İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

STATİK VE DİNAMİK YÜKLER ALTINDA KOMPOZİT PLAKALARIN HASAR DURUMLARINA KARŞI DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Serdar KORKUT

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Konstrüksiyon Programı

MART 2017

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

STATİK VE DİNAMİK YÜKLER ALTINDA KOMPOZİT PLAKALARIN HASAR DURUMLARINA KARŞI DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Serdar KORKUT
503131217

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Konstrüksiyon Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ata MUĞAN

MART 2017

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 503131217 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Serdar KORKUT, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "STATİK VE DİNAMİK YÜKLER ALTINDA KOMPOZİT PLAKALARIN HASAR DURUMLARINA KARŞI DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Prof. Dr. Ata MUĞAN** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Doç. Dr. Mustafa BAKKAL** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Prof. Dr. Serdar BARIŞ İstanbul Üniversitesi	.....

Teslim Tarihi : 13 Şubat 2017
Savunma Tarihi : 2 Mart 2017

Aileme,

ÖNSÖZ

Lisans ve yüksek lisans öğrenimim boyunca her zaman desteğini gördüğüm ve bu tez çalışmam süresince bilgi ve tecrübeleriyle yardımlarını esirgemeyen değerli danışman hocam Prof. Dr. Ata MUĞAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca beni sürekli destekleyen anne, baba ve kardeşime minnetlerimi sunarım.

Mart 2017

Serdar Korkut
(Makine Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ……. vii
İÇİNDEKİLER ix
KISALTMALAR xiii
SEMBOLLER xv
ÇİZELGE LİSTESİ xvii
ŞEKİL LİSTESİ xxi
ÖZET……. xxvii
SUMMARY xxxi
1. GİRİŞ…… 1
1.1 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı 2
1.2 Literatür Araştırması 3
2. KOMPOZİT MALZEMELER 7
2.1 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması 8
2.1.1 Matris malzemesine göre kompozit malzemeler 8
2.1.1.1 Polimer matrisli kompozitler 8
2.1.1.2 Metal matrisli kompozitler 8
2.1.1.3 Seramik matrisli kompozitler 9
2.1.1.4 Karbon matrisli kompozitler 9
2.1.2 Takviye elemanına göre kompozit malzemeler 9
2.1.2.1 Fiber takviyeli kompozitler 10
2.1.2.2 Partikül (parçacık) takviyeli kompozitler 10
2.1.2.3 Dolgu kompozitler 11
2.1.2.4 Tabakalı kompozitler 11
2.2 Kompozit Malzemelerde Malzeme Yönü 12
2.3 Kompozit Malzemelerde Ezilme Modları 13
2.3.1 Katastropik hasar 13
2.3.2 İlerlemeli hasar 14
3. KOMPOZİT MALZEMELERDE HASAR KRİTERLERİ 17
3.1 Etkileşimli (İnteraktif) Olmayan Hasar Kriterleri 19
3.1.1 Maksimum gerilme hasar kriteri 20
3.1.2 Maksimum şekil değiştirme hasar kriteri 20
3.2 Etkileşimli (İnteraktif) Hasar Kriterleri 21
3.2.1 Tsai – Hill hasar kriteri 21
3.2.2 Modifiye edilmiş Tsai – Hill hasar kriteri 22
3.2.3 Tsai – Wu hasar kriteri 23
3.2.4 Hoffman hasar kriteri 24
3.3 Hasar Modlarıyla İlişki Kuran Hasar Kriterleri 25
3.3.1 Hashin-Rotem hasar kriteri 26
3.3.2 Hashin hasar kriteri 26
3.3.3 Puck hasar kriteri 27

3.3.4 Chang-Chang hasar kriteri 29
3.3.5 Diğer hasar kriterleri 30
4. DELAMİNASYON 31
4.1 Delaminasyon Modları 32
4.2 Delaminasyon Bölgesinin Hasar Mekaniği İle Modellenmesi 33
4.2.1 CZM (Cohesive Zone Method) kohesif alan modellemesi 34
4.2.1.1 DCB (Double Cantilever Beam) testi 35
4.2.1.2 3ENF (Three End Notched Flexure) testi 36
4.2.1.3 MMB (Mixed Mode Bending) testi 36
4.2.2 Kohesif alan modelini etkileyen faktörler 37
4.3 Çekme-Ayrılma Kanunu (Traction-Separation Law) 38
4.3.1 Bilineer kanun 39
4.3.2 Trapezoid kanun 40
4.3.3 Üstel kanun 40
5. SONLU ELEMANLAR PROGRAMLARI VE MALZEME MODELLERİ 41
5.1 ABAQUS 43
5.1.1 ABAQUS kompozit hasar modelleri 43
5.1.1.1 Hashin-Rotem hasar kriteri 44
5.1.1.2 Hashin hasar kriteri 46
5.1.2 ABAQUS delaminasyon modelleri 46
5.1.2.1 Hasar başlangıcı 47
5.1.2.2 Hasar ilerlemesi 48
5.2 LS-DYNA 50
5.2.1 LS-DYNA kompozit malzeme modelleri 50
5.2.1.1 MAT 22 52
5.2.1.2 MAT 54 53
5.2.1.3 MAT 55 54
5.2.1.4 MAT 59 55
5.2.2 LS-DYNA delaminasyon hasar modelleri 56
5.2.2.1 MAT 138 57
5.2.2.2 MAT 184 58
5.2.2.3 MAT 185 59
5.2.2.4 MAT 186 60
5.3 RADIOSS 61
5.3.1 RADIOSS kompozit hasar modelleri 62
5.3.1.1 LAW12 - Tsai-Wu hasar kriteri 62
5.3.1.2 Hashin hasar kriteri 64
5.3.1.3 Puck hasar kriteri 66
5.3.2 RADIOSS delaminasyon hasar modelleri 67
5.3.2.1 CONNECT hasar kriteri 68
5.3.2.2 SNCONNECT hasar kriteri 69
6. SONLU ELEMANLAR ANALİZLERİ 71
6.1 Problemin Tanımı 71
6.1.1 Malzeme özellikleri 72
6.1.2 Test düzeneği 73
6.1.2.1 Statik test 74
6.1.2.2 Dinamik test 74
6.1.3 Test sonuçları 75
6.2 Modelleme 79
6.2.1 Sonlu elemanların oluşturulması 80

6.2.2 ABAQUS ile modelleme 82
6.2.2.1 Eleman tiplerinin belirlenmesi 83
6.2.2.2 Malzeme ve hasar kriteri parametreleri 84
6.2.2.3 Yüzey ilişkilerinin tanımlanması 87
6.2.2.4 Sınır koşullarının belirlenmesi 87
6.2.3 LS-DYNA ile modelleme 91
6.2.3.1 Eleman tiplerinin belirlenmesi 92
6.2.3.2 Malzeme ve hasar kriteri parametreleri 93
6.2.3.3 Yüzey ilişkilerinin tanımlanması 96
6.2.3.4 Sınır koşullarının belirlenmesi 97
6.2.4 RADIOSS ile modelleme 100
6.2.4.1 Eleman tiplerinin belirlenmesi 100
6.2.4.2 Malzeme ve hasar kriteri parametreleri 101
6.2.4.3 Yüzey ilişkilerinin tanımlanması 106
6.2.4.4 Sınır koşullarının belirlenmesi 108
7. ANALİZ SONUÇLARI VE KARŞILAŞTIRMALAR 111
7.1 ABAQUS Analiz Sonuçları 111
7.1.1 Statik analiz sonuçları 111
7.1.2 Dinamik analiz sonuçları 112
7.2 LS-DYNA Analiz Sonuçları 112
7.2.1 Statik analiz sonuçları 112
7.2.2 Dinamik analiz sonuçları 112
7.3 RADIOSS Analiz Sonuçları 112
7.3.1 Statik analiz sonuçları 113
7.3.2 Dinamik analiz sonuçları 113
8. SONUÇLAR VE TARTIŞMA 115
KAYNAKLAR 121
EKLER……. 127
ÖZGEÇMİŞ 159

KISALTMALAR

ASTM	**:** American Society for Testing and Materials
BK	**:** Benzeggagh-Kenane
CZM	**:** Cohesive Zone Method
DCB	**:** Double Cantilever Beam
ELS	**:** End Loaded Split
LEFM	**:** Linear elastic fracture mechanics
LLNL	**:** Lawrence Livermore National Laboratory
LSTC	**:** Livermore Software Technology Corporation
MMB	**:** Mixed Mode Bending
NASA	**:** The National Aeronautics and Space Administration
NLS	**:** Length scale in the normal direction
TES	**:** Type of effective separation
3ENF	**:** Three end notched flexure
TLS	**:** Length scale in the tangential direction
TSLC	**:** Traction-separation load curve
VCCT	**:** Virtual Crack Closure Technique
VCET	**:** Virtual Crack Extension Technique

SEMBOLLER

$\mathbf{d_f, d_m, d_s}$: Hasar değişkenleri
$\mathbf{d_f^t, d_f^c}$: Fiber çekme ve basma hasar değişkenleri
$\mathbf{d_m^t, d_m^c}$: Matris çekme ve basma hasar değişkenleri
$\mathbf{\delta_I}$: Açılma modundaki yer değiştirme
$\mathbf{\delta_{II}}$: Kesme modundaki yer değiştirme
$\mathbf{\delta_{III}}$: Yırtılma modundaki yer değiştirme
$\mathbf{\delta_m}$: İzafi yer değiştirme
$\mathbf{\delta^0}$: Karışık mod hasar başlangıç yer değiştirmesi
$\mathbf{\delta_I^0}$: Mod I hasar başlangıç yer değiştirmesi
$\mathbf{\delta_{II}^0}$: Mod II hasar başlangıç yer değiştirmesi
$\mathbf{\delta_I^F}$: Mod I maksimum yer değiştirme
$\mathbf{\delta_{II}^F}$: Mod II maksimum yer değiştirme
$\mathbf{\delta^F}$: Karışık mod kopmanın gerçekleşeceği yer değiştirme değeri
$\mathbf{E_n}$: Normal doğrultudaki rijitlik
$\mathbf{E_t}$: Teğetsel doğrultudaki rijitlik
$\mathbf{E_{Imaks}}$: Maksimum enerji
$\mathbf{E_{nmaks}}$: Normal doğrultudaki maksimum enerji
$\mathbf{E_{tmaks}}$: Teğetsel doğrultudaki maksimum enerji
$\mathbf{E_{11}}$: Fiber doğrultusundaki elastisite modülü
$\mathbf{E_{22}, E_{33}}$: Fibere dik doğrultudaki elastisite modülleri
$\mathbf{\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}, \gamma_{12}}$: Gerinim bileşenleri
$\mathbf{\varepsilon_I}$: Açılma modu gerinimi
$\mathbf{\varepsilon_{II}}$: Kesme modu gerinimi
$\mathbf{\varepsilon_{III}}$: Yırtılma modu gerinimi
$\mathbf{\varepsilon_{m,I}}$: Açılma modundaki maksimum yer değiştirme
$\mathbf{\varepsilon_{m,II}}$: Kesme modundaki maksimum yer değiştirme
$\mathbf{\varepsilon_{m,III}}$: Yırtılma modundaki maksimum yer değiştirme
$\mathbf{\dot{\varepsilon}}$: Birim şekil değiştirme hızı
$\mathbf{\dot{\varepsilon}_0}$: Referans birim şekil değiştirme hızı
$\mathbf{G_I}$: Açılma modu enerji yayınım hızı
$\mathbf{G_{II}}$: Kesme modu enerji yayınım hızı
$\mathbf{G_{III}}$: Yırtılma modu enerji yayınım hızı
$\mathbf{G_C}$: Kritik enerji yayınım hızı
$\mathbf{G_{IC}}$: Açılma modu kritik enerji yayınım hızı
$\mathbf{G_{IIC}}$: Kesme modu kritik enerji yayınım hızı
$\mathbf{G_{IIIC}}$: Yırtılma modu kritik enerji yayınım hızı
$\mathbf{G_{ft}}$: Fiber çekme modu enerji yayınım hızı
$\mathbf{G_{fc}}$: Fiber basma modu enerji yayınım hızı
$\mathbf{G_{mt}}$: Matris çekme modu enerji yayınım hızı
$\mathbf{G_{mc}}$: Matris basma modu enerji yayınım hızı
$\mathbf{G_{12}, G_{23}, G_{13}}$: Kayma modülleri
$\mathbf{\Lambda_1}$: Maksimum çekme değerindeki ölçeklendirilmiş uzunluk

Λ_2 : Hasarın başlayacağı ölçeklendirilmiş uzunluk
Λ_{kopma} : Kopmanın gerçekleşeceği ölçeklendirilmiş uzunluk
N_{soft} : Hasar üsteli
p_{12}^{+}, p_{12}^{-}, p_{22}^{-} : Puck hasar parametreleri
S : Kayma dayanımı
S_{12}, S_{23}, S_{13} : Kayma dayanımı bileşenleri
σ_{11} : Fiber doğrultusundaki gerilme
σ_{22}, σ_{33} : Fibere dik yanal ve düşey doğrultulardaki gerilme
σ_d : Hasar başladığındaki gerilme
T_I : Açılma modu çekmesi
T_{II} : Kesme modu çekmesi
T_{III} : Yırtılma modu çekmesi
$Tm_{,I}$: Açılma modu dayanımı
$Tm_{,II}$: Kesme modu dayanımı
$Tm_{,III}$: Yırtılma modu dayanımı
t : Zaman
t_1, t_2, t_3 : Kırılma yüzeyine etkiyen gerilme komponenleri
t_r : Hasarın başladığı zaman
τ_{12}, τ_{23}, τ_{13} : Kayma gerilmeleri
τ_{max} : Dinamik gevşeme süresi
v_{12}, v_{23}, v_{13} : Poisson oranları
X_T, X_C : Fiber doğrultusundaki çekme ve basma dayanımı
X_{crush} : Ezilme dayanımı
Y_T, Y_C : Yanal doğrultudaki çekme ve basma dayanımı
Z_T, Z_C : Kalınlık doğrultusundaki çekme ve basma dayanımı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 5.1 : Kullanılan sonlu elemanlar yazılımlarında bulunan hasar kriterleri. ... 42
Çizelge 5.2 : LS-DYNA'da bulunan kompozit malzeme modellerinin kullandığı hasar kriterleri. ... 51
Çizelge 6.1 : T700/M21 kompozit malzemesinin özellikleri [4,6,8]. ... 72
Çizelge 6.2 : Tabakalar arasındaki yapıştırıcı malzemenin özellikleri [4,8,73]. ... 73
Çizelge 6.3 : Oluşturulan modellerdeki eleman sayıları. ... 82
Çizelge A.1 : Hashin-Rotem ve Benzeggagh-Kenane kriterleri ile farklı sürtünme katsayıları kullanılarak statik analizlerde elde edilen maksimum reaksiyon kuvvetleri ve sönümlenen enerji miktarları. ... 128
Çizelge A.2 : Hashin-Rotem ve üstel kriter ile farklı sürtünme katsayıları kullanılarak statik analizlerde elde edilmiş maksimum reaksiyon kuvvetleri ve sönümlenen enerji miktarları. ... 129
Çizelge A.3 : Hashin ve Benzeggagh-Kenane kriterleri ile farklı sürtünme katsayıları kullanılarak statik analizlerde elde edilmiş maksimum reaksiyon kuvvetleri ve sönümlenen enerji miktarları. ... 130
Çizelge A.4 : Hashin-Rotem ve üstel kriter ile farklı sürtünme katsayıları kullanılarak statik analizlerde elde edilmiş maksimum reaksiyon kuvvetleri ve sönümlenen enerji miktarları. ... 131
Çizelge A.5 : Hashin-Rotem ve Benzeggagh-Kenane kriterleri ile farklı sürtünme katsayıları kullanılarak dinamik analizlerde elde edilmiş maksimum reaksiyon kuvvetleri ve sönümlenen enerji miktarları. ... 132
Çizelge A.6 : Hashin-Rotem ve üstel kriter ile farklı sürtünme katsayıları kullanılarak dinamik analizlerde elde edilmiş maksimum reaksiyon kuvvetleri ve sönümlenen enerji miktarları. ... 133
Çizelge A.7 : Hashin ve Benzeggagh-Kenane kriterleri ile farklı sürtünme katsayıları kullanılarak dinamik analizlerde elde edilmiş maksimum reaksiyon kuvvetleri ve sönümlenen enerji miktarları. ... 134
Çizelge A.8 : Hashin-Rotem ve üstel kriter ile farklı sürtünme katsayıları kullanılarak dinamik analizlerde elde edilmiş maksimum reaksiyon kuvvetleri ve sönümlenen enerji miktarları. ... 135
Çizelge B.1 : MAT 22 ve 0,09 hasar gerinimi ile farklı sürtünme katsayıları kullanılarak statik analizlerde elde edilmiş maksimum reaksiyon kuvvetleri ve sönümlenen enerji miktarları. ... 136
Çizelge B.2 : MAT 22 ve 0,1 hasar gerinimi ile farklı sürtünme katsayıları kullanılarak statik analizlerde elde edilmiş maksimum reaksiyon kuvvetleri ve sönümlenen enerji miktarları. ... 137
Çizelge B.3 : MAT 22 ve 0,11 hasar gerinimi ile farklı sürtünme katsayıları kullanılarak statik analizlerde elde edilmiş maksimum reaksiyon kuvvetleri ve sönümlenen enerji miktarları. ... 138

Çizelge B.4 : MAT 54 ve farklı sürtünme katsayıları kullanılarak statik analizlerde elde edilmiş maksimum reaksiyon kuvvetleri ve sönümlenen enerji miktarları. 139
Çizelge B.5 : MAT 55 ve farklı sürtünme katsayıları kullanılarak statik analizlerde elde edilmiş maksimum reaksiyon kuvvetleri ve sönümlenen enerji miktarları. 140
Çizelge B.6 : MAT 59 ve 0,1 hasar gerinimi ile farklı sürtünme katsayıları kullanılarak statik analizlerde elde edilmiş maksimum reaksiyon kuvvetleri ve sönümlenen enerji miktarları. 141
Çizelge B.7 : MAT 22 ve 0,09 hasar gerinimi ile farklı sürtünme katsayıları kullanılarak dinamik analizlerde elde edilmiş maksimum reaksiyon kuvvetleri ve sönümlenen enerji miktarları. 142
Çizelge B.8 : MAT 22 ve 0,1 hasar gerinimi ile farklı sürtünme katsayıları kullanılarak dinamik analizlerde elde edilmiş maksimum reaksiyon kuvvetleri ve sönümlenen enerji miktarları. 143
Çizelge B.9 : MAT 22 ve 0,11 hasar gerinimi ile farklı sürtünme katsayıları kullanılarak dinamik analizlerde elde edilmiş maksimum reaksiyon kuvvetleri ve sönümlenen enerji miktarları. 144
Çizelge B.10 : MAT 54 ve farklı sürtünme katsayıları kullanılarak dinamik analizlerde elde edilmiş maksimum reaksiyon kuvvetleri ve sönümlenen enerji miktarları. 145
Çizelge B.11 : MAT 55 ve farklı sürtünme katsayıları kullanılarak dinamik analizlerde elde edilmiş maksimum reaksiyon kuvvetleri ve sönümlenen enerji miktarları. 146
Çizelge B.12 : MAT 59 ve 0,1 hasar gerinimi ile farklı sürtünme katsayıları kullanılarak dinamik analizlerde elde edilmiş maksimum reaksiyon kuvvetleri ve sönümlenen enerji miktarları. 147
Çizelge C.1 : Hashin hasar kriteri ve farklı sürtünme katsayıları kullanılarak statik analizlerde elde edilmiş maksimum reaksiyon kuvvetleri ve sönümlenen enerji miktarları. 148
Çizelge C.2 : Hashin hasar kriteri, 0,1 hasar gerinimi ve farklı sürtünme katsayıları kullanılarak statik analizlerde elde edilmiş maksimum reaksiyon kuvvetleri ve sönümlenen enerji miktarları. 149
Çizelge C.3 : Puck hasar kriteri ve farklı sürtünme katsayıları kullanılarak statik analizlerde elde edilmiş maksimum reaksiyon kuvvetleri ve sönümlenen enerji miktarları. 150
Çizelge C.4 : Puck hasar kriteri, 0,1 hasar gerinimi ve farklı sürtünme katsayıları kullanılarak statik analizlerde elde edilmiş maksimum reaksiyon kuvvetleri ve sönümlenen enerji miktarları. 151
Çizelge C.5 : Tsai-Wu hasar kriteri ve farklı sürtünme katsayıları kullanılarak statik analizlerde elde edilmiş maksimum reaksiyon kuvvetleri ve sönümlenen enerji miktarları. 152
Çizelge C.6 : Hashin hasar kriteri ve farklı sürtünme katsayıları kullanılarak dinamik analizlerde elde edilmiş maksimum reaksiyon kuvvetleri ve sönümlenen enerji miktarları. 153
Çizelge C.7 : Hashin hasar kriteri, 0,1 hasar gerinimi ve farklı sürtünme katsayıları kullanılarak dinamik analizlerde elde edilmiş maksimum reaksiyon kuvvetleri ve sönümlenen enerji miktarları. 154

Çizelge C.8 : Puck hasar kriteri ve farklı sürtünme katsayıları kullanılarak dinamik analizlerde elde edilmiş maksimum reaksiyon kuvvetleri ve sönümlenen enerji miktarları..... 155
Çizelge C.9 : Puck hasar kriteri, 0,1 hasar gerinimi ve farklı sürtünme katsayıları kullanılarak dinamik analizlerde elde edilmiş maksimum reaksiyon kuvvetleri ve sönümlenen enerji miktarları. 156
Çizelge C.10 : Tsai-Wu hasar kriteri ve farklı sürtünme katsayıları kullanılarak dinamik analizlerde elde edilmiş maksimum reaksiyon kuvvetleri ve sönümlenen enerji miktarları. 157

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Takviye elemanına göre kompozit malzemeler; a) fiber takviyeli, b) partikül takviyeli, c) tabakalı kompozitler, d) dolgu kompozitler [23]. . 9
Şekil 2.2 : Fiber takviyeli kompozitlerin çekme durumundaki davranışı [24]. 10
Şekil 2.3 : Tabakalı kompozit plakanın açılmış görüntüsü [25]. 11
Şekil 2.4 : Tek eksenli kompozit tabaka ve temel koordinat eksenleri [20]. 12
Şekil 2.5 : Dokuma tipi kompozitin şematik gösterilişi [26]. 12
Şekil 2.6 : Katastropik hasar durumu [27]. 13
Şekil 2.7 : İlerlemeli hasar durumu [27]. 14
Şekil 2.8 : Kompozit tüpün ezilme durumundaki davranışının şematik gösterimi [28]. 15
Şekil 2.9 : İlerlemeli ezilme modları: a) Yanal kayma modu, b) Tabaka eğilmesi, c) Gevrek kırılma, d) Burkulma [30] 15
Şekil 3.1 : Yük-uzama grafikleri: a) Metal malzeme, b) Tek eksenli kompozit malzeme [31]. 17
Şekil 3.2 : Kompozit malzemelerde fiber doğrultularına göre gerilme ve gerinim dayanımları [33]. 18
Şekil 3.3 : Kompozit malzemelerde kullanılan hasar kriterlerinin sınıflandırılması. 19
Şekil 3.4 : Matris hasar modları [44]. 29
Şekil 4.1 : Basma yükü altındaki kompozit plakada delaminasyon burkulması [50]. 31
Şekil 4.2 : Temel kırılma modları; a) tabakalar içi, b) tabakalar arası, c) tabakaları kesen [51]. 32
Şekil 4.3 : Çatlak ilerleme modları. 32
Şekil 4.4 : Kohesif alan modellemesinin şematik gösterimi [50]. 34
Şekil 4.5 : DCB testi şematik gösterimi [55]. 35
Şekil 4.6 : 3ENF testi şematik gösterimi [55]. 36
Şekil 4.7 : MMB testi şematik gösterimi [55]. 36
Şekil 4.8 : Çekme-ayrılma kanunu [59]. 38
Şekil 4.9 : Bilineer çekme-ayrılma eğrisi [64]. 39
Şekil 4.10 : Trapezoid çekme-ayrılma eğrisi [64]. 40
Şekil 4.11 : Üstel çekme-ayrılma eğrisi [64]. 40
Şekil 5.1 : ABAQUS'te bulunan kompozit tabakalar için hasar modelleri. 43
Şekil 5.2 : Çekme-ayrılma davranışı [68]. 46
Şekil 5.3 : ABAQUS'te bulunan delaminasyon hasar başlangıcı yöntemleri. 47
Şekil 5.4 : ABAQUS'te bulunan delaminasyon hasar ilerlemesi yöntemlerinin sınıflandırılması. 48
Şekil 5.5 : LS-DYNA'da bulunan kompozit malzeme modellerinin sınıflandırılması. 51

Şekil 5.6 : MAT 138 karışık mod çekme-ayrılma kanunu. 56
Şekil 5.7 : MAT 138 karışık mod çekme-ayrılma kanunu [70]. 58
Şekil 5.8 : Kohesif elemanda izafi yer değiştirme ve üçgensel çekme-ayrılma kanunu [70]. 59
Şekil 5.9 : Normalleştirilmiş çekme-ayrılma knunu [70]. 60
Şekil 5.10 : MAT 186 karışık mod çekme-ayrılma kanunu [70]. 61
Şekil 5.11 : RADIOSS'ta bulunan kompozit malzeme modelleri ve hasar kriterleri. 62
Şekil 5.12 : Tsai-Wu hasar kriteri plastik pekleşme davranışı [72]. 63
Şekil 5.13 : RADIOSS'ta bulunan kompozit malzeme modelleri ve hasar kriterleri. 67
Şekil 5.14 : SNCONNECT hasar kriteri eğrisi [72]. 69
Şekil 6.1 : Kullanılan kompozit numunenin tabaka yerleşimi [5]. 71
Şekil 6.2 : Test düzeneği [4]. 73
Şekil 6.3 : Statik test düzeneği [5]. 74
Şekil 6.4 : Dinamik test düzeneği [6]. 75
Şekil 6.5 : Statik test sonucu [4]. 76
Şekil 6.6 : Dinamik test sonucu [4]. 76
Şekil 6.7 : a) Karma mod ezilme sırasındaki ana hasar tipleri, b) parçalanma modları i) tabaka içi matris çatlağı, ii) 0^o lokal ezilmesi, iii) 90^o lokal ezilmesi, iv) tabaka içi fiber kırılması [4]. 77
Şekil 6.8 : 90^o açılı tabakada artık oluşumu [4]. 77
Şekil 6.9 : a) Statik Test (6 mm/dk), b) Dinamik Test (9 m/s) [4]. 78
Şekil 6.10 : Model ölçüleri. 79
Şekil 6.11 : Test numunesinin ve sonlu elemanlar için hazırlanmış dilimin modeli. 80
Şekil 6.12 : Sonlu elemanlarına ayrılmış kompozit tabaka. 81
Şekil 6.13 : Yapışkan elemanların konumu. 82
Şekil 6.14 : ABAQUS ile sürekli kabuk elemanların parametrelerinin girilmesi. 83
Şekil 6.15 : ABAQUS ile yapıştırıcı elemanların tipinin ve formülasyonlarının belirlenmesi. 84
Şekil 6.16 : Kompozit malzemenin elastik malzeme parametrelerinin girilmesi. 84
Şekil 6.17 : Hashin hasar kriteri hasar başlangıcı değişkenleri. 85
Şekil 6.18 : Hasar ilerlemesi değişkenleri. 85
Şekil 6.19 : Yapıştırıcı malzemenin elastik malzeme parametrelerinin girilmesi. 86
Şekil 6.20 : a) Hasar başlangıcı değişkenleri, b) Hasar ilerlemesi değişkenleri. 86
Şekil 6.21 : a) Normal yöndeki yüzey ilişkisi parametreleri, b) teğetsel yöndeki yüzey ilişkisi parametreleri. 87
Şekil 6.22 : Modelin piston ile ezilme hızı. 88
Şekil 6.23 : Modelin üstten yanal hareketi engellenen kısmı. 88
Şekil 6.24 : ABAQUS için hazırlanan statik modelin sınır koşulları. 89
Şekil 6.25 : ABAQUS ile çelik silindirin kütlesinin tanımlanması. 90
Şekil 6.26 : ABAQUS ile ilk hız tanımlamasında kullanılan parametreler. 90
Şekil 6.27 : ABAQUS ile hazırlanan dinamik modelin sınır koşulları. 91
Şekil 6.28 : HyperCrash ile LS-DYNA modülünün aktifleştirilmesi. 91
Şekil 6.29 : LS-DYNA ile kompozit tabakaları oluşturan eleman tipinin ve formülasyonlarının belirlenmesi. 92
Şekil 6.30 : LS-DYNA ile yapıştırıcı elemanların tipinin ve formülasyonlarının belirlenmesi. 92
Şekil 6.31 : MAT22 malzeme modelinde kullanılan parametreler. 93
Şekil 6.32 : MAT54/MAT55 malzeme modellerinde kullanılan parametreler. 94

Şekil 6.33 : MAT59 malzeme modelinde kullanılan parametreler. 95
Şekil 6.34 : Analizlerde kullanılan yapıştırıcı malzemenin gerilme-yer değiştirme grafiği. 95
Şekil 6.35 : MAT138 malzeme modelinde kullanılan parametreler. 96
Şekil 6.36 : LS-DYNA yüzey ilişkisi tanımlamasında kullanılan parametreler. 97
Şekil 6.37 : LS-DYNA için hazırlanan statik modelin sınır koşulları. 98
Şekil 6.38 : LS-DYNA rijit duvar tanımlamasında kullanılan parametreler. 98
Şekil 6.39 : LS-DYNA ile çelik silindirin kütlesinin tanımlanması. 99
Şekil 6.40 : LS-DYNA ile ilk hız tanımlamasında kullanılan parametreler. 99
Şekil 6.41 : LS-DYNA için hazırlanan dinamik modelin sınır koşulları. 99
Şekil 6.42 : HyperCrash ile RADIOSS modülünün aktifleştirilmesi. 100
Şekil 6.43 : RADIOSS ile kompozit tabakaları oluşturan eleman tipinin ve formülasyonlarının belirlenmesi. 101
Şekil 6.44 : RADIOSS ile yapıştırıcı elemanların tipinin ve formülasyonlarının belirlenmesi. 101
Şekil 6.45 : Tsai-Wu hasar kriteri için kullanılan malzeme parametreleri. 102
Şekil 6.46 : Hashin hasar kriteri parametreleri. 103
Şekil 6.47 : Eleman silinmesi için gerinim sınırı tanımlaması. 104
Şekil 6.48 : Puck hasar kriteri parametreleri. 105
Şekil 6.49 : Yapıştırıcı yüzey için kullanılan malzeme parametreleri. 105
Şekil 6.50 : Yapıştırıcı malzemenin hasar sonrasındaki gerilme-yer değiştirme davranışı. 106
Şekil 6.51 : Yapıştırıcı malzeme için kullanılan hasar kriteri parametreleri. 106
Şekil 6.52 : Yüzey ilişkilerinin tanımlanmasında kullanılan parametreler. 107
Şekil 6.53 : RADIOSS için hazırlanan statik modelin sınır koşulları. 108
Şekil 6.54 : RADIOSS rijit duvar tanımlamasında kullanılan parametreler. 109
Şekil 6.55 : Çelik silindirin kütlesinin tanımlanması. 110
Şekil 6.56 : İlk hız tanımlamasında kullanılan parametreler. 110
Şekil 6.57 : RADIOSS için hazırlanan dinamik modelin sınır koşulları. 110
Şekil A.1 : Kompozit tabakalar için Hashin-Rotem hasar kriteri, yapışkan malzeme için Benzeggagh-Kenane kriteri ve farklı sürtünme katsayıları kullanılarak statik analizlerde elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri. 128
Şekil A.2 : Hashin-Rotem ve Benzeggagh-Kenane kriterleri kullanılarak farklı sürtünme katsayıları ile elde edilen statik analiz sonuçları. 128
Şekil A.3 : Kompozit tabakalar için Hashin-Rotem hasar kriteri, yapışkan malzeme için üstel kriter ve farklı sürtünme katsayıları kullanılarak statik analizlerde elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri. 129
Şekil A.4 : Hashin-Rotem ve üstel kriter kullanılarak farklı sürtünme katsayıları ile elde edilen statik analiz sonuçları. 129
Şekil A.5 : Kompozit tabakalar için Hashin hasar kriteri, yapışkan malzeme için Benzeggagh-Kenane kriteri ve farklı sürtünme katsayıları kullanılarak statik analizlerde elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri. 130
Şekil A.6 : Hashin ve Benzeggagh-Kenane kriterleri kullanılarak farklı sürtünme katsayıları ile elde edilen statik analiz sonuçları. 130
Şekil A.7 : Kompozit tabakalar için Hashin hasar kriteri, yapışkan malzeme için üstel kriter ve farklı sürtünme katsayıları kullanılarak statik analizlerde elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri. 131
Şekil A.8 : Hashin-Rotem ve üstel kriter kullanılarak farklı sürtünme katsayıları ile elde edilen statik analiz sonuçları. 131

Şekil A.9 : Kompozit tabakalar için Hashin-Rotem hasar kriteri, yapışkan malzeme için Benzeggagh-Kenane kriteri ve farklı sürtünme katsayıları kullanılarak dinamik analizlerde elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri. 132
Şekil A.10 : Hashin-Rotem ve Benzeggagh-Kenane kriterleri kullanılarak farklı sürtünme katsayıları ile elde edilen dinamik analiz sonuçları. 132
Şekil A.11 : Kompozit tabakalar için Hashin-Rotem hasar kriteri, yapışkan malzeme için üstel kriter ve farklı sürtünme katsayıları kullanılarak dinamik analizlerde elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri..... 133
Şekil A.12 : Hashin-Rotem ve üstel kriter kullanılarak farklı sürtünme katsayıları ile elde edilen dinamik analiz sonuçları. 133
Şekil A.13 : Kompozit tabakalar için Hashin hasar kriteri, yapışkan malzeme için Benzeggagh-Kenane kriteri ve farklı sürtünme katsayıları kullanılarak dinamik analizlerde elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri. 134
Şekil A.14 : Hashin ve Benzeggagh-Kenane kriterleri kullanılarak farklı sürtünme katsayıları ile elde edilen dinamik analiz sonuçları. 134
Şekil A.15 : Kompozit tabakalar için Hashin hasar kriteri, yapışkan malzeme için üstel kriter ve farklı sürtünme katsayıları kullanılarak dinamik analizlerde elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri..... 135
Şekil A.16 : Hashin-Rotem ve üstel kriter kullanılarak farklı sürtünme katsayıları ile elde edilen dinamik analiz sonuçları. 135
Şekil B.1 : MAT22 malzeme modeli, 0,09 hasar gerinimi ve farklı sürtünme katsayıları ile statik analizlerde elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri. 136
Şekil B.2 : MAT 22 ve 0,09 hasar gerinimi kullanılarak farklı sürtünme katsayıları ile elde edilen statik analiz sonuçları. 136
Şekil B.3 : MAT 22 malzeme modeli, 0,1 hasar gerinimi ve farklı sürtünme katsayıları ile statik analizlerde elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri. 137
Şekil B.4 : MAT 22 ve 0,1 hasar gerinimi kullanılarak farklı sürtünme katsayıları ile elde edilen statik analiz sonuçları. 137
Şekil B.5 : MAT 22 malzeme modeli, 0,11 hasar gerinimi ve farklı sürtünme katsayıları ile statik analizlerde elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri. 138
Şekil B.6 : MAT 22 ve 0,11 hasar gerinimi kullanılarak farklı sürtünme katsayıları ile elde edilen statik analiz sonuçları. 138
Şekil B.7 : MAT 54 malzeme modeli ve farklı sürtünme katsayıları ile statik analizlerde elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri..... 139
Şekil B.8 : MAT 54 kullanılarak farklı sürtünme katsayıları ile elde edilen statik analiz sonuçları. 139
Şekil B.9 : MAT 55 malzeme modeli ve farklı sürtünme katsayıları ile statik analizlerde elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri..... 140
Şekil B.10 : MAT 55 kullanılarak farklı sürtünme katsayıları ile elde edilen statik analiz sonuçları. 140
Şekil B.11 : MAT 59 malzeme modeli, 0,1 hasar gerinimi ve farklı sürtünme katsayıları ile statik analizlerde elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri. 141
Şekil B.12 : MAT 59 ve 0,1 hasar gerinimi kullanılarak farklı sürtünme katsayıları ile elde edilen statik analiz sonuçları. 141

Şekil B.13 : MAT22 malzeme modeli, 0,09 hasar gerinimi ve farklı sürtünme katsayıları ile dinamik analizlerde elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri..... 142
Şekil B.14 : MAT 22 ve 0,09 hasar gerinimi kullanılarak farklı sürtünme katsayıları ile elde edilen dinamik analiz sonuçları..... 142
Şekil B.15 : MAT 22 malzeme modeli, 0,1 hasar gerinimi ve farklı sürtünme katsayıları ile dinamik analizlerde elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri..... 143
Şekil B.16 : MAT 22 ve 0,1 hasar gerinimi kullanılarak farklı sürtünme katsayıları ile elde edilen dinamik analiz sonuçları..... 143
Şekil B.17 : MAT 22 malzeme modeli, 0,11 hasar gerinimi ve farklı sürtünme katsayıları ile dinamik analizlerde elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri..... 144
Şekil B.18 : MAT 22 ve 0,11 hasar gerinimi kullanılarak farklı sürtünme katsayıları ile elde edilen dinamik analiz sonuçları..... 144
Şekil B.19 : MAT 54 malzeme modeli ve farklı sürtünme katsayıları ile dinamik analizlerde elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri. 145
Şekil B.20 : MAT 54 kullanılarak farklı sürtünme katsayıları ile elde edilen dinamik analiz sonuçları. 145
Şekil B.21 : MAT 55 malzeme modeli ve farklı sürtünme katsayıları ile dinamik analizlerde elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri. 146
Şekil B.22 : MAT 55 kullanılarak farklı sürtünme katsayıları ile elde edilen dinamik analiz sonuçları. 146
Şekil B.23 : MAT 59 malzeme modeli, 0,1 hasar gerinimi ve farklı sürtünme katsayıları ile dinamik analizlerde elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri..... 147
Şekil B.24 : MAT 59 ve 0,1 hasar gerinimi kullanılarak farklı sürtünme katsayıları ile elde edilen dinamik analiz sonuçları..... 147
Şekil C.1 : Hashin hasar kriteri ve farklı sürtünme katsayıları kullanılarak statik analizlerde elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri. 148
Şekil C.2 : Hashin hasar kriteri ve farklı sürtünme katsayıları ile elde edilen statik analiz sonuçları. 148
Şekil C.3 : Hashin hasar kriteri, 0,1 hasar gerinimi ve farklı sürtünme katsayıları kullanılarak statik analizlerde elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri..... 149
Şekil C.4 : Hashin hasar kriteri, 0,1 hasar gerinimi ve farklı sürtünme katsayıları ile elde edilen statik analiz sonuçları. 149
Şekil C.5 : Puck hasar kriteri ve farklı sürtünme katsayıları kullanılarak statik analizlerde elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri. 150
Şekil C.6 : Puck hasar kriteri ve farklı sürtünme katsayıları ile elde edilen statik analiz sonuçları. 150
Şekil C.7 : Puck hasar kriteri, 0,1 hasar gerinimi ve farklı sürtünme katsayıları kullanılarak statik analizlerde elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri..... 151
Şekil C.8 : Puck hasar kriteri, 0,1 hasar gerinimi ve farklı sürtünme katsayıları ile elde edilen statik analiz sonuçları. 151
Şekil C.9 : Tsai-Wu hasar kriteri ve farklı sürtünme katsayıları kullanılarak statik analizlerde elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri. 152
Şekil C.10 : Tsai-Wu hasar kriteri ve farklı sürtünme katsayıları ile elde edilen statik analiz sonuçları. 152

Şekil C.11 : Hashin hasar kriteri ve farklı sürtünme katsayıları kullanılarak dinamik analizlerde elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri..... 153
Şekil C.12 : Hashin hasar kriteri ve farklı sürtünme katsayıları ile elde edilen dinamik analiz sonuçları. 153
Şekil C.13 : Hashin hasar kriteri, 0,1 hasar gerinimi ve farklı sürtünme katsayıları kullanılarak dinamik analizlerde elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri..... 154
Şekil C.14 : Hashin hasar kriteri, 0,1 hasar gerinimi ve farklı sürtünme katsayıları ile elde edilen dinamik analiz sonuçları. 154
Şekil C.15 : Puck hasar kriteri ve farklı sürtünme katsayıları kullanılarak dinamik analizlerde elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri..... 155
Şekil C.16 : Puck hasar kriteri ve farklı sürtünme katsayıları ile elde edilen dinamik analiz sonuçları. 155
Şekil C.17 : Puck hasar kriteri, 0,1 hasar gerinimi ve farklı sürtünme katsayıları kullanılarak dinamik analizlerde elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri..... 156
Şekil C.18 : Puck hasar kriteri, 0,1 hasar gerinimi ve farklı sürtünme katsayıları ile elde edilen dinamik analiz sonuçları. 156
Şekil C.19 : Tsai-Wu hasar kriteri ve farklı sürtünme katsayıları kullanılarak dinamik analizlerde elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri. 157
Şekil C.20 : Tsai-Wu hasar kriteri ve farklı sürtünme katsayıları ile elde edilen dinamik analiz sonuçları. 157

STATİK VE DİNAMİK YÜKLER ALTINDA KOMPOZİT PLAKALARIN HASAR DURUMLARINA KARŞI DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

ÖZET

Kompozit malzemelerin tarihi çok eski yıllara dayanmaktadır. İnsanların çok eski yıllardan beri kompozit malzemeleri tercih etmesindeki sebep sunduğu önemli avantajların olmasıdır. Kompozit malzemelerin getirdiği avantajlardan ötürü araçların yapısal tasarımlarında kullanım oranının artması çarpışma yükleri altındaki davranışlarının daha iyi anlaşılması ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. Yapılan çalışmalardaki amaç, kompozit malzemelerin güvenlik ve çarpışma dayanımı açısından geleneksel malzemelere kıyasla benzer ya da daha iyi kabiliyete sahip olduğunun gösterilmesidir. Geçtiğimiz 30 yılda kompozit malzemelerin çarpışma dayanımı konusunda yapılan çalışmalar bu konudaki bilgi birikimini oldukça arttırmıştır. Teknolojinin de gelişmesiyle birlikte artan bilgi birikimi daha verimli bir şekilde kullanılabilmektedir.

Kompozit malzemelerin çarpışma davranışlarının öngörülebilmesi için gerekli hesaplamalar el ile yapılabilecek hesaplamalardan çok daha zor olmaktadır. Bu sebeple bilgisayarlar yardımıyla analizler yapmak gerekmektedir. Doğru benzetimlerin yapılabilmesi doğru çalışan hasar kriterlerinin kullanımına bağlı olmaktadır. Geçmişten günümüze kadar araştırmacılar tarafından birçok hasar kriteri geliştirilmiştir. Maksimum gerilme, maksimum gerinim, Tsai-Hill, Tsai-Wu, Hoffman, Hashin, Hashin-Rotem, Puck, Chang-Chang gibi çok sayıda kompozit hasar kriteri geliştirilmiş ve farklı kompozit malzemelerle farklı senaryolarda bilgisayar destekli analizler ve testler gerçekleştirilmiştir. Bu tez çalışmasında geçmişten beri geliştirilen bu hasar kriterleri incelenmiştir. İncelenecek hasar kriterlerinin seçiminde kullanılan sonlu elemanlar yazılımlarında yer alan hasar kriterleri göz önüne alınmıştır. Hasar analizi çalışmalarındaki amaç, hasar davranışının, ezilme sırasındaki hasar ilerlemesinin ve ezilme sonundaki sönümlenen enerjinin her yapıda malzeme verileri kullanılarak öngörülebilmesidir. Bir hasar kriterinin başarılı sayılabilmesi için her durumda doğru sonuç öngörebilmesi gerekmektedir. Yapılan çalışmalar bu konudaki bilgi birikiminin, kompozit malzemelerin hasar analizleri için yeterli seviyede olmadığını göstermektedir.

Tek eksenli karbon fiber takviyeli kompozit malzemeler yüksek dayanımları ve yüksek enerji sönümleme kabiliyetleri olması sebebiyle çarpışma durumlarında sıklıkla tercih edilmektedirler. Literatürde bulunan çalışmalarda kompozit malzemelerin ezilme davranışını incelemek amacıyla düz plaka, boru, boru parçası, oluklu ve şapka biçimli geometrilerdeki numuneler kullanılmıştır. Bu çalışmada da kullanılacak numune ve hasar senaryosu literatürde sıklıkla görülen kompozit plakaların eksenel ezilme çalışmalarından seçilmiştir. Kullanılan numune tek eksenli karbon fiber takviyeli, 16 tabakalı, $[(0°/90°)_4]_s$ tabaka yerleşimine sahip, T700/M21 ismi verilen tabakalı düz kompozit plakadır.

Bu tez çalışmasında kullanılan deneysel veriler literatürden alınmıştır. Referans alınan çalışmada plaka şeklindeki kompozit malzemenin düşük hızlardaki hasar davranışını incelemek üzere yarı-statik ve dinamik testler gerçekleştirilmiştir. Kompozit plaka numunelerin testi için test düzeneği tasarlanmıştır. Yarı-statik testler 6 mm/dk sabit hız ile gerçekleştirilmiş ve dinamik testler 9 m/s ilk hızla numunenin üzerindeki 36 kg ağırlığındaki yük ile düşme testi şeklinde gerçekleştirilmiştir. Hasarı kolaylaştırmak ve ilerlemeli hasar oluşturmak amacıyla numunelerin bir ucuna 45^{o} açıyla pah kırılmıştır. Test verileri yüksek hızlı kameralar ve data toplama cihazlarıyla elde edilmiştir. Test sonucunda elde edilen kuvvet-yer değiştirme sonuçları paylaşılmıştır.

Kompozit malzemelerin hasar analizlerini gerçekleştirmek üzere geliştirilmiş çok sayıda ticari sonlu elemanlar yazılımları mevcuttur. Bu çalışmada ABAQUS 6.14-4, LS-DYNA R7 ve RADIOSS 14.0 gibi sıkça kullanılan sonlu elemanlar çözücüleri ve bu yazılımların sunduğu malzeme modelleri ile hasar kriterleri aynı senaryolar üzerinde kullanılarak karşılaştırma yapılmıştır. CATIA V5-6R2014 yazılımı ile numune geometrisi çizildikten sonra sonlu elemanların oluşturulması için HyperMesh 14.0 ve HyperCrash 14.0 yazılımlarından faydalanılmıştır. Kullanılan yazılımların bu çalışmanın yapıldığı tarihteki son versiyonlarında olmasına dikkat edilmiş, böylelikle yazılımlar üzerinde yapılmış geliştirmeler de göz önüne alınarak güncel bir çalışma ortaya koyulmaya çalışılmıştır. Daha önce yapılan çalışmalar incelendiğinde çalışmaların genellikle ABAQUS kullanılarak yapıldığı görülmüştür. Literatürde farklı hasar kriterlerinin ve sonlu elemanlar programlarının bir arada kullanılarak kıyaslama yapıldığı çalışmaların eksikliği bu tez çalışmasını bu konu üzerinde odaklanmaya itmiştir. Kompozit malzemelerin hasar incelemelerinde kullanılması neredeyse zorunluluk olan sonlu elemanlar yazılımları böylelikle daha iyi tanınmış olacaktır.

Kompozit malzemelerin sonlu elemanlar ile hasar analizi yapılırken delaminasyonun etkisinin hasar durumlarında göz ardı edilemeyeceği zamanlarda modellemede de delaminasyonun gerçekleşmesi sağlanmalıdır. Özellikle tabakaların hasara uğradıktan sonra birbirlerinden ayrılıp diğer tabakaları etkilediği hasar durumlarında delaminasyon hasarının doğru bir şekilde modellenebilmesi büyük öneme sahip olmaktadır. Bu sebeple modelleme tekniği olarak delaminasyon hasarının daha gerçekçi gözlemlenebildiği, her tabakanın üç boyutlu katı elemanlarla modellendiği teknik kullanılmıştır. Katı elemanlarla modellenen tabakalar arasına üç boyutlu yapışkan elemanlar tanımlanmıştır. Çeşitli hasar kriterleri kullanılarak değerlendirilen bu elemanlar belirlenen kritere ulaşıldığında hasara uğramakta ve tabakalar birbirinden ayrılmaktadır. Yapışkan elemanlar için kullanılan hasar kriterlerine bu çalışmada yer verilmiştir. ABAQUS, LS-DYNA ve RADIOSS yazılımlarıyla kompozit malzemeler için farklı malzeme modelleri ve hasar kriterleri kullanılarak kuvvet-yer değiştirme grafikleri elde edilmiştir. Çalışmadaki asıl amaç elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafiklerinin deneysel veriler ile uyuştuğunun gösterilmesidir. Farklı sürtünme katsayıları ile analizler tekrarlanmıştır. Böylece doğru sürtünme katsayısının öngörülmesi de amaçlanmıştır. Kopma gerinmesi değerinin gerektiği bazı hasar kriterlerinde farklı gerinme değerleriyle bulunan sonuçlar kıyaslanmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarda kopma gerinmesi ile ilgili verilerin olmaması bu çalışmada da farklı değerler ile deneme yapılmasını gerektirmiştir. Kullanılan eleman tipleri, yüzey ilişkileri, sınır koşulları ve gereken diğer tüm parametreler tez içerisinde açıklanmıştır. Böylelikle programlar kendi içlerinde kıyaslandığı gibi birbirleriyle kıyaslanabilecek sonuçlar da elde edilmiştir.

Sonuç olarak; sonlu elemanlar yazılımlarının üç boyutlu modellenen kompozit plakaların hasar analizlerindeki yetenekleri ve değişik hasar kriterlerinin karşılaştırmalı doğruluk oranları gösterilmiştir. Sonuçlar incelenirken kuvvet-yer değiştirme eğrisinin deneysel çalışmadan elde edilen eğri ile uyumu, maksimum reaksiyon kuvvetinin ve sönümlenen enerjinin doğruluğu ve hasar davranışının deneysel çalışmada kameralarla elde edilen görüntülerle örtüşmesi dikkate alınmıştır. ABAQUS ve LS-DYNA yazılımları genel olarak hasar davranışını daha doğru öngörmüşlerdir. LS-DYNA farklı çeşitlerde kompozit malzeme modelleri ve hasar kriterleri sunarken ABAQUS bu konuda daha kısıtlıdır. ABAQUS ile farklı hasar kriterlerinin kullanılabilmesi için kod yazarak yazılıma malzeme modeli ya da hasar kriteri tanımlaması yapmak gerekmektedir. RADIOSS ile kullanıcılara sunulan hasar kriterleri diğer yazılımlarda başarılı olurken, RADIOSS bu çalışmada diğer iki yazılıma göre en başarısız yazılım olarak görülmüştür.

Kullanılan hasar kriterleri incelendiğinde Hashin-Rotem ve Hashin hasar kriterlerinin başarılı oldukları görülmüştür. Bunun yanında LS-DYNA'da MAT 55 malzeme modelinde kullanıldığı gibi Chang-Chang ve Tsai-Wu hasar kriterlerinin kombinasyonun da başarılı olabileceği görülmüştür. Bu durumdan hasar modlarıyla ilişki kuran hasar kriterlerinin daha gerçekçi sonuç verdiği görülmektedir.

INVESTIGATION OF BEHAVIORS OF THE COMPOSITE PLATES DURING STATIC AND DYNAMIC LOADS

SUMMARY

Composite materials have been used for many years. The reason why people prefer composite materials since very old years is that they have important advantages. The advantages of composite materials resulted in an increase of use in structural design of the vehicles and have revealed the need for a better understanding of behavior under crash loads. The purpose of the studies on the safety and crash behavior of composite materials showed that they have similar or better capabilities compared to conventional materials. Studies on the crashworthiness of composite materials have increased significantly in parallel to the knowledge in this field last 30 years. With the development of technology, increased knowledge can be used more efficiently.

The calculations required to predict the crash behavior of composite materials are much more difficult than the manual calculations. For this reason it is necessary to make analysis with the help of computers. Performing accurate simulations depends on accuracy of damage criterias. From past to present, numerous composite failure criterias were developed such as, maximum stress, maximum strain, Tsai-Hill, Tsai-Wu, Hoffman, Hashin, Hash-Rotem, Puck, Chang-Chang, and computer-aided analysis and tests in different scenarios with different composite materials were performed by researchers. Damage criterias generally work as a result of using an appropriate formula for the stress values of an element in different directions and analyzing the resulting stress. This thesis examined the failure crtierias developed in the past and many damage criterias not mentioned in this study are available in the literature. In the selection of damage criterias that will be examined, finite element softwares used in this thesis were taken into consideration. Purpose of failure analysis studies are to predict the damage behavior, damage evolution during crush and absorbed energy end of the crush of every structure using the material datas. In order for a damage criterion to be regarded as successful, the correct result must be provided in every case. Studies on this subject suggest that our knowledge is not enough for damage analysis of composite materials.

Uniaxial carbon fiber reinforced composite materials are preferred commonly at crash scenarios due to their high strength and high capability of energy dissipation. Studies in the literature in order to examine the crushing behavior of composite materials, flat plate, pipe, tubing, corrugated, and a hat-shaped specimen geometries were used. The damage scenario and samples used in this study were selected from the axial crushing of composite plates studies published in the literature. The sample used in this thesis is a carbon fiber-reinforced, uniaxial, 16 layered, $[(0°/90°)_4]_s$ layer placement, called as T700/M21 composite flat plate. The thickness of each layer is 0.26 mm. This composite material exhibits very high strength properties in the fiber direction and is used mainly in aeronautical industry as the wing box or the fuselage. The effect of holes on the material strength to be opened during assembly is another research topic that is frequently studied.

The performed tests used in this thesis were taken from literature. In the reference works, quasi-static and dynamic tests were carried out to examine the damage in low-speed behavior of the composite plates. Test setup was designed for testing of composite plate specimens. Quasi-static tests carried out with a constant speed of 6 mm/min using a hydraulic testing machine in compression and dynamic tests carried out with 9 m/s initial speed with a falling load of 36 kg on the specimen. The unsupported length of specimen was 30 mm at the beginning of the quasi-static test and decreases as the displacement of piston increases. The unsupported length of specimen was fixed to 20 mm and is constant during dynamic tests. The specimens were crushed 10 mm in static tests and 20 mm in dynamic tests. The size of the specimens are 60 mm x 10 mm in quasi-static tests and 160 mm x 60 mm in dynamic test. Thickness of the plates is 4,16 mm. In order to trigger the damage and create progressive damage, 45^{o} chamfer was created on one end of the specimen. The tests were repeated twice and were followed by high-speed cameras and data collection devices. Force-displacement results and damage behavior images obtained from the tests were reported.

There are many commercial finite elements softwares to perform failure analysis of composite materials. In this study, commonly used ABAQUS 6.14-4, LS-DYNA R7 and RADIOSS 14.0 finite element softwares, material models and failure criterias offered by this softwares were used for the same scenarios to make comparisons between them. After creating 3D geometry of the specimen using CATIA, HyperMesh and HyperCrash were also used for creating the finite element model. HyperMesh and HyperCrash are very useful softwares for defining element and material properties, contact parameters and boundary conditions. ABAQUS user interface is used for analysis used ABAQUS solver and HyperCrash user interface is used for LS-DYNA and RADIOSS analysis. The softwares that are used on the date of this study selected as the final versions, improvements that are implemented in softwares are considered to make up-to-date study.

When the previous studies were examined, it was seen that the studies were usually done using ABAQUS. The lack of studies using LS-DYNA and RADIOSS is noteworthy. In addition, lack of benchmarking studies performed in the literature by using a combination of finite element programs, forced the study of this thesis on this issue. Finite element softwares, which are almost mandatory in the study of damage thus will be better recognized and this work may be a helpful resource for future works.

There are various methods of modeling with finite elements of composite materials. Among these methods, the most commonly used technique is the modeling of layer groups within shell elements. However, it is not possible to predict delamination by using this method. While the damage analysis is performed with the composites and when the effect of delamination can not be ignored in the damaged cases, delamination must be ensured in the modeling. Especially in case of damages where the plies are separated from each other after the damage and the other plies are affected, it is very important that the delamination damage is correctly modeled. There are also methods to do this. Three-dimensional solid modeling for each layer was used to observe the delamination to be more realistic. Between layers that were modeled using solid elements, three-dimensional adhesive layer were defined. In this case, test results more compatible with experimental studies can be obtained. When elements that are evaluated using various damage criterias reach limit, they are damaged and layers separated from each other. With ABAQUS and LS-DYNA it is

possible to define the adhesive region between the layers using contacts. According to the traction-separation law, the surface-to-surface relationship is deleted after the damage, and the layers are separated from each other. In this case, realistic results can be obtained and analysis time is shortened. However, because RADIOSS does not support, this method is not used. Also, damage criterias used for the adhesive elements are included in this thesis. Force-displacement graphs of damages were obtained using ABAQUS, LS-DYNA and RADIOSS softwares with different material models and failure criterias. Using these graphs, the maximum reaction force and the absorbed energy amount are calculated. Damage behaviors are examined and the final damage status is shared for each analysis.

The main purpose of the study is to show that the obtained force-displacement graphs agree with the experimental data. Analysis was repeated with different coefficients of frictions. Thus, it is also aimed to predict the correct friction coefficient. For some damage criterias that require failure strain, results were compared obtained from different values of failure strains. The fact that there is no data related to failure strain in the experimental studies made necessitates analyzing with different values in this study. Element types, contact types and parameters, boundary conditions, and other required parameters that are used during the creation of finite element models are described in detail. Thus, comparable results were obtained as compared with each other within the softwares themselves.

As a result; capabilities of finite element analysis and damage criterias that are used for damage analysis of composite plates with three-dimensional elements are showed. While examining the obtained results from analysis, force-displacement curves and damage behaviors are compared with the results obtained from the experimental studies. In order to be able to accept that an analysis result is correct, the force-displacement curve, the maximum reaction force, the amount of absorbed energy, and the damage behavior must be compatible with the experimental study. In addition, the accuracy of the damage behavior of the composite plate is considered using the images obtained with the cameras in the experimental study.

ABAQUS and LS-DYNA softwares are generally estimate the behavior of damage more accurately. Although LS-DYNA provides various composite material models and damage criterias, ABAQUS is limited at this subject. Using ABAQUS software with different damage criteria needs to identify the material models or the damage criterias by writing codes. It is seen in the literature that many researchers use their own material model codes for their studies. In this way, desired element types and contact definitions can be used easily. Composite material models in LS-DYNA generally require more experimental work, and if they are done, more realistic analysis results will be obtained. Although damage criterias offered to the users with RADIOSS succeeds in other two softwares, RADIOSS is found as the most unsuccessful in this study than the other two. Although the material models are easy to define, the disadvantages of the element formulations and contact definitions caused this situation.

When the damage criterias used were examined, it was found that the Hashin-Rotem and Hashin damage criterias were successful. Besides, the combination of Chang-Chang and Tsai-Wu damage criteria in MAT 55 material model could be successful in LS-DYNA. In this case, it is seen that the damage criteria related to the damage modes give more realistic results. However, when the same damage criteria are examined with a single finite elements software, the result will be more accurate.

1. GİRİŞ

Kompozit malzemelerin kullanımı çevresel etkenlerden ötürü daha hafif yapılar ortaya çıkarmak ve verimliliği arttırmak amacıyla hızla artmaktadır. Havacılık sektörü kompozit malzeme kullanımında başta bulunurken otomotiv ve demiryolu sektöründe de kullanım oranı giderek artmaktadır. Kompozit malzemelerin günlük hayatta artan kullanım oranı çarpışma yüklerindeki davranışlarını inceleme ihtiyacını da beraberinde getirmiştir. Fiber takviyeli polimer kompozit malzeme kullanılarak geliştirilmiş araçlarda öncelikli hedef insanların güvenliğini ve dolayısıyla yeterli çarpışma dayanımını sağlamaktır.

Çarpışma dayanıklılığı, bir yapının çarpışma durumunda içerisinde bulunan canlıları güvende tutabilmesi manasına gelmektedir. Kompozit malzemelerin mühendislik konusu altında incelenmesi 1940'lı yıllarından başından itibaren olmuştur. Yapılan çalışmaların büyük kısmı yüksek maliyetli deneysel çalışmaları kolaylaştıracak sayısal modellerin geliştirilmesi üzerine odaklanmıştır. Bu amaçla temel modellerin seçilmesi, delaminasyon teknikleri ve hasar başlatıcı mekanizmalar araştırılmıştır. Daha güçlü sonlu elemanlar kodlarının geliştirilmesi ve daha iyi bilgisayar sistemlerinin kullanılabilmesi sayesinde sayısal hesaplamaların yapılabilmesi de gün geçtikçe kolaylaşmıştır. Kırılma davranışları geometri, tabaka yerleşme sırası, mekanik özellikler, yüzey ilişkileri, sürtünme ve şekil değiştirme hızı gibi parametrelere bağımlıdır [1,2]. Ayrıca kompozit malzemeler fiber kırılması, matris kırılması ve delaminasyon gibi birbirleriyle ilişkili hasar mekanizmalarının karışık sırayla gerçekleşmesiyle hasara uğramaktadırlar. Kompozit malzemedeki kırılma davranışının karışık doğasından ötürü bunların sayısal olarak hesaplanması zor olmuştur.

Sayısal modellemede büyük deformasyonların bulunduğu ezilme davranışını daha iyi hesaplayabilmek için uygun hasar modellerinin kullanıldığı açık (explicit) kod ile doğrusal olmayan analiz tavsiye edilmektedir [3]. Kompozit malzemelerin ezilme modellemesinde kullanılan hasar modellerinin çoğunda geleneksel hasar kriterleri

temel alınmaktadır. Literatürdeki çalışmalarda araştırmacıların geleneksel hasar kriterlerinin dışına çıkarak geliştirdikleri modeller de bulunmaktadır [4].

Kompozit hasar modellemesindeki asıl amaç ezilme hasar modlarını öngörmek, ezilme sırasındaki ve enerji sönümleme halindeki davranışını değerlendirmektir. Bu tezde karbon fiber takviyeli plastik kompozit plakanın ezilme anındaki sayısal modellemesi üzerinde çalışılmıştır. Modelleme çalışmaları literatürde bulunan deneysel çalışmalar üzerine yapılmıştır [5-7]. Çarpışma durumundaki kompozit malzemelerin karışık hasar davranışının hesaplanabilmesi için gelişen bilgisayar teknolojisiyle birlikte piyasadaki sonlu elemanlar yazılımlarını kullanmak neredeyse zorunlu hale gelmiştir. Sıklıkla tercih edilen ABAQUS, LS-DYNA ve RADIOSS sonlu elemanlar yazılımları kullanılarak ilgili deneysel çalışmalarda kullanılan numunenin sayısal modeli oluşturulmuş, farklı parametreler kullanılarak bulunan sonuçlar değerlendirilmiştir. Ele alınan numunedeki her tabaka üç boyutlu katı elemanlarla modellenmiş, tabakalar arasına yine üç boyutlu yapışkan elemanlar tanımlanmıştır. Böylece delaminasyon hasarının da doğru bir şekilde incelenmesi amaçlanmıştır. Programların sunduğu ve üç boyutlu elemanlarla kullanılabilen tüm malzeme modelleri ve hasar kriterleri bu tez çalışmasına mümkün olduğunca dahil edilmiştir. Bu sayede kompozit malzemelerin hasar incelemesinde en çok kullanılan programlar karşılaştırılarak bu programların kabiliyetleri ve sunmuş oldukları hasar kriterleri kıyaslanmıştır.

1.1 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Literatürdeki kompozit malzemelerin hasar analizi çalışmaları genellikle belirli analiz programları üzerine yoğunlaşmış, farklı analiz programları arasındaki kıyaslama çalışmalarına yeteri kadar yer verilmemiştir. Bu çalışmanın amacı farklı hasar modlarının karışık bir şekilde gerçekleştiği ve analiz ile test sonuçlarına yakınlaşmanın güç olduğu eksenel yönde ezilen tek eksenli karbon fiber kompozit malzemenin ABAQUS, LS-DYNA ve RADIOSS sonlu elemanlar yazılımları ile analizlerinin yapılarak programların ve bunların sunduğu malzeme modelleri ile hasar kriterlerinin kıyaslanmasıdır. Çalışmada ayrıca; yarı-statik ve dinamik olarak iki senaryo uygulanarak sonuçların senaryolar arasında değişmediğini görmek amaçlanmıştır. Sonlu elemanlar analizleriyle elde edilen sonuçların kuvvet-yer değiştirme grafikleri, maksimum reaksiyon kuvveti değerleri, sönümlenen enerji

miktarları ve hasar davranışları üzerinden deneysel çalışmalara olan yakınlığı incelenmiştir.

1.2 Literatür Araştırması

Israr ve arkadaşları [5], $0^o/90^o$ açılı T700/M21 karbon fiber takviyeli kompozit plakaların eksenel ezilme durumundaki davranışını deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında farklı tabaka dizilimindeki ve farklı açılarda pah kırılmış plakalara eksenel yönde sabit 6 mm/dk hızla yük uygulayarak kuvvet-yer değiştirme davranışlarını kıyaslamışlardır. Çıkan sonuçlardan hasar hesaplamalarında kullanılmak üzere ortalama ezilme gerilmesi hesaplamışlardır. Duong ve arkadaşları [7], aynı test düzeneğini ve farklı tabaka dizilişlerine sahip iki farklı kompozit plakayı kullanarak ezilme hızının deneysel sonuçlara olan etkisini incelemişlerdir. Deneysel çalışma sonuçlarına göre ilk hızın artmasının maksimum tepki kuvvetini bir miktar arttırdığını ancak genel davranışı değiştirmediğini, malzemenin enerji sönümleme davranışında ise görünür bir fark ortaya çıkarmadığını belirtmişlerdir. Guillon ve arkadaşları [6], farklı kompozit plakaların sabit 20 mm/dk hızla ve üzerine çelik silindir bağlanarak 5 m/s ilk hızla ezilme testini yapmışlardır ve farklı hasar modlarında numunenin ne kadar enerji sönümlediğini incelemişlerdir. Zemine yerleştirdikleri bir parça ile tabakaların ayrılmasını sağlamışlar, bu hasar sırasında sönümlenen enerji miktarını ölçmüşlerdir. Doğrulama çalışmasında ABAQUS kullanarak üç boyutlu elemanlarla numuneyi modellemişler ve analiz sonuçlarının test sonuçlarına yakın olduğunu göstermişlerdir. Israr ve arkadaşları [4], yapılan bu deneysel çalışmaları kullanarak ABAQUS yazılımında T700/M21 kompozit plakanın ezilmesi üzerine statik ve dinamik deneysel çalışmalara uygun sayısal model hazırlamışlardır. Modellerinde üç boyutlu elemanlarla modelleme yapmışlardır. Yazılımın sunduğu malzeme modeli ve hasar kriterini kullanmak yerine ezilen elemanın hasar hesabını daha önce bulunan ortalama ezilme gerilmesine göre yapan kendi hazırladıkları yöntemi uygulamışlardır. Analizlerden elde ettikleri sonuçların statik ve dinamik testlerle örtüştüğünü belirtmişlerdir.

Chiu ve arkadaşları [8], tek eksenli T700/M21 kompozit borunun eksenel yük altında ezilme testi çalışmasını yapmışlardır. Ezilme hızları 0,017 mm/s ile 8,3 m/s arasında değişmektedir. Test sonrasında hasar gören numuneleri incelemişlerdir. Her numunenin kuvvet-yer değiştirme grafikleri elde edilmiştir. Elde edilen verilerle

malzemenin özgül enerji sönümleme değeri ile maksimum ve kararlı haldeki kuvvet değerleri belirlenmiştir. Çalışmalarının sonunda şekil değiştirme hızının artmasının hasar davranışı üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığını belirtmişlerdir. Sonraki çalışmalarında [9], deneysel çalışmasını yaptıkları kompozit borunun ABAQUS kullanarak sonlu elemanlar analizlerini üç boyutlu katı elemanlarla gerçekleştirmişlerdir. Tabaka hasarı için kendi geliştirdikleri hasar modelini kullanmışlardır. Delaminasyon bölgesi için yazılım içerisinde bulunan çekme-ayrılma kanununu kullanmışlardır. Geliştirilen hasar modeli ile elde ettikleri analiz sonucunun test sonuçları ile örtüştüğünü belirtmişlerdir.

Huang ve Wang [10], tek eksenli karbon fiber takviyeli plastik kompozit borunun ezilme davranışını incelemişlerdir. Kullanılan üç numunenin bir tanesine hasar başlangıcı için bölüm oluşturulmazken diğer ikisinin bir ucuna pah kırılmıştır. 2 mm/dk sabit hızla eksenel yönde ezilen borunun kuvvet-yer değiştirme grafiği elde edilmiştir. Pah kırılmayan numune ortasından hasar görürken, pah kırılan numuneler ucundan hasar görmeye başlamıştır. Pah kırılan numunelerin LS-DYNA ile sonlu elemanlar modeli oluşturulup MAT54 malzeme modeli kullanılarak analizi yapılmıştır. Elde edilen sonucun deneysel çalışmayla örtüştüğü görülmüştür.

Siromani ve arkadaşları [11], karbon fiber takviyeli kompozit borunun eksenel ezilmesi deneysel çalışmasının LS-DYNA kullanarak sonlu elemanlar analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada her üç tabaka bir sıra kabuk eleman olarak modellenmiş, tabakaları temsil eden kabuk elemanlar birbirlerine delaminasyon hasar kriteri tanımlı yüzey ilişkisi ile bağlanmıştır. Tabaka için MAT54 malzeme modeli kullanılmıştır. Çalışma sonunda analiz sonuçlarının test sonuçları ile örtüştüğü belirtilmiştir.

Feraboli ve arkadaşları [12], T700/2510 karbon fiber takviyeli kompozit oluklu numunenin LS-DYNA yazılımıyla MAT54 malzeme modelini kullanarak ezilme analizini gerçekleştirmişlerdir. Deneysel çalışmalar Feraboli tarafından yapılmıştır [13]. Oluklu yapı seçmelerinin sebebini burkulmaya karşı daha stabil olması ve numuneyi dengede tutmak için aparata ihtiyaç duyulmaması olarak belirtmişlerdir. Numuneyi tek sıra kabuk elemanlarla modellemişlerdir. Farklı parametrelerde çok sayıda deneme yaptıktan sonra kuvvet-yer değiştirme grafiğinde test sonuçlarına yakın değerler elde etmişlerdir. Yüzey ilişkisi tanımlamasının, eleman boyutunun ve filtreleme yönteminin modellemedeki güçlüklerden olduğunu, test sonuçlarına daha

çok yakınlaşabilmek için daha fazla parametrik çalışmanın yapılması gerektiğini belirtmişlerdir.

Sun ve arkadaşları [14], çalışmalarında, kompozit hasar kriterlerinin kullanım oranlarının tahmini dağılımını belirtilmişlerdir. Bu çalışmaya göre kompozit tasarımcılarının yaklaşık %70lik kısmı Tsai kriterlerini kullanmamaktadır. Maksimum şekil değiştirme hasar kriterinin ise en çok kullanılan kriter olduğu görülmektedir. Hashin hasar kriterinin ve bundan türetilmiş diğer kriterlerin daha az kullanılmasının sebebinin kompozit kitaplarında bu kriterlere yeterli önemin verilmemesinden olabileceği düşünülmektedir. Ancak araştırmacıların çalışmalarına bakıldığında çoğu araştırmacının Hashin hasar kriterini kullandığı görülmektedir.

Lampani [15], çalışmasında kompozit malzemelerin sonlu elemanlar modellerinde kullanılan kohesif alan modellemesi tekniğini incelemiştir. Delaminasyon modlarını incelemek için kullanılan DCB, 3ENF ve MMB testleri modellenmiştir. Farklı eleman boyutları kullanılarak elde edilen sonuçlar test sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Analiz sonuçlarının test sonuçlarıyla uyumlu olduğu belirtilmiştir.

Uguen ve arkadaşları [16], çalışmalarında farklı tabaka dizilimlerine sahip T800/M21 karbon fiber takviyeli plastik kompozit numunelerin DCB testini yapmışlardır. Aynı numunelerin sonlu elemanlar modelini kohesif alan elemanları kullanarak farklı parametreler ile oluşturmuşlar ve elde ettikleri sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Kohesif elemanların rijitliğinin sonuçları etkilemediğini ancak enerji yayınım hızının değişmesiyle sonuçların değiştiğini belirtmişlerdir. Hasar başlangıcından sonra doğrusal mukavemet hasarının üstel hasara göre daha gerçekçi sonuçlar verdiğini görmüşlerdir.

Dogan ve arkadaşları [17], çalışmalarında LS-DYNA ile katı, sürekli kabuk ve kabuk elemanları kullanarak karbon takviyeli plastik kompozit malzemenin hasar analizini yapmışlar ve literatürdeki deneysel çalışmalarla kıyaslamışlardır. Çalışmalarında kohesif elemanları ve hasar tanımlı yüzey ilişkisini, yüzey ilişkisi parametrelerini, eleman boyutlarını, tabaka modellemelerini değiştirerek analizleri tekrarlamışlardır. Yaptıkları karşılaştırmalarda kabuk elemanlarla modellemenin deneysel sonuçlara en çok yaklaştığını ancak analiz parametrelerinin sonuçları oldukça etkilediğini belirtmişlerdir.

Ilyas ve arkadaşları [18], çalışmalarında LS-DYNA yazılımı ile T800/M21 karbon fiber takviyeli plastik kompozit malzemesinin darbe hasarının sayısal modelini oluşturmuşlardır. Kohesif eleman parametrelerini bulmak için DCB, ELS ve MMB testlerini yapmışlardır. Sonlu elemanlar yazılımında, geliştirdikleri malzeme modelini kullanarak yaptıkları analizlerle deneysel çalışmalara oldukça yakın sonuçlar bulmuşlardır. Elde ettikleri modeli kohesif elemanlar kullanarak modelledikleri düz bir kompozit plakanın ortasına düşen bir cismin analizinde kullanmışlar ve sonuçların deneysel sonuçlarla uyumlu olduğunu belirtmişlerdir.

2. KOMPOZİT MALZEMELER

İki veya daha fazla organik ya da inorganik malzemenin birbiri içinde çözünmeden bir araya gelmesiyle oluşan, bu malzemelerden farklı yapısal özelliklere sahip yeni tür malzemelere kompozit malzemeler denilmektedir. Yapılarında genellikle sürekli olan matris ve onun içinde dağılmış fiberler bulunmaktadır. Kompozit malzemenin mukavemetinin büyük çoğunluğunu fiberler sağlamaktadır. Matris malzeme, fiberleri bir arada tutmak, yükleri fiberlere düzgün bir şekilde aktarmak, fiberleri dış etkilerden gelecek risklere karşı korumak, çatlak oluşumuna ve yayılmasına karşı direnç sağlamak, fiberleri sıcaklığa ve korozyona karşı korumak gibi görevler üstlenmektedir. Kompozit malzeme tasarımında en önemli kıstas ihtiyaca en uygun matris ve fiber birleşiminin yanı sıra uygun fiber oryantasyonunun seçilmesidir.

Tarihi çok eski yıllara dayanmasına rağmen 1950'li yıllarda denizcilik alanında tekne yapımında, otomotiv karoserilerinde, uçak sanayisinde ve elektriksel komponentlerde cam takviyeli kompozit malzemeler sıkça uygulama alanı bulmuştur. Ülkemizde 1960'lı yılların başından itibaren çatı levhaları, sıvı depoları ve küçük deniz teknelerinin yapımı gibi alanlarda kullanılmıştır. Ülkemizde üretilen Anadol otomobilinin kaportası da bu kompozit malzemeden yapılmıştır. 1970'li yıllarda metal matrisli kompozitler geliştirilmiştir. Havacılık sektöründe ilk olarak ağırlıkça %2 oranla Boeing 707 uçağında, daha sonra %10 oranla Boeing 777'de kullanılmıştır. Bu oran daha sonra %65 değerine kadar artmıştır [19]. 1980li yıllarda yüksek dayanımlı fiber kompozit alanında önemli çalışmalar yapılmıştır. Kompozit malzemeler günümüzde uzay ve uçak sanayi, yapı ve inşaat sektörü, otomotiv sanayi, elektrik ve elektronik sanayi, spor sektörü, biyomedikal sektörü gibi alanlarda yaygın bir kullanım alanı bulmuştur. Yüksek dayanım ve düşük ağırlık gerektiren alanlarda artan bir kullanım oranıyla kompozit malzemeler tercih edilmeye devam etmektedir [20].

Kompozit malzemeler tek fazlı malzemelere kıyasla yüksek mukavemet, düşük ağırlık, yorulma direnci, korozyon direnci, ısıya karşı dayanıklılık, elektriksel ve akustik yalıtım gibi özelliklere sahiptir. Ancak yüksek üretim maliyeti, malzemenin

işlemesinin güçlüğü, seri üretime yatkın olmaması, geri dönüşümünün neredeyse olmaması, kırılma uzamasının az olması ve üretiminin zorluğu da kompozit malzemelerin dezavantajlarındandır.

2.1 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemelerin yapılarında çok fazla sayıda malzeme kullanabilmesinden ötürü kesin sınırların çizilememesine rağmen aşağıdaki gibi matris ve fiber elemanlarına göre sınıflandırma yapabilmek mümkündür.

2.1.1 Matris malzemesine göre kompozit malzemeler

Kompozit malzemeler matris malzemesinin türüne göre polimer, metal, seramik ve karbon matrisli kompozit malzemeler olmak üzere sınıflandırılabilirler.

2.1.1.1 Polimer matrisli kompozitler

Polimer malzemeler liflerle pekiştirilerek polimer kompozitler elde edilmektedir. Düşük maliyetlidirler ve bu sebeple endüstride çok geniş kullanım alanı bulmuşlardır. Polimer matrisler ile fiber malzemesi olarak karbon, cam ve boron lifleri kullanılmaktadır.

Polimer kompozitlerde mukavemet, fiberlerin miktarı ile doğru orantılı olarak artmaktadır. En önemli özellikleri yüksek özgül mukavemet ve özgül elastisite modülüne sahip olması, işleme kolaylığı ve nem tutma özelliğidir. Yoğunlukları düşük olduğundan sıcaklık, nem ve zaman etkisiyle viskoelastik ve viskoplastik davranış sergilemektedirler [21].

2.1.1.2 Metal matrisli kompozitler

Metalik fazın bazı takviye malzemeleri ile vakum emdirme, dökme, karıştırma, elektroliz yoluyla kaplama, sıcak presleme, haddeleme ve difüzyon kaynağı gibi yöntemlerle pekiştirilmesi ile elde edilmektedirler. Matris malzemesi olarak genellikle demir, alüminyum, titanyum, magnezyum, bakır ve çelik kullanılmaktadır. Oksitlenme riskinin yüksek olduğu ortamlarda bile yüksek sıcaklıklarda kullanılabilmektedirler. İmalatının zor ve maliyetlerinin yüksek olmasına rağmen daha çok uzay ve havacılık alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadırlar [21].

2.1.1.3 Seramik matrisli kompozitler

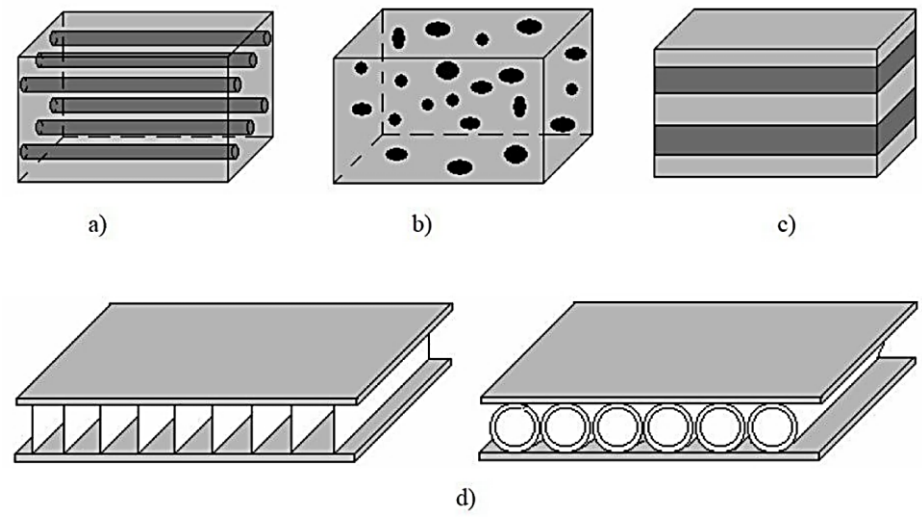
Seramik fazın takviye malzemeleri ile pekiştirilmesi yoluyla elde edilirler. Metalik ya da metal özelliği taşımayan elemanların bir araya gelmesiyle üretilebilmektedirler. Yapıları itibariyle gevrektirler ve yüksek sıcaklık dayanımı gerektiren çalışma şartlarında karbon, cam, metal ve seramik fiberlerle kullanılırlar. Başlıca kullanım alanları arasında zırhlar, çeşitli askeri amaçlı parçalar ve uzay araçları gelmektedir [21].

2.1.1.4 Karbon matrisli kompozitler

Karbon, seramiklere benzer şekilde kırılgan bir malzemedir. Yüksek sıcaklık ve sürünme dayanımı, düşük yoğunluk, çekme ve basma yönlerinde yüksek mukavemet, yüksek yorulma dayanımı, yüksek ısıl iletkenlik ve yüksek sürtünme katsayısı gibi özelliklere sahiptirler. Bunun yanında yüksek maliyet, düşük kayma dayanımı ve yüksek sıcaklıklarda oksidasyon hassasiyeti gibi dezavantajları da bulunmaktadır [22]. Havacılık ve otomobil yarışları gibi yüksek performans gerektiren alanlarda kullanılırlar [21].

2.1.2 Takviye elemanına göre kompozit malzemeler

Kompozit malzemeleri yapılarındaki malzemelerin formuna göre sınıflandırma yapmak mümkündür. Şekil 2.1'de fiber takviyeli, partikül takviyeli, tabakalı ve dolgu kompozit malzemelerin şematik resimleri görülmektedir. Bu açıdan takviye elemanlarına göre kompozit malzemeler dört ana grupta toplanabilmektedir.

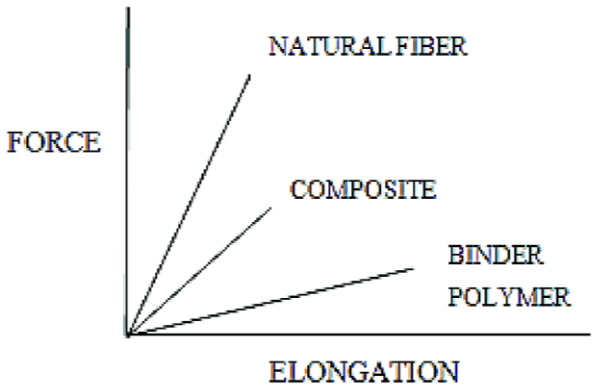


Şekil 2.1 : Takviye elemanına göre kompozit malzemeler; a) fiber takviyeli, b) partikül takviyeli, c) tabakalı kompozitler, d) dolgu kompozitler [23].

2.1.2.1 Fiber takviyeli kompozitler

Fiber takviyeli kompozit malzemeler fiber liflerinin uygun bir matris malzemesi ile birleştirilmesiyle elde edilirler. Fiberlerin matris içindeki doğrultuları, yerleşimi ve boyutları kompozitlerin özelliğini büyük ölçüde etkilemektedir. Uzun boyutlardaki fiberlerin matris içerisinde birbirlerine paralel şekilde yerleştirilmeleri ile fiber doğrultusunda yüksek, fiberlere dik doğrultuda ise oldukça düşük mukavemet elde edilmektedir. Birbirlerine dik iki doğrultuda yerleştirilmiş fiber durumunda ise iki doğrultuda da yüksek mukavemet elde etmek mümkündür. Fiberleri matris içerisinde homojen olarak dağıtarak yarı-izotropik bir yapı elde edilebilmektedir. Kompozit malzemeye uygulanan gerilme fiber doğrultusunda ise kompozit malzemenin dayanım değeri yüksek, fiber doğrultusu dışına çıkıldıkça kompozit malzemenin dayanım değeri düşük olmaktadır.

Fiberler genel olarak aynı malzemenin katı haldeki yapısına göre daha rijit ve daha güçlüdür. Yoğunluklarına oranla yüksek rijitlik ve dayanım özelliklerine sahiptirler. Fiber takviyeli kompozitlerin yapısında kısa veya kesik yapıda fiberler bulunabilir. Kısa fiberlerin boy-çap oranı oldukça büyüktür ve matris içerisinde tek yönlü ya da rastgele dizilmiş halde bulunabilirler. Şekil 2.2'de fiber ile matris malzemesinin ve oluşturdukları kompozit malzemenin çekme durumundaki tipik davranışı görülebilmektedir. En çok kullanılan çeşitleri grafit ve karbon fiberlerdir [21].



Şekil 2.2 : Fiber takviyeli kompozitlerin çekme durumundaki davranışı [24].

2.1.2.2 Partikül (parçacık) takviyeli kompozitler

Partikül takviyeli kompozit malzemeler bir ya da daha fazla malzemeden yapılmış partiküllerin daha farklı bir malzemeden olan matris içinde rastgele yerleştirilmesiyle oluşturulurlar. Partikül dağılımının rastgele ve homojen olmasından ötürü bu malzemelere yarı izotropik malzeme de denilmektedir. Matrisler seramik, metal ya

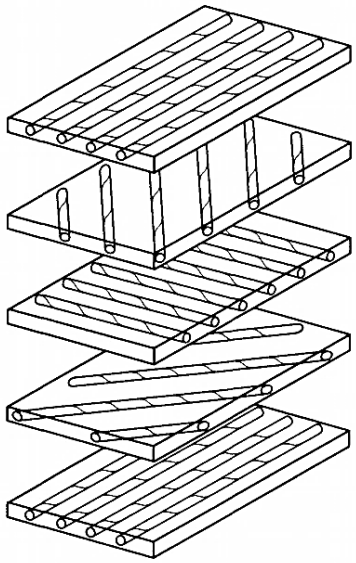
da polimer olabilmektedir. Yüksek mukavemet elde etmek için parçacık boyutlarının aynı olması gereklidir. Beton, alüminyum takviyeli poliüretan, kauçuk ve bakır alaşımları bu kompozitlere örnektir. Genellikle nükleer reaktörlerde ve roket pervanelerinde kullanılmaktadırlar.

2.1.2.3 Dolgu kompozitler

Üç boyutlu matris malzemesinin üç boyutlu dolgu maddesi ile doldurulması ile oluşturulur. Matris düzgün petekler, hücreler veya süngere benzeyen gözenekli yapılarda çeşitli geometrik şekillerde bir iskelet görevi görmektedir. Kullanılan dolgu malzemesi metalik, organik veya seramik esaslı olabilmektedir. Kompozit malzeme oluşturulurken seçilen malzemelerin birbiri içinde çözünmeyen ve birbirleriyle kimyasal reaksiyon vermeyen malzemelerden olmasına dikkat edilmelidir.

2.1.2.4 Tabakalı kompozitler

Tabakalı kompozitler aynı veya farklı doğrultularda fiber barındıran en az iki tabakanın üst üste konularak bir araya getirilmesi ile oluşturulurlar. Bu tabakalar metal, cam, plastik ya da ahşap olabilmektedir. Matris içerisinde rastgele yönlenmiş elyaflar, tek yönlü elyaflar veya farklı elyaf takviyeli tabakalar ile de oluşturulabilirler. En eski ve uygulamalarda en çok karşılaşılan kompozit türüdür. Uçaklardaki kanat ve kuyruk gruplarında yüzey kaplama malzemesi olarak yaygın bir şekilde kullanılırlar. Tabakaların Şekil 2.3'te görüldüğü gibi istiflenmesinin ardından yapıya sıcaklık ile birlikte basınç uygulanır.



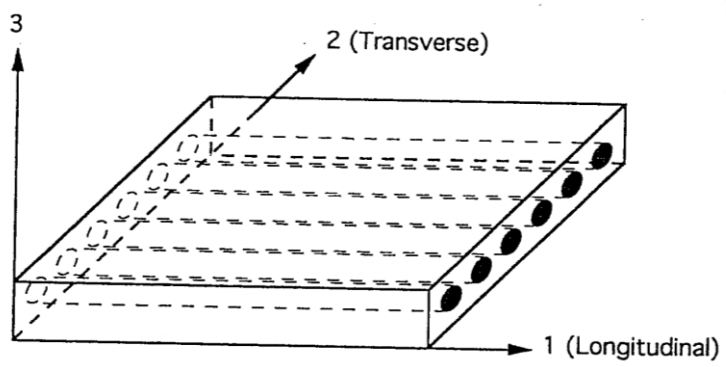
Şekil 2.3 : Tabakalı kompozit plakanın açılmış görüntüsü [25].

Tabakalı kompozit malzemelerin tercih edilmesindeki esas sebep bu kompozitlerin maruz kalacağı yükleme şartına uygun tasarlanabilmesidir. Çünkü uygulanan her tabakanın malzeme yönü istenilen doğrultuda seçilebilmektedir.

Tabakalı kompozitler simetrik ve antisimetrik olarak ikiye ayrılmaktadır. Bu tabakalamanın temelinde açı, malzeme ve tabaka kalınlığındaki farklılık yer almaktadır [23].

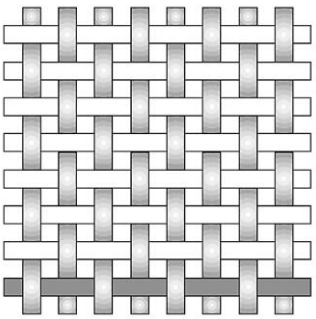
2.2 Kompozit Malzemelerde Malzeme Yönü

Kompozit malzemeler fiber doğrultusunda fiberlerin daha mukavemetli olması sayesinde daha dayanıklı ve rijittirler. Fiber doğrultusuna dik yönde ise yükler matris tarafından karşılanır ve matris fiber kadar dayanıklı olmadığından bu yönde kompozitler daha zayıftırlar. Yarı izotropik kompozit malzemelerde tüm yönlerde birbirine yakın özellikler görülmektedir. Şekil 2.4'te tek yönlü kompozit malzemeye ait temel yönler görülmektedir. 1 yönü fiber yönünü, 2 ve 3 yönleri fiberlere dik yönleri göstermektedir.



Şekil 2.4 : Tek eksenli kompozit tabaka ve temel koordinat eksenleri [20].

Şekil 2.5'te görülen fiberlerin birbirine dik şekilde örüldüğü tip kompozit malzemeler ise çift yönde de yüksek mukavemete sahiptirler.



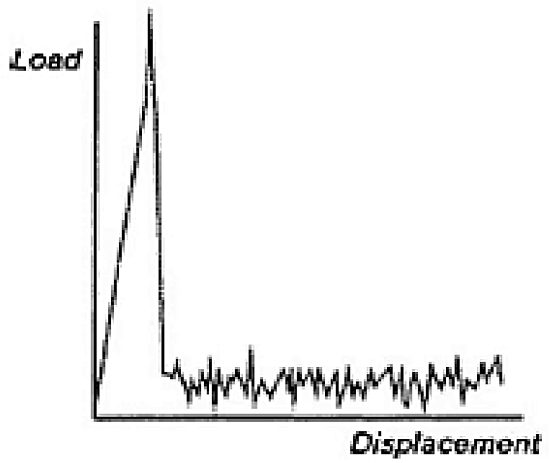
Şekil 2.5 : Dokuma tipi kompozitin şematik gösterilişi [26].

2.3 Kompozit Malzemelerde Ezilme Modları

Kompozit yapılardaki ezilme modları genel olarak katastropik hasar ve ilerlemeli hasar olmak üzere iki ana başlık altında incelenmektedir. Yapılardaki çarpışma durumunda, özellikle araçlardaki uygulamalarda tasarımın ve malzemenin kabul edilebilir seviyede yavaşlama ivmesini sağlayacak enerji sönümleme kabiliyetinin olması beklenmektedir. Testlerde farklı enerji sönümleme mekanizmalarının aynı anda gerçekleşmesinden ötürü kompozit malzemelerin sabit bir ezilme yükü ile enerji sönümlediği görülmektedir. Bu sebeple kompozit malzemeler çarpışma uygulamaları için kullanışlı olmaktadır. Bu konuda dikkat edilmesi gereken nokta yapının ilerlemeli hasara uğrayacak şekilde tasarlanması gerektiğidir.

2.3.1 Katastropik hasar

Katastropik hasar maksimum yükteki ani artış ardından gelen yük düşüşü şeklinde görülmektedir (Şekil 2.6). Hasar sonrasında numune basma yükünü taşıyacak kabiliyetinin büyük bir kısmını kaybetmektedir. Bu işlemdeki absorbe edilen enerji taşıt içinde bulunan yolcuları güvende tutabilecek miktardan çok düşük olmaktadır. Çoğu katastropik hasar mekanizması malzeme içerisindeki tabaka içi ya da tabakalar arası kontrolsüz çatlak ilerlemesinden kaynaklanmaktadır. Bu amaçla tasarlanmış yapılar daha az enerji sönümlerler ve ilerlemeli hasara uğrayan enerji sönümleyicilere göre daha fazla yapısal yük taşıyabilirler.

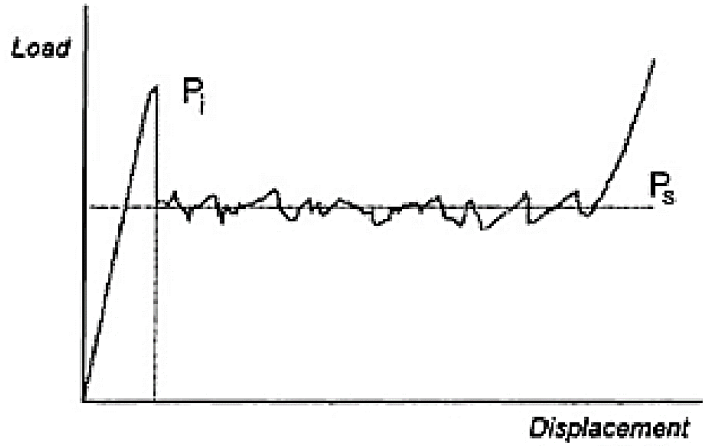


Şekil 2.6 : Katastropik hasar durumu [27].

Kompozit malzemeler kullanılarak, hasar modlarının, sönümlenen enerjinin ve ezilme yükünün elde edildiği çok sayıda test yapılmıştır. Katastropik hasarlardan kaçınmak için ince et kalınlığına sahip uzun yapılardan kaçınılmalıdır.

2.3.2 İlerlemeli hasar

İlerlemeli hasar, numunenin bir ucunda hasarı başlatacak bir bölge oluşturularak yapılabilir. Bu sayede stabil bir hasar ilerlemesi görülür ve ölçülen en yüksek yük azalır. Şekil 2.7'de ilerlemeli hasar durumunda elde edilen tipik kuvvet-yer değiştirme grafiği görülmektedir. Buna göre ilerlemeli hasar durumunda malzeme hasara uğramaya başladıktan sonra yük taşıma kabiliyetini kaybetmemektedir.

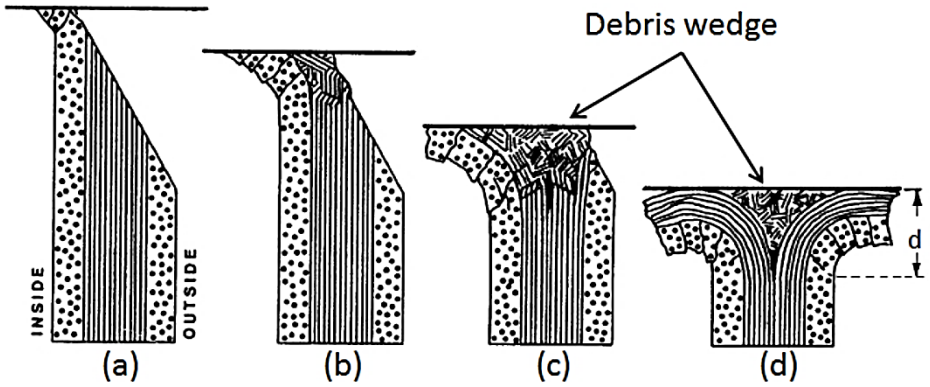


Şekil 2.7 : İlerlemeli hasar durumu [27].

Hull [28] tarafından yapılan testte belli bir kesitteki kompozit tüpün ortalama ezilme davranışı incelenmiştir. Yapılan testte $[90/0]_{2S}$ tabaka dizilimdeki numune kullanılmıştır. Şekil 2.8'da numune ucunda bulunan pah yardımıyla ezilmenin başlatıldığı görülmektedir. Şekil 2.8a'da iç bölgedeki 90^o açılı tabaka basmaya maruz kalmış ve kayma gerilmesinin etkisinde hasara uğrayarak iç bölgeye kaymıştır. Bu hareket devam ederken fiber doğrultusundaki basma gerilmesi artarak burkulmaya sebep olmuştur.

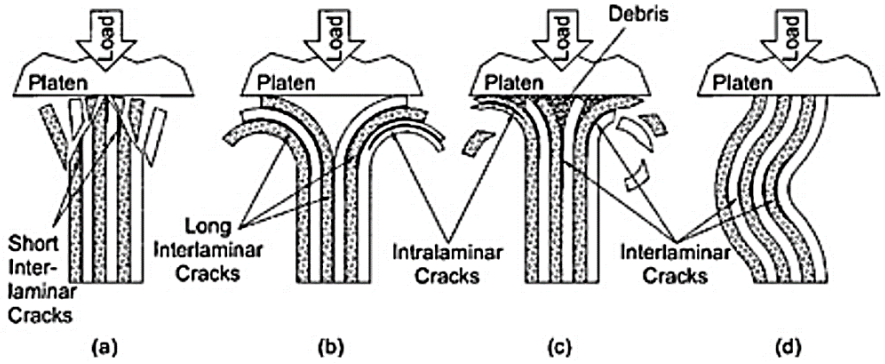
Şekil 2.8b'de orta eksendeki tabakalar rijit plaka ile temas ettiğinde bu tabakalarda burkulma gözlenmiştir. Şekil 2.8c'de ezilme devam ettikçe ezilen malzeme kalıntıların yığılmasına sebep olmuştur. Birçok ezilme testinde ezilen malzeme kalıntılarının ortadaki eksenel fiberlere paralel yanal kırılmalara sebep olduğu görülebilmektedir. Bu kalıntılar mod I delaminasyonuna sebep olarak malzemeyi ikiye ayırmakta ve içeriye/dışarıya doğru hareket etmesine sebep olmaktadır. Şekil 2.8d'de görüldüğü gibi orta bölgede birbirinden ayrılan tabakalar kırılmamaktadır ve eğilerek kayma gerilmesinden dolayı çatlaklara sebep olmaktadır [29]. 90^o ve 0^o açılı tabakalar arasında kaymadan kaynaklı mod II delaminasyonu görülmektedir. Dıştaki 90^o tabakada basma yükünden dolayı matris bölgesinde kayma çatlakları

oluşmaktadır. Tabaka dışa doğru kaydıkça fiber doğrultusunda çekme gerilmesi oluşmasına sebep olmakta ve fiber çekme modunda hasar görülmektedir.



Şekil 2.8 : Kompozit tüpün ezilme durumundaki davranışının şematik gösterimi [28].

Şekil 2.9'da ilerlemeli ezilme modları görülmektedir. Kompozit malzemeler ezilme durumunda yanal kayma modu, tabaka eğilmesi, gevrek kırılma ya da burkulma gibi davranışlar gösterebilmektedir.



Şekil 2.9 : İlerlemeli ezilme modları: a) Yanal kayma modu, b) Tabaka eğilmesi, c) Gevrek kırılma, d) Burkulma [30]

İlerlemeli hasar analizinin avantajları:

Ani kırılmaya göre düşük en yüksek yük ve yüksek enerji sönümleme durumu oluşmaktadır.

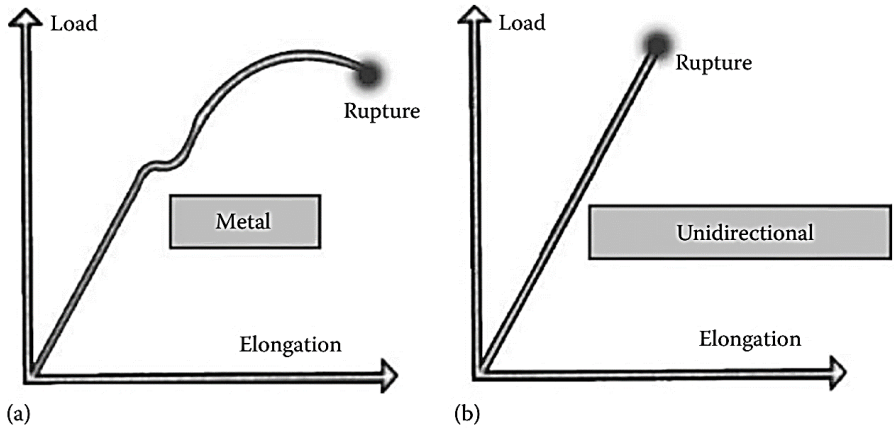
Ani kırılmış yapılara kıyasla en yüksek yükün ortalama ezilme yüküne oranı daha düşük olmaktadır.

Lale veya taç şeklinde, konik ya da oluklu gibi çok çeşitli şekillerde hasar başlatıcı geometri tipleri mevcuttur.

3. KOMPOZİT MALZEMELERDE HASAR KRİTERLERİ

Kompozit malzemelerin kullanım oranının artması kompozitlerin daha detaylı incelenmesini zorunlu kılmış ve yapısal analiz konusunda çok sayıda çalışmanın ortaya çıkmasına sebep olmuştur. Kompozit malzemeler kullanılarak yapılmış parçaların sunmuş olduğu avantajları etkin bir şekilde kullanabilmek için doğru matematiksel modellere ihtiyaç duyulmuştur.

Kompozit malzemelerin anizotropik doğasından ötürü çelik, alüminyum gibi izotropik malzemelerde olduğu gibi yüke ve boyuta bakılmaksızın her doğrultuda malzeme mukavemeti eşit olmamaktadır. Şekil 3.1'de metal ve kompozit malzemelerin tipik kuvvet-uzama eğrileri görülebilmektedir. Metal malzemeler genel olarak akma noktasına kadar elastik davranış sergilerken akma noktası aşıldığında kopma noktasına kadar doğrusal olmayan davranış göstermektedir. Kompozit malzemelerin ise başlangıçtan kopma noktasına kadar doğrusal davranış gösterdiği varsayılmaktadır.



Şekil 3.1 : Yük-uzama grafikleri: a) Metal malzeme, b) Tek eksenli kompozit malzeme [31].

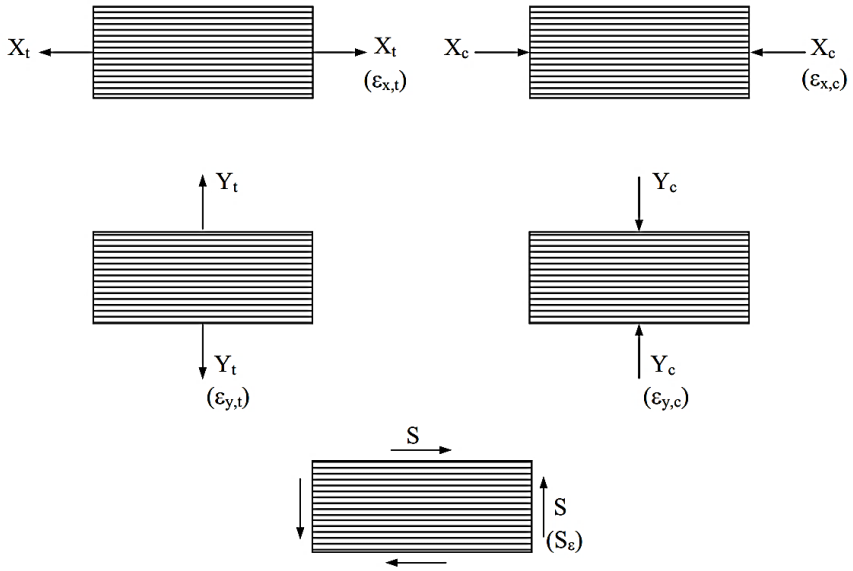
Günümüzde çok sayıda kompozit hasar kriteri ve hasar analiz metodu vardır. Ancak bu kriterler ve metotlar belirli geometrilerde, malzeme içeriklerinde ve senaryolarda geliştirildiklerinden bu durumlarda başarılı sonuçlar vermektedir. Çok sayıda farklı yaklaşımların sunulmuş olması fiber takviyeli kompozit malzemelerde hasar davranışlarının bugün bile önemli bir konu olduğunu göstermektedir. Önemli

gelişmeler yapılmış olmasına rağmen hala tasarımcılar tarafından tüm şartlarda doğru öngörü yapabildiği kabul edilmiş bir hasar kriteri bulunmamaktadır.

Kompozit hasar kriterlerinin değerlendirilmesi iki aşamalı bir işlemdir. İlk aşamada hasar kriterleri kabiliyetlerine göre hasarı öngörebildikleri şartlara bakılarak kategorize edilir. İkinci aşamada farklı fiber doğrultularındaki tabakalardan oluşmuş kompozit plakalar kullanılarak deneylerle kriterin hasarı öngörebilme değerlendirmesi yapılır. Tek eksenli yüklemeler ile yapılan hasar testlerinden sonra hasar kriterlerini değerlendirmek genellikle erken olabilmektedir. Örneğin bazı durumlarda kompozit tabakalardaki matrisler tek eksenli testlerden elde edilen sonuçlardan farklı davranış sergileyebilmektedirler. Kompozit hasar kriteri karışık hasar senaryolarına uygun ve esnek bir yapıda olmalıdır.

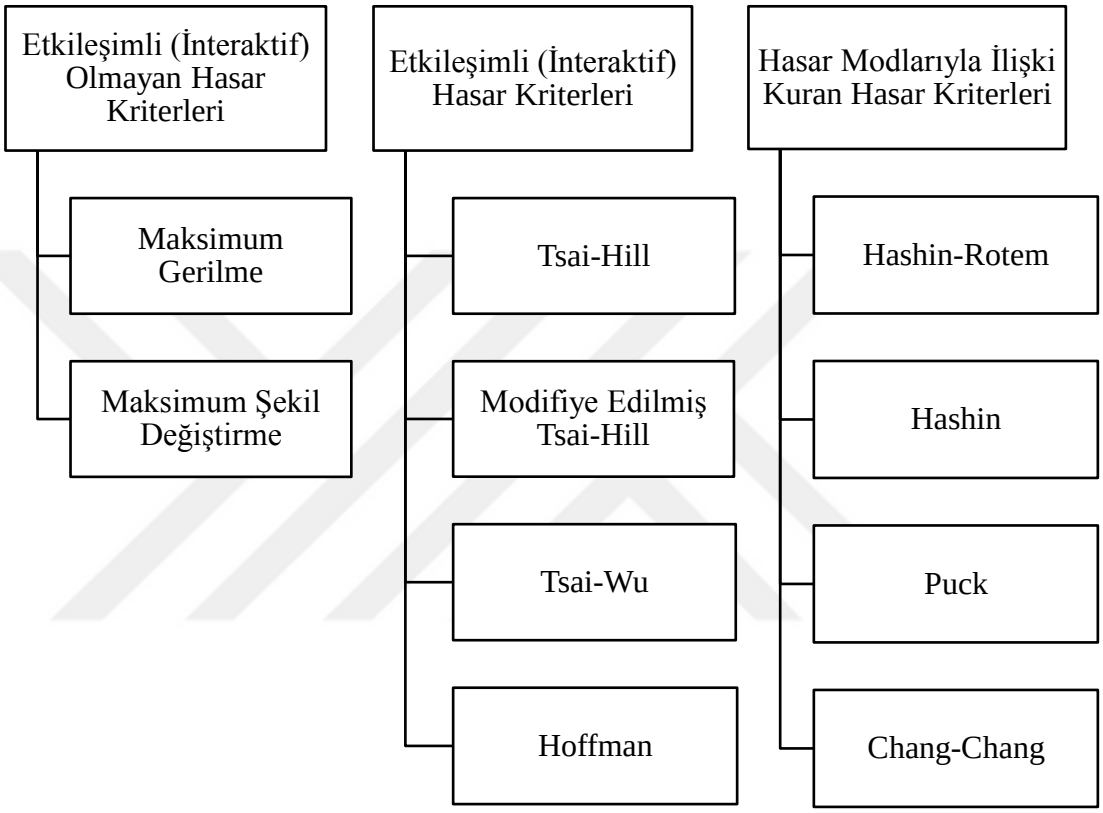
Ortotropik malzemelerde asal doğrultulardaki çekme ve basma mukavemetleri genellikle aynı değer olmamaktadır. Bunun sebebi çekme zorlanmasında fiber kırılmasının olması, basma zorlanmasında ise fiber mikro burkulmaların ve yüzeysel ayrılmaların görülmesidir. Ancak malzeme doğrultusunda pozitif ve negatif kayma mukavemetleri aynıdır. Bu farklılıkların olması geliştirilen mevcut izotropik hasar kriterlerini ortotropik malzemelerde geçersiz kılmaktadır [32].

Kompozit malzemelerin analizinde fiber doğrultularına göre iki boyutlu düzlemde genellikle kullanılan mukavemetler fiber doğrultusuna göre tanımlanmaktadır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 : Kompozit malzemelerde fiber doğrultularına göre gerilme ve gerinim dayanımları [33].

Kompozit malzemeler için geliştirilmiş hasar kriterlerini incelerken gruplama yapmak incelemeyi kolaylaştırmaktadır. Gruplandırma için hasar kriterinin hasarı değerlendirme yöntemine bakılmaktadır. Kompozit hasar kriterleri genel olarak etkileşimli (interaktif) olmayan hasar kriterleri, etkileşimli hasar kriterleri ve hasar modlarıyla ilişki kuran hasar kriterleri olmak üzere üç ana başlık altında incelenebilir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3 : Kompozit malzemelerde kullanılan hasar kriterlerinin sınıflandırılması.

3.1 Etkileşimli (İnteraktif) Olmayan Hasar Kriterleri

Kompozit tabaka üzerine gelen gerilme ve gerinim bileşenlerinin birbirleriyle etkileşimini göz önüne almayan kriterlerdir. Bu tipteki hasar kriterlerinde ilgili gerilme ya da gerinim bileşeni aynı doğrultudaki mukavemet değeri ile kıyaslanmaktadır. Bu yöntem genellikle mukavemet hesaplamalarında özellikle çok eksenli zorlanmalarda yanlış değerlendirmelere yol açabilmektedir. Bu kategorideki en çok kullanılan kriterler maksimum gerilme hasar kriteri ve maksimum şekil değiştirme hasar kriteridir.

3.1.1 Maksimum gerilme hasar kriteri

Maksimum gerilme hasar kriteri, izotropik malzemeler için Rankine tarafından geliştirilmiş maksimum normal gerilme teorisi ve Tresca tarafından geliştirilmiş maksimum kayma gerilmesine benzer şekilde kompozit malzemeler için düzenlenmiştir. Bu kritere göre oluşan gerilmeler elastisite modülü ve birim şekil değiştirme kullanılarak doğrusal olarak hesaplanmaktadır. Oluşan gerilmeler lokal eksenlerde çekme, basma ve kayma gerilmesi bileşenlerine ayrılmaktadır. Bu bileşenlerden birisi kompozit tabakanın kendisiyle aynı cinsten normal veya kayma mukavemetini aşarsa tabakada hasarın meydana geldiği söylenmektedir.

$$-(X_C) < \sigma_{11} < (X_T) \tag{3.1}$$

$$-(Y_C) < \sigma_{22} < (Y_T) \tag{3.2}$$

$$-(S_{12}^C) < \tau_{12} < (S_{12}^T) \tag{3.3}$$

Maksimum gerilme kriteri kırılgan hasar durumlarında daha kullanışlıdır. Bu kriterin hasar modlarını göz önüne aldığı kabul edilmektedir ancak kompozit malzemeler için oldukça önemli olan mikromekanik yaklaşımını içermemektedir. Deneysel çalışmalarda özellikle çok eksenli yüzey gerilmesi durumunda gerçeğe çok yakın olmayan sonuçlar verse de günümüzde hala geniş bir kullanım alanı bulmaktadır.

3.1.2 Maksimum şekil değiştirme hasar kriteri

Maksimum şekil değiştirme hasar kriteri, izotropik malzemeler için St. Venant tarafından geliştirilmiş maksimum normal gerinme teorisi ve Tresca tarafından geliştirilmiş maksimum kayma gerilmesi teorisini temel almaktadır. Oluşan gerinmeler elastisite modülü kullanılarak doğrusal olarak hesaplanmaktadır. Denklem 3.4-3.6'da belirtildiği gibi lokal eksenlerdeki bileşenlerine ayrılan gerinmeler kendi cinsinden olan mukavemet değerini aşarsa tabakada hasarın meydana geldiği söylenmektedir.

$$-(\varepsilon_{11}^c) < \varepsilon_{11} < (\varepsilon_{11}^T) \tag{3.4}$$

$$-(\varepsilon_{22}^c) < \varepsilon_{22} < (\varepsilon_{22}^T) \tag{3.5}$$

$$-(\gamma_{12}^c) < \gamma_{12} < (\gamma_{12}^T) \tag{3.6}$$

Maksimum şekil değiştirme hasar kriteri maksimum gerilme kriteri ile aynı dezavantajlara sahip olmasına rağmen, maksimum şekil değiştirme kriteri denklem 3.7 ve denklem 3.8'deki gibi gerilme bileşenleri ile ifade edildiğinde Poisson etkisinden dolayı boyuna ve yanal gerilme değerleri birbirleriyle az da olsa etkileşim içinde olmaktadır. Poisson oranının 0 olması durumunda maksimum gerilme kriteri ile aynı sonuçları vermektedir.

$$-(X_C) < \sigma_{11} - \gamma_{12}\sigma_{22} < (X_T) \tag{3.7}$$

$$-(Y_C) < \sigma_{22} - \gamma_{21}\sigma_{11} < (Y_T) \tag{3.8}$$

3.2 Etkileşimli (İnteraktif) Hasar Kriterleri

Bu kategorideki hasar kriterlerinde farklı doğrultulardaki gerilmeler bir arada göz önüne alınarak hasar değerlendirmesi yapılmaktadır. Bu ifadeler genelde bir dizi deneysel çalışmadan elde edilen veriler kullanılarak bir eğri çizilmesi ile oluşturulmaktadır. Kriterde belirtilen şart ihlal edildiğinde malzemenin hasara uğradığı kabul edilmektedir.

3.2.1 Tsai – Hill hasar kriteri

Tsai-Hill hasar kriteri [34], izotropik malzemeler için geliştirilen Von Mises çarpılma enerjisi hasar teorisinin anizotropik malzemelere uyarlanmış halidir. Hill [35], Von Mises kriterini sünek anizotropik malzemelere, Azzi ve Tsai [36] ise ortotropik takviyeli kompozit levhaya uygulamıştır. Bu kritere göre tabakada hasar oluşması için denklem 3.16'nın ihlal edilmesi gerekmektedir.

Global olarak hesaplanan gerilmelerden lokal gerilmeler elde edilerek denklem 3.9 kullanılır. Hesaplama sonucunda belirtilen şart ihlal edilirse hasar oluştuğu kabul edilir.

$$\begin{aligned}(F_2 + F_3)\sigma_{11}^2 + (F_1 + F_3)\sigma_{22}^2 + (F_1 + F_2)\sigma_{33}^2 - 2F_3\sigma_{11}\sigma_{22} \\ - 2F_2\sigma_{11}\sigma_{33} - 2F_1\sigma_{22}\sigma_{33} + 2F_4{\tau_{23}}^2 + 2F_5{\tau_{13}}^2 \\ + 2F_6{\tau_{12}}^2 < 1\end{aligned} \tag{3.9}$$

F1, F2, F3, F4, F5 ve F6 sabitleri aşağıdaki gibi bulunur:

$$F_1 = \frac{1}{2}\left(-\frac{1}{X_T^2} + \frac{1}{Y_T^2} + \frac{1}{Z_T^2}\right) \tag{3.10}$$

$$F_2 = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{X_T^2} - \frac{1}{Y_T^2} + \frac{1}{Z_T^2}\right) \tag{3.11}$$

$$F_3 = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{X_T^2} + \frac{1}{Y_T^2} - \frac{1}{Z_T^2}\right) \tag{3.12}$$

$$F_4 = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{S_{23}^2}\right) \tag{3.13}$$

$$F_5 = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{S_{13}^2}\right) \tag{3.14}$$

$$F_6 = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{S_{12}^2}\right) \tag{3.15}$$

Sonuç olarak denklem 3.16 elde edilir:

$$\begin{aligned}\left(\frac{\sigma_{11}}{X_T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{22}}{Y_T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{33}}{Z_T}\right)^2 - \sigma_{11}\sigma_{22}\left(\frac{1}{X_T^2} + \frac{1}{Y_T^2} - \frac{1}{Z_T^2}\right) \\ - \sigma_{11}\sigma_{33}\left(\frac{1}{X_T^2} - \frac{1}{Y_T^2} + \frac{1}{Z_T^2}\right) - \sigma_{22}\sigma_{33}\left(-\frac{1}{X_T^2} + \frac{1}{Y_T^2} + \frac{1}{Z_T^2}\right) \\ + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S_{23}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S_{13}}\right)^2 < 1\end{aligned} \tag{3.16}$$

3.2.2 Modifiye edilmiş Tsai – Hill hasar kriteri

Tsai-Hill hasar kriterinde sadece çekme gerilmeleri kullanılmıştır. Ancak tek eksenli bir kompozit tabakada çekme ve basma mukavemetleri arasında farklılıklar vardır. Fiber yönünde çekme dayanımı, basma dayanımından genellikle daha yüksektir. Ayrıca fiberlere dik doğrultuda basma dayanımı çekme dayanımından genellikle daha yüksek olmaktadır. Bu sebeple basma mukavemeti değeri kullanılmak istenirse Tsai-Hill kriteri aşağıdaki gibi modifiye edilebilmektedir:

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X}\right)^2+\left(\frac{\sigma_{22}}{Y}\right)^2+\left(\frac{\sigma_{33}}{Z}\right)^2-\sigma_1\sigma_2\left(\frac{1}{X^2}+\frac{1}{Y^2}-\frac{1}{Z^2}\right)$$
$$-\sigma_1\sigma_3\left(\frac{1}{X^2}-\frac{1}{Y^2}+\frac{1}{Z^2}\right)-\sigma_2\sigma_3\left(-\frac{1}{X^2}+\frac{1}{Y^2}+\frac{1}{Z^2}\right) \quad (3.17)$$
$$+\left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2+\left(\frac{\tau_{23}}{S_{23}}\right)^2+\left(\frac{\tau_{13}}{S_{13}}\right)^2<1$$

$$\mathrm{X}=\begin{cases}\sigma_{11}>0 \Rightarrow X=X_T\\ \sigma_{11}<0 \Rightarrow X=X_C\end{cases} \quad (3.18)$$

$$\mathrm{Y}=\begin{cases}\sigma_{22}>0 \Rightarrow Y=Y_T\\ \sigma_{22}<0 \Rightarrow Y=Y_C\end{cases} \quad (3.19)$$

$$\mathrm{Z}=\begin{cases}\sigma_{33}>0 \Rightarrow Z=Z_T\\ \sigma_{33}<0 \Rightarrow Z=Z_C\end{cases} \quad (3.20)$$

3.2.3 Tsai – Wu hasar kriteri

Tsai ve Wu ilk defa Gol'denblat and Kopnov [37] tarafından anizotropik malzemeler için geliştirilen genel ikinci dereceden hasar kriterini düzlem gerilmeye maruz kalan kompozit plakalar için uygulamışlardır. [38]. Tsai-Wu kriterinde denklem 3.21 ihlal edildiğinde malzemenin hasara uğradığı kabul edilmektedir.

$$F_1\sigma_{11}+F_2\sigma_{22}+F_3\sigma_{33}+F_4\tau_{23}+F_5\tau_{31}+F_6\tau_{12}+F_{11}{\sigma_{11}}^2+F_{22}{\sigma_{22}}^2$$
$$+F_{33}{\sigma_{33}}^2+F_{44}{\tau_{23}}^2+F_{55}{\tau_{31}}^2+F_{66}{\tau_{12}}^2 \quad (3.21)$$
$$+2F_{12}\sigma_{11}\sigma_{22}+2F_{13}\sigma_{11}\sigma_{33}+2F_{23}\sigma_{22}\sigma_{33}\leq 1$$

Kriterde kullanılan katsayılar aşağıda belirtildiği gibi elde edilir.

$$F_1=\frac{1}{X_T}-\frac{1}{X_C} \quad (3.22)$$

$$F_2=\frac{1}{Y_T}-\frac{1}{Y_C} \quad (3.23)$$

$$F_3=\frac{1}{Z_T}-\frac{1}{Z_C} \quad (3.24)$$

$$F_4=F_5=F_6=0 \quad (3.25)$$

$$F_{11} = \frac{1}{X_C X_T} \tag{3.26}$$

$$F_{22} = \frac{1}{Y_C Y_T} \tag{3.27}$$

$$F_{33} = \frac{1}{Z_C Z_T} \tag{3.28}$$

$$F_{44} = \frac{1}{S_{23}^2} \tag{3.29}$$

$$F_{55} = \frac{1}{S_{31}^2} \tag{3.30}$$

$$F_{66} = \frac{1}{S_{12}^2} \tag{3.31}$$

F_{12}, F_{13} ve F_{23} parametreleri çift eksenli test yapılarak bulunabilmektedir. Bu testlerin gerçekleştirilmesindeki güçlük parametrelerin yeterli doğrulukta elde edilememesine sebep olmaktadır. Gerçekleştirilen çift eksenli çekme testlerinde hasar dayanımlarının $\sigma_{11} = \sigma_{22} = \sigma_{\mathrm{b}12}$, $\sigma_{11} = \sigma_{33} = \sigma_{\mathrm{b}13}$ ve $\sigma_{22} = \sigma_{33} = \sigma_{\mathrm{b}23}$ olduğu kabul edilirse F_{12}, F_{13} ve F_{23} parametreleri aşağıdaki gibi bulunur:

$$F_{12} = \frac{1}{2\sigma_{b12}^2}[1 - \sigma_{b12}(F_1 + F_2) - \sigma_{b12}^2(F_{11} + F_{22})] \tag{3.32}$$

$$F_{13} = \frac{1}{2\sigma_{b13}^2}[1 - \sigma_{b13}(F_1 + F_3) - \sigma_{b13}^2(F_{11} + F_{33})] \tag{3.33}$$

$$F_{23} = \frac{1}{2\sigma_{b23}^2}[1 - \sigma_{b23}(F_2 + F_3) - \sigma_{b23}^2(F_{22} + F_{33})] \tag{3.34}$$

Bu çift eksenli çekme testlerinin gerçekleştirilmesindeki güçlük F_{12}, F_{13} ve F_{23} parametreleri hakkında yeterli deneysel verinin olmamasına sebep olmuştur.

3.2.4 Hoffman hasar kriteri

Hoffman hasar kriteri [39] basitçe Tsai-Hill hasar kriterinin modifiye edilmiş halidir. Tsai-Hill kriterinde basma ve çekme mukavemetleri arasındaki fark göz ardı

edilmektedir. Hoffman kriterinde çekme ve basma mukavemetlerinin farklı olduğu göz önüne alınmıştır. Bu kritere göre denklem 3.35 ihlal edilirse malzemenin hasara uğradığı kabul edilmektedir.

$$\begin{aligned}
&\frac{1}{2}\left(\frac{1}{X_T X_c}-\frac{1}{Y_T Y_c}-\frac{1}{Z_T Z_c}\right)(\sigma_{22}-\sigma_{33})^2 \\
&+\frac{1}{2}\left(-\frac{1}{X_T X_c}+\frac{1}{Y_T Y_c}-\frac{1}{Z_T Z_c}\right)(\sigma_{33}-\sigma_{11})^2 \\
&+\frac{1}{2}\left(-\frac{1}{X_T X_c}-\frac{1}{Y_T Y_c}+\frac{1}{Z_T Z_c}\right)(\sigma_{11}-\sigma_{22})^2 \\
&+\left(\frac{1}{X_T}+\frac{1}{X_C}\right)\sigma_{11}+\left(\frac{1}{Y_T}+\frac{1}{Y_C}\right)\sigma_{22}+\left(\frac{1}{Z_T}+\frac{1}{Z_C}\right)\sigma_{33} \\
&+\frac{{\tau_{12}}^2}{{S_{12}}^2}+\frac{{\tau_{13}}^2}{{S_{13}}^2}+\frac{{\tau_{23}}^2}{{S_{23}}^2}<1
\end{aligned} \tag{3.35}$$

3.3 Hasar Modlarıyla İlişki Kuran Hasar Kriterleri

Bu bölümdeki hasar kriterleri kompozit malzemelerin farklı hasar modlarına sahip olabileceğini göz önüne almaktadır. Bu kriterler hasar modlarını hesaplayabilmesinin yanında ilerlemeli hasar analizi için de uygundurlar.

Hasar kriterlerinde kullanılan hasar modları genellikle fiber çekme, fiber basma, matris çekme, matris basma ve delaminasyon olarak ayrılmaktadır. Fiber çekme hasarı, en tehlikeli hasar modudur. Yüksek miktarda enerji açığa çıkar. Kuvveti düzgün bir şekilde yayamayan yapılarda ani kırılmalara yol açar. Fiber basma hasarı daha çok matrisin kayma hareketinden ve fiber doğrultusundaki düzensizlik ile boşluklardan etkilenir. Sonucunda fiber mikro burkulmaları, matris kesme hasarı ya da fiber hasarı görülür. Matris çekme hasarı oluştuğunda hasar yüzeyinde bazı fiber ayrılmaları gözlenir. Genellikle kuvvetin doğrultusuna dik doğrultuda oluşur. Matris basma hasarı genellikle matrise gelen kayma yüklerinden dolayı oluşur. Yükleme doğrultusuna göre açılı şekilde hasar görülür. Delaminasyon hasarı farklı tabakalardan oluşan kompozit plakaların birbirinden ayrılması şeklinde görülür. Delaminasyon durumunda görünür herhangi bir hasar olmamasına rağmen eğilme rijitliğinde düşüş görülebilir.

3.3.1 Hashin-Rotem hasar kriteri

1973 yılında geliştirilen Hashin-Rotem hasar kriteri [40], kompozit malzemelerde yaygın olarak kullanılan ilk hasar kriterlerinden bir tanesidir. Fiber hasarı ve matris hasarı olmak üzere iki hasar mekanizmasını basma ve çekme yönlerinde ayrı olarak hesaplamaktadır. Fiber hasar modu fiber doğrultusundaki gerilmeleri göz önüne alır. Matris hasar modu ise fibere gelen yanal ve teğetsel gerilmelerle ilgilenir. Hashin ve Rotem, yaptıkları çalışmada matris hasarını ve delaminasyon hasarını ayrı olarak düşünmemişler ve bu konudan bahsetmemişlerdir.

Fiber çekme ($\sigma_{11} \geq 0$):

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_T}\right) < 1 \tag{3.36}$$

Fiber basma ($\sigma_{11} < 0$):

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_C}\right) < 1 \tag{3.37}$$

Matris çekme ($\sigma_{22} + \sigma_{33} \geq 0$):

$$\left(\frac{\sigma_{22}}{Y_T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 < 1 \tag{3.38}$$

Matris basma ($\sigma_{22} + \sigma_{33} < 0$):

$$\left(\frac{\sigma_{22}}{Y_C}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 < 1 \tag{3.39}$$

3.3.2 Hashin hasar kriteri

1980 yılında geliştirilen Hashin hasar kriteri [41], Hashin-Rotem kriterinin değiştirilmiş halidir. Basma gerilmesinin matris mukavemetindeki etkisini göz önüne alabilmek için geliştirilmiştir. Hashin, bu çalışmasında hasar mekanizmalarıyla ilgili değişkenlere dayalı bir kriter geliştirmekten çok, kabul edilebilir ve uygulanabilir bir kriter ortaya koymaya çalışmıştır. Bu sebeple matris hasarı için ikinci dereceden denklemle hesaplama yapan kriteri tercih etmiştir. Bunun sebebi doğrusal hesaplama yapan kriterin yeterince başarılı olamaması ve daha yüksek dereceden polinomların ise hesaplamasındaki güçlük olmuştur.

Hashin'in çalışmasında uygulanan en önemli konsept, hasarın hasar yüzeyinde oluşan gerilmelerden kaynaklandığının kabulüdür. Fiber çekme modu Hashin'in aksiyon yüzey konsepti ismini verdiği bir konsept ile uygulanmıştır. Fiber basma modu için maksimum gerilme kriteri kullanılmıştır. Çalışmasının büyük bir bölümü teorik bir zeminden çok mantıksal sebeplere dayanmaktadır.

Fiber çekme ($\sigma_{11} \geq 0$):

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_T}\right) + \frac{\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2}{(S_{12})^2} < 1 \tag{3.40}$$

Fiber basma ($\sigma_{11} < 0$):

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_C}\right) < 1 \tag{3.41}$$

Matris çekme ($\sigma_{22} + \sigma_{33} \geq 0$):

$$\frac{(\sigma_{22} + \sigma_{33})^2}{Y_T} + \frac{\tau_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}}{(S_{23})^2} + \frac{\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2}{(S_{12})^2} < 1 \tag{3.42}$$

Matris basma ($\sigma_{22} + \sigma_{33} < 0$):

$$\left[\left(\frac{Y_C}{2S_{23}}\right)^2 - 1\right]\left(\frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{Y_C}\right) + \left(\frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{2S_{23}}\right)^2 + \frac{\tau_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}}{(S_{23})^2} + \frac{\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2}{(S_{12})^2} < 1 \tag{3.43}$$

Delaminasyon çekme ($\sigma_{33} > 0$):

$$\left(\frac{\sigma_{33}}{Z_T}\right)^2 < 1 \tag{3.44}$$

Delaminasyon basma ($\sigma_{33} < 0$):

$$\left(\frac{\sigma_{33}}{Z_C}\right)^2 < 1 \tag{3.45}$$

3.3.3 Puck hasar kriteri

Puck hasar kriteri günümüzde sıkça kullanılan halini alana kadar geliştirilmiştir. Kriterin ilk hali 1969 yılında Puck ve Schneider tarafından yayınlanmıştır [42]. Puck

daha sonra Hashin kriterinden yararlanarak kriterini 1992 [43] ve 1996 [44] yıllarında tekrar geliştirmiştir. Puck hasar kriteri yapısal uygulamalarda kullanılan polimer matrisli kompozitlerin kırılgan yapıda olduğunu kabul etmiştir. Kırılma yüzeyinin koordinat ekseni, hasarın olduğu yüzeye göre dönebilecek şekilde düşünülmüştür. Hashin bu durumu fiziksel bir ispat olmadan mantıksal olarak ifade etmesine rağmen Puck sayısal çözümlerin yardımıyla yeni kriterini bu ifade üzerine kurmuştur. Hesaplamalar aşağıdaki formüllere göre yapılmaktadır.

Fiber çekme ($\sigma_{11} > 0$):

$$\frac{\sigma_{11}}{X_T} < 1 \tag{3.46}$$

Fiber basma ($\sigma_{11} < 0$):

$$\frac{|\sigma_{11}|}{X_C} < 1 \tag{3.47}$$

Matris hasarı:

Mod A - Matris çekme ($\sigma_{22} > 0$):

$$\sqrt{\left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(1 - p_{12}^{+}\frac{Y_T}{S_{12}}\right)^2 \left(\frac{\sigma_{22}}{Y_T}\right)^2} + p_{12}^{+}\frac{\sigma_{22}}{Y_T} < 1 \tag{3.48}$$

Mod B - Matris basma ($\sigma_{22} < 0$):

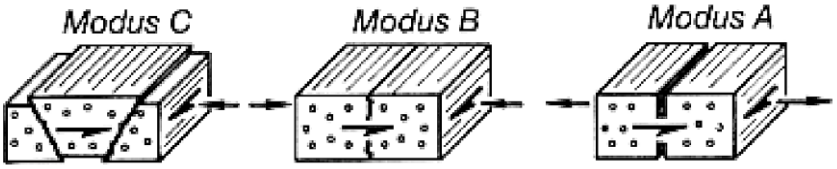
$$\frac{1}{S_{12}}\sqrt{\tau_{12}^2 + (p_{12}^{-} \cdot \sigma_{22})^2} + p_{12}^{-} \cdot \sigma_{22} < 1 \tag{3.49}$$

Mod C - Matris basma ($\sigma_{22} < 0$):

$$\left[\left(\frac{\tau_{12}}{2(1 + p_{22}^{-})S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{22}}{Y_C}\right)^2\right]\left(\frac{Y_C}{-\sigma_{22}}\right) < 1 \tag{3.50}$$

Puck kriteri, fiberler incelenirken maksimum gerinim kriterine göre çalışmakta ve kriterin yaptığı öngörüler deneysel çalışmalarla uyumlu sonuçlar ortaya çıkarmaktadır. Matris hasarını üç mod altında, fiber hasarını ise iki mod altında incelemektedir. Puck ve Hashin hasar kriterlerinin en önemli farkı Puck kriterinin matris kırılması hesaplanırken kırılma yüzeyi ile kompozit tabaka arasındaki açıya

göre değişen üç hasar modunu ve hasara yol açan kuvvet tipini göz önüne almış olmasıdır [45] (Şekil 3.4).



Şekil 3.4 : Matris hasar modları [44].

Kriterde geçen p_{12}^{+}, p_{12}^{-} ve p_{22}^{-} parametreleri basit deneylerle elde edilememektedir. Bu parametrelerin hesaplanması ile ilgili yayın Puck tarafından 2002 yılında sunulmuştur [46].

3.3.4 Chang-Chang hasar kriteri

Chang-Chang hasar kriteri 1987 yılında Fu-Kuo Chang ve Kuo-Yen Chang tarafından geliştirilen ve kompozit hasar analizlerinde sıklıkla tercih edilen bir kriterdir [47,48]. Karbon fiber takviyeli kompozit malzemelerde açık deliklerin, cıvataların veya darbe yüklerinin etkilerini hesaplamak amacıyla geliştirilmiştir.

Fiber çekme ($\sigma_{11} > 0$):

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_T}\right)^2 + \alpha\frac{\tau_{12}}{S_{12}} < 1 \tag{3.51}$$

Fiber basma ($\sigma_{11} < 0$):

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_C}\right)^2 < 1 \tag{3.52}$$

Matris çekme ($\sigma_{22} > 0$):

$$\left(\frac{\sigma_{22}}{Y_T}\right)^2 + \alpha\left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 < 1 \tag{3.53}$$

Matris basma ($\sigma_{22} < 0$):

$$\left(\frac{\sigma_{22}}{2S_{12}}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y_c}{2S_{12}}\right)^2 - 1\right]\frac{\sigma_{22}}{Y_c} + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 < 1 \tag{3.54}$$

Bu kriterde α katsayısı kayma gerilmesi içeren terimlerde kayma gerilmesinin hesaplamadaki ağırlığını belirlemektedir.

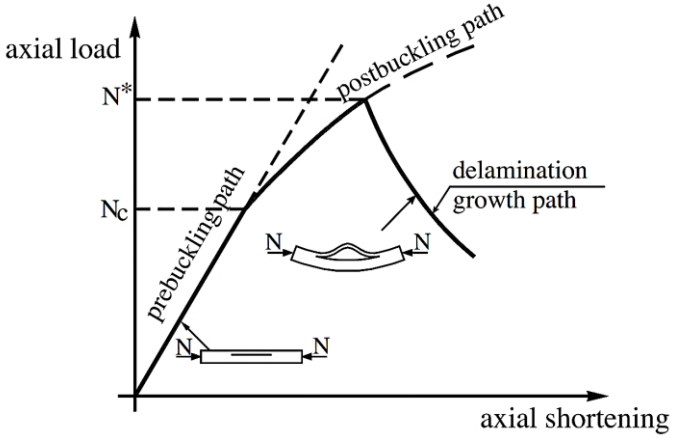
3.3.5 Diğer hasar kriterleri

Bu tez çalışmasında detaylı olarak bahsedilmeyen Cuntze, Yamada-Sun, Koop-Michaeli, Kroll-Hufenbach, Sun-Tao, Zinoviev, Gosse, ve Hart-Smith gibi kompozit hasar kriterleri de literatürde yer almaktadır.

4. DELAMİNASYON

Delaminasyon, kompoziti oluşturan tabakaların birbirinden ayrılması olarak tanımlanmaktadır. Tabakalı kompozit malzemelerde tabakalar arasındaki mukavemetin düşük olması sebebiyle en çok karşılaşılan hasar tipidir. Malzemede rijitlik kaybı ve malzeme ömrünün kısalması gibi sonuçlar ortaya çıkarabileceğinden önemli bir çalışma konusudur.

Malzeme içerisindeki veya yüzey kenarlarındaki darbeden kaynaklanan etkiler, geometrik ve malzeme süreksizlik bölgelerindeki gerilme yığılması, kompozit parçaya gelen basma yükleri ile burkulmanın gerçekleşmesi, imalattan kaynaklanan kusurlar ile taşıma, montaj ve servis ömrü sırasında gerçekleşebilecek darbeler delaminasyonun sebepleri arasında sayılabilmektedir. Basma yükü altındaki plakalarda delaminasyona uğramış tabakalar burkulabilmektedir ve burkulma ile delaminasyon etkisinin ilişkisinden ötürü çatlak büyüyebilmektedir. Şekil 4.1'de görülebileceği gibi delaminasyonun varlığı burkulma yükünü ve tabakaların basma yükü altındaki dayanımını ciddi bir şekilde düşürebilmektedir. Yanal yüklemelerde de burkulmadan ötürü delaminasyon gözlemlenebilmektedir [49].



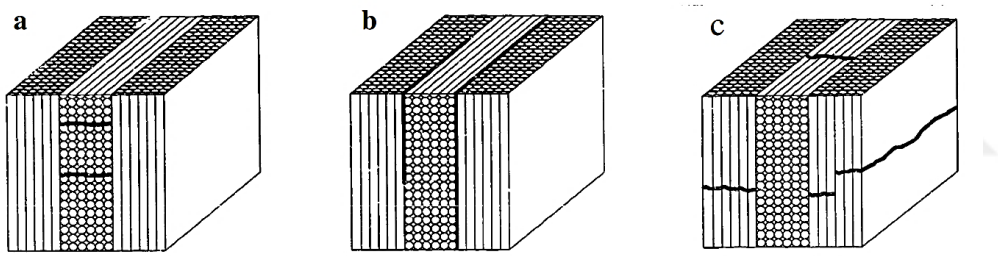
Şekil 4.1 : Basma yükü altındaki kompozit plakada delaminasyon burkulması [50].

Delaminasyon, hava ve nemin açılan boşluklardan içeri girmesine ya da diğer hasar modlarını tetikleyerek hasarın büyümesine sebep olabilmektedir. Delaminasyon hasarı tabakalar arasında gerçekleştiğinden çalışma koşulları altında parça üzerinde

delaminasyon kontrolü yapmak oldukça güçtür. Bu sebeple güvenilir ve verimli çalışan bir matematiksel modelin ortaya koyulması delaminasyon hasarına karşı dayanıklı tasarımların yapılabilmesi açısından oldukça önemlidir. Çok sayıda çalışmanın ve yayının ortaya koyulmasına rağmen kompozit malzemelerdeki delaminasyon hasarı günümüzde hala yeteri kadar anlaşılabilmiş değildir.

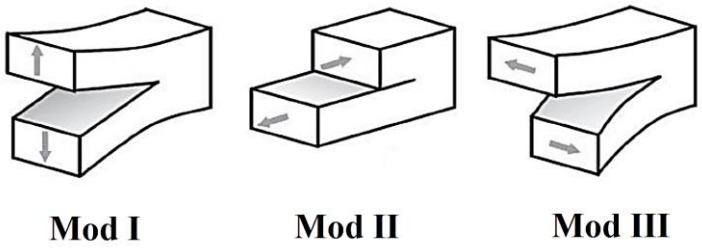
4.1 Delaminasyon Modları

Kompozit malzemelerde anizotropik yapılarından dolayı kırılma, izotropik malzemelere kıyasla çok sayıda karmaşık şekilde olabilmektedir. Şekil 4.2'de görüldüğü gibi kompozit malzemelerde kırılma tabakalar içi, tabakalar arası ve tabakaları kesen olarak üç temel şekilde gerçekleşebilmektedir. Tabakalar arası kırılma direnci tabakaları kesen kırılma direncinden çok daha küçüktür ve kompozit malzemelerde bu sebeple oluşan delaminasyon hasarına sıkça karşılaşılır. Mikro ölçekte düşünüldüğünde tabakalar arası ve tabaka içi kırılmalar benzerdir.



Şekil 4.2 : Temel kırılma modları; a) tabakalar içi, b) tabakalar arası, c) tabakaları kesen [51].

Delaminasyon yüklemeleri normal ve kayma doğrultularında gerçekleşir. Çekme gerilmesi mod I, kayma gerilmesi ise mod II ve mod III delaminasyon modlarında görülür. Şekil 4.3'te farklı delaminasyon modları görülmektedir:



Şekil 4.3 : Çatlak ilerleme modları.

Mod I yüklemede çatlak yüzeylerinin yer değiştirmesi çatlak yüzeyine diktir ve açılma (çekme) olarak adlandırılmaktadır. Mod II ve Mod III yüklemelerinde çatlak

yüzeylerinin yer değiştirmesi çatlak düzlemindedir ve sırasıyla kesme ve yırtılma yüklemesi olarak adlandırılmaktadır. Karışık mod yüklemesi normal, kesme ve yırtılma yüklerinin kombinasyonundan oluşmaktadır. Farklı modların birbirleriyle etkileşimi bir çekme kanunuyla bulunmaktadır. Modlar arasındaki etkileşimi tanımlayan çoğu model denklem 4.1'de belirtilen kriteri temel almaktadır:

$$\left(\frac{T_I}{T_{m,I}}\right)^2 + \left(\frac{T_{II}}{T_{m,II}}\right)^2 + \left(\frac{T_{III}}{T_{m,III}}\right)^2 = 1 \tag{4.1}$$

Karışık mod için enerji yayınım hızı hasar modlarının enerji yayınım hızlarına bağlı bir fonksiyon olarak ifade edilmekte ve hasar ilerleme kriterinde kullanılmaktadır. Enerji yayınım hızı ve sonrasında gerçekleşen karışık mod zorlanmasındaki hasar kriteri için üstel kanun (power law) sıklıkla kullanılmaktadır. Malzemeye bağlı olarak kullanılan Benzeggagh and Kenane [52] gibi farklı kriterler de mevcuttur.

Üstel kanun:

$$\left(\frac{G_I}{G_{IC}}\right)^m + \left(\frac{G_{II}}{G_{IIC}}\right)^n + \left(\frac{G_{III}}{G_{IIIC}}\right)^p = 1 \tag{4.2}$$

Benzeggagh and Kenane:

$$\frac{G_I + G_{II} + G_{III}}{G_{IC} + (G_{IIC} - G_{IC})\left(\frac{G_{II} + G_{III}}{G_I + G_{II} + G_{III}}\right)^\eta} = 1 \tag{4.3}$$

G değerleri hesaplanan enerji yayınım hızlarını, G_C değerleri kritik enerji yayınım hızlarını göstermektedir. M, n, p ve η deneysel olarak bulunabilen parametrelerdir.

4.2 Delaminasyon Bölgesinin Hasar Mekaniği İle Modellenmesi

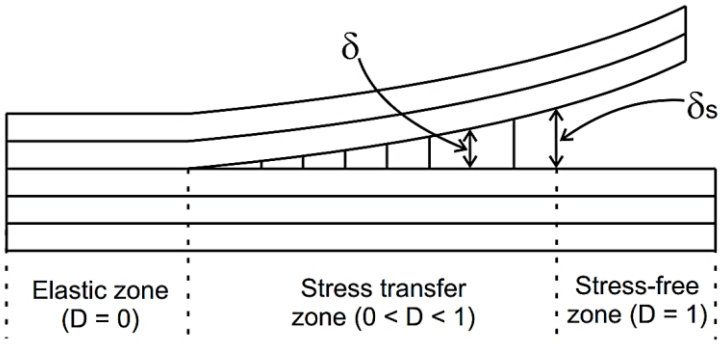
Delaminasyonun sayısal hesaplamasında kullanılan yöntemler kırılma mekaniği ve hasar mekaniği yaklaşımına göre iki ana grupta incelenebilir. Doğrusal elastik kırılma mekaniği (LEFM), doğrusal olmayan malzeme özellikleri ihmal edildiğinde delaminasyon hesaplamalarında başarılı sonuçlar vermektedir. Kırılma mekaniği yaklaşımına dayanan VCCT (Virtual Crack Closure Technique), J-integral ve VCET (Virtual Crack Extension Technique) teknikleri delaminasyon hesaplamalarında sıklıkla kullanılmaktadır.

Delaminasyon hesaplamalarındaki diğer bir yaklaşım ise hasar mekaniğinin kullanılmasıdır. Hasar mekaniği yaklaşımı kullanılan modellerde delaminasyon oluşacak bölgede kohesif hasar alanı oluşturulmaktadır. Bu alandaki elemanlarda kohesif bölgenin rijitliği kullanılarak gerilme ve yer değiştirme hesabı yapılmaktadır. Malzemenin belirlenen limit değerlerine ulaşıldığında hasar başlangıcı görülmekte ve kırılma tokluğuna ulaşıldığında kopma gerçekleşmektedir. Bu sayede tabakalar birbirinden ayrılmaya başlayarak yeni çatlak bölgeleri oluşmakta ve delaminasyon büyümesi meydana gelmektedir.

LEFM'ye dayanan VCCT ve J-integral tekniklerinde çatlak başlangıcının ve doğrultusunun başlangıçta belirtilmesi gerekirken kohesif alan modeli tekniğinde çatlak, kohesif alan elemanlarının yerleştirildiği herhangi bir bölgede ve herhangi bir doğrultuda oluşabilmektedir. Ayrıca sünek ve kırılgan yüzeylerin modellenebilmesi ve sonlu elemanlara integrasyonu kolay olduğundan daha yetenekli bir tekniktir.

4.2.1 CZM (Cohesive Zone Method) kohesif alan modellemesi

Kohesif alan modellemesi tekniğinin temeli Dugdale and Barenblatt'ın çalışmalarına dayanmaktadır [53]. Bu modelleme tekniği delaminasyon bölgesindeki iki yüzey arasındaki bağın hasara uğradığında tamamen yok olması yerine ilerlemeli olarak mukavemetinin düşürülmesi temeline dayanır. Uygulamalardaki kolaylığı ve deneylerle elde edilmesi gereken az sayıda parametreye ihtiyaç duyması sebebiyle sonlu elemanlarla kompozit analizi yapılırken en çok tercih edilen yöntemlerden bir tanesidir. Çok sayıda araştırmacı deneysel çalışmalardaki delaminasyonu matematiksel ortamda hesaplayabilmek için kohezif yüzey elemanlarını kullanmaktadır. Şekil 4.4'de sonlu elemanlar modelindeki kohesif alan elemanları şematik olarak görülebilmektedir.



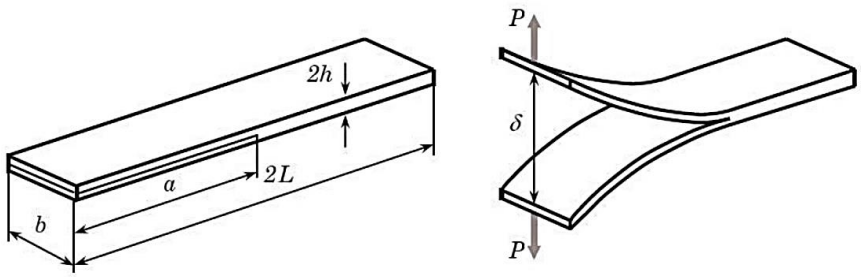
Şekil 4.4 : Kohesif alan modellemesinin şematik gösterimi [50].

Delaminasyon hasarının göz önüne alındığı hesaplamalarda genellikle tabakalar bazında modelleme yapılmaktadır. Bu boyutta modelleme ise bu tabakaların arasına yapışkan bölgelerin tanımlanmasına imkan sağlamaktadır. Yapışkan bölgelerin modellenmesinde kullanılan kohezif yüzey elemanları rijitlik, mukavemet ve hasar ilerlemesi özellikleri ile tanımlanmaktadır. Bu parametrelerin her biri tabakaların birbirinden ne zaman, nereden ve ne kadar hızlı ayrılacağını etkilemektedir.

Kohesif alan elemanları hacimsiz ya da hacme sahip sekiz düğüm noktalı katı elemanlarla veya iki boyutlu dört düğüm noktalı kabuk elemanlarla modellenebilmektedir. Kompozit malzemeyi oluşturan tabakaların birbirine temas ettiği yüzeye yerleştirilen kohesif alan elemanları çekme-ayrılma kanununa göre tanımlanmaktadırlar. Bu elemanlar çekme mukavemeti kaybı gerçekleşene kadar açılırken enerji harcanmakta ve enerjinin harcandığı bu bölgeye kohesif alanı ismi verilmektedir. Bu sebeple kompozit hasar analizlerinde delaminasyon hesaplaması yapmak için tabakalar arası kırılma tokluğuna ihtiyaç duyulmaktadır. Kırılma tokluğu delaminasyon sırasında malzemenin gösterdiği direnç ile ölçülmekte ve kritik şekil değiştirme yayınım hızı (G_C) ile tanımlanmaktadır. Kohesif alan elemanlarının parametreleri bir dizi test yapılarak elde edilmektedir:

4.2.1.1 DCB (Double Cantilever Beam) testi

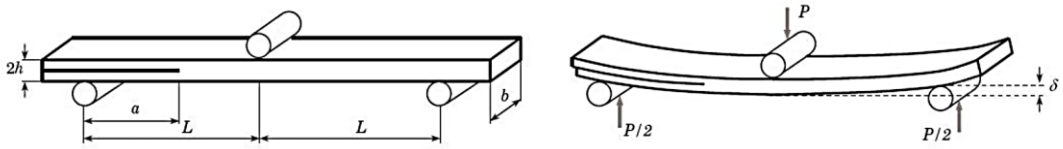
Başlangıçta birbirine yapıştırılmış malzemelerin hasar çalışmaları için geliştirilen ve daha sonra kompozit malzemelerde delaminasyon çalışmaları için de uyarlanan bu test metodu, tabakalar arası mod I kırılma tokluğunun deneysel olarak belirlenmesi amacıyla en çok tercih edilen metod olmuştur [54]. Tabakalar arası bölgenin kalınlık doğrultusundaki zorlanmalar altında zayıflığının bilinmesi sebebiyle önemli bir testtir. Testin başlangıcında üst üste yapıştırılmış iki kompozit kirişin serbest ucunda orta düzlemde olacak şekilde küçük bir delaminasyon bölgesi bırakılır. İki kiriş Şekil 4.5'deki gibi birbirinden ayrılmaya zorlanarak delaminasyon incelenir.



Şekil 4.5 : DCB testi şematik gösterimi [55].

4.2.1.2 3ENF (Three End Notched Flexure) testi

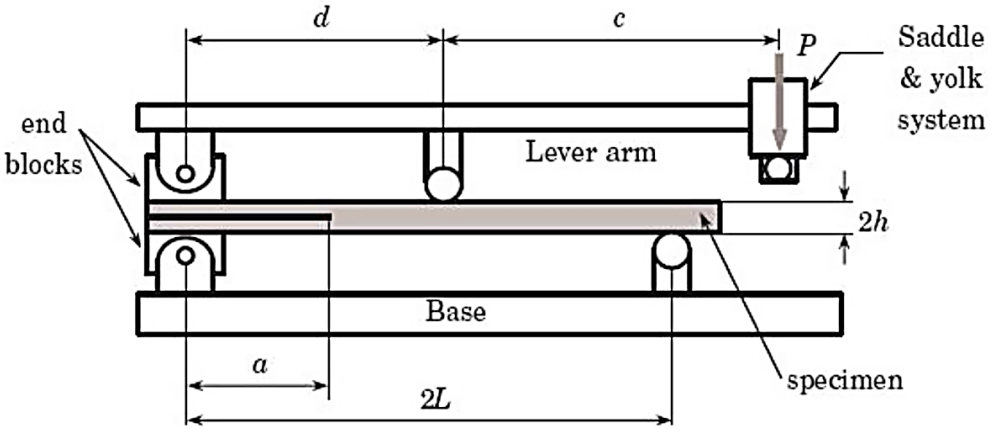
Kompozit parça üzerine gelen yanal darbeler tespit edilmesi güç olan iç çatlaklara ve delaminasyonlara sebep olabilmektedir. Bu aşamadan sonra kompozit parça düzlemsel basma yüklerine maruz kalacak olursa çatlaklar ve delaminasyonlar burkulmalara ve düzlemsel basma dayanımının düşmesine sebep olabilmektedir. Bu sebeple önemi artan mod II tabakalar arası kırılma tokluğunun belirlenmesi için en çok kullanılan deneysel metotlardan birisi 3ENF testidir. Orta düzlemdeki delaminasyon, Şekil 4.6'da görüldüğü gibi silindirik parça yardımıyla, kirişlerin birbirine göre kayma hareketi yapacak şekilde zorlanması ile büyümektedir.



Şekil 4.6 : 3ENF testi şematik gösterimi [55].

4.2.1.3 MMB (Mixed Mode Bending) testi

MMB testi ilk olarak NASA'da Reeder ve Crews tarafından geliştirilmiştir [56,57]. Karışık mod (Mod I ve Mod II) eğilme testi Şekil 4.7'de görülen test düzeneği kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu testte başlangıçta bulunan delaminasyon test düzeneği ile açılmaya ve kaymaya zorlanmaktadır. Test düzeneğindeki c mesafesi sıfır olduğunda ve P yükü numunenin ortasından uygulandığında mod II delaminasyonuna neden olmakta ve c mesafesi arttıkça mod I ve mod II karışımı artmaktadır. Bu sebepten dolayı MMB testine, DCB ve ENF testlerinin kombinasyonu denilebilmektedir.



Şekil 4.7 : MMB testi şematik gösterimi [55].

4.2.2 Kohesif alan modelini etkileyen faktörler

Kohesif alan modellemesinde seçilen çekme kanununun etkisi büyüktür. Çekme kanununun ilk kısmındaki elastik alan ve ikinci kısımdaki plastik alan kohesif elemanın davranışına karar verir. Örneğin trapezoid kanun üstel kanuna göre daha büyük yer değiştirme ve daha yüksek çekme yüklerini sağlama kabiliyetine sahiptir [58].

Maksimum çekme yükünün etkisi de kohesif alan modelini etkileyen bir diğer faktördür. Plastik bölgedeki eğimi, eğrinin altındaki alanının karşılığı olan kritik enerji yayınım hızına göre ifade eden bu değer kohesif alan elemanının tamamen hasara uğrayacağı noktanın hesaplanmasında önemlidir. Yapışkan elemanın gevrek ya da sünek olması bu değere göre ifade edilir. Maksimum çekme yükü azaldıkça, yapışan yüzeyler arasındaki kritik açıklık artar.

Yapışkan yüzeyler arasındaki kritik açıklık ve kritik enerji yayınım hızı, rijitliği ve elastik bölgeyi tariflediğinden kohesif alan modelini etkileyen diğer faktörlerdendir. Kritik enerji yayınım hızındaki azalma maksimum çekme yükünde değişiklik olmadan kritik açılma miktarını da azaltacaktır. Yüksek kritik açılma miktarı yorulma yüklerinde avantajlı olabilir.

Kohesif alan modelinde etkili olan bir diğer parametre kritik enerji yayınım hızının ve maksimum çekme yükünün kayma bileşenleridir. Bu durum daha çok karışık mod yüklemesiyle ve ilgili çekme kanunun bu durumu nasıl hesapladığıyla ilgilidir. Bazı yapışkan malzemeler daha iyi kayma yükü özelliklerine sahipken bazıları daha iyi çekme yükü özelliklerine sahiptir. Bu durum birbirinden farklı karışık mod kohesif alan modellerinin ortaya çıkmasında ve hangi hasarın önce gerçekleşeceğinin karar verilmesinde önemlidir.

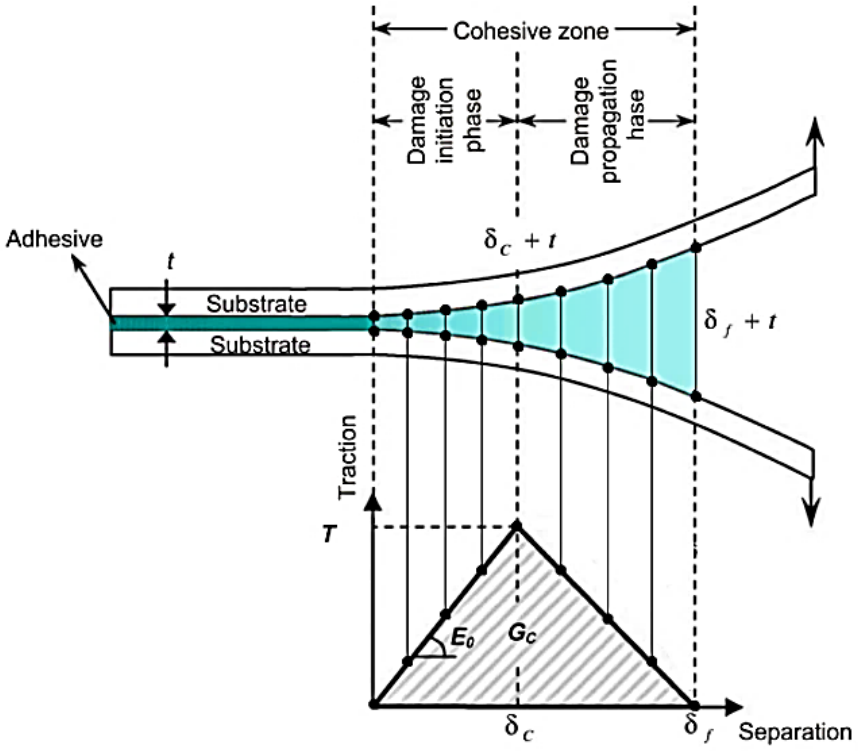
Kohesif alan modeli tekniği sonlu elemanlarla uygulanırken karşılaşılan en büyük güçlüklerden birisi de kohesif elemanların büyüklüğünün seçilmesidir. Kullanılan sonlu elemanlar çok büyük olduğunda kuvvet-yer değiştirme eğrisinde osilasyonlar görülebilir ya da model stabil olmayabilir. Eleman boyutunu küçültmek bu sorunu ortadan kaldırsa da eleman sayısı artar ve hesaplama süresi uzar. Bu sebepler göz önüne alınarak optimum eleman büyüklüğüne karar verilmelidir. Ayrıca bazı çekme kanunları sünek malzemelerle iyi sonuçlar verirken bazıları kırılgan malzemeler için

daha uygun olabilmektedir. Uygun kanunun seçilmesi de sonuçların doğruluğu açısından önemlidir.

4.3 Çekme-Ayrılma Kanunu (Traction-Separation Law)

Çekme-ayrılma kanunu olarak da bilinen kohesif alan kanunu mühendislik gerilme-gerinim eğrisinin, gerilme ve yer değiştirme parametreleriyle değiştirilmiş halidir. İki nokta arasındaki izafi yer değiştirmeyi ve buna bağlı olarak oluşan yükü belirleyen temel davranışı tanımlar. Doğrusal, doğrusal olmayan, sürekli ve süreksiz olarak çok çeşitli çekme kanunları literatürde yer almaktadır.

Çekme kanunu iki bölüme ayrılabilir. İlk bölüm başlangıç noktasından hasarın oluşmaya başlayacağı noktaya kadar olan bölgeyi gösterir. Bu aralık yapının rijitliği olarak görülebilir. Hasar başlama noktası hasar kriterleri ile malzemenin bilinen temel özelliklerine göre hesaplanan maksimum çekme T_{maks} ya da maksimum çekme anındaki yer değiştirme δ_c olarak tanımlanabilir (Şekil 4.8).



Şekil 4.8 : Çekme-ayrılma kanunu [59].

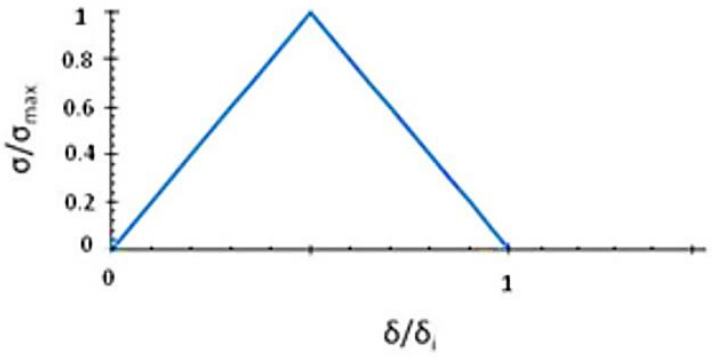
Hasar başlama noktasına ulaşıldıktan sonra yer değiştirme artmaya devam ettikçe başlangıçtaki elastik davranış yerini çekme kanunun ikinci kısmındaki davranışa bırakmaktadır. Bu bölüm hasar başlama noktası ile kopma noktası arasını ifade

etmektedir ve hasar ilerleme kriteri ile hesaplanmaktadır. Hasar ilerleme kriteri kritik enerji yayınım hızı G_c ile tanımlanmaktadır. Genellikle kohesif enerji olarak da isimlendirilen enerji yayınım hızı çekme kanunu eğrisi ile y ekseni arasında kalan alandır. Kritik enerji yayınım hızı değerine ulaşıldığında sıfır ya da sıfıra çok yakın çekme değeri elde edilmektedir. Bu aşamada çekme değeri sıfır olduğundan ve malzemeleri bir arada tutacak kuvvet bulunmadığından hasarın tamamı gerçekleşmiş olur, ilgili kohesif alan yok olur ve çatlak ilerlemesi görülür.

Literatürde ve deneysel çalışmalarda en çok kullanılan çekme kanunu bilineer kanun, trapezoid kanun ve üstel kanundur [60]. Çekme kanununun seçimi deneyin tipine, geometriye ya da malzemeye göre yapılmaktadır. Gevrek malzemelerde ve delaminasyon çalışmalarında genellikle sayısal performans, hesaplama kolaylığı ve sonuçların doğruluğu konusunda iyi sonuçlar veren bilineer kanun tercih edilmektedir [61]. Sünek yapıştırıcılar için trapezoid kanun tercih edilmektedir [62]. Üstel kanun, DCB (Double Cantilever Beam) testi gibi basit numune testlerinde hesaplaması zor olmasına rağmen en doğru sonucu vermektedir [60].

4.3.1 Bilineer kanun

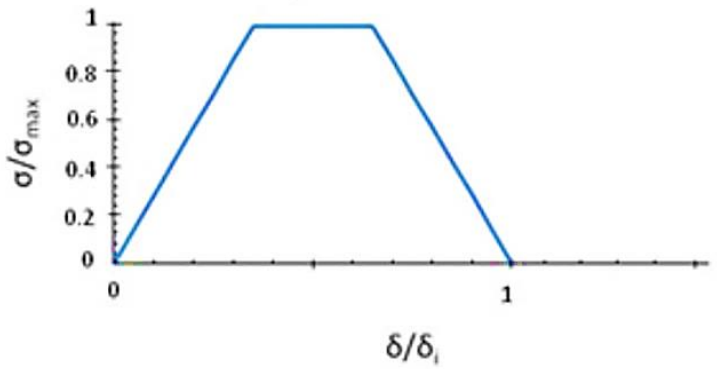
Bilineer ya da üçgensel çekme kanunu basitliği sebebiyle en çok tercih edilen kanundur. Şekil 4.9'da belirtildiği üzere üçgenseldir ve fonksiyon sürekli ve parçalı doğrusaldır. Bilinmeyen parametrelerin çokluğu sebebiyle, başlangıç rijitliği T_m/δ_c hasar oluşmadan önce yapışkan iki yüzey arasında rijit bir bağlantı sağlayabilmek için çok yüksek bir değer girilir. Bu değer Gonçalves [58] ve Camanho [63] tarafından da incelendiği gibi 10^6 N/mm^3 civarında olmalıdır. Hasar başladıktan sonra yapıştırıcı malzemenin mukavemeti doğrusal bir şekilde düşürülür (Şekil 4.9). Genellikle gevrek malzemelerde tercih edilir.



Şekil 4.9 : Bilineer çekme-ayrılma eğrisi [64].

4.3.2 Trapezoid kanun

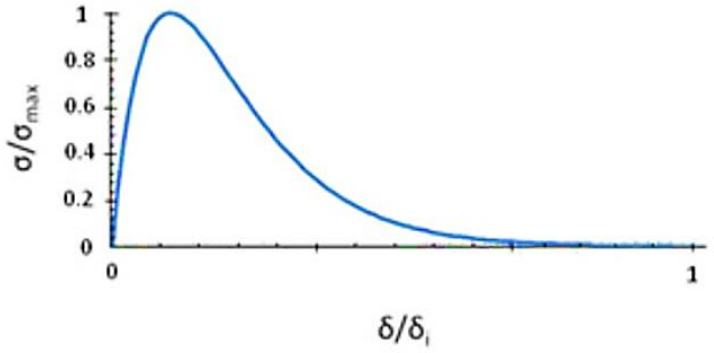
Tvergaard ve Hutchinson [65] tarafından sunulan teknik, sünek yapıştırıcı malzemeler için sıklıkla tercih edilmektedir. Sürekli ve parçalı doğrusal bir fonksiyondur (Şekil 4.10).



Şekil 4.10 : Trapezoid çekme-ayrılma eğrisi [64].

4.3.3 Üstel kanun

İlk defa Xu ve Needleman [66] tarafından sunulan teknik genellikle DCB testi gibi basit numune testlerinde kullanılır (Şekil 4.11). Hesaplaması diğer kanunlara göre zor olmasına rağmen gerçeğe yakın sonuçlar vermektedir.



Şekil 4.11 : Üstel çekme-ayrılma eğrisi [64].

5. SONLU ELEMANLAR PROGRAMLARI VE MALZEME MODELLERİ

ABAQUS, LS-DYNA, RADIOSS, ANSYS, MSC Marc ve PAM-CRASH gibi sonlu elemanlar yazılımları kompozit ve metal malzemelerin hasar analizleri konusunda çeşitli çözümler sunmaktadırlar. Kompozit malzemelerin modellenmesindeki güçlükten dolayı ticari olarak geliştirilen sonlu elemanlar yazılımlarını kullanarak ezilme davranışlarını deneysel sonuçlarla uyumlu bir şekilde hesaplamak uzun uğraşlar gerektirmektedir. Hasar başlangıcının ve ilerlemesinin hesaplanması konusunda mevcut hasar kriterlerinin yeterli olmaması bu konuda çalışan araştırmacılar arasında yaygın bir düşüncedir. Kullanışlı bir kompozit malzeme modeli geliştirmek amacıyla son yıllarda yapılan uluslararası çalışmalar kompozit hasar analizleri konusunda literatürün zenginleşmesini sağlamıştır.

Mevcut sonlu elemanlar programları, yazılım geliştiriciler tarafından programa eklenmiş malzeme modellerini kullanarak elemanların elastik, hasar ve hasar sonrası davranışlarını hesaplayabilmektedirler. Bu malzeme modelleri malzemenin deneysel yollarla elde edilen fiziksel özelliklerini ve yazılımın gerektirdiği fiziksel karşılığı olmayan birtakım parametreleri kullanmaktadırlar. Doğru modelleme için bu parametrelerin optimum değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir.

Kompozit malzemeler katı veya kabuk elemanlarla modellenebilmektedirler. Üç boyutlu katı elemanların hesaplanmasındaki güçlük, programları daha çok iki boyutlu kabuk elemanlar kullanarak çözüm üretmeye zorlamıştır. Özellikle kompozitlerde genel yaklaşım ortotropik kabuk elemanların kullanılması yönündedir. Kompozit tabakaları iki boyutlu bir kabuk eleman içerisinde gruplayarak modellemek analiz sürelerini kısaltmakta ancak delaminasyon gibi tabakalar arası davranışların gözlemlenmesini engellemektedir. Bu noktada üç boyutlu katı elemanların kullanılması detaylı hasar analizlerinin gerektiği durumlarda uzun analiz sürelerine rağmen tercih edilmektedir. Bu tez çalışmasında da kompozit numunenin modellenmesinde üç boyutlu katı elemanlar kullanılmıştır.

Üç boyutlu katı elemanlarla modelleme tekniği kompozit tabakaları ve tabakaları birbirine bağlayan yapıştırıcı bölgeyi ayrı ayrı üç boyutlu elemanlarla modelleme

mantığına dayanır. Bu durumda hem tabakalar için hem de tabakalar arasında bulunan yapıştırıcı bölge için malzeme modeli ve hasar kriteri tanımlaması gerekmektedir. İncelenen hasar kriterleri ve malzeme modelleri üç boyutlu katı elemanlarla uyumlu olarak çalışabilenler arasından seçilmiştir.

Kullanılan hasar kriterleri Çizelge 5.1'de görülmektedir.

Çizelge 5.1 : Kullanılan sonlu elemanlar yazılımlarında bulunan hasar kriterleri.

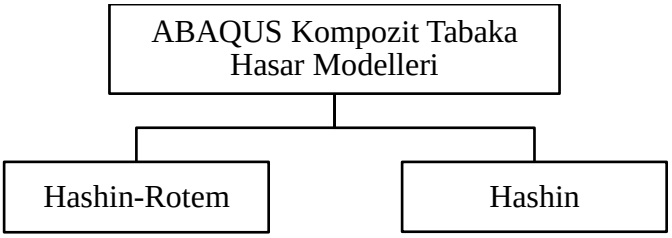
Hasar Kriteri	ABAQUS	LS-DYNA	RADIOSS	Açıklama
Maksimum Gerilme		✓	✓	Bu hasar kriterleri için yazılımlarda özel bir malzeme modeli bulunmamaktadır. Ancak diğer malzeme modellerinin hasar hesaplaması girilmeden gerilme/gerinim limiti ayrıca belirlenerek hasar hesaplaması yapılabilmektedir.
Maksimum Şekil Değiştirme		✓	✓	
Tsai-Hill				Bu hasar kriteri ABAQUS'te bulunmasına rağmen ilerlemeli hasar analizi için kullanılamamaktadır.
Modifiye edilmiş Tsai-Hill				Bu hasar kriteri incelenen yazılımlarda bulunmamaktadır.
Tsai-Wu		✓	✓	RADIOSS'ta ayrı bir hasar kriteri olarak bulunurken LS-DYNA'da MAT 55 malzeme modelinde matris hasarı hesaplaması için kullanılmaktadır.
Hashin-Rotem	✓			Sadece ABAQUS ile kullanılabilmektedir.
Hashin	✓	✓	✓	ABAQUS ve RADIOSS ile ayrı bir kriter olarak yer alırken LS-DYNA'da fiber çekme modu hasarı için kullanılmaktadır.
Puck			✓	Sadece RADIOSS ile kullanılabilmektedir.
Chang-Chang		✓		Sadece LS-DYNA ile MAT 22, MAT 54 ve MAT 55 malzeme modellerinde kullanılmaktadır.

5.1 ABAQUS

ABAQUS, 1978 yılında doğrusal olmayan fiziksel problemleri çözmek amacıyla geliştirilmeye başlanmıştır. Günümüze kadar artan kabiliyetleri sayesinde birçok fiziksel problemin hesaplanmasında kullanılabilen güçlü bir yazılım halini almıştır. Ortotropik ve anizotropik malzeme modelleri, eleman tipleri, hasar kriterleri, kullanışlı kullanıcı arayüzü ve kompozit modelleme yetenekleriyle kompozit malzemelerin hasar analizi çalışmalarında akademik anlamda en sık kullanılan yazılımlardan bir tanesidir. Ayrıca; otomotiv, havacılık ve endüstriyel ürün sektöründe sıklıkla kullanılmaktadır.

5.1.1 ABAQUS kompozit hasar modelleri

ABAQUS'te kullanılan hasar analizi tekniği, Camanho ve Davilla [67] tarafından geliştirilen yaklaşımın genelleştirilmiş halidir. ABAQUS, kompozit malzemelerin analizinde hasar başlangıcı ve hasar ilerlemesi bölümlerinden oluşan iki kademeli hasar modeli sunmaktadır. Hasar başlangıcı, kullanıcı tercihine bırakılan Hashin-Rotem veya Hashin hasar kriterleri kullanılarak hesaplanmaktadır (Şekil 5.1). ABAQUS'un sunduğu bu kriterler ile çekme yükü altında fiber kırılması, basma yükü altında fiber burkulması/bükülmesi, çekme yükü altında matris kırılması ve basma yükü altında matris ezilmesi öngörülebilmektedir.



Şekil 5.1 : ABAQUS'te bulunan kompozit tabakalar için hasar modelleri.

Hasar hesaplaması her eleman için homojen olarak yapılmakta ve fiber ya da matris hasarından dolayı elemanın tamamı hasara uğramaktadır. Hasar ilerleme modeli hasar başladığında fiberin ve matrisin enerji sönümleme kabiliyetlerine göre hasarın kompozit tabakası üzerinde nasıl ilerleyeceğine karar vermektedir. Hasarın başladığı eleman üzerindeki gerilme değerinin durumu hasar ilerlemesi hesabında belirlenmektedir.

Kullanıcı, kompozit parçayı üç boyutlu katı elemanlar, üç boyutlu sürekli kabuk elemanlar ya da geleneksel iki boyutlu kabuk elemanlarla modelleyebilmektedir.

Sürekli kabuk elemanlar geleneksel kabuk elemanlara göre fiziksel kalınlıklarının olması ve kalınlıklarının modeldeki diğer elemanları etkilemesi sebebiyle daha avantajlıdır.

ABAQUS içerisindeki kompozit hasar modelleri sadece üç boyutlu sürekli kabuk elemanlar ile çalışabilmektedir. Bu sebeple bu tez çalışmasında kullanılan numune üç boyutlu sürekli kabuk elemanlar ile modellenmiş, ABAQUS içerisindeki bu eleman tipiyle uyumlu olan Hashin-Rotem ve Hashin hasar kriterleri incelenmiştir.

5.1.1.1 Hashin-Rotem hasar kriteri

ABAQUS'te hasar başlangıcının hesaplandığı kriterlerden bir tanesi Hashin-Rotem [40] kriteridir. Bu hasar kriteri birbirinden ayrı dört hasar modundan oluşmaktadır:

Fiber çekme modu ($\sigma_{11} \geq 0$):

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_T}\right)^2 + \alpha\left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 < 1 \tag{5.1}$$

Fiber basma modu ($\sigma_{11} < 0$):

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_C}\right)^2 < 1 \tag{5.2}$$

Matris çekme modu ($\sigma_{22} \geq 0$):

$$\left(\frac{\sigma_{22}}{Y_T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 < 1 \tag{5.3}$$

Matris basma modu ($\sigma_{22} < 0$):

$$\left(\frac{\sigma_{22}}{2S_{23}}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y_C}{2S_{23}}\right)^2 - 1\right]\frac{\sigma_{22}}{Y_C} + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 < 1 \tag{5.4}$$

Denklem 5.1'deki α parametresi kayma gerilmesinin fiber çekme kriterine etkisini belirlemek için kullanılmaktadır. Hashin-Rotem hasar kriterinin kullanılabilmesi için bu parametrenin 0 olarak girilmesi gerekir. Ayrıca; Hashin-Rotem kriterinde $S_{23} = \frac{Y_C}{2}$ olarak hesaplanmaktadır.

Hasar başlangıcının hesaplanmasında denklem 5.5 kullanılmaktadır. Buna göre hasar başlamadan önce denklem 5.6'da bulunan M matrisi birim matristir. Bu matrisin

elemanın mukavemeti üzerindeki etkisi hasar başlangıcından sonra görülmektedir. Herhangi bir modda hasar başlangıcı olduktan sonra diğer modlar için hasar başlangıcı hesabı düşürülen gerilme değeri ile yapılmaktadır.

$$\tilde{\sigma} = M\sigma \tag{5.5}$$

$$M = \begin{bmatrix} \frac{1}{1-d_f} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{1-d_m} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{1-d_s} \end{bmatrix} \tag{5.6}$$

d_f, d_m ve d_s hasar parametreleri ilgili elemanın zorlanma durumuna göre hesaplanmaktadır. Örneğin; denklem 5.7'deki fiber hasar değişkeni d_f, fiber doğrultusundaki efektif gerilme sıfırdan büyük ya da eşitse çekme kriterini, sıfırdan küçükse basma kriterini kullanmaktadır. Fiberlere dik doğrultuda da denklem 5.8'deki matris hasar değişkeni d_m için aynı durum geçerli olmaktadır.

$$d_f = \begin{cases} d_f^t \; eğer \; \tilde{\sigma}_{11} \geq 0 \\ d_f^c \; eğer \; \tilde{\sigma}_{11} < 0 \end{cases} \tag{5.7}$$

$$d_m = \begin{cases} d_m^t \; eğer \; \tilde{\sigma}_{22} \geq 0 \\ d_m^c \; eğer \; \tilde{\sigma}_{22} < 0 \end{cases} \tag{5.8}$$

Kayma hasar değişkeni d_s ise denklem 5.9'a göre hesaplanmaktadır.

$$d_s = 1 - (1 - d_f^t)(1 - d_f^c)(1 - d_m^t)(1 - d_m^c) \tag{5.9}$$

Herhangi bir hasar modunda kritere ulaşıldığında hesaplanan gerilme değeri denklem 5.10 uygulanarak bulunmaktadır. Eleman üzerindeki fiber hasarı, program tarafından hesaplanan ya da kullanıcı tarafından belirlenebilen kritik değerine ulaştığında ilgili eleman analizden silinmektedir.

$$\sigma = C_d \varepsilon \tag{5.10}$$

$$C_d = \frac{1}{D}\begin{bmatrix} (1-d_f)E_1 & (1-d_f)(1-d_m)\nu_{21}E_1 & 0 \\ (1-d_f)(1-d_m)\nu_{12}E_2 & (1-d_m)E_2 & 0 \\ 0 & 0 & (1-d_s)GD \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

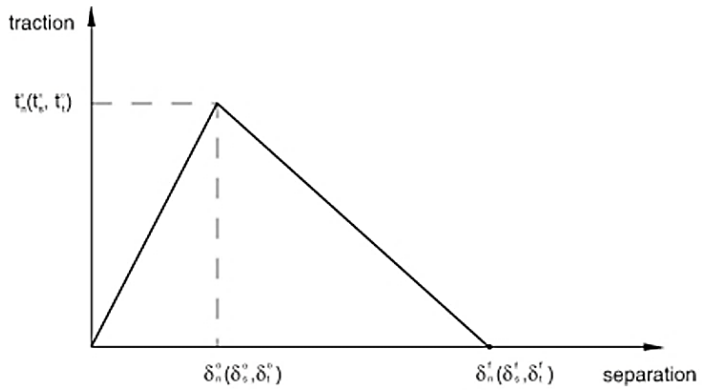
$$D = 1-(1-d_f)(1-d_m)\nu_{12}\nu_{21} \quad (5.12)$$

5.1.1.2 Hashin hasar kriteri

ABAQUS ile Hashin [41] kriterini kullanmak için α parametresinin 1 olarak girilmesi gerekmektedir. Hashin-Rotem kriterinde belirtilen hasar modları, matematiksel ifadeler ve hasar ilerleme hesaplamaları bu kriterde de aynı şekilde kullanılmaktadır. α parametresi 1 olduğundan dolayı fiber çekme modunda kayma gerilmeleri de hesaba dahil edilmektedir. Bu kriterde ayrıca $S_{23} = Y_C$ olarak hesaplanmaktadır.

5.1.2 ABAQUS delaminasyon modelleri

ABAQUS ile sunulan çekme-ayrılma kanunu, doğrusal elastik davranış gösteren malzemenin hasar davranışını hasar başlangıcı ve hasar ilerlemesi olarak iki bölümde incelemektedir (Şekil 5.2). Hesaplamalarda kullanılan nominal gerilme değeri ilgili integrasyon noktasındaki kuvvetin alana bölümünden elde edilir. Nominal gerinim değeri ise ayrılma miktarının integrasyon noktasındaki kalınlıkla bölünmesinden elde edilir. Basma yükleri altında kohesif elemanlar hasara uğramamaktadırlar.



Şekil 5.2 : Çekme-ayrılma davranışı [68].

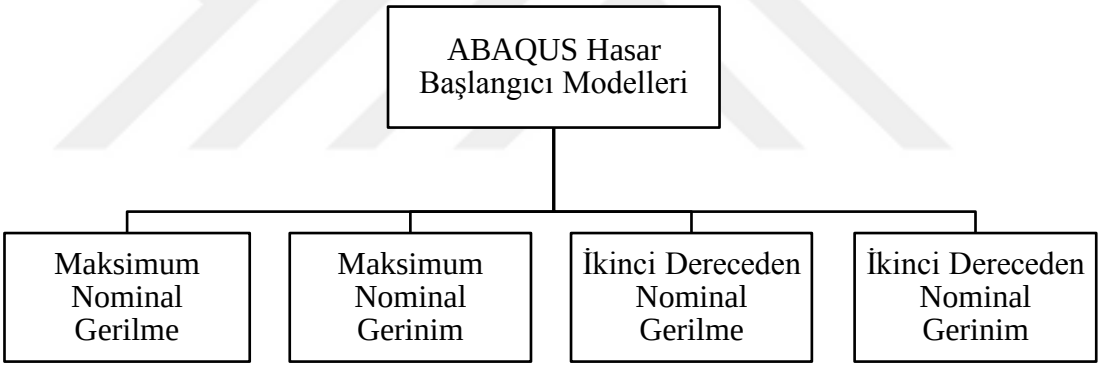
Kohesif elemanlar kabuk ya da katı elemanlardan oluşabilmektedir. Katı elemanlar sıfır kalınlıklı olarak da modellenebilmektedir. Ayrıca kohesif elemanlar yerine ilgili kompozit tabakaların arasına tanımlanan yüzey ilişkisi ile de delaminasyon

modellemesi yapılabilmektedir. Kohesif elemanlar için kullanılan kriterler tanımlanan bu yüzey ilişkisi ile de kullanılabilmektedir.

Kohesif elemanlarla bağlanan yüzeylerin birbirleri ile olan yüzey ilişkileri de önemli bir konudur. Kohesif elemanlar hasara uğradıktan sonra birbirine temas edecek tabakaların doğru davranışı için doğru yüzey ilişkisi parametrelerinin tercih edilmesi gerekmektedir.

5.1.2.1 Hasar başlangıcı

Malzemenin çeşitli kriterlerle hesaplanan limit değerlerde zorlandıktan sonra hasara uğramaya ve mukavemetinin düşmeye başladığı noktayı ifade etmektedir. ABAQUS, hasar başlangıcının belirlenmesinde kullanılmak üzere maksimum nominal gerilme kriteri, maksimum nominal gerinme kriteri, ikinci dereceden nominal gerilme kriteri ve ikinci dereceden nominal gerinme kriteri gibi çeşitli seçenekler sunmaktadır (Şekil 5.3).



Şekil 5.3 : ABAQUS'te bulunan delaminasyon hasar başlangıcı yöntemleri.

Maksimum nominal gerilme kriteri

Denklem 5.13'te belirtilen maksimum nominal gerilme oranı 1 olduğunda hasarın başladığı kabul edilmektedir.

$$max\left\{\frac{\langle T_I \rangle}{T_{m,I}}, \frac{T_{II}}{T_{m,II}}, \frac{T_{III}}{T_{m,III}}\right\} = 1 \tag{5.13}$$

Maksimum nominal gerinim kriteri

Denklem 5.14'te belirtilen maksimum nominal gerinim oranı 1 olduğunda hasarın başladığı kabul edilmektedir.

$$max\left\{\frac{\langle\varepsilon_I\rangle}{\varepsilon_{m,I}},\frac{\varepsilon_{II}}{\varepsilon_{m,II}},\frac{\varepsilon_{III}}{\varepsilon_{m,III}}\right\}=1 \tag{5.14}$$

İkinci dereceden nominal gerilme kriteri

Denklem 5.15'te belirtilen nominal gerilme oranlarını içeren ikinci dereceden ifadenin değeri 1 olduğunda hasarın başladığı kabul edilmektedir.

$$\left(\frac{\langle T_I\rangle}{T_{m,I}}\right)^2+\left(\frac{T_{II}}{T_{m,II}}\right)^2+\left(\frac{T_{III}}{T_{m,III}}\right)^2=1 \tag{5.15}$$

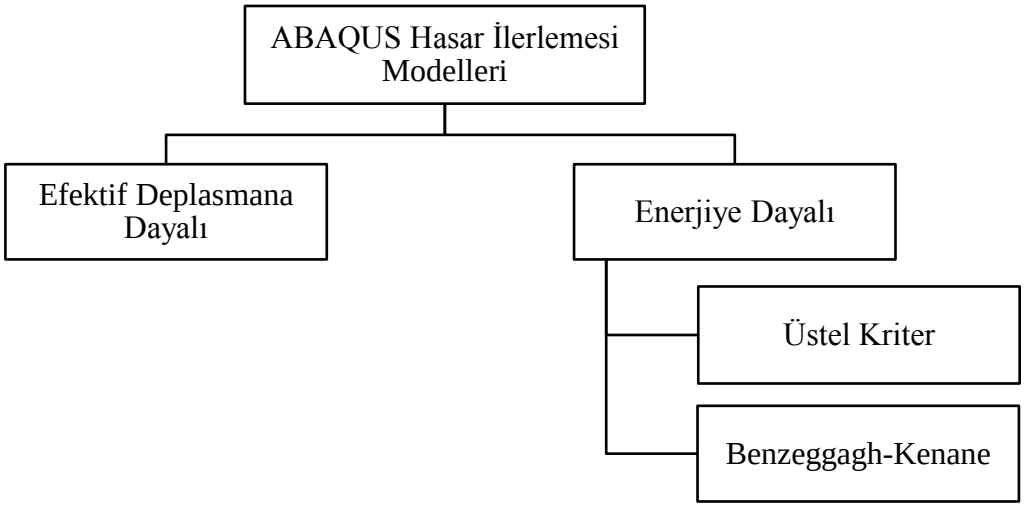
İkinci dereceden nominal gerinim kriteri

Denklem 5.16'da belirtilen nominal gerinim oranlarını içeren ikinci dereceden ifadenin değeri 1 olduğunda hasarın başladığı kabul edilmektedir.

$$\left(\frac{\langle\varepsilon_I\rangle}{\varepsilon_{m,I}}\right)^2+\left(\frac{\varepsilon_{II}}{\varepsilon_{m,II}}\right)^2+\left(\frac{\varepsilon_{III}}{\varepsilon_{m,III}}\right)^2=1 \tag{5.16}$$

5.1.2.2 Hasar ilerlemesi

Malzemedeki hasar ilerlemesi, hasar başlangıcı ve kopma noktası arasında kalan bölümü temsil etmektedir. Hasar ilerleme hesabı, bir kez hasar oluştuktan sonra malzeme mukavemetinin nasıl azaltılacağını ifade eden kurallarla yapılmaktadır. Bu kurallar efektif deplasmana dayalı ve enerjiye dayalı olmak üzere iki bölüme ayrılmaktadır (Şekil 5.4).



Şekil 5.4 : ABAQUS'te bulunan delaminasyon hasar ilerlemesi yöntemlerinin sınıflandırılması.

Efektif deplasmana dayalı hasar ilerlemesi

Malzemenin kopacağı maksimum deplasman değeri kullanıcı tarafından tanımlanmaktadır. Hasar başladıktan sonra bu deplasman değerine kadar malzemenin mukavemeti düşürülür. Denklem 5.17'ye göre hesaplanan maksimum deplasmana ulaşıldığında eleman silinir [66].

$$\delta_m = \sqrt{\langle \delta_I \rangle^2 + \delta_{II}^2 + \delta_{III}^2} \tag{5.17}$$

Ayrıca hasar başladıktan sonra malzeme mukavemetindeki düşüşün nasıl olacağını ifade eden doğrusal ya da üstel bir form seçilmeli ya da deplasmana göre hasar parametresini ifade eden bir tablo tanımlanmalıdır.

Enerjiye dayalı hasar ilerlemesi

Kırılma enerjisi olarak da ifade edilen hasar sırasında harcanan enerji, hasar ilerleme hesabı için kullanılabilmektedir. Kırılma enerjisi çekme ayrılma eğrisinin altında kalan alan olarak ifade edilmektedir.

Kullanıcı tarafından tanımlanan değerler elemanın hasar ilerleme hesabı için kullanılmaktadır. Hasar başladıktan sonra malzeme mukavemetindeki düşüşü ifade eden doğrusal ya da üstel bir form seçilmeli ya da deplasmana göre hasar parametresini ifade eden bir tablo tanımlanmalıdır. ABAQUS, hasarın tamamlanacağı noktayı hesaplamak için kullanıcının seçebileceği iki kriter sunmaktadır:

Üstel kriter

Bu kriter farklı doğrultulardaki kırılma enerjilerinin etkilerini karışık moddaki bir kırılma durumunda hesaplamak için denklem 5.18'de belirtildiği gibi üstel ifadeler kullanır.

$$\left(\frac{G_I}{G_{IC}}\right)^{\alpha} + \left(\frac{G_{II}}{G_{IIC}}\right)^{\alpha} + \left(\frac{G_{III}}{G_{IIIC}}\right)^{\alpha} = 1 \tag{5.18}$$

Formüldeki α değeri deneysel çalışmalarla bulunmaktadır. Kullanıcı tarafından program arayüzünden tanımlanabilmektedir.

Benzeggagh-Kenane (BK) kriteri

Benzeggagh-Kenane (BK) kriteri [52] birinci ve ikinci kayma doğrultularındaki kritik kırılma enerjilerinin eşit olduğu durumlarda ($G_{IIC} = G_{IIIC}$) daha başarılı

sonuçlar vermektedir. Malzemenin kopacağı nokta denklem 5.19 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$G_{IC} + (G_{IIC} - G_{IC})\left(\frac{G_S}{G_T}\right)^{\eta} = G^C \tag{5.19}$$

$$G_S = G_{II} + G_{III} \tag{5.20}$$

$$G_T = G_I + G_{II} + G_{III} \tag{5.21}$$

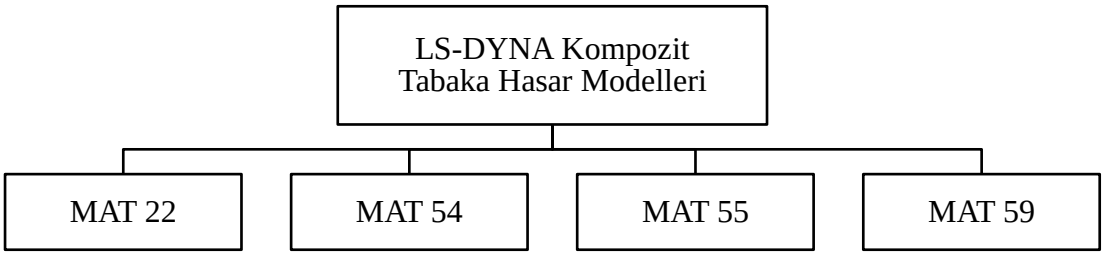
5.2 LS-DYNA

LS-DYNA doğrusal ve doğrusal olmayan malzeme modelleri, güçlü yüzey ilişkileri ve eleman formülasyonları ile otomotiv, havacılık, biyomühendislik, inşaat ve imalat sektörlerinde sıklıkla tercih edilen genel amaçlı sonlu elemanlar programlarından bir tanesidir. 1976 yılında doğrusal olmayan dinamik analizlerin yapılabilmesi için Dr. John O. Hallquist tarafından Lawrence Livermore National Laboratory'de (LLNL) DYNA3D ismiyle geliştirilmiştir. 1988 yılının sonlarında DYNA3D programını geliştirmek için Livermore Software Technology Corporation (LSTC) kurulmuş ve yazılımın adı LS-DYNA olarak değiştirilmiştir [69].

Günümüze kadar LS-DYNA, eklenen yeni malzeme modelleri, eleman formülasyonları, yüzey ilişkisi algoritmaları gibi özelliklerle çok çeşitli analiz ihtiyaçlarına cevap verebilecek düzeye gelmiştir. Bugüne kadar programa yaklaşık iki yüz malzeme modeli eklenmiştir [69].

5.2.1 LS-DYNA kompozit malzeme modelleri

LS-DYNA sonlu elemanlar yazılımında MAT 22, MAT54/55, MAT58, MAT 59 ve MAT 162 gibi malzeme modelleri ile farklı hasar kriterlerinde farklı senaryolar için uyumlu seçenekler sunulmuştur (Şekil 5.5). Bu malzeme modelleri katı ya da kabuk elemanlarla uyumlu olarak çalışabilmektedir. Kompozitler için sunulan malzeme modelleri genel olarak ortotropik malzeme tanımlamaları ile uyumlu olarak çalışmaktadır. Bu malzeme modellerinde Tsai-Wu [38], Chang-Chang [47,48] ve Hashin [41] hasar kriterleri kullanılmıştır. Bunlar dışında kullanıcının tercihine bağlı olarak enerji, gerilme ya da gerinim limitlerine göre hasar hesaplamaları da yapılabilmektedir.



Şekil 5.5 : LS-DYNA'da bulunan kompozit malzeme modellerinin sınıflandırılması.

LS-DYNA ile yapılan kompozit malzemelerin analiz işlemi, hasar başlangıcı ve hasar ilerlemesi olarak iki ana bölümden oluşur. Malzeme modellerinde genellikle hasar kriterine ulaşan elemanların rijitlikleri sıfırlanarak gerilme değerleri sabit tutulur. Hasar başladıktan sonra kullanıcı tarafından belirlenen kopma gerinimi değerine kadar şekil değiştiren elemanlar kopma gerinimine ulaştıklarında analizden silinirler.

LS-DYNA ile kompozit malzemeler kabuk elemanlar, sürekli kabuk elemanlar ya da katı elemanlarla modellenebilmektedir. Bazı malzeme modelleri katı elemanlar ile bazı malzeme modelleri kabuk elemanlar ile çalışabilirken, bazıları her iki türdeki elemanlarla da hesaplama yapabilmektedir.

LS-DYNA'da bulunan kompozit malzeme modellerinin kullandığı hasar kriterleri incelendiğinde Çizelge 5.2'deki gibi bir tablo ortaya çıkmaktadır:

Çizelge 5.2 : LS-DYNA'da bulunan kompozit malzeme modellerinin kullandığı hasar kriterleri.

Malzeme Modeli	Hasar Kriteri	Açıklama
MAT 22	Chang-Chang	Chang-Chang hasar kriterinin modifiye edilmiş hali kullanılmaktadır.
MAT 54	Chang-Chang	Fiber çekme hasarı için Hashin hasar kriteri, fiber basma hasarı için maksimum gerilme hasar kriteri, matris hasarı için Chang-Chang hasar kriterini kullanmaktadır.
MAT 55	Chang-Chang ve Tsai-Wu	MAT 54 malzeme modelinden farkı, matris hasarı için Tsai-Wu hasar kriterini kullanmasıdır.
MAT 59	-	Bu malzeme modeli için literatürde belirtilen bir hasar kriteri bulunamamıştır.

5.2.1.1 MAT 22

Chang-Chang tarafından 1987 yılında geliştirilen [47,48] hasar kriterini kullanan MAT 22 malzeme modeli LS-DYNA yazılımına ilk eklenen kompozit malzeme modelidir. Katı ya da kabuk elemanlarla hesaplama yapabilmektedir. Düzlemsel gerilme durumunda, gerinim değerleri gerilmeler cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\varepsilon_{11} = \frac{1}{E_{11}}(\sigma_{11} - \nu_{12}\sigma_{22}) \tag{5.22}$$

$$\varepsilon_{22} = \frac{1}{E_{22}}(\sigma_{22} - \nu_{21}\sigma_{11}) \tag{5.23}$$

$$2\varepsilon_{12} = \frac{1}{G_{12}}\tau_{12} + \alpha\tau_{12}^3 \tag{5.24}$$

Kriterdeki belirtilen α değeri doğrusal olmayan kayma gerilmesi parametresidir ve deneysel yollarla malzemenin kayma gerilmesi-kayma gerinimi ölçümleri ile elde edilir. MAT22 malzeme modelinin hasar modları aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır. İlgili hasar modu sağlandığında o hasar moduyla ilişkili malzeme özellikleri sıfırlanmaktadır.

Matris hasarı:

$$\left(\frac{\sigma_{22}}{Y_T}\right)^2 + \bar{\tau} < 1 \tag{5.25}$$

$$E_{22} = G_{12} = \nu_{21} = \nu_{12} = 0$$

Basma hasarı:

$$\left(\frac{\sigma_{22}}{2S_{12}}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y_C}{2S_{12}}\right)^2 - 1\right]\frac{\sigma_{22}}{Y_C} + \bar{\tau} < 1 \tag{5.26}$$

$$E_{22} = \nu_{21} = \nu_{12} = 0$$

Fiber hasarı:

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_T}\right)^2 + \bar{\tau} < 1 \tag{5.27}$$

$$E_{11} = E_{22} = G_{12} = \nu_{21} = \nu_{12} = 0$$

Formüllerde yer alan $\bar{\tau}$ kayma parametresi denklem 5.28'de belirtildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$\bar{\tau} = \frac{\frac{\tau_{12}^2}{2G_{12}} + \frac{3}{4}\alpha\tau_{12}^4}{\frac{S_{12}^2}{2G_{12}} + \frac{3}{4}\alpha S_{12}^4} \tag{5.28}$$

5.2.1.2 MAT 54

MAT 54 malzeme modeli MAT 22 malzeme modeline fiber basma modunun eklenmiş halidir. Tek eksenli, tabakalı, ortotropik kompozit malzemeleri tanımlamak için kullanılmaktadır. Hashin [41], Chang-Chang [47,48] ve maksimum gerilme hasar kriterlerini kullanmaktadır. Tanımlanması için fazla sayıda parametreye ihtiyaç duymamasından ötürü kompozit hasar analizlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Fazla sayıda parametreye ihtiyaç duymaması hesaplama süresini kısaltmakta ve malzemeyi tanımlamak için gerekli deneysel çalışma sayısını azaltmaktadır.

Fiber çekme modu ($\sigma_{11} > 0$):

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_T}\right)^2 + \beta\left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right) < 1 \tag{5.29}$$

$$E_{11} = E_{22} = G_{12} = \nu_{21} = \nu_{12} = 0$$

Fiber basma modu ($\sigma_{11} < 0$):

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_C}\right)^2 < 1 \tag{5.30}$$

$$E_{11} = \nu_{12} = \nu_{21} = 0$$

Matris çekme modu ($\sigma_{22} > 0$):

$$\left(\frac{\sigma_{22}}{Y_T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 < 1 \tag{5.31}$$

$$E_{22} = \nu_{21} = G_{12} = 0$$

Matris basma modu ($\sigma_{22} < 0$):

$$\left(\frac{\sigma_{22}^2}{2S_{12}}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y_C}{2S_{12}}\right)^2 - 1\right]\frac{\sigma_{22}}{Y_C} + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 < 1 \tag{5.32}$$

$$E_{22} = \nu_{21} = \nu_{12} = G_{12} = 0$$

$$X_C = 2Y_C$$

LS-DYNA dokümantasyonunda MAT 54 malzeme modeli için yeterli bilgiye yer verilmemiştir ve yazılanlar kolaylıkla yanlış anlaşılabilecek niteliktedir [70]. MAT 54 malzeme modeli elastik bölge içinde Chang-Chang hasar kriterini kullanmaktadır.

Bir eleman i. zaman adımında hasara uğradığında denklem 5.33'te yer alan rijitlik matrisindeki değerler sıfırlanmaktadır. Ancak bir önceki adımdaki gerilme değerleri değişmeden devam etmektedir. Bu plastik şekil değiştirme durumu malzemenin kopma uzamasına kadar devam etmektedir. Tüm tabakalar için hasar kriteri sağlandığında eleman analizden silinmektedir.

$$\begin{bmatrix}\sigma_{11}\\ \sigma_{22}\end{bmatrix}_i = \begin{bmatrix}\sigma_{11}\\ \sigma_{22}\end{bmatrix}_{i-1} + \begin{bmatrix}C_{11} & C_{12}\\ C_{12} & C_{22}\end{bmatrix}_i \begin{bmatrix}\Delta\varepsilon_1\\ \Delta\varepsilon_2\end{bmatrix}_i \tag{5.33}$$

β değeri 1 olarak seçildiğinde program fiber hasarı için Hashin (1980) kriterini kullanırken $\beta = 0$ seçildiğinde maksimum gerilme kriterine göre hesaplama yapmaktadır. Maksimum gerilme kriterinin bu durumda deneylerle daha iyi örtüştüğü görülmüştür [70].

5.2.1.3 MAT 55

MAT 55 malzeme modelinde çekme ve basma fiber hasarı MAT 54 malzeme modelinde olduğu gibi Chang-Chang [47,48] hasar kriteri ile aynı şekilde hesaplanmaktadır. Farklı olarak çekme ve basma matris hasarı denklem 5.34'e göre hesaplanmaktadır:

$$\frac{\sigma_{22}}{Y_C Y_T} + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \frac{(Y_C - Y_T)\sigma_{22}}{Y_C Y_T} < 1 \tag{5.34}$$

Tüm parametrelerin ve hesaplama yöntemlerinin MAT 54 malzeme modeli ile aynı olduğu bu modelin farkı, matris hasarı için Tsai-Wu [38] kriterini kullanmasıdır. Bu modelde düzlem dışı kayma gerilmeleri dikkate alınmamaktadır.

Malzeme modeli tanımlanırken malzeme mukavemet değerlerinin yanında kopma uzaması değerlerinin ya da maksimum efektif hasar gerinimi değerinin de girilmesi gerekmektedir. Malzeme gerinim değerleri bu değerlere ulaştığında ilgili eleman analizden silinmektedir. Elemanın silinmesi için ilgili elemandaki tüm tabakaların hasar kriterini sağlaması gerekmektedir.

5.2.1.4 MAT 59

MAT 59 malzeme modeli ortotropik malzemeler için genellikle kalın kompozit yapıların darbe ve ezilme analizlerinde katı elemanlar ile kullanılmaktadır. Malzemenin hasar kriterleri aşağıda belirtildiği gibidir [70,71]:

Fiber çekme ($\sigma_{11} > 0$):

$$\frac{\sigma_{11}^2}{X_T^2} + \frac{\tau_{12}^2}{S_{12}^2} + \frac{\tau_{31}^2}{S_{31}^2} < 1 \tag{5.35}$$

Matris çekme (fiber çekme ile beraber) ($\sigma_{22} > 0$):

$$\frac{\sigma_{22}^2}{Y_T^2} + \frac{\tau_{12}^2}{S_{12}^2} + \frac{\tau_{23}^2}{S_{23}^2} < 1 \tag{5.36}$$

Kalınlık doğrultusunda kayma ($\sigma_{11} > 0$):

$$\frac{\sigma_{11}^2}{X_T^2} + \frac{\tau_{31}^2}{S_{31}^2} < 1 \tag{5.37}$$

Kalınlık doğrultusunda çekme (delaminasyon) ($\sigma_{33} > 0$):

$$\frac{\sigma_{33}^2}{Z_T^2} + \frac{\tau_{23}^2}{S_{23}^2} + \frac{\tau_{31}^2}{S_{31}^2} < 1 \tag{5.38}$$

Kalınlık doğrultusunda kayma (matris çekme ile beraber) ($\sigma_{22} > 0$):

$$\frac{\sigma_{22}^2}{Y_T^2} + \frac{\tau_{23}^2}{S_{23}^2} < 1 \tag{5.39}$$

Fiber basma ($\sigma_{11} < 0$):

$$\frac{\sigma_{11}^2}{X_C^2} < 1 \tag{5.40}$$

Matris basma ($\sigma_{22} < 0$):

$$\frac{\sigma_{22}^2}{(S_{11}+S_{23})^2}+\frac{\sigma_{22}}{Y_c}\left[\left(\frac{Y_C^2}{(S_{12}+S_{23})}\right)^2-1\right]+\frac{\tau_{12}^2}{S_{12}^2}+\frac{\tau_{31}^2}{S_{31}^2}<1 \tag{5.41}$$

Kalınlık doğrultusunda basma ($\sigma_{33} < 0$):

$$\frac{\sigma_{33}^2}{(S_{31}+S_{23})^2}+\frac{\sigma_{33}}{Z_C}\left[\left(\frac{Z_C^2}{(S_{31}+S_{23})}\right)^2-1\right]+\frac{\tau_{31}^2}{S_{12}^2}+\frac{\tau_{23}^2}{S_{23}^2}<1 \tag{5.42}$$

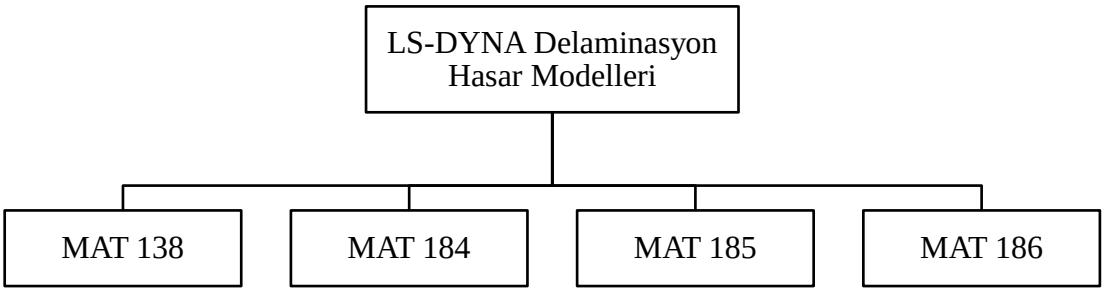
Hasar kriterine ulaşan elemanların rijitlik matrisleri sonraki yüz zaman adımı süresinde düşürülerek sıfırlanır. Çekme/basma gerinimi ya da maksimum efektif gerinimi kullanıcı tarafından belirlenen sınırı geçen elemanlar tamamen hasara uğramış sayılır ve analizden silinir.

5.2.2 LS-DYNA delaminasyon hasar modelleri

LS-DYNA'daki kohesif eleman formülasyonu iki yüzeyi, doğrusal olmayan yay elemanlarla bağlamaktadır. Eleman gerçekte iki boyutludur. Deformasyon, iki yüzeyin izafi yer değiştirmesi ile ifade edilmektedir. Bu formülasyonda deformasyonların birimi gerinimden farklı olarak uzunluktur. Malzeme modellerinin çıktısı Gauss noktalarındaki alan başına düşen kuvvet olarak hesaplanmaktadır.

Kohesif elemanlar sıfır kalınlıkta olabilmektedir ve kararlılığını kaybetmeden şekil değiştirebilmektedir. Bir tanesi normal doğrultuda iki tanesi kayma doğrultularında çalışan üç adet doğrusal olmayan yaydan meydana gelmektedirler.

LS-DYNA'da kohesif eleman modellemesi için MAT 138, MAT 184, MAT 185 ve MAT 186 malzeme modelleri bulunmaktadır. Bu malzeme modellerinin her biri farklı bir formülasyona göre çalışmaktadır ve kullanılacak senaryoya göre uygun model tercih edilmelidir (Şekil 5.6).



Şekil 5.6 : MAT 138 karışık mod çekme-ayrılma kanunu.

İki yüzey birbirine kohesif elemanlarla bağlandığında kohesif elemanlar hasara uğradıktan ve silindikten sonra bu yüzeylerin birbirleriyle olan ilişkilerini de düşünmek gerekmektedir. Bu sebeple kohesif elemanlarla bağlanan tabakalar için yüzey ilişkileri de tanımlanmalıdır. Kullanılan sonlu elemanlar yazılımının sunduğu güçlü yüzey ilişkisi formülasyonları yapılacak analizlerin doğruluğu açısından önemli olmaktadır.

LS-DYNA ile yüzey ilişkisi kullanarak da kohesif alan modellemesi yapmak mümkündür. Kullanılan yüzey ilişkisi belirli kriterlere göre hasar başlangıcı ve hasar ilerlemesi hesabı yapılacak şekilde de tanımlanabilmektedir. Bu işlem modelde bulunan eleman sayısını azaltacağından hesaplama süresini de kısaltmaktadır.

5.2.2.1 MAT 138

MAT 186 malzeme modelinin basitleştirilmiş halidir. İkinci dereceden karışık mod kriteri ile bilineer çekme ayrılma kanunu ve hasar formülasyonunu kullanmaktadır. Katı elemanlarla birlikte çalışmaktadır [70].

Kohesif malzeme modelinde karışık moddaki izafi yer değiştirme δ_m, denklem 5.43'te belirtildiği gibi hesaplanır:

$$\delta_m = \sqrt{\delta_I^2 + \delta_{II}^2} \tag{5.43}$$

$$\delta_I = \delta_3 \tag{5.44}$$

$$\delta_{II} = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2} \tag{5.45}$$

Hesaplanan izafi yer değiştirme değerinin hasarın başlangıç değerine geldiği yazılım tarafından kontrol edilmektedir. Karışık moddaki hasar başlangıç uzaması denklem 5.46'daki gibi hesaplanır:

$$\delta^0 = \delta_I^0 \delta_{II}^0 \sqrt{\frac{1+\beta^2}{(\delta_{II}^0)^2 + (\beta\,\delta_I^0)^2}} \qquad \beta = \frac{\delta_{II}}{\delta_I} \tag{5.46}$$

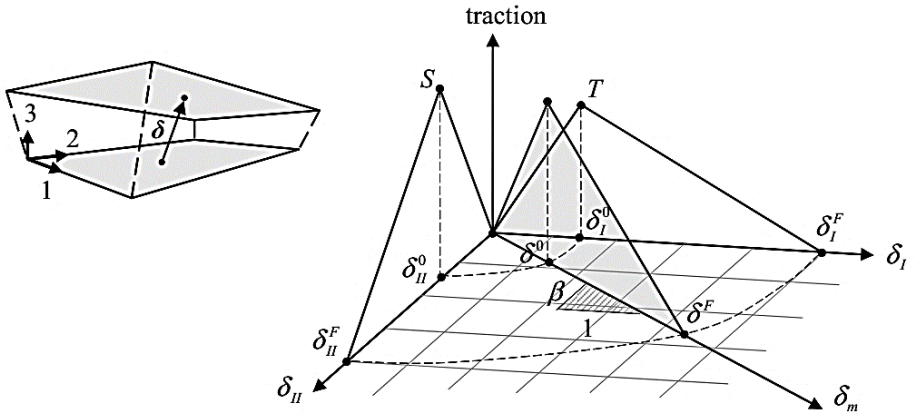
Denklem 5.46'da yer alan δ_I^0 ve δ_{II}^0 değişkenleri $\delta_I^0 = T/E_n$ ve $\delta_{II}^0 = S/E_t$ olarak belirtilmektedir. T, normal doğrultudaki maksimum gerilmeyi, S ise teğetsel doğrultudaki maksimum gerilmeyi belirtmektedir. Hasar başladıktan sonra kopmanın olacağı noktaya kadar olan yer değiştirme malzeme rijitliği düşürülerek devam etmektedir. Hasarın tamamlanacağı maksimum yer değiştirme hesabı için kullanılan üstel kanun denklem 5.47'de belirtilmiştir:

$$\delta^F = \frac{2(1+\beta)^2}{\delta^0}\left[\left(\frac{E_n}{G_{IC}}\right)^{XMU} + \left(\frac{E_t\,\beta^2}{G_{IIC}}\right)^{XMU}\right]^{-\frac{1}{XMU}} \tag{5.47}$$

Alternatif olarak denklem 5.48'de belirtilen Benzeggagh-Kenane kanunu [52] da tercih edilebilmektedir (Şekil 5.2).

$$\delta^F = \frac{2}{\delta^0\left(\frac{1}{1+\beta^2}E_n + \frac{\beta^2}{1+\beta^2}E_t\right)}\Bigg[G_{IC} + (G_{IIC} - G_{IC})\left(\frac{\beta^2\,E_t}{E_n + \beta^2\,E_t}\right)^{|XMU|}\Bigg] \tag{5.48}$$

MAT 138 kullanılarak modellenen yapışkan bölgenin karışık mod zorlanması altında hesaplanan çekme-ayrılma grafiği Şekil 5.7'de gösterilmiştir.



Şekil 5.7 : MAT 138 karışık mod çekme-ayrılma kanunu [70].

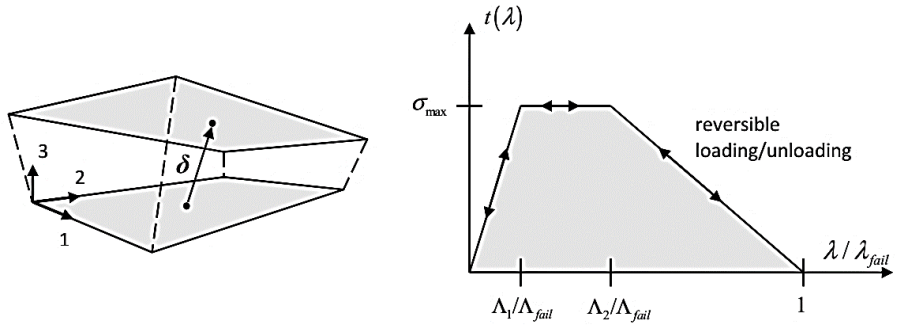
5.2.2.2 MAT 184

Katı kohesif elemanlarla kullanılmak üzere geliştirmiş basit bir elastik malzeme modelidir. Hesaplanan yer değiştirme değerleri kullanıcı tarafından belirlenen limite ulaştığında malzeme hasara uğramaktadır.

5.2.2.3 MAT 185

MAT 185 malzeme modeli Tvergaard and Hutchinson [65] tarafından geliştirilmiş kohesif modeli içerir. Katı elemanla kullanılabilmektedir.

MAT 185 malzeme modelinde normal (δ_3 – mod I) ve teğetsel (δ_1, δ_2 – mode II) izafi yer değiştirmeleri kapsayan birimsiz λ sayısı hesaplanmaktadır. λ değeri 1 olduğunda eleman gerilmesi sıfırlanmaktadır (Şekil 5.8).



Şekil 5.8 : Kohesif elemanda izafi yer değiştirme ve üçgensel çekme-ayrılma kanunu [70].

$$\lambda = \sqrt{\left(\frac{\delta_I}{TLS}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{II}}{TLS}\right)^2 + \left(\frac{\langle\delta_{III}\rangle}{NLS}\right)^2} \tag{5.49}$$

NLS ve TLS sayıları normal ve teğetsel yönlerde maksimum yer değiştirme limitleridir. Gerilme hesaplaması için üç durumlu çekme-ayrılma kanunu kullanılır:

$$t(\lambda) = \begin{cases} \sigma_{maks}\dfrac{\lambda}{\Lambda_1/\Lambda_{\text{kopma}}} \rightarrow \Lambda < \Lambda_1/\Lambda_{\text{kopma}} \\ \sigma_{maks} \rightarrow \dfrac{\Lambda_1}{\Lambda_{\text{kopma}}} < \Lambda < \dfrac{\Lambda_2}{\Lambda_{\text{kopma}}} \\ \sigma_{maks}\dfrac{1-\lambda}{1-\Lambda_2/\Lambda_{\text{kopma}}} \rightarrow \dfrac{\Lambda_2}{\Lambda_{\text{kopma}}} < \Lambda < 1 \end{cases} \tag{5.50}$$

Hasar hesaplamasında kırılma yüzeyine etkiyen gerilmelerin teğetsel bileşenleri (t_1, t_2) ve normal bileşeni (t_3) denklem 5.51'deki gibi hesaplanır:

$$\begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix} = \frac{\mathrm{t}(\lambda)}{\lambda} \begin{bmatrix} \dfrac{\mathrm{NLS}}{TLS^2} & 0 & 0 \\ 0 & \dfrac{\mathrm{NLS}}{TLS^2} & 0 \\ 0 & 0 & \dfrac{1}{NLS} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_I \\ \delta_{II} \\ \delta_{III} \end{bmatrix} \tag{5.51}$$

Basma yükleri altında ($\delta_3 < 0$) denklem 5.52 kullanılarak elemanların iç içe geçmesi engellenmektedir. STFSF düşey doğrultudaki rijitlik katsayısını belirtmektedir.

$$t_3 = \frac{\text{STFSF}\ \sigma_{maks}}{NLS\ \Lambda_1/\Lambda_{\text{kopma}}}\delta_{III} \tag{5.52}$$

MAT 185 malzeme modelinde kullanılan çekme-ayrılma grafiği Şekil 5.8'de görülebilmektedir.

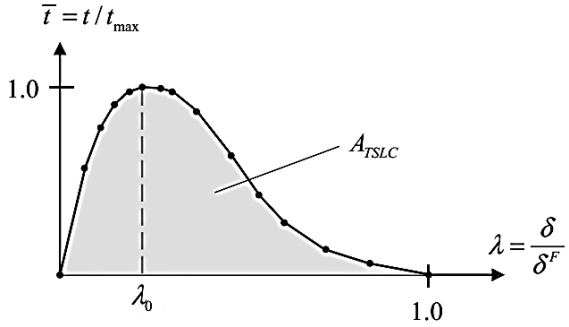
5.2.2.4 MAT 186

MAT 186 malzeme modeli üç adet tersinmez karışık mod kohesif formülasyon içermektedir. Bu üç formülasyon birbirinden efektif ayrılma parametresi (TES) ile ayrılmaktadır. Üç formülasyonda da çekme-ayrılma kanunu normal mod için G_{IC} ve T parametreleri kullanılarak, teğetsel mod için G_{IIC} ve S parametreleri kullanılarak ve kullanıcı tarafından belirlenen çekme-ayrılma eğrisi ile tanımlanmaktadır. Maksimum ayrılma miktarı denklem 5.53 ile hesaplanmaktadır:

$$\delta_I^F = \frac{G_{IC}}{A_{TSLC}\ T} \tag{5.53}$$

$$\delta_{II}^F = \frac{G_{IIC}}{A_{TSLC}\ S} \tag{5.54}$$

A_{TSLC} değeri çekme-ayrılma eğrisindeki eğrinin altında kalan alandır (Şekil 5.9).



	mode I	mode II
$t_{\max}$	T	S
δ^F	$\frac{G_I^c}{A_{TSLC}T}$	$\frac{G_{II}^c}{A_{TSLC}S}$
G^c	G_I^c	G_{II}^c

Şekil 5.9 : Normalleştirilmiş çekme-ayrılma knunu [70].

TES=0 seçildiğinde denklem 5.55'te belirtilen üstel kanun kullanılmaktadır.

$$\delta^F = \frac{1+\beta^2}{A_{TSLC}}\left[\left(\frac{T}{G_{IC}}\right)^{XMU} + \left(\frac{S\ \beta^2}{G_{IIC}}\right)^{XMU}\right]^{-\frac{1}{XMU}} \tag{5.55}$$

TES=1 seçildiğinde denklem 5.56'da belirtilen Benzeggagh-Kenane kanunu [52] kullanılmaktadır.

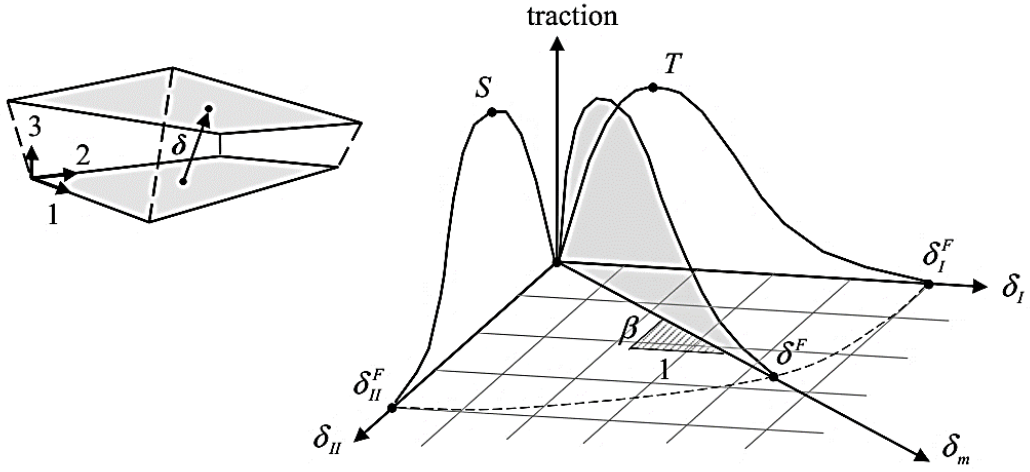
$$\delta^F = \frac{1+\beta^2}{A_{TSLC}(\beta^2 S)}\left[G_{IC} + (G_{IIC} - G_{IC})\left(\frac{\beta^2 S}{T+\beta^2 S}\right)^{|XMU|}\right] \tag{5.56}$$

Bu formülasyonlar MAT 138 malzeme modelindekilerle benzemekle birlikte MAT 186 malzeme modelinin en büyük farkı kullanıcının bir çekme-ayrılma eğrisi (TSLC) girmiş olmasıdır.

TES=2 seçildiğinde birimsiz efektif ayrılma parametresi kullanılır.

$$\lambda = \sqrt{\left(\frac{\delta_I}{\delta_{II}^F}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{II}}{\delta_{II}^F}\right)^2 + \left\langle\frac{\delta_{III}}{\delta_I^F}\right\rangle^2} \tag{5.57}$$

Karışık moddaki zorlanmalarda hesaplanan çekme-ayrılma eğrisi Şekil 5.10'daki gibidir.



Şekil 5.10 : MAT 186 karışık mod çekme-ayrılma kanunu [70].

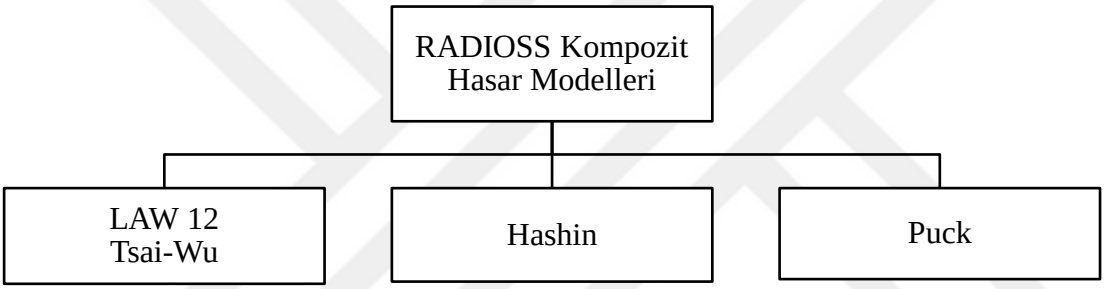
5.3 RADIOSS

Altair HyperWorks firmasının bir ürünü olan RADIOSS sonlu elemanlar yazılımı daha çok otomotiv endüstrisi ve imalat işlemleri için ihtiyaç duyulan, yüksek şekil değişimlerinin gerçekleştiği, doğrusal olmayan açık sonlu elemanlar analizleri için geliştirilmiştir. Son yıllardaki gelişmelerle birlikte RADIOSS ile kapalı sonlu elemanlar analizleri de mümkün hale gelmiştir. Kompozit malzemelerin sonlu

elemanlar analizleri üzerine çok sayıda geliştirme yapılmış, günümüzde kompozit malzemelerin analizlerinde kullanılabilecek hala geliştirilmeye devam eden güçlü yazılımlardan bir tanesidir.

5.3.1 RADIOSS kompozit hasar modelleri

RADIOSS sonlu elemanlar yazılımında kompozit malzemelerin hasar analizleri için çeşitli seçenekler sunulmuştur. Tsai-Wu [38] hasar kriteri ile hesaplama yapan LAW12 malzeme modeli ve malzeme modellerine tanımlanabilen Hashin, Puck, Chang-Chang [47,48] hasar kriterleri mevcuttur (Şekil 5.11). Hasar kriterlerine ulaşan elemanlar kullanıcının tercihine göre hemen silinebilmekte ya da yine kullanıcının belirleyeceği parametrelere göre gerilme ya da gerinim değerlerine göre hasar ilerlemesi hesabı yapılabilmektedir.

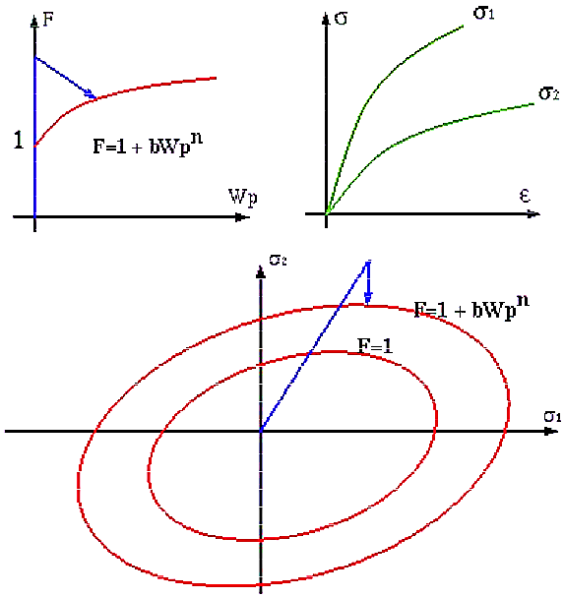


Şekil 5.11 : RADIOSS'ta bulunan kompozit malzeme modelleri ve hasar kriterleri.

5.3.1.1 LAW12 - Tsai-Wu hasar kriteri

LAW12 malzeme modeli genellikle kompozit malzemeleri modellemek için tercih edilen Tsai-Wu hasar kriterini içermektedir. Hashin ve Puck hasar kriterlerinin aksine bu malzeme modelinde Tsai-Wu hasar kriteri malzeme modelinin içerisinde bulunduğundan sonradan hasar kriteri tanımlaması yapmak gerekmemektedir. Sadece üç boyutlu katı elemanlar ile kullanılabilmektedir. Tsai-Wu kriteri plastik işi ve şekil değiştirme hızını kullanarak izotropik malzeme pekleşmesi hesabı yapmaktadır. Kullanıcı girdiği parametrelerle Tsai-Wu kriterinin hasar limitini arttırabilmektedir (Şekil 5.12). Tsai-Wu hasar kriteri denklem 5.58 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$F_1\sigma_{11} + F_2\sigma_{22} + F_3\sigma_{33} + F_{11}\sigma_{11}^2 + F_{22}\sigma_{22}^2 + F_{33}\sigma_{33}^2 + F_{44}\tau_{12}^2 + F_{55}\tau_{23}^2 + F_{66}\tau_{31}^2 + 2F_{12}\sigma_{11}\sigma_{22} + 2F_{23}\sigma_{22}\sigma_{33} + 2F_{13}\sigma_{11}\sigma_{33} \leq F(W_p, \dot{\varepsilon}) \quad (5.58)$$



Şekil 5.12 : Tsai-Wu hasar kriteri plastik pekleşme davranışı [72].

Hesaplanan değerin denklem 5.59 ile elde edilen limite ulaştığı yazılım tarafından kontrol edilmektedir. Denklem 5.59'daki b, c ve n parametreleri kullanıcı tarafından belirlenmektedir. W_p, $\dot{\varepsilon}$ ve $\dot{\varepsilon}_0$ parametreleri sırasıyla plastik iş, şekil değiştirme hızı ve referans şekil değiştirme hızını belirtmektedir. Tsai-Wu limitine ulaşana kadar doğrusal bir davranış gösteren eleman, Tsai-Wu kriteri sağlandıktan sonra doğrusal olmayan davranış göstermektedir.

$$F(W_p, \dot{\varepsilon}) = \left(1 + bW_p^n\right)\left(1 + cIn\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right) \tag{5.59}$$

$$F_1 = -\frac{1}{\mathrm{X}_C} + \frac{1}{\mathrm{X}_T} \tag{5.60}$$

$$F_2 = -\frac{1}{\mathrm{Y}_C} + \frac{1}{\mathrm{Y}_T} \tag{5.61}$$

$$F_3 = -\frac{1}{\mathrm{Z}_C} + \frac{1}{\mathrm{Z}_T} \tag{5.62}$$

$$F_{11} = -\frac{1}{\mathrm{X}_C\mathrm{X}_T} \tag{5.63}$$

$$F_{22} = -\frac{1}{\mathrm{Y}_C\mathrm{Y}_T} \tag{5.64}$$

$$F_{33} = -\frac{1}{Z_C Z_T} \tag{5.65}$$

$$F_{44} = -\frac{1}{S_{12}^C S_{12}^T} \tag{5.66}$$

$$F_{55} = -\frac{1}{S_{23}^C S_{23}^T} \tag{5.67}$$

$$F_{66} = -\frac{1}{S_{31}^C S_{31}^T} \tag{5.68}$$

$$F_{12} = -\frac{1}{2}\sqrt{(F_{11}F_{22})} \tag{5.69}$$

$$F_{23} = -\frac{1}{2}\sqrt{(F_{22}F_{33})} \tag{5.70}$$

$$F_{13} = -\frac{1}{2}\sqrt{(F_{11}F_{33})} \tag{5.71}$$

LAW12 malzeme modelinde bir diğer hasar uygulaması olarak, çekme gerilmesi altında limit gerilme değerine ulaşan elemanların gerilme değerleri denklem 5.72 kullanılarak düşürülebilmektedir. Bu uygulamadaki tercih kullanıcıya bırakılmıştır.

$$\sigma_i^{düşürülmüş} = (1 - D_i)\sigma_t \tag{5.72}$$

$$D_i = D_i + \delta \tag{5.73}$$

D_i değeri her zaman adımında kullanıcının belirlediği δ değeri kullanılarak güncellenmektedir. D_i değeri 1 olduğunda ilgili doğrultudaki gerilme değeri sıfırlanmaktadır. Böylelikle kullanıcı δ değerini belirleyerek hasarın kaç zaman adımında tamamlanacağını da belirlemektedir. Bu hesaplamada gerçekleşen hasarın geri dönüşü mümkün değildir. Dolayısıyla malzemeye atanan D_i değeri daha sonra eleman üzerindeki yük kalksa dahi daha düşük bir değere düşmemektedir.

5.3.1.2 Hashin hasar kriteri

Hashin hasar kriteri RADIOSS'ta kompozit malzeme modeline hasar kriteri olarak tanımlanabilen, eleman üzerinde hesaplanan gerilmelere göre hasar hesaplaması

yapan, kabuk ve katı elemanlar ile çalışabilen bir hasar kriteridir. Hasar hesaplamasını aşağıdaki formüllere göre yapmaktadır.

Fiber çekme/kayma:

$$\left(\frac{\langle\sigma_{11}\rangle}{X_T}\right)^2+\left(\frac{\tau_{12}^2+\tau_{13}^2}{{S_{12}^f}^2}\right)<1 \tag{5.74}$$

Fiber basma:

$$\left(\frac{\langle\sigma_a\rangle}{X_C}\right)^2<1 \tag{5.75}$$

$$\sigma_a=-\sigma_{11}+\left\langle-\frac{\sigma_{22}+\sigma_{33}}{2}\right\rangle$$

Ezilme:

$$\left(\frac{\langle p\rangle}{X_{Crush}}\right)<1 \tag{5.76}$$

$$p=-\frac{\sigma_{11}+\sigma_{22}+\sigma_{33}}{3}$$

Matris hasarı:

$$\left(\frac{\langle\sigma_{22}\rangle}{Y_T}\right)^2+\left(\frac{\sigma_{23}}{S_{23}}\right)^2+\left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2<1 \tag{5.77}$$

Delaminasyon:

$$S_{del}^2\left[\left(\frac{\sigma_{33}}{Y_T}\right)^2+\left(\frac{\tau_{23}}{\tilde{S}_{23}}\right)^2+\left(\frac{\tau_{13}}{S_{13}}\right)^2\right]<1 \tag{5.78}$$

$$S_{12}=\tau_{12}^m+\langle-\sigma_{22}\rangle\tan g(\phi) \tag{5.79}$$

$$S_{23}=\tau_{23}^m+\langle-\sigma_{22}\rangle\tan g(\phi) \tag{5.80}$$

$$S_{13}=\tau_{13}^m+\langle-\sigma_{33}\rangle\tan g(\phi) \tag{5.81}$$

$$\tilde{S}_{23}=\tau_{23}^m+\langle-\sigma_{33}\rangle\tan g(\phi) \tag{5.82}$$

$$\langle a \rangle = \begin{cases} a & a > 0 \\ 0 & a < 0 \end{cases} \tag{5.83}$$

Elemanın hasara uğraması ve silinmesi için tüm integrasyon noktalarında kriterin sağlanmış olması gerekmektedir. Hasara uğrayan elemanların analizden silinmesi sayısal dengesizliklere engel olmak amacıyla üstel bir fonksiyon yardımıyla denklem 5.84 kullanılarak gerilme değerinin azaltılması yoluyla yapılmaktadır. Gerilme sıfırlandığında eleman analizden silinmektedir.

$$\begin{gathered} \sigma(t) = f(t)[\sigma_d(t_r)] \\ f(t) = \exp\left(-\frac{t - t_r}{\tau_{max}}\right) \\ t \geq t_r \end{gathered} \tag{5.84}$$

Denklem 5.84'te t zamanı, t_r hasar başlangıç zamanını ve τ_{max} ise dinamik gevşeme sayısını belirtmektedir. τ_{max} değeri kullanıcı tarafından belirtilmezse ilgili eleman analizden silinmemektedir. Kullanılan zaman adımından on kat daha büyük bir değer seçilmesi tavsiye edilmektedir. $[\sigma_d(t_r)]$ hasar başlangıcındaki gerilmeyi göstermektedir.

5.3.1.3 Puck hasar kriteri

Puck hasar kriteri RADIOSS'ta kompozit malzeme modeline hasar kriteri olarak tanımlanabilen, gerilmelere göre hasar hesaplaması yapan, kabuk ve katı elemanlar ile çalışabilen bir hasar kriteridir:

Fiber çekme modu ($\sigma_{11} > 0$):

$$\frac{\sigma_{11}}{X_T} < 1 \tag{5.85}$$

Fiber basma modu ($\sigma_{11} < 0$):

$$\frac{|\sigma_{11}|}{X_C} < 1 \tag{5.86}$$

Matris hasarı:

Mod A ($\sigma_{22} > 0$):

$$\sqrt{\left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(1 - p_{12}^{+}\frac{Y_T}{S_{12}}\right)^2 \left(\frac{\sigma_{22}}{Y_T}\right)^2} + p_{12}^{+}\frac{\sigma_{22}}{Y_T} < 1 \tag{5.87}$$

Mod C ($\sigma_{22} < 0$):

$$\left[\left(\frac{\tau_{12}}{2(1+p_{22}^{-})S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{22}}{Y_C}\right)^2\right]\left(\frac{Y_C}{-\sigma_{22}}\right) < 1 \tag{5.88}$$

Mod B:

$$\frac{1}{S_{12}}\left(\sqrt{\tau_{12}^2 + (p_{12}^{-}\sigma_{22})^2} + p_{12}^{-}\sigma_{22}\right) < 1 \tag{5.89}$$

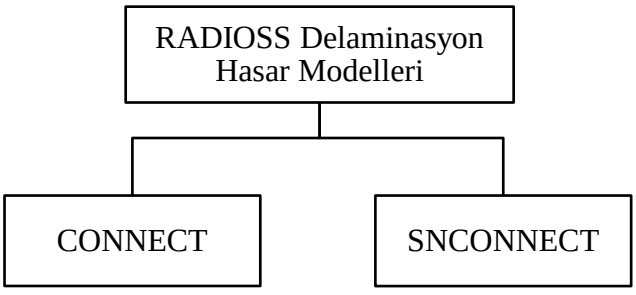
Elemanın hasara uğraması ve silinmesi için tüm integrasyon noktalarında kriterin sağlanmış olması gerekmektedir. Hasara uğrayan elemanların analizden silinmesi sayısal dengesizliklere engel olmak amacıyla üstel bir fonksiyon yardımıyla gerilme değerinin azaltılması yoluyla yapılmaktadır. Gerilme sıfırlandığında eleman analizden silinmektedir.

$$\begin{gathered}\sigma(t) = f(t)[\sigma_d(t_r)] \\ f(t) = \exp\left(-\frac{t-t_r}{\tau_{max}}\right) \\ t \geq t_r\end{gathered} \tag{5.90}$$

Denklem 5.90'da t zamanı, t_r hasar başlangıç zamanını ve τ_{max} ise dinamik gevşeme zamanını belirtmektedir. τ_{max} değeri belirtilmezse ilgili eleman analizden silinmemektedir. τ_{max} için kullanılan zaman adımından on kat daha büyük bir değer seçilmesi tavsiye edilmektedir. $[\sigma_d(t_r)]$ hasar başlangıcındaki gerilmeyi göstermektedir.

5.3.2 RADIOSS delaminasyon hasar modelleri

RADIOSS kullanarak kohesif alan modellemesi yapmak mümkündür. Bunun için kohesif elemanlara tanımlanmak üzere yazılım içerisinde CONNECT ve SNCONNECT kohesif malzeme modelleri bulunmaktadır (Şekil 5.13).



Şekil 5.13 : RADIOSS'ta bulunan kompozit malzeme modelleri ve hasar kriterleri.

Modellenen kohesif elemanlar kabuk ya da katı olabilmektedir. Modellenen bu elemanlar yüzey ilişkileriyle ya da katı elemanlar oluşturulduysa düğüm noktalarının birleştirilmesi ile tabakalara bağlanabilmektedir. Katı elemanların kalınlıkları sıfır olabilmektedir.

Diğer programların aksine RADIOSS ile hasar tanımlaması yapılabilen yüzey ilişkisi oluşturarak kohesif alan modellemesi yapmak mümkün değildir. Bu sebeple kohesif bölgelerin modellenmesi yalnızca tabakalar arasına oluşturulan sonlu elemanlarla mümkün olabilmektedir.

5.3.2.1 CONNECT hasar kriteri

RADIOSS'ta modellenen kohesif elemanların hasar hesaplamaları için belirlenen gerinim ya da enerji limitlerine göre hesaplama yapan hasar kriteridir.

$$C = \left(\frac{E_n}{E_{nmaks}}\right)^N + \left(\frac{E_t}{E_{tmaks}}\right)^N \tag{5.91}$$

E_n ve E_t sırasıyla normal ve teğetsel doğrultulardaki hesaplanan enerjiyi ifade etmektedir. E_{nmaks} ve E_{tmaks} parametreleri kullanıcı tarafından tanımlanmaktadır ve sırasıyla elemanın normal ve teğetsel doğrultulardaki tokluğunu ifade etmektedir. N değeri kullanıcı tarafından belirlenmektedir. Hasar değişkeni aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$D_1 = \int_0^t \left(\frac{E(t)}{E_{Imaks}}\middle| E(t) \geq E_{Imaks}\right) dt \tag{5.92}$$

$$D_2 = \int_0^t (C(t)|C(t) \geq 1)\, dt \tag{5.93}$$

$$D_{maks} = maks(D_1, D2) \tag{5.94}$$

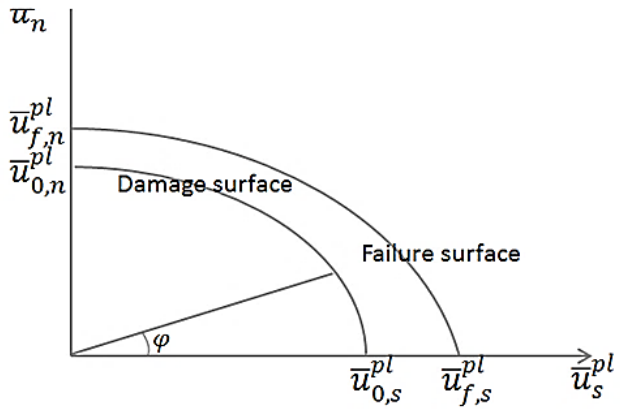
E_{Imaks} parametresi kullanıcı tarafından tanımlanmaktadır ve malzemenin tokluğunu ifade etmektedir. $D_{maks} > T_{maks}$ kriteri sağlandığında ilgili eleman analizden silinmektedir. T_{maks} değeri varsayılan değerinde bırakılırsa eleman silinmesi aniden olmaktadır. $T_{maks} > D_{maks} > 0$ durumunda ise hasar hesaplaması denklem 5.95'te belirtildiği gibi yapılmaktadır:

$$\sigma = \sigma\left(1 - \frac{D}{T_{maks}}\right)^{N_{soft}} \tag{5.95}$$

T_{maks} parametresi enerji hasar kriterinde elemanın silinmesi için kullanılmaktadır. Yukarıdaki formüle göre elemanın gerilme değeri azalır ve sıfırlandığında eleman analizden silinir.

5.3.2.2 SNCONNECT hasar kriteri

Kohesif elemanların hasar hesaplamalarını plastik gerinim cinsinden hesaplayan hasar kriteridir. Malzemenin normal ve kayma doğrultularında farklı davranış göstermesine izin vermektedir (Şekil 5.14).



Şekil 5.14 : SNCONNECT hasar kriteri eğrisi [72].

Denklem 5.96'da belirtilen değer sağlandığında hasar oluşumu başlamaktadır.

$$\sigma_y = \left[\left(\frac{\bar{\mu}^{pl}_{0,n}}{fct_ID_{0N}(1 - sym\alpha_0)}\right)^{\beta_0} + \left(\frac{\bar{\mu}^{pl}_{0,s}}{fct_ID_{0S}}\right)^{B_0}\right]^{\frac{1}{\beta_0}} \tag{5.96}$$

μ parametresi uzamayı ifade etmektedir. α ve β parametreleri akma fonksiyonlarında hasar başlangıcını ve kopmayı temsil etmektedir. Hasar faktörü denklem 5.97'deki gibi hesaplanmaktadır:

$$d = \frac{\bar{\mu}^{pl} - \bar{\mu}^{pl}_0}{\bar{\mu}^{pl} - \bar{\mu}^{pl}_0} \tag{5.97}$$

Gerilme değeri $\sigma = \sigma(1 - d)$ formülüne göre azaltılmaktadır. Denklem 5.98'de ifade edilen kopma değerine ulaşıldığında ilgili eleman silinmektedir:

$$\sigma_y = \left[\left(\frac{\bar{\mu}_{f,n}^{pl}}{fct_ID_{FN}(1 - sym\alpha_f)} \right)^{\beta_f} + \left(\frac{\bar{\mu}_{f,s}^{pl}}{fct_ID_{FS}} \right)^{B_f} \right]^{\frac{1}{\beta_f}} \quad (5.98)$$

Formüllerde belirtilen “fct” parametreleri kullanıcı tarafından tanımlanmaktadır.

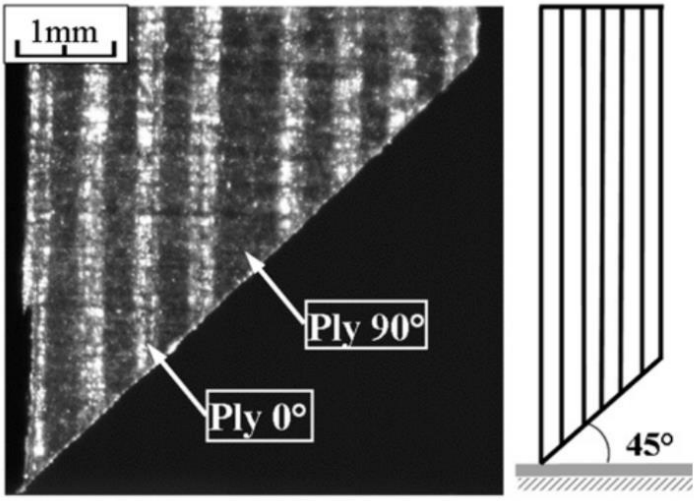
6. SONLU ELEMANLAR ANALİZLERİ

Sonlu elemanlar analizleri test şartlarının bilgisayar ortamında oluşturulduktan sonra optimum analiz parametrelerinin belirlenmesi ve teste en yakın sonuçların elde edilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. ABAQUS, LS-DYNA ve RADIOSS yazılımları ile analizler yapıldıktan sonra referanslardan alınan test sonuçları elde edilen analiz sonuçlarıyla kıyaslanmıştır.

6.1 Problemin Tanımı

Kompozit malzemelerin günümüzde sıklıkla kullanılması bu malzemelerin çarpışma durumundaki hasar davranışlarını inceleme gereği ortaya çıkarmıştır. Barrau ve diğerleri [5-7] tarafından yapılan bir dizi çalışmada kompozit plakaların düşük hızlarda çarpışma halindeki hasar durumları deneysel olarak incelenmiştir. Bu tez çalışmasında da daha önce yapılan deneysel çalışmalar kullanılarak kompozit numunenin hasar mekanizmalarını incelemek, sayısal bir model geliştirmek, değişik hasar kriterlerini karşılaştırmak ve bu modeli doğrulamak amaçlanmıştır.

Kullanılan numunedeki tabaka yerleşimi Şekil 6.1'de görülebilmektedir. Testte kullanılan her numunenin ezilmenin başlayacağı ucuna hasarın başlamasını kolaylaştırmak amacıyla 45° açılı pah kırılmıştır.



Şekil 6.1 : Kullanılan kompozit numunenin tabaka yerleşimi [5].

Gerçekleştirilen her test senaryosu için test iki defa tekrarlanmıştır. Numuneler statik testlerde 6 mm/dk sabit hızla, dinamik testlerde 9 m/s ilk hızla ezilmiştir. Statik ve dinamik testlerde kullanılan numuneler boyutları dışında aynıdır. Numunedeki her tabakanın kalınlığı 0,26 mm'dir ve 16 tabakadan oluşmaktadır.

İlgili referansta [5] sadece 0° ve 90° açılı tabakalardan oluşmuş ya da numune ucuna 5° ve 20° açılarında pah kırılmış numunelerin de deneysel çalışmaları bulunmaktadır.

6.1.1 Malzeme özellikleri

Kullanılan numuneler 16 tabakalı $[(0°/90°)_4]_s$, tek eksenli T700/M21 karbon epoksi prepreg malzemeden imal edilmiştir. Sonlu elemanlar yazılımlarında kompozit tabakaların ve bu tabakalar arasına tanımlanan yapıştırıcı bölgelerin özellikleri ayrı ayrı tanımlanmıştır. T700/M21 kompozit tabaka malzemesinin özellikleri Çizelge 6.1'de belirtilmiştir. Bu değerler ASTM standartlarına göre yapılan numune testlerinden elde edilmiştir.

Çizelge 6.1 : T700/M21 kompozit malzemesinin özellikleri [4,6,8].

Parametre	Değer
Density [ton/mm^3]	1,59E-09
E_{11} [MPa]	125000
E_{22} [MPa]	9000
E_{33} [MPa]	9000
G_{12} [MPa]	5000
G_{23} [MPa]	5000
G_{13} [MPa]	5000
v_{12}	0,33
v_{23}	0,33
v_{13}	0,33
G_{ft} [N/mm]	133
G_{fc} [N/mm]	40
G_{mt} [N/mm]	0,331
G_{mc} [N/mm]	1,1
X_T [MPa]	2282
Y_T [MPa]	75
X_C [MPa]	1465
Y_C [MPa]	290
S [MPa]	110

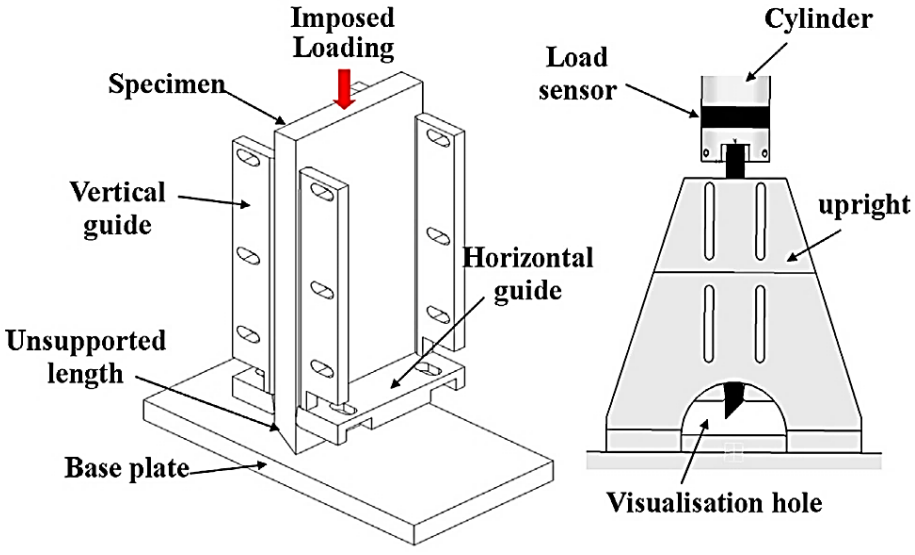
Tabakalar arasına tanımlanan yapıştırıcı malzemenin modellenmesinde kullanılan parametreler literatürden ilgili kaynaklardan alınmıştır. Bu parametreler Çizelge 6.2'de görülmektedir.

Çizelge 6.2 : Tabakalar arasındaki yapıştırıcı malzemenin özellikleri [4,8,73].

Parametre	Değer
Yoğunluk [ton/mm^3]	1,20E-09
E_N [MPa]	100000
E_T [MPa]	100000
$T_{m,I}$ [MPa]	60
$T_{m,II}$ [MPa]	60
$T_{m,III}$ [MPa]	60
G_I [N/mm]	0,6
G_{II} [N/mm]	2,1
G_{III} [N/mm]	2,1
α	1,45

6.1.2 Test düzeneği

Test düzeneği literatürde de belirtildiği gibi [6] plaka ezilmesini geliştirmek amacıyla tasarlanmıştır. Numunenin burkulmasına engel olmak amacıyla ayarlanabilir dört adet düşey ve iki adet yatay kılavuz yer almaktadır. Yatay kılavuzlar ile tabandaki metal plaka arasında numunenin ezilmesi için bir miktar boşluk bulunmaktadır (Şekil 6.2). Benzer tasarım Feraboli tarafından da geliştirilmiştir [74]. Bu tasarım birçok ezilme test düzeneğinde karşılaşılan yırtılma problemine [75] engel olmaktadır ve ezilme yüzeyinin üzerindeki bölgede sınır şartlarının numune genişliği boyunca aynı olmasını sağlamaktadır.



Şekil 6.2 : Test düzeneği [4].

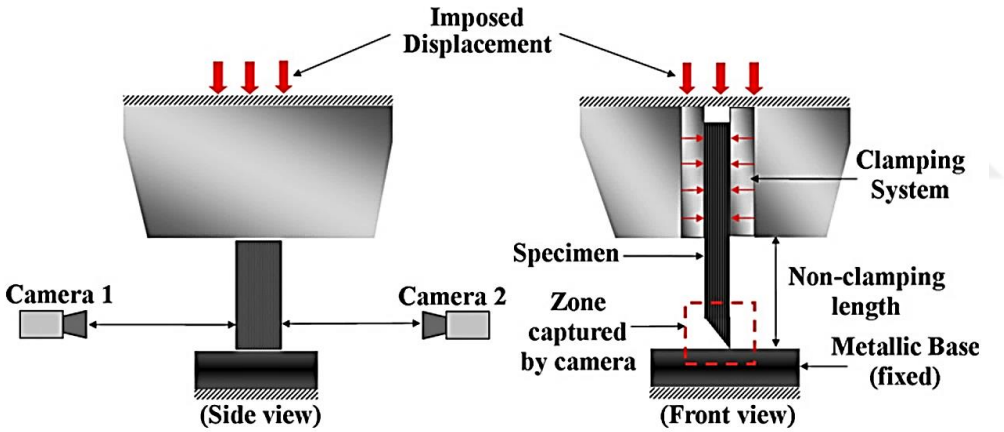
Kompozit numune çelik bir silindir ile hidrolik pres makinesine bağlanmakta ya da dinamik test için ağırlıklı düşme testi gerçekleştirilebilmektedir. Ezilme sırasında çelik silindir ve numune aşağıya doğru birlikte hareket etmektedir. Kuvvet numuneye

çelik silindir üzerinden uygulanmaktadır. Silindirin üzerinde ezilme yükünü ölçmek amacıyla yerleştirilmiş yük sensörü bulunmaktadır.

6.1.2.1 Statik test

Ezilme mekanizmalarının tespit ve kontrol edilmesinin kolaylığı sebebiyle bu konuda çalışan araştırmacılar tarafından yarı-statik testler sıklıkla tercih edilmiştir [9,75]. Bu sebeple deneysel çalışmanın bir kısmında yarı-statik test gerçekleştirilmiştir. Yarı-statik testler 60 mm uzunluğunda ve 10 mm genişliğinde düz kompozit plakalarla gerçekleştirilmiştir.

Şekil 6.3'te şematik olarak görüldüğü şekilde kuvvet, numune üzerinden 6 mm/dk sabit hızla basma hareketi yapan hidrolik test makinesi ile uygulanmıştır. Üst bölgede metal yüzey ile test fikstürü arasında kalan numunenin 30 mm uzunluğundaki bölümü test fikstürü ile kenarlarından sabitlenmemiştir ve yukarıdan bastıran pistonun hareketi ile bu uzunluk kısalmaktadır.



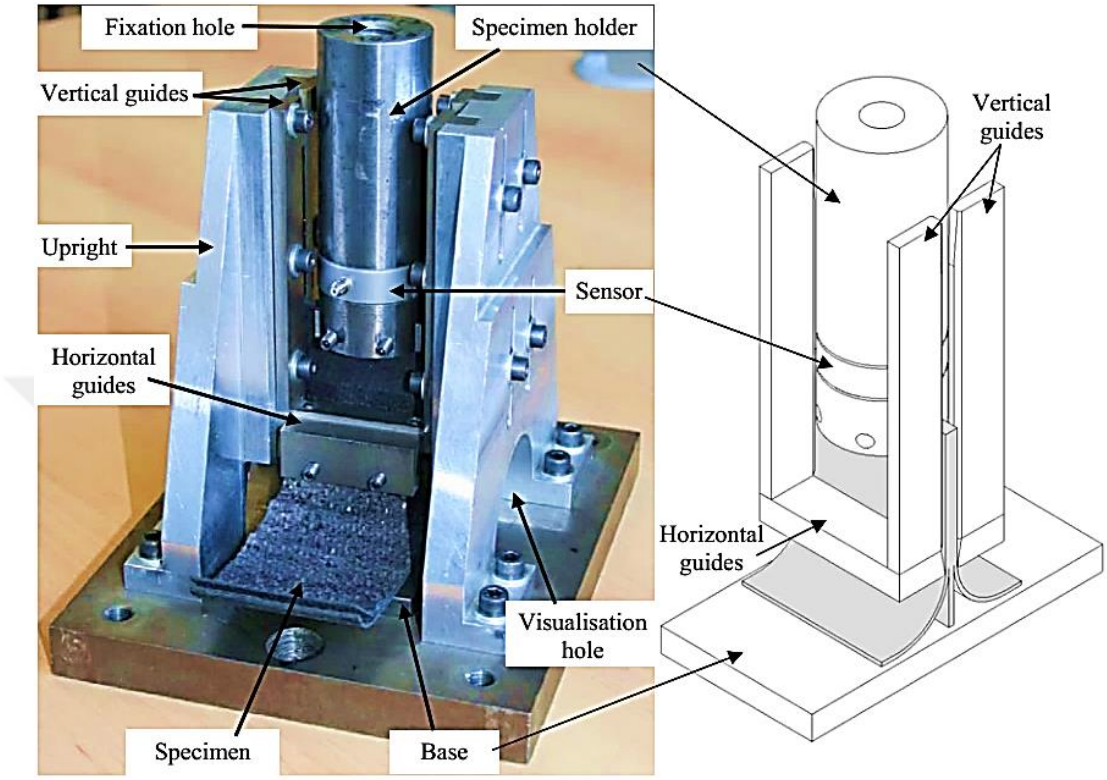
Şekil 6.3 : Statik test düzeneği [5].

Numunenin hasar davranışı yüksek çözünürlüklü kameralarla 1 Hz frekansında izlenmiştir. Kuvvet ölçümü çelik silindirin üzerinden yapılmıştır. Kuvvet-yer değişimi ölçümü için 100 Hz frekansında veri toplanmıştır.

6.1.2.2 Dinamik test

Dinamik testte 36 kg ağırlıklı çelik silindir kullanılarak 9 m/s ilk hızla düşme testi yapılmıştır. Şekil 6.4'te görülebildiği gibi çelik silindir ile numune beraber bir şekilde aşağıya düşmektedir. Numuneler 160 mm uzunluğunda ve 60 mm genişliğinde düz kompozit plakalardır. Fikstür ile sabitlenmeyen kısım 20 mm uzunluğundadır ve test süresince bu uzunluk kısalmamaktadır. Ezilme sırasında

enerji sönümlendikçe hız azalacağından sabit bir hız uygulamak mümkün değildir. Test konfigürasyonuna bağlı olarak (kullanılan ağırlık, numunenin enerji sönümleme kapasitesi, ilk hız) test sonundaki hız azalabilmekte ya da tamamen sıfır olabilmektedir.



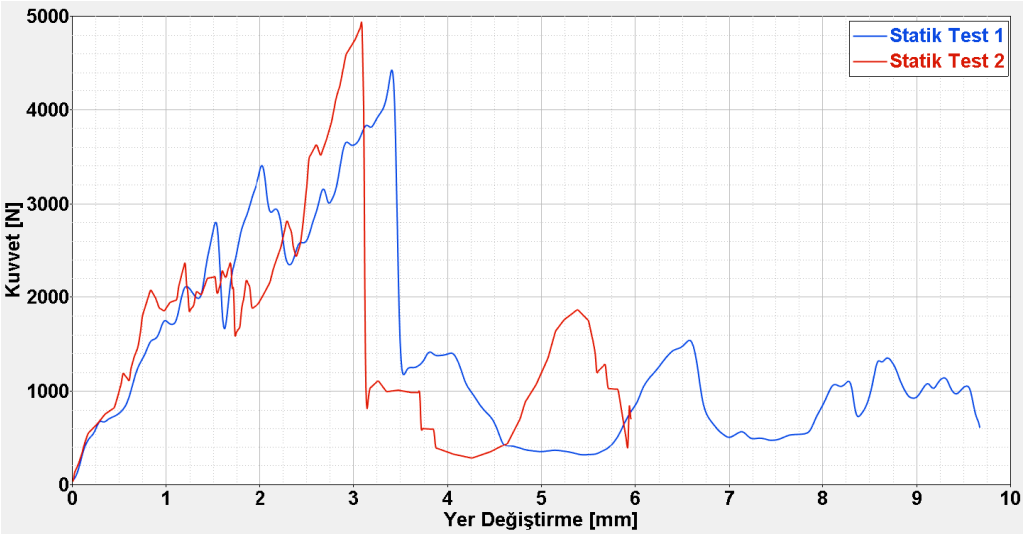
Şekil 6.4 : Dinamik test düzeneği [6].

Hasar başlangıcının ve ilerlemesinin incelenmesinde saniyede 20000 kare kaydedebilen 40 piksel/mm çözünürlüğündeki yüksek hızlı kameralar kullanılmıştır.

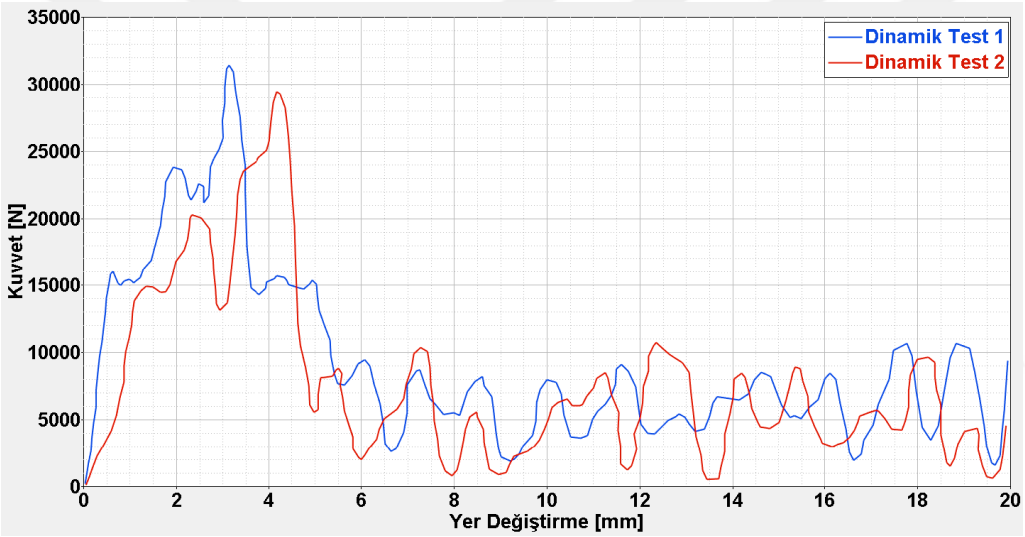
6.1.3 Test sonuçları

Gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda statik testler için 6 mm yer değiştirmenin malzeme incelemesi için yeterli olduğu düşünülmüştür [5]. Statik testlerin bir tanesi 6 mm ezilmeden sonra sonlandırılmış, diğer test 10 mm ezilemeye kadar devam ettirilmiştir. Dinamik testte numunenin 20 mm ezilmesine izin verilmiştir. Deneysel çalışmalarda çelik silindir parçanın yer değiştirmesine bağlı olarak yük sensöründen ölçülen reaksiyon kuvveti miktarı kuvvet-yer değiştirme grafiği şeklinde çizdirilmiştir.

Numuneler için iki defa tekrarlanan test çalışmasına göre ilgili çalışmalarda yayınlanan statik ve dinamik test sonuç grafiği Şekil 6.5 ve Şekil 6.6'da yer almaktadır.



Şekil 6.5 : Statik test sonucu [4].

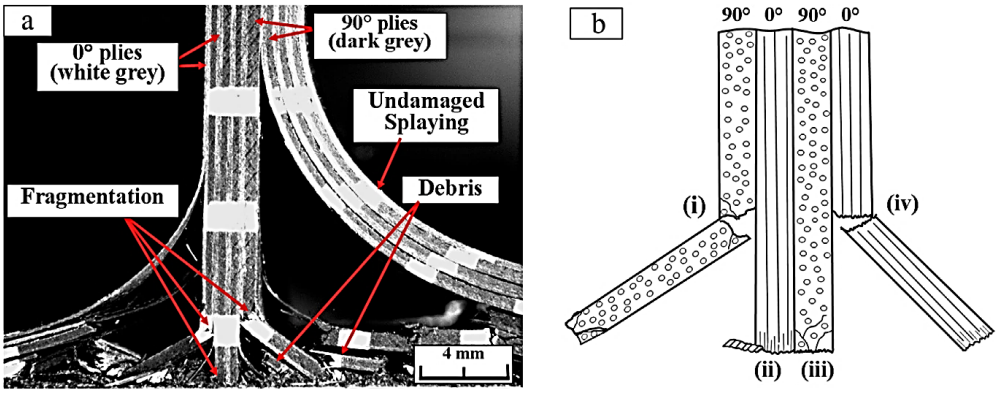


Şekil 6.6 : Dinamik test sonucu [4].

Numunenin ezilmesi sırasında tabaka ayrılması, parçalanma ve artık oluşması olmak üzere üç ana hasar çeşidi gözlenmiştir (Şekil 6.7). Ezilme işleminin başlarında numune ucundaki kısım yüksek gerilmelere maruz kalmış ve delaminasyonla birlikte ayrılıp temas yüzeyinde kaymaya zorlanmıştır. Numunenin iki tarafındaki ayrılan tabaka miktarı değişken olmuştur. Delaminasyonun başlangıcı ve ilerlemesi açılma (mod I), kayma (mod II) ve genellikle bu iki modun kombinasyonu şeklinde gözlenmiştir.

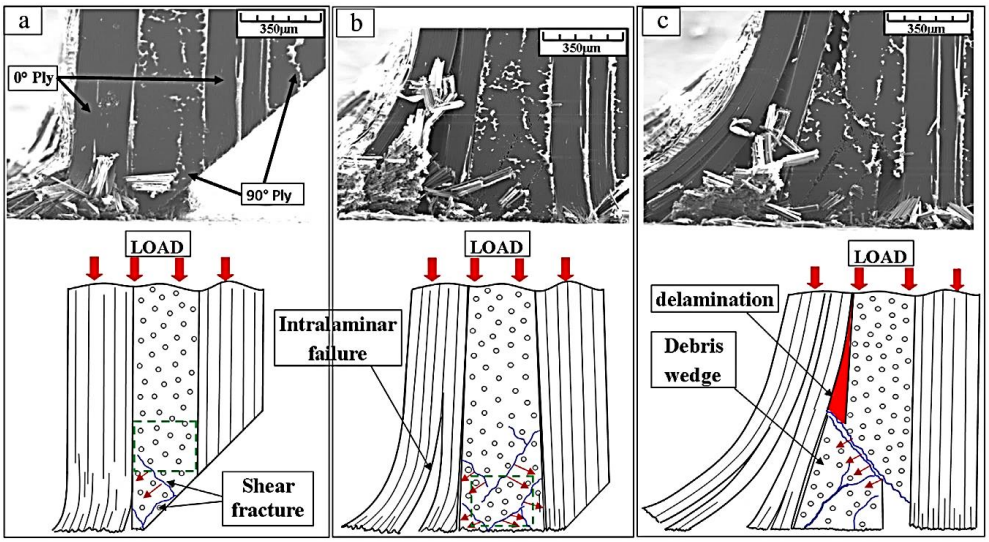
Tabaka ayrılması ve kayma şeklinde hasara uğramayan tabakalar uç taraftaki lokal hasarlar ve uç taraftan uzaktaki tabaka içi hasarlar olmak üzere iki çeşit hasara maruz kalmışlardır. Metal temas yüzeyine temas eden uç taraftaki 0^o açılı tabakalar fiberlerin mikro burkulmaları sebebiyle hasar görmüşlerdir. 90^o açılı tabakalar ise

birden fazla kayma mikro çatlakları sebebiyle parçalanmışlardır. Temas yüzeyinden uzaktaki tabaka içi hasarlar basma, eğilme ve kayma yüklerinin kombinasyonundan kaynaklanan zorlanmalarla fiber kırılması ve matris çatlakları ile oluşmuşlardır.



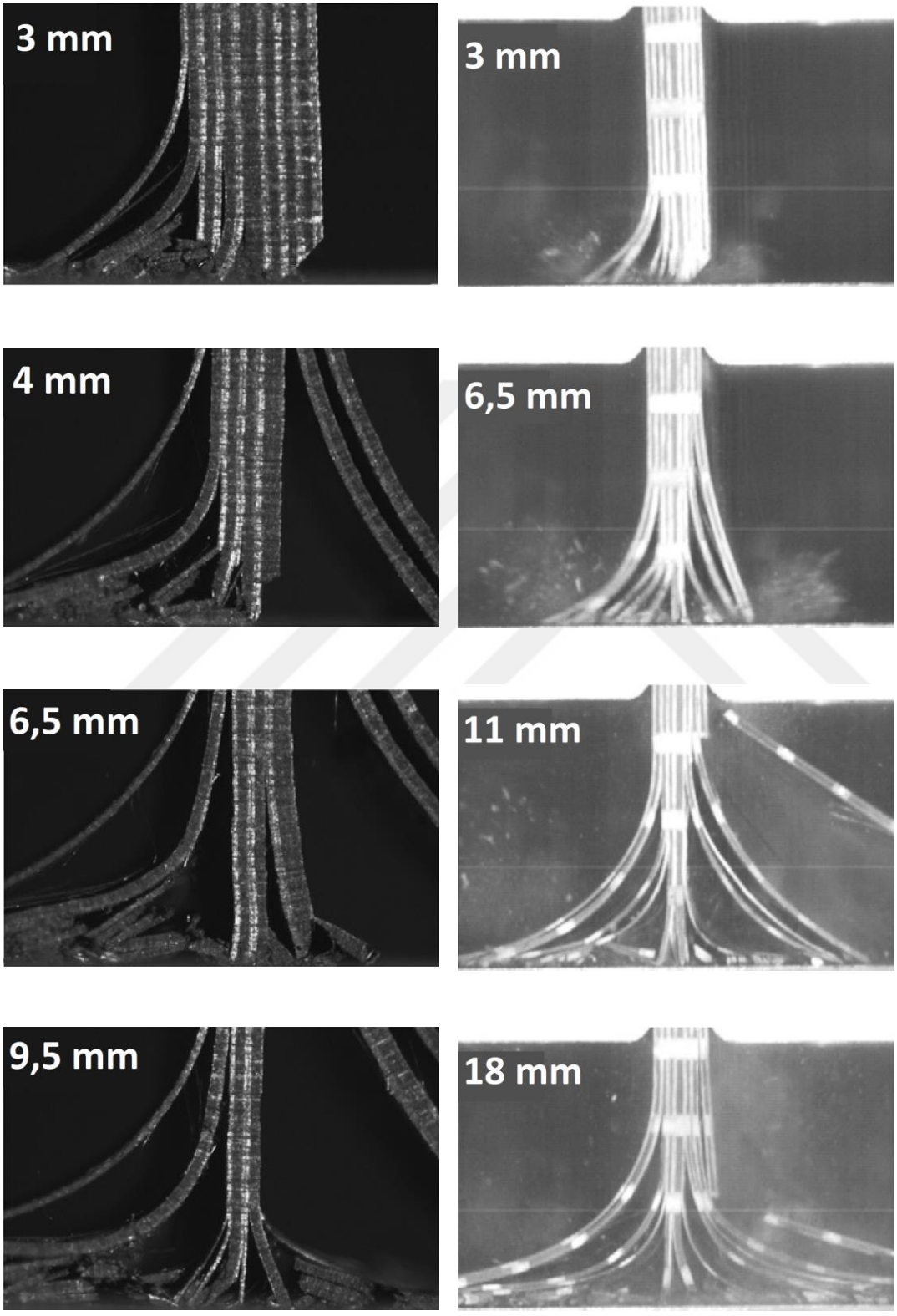
Şekil 6.7 : a) Karma mod ezilme sırasındaki ana hasar tipleri, b) parçalanma modları i) tabaka içi matris çatlağı, ii) 0^o lokal ezilmesi, iii) 90^o lokal ezilmesi, iv) tabaka içi fiber kırılması [4].

Numunede meydana gelen farklı hasar çeşitleri farklı büyüklüklerde artıkların oluşmasına sebep olmuştur. Tabakaların ucunda meydana gelen hasardan ötürü ortaya çıkan artıklar 0,25 mm'den küçükken, uç taraftan uzakta meydana gelen hasarlardan ötürü oluşan artıklar 0,5 mm ile 5 mm boyutları arasında olmuştur. Hasar sırasında rastgele oluşan bu artıklar numunenin hasar davranışında etkili olmuştur. 90^o açılı tabakaların hasarından ortaya çıkan artıklar ezilme işlemini oldukça etkilemiştir. 45^o açılı çatlak ile oluşan artıklar ve bunların komşu iki 0^o tabaka ile hapsedilmesi, komşu 0^o tabakalarda yanal yük ortaya çıkarmakta ve $0^o/90^o$ açılı tabaka çiftinin delaminasyon ile ayrılmasına sebep olmaktadır (Şekil 6.8).



Şekil 6.8 : 90^o açılı tabakada artık oluşumu [4].

Test sırasında kameralarla kaydedilen numune davranışı Şekil 6.9'daki gibi gerçekleşmiştir.



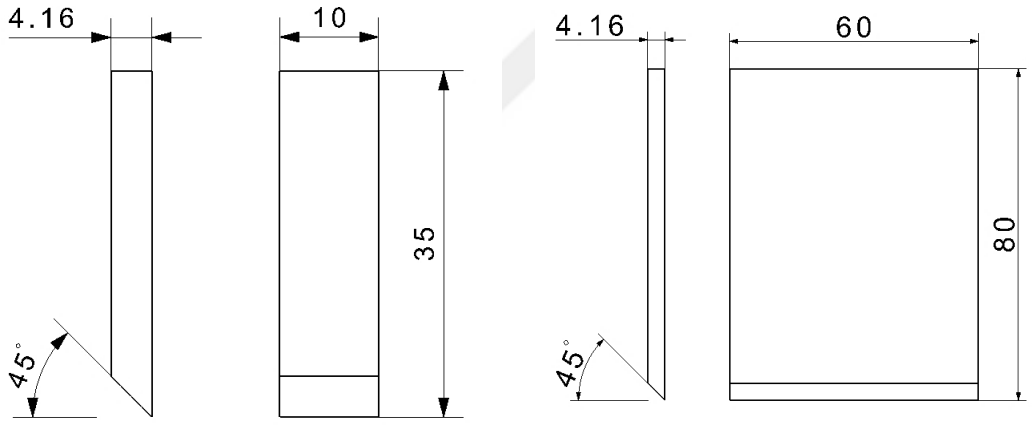
a **b**

Şekil 6.9 : a) Statik Test (6 mm/dk), b) Dinamik Test (9 m/s) [4].

Uygulanan kuvvetin büyüklüğü temas yüzeyinin büyüklüğü ile doğru orantılı olarak değişmektedir. İlk resimde numune bölgesel ayrılmalarla ezilmeye başlamış ve temas yüzeyi arttıkça uygulanan kuvvetin de arttığı görülmüştür. Delaminasyon oluşmaya başladığı anda tabakalar kaymaya başlamış ve temas yüzeyi azalmıştır. Böylece uygulanan yük de düşmüştür. Bölgesel hasarların oluşması, tabakaların kırılmasına sebep olmuştur ve uygulanan kuvvette artış görülmüştür.

6.2 Modelleme

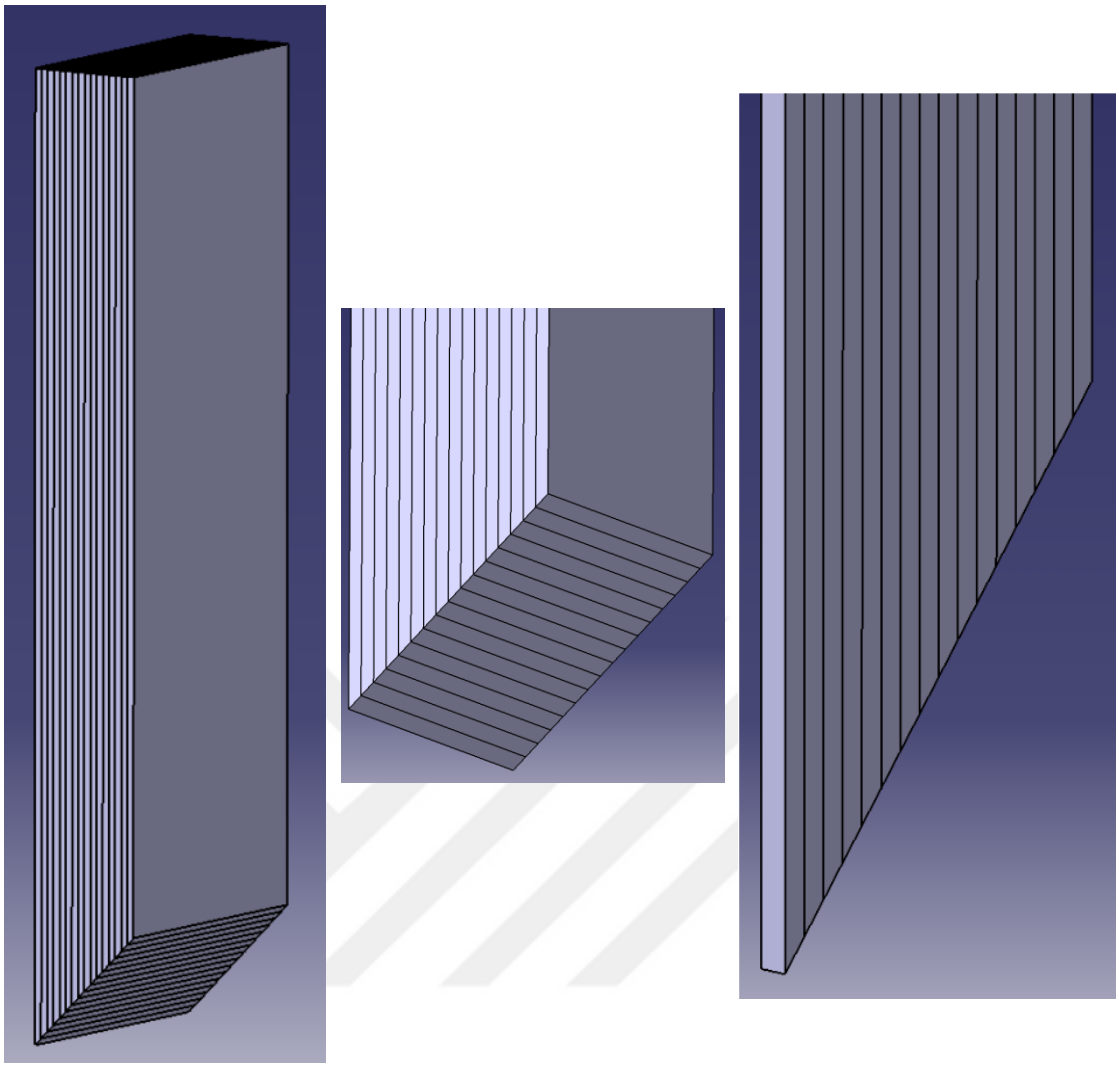
Sonlu elemanlar modeli hazırlanırken öncelikle CATIA yazılımı ile numunenin statik ve dinamik testlerdeki katı modelleri oluşturulmuştur. Analiz süresini kısaltmak amacıyla Şekil 6.10'da görüldüğü gibi statik analizler için numunenin 35 mm uzunluğundaki kısmı, dinamik analizler için de 80 mm uzunluğundaki kısmı modellenmiştir. Modellenmeyen kısımlar test süresince test düzeneği içerisinde kaldığından bu kısımların modellenmemesi analiz sonuçlarını değiştirmeyecektir.



Statik Model **Dinamik Model**

Şekil 6.10 : Model ölçüleri.

Hazırlanan katı modellerde her bir tabakanın kalınlığı testte olduğu gibi 0,26 mm olarak belirlenmiş, tabakaların arasına yapıştırıcı elemanlarla modellenmek üzere 0,001 mm kalınlığında katı bir bölge oluşturulmuştur. Kompozit plaka toplam 16 tabakadan oluşmaktadır ve her iki tabakanın arasında yapıştırıcı bölge vardır. Kullanılan numuneler her statik ve dinamik test için aynı malzemeden imal edilmiş ve aynı malzeme oryantasyonuna sahiptir. Analiz süresini kısaltmak amacıyla modelin Şekil 6.11'de görüldüğü gibi 0,25 mm genişliğindeki bir dilimi kullanılmıştır.



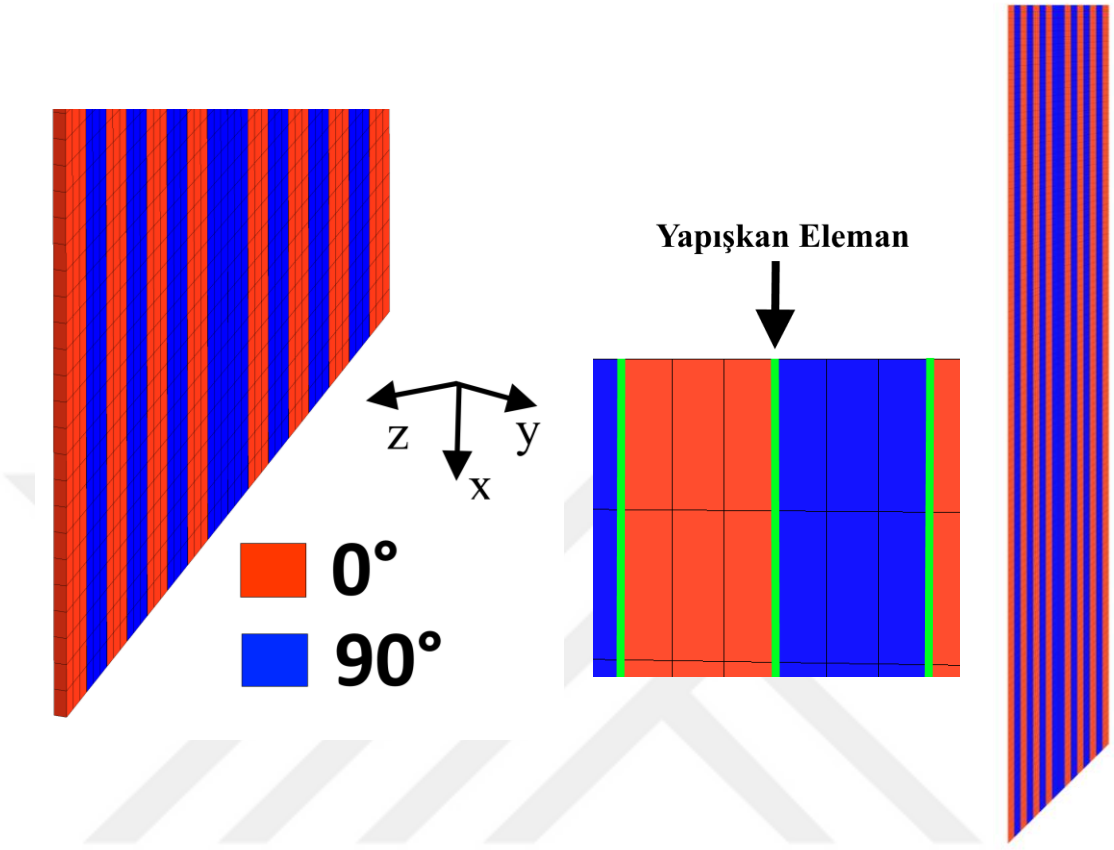
Şekil 6.11 : Test numunesinin ve sonlu elemanlar için hazırlanmış dilimin modeli.

Statik analizlerde ezilme hızını arttırarak hesaplama süresini kısaltmak amacıyla 2 m/s sabit hız kullanılmıştır. Duong ve diğerlerinin çalışmalarına göre yükleme hızının 20 mm/dk değerinden 9 m/s değerine kadar arttırılması test sonuçlarında göz önüne alacak bir etki ortaya çıkarmamaktadır [4]. Dinamik analizlerde numunenin yükleme uygulanan ucuna sonlu elemanlar yazılımı ile test şartlarında olduğu gibi çelik silindirin ağırlığı olan 36 kg ağırlık eklenmiştir. Test düzeneği ve ezilme yüzeyi sonlu elemanlar yazılımının rijit yüzey oluşturma özellikleri kullanılarak modellenmiştir.

6.2.1 Sonlu elemanların oluşturulması

CATIA yazılımında oluşturulan katı modeller HyperMesh yazılımı ile sonlu elemanlarına ayrılmıştır. Tabakaların eleman büyüklüğü düşey ve yanal yönde 0,25 mm olarak belirlenmiştir. Analiz süresini kısaltmak amacıyla numunenin 0,25 mm

genişliğindeki bir dilimi modellenmiştir. Kullanılan numunenin 0^o ve 90^o açılı fiber doğrultulu tabakaları Şekil 6.12'de görülmektedir.



Şekil 6.12 : Sonlu elemanlarına ayrılmış kompozit tabaka.

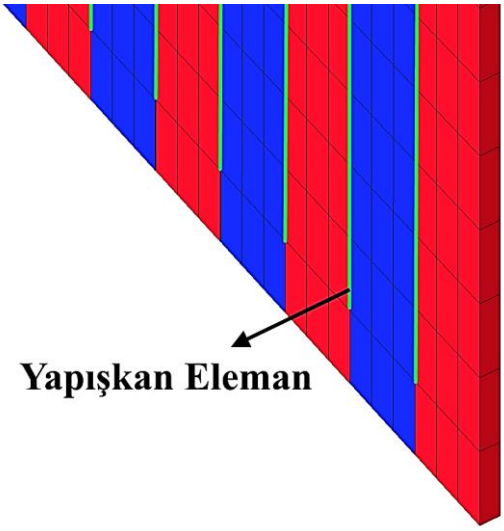
İndirgenmiş integrasyon formülasyonu kullanan elemanlar eğilme durumunda eleman ortasında bulunan integrasyon noktasında gerinim hesaplayamamaktadır. Bu sebeple "hourglass" ismi verilen problem ortaya çıkabilmektedir. Bunun önüne geçebilmek ve eğilme davranışını daha iyi gözlemleyebilmek için tabakadaki kalınlık boyunca üç eleman oluşturulmuştur.

Yapıştırıcı bölgeler çekme-ayrılma kanununa göre hesaplama yapan 0,001 mm kalınlığında sekiz düğüm noktalı katı elemanlar kullanılarak modellenmiştir. Daha önce yapılan farklı bir çalışmada yapışkan eleman kalınlığı tabaka kalınlığının %10'u olarak hesaplanmıştır [6]. Yapıştırıcı bölge, kalınlığı olmayan katı elemanlarla da modellenebilmektedir [4,77,78,79]. Ancak tabakalar arasında yüzey ilişkisinin tanımlanmasıyla yüzeyler arasında boşluk olmadığından dolayı düşük zaman adımlarıyla çözüm yapılması ve analiz süresinin uzaması sebebiyle yapıştırıcı elemanlar çok ince bir kalınlık ile modellenmiştir. Modellerde oluşturulan eleman sayıları Çizelge 6.4'te belirtilmiştir.

Çizelge 6.3 : Oluşturulan modellerdeki eleman sayıları.

Statik Model			Dinamik Model		
Tabaka	Yapışkan	Toplam	Tabaka	Yapışkan	Toplam
5904	1830	7734	14544	4530	19074

Oluşturulan yapıştırıcı elemanlar tabakalara düğüm noktalarının birleştirilmesi ya da yüzey ilişkisi yoluyla bağlanabilmektedir. Bu çalışmada yapıştırıcı elemanlar düğüm noktalarıyla tabakalarla birleştirilmiştir. Delaminasyonun başlamasını kolaylaştırmak amacıyla rijit duvara temas edecek ilk elemanlar arasına yapıştırıcı elemanlar tanımlanmamıştır (Şekil 6.13).



Şekil 6.13 : Yapışkan elemanların konumu.

Tabakalar arasına katı yapışkan elemanlar oluşturmak yerine çekme-ayrılma kanununa göre çalışan yüzey ilişkisi de tanımlanabilmektedir. Bu durumda yüzey ilişkisi için yapışkan malzeme parametreleri girilmekte, ilgili kriter sağlandığında çözücü tarafından yüzey ilişkisi kaldırılmakta ve tabakalar birbirinden ayrılmaktadır. ABAQUS ve LS-DYNA bu şekilde çalışan yüzey ilişkisi sunarken RADIOSS henüz bu özelliği desteklememektedir. O yüzden, bu seçenek üç programda da aynı yöntemi kullanabilmek amacıyla tercih edilmemiştir.

6.2.2 ABAQUS ile modelleme

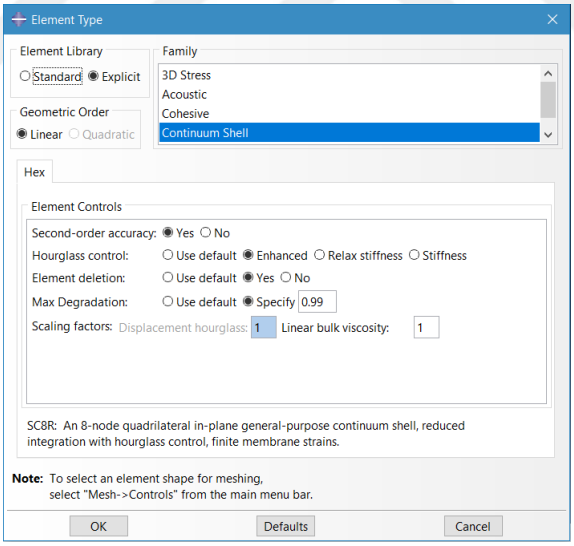
ABAQUS, .inp uzantılı komut dosyası ile çalışmaktadır. Bu dosya içerisinde modelde bulunan düğüm noktaları, eleman tipleri, malzeme ve yüzey ilişkisi tanımlamaları, sınır şartları, analiz süresi ve zaman adımı tanımlamaları gibi tüm komutlar bulunmaktadır. ABAQUS kullanıcı arayüzü kullanılarak oluşturulan bu dosya ASCII formatındadır ve metin editörü kullanılarak da düzenlenebilmektedir.

6.2.2.1 Eleman tiplerinin belirlenmesi

HyperMesh ile sonlu elemanlara ayrılmış model ABAQUS yazılımına aktarılmıştır. Modelin malzeme parametreleri, yüzey ilişkileri, eleman formülasyonları, sınır koşulları ve analiz komutları gibi kalan diğer işlemler ABAQUS arayüzü ile gerçekleştirilmiştir.

Modelde bulunan sekiz düğüm noktalı katı elemanlar için üç boyutlu katı eleman formülasyonu ya da üç boyutlu sürekli kabuk eleman formülasyonu seçilebilmektedir. Kullanılacak Hashin ve Hashin-Rotem hasar kriterleri yalnızca sürekli kabuk elemanlarla hesaplama yapabildiğinden tabakalardaki elemanlar için SC8R eleman tipi tanımlanmıştır. Literatürdeki diğer çalışmalarda üç boyutlu tam integrasyon elemanlarla modelleme yapıldığı görülmüştür. Kullanıcılar bu çalışmalarda UMAT/VUMAT kullanarak tam integrasyon elemanlarla çalışabilen malzeme modelleri ve hasar kriterleri geliştirmişlerdir [4].

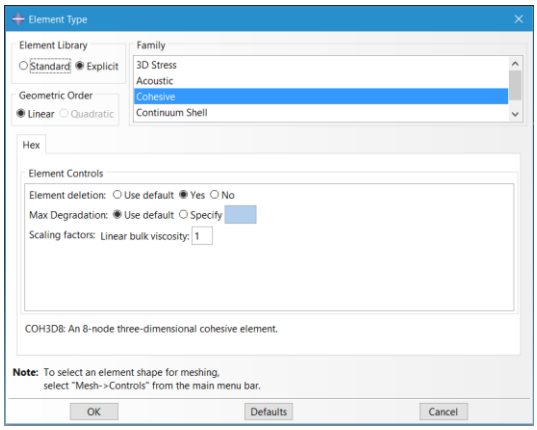
Oluşturulan sonlu elemanların tiplerinin ve birtakım formülasyon seçeneklerinin belirlendiği ekran Şekil 6.14'te görülmektedir.



Şekil 6.14 : ABAQUS ile sürekli kabuk elemanların parametrelerinin girilmesi.

Yapılan analiz denemelerinden sonra bu ekranda ikinci dereceden hassasiyet seçeneği açıldığında elemanların daha kararlı davrandığı gözlemlenmiştir. Hourglass kontrolü için gelişmiş formülasyon seçeneği seçilmiştir. Eleman silinmesi seçeneği aktifleştirilerek hasar oluşan elemanların analizden silinmesi sağlanmıştır.

Yapıştırıcı yüzeylerdeki sekiz düğüm noktalı katı elemanlar için çekme ayrılma kanununa göre tanımlama yapılabilen COH3D8 eleman tipi seçilmiştir (Şekil 6.15).



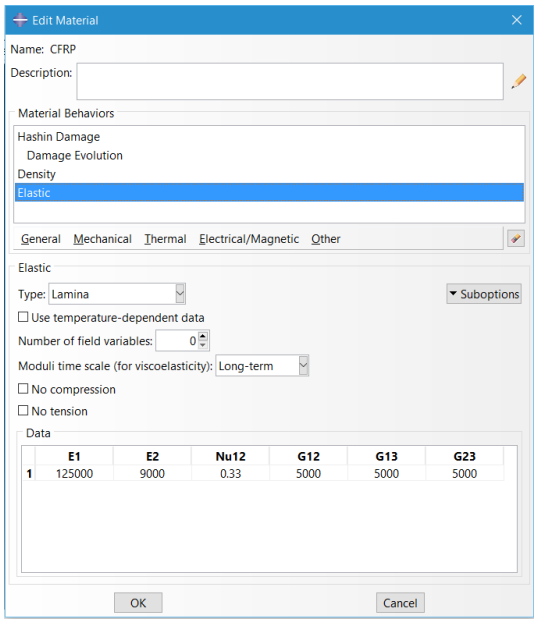
Şekil 6.15 : ABAQUS ile yapıştırıcı elemanların tipinin ve formülasyonlarının belirlenmesi.

6.2.2.2 Malzeme ve hasar kriteri parametreleri

Statik ve dinamik modeller için aynı malzeme parametreleri ve aynı hasar kriterleri kullanılmıştır. Tabakalar ve tabakaları birbirine bağlayan yapıştırıcı malzeme için farklı malzeme modelleri ve hasar kriterleri tanımlamak gerekmektedir.

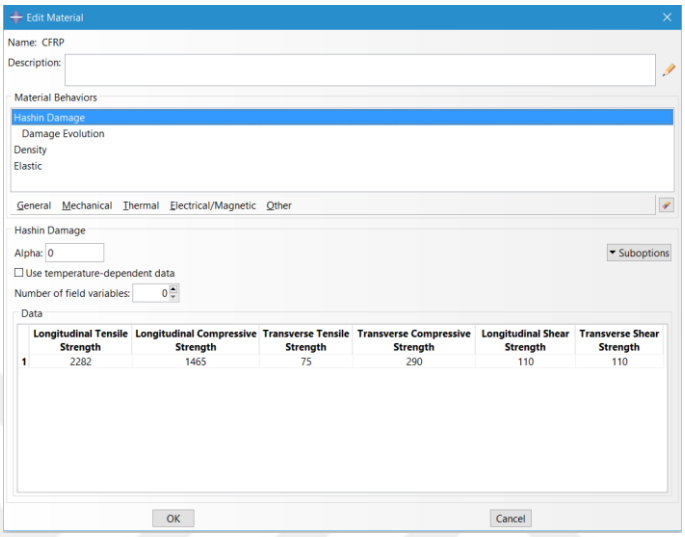
Kompozit malzeme ve hasar parametreleri

ABAQUS, malzeme tanımlaması yönünden LS-DYNA ve RADIOSS yazılımlarına göre daha farklıdır. Diğer programlarda mevcut malzeme modelleri arasından uygun olan malzeme modelinin tespit edilip seçilmesi gerekirken ABAQUS, kullanıcıya malzeme üzerine istenilen özelliklerin eklenebilmesine izin vermektedir. Kompozit malzeme için yoğunluk, elastik özellikler ve hasar kriteri Şekil 6.16'da görüldüğü gibi bu bölümde tanımlanmıştır.



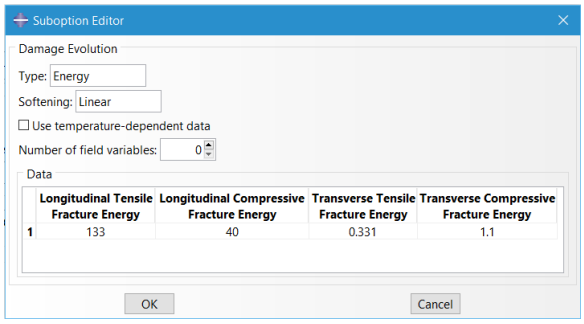
Şekil 6.16 : Kompozit malzemenin elastik malzeme parametrelerinin girilmesi.

ABAQUS, fiber takviyeli kompozit malzemeler için Hashin-Rotem ve Hashin hasar kriterlerini sunmaktadır. Şekil 6.17'deki "Alpha" değişkeni 0 olarak seçildiğinde Hashin-Rotem [40], 1 olarak seçildiğinde Hashin [41] kriterine göre hasar başlangıcı hesabı yapılmaktadır. Hasar kriteri tanımlamasında kullanılan parametreler Şekil 6.17'de görülmektedir.



Şekil 6.17 : Hashin hasar kriteri hasar başlangıcı değişkenleri.

Kompozit tabakanın farklı doğrultuları için belirtilen mukavemet değerleri hasarın başlayacağı noktanın hesaplanması için kullanılmaktadır. Hasar başladıktan sonra elemanın mukavemetinin davranışı Şekil 6.18'de belirtilen hasar hesaplaması değişkenleri kullanılarak yapılmaktadır.

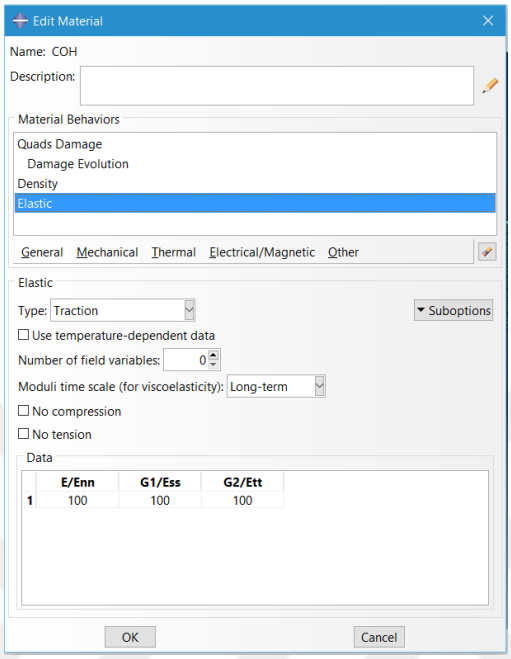


Şekil 6.18 : Hasar ilerlemesi değişkenleri.

Kompozit malzemelerin hasar ilerlemesi hesabında ABAQUS yalnızca enerjiye göre hesap yapan doğrusal hasar ilerlemeli yöntemi kullanmaktadır. Bu yöntemde ilgili hasar modu ile hasar başladıktan sonra belirtilen kırılma enerjisi kullanılarak elemanın analizden silineceği şekil değiştirme değeri hesaplanmaktadır. Hasar başlangıcı ile hasarın tamamlandığı bu değer arasında eleman mukavemeti doğrusal olarak düşürülmektedir.

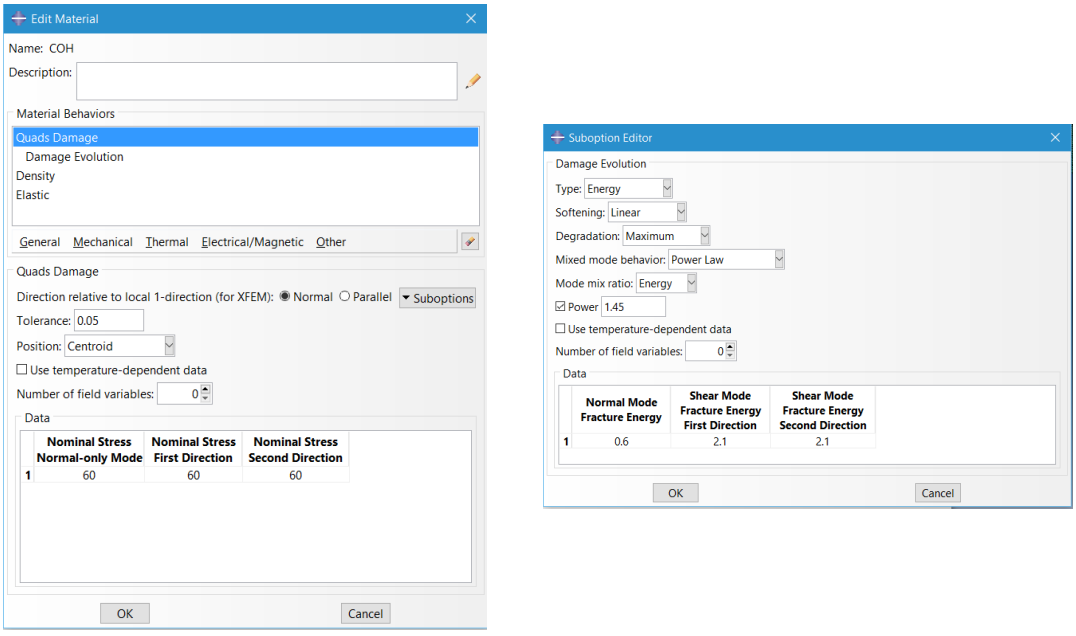
Yapıştırıcı malzeme ve hasar parametreleri

Yapıştırıcı malzeme için kullanılan yoğunluk, elastik özellikler ve diğer hasar parametreleri Çizelge 6.3'te belirtildiği şekilde Şekil 6.19'da görüldüğü gibi tanımlanmıştır.



Şekil 6.19 : Yapıştırıcı malzemenin elastik malzeme parametrelerinin girilmesi.

Yapıştırıcı malzemelerde hasar başlangıcı için ikinci dereceden nominal gerilme kriteri kullanılmıştır. Hasar ilerlemesi için üstel kriter ve Benzeggagh-Kenane kriteri ile doğrusal hasar ilerleme yöntemi kullanılmıştır (Şekil 6.20).



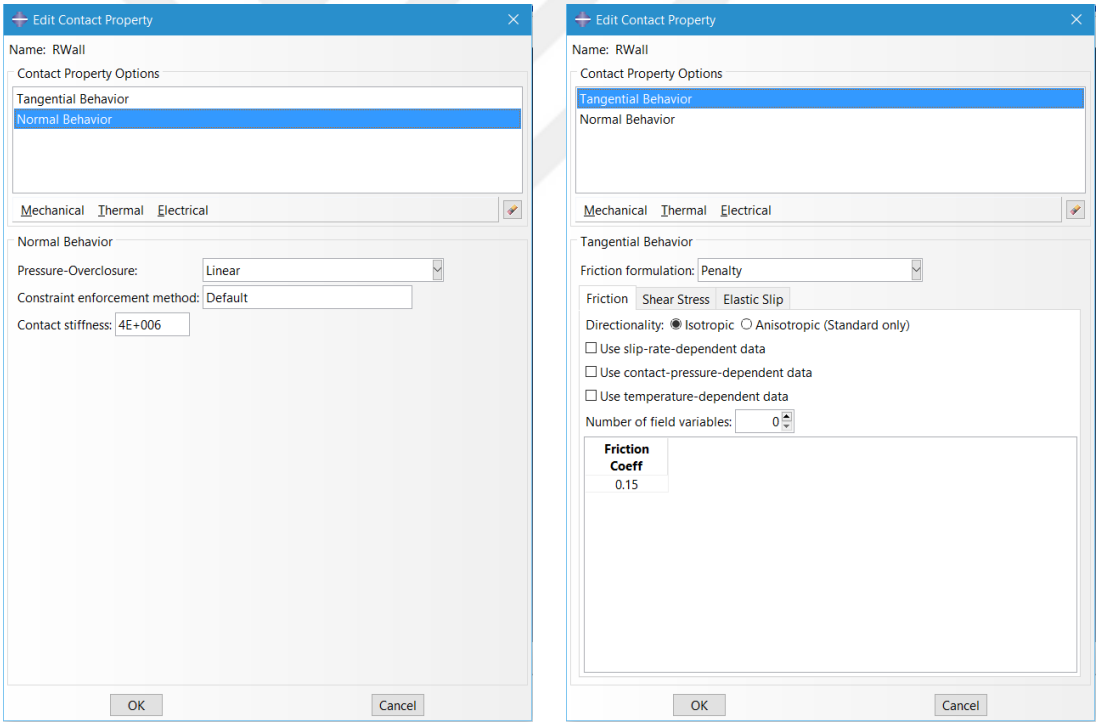
a **b**

Şekil 6.20 : a) Hasar başlangıcı değişkenleri, b) Hasar ilerlemesi değişkenleri.

6.2.2.3 Yüzey ilişkilerinin tanımlanması

Rijit duvarın, kılavuzların ve tabakaların kendileri arasındaki yüzey ilişkileri için genel yüzey ilişkisi seçeneği kullanılmıştır. Yüzey ilişkisi tanımlanırken normal ve teğetsel yöndeki özelliklerin tanımlanması gerekmektedir. Çalışmanın başında normal yönde "Hard" seçeneği seçilmiştir ancak analiz sırasında yüzeyler arasında yazılım tarafından oluşturulan ilişkinin rijitliği yeterli olmadığından elemanların bir miktar iç içe geçtiği gözlenmiştir. Bu sebeple doğrusal rijitlik hesabı seçilerek 4E6 değerinin zaman adımı, analiz süresi ve kararlılığı bakımından uygun olduğu görülmüştür. Yüzey ilişkisi rijitliğinin düşük olması yüzeylerin iç içe geçmesine sebep olmakta, çok yüksek olması ise zaman adımını düşürerek analiz süresini kısaltmaktadır.

Analizler farklı sürtünme katsayıları kullanılarak tekrarlanmıştır. Şekil 6.21'de sürtünme katsayısı kısmı değiştirilerek analiz sonuçları kıyaslanmıştır.



a **b**

Şekil 6.21 : a) Normal yöndeki yüzey ilişkisi parametreleri, b) teğetsel yöndeki yüzey ilişkisi parametreleri.

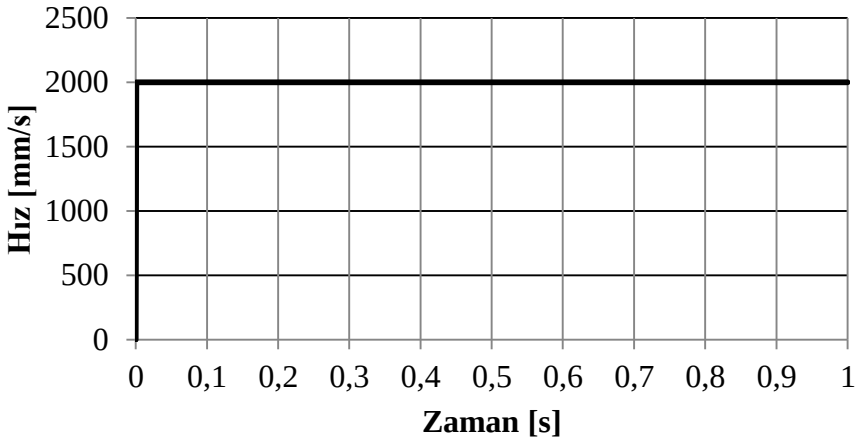
6.2.2.4 Sınır koşullarının belirlenmesi

Analizdeki sınır koşulları test şartları göz önüne alınarak belirlenmiştir. Yapılan statik ve dinamik testlerdeki test şartları ve sınır koşulları farklıdır. Bu sebeple iki durumda da farklı sınır şartları uygulanmıştır.

Statik model

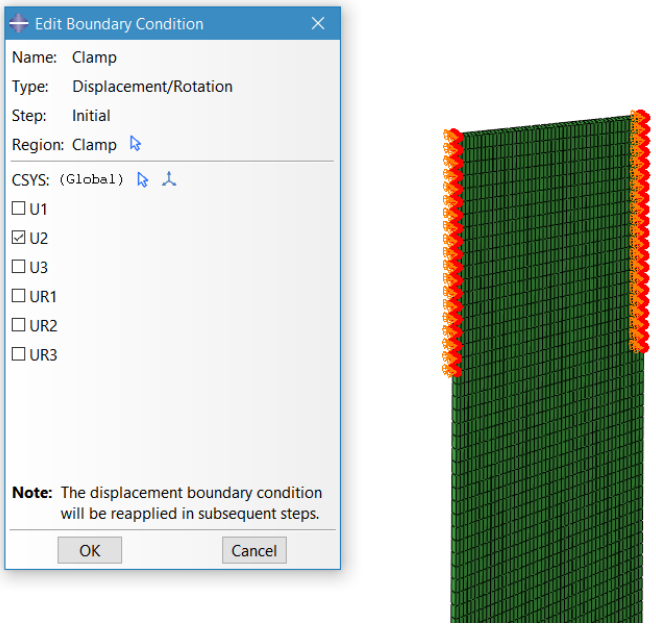
Numune ile pistonun temas ettiği üst kısma Şekil 6.22'deki gibi sabit hız tanımlanmıştır. Hızın 0 ile 0,001 saniye arasında 2000 mm/s değerine doğrusal olarak çıkması, sonraki kısımda 2000 mm/s değerinde sabit devam etmesi sağlanmıştır. Böylece analiz sırasında dinamik etkilerden dolayı oluşabilecek kararlılık problemleri giderilmiştir. Analiz süresi 0,0055 s olarak belirlenmiştir. Bu süre modelin 10 mm ezilmesi için yeterli olmuştur.

Zaman [s]	Hız [mm/s]
0	0
0,001	2000
1	2000



Şekil 6.22 : Modelin piston ile ezilme hızı.

Test düzeneğinde modelin üst kısmı test düzeneği ile sıkıştırılarak sabitlendiğinden modelin üstten 5 mm uzunluğundaki kısmı Şekil 6.23'teki gibi sınır koşulu ile sabitlenmiştir.

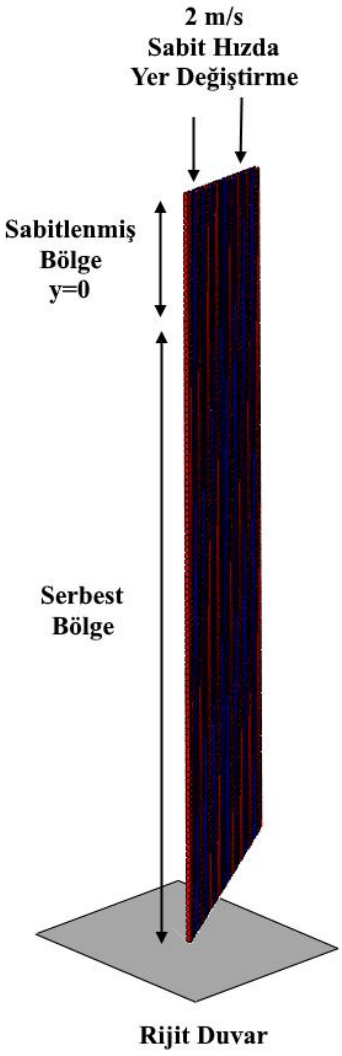


Şekil 6.23 : Modelin üstten yanal hareketi engellenen kısmı.

Analizde kullanılan model, 10 mm genişliğindeki numunenin 0,25 mm'lik bir dilimidir. Bu sebeple modelin genişlik doğrultusundaki yanal hareketi kısıtlanmıştır.

Statik ve dinamik analizlerdeki rijit duvar analitik yüzey kullanılarak modellenmiştir. Rijit duvar ile tabakaların arasındaki yüzey ilişkisi genel yüzey ilişkisi seçeneği ile tanımlanmıştır.

ABAQUS için hazırlanan statik analiz modelinin sınır koşulları Şekil 6.24'te görülmektedir.

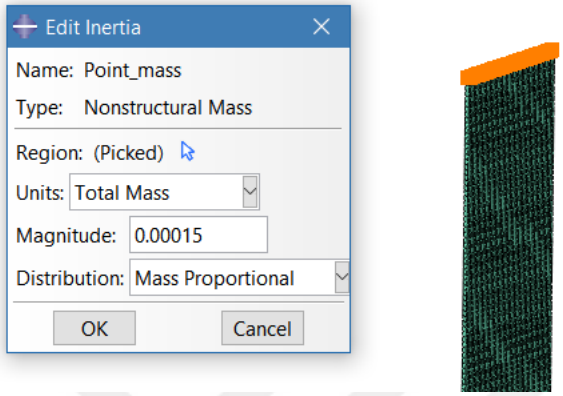


Şekil 6.24 : ABAQUS için hazırlanan statik modelin sınır koşulları.

Dinamik model

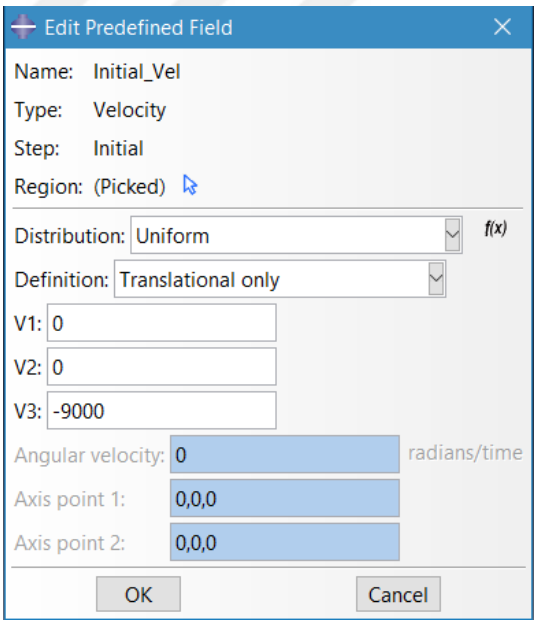
Test düzeneğindeki numunenin yerleştirildiği kılavuzlar ve rijit duvar analitik yüzeyler kullanılarak modellenmiştir. Bu yüzeyler gelen yükler ile şekil değiştirmemektedir. Kompozit numune, kılavuzlar ve rijit duvar arasındaki yüzey ilişkisi tanımlaması için genel yüzey ilişkisi kullanılmıştır. Model, deneysel

çalışmada kullanılan 60 mm genişliğindeki numunenin 0,25 mm genişliğinde bir dilimidir. Deneysel çalışmadaki numune üzerinde bulunan 36 kg ağırlığındaki çelik silindirin ağırlığı numune üzerine 0,15 kg noktasal ağırlık eklenerek modellenmiştir (Şekil 6.25). Böylece numunenin zemine çarpmasında etkin bir rol oynayan silindirin numune üzerindeki etkisi analize dahil edilmiştir.



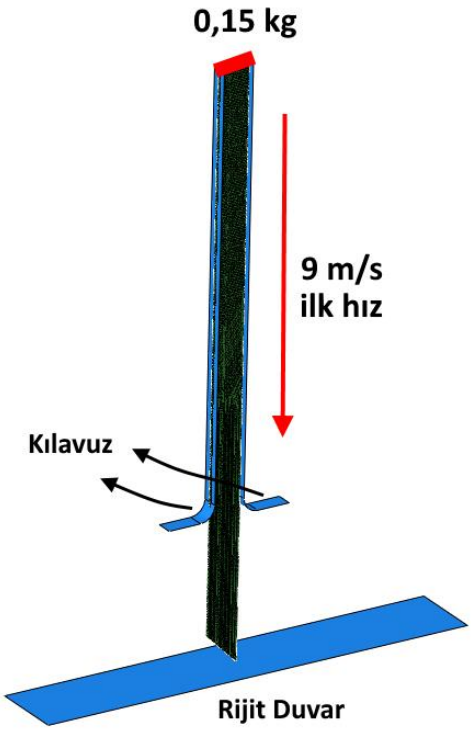
Şekil 6.25 : ABAQUS ile çelik silindirin kütlesinin tanımlanması.

Modele analiz başlangıcında Şekil 6.26'daki ekrandan elemanların hepsine düşey yönde 9 m/s ilk hız tanımlanmıştır. Bu sayede analiz başlangıcında model 9 m/s ilk hız ile harekete başlayarak ezilmektedir.



Şekil 6.26 : ABAQUS ile ilk hız tanımlamasında kullanılan parametreler.

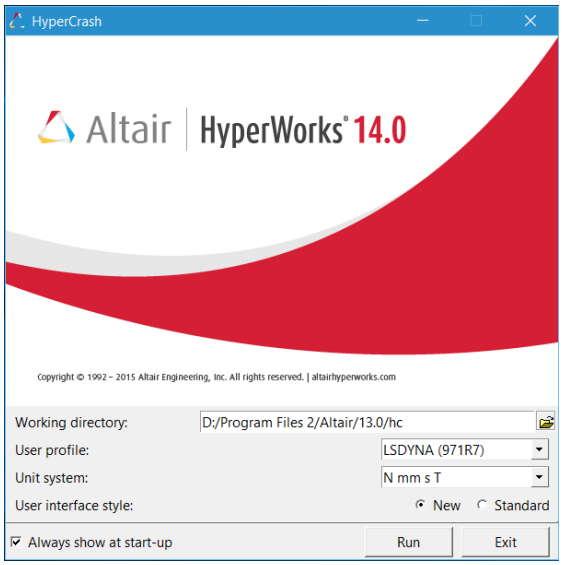
Sınır koşulları tanımlandıktan sonra analize hazırlanan model Şekil 6.27'deki gibidir. Analiz süresi 0,0025 s olarak belirlenmiştir. Tanımlanan hız ile numune bu sürede 20 mm uzunluğundan daha fazla ezilmektedir. Bu ezilme miktarı deneysel çalışmalardaki ezilme miktarı ile uyuşmaktadır.



Şekil 6.27 : ABAQUS ile hazırlanan dinamik modelin sınır koşulları.

6.2.3 LS-DYNA ile modelleme

LS-DYNA .key uzantılı dosyada yer alan komutlarla çalışan bir uygulamadır. Kullanılan bu girdi dosyası ASCII formatındadır ve herhangi bir metin editörü ile açılıp kolaylıkla düzenlenebilir. LS-DYNA'nın LS-PrePost ismindeki model düzenleme uygulaması kullanışlı olmasına rağmen LS-DYNA çözücüsüyle uyumlu bir şekilde çalışan farklı programlar da geliştirilmiştir. Şekil 6.28'de HyperCrash yazılımının LS-DYNA profili ile çalıştırılması görülmektedir.



Şekil 6.28 : HyperCrash ile LS-DYNA modülünün aktifleştirilmesi.

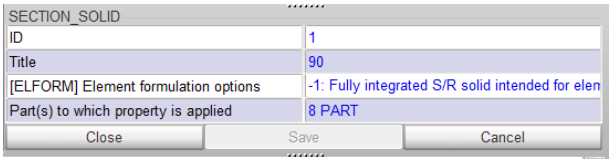
Bu çalışmada LS-DYNA modellerinin hazırlanmasında Altair firmasının HyperMesh ve HyperCrash yazılımları kullanılmıştır. HyperMesh ve HyperCrash yazılımları LS-DYNA profili ile çalıştırıldığında LS-DYNA çözücüsünde sorunsuz bir şekilde çalışan çıktılar oluşturabilmektedir.

LS-DYNA profili aktifleştirildikten sonra program içerisindeki tüm menüler LS-DYNA ile uyumlu hale gelmektedir. Bundan sonra yapılacak düzenlemeler LS-DYNA çözücüsü ile sorunsuz bir şekilde kullanılabilmektedir.

6.2.3.1 Eleman tiplerinin belirlenmesi

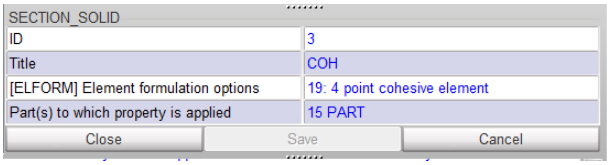
HyperMesh'te sonlu elemanlarına ayrılan modelin malzeme parametreleri, yüzey ilişkileri, eleman formülasyonları, sınır koşulları ve analiz komutları gibi kalan diğer işlemleri LS-DYNA çözücüsü ile çözdürülmek üzere HyperCrash programının LS-DYNA ile uyumlu modülü kullanılarak yapılmıştır.

Şekil 6.29'da görüldüğü gibi kompozit tabakalar için eleman tipi olarak sekiz düğüm noktalı ortotropik katı elemanlar, eleman formülasyonu olarak tam integrasyon noktalı seçenek tanımlanmıştır. Bu eleman formülasyonu "hourglass" ve "shear locking" problemlerine karşı daha başarılı olmaktadır. 0° ve 90° fiber doğrultulu tabakalar için ayrı ayrı tanımlama yapılmıştır. Fiber yönleri koordinat sistemi tanımlaması yapılarak belirlenmiştir.



Şekil 6.29 : LS-DYNA ile kompozit tabakaları oluşturan eleman tipinin ve formülasyonlarının belirlenmesi.

8 düğüm noktalı katı elemanlarla modellenen yapıştırıcı elemanlar için Şekil 6.30'da görüldüğü gibi 19 numaralı formülasyon seçilmiştir.



Şekil 6.30 : LS-DYNA ile yapıştırıcı elemanların tipinin ve formülasyonlarının belirlenmesi.

Bu formülasyona göre üst üste denk gelen iki düğüm noktasının yer değiştirmesi arasındaki fark hesaplanarak yapıştırıcı elemanın uzama miktarı ve gerilmesi

belirlenmektedir. Bu sebeple 8 integrasyon noktasının 4 noktaya interpolasyonu yapılmaktadır.

6.2.3.2 Malzeme ve hasar kriteri parametreleri

LS-DYNA üç boyutlu katı elemanlarla kullanılmak üzere MAT22, MAT54, MAT55, MAT59 kompozit malzeme modellerini ve yapışkan elemanlarla kullanılmak üzere MAT 138, MAT 184, MAT 185 ve MAT 186 malzeme modellerini sunmaktadır. Statik ve dinamik analizler için aynı malzeme parametreleri kullanılmıştır.

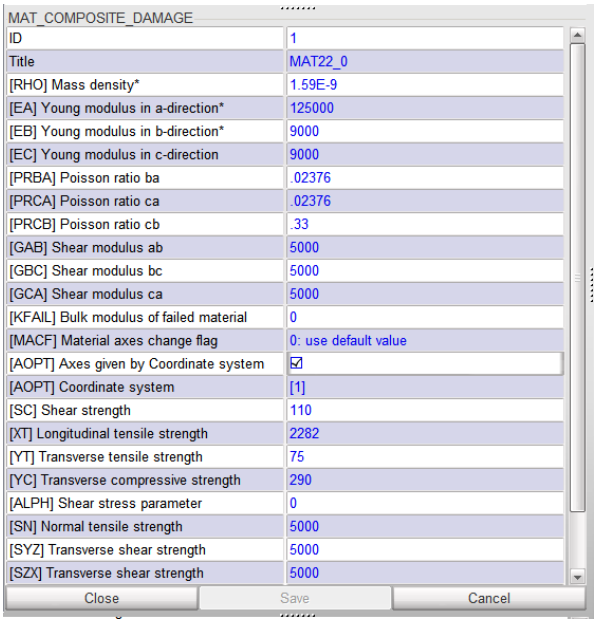
Kompozit malzeme ve hasar parametreleri

LS-DYNA çok sayıda malzeme modeli ile kullanıcıya birçok duruma uygun tanımlama yapma imkanı vermektedir. Bu tez çalışmasında kompozit tabakalar için üç boyutlu katı elemanlarla kullanılabilen MAT22, MAT54, MAT55 ve MAT59 malzeme modelleri incelenmiştir.

LS-DYNA'da kullanılan malzeme modelleri için Poisson oranlarına ν_{21}, ν_{31} ve ν_{32} değerlerini tanımlamak gerekmektedir. Bu değerler denklem 6.1 ile hesaplanmaktadır:

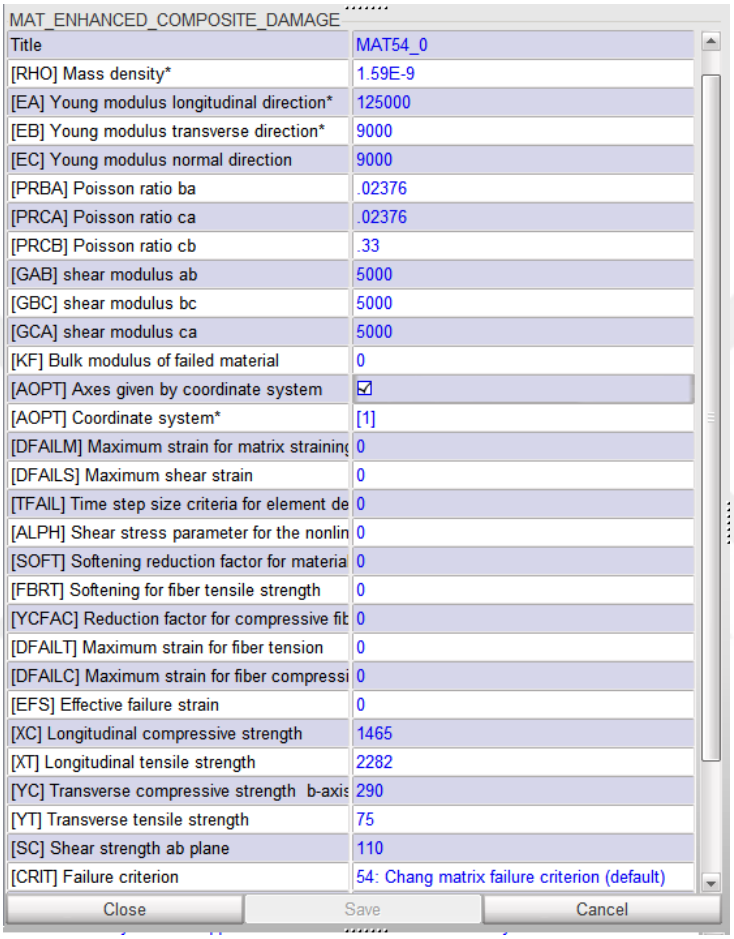
$$\frac{\nu_{ij}}{E_i} = \frac{\nu_{ji}}{E_j} \tag{6.1}$$

Şekil 6.31'de parametreleri görülen MAT22 malzeme modeli Chang-Chang hasar kriterine göre hesaplama yapmaktadır.



Şekil 6.31 : MAT22 malzeme modelinde kullanılan parametreler.

MAT54 ve MAT55 malzeme modelleri, MAT22 malzeme modelinin geliştirilmiş halleri olarak belirtilmiştir [70]. CRIT parametresi 54 olarak seçildiğinde MAT22 malzeme modelinde olduğu gibi Chang-Chang hasar kriterine göre, CRIT değeri 55 olarak seçildiğinde matris hasarı Tsai-Wu hasar kriterine göre hesaplanmaktadır. MAT54 ve MAT55 malzeme modellerinde kullanılan parametreler Şekil 6.32'de görülmektedir.

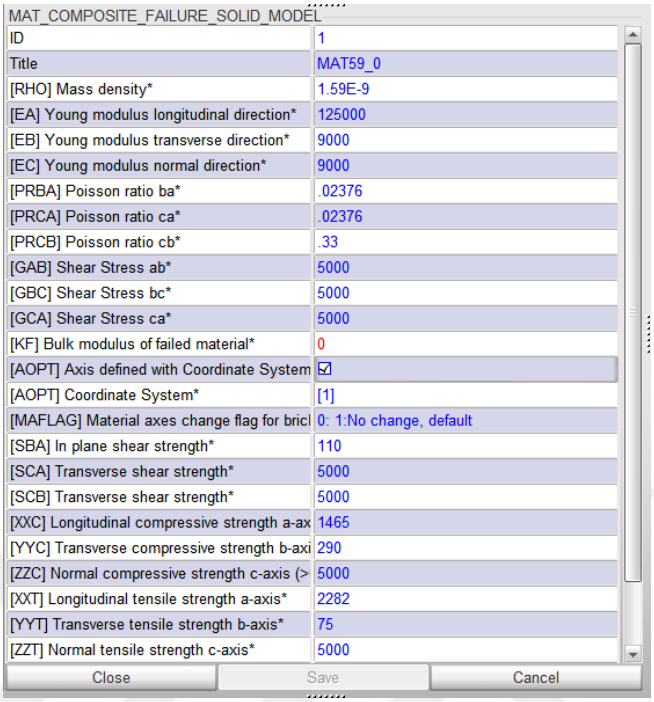


Şekil 6.32 : MAT54/MAT55 malzeme modellerinde kullanılan parametreler.

MAT54/MAT55 malzeme modelinde bu çalışmada kullanılmayan fiber basma/çekme gerinimi, matris gerinimi ve kayma gerilmesi limitleri ile daha detaylı deneysel çalışmalarla elde edilebilecek birtakım parametreler de yer almaktadır. Bu parametreler kullanılarak hasar kriterlerine ek olarak eleman mukavemeti düşürülebilmekte ya da elemanlar analizden silinebilmektedir.

Malzeme modelinde tanımlanması gereken çok sayıda parametrenin yer alması ihtiyaç duyulan deneysel çalışma sayısını arttırmakta ancak malzeme modelinin daha gerçekçi bir şekilde çalışmasını sağlayabilmektedir. MAT59 malzeme modelinin tanımlanması için kullanılan parametreler Şekil 6.33'te görülmektedir. Bu malzeme

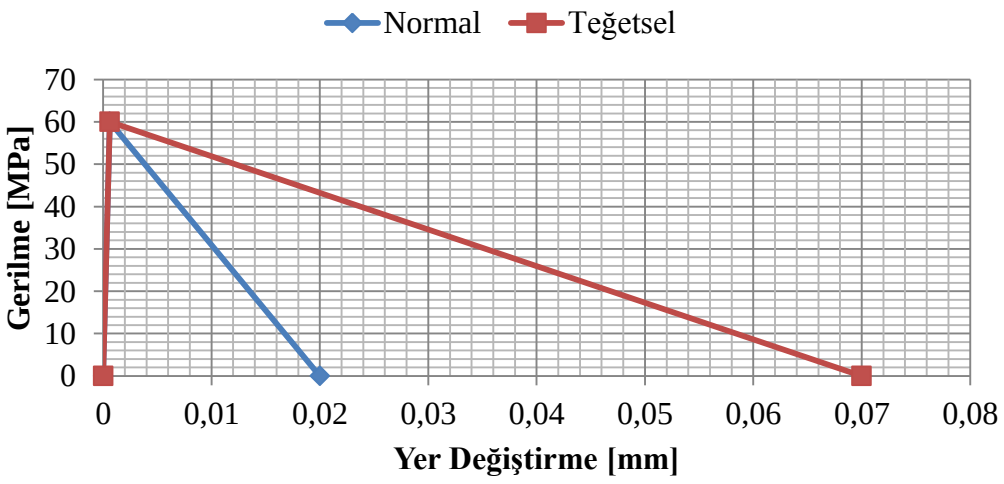
modeli MAT54/MAT55 malzeme modellerinin aksine daha az parametreye ihtiyaç duymaktadır.



Şekil 6.33 : MAT59 malzeme modelinde kullanılan parametreler.

Yapıştırıcı malzeme ve hasar parametreleri

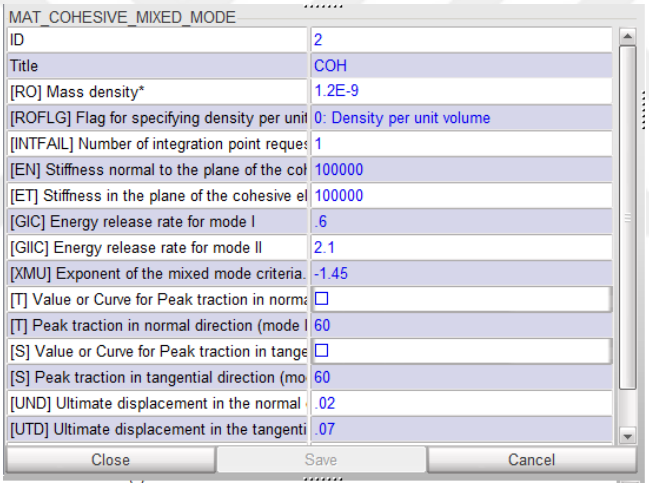
Yapıştırıcı malzeme parametreleri hesaplanırken Şekil 6.34'teki grafik oluşturulmuştur. Bu grafiğe göre yapıştırıcı malzemede literatürden [73] alınan verilere göre elastik bölgedeki rijitlik 100000 MPa/mm değerindedir. Malzemede normal ve teğetsel yönlerde 60 MPa gerilme değerinde hasar görülmeye başlamaktadır.



Şekil 6.34 : Analizlerde kullanılan yapıştırıcı malzemenin gerilme-yer değiştirme grafiği.

ABAQUS yazılımında hesaplandığı şekilde doğrusal hasar ilerlemesi göz önüne alınarak hasar gören elemanın gerilme değerinin LS-DYNA ile de doğrusal olarak azalacak şekilde tanımlanmıştır. Maksimum hasar yer değiştirmesi değeri, literatürde belirtilen enerji yayınım hızı değerine göre hesaplanmıştır. Gerilme-yer değiştirme grafiğinin altında kalan alan enerji yayınım hızına eşit olduğunda malzemenin tamamen hasara uğradığı kabul edilmiştir. Hesaplamalara göre yapıştırıcı malzemenin normal yönde 0,02 mm değerinde, teğetsel yönde 0,07 mm değerinde kopacağı bulunmuştur.

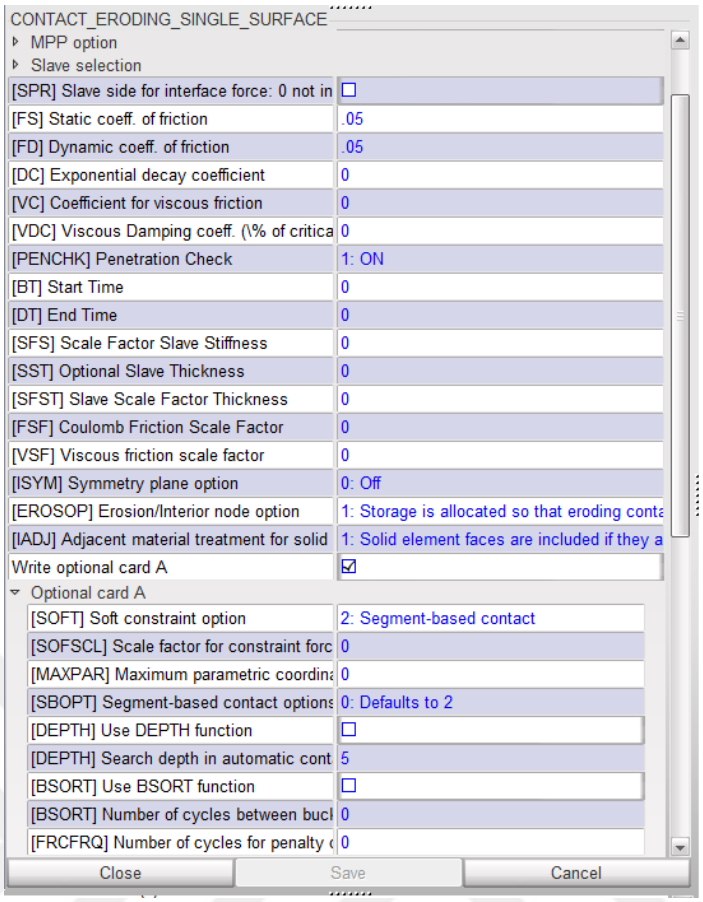
Yapıştırıcı malzeme için LS-DYNA içerisinde MAT138, MAT 184, MAT185 ve MAT186 malzeme modelleri mevcuttur. Bu malzeme modelleri temelde aynı olup hasarın hesaplanması bakımından birbirinden ayrılırlar. Bu çalışmada ABAQUS ve RADIOSS programlarındaki kriterlere en yakın model olarak MAT138 seçilmiştir. Şekil 6.35'te kullanılan parametreler görülmektedir.



Şekil 6.35 : MAT138 malzeme modelinde kullanılan parametreler.

6.2.3.3 Yüzey ilişkilerinin tanımlanması

LS-DYNA ile farklı durumlarda başarılı sonuçlar veren çok sayıda yüzey ilişkisi tanımlaması yapmak mümkündür. Bu çalışmada yüzey ilişkisi oluşturulurken tek yüzey tanımlaması yapılan, tanımlanan bu yüzeyin kendi içerisindeki ilişkisini kuran tipte yüzey ilişkisi kullanılmıştır (Şekil 6.36). Yüzey ilişkisi tanımlamasında kullanılacak yüzeyler için tabakalarda bulunan elemanlar seçilmiştir. Bu yüzey ilişkisinde SOFT parametresi yüzeyler arasındaki rijitliğin hesaplama yöntemini belirlemektedir ve modelin durumuna göre uygun olan parametre seçilmelidir. Dinamik analizlerde kılavuzlar ile numune arasında yüzey-yüzey ilişkisi tanımlaması yapılmıştır.



Şekil 6.36 : LS-DYNA yüzey ilişkisi tanımlamasında kullanılan parametreler.

Rijit duvar ile tabakalar arasındaki yüzey ilişkisi parametreleri rijit duvar ekranından tanımlanmaktadır. Analizlerde kullanılan statik ve dinamik sürtünme katsayıları aynı kabul edilmiştir ve bu değerler değiştirilerek analizler tekrarlanmıştır.

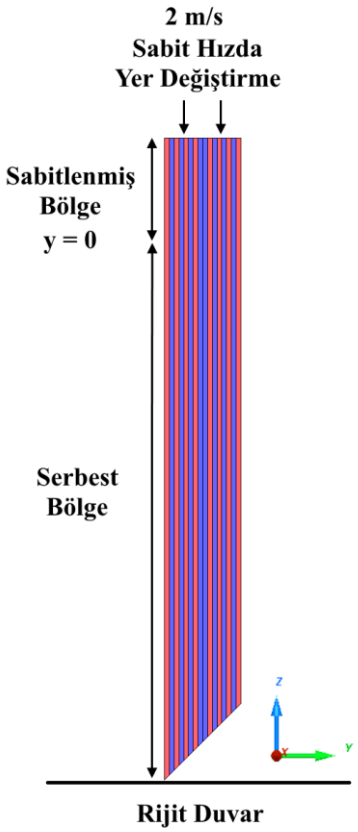
6.2.3.4 Sınır koşullarının belirlenmesi

Statik ve dinamik test şartları farklı olduğundan LS-DYNA ile sınır koşulları tanımlaması statik ve dinamik analizler için ayrı ayrı yapılmıştır.

Statik model

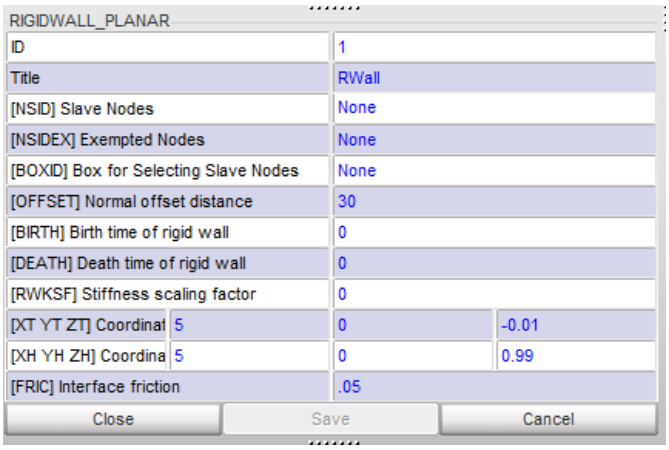
Kompozit numune ile çelik silindirin temas ettiği kısma ABAQUS ile yapılan analizlerde kullanılan hız tanımlamasının aynısı uygulanmıştır (Şekil 6.37). Modelin üstten 5 mm uzunluğundaki kısmı sınır koşulu kullanılarak kalınlık doğrultusunda (y ekseni) hareket edemeyecek şekilde sabitlenmiştir. Serbest bölge olarak ifade edilen kısmın uzunluğu 30 mm'dir.

Statik analizde kullanılan model, 10 mm genişliğindeki numunenin 0,25 mm genişliğindeki bir dilimdir. Bu sebeple modelin genişlik doğrultusundaki (x ekseni) yanal hareketi kısıtlanmıştır.



Şekil 6.37 : LS-DYNA için hazırlanan statik modelin sınır koşulları.

Modeldeki rijit duvar parametreleri Şekil 6.38'de görülmektedir. Rijit duvardaki sürtünme değerleri değiştirilerek analizler tekrarlanmıştır.

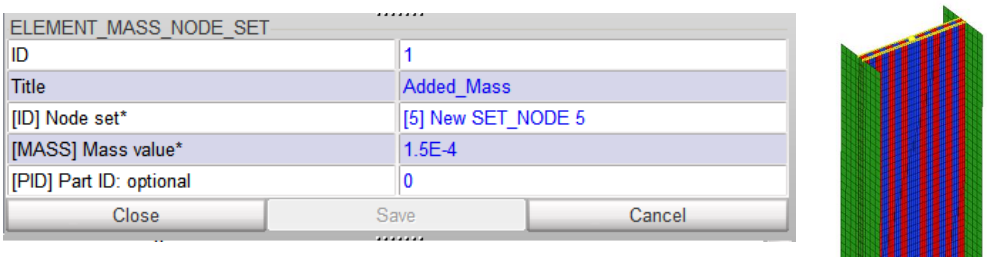


Şekil 6.38 : LS-DYNA rijit duvar tanımlamasında kullanılan parametreler.

Dinamik model

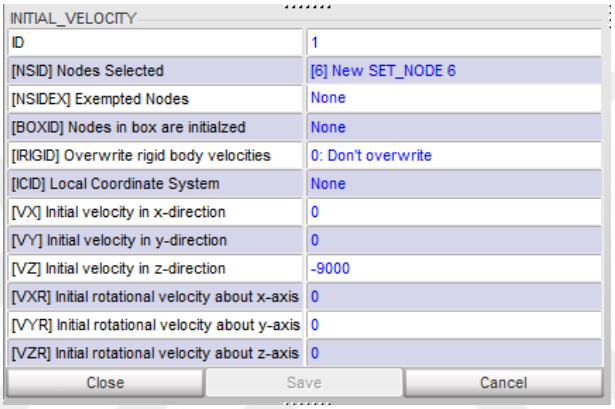
Test düzeneğindeki numunenin yerleştirildiği kılavuzlar iki boyutlu kabuk elemanlarla rijit ve hareket etmeyecek şekilde modellenmiştir. Model, deneysel çalışmada kullanılan 60 mm genişliğindeki numunenin 0,25 mm genişliğinde bir dilimidir. Deneysel çalışmadaki numune üzerinde bulunan 36 kg ağırlığındaki çelik

silindirin ağırlığı numune üzerine 0,15 kg noktasal ağırlık eklenerek modellenmiştir (Şekil 6.39).



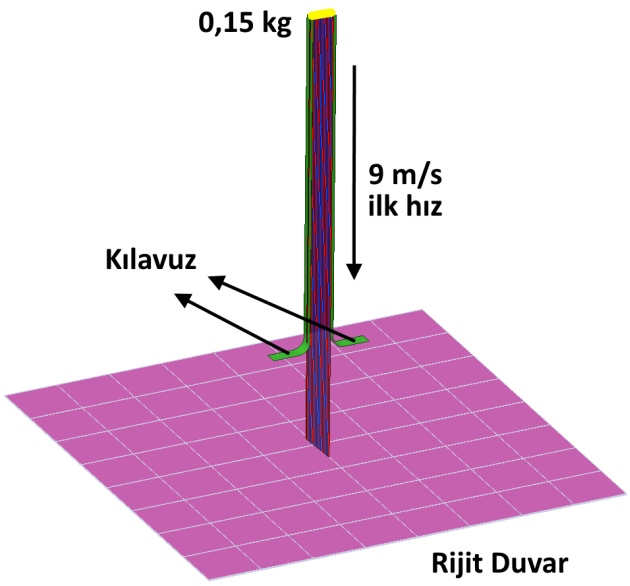
Şekil 6.39 : LS-DYNA ile çelik silindirin kütlesinin tanımlanması.

Modele düşey yönde 9 m/s ilk hız tanımlanmıştır (Şekil 6.40).



Şekil 6.40 : LS-DYNA ile ilk hız tanımlamasında kullanılan parametreler.

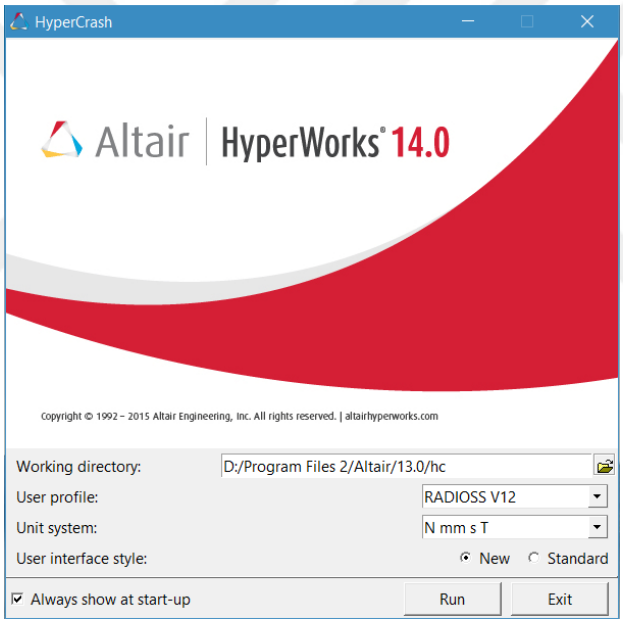
Sınır koşulları tanımlandıktan sonra analize hazırlanan model Şekil 6.41'de görülmektedir. Analiz süresi 0,0025 s olarak belirlenmiştir. Tanımlanan hız ile numune bu sürede 20 mm uzunluğundan daha fazla ezilmektedir.



Şekil 6.41 : LS-DYNA için hazırlanan dinamik modelin sınır koşulları.

6.2.4 RADIOSS ile modelleme

RADIOSS çözücüsü .rad uzantılı dosyada yer alan komutlarla çalışmaktadır. Çözücünün çalışması için gereken dosyalardan bir tanesi olan "_0001.rad" uzantılı dosyada analiz süresi, zaman adımı tanımları, çıktıların türleri ve sıklığı gibi komutlar yer almaktadır. "_0000.rad" uzantılı dosyada ise eleman ve düğüm noktası koordinatları, eleman tipleri, malzeme ve yüzey ilişkisi tanımlamaları, sınır şartları gibi modeli oluşturan tanımlamalar bulunmaktadır. ASCII formatında olan bu iki dosya da herhangi bir metin editörü ile rahatlıkla düzenlenebilmektedir. Ayrıca HyperMesh ya da HyperCrash yazılımları ile modeller kullanıcı arayüzleri sayesinde kolaylıkla oluşturulabilmektedir. Bu çalışmada RADIOSS ile analiz yapılırken model hazırlama aşamasında HyperMesh ve HyperCrash kullanılmıştır. Şekil 6.42'de HyperCrash ile RADIOSS modülünün aktifleştirilmesi görülmektedir.



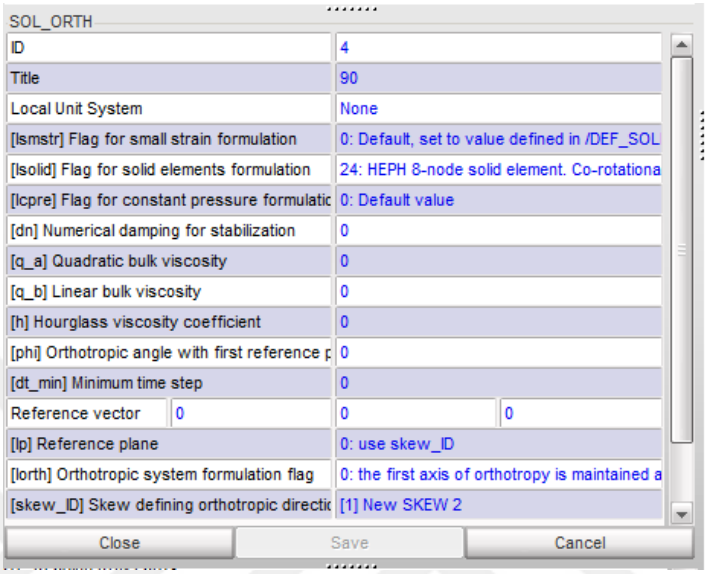
Şekil 6.42 : HyperCrash ile RADIOSS modülünün aktifleştirilmesi.

RADIOSS modülü aktifleştirildikten sonra program içerisindeki tüm menüler uyumlu hale gelmektedir. Bundan sonra yapılacak düzenlemeler RADIOSS çözücüsü ile sorunsuz kullanılabilmektedir.

6.2.4.1 Eleman tiplerinin belirlenmesi

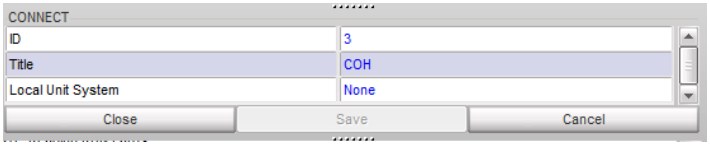
HyperMesh ile sonlu elemanlarına ayrılmış model HyperCrash programına aktarılmıştır. Modelin malzeme parametreleri, yüzey ilişkileri, eleman formülasyonları, sınır koşulları ve analiz komutları gibi kalan diğer işlemleri HyperCrash ile gerçekleştirilmiştir.

Kompozit tabakaların eleman tipi olarak Şekil 6.43'te görüldüğü gibi sekiz düğüm noktalı ortotropik katı elemanlar, eleman formülasyonu olarak tek integrasyon noktalı seçenek tanımlanmıştır. Tabakaların fiber doğrultuları bu ekrandan koordinat sistemi tanımlaması yapılarak belirlenmiştir. Bunun için 0° ve 90° fiber doğrultulu elemanlara ayrı ayrı koordinat ekseni tanımlaması yapılmıştır.



Şekil 6.43 : RADIOSS ile kompozit tabakaları oluşturan eleman tipinin ve formülasyonlarının belirlenmesi.

Yapıştırıcı malzemeler de sekiz düğüm noktalı katı elemanlarla modellenmiştir. Şekil 6.44'te görülen eleman özellikleri ekranında bu elemanlar için seçilmesi gereken bir parametre bulunmamaktadır.



Şekil 6.44 : RADIOSS ile yapıştırıcı elemanların tipinin ve formülasyonlarının belirlenmesi.

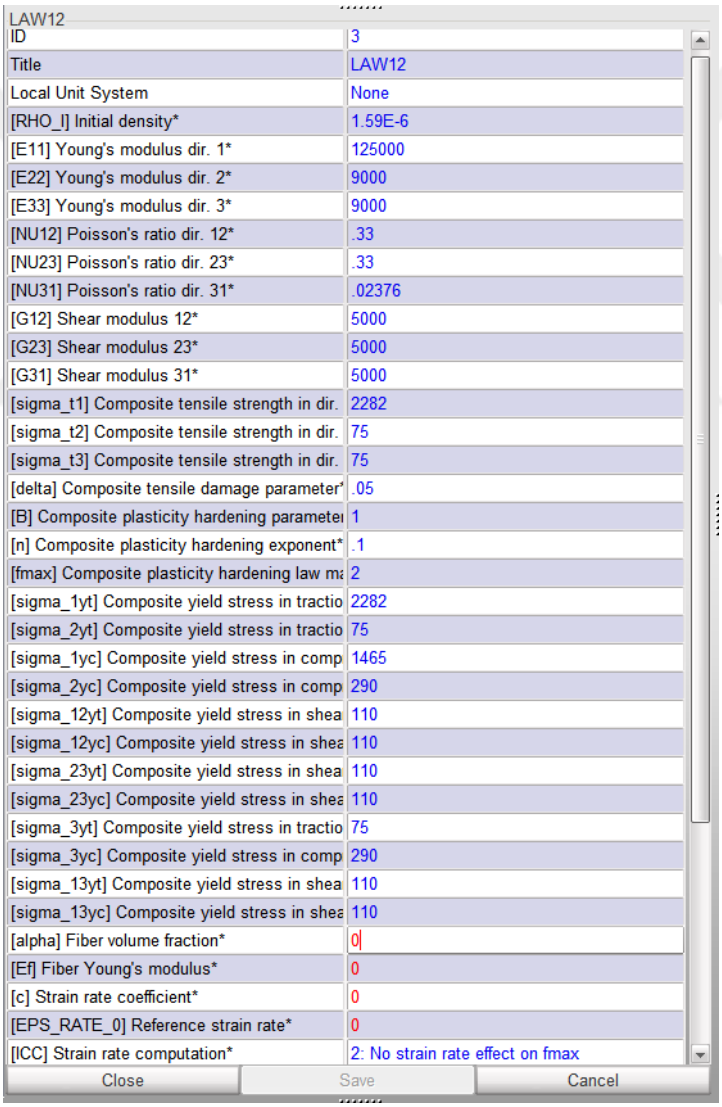
6.2.4.2 Malzeme ve hasar kriteri parametreleri

RADIOSS üç boyutlu katı elemanlarla kullanılmak üzere LAW12, LAW14 ve LAW25 kompozit malzeme modellerini ve yapışkan elemanlarla kullanılmak üzere LAW59 malzeme modelini içermektedir. LAW12 malzeme modeli LAW14 malzeme modelinin geliştirilmiş versiyonu olduğu ve LAW12 malzeme modelinin tercih edilmesi gerektiği belirtilmiştir [72]. LAW25 malzeme modelinin ise hasar kriteri üç boyutlu elemanlarla uyumlu değildir. Katı elemanlarla modellenen kompozitler için Hashin, Puck ve Tsai-Wu hasar kriterleri, yapışkan malzemeler için

CONNECT ve SNCONNECT hasar kriterleri yer almaktadır. Statik ve dinamik analizler için aynı malzeme parametreleri ve aynı hasar kriterleri kullanılmıştır.

Kompozit malzeme ve hasar parametreleri

Hashin ve Puck hasar kriterlerini kullanmak için bir malzeme modeline hasar kriterini tanımlamak gerekmektedir. LAW12 malzeme modeli Tsai-Wu hasar kriterini de içermektedir. Bu sebeple Tsai-Wu hasar kriteri için LAW12 malzeme modelini kullanmak yeterli olmaktadır. Hashin ve Puck hasar kriterleri tanımlanırken LAW12 malzeme modelinin B, n ve f_{max} parametreleri boş bırakılarak elemanların doğrusal davranış göstermesi sağlanmıştır. Tsai-Wu hasar kriteri için Şekil 6.45'te belirtilen parametreler kullanılarak hesaplama yapılmaktadır.

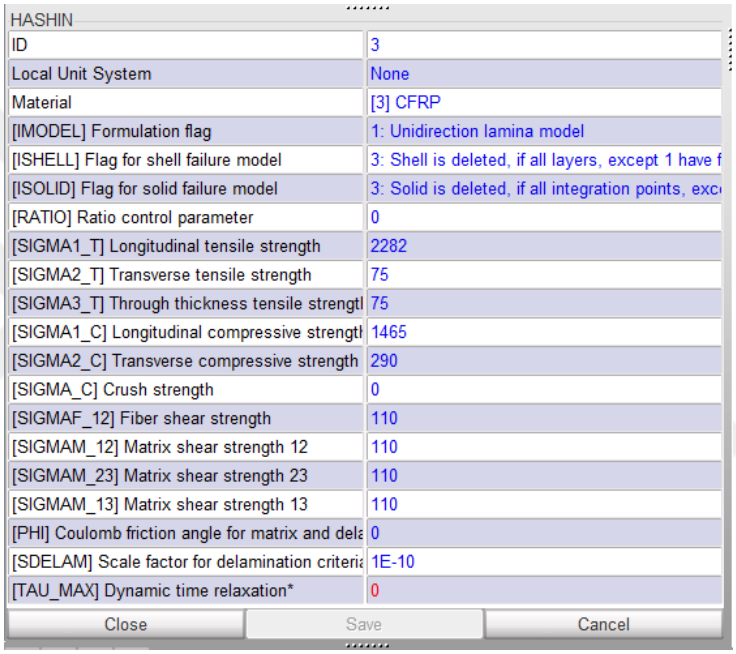


Şekil 6.45 : Tsai-Wu hasar kriteri için kullanılan malzeme parametreleri.

Malzeme Tsai-Wu kriterine ulaşana kadar doğrusal, sonrasında kullanıcının belirlediği B ve n değerlerine göre doğrusal olmayan davranış gösterir. Bu değerler

malzemenin kriterden sonra sabit gerilmede olması için Şekil 6.44'te gösterildiği gibi seçilmiştir. Kullanılan malzemenin hacimsel fiber oranı, fiber Young modülü ve birim şekil değiştirme hızı hakkında veri olmadığından malzemenin bu parametreleri boş bırakılmıştır.

Hashin hasar kriterinde Şekil 6.46'daki gibi girilen parametreler kullanılarak RADIOSS'ta tanımlı formüllere göre hesap yapılır. Kritere ulaşan elemanlarda hasarın başladığı kabul edilir ve TAU_MAX parametresi ile denklem 5.84 kullanılarak elemanın gerilmesi düşürülür. Gerilme değeri sıfıra ulaştığında eleman silinir.



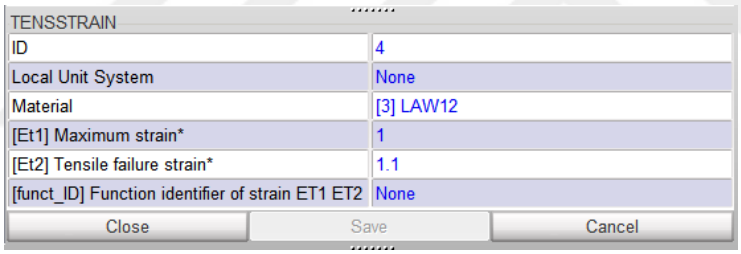
Şekil 6.46 : Hashin hasar kriteri parametreleri.

Hashin hasar kriterinde ezilme dayanımı ile ilgili bir hasar hesabı bulunmaktadır. Ezilme analizlerinde kullanılmak üzere Hashin hasar kriterine eklenen SIGMA_C parametresi deneysel çalışmalarla eksenel ezilme testlerinden sonra elde edilebilmektedir. Hem kullanılan kompozit malzemenin ezilme dayanımı ile ilgili bir verisi olmaması hem de yapılan çalışmanın ABAQUS, LS-DYNA ve Hashin kriterine daha uygun olması amacıyla bu değer boş bırakılmıştır. Böylelikle elemanlarda SIGMA_C parametresine göre hasar hesabı yapılmayacaktır.

RADIOSS dokümanlarında TAU_MAX parametresinin zaman adımından 10 kat büyük olması tavsiye edilmektedir. Bir elemanın analizden silinmesi ona komşu olan elemanlarda anlık olarak dengesizlik oluşturmaktadır. Bu sebeple zincirleme şekilde komşu elemanlar da silinmektedir. TAU_MAX parametresi ile hasara uğrayan

elemanın gerilmesi kademeli olarak düşürülerek zincirleme eleman silinmesinin önüne geçilmeye çalışılmıştır. Ancak farklı TAU_MAX değerleriyle yapılan denemeler sonunda bu parametrenin eleman silinmesi konusunda efektif olmadığı görülmüştür. Çok küçük TAU_MAX değeri ilgili elemanı hasar başlangıcında silmekte hasar ilerlemesi gözlemlenememektedir. Büyük TAU_MAX değeri ise ilgili elemanın silinmeden çok şekil değiştirmesine sebep olmakta ve analizi hata ile sonlandırmaktadır.

TAU_MAX parametresinin yapılan analizlerde efektif çalışmadığı görülerek bu kısımda herhangi bir değer girilmemiş, eleman silinmesi gerinim sınırı tanımlanarak aktifleştirilmiştir (Şekil 6.47). Hasara uğrayan parçaların zeminde artıklar oluşturması ve bu artıkların hasar davranışına etki etmesi göz önüne alınarak elemanların erken silinmemesi amacıyla hasar gerinim limiti yüksek tanımlanmıştır. Bu komut hem çekme hem de basma gerilmeleri altında çalışmaktadır. Şekil 6.46'da çekme gerinimi olarak belirtilmesine rağmen basma gerinimi hesaplandığında da eleman silinmesi gerçekleşmektedir.

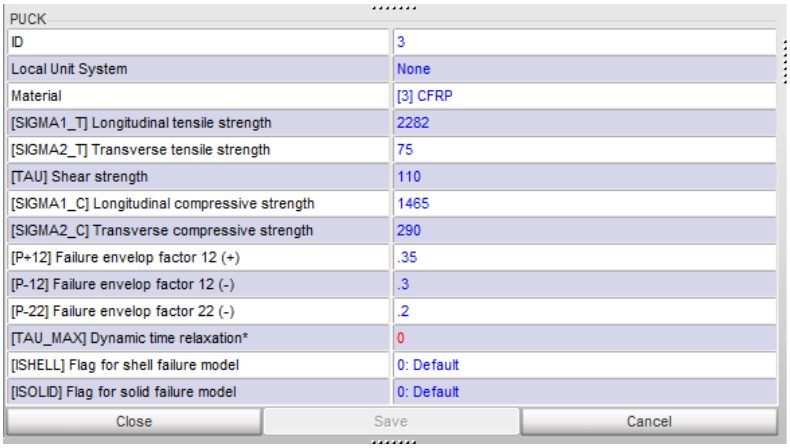


Şekil 6.47 : Eleman silinmesi için gerinim sınırı tanımlaması.

RADIOSS içerisindeki Hashin hasar kriterinin delaminasyon hasar modu tabaka kalınlığı boyunca tabakaların tek sıra elemanla modellendiği durumlarda delaminasyon hesabı yapmak amacıyla eklenmiştir. Bu çalışmadaki delaminasyon tabakalar arasına eklenen yapışkan elemanlarla inceleneceğinden bu hasar moduna gerek olmamıştır. Bu sebeple SDELAM parametresi 1E-10 gibi çok küçük bir değer girilerek elemanların bu hasar moduna ulaşması engellenmiştir.

Puck hasar kriterinde de Hashin kriterine benzer şekilde hesaplama yapılmaktadır. Tanımlama yapılırken kullanılan değerler Şekil 6.48'deki gibi girilmiştir. Kritere ulaşan elemanlarda hasarın başladığı kabul edilir ve TAU_MAX parametresi kullanılarak, denklem 5.90 uygulanarak elemanın gerilmesi düşürülür. Gerilme değeri sıfıra ulaştığında eleman silinir. Puck kriterinde de Hashin kriterinde olduğu

gibi TAU_MAX değeri girilmemiş eleman silinmesi gerinim sınırı tanımlanarak aktifleştirilmiştir.

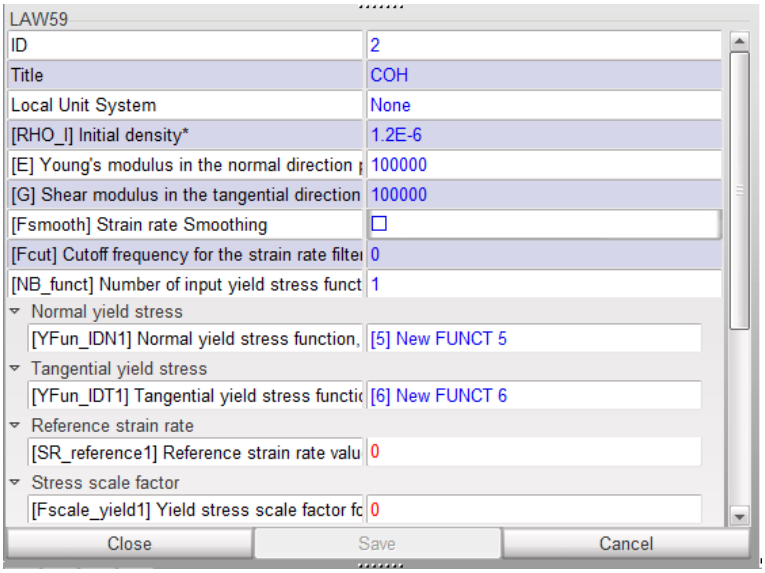


Şekil 6.48 : Puck hasar kriteri parametreleri.

Hasar kriterindeki p_{12}^{+}, p_{12}^{-} ve p_{22}^{-} değerleri Puck'ın çalışmasından alınmıştır [46].

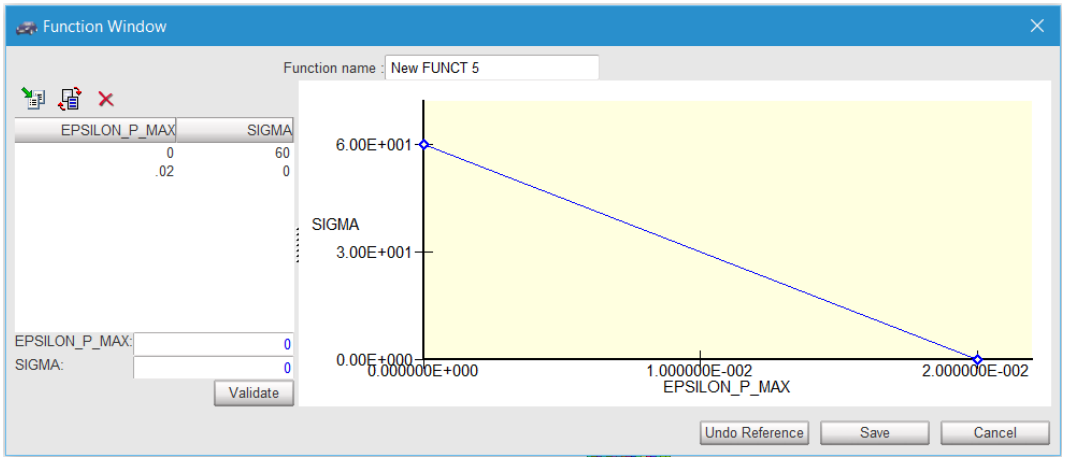
Yapıştırıcı malzeme ve hasar parametreleri

Yapıştırıcı elemanlar için LAW59 malzeme modeli Şekil 6.49'da görüldüğü gibi kullanılmıştır. Elastisite modülü ve kayma modülü için Çizelge 6.2'de belirtilen 100000 değeri kullanılmıştır. Yapıştırıcı malzeme hasar başlayana kadar bu değere göre doğrusal olarak davranmaktadır.



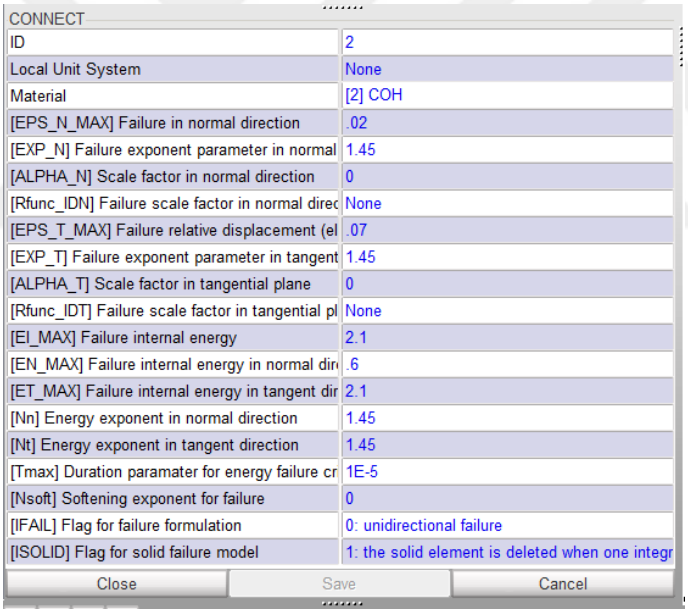
Şekil 6.49 : Yapıştırıcı yüzey için kullanılan malzeme parametreleri.

Normal ve teğetsel yönlerdeki gerilme-gerinim grafikleri Şekil 6.50'de tanımlanmıştır. Bu grafik yapıştırıcı malzemenin hasar başlangıcından sonraki davranışını belirtmektedir. Bu sayede kullanıcı elemanların hasar sonrası davranışını istediği gibi belirleyebilmektedir.



Şekil 6.50 : Yapıştırıcı malzemenin hasar sonrasındaki gerilme-yer değiştirme davranışı.

Yapıştırıcı malzemenin hasarı Şekil 6.51'de gösterilen CONNECT hasar kriteri ile tanımlanmıştır. Bu hasar kriterinin kullanılabilmesi için LAW59 malzeme modeline CONNECT hasar kriterinin ayrıca tanımlanması gerekmektedir.



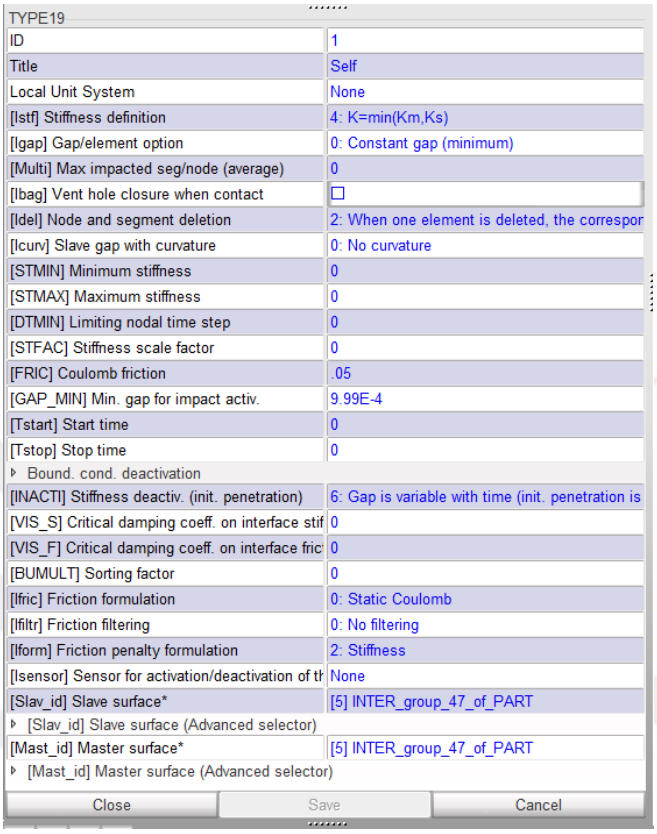
Şekil 6.51 : Yapıştırıcı malzeme için kullanılan hasar kriteri parametreleri.

CONNECT hasar kriteri ile gerinim ya da enerjiye göre hasar hesaplaması yapılabilmektedir. Bu çalışmada her iki kritere de uygun değerler girilerek aktifleştirilmiştir. Bu durumda eleman önce hangi kriteri sağlarsa o kritere göre hasara uğrayacaktır.

6.2.4.3 Yüzey ilişkilerinin tanımlanması

Tabakaların birbiri arasındaki yüzey ilişkisi için RADIOSS yazılımında bulunan TYPE19 yüzey ilişkisi kullanılmıştır. TYPE19 yüzey ilişkisi TYPE7 ve TYPE11

yüzey ilişkilerinin kombinasyonundan oluşmaktadır. TYPE7 yüzey ilişkisi düğüm noktaları ile yüzeyler arasında ilişki kurarken TYPE11 yüzey ilişkisi elemanların kenarları arasında ilişki kurmaktadır. TYPE19 ile bu iki yüzey ilişkisi birleştirilmiştir. Yüzey ilişkisi parametreleri Şekil 6.52'de görüldüğü gibi seçilmiştir.



Şekil 6.52 : Yüzey ilişkilerinin tanımlanmasında kullanılan parametreler.

Malzeme özellikleri ve kalınlığı ile yazılım tarafından hesaplanan yüzey ilişkisinin rijitliği analizi oldukça etkilemektedir. Küçük rijitlik büyük zaman adımlarının kullanılmasına izin verirken temas eden yüzeylerin iç içe geçmesine sebep olabilmektedir. Yüksek rijitlik ise iç içe geçme problemine engel olurken zaman adımını küçültmekte ve analiz süresini uzatmaktadır. TYPE19 yüzey ilişkisi birbiriyle temas edecek iki yüzey arasındaki rijitliği arttırıp azaltmaya imkan vermektedir. Temas edecek iki yüzey ilişkisi için de hesaplanan rijitliklerden küçük olanının kullanılması yüzeyler arasında bir probleme sebep olmamıştır.

GAP_MIN parametresi iki eleman arasındaki yüzey ilişkisinin hesaplanmaya başlayacağı boşluk miktarını belirtmektedir. Tabakalar arasına tanımlanan yapıştırıcı elemanların kalınlığı 0,001 mm olduğundan yapıştırıcı elemanlar hasara uğrayıp analizden silindikten sonra tabakaların birbirine temas etmeye başlayacağı aralık olarak 9,99E-4 değeri seçilmiştir.

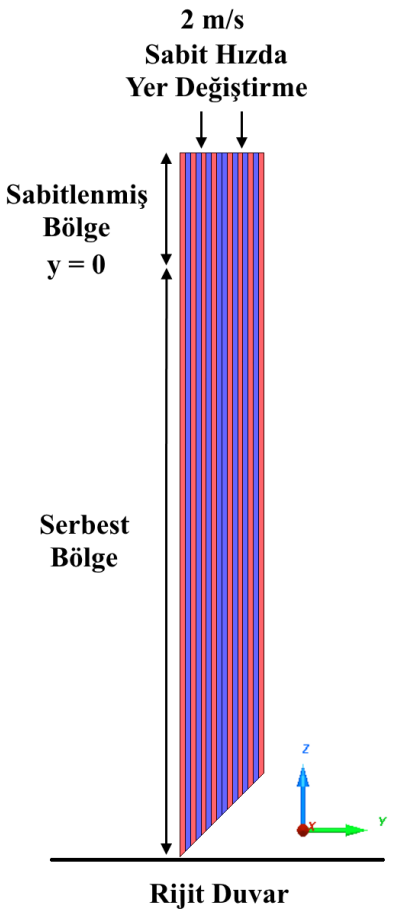
6.2.4.4 Sınır koşullarının belirlenmesi

Analizdeki sınır koşulları test şartları göz önüne alınarak belirlenmiştir. Yapılan statik ve dinamik testlerdeki test şartları ve sınır koşulları farklıdır. Bu sebeple iki durumda da farklı sınır şartları uygulanmıştır.

Statik model

Numune ile pistonun temas ettiği üst kısımdaki düğüm noktalarına sabit hız tanımlanmıştır. Hızın 0 ile 0,001 saniye arasında 2000 mm/s değerine doğrusal olarak çıkması, sonraki kısımda 2000 mm/s değerinde sabit devam etmesi sağlanmıştır. Böylece analiz sırasında dinamik etkilerden dolayı oluşabilecek kararlılık problemleri giderilmiştir. Bu ezilme hızı ile numunenin 10 mm ezilmesi için gerekli olan analiz süresi 0,055 s olarak belirlenmiştir. Bu süre modelin 10 mm ezilmesi için yeterli olmuştur.

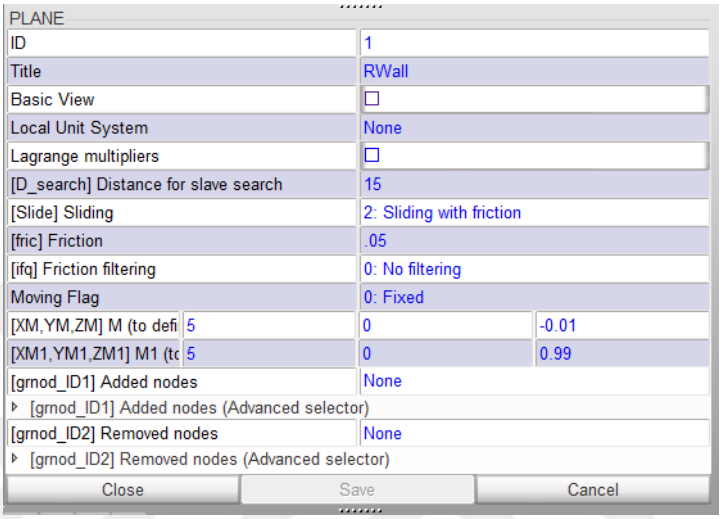
Test şartlarında olduğu gibi modelin üstten 5 mm uzunluğundaki kısmı Şekil 6.53'teki gibi sabitlenmiştir. Bu işlem sabitlenecek düğüm noktalarının yanal yönde (y ekseni) hareketi engellenerek gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.53 : RADIOSS için hazırlanan statik modelin sınır koşulları.

Analizde kullanılan model, 10 mm genişliğindeki numunenin 0,25 mm'lik bir dilimidir. Bu sebeple modelin genişlik doğrultusundaki (x ekseni) yanal hareketi kısıtlanmıştır.

Statik ve dinamik analizlerde kullanılan rijit duvar parametreleri Şekil 6.54'te görülmektedir. Rijit duvardaki sürtünme değerleri değiştirilerek analizler tekrarlanmıştır.



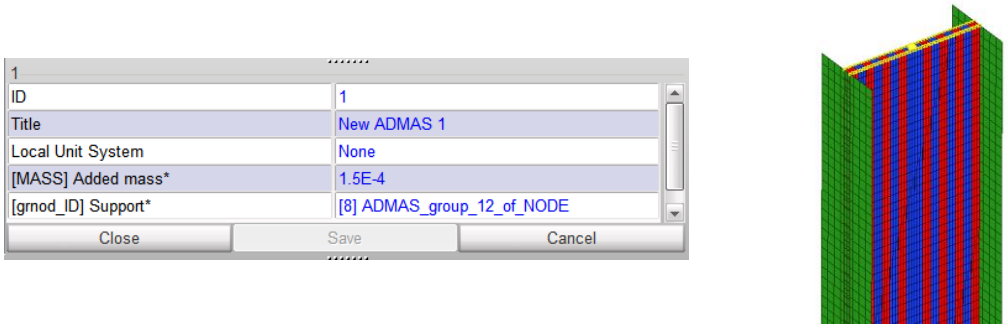
Şekil 6.54 : RADIOSS rijit duvar tanımlamasında kullanılan parametreler.

Rijit duvar tanımlanırken duvara temas eden yüzeyin duvar üzerine yapıştığı ya da sürtünme ile kaydığı seçeneklerden bir tanesi seçilebilmektedir. Bu çalışmada rijit duvara temas eden elemanların yüzey üzerinden belirli sürtünme katsayısı ile kayması sağlanmıştır.

Dinamik model

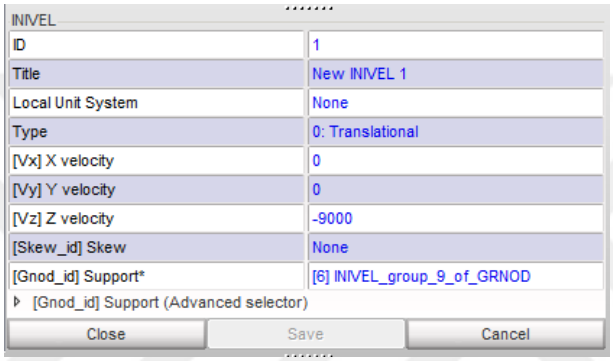
Test düzeneğindeki numunenin yerleştirildiği kılavuzlar iki boyutlu kabuk elemanlarla rijit ve hareket etmeyecek şekilde modellenmiştir. Bunun için kabuk elemanlarla modellenen kılavuzlar rijit RBE2 elemanlarla rijit hale getirilmiş, hareket etmemeleri için de RBE2 elemanlar ankastre olarak sabitlenmiştir. Modellenen numune kılavuzların arasından kayarak zemindeki rijit duvar ile temas etmektedir.

Model, deneysel çalışmada kullanılan 60 mm genişliğindeki numunenin 0,25 mm genişliğinde bir dilimidir. Deneysel çalışmadaki numune üzerinde bulunan 36 kg ağırlığındaki çelik silindirin ağırlığı model üzerindeki düğüm noktalarına 0,15 kg noktasal ağırlık eklenerek Şekil 6.55'te görüldüğü gibi modellenmiştir. Bu ekrana yazılan ağırlık değeri seçilen düğüm noktalarına eşit bir şekilde paylaştırılmaktadır.



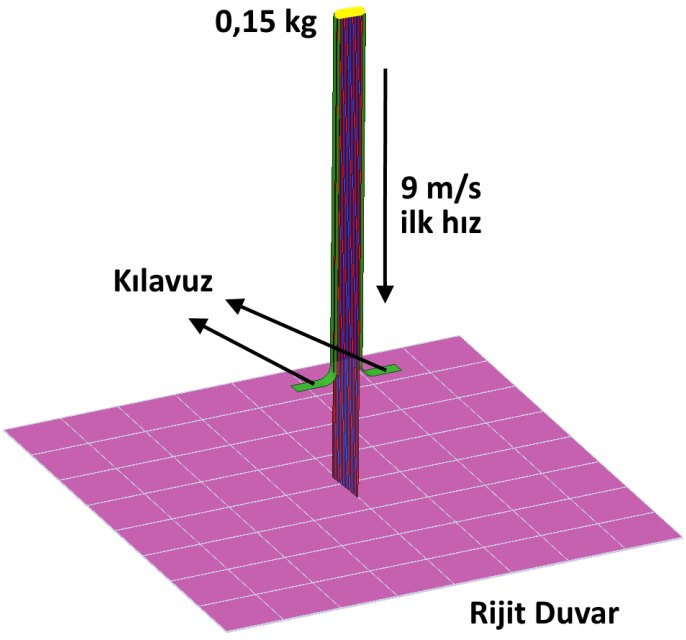
Şekil 6.55 : Çelik silindirin kütlesinin tanımlanması.

Modeldeki elemanların tamamına analiz başlangıcında Şekil 6.56'daki ekrandan düşey yönde 9 m/s değerinde ilk hız tanımlanmıştır.



Şekil 6.56 : İlk hız tanımlamasında kullanılan parametreler.

Sınır koşulları tanımlandıktan sonra analize hazırlanan model Şekil 6.57'de görülmektedir. Analiz süresi 0,0025 s olarak belirlenmiştir. Tanımlanan hız ile numune bu sürede 20 mm uzunluğundan daha fazla ezilmektedir.



Şekil 6.57 : RADIOSS için hazırlanan dinamik modelin sınır koşulları.

7. ANALİZ SONUÇLARI VE KARŞILAŞTIRMALAR

Gerçekleştirilen analizlerin sonuçları kullanılan yazılımlara, malzeme modellerine ve hasar kriterlerine göre kategorilere ayrılmıştır. Analiz sonuçları kuvvet-yer değiştirme grafiği, maksimum reaksiyon kuvvetleri, sönümlenen enerji miktarları ve çıkan sonucun son ekran görüntüsü olarak paylaşılmıştır. Sonuçlar incelenirken kuvvet-yer değiştirme grafikleri çıkarılarak test sonuçları ile analiz sonuçlarının benzerliğine bakılmıştır. Elde edilen grafiklerdeki maksimum reaksiyon kuvvetinin ve sönümlenen enerji miktarlarının test sonuçlarıyla yakınsamasına dikkat edilmiştir. Bu grafiklerde test sonuçlarıyla olan fark yüzde olarak hesaplanmıştır. İki adet test sonucu olduğundan yüzde hata hesaplamasında analiz sonucuna yakın olan test sonucu göz önüne alınmıştır. Analiz sonuçlarının ekran görüntüleri paylaşılarak testteki numunenin davranışı ile analizlerdeki davranışın örtüşüp örtüşmediği değerlendirilmiştir. Tüm analiz sonuçları HyperView ile incelenmiştir.

7.1 ABAQUS Analiz Sonuçları

ABAQUS, kompozit malzemelerin hasar analizlerinde kullanılmak üzere Hashin-Rotem ve Hashin hasar kriterlerini sunmaktadır. Tabakaların birbirleri arasındaki ve tabaka ile zemin arasındaki sürtünme katsayısı aynı kabul edilerek 0,15-0,30 arasında değişen değerler seçilmiştir. Delaminasyon modellemesi için Benzeggagh-Kenane kriteri ve üstel kanun kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar ayrı ayrı incelenmiştir.

ABAQUS analiz sonuçlarını .odb uzantılı dosyaya yazmaktadır. Bu dosya içerisinde kullanıcının yazılımdan istediği tüm çıktılar yer almaktadır. Kuvvet-yer değiştirme grafiğinin çizdirilmesi için de yine bu dosyanın açılması gerekmektedir.

7.1.1 Statik analiz sonuçları

ABAQUS ile elde edilen statik analiz sonuçları Şekil A.1-A.8 ve Çizelge A.1-A.4'te görülmektedir.

7.1.2 Dinamik analiz sonuçları

ABAQUS ile elde edilen dinamik analiz sonuçları Şekil A.9-A.16 ve Çizelge A.5-A.8'de görülmektedir.

7.2 LS-DYNA Analiz Sonuçları

LS-DYNA, kompozit malzemelerin hasar analizlerinde kullanılmak üzere MAT 22, MAT 54, MAT 55 ve MAT 59 malzeme modellerini sunmaktadır. Tabakaların birbirleri arasındaki ve tabaka ile zemin arasındaki sürtünme katsayısı olarak 0,05-0,25 arasında değişen değerler seçilmiştir. Hasar geriniminin tanımlanmasının gerektiği malzeme modellerinde 0,09, 0,01 ve 0,11 değerleri kullanılmıştır. Delaminasyon modellemesi için MAT 138 malzeme modeli kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar ayrı ayrı incelenmiştir.

LS-DYNA analiz sonuçları d3plot isimli dosyaya yazılmaktadır. Analiz görüntüleri için bu dosya kullanılmaktadır. Kullanıcının belirttiği sıklıkta grafik çizdirilmesi için yazılan veriler binary formatta binout isimli dosya içinde bulunmaktadır. Analiz sonuçları HyperView ile incelenmiştir.

7.2.1 Statik analiz sonuçları

LS-DYNA ile elde edilen statik analiz sonuçları Şekil B.1-B.12 ve Çizelge B.1-B.6'da görülmektedir.

7.2.2 Dinamik analiz sonuçları

LS-DYNA ile elde edilen dinamik analiz sonuçları Şekil B.13-B.24 ve Çizelge B.7-B.12'de görülmektedir.

7.3 RADIOSS Analiz Sonuçları

RADIOSS, kompozit malzemelerin hasar analizlerinde kullanılmak üzere üç boyutlu katı elemanlarla çalışabilen Hashin ve Puck hasar kriteri ile Tsai-Wu hasar kriterini kullanan LAW 12 malzeme modelini sunmaktadır. Tabakaların birbirleri arasındaki ve tabaka ile zemin arasındaki sürtünme katsayısı olarak 0,05-0,25 arasında değişen değerler seçilmiştir. Hasar geriniminin tanımlanmasının gerektiği malzeme modellerinde 0,01 değeri kullanılmıştır. Delaminasyon modellemesi için LAW 59

malzeme modeli ile CONNECT hasar kriteri kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar ayrı ayrı incelenmiştir.

RADIOSS analiz sonuçlarını A001, A002 vs. uzantılı animasyon dosyalarına yazmaktadır. Analiz bittiğinde bu animasyon dosyalarını sıkıştırarak .h3d uzantılı bir sonuç dosyası oluşturmaktadır. Analiz görüntülerine bu dosyalardan bakılabilmektedir. Kullanıcının yazılımdan istediği grafikler ise yine kullanıcının belirttiği sıklıkla .T01 uzantılı dosyaya yazılmaktadır. Analiz sonuçları HyperView ile incelenmiştir.

7.3.1 Statik analiz sonuçları

RADIOSS ile elde edilen statik analiz sonuçları Şekil C.1-C.10 ve Çizelge C.1-C.5'te görülmektedir.

7.3.2 Dinamik analiz sonuçları

RADIOSS ile elde edilen dinamik analiz sonuçları Şekil C.11-C.20 ve Çizelge C.6-C.10'da görülmektedir.

8. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada tek eksenli karbon fiber takviyeli polimer kompozit plakanın eksenel ezilme durumundaki hasar davranışı ABAQUS, LS-DYNA ve RADIOSS yazılımları kullanılarak incelenmiştir. Çalışmada farklı malzeme modelleri ve hasar kriterleri kullanılmıştır. Farklı sürtünme katsayıları ve kopma gerinimi değerleri ile elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri, maksimum reaksiyon kuvvetleri, sönümlenen enerji miktarları ve hasar davranışları kıyaslanmıştır.

Analiz sonuçları incelendiğinde seçilen malzeme modellerinin ya da hasar kriterlerinin yanı sıra eleman formülasyonlarının, yüzey ilişkisi parametrelerinin ve analiz zaman adımının da sonuçları oldukça etkilediği görülmüştür. Modelleme yapılırken kullanılan sürekli kabuk elemanların ya da katı elemanların seçiminde yazılımlara göre eleman formülasyonlarının tanımlamaları ve analiz sonuçları dikkatle incelenerek karar verilmelidir. Sürekli kabuk elemanlar görünüş olarak katı elemanlara benzemesine rağmen hesaplamaları kabuk elemanlar gibi yapmaktadır. Ayrıca indirgenmiş integrasyon noktalı elemanlar ya da tam integrasyon noktalı elemanlar avantajları ya da dezavantajlarıyla analiz sonuçlarını etkilemektedir. Modeldeki tabakalar analiz süresince birbirleriyle etkileşim içinde bulunduğundan yüzey ilişkisi bu tür çalışmalarda büyük rol oynamaktadır. Yüzey ilişkisi tanımlaması yapılırken deneysel yöntemlerle elde edilemeyen birtakım parametreler dikkatli şekilde seçilmelidir. Zaman adımının çok düşük seçilmesi uzun analiz sürelerine, çok yüksek seçilmesi ise modelin kütlesinin fazla artmasıyla stabil olmayan sonuçlara, analiz hatalarına veya gerçekdışı sonuçların ortaya çıkmasına sebep olmaktadır.

Ölçülen reaksiyon kuvvetinin değeri hasarın miktarı ve şekline göre değişmektedir. Düşük sürtünme katsayısı tabakaların fazla hasara uğramadan zeminden kaymasına, delaminasyon ile birlikte düşük enerji sönümleme modlarından olan tabaka ayrılması davranışı sergilemesine sebep olmaktadır. Yüksek sürtünme katsayısı ise tabakaların zemindeki kayma hareketine engel olmakta, tabakalar zemin üzerine yığılarak aynı anda fazla hasarın oluşmasına sebep olmaktadır. Bu sebeple, analizde ölçülen reaksiyon kuvveti testte ölçülen reaksiyon kuvvetinden daha yüksek olmaktadır.

Sönümlenen enerji miktarı da sürtünme kuvvetinden etkilenen bir diğer değişkendir. Analizde kullanılacak optimum sürtünme katsayısı değerinin tespiti analiz sonuçlarının doğruluğu açısından önemlidir. Doğru sürtünme katsayısı için analiz sonunda elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafiklerinden, maksimum reaksiyon kuvvetinden, sönümlenen enerji miktarından ve numunenin hasar davranışından yararlanılmıştır.

Yazılımlarda bazıları testler ile elde edilebilen, bazılarıysa parametrik analiz çalışmalarıyla bulunabilen değerler yer almaktadır. Bu değerlerin değiştirilmesi analiz sonuçlarını oldukça etkilemektedir. Ayrıca yazılımların eleman formülasyonları ve yüzey ilişkisi algoritmaları gibi birbirinden ayrılan tarafları bulunmaktadır. Bu sebeple yüzey ilişkilerinin çok fazla çalıştığı, malzeme modellerinin ve eleman davranışlarının çok önemli olduğu bu tür analiz çalışmalarında farklı yazılımlar kullanılarak aynı parametrelerle gerçekleştirilen analizler aynı sonuçları vermeyebilmektedir.

ABAQUS ile gerçekleştirilen statik analiz sonuçlarında Hashin-Rotem ve Hashin hasar kriteri ile yapılan analizler arasında ciddi bir fark olmamakla birlikte Hashin-Rotem hasar kriterinin kullanıldığı, delaminasyon hasarı için üstel kriterin tercih edildiği ve sürtünme katsayısı olarak 0,3 değeri seçilen analiz test sonuçlarına en çok yaklaşmıştır (Şekil A.3-A4). Şekil A.4'te gösterilen analiz sonundaki parçanın hasar davranışı incelendiğinde Şekil 6.9'da görülen test görüntüleriyle benzerlik gösterdiği, Çizelge A.2'de belirtilen maksimum reaksiyon kuvvetinin testte ölçülen değere %4,4 farkla yaklaştığı ve sönümlenen enerjinin %9,3 farkla yaklaştığı görülmüştür. Elde edilen analiz sonuçları incelendiğinde delaminasyon modellemesinde kullanılan Benzeggagh-Kenane ve üstel kriter ile sürtünme katsayısı analiz sonuçlarının test sonuçları ile yakınsamasında belirleyici olmuştur.

ABAQUS ile gerçekleştirilmiş dinamik analiz sonuçlarında Hashin-Rotem hasar kriterinin kullanıldığı, delaminasyon hasarı için üstel kriterin tercih edildiği ve sürtünme katsayısı olarak 0,3 seçilen analiz test sonuçlarına en çok yaklaşmıştır (Şekil A.11-A.12). Şekil A.12'de yer alan analiz sonundaki parçanın hasar davranışı incelendiğinde Şekil 6.9'da görülen test görüntüleriyle benzerlik gösterdiği, Çizelge A.6'da yer alan maksimum reaksiyon kuvvetinin testte ölçülen değere %14,4 farkla yaklaştığı ve sönümlenen enerjinin %5 farkla yaklaştığı görülmüştür.

Statik ve dinamik analizler bir arada incelendiğinde iki senaryo için de en gerçekçi sonucu Hashin-Rotem hasar kriteri vermiştir. Hashin-Rotem hasar kriteri ve üstel kriterin bir arada kullanıldığı, sürtünme katsayısı olarak 0,3 seçilen analizler hem statik hem de dinamik senaryolarda test sonuçlarıyla kabul edilebilir derecede yaklaşmıştır. Delaminasyon hasarı için üstel kriter Benzeggagh-Kenane kriterine göre daha başarılı olmuştur.

LS-DYNA ile gerçekleştirilmiş statik analiz sonuçlarında kuvvet-yer değiştirme grafiği, maksimum reaksiyon kuvveti, sönümlenen enerji miktarı ve analiz sonundaki hasar davranışı birlikte incelendiğinde MAT 55 malzeme modelinin 0,20 sürtünme katsayısı ile genel olarak daha gerçekçi sonuç verdiği görülmüştür (Şekil B.9-B.10). Şekil B.10'da yer alan analiz sonundaki numunenin hasar davranışı incelendiğinde Şekil 6.9'da görülen test görüntüleriyle benzerlik gösterdiği, Çizelge B.5'te yer alan maksimum reaksiyon kuvvetinin testte ölçülen değere %8,4 farkla yaklaştığı ve sönümlenen enerjinin %3 farkla yaklaştığı görülmüştür. MAT 22 malzeme modeli, 0,20 sürtünme katsayısı ve 0,09 kopma gerinimi kullanıldığında ise kuvvet-yer değiştirme davranışı test ile oldukça yakınlaşmaktadır (Şekil B.1). Maksimum reaksiyon kuvveti %1,9, sönümlenen enerji miktarı %13,7 farkla test sonuçları ile uyuşmuştur (Çizelge B.1). Ancak ezilme sonrası malzeme görüntüsü test sonucu ile bir miktar farklıdır (Şekil B.2). Analiz parametrelerinde yapılacak çalışmalar ile bu seçeneğin test sonuçlarına daha fazla yakınlaşabileceği düşünülmüştür.

LS-DYNA ile gerçekleştirilmiş dinamik analiz sonuçlarında test sonuçlarına en yakın sonucu MAT 55 malzeme modelinin 0,25 sürtünme katsayısı ile kullanıldığı durumda elde edilmiştir (Şekil B.21-B.22). Çizelge B.11'e bakıldığında maksimum reaksiyon kuvvetinin %9,7 farkla, sönümlenen enerji miktarı %2,2 farkla test sonucuna yaklaştığı görülmüştür. Şekil B.22'ye göre numunenin hasar davranışı test sonuçlarıyla benzerlik göstermektedir. MAT22 malzeme modeli, 0,20 sürtünme katsayısı ve 0,11 kopma gerinimi kullanıldığında da test sonuçlarına yakınlık görülmektedir (Şekil B.17-B.18). Maksimum reaksiyon kuvveti %1, sönümlenen enerji miktarı %25 farkla test sonuçları ile uyuşmuştur (Çizelge B.9). Sönümlenen enerji miktarındaki %25 fark analizde kopan parçaların hasarı etkilememesinden kaynaklanmaktadır. Ancak hasarın öngörülebilmesi açısından bu malzeme modelinin de doğru sonuç çıkardığı düşünülmüştür.

LS-DYNA ile MAT 59 malzeme modeli statik ve dinamik senaryolardaki analizlerde test sonuçlarından çok uzak sonuçlar vermiştir. MAT 59 malzeme modelinde hasara uğrayan elemanın rijitlik matrisi hasar sonrasındaki 100 zaman adımında kademeli olarak sıfırlanarak ilgili eleman analizden silinmektedir. Hasar sonrasında bir süre daha analize devam etmesi gereken, tabakaların hasar davranışında belirleyici olacak hasarlı elemanlar bu yöntem ile erkenden analizden silinmiş olmaktadır. Bu sebeple tabaka ayrılması gözlemlenememekte, zemine temas eden elemanlar hasara uğrayıp erken silinmekte, reaksiyon kuvveti düşük bir değerde kalmaktadır.

Statik ve dinamik senaryolar bir arada göz önüne alındığında LS-DYNA ile MAT 55 malzeme modeli hem statik hem de dinamik analizlerde oldukça gerçekçi sonuçlar vermiştir. Statik analizlerde 0,2 sürtünme katsayısı daha doğru sonuç verirken dinamik analizlerde 0,25 sürtünme katsayısı daha başarılı olmuştur.

RADIOSS ile analizler kopma gerinmesi tanımlanarak ve tanımlanmadan yapılmıştır. Hasara uğrayan eleman eğer kopma gerinmesi tanımlı değilse sabit gerilme değerinde şekil değiştirmeye devam etmektedir. Kopma gerinmesinin tanımlanması durumunda ise ilgili eleman bu gerinme değerine kadar şekil değiştirdikten sonra analizden silinmektedir. Statik analiz sonuçlarına göre Puck hasar kriteri Hashin hasar kriterine göre bir miktar daha yakın yakın sonuç vermiştir. Statik analizdeki kuvvet-yer değiştirme grafiğine (Şekil C.5) ve maksimum reaksiyon kuvvetine ve sönümlenen enerji miktarına (Çizelge C.3) bakıldığında test sonuçlarına en yakın sonuç Puck hasar kriteri ile 0,05 sürtünme katsayısının kullanıldığı durumda elde edilmiştir. Analiz sonundaki hasar görünümünde eleman silinmesi olmamasından dolayı test sonuçlarından farklı bir davranış görülmektedir (Şekil C.6). Maksimum reaksiyon kuvveti test sonuçlarından %6,6 farkla, sönümlenen enerji miktarı ise %1,5 farkla elde edilmiştir (Çizelge C.3). Hasar gerinmesinin tanımlanması sonuçları büyük ölçüde değiştirecek bir etki yaratmamıştır. Tsai-Wu hasar kriteri de 0,05 sürtünme katsayısı kullanıldığında test sonuçlarına yaklaşmıştır (Şekil C.9-C.10 ve Çizelge C.5).

RADIOSS ile gerçekleştirilen dinamik analiz sonuçlarına göre kuvvet-yer değiştirme grafiği incelendiğinde 0,1 hasar gerinmesinin tanımlandığı, 0,15 sürtünme katsayısının kullanıldığı Hashin hasar kriteri test sonuçlarına oldukça yaklaşmıştır (Şekil C.13-C.14). Bu durumda maksimum reaksiyon kuvvetinde %1,4 fark, sönümlenen enerji miktarında ise %47,4 fark oluşmuştur (Çizelge C.7). Bunun

sebebi yazılımın gerçekçi bir hasar sonrası hesaplaması sunmamış olmasındandır. Şekil C.14'te görüldüğü gibi elemanların analizden silinmemesinden dolayı hasar davranışı test sonuçlarına benzememiştir. Puck hasar kriteri Hashin hasar kriteri ile benzer sonuçlar vermesine rağmen dinamik analizlerde çok başarılı olamamıştır. Tsai-Wu hasar kriteri de dinamik senaryoda statik senaryodaki gibi bir doğruluk göstermemiştir.

RADIOSS kullanılarak gerçekleştirilen statik ve dinamik analiz senaryoları bir arada düşünüldüğünde iki senaryoda da doğru sonuç veren hasar kriterini ve sürtünme katsayısını belirlemek zor olmaktadır. Statik senaryoda Puck hasar kriteri ve 0,1 sürtünme katsayısı ile doğru sonuçlar elde edilirken dinamik senaryoda Hashin hasar kriterinin ve 0,15 sürtünme katsayısının kullanılması gerekmektedir. RADIOSS yazılımının bu çalışmada görülen en büyük eksikliği hasar sonrası elemanların mukavemetindeki düşüşü gerçekçi bir şekilde hesaplayacak seçeneğin sunulmamış olmasıdır.

Analiz programları bir arada düşünüldüğünde en başarılı yazılımın ABAQUS olduğu, LS-DYNA'nın daha detaylı parametrik çalışmalarla test sonuçlarına daha çok yaklaşabileceği ve test sonuçlarına en uzak sonuç veren yazılımın ise RADIOSS olduğu görülmüştür.

Gelecek çalışmalarda bu tez çalışmasından elde edilen verilerden faydalanılarak en iyi sonuçları veren ABAQUS ile literatürde bulunan hasar kriterleri kod yazılarak, yazılım içerisinde kullanılarak incelenebilecektir. Farklı hasar senaryolarında farklı hasar kriterleri aynı yazılımla kıyaslanarak en doğru sonucu veren hasar kriteri bu şekilde seçilmeye çalışılacaktır. Mevcut hasar kriterlerinin hesaplamalardaki performansları incelenerek kriterlerdeki eksiklikler hakkında yorum yapılabilecektir.

KAYNAKLAR

[1] **Farley, G. L., Jones, R. M.** (1989). Energy-absorption capability of composite tubes and beams. *NASA TM-101634*.

[2] **Mamalis, A., Robinson, M., Manolakos, D., Demosthenous, G., Ioannidis, M., Carruthers, J.** (1997). Crashworthy capability of composite material structures. *Compos Struct 1997;37* (2):109–34.

[3] **Pinho, S. T., Camanho, P. P., de Moura, M. F.** (2004). Numerical simulation of the crushing process of composite materials. *Int J Crash 2004;9* (3):263–76.

[4] **Israr, H. A., Rivallant, S., Bouvet, C., Barrau, J. J.** (2014). Finite element simulation of $0^o/90^o$ CFRP laminated plates subjected to crushing using a free-face-crushing concept, *Composites: Part A 62* (2014) 16–25.

[5] **Israr, H. A., Rivallant, S., Barrau, J. J.** (2013). Experimental investigation on mean crushing stress characterization of carbon-epoxy plies under compressive crushing mode. *Compos Struct 2013*;96:357–64.

[6] **Guillon, D., Rivallant, S., Barrau, J. J., Petiot, C., Thevenet, P., Malherbe, B.** (2009). Experimental and numerical study of the splaying mode crush of CFRP laminates. *ICCM-17*, Edinburgh, UK.

[7] **Duong, A. V., Rivallant, S., Barrau, J. J., Petiot, C., Malherbe, B.** (2010). Influence of speed on the crushing behavior of composite plates. *ACCM-7*, Taipei, Taiwan.

[8] **Chiu, L. N. S., Falzon, B. G., Ruan, D., Xu, S., Thomson, R. S., Chen, B., Yan, W.** (2015). "Crush Responses of Composite Cylinder under Quasi-static and Dynamic Loading." *Composite Structures* 131 : 90-98.

[9] **Chiu, L. N. S., Falzon, B. G., Boman, R., Chen, B., Yan, W.** (2015). "Finite Element Modelling of Composite Structures under Crushing Load." *Composite Structures* 131 (2015): 215-28.

[10] **Huang, J., Wang, X.** (2009). "Numerical and Experimental Investigations on the Axial Crushing Response of Composite Tubes." *Composite Structures* 91.2: 222-28.

[11] **Siromani, D., Awerbuch, J., Tan T.** (2014). "Finite Element Modeling of the Crushing Behavior of Thin-walled CFRP Tubes under Axial Compression." *Composites Part B: Engineering* 64 : 50-58.

[12] **Feraboli, P., Wade, B., Deleo, F., Rassaian, M., Higgins, M., Byar, A.** (2011). "LS-DYNA MAT54 Modeling of the Axial Crushing of a Composite Tape Sinusoidal Specimen." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 42.11 : 1809-825.

[13] **Feraboli, P.** (2008). "Development of a Corrugated Test Specimen for Composite Materials Energy Absorption." *Journal of Composite Materials* 42.3 : 229-56.

[14] **Sun, C. T., Quirm, B. J., TaG, J., Oplinger, D. W.** (1996). Comparative Evaluation of Failure Analysis Methods for Composite Laminates. DOT/FAA/AR-95/109.

[15] **Lampani, L.** (2011). "Finite Element Analysis of Delamination of a Composite Component with the Cohesive Zone Model Technique." *Engineering Computations* 28.1 : 30-46.

[16] **Uguen, A., Zubillaga, L., Turon, A., Carrere, N.** (2014). Comparison Of Cohesive Zone Models Used To Predict Delamination Initiated From Free-Edges : Validation Against Experimental Results. *ECCM-16th European Conference On Composite Materials*, Seville, Spain.

[17] **Dogan, F., Hadavinia, H., Donchev, T., Bhonge, P.** (2012). "Delamination of Impacted Composite Structures by Cohesive Zone Interface Elements and Tiebreak Contact." *Open Engineering* 2.4.

[18] **Ilyas, M., Espinosa, Ch., Lachaud, F., Salaün M.** (2009). "Dynamic Delamination Mpodeling Using Cohesive Finite Elements." *DYMAT 2009 - 9th International Conferences on the Mechanical and Physical Behaviour of Materials under Dynamic Loading.*

[19] **Url-1** <http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr_4_06/AERO_Q406_article4.pdf>, erişim tarihi 22.08.2016.

[20] **Daniel, I. M., Ishai, O.** (1994). *Engineering Mechanics Of Composite Materials*. New York: Oxford UP.

[21] **Harris, B.** (1999). *Engineering Composite Materials*. London, UK.: The Institute of Materials.

[22] **Kaw, K. A.** (2006). *Mechanics of Composite Materials, 2nd ed.*, Boca Raton Fla. : Taylor & Francis, (s.49).

[23] **Eren, Y.,** (2007). *Kompozit yapıların darbe etkisinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi.

[24] **Kamath, M. G.** (2004). *Processing and evaluation of cotton-based composites for automotive and other applications*. M.Sc Thesis, University of Tennessee, USA.

[25] **Jones, R. M.** (1999). Mechanics of composite materials, Taylor & Francis Inc., PA

[26] **Url-3** <http://www.gurit.com/files/documents/guide-to-composites-v5pdf.pdf>, erişim tarihi 15.11.2013.

[27] **Jiménez, M. A., Miravete, A., Larrode, E., Revuelta, D.** (2000). Effect of trigger geometry on energy absorption in composite profiles, *Composite Structures* (Vol. 48, no. 1-3, pp. 107-111).

[28] **Hull, D.** (1991). A unified approach to progressive crushing of fibre-reinforced composite tubes. *Composites Science and Technology 40.4*, 377–421.

[29] **Jacob, G. C., Fellers, J. F., Starbuck, J. M., Simunovic, S.** (2004). "Crashworthiness of Automotive Composite Material Systems." *Journal of Applied Polymer Science J. Appl. Polym. Sci.* 92.5: 3218-225.

[30] **Michael, D., Garner, J.** (2009). *Crush testing, characterizing, and modeling the crashworthiness of composite laminates* (PhD thesis). The University of Utah, Utah.

[31] **Gay, D.,** (2015). *Composite Materials Design and Applications 3rd Ed.*, Boca Raton Fla. : Taylor & Francis.

[32] **Camanho, P. P.** (2002). Failure Criteria For Fibre-Reinforced Polymer Composites, Universidade do Porto, Porto, Potugal.

[33] **Datoo M. H.** (1991). Mechanics of Fibrous Composites, Elsevier Applied Science.

[34] **Hill, R. (1950).** *The Mathematical Theory of Plasticity*, Oxford University Press, London, England.

[35] **Daniel, I. M., Liber, T.** (1975). *Lamination Residual Stresses in Fiber Composites*, NASA CR-134826, NASA-Lewis Research Center, Cleveland, OH, 1975.

[36] **Daniel, I. M., Liber T., Chamis, C. C.** (1975). "Measurement of Residual Strains in Boron/Epoxy and Glass/Epoxy Laminates", *Composite Reliability*, ASTM STP 580, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 340-351.

[37] **Gol'denblat, I., Kopnov, V. A.** (1966). Strength of glass reinforced plastic in the complex stress state. *Polymer Mechanics*, vol. 1, pp. 54–60.

[38] **Tsai, S. W., Wu, E. M.** (1971). A General Theory of Strength for Anisotropic Materials, *Journal of Composite Materials*, 5, 58-80.

[39] **Hoffman, O.** (1967). "The Brittle Strength of Orthotropic Materials." *Journal of Composite Materials* 1.2: 200-06.

[40] **Hashin, Z., Rotem, A.** (1973). "A Fatigue Failure Criterion for Fiber Reinforced Materials," *Journal of Composite Materials*, 7, 448–464.

[41] **Hashin, Z.** (1980), "Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites," *Journal of Applied Mechanics*, 47, 329–344.

[42] **Puck, A., Schneider, W.** (1969). On failure mechanisms and failure criteria of filament-wound glass-fibre/resin composites. *Plastics and Polymers*, 37(127):33 – 44.

[43] **Puck, A.** (1992). Fracture criteria for highly stressed fibre-plastic composites which meet requirements of design practice. *Kunststoffe, German plastics*, 82(2):149 – 155.

[44] **Puck, A.** (1996). Festigkeitsanalyse Von Faser-Matrix-Laminaten: Modelle Für Die Praxis. München: Hanser.

[45] **Gauthier, L.** (2010). *Modelling of High Velocity Impact on Composite Materials for Airframe Structures Application (PhD thesis)*. Université Laval.

[46] **Puck, A., Kopp J., Knops M.** (2002). "Guidelines for the Determination of the Parameters in Puck's Action Plane Strength Criterion." *Composites Science and Technology* 62 (3):371-78.

[47] **Chang, F.-K. and Chang, K.-Y.** (1987a), "Post-Failure Analysis of Bolted Composite Joints in Tension or Shear-Out Mode Failure," *Journal of Composite Materials*, 21, 809–833.

[48] **Chang, F.-K. and Chang, K.-Y.** (1987b), "A Progressive Damage Model for Laminated Composites Containing Stress Concentrations," *Journal of Composite Materials*, 21, 834–855.

[49] **Chai, H., Babcock, C. D., Knauss, W. G.** (1981). One dimensional modeling of failure in laminated plates by delamination buckling. *International Journal of Solids and Structures*, 17(11):1069–1083.

[50] **Barbero, E. J.** (2013). *Finite Element Analysis of Composite Materials Using Abaqus*. Boca Raton, FL: CRC/Taylor & Francis Group.

[51] **Kar, R. J.** (1992). *Composite failure analysis handbook*, Technical Handbook Part 2. Atlas of Fractographs, Northrop Aircraft Div. Technical Reports.

[52] **Benzeggagh, M. L., Kenane, M.,** (1996). Measurement of Mixed-Mode Delamination Fracture Toughness of Unidirectional Glass/Epoxy Composites with Mixed-Mode Bending Apparatus, *Composites Science and Technology*, vol. 56, pp. 439–449.

[53] **De Borst, R.** (2003). Numerical aspects of cohesive-zone models. *Engineering Fracture Mechanics*, 70(14):1743-1757.

[54] **Gibson, R. F.** (2011). *Principles of Composite Material Mechanics*. 3rd ed. Boca Raton, FL: CRC/Taylor & Francis Group.

[55] **Ranaweera, P. S.** (2010). *Prediction of Delamination in Composite Laminates under Quasi-Static and Fatigue Loadings with Local/Non-local Damage Evolution (Master thesis)*. Ecole Centrale de Nantes.

[56] **Reeder, J. R., Crews, J. H., Jr.** (1990). Mixed mode bending method for delamination testing. *AIAA Journal*, 28(7), 1270–1276.

[57] **Reeder, J. R., Crews, J. H., Jr.** (1992). Redesign of the mixed mode bending delamination test to reduce nonlinear effects. *Journal of Composites Technology and Research*, 14(1), 12–19.

[58] **Gonçalves J. P. M., de Moura M. F. S. F., de Castro P. T., Marques A. T.** (2000). Interface element including point-to-surface constraints for three-dimensional problems with damage propagation. *Engineering Computations*. 17, 28.

[59] **Noorman, D. C.** (2014). *Cohesive Zone Modelling In Adhesively Bonded Joints Analysis On Crack Propagation In Adhesives And Adherends (Master thesis)*. Delft University of Technology, Netherlands.

[60] **Alfano, G.** (2006). On the influence of the shape of the interface law on the application of cohesive-zone models. *Composites Science and Technology* 66, 723.

[61] **Turon, A.** (2006), *Simulation of delamination in composites under quasi-static and fatigue loading using cohesive zone model. (Ph.D. thesis)*, Universitat de Girona.

[62] **Feraren, P., Jensen, H. M.** (2004). Cohesive zone modelling of interface fracture near flaws in adhesive joints. *Engineering Fracture Mechanics* 71, 2125.

[63] **Camanho, P. P., Davila, C. G., Pinho, S.** (2004). Fracture analysis of composite co-cured structural joints using decohesion elements. *Fatigue and fracture of engineering materials and structures*. 27, 745.

[64] **Dogan, F., Homayoun, H., Todor, D., Prasannakumar, B.** (2012). "Delamination of Impacted Composite Structures by Cohesive Zone Interface Elements and Tiebreak Contact." *Open Engineering* 2.4.

[65] **Tvergaard, V., Hutchinson, J. W.** (1992). The relation between crack growth resistance and fracture process parameters in elastic–plastic solids. *Mechanics and Physics of Solids*. 40, 1377.

[66] **Xu, X., Needleman, A.** (1994). Numerical simulations of fast crack growth in brittle solids. *J. Mechanics and Physics of Solids*. 42, 1397.

[67] **Camanho, P., Davila, C.** (2002). Mixed-mode decohesion finite elements for the simulation of delamination in composite materials. *NASA/TM-2002-211737*, pages 1–37.

[68] Abaqus 6.14-4 Analysis user's manual. Dassault Systèmes, 2014.

[69] **Chatla, P.,** (2014). *LS-Dyna for Crashworthiness of Composite Structures (Master thesis)*. University of Cincinnati, USA.

[70] Livermore Software Technology Corporation, LS-DYNA Keyword User's Manual Version 971, May 2007.

[71] **Park, C.-K., Kan, C.-D., Hollowell, W.T., Hill, S.I.** (2012). "Investigation of Opportunities for Lightweight Vehicles Using Advanced Plastics and Composites," *Report No. DOT HS 811 692*, Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration.

[72] Hyperworks user's manual. Altair, 2014.

[73] **Bouvet, C., Rivallant, S., Barrau, J.j.** (2012). "Low Velocity Impact Modeling in Composite Laminates Capturing Permanent Indentation." *Composites Science and Technology* 72.16: 1977-988.

[74] **Feraboli, P., Deleo, F., Garattoni, F.** (2007). "Efforts in the standardization of composite materials crashworthiness energy absorption", *22nd American Society for Composites Technical Conference*, Seattle.

[75] **Daniel, L., Hogg, P. J., Curtis, P. T.** (2000). "The crush behaviour of carbon fibre angle-ply reinforcement and the effect of interlaminar shear strength on energy absorption capability" *Composites: Part B 2000*;31:435-440.

[76] **Palanivelu, S., Paepegem, M. V., Degrieck, J., Vantomme, J., Kakogiannis, D., Ackeren, J. V.** (2011). Crushing and energy absorption performance of different geometrical shapes of small-scale glass/polyester composite tubes under quasi-static loading conditions. *Compos Struct 2011*;93:992–1007.

[77] **Israr, H. A., Rivallant, S., Barrau, J. J.** (2012). "Numerical modeling of [0°/90°] CFRP laminated plates under low velocity crushing", *8th Asian-Australasian Conference on Composite Materials (ACCM-8)*, Kuala Lumpur, Malaysia.

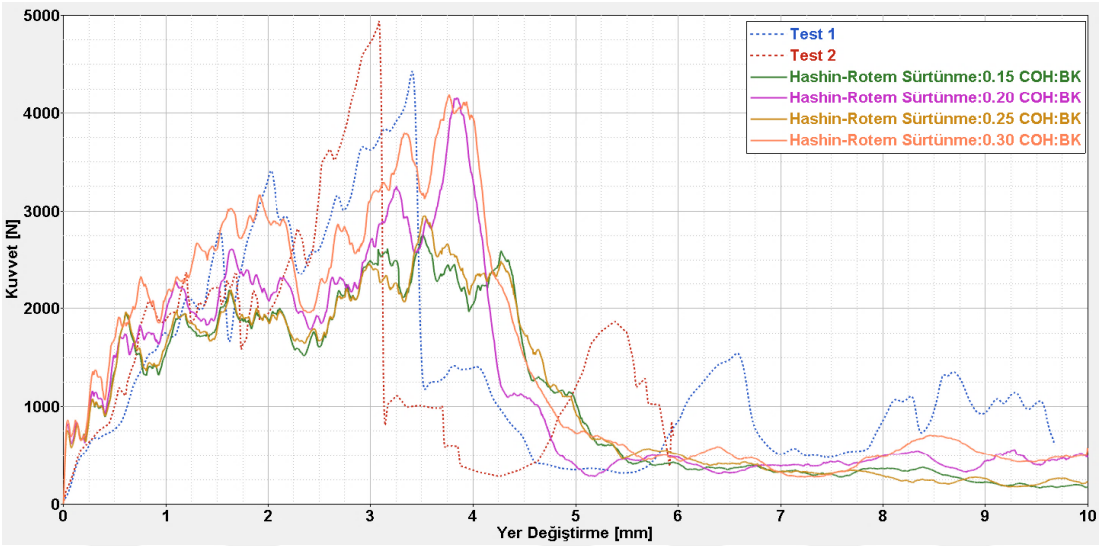
[78] **Hongkarnjanakul, N., Bouvet, C., Rivallant, S.** (2013). "Validation of Low Velocity Impact Modelling on Different Stacking Sequences of CFRP Laminates and Influence of Fibre Failure." *Composite Structures* 106: 549-59.

[79] **Tan, W., Falzon, B. G., & Price, M.** (2015). Predicting the crushing behaviour of composite material using highfidelity finite element modelling. *International Journal of Crashworthiness*, 20(1), 60-77.

EKLER

EK A: ABAQUS Analiz Sonuçları
EK B: LS-DYNA Analiz Sonuçları
EK C: RADIOSS Analiz Sonuçları

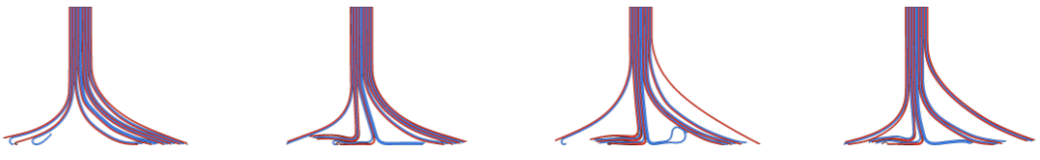
EK A



Şekil A.1 : Kompozit tabakalar için Hashin-Rotem hasar kriteri, yapışkan malzeme için Benzeggagh-Kenane kriteri ve farklı sürtünme katsayıları kullanılarak statik analizlerde elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri.

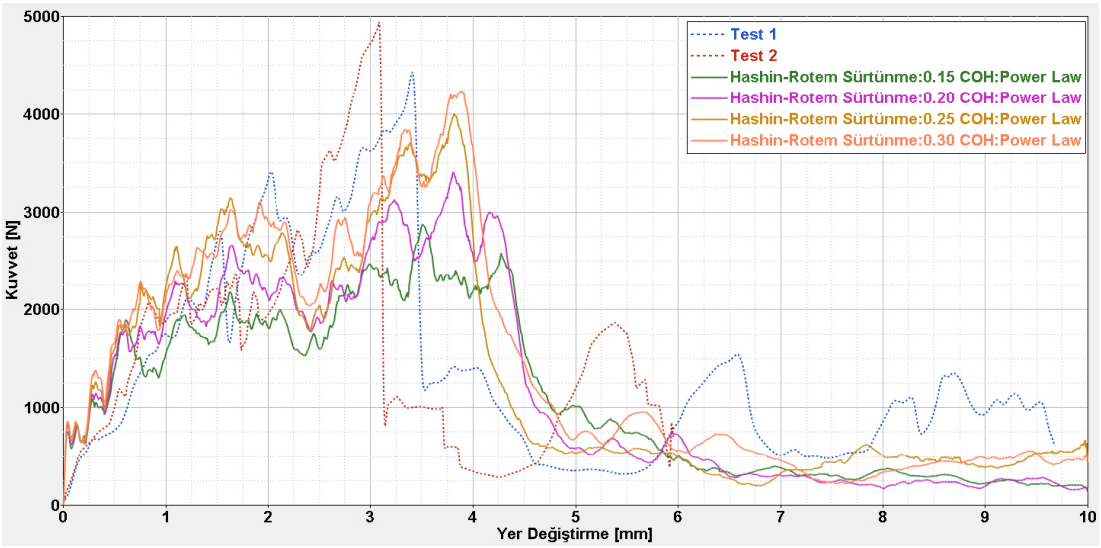
Çizelge A.1 : Hashin-Rotem ve Benzeggagh-Kenane kriterleri ile farklı sürtünme katsayıları kullanılarak statik analizlerde elde edilen maksimum reaksiyon kuvvetleri ve sönümlenen enerji miktarları.

	Maksimum Reaksiyon Kuvveti [N]		Sönümlenen Enerji [mJ]	
	Test			
Test 1	4429		13239	
Test 2	4940		12895	
	Analiz			
Sürtünme Katsayısı	Sonuç [N]	Fark [%]	Sonuç [mJ]	Fark [%]
0,15	2755	37,8	10826	16,0
0,20	4252	4	12150	5,8
0,25	2948	33,4	11048	14,3
0,30	4182	5,6	14557	10,0



0,15 **0,20** **0,25** **0,30**

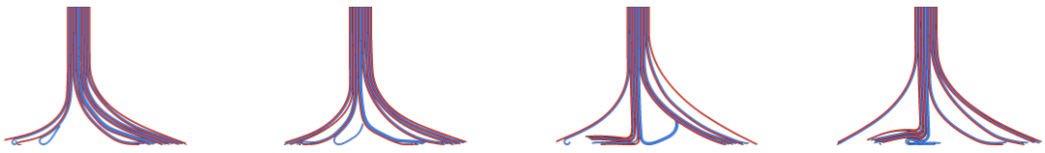
Şekil A.2 : Hashin-Rotem ve Benzeggagh-Kenane kriterleri kullanılarak farklı sürtünme katsayıları ile elde edilen statik analiz sonuçları.



Şekil A.3 : Kompozit tabakalar için Hashin-Rotem hasar kriteri, yapışkan malzeme için üstel kriter ve farklı sürtünme katsayıları kullanılarak statik analizlerde elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri.

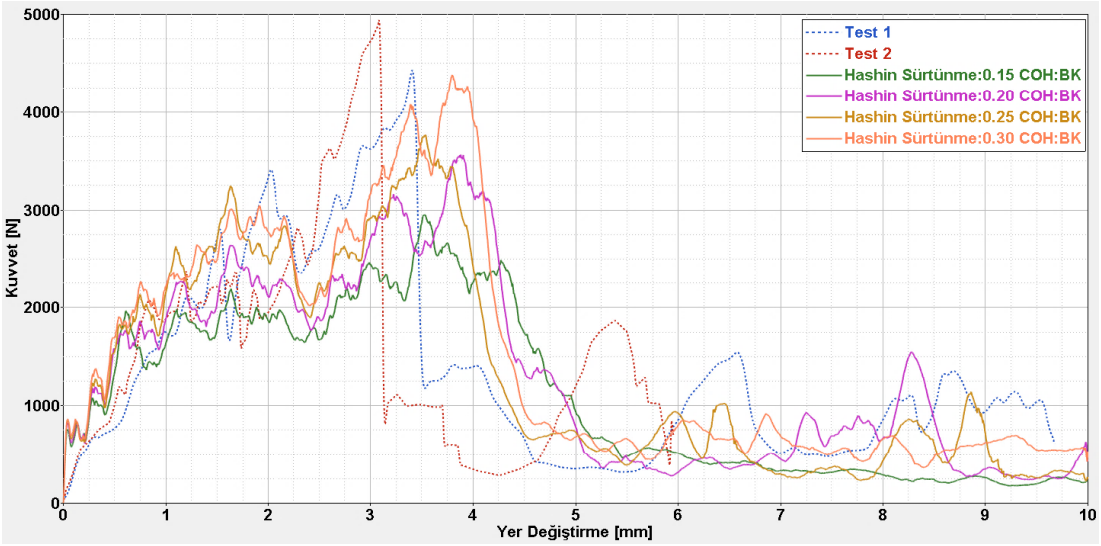
Çizelge A.2 : Hashin-Rotem ve üstel kriter ile farklı sürtünme katsayıları kullanılarak statik analizlerde elde edilmiş maksimum reaksiyon kuvvetleri ve sönümlenen enerji miktarları.

	Maksimum Reaksiyon Kuvveti [N]		Sönümlenen Enerji [mJ]	
	Test			
Test 1	4429		13239	
Test 2	4940		12895	
	Analiz			
Sürtünme Katsayısı	Sonuç [N]	Fark [%]	Sonuç [mJ]	Fark [%]
0,15	2872	35,2	10937	15,2
0,20	3406	23,1	11878	7,9
0,25	4001	9,7	13106	1,0
0,30	4235	4,4	14471	9,3



0,15 **0,20** **0,25** **0,30**

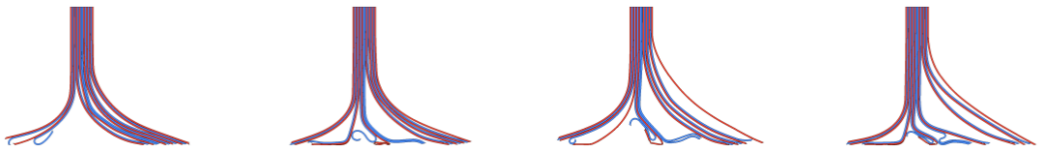
Şekil A.4 : Hashin-Rotem ve üstel kriter kullanılarak farklı sürtünme katsayıları ile elde edilen statik analiz sonuçları.



Şekil A.5 : Kompozit tabakalar için Hashin hasar kriteri, yapışkan malzeme için Benzeggagh-Kenane kriteri ve farklı sürtünme katsayıları kullanılarak statik analizlerde elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri.

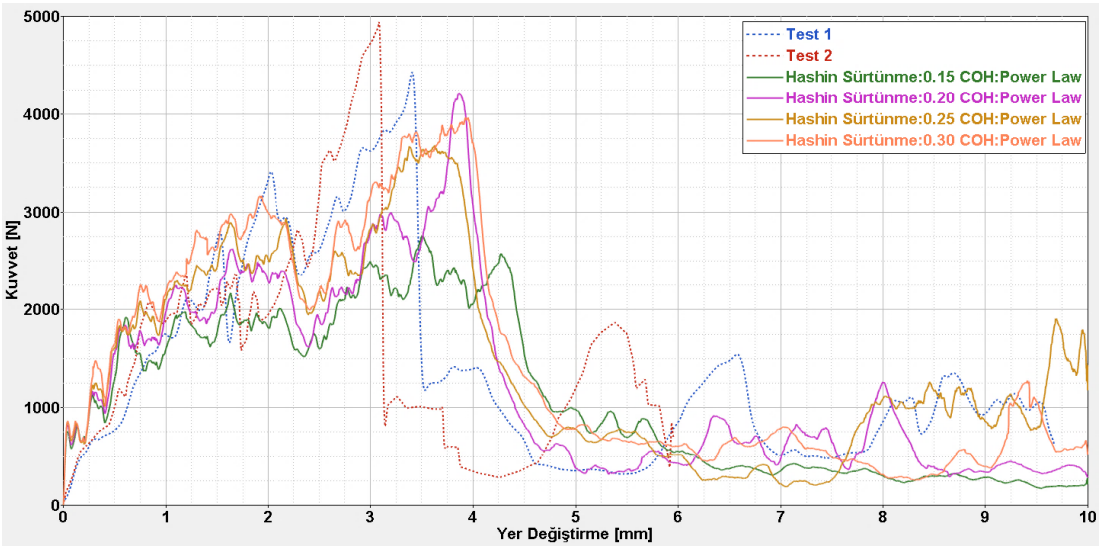
Çizelge A.3 : Hashin ve Benzeggagh-Kenane kriterleri ile farklı sürtünme katsayıları kullanılarak statik analizlerde elde edilmiş maksimum reaksiyon kuvvetleri ve sönümlenen enerji miktarları.

	Maksimum Reaksiyon Kuvveti [N]		Sönümlenen Enerji [mJ]	
	Test			
Test 1	4429		13239	
Test 2	4940		12895	
	Analiz			
Sürtünme Katsayısı	Sonuç [N]	Fark [%]	Sonuç [mJ]	Fark [%]
0,15	2948	33,4	11048	14,3
0,20	3560	19,6	13065	1,3
0,25	3763	15	13291	0,4
0,30	4381	1,1	14918	12,7



0,15 **0,20** **0,25** **0,30**

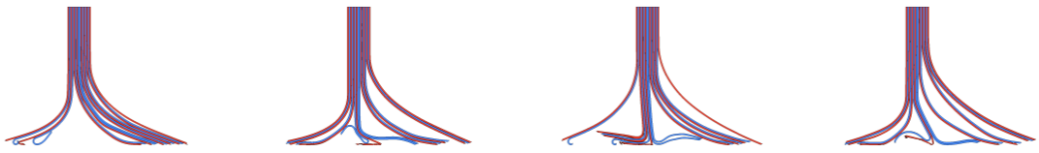
Şekil A.6 : Hashin ve Benzeggagh-Kenane kriterleri kullanılarak farklı sürtünme katsayıları ile elde edilen statik analiz sonuçları.



Şekil A.7 : Kompozit tabakalar için Hashin hasar kriteri, yapışkan malzeme için üstel kriter ve farklı sürtünme katsayıları kullanılarak statik analizlerde elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri.

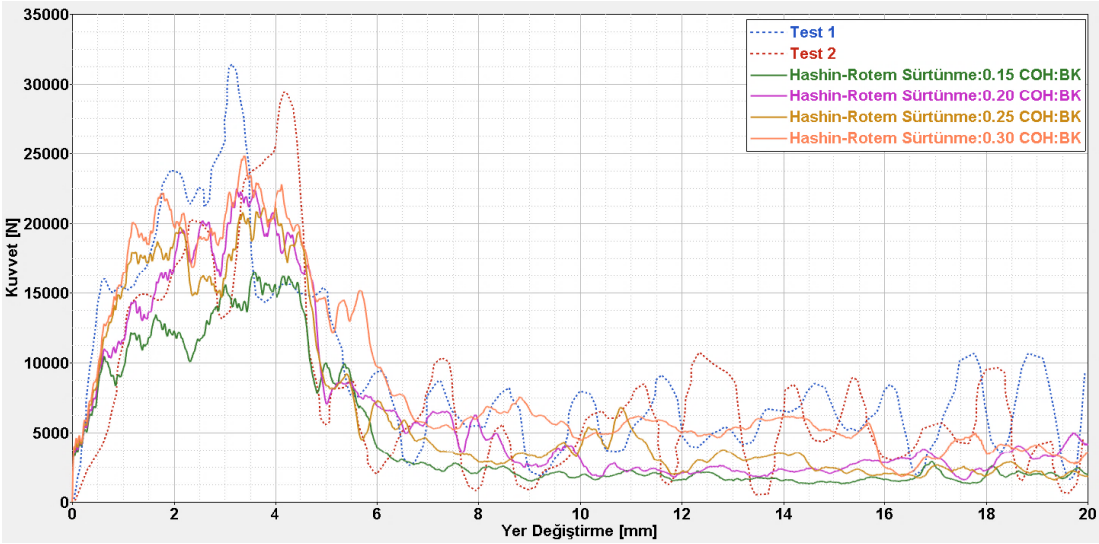
Çizelge A.4 : Hashin-Rotem ve üstel kriter ile farklı sürtünme katsayıları kullanılarak statik analizlerde elde edilmiş maksimum reaksiyon kuvvetleri ve sönümlenen enerji miktarları.

	Maksimum Reaksiyon Kuvveti [N]		Sönümlenen Enerji [mJ]	
	Test			
Test 1	4429		13239	
Test 2	4940		12895	
	Analiz			
Sürtünme Katsayısı	Sonuç [N]	Fark [%]	Sonuç [mJ]	Fark [%]
0,15	2765	37,6	11013	14,6
0,20	4214	4,8	12533	2,8
0,25	3677	17	14499	9,5
0,30	3960	10,6	14889	12,5



0,15 **0,20** **0,25** **0,30**

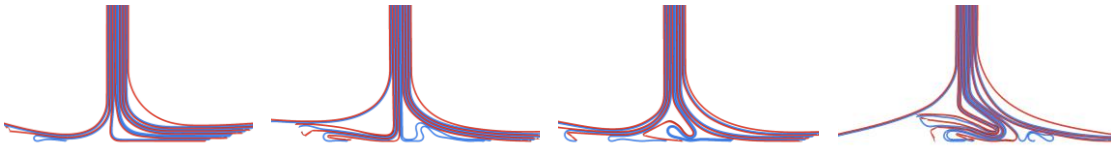
Şekil A.8 : Hashin-Rotem ve üstel kriter kullanılarak farklı sürtünme katsayıları ile elde edilen statik analiz sonuçları.



Şekil A.9 : Kompozit tabakalar için Hashin-Rotem hasar kriteri, yapışkan malzeme için Benzeggagh-Kenane kriteri ve farklı sürtünme katsayıları kullanılarak dinamik analizlerde elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri.

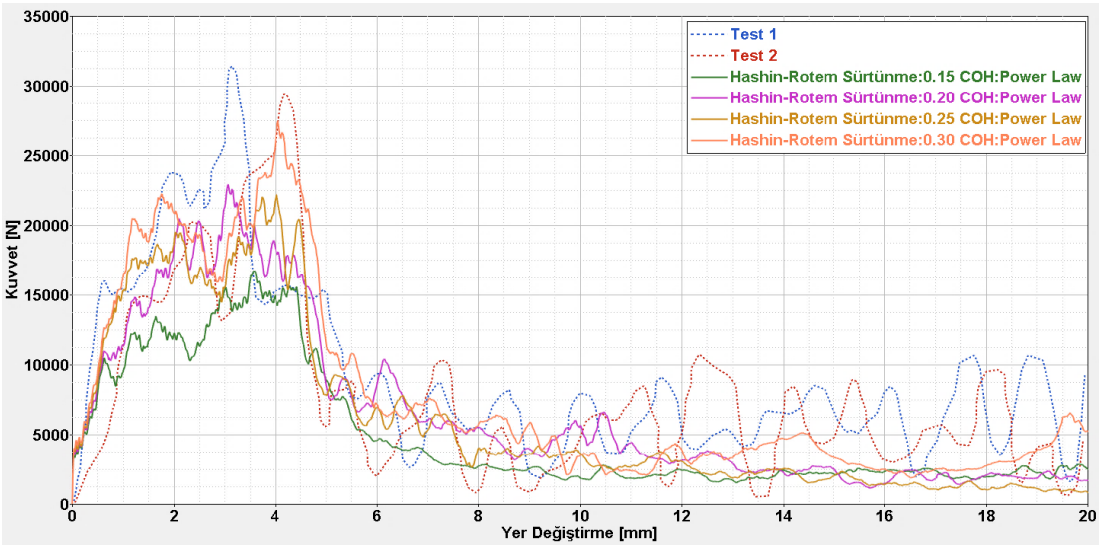
Çizelge A.5 : Hashin-Rotem ve Benzeggagh-Kenane kriterleri ile farklı sürtünme katsayıları kullanılarak dinamik analizlerde elde edilmiş maksimum reaksiyon kuvvetleri ve sönümlenen enerji miktarları.

	Maksimum Reaksiyon Kuvveti [N]		Sönümlenen Enerji [mJ]	
	Test			
Test 1	31422,2		183408	
Test 2	29391		153767	
	Analiz			
Sürtünme Katsayısı	Sonuç [N]	Fark [%]	Sonuç [mJ]	Fark [%]
0,15	16098	45,2	101410	34,0
0,20	22206	24,4	141600	7,9
0,25	21100	28,2	135270	12,0
0,30	23867	18,8	181332	1,1



0,15 **0,20** **0,25** **0,30**

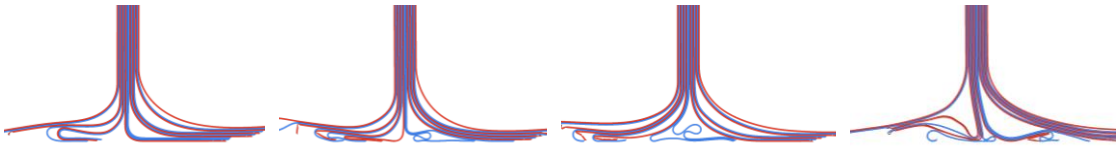
Şekil A.10 : Hashin-Rotem ve Benzeggagh-Kenane kriterleri kullanılarak farklı sürtünme katsayıları ile elde edilen dinamik analiz sonuçları.



Şekil A.11 : Kompozit tabakalar için Hashin-Rotem hasar kriteri, yapışkan malzeme için üstel kriter ve farklı sürtünme katsayıları kullanılarak dinamik analizlerde elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri.

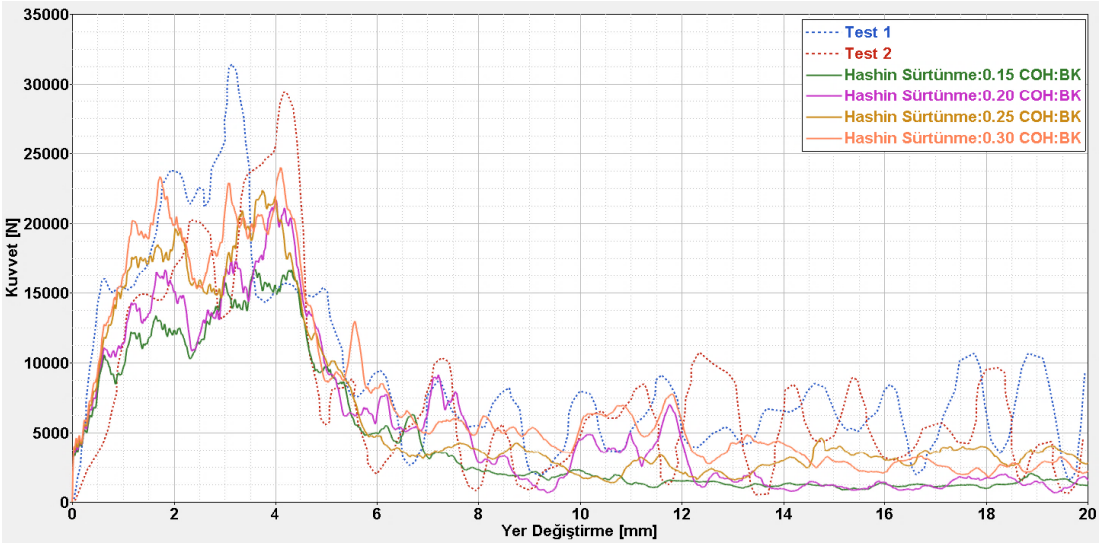
Çizelge A.6 : Hashin-Rotem ve üstel kriter ile farklı sürtünme katsayıları kullanılarak dinamik analizlerde elde edilmiş maksimum reaksiyon kuvvetleri ve sönümlenen enerji miktarları.

	Maksimum Reaksiyon Kuvveti [N]		Sönümlenen Enerji [mJ]	
	Test			
Test 1	31422		183408	
Test 2	29391		153767	
	Analiz			
Sürtünme Katsayısı	Sonuç [N]	Fark [%]	Sonuç [mJ]	Fark [%]
0,15	15962	45,7	104307	32,2
0,20	21768	25,9	137113	10,8
0,25	21796	25,8	125860	18,1
0,30	25758	12,4	174235	5,0



0,15 **0,20** **0,25** **0,30**

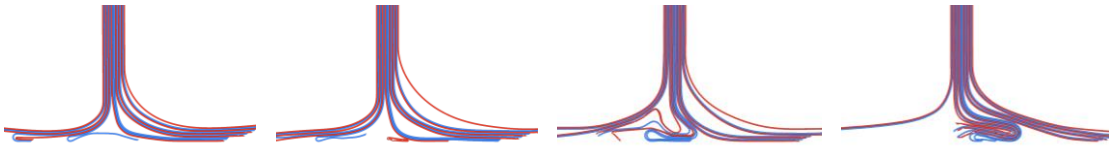
Şekil A.12 : Hashin-Rotem ve üstel kriter kullanılarak farklı sürtünme katsayıları ile elde edilen dinamik analiz sonuçları.



Şekil A.13 : Kompozit tabakalar için Hashin hasar kriteri, yapışkan malzeme için Benzeggagh-Kenane kriteri ve farklı sürtünme katsayıları kullanılarak dinamik analizlerde elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri.

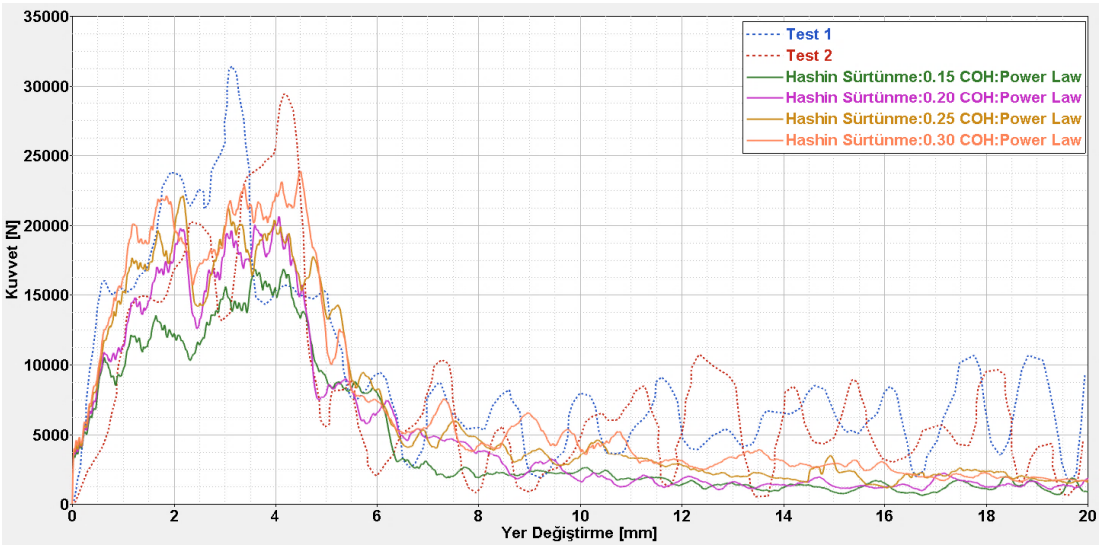
Çizelge A.7 : Hashin ve Benzeggagh-Kenane kriterleri ile farklı sürtünme katsayıları kullanılarak dinamik analizlerde elde edilmiş maksimum reaksiyon kuvvetleri ve sönümlenen enerji miktarları.

	Maksimum Reaksiyon Kuvveti [N]		Sönümlenen Enerji [mJ]	
	Test			
Test 1	31422		183408	
Test 2	29391		153767	
	Analiz			
Sürtünme Katsayısı	Sonuç [N]	Fark [%]	Sonuç [mJ]	Fark [%]
0,15	16219	44,8	95780	37,7
0,20	21072	28,3	117294	23,7
0,25	22104	24,8	137972	10,3
0,30	22220	24,4	159431	3,7



0,15 **0,20** **0,25** **0,30**

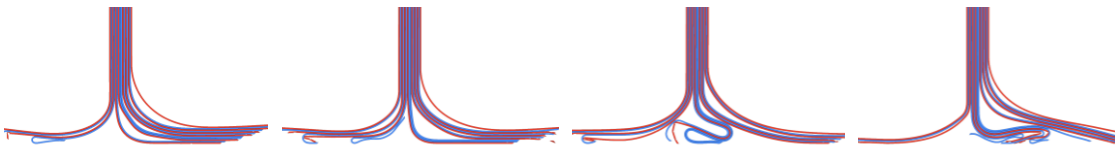
Şekil A.14 : Hashin ve Benzeggagh-Kenane kriterleri kullanılarak farklı sürtünme katsayıları ile elde edilen dinamik analiz sonuçları.



Şekil A.15 : Kompozit tabakalar için Hashin hasar kriteri, yapışkan malzeme için üstel kriter ve farklı sürtünme katsayıları kullanılarak dinamik analizlerde elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri.

Çizelge A.8 : Hashin-Rotem ve üstel kriter ile farklı sürtünme katsayıları kullanılarak dinamik analizlerde elde edilmiş maksimum reaksiyon kuvvetleri ve sönümlenen enerji miktarları.

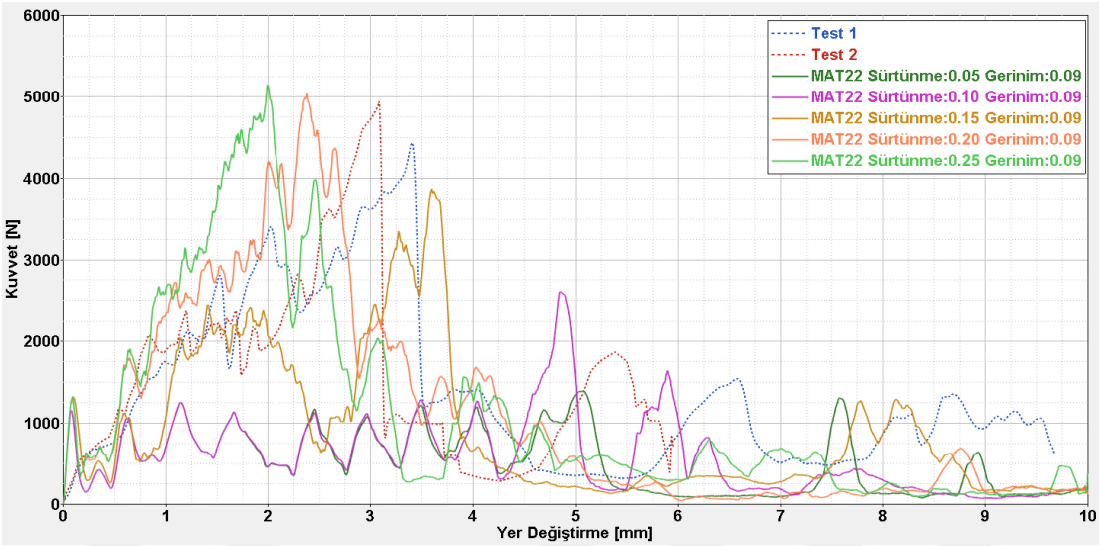
	Maksimum Reaksiyon Kuvveti [N]		Sönümlenen Enerji [mJ]	
	Test			
Test 1	31422		183408	
Test 2	29391		153767	
	Analiz			
Sürtünme Katsayısı	Sonuç [N]	Fark [%]	Sonuç [mJ]	Fark [%]
0,15	16375	44,3	95847	37,7
0,20	19671	33,1	114386	25,6
0,25	20642	29,8	136031	11,5
0,30	22692	22,8	151728	1,3



0,15 **0,20** **0,25** **0,30**

Şekil A.16 : Hashin-Rotem ve üstel kriter kullanılarak farklı sürtünme katsayıları ile elde edilen dinamik analiz sonuçları.

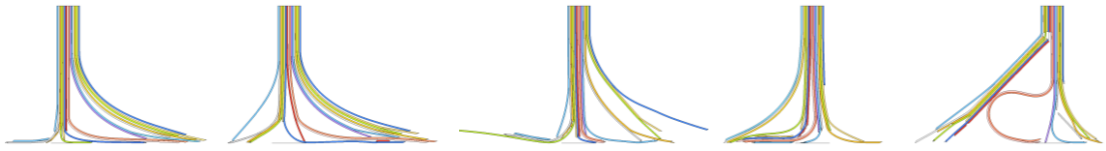
EK B



Şekil B.1 : MAT22 malzeme modeli, 0,09 hasar gerinimi ve farklı sürtünme katsayıları ile statik analizlerde elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri.

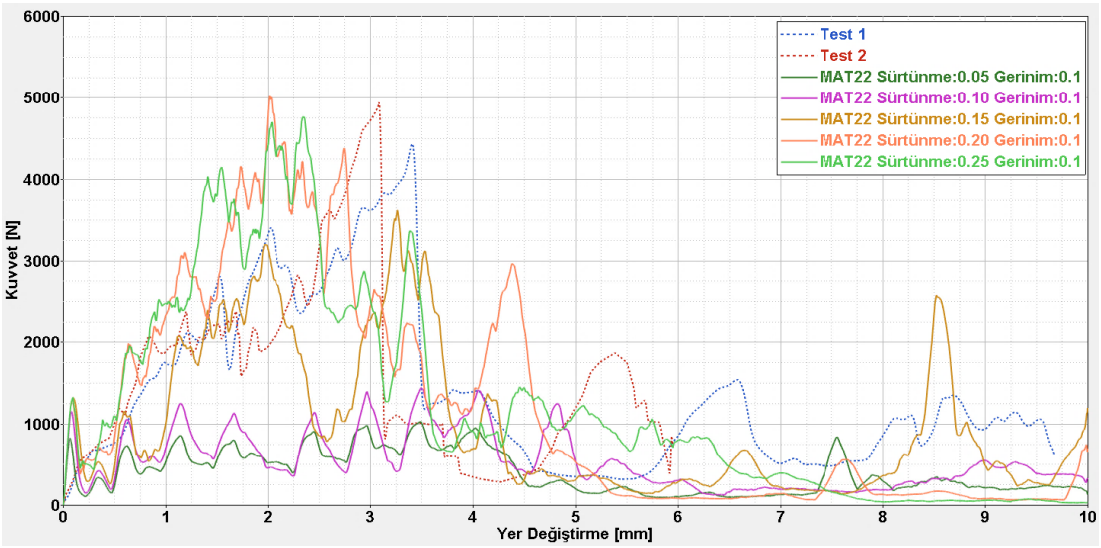
Çizelge B.1 : MAT 22 ve 0,09 hasar gerinimi ile farklı sürtünme katsayıları kullanılarak statik analizlerde elde edilmiş maksimum reaksiyon kuvvetleri ve sönümlenen enerji miktarları.

	Maksimum Reaksiyon Kuvveti [N]		Sönümlenen Enerji [mJ]	
		Test		
Test 1	4429		13239	
Test 2	4940		12895	
		Analiz		
Sürtünme Katsayısı	Sonuç [N]	Fark [%]	Sonuç [mJ]	Fark [%]
0,05	1389	68,6	4952	61,6
0,10	2603	41,2	5768	55,3
0,15	3865	12,7	8977	30,4
0,20	5034	1,9	11132	13,7
0,25	5144	4,1	11145	13,6



0,05 **0,10** **0,15** **0,20** **0,25**

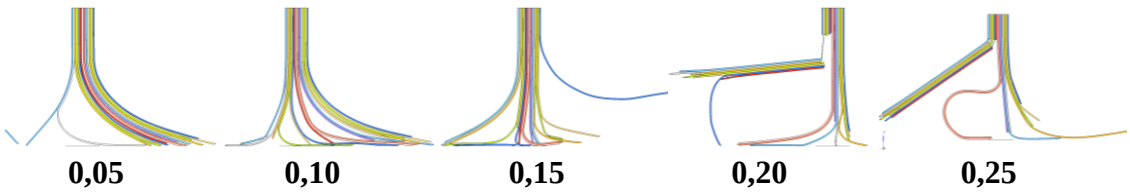
Şekil B.2 : MAT 22 ve 0,09 hasar gerinimi kullanılarak farklı sürtünme katsayıları ile elde edilen statik analiz sonuçları.



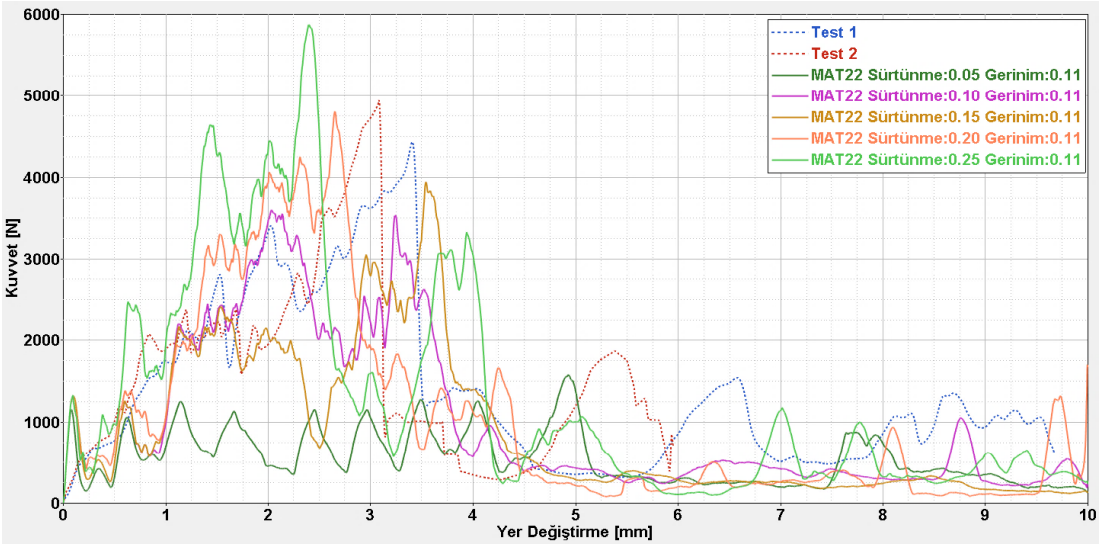
Şekil B.3 : MAT 22 malzeme modeli, 0,1 hasar gerinimi ve farklı sürtünme katsayıları ile statik analizlerde elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri.

Çizelge B.2 : MAT 22 ve 0,1 hasar gerinimi ile farklı sürtünme katsayıları kullanılarak statik analizlerde elde edilmiş maksimum reaksiyon kuvvetleri ve sönümlenen enerji miktarları.

	Maksimum Reaksiyon Kuvveti [N]		Sönümlenen Enerji [mJ]	
	Test			
Test 1	4429		13239	
Test 2	4940		12895	
	Analiz			
Sürtünme Katsayısı	Sonuç [N]	Fark [%]	Sonuç [mJ]	Fark [%]
0,05	1027	76,8	3974	69,2
0,10	1438	67,5	5362	58,4
0,15	3620	18,3	9715	24,7
0,20	5019	1,6	12063	6,5
0,25	4764	3,6	12465	3,3



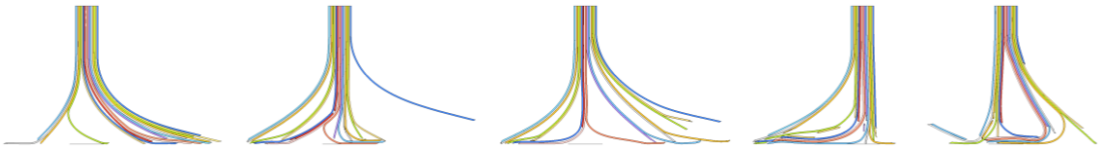
Şekil B.4 : MAT 22 ve 0,1 hasar gerinimi kullanılarak farklı sürtünme katsayıları ile elde edilen statik analiz sonuçları.



Şekil B.5 : MAT 22 malzeme modeli, 0,11 hasar gerinimi ve farklı sürtünme katsayıları ile statik analizlerde elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri.

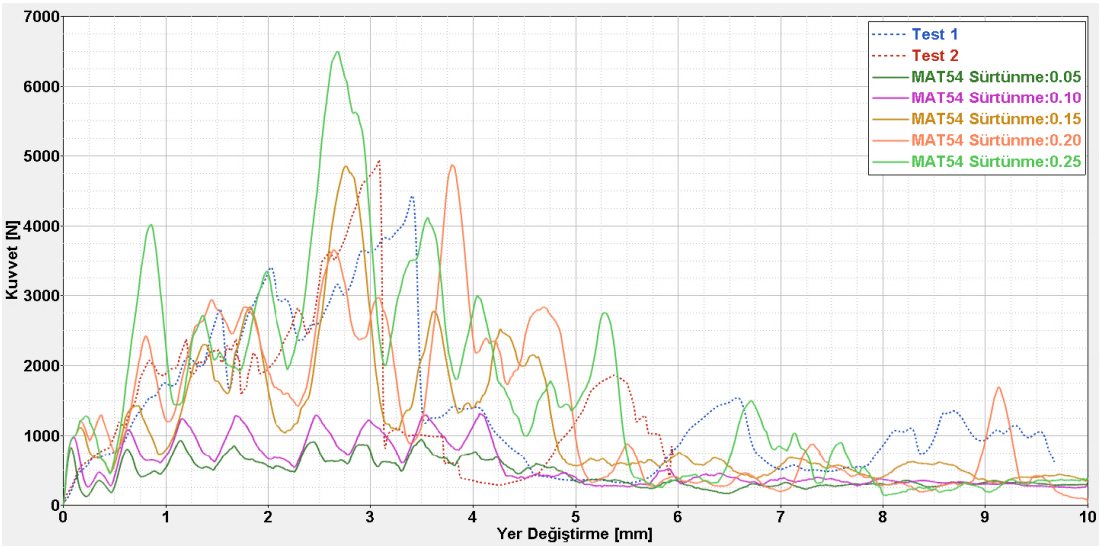
Çizelge B.3 : MAT 22 ve 0,11 hasar gerinimi ile farklı sürtünme katsayıları kullanılarak statik analizlerde elde edilmiş maksimum reaksiyon kuvvetleri ve sönümlenen enerji miktarları.

	Maksimum Reaksiyon Kuvveti [N]		Sönümlenen Enerji [mJ]	
	Test			
Test 1	4429		13239	
Test 2	4940		12895	
	Analiz			
Sürtünme Katsayısı	Sonuç [N]	Fark [%]	Sonuç [mJ]	Fark [%]
0,05	1575	64,4	5480	57,5
0,10	3594	18,9	10052	22,0
0,15	3939	11,1	8743	32,2
0,20	4803	2,8	10571	18,0
0,25	5867	18,8	12947	0,4



0,05 **0,10** **0,15** **0,20** **0,25**

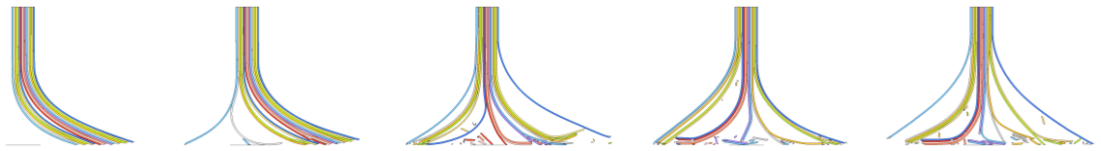
Şekil B.6 : MAT 22 ve 0,11 hasar gerinimi kullanılarak farklı sürtünme katsayıları ile elde edilen statik analiz sonuçları.



Şekil B.7 : MAT 54 malzeme modeli ve farklı sürtünme katsayıları ile statik analizlerde elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri.

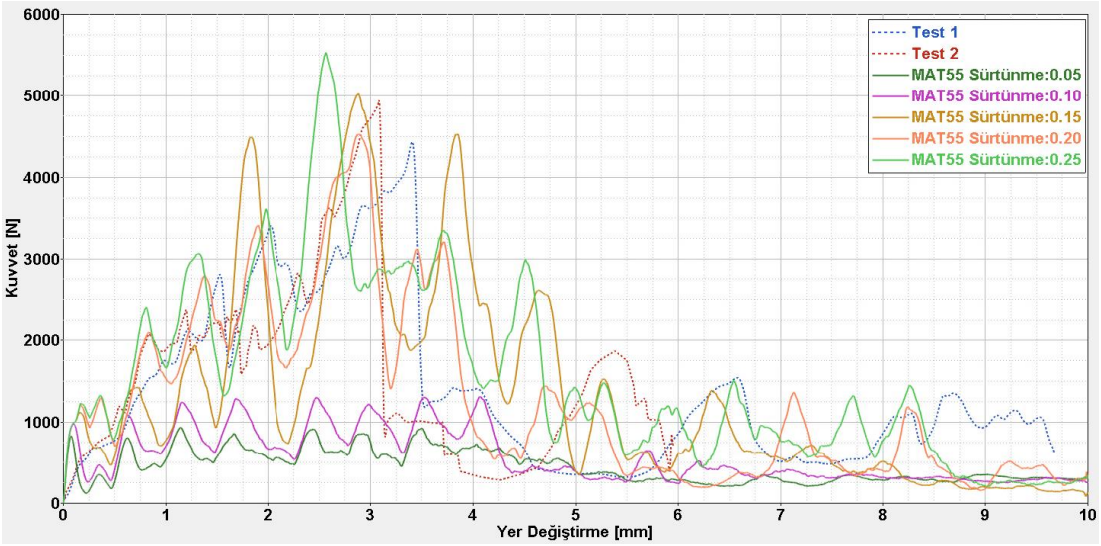
Çizelge B.4 : MAT 54 ve farklı sürtünme katsayıları kullanılarak statik analizlerde elde edilmiş maksimum reaksiyon kuvvetleri ve sönümlenen enerji miktarları.

	Maksimum Reaksiyon Kuvveti [N]		Sönümlenen Enerji [mJ]	
		Test		
Test 1	4429		13239	
Test 2	4940		12895	
		Analiz		
Sürtünme Katsayısı	Sonuç [N]	Fark [%]	Sonuç [mJ]	Fark [%]
0,05	946	78,7	4453	65,5
0,10	1315	70,3	5655	56,1
0,15	4848	1,8	11563	10,3
0,20	4871	1,4	13103	1,0
0,25	6496	31,5	16001	20,9



0,05 **0,10** **0,15** **0,20** **0,25**

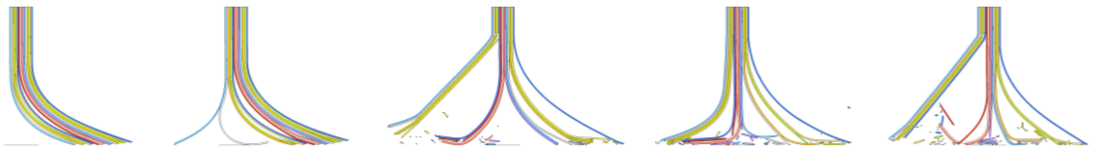
Şekil B.8 : MAT 54 kullanılarak farklı sürtünme katsayıları ile elde edilen statik analiz sonuçları.



Şekil B.9 : MAT 55 malzeme modeli ve farklı sürtünme katsayıları ile statik analizlerde elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri.

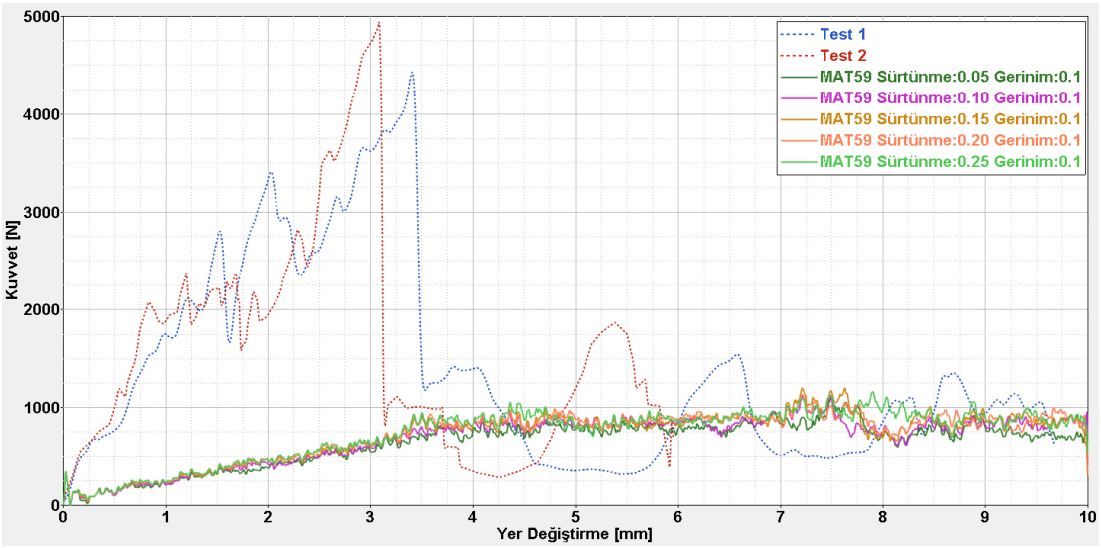
Çizelge B.5 : MAT 55 ve farklı sürtünme katsayıları kullanılarak statik analizlerde elde edilmiş maksimum reaksiyon kuvvetleri ve sönümlenen enerji miktarları.

	Maksimum Reaksiyon Kuvveti [N]		Sönümlenen Enerji [mJ]	
	Test			
Test 1	4429		13239	
Test 2	4940		12895	
	Analiz			
Sürtünme Katsayısı	Sonuç [N]	Fark [%]	Sonuç [mJ]	Fark [%]
0,05	930	79	4453	65,5
0,10	1306	70,5	5670	56,0
0,15	5024	1,7	13241	0,0
0,20	4525	8,4	12507	3,0
0,25	5529	11,9	15442	16,6



0,05 **0,10** **0,15** **0,20** **0,25**

Şekil B.10 : MAT 55 kullanılarak farklı sürtünme katsayıları ile elde edilen statik analiz sonuçları.



Şekil B.11 : MAT 59 malzeme modeli, 0,1 hasar gerinimi ve farklı sürtünme katsayıları ile statik analizlerde elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri.

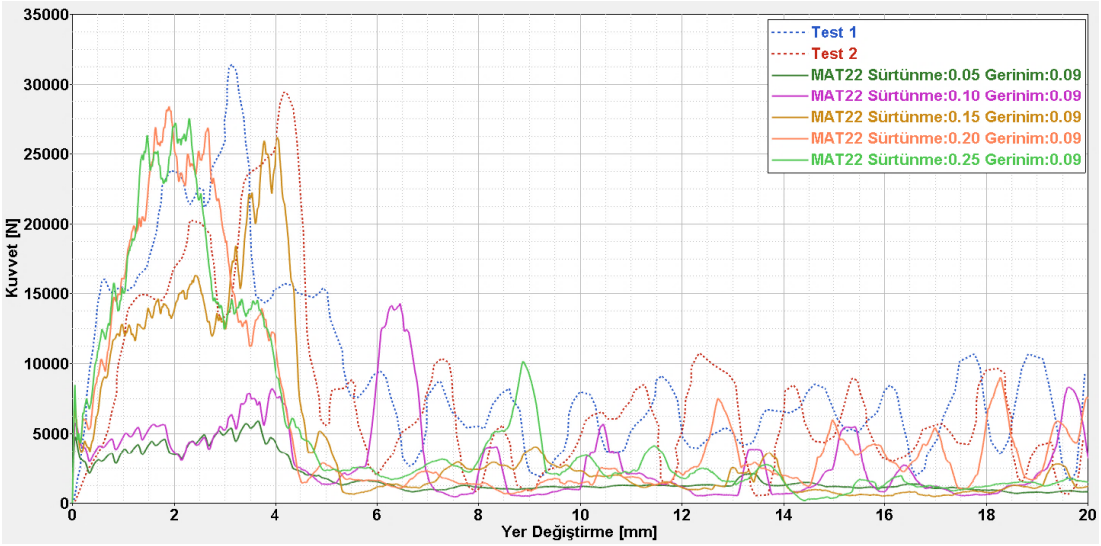
Çizelge B.6 : MAT 59 ve 0,1 hasar gerinimi ile farklı sürtünme katsayıları kullanılarak statik analizlerde elde edilmiş maksimum reaksiyon kuvvetleri ve sönümlenen enerji miktarları.

	Maksimum Reaksiyon Kuvveti [N]		Sönümlenen Enerji [mJ]	
	Test			
Test 1	4429		13239	
Test 2	4940		12895	
	Analiz			
Sürtünme Katsayısı	Sonuç [N]	Fark [%]	Sonuç [mJ]	Fark [%]
0,05	1122	74,7	6366	50,6
0,10	1125	74,6	6760	47,6
0,15	1201	75,7	7072	45,2
0,20	1131	77,1	7141	44,6
0,25	1163	76,5	7318	43,2



0,05 **0,10** **0,15** **0,20** **0,25**

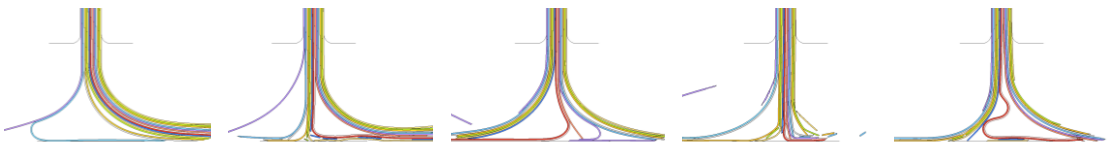
Şekil B.12 : MAT 59 ve 0,1 hasar gerinimi kullanılarak farklı sürtünme katsayıları ile elde edilen statik analiz sonuçları.



Şekil B.13 : MAT22 malzeme modeli, 0,09 hasar gerinimi ve farklı sürtünme katsayıları ile dinamik analizlerde elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri.

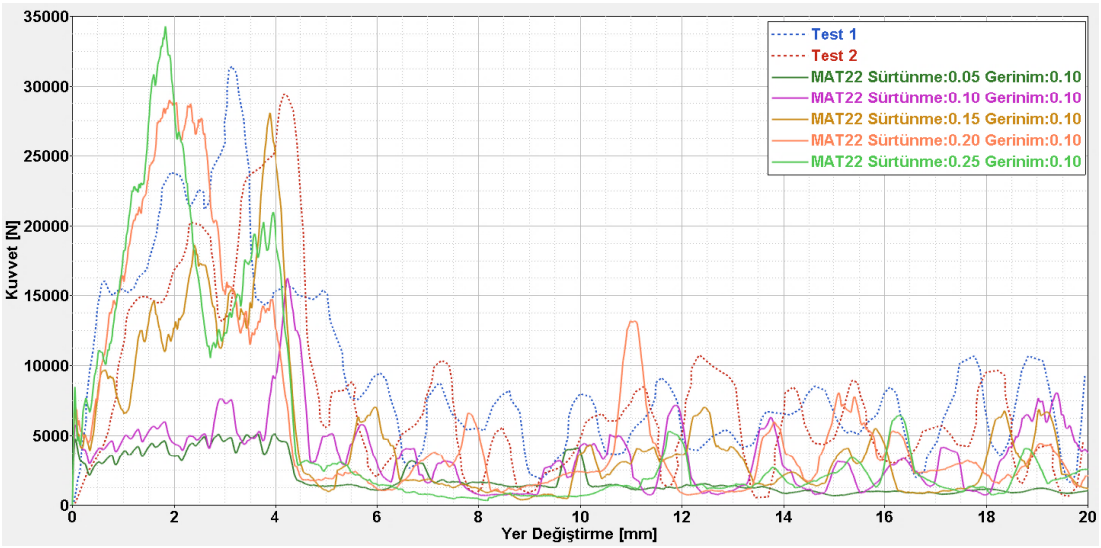
Çizelge B.7 : MAT 22 ve 0,09 hasar gerinimi ile farklı sürtünme katsayıları kullanılarak dinamik analizlerde elde edilmiş maksimum reaksiyon kuvvetleri ve sönümlenen enerji miktarları.

	Maksimum Reaksiyon Kuvveti [N]		Sönümlenen Enerji [mJ]	
	Test			
Test 1	31422		183408	
Test 2	29391		153767	
	Analiz			
Sürtünme Katsayısı	Sonuç [N]	Fark [%]	Sonuç [mJ]	Fark [%]
0,05	5902	79,9	38414	75,0
0,10	14265	51,5	70351	54,2
0,15	26160	11	93252	39,4
0,20	28360	3,5	125751	18,2
0,25	27515	6,4	109947	28,5



0,05 **0,10** **0,15** **0,20** **0,25**

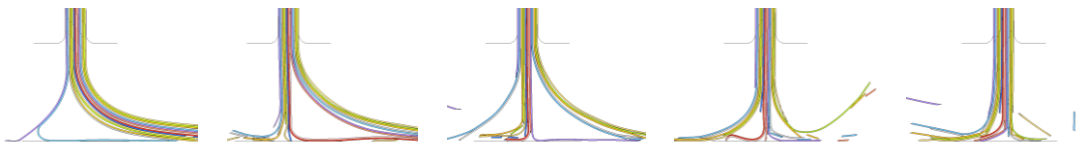
Şekil B.14 : MAT 22 ve 0,09 hasar gerinimi kullanılarak farklı sürtünme katsayıları ile elde edilen dinamik analiz sonuçları.



Şekil B.15 : MAT 22 malzeme modeli, 0,1 hasar gerinimi ve farklı sürtünme katsayıları ile dinamik analizlerde elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri.

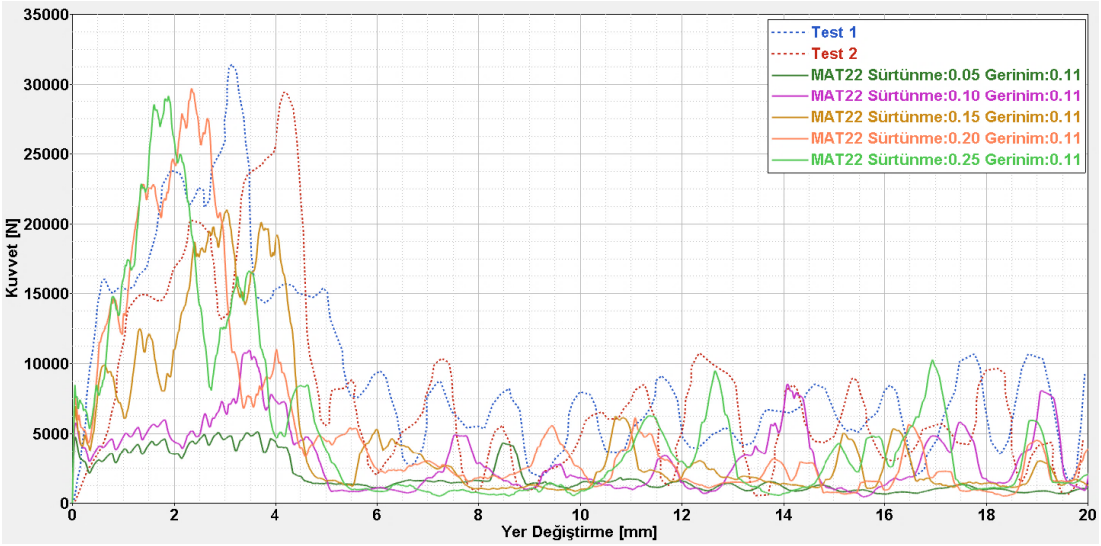
Çizelge B.8 : MAT 22 ve 0,1 hasar gerinimi ile farklı sürtünme katsayıları kullanılarak dinamik analizlerde elde edilmiş maksimum reaksiyon kuvvetleri ve sönümlenen enerji miktarları.

	Maksimum Reaksiyon Kuvveti [N]		Sönümlenen Enerji [mJ]	
	Test			
Test 1	31422		183408	
Test 2	29391		153767	
	Analiz			
Sürtünme Katsayısı	Sonuç [N]	Fark [%]	Sonuç [mJ]	Fark [%]
0,05	5127	82,6	40597	73,6
0,10	16200	44,9	77405	49,7
0,15	28042	4,6	106844	30,5
0,20	28957	1,5	128729	16,3
0,25	34264	9	118870	22,7



0,05 **0,10** **0,15** **0,20** **0,25**

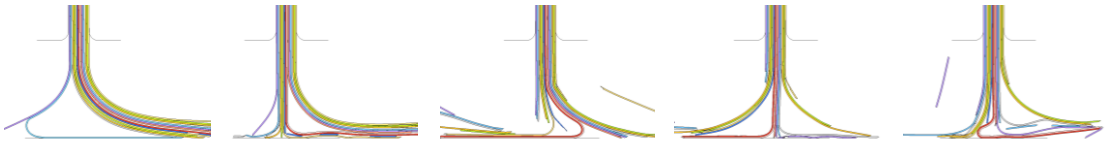
Şekil B.16 : MAT 22 ve 0,1 hasar gerinimi kullanılarak farklı sürtünme katsayıları ile elde edilen dinamik analiz sonuçları.



Şekil B.17 : MAT 22 malzeme modeli, 0,11 hasar gerinimi ve farklı sürtünme katsayıları ile dinamik analizlerde elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri.

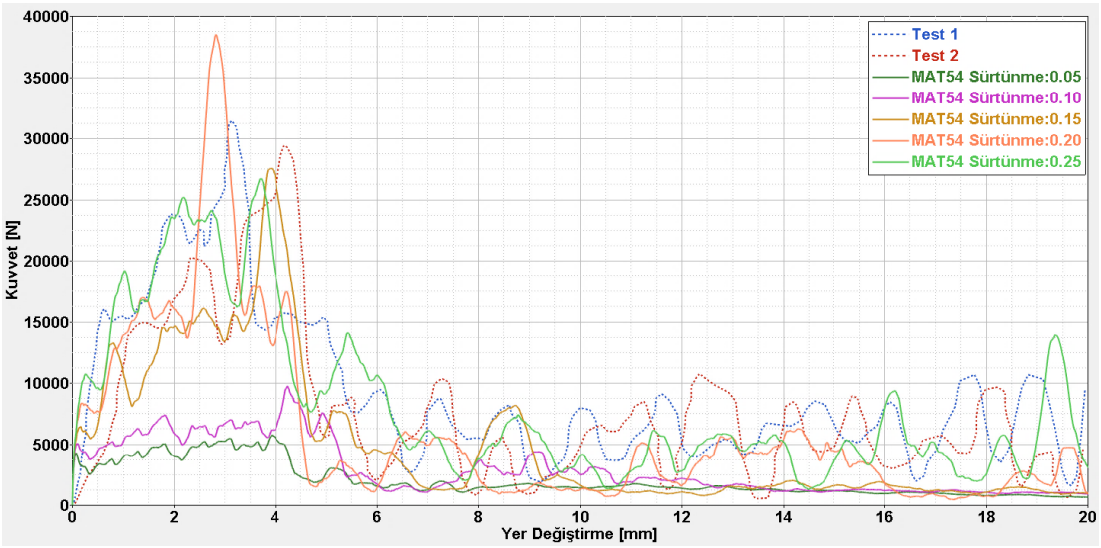
Çizelge B.9 : MAT 22 ve 0,11 hasar gerinimi ile farklı sürtünme katsayıları kullanılarak dinamik analizlerde elde edilmiş maksimum reaksiyon kuvvetleri ve sönümlenen enerji miktarları.

	Maksimum Reaksiyon Kuvveti [N]		Sönümlenen Enerji [mJ]	
	Test			
Test 1	31422		183408	
Test 2	29391		153767	
	Analiz			
Sürtünme Katsayısı	Sonuç [N]	Fark [%]	Sonuç [mJ]	Fark [%]
0,05	5156	82,5	39835	74,1
0,10	10946	62,8	73005	52,5
0,15	21004	28,5	93920	38,9
0,20	29694	1	115359	25,0
0,25	29108	1	112909	26,6



0,05 **0,10** **0,15** **0,20** **0,25**

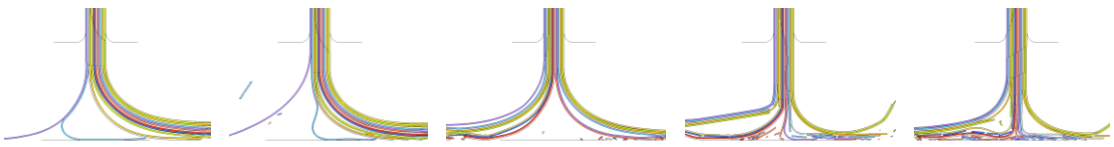
Şekil B.18 : MAT 22 ve 0,11 hasar gerinimi kullanılarak farklı sürtünme katsayıları ile elde edilen dinamik analiz sonuçları.



Şekil B.19 : MAT 54 malzeme modeli ve farklı sürtünme katsayıları ile dinamik analizlerde elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri.

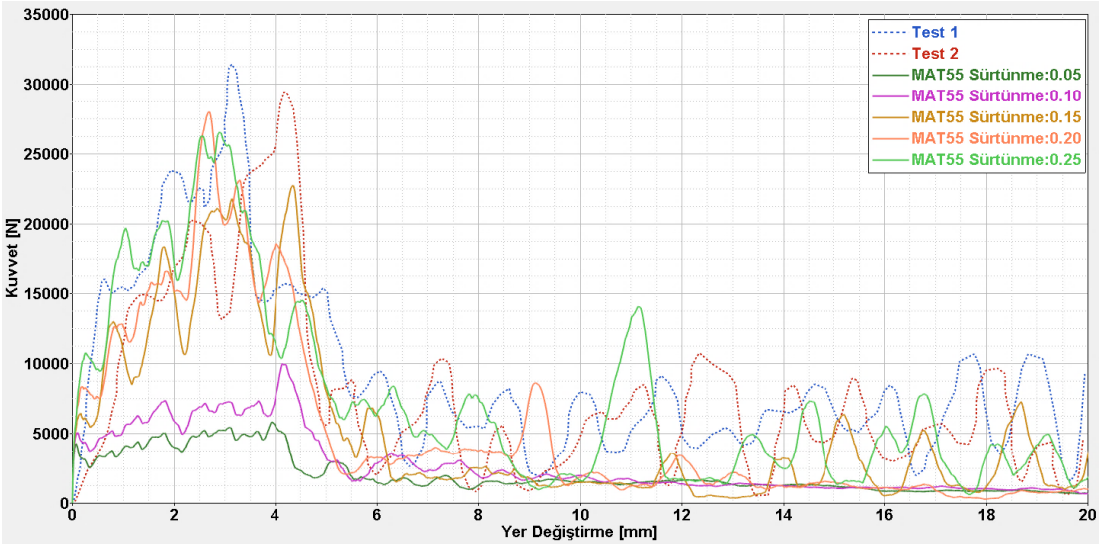
Çizelge B.10 : MAT 54 ve farklı sürtünme katsayıları kullanılarak dinamik analizlerde elde edilmiş maksimum reaksiyon kuvvetleri ve sönümlenen enerji miktarları.

	Maksimum Reaksiyon Kuvveti [N]		Sönümlenen Enerji [mJ]	
	Test			
Test 1	31422		183408	
Test 2	29391		153767	
	Analiz			
Sürtünme Katsayısı	Sonuç [N]	Fark [%]	Sonuç [mJ]	Fark [%]
0,05	5731	80,5	41779	72,8
0,10	9745	66,8	61358	60,1
0,15	27537	6,3	102196	33,5
0,20	38485	22,5	126255	17,9
0,25	26704	9,1	174519	4,8



0,05 **0,10** **0,15** **0,20** **0,25**

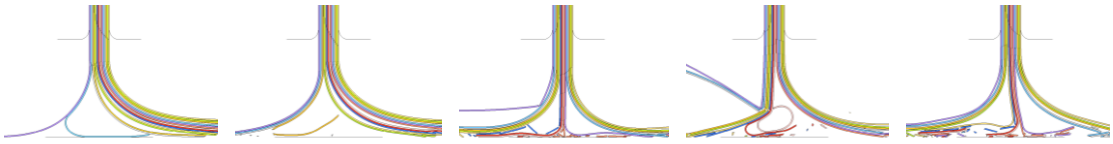
Şekil B.20 : MAT 54 kullanılarak farklı sürtünme katsayıları ile elde edilen dinamik analiz sonuçları.



Şekil B.21 : MAT 55 malzeme modeli ve farklı sürtünme katsayıları ile dinamik analizlerde elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri.

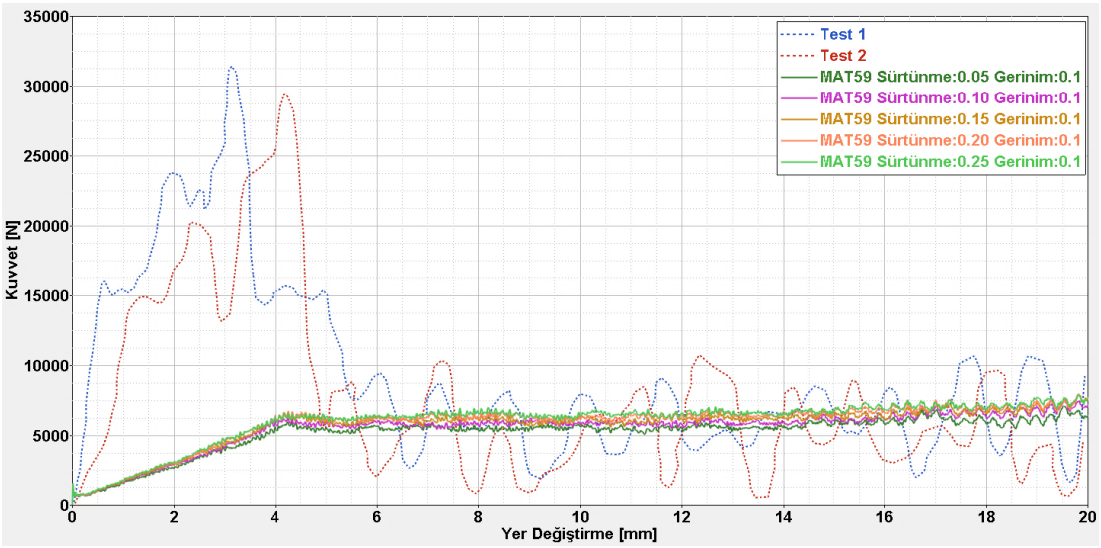
Çizelge B.11 : MAT 55 ve farklı sürtünme katsayıları kullanılarak dinamik analizlerde elde edilmiş maksimum reaksiyon kuvvetleri ve sönümlenen enerji miktarları.

	Maksimum Reaksiyon Kuvveti [N]		Sönümlenen Enerji [mJ]	
	Test			
Test 1	31422		183408	
Test 2	29391		153767	
	Analiz			
Sürtünme Katsayısı	Sonuç [N]	Fark [%]	Sonuç [mJ]	Fark [%]
0,05	5816	80,2	41591	73,0
0,10	9989	66	56333	63,4
0,15	22841	22,3	113937	25,9
0,20	27998	4,7	107514	30,1
0,25	26543	9,7	157159	2,2



0,05 **0,10** **0,15** **0,20** **0,25**

Şekil B.22 : MAT 55 kullanılarak farklı sürtünme katsayıları ile elde edilen dinamik analiz sonuçları.



Şekil B.23 : MAT 59 malzeme modeli, 0,1 hasar gerinimi ve farklı sürtünme katsayıları ile dinamik analizlerde elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri.

Çizelge B.12 : MAT 59 ve 0,1 hasar gerinimi ile farklı sürtünme katsayıları kullanılarak dinamik analizlerde elde edilmiş maksimum reaksiyon kuvvetleri ve sönümlenen enerji miktarları.

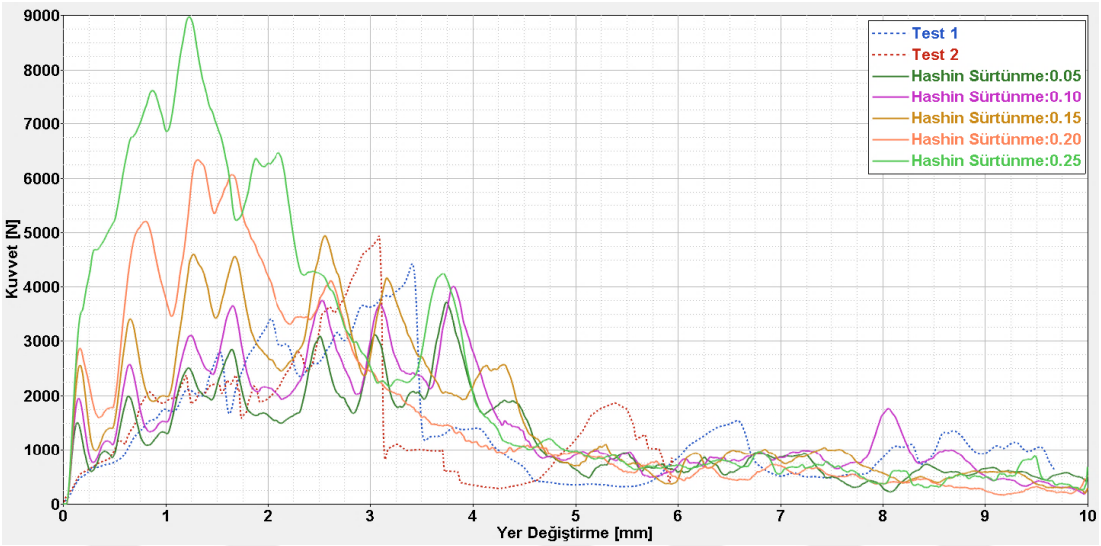
	Maksimum Reaksiyon Kuvveti [N]		Sönümlenen Enerji [mJ]	
	Test			
Test 1	31422		183408	
Test 2	29391		153767	
	Analiz			
Sürtünme Katsayısı	Sonuç [N]	Fark [%]	Sonuç [mJ]	Fark [%]
0,05	7203	75,5	119736	22,1
0,10	8872	69,8	127850	16,9
0,15	8169	72,2	132778	13,6
0,20	8332	71,7	137073	10,9
0,25	8604	70,7	139820	9,1



0,05 **0,10** **0,15** **0,20** **0,25**

Şekil B.24 : MAT 59 ve 0,1 hasar gerinimi kullanılarak farklı sürtünme katsayıları ile elde edilen dinamik analiz sonuçları.

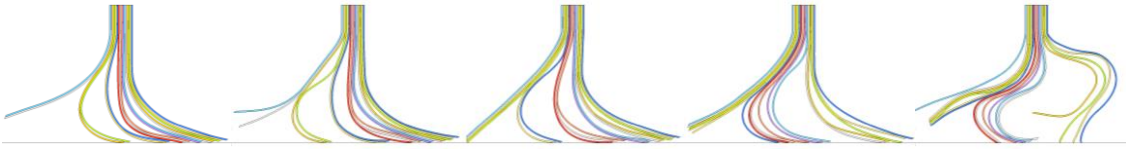
EK C



Şekil C.1 : Hashin hasar kriteri ve farklı sürtünme katsayıları kullanılarak statik analizlerde elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri.

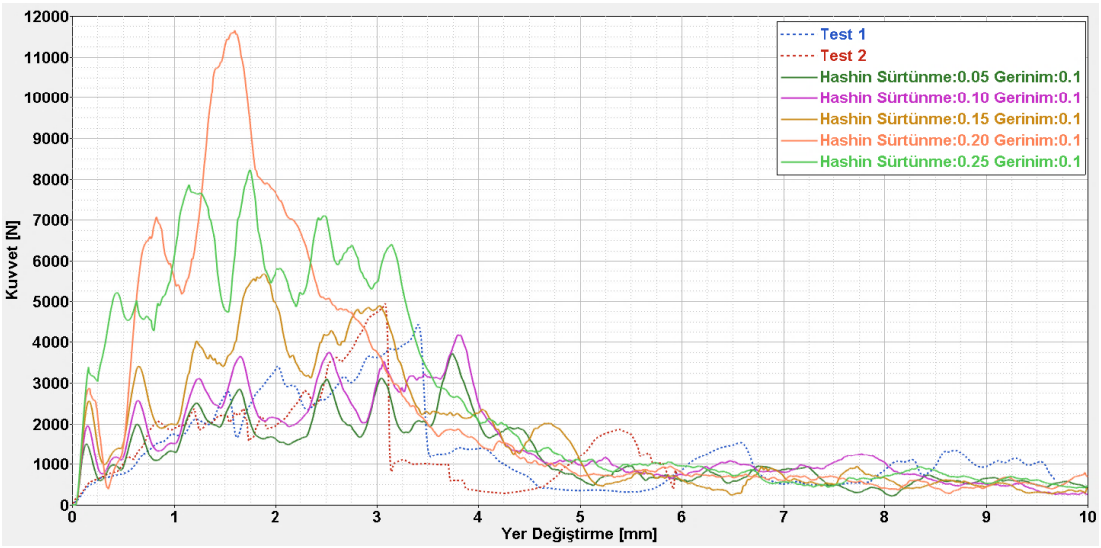
Çizelge C.1 : Hashin hasar kriteri ve farklı sürtünme katsayıları kullanılarak statik analizlerde elde edilmiş maksimum reaksiyon kuvvetleri ve sönümlenen enerji miktarları.

	Maksimum Reaksiyon Kuvveti [N]		Sönümlenen Enerji [mJ]	
	Test			
Test 1	4429		13239	
Test 2	4940		12895	
	Analiz			
Sürtünme Katsayısı	Sonuç [N]	Fark [%]	Sonuç [mJ]	Fark [%]
0,05	3712	16,2	12283	4,7
0,10	3999	9,7	14765	11,5
0,15	4943	0,1	16582	25,3
0,20	6335	28,2	16726	26,3
0,25	8968	81,5	23608	78,3



0,05 **0,10** **0,15** **0,20** **0,25**

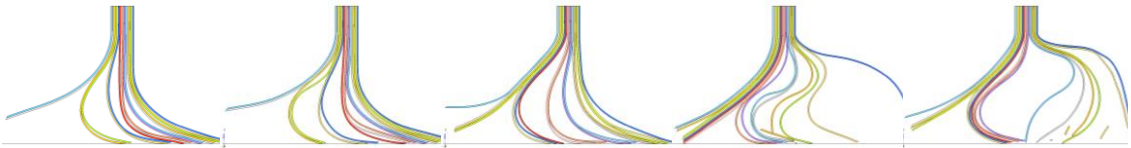
Şekil C.2 : Hashin hasar kriteri ve farklı sürtünme katsayıları ile elde edilen statik analiz sonuçları.



Şekil C.3 : Hashin hasar kriteri, 0,1 hasar gerinimi ve farklı sürtünme katsayıları kullanılarak statik analizlerde elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri.

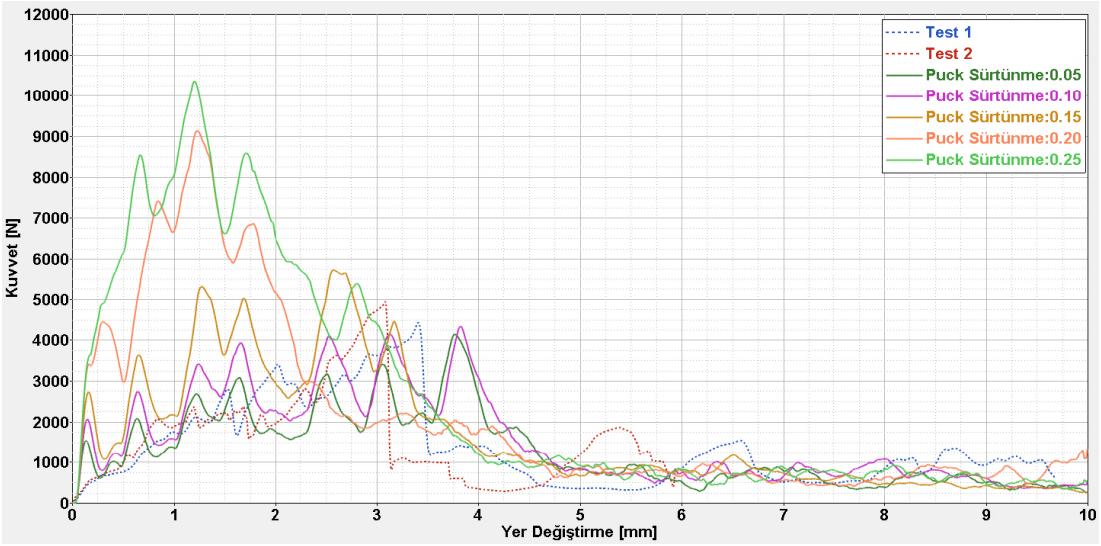
Çizelge C.2 : Hashin hasar kriteri, 0,1 hasar gerinimi ve farklı sürtünme katsayıları kullanılarak statik analizlerde elde edilmiş maksimum reaksiyon kuvvetleri ve sönümlenen enerji miktarları.

	Maksimum Reaksiyon Kuvveti [N]		Sönümlenen Enerji [mJ]	
	Test			
Test 1	4429		13239	
Test 2	4940		12895	
	Analiz			
Sürtünme Katsayısı	Sonuç [N]	Fark [%]	Sonuç [mJ]	Fark [%]
0,05	3712	16,2	12283	4,7
0,10	4170	5,9	15075	-13,9
0,15	5677	14,9	17427	-31,6
0,20	11649	135,8	24126	-82,2
0,25	8221	66,4	25703	-94,1



0,05 **0,10** **0,15** **0,20** **0,25**

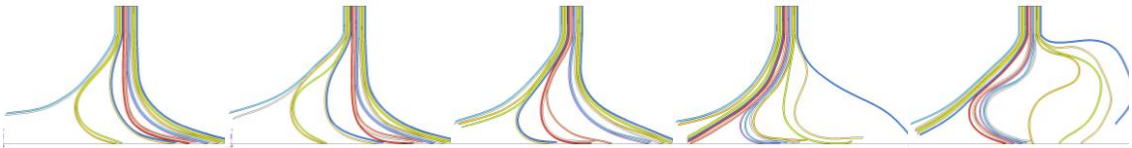
Şekil C.4 : Hashin hasar kriteri, 0,1 hasar gerinimi ve farklı sürtünme katsayıları ile elde edilen statik analiz sonuçları.



Şekil C.5 : Puck hasar kriteri ve farklı sürtünme katsayıları kullanılarak statik analizlerde elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri.

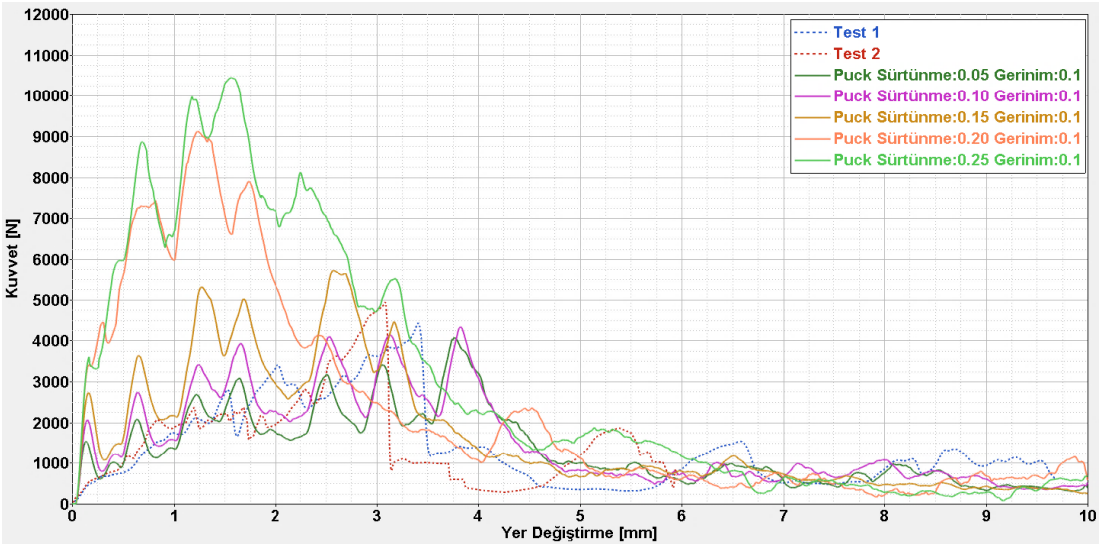
Çizelge C.3 : Puck hasar kriteri ve farklı sürtünme katsayıları kullanılarak statik analizlerde elde edilmiş maksimum reaksiyon kuvvetleri ve sönümlenen enerji miktarları.

	Maksimum Reaksiyon Kuvveti [N]		Sönümlenen Enerji [mJ]	
	Test			
Test 1	4429		13239	
Test 2	4940		12895	
	Analiz			
Sürtünme Katsayısı	Sonuç [N]	Fark [%]	Sonuç [mJ]	Fark [%]
0,05	12699	6,6	12699	1,5
0,10	15237	2,2	15237	15,1
0,15	16634	16	16634	25,6
0,20	21041	84,8	21041	58,9
0,25	25875	109,6	25875	95,4



0,05 **0,10** **0,15** **0,20** **0,25**

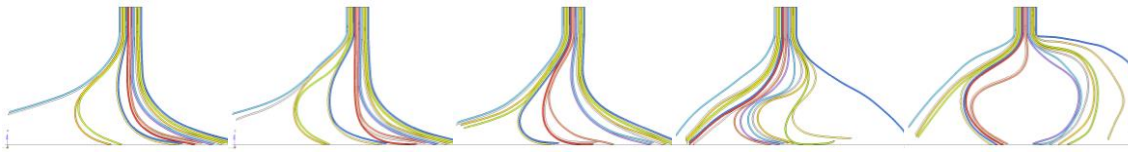
Şekil C.6 : Puck hasar kriteri ve farklı sürtünme katsayıları ile elde edilen statik analiz sonuçları.



Şekil C.7 : Puck hasar kriteri, 0,1 hasar gerinimi ve farklı sürtünme katsayıları kullanılarak statik analizlerde elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri.

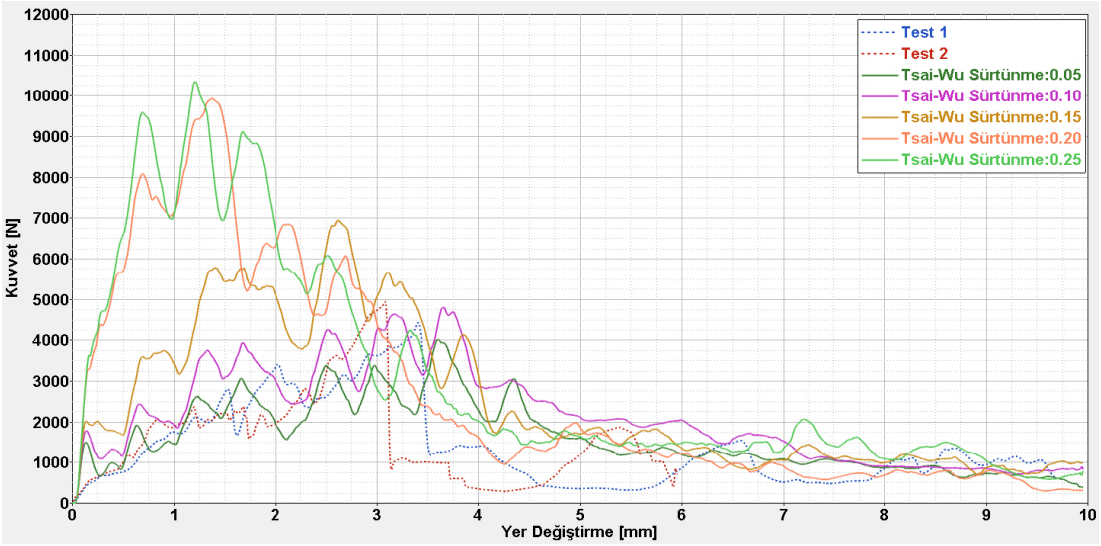
Çizelge C.4 : Puck hasar kriteri, 0,1 hasar gerinimi ve farklı sürtünme katsayıları kullanılarak statik analizlerde elde edilmiş maksimum reaksiyon kuvvetleri ve sönümlenen enerji miktarları.

	Maksimum Reaksiyon Kuvveti [N]		Sönümlenen Enerji [mJ]	
	Test			
Test 1	4429		13239	
Test 2	4940		12895	
	Analiz			
Sürtünme Katsayısı	Sonuç [N]	Fark [%]	Sonuç [mJ]	Fark [%]
0,05	4071	8,1	13249	-0,1
0,10	4330	2,2	15237	-15,1
0,15	5728	16	16634	-25,6
0,20	9121	84,6	22724	-71,6
0,25	10441	111,4	29752	-124,7



0,05 **0,10** **0,15** **0,20** **0,25**

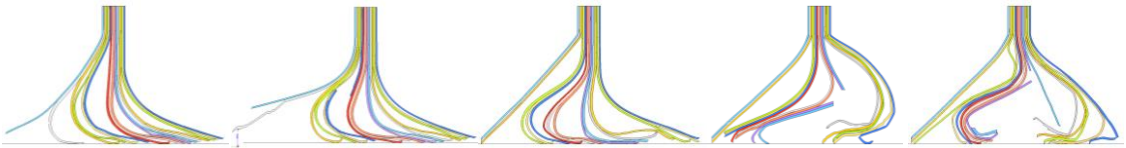
Şekil C.8 : Puck hasar kriteri, 0,1 hasar gerinimi ve farklı sürtünme katsayıları ile elde edilen statik analiz sonuçları.



Şekil C.9 : Tsai-Wu hasar kriteri ve farklı sürtünme katsayıları kullanılarak statik analizlerde elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri.

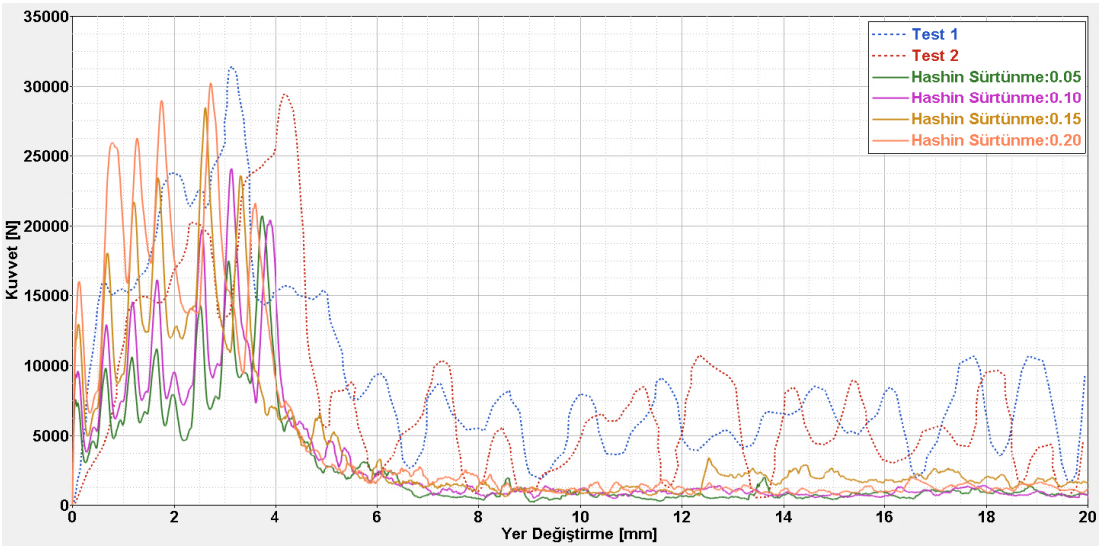
Çizelge C.5 : Tsai-Wu hasar kriteri ve farklı sürtünme katsayıları kullanılarak statik analizlerde elde edilmiş maksimum reaksiyon kuvvetleri ve sönümlenen enerji miktarları.

	Maksimum Reaksiyon Kuvveti [N]		Sönümlenen Enerji [mJ]	
	Test			
Test 1	4429		13239	
Test 2	4940		12895	
	Analiz			
Sürtünme Katsayısı	Sonuç [N]	Fark [%]	Sonuç [mJ]	Fark [%]
0,05	4010	9,5	16364	-23,6
0,10	4792	3	21595	-63,1
0,15	6943	40,6	25186	-90,2
0,20	9929	101	27456	-107,4
0,25	10341	109,3	31032	-134,4



0,05 **0,10** **0,15** **0,20** **0,25**

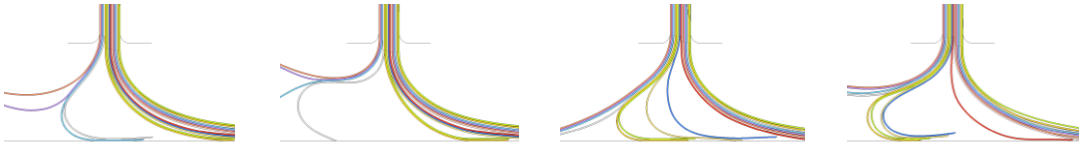
Şekil C.10 : Tsai-Wu hasar kriteri ve farklı sürtünme katsayıları ile elde edilen statik analiz sonuçları.



Şekil C.11 : Hashin hasar kriteri ve farklı sürtünme katsayıları kullanılarak dinamik analizlerde elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri.

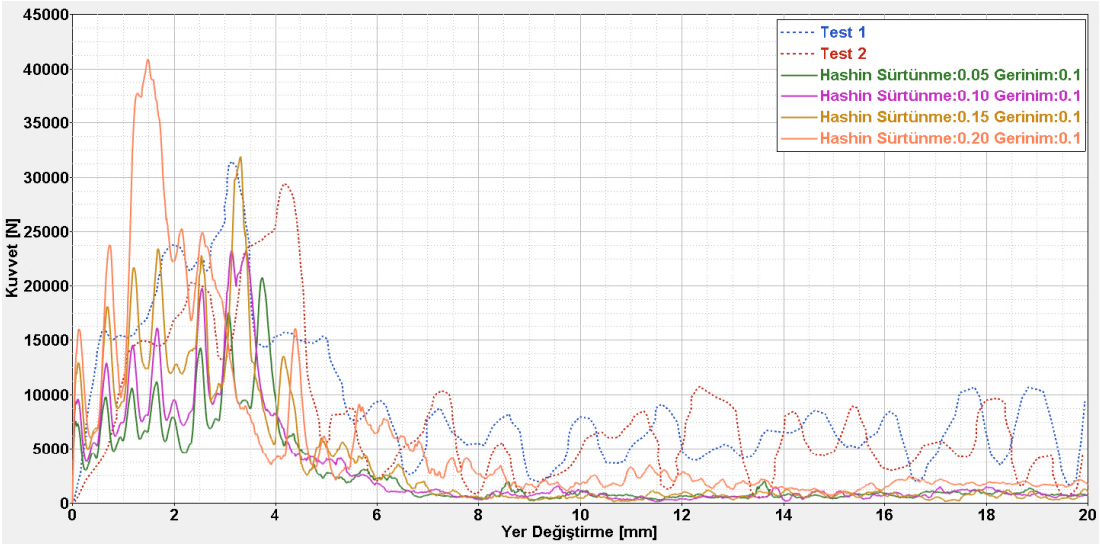
Çizelge C.6 : Hashin hasar kriteri ve farklı sürtünme katsayıları kullanılarak dinamik analizlerde elde edilmiş maksimum reaksiyon kuvvetleri ve sönümlenen enerji miktarları.

	Maksimum Reaksiyon Kuvveti [N]		Sönümlenen Enerji [mJ]	
	Test			
Test 1	31422		183408	
Test 2	29391		153767	
	Analiz			
Sürtünme Katsayısı	Sonuç [N]	Fark [%]	Sonuç [mJ]	Fark [%]
0,05	20710	29,5	55135	64,1
0,10	24085	18,1	67778	55,9
0,15	28432	3,3	89663	41,7
0,20	30233	2,9	99537	35,3



0,05 **0,10** **0,15** **0,20**

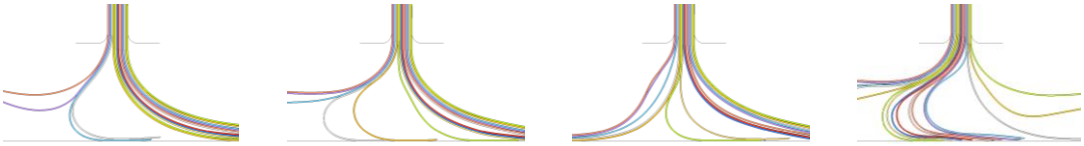
Şekil C.12 : Hashin hasar kriteri ve farklı sürtünme katsayıları ile elde edilen dinamik analiz sonuçları.



Şekil C.13 : Hashin hasar kriteri, 0,1 hasar gerinimi ve farklı sürtünme katsayıları kullanılarak dinamik analizlerde elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri.

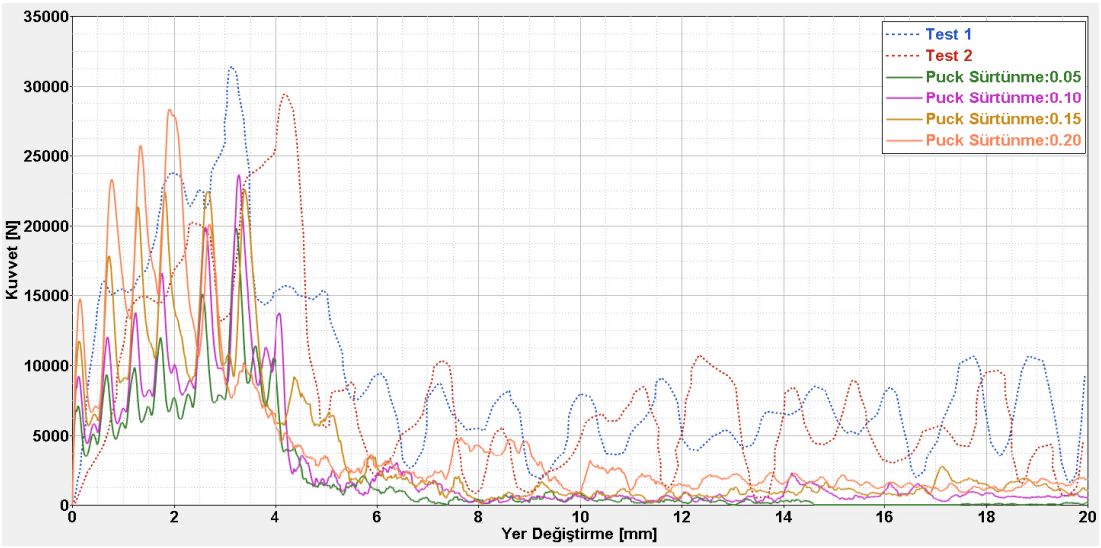
Çizelge C.7 : Hashin hasar kriteri, 0,1 hasar gerinimi ve farklı sürtünme katsayıları kullanılarak dinamik analizlerde elde edilmiş maksimum reaksiyon kuvvetleri ve sönümlenen enerji miktarları.

	Maksimum Reaksiyon Kuvveti [N]		Sönümlenen Enerji [mJ]	
	Test			
Test 1	31422		183408	
Test 2	29391		153767	
	Analiz			
Sürtünme Katsayısı	Sonuç [N]	Fark [%]	Sonuç [mJ]	Fark [%]
0,05	20710	29,5	55135	64,1
0,10	23286	20,8	65938	57,1
0,15	31861	1,4	80858	47,4
0,20	40863	30	120865	21,4



0,05 **0,10** **0,15** **0,20**

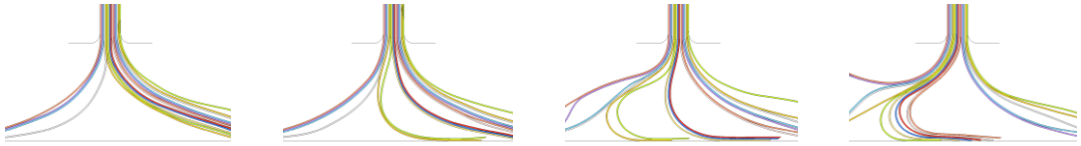
Şekil C.14 : Hashin hasar kriteri, 0,1 hasar gerinimi ve farklı sürtünme katsayıları ile elde edilen dinamik analiz sonuçları.



Şekil C.15 : Puck hasar kriteri ve farklı sürtünme katsayıları kullanılarak dinamik analizlerde elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri.

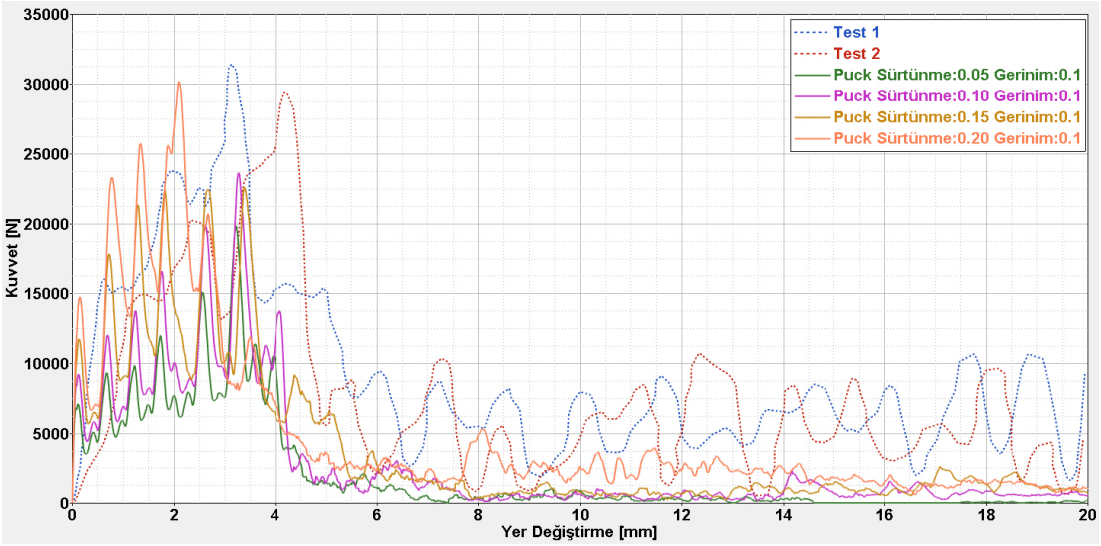
Çizelge C.8 : Puck hasar kriteri ve farklı sürtünme katsayıları kullanılarak dinamik analizlerde elde edilmiş maksimum reaksiyon kuvvetleri ve sönümlenen enerji miktarları.

	Maksimum Reaksiyon Kuvveti [N]		Sönümlenen Enerji [mJ]	
	Test			
Test 1	31422		183408	
Test 2	29391		153767	
	Analiz			
Sürtünme Katsayısı	Sonuç [N]	Fark [%]	Sonuç [mJ]	Fark [%]
0,05	19838	32,5	42235	72,5
0,10	23626	19,6	60231	60,8
0,15	22599	23,1	79166	48,5
0,20	28326	3,6	97050	36,9



0,05 **0,10** **0,15** **0,20**

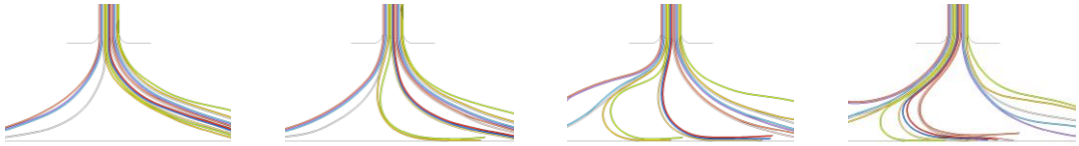
Şekil C.16 : Puck hasar kriteri ve farklı sürtünme katsayıları ile elde edilen dinamik analiz sonuçları.



Şekil C.17 : Puck hasar kriteri, 0,1 hasar gerinimi ve farklı sürtünme katsayıları kullanılarak dinamik analizlerde elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri.

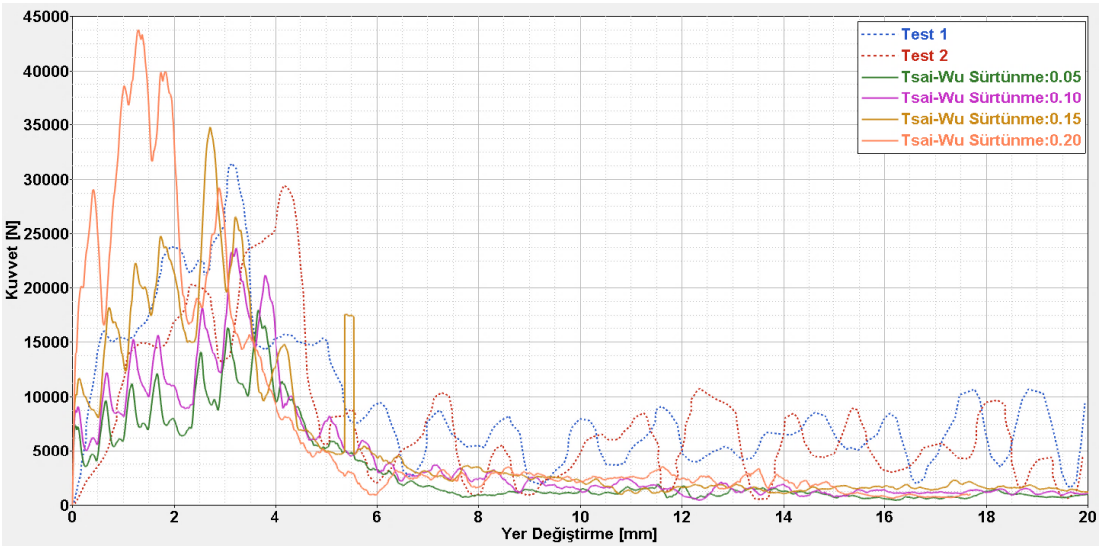
Çizelge C.9 : Puck hasar kriteri, 0,1 hasar gerinimi ve farklı sürtünme katsayıları kullanılarak dinamik analizlerde elde edilmiş maksimum reaksiyon kuvvetleri ve sönümlenen enerji miktarları.

	Maksimum Reaksiyon Kuvveti [N]		Sönümlenen Enerji [mJ]	
	Test			
Test 1	31422		183408	
Test 2	29391		153767	
	Analiz			
Sürtünme Katsayısı	Sonuç [N]	Fark [%]	Sonuç [mJ]	Fark [%]
0,05	19838	32,5	42235	72,5
0,10	23626	19,6	60231	60,8
0,15	22599	23,1	78709	48,8
0,20	30191	2,7	99252	35,5



0,05 **0,10** **0,15** **0,20**

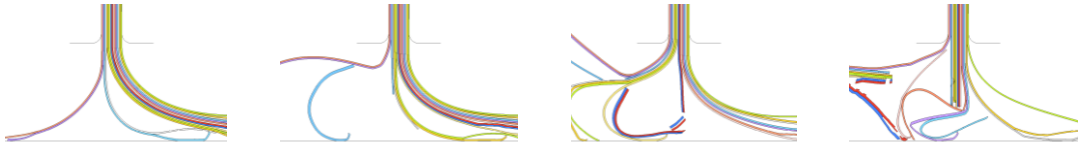
Şekil C.18 : Puck hasar kriteri, 0,1 hasar gerinimi ve farklı sürtünme katsayıları ile elde edilen dinamik analiz sonuçları.



Şekil C.19 : Tsai-Wu hasar kriteri ve farklı sürtünme katsayıları kullanılarak dinamik analizlerde elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri.

Çizelge C.10 : Tsai-Wu hasar kriteri ve farklı sürtünme katsayıları kullanılarak dinamik analizlerde elde edilmiş maksimum reaksiyon kuvvetleri ve sönümlenen enerji miktarları.

	Maksimum Reaksiyon Kuvveti [N]		Sönümlenen Enerji [mJ]	
	Test			
Test 1	31422		183408	
Test 2	29391		153767	
	Analiz			
Sürtünme Katsayısı	Sonuç [N]	Fark [%]	Sonuç [mJ]	Fark [%]
0,05	17920	39	67961	55,8
0,10	23674	19,5	91062	40,8
0,15	34761	10,6	119344	22,4
0,20	43744	39,2	131989	14,2



0,05 **0,10** **0,15** **0,20**

Şekil C.20 : Tsai-Wu hasar kriteri ve farklı sürtünme katsayıları ile elde edilen dinamik analiz sonuçları.

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad **: Serdar KORKUT**

Doğum Tarihi ve Yeri **: 04.12.1989 / Safranbolu**

E-posta **:** serdarkork@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** **:** 2013, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Makina Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- Metro İstanbul A.Ş. : 09.2013 – halen
- Mercedes Benz Türk A.Ş. : 07.2012 – 08.2012 (Staj)
- TEI – Tusaş Motor Sanayii A.Ş. : 07.2011 – 08.2011 (Staj)