere göre ortalama yer değişimin her hesap adımına göre değişim grafiği Şekil 6.12'de elde edildiği gibidir. Elde edilen grafiğe göre her hesap adımında ortalama yer değiştirmenin arttığı gözlemlenmektedir.



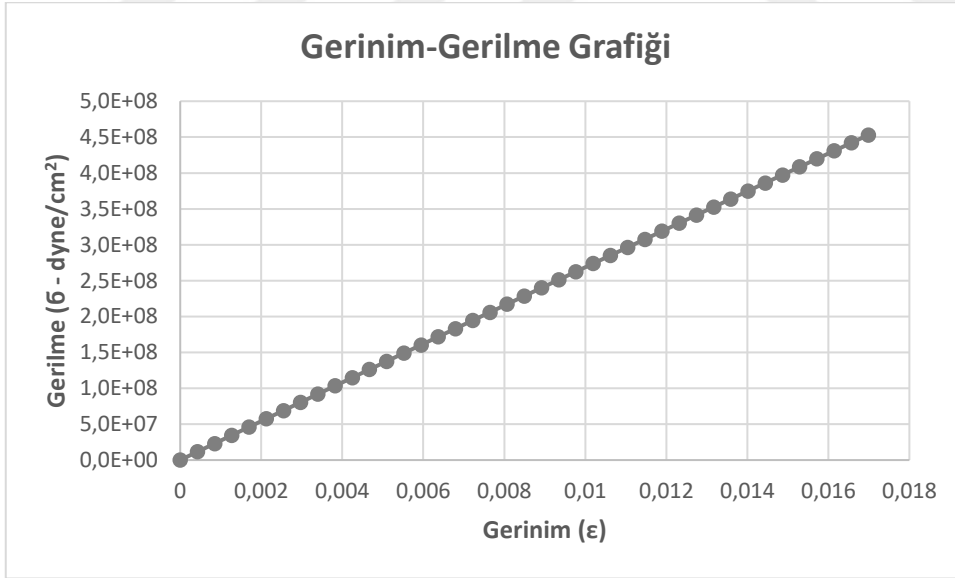
Şekil 6.12 Üçüncü modelin elastik cp. malzeme modeli hesaplamasına ait ortalama yer değişimin hesap adım sırasına göre değişim grafiği

Elde edilen değerlere göre uygulanan ortalama kuvvetin her hesap adımına göre değişim grafiği Şekil 6.13'te elde edildiği gibidir. Elde edilen grafiğe göre her hesap adımında ortalama kuvvetin arttırıldığı gözlemlenmektedir.



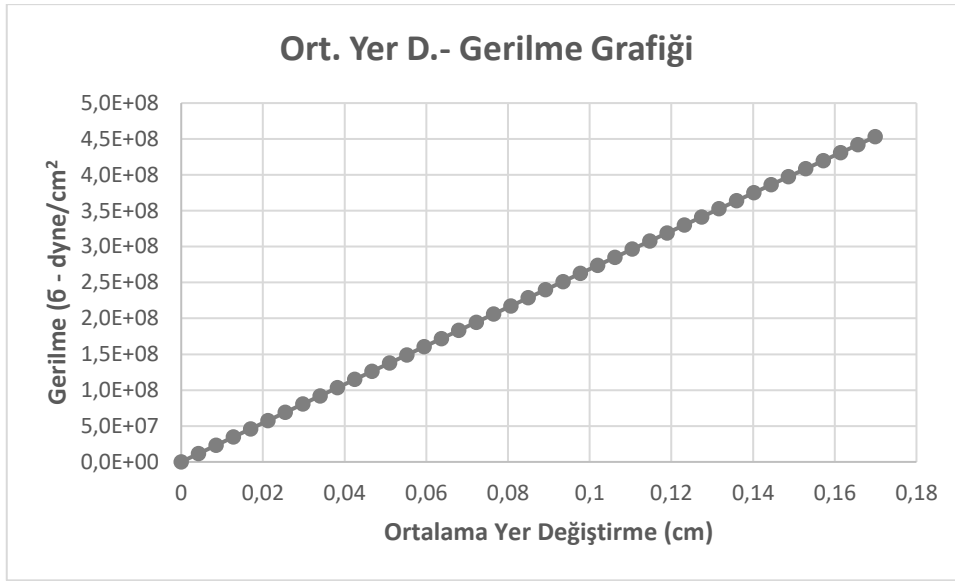
Şekil 6.13 Üçüncü modelin elastik cp. malzeme modeli hesaplamasına ait uygulanan ortalama kuvvetin hesap adım sırasına göre değişim grafiği

Elde edilen değerlere göre her hesap adımında elde edilen gerinim ve gerilme değerleri elde edildikleri hesap adımlarına göre grafiği elde edilmek istenildiğinde Şekil 6.14'teki gibi olmaktadır. Elde edilen grafiğe göre değerler birbiriyle doğru orantılı şekilde artmaktadır.



Şekil 6.14 Üçüncü modelin elastik cp. malzeme modeli hesaplamasına ait gerinim-gerilme grafiği

Ortalama yer değiştirmenin gerilme ile ilişkisi ise Şekil 6.15'te verilmiştir. İlişkinin birbiriyle doğru orantılı şekilde artış gösterdiği görülmüştür.



Şekil 6.15 Üçüncü modelin elastik cp. malzeme modeli hesaplamasına ait ortalama yer değiştirme-gerilme grafiği

6.3.2 Üçüncü modelin elastik plastik karşılaştırmalı (correspondence-cp.) malzeme modelinde analiz sonuçları

Kuvvetin uygulandığı sol cephe üzerindeki malzeme noktalarının her hesap adımlarındaki ortalama yer değiştirme, ortalama kuvvet, gerilme ve gerinim değerleri hesaplanmış ve Tablo 6.9’da verilmiştir.

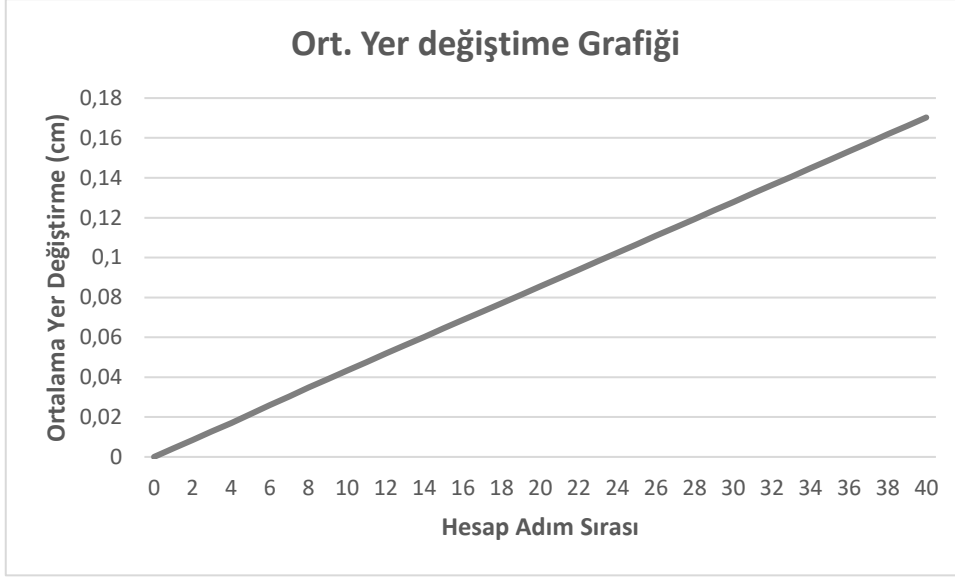
Tablo 6.9 Üçüncü modelin elastik-plastik cp. malzeme modeli hesabında sol cephesine ait her hesap adımdaki ortalama değerler

Adım Sırası	Ort. Kuvvet (F-dyne)	Ort. Y.değs. (cm)	Gerilme (σ-dyne/cm ²)	Gerinim (ε)
1	3,75E+06	-0,00424756	1,15E+07	0,000424756
2	7,49E+06	-0,00849512	2,30E+07	0,000849512
3	1,12E+07	-0,0127427	3,45E+07	0,00127427
4	1,44E+07	-0,0169902	4,42E+07	0,00169902
5	1,56E+07	-0,0212378	4,81E+07	0,00212378
6	1,62E+07	-0,0254853	4,97E+07	0,00254853
7	1,64E+07	-0,0297329	5,04E+07	0,00297329
8	1,65E+07	-0,0339805	5,07E+07	0,00339805
9	1,66E+07	-0,038228	5,10E+07	0,0038228
10	1,66E+07	-0,0424756	5,11E+07	0,00424756
11	1,67E+07	-0,0467231	5,13E+07	0,00467231
12	1,67E+07	-0,0509707	5,14E+07	0,00509707

Tablo 6.9'un devamı

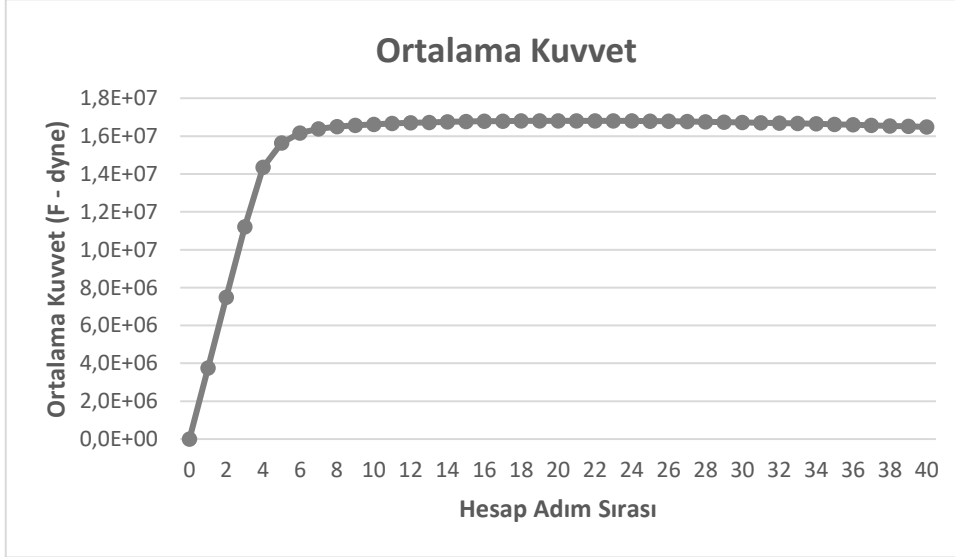
13	1,67E+07	-0,0552183	5,15E+07	0,00552183
14	1,67E+07	-0,0594658	5,15E+07	0,00594658
15	1,68E+07	-0,0637134	5,16E+07	0,00637134
16	1,68E+07	-0,0679609	5,16E+07	0,00679609
17	1,68E+07	-0,0722085	5,17E+07	0,00722085
18	1,68E+07	-0,076456	5,17E+07	0,0076456
19	1,68E+07	-0,0807036	5,17E+07	0,00807036
20	1,68E+07	-0,0849512	5,17E+07	0,00849512
21	1,68E+07	-0,0891987	5,17E+07	0,00891987
22	1,68E+07	-0,0934463	5,17E+07	0,00934463
23	1,68E+07	-0,0976938	5,17E+07	0,00976938
24	1,68E+07	-0,101941	5,17E+07	0,0101941
25	1,68E+07	-0,106189	5,17E+07	0,0106189
26	1,68E+07	-0,110437	5,16E+07	0,0110437
27	1,68E+07	-0,114684	5,16E+07	0,0114684
28	1,68E+07	-0,118932	5,16E+07	0,0118932
29	1,67E+07	-0,123179	5,15E+07	0,0123179
30	1,67E+07	-0,127427	5,15E+07	0,0127427
31	1,67E+07	-0,131674	5,14E+07	0,0131674
32	1,67E+07	-0,135922	5,14E+07	0,0135922
33	1,67E+07	-0,140169	5,13E+07	0,0140169
34	1,66E+07	-0,144417	5,12E+07	0,0144417
35	1,66E+07	-0,148665	5,11E+07	0,0148665
36	1,66E+07	-0,152912	5,11E+07	0,0152912
37	1,66E+07	-0,15716	5,10E+07	0,015716
38	1,65E+07	-0,161407	5,09E+07	0,0161407
39	1,65E+07	-0,165655	5,08E+07	0,0165655
40	1,65E+07	-0,169902	5,07E+07	0,0169902

Elde edilen değerlere göre ortalama yer değişimin her hesap adımına göre değişim grafiği Şekil 6.16'da elde edildiği gibidir. Elde edilen grafiğe göre her hesap adımında ortalama yer değiştirmenin arttığı gözlemlenmektedir.



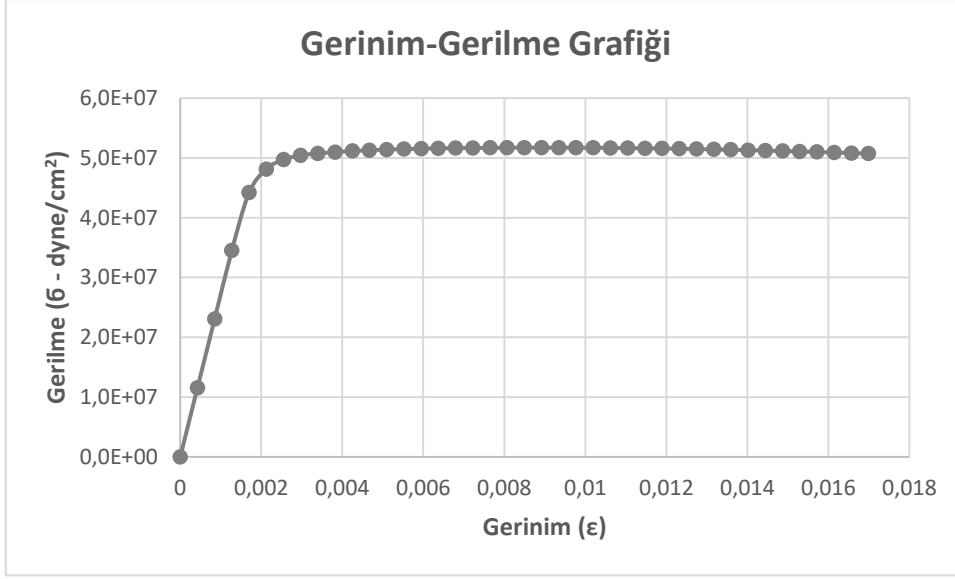
şekil 6.16 Üçüncü modelin elastik-plastik cp. malzeme modeli hesaplamasına ait ortalama yer değişimin hesap adım sırasına göre değişim grafiği

Elde edilen değerlere göre uygulanan ortalama kuvvetin her hesap adımına göre değişim grafiği şekil 6.17’de elde edildiği gibidir. Elde edilen grafiğe göre her hesap adımında ortalama kuvvetin 6. adıma kadar artırıldığı, sonrasında da sabit bir değere yakın bırakıldığı gözlemlenmektedir.



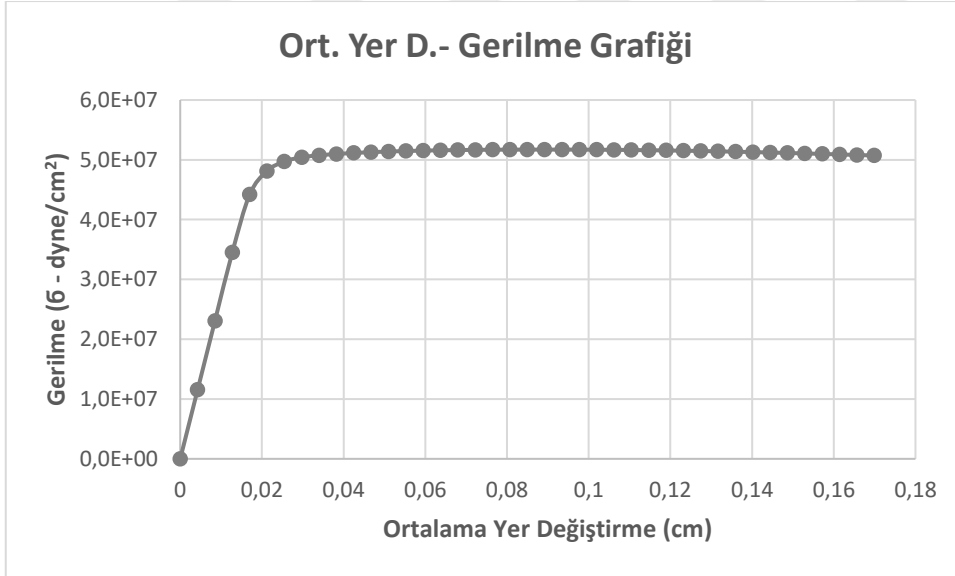
şekil 6.17 Üçüncü modelin elastik-plastik cp. malzeme modeli hesaplamasına ait uygulanan ortalama kuvvetin hesap adım sırasına göre değişim grafiği

Elde edilen değerlere göre her hesap adımında elde edilen gerinim ve gerilme değerleri elde edildikleri hesap adımlarına göre grafiği elde edilmek istenildiğinde şekil 6.18’teki olmaktadır. Elde edilen grafiğe göre değerler birbiriyle doğru orantılı şekilde 6. Adıma kadar artarken sonrasında sabit bir değere yakın kalmaktadır.



Şekil 6.18 Üçüncü modelin elastik-plastik cp. malzeme modeli hesaplamasına ait gerinim-gerilme grafiği

Ortalama yer değiştirmenin gerilme ile ilişkisi ise Şekil 6.19’da verilmiştir. Elde edilen verilere göre iki değer arasındaki ilişki 6.adıma kadar doğru oranlı şekilde artış gösterirken, sonrasında sabit bir değere yakın kaldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 6.19 Üçüncü modelin elastik-plastik cp. malzeme modeli hesaplamasına ait ortalama yer değiştirme-gerilme grafiği

6.4 Dördüncü Modelin Analiz Sonuçları ve Yorumlanması

Dördüncü modelin analizinden elde edilen sonuçların yorumlanması için her hesap adımında kuvvetin uygulandığı cephedeki ortalama yer değiştirme, ortalama kuvvet, gerilme ve gerinim değerleri kullanılmıştır.

6.4.1 Dördüncü modelin elastik (correspondence-cp.) malzeme modelinde analiz sonuçları

Kuvvetin uygulandığı sol cephe üzerindeki malzeme noktalarının her hesap adımlarındaki ortalama yer değiştirme, ortalama kuvvet, gerilme ve gerinim değerleri hesaplanmış ve Tablo 6.10’da verilmiştir.

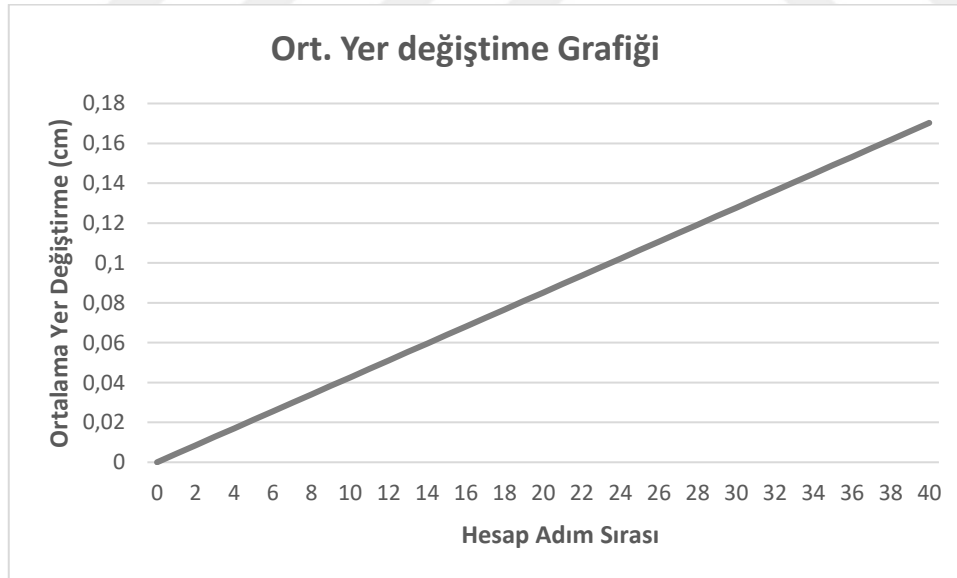
Tablo 6.10 Dördüncü modelin elastik malzeme cp. modeli hesabında sol cephesine ait her hesap adımıdaki ortalama değerler

Adım Sırası	Ort. Kuvvet (F-dyne)	Ort. Y.değş. (cm)	Gerilme (σ -dyne/cm ²)	Gerinim (ϵ)
1	3,73E+06	-0,0042564	1,36E+07	0,00042564
2	7,46E+06	-0,0085128	2,71E+07	0,00085128
3	1,12E+07	-0,0127692	4,07E+07	0,00127692
4	1,49E+07	-0,0170256	5,42E+07	0,00170256
5	1,86E+07	-0,021282	6,77E+07	0,0021282
6	2,23E+07	-0,0255384	8,12E+07	0,00255384
7	2,60E+07	-0,0297948	9,47E+07	0,00297948
8	2,98E+07	-0,0340512	1,08E+08	0,00340512
9	3,35E+07	-0,0383076	1,22E+08	0,00383076
10	3,72E+07	-0,042564	1,35E+08	0,0042564
11	4,09E+07	-0,0468204	1,49E+08	0,00468204
12	4,45E+07	-0,0510768	1,62E+08	0,00510768
13	4,82E+07	-0,0553332	1,75E+08	0,00553332
14	5,19E+07	-0,0595896	1,89E+08	0,00595896
15	5,56E+07	-0,063846	2,02E+08	0,0063846
16	5,93E+07	-0,0681024	2,16E+08	0,00681024
17	6,30E+07	-0,0723588	2,29E+08	0,00723588
18	6,66E+07	-0,0766152	2,42E+08	0,00766152
19	7,03E+07	-0,0808716	2,56E+08	0,00808716
20	7,40E+07	-0,085128	2,69E+08	0,0085128
21	7,76E+07	-0,0893844	2,82E+08	0,00893844
22	8,13E+07	-0,0936408	2,96E+08	0,00936408
23	8,50E+07	-0,0978972	3,09E+08	0,00978972
24	8,86E+07	-0,102154	3,22E+08	0,0102154
25	9,23E+07	-0,10641	3,35E+08	0,010641
26	9,59E+07	-0,110666	3,49E+08	0,0110666

Tablo 6.10'un devamı

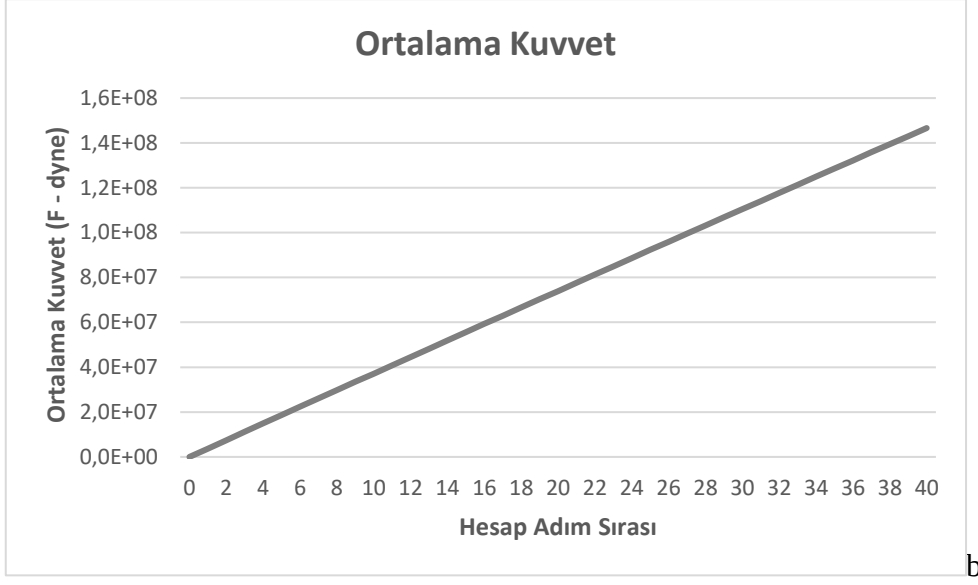
27	9,96E+07	-0,114923	3,62E+08	0,0114923
28	1,03E+08	-0,119179	3,75E+08	0,0119179
29	1,07E+08	-0,123436	3,88E+08	0,0123436
30	1,10E+08	-0,127692	4,02E+08	0,0127692
31	1,14E+08	-0,131948	4,15E+08	0,0131948
32	1,18E+08	-0,136205	4,28E+08	0,0136205
33	1,21E+08	-0,140461	4,41E+08	0,0140461
34	1,25E+08	-0,144718	4,54E+08	0,0144718
35	1,29E+08	-0,148974	4,68E+08	0,0148974
36	1,32E+08	-0,15323	4,81E+08	0,015323
37	1,36E+08	-0,157487	4,94E+08	0,0157487
38	1,39E+08	-0,161743	5,07E+08	0,0161743
39	1,43E+08	-0,166	5,20E+08	0,0166
40	1,47E+08	-0,170256	5,33E+08	0,0170256

Elde edilen değerlere göre ortalama yer değişiminin her hesap adımına göre değişim grafiği Şekil 6.20'de elde edildiği gibidir. Elde edilen grafiğe göre her hesap adımında ortalama yer değiştirmenin arttığı gözlemlenmektedir.



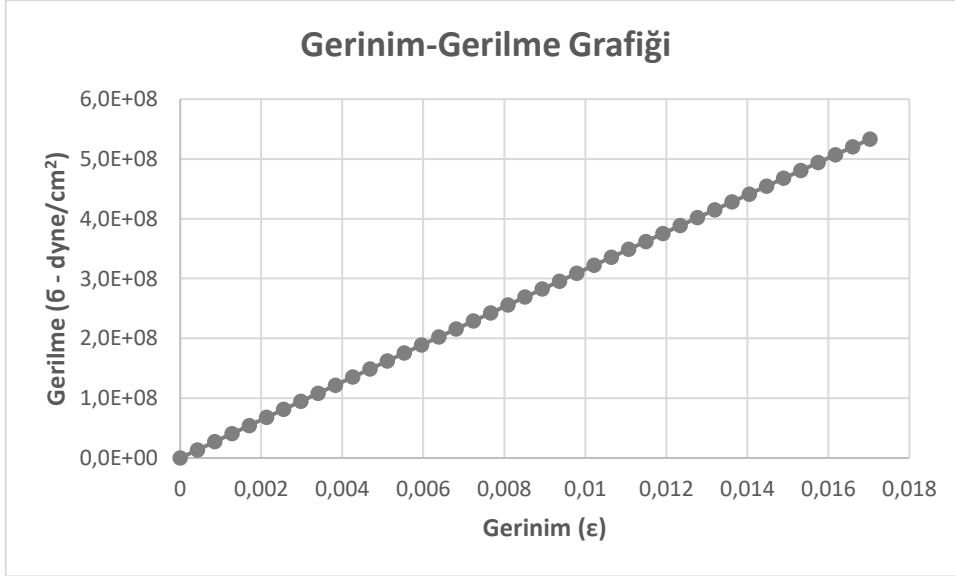
Şekil 6.20 Dördüncü modelin elastik cp. malzeme modeli hesaplamasına ait ortalama yer eğişiminin hesap adım sırasına göre değişim grafiği

Elde edilen değerlere göre uygulanan ortalama kuvvetin her hesap adımına göre değişim grafiği Şekil 6.21'de elde edildiği gibidir. Elde edilen grafiğe göre her hesap adımında ortalama kuvvetin artırıldığı gözlemlenmektedir.



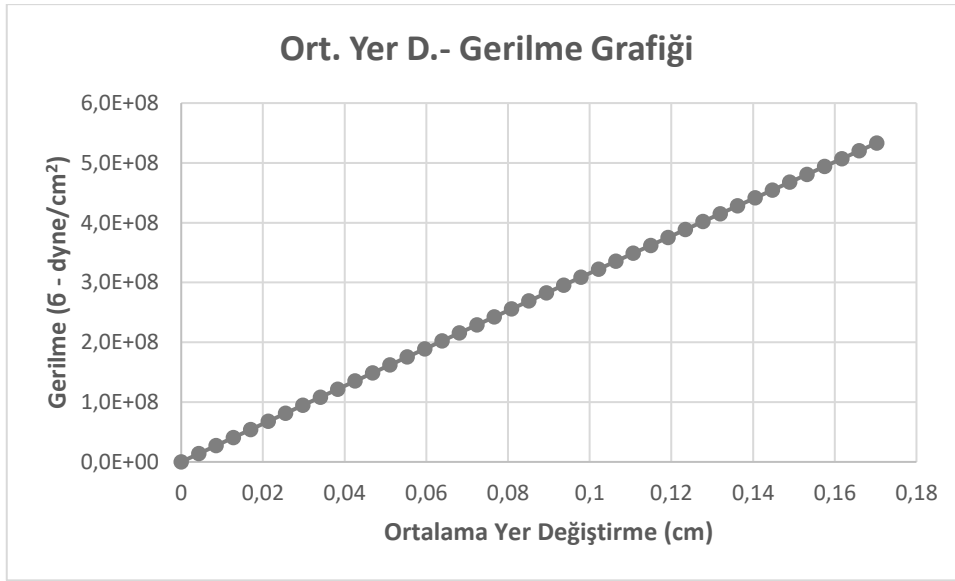
Şekil 6.21 Dördüncü modelin elastik cp. malzeme modeli hesaplamasına ait uygulanan ortalama kuvvetin hesap adım sırasına göre değişim grafiği

Elde edilen değerlere göre her hesap adımında elde edilen gerinim ve gerilme değerleri elde edildikleri hesap adımlarına göre grafiği elde edilmek istenildiğinde Şekil 6.22'deki gibi olmaktadır. Elde edilen grafiğe göre değerler birbiriyle doğru orantılı şekilde artmaktadır.



Şekil 6.22 Dördüncü modelin elastik cp. malzeme modeli hesaplamasına ait gerinim-gerilme grafiği

Ortalama yer değiştirmenin gerilme ile ilişkisi ise Şekil 6.23'te verilmiştir. İlişkinin birbiriyle doğru orantılı şekilde artış gösterdiği görülmüştür.



Şekil 6.23 Dördüncü modelin elastik cp. malzeme modeli hesaplamasına ait ortalama yer değiştirme-gerilme grafiği

6.4.2 Dördüncü modelin elastik plastik karşılaştırmalı (correspondence-cp.) malzeme modelinde analiz sonuçları

Kuvvetin uygulandığı sol cephe üzerindeki malzeme noktalarının her hesap adımlarındaki ortalama yer değiştirme, ortalama kuvvet, gerilme ve gerinim değerleri hesaplanmış ve Tablo 6.11’de verilmiştir.

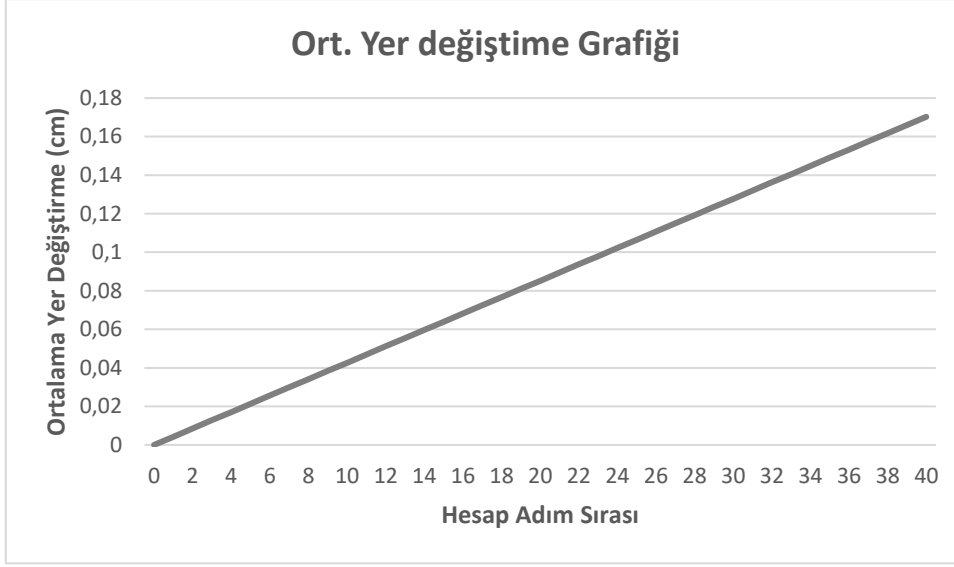
Tablo 6.11 Dördüncü modelin elastik-plastik cp. malzeme modeli hesabında sol cephesine ait her hesap adımıdaki ortalama değerler

Adım Sırası	Ort. Kuvvet (F-dyne)	Ort. Y.değş. (cm)	Gerilme (σ - dyne/cm ²)	Gerinim (ϵ)
1	3,73E+06	-0,004256	1,36E+07	0,000426
2	7,46E+06	-0,008513	2,71E+07	0,000851
3	1,12E+07	-0,012769	4,06E+07	0,001277
4	1,44E+07	-0,017026	5,23E+07	0,001703
5	1,56E+07	-0,021282	5,68E+07	0,002128
6	1,60E+07	-0,025538	5,83E+07	0,002554
7	1,62E+07	-0,029795	5,89E+07	0,002979
8	1,63E+07	-0,034051	5,91E+07	0,003405
9	1,63E+07	-0,038308	5,93E+07	0,003831
10	1,63E+07	-0,042564	5,94E+07	0,004256
11	1,64E+07	-0,04682	5,95E+07	0,004682

Tablo 6.11'in devamı

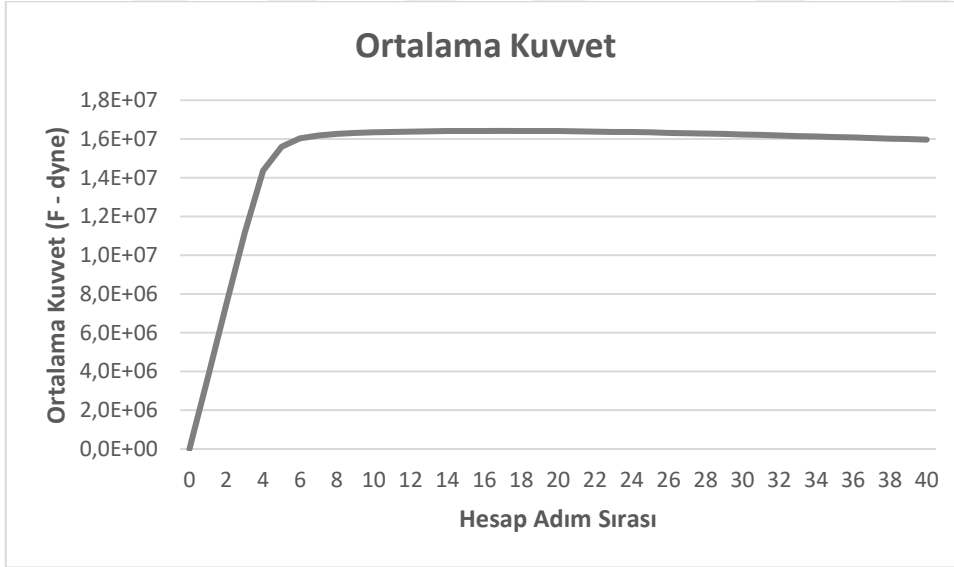
12	1,64E+07	-0,051077	5,96E+07	0,005108
13	1,64E+07	-0,055333	5,96E+07	0,005533
14	1,64E+07	-0,05959	5,97E+07	0,005959
15	1,64E+07	-0,063846	5,97E+07	0,006385
16	1,64E+07	-0,068102	5,97E+07	0,00681
17	1,64E+07	-0,072359	5,97E+07	0,007236
18	1,64E+07	-0,076615	5,97E+07	0,007662
19	1,64E+07	-0,080872	5,97E+07	0,008087
20	1,64E+07	-0,085128	5,96E+07	0,008513
21	1,64E+07	-0,089384	5,96E+07	0,008938
22	1,64E+07	-0,093641	5,96E+07	0,009364
23	1,64E+07	-0,097897	5,95E+07	0,00979
24	1,64E+07	-0,102154	5,95E+07	0,010215
25	1,63E+07	-0,10641	5,94E+07	0,010641
26	1,63E+07	-0,110666	5,93E+07	0,011067
27	1,63E+07	-0,114923	5,93E+07	0,011492
28	1,63E+07	-0,119179	5,92E+07	0,011918
29	1,63E+07	-0,123436	5,91E+07	0,012344
30	1,62E+07	-0,127692	5,90E+07	0,012769
31	1,62E+07	-0,131948	5,89E+07	0,013195
32	1,62E+07	-0,136205	5,88E+07	0,013621
33	1,62E+07	-0,140461	5,87E+07	0,014046
34	1,61E+07	-0,144718	5,86E+07	0,014472
35	1,61E+07	-0,148974	5,85E+07	0,014897
36	1,61E+07	-0,15323	5,84E+07	0,015323
37	1,60E+07	-0,157487	5,83E+07	0,015749
38	1,60E+07	-0,161743	5,82E+07	0,016174
39	1,60E+07	-0,166	5,81E+07	0,0166
40	1,60E+07	-0,170256	5,80E+07	0,017026

Elde edilen değerlere göre ortalama yer değişimin her hesap adımına göre değişim grafiği Şekil 6.24'te elde edildiği gibidir. Elde edilen grafiğe göre her hesap adımında ortalama yer değiştirmenin arttığı gözlemlenmektedir.



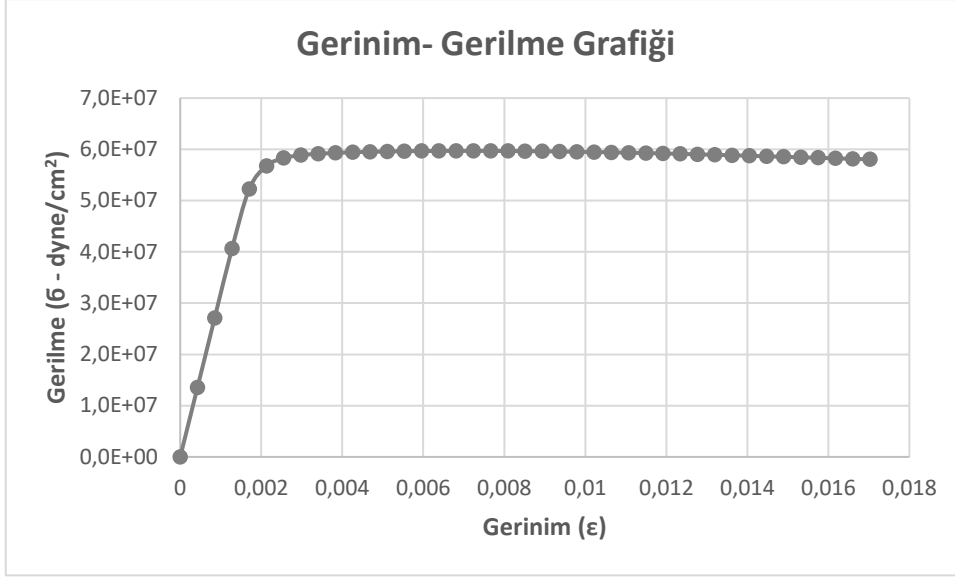
şekil 6.24 Dördüncü modelin elastik-plastik cp. malzeme modeli hesaplamasına ait ortalama yer değişimin hesap adım sırasına göre değişim grafiği

Elde edilen değerlere göre uygulanan ortalama kuvvetin her hesap adımına göre değişim grafiği şekil 6.25'te elde edildiği gibidir. Elde edilen grafiğe göre her hesap adımında ortalama kuvvetin 6. adıma kadar arttırıldığı, sonrasında da sabit bir değere yakın bırakıldığı gözlemlenmektedir.



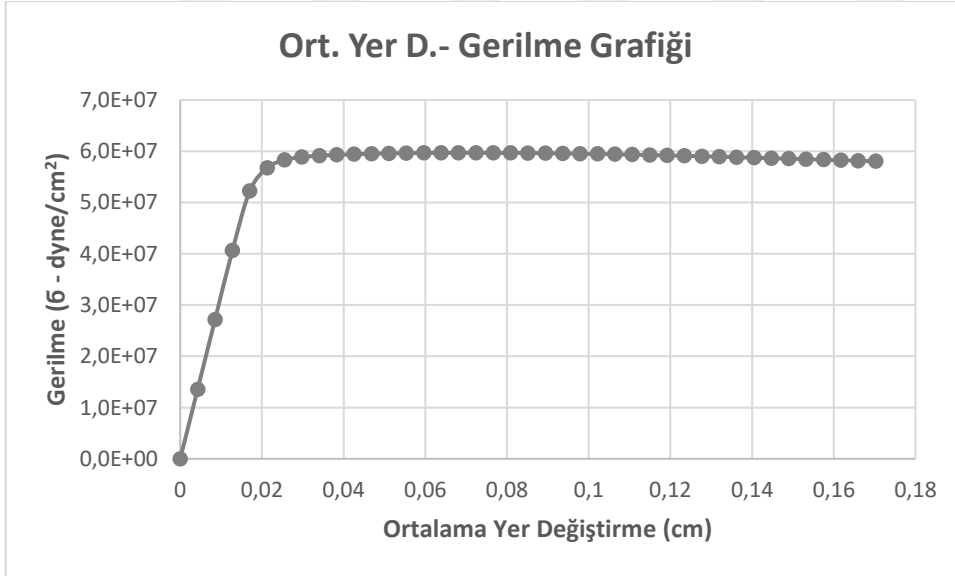
şekil 6.25 Dördüncü modelin elastik-plastik cp. malzeme modeli hesaplamasına ait uygulanan ortalama kuvvetin hesap adım sırasına göre değişim grafiği

Elde edilen değerlere göre her hesap adımında elde edilen gerinim ve gerilme değerleri elde edildikleri hesap adımlarına göre grafiği elde edilmek istenildiğinde şekil 6.26'daki gibi olmaktadır. Elde edilen grafiğe göre değerler birbiriyle doğru orantılı şekilde 6. adıma kadar artarken sonrasında sabit bir değere yakın kalmaktadır.



Şekil 6.26 Dördüncü modelin elastik-plastik cp. malzeme modeli hesaplamasına ait gerinim-gerilme grafiği

Ortalama yer değiştirmenin gerime ile ilişkisi ise Şekil 6.27’de verilmiştir. Elde edilen verilere göre iki değer arasındaki ilişki 6.adıma kadar doğru oranlı şekilde artış gösterirken, sonrasında sabit bir değere yakın kaldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 6.27 Dördüncü modelin elastik-plastik cp. malzeme modeli hesaplamasına ait ortalama yer değiştirme-gerilme grafiği

6.5 Beşinci Modelin Analiz Sonuçları ve Yorumlanması

Beşinci modelin analizinden elde edilen sonuçların yorumlanması için her hesap adımında kuvvetin uygulandığı cephedeki ortalama yer değiştirme, ortalama kuvvet, gerilme ve gerinim değerleri kullanılmıştır.

6.5.1 Beşinci modelin elastik karşılaştırmalı (correspondence-cp.) malzeme modelinde analiz sonuçlar

Kuvvetin uygulandığı sol cephe üzerindeki malzeme noktalarının her hesap adımlarındaki ortalama yer değiştirme, ortalama kuvvet, gerilme ve gerinim değerleri hesaplanmış ve Tablo 6.12’de verilmiştir.

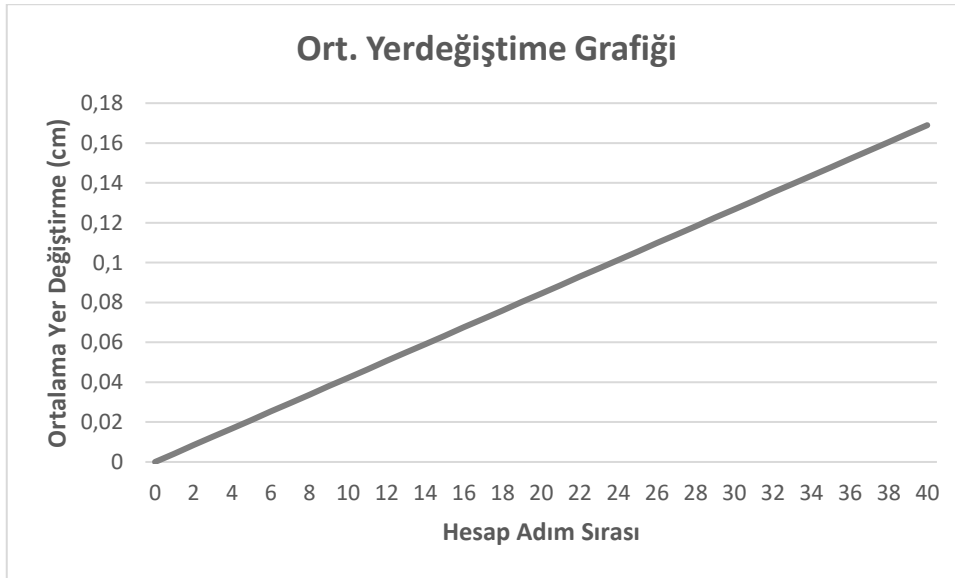
Tablo 6.12 Beşinci modelin elastik cp. malzeme modeli hesabında sol cephesine ait her hesap adımıdaki ortalama değerler

Adım Sırası	Ort. Kuvvet (F-dyne)	Ort. Y.değş. (cm)	Gerilme (σ -dyne/cm ²)	Gerinim (ϵ)
1	3,76E+06	-0,00422297	1,00E+07	0,000422297
2	7,53E+06	-0,00844595	2,01E+07	0,000844595
3	1,13E+07	-0,0126689	3,01E+07	0,00126689
4	1,50E+07	-0,0168919	4,01E+07	0,00168919
5	1,88E+07	-0,0211149	5,01E+07	0,00211149
6	2,25E+07	-0,0253378	6,01E+07	0,00253378
7	2,63E+07	-0,0295608	7,01E+07	0,00295608
8	3,00E+07	-0,0337838	8,01E+07	0,00337838
9	3,38E+07	-0,0380068	9,00E+07	0,00380068
10	3,75E+07	-0,0422297	1,00E+08	0,00422297
11	4,12E+07	-0,0464527	1,10E+08	0,00464527
12	4,50E+07	-0,0506757	1,20E+08	0,00506757
13	4,87E+07	-0,0548986	1,30E+08	0,00548986
14	5,24E+07	-0,0591216	1,40E+08	0,00591216
15	5,61E+07	-0,0633446	1,50E+08	0,00633446
16	5,98E+07	-0,0675676	1,60E+08	0,00675676
17	6,35E+07	-0,0717905	1,69E+08	0,00717905
18	6,72E+07	-0,0760135	1,79E+08	0,00760135
19	7,09E+07	-0,0802365	1,89E+08	0,00802365
20	7,46E+07	-0,0844595	1,99E+08	0,00844595
21	7,83E+07	-0,0886824	2,09E+08	0,00886824
22	8,20E+07	-0,0929054	2,19E+08	0,00929054
23	8,57E+07	-0,0971284	2,29E+08	0,00971284
24	8,94E+07	-0,101351	2,38E+08	0,0101351
25	9,31E+07	-0,105574	2,48E+08	0,0105574

Tablo 6.12'nin devamı

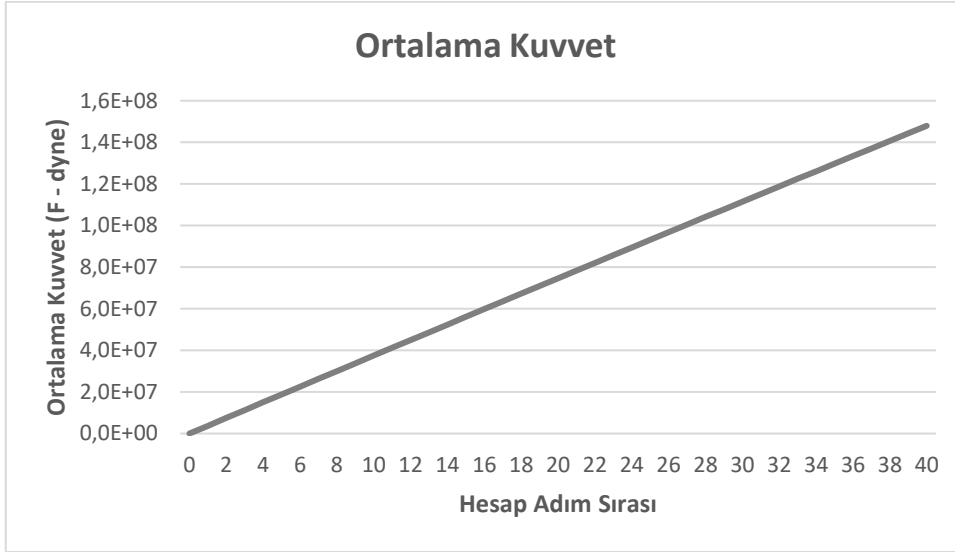
26	9,68E+07	-0,109797	2,58E+08	0,0109797
27	1,00E+08	-0,11402	2,68E+08	0,011402
28	1,04E+08	-0,118243	2,78E+08	0,0118243
29	1,08E+08	-0,122466	2,87E+08	0,0122466
30	1,11E+08	-0,126689	2,97E+08	0,0126689
31	1,15E+08	-0,130912	3,07E+08	0,0130912
32	1,19E+08	-0,135135	3,17E+08	0,0135135
33	1,22E+08	-0,139358	3,26E+08	0,0139358
34	1,26E+08	-0,143581	3,36E+08	0,0143581
35	1,30E+08	-0,147804	3,46E+08	0,0147804
36	1,33E+08	-0,152027	3,56E+08	0,0152027
37	1,37E+08	-0,15625	3,65E+08	0,015625
38	1,41E+08	-0,160473	3,75E+08	0,0160473
39	1,44E+08	-0,164696	3,85E+08	0,0164696
40	1,48E+08	-0,168919	3,94E+08	0,0168919

Elde edilen değerlere göre ortalama yer değişimin her hesap adımına göre değişim grafiği Şekil 6.28'de elde edildiği gibidir. Elde edilen grafiğe göre her hesap adımında ortalama yer değiştirmenin arttığı gözlemlenmektedir.



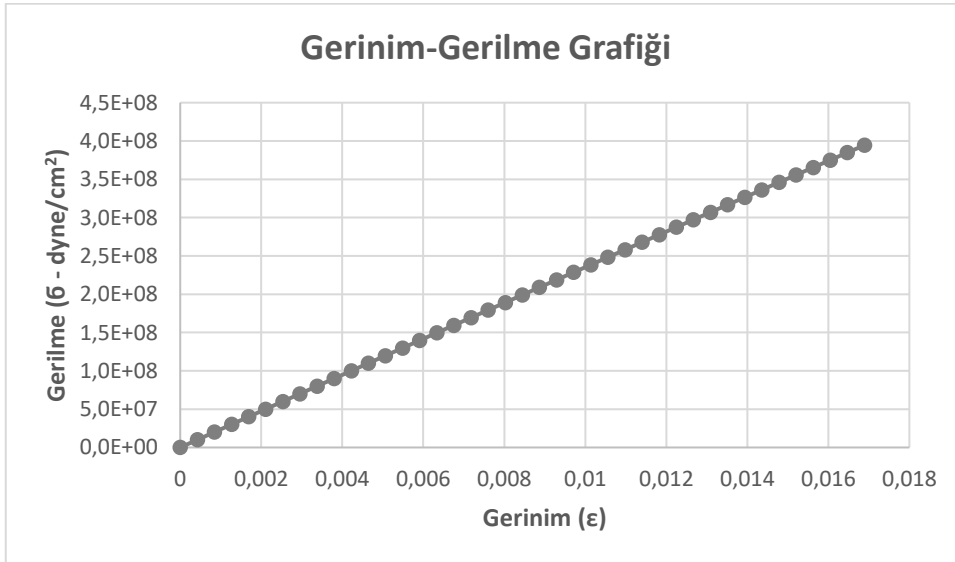
Şekil 6.28 Beşinci modelin elastik cp. malzeme modeli hesaplamasına ait ortalama yer değişimin hesap adım sırasına göre değişim grafiği

Elde edilen değerlere göre uygulanan ortalama kuvvetin her hesap adımına göre değişim grafiği Şekil 6.29’da elde edildiği gibidir. Elde edilen grafiğe göre her hesap adımında ortalama kuvvetin artırıldığı gözlemlenmektedir.



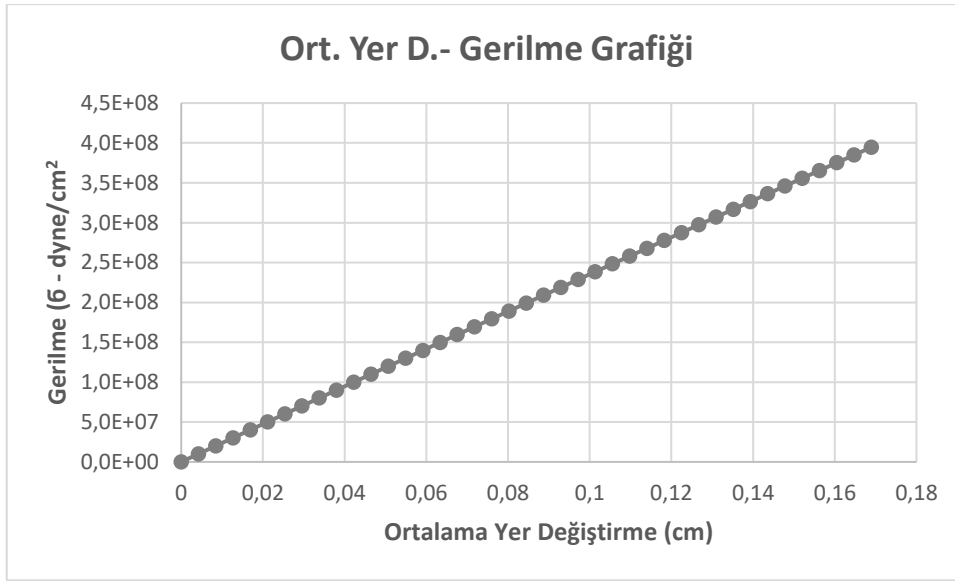
Şekil 6.29 Beşinci modelin elastik cp. malzeme modeli hesaplamasına ait uygulanan ortalama kuvvetin hesap adım sırasına göre değişim grafiği

Elde edilen değerlere göre her hesap adımında elde edilen gerinim ve gerilme değerleri elde edildikleri hesap adımlarına göre grafiği elde edilmek istenildiğinde Şekil 6.30’daki olmaktadır. Elde edilen grafiğe göre değerler birbiriyle doğru orantılı şekilde artmaktadır.



Şekil 6.30 Beşinci modelin elastik cp. malzeme modeli hesaplamasına ait gerinim-gerilme grafiği

Ortalama yer değiştirmenin gerilme ile ilişkisi ise Şekil 6.31’de verilmiştir. İlişkinin birbiriyle doğru orantılı şekilde artış gösterdiği görülmüştür.



Şekil 6.31 Beşinci modelin elastik cp. malzeme modeli hesaplamasına ait ortalama yer değiştirme-gerilme grafiği

6.5.2 Beşinci modelin elastik plastik karşılaştırmalı (correspondence-cp.) malzeme modelinde analiz sonuçları

Kuvvetin uygulandığı sol cephe üzerindeki malzeme noktalarının her hesap adımlarındaki ortalama yer değiştirme, ortalama kuvvet, gerilme ve gerinim değerleri hesaplanmış ve Tablo 6.13'te verilmiştir.

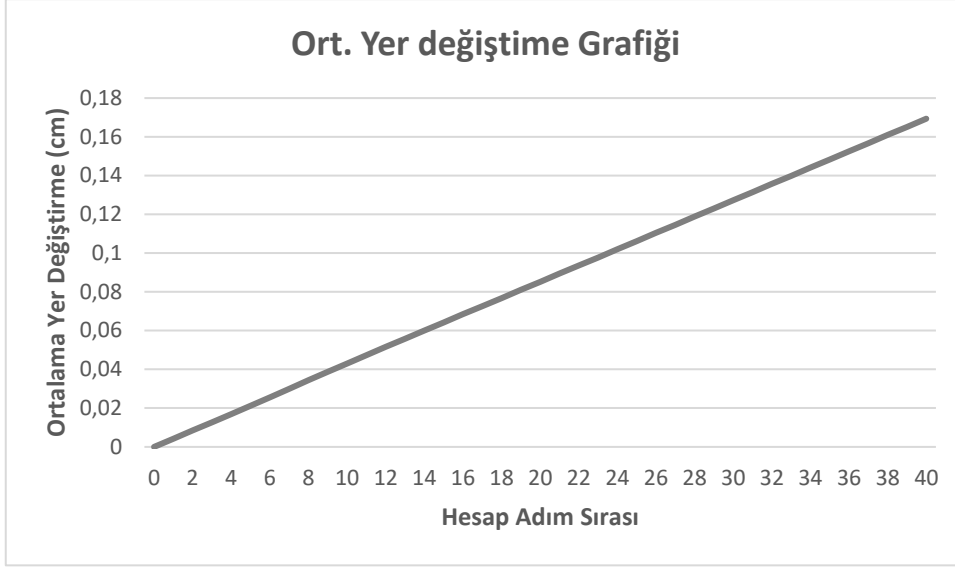
Tablo 6.13 Beşinci modelin elastik-plastik cp. malzeme modeli hesabında sol cephesine ait her hesap adımıdaki ortalama değerler

Adım Sırası	Ort. Kuvvet (F-dyne)	Ort. Y.değş. (cm)	Gerilme (σ -dyne/cm ²)	Gerinim (ϵ)
1	3,76E+06	-0,00422297	1,00E+07	0,0004223
2	7,53E+06	-0,00844595	2,01E+07	0,0008446
3	1,13E+07	-0,0126689	3,01E+07	0,0012669
4	1,45E+07	-0,0168919	3,86E+07	0,0016892
5	1,57E+07	-0,0211149	4,20E+07	0,0021115
6	1,64E+07	-0,0253378	4,36E+07	0,0025338
7	1,68E+07	-0,0295608	4,48E+07	0,0029561
8	1,72E+07	-0,0337838	4,57E+07	0,0033784
9	1,74E+07	-0,0380068	4,64E+07	0,0038007
10	1,76E+07	-0,0422297	4,69E+07	0,004223
11	1,77E+07	-0,0464527	4,72E+07	0,0046453

Tablo 6.13'ün devamı

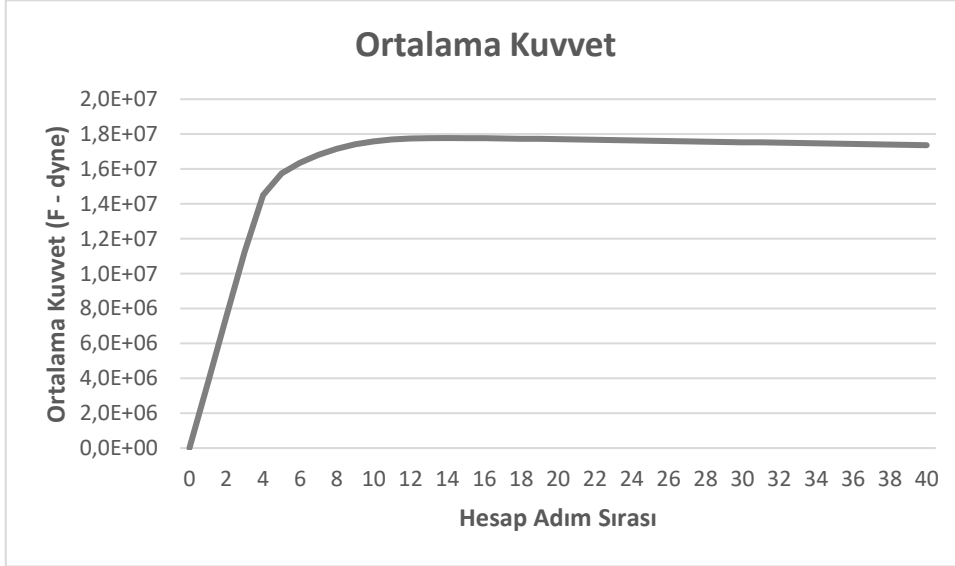
12	1,78E+07	-0,0506757	4,73E+07	0,0050676
13	1,78E+07	-0,0548986	4,74E+07	0,0054899
14	1,78E+07	-0,0591216	4,74E+07	0,0059122
15	1,78E+07	-0,0633446	4,74E+07	0,0063345
16	1,78E+07	-0,0675676	4,74E+07	0,0067568
17	1,77E+07	-0,0717905	4,73E+07	0,0071791
18	1,77E+07	-0,0760135	4,73E+07	0,0076014
19	1,77E+07	-0,0802365	4,73E+07	0,0080237
20	1,77E+07	-0,0844595	4,72E+07	0,008446
21	1,77E+07	-0,0886824	4,72E+07	0,0088682
22	1,77E+07	-0,0929054	4,71E+07	0,0092905
23	1,77E+07	-0,0971284	4,71E+07	0,0097128
24	1,76E+07	-0,101351	4,70E+07	0,0101351
25	1,76E+07	-0,105574	4,70E+07	0,0105574
26	1,76E+07	-0,109797	4,70E+07	0,0109797
27	1,76E+07	-0,11402	4,69E+07	0,011402
28	1,76E+07	-0,118243	4,69E+07	0,0118243
29	1,76E+07	-0,122466	4,68E+07	0,0122466
30	1,75E+07	-0,126689	4,68E+07	0,0126689
31	1,75E+07	-0,130912	4,67E+07	0,0130912
32	1,75E+07	-0,135135	4,67E+07	0,0135135
33	1,75E+07	-0,139358	4,66E+07	0,0139358
34	1,75E+07	-0,143581	4,66E+07	0,0143581
35	1,74E+07	-0,147804	4,65E+07	0,0147804
36	1,74E+07	-0,152027	4,65E+07	0,0152027
37	1,74E+07	-0,15625	4,64E+07	0,015625
38	1,74E+07	-0,160473	4,64E+07	0,0160473
39	1,74E+07	-0,164696	4,63E+07	0,0164696
40	1,74E+07	-0,168919	4,63E+07	0,0168919

Elde edilen değerlere göre ortalama yer değişimin her hesap adımına göre değişim grafiği Şekil 6.32'de elde edildiği gibidir. Elde edilen grafiğe göre her hesap adımında ortalama yer değiştirmenin arttığı gözlemlenmektedir.



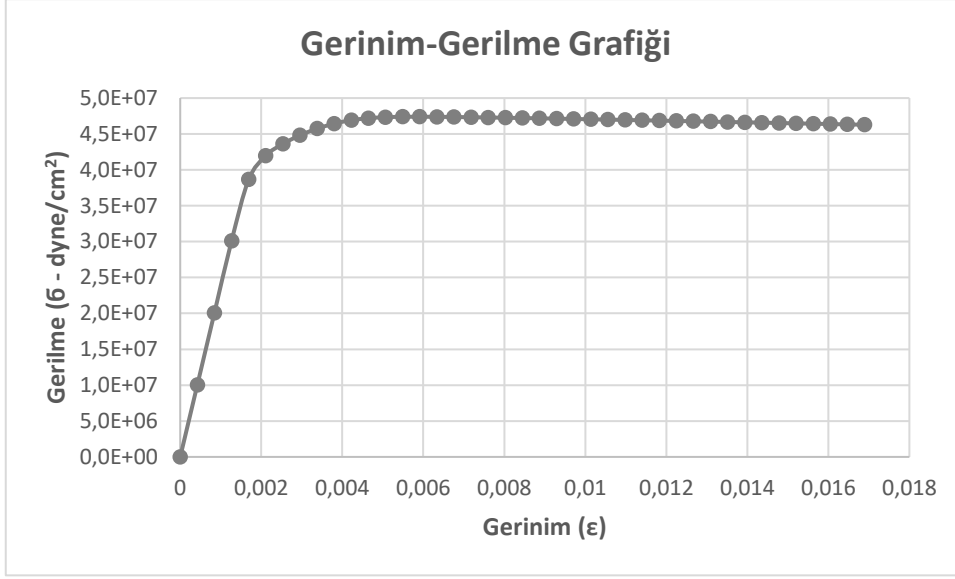
şekil 6.32 Beşinci modelin elastik-plastik cp. malzeme modeli hesaplamasına ait ortalama yer değişimin hesap adım sırasına göre değişim grafiği

Elde edilen değerlere göre uygulanan ortalama kuvvetin her hesap adımına göre değişim grafiği şekil 6.33'te elde edildiği gibidir. Elde edilen grafiğe göre her hesap adımında ortalama kuvvetin 6. adıma kadar arttırıldığı, sonrasında da sabit bir değere yakın bırakıldığı gözlemlenmektedir.



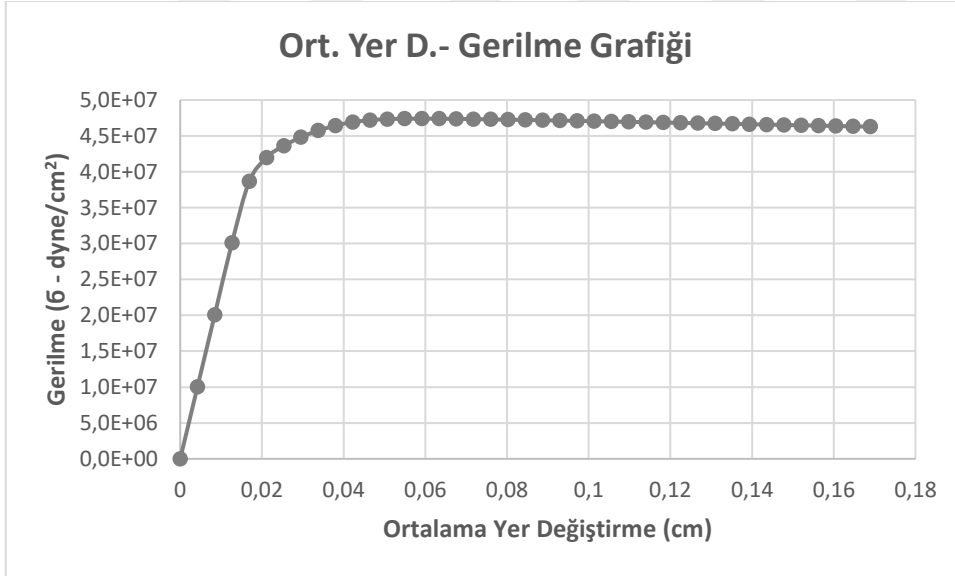
şekil 6.33 Beşinci modelin elastik-plastik cp. malzeme modeli hesaplamasına ait uygulanan ortalama kuvvetin hesap adım sırasına göre değişim grafiği

Elde edilen değerlere göre her hesap adımında elde edilen gerinim ve gerilme değerleri elde edildikleri hesap adımlarına göre grafiği elde edilmek istenildiğinde şekil 6.34'teki olmaktadır. Elde edilen grafiğe göre değerler birbiriyle doğru orantılı şekilde 6. adıma kadar artarken sonrasında sabit bir değere yakın kalmaktadır.



Şekil 6.34 Beşinci modelin elastik-plastik cp. malzeme modeli hesaplamasına ait gerinim-gerilme grafiği

Ortalama yer değiştirmenin gerilme ile ilişkisi ise Şekil 6.35'te verilmiştir. Elde edilen verilere göre iki değer arasındaki ilişki 6. adıma kadar doğru oranlı şekilde artış gösterirken, sonrasında sabit bir değere yakın şekilde kaldığı gözlemlenmiştir.

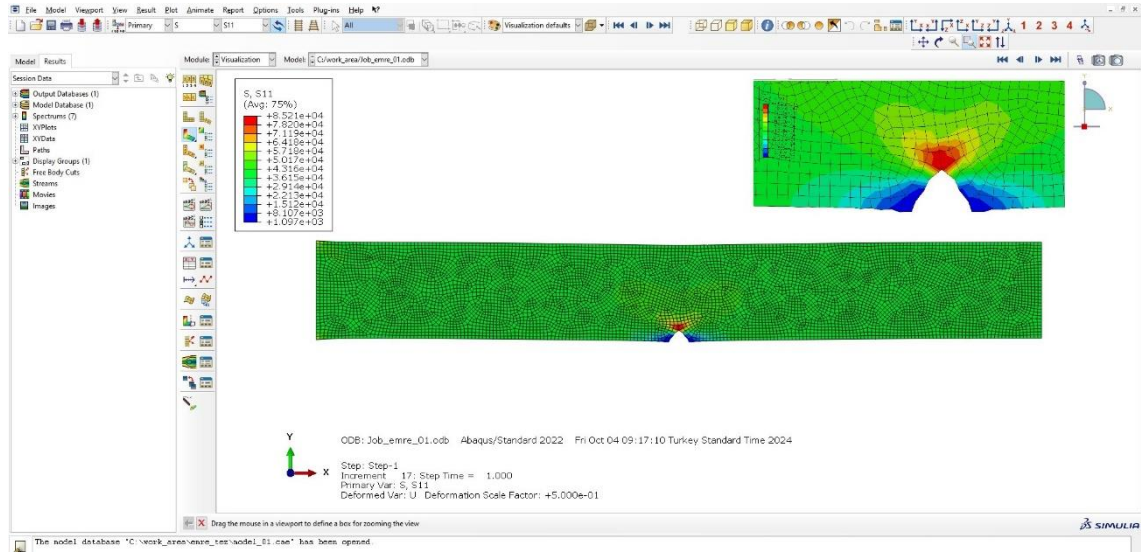


Şekil 6.35 Beşinci modelin elastik-plastik cp. malzeme modeli hesaplamasına ait ortalama yer değiştirme-gerilme grafiği

6.6 Üçüncü Modelin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Tasarımının Analiz Sonuçları ve Yorumlanması

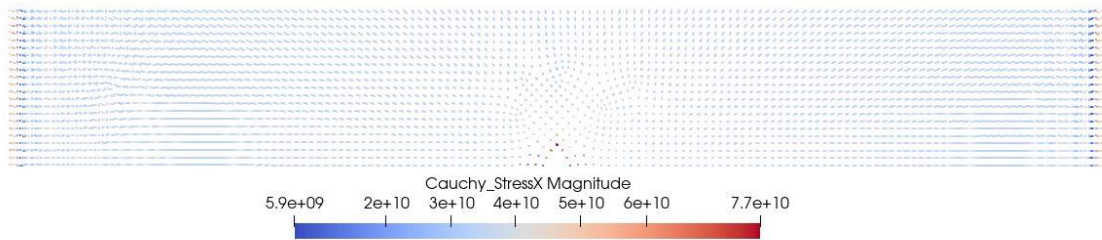
Üçüncü modelin sonlu elemanlar yöntemiyle hesaplanmasının analizinden elde edilen sonuçların yorumlanması için her hesap adımında kuvvetin uygulandığı cephedeki

ortalama yer değiştirme, ortalama kuvvet, gerilme ve gerinim değerleri kullanılmıştır. Analiz sonucunda elde edilen görüntü ve çentik üzerindeki gerilme diyagramı şekil 6.36’da gösterildiği gibidir.



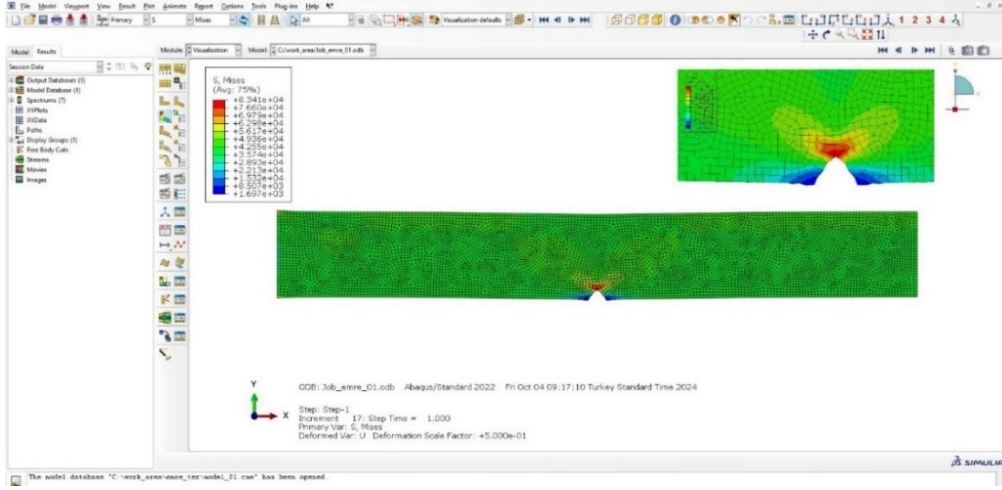
şekil 6.36 nc modelin sonlu elamanlar yöntemiyle hesaplanmasının analizinden elde edilen görüntü ve çentik üzerindeki gerilme diyagramı

nc modelin elastik cp. malzeme modeli hesabındaki analiz sonucunda elde edilen görüntü ve çentik üzerindeki gerilme diyagramı şekil 6.37’de gösterildiği gibidir. Elde edilen sonuçla çentik üzerinde oluşan diyagramın sonlu elamanlar yöntemiyle elde edilen analiz sonuçlarıyla yakın olduğu görülmüştür.



şekil 6.37 nc modelin elastik cp. malzeme modeli hesaplanmasının analizinden elde edilen görüntü ve çentik üzerindeki gerilme diyagramı

Analiz sonucunda elde edilen çentik üzerindeki gerinim diyagramı ise şekil 6.38’de gösterildiği gibidir.



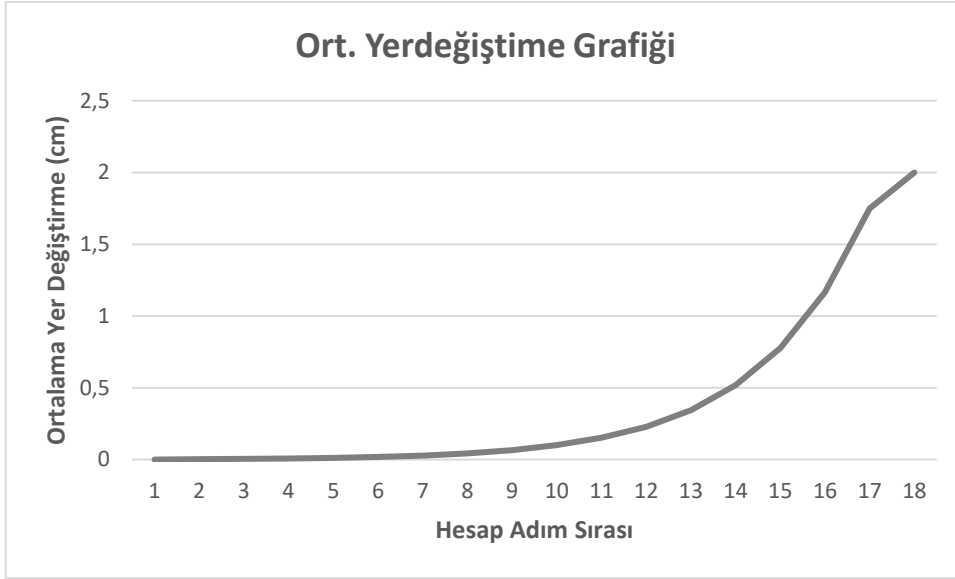
Şekil 6.38 Üçüncü modelin sonlu elamanlar yöntemiyle hesaplanmasının analizinden elde edilen çentik üzerindeki gerilme diyagramı

Üçüncü modelin sonlu elamanlar yöntemiyle hesaplanmasının analizinden elde edilen ortalama gerinim ve gerilme değerler Tablo 6.14’te verilmiştir.

Tablo 6.14 Üçüncü modelin sonlu elamanlar yöntemiyle hesaplanmasının analizinden elde edilen ortalama değerler

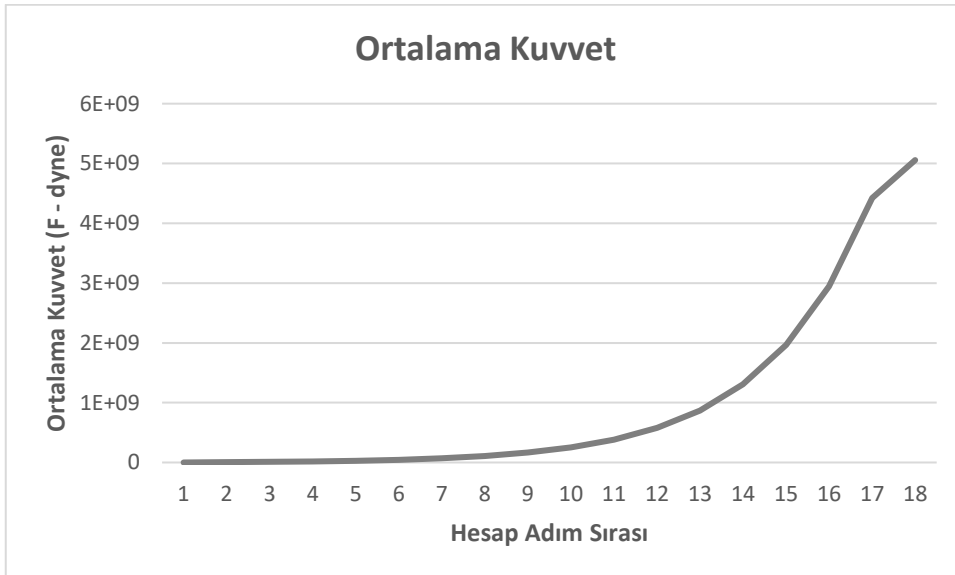
Adım Sırası	Ort. Kuvvet (F-dyne)	Ort. Y.değş. (cm)	Gerilme (σ -dyne/cm ²)	Gerinim (ϵ)
1	5,06E+06	0,002	13483355	0,0002
2	1,01E+07	0,004	26966624	0,0004
3	1,77E+07	0,007	47191570	0,0007
4	2,91E+07	0,0115	77529032	0,00115
5	4,61E+07	0,01825	1,23E+08	0,001825
6	7,17E+07	0,028375	1,91E+08	0,002838
7	1,10E+08	0,0435625	2,94E+08	0,004356
8	1,68E+08	0,0663437	4,47E+08	0,006634
9	2,54E+08	0,100516	6,78E+08	0,010052
10	3,84E+08	0,151773	1,02E+09	0,015177
11	5,78E+08	0,22866	1,54E+09	0,022866
12	8,70E+08	0,34399	2,32E+09	0,034399
13	1,31E+09	0,516985	3,49E+09	0,051699
14	1,96E+09	0,776478	5,23E+09	0,077648
15	2,95E+09	1,16572	7,86E+09	0,116572
16	4,42E+09	1,74958	1,18E+10	0,174958
17	5,06E+09	2	1,35E+10	0,2

Elde edilen değerlere göre ortalama yer değişiminin her hesap adımına göre değişim grafiği Şekil 6.39’da elde edildiği gibidir. Elde edilen grafiğe göre her hesap adımında ortalama yer değiştirmenin arttığı gözlemlenmektedir.



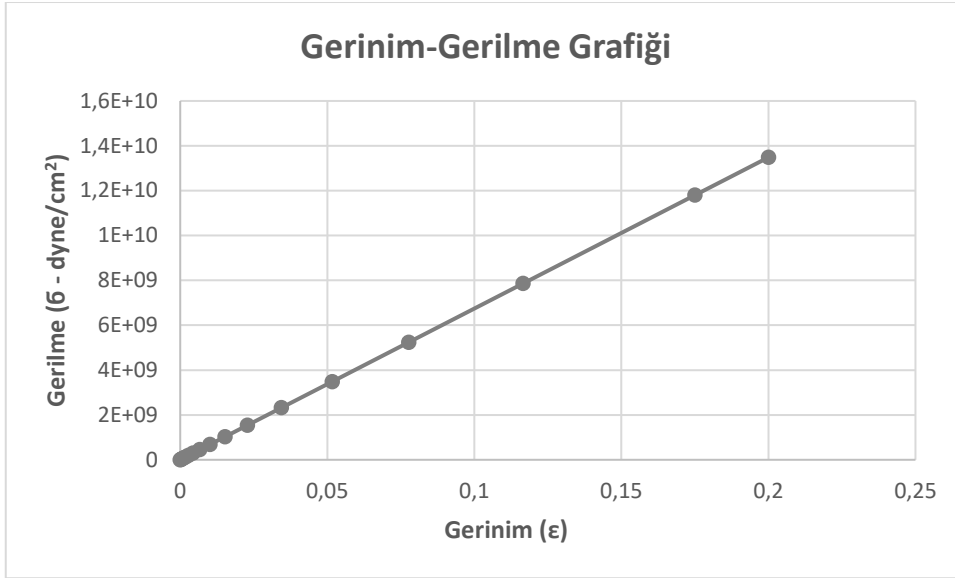
Şekil 6.39 Üçüncü modelin sonlu elamanlar yöntemiyle hesaplanmasının analizinden elde edilen ortalama yer değişiminin hesap adım sırasına göre değişim grafiği

Elde edilen değerlere göre uygulanan ortalama kuvvetin her hesap adımına göre değişim grafiği Şekil 6.40’ta elde edildiği gibidir. Elde edilen grafiğe göre her hesap adımında ortalama kuvvetin artırıldığı gözlemlenmektedir.



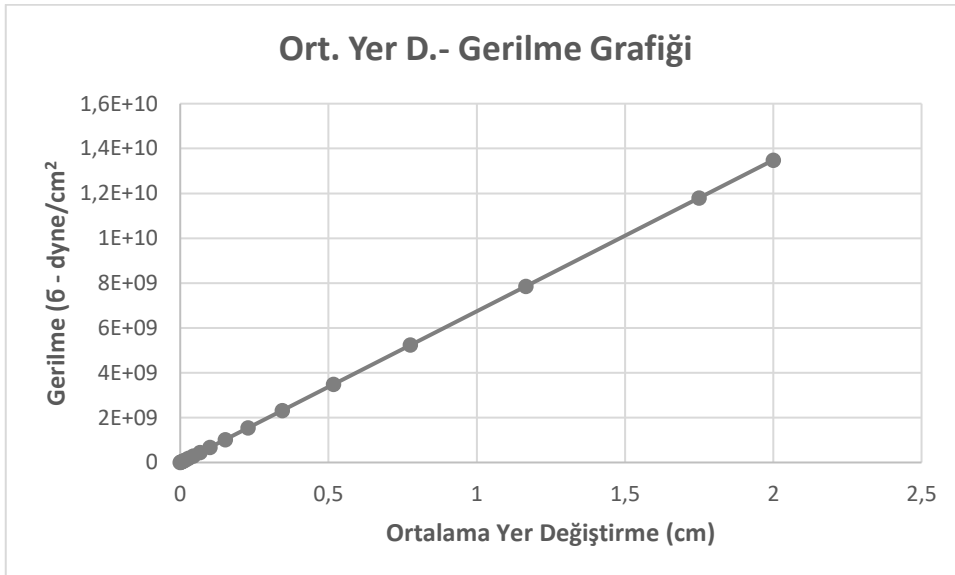
Şekil 6.40 Üçüncü modelin sonlu elamanlar yöntemiyle hesaplanmasının analizinden elde edilen uygulanan ortalama kuvvetin hesap adım sırasına göre değişim grafiği

Elde edilen değerlere göre her hesap adımında elde edilen gerinim ve gerilme değerleri elde edildikleri hesap adımlarına göre grafiği elde edilmek istenildiğinde Şekil 6.41'deki gibi olmaktadır. Elde edilen grafiğe göre değerler birbiriyle doğru orantılı şekilde artmaktadır.



Şekil 6.41 Üçüncü modelin sonlu elamanlar yöntemiyle hesaplanmasının analizinden elde edilen gerinim-gerilme grafiği

Ortalama yer değiştirmenin gerilme ile ilişkisi ise Şekil 6.42'de verilmiştir. İlişkinin birbiriyle doğru orantılı şekilde artış gösterdiği görülmüştür.



Şekil 6.42 Üçüncü modelin sonlu elamanlar yöntemiyle hesaplanmasının analizinden elde edilen ortalama yer değiştirme-gerilme grafiği

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tasarım ve analiz sürecinde beş farklı model tasarlanmıştır. Birinci ve ikinci modeller, hesap sonuçları için en uygun malzeme model hesaplamalarının tespiti için farklı hasarlara sahip modeller üzerinde analizler yapılmıştır. Sonrasında hesap sonuçlarına uygun malzeme modelleri seçilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, sağlıklı karşılaştırmaların yapılabilmesi için elastik karşılaştırmalı (correspondence) ve elastik plastik karşılaştırmalı (correspondence) malzeme model hesaplamaları uygun görülmüştür.

Seçilen malzeme model hesaplarıyla daha basit modellerde karşılaştırma yapılabilmesi için basit düz levha ve üzerinde farklı sayıda çentiklere sahip versiyonları olan üçüncü, dördüncü ve beşinci modeller tasarlanmıştır. Tasarlanan bu modeller üzerinden hesap değerleri incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Bu basit modellerden üçüncü modelin elastik karşılaştırmalı (correspondence) model hesaplaması seçilerek sonlu elemanlar hesap yönteminde analiz yapılmış ve karşılaştırılması yapılmıştır.

Tüm modeller farklı malzeme modellerinde ve durumlarında analiz edilmiştir. Tüm modellerde uygulanan analizler her malzeme modeli için benzer sonuçlar göstermektedir. Tüm modeller için karşılaştırmaz (non-correspondence) malzeme modellerindeki analizleri benzer davranışlar sergileyerek kuvvetin uygulandığı bölgede kopmaların meydana gelmesiyle sonuçlanmaktadır. Bu nedenle çatlak, yarık, çentik ve delik gibi hasarlarda gözlem yapılamamaktadır.

Karşılaştırmaz (non-correspondence) malzeme modellerindeki analizlerde kopmayı meydana getiren etmenler araştırılmıştır. Elastik malzeme modelinde öncelikle uygulanan kuvvet azaltılarak analizler yapılmış, yapılan analizlerde kopmaların tekrar yaşandığı görülmüştür. Hasar (damage) modeli kaldırıldığında ise kopmanın yaşanmadığı fark edilmiştir. Fakat hasar modeli kaldırıldığında malzemeye ne kadar deformasyon uygulanırsa uygulansın uzama devam etmekte ve hasar modeli olmadığı için kopma meydana gelmemektedir.

Tüm modeller için karşılaştırmalı (correspondence) malzeme modellerindeki analizler de benzer davranışlar sergileyerek kopmanın meydana gelmediği, kuvvete bağlı olarak yer

değiştirme ve deformasyonların meydana geldiği sonuçlar elde edilmektedir. Bu sayede malzeme hasar bölgelerinde ve modelin diğer bölgelerinde gözlem yapılabilmektedir.

Karşılaştırmalı (correspondence) malzeme modellerinde sadece sertleşmenin olduğu malzeme modelinde karşılaştırmaz (non-correspondence) malzeme modellerindeki gibi kopmanın meydana geldiği görülmektedir. Fakat bu kopma karşılaştırmaz (non-correspondence) malzeme modellerine göre farklı olmaktadır. İlk etapta kopmadan malzeme noktaları yer değiştirmeye başlamış, ardından koparak ana modelde kalan kısımlar elastik davranış gösterip eski konumlarına dönmüşlerdir.

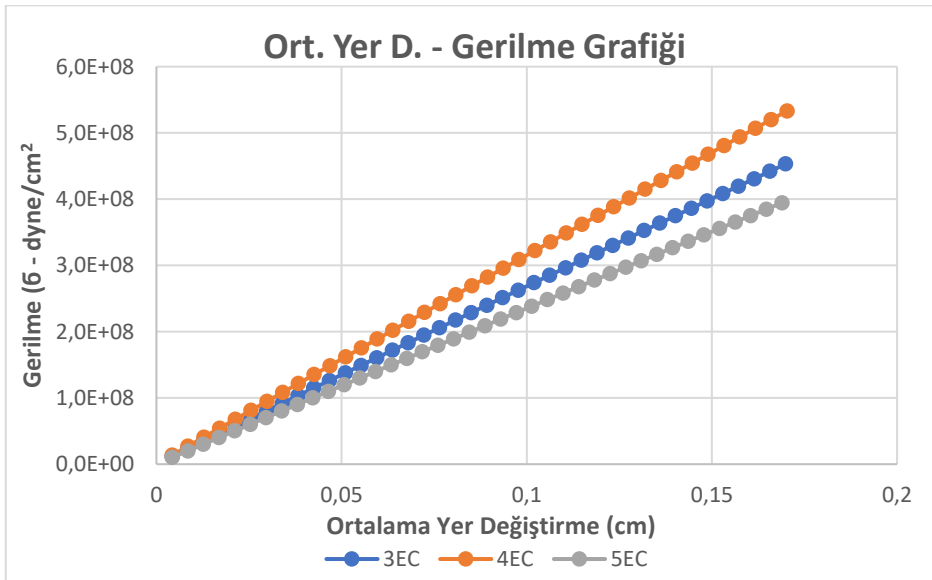
Karşılaştırmalı (correspondence) malzeme modelleriyle yapılan analizlerde malzeme hasarlarının davranışı incelenebilmiştir. Birinci modelde çatlağa göre daha geniş açıklıklı hasarın (yarık), ikinci modelde çatlak görevi yapması istenilen hasara göre daha geniş tutulmuş ve kuvvet uygulandığında yarığın arasının daha fazla açıldığı görülmüştür.

Çatlağın bir diğer etkisinin de bütünsel olduğu görülmüştür. Birinci modelin sol alt-üst köşe noktalarındaki yer değiştirme farkı elastik karşılaştırmalı (correspondence) malzeme modelinde 0,00414 cm iken ikinci modelin sol alt-üst köşe noktalarındaki yer değiştirme farkı 0,000338 cm olduğu görülmektedir. Bu 10 kat farkın çatlakların genişlik ve konum farklılıklarından kaynaklandığı görülmektedir.

İkinci modele açılan dairesel boşlukların modelin nasıl rijitliğine etkisi olduğu analiz edilmiş ve görülmüştür. Dairesel boşluk hasarlarının çekme kuvveti altında malzeme deformasyonu incelendiğinde elastik karşılaştırmalı (correspondence) malzeme modelinde deformasyon yoğunluğunun çatlaktan başlayarak oluştuğu görülmekteyken, elastik plastik karşılaştırmalı (correspondence) malzeme modelinde ise kuvvetin uygulandığı yüzeye en yakın dairesel boşluklardan başlayarak oluştuğu görülmektedir. Benzer durumlar üçüncü ve dördüncü modellerde de görülmektedir. Üçüncü ve dördüncü modellerde elastik karşılaştırmalı (correspondence) malzeme modelinde deformasyon çentiklerin sağ tarafından başlarken, elastik plastik karşılaştırmalı (correspondence) malzeme modelinde çentiklerin olduğu yerde başlamaktadır ve çentiklerin olduğu kısımlarda elastik karşılaştırmalı (correspondence) modeline göre deformasyon daha fazla olmaktadır. Bu sonuçlardan elastik plastik karşılaştırmalı (correspondence) malzeme modeli ile hesaplamalarda deformasyon, kuvvetin uygulandığı yüzeye en yakın malzeme bozukluklarının bulunduğu bölgelerde daha çok yoğunlaştığı görülmektedir. Bu

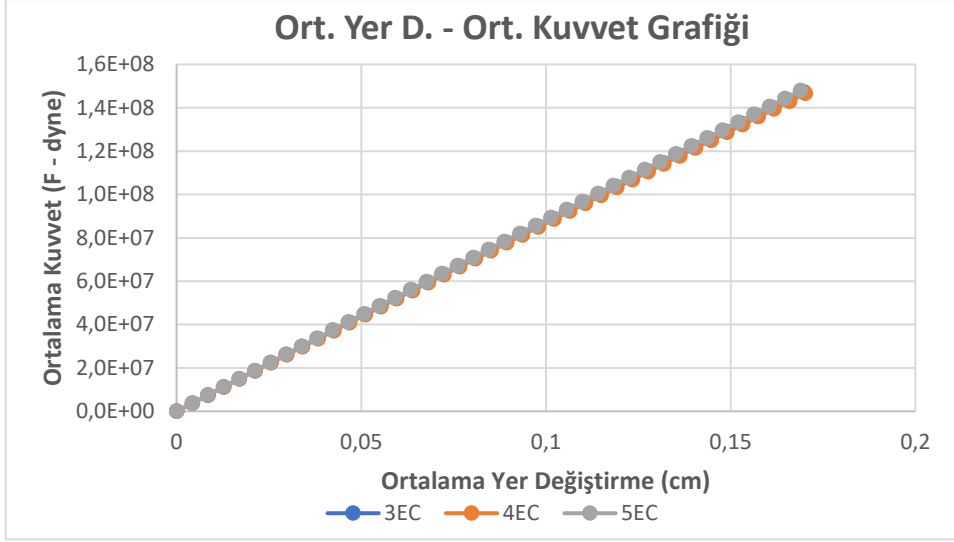
da elastik plastik karşılaştırmalı (correspondence) malzeme yönteminin daha gerçeğe yakın hesap yaptığını göstermektedir. Çünkü malzemeye çekme kuvveti uygulandığında malzeme en zayıf yerden yıpranmaya başlamakta ve yırtılmak ya da kopmak istemektedir.

Üçüncü, dördüncü ve beşinci modellerin elastik karşılaştırmalı (correspondence) malzeme modeli hesabından elde edilen Şekil 7.1’deki ortalama yer değiştirme-gerilme grafiği şekilde görüldüğü gibidir. Diğer modellere göre dördüncü modelde oluşan daha yüksek gerilmenin çentikler sebebiyle kuvvetin etkilediği kesit alanın daha da azalmasından kaynaklanmaktadır. Bu da çentiklerin bulunduğu kesit alanda daha fazla gerilmenin meydana gelmesine ve olumsuzlukların yaşanmasına sebep olmaktadır.



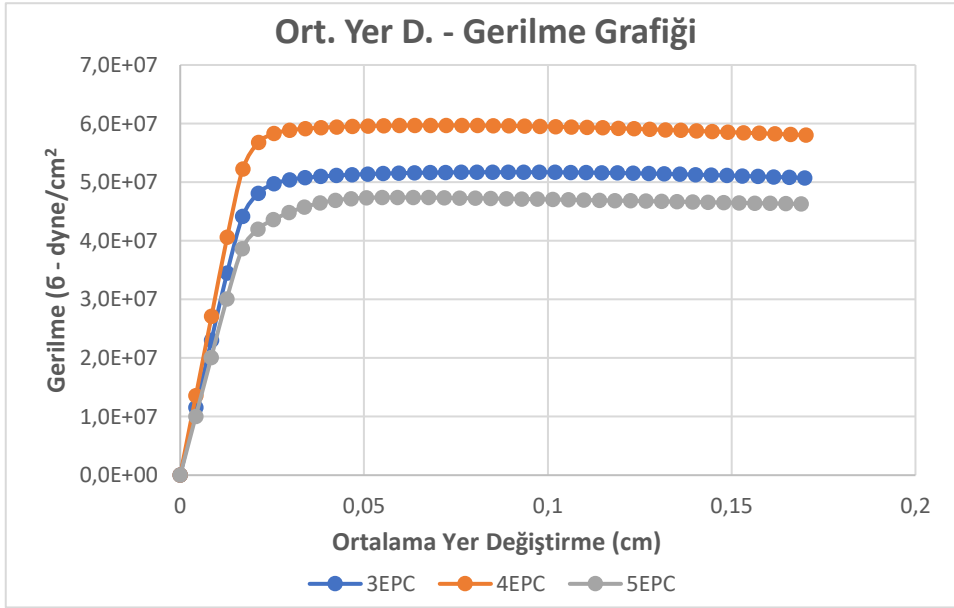
Şekil 7.1 Üçüncü, dördüncü ve beşinci modellerin elastik cp. malzeme model hesaplamasındaki ortalama yer değiştirme-gerilme grafiği karşılaştırılması

Şekil 7.2’de görüldüğü gibi az değer farkları gözlenmesine rağmen dördüncü modelin daha az kuvvet altında bile diğer modellere göre daha fazla yer değişimin olduğu gözlenmiştir. Bunun sebebinin ise iki adet çentiğe sahip olmasıyla daha fazla malzeme hasarına sahip olduğundan kaynaklandığı açıkça anlaşılmaktadır. Bu da malzeme bozukluklarının nasıl negatif sonuçlar verdiğini göstermektedir.



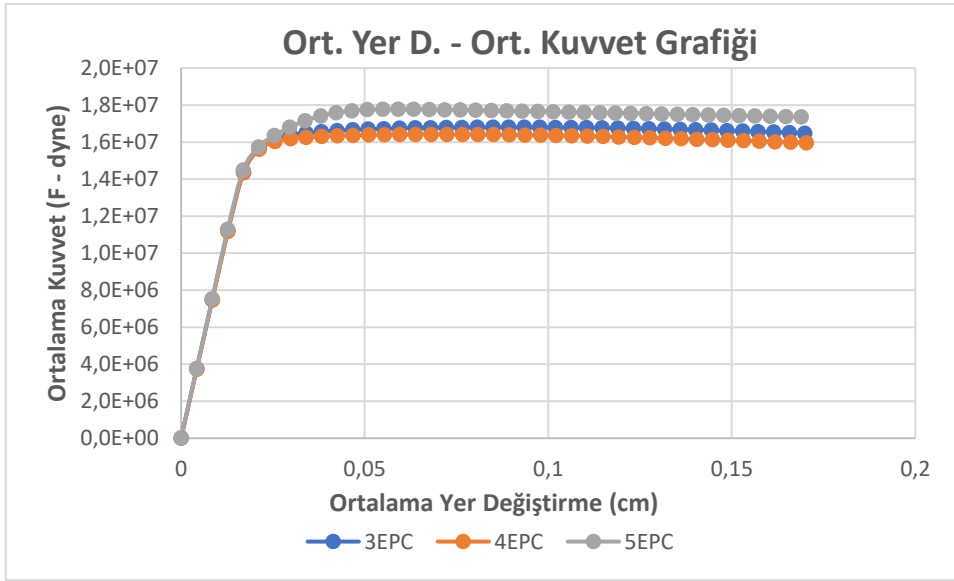
Şekil 7.2 Üçüncü, dördüncü ve beşinci modellerin elastik cp. malzeme model hesaplamasındaki ortalama yer değiştirme - ortalama yer değiştirme grafiği karşılaştırılması

Üçüncü, dördüncü ve beşinci modellerin elastik plastik karşılaştırmalı (correspondence) malzeme modeli hesabından elde edilen Şekil 7.3'teki ortalama yer değiştirme-gerilme grafiği şekilde görüldüğü gibidir. Diğer modellere göre dördüncü modelde oluşan daha yüksek gerilmenin çentikler sebebiyle kuvvetin etkilediği kesit alanın daha da azalmasından kaynaklanmaktadır. Bu da çentiklerin bulunduğu kesit alanda daha fazla gerilmenin meydana gelmesine ve olumsuzlukların yaşanmasına sebep olmaktadır.



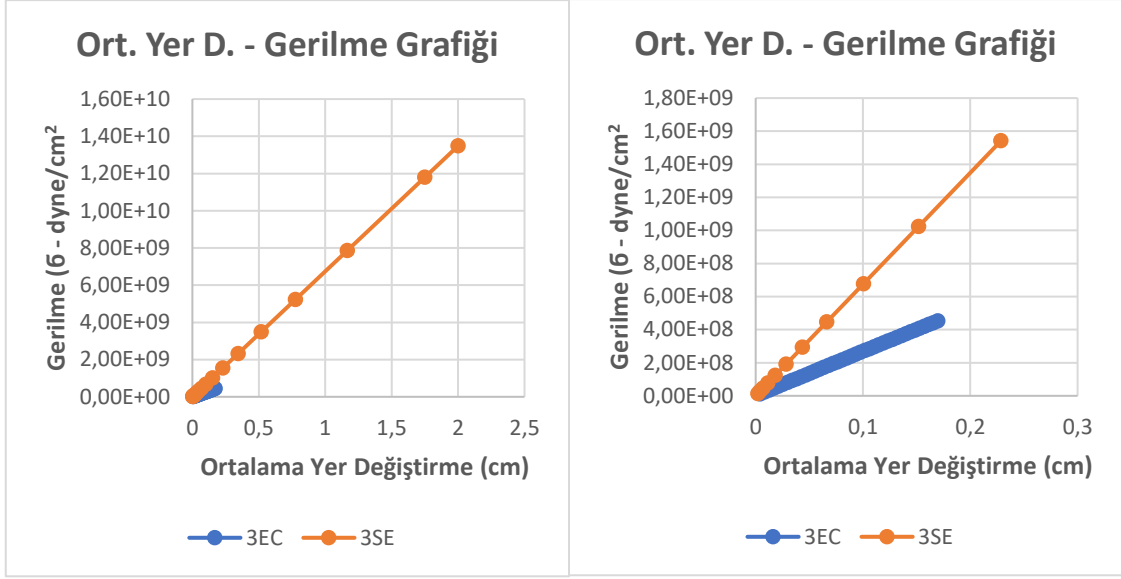
Şekil 7.3 Üçüncü, dördüncü ve beşinci modellerin elastik plastik cp. malzeme model hesaplamasındaki ortalama yer değiştirme-gerilme grafiği karşılaştırılması

Sekil 7.4'te görüldüğü gibi az değer farkları gözlenmesine rağmen dördüncü modelin daha az kuvvet altında bile diğer modellere göre daha fazla yer değişimin olduğu gözlenmiştir. Bunun sebebinin ise iki adet çentiğe sahip olmasıyla daha fazla malzeme hasarına sahip olduğundan kaynaklandığı açıkça anlaşılmaktadır. Bu da malzeme bozukluklarının nasıl negatif sonuçlar verdiğini göstermektedir. Dikkat çeken bir diğer fark ise üç model arasındaki fark elastik plastik cp. malzeme modelinde daha fazla olmasıdır. Bu da bu modelin malzeme hasarlarına karşı elastik cp. malzeme modeline göre daha hassas davranış sergilediğini göstermektedir.



Şekil 7.4 Üçüncü, dördüncü ve beşinci modellerin elastik plastik cp. malzeme model hesaplamasındaki ortalama yer değiştirme - ortalama kuvvet grafiği karşılaştırılması

Seçilen üçüncü modelin elastik karşılaştırmalı (correspondence) malzeme modeli için sonlu elemanlar yöntemi ile analiz yapılmıştır. Çıkan sonuçlar karşılaştırıldığında Şekil 7.5'teki grafik elde edilmektedir. Elde edilen grafikte peridinamik yöntemle çözüm grafiği sonlu elamanlar yöntemiyle elde edilen çizelge yanında küçük kalsa da gerilme karşısında paralel yakın hareket ettiği görülmektedir. Sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen grafik çizelgesinin büyük çıkmasının sebebi ise çözüm sırasında analizin daha büyük deplasmanlarla daha büyük kuvvetler oluşturularak hesap yapılmasından kaynaklanmaktadır. Görüldüğü üzere kuvvet artıkça oranlı olarak iki yöntemle de yakın davranışlar göstererek, ortalama yer değiştirmede artış görülmektedir.



Şekil 7.5 Üçüncü modelin peridinamik yöntemle elastik malzeme model hesaplamasındaki ortalama yer değiştirme-gerilme grafiğinin sonlu elemanlar yöntemiyle karşılaştırılması (3EC: üçüncü modelin elastik cp. malzeme modelinde hesabı, 3SE: üçüncü modelin sonlu elemanlar yöntemiyle hesabı)

Genel olarak bakıldığında karşılaştırmalı (correspondence) malzeme modelleriyle yapılan analizlerde modelin ve malzeme bozukluklarındaki davranışların gerçeğe yakın davranışlar gösterdiği görülmüştür. Karşılaştırmaz (non-correspondence) malzeme modelleriyle yapılan analizlerde analizin başında oluşan kopmalardan dolayı sağlıklı analiz yapılamamıştır. Bu durumun birçok nedenin olabileceği düşünülmektedir. Kullanılan modelin formatı veya ağ yapısı bu model analizlerine uygun olmayabilirliği ya da Peridigm kullanım kılavuzunda bu malzeme modelleri için gerekli özel kod dizimi eksikliği olabileceği düşünülmektedir.

Analizlerden görüldüğü üzere farklı modellerde farklı malzeme bozukluklarının (çatlak, yırtık, delik çentik vb.) etkiyen kuvvet karşısında malzemede nasıl negatif etkiler yarattığı yeni bir yöntem olan peridinamik yöntemle gözlenmektedir. Bu bozukluklar farklı malzeme model hesaplamalarında farklı etkilerde bulunmaktadır. Bu etkiler analiz sonuçlarında görülmüştür.

Sonuç olarak; karşılaştırmalı (correspondence) malzeme modelleriyle yapılan analizlerde elde edilen sonuçlarla yeni bir yöntem olan peridinamik yöntemin Peridigm yazılımıyla sağlıklı analiz yapılabileceğine ve sonuçlar elde edilebileceği sonucuna varılmıştır. Yeni ve gelişmekte olan bu yöntemle yapılan hesaplar daha gerçekçi hesap yapabileceği gibi farklı durumlarda yanlış sonuçlar da verebilme potansiyeline sahiptir. Karşılaştırmalı

(correspondence) malzeme modellerinde, klasik sürekli mekanik modellerle doğrudan bir karşılaştırma yapılsa da peridinamik yöntem yeni ve gelişmekte olan bir yöntem olduğu için hesapların bir de sonlu elemanlar yöntemi gibi klasik yöntemlerle karşılaştırması önerilmektedir.



KAYNAKLAR

- Abraham, F. F. (2002). *Very large scale simulations of materials failure*. *Philos. Trans. A. Math. Phys. Eng. Sci.*, 360(1792), 367–382.
- Abaqus, G. (2011). *Abaqus 6.11*. Dassault Systemes Simulia Corporation, Providence, RI, USA, 3.
- Anderson, T. (2005). *Fracture mechanics, fundamentals and applications*. New York, USA, pp: 43-66.
- Armağan, M. (2011). *Politetrafluoroetilen malzemede darbe kırılma tokluğunun esas kırılma işi metoduyla incelenmesi*. [Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli Üniversitesi].
- Ayachit, U. (2015). *The paraview guide: a parallel visualization application*. Kitware, Inc.
- Başoğlu, M. F. (2021). *İzotropik ve Kompozit Plaklarda Mikro Çatlak Toklaşmasının Peridinamik Teorisiyle İncelenmesi* [Doktora Tezi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Ondokuz Mayıs Üniversitesi].
- Belytschko, T., & Black, T. (1999). *Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing*. *International journal for numerical methods in engineering*, 45(5), 601–620.
- Cemal Eringen, A., & Kim, B. S. (1974). Stress concentration at the tip of crack. *Mechanics Research Communications*, 1(4), 233-237.
- Coreform Cubit (2020). Coreform Cubit, Erişim: 10 Mayıs 2024, <https://coreform.com/products/coreform-cubit/>
- Docker, I. (2020). Docker. linea].[Junio de 2017]. Disponible en: <https://www.docker.com/what-docker>.
- Dorduncu, M., Borut, A., & Madenci, E. (2015). *Ordinary-State Based Peridynamic Truss Element*. 56th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2015-0465>
- Eringen, A. C. (1972). *Nonlocal polar elastic continua*, *International Journal of Engineering Science*, 10(1). pp. 1–16.
- Hillerborg, A., Modéer, M., & 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.
- Janssen, M., Zuidema, J., & Wanhill, R. (2005). *Fracture Mechanics* (Second Edition), Taylor & Francis e-Library Publishers, 8-107.
- Kaya, Z. (2022). *S-Cam/Epoksi Tabakalı Kompozitlerin Farklı Sıcaklıklar ve Deformasyon Hızlarındaki Statik ve Kırılma Davranışlarının Belirlenmesi* [Doktora Tezi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Uşak Üniversitesi].
- Kundi, A. (2018). *Sonlu elemanlar yöntemiyle dişli kırılma analizi* [Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Uludağ Üniversitesi].
- Lewicki, G. (1995). *Crack propagation studies to determine benign or catastrophic failure modes for aerospace thin-rim gears* [Ph.D. Thesis, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Case Western Reserve University, USA].
- Madenci, E., & Oterkus, E. (2014). *Peridynamic Theory and Its Applications*, New York: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-8465-3>
- Miell, I., & Sayers, A. (2019). *Docker in practice*, Simon and Schuster.

- Mugilan, M., Devendra, K. S., Danish, M., & Prabu, S. S. (2022). *Investigation on thermal analysis of disc brake using Autodesk Fusion 360*, Materials Today: Proceedings, 65, 3707-3713.
- O'Dowd, N. (2002). *Advanced Fracture Mechanics*, Imperial College London Department of Mechanical Engineering, 9-20.
- Olmuş, İ. (2022). *Bir yönlü fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların kırılma davranışlarının peridinamik teorisi kullanılarak incelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Parks, M. L., Littlewood, D. J., Mitchell, J. A., & Silling, S. A. (2012). *Peridigm users' guide*. V1. 0.0 (No. SAND2012-7800), Sandia National Laboratories (SNL), Albuquerque, NM, and Livermore, CA (United States).
- Ramose, M. B. (2014). *Ubuntu*, In Degrowth (pp. 212-214). Routledge.
- Rädel, M., Bednarek, A. J., Schmidt, J., & Willberg, C. (2017). *Peridynamics: Convergence & influence of probabilistic material distribution on crack initiation*, 6th ECCOMAS Themat. Conf. Mech. Response Compos, p.26.
- Rädel, M., & Willberg, C. (2018). *Peridigm Installation Guide*.
- Saouma, V.E. (2000). *Lecture Notes in Fracture Mechanics*, Department of Civil Environmental and Architectural Engineering, University of Colorado, 100-104.
- Silling, S. A. (2000). *Reformulation of elasticity theory for discontinuities and longrange forces*. *J. Mech. Phys Solids*, 48(1), 175-209.
- Silling, S. A., & Askari, E. (2005). *A meshfree method based on the peridynamic model of solid mechanics*. *Computers and structures*, 83(17-18), 1526-1535.
- Silling, S. A., Epton, M., Weckner, O., Xu, J., & Askari, E. (2007). *Peridynamic States and Constitutive Modeling*. *Journal of Elasticity*, 88(2), 151-184. <https://doi.org/10.1007/s10659-007-9125-1>
- Sorucu, A. (2007). *Orthotropic malzemelerde çatlak ilerlemesi ve kırılma tokluğu tayini* [Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilim. Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, Mek. Anabilim Dalı], 89.
- Taştan, A. (2016). *Çekme ve eğilme yükleri altındaki izotropik ve kompozit yapılarda hasarı tahmin eden bağ bazlı peridinamik teoriyi kullanan bir yöntem geliştirilmesi* [Yüksek Lisans Tezi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik ve Fen bilimleri enstitüsü].
- Uğuz, A. (1996). *Kırılma Mekaniğine Giriş* (Birinci Baskı), Uludağ Üniversitesi Basımevi, 1-80.
- Verma, G. (2018). *Autodesk fusion 360 black book*, BPB Publications.
- Willberg, C., Hesse, J. T., Garbade, M., Rädel, M., Heinecke, F., Schuster, A., & Pernatii, A. (2023). *A user material interface for the Peridynamic Peridigm framework*. *SoftwareX*, 21, 101322.
- Williams, M. L. (1961). *The Bending Stress Distribution at the Base of a Stationary Crack*, *Journal of Applied Mechanics*, 28(1). pp. 78.
- Yayla, P. (2007). *Kırılma Mekaniği* (Birinci Baskı), Çağlayan Kitabevi, 1-96.

EKLER

EK 1. “tensile_test_07Bet10.yaml” dosyasının kod dizilimi

Peridigm:

```
# Description
# Simulation of an elastic tensile bar subjected to 0.5% strain.
# Engineering strain is estimated by tracking the elongation of a
# segment of the bar using the Nearest_Point_Data compute class.
# Engineering stress is estimated by tracking the reaction forces
# in the end segments of the bar using the Block_Data compute class.
# Using the data computed by the compute classes, engineering strain
# can be determined as the change in length divided by the initial
# length, and engineering stress as the force in an end segment
# divided by the initial cross-sectional area.
# Units are CGS
# mass      g
# length    cm
# time      s
# density    g/cm^3
# force      dyne
# pressure   dyne/cm^2
# velocity   cm/s
# acceleration cm/s^2
# energy     erg
```

Verbose: false

Discretization:

Type: "Exodus"

Input Mesh File: "block_7B.g"

Materials:

My Material:

Material Model: "Elastic"

Density: 7.8

Bulk Modulus: 175.833e10

Shear Modulus: 81.154e10

Damage Models:

My Damage Model:

Damage Model: "Critical Stretch"

Critical Stretch: 0.0002594

Blocks:

My Block:

Block Names: "block_1"

Material: "My Material"

Damage Model: "My Damage Model"

Horizon: 0.5798

Boundary Conditions:

Prescribed Displacement Top:
Type: "Prescribed Displacement"
Node Set: "NodeSet_1"
Coordinate: "x"
Value: "-0.05*x*t"
Prescribed Displacement Fix Bottom Rigid Body Motion In X:
Type: "Prescribed Displacement"
Node Set: "NodeSet_2"
Coordinate: "x"
Value: "0.0"

Solver:
Verbose: false
Initial Time: 0.0
Final Time: 10.0
QuasiStatic:
Number of Load Steps: 40
Absolute Tolerance: 1.0
Maximum Solver Iterations: 100

Compute Class Parameters:
Top Reaction Force:
Compute Class: "Block_Data"
Calculation Type: "Sum"
Block: "block_1"
Variable: "Force"
Output Label: "Top_Reaction_Force"
Bottom Reaction Force:
Compute Class: "Block_Data"
Calculation Type: "Sum"
Block: "block_1"
Variable: "Force"
Output Label: "Bottom_Reaction_Force"

Output:
Output File Type: "ExodusII"
Output Filename: "yirtik_out7Bet10"
Output Frequency: 1
Output Variables:
Displacement: true
Velocity: true
Acceleration: true
Element_Id: true
Proc_Num: true
Force_Density: true
Force: true
Volume: true
Damage: true
Top_Reaction_Force: true
Bottom_Reaction_Force: true
Deformation_Gradient: true
Radius: true
Number_Of_Neighbors: true
Neighborhood_Volume: true

EK 2. “tensile_test_07Bet50.yaml” dosyasının kod dizilimi

Peridigm:

Verbose: false

Discretization:

Type: "Egodur"

Input Mesh File: "block_7B.g"

Materials:

My Material:

Material Model: "Elastic"

Density: 7.8

Bulk Modulus: 175.833e10

Shear Modulus: 81.154e10

Damage Models:

My Damage Model:

Damage Model: "Critical Stretch"

Critical Stretch: 0.0002594

Blocks:

My Block:

Block Names: "block_1"

Material: "My Material"

Damage Model: "My Damage Model"

Horizon: 0.5798

Boundary Conditions:

Prescribed Displacement Top:

Type: "Prescribed Displacement"

Node Set: "NodeSet_1"

Coordinate: "x"

Value: "-0.01*x*t"

Prescribed Displacement Fix Bottom Rigid Body Motion In X:

Type: "Prescribed Displacement"

Node Set: "NodeSet_2"

Coordinate: "x"

Value: "0.0"

Solver:

Verbose: false

Initial Time: 0.0

Final Time: 10.0

QuasiStatic:

Number of Load Steps: 40

Absolute Tolerance: 1.0

Maximum Solver Iterations: 100

Compute Class Parameters:

Top Reaction Force:

Compute Class: "Block_Data"

Calculation Type: "Sum"

Block: "block_1"

Variable: "Force"
Output Label: "Top_Reaction_Force"
Bottom Reaction Force:
Compute Class: "Block_Data"
Calculation Type: "Sum"
Block: "block_1"
Variable: "Force"
Output Label: "Bottom_Reaction_Force"

Output:

Output File Type: "ExodusII"
Output Filename: "yirtik_out7Bet50"
Output Frequency: 1
Output Variables:
Displacement: true
Velocity: true
Acceleration: true
Element_Id: true
Proc_Num: true
Force_Density: true
Force: true
Volume: true
Damage: true
Top_Reaction_Force: true
Bottom_Reaction_Force: true
Deformation_Gradient: true
Radius: true
Number_Of_Neighbors: true
Neighborhood_Volume: true

EK 3. “tensile_test_07Betds.yaml” dosyasının kod dizilimi

Peridigm:

Verbose: false

Discretization:

Type: "Exodus"

Input Mesh File: "block_7B.g"

Materials:

My Material:

Material Model: "Elastic"

Density: 7.8

Bulk Modulus: 175.833e10

Shear Modulus: 81.154e10

Blocks:

My Block:

Block Names: "block_1"

Material: "My Material"

Horizon: 0.5798

Boundary Conditions:

Prescribed Displacement Top:

Type: "Prescribed Displacement"

Node Set: "NodeSet_1"

Coordinate: "x"

Value: "-0.5*x*t"

Prescribed Displacement Fix Bottom Rigid Body Motion In X:

Type: "Prescribed Displacement"

Node Set: "NodeSet_2"

Coordinate: "x"

Value: "0.0"

Solver:

Verbose: false

Initial Time: 0.0

Final Time: 10.0

QuasiStatic:

Number of Load Steps: 40

Absolute Tolerance: 1.0

Maximum Solver Iterations: 100

Compute Class Parameters:

Top Reaction Force:

Compute Class: "Block_Data"

Calculation Type: "Sum"

Block: "block_1"

Variable: "Force"

Output Label: "Top_Reaction_Force"

Bottom Reaction Force:

Compute Class: "Block_Data"

Calculation Type: "Sum"

Block: "block_1"

Variable: "Force"

Output Label: "Bottom_Reaction_Force"

Output:

Output File Type: "ExodusII"

Output Filename: "yirtik_out7Betds"

Output Frequency: 1

Output Variables:

Displacement: true

Velocity: true

Acceleration: true

Element_Id: true

Proc_Num: true

Force_Density: true

Force: true

Volume: true

Top_Reaction_Force: true

Bottom_Reaction_Force: true

Deformation_Gradient: true

Radius: true

Number_Of_Neighbors: true

Neighborhood_Volume: true

EK 4. “tensile_test_07Bect.yaml” dosyasının kod dizilimi

Peridigm:

Verbose: false

Discretization:

Type: "Exodus"

Input Mesh File: "block_7B.g"

Materials:

My Material:

Material Model: "Elastic Correspondence"

Density: 7.8

Bulk Modulus: 175.833e10

Shear Modulus: 81.154e10

Hourglass Coefficient: 0.02

Damage Models:

My Damage Model:

Damage Model: "Critical Stretch"

Critical Stretch: 0.0002594

Blocks:

My Block:

Block Names: "block_1"

Material: "My Material"

Damage Model: "My Damage Model"

Horizon: 0.5798

Boundary Conditions:

Prescribed Displacement Top:

Type: "Prescribed Displacement"

Node Set: "NodeSet_1"

Coordinate: "x"

Value: "-0.5*x*t"

Prescribed Displacement Fix Bottom Rigid Body Motion In X:

Type: "Prescribed Displacement"

Node Set: "NodeSet_2"

Coordinate: "x"

Value: "0.0"

Solver:

Verbose: false

Initial Time: 0.0

Final Time: 10.0

QuasiStatic:

Number of Load Steps: 40

Absolute Tolerance: 1.0

Maximum Solver Iterations: 100

Compute Class Parameters:

Top Reaction Force:

Compute Class: "Block_Data"

Calculation Type: "Sum"

Block: "block_1"
Variable: "Force"
Output Label: "Top_Reaction_Force"
Bottom Reaction Force:
Compute Class: "Block_Data"
Calculation Type: "Sum"
Block: "block_1"
Variable: "Force"
Output Label: "Bottom_Reaction_Force"

Output:

Output File Type: "ExodusII"
Output Filename: "yirtik_out7Bect"
Output Frequency: 1
Output Variables:
Displacement: true
Velocity: true
Acceleration: true
Element_Id: true
Proc_Num: true
Force_Density: true
Hourglass_Force_Density: true
Force: true
Volume: true
Damage: true
Top_Reaction_Force: true
Bottom_Reaction_Force: true
Deformation_Gradient: true
Cauchy_Stress: true
Radius: true
Number_Of_Neighbors: true
Neighborhood_Volume: true

EK 5. “tensile_test_07Bept.yaml” dosyasına ait kod dizilimi

Peridigm:

Verbose: false

Discretization:

Type: "Exodus"

Input Mesh File: "block_7B.g"

Materials:

My Material:

Material Model: "Elastic Plastic"

Density: 7.8

Bulk Modulus: 175.833e10

Shear Modulus: 81.154e10

Yield Stress: 4.2e9

Disable Plasticity: true

Apply Shear Correction Factor: false

Damage Models:

My Damage Model:

Damage Model: "Critical Stretch"

Critical Stretch: 0.0002594

Blocks:

My Block:

Block Names: "block_1"

Material: "My Material"

Damage Model: "My Damage Model"

Horizon: 0.5798

Boundary Conditions:

Prescribed Displacement Top:

Type: "Prescribed Displacement"

Node Set: "NodeSet_1"

Coordinate: "x"

Value: "-0.5*x*t"

Prescribed Displacement Fix Bottom Rigid Body Motion In X:

Type: "Prescribed Displacement"

Node Set: "NodeSet_2"

Coordinate: "x"

Value: "0.0"

Solver:

Verbose: false

Initial Time: 0.0

Final Time: 10.0

QuasiStatic:

Number of Load Steps: 40

Absolute Tolerance: 1.0

Maximum Solver Iterations: 100

Compute Class Parameters:

Top Reaction Force:

Compute Class: "Block_Data"
Calculation Type: "Sum"
Block: "block_1"
Variable: "Force"
Output Label: "Top_Reaction_Force"
Bottom Reaction Force:
Compute Class: "Block_Data"
Calculation Type: "Sum"
Block: "block_1"
Variable: "Force"
Output Label: "Bottom_Reaction_Force"

Output:

Output File Type: "ExodusII"
Output Filename: "yirtik_out7Bept"
Output Frequency: 1
Output Variables:
Displacement: true
Velocity: true
Acceleration: true
Element_Id: true
Proc_Num: true
Force_Density: true
Force: true
Dilatation: true
Weighted_Volume: true
Volume: true
Damage: true
Top_Reaction_Force: true
Bottom_Reaction_Force: true
Deformation_Gradient: true
Radius: true
Number_Of_Neighbors: true
Neighborhood_Volume: true

EK 6. “tensile_test_07Bepct.yaml” dosyasına ait kod dizilimi

Peridigm:

Verbose: false

Discretization:

Type: "Exodus"

Input Mesh File: "block_7B.g"

Materials:

My Material:

Material Model: "Elastic Plastic Correspondence"

Density: 7.8

Young's Modulus: 211.0e10

Poisson's Ratio: 0.3

Hourglass Coefficient: 0.02

Yield Stress: 4.2e9

Damage Models:

My Damage Model:

Damage Model: "Critical Stretch"

Critical Stretch: 0.0002594

Blocks:

My Block:

Block Names: "block_1"

Material: "My Material"

Damage Model: "My Damage Model"

Horizon: 0.5798

Boundary Conditions:

Prescribed Displacement Top:

Type: "Prescribed Displacement"

Node Set: "NodeSet_1"

Coordinate: "x"

Value: "-0.5*x*t"

Prescribed Displacement Fix Bottom Rigid Body Motion In X:

Type: "Prescribed Displacement"

Node Set: "NodeSet_2"

Coordinate: "x"

Value: "0.0"

Solver:

Verbose: false

Initial Time: 0.0

Final Time: 10.0

QuasiStatic:

Number of Load Steps: 40

Absolute Tolerance: 1.0

Maximum Solver Iterations: 100

Compute Class Parameters:

Top Reaction Force:

Compute Class: "Block_Data"

Calculation Type: "Sum"
Block: "block_1"
Variable: "Force"
Output Label: "Top_Reaction_Force"
Bottom Reaction Force:
Compute Class: "Block_Data"
Calculation Type: "Sum"
Block: "block_1"
Variable: "Force"
Output Label: "Bottom_Reaction_Force"

Output:

Output File Type: "ExodusII"
Output Filename: "yirtik_out7Bepct"
Output Frequency: 1
Output Variables:
Displacement: true
Velocity: true
Acceleration: true
Element_Id: true
Proc_Num: true
Force_Density: true
Hourglass_Force_Density: true
Force: true
Volume: true
Damage: true
Top_Reaction_Force: true
Bottom_Reaction_Force: true
Deformation_Gradient: true
Cauchy_Stress: true
Radius: true
Number_Of_Neighbors: true
Neighborhood_Volume: true

EK 7. “tensile_test_07Bephct.yaml” dosyasına ait kod dizilimi

Peridigm:

Verbose: false

Discretization:

Type: "Exodus"

Input Mesh File: "block_7B.g"

Materials:

My Material:

Material Model: "Isotropic Hardening Correspondence"

Density: 7.8

Young's Modulus: 211.0e10

Poisson's Ratio: 0.3

Yield Stress: 420.0e7

Hardening Modulus: 630.0e7

Hourglass Coefficient: 0.02

Damage Models:

My Damage Model:

Damage Model: "Interface Aware"

Critical Stretch: 0.0002594

Blocks:

My Block:

Block Names: "block_1"

Material: "My Material"

Damage Model: "My Damage Model"

Horizon: 0.5798

Boundary Conditions:

Prescribed Displacement Top:

Type: "Prescribed Displacement"

Node Set: "NodeSet_1"

Coordinate: "x"

Value: "-0.5*x*t"

Prescribed Displacement Fix Bottom Rigid Body Motion In X:

Type: "Prescribed Displacement"

Node Set: "NodeSet_2"

Coordinate: "x"

Value: "0.0"

Solver:

Verbose: false

Initial Time: 0.0

Final Time: 10.0

QuasiStatic:

Number of Load Steps: 40

Absolute Tolerance: 1.0

Maximum Solver Iterations: 100

Compute Class Parameters:

Top Reaction Force:

Compute Class: "Block_Data"
Calculation Type: "Sum"
Block: "block_1"
Variable: "Force"
Output Label: "Top_Reaction_Force"
Bottom Reaction Force:
Compute Class: "Block_Data"
Calculation Type: "Sum"
Block: "block_1"
Variable: "Force"
Output Label: "Bottom_Reaction_Force"

Output:

Output File Type: "ExodusII"
Output Filename: "yirtik_out7Bephct"
Output Frequency: 1
Output Variables:
Displacement: true
Velocity: true
Element_Id: true
Proc_Num: true
Force_Density: true
Hourglass_Force_Density: true
Force: true
Volume: true
Top_Reaction_Force: true
Bottom_Reaction_Force: true
Deformation_Gradient: true
Cauchy_Stress: true
Radius: true
Number_Of_Neighbors: true
Neighborhood_Volume: true

EK 8. “tensile_test_06epct.yaml” dosyasına ait kod dizilimi

Peridigm:

Verbose: false

Discretization:

Type: "Exodus"

Input Mesh File: "block_6.g"

Materials:

My Material:

Material Model: "Elastic Plastic Correspondence"

Density: 7.8

Young's Modulus: 211.0e10

Poisson's Ratio: 0.3

Hourglass Coefficient: 0.02

Yield Stress: 4.2e9

Damage Models:

My Damage Model:

Damage Model: "Critical Stretch"

Critical Stretch: 0.0002367

Blocks:

My Block:

Block Names: "block_1"

Material: "My Material"

Damage Model: "My Damage Model"

Horizon: 0.6965

Boundary Conditions:

Prescribed Displacement Top:

Type: "Prescribed Displacement"

Node Set: "NodeSet_1"

Coordinate: "x"

Value: "-0.5*x*t"

Prescribed Displacement Fix Bottom Rigid Body Motion In X:

Type: "Prescribed Displacement"

Node Set: "NodeSet_2"

Coordinate: "x"

Value: "0.0"

Solver:

Verbose: false

Initial Time: 0.0

Final Time: 10.0

QuasiStatic:

Number of Load Steps: 40

Absolute Tolerance: 1.0

Maximum Solver Iterations: 100

Compute Class Parameters:

Top Reaction Force:

Compute Class: "Block_Data"

Calculation Type: "Sum"
Block: "block_1"
Variable: "Force"
Output Label: "Top_Reaction_Force"
Bottom Reaction Force:
Compute Class: "Block_Data"
Calculation Type: "Sum"
Block: "block_1"
Variable: "Force"
Output Label: "Bottom_Reaction_Force"

Output:

Output File Type: "ExodusII"
Output Filename: "yirtik_out6epct"
Output Frequency: 1
Output Variables:
Displacement: true
Velocity: true
Acceleration: true
Element_Id: true
Proc_Num: true
Force_Density: true
Hourglass_Force_Density: true
Force: true
Volume: true
Damage: true
Top_Reaction_Force: true
Bottom_Reaction_Force: true
Deformation_Gradient: true
Cauchy_Stress: true
Radius: true
Number_Of_Neighbors: true
Neighborhood_Volume: true

EK 9. “tensile_test_11epc.yaml” dosyasına ait kod dizilimi

Peridigm:

Verbose: false

Discretization:

Type: "Exodus"

Input Mesh File: "block_11.g"

Materials:

My Material:

Material Model: "Elastic Plastic Correspondence"

Density: 7.8

Young's Modulus: 211.0e10

Poisson's Ratio: 0.3

Hourglass Coefficient: 0.02

Yield Stress: 4.2e9

Damage Models:

My Damage Model:

Damage Model: "Critical Stretch"

Critical Stretch: 0.0004256

Blocks:

My Block:

Block Names: "block_1"

Material: "My Material"

Damage Model: "My Damage Model"

Horizon: 0.2154

Boundary Conditions:

Prescribed Displacement Top:

Type: "Prescribed Displacement"

Node Set: "NodeSet_1"

Coordinate: "x"

Value: "-0.5*x*t"

Prescribed Displacement Fix Bottom Rigid Body Motion In X:

Type: "Prescribed Displacement"

Node Set: "NodeSet_2"

Coordinate: "x"

Value: "0.0"

Solver:

Verbose: false

Initial Time: 0.0

Final Time: 10.0

QuasiStatic:

Number of Load Steps: 40

Absolute Tolerance: 1.0

Maximum Solver Iterations: 100

Compute Class Parameters:

Top Reaction Force:

Compute Class: "Block_Data"
Calculation Type: "Sum"
Block: "block_1"
Variable: "Force"
Output Label: "Top_Reaction_Force"
Bottom Reaction Force:
Compute Class: "Block_Data"
Calculation Type: "Sum"
Block: "block_1"
Variable: "Force"
Output Label: "Bottom_Reaction_Force"

Output:

Output File Type: "ExodusII"
Output Filename: "yirtik_out11epc"
Output Frequency: 1
Output Variables:
Displacement: true
Velocity: true
Acceleration: true
Element_Id: true
Proc_Num: true
Force_Density: true
Hourglass_Force_Density: true
Force: true
Volume: true
Damage: true
Top_Reaction_Force: true
Bottom_Reaction_Force: true
Deformation_Gradient: true
Cauchy_Stress: true
Radius: true
Number_Of_Neighbors: true
Neighborhood_Volume: true

EK 10. “tensile_test_12ec.yaml” dosyasına ait kod dizilimi

Peridigm:

Discretization:

Type: "Exodus"

Input Mesh File: "block_12.g"

Materials:

My Material:

Material Model: "Elastic Correspondence"

Density: 7.8

Bulk Modulus: 175.833e10

Shear Modulus: 81.154e10

Hourglass Coefficient: 0.02

Damage Models:

My Damage Model:

Damage Model: "Critical Stretch"

Critical Stretch: 0.0004256

Blocks:

My Block:

Block Names: "block_1"

Material: "My Material"

Damage Model: "My Damage Model"

Horizon: 0.2154

Boundary Conditions:

Prescribed Displacement Top:

Type: "Prescribed Displacement"

Node Set: "NodeSet_1"

Coordinate: "x"

Value: "-0.5*x*t"

Prescribed Displacement Fix Bottom Rigid Body Motion In X:

Type: "Prescribed Displacement"

Node Set: "NodeSet_2"

Coordinate: "x"

Value: "0.0"

Solver:

Verbose: false

Initial Time: 0.0

Final Time: 10.0

QuasiStatic:

Number of Load Steps: 40

Absolute Tolerance: 1.0

Maximum Solver Iterations: 100

Compute Class Parameters:

Top Reaction Force:

Compute Class: "Block_Data"

Calculation Type: "Sum"

Block: "block_1"

Variable: "Force"

Output Label: "Top_Reaction_Force"
Bottom Reaction Force:
Compute Class: "Block_Data"
Calculation Type: "Sum"
Block: "block_1"
Variable: "Force"
Output Label: "Bottom_Reaction_Force"

Output:

Output File Type: "ExodusII"
Output Filename: "yirtik_out12ec"
Output Frequency: 1
Output Variables:
Displacement: true
Velocity: true
Acceleration: true
Element_Id: true
Proc_Num: true
Force_Density: true
Hourglass_Force_Density: true
Force: true
Volume: true
Damage: true
Top_Reaction_Force: true
Bottom_Reaction_Force: true
Deformation_Gradient: true
Cauchy_Stress: true
Radius: true
Number_Of_Neighbors: true
Neighborhood_Volume: true

EK 11. “tensile_test_12epc.yaml” dosyasına ait kod dizilimi

Peridigm:

Verbose: false

Discretization:

Type: "Exodus"

Input Mesh File: "block_12.g"

Materials:

My Material:

Material Model: "Elastic Plastic Correspondence"

Density: 7.8

Young's Modulus: 211.0e10

Poisson's Ratio: 0.3

Hourglass Coefficient: 0.02

Yield Stress: 4.2e9

Damage Models:

My Damage Model:

Damage Model: "Critical Stretch"

Critical Stretch: 0.0004256

Blocks:

My Block:

Block Names: "block_1"

Material: "My Material"

Damage Model: "My Damage Model"

Horizon: 0.2154

Boundary Conditions:

Prescribed Displacement Top:

Type: "Prescribed Displacement"

Node Set: "NodeSet_1"

Coordinate: "x"

Value: "-0.5*x*t"

Prescribed Displacement Fix Bottom Rigid Body Motion In X:

Type: "Prescribed Displacement"

Node Set: "NodeSet_2"

Coordinate: "x"

Value: "0.0"

Solver:

Verbose: false

Initial Time: 0.0

Final Time: 10.0

QuasiStatic:

Number of Load Steps: 40

Absolute Tolerance: 1.0

Maximum Solver Iterations: 100

Compute Class Parameters:

Top Reaction Force:

Compute Class: "Block_Data"
Calculation Type: "Sum"
Block: "block_1"
Variable: "Force"
Output Label: "Top_Reaction_Force"
Bottom Reaction Force:
Compute Class: "Block_Data"
Calculation Type: "Sum"
Block: "block_1"
Variable: "Force"
Output Label: "Bottom_Reaction_Force"

Output:

Output File Type: "ExodusII"
Output Filename: "yirtik_out12epc"
Output Frequency: 1
Output Variables:
Displacement: true
Velocity: true
Acceleration: true
Element_Id: true
Proc_Num: true
Force_Density: true
Hourglass_Force_Density: true
Force: true
Volume: true
Damage: true
Top_Reaction_Force: true
Bottom_Reaction_Force: true
Deformation_Gradient: true
Cauchy_Stress: true
Radius: true
Number_Of_Neighbors: true
Neighborhood_Volume: true

EK 12. “tensile_test_13ec.yaml” dosyasına ait kod dizilimi

Peridigm:

Discretization:

Type: "Exodus"

Input Mesh File: "block_13.g"

Materials:

My Material:

Material Model: "Elastic Correspondence"

Density: 7.8

Bulk Modulus: 175.833e10

Shear Modulus: 81.154e10

Hourglass Coefficient: 0.02

Damage Models:

My Damage Model:

Damage Model: "Critical Stretch"

Critical Stretch: 0.0004256

Blocks:

My Block:

Block Names: "block_1"

Material: "My Material"

Damage Model: "My Damage Model"

Horizon: 0.2154

Boundary Conditions:

Prescribed Displacement Top:

Type: "Prescribed Displacement"

Node Set: "NodeSet_1"

Coordinate: "x"

Value: "-0.5*x*t"

Prescribed Displacement Fix Bottom Rigid Body Motion In X:

Type: "Prescribed Displacement"

Node Set: "NodeSet_2"

Coordinate: "x"

Value: "0.0"

Solver:

Verbose: false

Initial Time: 0.0

Final Time: 10.0

QuasiStatic:

Number of Load Steps: 40

Absolute Tolerance: 1.0

Maximum Solver Iterations: 100

Compute Class Parameters:

Top Reaction Force:

Compute Class: "Block_Data"

Calculation Type: "Sum"

Block: "block_1"

Variable: "Force"

Output Label: "Top_Reaction_Force"
Bottom Reaction Force:
Compute Class: "Block_Data"
Calculation Type: "Sum"
Block: "block_1"
Variable: "Force"
Output Label: "Bottom_Reaction_Force"

Output:

Output File Type: "ExodusII"
Output Filename: "yirtik_out13ec"
Output Frequency: 1
Output Variables:
Displacement: true
Velocity: true
Acceleration: true
Element_Id: true
Proc_Num: true
Force_Density: true
Hourglass_Force_Density: true
Force: true
Volume: true
Damage: true
Top_Reaction_Force: true
Bottom_Reaction_Force: true
Deformation_Gradient: true
Cauchy_Stress: true
Radius: true
Number_Of_Neighbors: true
Neighborhood_Volume: true

EK 13. “tensile_test_13epc.yaml” dosyasına ait kod dizilimi

Peridigm:

Verbose: false

Discretization:

Type: "Exodus"

Input Mesh File: "block_13.g"

Materials:

My Material:

Material Model: "Elastic Plastic Correspondence"

Density: 7.8

Young's Modulus: 211.0e10

Poisson's Ratio: 0.3

Hourglass Coefficient: 0.02

Yield Stress: 4.2e9

Damage Models:

My Damage Model:

Damage Model: "Critical Stretch"

Critical Stretch: 0.0004256

Blocks:

My Block:

Block Names: "block_1"

Material: "My Material"

Damage Model: "My Damage Model"

Horizon: 0.2154

Boundary Conditions:

Prescribed Displacement Top:

Type: "Prescribed Displacement"

Node Set: "NodeSet_1"

Coordinate: "x"

Value: "-0.5*x*t"

Prescribed Displacement Fix Bottom Rigid Body Motion In X:

Type: "Prescribed Displacement"

Node Set: "NodeSet_2"

Coordinate: "x"

Value: "0.0"

Solver:

Verbose: false

Initial Time: 0.0

Final Time: 10.0

QuasiStatic:

Number of Load Steps: 40

Absolute Tolerance: 1.0

Maximum Solver Iterations: 100

Compute Class Parameters:

Top Reaction Force:

Compute Class: "Block_Data"
Calculation Type: "Sum"
Block: "block_1"
Variable: "Force"
Output Label: "Top_Reaction_Force"
Bottom Reaction Force:
Compute Class: "Block_Data"
Calculation Type: "Sum"
Block: "block_1"
Variable: "Force"
Output Label: "Bottom_Reaction_Force"

Output:

Output File Type: "ExodusII"
Output Filename: "yirtik_out13epc"
Output Frequency: 1
Output Variables:
Displacement: true
Velocity: true
Acceleration: true
Element_Id: true
Proc_Num: true
Force_Density: true
Hourglass_Force_Density: true
Force: true
Volume: true
Damage: true
Top_Reaction_Force: true
Bottom_Reaction_Force: true
Deformation_Gradient: true
Cauchy_Stress: true
Radius: true
Number_Of_Neighbors: true
Neighborhood_Volume: true

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : EMRE SAĞLAM

Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu

Lise : Sinop Anadolu Lisesi, 2005

Lisans : Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği
Bölümü, 2010

Lisans : Anadolu Üniversitesi İşletme Fakültesi İşletme Bölümü, 2012

Önlisans : Anadolu Üniversitesi Açıköğretim Fakültesi Emlak ve Emlak
Yönetimi Bölümü, 2014

Lisans : Sinop Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Enerji
Sistemleri Mühendisliği Bölümü, 2019

Yüksek Lisans : Sinop Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Disiplinlerarası
Nükleer Enerji ve Enerji Sistemleri, 2022

Yüksek Lisans : Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İş Sağlığı ve
Güvenliği, 2023

Lisans : Sinop Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Nükleer
Enerji Mühendisliği Bölümü, 2024

Mesleki Deneyim

Staj : Karayolları Genel Müdürlüğü 7. Bölge Müdürlüğü, Stajyer, 2009

Staj	: TENMAK (Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu), Stajyer, 2023
Staj	: Biokütle Enerji Elektrik Üretim A.Ş., Stajyer, 2024
İş Yeri	: Eklips İnşaat Harita ve Müh. Sanayi ve Ticaret A.Ş., Veri giriş elemanı, 2005-2006
İş Yeri	: Cengiz İnşaat Sanayi ve Ticaret A.Ş., Saha mühendisi, 2011-2012
İş Yeri	: Akay Yapı Denetim Lti. Şti., Kontrol mühendisi, 2012-2018
İş Yeri	: Elliyedi Yapı Denetim Lti. Şti., Kontrol mühendisi, 2018-2019
İş Yeri	: Tokat Kemer İnş.Hafr. Nak.Gıda Zirai Gübre San. Tic. Ltd. Şti Ahmet Aydın Adi Ortaklığı, Şantiye şefi, 2019-2020
İş Yeri	: 4A Teknik Yapı Denetim Lti. Şti., Kontrol mühendisi, 2021-2022
İş Yeri	: Şahsa Yapı Denetim Lti. Şti., Kontrol mühendisi, 2023-halen