

**DÜŞÜK HIZLI DARBE YÜKÜ ALTINDA
TABAKALI KOMPOZİT MALZEMERİN
MEKANİK DAVRANIŞI**

Serkan KARADAYI

**Y. Lisans Tezi
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Prof. Dr. Hamit AKBULUT
2012
Her hakkı saklıdır**

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Y. LİSANS TEZİ

DÜŞÜK HIZLI DARBE YÜKÜ ALTINDA
TABAKALI KOMPOZİT MALZEMELERİN
MEKANİK DAVRANIŞI

Serkan KARADAYI

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ERZURUM

2012

Her hakkı saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

DÜŞÜK HIZLI DARBE YÜKÜ ALTINDA TABAKALI KOMPOZİT
MALZEMELERİN MEKANİK DAVRANIŞI

Prof. Dr. Hamit AKBULUT'un danışmanlığında, Serkan KARADAYI tarafından hazırlanan bu çalışma 24/02/2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak **oybirliği/oy çokluğu (3./.9)** ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Hamit AKBULUT

İmza

Üye : Prof. Dr. Adnan ÖZEL

İmza

Üye : Doç. Dr. Murat Demir AYDIN

İmza

(imza)

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum

Enstitü Müdürü

Prof. Dr. İhsan EFEOĞLU

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Y. Lisans Tezi

DÜŞÜK HIZLI DARBE YÜKÜ ALTINDA TABAKALI KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİK DAVRANIŞI

Serkan KARADAYI

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hamit AKBULUT

Bu çalışmada, düşük hızlı darbe yüklerine maruz tabakalı kompozit plakların mekanik davranışları ANSYS® LS-DYNA yazılımı kullanılarak araştırılmıştır. Çalışmada, vurucu (impactor) geometrisi, vurucu hızı, rijitlik oranı, takviye açıları, tabaka sayısı, plak kalınlığı ve plak alanı gibi parametrelerin darbe davranışı üzerindeki etkileri dikkate alınmıştır. Ayrıca, kompozit malzemelerin maruz kaldığı şartlarda, nikel alaşımı, 1018 çeliği ve titanyum alaşımından yapılmış izotropik malzemelerin de darbe davranışları incelenmiştir. Malzemelerin darbe yüklemesi esnasında; darbe enerjisi, darbe kuvveti, Von-Misses gerilmesi, yer değiştirme ve Hourglass enerjisi değerlerindeki değişimler incelenmiştir. Çalışmada dikkate alınan, takviye açısı, rijitlik oranı, tabaka sayısı, plaka kalınlığı, vurucu geometrisi, vurucu hızı, plaka alanı, izotropik malzemeler ve sınır şartı parametrelerinin darbe davranışı üzerinde önemli etkileri olduğu belirlenmiştir. Bu çalışmada ayrıca SolidWorks yazılımı kullanılarak darbe deney cihazı tasarlanmıştır. Tasarlanmış bu model kullanılarak ve sonrasında vurucunun düşmesi analiz edilerek, yer değiştirme/hız-zaman ve kinetik/potansiyel enerji-zaman grafikleri elde edilmiştir.

2012, 171 sayfa

Anahtar Kelimeler: Tabakalı Kompozitler, Düşük Hızlı Darbe, Sonlu Elemanlar, ANSYS® LS-DYNA

ABSTRACT

Master Thesis

MECHANICAL BEHAVIOR OF LAMINATED COMPOSITE MATERIALS UNDER LOW VELOCITY IMPACT LOADING

Serkan KARADAYI

Ataturk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Hamit AKBULUT

In this study, mechanical behaviors of laminated composite plates under low-speed impact loads have been investigated using ANSYS ® LS-DYNA software. In this study, the effects of parameters such as impactor geometry, impactor velocity, stiffness ratio, orientation angles, number of layers, plate thickness, and plate area on the impact behavior have been taken into consideration. Additionally, impact behavior of the isotropic materials (nickel alloy, 1018 steel and titanium alloy) have also been studied in the conditions, which composite materials are exposed. During the Impact loading of the materials; changes of values of impact energy, impact force, Von-Misses stress, displacement and Hourglass energy have been examined. In present study, it is found that orientation angles, stiffness ratio, number of layers, plate thickness, impactor geometry, impactor velocity, plate area, isotropic materials and boundary condition have effects on impact behavior of materials. In this study, impact test device has been also designed using SolidWorks software. By using this test model and then analyzing impactor falling, displacement/velocity-time and kinetic/ potential energy-time graphs have been obtained.

2012, 171 pages

Keywords: Laminated Composite, Low velocity impact, Finite Elements, ANSYS® LS-DYNA

TEŞEKKÜRLER

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışma boyunca her türlü yardım ve desteğini esirgemeyen, bilgi ve deneyimleriyle bana yol gösteren, danışmanım Sayın Prof. Dr. Hamit AKBULUT'a teşekkürlerimi sunarım. Çalışmalarında yol gösteren ve desteklerini esirgemeyen Sayın Araştırma Görevlisi Volkan ACAR ve Sayın Makine Mühendisi Farzin A. SHİSHEVAN'a şükranlarımı sunarım.

Çalışma ve eğitim süreçlerinde her türlü maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, her konuda yanımda olan aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Serkan KARADAYI

Şubat 2012

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xii
1. GİRİŞ	1
1.1 Amaç.....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	3
3. MATERYAL ve YÖNTEM	14
3.1. Kompozit malzemeler.....	14
3.1.1. Matris malzemeleri.....	15
3.1.2. Takviye malzemeleri.....	15
3.1.3. Kompozit malzemelerin avantajları.....	16
3.1.4. Kompozit malzemelerin dezavantajları.....	18
3.2. Kompozit malzemelerin mekaniği.....	19
3.2.1. Mikromekanik.....	19
3.2.1.a. E_1 Elastisite modülünün hesaplanması.....	20
3.2.1.b. E_2 Elastisite modülünün hesaplanması.....	22
3.2.1.c. Poisson oranı ν_{12} 'nin hesaplanması.....	24
3.2.1.d. G_{12} Kayma modülünün hesaplanması.....	26
3.2.2. Makromekanik.....	28
3.2.2.a. Anizotrop malzemelerin elastik davranışı.....	28
3.2.2.b. Ortotropik tabakalarda düzlem gerilme durumu.....	32
3.2.2.c. Mekanik davranışın yöne bağlı olarak değişimi.....	33
3.2.2.d. Klasik laminasyon teorisi.....	35
3.2.3. Çok tabakalarda akma (kırılma) durumu.....	42
3.3. Sonlu elamanlar metodu (SEM).....	43
3.4. Kompozit malzemelerin darbe davranışı.....	49

3.4.1. Düşük hızlı darbenin belirlenmesi.....	49
3.4.2. Enine darbe.....	50
3.4.3. Darbe testleri.....	51
3.4.4. Darbe sonucu oluşan hasar modları.....	54
3.5. Belytschko-Tsay	56
3.5.1. Eş-dönme koordinatları.....	56
3.5.2. Hız –gerinme- yer değiştirme ilişkileri.....	59
3.5.3. Gerilme bileşkeleri ve düğüm kuvvetleri.....	61
3.5.4. Hourglass deformasyonlar.....	62
3.5.5. SHELL 163 elemanı.....	63
3.5.6. SOLID 164 elemanı.....	64
3.5.7. Kontak tipleri.....	65
3.5.8. Kontak seçenekleri.....	66
3.6. Ağırlık düşürme test cihazı tasarımı.....	68
3.6.1. Hareket analizi.....	69
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	74
4.1. Problemin tanımı.....	74
4.2. Çalışma sonuçlarının teyit edilmesi.....	76
4.2.1. Vurucu hızının darbe davranışına etkisi.....	78
4.2.2. Plak alanının darbe davranışına etkisi.....	87
4.2.3. Takviye açısının darbe davranışına etkisi.....	95
4.2.4. Sınır şartlarının darbe davranışına etkisi.....	109
4.2.5. İzotropik ve anizotropik malzemelerin darbe davranışı.....	118
4.2.6. Tabaka sayısının darbe davranışına etkisi.....	125
4.2.7. Vurucu geometrisinin darbe davranışına etkisi.....	132
4.2.8. Plaka kalınlığının darbe davranışına etkisi.....	139
4.2.9. E_1 / E_2 Rijitlik oranının darbe davranışına etkisi.....	145
5. SONUÇLAR.....	152
KAYNAKLAR.....	157
ÖZGEÇMİŞ.....	160

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

J	Joule
kN	Kilo-Newton
m	Metre
mm	Milimetre
MPa	Mega Paskal
ms	Milisaniye
s	Saniye
SEM	Sonlu Elemanlar Metodu
S_i	i. kenar

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Temsili hacim elemanı	19
Şekil 3.2. Tek yönlü takviye edilmiş ortotropik plak	20
Şekil 3.3. Fiber yönünde çekme yüküne maruz ortotropik plak	20
Şekil 3.4. Fibere dik yönde çekme yüküne maruz ortotropik plak.....	23
Şekil 3.5. Temsili hacim elemanında boyda uzamaya karşı yanal daralma.....	25
Şekil 3.6. Kayma gerilmesine maruz temsili hacim elemanı.....	27
Şekil 3.7. θ açısı ile takviye edilmiş bir plak.....	33
Şekil 3.8. Levhadaki bir noktanın yer değiştirmesi.....	37
Şekil 3.9. Bir levhaya etkiyen kuvvet ve momentler.....	40
Şekil 3.10. n tabakalı levhada koordinatlar	40
Şekil 3.11. Örnek bir sonlu eleman modelinde elemanlar.....	44
Şekil 3.12. Örnek bir sonlu eleman modelinde düğüm noktaları.....	44
Şekil 3.13. Enine darbeye maruz kompozit malzeme.....	50
Şekil 3.14. Charpy ve Izod darbe test düzenekleri.....	52
Şekil 3.15. Ağırlık Düşürme Test Düzeneği.....	53
Şekil 3.16. Ağırlık düşürme test düzeneğinin ayrıntılı görünümü.....	53
Şekil 3.17. Balistik test düzeneği.....	54
Şekil 3.18. Darbe sonucu kompozit malzemede oluşan hasar modları.....	55
Şekil 3.19. Eleman koordinat sisteminin yapısı.....	57
Şekil 3.20. Deforme olmamış mesh ve Hourglass etkisi ile deforme olmuş mesh....	63
Şekil 3.21. SHELL 163 elemanının geometrisi.....	64
Şekil 3.22. SOLID 164 elemanının geometrisi.....	64
Şekil 3.23. SolidWorks'te modellenmiş ağırlık düşürme test düzeneği.....	69
Şekil 3.24. SolidWorks' te modellenmiş vurucu (impektör).....	69
Şekil 3.25. SolidWorks'te modellenmiş test tablası.....	70
Şekil 3.26. SolidWorks' te modellenmiş sütun direkleri.....	71
Şekil 3.27. Hareketin başlaması ve geri sekmenin meydana gelmesi.....	72
Şekil 3.28. Hareket analizi sonucunda yer değiştirme/hız- zaman grafiği.....	72

Şekil 3.29. Hareket analizinde Potansiyel Enerji/Kinetik Enerji-zaman grafiği	73
Şekil 4.1. Numune ve vurucunun SEM modelleri.....	75
Şekil 4.2. Sonuçların literatürle karşılaştırılması.....	78
Şekil 4.3. Darbe hızının değişimine bağlı olarak gerilme dağılımı.....	79
Şekil 4.4. Darbe hızının değişimine bağlı olarak yer değiştirme-zaman grafiği.....	80
Şekil 4.5. Darbe hızına göre maksimum yer değiştirme	80
Şekil 4.6. Darbe hızının değişimine göre VonMisses-zaman grafiği.....	81
Şekil 4.7. Darbe hızına göre maksimum Von-Misses gerilme grafiği.....	82
Şekil 4.8. Darbe hızı değişiminde kontak kuvveti-zaman grafiği.....	83
Şekil 4.9. Darbe hızına göre maksimum kontak kuvveti.....	83
Şekil 4.10. Darbe hızının değişimine bağlı olarak enerji-zaman grafiği.....	84
Şekil 4.11. Darbe hızına göre maksimum enerji grafiği.....	84
Şekil 4.12. Darbe hızının değişiminde Hourglass enerji-zaman grafiği.....	85
Şekil 4.13. Darbe hızına göre maksimum Hourglass enerji grafiği	86
Şekil 4.14. Darbe hızının değişimine göre reaksiyon süresi	86
Şekil 4.15. Plak alanının değişimine bağlı olarak gerilme dağılımları.....	88
Şekil 4.16. Plak alanının değişimine göre yer değiştirme-zaman grafiği.....	88
Şekil 4.17. Plak alanının değişimine göre maksimum yer değiştirme grafiği.....	89
Şekil 4.18. Plak alanının değişimine göre Von-Misses-zaman grafiği.....	90
Şekil 4.19. Plak alanının değişiminde maksimum Von-Misses gerilme grafiği.....	91
Şekil 4.20. Plak alanının değişimine bağlı olarak kontak kuvveti-zaman grafiği.....	92
Şekil 4.21. Plak alanının değişiminde maksimum kontak kuvveti grafiği.....	92
Şekil 4.22. Plak alanının değişimine bağlı olarak enerji-zaman grafiği.....	93
Şekil 4.23. Plak alanının değişiminde maksimum enerji grafiği.....	93
Şekil 4.24. Plak alanının değişiminde Hourglass enerji-zaman grafiği.....	94
Şekil 4.25. Plak alanının değişiminde maksimum Hourglass enerji grafiği.....	94
Şekil 4.26. Plak alanının değişimine göre reaksiyon süresi.....	95
Şekil 4.27. Takviye açılarının değişimine bağlı olarak gerilme dağılımları.....	97
Şekil 4.28. Takviye açılarının değişimine göre yer değiştirme-zaman grafiği.....	98
Şekil 4.29. Takviye açılarının değişiminde maksimum yer değiştirme grafiği.....	99
Şekil 4.30. Takviye açılarının değişimine göre olarak Von-Misses -zaman.....	100

Şekil 4.31. Takviye açılarının değişiminde maksimum Von-Misses gerilmeleri.....	102
Şekil 4.32. Takviye açılarının değişiminde kontak kuvveti-zaman grafiği.....	103
Şekil 4.33. Takviye açılarının değişiminde maksimum kontak kuvvetleri.....	104
Şekil 4.34. Takviye açılarının değişimine göre enerji -zaman grafiği.....	105
Şekil 4.35. Takviye açılarının değişiminde maksimum enerji grafiği.....	106
Şekil 4.36. Takviye açılarının değişimine göre Hourglass enerji -zaman grafiği.....	107
Şekil 4.37. Takviye açılarının değişiminde maksimum Hourglass enerji grafiği.....	108
Şekil 4.38. Takviye açılarının değişimine göre reaksiyon süreleri.....	108
Şekil 4.39. Sınır şartlarının değişimine bağlı olarak gerilme dağılımları.....	110
Şekil 4.40. Sınır şartlarının değişimine göre yer değiştirme- zaman grafiği.....	110
Şekil 4.41. Sınır şartlarının değişiminde maksimum yer değiştirme grafiği.....	111
Şekil 4.42. Sınır şartlarının değişimine göre Von-Misses-zaman grafiği.....	112
Şekil 4.43. Sınır şartlarının değişiminde maksimum Von-Misses gerilmeleri.....	113
Şekil 4.44. Sınır şartlarının değişimine göre kontak kuvveti-zaman grafiği.....	114
Şekil 4.45. Sınır şartlarının değişiminde maksimum kontak kuvvetleri.....	114
Şekil 4.46. Sınır şartlarının değişimine bağlı olarak enerji-zaman grafiği.....	115
Şekil 4.47. Sınır şartlarının değişiminde maksimum enerji grafiği.....	115
Şekil 4.48. Sınır şartlarının değişimine göre Hourglass enerji-zaman grafiği.....	116
Şekil 4.49. Sınır şartlarının değişiminde maksimum Hourglass enerji grafiği.....	117
Şekil 4.50. Sınır şartlarının değişimine göre reaksiyon süreleri.....	117
Şekil 4.51. Bazı izotropik ve anizotropik plaklarda gerilme dağılımları.....	119
Şekil 4.52. İzotropik ve anizotropik plakalarda yer değiştirme-zaman grafiği.....	120
Şekil 4.53. İzotropik ve anizotropik plakalarda maksimum yer değiştirmeler.....	120
Şekil 4.54. İzotropik ve anizotropik plakalarda Von-Misses-zaman grafiği.....	121
Şekil 4.55. İzotropik ve anizotropik plakalarda maksimum gerilmeler.....	122
Şekil 4.56. İzotropik ve anizotropik plakalarda kontak kuvveti-zaman grafiği.....	122
Şekil 4.57. İzotropik ve anizotropik plakalarda maksimum kontak kuvvetleri.....	123
Şekil 4.58. İzotropik ve anizotropik plakalarda enerji-zaman grafiği.....	123
Şekil 4.59. İzotropik ve anizotropik plakalarda maksimum enerji miktarları.....	124
Şekil 4.60. İzotropik ve anizotropik plakalarda reaksiyon süreleri.....	124
Şekil 4.61. Tabaka sayısının değişimine bağlı olarak gerilme dağılımları.....	126

Şekil 4.62. Tabaka sayısının değişimine göre yer değiştirme–zaman grafiği.....	126
Şekil 4.63. Tabaka sayısının değişiminde maksimum yer değiştirme grafiği.....	127
Şekil 4.64. Tabaka sayısının değişimine göre Von-Misses – zaman grafiği.....	128
Şekil 4.65. Tabaka sayısının değişiminde maksimum Von-Misses gerilmeleri.....	128
Şekil 4.66. Tabaka sayısının değişimine göre kontak kuvveti – zaman grafiği.....	129
Şekil 4.67. Tabaka sayısının değişimine göre enerji – zaman grafiği.....	129
Şekil 4.68. Tabaka sayısının değişiminde maksimum kontak kuvveti/enerji.....	130
Şekil 4.69. Tabaka sayısının değişimine göre Hourglass enerji – zaman grafiği.....	130
Şekil 4.70. Tabaka sayısının değişiminde maksimum Hourglass enerji grafiği.....	131
Şekil 4.71. Tabaka sayısının değişiminde reaksiyon süreleri.....	131
Şekil 4.72. Vurucu geometrisinin değişiminde kontak kuvveti – zaman grafiği.....	132
Şekil 4.73. Vurucu geometrisinin değişiminde maksimum kontak kuvvetleri.....	133
Şekil 4.74. Vurucu geometrisinin değişimine göre gerilme dağılımları.....	134
Şekil 4.75. Vurucu geometrisinin değişimine göre yer değiştirme-zaman grafiği....	134
Şekil 4.76. Vurucu geometrisinin değişiminde maksimum yer değiştirmeler.....	135
Şekil 4.77. Vurucu geometrisinin değişimine göre Von-Misses – zaman grafiği.....	136
Şekil 4.78. Vurucu geometrisinin değişiminde maksimum VonMisses gerilmesi....	136
Şekil 4.79. Vurucu geometrisinin değişimine göre enerji– zaman grafiği.....	137
Şekil 4.80. Vurucu geometrisinin değişiminde maksimum enerji grafiği.....	137
Şekil 4.81. Vurucu geometrisinin değişiminde Hourglass enerji–zaman grafiği.....	138
Şekil 4.82. Vurucu geometrisinin değişimine göre Hourglass enerji grafiği.....	138
Şekil 4.83. Vurucu geometrisinin değişimine göre reaksiyon süreleri.....	139
Şekil 4.84. Plaka kalınlığının değişimine göre gerilme dağılımları.....	140
Şekil 4.85. Plaka kalınlığına bağlı olarak yer değiştirme-zaman grafiği.....	140
Şekil 4.86. Plaka kalınlığına bağlı olarak maksimum yer değiştirme grafiği.....	141
Şekil 4.87. Plaka kalınlığının değişiminde Von-Misses gerilmesi-zaman.....	140
Şekil 4.88. Plaka kalınlığının değişiminde maksimum Von-Misses gerilmeleri.....	142
Şekil 4.89. Plaka kalınlığının değişimine göre kontak kuvveti-zaman grafiği.....	143
Şekil 4.90. Plaka kalınlığının değişimine göre maksimum kontak kuvvetleri.....	144
Şekil 4.91. Plaka kalınlığının değişiminde reaksiyon süreleri.....	144
Şekil 4.92. Rijitlik oranının değişimine göre yer değiştirme- zaman grafiği.....	145

Şekil 4.93. Rijitlik oranının değişimine göre maksimum yer değiştirme grafiği.....	146
Şekil 4.94. Rijitlik oranın değişimine göre Von-Misses – zaman grafiği.....	146
Şekil 4.95. Rijitlik oranının değişiminde maksimum Von-Misses gerilmeleri.....	147
Şekil 4.96. Rijitlik oranının değişimine göre kontak kuvveti-zaman grafiği.....	148
Şekil 4.97. Rijitlik oranının değişiminde maksimum kontak kuvvetleri.....	148
Şekil 4.98. Rijitlik oranının değişimine göre enerji - zaman grafiği.....	149
Şekil 4.99. Rijitlik oranının değişimine göre maksimum enerji grafiği.....	149
Şekil 4.100. Rijitlik oranının değişimine göre Hourglass enerji - zaman grafiği.....	150
Şekil 4.101. Rijitlik oranının değişiminde maksimum Hourglass enerji değerleri....	150
Şekil 4.102. Rijitlik oranının değişiminde reaksiyon süreleri.....	151

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Vurucunun (impektör) mekanik özellikleri.....	70
Çizelge 3.2. Tablanın mekanik özellikleri.....	70
Çizelge 3.3. Sütun direklerin mekanik özellikleri.....	71
Çizelge 3.4. Hareket analizinde katı gövdelerin temas özellikleri.....	71
Çizelge 4.1. Vurucunun mekanik özellikleri.....	76
Çizelge 4.2. Bileşenlerin mekanik özellikleri.....	76
Çizelge 4.3. Kompozit malzemenin mekanik özellikleri.....	77
Çizelge 4.4. 1.Darbe seviyesindeki deney sonuçları.....	77
Çizelge 4.5. İzotropik malzemelerin mekanik özellikleri.....	118

1. GİRİŞ

Geleceğe dönük mühendislik malzemelerinin, çevresel sorumlulukların da göz önünde tutulduğu üretim yöntemleriyle üretilmesi ve geliştirilmesi ancak teknolojik, ekonomik, çevre dengesi bileşenlerinin her birinin zorunluluk arz ettiği disiplinler arası bir misyon ve strateji odaklı bir çalışma süreciyle olabilmektedir.

Mühendislik tasarımlarında sistemin maruz kaldığı statik ve dinamik yükler altındaki davranışlarının önceden belirlenmesi gerekir. Yük altındaki davranışı belirleyen unsurlar, seçilen malzemenin mekanik özellikleri, geometrisi ve maruz kaldığı yüklerden oluşmaktadır. Tasarımın maruz kaldığı yüklemelerden biri olan dinamik yüklemelerde mühendislik uygulamalarında, özellikle de mekanik uygulamalarında, dışarıdan gelecek herhangi bir darbeye karşı beklenmedik sonuçların ortaya çıkmaması için, malzemenin gerekli en uygun cevabı veya davranışı vermesi istenir. Malzemenin darbe davranışında mekanik özellikleri de çok önemli rol oynamaktadır. Metal bir malzemenin darbe etkisinde davranışı plastik deformasyon şeklinde ve gözle görülebilecek şekilde elastik uzama ve plastik şekil değiştirme şeklinde meydana gelmektedir. Metal malzemelerin plastik şekil değiştirme kabiliyetinin olması fazla enerji absorbe edebileceği anlamına gelmektedir. Kompozit malzemede ise darbe yüklemesi durumunda gözle görülmeyecek şekilde içyapıda hasar meydana gelebilir. Plastik matrisli kompozit malzemelerin büyük bir kısmı kırılğan yapıda olduklarından darbe enerjisini elastik deformasyon ve hasar mekanizmaları sayesinde absorbe edebilmektedir (Vural ve Turan 2003).

1.1. Amaç

Kompozit malzemelerin dinamik yükleme altındaki davranışı malzemenin bileşenlerine, tabaka sayılarına, takviye açlarına, plaka kalınlıklarına ve diğer mekanik özelliklerine göre farklılık göstermektedir. Bunların yanında vurucunun geometrisi ve hızındaki değişim darbe cevabını önemli ölçüde etkilemektedir. Örneğin tüm dinamik yükleme

şartları aynı olmasına karşın kompozit malzemenin sadece takviye açısındaki değişim malzemenin hasar boyutunda ve şeklinde farklılık göstermektedir.

Literatür çalışmalarında kompozit malzemenin düşük hızlı darbe yükü altındaki davranışı hakkında birçok deneysel ve nümerik çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda kompozit malzemede oluşan hasar modları, temas kuvveti, absorblanan enerji, yer değiştirme gibi vb. sonuçlar ortaya konulmuştur. Bu çalışmada ise farklı geometride, farklı hızlara sahip vurucunun, tabakalı kompozit malzemedeki etkileri sonlu elemanlar metodu (SEM) kullanılarak ANSYS LS-DYNA yazılımı ile ortaya konulmuştur. Düşük hızlı darbe şartlarında, tabakalı kompozit malzemenin, tabaka sayısının, tabaka kalınlığının, takviye açısının, E_1/E_2 oranının, sınır şartlarının ve yüzey alanının değişimi gibi durumlarda, mekanik davranışının nasıl değiştiğinin cevabı ortaya konulmuştur. Bunlara ek olarak vurucunun hızındaki, geometrisindeki değişim ve malzemenin de anizotropik, izotropik olma durumları da incelenmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Kompozit malzemelerin düşük hızlı darbe altındaki davranışının incelenmesi konusunda birçok çalışma yapılmıştır. Bu konuda yapılan çalışmaların bir kısmı aşağıda sunulmuştur.

Basitçe desteklenmiş ön gerilmeli, tabakalı plakaların kütle etkisi altındaki dinamik davranışını Sun and Chattopadhyay (1975) analitik olarak incelemişlerdir. Plakalarda ön gerilme söz konusu olduğunda düşük enerji absorbe edeceğini ifade etmişlerdir.

Dobyns (1981) basitçe desteklenmiş ortotropik plakaların, statik ve dinamik yükleme koşullarında malzemenin davranışı için nümerik çalışma yapmıştır. Çalışmada düşük hızlı darbe analizi için kullanışlı nümerik yöntemler sunmuştur.

Lal (1982) grafit-epoksi kompozit plakaların, düşük hızlı darbe yükü etkisinde davranışını incelemiştir. Farklı çaplarda çelik toplarla çalışmalarını gerçekleştirmiştir. Numunelerin hasar bölgelerini belirlemek için ultrasonik tarama yapmıştır. Hasar oluşturan darbe enerjisinin eşik değerini tespit etmiştir.

Düşük hızlı darbe yükü altındaki anizotropik tabakalı levhaların dinamik davranışını Ramkuar and Chen (1982) analitik olarak incelemişlerdir. Mindlin plaka teorisine göre enine kayma deformasyonunu hesap etmiş ve ilişkin denklemleri Fourier integral dönüşümleri kullanılarak çözmüşlerdir. Analitik tahminlerini SEM kullanarak sonuçlarını karşılaştırmışlardır.

Cantwell and Morton (1991) çalışmalarında, sürekli elyaf takviyeli kompozit malzemelerin darbe direncini değerlendirmişlerdir. Araştırmalarında kompozit malzemelerin darbe direncini belirleyen temel parametreleri tespit etmişlerdir. Lif ve matris özelliklerinin, yükleme hızının ve geometri değişiminin, dinamik yüklemeye etkileri incelenmiştir.

Düşük hızlı darbe yükü altındaki simetrik, tabakalı levhanın davranışını etkileyen parametreleri Sankar (1992) araştırmıştır. Temas kuvveti, temas süresi ve arka yüzeydeki şekil değiştirme gibi darbe sonucu oluşan durumları belirlemek için yarı ampirik formüller elde etmiştir.

Lee *et al.* (1993) tarafından yapılan çalışmada sandviç kompozit plakanın dinamik davranışını, deneysel ve nümerik olarak araştırmışlardır. Sandviç plaka için grafit-epoksi [O₂/90₂/O₂/FOAM]_s ve FR10110 sert köpük kullanılmıştır. Dinamik gerilme durumlarını tanımlamak için strain-gage ile teorik analiz yapmışlardır. Sandviç kompozit plakaların düşük hız etkisindeki dinamik davranışını teorik bir model ile açıklamışlardır.

Düşük darbe hızı altındaki tabakalı kompozit malzemelerin delaminasyon durumunu tahmin etmek için Jih and Sun (1993) çalışma yapmışlardır. Statik kırılma tokluğu değerlerini kullanarak, darbe koşulları altındaki delaminasyon durumunu açıklamışlardır. Delaminasyon boyutunun tahmininde, statik kırılma tokluğunu değerleri ve deneysel sonuçların uyumlu olduğunu ortaya koymuşlardır.

Goo and Kim (1997) tabakalı kompozit plakaların düşük darbe hızı altındaki davranışını incelemişlerdir. Hertz temas kanununu uyarlayarak tabaka istifleme yönü, kalınlık ve dinamik kontak davranışı gibi durumları açıklamışlardır. Kompozit laminantların dinamik davranışlarını simule etmek için SEM kullanmışlardır.

Lee *et al.* (1997) çalışmalarında düşük darbe hızı altındaki hibrid tabakalı kompozit plakaların davranışını, kayma deformasyon teorisini kullanarak açıklamışlardır. Aynı bileşen oranına sahip iki hibrid kompozit levhanın istifleme sırasının değişimine göre enerji kaybının farklı değerler aldığını ve Grafit-Kevlar-Grafit plakada düşük enerji kaybı, Kevlar-Grafit-Kevlar yüksek enerji kaybının olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca sonuçların malzeme yüzey özelliklerine göre farklılık gösterebileceğini incelemişlerdir.

Ön gerilmeli tabakalı kompozit malzemelerin düşük darbe yükü altındaki davranışını Chiu *et al.* (1997) incelemişlerdir. Kompozit malzemelerin mukavemeti ve sertliğinde değişikliğe neden olabilecek etkilerde, düzlem dışı darbe yüklerine karşı kompozit malzemenin son derece savunmasız kalabileceğini ifade etmişlerdir. Yarı izotropik T-300/976 grafit/epoksi laminantlarına düşük hızda yük uygulamışlardır. Kompozit numunelerdeki hasarın boyutunu ölçmek için ultrasonik tarama yapmışlardır. Sonuç olarak ön gerilmenin, kompozit malzemenin davranışında önemli bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuşlardır.

Abatan vd. (1998) tarafından yapılan çalışmada, Fourier açılımına dayalı nümerik yaklaşımla hibrid kompozit levha ve metal plakaların darbe direncini araştırmışlardır. Çalışmalarında SEM kullanarak sonuçlarını desteklemiş ve kayma deformasyon teorisi üzerinde çözüm geliştirerek, klasik plaka teorisi ile arasında karşılaştırma yapmışlardır.

Gong and Lam (1999) tarafından yapılan çalışmada düşük hız etkisine maruz kalan kompozit levhanın davranışını tanımlamak için plaka ve takviye elemanlarının kombine hareketinin yanı sıra kontak kuvveti ve enine kayma deformasyon etkilerini içeren yaklaşık bir çözüm yöntemi geliştirmişlerdir. Çalışmalarında sonlu elemanlar yaklaşımını da kullanmışlardır. Ayrıca sertleştirici aralığı, kalınlığı, anizotropik malzeme özellikleri, darbe kütlesi ve kontak rijitliği etkilerini ele almışlardır.

Karbon/epoksi kompozit plakaların hasar analizi konusunda Luo *et al.* (1999) yaptıkları çalışmada hasar başlaması ve hasarın yayılma durumlarını değerlendirmişlerdir. Hasar simülasyonu için hata modlarını uygulamaya koyarak, simülasyon ve deney sonuçlarını karşılaştırmışlardır.

Naik *et al.* (2000) dokuma kumaştan tabakalı olarak üretilmiş kompozit levhanın, düşük darbe yükü etkisindeki davranışını, Hertz yasası ve 3D sonlu eleman analizi kullanarak incelemişlerdir. Darbe sonucunda oluşan kompozit çatlakları, ikinci dereceden Tsai-Hill kırılma kriterine dayanan hasar fonksiyonu ile değerlendirmişlerdir. Deneylerini farklı hızlardaki vurucu ile yaparak, kumaş geometrisinin darbe davranışı üzerindeki etkisini

incelemişlerdir. Darbe testlerinde kompozit malzemeleri, oluşacak hasara dirençli olmaları bakımından karşılaştırmışlardır.

Modifiye edilmiş Hertz temas yasası ve 3D sonlu eleman analizi kullanarak, polimer matrisli tabakalı kompozit malzemelerin düşük hızlı darbe yüklemesi altındaki davranışını Naik and Meduri (2001) araştırmışlardır. Düzlem ve tabakalar arası hasarın başlamasını tahmin etmek için ikinci dereceden hasar kriteri kullanmışlardır. Basitçe desteklenmiş, farklı karma kompozitler, çapraz katlı plakalar, dokuma kumaş kompozitler ve 3D kompozitler ile araştırmalarını gerçekleştirmişlerdir.

Kim and Kang (2001) yaptıkları çalışmada, enine darbeye maruz cam/epoksi kompozit plakaların darbe kuvvetini tahmin etmek için yeni bir analitik yöntem geliştirmişlerdir. Bu çalışmayı iki varsayımla yapmışlardır. Dikdörtgen plakaya, Rayleigh–Ritz enerji yöntemi ve Lagrange prensibi uygulayarak denklemler elde etmişler ve bu denklemleri uygun bir teknikle ile çözmüşlerdir. Ayrıca analitik yöntemi doğrulamak için çeşitli kalınlıklarda, düz örgülü cam/epoksi kompozit levhaya darbe testleri uygulamışlardır. Bu analitik yöntemle elde edilen çarpma kuvvetleri ile uygulanan deneysel sonuçlar uyumaktadır.

Çapraz katlı tabakalı kompozit plakaların, düşük hızlı darbe yükü altındaki davranışını Mili ve Necip (2001) teorik ve deneysel olarak araştırmışlardır. Ağırlık düşürme test cihazıyla, $[0_2/90_6/0_2]$, $[0_3/90_4/0_3]$ ve $[0_4/90_2/0_4]$ şeklinde istiflenmiş E-camı/epoksi tabakalı kompozit malzemelere, farklı hızlardaki impektör ile düşük hızlı darbe yükü uygulamışlardır. İmpektör hızlarının ve tabaka dizilerinin, kompozit levhanın darbe davranışına etkilerini incelemişlerdir. Deneysel sonuçlarını doğrulamak amacıyla teorik model oluşturarak, Hertz temas yasasını kullanmışlardır.

Guan and Yang (2002) düşük hız etkisindeki tabakalı kompozit malzemelerin hasar durumu üzerinde araştırma yapmışlardır. Tabakalı kompozit malzemelerin düşük hız etkisi nedeniyle oluşan hasar simülasyonu ile ilgili sönümlenme, sertlik değişimi ve hasar başlatılması üzerinde inceleme yapmışlardır. Malzemelerin mekanik özelliklerini

değiştirerek, hasar gören malzemeler için sürekli hasar mekaniği yöntemini kullanmışlardır. Fortran sonlu elemanlar programıyla tabakalı kompozit malzemeyi temsil edecek elemanlara, hasar durumuna göre değişken malzeme katsayılarını atayarak hasar hesaplaması yapmışlardır. Matris çatlaması, delaminasyon ve fiber kırılması gibi hata modlarıyla hasarı analiz etmişlerdir.

Aslan ve Karakuzu (2002) ile Aslan vd. (2003) çalışmalarında fiber takviyeli E-cam/epoksi tabakalı kompozit malzemenin, düşük hızlı darbe yükü altındaki davranışını incelemişlerdir. Farklı hız ve kütleyle sahip vurucu ile çalışmalarını yapmışlardır. Sonlu eleman analizi için 3DIMPACT kullanmışlardır. Nümerik olarak hesaplanan değerler ile deneysel sonuçları karşılaştırarak, kontak kuvvetleri, darbe hasarı ile plak boyutlarının darbe davranışına etkilerini değerlendirmişlerdir.

Belingardi and Vadori (2002) çalışmalarında farklı yönlenmeye sahip cam fiber epoksi kompozit malzemesinin düşük hızlı darbe yükü altındaki davranışını incelemişlerdir. Deneysel testleri ağırlık düşürme test makinesi kullanılarak ASTM standartlarına göre yapmışlardır. Malzemenin düşük hızlı darbe yükü altındaki davranışını darbe enerjisi, hasar derecesi ve temas kuvveti değişimleriyle ifade etmişlerdir. Belingardi ve Vadori (2003) ağırlık düşürme testi ile karbon fiber-epoksi tabakalı kompozit malzemenin düşük hızlı darbe yükü altında davranışını incelemişlerdir. Farklı istifleme biçimlerine sahip, üç farklı kalınlıktaki kompozit malzemelere yarı-statik ve dinamik darbe yüklemesi yapmışlardır. Farklı çarpışma hızları ile birlikte yapılan testlerde kuvvet-yer değiştirme grafikleri yardımıyla malzemenin enerji absorpsiyon yeteneğini ortaya koymuşlardır.

Tekrarlı ve düşük hızlı darbe yükü altındaki cam, karbon ve kevlar kompozit malzemelerinin dinamik davranışlarını Sugun and Rao (2004) incelemişlerdir. Çalışmalar ağırlık düşürme test cihazı (DYNATUP 8250) kullanarak, düşük hızlar (\cong 1.2-2.4 m/s) altında yapılmıştır. Kompozit plakalarda hasar oluşuncaya kadar tekrarlı darbeler uygulanmıştır. Sonuç olarak tekrar sayıları, darbe kuvveti- enerjisi ve hasar bölgelerini ortaya koymuşlardır.

Whittingham *et al.* (2004) ön gerilme etkisindeki karbon-fiber/epoksi tabakalı kompozit malzemelerin düşük hızlı darbe yükü altındaki davranışını incelemişlerdir. Ön gerilme etkisindeki kompozit malzemede meydana gelen, kalıcı nüfuziyet, absorblanan enerji ve maksimum darbe yükünü araştırmışlardır.

Düşük darbe hızı etkisindeki çeşitli nanopartikül dolgulu kompozitlerin mekanik davranışını Lin *et al.* (2005) incelemişlerdir. Çalışmalarında nano-kompozit malzemelerin kırılma morfolojisi ve malzemelerin mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Farklı hızlarda gerçekleştirilen deneylerde hasar derecesini ve mekanik davranışını etkileyen parametreleri ortaya koymuşlardır.

Baucom and Zikry (2005) yaptıkları çalışmada tekrarlı ve düşük hızlı darbe yükü altındaki örgülü elyaf kompozit malzemenin hasar ilerlemesi durumunu ortaya koymuşlardır. Hasar oluşuncaya kadar darbe sayısının, kontak kuvveti-enerji durumlarıyla meydana gelen hasar miktarlarını incelemişlerdir.

Mitrevski *et al.* (2005) yaptıkları çalışmada darbe yükü altındaki karbon/epoksi tabakalı kompozit malzemesine, yarı küresel, sivri ve konik şeklindeki impektör geometrilerinin darbe davranışına etkisini incelemişlerdir. Farklı enerjilere sahip impektör ile yapılan çalışmada farklı impektör geometrilerinin enerji absorblama, oluşturduğu hasar ve temas sürelerini bakımından karşılaştırma yapmışlardır. İç hasar mekanizmalarını ve hasar alanlarını belirlemek için tahribatsız muayene teknikleri kullanmışlardır.

Caprino *et al.* (2005) yaptıkları çalışmada, ağırlık düşürme test makinesi kullanarak düşük hızlı darbe yükü altındaki fiberglas-alüminyum kompozit plakaların davranışını ve darbe hızı, kütle, enerji parametrelerinin malzeme üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin darbe enerjisine bağlı olduğunu ve fiberglas-alüminyum kompoziti ile alüminyum için absorbe edilen enerji miktarını değerlendirmişlerdir. Numunelerde darbe sonucu oluşan hasarı ultrasonik tarama ve kimyasal yöntemlerle tespit etmişlerdir.

Liu *et al.* (2005) yapısal yoğunluk yaklaşımı ile düşük hızlı darbe yükü altındaki plakaların dinamik davranışını incelemiştir. Dinamik temas etkisini Lagrangian yaklaşımına dayanan algoritma ve denklemler ile gerçekleştirerek, yapısal yoğunluk yaklaşımının, malzemenin dinamik cevabını için verimli bir yaklaşım olduğunu ifade etmişlerdir.

Hosseinzadeh *et al.* (2006) farklı elyaf takviyeli kompozit levhalara, farklı çarpma enerjisi ve moment ile standart bir ağırlık düşürme testi uygulamışlardır. Hasar bölgelerini tahribatsız muayene yöntemiyle tespit etmişlerdir. Karbon fiber takviyeli kompozit levha, düşük hızlı darbe yükü altında uygun yapısal davranış gösterirken, hibrid karbon/cam elyaf plakaları ise yüksek darbe enerjisi altında uygun davranış göstermiştir. Tüm plakalara uygulanan test koşulları ANSYS LS DYNA yazılımında modellenerek gerçekleştirilmiş ve deneysel sonuçlarla uyumlu sonuçlar elde etmişlerdir.

Tiberkak *et al.* (2006) düşük darbe yükü etkisindeki fiber takviyeli kompozit levhada hasar oluşturmadan, sonlu elemanlar metodu ile yapısal davranışını incelemiştir. Plakanın davranışını analiz etmek için Newmark zaman integrasyon algoritmasını ve enine kayma gerilmesi hesabı için modifiye edilmiş Hertz temas yasası-Mindlin plaka teorisini kullanmışlardır. Kontak kuvvetinin yüklemesi ve boşaltması süreçlerini birlikte hesaplamışlardır.

Doymamış polyester ile kenevir takviyeli malzemeleri, dokuma olmadan meydana getirilmiş kompozit malzemenin, düşük hızlı darbe testlerindeki davranışını Dhakal *et al.* (2006) araştırmışlardır. Eşdeğer hacim oranına sahip E-cam elyaf takviyeli numuneleri de test ederek diğer kompozit malzemelerle karşılaştırma yapmışlardır. Bu numunelerin darbe sonrası hasar tespiti için taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır. Malzemelerin yük taşıma kapasitesi ve enerji absorblama yeteneklerinin fiber hacim oranlarıyla ilişkili olduğunu tespit etmişlerdir.

Uyaner vd. (2007) yaptıkları çalışmada, düşük hızlı darbe yüküne maruz E-cam/epoksi tabakalı kompozit malzemelerde, plaka boyutlarının, malzeme de oluşan hasara etkilerini

araştırmışlardır. Ağırlık düşürme test cihazıyla, takviye açıları $[0^\circ, -45^\circ, +45^\circ, 0^\circ, 90^\circ, +45^\circ, -45^\circ, 0^\circ]$ s olan E-camı/epoksi tabakalı kompozit malzemesine, 30 kg ağırlığında, 24 mm çapında, yarı küresel uçlu geometriye sahip vurucu ile darbe testlerini gerçekleştirmişlerdir. Deney sonuçlarını kuvvet-zaman, ivme-zaman, hız-zaman, yer değiştirme-zaman ve kuvvet-yer değiştirme grafikleri şeklinde elde etmişlerdir.

3D sonlu elemanlar metodu ile düşük hızlı darbe yükü altındaki grafit / epoksi kompozit malzemelere, birden fazla silindirik vurucunun malzeme üzerinde yarattığı delaminasyon hasarının değerlendirmesini Chakraborty (2007) yapmıştır. Newmark-b metodu ve Hertz temas yasasını birlikte kullanılarak, sonlu eleman analizi için farklı zamanlarda birden fazla etki altındaki tabakalı plakaların tepkisini belirlemek için algoritma geliştirmişlerdir. Ayrıca uygun bir delaminasyon kriterini, delaminasyon büyüklüğünü ve yerini değerlendirmede kullanmıştır. Temas kuvvetinin büyüklüğünün yanı sıra, birden fazla darbenin kısa zaman aralığında etkimesi sonucunda delaminasyon hasarının oluştuğu tespit edilmiştir.

Tiberkak *et al.* (2008) çalışmalarında, düşük hızlı darbe yüküne tabi fiber takviyeli kompozit levhanın davranışını SEM ile incelemişlerdir. Kompozit laminantlar hasara uğramadan, Mindlin plak teorisi ve 9 düğümlü Lagrangian elemanı kullanarak dinamik gerilme analizi gerçekleştirilmiştir. Farklı istifleme dizisine sahip malzemede çatlak oluşumuna sebep olan eşik hızlar tahmin edilmiş ve darbe hızının etkisiyle matrisin çatlama uygun bir hasar kriterine göre hesaplanmıştır.

Hosur *et al.* (2008) çalışmalarında, örgülü karbon/epoksi kompozit malzemelerin düşük hızlı darbe yükü altındaki davranışını incelemişlerdir. Farklı istifleme açlarına sahip kompozit malzemelere, farklı darbe enerjileri uygulanmıştır. Numunelerin hasar boyutlarını belirlemek için ultrasonik tarama yapılmıştır. Uygulanan enerji değerlerine bağlı olarak hasar oluşum miktarlarını tespit edilmiş ve $0/\pm 45$ istifleme açısına sahip malzemede yüksek hasar meydana gelmiştir.

Deneysel ve 3D dinamik sonlu elemanlar yaklaşımı ile hibrid kompozit malzemeye darbe yükü altında Sevkate vd. (2008) hasar çalışması yapmışlardır. İki tip ağırlık düşürme testleri yapmışlardır. İlkinde çarpmanın etkisiyle oluşan hasar üzerinde durulurken, ikincisinde ise hasar ilerlemesi üzerinde durmuşlardır. Ağırlık düşürme testlerini simule etmek için 3D sonlu elemanlar yazılımı DYNA'yı kullanmışlardır. Deneysel sonuçlar ile SEM sonuçlarını karşılaştırarak, dinamik kuvvet ve hasar şekilleri bakımından uyum sağlamışlardır.

Taleb and Sakr (2009), kompozit malzemelerin düşük hızlı darbe yükü altındaki davranışını incelemişlerdir. Farklı darbe enerjilerini kullanarak yapılan deneylerde, malzemenin enerji absorblama kapasitesinin ve hasar tipinin, takviye elemanının birim hacim başına düşen ağırlık yüzdesiyle orantılı olduğunu tespit etmişlerdir. Test parametrelerini açıklayan matematiksel modeller oluşturarak, darbe absorblama kapasitesi bakımından deneysel sonuçlarla iyi uyum sağladığını ortaya koymuşlardır.

Chandekar *et al.* (2010) çalışmalarında, düşük hızlı darbe yüklemesi altındaki örgülü fiberglas/epoksi kompozit malzemenin davranışını, LS-DYNA yazılımını kullanarak ve Instron dynatup 8250 test cihazıyla deneysel olarak incelemişlerdir. Tabakalı, sepet örgü desenli cam elyaf kumaşı temsil eden, mozaik 3 boyutlu katı elemanlar kullanılarak modellenmişlerdir. Kompozit malzemenin mekanik özellikleri klasik mikromekanik teorisi kullanılarak hesaplanmış ve ortotropik elastik malzeme modeli kullanarak elemanlara atanmışlardır. LS-DYNA ile ileri kompozit hasar modeli kullanılarak artan darbe enerjisinin hasar oluşuma neden olduğunu gözlemlemiştir. Araştırma sonuçlarının değerlendirmelerini yük taşıma kapasitesi ve absorbe edilen enerji miktarı olarak verilmiş ve karşılaştırma sonucunda SEM ile deneysel çalışmanın iyi uyum sağladığını elde etmiştir.

Karakuzu vd. (2010) yaptıkları çalışmada, darbesel yüklere maruz cam/epoksi plakaların hasar tahmini için çalışma yapmışlardır. $[0/\pm\theta/90]_S$ takviye açısı açısına sahip cam/epoksi kompozit malzemelere darbe yükü uygulanmış ve istifleme dizisinin etkisini incelemek için $\pm\theta$ açısı 15° , 30° , 45° , 60° ve 75° olarak seçilmiştir. Farklı kalınlıklarda

cam/epoksi kompozit numuneler kullanarak, kalınlığında darbe davranışına etkisini incelemişlerdir. SEM için 3DIMPACT kullanarak elde edilen sonuçlar, deneysel sonuçlar ile karşılaştırıldığında iyi bir uyum olduğunu göstermektedirler.

Mathivanan and Jerald (2010) çalışmalarında, düşük darbe hızına maruz kalan E-cam epoksi kompozit malzemesinin farklı enerji seviyelerindeki davranışını deneysel olarak incelemişlerdir. Deneysel testleri ağırlık düşürme test cihazıyla, ASTM standartlarına göre yapmışlardır. Darbe testlerini farklı hızlarda (2-4.5 m/s) yaparak plakalarda görülen hasar türü-boyutu belirlenmiş ve darbe hızının 4.429 m/s olduğu durumda büyük hasar meydana geldiğini gözlemlemişlerdir. Araştırmalarında iki tip hata modu, çatlak oluşumu ve plaka delinmesi meydana geldiğini ortaya koymuşlardır.

Akın ve Şenel (2010) yaptıkları çalışmada, düşük hızlı darbesel yüklere maruz tabakalı plakaların, farklı darbe enerjileri altında davranışını incelemişlerdir. Ağırlık düşürme test makinesinde yaptıkları çalışmada kullandıkları numuneler, 8 tabakalı, üç farklı istifleme açıları ($[0/90]_{2s}$, $[-30/30]_{2s}$, $[-45/45]_{2s}$) olan, 140x140 mm boyutlarında, E-cam/epoksi kompozit malzemelerdir. Hasar dirençlerini, hasar başlangıcından itibaren son delinmeye kadar incelemişlerdir. Kompozit plakaların farklı sınır şartlarında, istifleme açılarının ve darbe enerjisinin etkisi araştırılmıştır.

Literatür çalışmalarında kompozit malzemenin düşük hızlı darbe yükü altındaki davranışı hakkında birçok deneysel ve nümerik çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda kompozit malzemedeki oluşan hasar modları, temas kuvveti, absorblanan enerji ve yer değiştirme miktarı gibi vb. sonuçlar ortaya konulmuştur. Ayrıca darbe yüklemesinde, darbe davranışını karakterize eden parametreler sunulmuştur. Bu çalışmada, ANSYS Ls-Dyna yazılımı ile tabakalı kompozit malzemenin düşük hızlı darbe yükü altındaki mekanik davranışı ele alınmıştır. Tabakalı kompozit malzemenin tabaka sayısının, plaka kalınlığının, takviye açısının, E_1/E_2 oranının, sınır şartlarının ve yüzey alanının değişimi gibi durumlarda düşük hızlı darbe yüklemesinin mekanik davranışı nasıl değiştirdiğinin cevabı ortaya konmuştur. Bunlara ek olarak malzemenin anizotropik, izotropik olma

durumları ve vurucunun hızındaki, geometrisindeki değişimin malzeme üzerinde yarattığı dinamik etkide incelenmiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Kompozit malzemeler

Belirli bir amaç doğrultusunda fiziksel ve kimyasal özellikleri farklı iki veya daha fazla malzemenin belirli oranlarda makro seviyede birleşmesi ile birbirlerinin zayıf yönlerini düzelterek meydana getirmiş oldukları yeni malzemeye kompozit malzeme denir. Kompozit malzemeler genel olarak matris ve takviye malzemesi olarak iki bileşenden meydana gelir. Kompozit malzemeler takviye türüne göre parçacık, süreksiz ve sürekli olmak üzere üç kategoriye ayrılır. Parçacık takviye elemanları, mikroskobik veya makroskobik boyutta olabilirler. Bu takviye elemanları büyük parçacık (Örn: agrega) ve küçük parçacık (Örn: Al_2O_3 ve SiC seramikler) şeklinde olabilirler. Süreksiz takviye elemanlarında ise, lif çapları birkaç μm 'yi geçmemektedir. Bu takviye elemanları birkaç mm'den birkaç cm'ye kadar değişen ölçülerde olabilmektedir. Sürekli elyaflar, günümüzde kompozit yapılarda en önemli takviye bileşenidir. Bu takviye elemanı kendi boyları doğrultusunda, kompozitin mekanik özelliklerini iyileştirirler.

Kompozit malzemenin eski çağlarda kullanım yerleri genellikle kırsal inşaat yapımında kullandıkları, saman çamur karışımı olan malzemelerdir. Günümüzde ise bu yapılaşmayı çimento, çakıl ve demir bileşenlerinin oluşturdukları malzeme sistemi almıştır. Kompozit malzemenin genel kullanım alanları;

- Ev aletleri (masa, sandalye, depo vb.),
- Savunma ve havacılık sanayi (uçak gövde kısımları, balistik, uzay araçları vb.),
- Denizcilik sanayi (yat, gemi, kano vb. araçlarda),
- Medikal alanlar (implant, çimento yapıları, tıbbi cihazlar vb.),
- Spor malzemeleri (yüksek atlama sırtıkları, tenis racketleri, yarış tekneleri, kayak vs.)
- Robot sanayi (robot kolları vb),
- Kimya sanayi (kimyasal madde tankları vb.),
- Elektrik-Elektroteknik (kablo üretimi, elektrik panoları vb.),

- Müzik aletleri (gitar, piyano vb.),
- İnaaat ve Yapı Sektörü (prefabrik yapılar vb.),
- Gıda ve Tarım Sektörü (sulama kanalları, gıda muhafaza tankları vb.),
- Isı Sektörü (yalıtım malzemeleri vb.),
- Ulaşım sektörü (tren, vapur, otomobil, teleferik vb. araçlarda) vb. alanlarda kullanılmaktadır.

3.1.1. Matris malzemeleri

Elyaf takviyeli malzemelerin bileşenlerinden biri olan matris malzemelerinin görevleri, gelen yükü elyaflara dağıtmak, elyaf malzemelerini bir arada tutmak, kompozit malzemeyi çevresel koşullardan korumak, kompozit malzemenin tokluğunu artırmak, kompozitlerde çatlak oluşumunu ve ilerlemesini engellemektir. Genel matris malzemeleri;

- Plastik matris malzemeleri (Polimerler)
 - Termosetler
 - Termoplastikler
 - Elastomerler
- Metal matris malzemeleri (Alüminyum, titanyum, magnezyum, gibi)
- Yüksek sıcaklık matrisleri (Seramikler)

3.1.2. Takviye malzemeleri

Takviye malzemeleri parçacık, süreksiz ve sürekli takviye malzemeleri olmak üzere üç grupta toplanabilir. Takviye malzemeler yüksek elastisite modülüne sahiptirler. Matris malzemeleriyle belirli oranlarda birleştirilmesiyle yüksek mukavemete sahip malzemeler oluşturmaktadırlar. Takviye malzemeleri;

- Cam elyaflar (A-camı, C-camı, E-camı, S-camı),

- Karbon elyaflar,
- Aramid elyaflar,
- Bor elyaflar,
- Silisyum karbür elyaflar,
- Alümina elyaflar,
- Oksit elyafi,
- Yüksek yoğunluklu polietilen elyafi,
- Poliamid elyafi,
- Polyester elyafi,
- Doğal organik elyaflardır.

3.1.3. Kompozit malzemelerin avantajları

Kompozit malzemelerin üretimiyle aşağıdaki özelliklerin biri veya birkaçının geliştirilmesi amaçlanır. Bu sayılan özelliklerin hepsi aynı anda iyileştirilemez. Böyle bir üretime gidilmesinin de bir anlamı yoktur. Kompozit malzemelerin avantajları;

- Yüksek mukavemet/yoğunluk oranı: Yüksek mukavemet değerlerine sahip kompozitler üretilebilir. Geleneksel malzemelere göre mukavemet/yoğunluk oranları daha yüksek olabilir.
- Yüksek Rijitlik/yoğunluk oranı: Rijitlik/yoğunluk oranı yüksek kompozitler üretilebilir.
- Hafiflik: Plastik esaslı kompozitler, geleneksel malzemelere göre daha hafiftirler. Buna rağmen metallere göre daha yüksek mukavemet değerleri sunmaktadır.
- Yüksek Dielektrik Direnç: Kompozitlerin yüksek elektrik yalıtım özellikleri, birçok makine elemanının imalatında tercih nedeni olabilmektedir.

- Korozyon dayanımı: Çevre şartlarına karşı kompozitlerin antikorozyif özellikleri, diğer malzemelere göre çok üstündür.
- Çeşitlilik: Farklı mekanik özelliklere sahip, farklı kombinasyonlara sahip kompozit malzemeler imal edilebilir.
- Kalıplama kolaylığı: Çok parçadan oluşan karmaşık makine elemanları kompozitler kullanılarak tek parça olarak imal edilebilir. Bu sayede parça sayısı azaldığından ara birleştirme detay ve parçalarının azalmasıyla üretim süresi kısalmaktadır. Bu durum alüminyum, çelik gibi geleneksel malzemelerde çok zordur.
- Yüzey uygulamaları: Kompozitlerde kullanılan polyester reçine, amaca uygun olarak, özel pigment katkıları ile renklendirilerek kendinden renkli olarak üretilebilir.
- Tasarım esnekliği: Karmaşık makine elemanları kompozit malzeme ile daha kolay tasarlanabilir.
- Şeffaflık özelliği: Kompozitler, cam kadar ışık geçirgen olabilir. Şeffaf olmaları nedeniyle, difüze ışığın önem kazandığı seralarda ve güneş kolektörü yapımında önemli avantajlar sağlarlar.
- Beton yüzeylere uygulama imkânı: Özellikle, betonun gözenekli olması nedeniyle, kompoziti oluşturan ana malzemelerden polyester reçinenin betonun gözeneklerine sızmasından dolayı iyi bir yapışma sağlar.
- Ahşap yüzeylere uygulama imkânı: Kompozitler ahşap yüzeylere yapışma özelliğine sahiptir.

- Metal yüzeylere uygulama imkânı: Metal yüzeyindeki pas ve yağ kalıntılarını temizlendikten sonra kompozitlerle kaplanabilir. Bu sayede demir ve çelik yüzeyler, kompozitlerle kaplanarak korozyondan korunabilir.
- Yanmazlık özelliği: Kompozitlerin alev dayanımı, kullanılan polyeşterin özelliğine bağılıdır. Alev dayanımlı kompozitler terkip edilerek yanmaya karşı direnç artırılabilir.
- Isıl dayanım: Bilhassa termoset plastikler grubundan polyeşter reçineler ile yapılan kompozitler yumuşamazlar ve şekil değiştirmezler. Isıl dayanım kullanılan polyeşter reçinenin cinsine çok bağılıdır.
- Tamir edilebilirlik: Hasar görmeleri halinde tamir edilebilirler. Onarım işleminde bir kalıp kullanılır. Onarım sonrası zımpara ve boya yapılır.
- İşlenebilirlik: Kompozitler, kolayca kesilir, delinir, zımparalanır. Bu amaçla kullanılan aletlerin sert çelik veya elmas uçlu olması halinde daha iyi sonuç alınabilir.

3.1.4. Kompozit malzemelerin dezavantajları

Kompozit malzemelerin yukarıda sayılan avantajlarının yanında dezavantajları da bulunmaktadır. Kompozit malzemelerin bazı dezavantajları aşağıda verilmektedir.

- İmalatı gerçekleştirilmiş kompozitin özellikleri her zaman ideal olmayabilir.
- Tabakalı kompozitler, tabakalar arası kayma gerilmelerine hassas olduklarından delaminasyon meydana gelebilir.
- Malzemenin kalitesi üretim metodunun kalitesine bağılıdır, standartlaşmış bir kalite mevcut değildir.

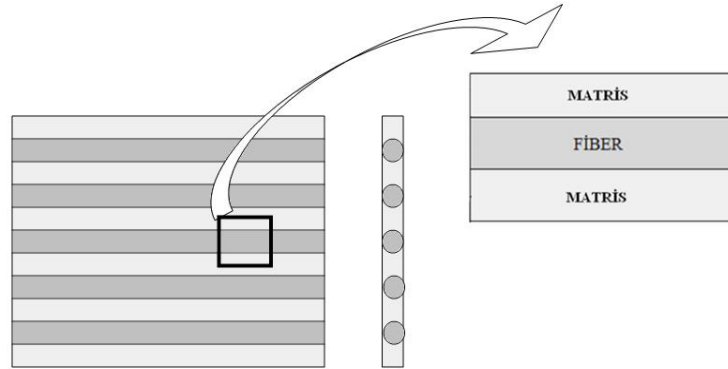
- Bazı kompozitler gevrek yapıya sahip olduklarından kolaylıkla zarar görürler, onarılmaları yeni problemler oluşturabilir.
- Onarılmadan önce çok iyi temizlenmeleri ve sıcak kurutulmaları gerekir. Bazı kurutma teknikleri uzun zaman alabilir. Bazen de bu çok zor olmaktadır.

3.2. Kompozit malzemelerin mekaniği

Kompozit malzemelerin mekanik özellikleri homojen ve izotrop malzemelerden farklıdır. Kompozit malzemelerin mekaniği mikromekanik ve makromekanik olmak üzere iki grup altında incelenir.

3.2.1. Mikromekanik

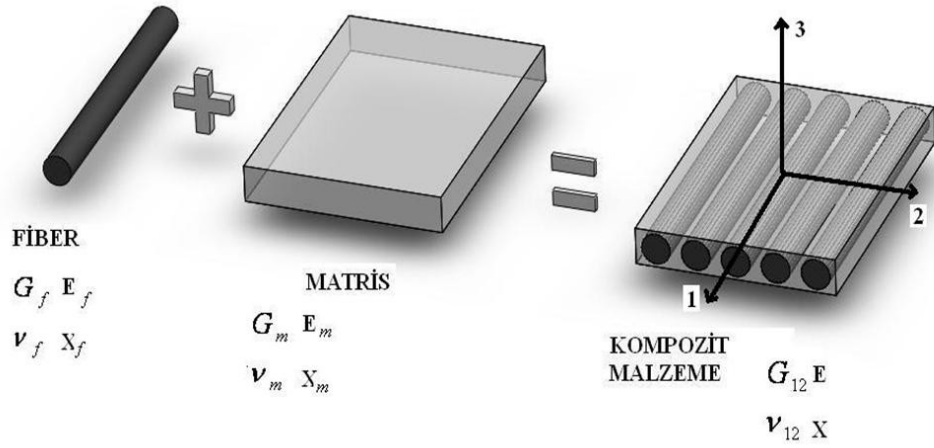
Mikromekanik ile dış etkiler altındaki kompozit malzemelerle malzeme gerilme veya şekil değiştirme durumları incelenir. Bileşenlerin (matris ve takviye) mekanik özellikleri kullanılarak, kompozit yapının elastik, mukavemet özellikleri gibi bazı özellikleri teorik olarak bulunabilir. Ancak yorulma dayanımı, tokluk gibi özellikler mikromekanik olarak bulunamaz. Aşağıda bazı mekanik özellikleri, temsili hacim elemanı kullanılarak mikromekanik ile bulunması anlatılmaktadır (Şekil 3.1).



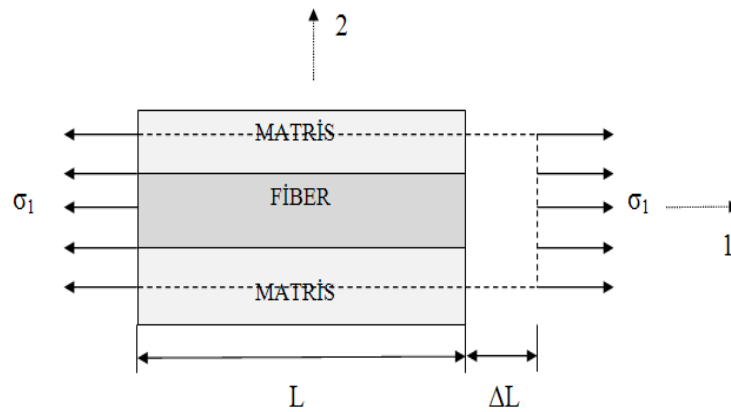
Şekil 3.1. Temsili hacim elemanı

3.2.1.a. E_1 Elastisite modülünün hesaplanması

Tek yönlü takviye edilmiş ortotropik bir plağın yapısı Şekil 3.2’de görülmektedir. Şekilde görüldüğü üzere hem tabaka düzlemine, hem de fiber (elyaf) doğrultusuna paralel eksen 1 dir. 2 eksen ise tabaka düzlemine paralel fakat fiber doğrultusuna dik eksendir. 3 ise hem tabaka düzlemine hem de fiber doğrultusuna dik eksendir. Bu eksenler ortotropik plağın asal eksenleridir.



Şekil 3.2. Tek yönlü takviye edilmiş ortotropik plak



Şekil 3.3. Fiber yönünde çekme yüküne maruz ortotropik plak

Şekil 3.3'de görüldüğü gibi tek yönlü takviye edilmiş kompozit levhaya fiber doğrultusunda yük uygulandığında uygunluk şartına göre fiber ve matris aynı oranda şekil değiştirir. (c: kompozit malzemeyi, f: fiberi (elyaf), m: matrisi göstermektedir.).

$$\varepsilon_c = \varepsilon_1 = \varepsilon_f = \varepsilon_m \quad (3.1)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta L}{L} \quad (3.2)$$

yazılabilir. Kompozit malzemenin taşıdığı yük ise, denge denkleminde bulunur.

$$F = F_f + F_m \quad (3.3)$$

Burada F_f fiberin, F_m matrisin taşıdığı yükü göstermektedir. Kompozitin fibere dik kesit alanı A , elyaf kesit alanı A_f ve matris kesit alanı A_m olmak üzere, kuvvetler $F = \sigma_1 A$, $F_f = \sigma_f A_f$ ve $F_m = \sigma_m A_m$ şeklinde yazılırsa;

$$\sigma_1 A = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m \quad (3.4)$$

olur. Bileşenler ve kompozit için Hooke bağıntıları,

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_1 \quad (3.5)$$

$$\sigma_m = E_m \varepsilon_1 \quad (3.6)$$

$$\sigma_1 = E_1 \varepsilon_1 \quad (3.7)$$

olup, (3.4) de (3.5), (3.6), (3.7) numaralı denklemler yerine yazılarak düzenlenirse,

$$E_1 = E_f \frac{A_f}{A} + E_m \frac{A_m}{A} \quad (3.8)$$

elde edilir. V_f fiber, V_m ise matris hacim oranı olduğundan aşağıdaki gibi yazılır:

$$V_f = \frac{A_f}{A} \text{ ve } V_m = \frac{A_m}{A} \quad (3.9)$$

Hacim oranları (3.8)'de yerine konduğunda karışımlar kuralında paralel toplama olarak adlandırılan,

$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m \quad (3.10)$$

denklemini elde edilir. Bileşenlerin kesit alanları toplamı malzemenin toplam kesit alanına eşit olup aşağıdaki gibi yazılır:

$$A = A_f + A_m \quad (3.11)$$

Bu eşitliğin iki tarafını A'ya bölersek,

$$1 = \frac{A_f}{A} + \frac{A_m}{A} \text{ veya } 1 = V_f + V_m \quad (3.12)$$

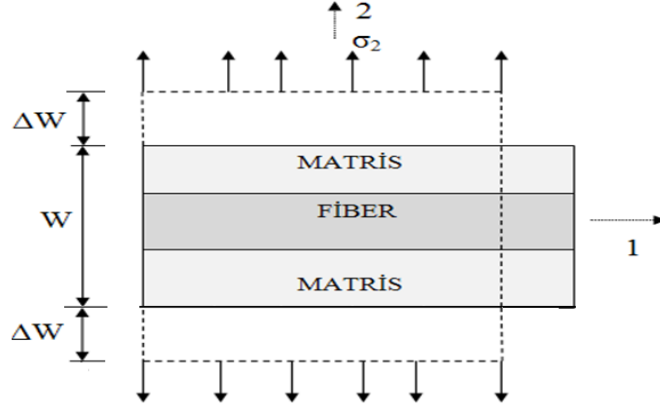
denklemini elde edilir.

3.2.1.b. E_2 Elastisite modülünün hesaplanması

Temsili hacim elemanı yönünde yüklendiğinde kompozit ve bileşenlerinde aynı gerilmelerin oluştuğu kabul edilir (Şekil 3.4). Bu durumda 2 yönünde ΔW kadar uzama meydana gelir. Oluşan gerilmeler:

$$\sigma_2 = \sigma_f = \sigma_m \quad (3.13)$$

şeklindedir.



Şekil 3.4. Fibere dik yönde çekme yüküne maruz ortotropik plak

Fibere dik doğrultuda kompozit plakta oluşan toplam şekil değişirme,

$$\Delta W = \Delta W_f + \Delta W_m \quad (3.14)$$

şeklinde yazılır. Diğer yandan, bileşenlerdeki şekil değiştirmeler;

$$\Delta W = \varepsilon_2 W \quad (3.15)$$

$$\Delta W_f = \varepsilon_2 W_f \quad (3.16)$$

$$\Delta W_m = \varepsilon_2 W_m \quad (3.17)$$

olduğundan, (3.15), (3.16), (3.17) denklemleri (3.14) denkleminde yerine konularak eşitliğin her tarafı W'ya bölündüğünde,

$$\varepsilon_2 W = \varepsilon_f W_f + \varepsilon_m W_m \quad (3.18)$$

$$\varepsilon_2 \frac{W}{W} = \varepsilon_f \frac{W_f}{W} + \varepsilon_m \frac{W_m}{W} \quad (3.19)$$

denklemleri elde edilir. Bileşenler için Hooke bağıntıları aşağıdaki gibi yazılır.

$$\varepsilon_2 = \frac{\sigma_2}{E_2} \quad (3.20)$$

$$\varepsilon_f = \frac{\sigma_2}{E_f} \quad (3.21)$$

$$\varepsilon_m = \frac{\sigma_2}{E_m} \quad (3.22)$$

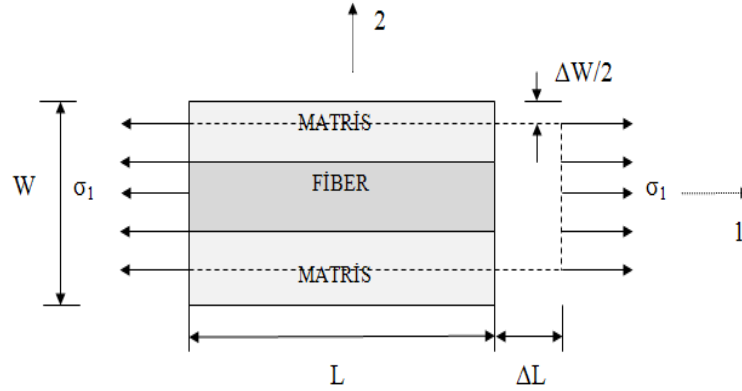
(3.20), (3.21), (3.22) eşitlikleri (3.19) eşitliğinde yerine konulup gerekli düzenlemeler yapıldığında karışımlar kuralında seri toplama olarak adlandırılan, 2 yönündeki E_2 elastisite modülü,

$$\frac{1}{E_2} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m} \quad \text{veya} \quad E_2 = \frac{E_f E_m}{V_m E_f + V_f E_m} \quad (3.23)$$

olarak elde edilir. Ancak E_2 'nin teorik değerleri deneysel değerlerden uzak düştüğü yapılan çalışmalarda görülmüştür. Bu nedenle elastisite teorisinde, Halpin-Tsai denklemleri gibi daha iyi yaklaşımlar ileri sürülmüştür (Jones 1998).

3.2.1.c. Poisson oranı ν_{12} 'nin hesaplanması

Poisson oranı enine daralmanın boyuna uzamaya oranı olarak tanımlanır. Ortotropik plaka 1 yönünde yüklendiğinde 1 yönündeki uzamaya karşılık 2 yönündeki toplam kısalma meydana gelir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Temsili hacim elemanında boyda uzamaya karşı yanal daralma

ΔW , fiber ve matristeki daralmaların toplamıdır.

$$\Delta W = \Delta W_m + \Delta W_f \quad (3.24)$$

Bileşenler için Poisson oranları aşağıdaki gibi yazılır.

$$u_{12} = -\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}, \quad u_m = -\frac{\varepsilon_{m2}}{\varepsilon_1} \quad \text{ve} \quad u_f = -\frac{\varepsilon_{f2}}{\varepsilon_1} \quad (3.25)$$

2 yönündeki şekil değiştirme oranları (gerinmeler) ,

$$\varepsilon_2 = -\frac{\Delta W}{W}, \quad \varepsilon_{f2} = -\frac{\Delta W_f}{W_f} \quad \text{ve} \quad \varepsilon_{m2} = -\frac{\Delta W_m}{W_m} \quad (3.26)$$

şeklinde yazılır. 1 yönünde uygunluk şartı,

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{m1} = \varepsilon_{f1} \quad (3.27)$$

ΔW fiber ve matristeki daralmaların toplamıdır. Eş birim uzama söz konusu olduğuna göre ε_1 her iki bileşen içinde aynıdır.

$$\Delta W = \Delta W_m + \Delta W_f \quad (3.28)$$

$$\Delta W = -W \varepsilon_2 = W \nu_{12} \varepsilon_1 \quad (3.29)$$

$$\Delta W_m = W_m \nu_m \varepsilon_1 \quad (3.30)$$

$$\Delta W_f = W_f \nu_f \varepsilon_1 \quad (3.31)$$

Denklem(3.29) (3.30) ve (3.31), Denklem (3.28)'de yerine konursa,

$$W \nu_{12} \varepsilon_1 = W_f \nu_f \varepsilon_1 + W_m \nu_m \varepsilon_1 \quad (3.32)$$

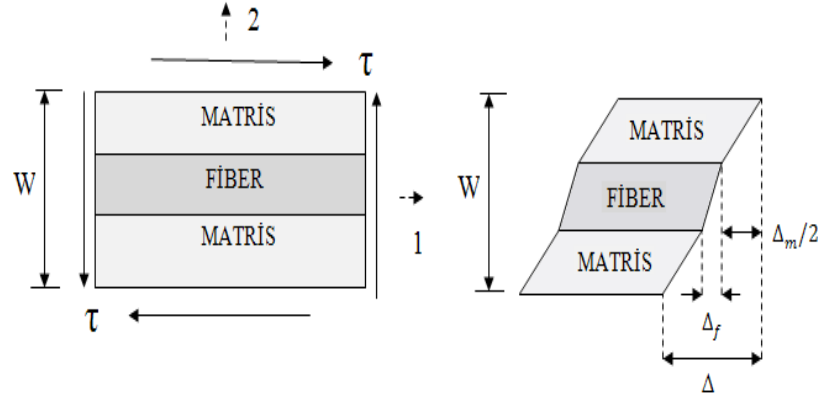
elde edilir. Gerekli düzenlemeler yapılırsa, kompozitin Poisson oranı;

$$\nu_{12} = \nu_m V_m + \nu_f V_f \quad (3.33)$$

şeklinde elde edilir.

3.2.1.d. G_{12} Kayma modülünün hesaplanması

Temsili hacim elemanı kesme kuvvetinin etkisinde kaldığında, fiber ve matriste aynı kayma gerilmelerinin oluştuğu kabul edilir. Kompozitin şekil değiştirmesi Şekil 3.6'da ki gibidir.



Şekil 3.6. Kayma gerilmesine maruz temsili hacim elemanı

Kayma gerilmesine maruz kalan kompozit malzemenin toplam çarpılma değeri,

$$\Delta = \Delta_f + \Delta_m \quad (3.34)$$

şeklinde yazılabilir. Kompozit ve bileşenler için kayma şekil değiştirmeleri,

$$\gamma = \frac{\Delta}{W} \rightarrow \Delta = \gamma W \quad (3.35)$$

$$\gamma_m = \frac{\Delta_m}{W_m} \rightarrow \Delta_m = \gamma_m W_m \quad (3.36)$$

$$\gamma_f = \frac{\Delta_f}{W_f} \rightarrow \Delta_f = \gamma_f W_f \quad (3.37)$$

şeklinde yazılır. Kayma hali için Hooke eşitlikleri aşağıdaki gibi yazılıp

$$\gamma_m = \frac{\tau}{G_m} \quad (a), \quad \gamma_f = \frac{\tau}{G_f} \quad (b) \quad \text{ve} \quad \gamma_{12} = \frac{\tau}{G_{12}} \quad (c) \quad (3.38)$$

bunlar Denklem (3.34)'de yerine konulduğunda,

$$\gamma \cdot W = \gamma_f W_f + \gamma_m W_m \quad (3.39)$$

$$\gamma_{12} = V_m \gamma_m + V_f \gamma_f \quad (3.40)$$

şeklinde bulunur. Burada $W_f/W = V_f$ ve $W_m/W = V_m$ olduğundan ve burada 3.38(a-b-c) denklemleri kullanıldığında, 1-2 düzlemindeki kayma modülü,

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{V_f}{G_f} + \frac{V_m}{G_m} \quad \text{veya} \quad G_{12} = \frac{G_m G_f}{V_m G_f + V_f G_m} \quad (3.41)$$

elde edilir. Ancak G_{12} 'nin teorik değerleri deneysel değerlerden uzak düştüğü yapılan çalışmalarda görülmüştür. Bu nedenle elastisite teorisinde, Halpin-Tsai denklemleri gibi daha iyi yaklaşımlar ileri sürülmüştür (Jones, 1998).

3.2.2. Makromekanik

3.2.2.a. Anizotrop malzemelerin elastik davranışı

İzotrop malzemelerin elastik özelliklerini tanımlamak için sadece iki sabitin (E, ν) bilinmesi yeterlidir. Kompozit malzemelerin mekanik özellikleri yöne bağlı olduğundan anizotropi nedeniyle elastik özelliklerinin tanımlamak için çok fazla sayıda sabitlerin bilinmesi gerekmektedir.

Anizotropik malzemeler için genelleştirilmiş Hooke kanunu aşağıdaki denklemlerde verilmiştir.

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (3.42)$$

$$\varepsilon_{ij} = S_{ijkl} \sigma_{kl} \quad (3.43)$$

$$S_{ijkl} = (C_{ijkl})^{-1} \quad (3.44)$$

Denklemlerde σ_{ij} gerilme tensörünün bileşenlerini, ε_{kl} şekil değiştirme tensörünün bileşenlerini, C_{ijkl} elastik rijitlik tensörünü ve S_{ijkl} elastik gevşeklik tensörünü göstermektedir.

Bu tensörler açık olarak yazıldığında her birinde 9 terim bulunan 9 denklem ortaya çıkar. 4. Dereceden tensörler olan C_{ijkl} ve S_{ijkl} tensörleri 81 sabit içerir. Gerilme ve şekil değiştirme tensörlerinin simetrik olması ve kütle kuvvetlerinin dikkate alınmaması durumunda bu sabitlerin sayısı 36'ya düşmektedir.

Mekanikte kısa notasyonların kullanılması ile rijitlik ve gevşeklik tensörlerinin 2. dereceden olması sağlanır. Böylece Hooke kanununun yeni şekli aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$\sigma_i = C_{ij} \varepsilon_j \quad (j=1\dots6) \quad (3.45)$$

$$\varepsilon_i = S_{ij} \sigma_j \quad (j=1\dots6) \quad (3.46)$$

Anizotropik malzemeler için 2 boyutlu tensörlerle ifade edilen gerilme şekil değiştirme bağıntısı,

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \quad (3.47)$$

şeklinde yazılır. Burada gerilme ve gerinme bileşenleri aşağıdaki gibi olmaktadır:

$$\sigma_{11} = \sigma_1 \quad \varepsilon_{11} = \varepsilon_1$$

$$\sigma_{22} = \sigma_2 \quad \varepsilon_{22} = \varepsilon_2$$

$$\begin{aligned}
\sigma_{33} &= \sigma_3 & \varepsilon_{33} &= \varepsilon_3 & (3.48) \\
\sigma_{23} &= \sigma_4 = \tau_{23} & 2\varepsilon_{23} &= \varepsilon_4 = \gamma_{23} \\
\sigma_{13} &= \sigma_5 = \tau_{13} & 2\varepsilon_{13} &= \varepsilon_5 = \gamma_{13} \\
\sigma_{12} &= \sigma_6 = \tau_{12} & 2\varepsilon_{12} &= \varepsilon_6 = \gamma_{12}
\end{aligned}$$

Eşitlik (3.47)'deki rijitlik matrisinde 36 bulunmaktadır. Şekil değiştirme enerjisi yardımıyla bu matrisin simetrik olduğu gösterilebilir. Malzeme σ_i gerilmesi altında $d\varepsilon_i$ şekil değişimine uğrar ise, birim hacimdeki elastik enerji değişimi:

$$dW = \sigma_i d\varepsilon_i \quad (3.49)$$

olarak yazılabilir. Bu denklemin integrali alınırsa

$$dW = C_{ij} d\varepsilon_i \quad (3.50)$$

olduğundan,

$$W = \frac{1}{2} (C_{ij} \varepsilon_j \varepsilon_i) \quad (3.51)$$

elde edilir. Elde edilen denklemlerin kısmı türevi alınırsa,

$$\frac{\partial W}{\partial \varepsilon_1} = C_{ij} \varepsilon_j \quad \text{ve} \quad \frac{\partial W}{\partial \varepsilon_j} = C_{ij} \varepsilon_i \quad (3.52)$$

bulunur. İkinci kısmı türevleri alınırsa,

$$\frac{\partial^2 W}{\partial \varepsilon_i \partial \varepsilon_j} = C_{ij} \quad \text{ve} \quad \frac{\partial^2 W}{\partial \varepsilon_j \partial \varepsilon_i} = C_{ji} \quad (3.53)$$

denklemleri elde edilir. Bu işlemler neticesinde, türev sırası önemli olmadığından $C_{ij} = C_{ji}$ olduğu görülür. Benzer şekilde $S_{ij} = S_{ji}$ eşittir. Bu durumda rijitlik ve gevşeklik matrisleri, diyagonale göre simetrik olmalıdır ve bu matrislerde bağımsız sabit sayısı 21'e düşmektedir. Simetri düzlemi bulunmayan bu malzemelere triklinik malzeme denir.

$$C_{ij} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{15} & C_{25} & C_{35} & C_{45} & C_{55} & C_{56} \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & C_{46} & C_{56} & C_{66} \end{bmatrix} \quad (3.54)$$

Eğer mekanik özellikler bakımından bir simetri düzlemi (Örnek $z=0$ düzlemi) bulunduğunda, bağımsız sabit sayısı 13'e düşer. Bu malzemeler monoklinik malzeme olarak adlandırılır ve gerilme-gerinme bağıntısı aşağıdaki gibi olur:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & C_{36} \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & C_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{45} & C_{55} & 0 \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \quad (3.55)$$

Malzemede mekanik özellikler bakımından ortogonal düzlemler (3 adet simetri düzlemi) varsa, malzeme ortotropik malzeme olarak adlandırılır. Bu durumda bağımsız sabit sayısı 9 olur ve gerilme-gerinme bağıntısı aşağıdaki gibi olur:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \quad (3.56)$$

Malzemede bu simetrilere ek olarak mekanik özelliklerin tüm doğrultularda eşit olduğu bir düzlem söz konusu ise bu tip malzemeler enine (transvers) izotropik malzeme olarak adlandırılır. Örnek olarak 1-2 düzlemi özel izotropi düzlemi rijitlik matrisindeki 1 ve 2 indisleri yer değiştirebilir ve gerilme-gerinme bağımsız elastik sabit sayısı 5'e düşmüş olur.

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (C_{11} - C_{12})/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \quad (3.57)$$

Eğer malzeme özelliklerine ait simetri düzlemleri sonsuz sayıda ise bağıntılar izotropik malzeme durumuna indirgenebilir. Bu durumda rijitlik matrisindeki bağımsız sayısı 2 olur.

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (C_{11} - C_{12})/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (C_{11} - C_{12})/2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (C_{11} - C_{12})/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \quad (3.58)$$

3.2.2.b. Ortotropik Tabakalarda Düzlem Gerilme Durumu

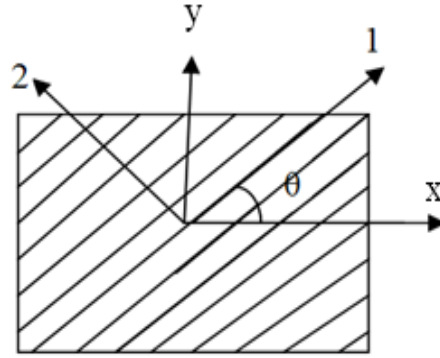
Fiber takviyeli tabakalarda, kalınlıklar diğer boyutlarının yanında küçük kaldığından plak olarak kabul edilebilir. Böylece düzlem gerilme durumunun geçerli olduğu ve düzleme dik gerilmelerin oluşmadığı kabul edilmektedir. Bu durum için gerilme-gerinme (Hooke) bağıntısı aşağıdaki gibi olur:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \end{bmatrix} \quad (3.59)$$

burada Q_{ij} indirgenmiş rijitlik matrisi olup 4 adet elastik sabitle ifade edilir. Bu matrisin elemanları aşağıdaki şekildedir.

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1-\nu_{12}\nu_{21}}, \quad Q_{22} = \frac{E_2}{1-\nu_{12}\nu_{21}}, \quad Q_{12} = \frac{\nu_{12}E_2}{1-\nu_{12}\nu_{21}} = \frac{\nu_{21}E_1}{1-\nu_{12}\nu_{21}}, \quad Q_{66} = G_{12} \quad (3.60)$$

3.2.2.c. Mekanik davranışın yöne bağlı olarak değişimi



Şekil 3.7. θ açısı ile takviye edilmiş bir plak

Malzemeye uygulanan gerilmeler malzemenin asal eksenleriyle çakışmayabilir. Bu durumda bağıntılarda dönüşüm matrisi kullanılarak bu yönlerdeki bağıntılar elde edilebilir. θ açısı ile takviye edilmiş bir plak dikkate alındığında (Şekil 3.7) pozitif düzlem gerilme dönüşümüne göre, x-y düzlemindeki gerilmeler 1-2 asal eksenlerinin bulunduğu düzleme aşağıdaki gibi dönüştürülür:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad \text{veya} \quad \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (3.61)$$

Burada $[T]$ dönüşüm matrisi olup aşağıdaki gibi gösterilir:

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos^2\theta & \sin^2\theta & 2\sin\theta \cos\theta \\ \sin^2\theta & \cos^2\theta & -2\sin\theta \cos\theta \\ -\sin\theta \cos\theta & \sin\theta \cos\theta & \cos^2\theta - \sin^2\theta \end{bmatrix} \quad (3.62)$$

Benzer şekilde gerinmeler arasında aşağıdaki eşitlik yazılabilir:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \frac{\gamma_{12}}{2} \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \frac{\gamma_{xy}}{2} \end{bmatrix} \quad \text{veya} \quad \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \frac{\gamma_{xy}}{2} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \frac{\gamma_{12}}{2} \end{bmatrix} \quad (3.63)$$

Bununla birlikte düzeltme matrisi $[R]$ kullanılarak (3.76) gerinme vektörlerinden $\frac{1}{2}$ çarpanları yok edilir.

$$[R] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (3.64)$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = [R] \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \frac{\gamma_{xy}}{2} \end{bmatrix} \quad \text{ve} \quad \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = [R] \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \frac{\gamma_{12}}{2} \end{bmatrix} \quad (3.65)$$

x-y düzlemindeki gerilme bileşenleri ile 1-2 düzlemindeki gerilme bileşenleri arasında aşağıdaki eşitlik yazılır:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = [T]^{-1}[Q] \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \frac{\gamma_{12}}{2} \end{bmatrix} = [T]^{-1}[Q][R][T][R]^{-1} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \frac{\gamma_{xy}}{2} \end{bmatrix} \quad (3.66)$$

Burada $[R][T][R]^{-1} = [T]^{-T}$ olduğundan $[\bar{Q}] = [T]^{-1}[Q][T]^{-T}$ şeklindedir. Bu durumda x-y düzlemindeki gerilme-gerinme bağıntısı aşağıdaki gibi olur:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [\bar{Q}] \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.67)$$

Burada $\overline{[Q]}$ indirgenmiş rijitlik matrisi olup, bu matrisin elemanları aşağıda açıkça verilmektedir:

$$\begin{aligned}
\overline{Q}_{11} &= Q_{11}\cos^4\theta + 2(Q_{12} + 2Q_{66})\sin^2\theta \cos^2\theta + Q_{22} \sin^4\theta \\
\overline{Q}_{12} &= (Q_{11}+Q_{22}-4Q_{66})\sin^2\theta \cos^2\theta+Q_{12}(\sin^4\theta + \cos^4\theta) \\
\overline{Q}_{22} &= Q_{11} \sin^4\theta + 2(Q_{12} + 2Q_{66})\sin^2\theta \cos^2\theta + Q_{22} \cos^4\theta \\
\overline{Q}_{16} &= (Q_{11}-Q_{22}-2Q_{66})\sin\theta \cos^3\theta+ (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66}) \sin^3\theta \cos\theta \\
\overline{Q}_{26} &= (Q_{11}-Q_{22}-2Q_{66})\sin^3\theta \cos\theta+ (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66}) \sin\theta \cos^3\theta \\
\overline{Q}_{66} &= (Q_{11}+Q_{22}-2Q_{12}-2Q_{66})\sin^2\theta \cos^2\theta+Q_{66}(\sin^4\theta + \cos^4\theta)
\end{aligned} \tag{3.68}$$

3.2.2.d. Klasik laminasyon teorisi

İki veya daha fazla tabakadan oluşan levhalar, tabakaların değişik doğrultularda istiflenmesiyle, malzeme asal eksenleri çeşitli açılar yapan zorlamalara dayanabilecek şekilde üretilirler. Bu tip levhaların rijitlikleri klasik laminasyon teorisi ile açıklanmaktadır. Tabakaların değişik yönlendirilmeleri sonucunda levhada belirli bir asal eksen olmayabilir. Klasik laminasyon teorisi bir tabakadan yola çıkıp levhanın davranışını incelemektedir.

Tek bir tabakanın gerilme-gerinme bağıntıları

Düzlem gerilme altındaki ortotropik tabakanın asal eksenlerdeki gerilme-şekil değiştirme bağıntısı aşağıdaki gibidir:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \tag{3.69}$$

Tabaka düzleminde olan herhangi bir eksen takımındaki gerilme-şekil değiştirme bağıntısı ise aşağıdaki gibidir.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.70)$$

Bu sayede değişik açılarda takviye edilmiş tabakalar için transforme edilmiş, indirgenmiş rijitlik matrisinin (\bar{Q}_{ij}) hesaplanması mümkün olur. Tabakalı bir kompozitte k. tabakanın gerilme-gerinme bağıntısı aşağıdaki gibidir:

$$\{\sigma\}_k = [\bar{Q}]_k \cdot \{\varepsilon\}_k \quad (3.71)$$

Çok tabakalı bir plakta gerilme – gerinme davranışı

Bir levhanın kalınlığı boyunca gerilme-gerinme değişiminin hesaplanması için levhanın rijitlik matrislerinin bilinmesi gerekir. Klasik laminasyon teorisinde tabakalı plakların mekanik davranışının incelenmesinde şu kabuller yapılır:

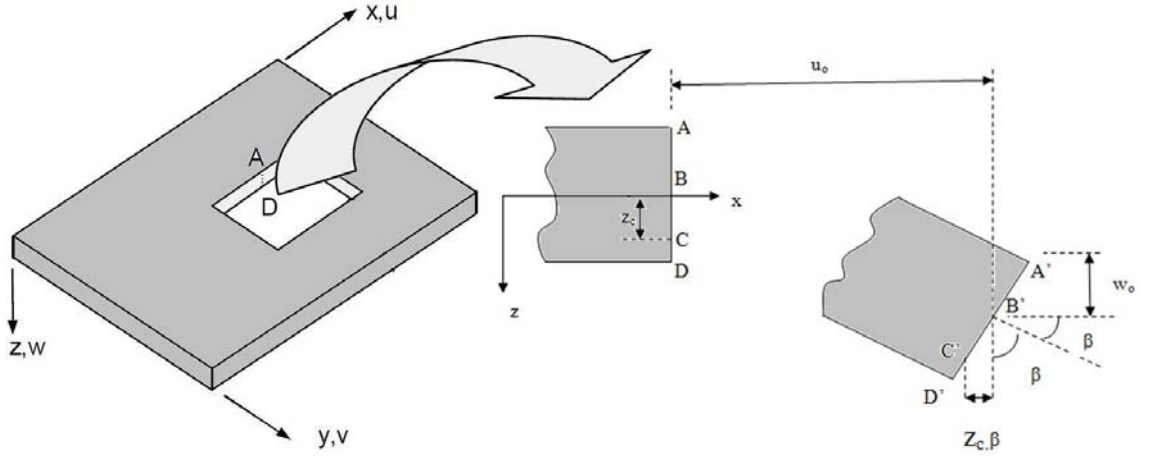
- Tabakalar arasında bağlar mükemmeldir ve kayma etkisiyle deforme olmazlar, levha tek bir tabaka gibi davranır.
- Levhanın orta düzlemine dik düzlem, levha şekil değiştirse dahi orta düzleme dik kalır. Yani orta düzlemlere dik düzlemlerde kayma olmaz.

$$\gamma_{xz} = \gamma_{yz} = 0$$

- Normal doğrultusunda kalınlığın sabit kaldığı kabul edilir.

$$\varepsilon_z = 0$$

Çok tabakalı ve fiber takviyeli bir levha alalım ve x, y, z doğrultularındaki u, v, w yer değişimlerini ifade edelim (Şekil 3.8). Bir ABCD düzleminin yer değiştirmesini x - z düzleminde inceleyelim.



Şekil 3.8. Levhadaki bir noktanın yer değiştirmesi

Orta düzlemdeki B noktasının x doğrultusundaki yer değişimi u_0 ise düzlem üzerindeki diğer noktalar için (örneğin C noktası)

$$u = u_0 - z_c \cdot \beta \quad (3.72)$$

yazılabilir. Burada β , x eksenine göre kesit normalinin eğimidir.

$$\beta = \frac{\partial w_0}{\partial x} \quad (3.73)$$

u yer değişimi, levha kalınlığı boyunca herhangi bir z noktası için

$$u = u_0 - z \cdot \frac{\partial w_0}{\partial x} \quad (3.74)$$

olarak yazılabilir. Benzer şekilde y doğrultusunda v yerdeğişimi aşağıdaki gibi olur:

$$v = v_0 - z \cdot \frac{\partial w_0}{\partial y} \quad (3.75)$$

$\varepsilon_z = \gamma_{xz} = \gamma_{yz} = 0$ olduğundan, sadece $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ ve γ_{xy} gerinmeleri meydana gelir. Bunlar yer değiştirmeler cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilirler:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (3.76)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \quad (3.77)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} = 2 \varepsilon_{xy} \quad (3.78)$$

(3.76), (3.77) ve (3.78) nolu bağıntıların türevleri alınarak,

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u_0}{\partial x} - z \cdot \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \quad (3.79)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v_0}{\partial y} - z \cdot \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \quad (3.80)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial v_0}{\partial x} + \frac{\partial u_0}{\partial y} - 2 \cdot z \cdot \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \cdot \partial y} = 2 \cdot \varepsilon_{xy} \quad (3.81)$$

veya

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.82)$$

(3.82) denklemi elde edilir. Bu denklemdeki ε_x^0 , ε_y^0 ve γ_{xy}^0 orta düzlemdeki gerinmeler olup aşağıdaki gibi yazılır:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u_0}{\partial x} \\ \frac{\partial v_0}{\partial y} \\ \frac{\partial v_0}{\partial x} + \frac{\partial u_0}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (3.83)$$

Orta düzlemdeki eğrilikler ise aşağıdaki gibi ifade edilebilirler.

$$\begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\ 2 \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \end{bmatrix} \quad (3.84)$$

(3.84) denkleminde, kalınlık boyunca şekil değişimi değerinin gerilme-gerinme bağıntısında yerine konulmasıyla k. tabakadaki gerilme değeri aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.85)$$

Plâğin her tabakası için Q_{ij} matrisi farklı olabileceğinden, levha kalınlığı boyunca gerilme değişimi sürekli değildir. Buna karşın tabakalar arası bağlar mükemmel olduğu kabulünden şekil değişimindeki süreklilik bozulmaz.

Bir levhaya etkiyen bileşke kuvvetler ve momentler

Bir levhaya etkiyen bileşke kuvvet ve momentler her bir tabakadaki gerilmelerin kalınlığı boyunca integre edilmesi ile elde edilir.

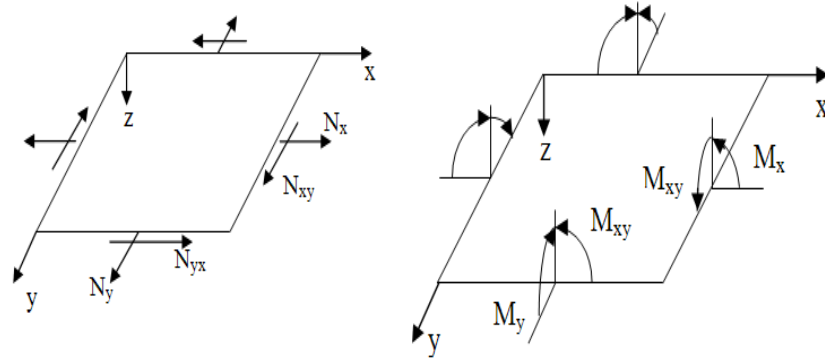
$$N_x = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_x dz \quad (3.86)$$

$$M_x = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_x z dz \quad (3.87)$$

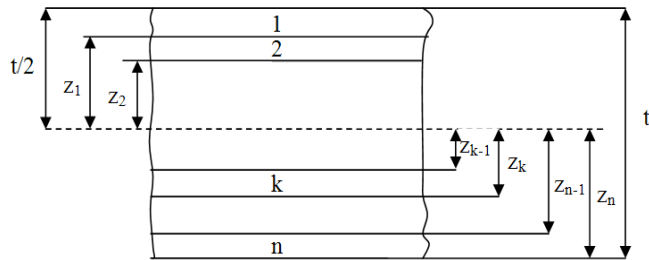
Şekil 3.9’da görüldüğü gibi, N_x levha enine kesitinin birim genişliği başına etkiyen kuvvet, M_x de birim genişlik başına etkiyen momenttir.

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \int_{-t/2}^{t/2} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}_k dz = \sum_{k=1}^N \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}_k dz \quad (3.88)$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \int_{-t/2}^{t/2} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}_k z dz = \sum_{k=1}^N \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}_k z dz \quad (3.89)$$



Şekil 3.9. Bir levhaya etkiyen kuvvet ve momentler



Şekil 3.10. n tabakalı levhada koordinatlar

Yukarıdaki denklemlerdeki z_k ve z_{k-1} , levhanın z doğrultusundaki kalınlık koordinatlarıdır ve $z_0 = -t/2$ ' dir (Şekil 3.10). Şekildeki bileşke kuvvet ve momentlerin integrali alındıktan sonra z 'den bağımsızdırlar. Fakat x ve y ' nin fonksiyonudurlar.

Her iki tabaka için bilinen gerilme-şekil değiştirme bağıntıları yardımıyla çok tabakalı levhanın gerilme-şekil değiştirme bağıntısı aşağıdaki şekle dönüştürülebilir.

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^N \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \left[\int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} dz + \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix} z dz \right] \quad (3.90)$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^N \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \left[\int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} z dz + \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix} z^2 dz \right] \quad (3.91)$$

ε_x^0 , ε_y^0 , γ_{xy}^0 , κ_x , κ_y ve κ_{xy} z 'nin fonksiyonu değildirler. Bunlar orta düzleme ait değerlerdir. Bu yüzden toplam işareti içinden çıkartılabilirler ve yukarıdaki denklemler şu şekli alırlar:

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.92)$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.93)$$

Burada;

A_{ij} = Uzama rijitlik matrisi,

B_{ij} = Birleşme rijitlik matrisi,

D_{ij} = Eğme rijitlik matrisini göstermektedir.

$$\begin{aligned}
A_{ij} &= \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k - z_{k-1}) \\
B_{ij} &= \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^2 - z_{k-1}^2) \\
D_{ij} &= \frac{1}{3} \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3)
\end{aligned} \tag{3.94}$$

B_{ij} matrisi eğme ile uzama arasındaki ilişkiyi temsil eder. B_{ij} terimi var olan çok tabakalı bir levhada, eğme ve/veya dönme yaratmadan tabakayı çekmenin olanağı yoktur. Yani uzama kuvveti yalnızca uzama şekil değişimleri değil aynı zamanda levhada eğme ve/veya dönme de yaratır. Aynı şekilde levhaya moment uygulandığında uzama ve kısalmalarda söz konusudur.

3.2.3. Çok tabakalarda akma (kırılma) durumu

Çok tabakalı bir levhanın kırılma kriteri içerdiği tabakanın özellikleri ile doğrudan ilgili olmalıdır. Böyle bir kriterin önce her bir tabakadaki gerilme seviyesini, daha sonrada tabakaların herhangi birinin hasara uğrayıp uğramayacağını belirlemesi gereklidir. Ancak birçok durumda tek bir tabakanın hasara uğraması tüm levhanın hasarı anlamına gelmeyebilir. Tek bir tabakanın hasara uğraması ile levhanın rijitliği değişir, fakat buna rağmen levha kırılmaya neden olan kuvvetten de yüksek zorlamaları taşıyabilir.

Kompozit malzemelerin kompleks yapıları ve anizotropik özelliklerinden dolayı, söz konusu olabilecek tüm hasar mekanizmalarını ve bunların süperpozisyonunu kapsayan bir kırılma kriterinin geliştirilmesi oldukça güçtür. Ayrıca gerek malzemelerin üretimi, gerek deneylerin yapılışındaki kaçınılmaz hatalar nedeniyle, önerilen bu teorilerin geçerliliğinin incelenmesinde de büyük sapmalar oluşmakta ve bu durum teorilerin doğruluğunun yargılanmasında güçlükler yaratmaktadır.

Çok tabakalı bir levhanın dayanımını etkileyen başlıca faktörler şunlardır:

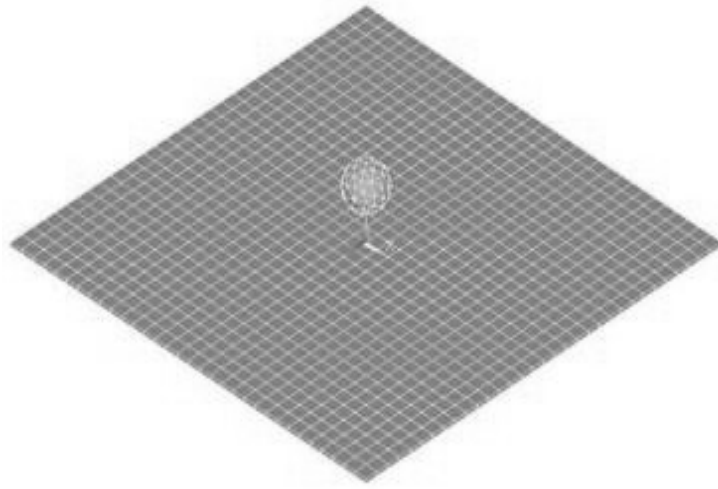
- Tabakaların dayanım
- Tabakaların rijitliği
- Tabaka kalınlıkları
- İstifleme geometrisi
- Tabakaların ısıl genleşme özellikleri
- Matrisin sertleşme sıcaklığı

Görüldüğü gibi mekanik ve geometrik özellikler yanında ısıl özelliklerde tabaka dayanımı bakımından belirleyici olmaktadır. Isıl genleşme katsayıları sıcaklık değişimleri sırasında ortaya çıkan ısıl gerilmeleri, sertleşme sıcaklığı ise oda sıcaklığındaki artık gerilmeleri etkilemekte ve bu şekilde levhanın ısıl zorlamalar altındaki davranışı belirlenmiş olmaktadır (Aran,1990).

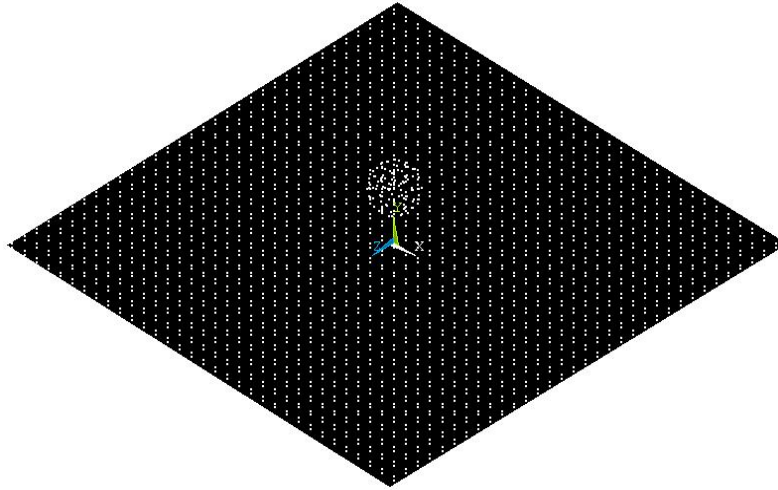
3.3. Sonlu elemanlar metodu (SEM)

Sonlu elemanlar yöntemi bilgisayar teknolojisinin gelişimine paralel olarak mühendislik alanlarında temsil gücü yüksek bir yaklaşımla çözüm arayan, sayısal bir çözüm yöntemidir. Bu çözüm yönteminin temelinde fizik kanunları ve matematik dili yatmaktadır. Bu yöntem ile akışkanlar mekaniği, elektro manyetik hesaplamalar, statik ve dinamik analizler, mekanizma analizleri, termal analiz vb. gibi alanlarda uygulamalar yapılmaktadır.

Sonlu elemanlar metodunda yapısal geometri, maruz kalacağı şartları temsil edebilecek elemanlara ayrılır. Elemanlar 'düğüm' adı verilen düğüm noktalarıyla bir araya getirilmiştir. Şekilde (3.11) ve (3.12)'de görüldüğü gibi eleman ve nodlarla temsil edilen bir model verilmiştir.



Şekil 3.11. Örnek bir sonlu eleman modelinde elemanlar



Şekil 3.12. Örnek bir sonlu eleman modelinde düğüm noktaları

Bu şekilde matematiksel bir denklem takımı elde edilir. Gerilme analizinde bu denklemler nodlardaki denge denklemleridir. İncelenen probleme bağlı olarak bu şekilde yüzlerce hatta binlerce denklem elde edilir. Bu denklem takımının çözümü ise bilgisayar kullanımını zorunlu kılmaktadır.

Sonlu elemanlar metodunda temel fikir sürekli fonksiyonları bölgesel sürekli fonksiyonlar (genellikle polinomlar) ile temsil etmektir. Bunun anlamı bir eleman içerisinde hesaplanması istenen büyüklüğün (örneğin deplasmanın) değeri o elemanın nodlarındaki değerler kullanılarak interpolasyon ile bulunur. Bu nedenle sonlu

elemanlar metodunda bilinmeyen ve hesaplanması istenen değerler nodlardaki değerlerdir. Bir varyasyonel prensip (örneğin; enerjinin minimum olması prensibi) kullanılarak büyüklük alanının nodlardaki değerleri için bir denklem takımı elde edilir. Bu denklem takımının matris formundaki gösterimi

$$[K] [D] = [R]$$

şeklinindedir. Burada $[D]$ büyüklüğü alanının nodlardaki bilinmeyen değerlerini temsil eden vektör, $[R]$ bilinen yük vektörü ve $[K]$ ise bilinen sabitler matrisidir. Gerilme analizinde $[K]$ dirençlilik matrisi olarak bilinmektedir (Ergin ve ark. 2000).

Sonlu elemanlar metodunun temel prensibi, öncelikle bir elemana ait sistem özelliklerini içeren denklemlerin çıkartılıp tüm sistemi temsil edecek şekilde eleman denklemlerini birleştirerek sisteme ait lineer denklem takımının elde edilmesidir. Bir elemana ait denklemlerin elde edilmesinde değişik metotlar kullanılabilir. Bunlar içinde en çok kullanılan dört temel yöntem şunlardır:

- Direk yaklaşım: Bu yaklaşım daha çok tek boyutlu ve basit problemler için uygundur.
- Varyasyonel yaklaşım: Bir fonksiyonelin maksimum ve minimum edilmesi demektir. Katı cisim mekaniğinde en çok kullanılan fonksiyoneller potansiyel enerji prensibi, komplementer (tümleyen) potansiyel enerji prensibi ve Reissner prensibi olarak sayılabilir. Fonksiyonelin birinci türevinin sıfır olduğu noktada fonksiyonu ekstremize eden değerler bulunur. İkinci türevinin sıfırdan büyük veya küçük olmasına göre bu değer maksimum veya minimum olduğu anlaşılır.
- Ağırlıklı kalanlar yaklaşımı: Bir fonksiyonun çeşitli değerler karşılığında elde edilen yaklaşık çözümü ile gerçek çözüm arasındaki farkların bir ağırlık fonksiyonu ile çarpılarak toplamlarını minimize etme işlemine "ağırlıklı kalanlar yaklaşımı" denir. Bu yaklaşım kullanılarak eleman özelliklerinin elde edilmesinin avantajı, fonksiyonellerin elde edilemediği problemlerde uygulanabilir olmasıdır.

- Enerji dengesi yaklaşımı: Bir sisteme giren ve çıkan termal veya mekanik enerjilerin eşitliği ilkesine dayanır. Bu yaklaşım bir fonksiyonele ihtiyaç duymaz.

Sonlu elemanlar metodunda kullanılan elemanlar boyutlarına göre dört kısma ayrılabilir:

- Tek boyutlu elemanlar: Bu elemanlar tek boyutlu olarak ifade edilebilen problemlerin çözümünde kullanılır.
- İki boyutlu elemanlar: İki boyutlu (düzlem) problemlerinin çözümünde kullanılırlar. Bu grubun temel elemanı üç düğümlü üçgen elemandır. Üçgen elemanın altı, dokuz ve daha fazla düğüm ihtiva eden çeşitleri de vardır. Düğüm sayısı seçilecek interpolasyon fonksiyonunun derecesine göre belirlenir. Üçgen eleman, çözüm bölgesini aslına uygun olarak temsil etmesi bakımından kullanışlı bir eleman tipidir. İki üçgen elemanın birleşmesiyle meydana gelen dörtgen eleman, problemin geometrisine uyum sağladığı ölçüde kullanışlılığı olan bir elemandır. Dört veya daha fazla düğümlü olabilir. Dörtgen eleman çoğu zaman özel hal olan dikdörtgen eleman şeklinde kullanılır.
- Dönel elemanlar: Eksenel simetrik özellik gösteren problemlerin çözümünde dönel elemanlar kullanılır. Bu elemanlar bir veya iki boyutlu elemanların simetri eksenini etrafında bir tam dönme yapmasıyla oluşurlar. Gerçekte üç boyutlu olan bu elemanlar, eksenel simetrik problemleri iki boyutlu problem gibi çözme olanağı sağladığı için çok kullanışlıdır.
- Üç boyutlu elemanlar: Bu grupta temel eleman üçgen piramittir. Bunun dışında dikdörtgenler prizması veya daha genel olarak altı yüzeyle elemanlar, üç boyutlu problemlerin çözümünde kullanılan eleman tipleridir.
- İzoparametrik Elemanlar: Çözüm bölgesinin sınırları eğri denklemleri ile tanımlanmışsa, kenarları doğru olan elemanların bu bölgeyi tam olarak tanımlaması mümkün değildir. Böyle durumlarda bölgeyi gereken hassasiyette tanımlamak için

elemanların boyutlarını küçültmek, dolayısıyla adetlerini artırmak gerekmektedir. Bu durum çözülmesi gereken denklem sayısını artırır, dolayısıyla gereken bilgisayar kapasitesinin ve zamanın büyümesine sebep olur. Bu olumsuzluklardan kurtulmak için, çözüm bölgesinin eğri denklemleri ile tanımlanan sınırlarına uyum sağlayacak eğri kenarlı elemanlara ihtiyaç hissedilmektedir. Böylece hem çözüm bölgesi daha iyi tanımlanmakta hem de daha az sayıda eleman kullanılarak çözüm yapılabilir. Bu elemanlar üzerindeki düğüm noktaları bir fonksiyon ile tanımlanır. İzoparametrik sonlu elemanın özelliği, her noktasının konumunun ve yer değiştirmesinin aynı mertebeden aynı şekil (interpolasyon) fonksiyonu ile tanımlanabiliyor olmasıdır.

İnterpolasyon fonksiyonlarının seçimi:

İnterpolasyon fonksiyonu alan değişkeninin eleman üzerindeki değişimini temsil etmektedir. İnterpolasyon fonksiyonunun belirlenmesi seçilen eleman tipine ve çözülecek denklemin derecesine bağlıdır. Ayrıca interpolasyon fonksiyonları şu şartları sağlamalıdır:

- İnterpolasyon fonksiyonunda bulunan alan değişkeni ve alan değişkeninin en yüksek mertebeden bir önceki mertebeye kadar olan kısmi türevleri eleman sınırlarında sürekli olmalıdır.
- İnterpolasyon fonksiyonunda bulunan alan değişkeninin bütün türevleri, eleman boyutları limitte sıfıra gitse bile alan değişkenini karakterize etmelidir.
- Seçilen interpolasyon fonksiyonu koordinat değişimlerinden etkilenmemelidir. Hem yukarıdaki şartları sağlamaları hem de türev ve integral almadaki kolaylığından dolayı interpolasyon fonksiyonu olarak genelde polinomlar seçilir. Seçilen polinom, yukarıdaki şartların gerçekleşmesi için uygun terimleri ihtiva etmelidir.

Eleman direngenlik matrisinin elde edilmesi

Eleman direngenliğinin bulunması, elemana etki eden dış etkenler ile alan değişkenleri arasında bir ilişki kurmak anlamına gelmektedir. Eleman direngenliğini elde ederken çözülecek problemin konusu, alan değişkeni, seçilen eleman tipi, seçilen interpolasyon fonksiyonu, eleman özelliklerini elde ederken kullanılan metot gibi pek çok faktör göz önüne alınmak durumundadır. Etki eden bu faktörlere göre de eleman direngenliğinin elde edilmesinde değişik yollar izlenir.

Sistem direngenlik matrisinin teşkili

Sistem direngenlik matrisi sistemin düğüm sayısı ve her düğümdeki serbestlik derecesine bağlı olarak belirlenir. Elemanlar için hesaplanan direngenlik matrisleri, elemanın üzerindeki düğüm numaralarına bağlı olarak genel direngenlik matrisinde ilgili satır ve sütununa yerleştirilir. Farklı elemanlar tarafından ortak kullanılan düğümlerdeki terimler genel direngenlik matrisinin ilgili satır ve sütununda üst üste toplanmalıdır. Elemanların düğüm numaralaması bir sistematiğe göre yapılırsa genel direngenlik matrisinde elemanlar diyagonal üzerinde üst üste toplanır.

Sisteme etki eden kuvvetlerin bulunması

Bir problemde sisteme etki edebilecek kuvvetler şunlar olabilir:

- Tekil Kuvvetler: Tekil kuvvetler hangi elemanın hangi düğümüne ne yönde etki ediyorsa genel kuvvet vektöründe etki ettiği düğüme karşılık gelen satıra yerleştirilir. Problemin cinsine göre tekil yük kavramı değişebilir Örneğin ısı iletimi probleminde elastisite problemindeki tekil yüke karşılık noktasal ısı kaynağı veya tanımlı ısı akışı yükleri bulunmaktadır.

- Yayılı Kuvvetler: Bu kuvvetler bir kenar boyunca ya da bir alanda etkili olurlar.

- Kütlevetleri: Eleman hacmi için geçerli olan merkezkaç kuvveti ve ağırlık kuvvetleri gibi kuvvetlerdir.

Sınır şartlarının belirlenmesi

Her problemin tabii olarak ya da yapay sınır şartları vardır. Sınır şartları, cismin çeşitli kısımlarındaki elastik yer değiştirmelerin ölçülebileceği bir referans sağlar. Bir çubuk eleman ele alalım. Bu eleman için bir sınır şartı tanımlanmazsa, etki eden düğüm kuvvetlerinin büyük, küçük ya da eşit olmasına göre hareket eder.

Sistem denkleminin çözümü

Çözüm için, sistemin sınır şartları da göz önüne alınarak direngenlik matrisinin tersini almak yeterlidir. Fakat bilgisayar kapasitesi ve bilgisayar zamanı açısından çok büyük matrislerin çözümünü ters alma işlemi ile yapmak yerine Gauss eliminasyon metodu ile daha az kapasite ve daha kısa sürede yapmak mümkün olmaktadır.

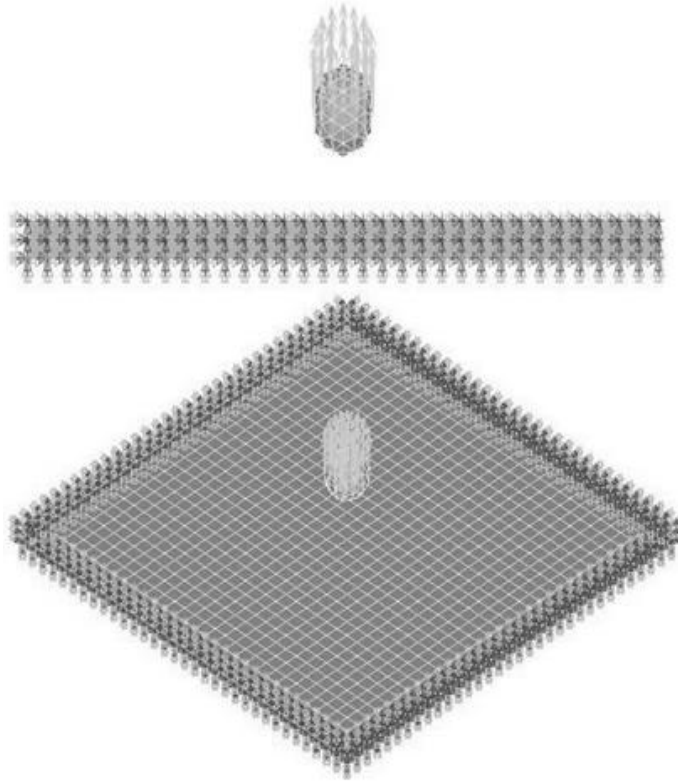
3.4. Kompozit malzemelerin darbe davranışı

3.4.1. Düşük hızlı darbenin belirlenmesi

Genel olarak, darbeler düşük hızlı veya yüksek hızlı olarak sınıflandırılırlar, fakat bu kategoriler arasında açık bir geçiş yoktur. Yapılan araştırmalar bu geçişin belirlenmesinde henüz net bir sonucun elde edilemediğini göstermektedir. Bu konuda yapılmış çalışmalardan bir kısmı düşük hızlı darbeyi ki bunlar statikmiş gibi düşünülebilir. Hedefin rijitliğine, malzeme özelliklerine ve çarpan cismin kütle ve rijitliğine bağlı olarak 1 ila 10 m/s arasında değişen hızlar olarak değerlendirilmesi gerektiğini savunmaktadır. Düşük hızlı darbeye en basit örnek olarak kompozit malzeme üzerine imalat veya bakım esnasında kaza sonucu bir parçanın düşmesi verilebilir. Düşük hızlı darbeler normal olarak çarpışma temas anında malzeme

içyapısında deformasyon oluşturan darbelerdir. Bazen düşük hızlı darbe, düşük enerjili darbe olarak da kullanılır. Düşük hızlı darbede, malzemenin içyapısında darbeye karşı cevap verebilmek için gerekli olan temas süresi yeterlidir ve sonuç olarak daha fazla enerji elastik olarak absorbe edilir. Bu nedenle hedefin dinamik yapısal cevabı çok büyük bir öneme sahiptir (Ceyhun ve Turan, 2003). Tabakalı kompozit malzemelerin dinamik cevabının birçok parametreden etkilendiği bilinmektedir. Kompozit malzemenin mekanik özelliklerinin yanı sıra takviye açısı, malzeme boyutu ve kalınlığı, tabaka sayısı ve ön gerilme durumu gibi parametrelerin malzemenin darbe davranışı üzerinde önemli etkilerinin olduğu görülmektedir. Ayrıca kompozit malzemenin dinamik yapısal cevabında, vurucu geometrisinin ve hızının da önemli bir etkisinin olduğu yapılan çalışmalardan anlaşılmaktadır.

3.4.2. Enine darbe



Şekil 3.13. Enine darbeye maruz kompozit malzeme

Şekil 3.13’de görüldüğü gibi kompozit tabakaya fibere dik yönde darbe yükü uygulanmıştır. Kompozit malzemelerde kalınlık boyunca bir takviye söz konusu değilse, kompozit malzemeler mekanik özellikleri bakımından fibere dik doğrultularda zayıf olduğundan, bu doğrultularda gelebilecek darbe yüklemelerinde direnç gösterememektedir. Enine darbe yüklemelerinde malzemenin sahip olduğu özellikler dinamik cevabında önemli rol oynamaktadır. Örneğin, yükleme şartları aynı kalmak şartıyla sadece takviye açısındaki değişim direnci artırmaktadır. $[0^0/0^0]_{10}$ takviye açısına sahip kompozit malzeme ile $[0^0/90^0]_{10}$ takviye açısına sahip kompozit malzemenin enine darbe yüklemesi durumunda vermiş oldukları dinamik cevaplar farklılık göstermektedir. $[0^0/0^0]_{10}$ takviye açısına sahip kompozit malzemede büyük hasar oluşumu meydana gelirken $[0^0/90^0]_{10}$ takviye açısına sahip kompozit malzemede ise daha küçük hasar oluşumu görülmemektedir. Enine darbe yüklemesinde impektörün (vurucu) geometrisinin ve hızının da önemli etkileri vardır.

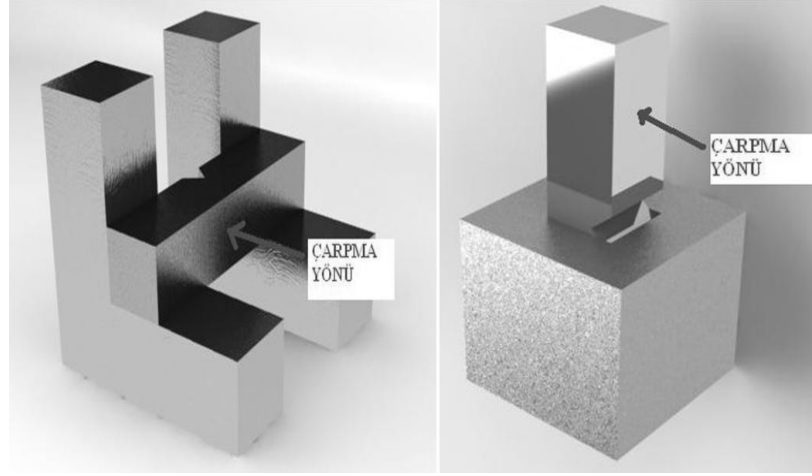
Düşük hızlı darbeler tabakalar üzerinde gözle görülen hasarlar oluşturmayabilirler. Fakat tabaka içerisinde, matris kırılması, delaminasyon ve/veya fiber kırılması şeklinde hasarlara sebep olabilirler (Ceyhun ve Turan, 2003).

3.4.3. Darbe testleri

Malzemelerin darbelere karşı dayanımı tokluğu ile ilişkilidir. Tokluk, malzemeyi deforme etmek için gerekli enerji miktarı olarak tanımlanabilir. Darbe süresince malzeme tarafından absorblanan enerji, malzemenin dayanımının ve tokluğunun bir ölçüsü olarak kullanılabilir.

Günümüzde aşağıdaki test yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunlar genellikle üç kategoride sınıflandırılabilirler;

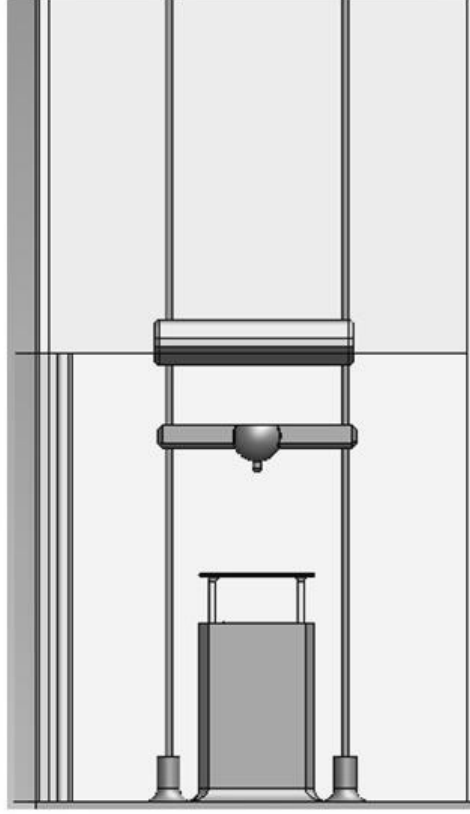
1. Ağırlık düşürme testleri,
2. Izod ve Charpy testleri,
3. Balistik testler



Şekil 3.14. Charpy ve Izod darbe test düzenekleri

Şekil 3.14’de Izod ve Charpy test düzenek şemaları verilmiştir. Çentik açılmış test numunelerine, standart yükseklikten bırakılan sarkaç darbe uygulamaktadır. Sarkacın numunelere çarpma yönleri Şekil 3.14’de gösterilmiştir. Sarkacın çarpmadan önceki ve çarpma işleminden sonraki yükseklikleri tespit edilerek, ilk ve son durumdaki enerji farkı malzeme tarafından absorblanan enerji olarak ifade edilir. Deney sonuçlarından malzemenin tokluğu hakkında derecelendirme yapılabilir. Izod ve Charpy deney yöntemleri deney düzeneğinde desteklenme biçimleri açısından ve uygulanan darbe noktaları bakımından farklılık göstermektedir.

Ağırlık düşürme test yöntemi, malzeme üzerine düşey yönde, belirli yükseklikteki vurucu ile numuneye darbe uygulayarak gerçekleştirilmektedir (Şekil 3.15-3.16). Bu testlerde numuneye çarpma hızları, ivme ve kontak kuvvetleri gibi parametreler ölçülmekte ve zamana bağlı değişimler elde edilmektedir.



Şekil 3.15. Ağırlık Düşürme Test Düzeneği



Şekil 3.16. Ağırlık düşürme test düzeneğinin ayrıntılı görünümü

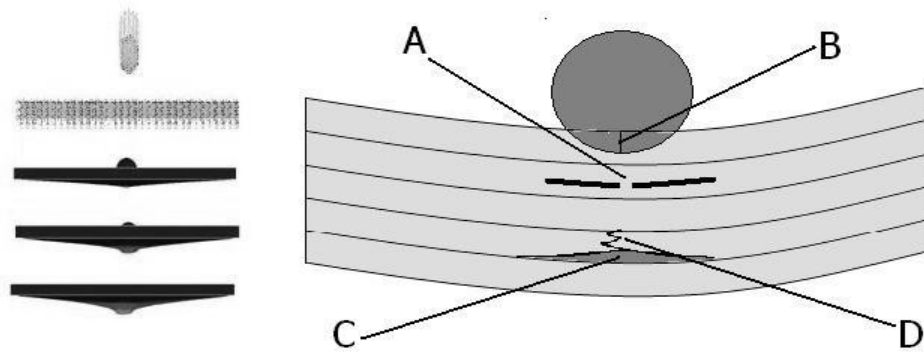


Şekil 3.17. Balistik test düzeneği

Balistik testler, yüksek hızlı darbe yükü gerektirdiğinden, numuneler silah vb. araçlar kullanılarak yüksek hızlı darbe deneyi gerçekleştirilmektedir (Şekil 3.17). Bu deney sistemlerinde darbe reaksiyon süreleri çok kısa olduklarından, yüksek özelliklere sahip kamera sistemleri ile desteklenmektedir. Bu çalışmalarda genellikle malzemenin hasar oluşumu ve ilerlemesi durumları incelenmektedir.

3.4.4. Darbe sonucu oluşan hasar modları

Tabakalı kompozit malzemeler, elyaf ve matris bileşenlerinden meydana gelmiştir. Bu durum malzemenin darbe davranışını karmaşık hale gerektirmektedir. Darbe sonucunda tabakalı kompozit malzemedeki farklı hasar oluşumları meydana gelmektedir. Bu hasar oluşumlarının meydana gelmesi, kompozit malzemenin sahip olduğu mekanik ve geometrik özelliklere bağlıdır. Bunun yanında vurucunun geometrisinin ve hızının da önemli bir yeri vardır. Bu hasar modaları, matris çatlaması, fiber kopması, delaminasyon ve nüfuziyet şeklinde ele alınabilir (Şekil 3.18).



Şekil 3.18. Darbe sonucu kompozit malzemede oluşan hasar modları: A fiber kopması, B nüfuziyet, C delaminasyon, D matris çatlama

Matris çatlama, darbeden dolayı oluşan enerjiyi fiberlere iletirken meydana gelen çatlak tipidir. Kompozit malzemenin üretilmesinde matris ile fiberin bağlantı noktalarındaki süreksizlik, darbe enerjisinin fibere iletilmesini güçleştirir ve matriste çatlak meydana getirebilir. Uygulanan yüklerden dolayı kompozit tabakalarda meydana gelen bası-çeki gerilmeleri malzemenin alt tabakalarındaki matrisin çatlamaına sebep olmaktadır.

Fiber kopması, malzemenin esas mukavemet elemanı olan fiberlerin matristin dağıtmış olduğu enerjiyi taşıyamamasından meydana gelmektedir. Genellikle görülen hasar modudur. Vurucunun temasa başladığı noktalarda meydana gelebildiği gibi eğilme durumunun meydana getirdiği eğilme gerilmelerinin etkisiyle fiber kopması meydana gelebilir.

Delaminasyon, tabakalı yapıya sahip olan kompozit malzemede eğilmeden dolayı meydana gelen tabakalar arası uyumsuzluktur. Bu uyumsuzluk sonucunda tabakalar arası ayrılma meydana gelmektedir. Genellikle farklı takviye açılara sahip tabakalarda meydana gelmektedir. Takviye açılarının farklı oluşu, darbe enerjisi tabakalar arasında aktarırken delaminasyon durumunu oluşturabilir. Bunların yanında tabakaların kalınlık ve yoğunluk farkı gibi düzensizlikler delaminasyon oluşumunu meydana getirebilir. Delaminasyon (Ceyhun ve Turan, 2003), matris kırılmalarından dolayı meydana gelen

yüksek mertebedeki düzlem dışı gerilmeler ve ara yüzey boyunca tabakalar arasındaki kesme gerilmelerinden dolayı Mod I kırılma olarak başlamaktadır. Hem eğilme kırılmaları hem de kesme kırılmaları delaminasyonu başlatabilir. Fakat kesme gerilmeleri nedeniyle oluşan delaminasyon, kararsız ve eğilme kırılması tarafından oluşan delaminasyon ise, kararlıdır ve uygulanan yük ile orantılıdır.

Nüfuziyet, vurucunun kompozit malzemede girinti miktarıdır. Bu durum vurucunun geometrisi ve enerjisiyle doğrudan ilişkilidir. Yüksek hızlı darbe yüklerinin etkisinde vurucu malzemede yüksek nüfuziyet meydana getirmektedir. Darbe esnasında malzemeye aktarılan toplam enerjinin büyük bir kısmı bu hata modu ile absorbe edilmektedir.

Darbe yüklemelerinde tabakalı kompozit malzemelerde meydana gelen hasar modları değişik kombinasyonlarda meydana gelebilir. Bu hasar modları malzemenin geometrik ve mekanik özelliklerinin yanında vurucunun mekanik ve geometrik durumu hasar modlarının oluşumunda ve oluşum sırasında farklılık meydana getirebilmektedir.

3.5. Belytschko-Tsay

Belytschko-Tsay kabuk eleman eş-dönme ve hız-gerinme formülasyonuna dayanmaktadır. Elemanın etkinliği bu iki kinematik varsayımların matematiksel basitleştirilmeleri sonucunda elde edilir. Formülasyonun eş-dönme kısmının elemanı koordinat sistemine yerleştirilerek, lineer olmayan mekaniğinin karmaşıklıklarını önler. Eşdeğer gerilme, Cauchy gerilmelerine benzer olduğu için formüllerde, deformasyon oranının veya hız gerinme seçiminin formüllerde karmaşıklığını kolaylaştırır.

3.5.1. Eş-dönme koordinatları

Orta yüzey ya da referans yüzeydeki dörtgen kabuk eleman, elemanın dört köşesindeki düğümlerin konumuna göre tanımlanır. Şekli değişmiş eleman koordinat sistemi Şekil 3.19'de görüldüğü gibi düğüm koordinatları açısından ifade edilir.

Anadiyogonal elemanın normal yöndeki birim vektörü hesaplanarak, eş-dönme koordinat sistemini teşkil etmek için işlemler başlatılır.

$$\hat{e}_3 = \frac{s_3}{\|s_3\|} \quad (3.95)$$

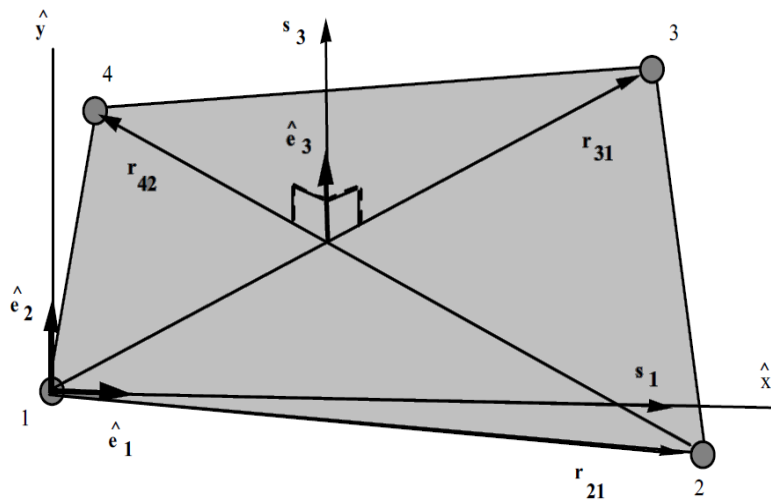
$$\|s_3\| = \sqrt{s_{31}^2 + s_{32}^2 + s_{33}^2} \quad (3.96)$$

$$s_3 = r_{31} \times r_{42} \quad (3.97)$$

Üst simge ($\hat{}$) yerel (eleman) koordinat sistemi belirtmek için kullanılır. 1 ve 2 düğümleri arasında eleman kenarı boyunca yaklaşık olarak yerel x , \hat{x} eksenini tanımlanmıştır. Bu tanım yerel \hat{x} - \hat{y} koordinat sisteminde tanımlanmış olan eleman gerilmelerini yorumlamak için elverişlidir. Bu birim vektörü oluşturmak için yapılan işlem, r_{21} vektörüne hemen hemen paralel olan bir s_1 vektörünü belirlemek içindir.

$$s_1 = r_{21} - (r_{21} \cdot \hat{e}_3) \hat{e}_3 \quad (3.98)$$

$$\hat{e}_1 = \frac{s_1}{\|s_1\|} \quad (3.99)$$



Şekil 3.19. Eleman koordinat sisteminin yapısı

Yeni birim vektör, diğer vektörlerin vektörel çarpımından elde edilir.

$$\hat{e}_2 = \hat{e}_3 \times \hat{e}_1 \quad (3.100)$$

Dört düğümlü elemanın eş düzlemindeki \hat{e}_1 ve \hat{e}_2 , kabuk orta düzlemine teğet, \hat{e}_3 fiber yönündedir. Elemanın deformasyonu gerçek lif yönü ile birim normal \hat{e}_3 arasındaki bir açıyla gerçekleşebilir. Bu açının büyüklüğü, fiber yönündeki birim vektörün büyüklüğü ve gerilmelerin büyüklüğüne bağlı olarak karakterize edilir.

$$|\hat{e}_3 f - 1| < \delta \quad (3.101)$$

Burada f , fiber doğrultusundaki birim vektördür. δ 'nın büyüklüğü gerilmelerin büyüklüğüne bağlıdır. Belytschko ve arkadaşlarına göre çoğu mühendislik uygulamaları için Denklem (3.101)'de sunulan koşulun yerine getirilmesi için δ 'nın kabul edilebilir değeri 10^{-2} kabul edilirse eş dönme koordinatları \hat{e} ve malzeme dönmesi arasındaki fark küçük olmalıdır.

Eş dönme üçlüsünün global bileşenleri, global ve element koordinat sistemleri arasında transformasyon matrisi tanımlanmasını gerektirir. Bu transformasyon işlemi global bileşenleri lokal bileşenlere dönüştürür. Global bileşenler $A = (A_x, A_y, A_z)$ ve eleman koordinat bileşenleri $\hat{A} = (\hat{A}_x, \hat{A}_y, \hat{A}_z)$ olarak tanımlanır.

$$\{A\} = \begin{Bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{1x} & e_{2x} & e_{3x} \\ e_{1y} & e_{2y} & e_{3y} \\ e_{1z} & e_{2z} & e_{3z} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \hat{A}_x \\ \hat{A}_y \\ \hat{A}_z \end{Bmatrix} = [\mu]\{\hat{A}\} = [q]^T\{A\} \quad (3.102)$$

Burada e_{ix}, e_{iy}, e_{iz} eleman koordinatının birim vektörlerinin küresel bileşenleridir. Ters dönüşüm matrisin transpozesi ile belirlenir.

$$\{\hat{A}\} = [\mu]^T\{A\} \quad (3.103)$$

3.5.2. Hız –gerinme- yer değiştirme ilişkileri

Yukarıda açıklanan küçük dönme durumunda Denklem (3.101) deki dönmenin büyüklüğü rijit elemanda bir sınırlama getirmemiştir. Düzlem dışı sınırlamalardan daha çok eleman gerinmeleri üzerinde sınırlamalar oluşturulmaktadır.

Mindlin plaka ve kabuk teorisi kullanarak Belytschko-Lin-Tsay kabuk elemanın bir noktasında ki hız Denklem (3.104) de verilmiştir.

$$v = v^m - \hat{z} e_3 \times \theta \quad (3.104)$$

Burada v^m orta yüzeyin hızı, θ açısal hız vektörü ve \hat{z} kabul elemanın fiber yönü (kalınlığı) boyunca mesafesidir. Deformasyon oranı eş dönme bileşenleri tarafından verilmektedir.

$$\hat{d}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.105)$$

Denklem (3.104) Denklem (3.105)' te yerine konarak gerekli işlemler yapılırsa aşağıdaki hız-gerinme ilişkileri aşağıdaki gibi olur.

$$\hat{d}_x = \frac{\partial \hat{d}_x^m}{\partial \hat{x}} + \hat{z} \frac{\partial \hat{\theta}_y}{\partial \hat{x}} \quad (3.106)$$

$$\hat{d}_y = \frac{\partial \hat{v}_y^m}{\partial \hat{y}} - \hat{z} \frac{\partial \hat{\theta}_x}{\partial \hat{y}} \quad (3.107)$$

$$2\hat{d}_{xy} = \frac{\partial \hat{v}_x^m}{\partial \hat{y}} + \frac{\partial \hat{v}_y^m}{\partial \hat{x}} + \hat{z} \left(\frac{\partial \hat{\theta}_y}{\partial \hat{y}} - \frac{\partial \hat{\theta}_x}{\partial \hat{x}} \right) \quad (3.108)$$

$$2\hat{d}_{yz} = \frac{\partial \hat{v}_z^m}{\partial \hat{y}} - \hat{\theta}_x \quad (3.109)$$

$$2\hat{d}_{xz} = \frac{\partial \hat{v}_z^m}{\partial \hat{x}} + \hat{\theta}_y \quad (3.110)$$

Hız-gerinme ilişkileri, kabuk içinde dörtgen noktalarda değerlendirilmesi gerekmektedir. Standart çift doğrusal düğüm interpolasyonu, orta yüzey hızı, açısız hız ve elemanın koordinatlarını (İzoparametrik temsili) tanımlamak için kullanılır. Bu interpolasyon ilişkileri aşağıda verilmiştir.

$$v^m = N_I(\xi, \eta)v_I$$

$$\theta^m = N_I(\xi, \eta)\theta_I \quad (3.111)$$

$$x^m = N_I(\xi, \eta)x_I$$

Burada alt simge tüm eleman düğümleri ve düğüm hızları üzerinde düğüm koordinatlarına göre zamana bağlı türevi alınarak elde edilmektedir $v_I = \dot{x}_I$. Çift doğrusal şekil fonksiyonları aşağıdadır.

$$N_1 = \frac{1}{4}(1 - \xi)(1 - \eta) \quad (3.112)$$

$$N_2 = \frac{1}{4}(1 + \xi)(1 - \eta) \quad (3.113)$$

$$N_3 = \frac{1}{4}(1 + \xi)(1 + \eta) \quad (3.114)$$

$$N_4 = \frac{1}{4}(1 - \xi)(1 + \eta) \quad (3.115)$$

Elemanın merkezindeki hız gerinmeleri ($\xi = 0$ ve $\eta = 0$), önceden tanımlanmış hız gerinme yer değiştirme ilişkileri Denklem (3.106) ve (3.110) içine yukarıdaki ilişkilerin konulmasıyla elde edilir. Yapılan cebrik işlemlerin sonunda aşağıdaki bağıntılar elde edilir.

$$\hat{d}_x = B_{1I}\hat{v}_{xI} + \hat{z}B_{1I}\hat{\theta}_{yI}$$

$$\hat{d}_y = B_{2I}\hat{v}_{yI} - \hat{z}B_{2I}\hat{\theta}_{xI}$$

$$2\hat{d}_{xy} = B_{2I}\hat{v}_{xI} + B_{1I}\hat{v}_{yI} + \hat{z}(B_{2I}\hat{\theta}_{yI} - B_{1I}\hat{\theta}_{xI}) \quad (3.116)$$

$$2\hat{d}_{xz} = B_{1I}\hat{v}_{zI} + N_I\hat{\theta}_{yI}$$

$$2\hat{d}_{yz} = B_{2I}\hat{v}_{zI} + N_I\hat{\theta}_{xI}$$

Burada

$$B_{1I} = \frac{\partial N_I}{\partial \hat{x}} \quad (a) \quad , \quad B_{2I} = \frac{\partial N_I}{\partial \hat{y}} \quad (b) \quad (3.117)$$

Şekil fonksiyon türevleri B_{aI} , elemanın merkezinde hesaplanmıştır yani $\xi = 0$ ve $\eta = 0$.

3.5.3. Gerilme bileşkeleri ve düğüm kuvvetleri

Hız-gerinme-yer değiştirme ilişkilerine göre uygun değerlendirmeler sonucunda ortaya çıkan gerilmeler, yerel bileşke kuvvet ve momentleri elde etmek için kabuk kalınlığı boyunca integre edilmiştir. Bileşkeler için integrasyon formülleri aşağıdaki gibidir:

$$\hat{f}_{\alpha\beta}^R = \int \hat{\sigma}_{\alpha\beta} d\hat{z} \quad (3.118)$$

$$\hat{m}_{\alpha\beta}^R = - \int \hat{z} \hat{\sigma}_{\alpha\beta} d\hat{z} \quad (3.119)$$

Burada üst indis R, bileşke kuvvet ve momentleri ve alt indisler (α, β) sınırlı düzlem gerilme plastisitesini göstermektedir.

Denklem (3.118) ve (3.119)'de verilen eleman merkezli kuvvet ve moment bileşkeleri, lokal düğüm kuvvetleri ve momentleri virtuel güç prensibi kullanılarak gerçekleştirmiştir. Bu şekilde elde edilen ilişkiler aşağıda verilmiştir:

$$\hat{f}_{xI} = A(B_{1I}\hat{f}_{xx}^R + B_{2I}\hat{f}_{xy}^R)$$

$$\hat{f}_{yI} = A(B_{2I}\hat{f}_{yy}^R + B_{1I}\hat{f}_{xy}^R) \quad (3.120)$$

$$\hat{f}_{zI} = A\kappa(B_{1I}\hat{f}_{xz}^R + B_{2I}\hat{f}_{yz}^R)$$

$$\hat{m}_{xI} = A\left(B_{2I}\hat{m}_{yy}^R + B_{1I}\hat{m}_{xy}^R - \frac{\kappa}{4}\hat{f}_{yz}^R\right)$$

$$\hat{m}_{yI} = -A\left(B_{1I}\hat{m}_{xx}^R + B_{2I}\hat{m}_{xy}^R - \frac{\kappa}{4}\hat{f}_{yz}^R\right) \quad (3.121)$$

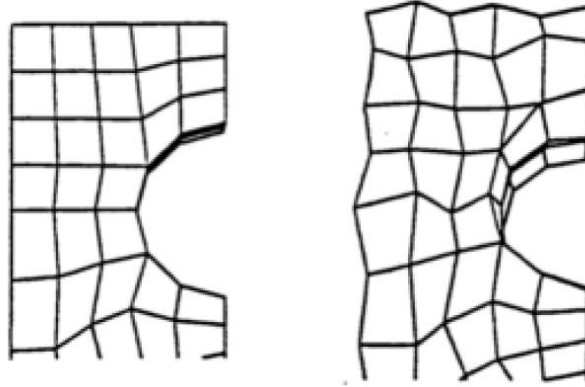
$$\hat{m}_{zI} = 0$$

Burada A elemanın alanı ve κ Mindlin teorisi kayma faktörüdür. Kabuk incelirken Kirchhoff formüllerini Belytschko-Lin-Tsay formülasyonlarına uydurmak için κ , bir penaltı parametresi olarak kullanılır.

Yukarıdaki yerel düğüm noktası kuvvetleri ve momentler Denklem (3.102) deki dönüşüm ilişkileri kullanılarak global koordinat sistemine dönüştürülmektedir. Global düğüm noktası kuvvetleri ve momentleri uygun bir şekilde bütün düğümler üzerinde toplanır ve düğüm ivmelerindeki bir sonraki artış için global hareket denklemleri çözülür.

3.5.4. Hourglass deformasyonlar

Hourglassing modları sıfır enerji modlarıyla ilişkilidirler. Bunlar tabiatta salınımlıdır ve tüm yapının salınımında çok daha küçük değerlerdir. Sıfır enerji modları fiziksel olarak mümkün olmayan matematiksel durumlara yol açarlar. Bu modlar tipik olarak hiçbir rijitliğe sahip değildirler. Hourglassing deformasyonlar mesh yapısına zigzag bir görünüş verirler (Şekil 3.20). Bir analizde hourglassing deformasyonların oluşması sonuçları geçersiz kılabilir ve her zaman minimize edilmesi gereklidir.

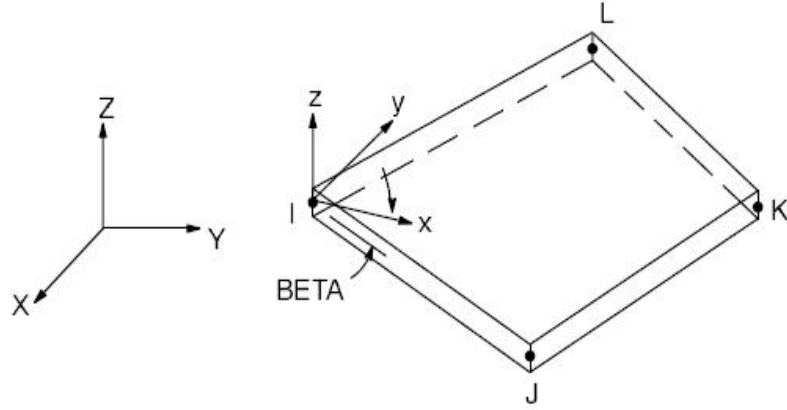


Şekil 3.20. Deforme olmamış mesh ve Hourglass etkisi ile deforme olmuş mesh

Hourglassing, katı, dörtgen kabuk ve 2D elemanları etkileyebilir, ancak üçgen kabukları, 2D üçgen ve kiriş elemanları etkilemez. Genel ilkeleri düzgün, uniform bir mesh kullanılması ve tek bir noktada yoğunlaşmış yükleri önlemek için vardır. Hourglass modu transferi için tüm yönlerden, yükler birkaç komşu düğümlere yayılmış olmalıdır. Analizlerin tutarlılığı açısından, genel kural olarak hourglass enerjisi, iç enerjinin %10'unu geçmemelidir.

3.5.5. SHELL 163 elemanı

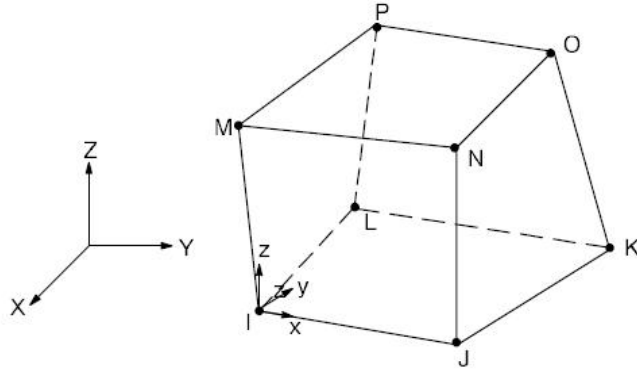
SHELL 163, eğilme (bükülme) ve membran özelliklerine sahip 4 düğümlü bir eleman olup (Şekil 3.21). Her ikisi içinde düzlemde ve normal yüklere izin verir ve düzlemde eğilme özelliğine sahiptirler. Elemanın her düğümünde 12 serbestlik derecesi vardır: düğümün x, y ve z eksenlerinde yer değiştirme, ivme, hız ve dönmelerden meydana gelmiştir (ANSYS klavuzu).



Şekil 3.21. SHELL 163 elemanın geometrisi

3.5.6. SOLID 164 elemanı

SOLID 164 katı yapıların 3D modellemesi için kullanılır. Eleman 8 düğümlüdür (Şekil 3.22). Düğümlerin serbestlik derecesi: x, y ve z yönlerinde yer değiştirme, hız ve ivmedir. Bu eleman sadece dinamik analizler için kullanılır.



Şekil 3.22. SOLID 164 elemanın geometrisi

3.5.7. Kontak tipleri

Single surface contact

Tek yüzey kontağı kurulduğunda, kendi gövdesi veya başka gövde yüzeyinde temas gerçekleşir. Tek yüzey kontağı, bir modelin bünyesinde otomatik olarak ANSYS LS-DYNA programı gerçekleştirir. Bu nedenle tek yüzey kontağında, temas veya hedef yüzeyleri için gerekli tanımlamalar yapılmalıdır. Tanımlama yapıldığında tek bir modelin bünyesinde tüm dış yüzeylerin teması sağlanır. Birçok darbe ve çarpma uygulamalarında tek yüzey kontağı tanımlanması gerekir.

Node-to-Surface contact

Düğüm-yüzey teması, bir düğüm ve hedef yüzeyle kurulan bir kontak türüdür. Bu tür kontakta iki yüzey arasında genel kontak seçeneği kullanılır. ANSYS de hedef veya kontak yüzeyini belirlerken düz veya iç bükey yüzeyi hedef, dış bükey yüzeyi temas yüzeyi olarak belirlenir v kaba meshli yüzeyi hedef, ince meshli yüzeyi temas yüzeyi olarak tanımlanır.

Surface-to-Surface contact

Yüzey- yüzey temasta, bir gövde yüzeyinin başka bir gövde yüzeyine nüfusu söz konusu olduğunda kullanılan kontak türüdür. En genel temas türüdür. Yüzey-yüzey temasında büyük temas alanları ve keyfi şekilleri olan gövdeler için kullanılır. Çalışmamız Surface-to-Surface Contact tipiyle gerçekleştirilmiştir.

3.5.8. Kontak seçenekleri

1. General (Normal) contact

Genel kontak seçeneği basit kontak temas algoritmaları kullanıyor olsa da hala geniş bir uygulama alanı için kullanılmaktadır. Genel kontak algoritmalarını kullanmanın avantajı son derece hızlı ve sağlam olmasıdır. Genel kontak seçeneğinin tek sorunu temas yüzeyini yönlendirme ile ilgilidir. Temas eden yüzey yönlendirme de, bir yüzeyin hangi tarafının katı ve hangi tarafının hava olarak tanımlayan elemanları kullanarak, ANSYS LS-DYNA otomatik olarak doğru kontak yönünü ayarlar. Genel kontak kullanırken kabuk elemanlar için yüzey yönlendirmede ayarlama yapılması gerekmektedir. Kabuk yüzeyinde herhangi başlangıç nüfuzu varsa yeniden yönelim meydana gelmektedir bu nedenle dikkat etmek gerekmektedir.

2. Automatic contact

Otomatik kontak seçeneği en sık kullanılan kontak algoritmalarına sahiptir. Otomatik ve genel kontak seçenekleri arasındaki temel fark, kabuk elemanlar için temas eden yüzeyi yönlendirme otomatik temas algoritmaları ile otomatik olarak belirlenmektedir. Otomatik temas durumunda kabuk elemanlar temasında iki taraf içinde kontrol yapılır. Bu nedenle temas arama derinliği her zaman sınırlıdır. Çalışmamızda bu kontak seçeneğini kullanarak analizler yapılmıştır.

3. Eroding contact

Elemanların temas sırasında bir veya her iki dış yüzeyini oluşturan kısımların aşınmasını sağlamaktadır. Temasa geriye kalan iç elemanları ile devam etmesine izin vermektedir. Eroding kontak katı elemanlar ile kullanılmalıdır.

4. Rigid contact

Bu kontaklar genellikle bütün cisimlerin rijit kütle dinamikleri için kullanılır. Rijit cisim temasında deforme olabilen elemanlara gerek kalmadan enerji absorpsiyonuna izin vermektedir. Deforme olabilen bir cisim için otomatik veya aşındırma seçeneklerinin tanımlanmış olması gerekmektedir.

5. Tied contact

Tied kontak seçeneğinde temas düğümleri (yüzeyleri) ile hedef yüzeylerine yapıştırma ile bağlanır. Temas ve hedef yüzeyler başlangıçta eş düzlemsel olmalıdır böylece İzoparametrik konumda hedef parça içindeki kontak düğüm (yüzey) hesaplanır. Böylece yükler veya hızların etkimesiyle, temas düğümleri (yüzeyler) hedef yüzey içersinde izoparametrik konumu korumak zorunda kalmaktadır. Tied kontak etkisinde hedef yüzeyin deforme olması durumunda ikincil düğümler deformasyonu takip etmek zorundadır. Tied kontak seçeneğinde kaba mesh yapılmış gövde hedef yüzey olarak tanımlanmalıdır. Tied kontak ta sadece serbestlik derecesi (U_x , U_y , U_z) durumunda etkilenmektedir.

6. Tiebreak contact

Tiebreak kontak, tied kontak gibi temas düğümleri (yüzey) ve hedef yüzeylerin bağlanmasının dışında, bir hasar kriterine kadar bu durum geçerlidir. Tiebreak kontak seçenekleri genellikle nokta kaynaklı veya cıvatalı bağlantıları temsil etmek için kullanılır.

7. Edge contact

Kontak kabuk yüzeyinin normal yönüne dik ortaya çıktığında tek kenar kontak seçeneği kullanılmalıdır. Bu kontak seçeneği temas veya hedef yüzey tanımları gerektirmez. Bu

kontak seçeneği genellikle yüzey normalleri çarpma yönüne dik sac metal uygulamalarında kullanılır.

8. Drawbead contact

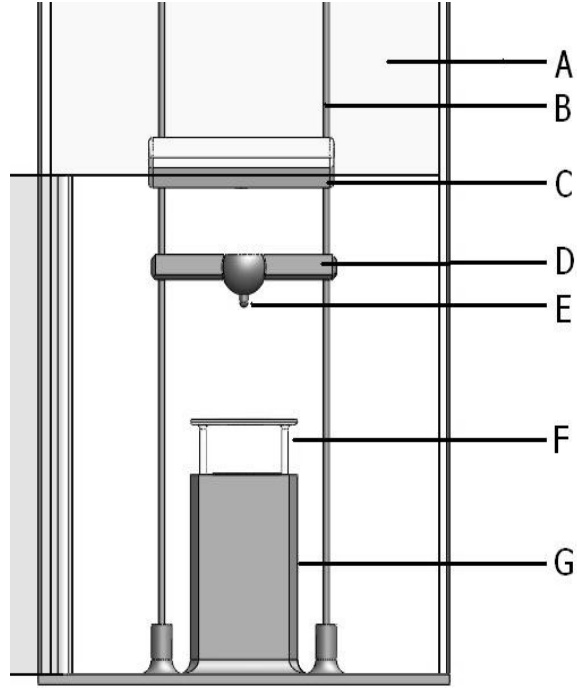
Drawbead kontak seçeneği kontrol altına alınan dikkat gerektiren metal şekillendirme işlemlerinde kullanılmaktadır. Eğilme ve sürtünme kuvvetlerinin uygulanmasına olanak verir.

9. Forming contact

Forming kontak seçenekleri esas olarak metal şekillendirme uygulamalarında kullanılmaktadır. Bu kontak türü için araç ve kalıplar genellikle hedef olarak tanımlanırken iş parçası da temas yüzeyi olarak tanımlanır. Forming kontak seçeneğinde meshleme işlemi yapılırken kalıp meshleri aynı yönlü olmalıdır. Forming kontak seçenekleri otomatik temas türlerine dayanır ve bu nedenle metal şekillendirme uygulamalarında çok sağlıklı temas sağlamaktadır.

3.6. Ağırılık düşürme test cihazı tasarımı

SolidWorks programı kullanılarak ağırılık düşürme test cihazı tasarlanmış ve ‘ Motion’ özelliği kullanılarak hareket analizi yapılmıştır (Şekil 3.23). Hareket analizi sonucunda tasarlanmış olan impektörün düşme hareketi sonucunda yer değiştirme-zaman, hız-zaman, potansiyel enerji-zaman ve kinetik enerji-zaman grafikleri elde edilmiştir. Hareket analizinde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri Çizelge 3.1-3.2-3.3’te yer almaktadır.

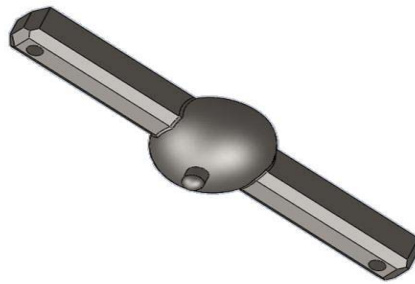


A:Cam Panel, B: Sütun direk, C:Mıknatıs Tutucu, D:Ağırlık, E:impektör Ucu, F: Numune Tutucu, G:Test Tablası

Şekil 3.23. SolidWorks'te modellenmiş ağırlık düşürme test düzeneği

3.6.1. Hareket analizi

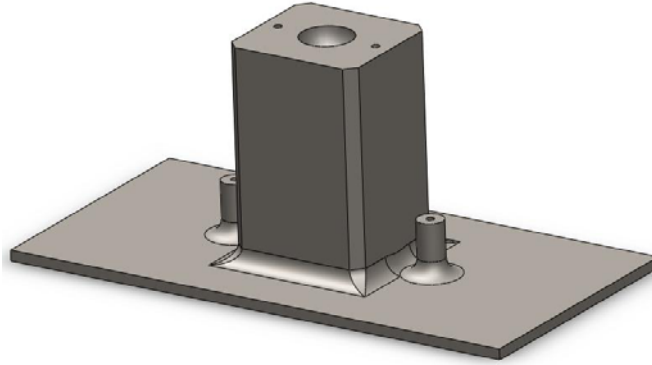
SolidWorks programının 'Motion' özelliği kullanılarak hareket analizi yapılmıştır. Analizde kullanılan malzeme özellikleri ve hareket temas özellikleri aşağıdaki tablolarda yer almaktadır.



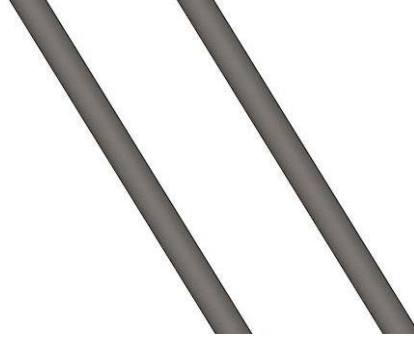
Şekil 3.24. SolidWorks' te modellenmiş impektör (vurucu)

Çizelge 3.1. İmpektörün (vurucu) mekanik özellikleri

Özellikler	AISI 1015 Çelik
Elastisite Modülü (GPa)	205
Poisson Oranı	0.29
Kayma Modülü (GPa)	80
Kütle Yoğunluğu (kg/m^3)	7870
Kopma Mukavemeti (Mpa)	385
Akma Mukavemeti (MPa)	325

**Şekil 3.25.** SolidWorks'te modellenmiş test tablası**Çizelge 3.2.** Tablanın mekanik özellikleri

Özellikler	AISI Tip A2 Takım Çeliği
Elastisite Modülü (GPa)	203
Poisson Oranı	0.285
Yırtılma Modülü (MPa)	78
Kütle Yoğunluğu (kg/m^3)	7860



Şekil 3.26. SolidWorks' te modellenmiş sütun direkler

Çizelge 3.3. Sütun direklerin mekanik özellikleri

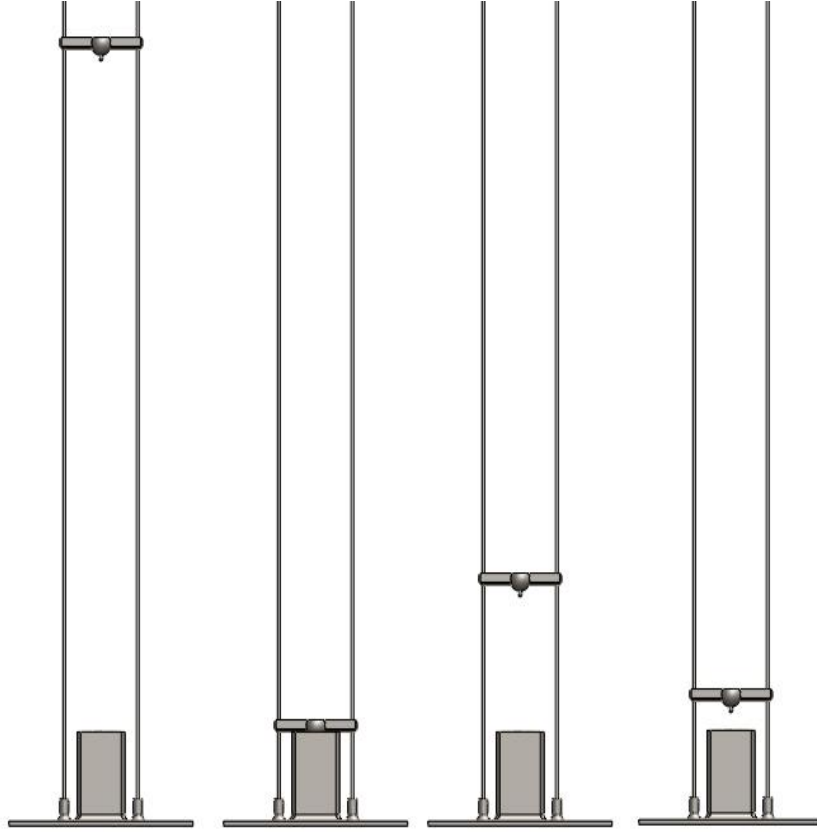
Özellikler	AISI 1010 Çelik
Elastisite Modülü (GPa)	200
Poisson Oranı	0.29
Yırtılma Modülü (GPa)	80
Kütle Yoğunluğu (kg/m ³)	7870
Gerilme Mukavemeti (MPa)	325
Akma Mukavemeti (MPa)	180

Çizelge 3.4. Hareket analizinde katı gövdelerin temas özellikleri

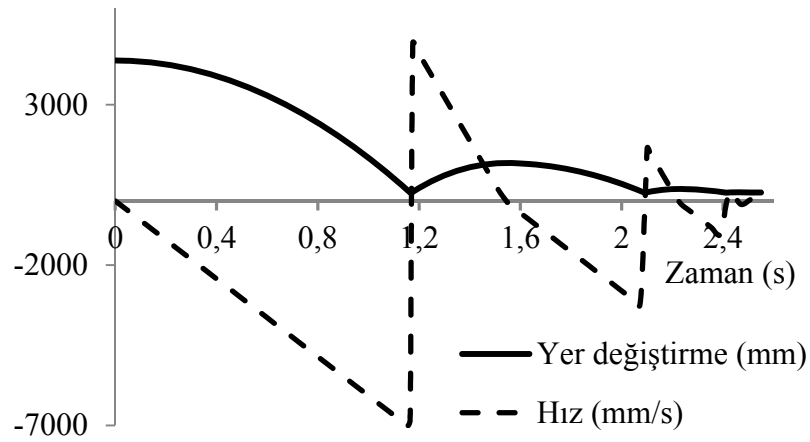
Dinamik sürtünme hızı (mm/s)	10.16
Dinamik sürtünme katsayısı	0.2
Statik sürtünme hızı (mm/s)	0.1
Statik sürtünme katsayısı	0.33

Hareket analizinde tanımlanmış yer çekiminin etkisiyle 4.379 m'den serbest düşme neticesinde elde edilen yer değiştirme/hız-zaman ve potansiyel/kinetik enerji-zaman

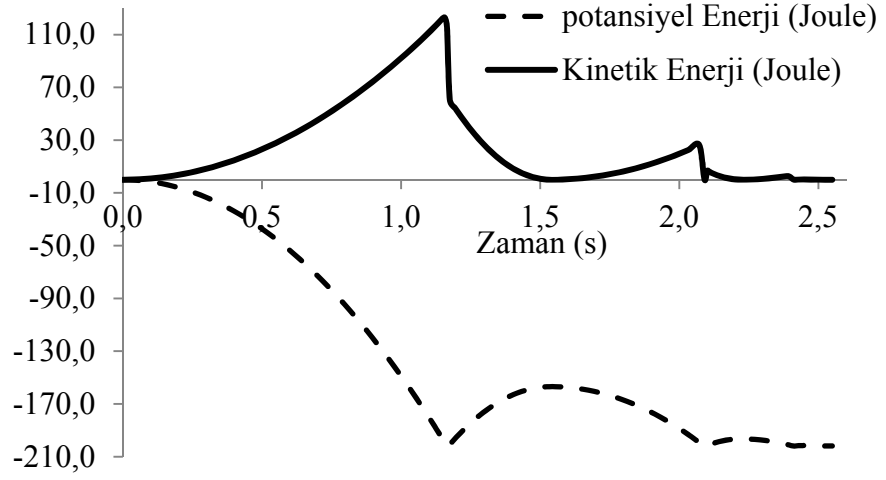
grafikleri aşağıda verilmiştir. Hareket analizinde 1.16 saniyede çarpmanın gerçekleştiği görülmekte ve akabinde geri sekme meydana gelmektedir (Şekil 3.27).



Şekil 3.27. Hareket analizinin gerçekleşmesi ve geri sekmenin meydana gelmesi



Şekil 3.28. Hareket analizi sonucunda yer değiştirme/hız- zaman grafiği



Şekil 3.29. Hareket analizinde Potansiyel Enerji/Kinetik Enerji-zaman grafiği

Hareket analizinin 1.16. saniyesinde impektörün sahip olduğu hız 7.016 m/s 'dir (Şekil3.28-a). Hareket analizinde çarpma durumuna kadar geçen sürede kinetik enerji 123 J 'dür. Vurucunun sahip olduğu potansiyel enerji ise 202.1 J 'dür. Hareket analizinde tanımlanmış olan dinamik ve statik sürtünme değerleri Tablo 3.4'de yer almıştır. Enerji değişimlerinde ortaya çıkan fark sürtünmeye harcanmıştır. Hareket analizi sonucunda elde edilen sonuçlar Şekil 3.28-a-b'de verilmiştir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. Problemin tanımı

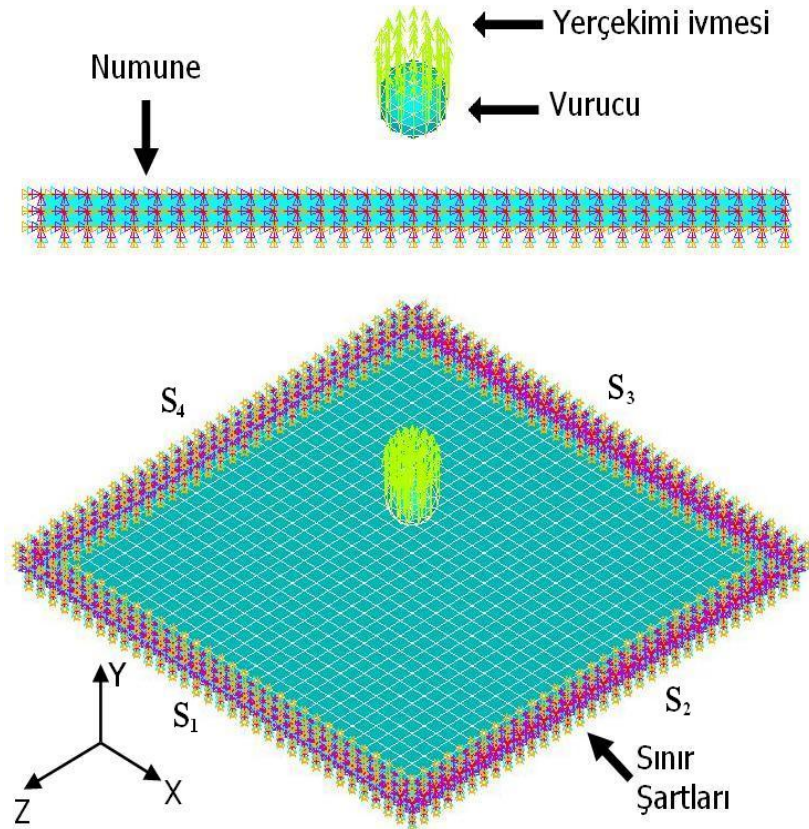
Bu çalışmada, ANSYS LS-DYNA yazılımı kullanılarak düşük hızlı darbe yükü altında, rijitlik (E_1/E_2) oranı, takviye açısı, tabaka sayısı, plak kalınlığı ve plak geometrisi gibi faktörlerin kompozit plağın darbe davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada çeşitli geometri ve hıza sahip vurucuların tabakalı kompozit plak üzerindeki etkisi dikkate alınmıştır. Ayrıca kompozit malzemenin maruz kaldığı şartlarda nikel alaşımı, 1018 çeliği, titanyum alaşımı gibi izotropik malzemelerin de darbe davranışları araştırılmıştır. Çalışma sonucunda, belirtilen faktörlerin darbe davranışı üzerindeki etkileri, zamana bağlı olarak kuvvet, enerji, VonMises, yer değiştirme ve hourglass enerji grafikleri ile gösterilmiştir.

ANSYS LS-DYNA yazılımının kullanımı: Yapılan çalışmada SEM modellemelerinde, tabakalı kompozit malzemeler için SHELL 163 ve vurucu için ise SOLID 164 elemanı kullanılmıştır. Kompozit malzemenin ve vurucunun modellemesi yapıldıktan sonra bileşenlerin kontak işlemi için surface to surface–Automatic (ASTS) parametreleri belirlenmiştir. Numunelerin sınır şartları, dörtkenarı ankastre olarak seçilmiştir; yer değiştirmeler (UX, UY, UZ), dönmeler (ROTX, ROTY, ROTZ), ivmeler (AX, AY, AZ) ve hızlar (VX, VY, VZ) sıfır olarak alınmıştır. Vurucunun kinematikini belirlemek için hız ve yer çekimi uygulanmıştır. Çıkış parametreleri kullanılarak darbe analizi olarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.1.). Çözüm adımları aşağıda verilmektedir.

ANSYS® Ls-dyna yazılımında işlem adımları:

- Analiz tipinin tanımlanması
- ✓ Preferences'ın ayarlanması
- Eleman tipi ve malzeme özelliklerinin belirlenmesi
- ✓ Eleman tipi seçimi
- ✓ Malzeme mekanik özelliklerinin girilmesi

- SEM modelinin (Mesh generation) elde edilmesi
- ✓ Hacim ve alanların oluşturulması
- ✓ Bileşenlerin tanımlanması
- ✓ Kontak tanımlaması
- Yükleme ve sınır şartlarının belirlenmesi
- ✓ Sınır şartlarının uygulanması
- ✓ Hızın uygulanması
- ✓ İvmenin uygulanması
- Sonuçlar
- ✓ Çıktı kontrollerinin yapılması
- ✓ Çözüm



Şekil 4.1. Numune ve vurucunun SEM modelleri

4.2. Çalışma sonuçlarının teyit edilmesi

Çalışma sonuçlarını teyit amacıyla, Chandekar ve arkadaşlarının yaptığı çalışmanın sonuçları dikkate alınmıştır. Chandekar *et al.* (2010) çalışmalarında düşük hızlı darbe yüklemesi altındaki E-camı/epoksi kompozit malzemenin darbe davranışını LS-DYNA yazılımını kullanarak ve ayrıca deneysel olarak incelemişlerdir. Bu çalışmada H-VARTM-c metodu ile sepet örgü şeklinde üretilen tabakalı kompozit plakları, 3 boyutlu katı elemanlar ile modellemişlerdir. Kompozit malzemenin mekanik özellikleri klasik mikromekanik teorisi ile hesaplanmış ve ileri kompozit hasar modeli kullanılarak artan darbe enerjisinin, hasar oluşumuna neden olduğunu gözlenmiştir. Araştırma sonucunda nümerik ve deneysel sonuçların uyumlu olduğu belirtilmiştir. Yük taşıma kapasitesi ve absorbe edilen enerji miktarının belirlendiği çalışmada, vurucu kütlesi 5.45 kg ve çapı 12.7 mm'dir. Vurucunun mekanik özellikleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Vurucunun mekanik özellikleri (Chandekar *et al.* 2010)

Vurucunun Özellikleri	Değer
Yoğunluk (kg/m^3)	7860
Elastisite modülü (GPa)	200
Poisson oranı	0.3

Kullandıkları $[0^0-90^0]_{10}$ çapraz takviyeli tabakalı kompozitin mekanik özellikleri Çizelge 4.2 ve 4.3'de verilmiştir. Numuneler 127×127 mm ebatlarındadır.

Çizelge 4.2. Bileşenlerin mekanik özellikleri (Chandekar *et al.* 2010)

Özellik	Değer
Elyaf hacim oranı V_f	0.50
Matrisin elastisite modülü E_m (GPa)	3.45
Matrisin kayma modülü G_m (GPa)	1.31
Elyafın elastisite modülü E_f (GPa)	73.09
Elyafın kayma modülü G_f (GPa)	30.13

Çizelge 4.3. Kompozit malzemenin mekanik özellikleri (Chandekar *et al.* 2010)

Mekanik özellikler	Değer
Elastisite modülü (E_1) (GPa)	38.30
Elastisite modülü (E_2) (GPa)	10.56
Elastisite modülü (E_3) (GPa)	10.56
Kayma modülü (G_{12}) (GPa)	3.96
Kayma modülü (G_{23}) (GPa)	2.45
Kayma modülü (G_{13}) (GPa)	3.96
Poisson oranı (ν_{12}) (GPa)	0.0787
Poisson oranı (ν_{13}) (GPa)	0.0787
Poisson oranı (ν_{23}) (GPa)	0.4206
Yoğunluk (ρ) (kg/m^3)	11.74
1-2 düzlemindeki kayma mukavemeti (S) (MPa)	88.9
1 yönündeki çekme mukavemet değeri (X_t) (MPa)	1080
2 yönündeki çekme mukavemet değeri (Y_t) (MPa)	39.3
2 yönündeki bası mukavemet değeri (Y_c) (MPa)	128

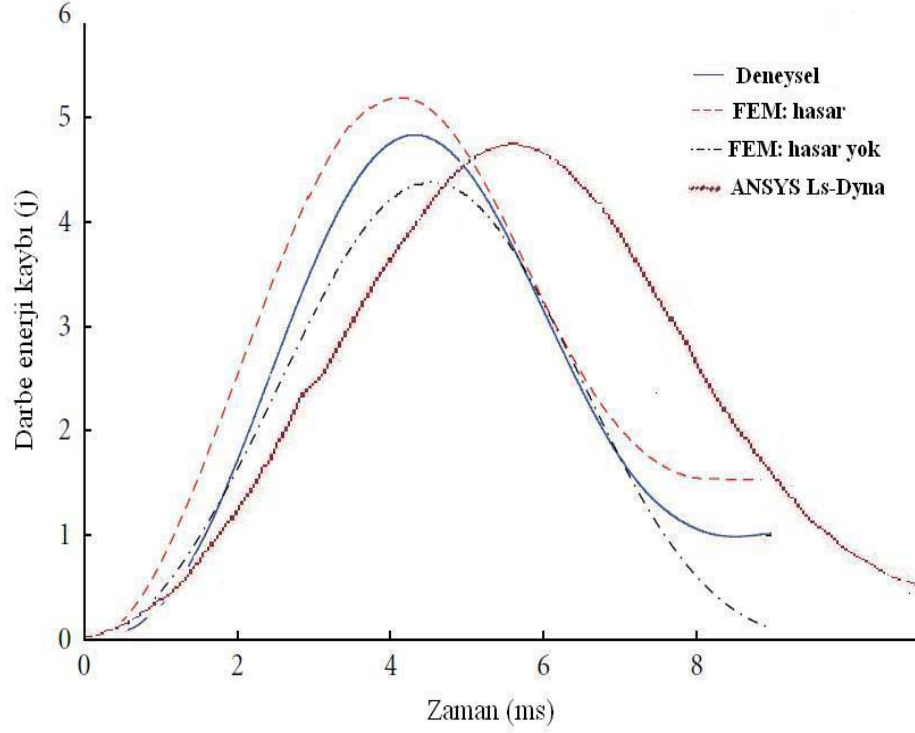
Deneysel çalışmalarını 6 farklı darbe seviyesinde yapmışlardır. Elde ettikleri 1. darbe seviyesindeki sonuçlar Çizelge 4.4’de verilmiştir.

Çizelge 4.4. 1.Darbe seviyesindeki deney sonuçları (Chandekar *et al.* 2010)

No	Düşme Yüksekliği (m)	Tabaka Kalınlığı (mm)	Maksimum darbe yükü (N)	Max. Yükün düşme süresi (ms)	Darbe Hızı (m/s)	Darbe enerjisi (J)	Darbe süresi (ms)
1	0.10	5.11	2770.88	3.64	1.30	0.72	7.77
2	0.10	5.31	2865.31	3.65	1.36	1.19	7.79
3	0.10	4.90	3069.12	3.47	1.38	0.93	7.79

Not: Vurucunun kontak zamanı Milisaniye (ms)’dir (1 saniye= 1000 ms).

1. darbe seviyesinde yapılan bu çalışmaya paralel olarak yapılan çalışmada, elde edilen sonuçlar tutarlılık göstermiştir (Şekil 4.2).



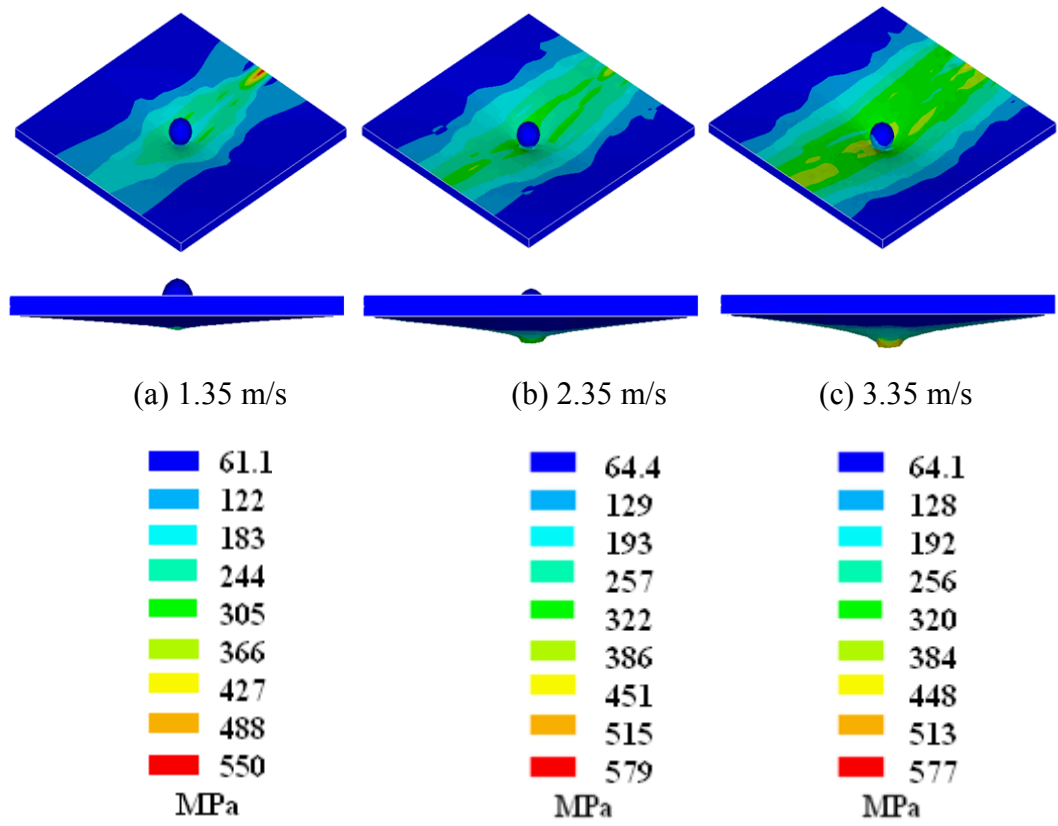
Şekil 4.2. Sonuçların literatürle karşılaştırılması (Chandekar *et al.* 2010)

Tabakalı kompozit malzemelerde, takviye açısının notasyonu değişik şekillerde olmaktadır. Örnek olarak takviye açısı $[X^0/Y^0]_T$ şeklinde olan gösterimde, X ve Y, takviye açılarını, T ise toplam tabaka sayısını göstermektedir.

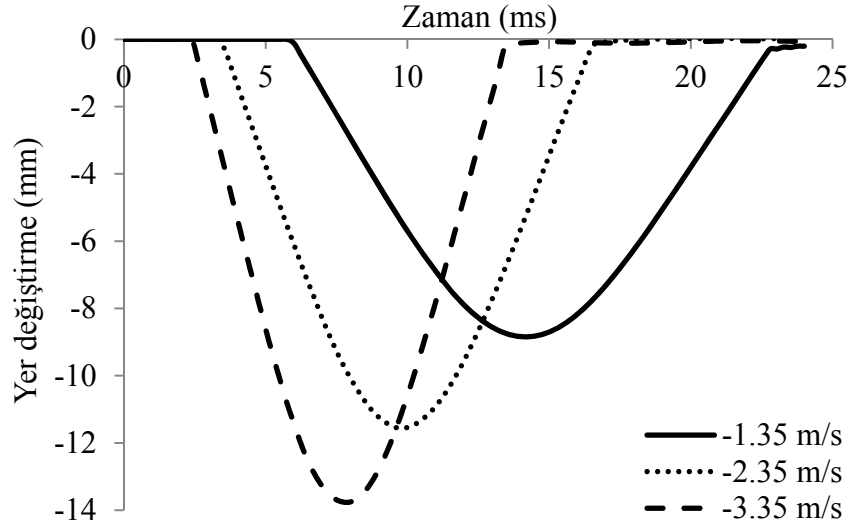
4.2.1. Vurucu hızının darbe davranışına etkisi

Vurucu hızının değişiminin darbe davranışına etkisini incelemek amacıyla, 12.7 mm çaplı ve 5.45 kg kütleli küresel vurucu kullanılarak, $[0^0-90^0]_{10}$ çapraz takviyeli, 5.11 mm kalınlıklı 127×127 mm boyutlarında 10 tabakalı kompozit plaklara 1.35, 2.35 ve 3.35 m/s hızlarında darbe yükleri uygulanmıştır. Kompozit malzeme ve vurucunun mekanik özellikleri Çizelge 4.1 ve 4.3'de gösterilmiştir. Bu veriler neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

Şekil 4.3’de hızın artışına bağlı olarak gerilme değerlerinin de arttığı görülmektedir. Bu durum, hem plak merkezinde meydana gelen gerilmelerin büyüklüklerini artırırken, aynı zamanda gerilmelerin plak düzlemi boyunca dağılımını da artırmaktadır. Ayrıca hız artışıyla birlikte, darbe nüfuziyetinin arttığı görülmekte ve hızın 3.35 m/s olduğu durumda hasar oluşumu nedeniyle gerilmelerde bir miktar azalma meydana gelmektedir (Şekil 4.3).

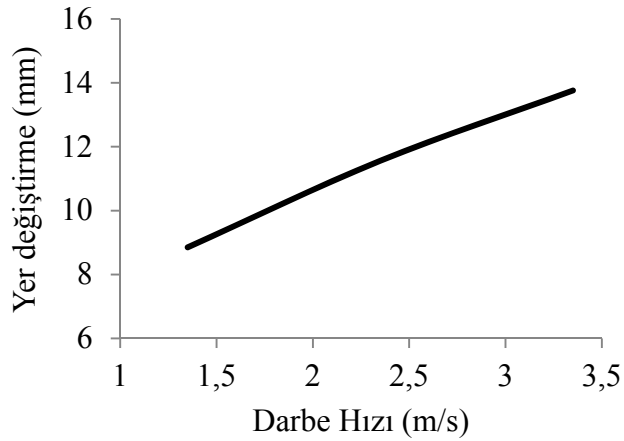


Şekil 4.3. Darbe hızının değişimine bağlı olarak gerilme dağılımı



Şekil 4.4. Darbe hızının değişimine bağlı olarak yer değiştirme-zaman grafiği

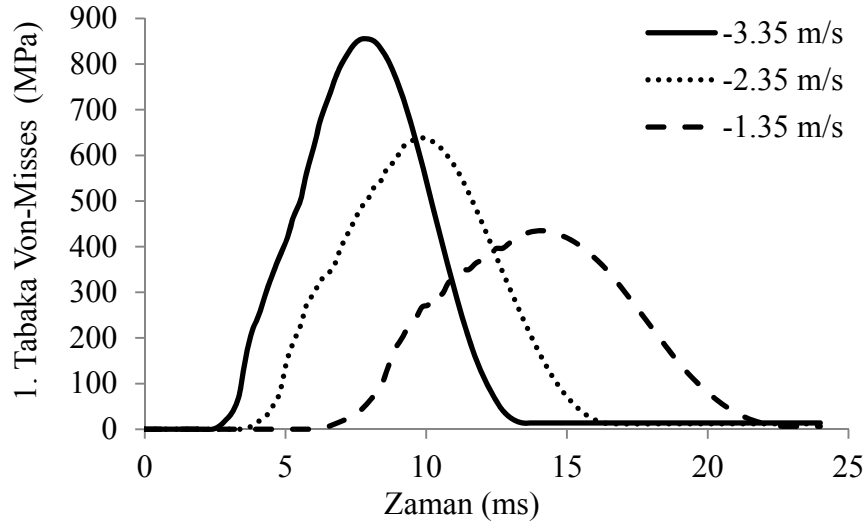
Şekil 4.4'de, hız değişimine bağlı olarak kompozit plakada meydana gelen yer değiştirmeler, darbe hızının artışıyla birlikte, artmıştır. Hızın atışına bağlı olarak plakanın darbeye direnci azalmakta buna bağlı olarak yer değiştirme miktarı artmaktadır.



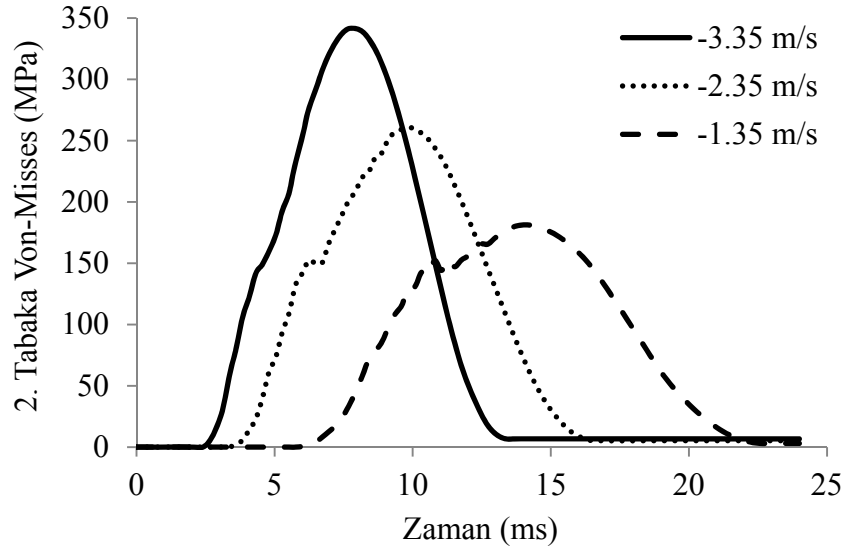
Şekil 4.5. Darbe hızına göre maksimum yer değiştirme

Hızın 1.35 m/sn ve kontak zamanının 14.16 ms olduğu anda, plakta oluşan maksimum yer değiştirme değeri 8.85 mm olmaktadır. Hızın sırasıyla 2.35 ve 3.35 m/sn olduğu ve

kontakın ise sırasıyla 9.84 ve 7.92 ms olduğu anlarda maksimum yer değiştirme miktarları sırasıyla 11.56 ve 13.76 mm değerlerinde olmaktadır (Şekil 4.5). Bu değerler plak yüzeyindeki, merkez düğümün yer değiştirme miktarıdır.



(a)

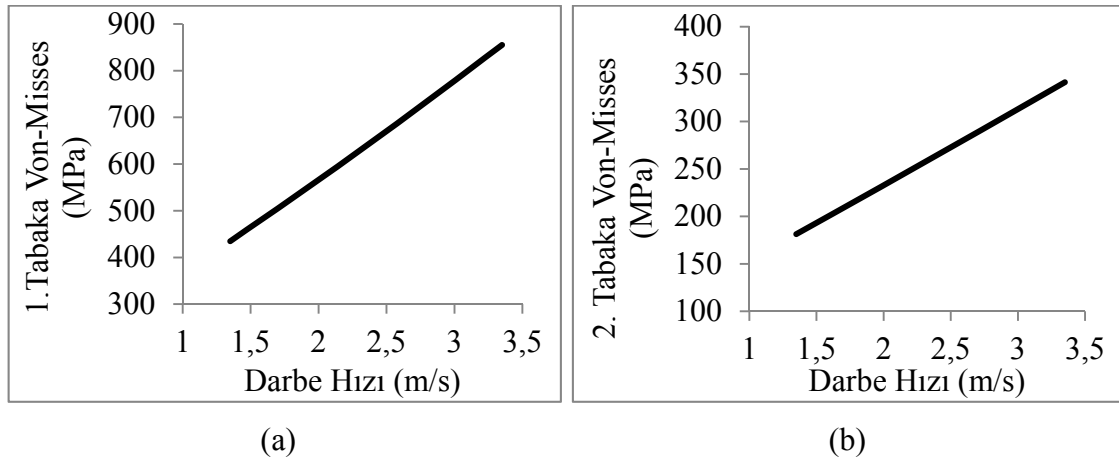


(b)

Şekil 4.6. Darbe hızının değişimine göre VonMisses-zaman grafiği (a) 1. (b) 2.tabaka

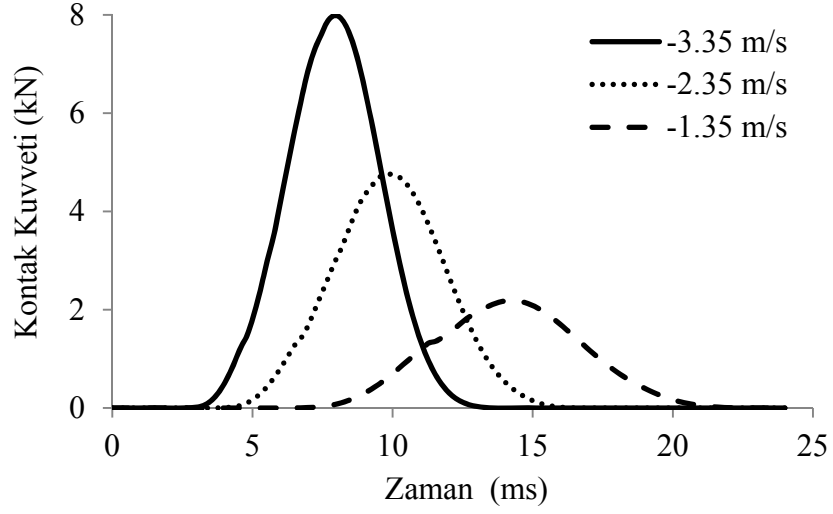
Plâğin merkez düğümünün 1. tabakasında meydana gelen Von-Misses gerilmeleri hızın artışına bağlı olarak Şekil 4.6-a'da gösterilmektedir. Oluşan gerilmeler, elyaf

doğrultusunda ve şerit şeklinde dağılım göstermektedir. Hızın 1.35 m/sn ve kontak zamanının 14.16 ms olduğu anda maksimum Von-Misses gerilmesi 434.8 MPa değerinde olmaktadır. Hızın sırasıyla 2.35-3.35 m/sn ve kontak zamanlarının sırasıyla 9.84-7.92 ms olduğu anlarda 1.tabaka Von-Misses gerilmelerinin maksimum değerleri sırasıyla 638.3 ve 855 MPa değerlerinde olmaktadır (Şekil 4.7-a).



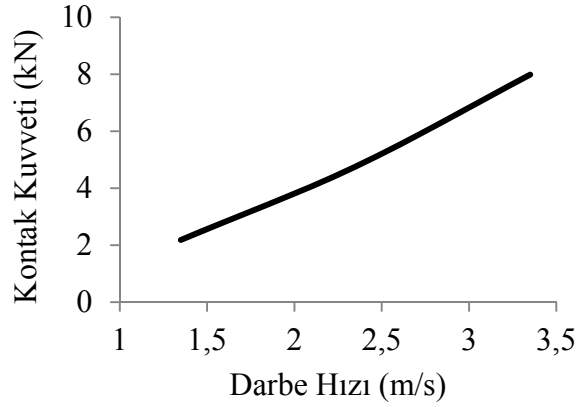
Şekil 4.7. Darbe hızına göre maksimum Von-Misses gerilme grafiği

Plağın merkez düğümünün 2. tabakasında meydana gelen Von-Misses gerilmeleri hızın artışına bağlı olarak Şekil 4.6-b'de gösterilmektedir. En üst tabakadan alt tabakalara doğru darbe yükü aktarılırken, darbe yükünün değerinde azalma meydana geldiği için alt tabakalarda meydana gelen Von-Misses gerilmeleri de azalmaktadır. Hızın 1.35 m/sn ve kontak zamanının 14.16 ms olduğu anda maksimum Von-Misses gerilmesi 181.3 MPa değerinde olmaktadır. Hızın 2.35-3.35 m/sn ve kontak sürelerinin sırasıyla 9.84-7.92 ms olduğu anlarda 2.tabaka Von-Misses gerilmelerinin maksimum değerleri sırasıyla 260.7 ve 341.4 MPa olmaktadır (Şekil 4.7-b). 2. tabakada meydana gelen gerilme değerleri, 1. tabakadaki gerilme değerlerine göre yaklaşık olarak % 59 oranında azalmaktadır.



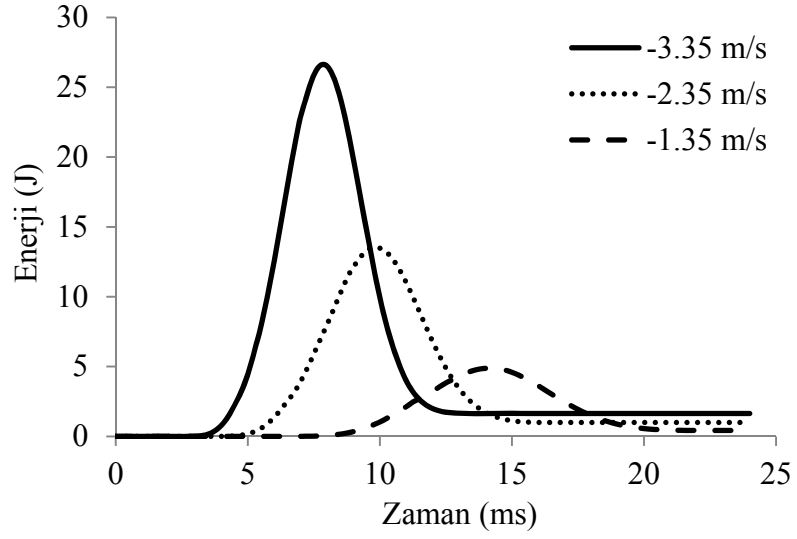
Şekil 4.8. Darbe hızı değişiminde kontak kuvveti-zaman grafiği

Darbe hızlarının artışına bağlı olarak plakta meydana gelen kontak kuvveti (reaksiyon kuvveti) Şekil 4.8'de verilmiştir. Burada darbe hızının artışına bağlı olarak kontak kuvvetlerinin arttığı belirlenmiştir.



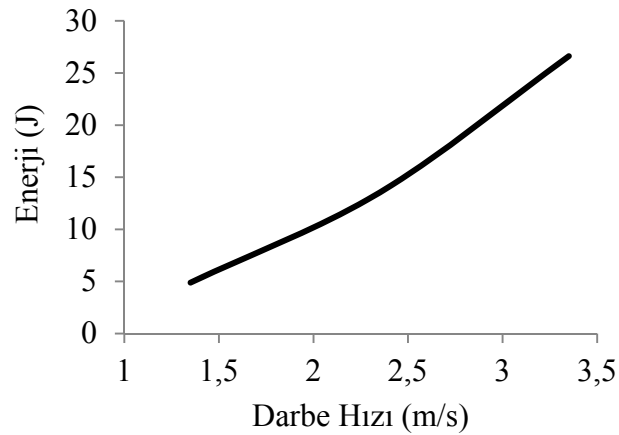
Şekil 4.9. Darbe hızına göre maksimum kontak kuvveti

Hızın 1.35 m/sn ve kontak zamanının 14.16 ms olduğu anda maksimum kontak kuvvetinin 2.185 kN değerinde olduğu görülmüştür. Hızın 2.35 ve 3.35 m/sn ve kontak zamanlarının sırasıyla 9.84 ve 7.92 ms olduğu anlarda kontak kuvvetlerinin maksimum değerleri sırasıyla 4.758 kN ve 7.985 kN olmaktadır (Şekil 4.9).



Şekil 4.10. Darbe hızının değişimine bağlı olarak enerji-zaman grafiği

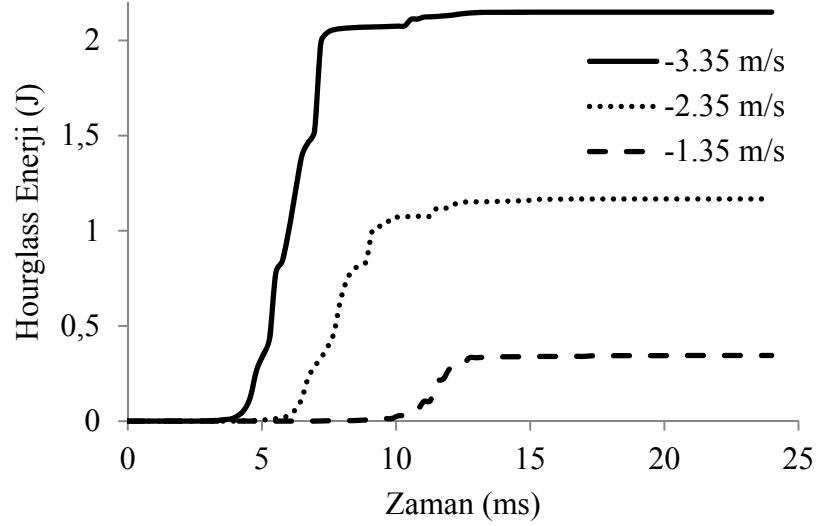
Darbe enerjisinin zamana bağlı olarak değişimi ile kontak kuvvetinin zaman bağlı değişimi paralellik göstermektedir. Darbe hızlarının artışıyla birlikte plakta absorblanan enerji, Şekil 4.10'de görüldüğü gibi artmakta ve bu durum plağın enerji absorblama yeteneğini koymaktadır.



Şekil 4.11. Darbe hızına göre maksimum enerji grafiği

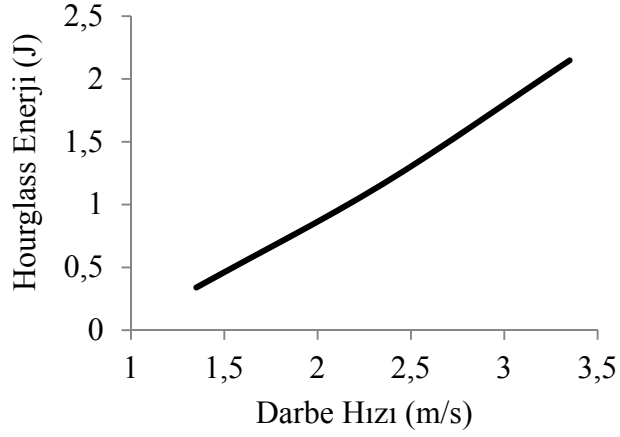
Hızın 1.35 m/sn ve kontak zamanının 14.16 ms olduğu anda maksimum absorbe edilen enerji miktarı 4.891 J değerindedir. Hızın sırasıyla 2.35-3.35 m/sn ve kontak

zamanlarının sırasıyla 9.84 - 7.92 ms olduğu anlarda absorbe edilen maksimum enerji miktarları ise sırasıyla 13.53 ve 26.61 J değerindedir (Şekil 4.11).



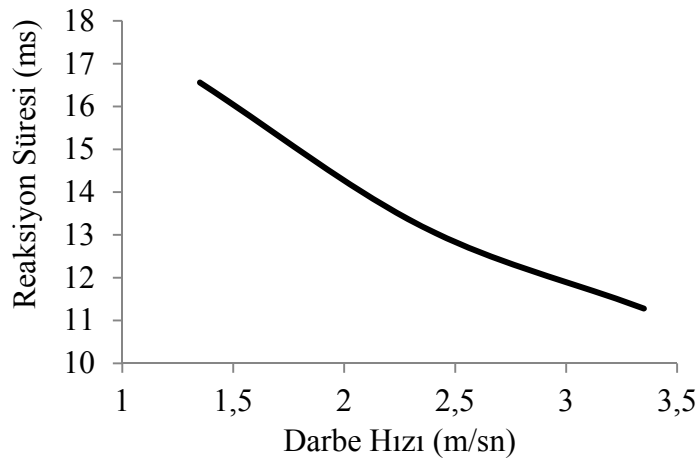
Şekil 4.12. Darbe hızının değişiminde Hourglass enerji-zaman grafiği

Hourglass şekil değiştirme enerjisi, oluşturulmuş SEM modelinin (mesh generation) zigzag şekline dönüşmesi için gerekli enerji miktarıdır. Burada hız artışıyla birlikte SEM modelinin çarpılması için aktarılan deformasyon enerjisi de artmaktadır (Şekil 4.12). Bundan dolayı, plağa uygulanan darbe hızlarının artış göstermesi SEM modelini daha çok deforme etmektedir. Bu durumda Şekil 4.8’de görüldüğü gibi oluşan Hourglass enerji değerleri, plakta absorbe edilen enerji miktarının %10’nunu geçmemesinden dolayı sonuçların turtalılık sağladığı söylenebilir (ANSYS yardım dokümanları).



Şekil 4.13. Darbe hızına göre maksimum Hourglass enerji grafiği

Darbe hızının 1.35, 2.35 ve 3.35 m/sn, kontak zamanının ise 15.36 ms olduğu anda meydana gelen maksimum Hourglass deformasyon enerjisi, sırasıyla 0.34, 1.165 ve 2.148 J değerinde olmaktadır (Şekil 4.13). Diğer parametrelerin (yer değiştirme-Von-Misses-kontak kuvveti-enerji) maksimum değerleri aldığı temas sürelerinde, Hourglass deformasyon enerjisi maksimum değer almamaktadır. Bunun nedeni, darbe yükleme ve boşaltma durumunun SEM modelinin deformasyonuna neden olmasından kaynaklandığı tahmin edilmektedir.



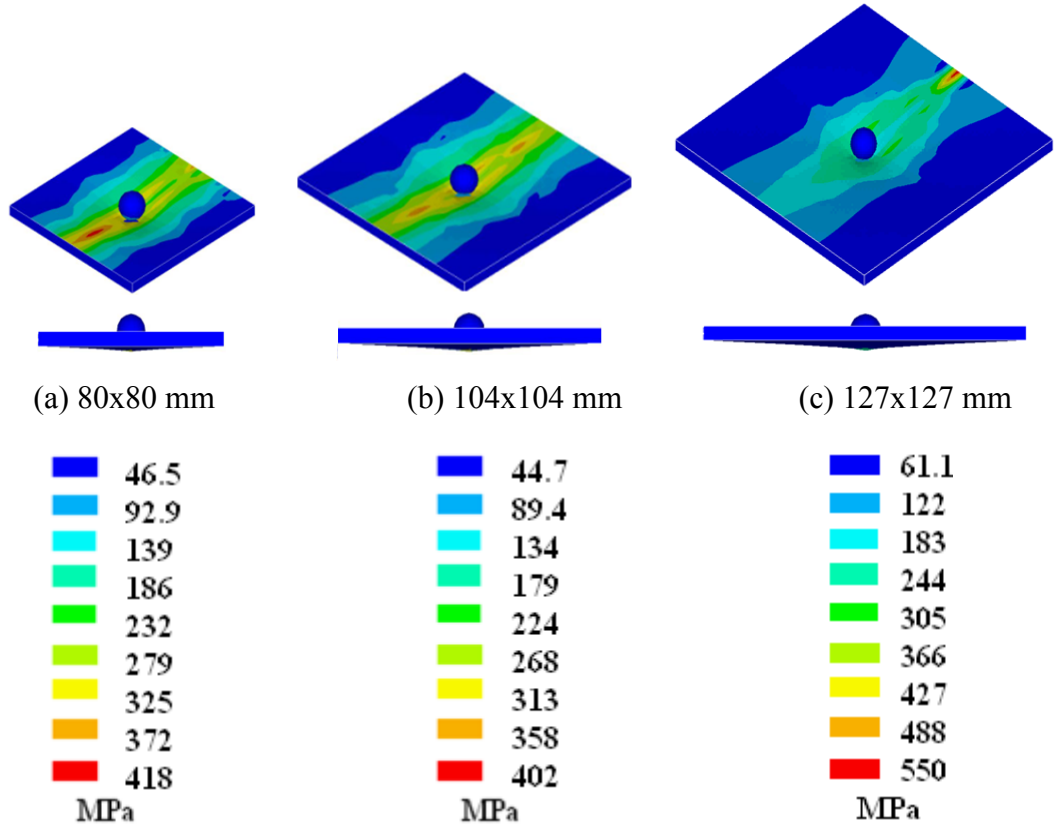
Şekil 4.14. Darbe hızının değişimine göre reaksiyon süresi

Darbe hızının 1.35 m/sn, 2.35 m/sn ve 3.35 m/sn olduğu anda temas başlama zamanları sırasıyla 5.76 ms, 3.36 ms ve 2.4 ms olmaktadır. Darbe hızının artışıyla birlikte vurucunun plağa temas etmesi için geçen sürede azalma meydana gelmektedir. Kontak reaksiyonu ise sırasıyla 16.56 ms, 13.2 ms ve 11.28 ms'lik sürelerde tamamlanmaktadır. Darbe hızının artışına bağlı olarak reaksiyon süresinin azalması, vurucunun plakaya nüfuz etme süresinin farklı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir (Şekil 4.14).

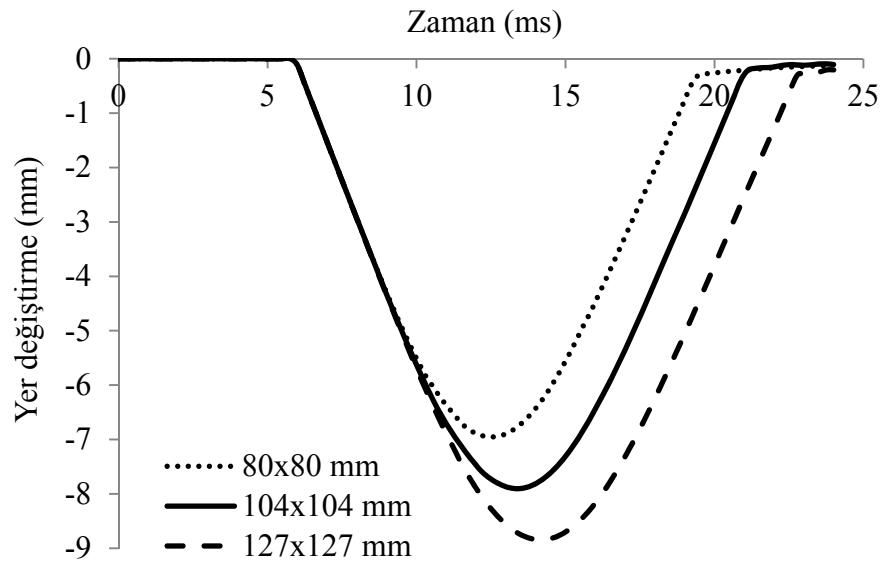
4.2.2. Plak alanının darbe davranışına etkisi

Plak alanının darbe davranışına etkisini incelemek amacıyla 12.7 mm çaplı, 5.45 kg kütleli küresel vurucu kullanılarak, $[0^0/90^0]_{10}$ çapraz takviyeli, 5.11 mm kalınlıklı, 80×80 mm, 104×104 mm ve 127×127 mm boyutlarındaki plakalara, 1.35 m/s hızında darbe yükü uygulanmıştır. Plakanın ve vurucunun mekanik özellikleri Çizelge 4.1 ve 4.3'de gösterilmiştir. Bu veriler neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

Şekil 4.15'de, aynı darbe yüklerine maruz, farklı alanlara sahip plakalarda meydana gelen gerilme dağılımları verilmiştir. Plaka alanının artışıyla birlikte, birim alana düşen darbe yükü değeri ve dolayısıyla plakalarda meydana gelen gerilme dağılımlarının azaldığı görülmektedir. Eşdeğer darbe yüküne maruz küçük alanlı plakada daha yüksek gerilmeler meydana gelirken, plaka alanı arttıkça, plağın enerji absorblama kabiliyeti arttığından plak boyunca gerilme dağılımı şekilde görülmektedir.

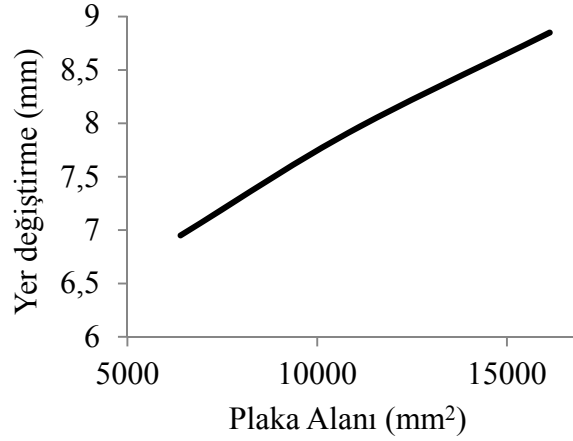


Şekil 4.15. Plak alanının değişimine bağlı olarak gerilme dağılımları



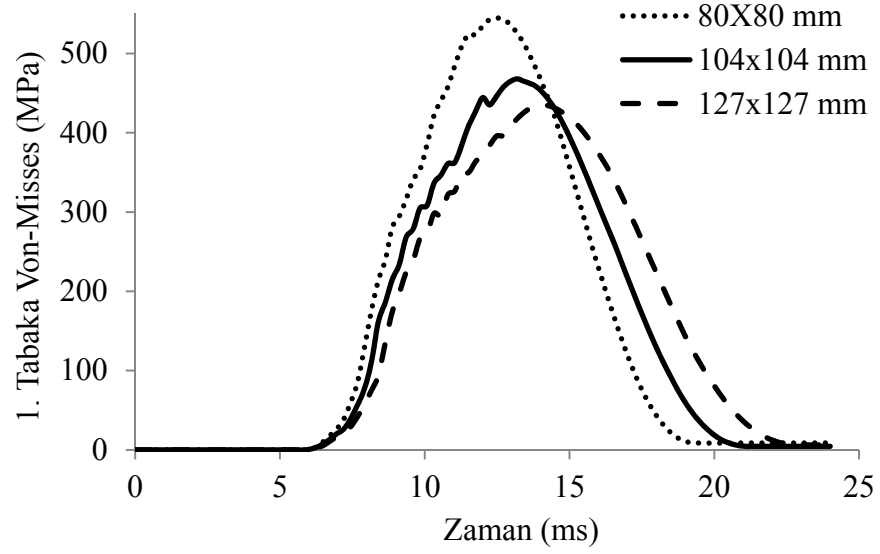
Şekil 4.16. Plak alanının değişimine göre yer değiştirme-zaman grafiği

Plaka alanı değişimine bağlı olarak meydana gelen yer değiştirmeler Şekil 4.16'da gösterilmektedir. Plak st yüzeyinin merkez düğümünde meydana gelen yer değiştirme miktarları plak alanının artışıyla birlikte artış göstermektedir.

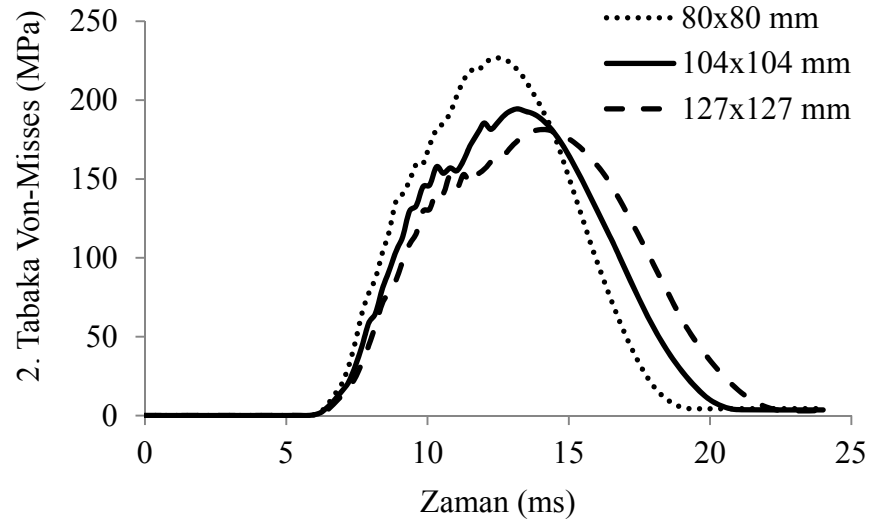


Şekil 4.17. Plak alanının değişimine göre maksimum yer değiştirme grafiği

Alanının 80x80 mm ve kontak zamanının 12.48 ms olduğu anda plak merkezinde meydana gelen maksimum yer değiştirme miktarı 6.95 mm olmaktadır. Alanın 104x104 ve 127x127 mm ve kontak zamanının sırasıyla 13.44 ve 14.16 ms olduğu anlarda maksimum yer değiştirme miktarları ise 7.91 ve 8.85 mm olmaktadır (Şekil 4.17). Burada bahsedilen yer değiştirme değerleri, plakanın merkez düğümünün yer değiştirme değerleridir.



(a)

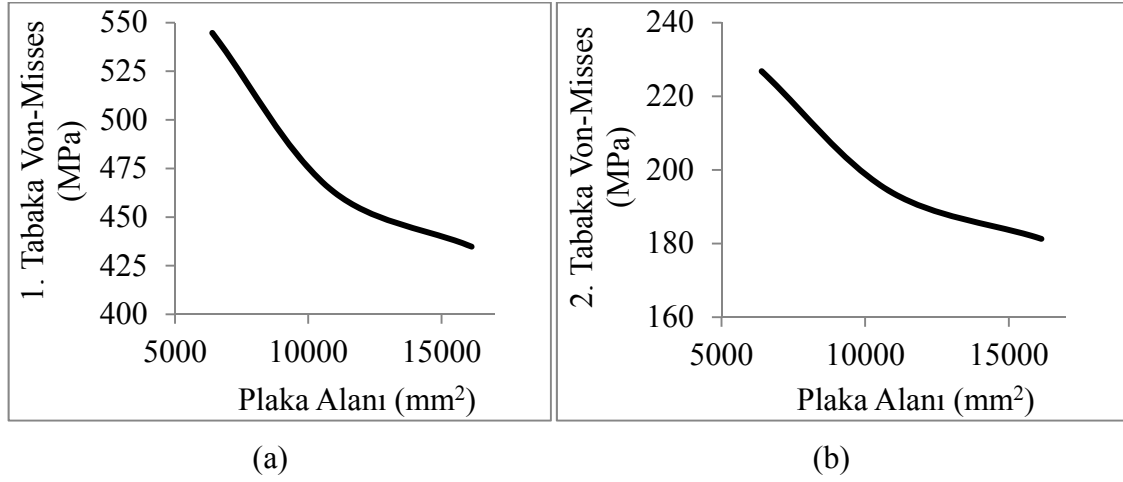


(b)

Şekil 4.18. Plak alanının değişimine göre Von-Misses–zaman grafiği (a)1. (b) 2. tabaka

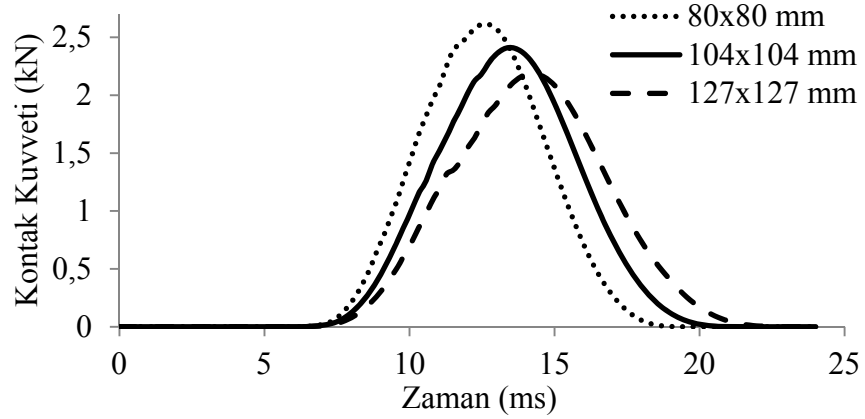
1. Tabakada meydana gelen Von-Misses gerilmeleri plakanın yüzey alanının artışına bağlı olarak azalma göstermiştir (Şekil 4.18-a). Çünkü vurucunun sabit enerjisi plaka alanında etkili olmakta ve birim alanda darbe yükünün meydana getirdiği gerilme miktarı, alanın azalmasıyla artış göstermektedir. Bu sebeple sabit darbe enerjisi, büyük alanlarda daha az gerilme meydana getirirken, küçük alanlarda daha büyük gerilmeler oluşturmaktadır. Plak alanının 80x80 mm ve kontak zamanının 12.48 ms olduğu anda plakada meydana gelen maksimum Von-Misses gerilme değeri 544.7 MPa olmaktadır.

Alanın 104x104 ve 127x127 mm ve kontak zamanının sırasıyla 13.44 ve 14.16 ms olduğu anlarda maksimum Von-Misses gerilmeleri sırasıyla ise 464.5 ve 434.8 MPa değerlerinde olmaktadır. Burada ifade edilen değerler, 1. tabakanın merkez düğümünün Von-Misses gerilme değerleridir (Şekil 4.19-a).



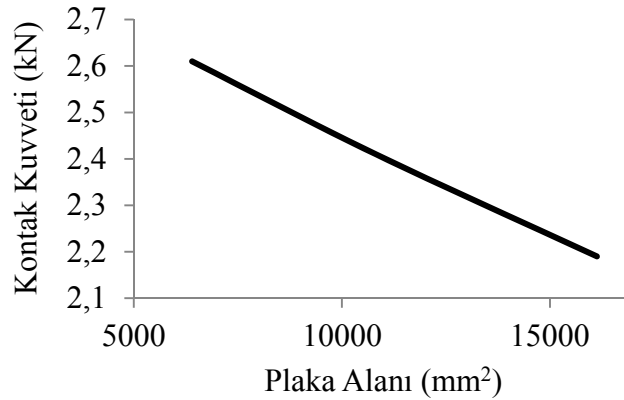
Şekil 4.19. Plak alanının değişiminde maksimum Von-Misses gerilme grafiği

Plak alanının artışına bağlı olarak, 2. tabakanın merkez düğümünde meydana gelen Von-Misses gerilmeleri, 1. tabakadaki değişime benzer bir şekilde azalma göstermektedir (Şekil 4.18-b). En üst tabakadan alt tabakalara doğru darbe yükü aktarılırken, darbe yükünün değerinde azalma meydana geldiği için alt tabakalarda meydana gelen Von-Misses gerilmeleri de azalmaktadır. Plak alanının 80x80 mm ve kontak zamanının 12.48 ms'de plakada meydana gelen maksimum Von-Misses gerilmesi 226.8 MPa değerini almaktadır. Alanın 104x104-127x127 mm ve kontak zamanlarının sırasıyla 13.44-14.16 ms olduğu anlarda maksimum Von-Misses gerilmeleri 194.4-181.3 MPa değerlerini almaktadır (Şekil 4.19-b). 2. tabakada meydana gelen gerilme değerleri, 1. tabakadaki gerilme değerlerine göre yaklaşık olarak % 58.3 daha azdır.



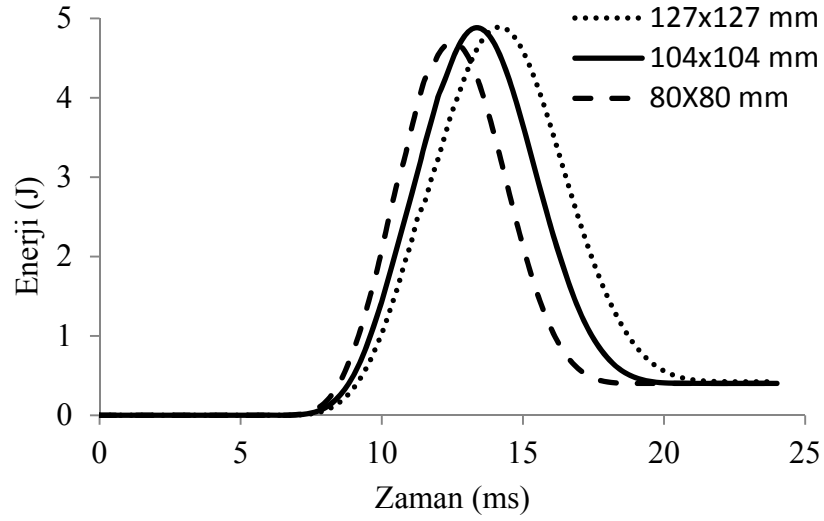
Şekil 4.20. Plak alanının değişimine bağlı olarak kontak kuvveti-zaman grafiği

Şekil 4.20, kontak kuvvetlerinin (reaksiyon/temas kuvveti) plak alanının artışına bağlı olarak azaldığını göstermektedir.



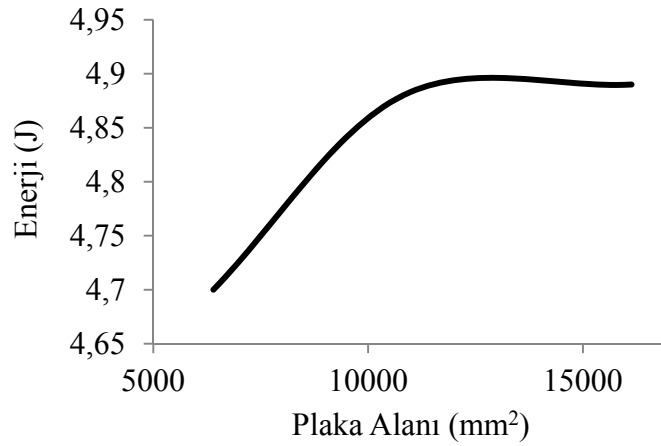
Şekil 4.21. Plak alanının değişiminde maksimum kontak kuvveti grafiği

Plaka alanının 80x80 mm ve kontak zamanının 12,48 ms olduğu anda plakada meydana gelen maksimum kontak kuvveti 2,61 kN değerindedir. Alanın 104x104-127x127 mm ve kontak zamanlarının sırasıyla 13,44-14,16 ms olduğu anlarda maksimum kontak kuvvetleri ise 2,41–2,19 kN değerlerinde olmaktadır (Şekil 4.21).



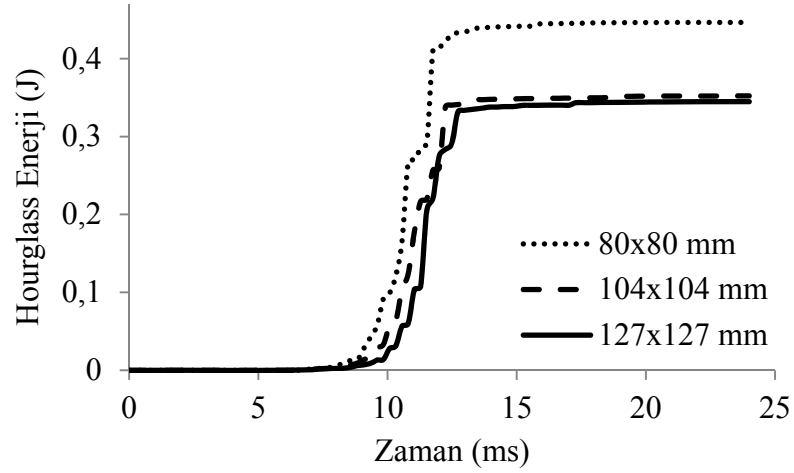
Şekil 4.22. Plak alanının değişimine bağlı olarak enerji-zaman grafiği

Plak alanının artması, plakta absorbe edilen enerji miktarını artırmaktadır (Şekil 4.22). Uygulanan darbe yükü, alanın artması ile daha çok yüzeye yayılarak, plakanın enerji absorblama yeteneğini ortaya koymaktadır.



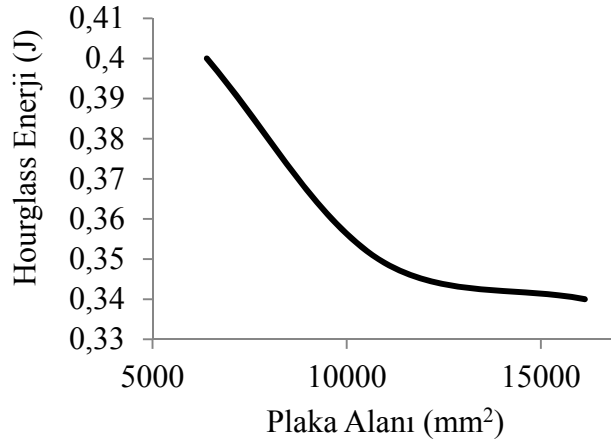
Şekil 4.23. Plak alanının değişiminde maksimum enerji grafiği

Plaka alanının 80x80 mm ve kontak zamanınının 12.48 ms olduğu anda absorbe edilen maksimum enerji değeri 4.7 J olmaktadır. Alanın 104x104-127x127 mm ve kontak zamanlarınının sırasıyla 13.44-14.16 ms olduğu anlarda absorbe edilen maksimum enerjiler ise sırasıyla 4.88 J – 4.89 J değerlerini almaktadır (Şekil 4.23).



Şekil 4.24. Plak alanının değişiminde Hourglass enerji-zaman grafiği

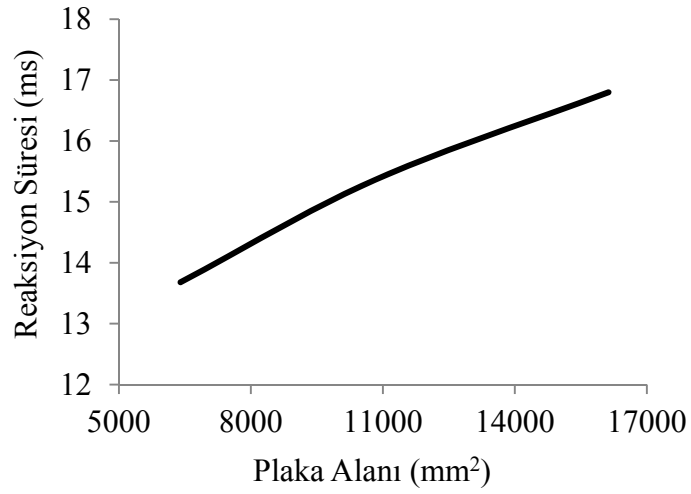
Hourglass şekil değiştirme enerjisi, oluşturulmuş SEM modelinin (mesh generation) zigzag şekline dönüşmesi için gerekli enerji miktarıdır. Bu durum yüzey alanı artışıyla, azalma göstermiştir. Bunun nedeninin, plak alanının artışıyla birlikte, SEM modelindeki elemanların birbirini daha az etkilemesi olarak düşünülmektedir (Şekil 4.24).



Şekil 4.25. Plak alanının değişiminde maksimum Hourglass enerji grafiği

Plak alanının 80x80, 104x104 ve 127x127 mm, kontak zamanının ise 19.68 ms olduğu anda, maksimum Hourglass deformasyon enerjisi sırasıyla 0.4, 0.35 ve 0.34 J değerlerini almaktadır (Şekil 4.25). Hourglass deformasyon enerji değerleri, plakta

absorbe edilen enerji miktarının %10'nunu geçmemesinden dolayı sonuçların turtalılık sağladığı söylenebilir (ANSYS yardım dokümanları). Diğer parametrelerin (yer değiştirme-Von-Misses-kontak kuvveti-enerji) maksimum değerleri aldığı zamanlarda, hourglass deformasyon enerjisi maksimum olmamaktadır. Bu nedeninin, darbe yükleme ve boşaltma esnasında SEM modelinin deformasyonuna uğramasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 4.26 Plak alanının değişimine göre reaksiyon süresi

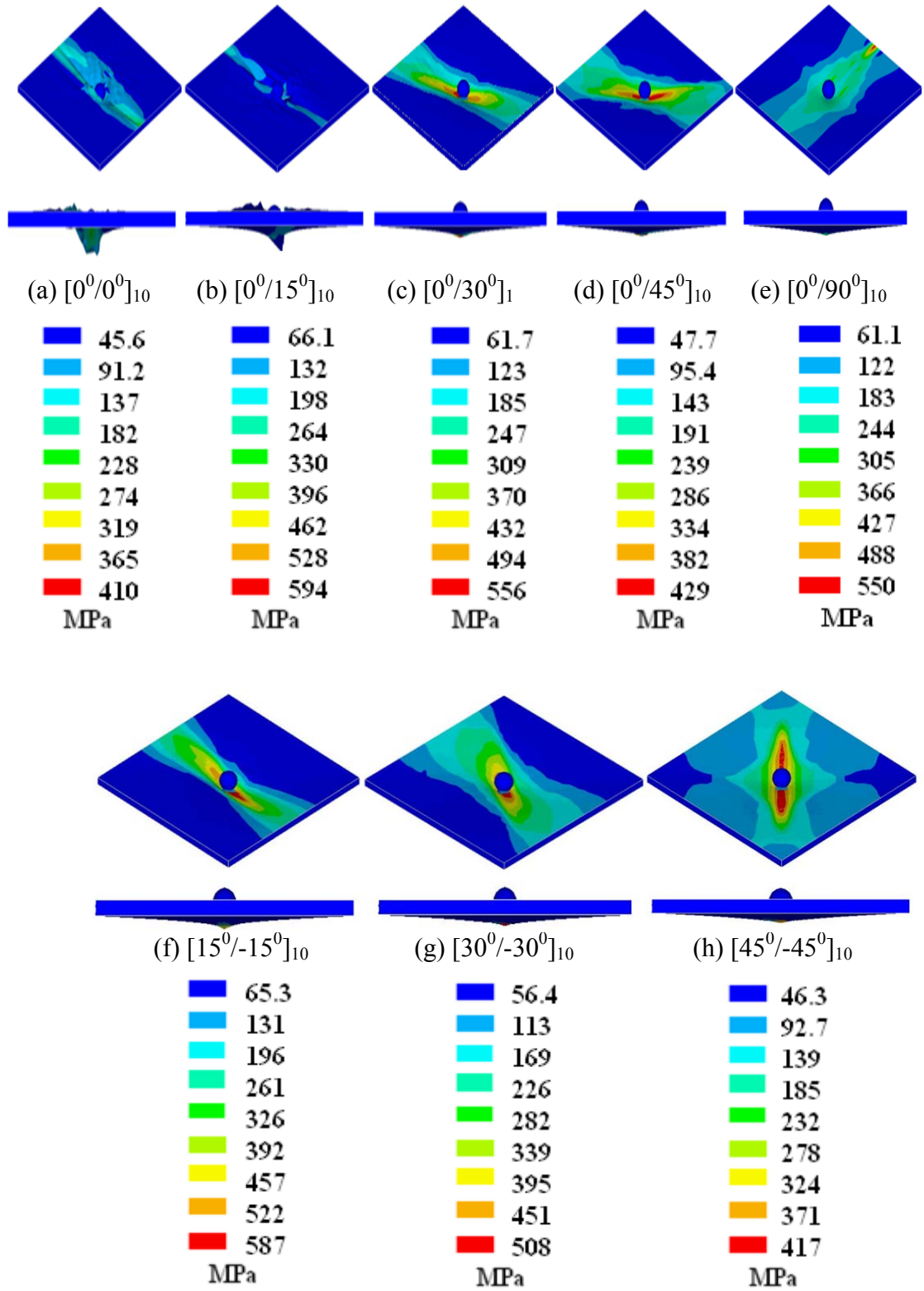
Bu kısımda sonuç olarak, plak alanlarının 80x80 cm², 104x104 cm² ve 127x127 mm olduğu durumlarda, reaksiyon süreleri artmaktadır. Bunlar sırasıyla 13.68 ms, 15.36 ms ve 16.8 ms olmaktadır (Şekil 4.26). Bu durum, alan artışına bağlı olarak, uygulanan darbe yükünün alan boyunca yayılma durumuyla açıklanabilir.

4.2.3. Takviye açısının darbe davranışına etkisi

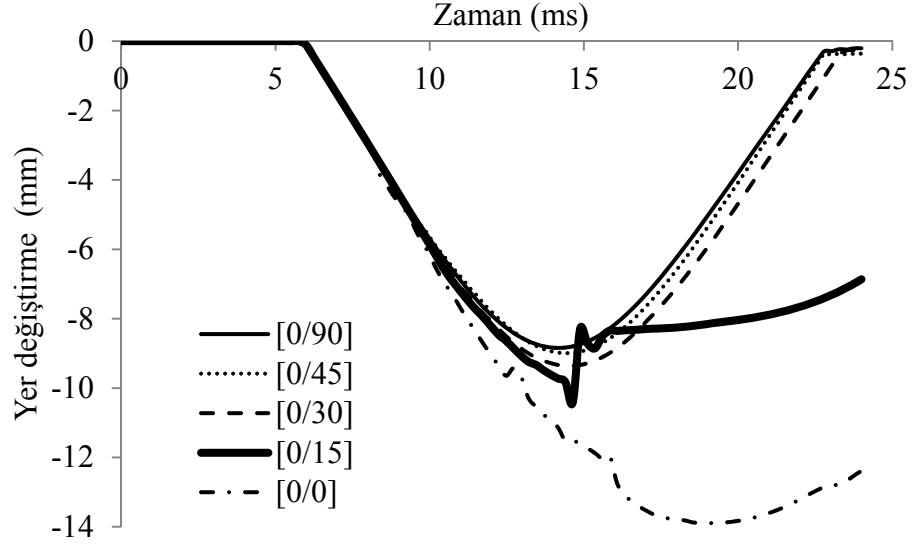
Takviye açısının darbe davranışına etkisini incelemek amacıyla, 12.7 mm çaplı ve 5.45 kg kütleli küresel vurucu kullanarak, $[0^0/0^0]_{10}$, $[0^0/15^0]_{10}$, $[0^0/30^0]_{10}$, $[0^0/45^0]_{10}$, $[0^0/90^0]_{10}$, $[15^0/-15^0]_{10}$, $[30^0/-30^0]_{10}$ ve $[45^0/-45^0]_{10}$ takviye açılara sahip, 5.11 mm kalınlıklı, 127x127 mm boyutlarındaki kompozit plakalara, 1.35 m/s hızında darbe yükleri

uygulanmıştır. Plakanın ve vurucunun mekanik özellikleri Çizelge 4.1 ve 4.3’de verilmiştir. Bu veriler neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda irdelenmiştir.

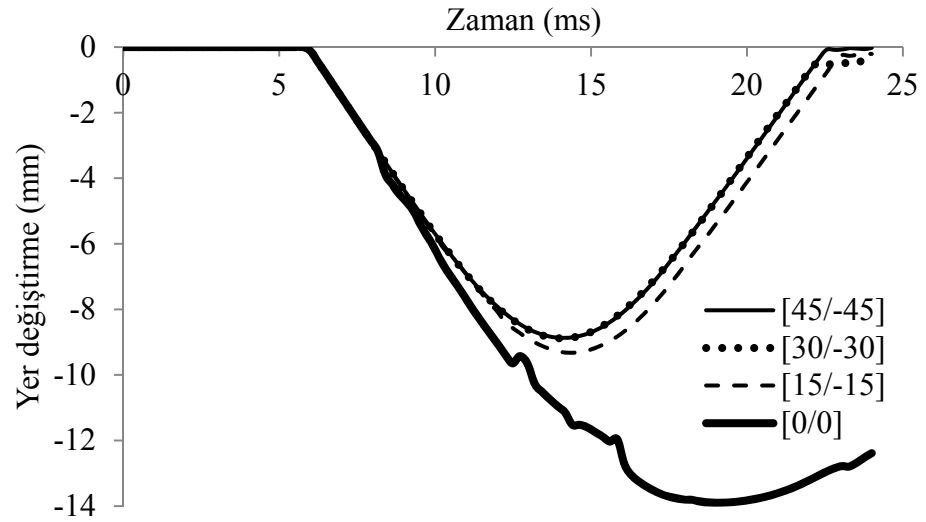
Şekil 4.27’de, takviye açısının değişimiyle, darbe yükünün meydana getirmiş olduğu gerilme dağılımları gösterilmiştir. Takviye açısının değişimi ile plakta meydana gelen gerilmeler, temas noktasında en büyük değerlerini alırken, merkezden geçen elyaf civarında ise bir şerit şeklinde olduğu görülmektedir. Takviye açısı 0^0 ’den 45^0 ’ye doğru arttığında gerilme şeridinin de benzer olarak 0^0 ’den 45^0 ’ye doğru yön değiştirdiği görülmektedir. Buradan, tek yönlü takviye edilmiş tabakalı plakların darbe yüklerine karşı daha hassas oldukları anlaşılmaktadır. $[15^0/-15^0]_{10}$, $[30^0/-30^0]_{10}$ ve $[45^0/-45^0]_{10}$ takviye açıları ise takviye açısı artıkça meydana gelen gerilme değerleri azalmaktadır. Gerilme dağılımı, takviye edilmiş açı doğrultularında şerit şeklinde olmaktadır. Bu takviye açıları hasar durumu çok az görülmekte ve plak merkezinin yer değiştirme miktarları ise açı değeri artıkça azalmaktadır. $[15^0/-15^0]_{10}$, $[30^0/-30^0]_{10}$ ve $[45^0/-45^0]_{10}$ takviye açıları gerilmeler, $[0^0/15^0]_{10}$, $[0^0/30^0]_{10}$ ve $[0^0/45^0]_{10}$ takviye edilmiş plaklara göre, gerilme dağılımı plak yüzeyinde fazla olmakta ve yer değiştirme miktarları daha az olmaktadır. Belirgin olarak $[0^0/15^0]_{10}$ takviye açılı plakta hasar büyük boyutlarda iken, $[15^0/-15^0]_{10}$ takviye açılı plaklarda hasar çok küçük boyutlarda olmaktadır.



Şekil 4.27. Takviye açılarının değişimine bağlı olarak gerilme dağılımları



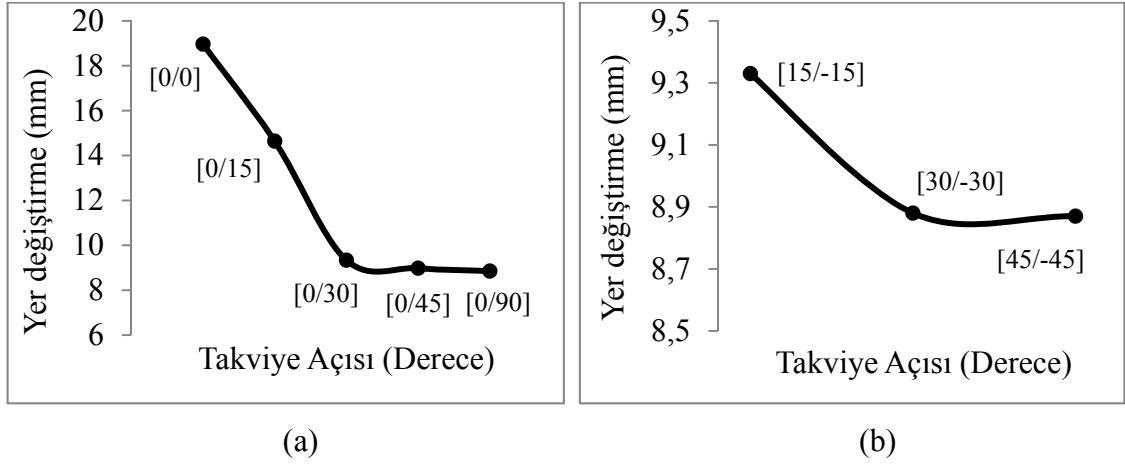
(a)



(b)

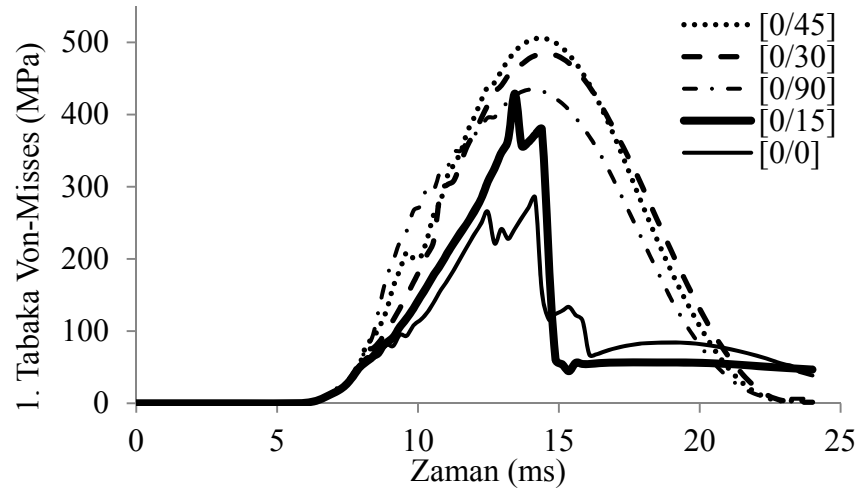
şekil 4.28. Takviye aırlarının değişimine göre yer değiştirme-zaman grafiği (a-b)

Takviye açısının değişimine bağlı olarak plakta meydana gelen yer değiştirmeler şekil 4.28'de verilmiştir. Tabakadan tabakaya takviye açısının artışı ile plakta meydana gelen yer değiştirme miktarlarında azalma meydana geldiği görülmektedir. Takviye açısı 0^0 'de daha büyük hasarlar meydana gelirken, aı büyüdükçe hasarın boyutunun küçüldüğü gözlenmektedir (şekil 4.28-a-b).

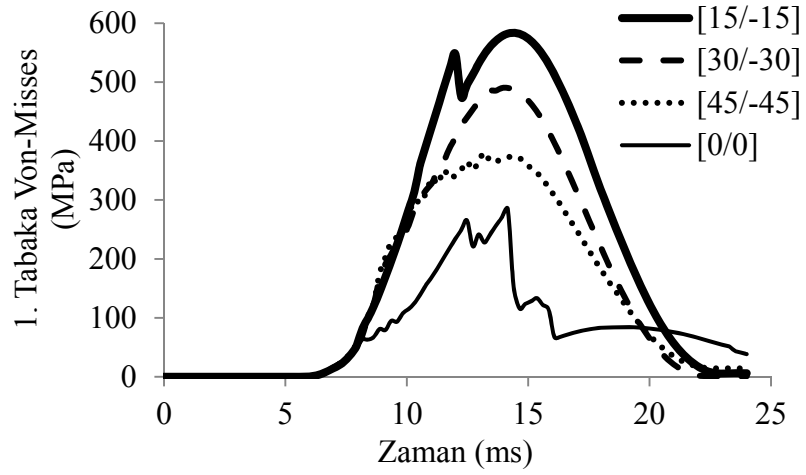


Şekil 4.29. Takviye açılarının değişiminde maksimum yer değiştirme grafiği

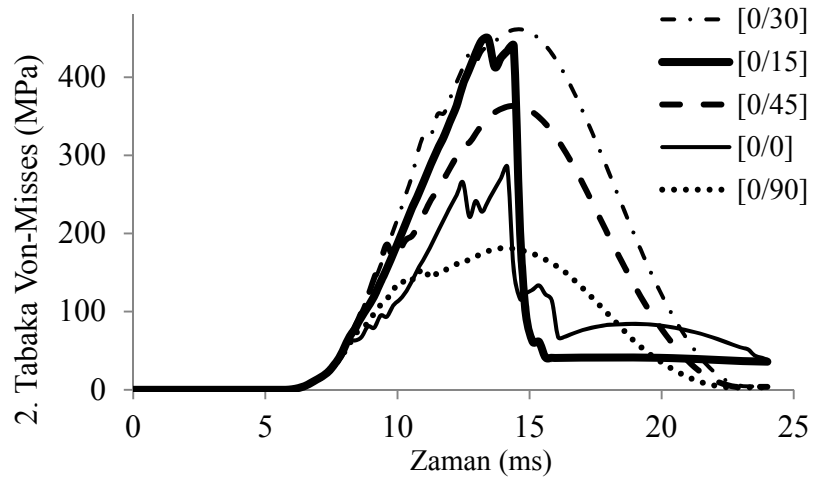
Hasar oluşumunun meydana geldiği $[0^0/0^0]_{10}$ ve $[0^0/15^0]_{10}$ takviye açılı plaklarda, kontak zamanlarının sırasıyla 18.96 ve 14.64 ms olduğu anlarda meydana gelen maksimum yer değiştirme miktarları sırasıyla 13.89 ve 10.41 mm olmaktadır. Takviye açılarının $[0^0/30^0]_{10}$, $[0^0/45^0]_{10}$, $[0^0/90^0]_{10}$ ve kontak zamanının 14.16 ms olduğu durumda maksimum yer değiştirme miktarları sırasıyla 9.34, 8.98 ve 8.85 mm olmaktadır (Şekil 4.29-a). Takviye açılarının $[15^0/-15^0]_{10}$, $[30^0/-30^0]_{10}$ ve $[45^0/-45^0]_{10}$ olduğu, temasın sırasıyla 14.4, 14.16 ve 14.16 ms olduğu anlarda ise meydana gelen maksimum yer değiştirme miktarları sırasıyla 9.33, 8.88 ve 8.87 mm değerlerine ulaşmaktadır (Şekil 4.29-b). Burada verilen değerler plakanın merkez düğümünün yer değiştirme miktarlarıdır.



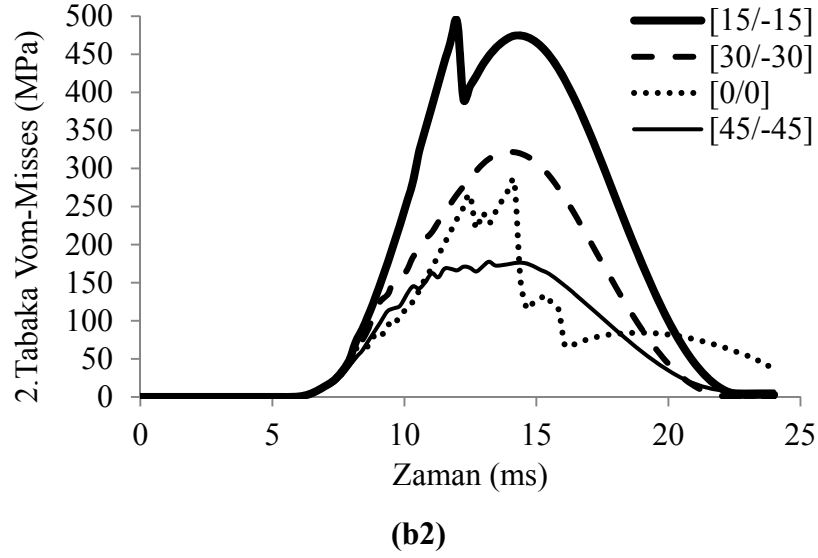
(a1)



(a2)



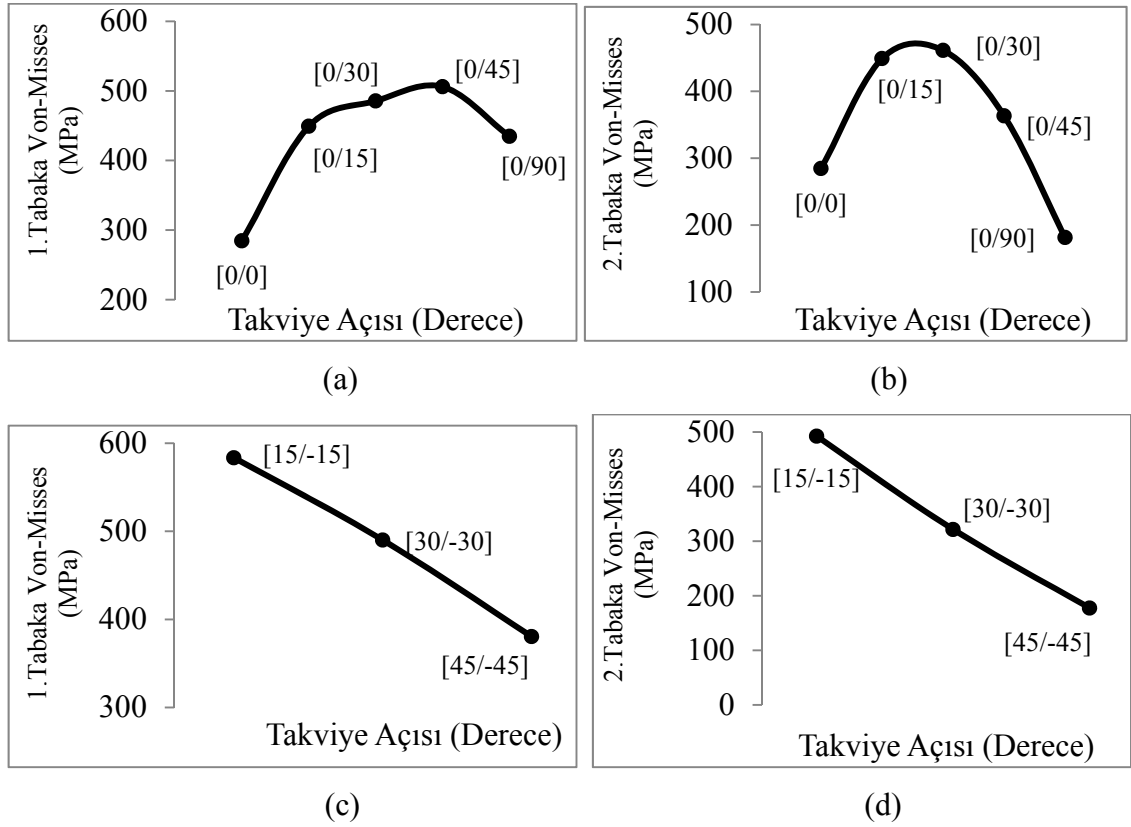
(b1)



Şekil 4.30. Takviye açılarının değişimine göre Von-Misses-zaman grafiği (a1/2) 1. (b1-b2) 2. tabakanın

1. tabakada meydana gelen Von-Misses gerilmeleri Şekil 4.30-a1’da verilmiştir. Takviye açıları $[0^0/0^0]_{10}$, $[0^0/15^0]_{10}$ olan plaktaki gerilmeler, takviye açlarına bağlı olarak belirli bölgelerde yoğunlaştığından hasar meydana gelmektedir. Hasar oluşumuyla birlikte, elyafın yük taşıma kabiliyeti düşmektedir. Takviye açılarının $[0^0/30^0]_{10}$, $[0^0/45^0]_{10}$ olduğu durumlarda oluşan gerilmeler plak düzlemi boyunca dağılım göstermekte ve bundan dolayı gerilmeler belirli bir bölgede dağılım göstererek yüksek gerilmeler meydana gelmektedir. Takviye açısının $[0^0/90^0]_{10}$ olduğu durumda ise oluşan gerilmeler plaka düzlemi boyunca dağılım gösterdiğinden plak merkezinde oluşan gerilme değeri, $[0^0/30^0]_{10}$, $[0^0/45^0]_{10}$ takviye açılı plakalara göre daha küçük olmaktadır. Takviye açıların $[0^0/0^0]_{10}$, $[0^0/15^0]_{10}$ ve kontak zamanlarının sırasıyla 14.16-13.44 ms olduğu anlarda meydana gelen maksimum Von-Misses gerilmeleri sırasıyla 284.6 ve 449.1 MPa değerine ulaşmaktadır. Takviye açıların $[0^0/30^0]_{10}$, $[0^0/45^0]_{10}$, $[0^0/90^0]_{10}$ ve kontak zamanlarının sırasıyla 14.64 ms, 14.4 ms, 14.16 ms olduğu anlarda meydana gelen maksimum Von-Misses gerilmeleri sırasıyla 485.5 MPa, 506 MPa ve 434.8 MPa değerlerinde olmaktadır (Şekil 4.31-a).

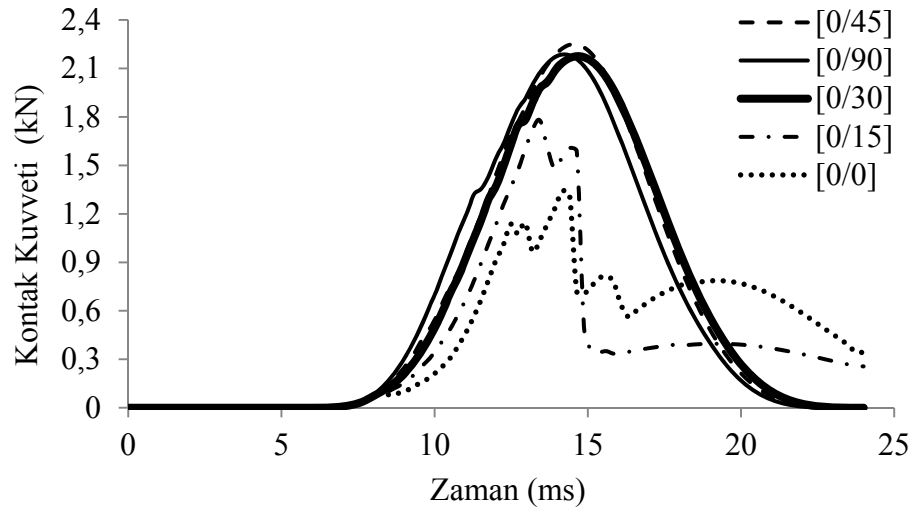
Takviye açılarının $[15^0/-15^0]_{10}$, $[30^0/-30^0]_{10}$ ve $[45^0/-45^0]_{10}$ olduğu, temasın sırasıyla 14.4, 14.16 ve 13.2 ms olduğu anlarda meydana gelen maksimum Von-Misses gerilmeleri sırasıyla 583.51, 490.12 ve 380.64 MPa değerlerinde olmaktadır (Şekil 4.31-c). Buradaki gerilme değerleri 1. tabakanın merkez düğümünün Von-Misses gerilme değerleridir.



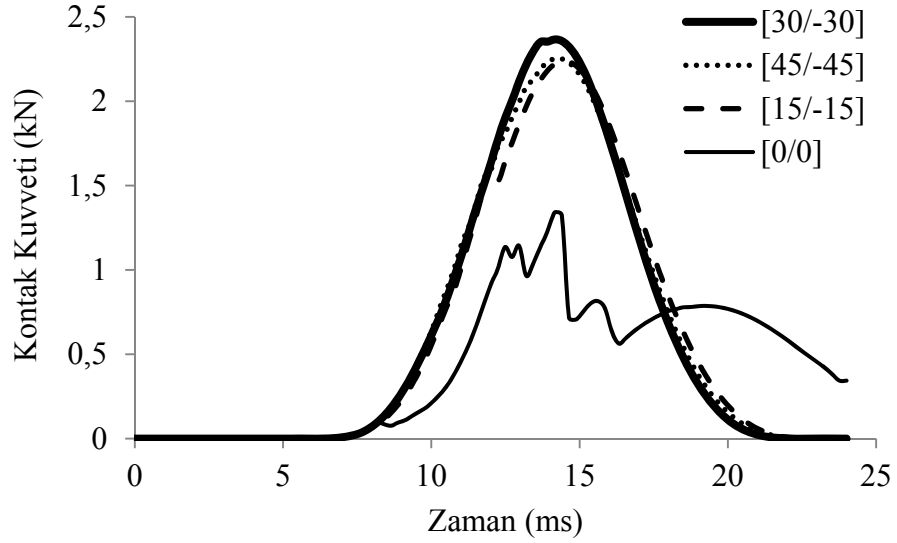
Şekil 4.31. Takviye açılarının değişiminde maksimum Von-Misses gerilmeleri

Plâğin 2. tabakasının merkez düğümünde meydana gelen Von-Misses gerilmelerinin değişimi ise Şekil 4.30'de verilmiştir. En üst tabakadan alt tabakalara doğru darbe yükü aktarılırken, darbe yükünün değerinde azalma meydana geldiği için alt tabakalarda meydana gelen Von-Misses gerilmeleri de azalmaktadır. Fakat $[0^0/0^0]_{10}$, $[0^0/15^0]_{10}$ takviye açılarında hasar oluşumu meydana geldiğinden, gerilme değerlerinde çok büyük değişimler meydana gelmemektedir. Diğer takviye açılarında 1. tabakadan 2. tabakaya aktarılan darbe yükü azaldığından, 2. tabakada Von-Misses gerilmelerinde azalma meydana gelmektedir. Takviye açılarının $[0^0/0^0]_{10}$, $[0^0/15^0]_{10}$ ve kontak zamanlarının

sırasıyla 14.16-13.44 ms olduğu anlarda meydana gelen maksimum Von-Misses gerilmeleri sırasıyla 284.6 ve 449.1 MPa değerine ulaşmaktadır (Şekil 4.31-b). Takviye açılarının $[0^0/30^0]_{10}$, $[0^0/45^0]_{10}$, $[0^0/90^0]_{10}$ ve kontak zamanlarının sırasıyla 14.64 ms, 14.4 ms, 14.16 ms olduğu anlarda meydana gelen maksimum Von-Misses gerilmeleri ise sırasıyla 461.2 MPa, 363.3 Mpa ve 181.3 Mpa değerinde olmaktadır. Şekil 4.30-b2'de $[15^0/-15^0]_{10}$, $[30^0/-30^0]_{10}$ ve $[45^0/-45^0]_{10}$ takviye açılı plakların 2. tabakasında meydana gelen Von-Misses gerilmeleri verilmiştir. Diğer takviye açılarında da olduğu gibi gerilmeler en üst tabakadan alt tabakalara azalmaktadır. Takviye açılarının $[15^0/-15^0]_{10}$, $[30^0/-30^0]_{10}$ ve $[45^0/-45^0]_{10}$ olduğu, temasın sırasıyla 12, 14.16 ve 13.2 ms olduğu anlarda meydana gelen maksimum Von-Misses gerilmeleri sırasıyla 492.52, 321.49 ve 177.58 MPa değerlerinde olmaktadır (Şekil 4.31-d). $[15^0/-15^0]_{10}$ takviye açısında, 2. tabakadaki gerilme değerleri 1. tabakadaki değerden yaklaşık %15.59 daha az olurken, $[30^0/-30^0]_{10}$ ve $[45^0/-45^0]_{10}$ takviye açılarında ise bu durum sırasıyla yaklaşık % 34.41 ve % 53.35 değerlerinde olmaktadır.



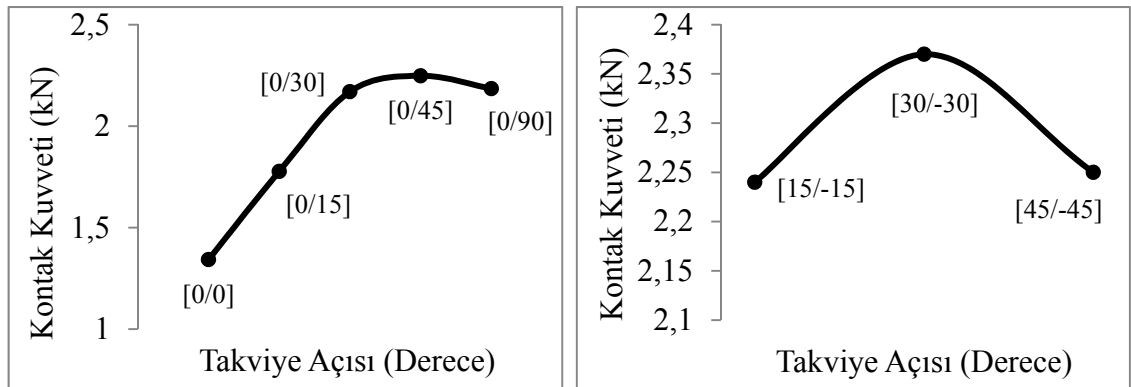
(a)



(b)

Şekil 4.32. Takviye açılarının değişiminde kontakt kuvveti -zaman grafiği (a-b)

Takviye açılarının değişimiyle plakta meydana gelen kontakt kuvvetleri Şekil 4.32'de görülmektedir. Takviye açılarının $[0^0/0^0]_{10}$, $[0^0/15^0]_{10}$ olduğu plakta hasar meydana geldiğinden, kontakt kuvvetinde azalma meydana gelmiştir. $[0^0/30^0]_{10}$, $[0^0/45^0]_{10}$ ve $[0^0/90^0]_{10}$ açılı plaklarda, $[0^0/0^0]_{10}$ ve $[0^0/15^0]_{10}$ takviyeli plakalara göre daha yüksek kontakt kuvvetleri meydana gelmektedir (Şekil 4.32-a). Takviye açısının $[30^0/-30^0]_{10}$ olduğu durumda kontakt kuvveti yüksek değer alırken, $[15^0/-15^0]_{10}$ ve $[45^0/-45^0]_{10}$ olduğu durumlarda ise kontakt kuvveti değerinde azalma meydana gelmiştir (Şekil 4.32-b).

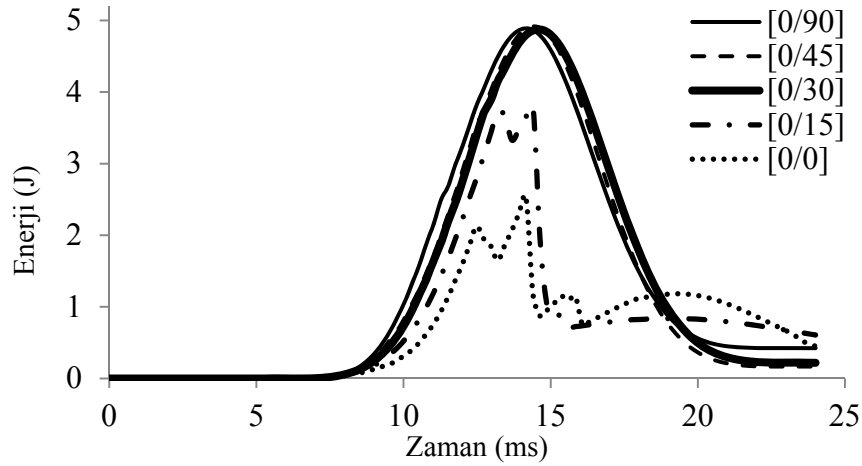


(a)

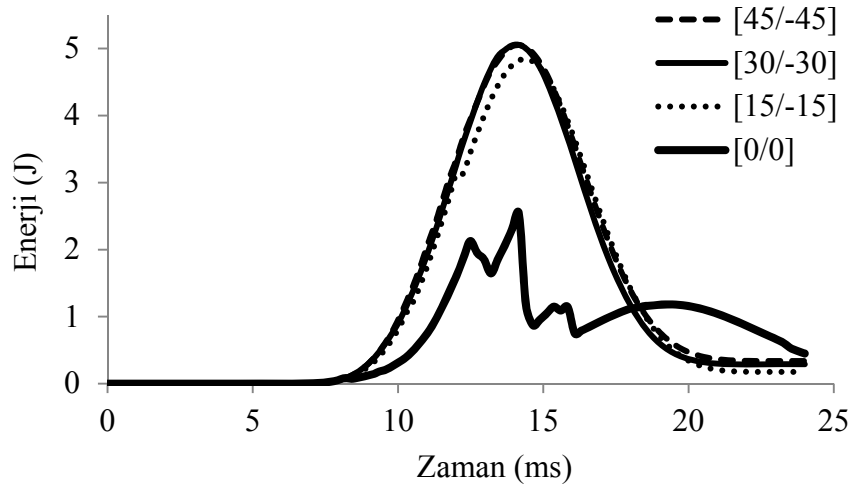
(b)

Şekil 4.33. Takviye açılarının değişiminde maksimum kontakt kuvvetleri

Takviye açılarının $[0^0/0^0]_{10}$, $[0^0/15^0]_{10}$ ve kontak zamanlarının sırasıyla 14.16-13.44 ms olduğu anlarda meydana gelen maksimum kontak kuvvetleri 1.342 kN ve 1.777 kN değerinde olurken, takviye açılarının $[0^0/30^0]_{10}$, $[0^0/45^0]_{10}$ ve $[0^0/90^0]_{10}$ ve kontak zamanlarının sırasıyla 14.64 ms, 14.4 ms ve 14.16 ms olduğu anlarda meydana gelen maksimum kontak kuvvetleri sırasıyla 2.17 kN, 2.248 kN ve 2.185 kN değerlerine ulaşmaktadır (Şekil 4.33-a). Takviye açılarının $[15^0/-15^0]_{10}$, $[30^0/-30^0]_{10}$ ve $[45^0/-45^0]_{10}$ olduğu ve temasın sırasıyla 14.4, 14.16 ve 14.16 ms olduğu anlarda meydana gelen maksimum kontak kuvvetleri sırasıyla 2.24, 2.37 ve 2.25 kN değerlerine ulaşmaktadır (Şekil 4.33-b).



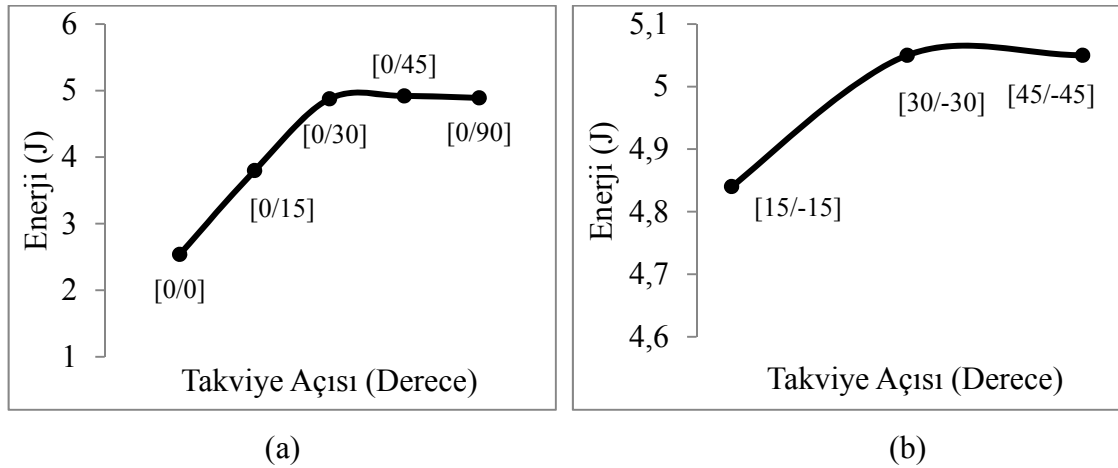
(a)



(b)

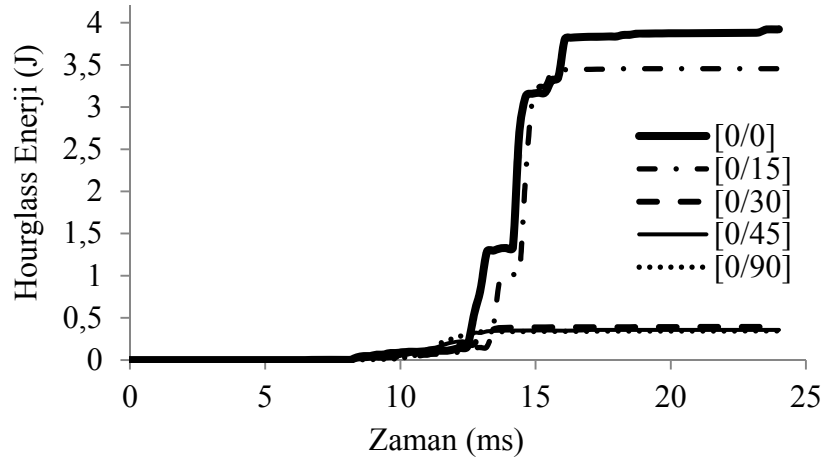
Şekil 4.34. Takviye açılarının değişimine göre enerji -zaman grafiği(a-b)

Plakada absorblanan enerji, $[0^0/0^0]_{10}$ ve $[0^0/15^0]_{10}$ takviye açılarında, meydana gelen hasar nedeniyle $[0^0/30^0]_{10}$, $[0^0/45^0]_{10}$ ve $[0^0/90^0]_{10}$ takviye açılarında göre daha az olmaktadır. Darbe enerjisinin belirli bir kısmının plakta meydana gelen hasara harcadığı görülmektedir. $[0^0/0^0]_{10}$ açılı plakta hasar boyutu büyük olduğundan absorbe edilen enerji az olmakla birlikte, $[0^0/15^0]_{10}$ açılı plakta ise hasar küçüldüğünden daha fazla enerji absorbe edilmektedir. Diğer takviye açılarında küçük hasarlar meydana geldiğinden, bunlarda absorbe edilen enerji miktarları, hasar gören plakalara göre daha büyük değerlere ulaşmaktadır (Şekil 4.34-a). Takviye açılarının $[30^0/-30^0]_{10}$ ve $[45^0/-45^0]_{10}$ olduğu durumlarda yaklaşık olarak eşit ve yüksek enerji absorbe edilirken, $[15^0/-15^0]_{10}$ takviye açılı plakta ise daha az enerji absorbe edilmektedir (Şekil 4.34-b).

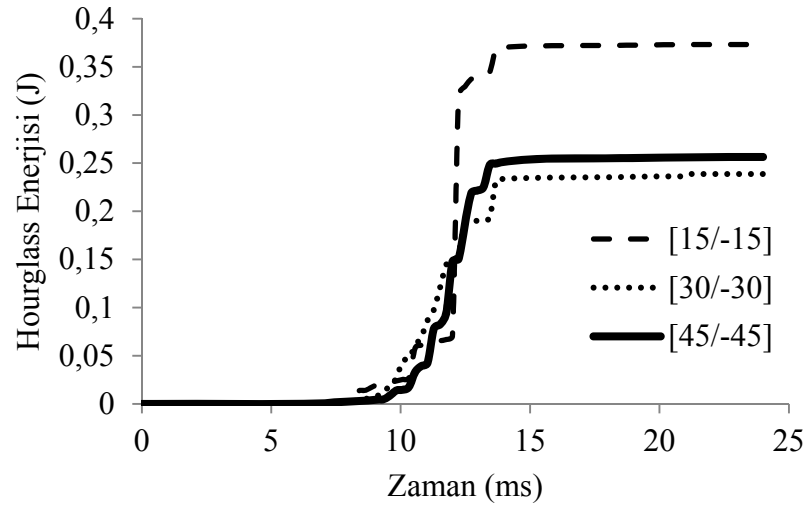


Şekil 4.35. Takviye açılarının değişiminde maksimum enerji grafiği

Takviye açılarının $[0^0/0^0]_{10}$, $[0^0/15^0]_{10}$ ve kontak zamanlarının sırasıyla 14.16-14.4 ms olduğu anlarda absorbe edilen maksimum enerji değerleri sırasıyla 2.537 ve 3.797 J değerlerinde olurken, takviye açılarının $[0^0/30^0]_{10}$, $[0^0/45^0]_{10}$ ve $[0^0/90^0]_{10}$ ve kontak zamanlarının sırasıyla 14.64 ms, 14.4 ms ve 14.16 ms olduğu durumlarda absorbe edilen maksimum enerji değerleri sırasıyla 4.876 J, 4.918 J ve 4.891 J değerlerine ulaşmaktadır (Şekil 4.35-a). Takviye açılarının $[15^0/-15^0]_{10}$, $[30^0/-30^0]_{10}$ ve $[45^0/-45^0]_{10}$ olduğu ve temasın sırasıyla 14.4, 14.16 ve 14.16 ms olduğu anlarda meydana gelen absorbe edilen maksimum enerjiler ise sırasıyla 4.84, 5.05 ve 5.05 J değerlerinde olmaktadır (Şekil 4.35-b).



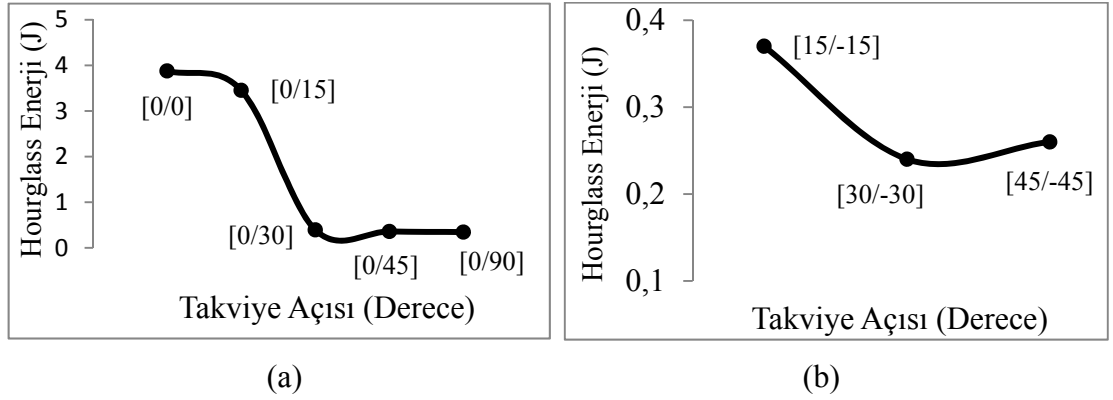
(a)



(b)

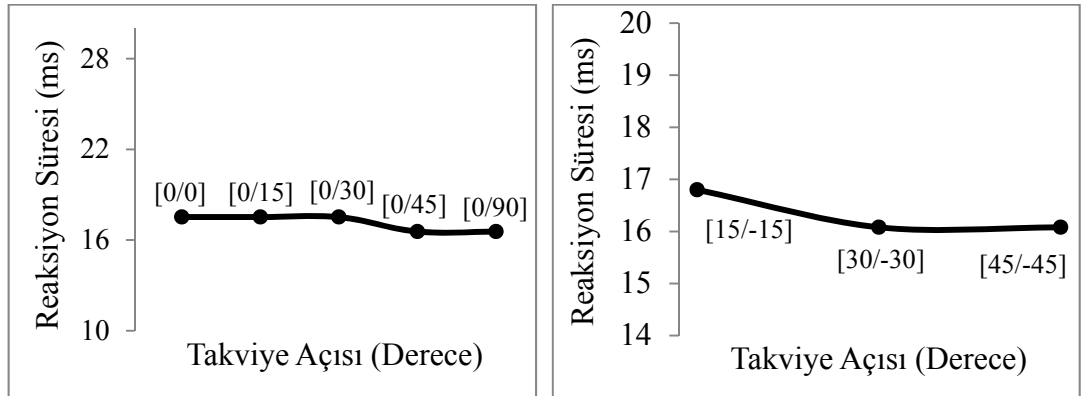
Şekil 4.36. Takviye açılarının değişimine göre Hourglass enerji -zaman grafiği

Şekil 4.36-a'da, Hourglass deformasyon enerjisi $[0^0/0^0]_{10}$, $[0^0/15^0]_{10}$ takviye açılı plaklarda çok büyük hasar oluşumu, plağın absorbe ettiği enerji miktarının %10'nunu aşmaktadır (ANSYS yardım dokümanları). Bunun sonucunda, SEM modelinde çok büyük çarpılmalar meydana gelmektedir. Takviye açılarının $[0^0/30^0]_{10}$, $[0^0/45^0]_{10}$, $[0^0/90^0]_{10}$ olduğu durumlarda çok küçük hasarlar meydana gelmekte, bundan dolayı Hourglass enerjisi, absorbe edilen enerji miktarının %10'nunu aşmamaktadır. Takviye açılarının $[15^0/-15^0]_{10}$, $[30^0/-30^0]_{10}$ ve $[45^0/-45^0]_{10}$ olduğu durumlarda ise plakların absorbe ettikleri enerji miktarlarının %10'nunu aşmaktadır (Şekil 4.36-b).



Şekil 4.37. Takviye açılarının değişiminde maksimum Hourglass enerji grafiği

Takviye açılarının $[0^0/30^0]_{10}$, $[0^0/45^0]_{10}$ ve $[0^0/90^0]_{10}$ ve temas zamanının 14.16 ms olduğu anda $H_{\text{Hourglass}}$ deformasyon enerjisi yaklaşık olarak 0.39 J değerine erişmektedir (Şekil 4.37-a). Takviye açılarının $[15^0/-15^0]_{10}$, $[30^0/-30^0]_{10}$ ve $[45^0/-45^0]_{10}$ olduğu ve temasın sırasıyla 22.56, 21.6 ve 22.32 ms olduğu anlarda meydana gelen maksimum Hourglass deformasyon enerjisi ise sırasıyla 0.37, 0.24 ve 0.26 J değerlerinde olmaktadır (Şekil 4.37-b).



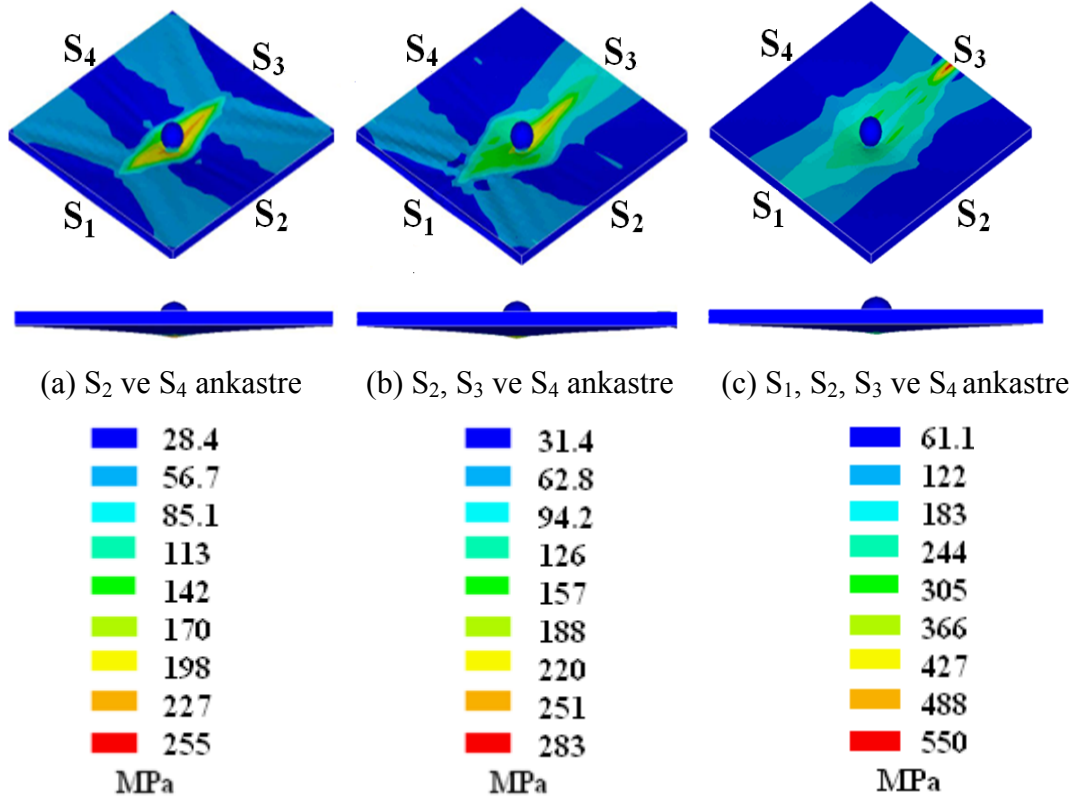
Şekil 4.38. Takviye açılarının değişimine göre reaksiyon süreleri

Gerçekleştirilen nümerik analizler sonucunda farklı takviye açılarına sahip plakalarda, reaksiyon süreleri yaklaşık olarak 17 ms civarında olduğu gözlenmiştir (Şekil 4.38).

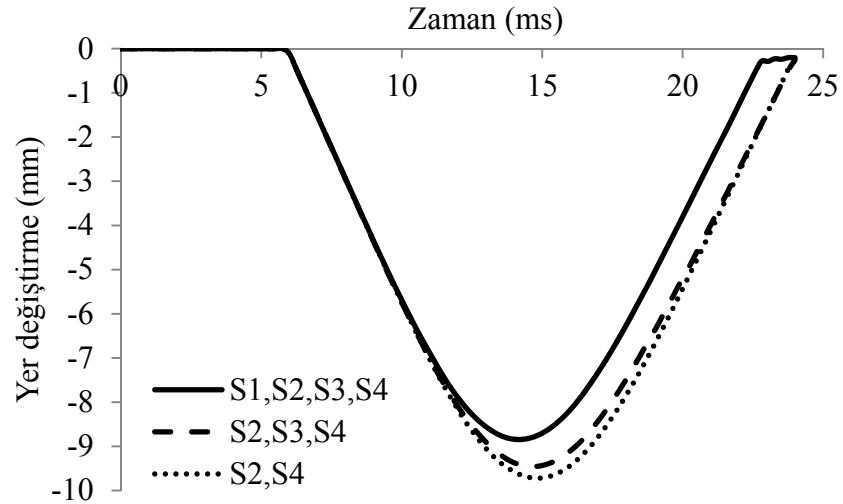
4.2.4. Sınır şartlarının darbe davranışına etkisi

Sınır şartlarının darbe davranışına etkisini incelemek amacıyla 12.7 mm çaplı, 5.45 kg kütleli küresel vurucu kullanarak, $[0^0-90^0]_{10}$ çapraz takviyeli, 5.11 mm kalınlıklı ve 127x 127 mm boyutlarındaki plakalara 1.35 m/s hızında darbe yükü uygulanmıştır. Darbe analizi, karşılıklı iki kenarı ankastre (S_2, S_4), üç kenarı ankastre (S_2, S_3, S_4) ve tüm kenarları ankastre (S_1, S_2, S_3, S_4) olan sınır şartlarında gerçekleştirilmiştir. Plaka ve vurucunun mekanik özellikleri Çizelge 4.1 ve 4.3’de gösterilmiştir. Bu verilere göre elde edilen sonuçlar aşağıda değerlendirilmiştir.

Şekil 4.39’da farklı sınır şartlarında yapılan çalışmalarda, gerilme dağılımları görülmektedir. Şekil 4.39-a’da karşılıklı iki kenarın (S_2 ve S_4) ankastre olduğu durumda, vurucunun çarptığı nokta civarında mesnetlere paralel şekilde gerilme yığılması oluşmakta ve bu iki kenar arasındaki doğrultu boyunca iki şerit şeklinde küçük gerilme dağılımı meydana gelmektedir. Şekil 4.39-b’de plağın S_2, S_3 ve S_4 kenarları ankastre sınır şartlarında tutularak darbe yükü uygulanmıştır. Burada, vurucunun çarptığı bölgenin S_3 kenarına büyük gerilme yığılmaları olduğu görülmekte, S_2 ve S_4 kenarlarında şerit şeklinde daha küçük gerilmeler meydana gelmekte ve ayrıca S_1 kenarı serbest olduğundan S_3 kenarına doğru giderek artan bir şerit şeklinde gerilme dağılımı oluşmaktadır. Şekil 4.39-c’de ise plakanın tüm kenarları (S_1, S_2, S_3, S_4) sınır şartı olarak tanımlanmıştır. Bu durumda plaka merkezine uygulanan darbe yükü nedeniyle oluşan gerilme dağılımı düzlem boyunca oluşacaktır. Böylece malzeme merkezinde oluşacak gerilme, sabitlenen kenar sayısının artışıyla azalacaktır.

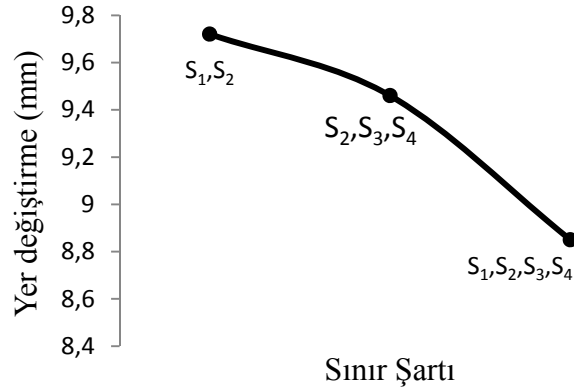


Şekil 4.39. Sınır şartlarının değişimine bağlı olarak gerilme dağılımları



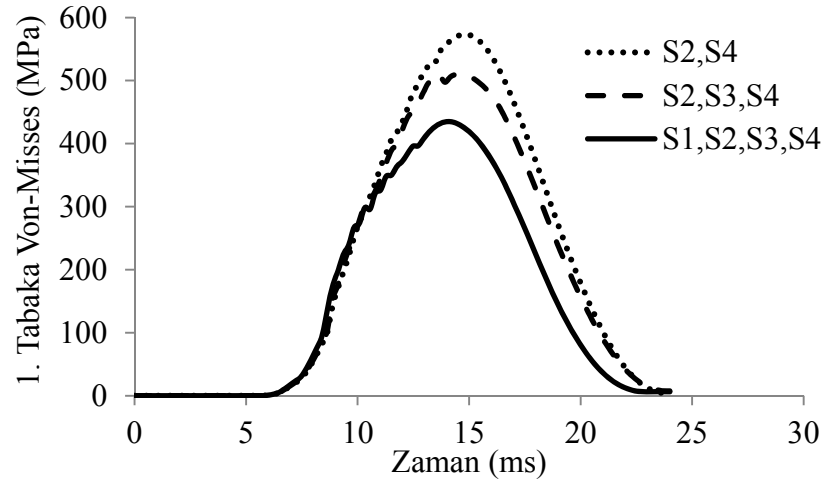
Şekil 4.40. Sınır şartlarının değişimine göre yer değiştirme- zaman grafiği

Ankastre kenar sayılarındaki değişime bağlı olarak plakada meydana gelen yer değiştirmeler Őekil 4.40'da verilmiştir. Burada sınır Őartlarının uygulandığı kenarların artışıyla birlikte, plakların merkez dūęümlerinde meydana gelen yer değiştirme miktarları azalmaktadır. Sadece iki kenarının (S_2, S_4) ankastre olarak tutulan plakta daha büyük yer değiştirme meydana gelirken reaksiyon süresi de daha uzun olmaktadır. Üç kenarının (S_2, S_3, S_4) ankastre olması durumunda, temas süresi bir miktar azalırken plak merkezindeki çökme miktarı da azalmaktadır. Tüm kenarların (S_1, S_2, S_3, S_4) sabitlenmesi durumunda ise reaksiyon daha kısa sürede olmakta ve yer değiştirme değeri daha küçük bir Őekilde meydana gelmektedir.

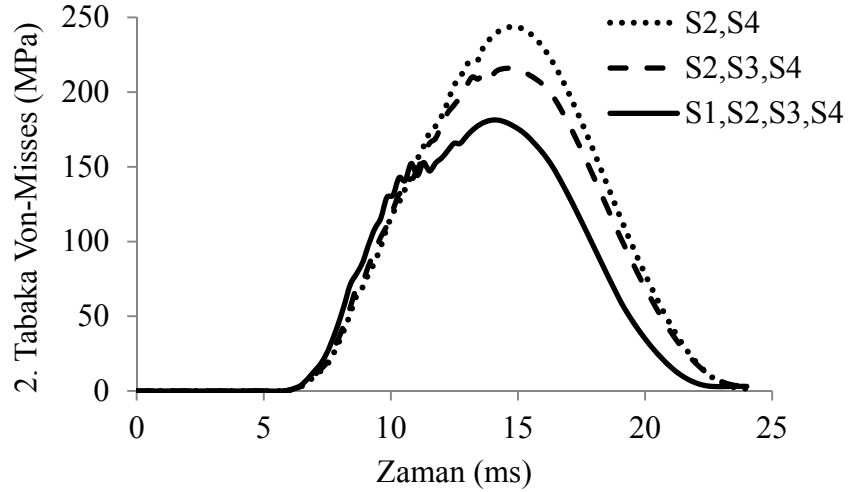


Şekil 4.41. Sınır Şartlarının değişiminde maksimum yer değiştirme grafiği

İki kenarın (S_2, S_4) sınır Şartı olarak tanımlandığı plakta, kontak zamanının 14.88 ms olduğu anda, maksimum yer değiştirme miktarı 9.72 mm olmaktadır. (S_2, S_3, S_4) ve (S_1, S_2, S_3, S_4) sınır Şartlarında kontak zamanlarının sırasıyla 14.64 ve 14.16 ms olduğu anlarda, maksimum yer değiştirme miktarları ise sırasıyla 9.46 ve 8.85 mm değerlerine ulaşmaktadır (Şekil 4.41).



(a)

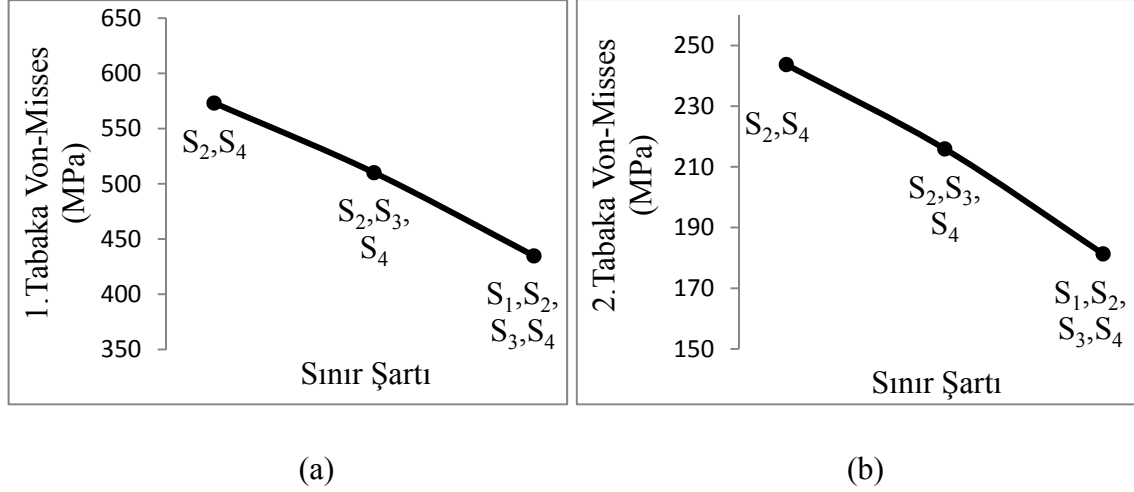


(b)

Şekil 4.42. Sınır şartlarının değişimine göre Von-Misses-zaman grafiği (a) 1. (b) 2.Tabaka

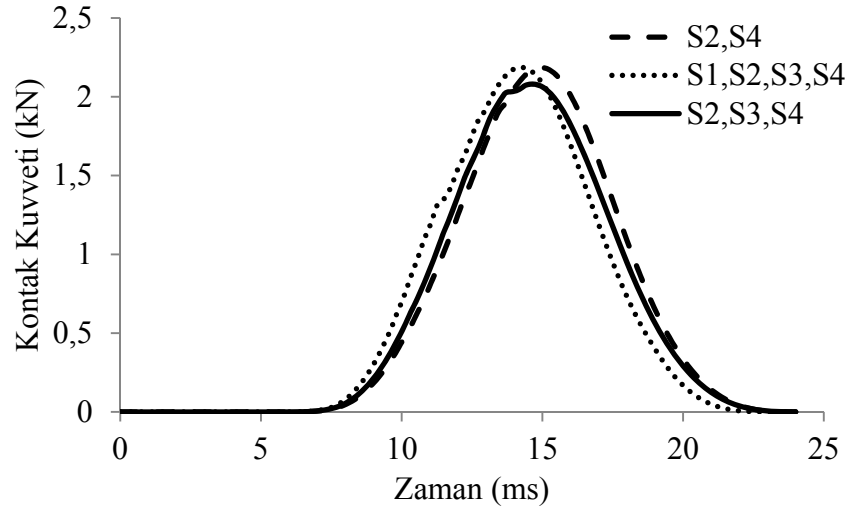
Şekil 4.42-a'da, 1. Tabakada meydana gelen Von-Misses gerilmeleri, ankastre olarak tutulan kenar sayısının artışına bağlı olarak azaldığı görülmektedir. Buradan, uygulanan yük ve plak yüzey alanı sabit olmak üzere, gerilme durumu sınır şartı uygulanan kenar sayısı ile ilişkisinin olduğu söylenebilir. Plâğın iki kenar (S_2 , S_4) tutulduğunda, kontak zamanının 14.88 ms olduğu anda plaka merkezinde meydana gelen Von-Misses gerilmesi 573.2 MPa değerinde olmaktadır. (S_2 , S_3 , S_4) ve (S_1 , S_2 , S_3 , S_4) sınır şartlarında kontak zamanları sırasıyla, 14.64 ve 14.16 ms olduğu anda maksimum Von-

Misses gerilme miktarları ise sırasıyla 510.1 ve 434.8 MPa değerlerinde olmaktadır (Şekil 4.43-a).



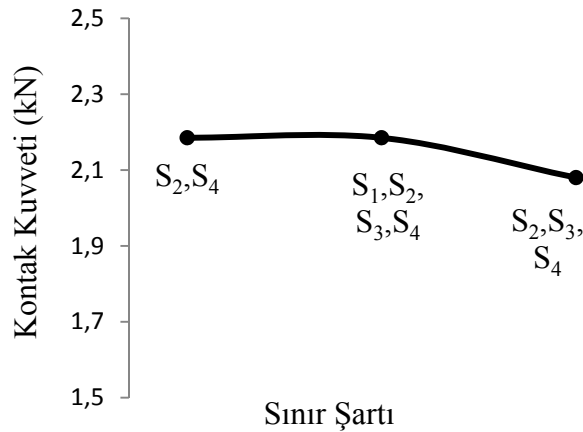
Şekil 4.43. Sınır şartlarının değişiminde maksimum Von-Misses gerilmeleri

Plağın 2. tabakasının merkez düğümünde meydana gelen Von-Misses gerilmelerinin değişimi, ankastre kenar sayısının artışına bağlı olarak Şekil 4.42-b'de gösterilmektedir. Burada gerilme değişimi 1. tabakadaki değişime benzer olup gerilme değerlerinde belirli bir oranda azalma olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca Şekil 4.42-a ve b'den, en üst tabakadan orta tabakalara doğru Von-Misses gerilmeleri azaldığı görülmektedir. 2. tabakada meydana gelen gerilme değerleri, 1. tabakadaki gerilme değerlerine göre yaklaşık olarak % 58 oranında azalmaktadır. İki kenar (S_2, S_4) tutulduğunda, kontak zamanının 14.88 ms olduğu anda plaka merkezinde meydana gelen Von-Misses gerilmesi 243.7 MPa değerinde olmaktadır. (S_2, S_3, S_4) ve (S_1, S_2, S_3, S_4) sınır şartlarında kontak zamanlarının sırasıyla 14.64 ve 14.16 ms olduğu anlarda maksimum Von-Misses gerilme miktarları ise sırasıyla 215.9 ve 181.3 MPa değerine erişmektedir (Şekil 4.43-b).



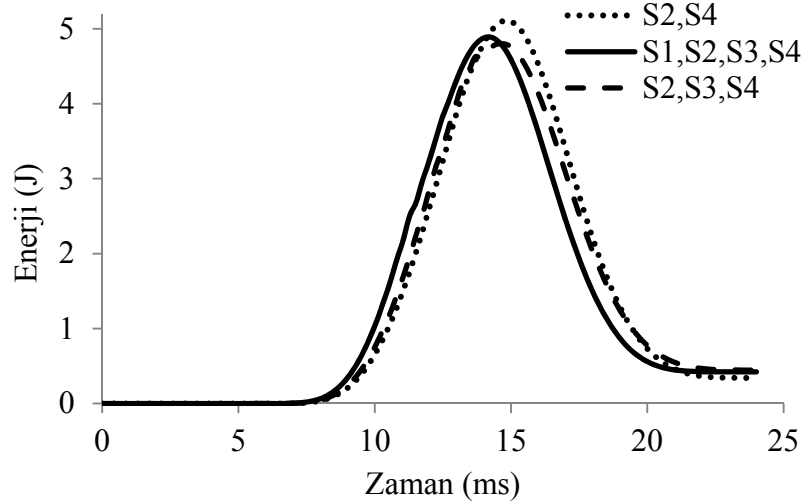
Şekil 4.44. Sınır şartlarının değişimine göre kontak kuvveti-zaman grafiği

Farklı sınır şartlarında plakada meydana gelen kontak kuvveti (reaksiyon kuvveti) Şekil 4.44'de verilmiştir. Kontak kuvveti, 2 (S_2, S_4) ve 4 (S_1, S_2, S_3, S_4) kenarı sabitlenen plakalarda yüksek iken 3 (S_2, S_3, S_4) kenarı sabit olan plakada diğerlerine göre bir miktar daha azdır. Bu durum plak kenarlarının simetrik olarak sabitlenmemesinden olduğu düşünülmektedir. Çünkü darbe yükünün plak yüzeyine dengeli olarak dağıtılmamasından dolayı oluşacak kontak kuvvetinde bir miktar azalma meydana gelecektir.



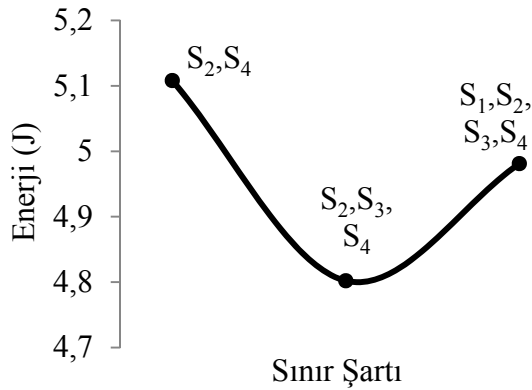
Şekil 4.45. Sınır şartlarının değişiminde maksimum kontak kuvvetleri

Sabitlenen kenar sayılarının 2 (S_2, S_4) ve 4 (S_1, S_2, S_3, S_4), temas zamanının sırasıyla 14.88 ve 14.16 ms olduğu anlarda maksimum kontak kuvveti değerleri eşit ve 2.185 kN'dur. Sabitlenen kenar sayısının 3 (S_2, S_3, S_4) ve temas zamanının 14.64 ms olduğu anda maksimum kontak kuvvet değeri 2.08 kN olmaktadır (Şekil 4.45).



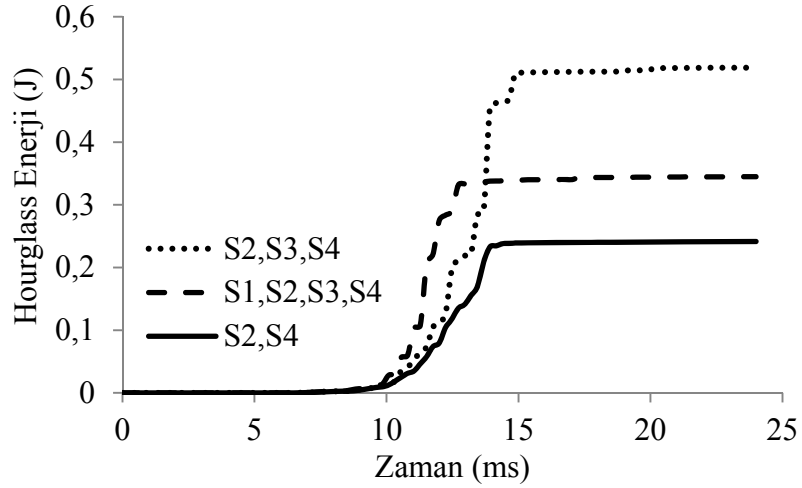
Şekil 4.46. Sınır şartlarının değişimine bağlı olarak enerji-zaman grafiği

Şekil 4.46'ya göre, absorbe edilen enerji miktarı, S_2 ve S_4 kenarı sabit plakada yüksek iken ve sabit kenar sayısı 4 (S_1, S_2, S_3, S_4), ve 3 (S_2, S_3, S_4) olan durumlarda daha azdır. 3 (S_2, S_3, S_4) kenarı sabit olan plakta sabit kenarların simetrik olmamasından dolayı absorbe edilen enerji miktarı, diğer durumlara göre az olmaktadır.



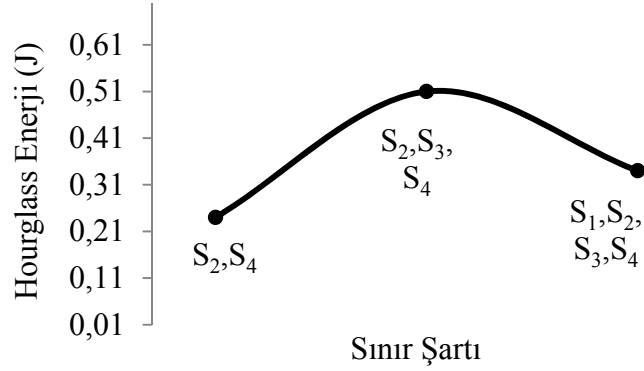
Şekil 4.47. Sınır şartlarının değişiminde maksimum enerji grafiği

Sabitlenen kenar sayılarının 2, 3 ve 4, temas zamanlarının sırasıyla 14.88, 14.64 ve 14.16 ms olduğu anlarda maksimum absorbe edilen enerji miktarları sırasıyla 5.108, 4.802 ve 4.981 J değerlerinde olmaktadır (Şekil 4.47).



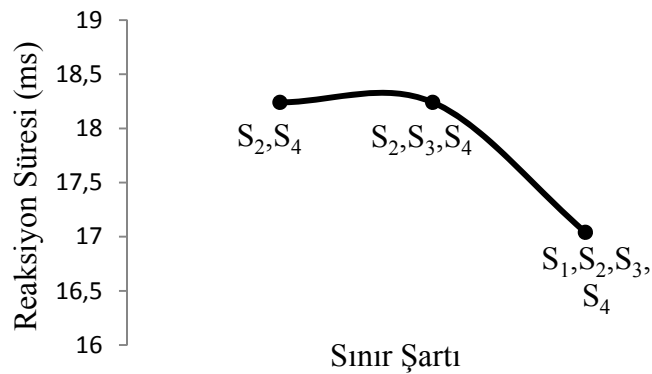
Şekil 4.48. Sınır şartlarının değişimine göre Hourglass enerji-zaman grafiği

Hourglass deformasyon enerjisi, 3 (S_2 , S_3 , S_4) kenarı sabitlenmiş plakta yüksektir, çünkü uygulanan sabit darbe yükü kenarlar arasında paylaştırıldığında bir kenarın sabitlenmemesi, sabitlenen diğer kenarların daha fazla yük taşıyacağını ortaya koymaktadır. Bu durum SEM modelinin zig-zag görünümü almasıyla, Hourglass deformasyon enerji miktarını artırmaktadır (Şekil 4.48). 2 (S_2 , S_4) ve 4 (S_1 , S_2 , S_3 , S_4) kenarı sabitlenen plaklarda vurucunun sahip olduğu darbe enerjisi karşılıklı sabit kenarlar arasında eşit tepki ile karşılanacağından elde edilen Hourglass deformasyon enerjisi daha az olacaktır. Sabitlenen kenar sayısının 4 olduğu durumda plaka daha çok direnç ile karşılaşacağından SEM modelinin çarpılması, 2 kenarı sabitlenen duruma göre fazla olmaktadır. Bu durum Hourglass deformasyon enerji miktarının artışına neden olmaktadır.



Şekil 4.49. Sınır şartlarının değişiminde maksimum Hourglass enerji grafiği

Sabitlenen kanar sayılarının 2, 3 ve 4, temas zamanlarının sırasıyla 16.08, 21.12 ve 17.52 ms olduğu anlarda maksimum Hourglass deformasyon enerji değerleri sırasıyla 0.24, 0.51 ve 0.34 J olmaktadır (Şekil 4.49). Diğer parametrelerin (yer değiştirme-Von-Misses-kontak kuvveti-enerji) maksimum değerleri aldığı sürelerde, hourglass deformasyon enerjisi maksimum değer almamaktadır. Bu durumun darbe yükleme ve boşaltma durumunun SEM modelinin deformasyonuna neden olmasından kaynaklandığı tahmin edilmektedir.



Şekil 4.50. Sınır şartlarının değişimine göre reaksiyon süreleri

Farklı sınır şartlarında yapılan analizlerde kontak başlama süresi 5.76 ms'dir. Reaksiyon süresi tüm durumlar için yaklaşık olarak Şekil 4.50'de verilmiştir. Burada ankastre kenar sayısının atışına bağlı olarak reaksiyon süresinin azaldığı görülmektedir.

4.2.5. İzotropik ve anizotropik malzemelerin darbe davranışı

İzotropik malzeme tüm yönlerde aynı mekanik özellik gösteren, anizotropik malzeme ise yöne göre mekanik özellikleri değişen malzemelerdir. Burada, nikel alaşımı, 1018 çeliği, titanyum alaşımı gibi izotropik malzemelerden üretilmiş plakların darbe yüklerine karşı davranışları araştırılmıştır. Bu malzemelerin mekanik özellikleri Çizelge 4.5’de verilmektedir. Aynı şartlarda darbe yüklerine maruz bırakılan plakların analizleri, ANSYS LS-DYNA ile nümerik olarak yapılmıştır.

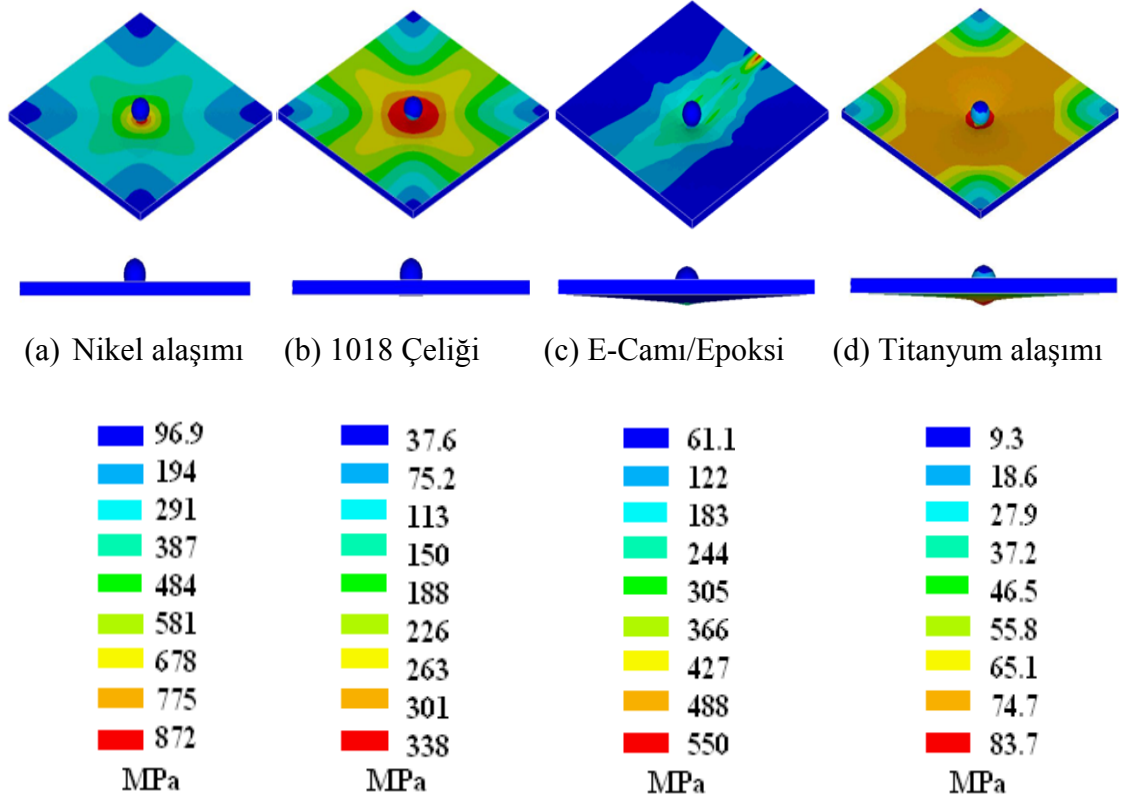
Çizelge 4.5. İzotropik malzemelerin mekanik özellikleri (Gök ve Kişioğlu, 2010)

Özellikler	Titanyum alaşımı	1018 Çeliği	Nikel alaşımı
Elastisite modülü (GPa)	100	200	180
Yoğunluk (kg/ m ³)	4650	7865	8490
Poisson oranı	0.36	0.27	0.31
Akma dayanımı (MPa)	70	310	900
Teğetsel modülü (MPa)	112	763	445

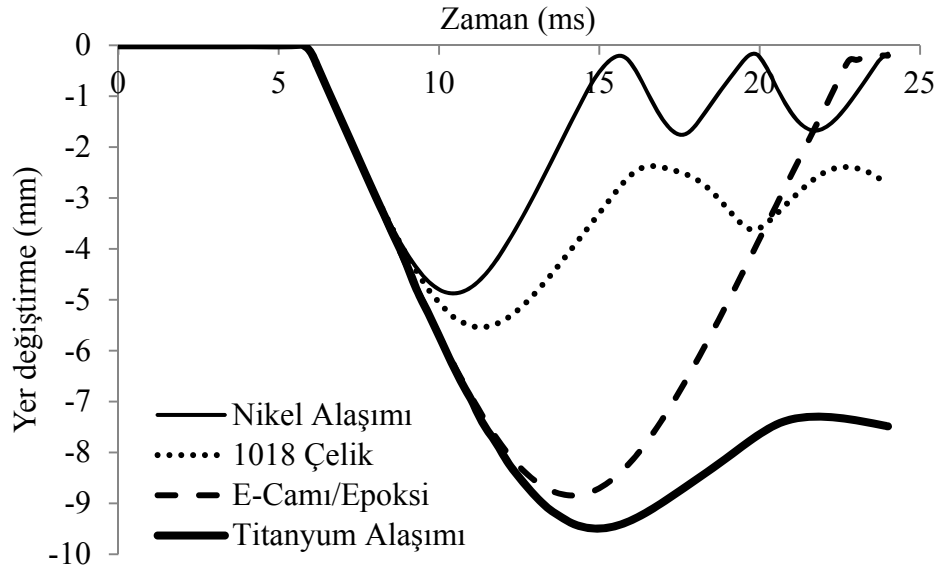
Şekil 4.51’de yukarıda bahsedilen izotropik malzemeler ve kompozit malzemede meydana gelen gerilme dağılımları karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Kompozit malzemenin en üst tabakasındaki gerilme haricinde, izotropik malzemelerde gerilme dağılımı artı işareti şeklinde meydana gelmektedir. Plakaların köşe noktalarında en düşük gerilmeler meydana gelirken, en yüksek gerilme değerleri temas noktasında oluşmaktadır. Nikel alaşımında meydana gelen gerilmeler plaka düzleminde iyi yayılmadığından dolayı, plaka merkezinde daha büyük gerilmelere neden olmaktadır. 1018 çelik malzemesinde ise gerilmeler, nikel alaşımına göre plaka düzlemine daha fazla yayıldığından plak merkezinde oluşan gerilme miktarı nikel alaşımına göre daha az olmaktadır.

$[0^0-90^0]_{10}$ takviye açılı E-Cam/Epoksi tabakalı kompozit plağın en üst tabakasından meydana gelen gerilmeler, elyaf doğrultusunda plak yüzeyinde bir şerit şeklinde

yayıldığı görülmektedir. Plaka merkezinde meydana gelen gerilme değeri nikel alaşımına göre daha az fakat çelik malzemesine göre fazla olmaktadır. Titanyum plakta meydana gelen gerilmeler ise, diğer malzemelere göre, plak düzlemine daha fazla yayıldığından, plak merkezindeki gerilmeler daha küçük değerlerde olmaktadır.

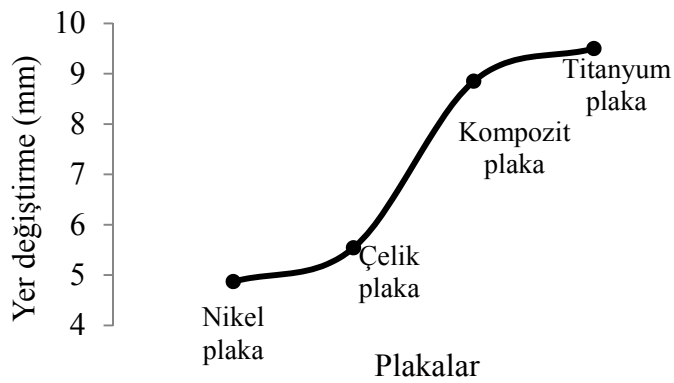


Şekil 4.51. Bazı izotropik ve anizotropik plaklarda gerilme dağılımları



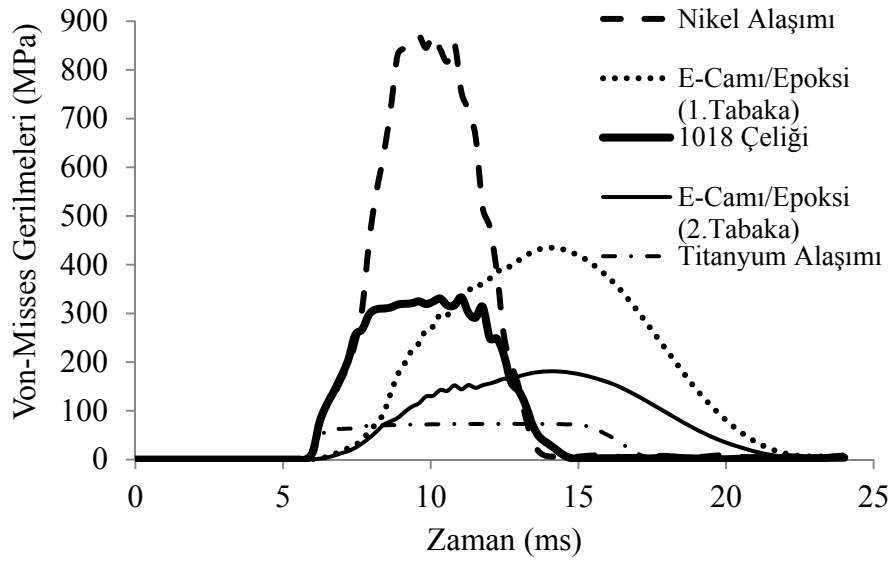
Şekil 4.52. İzotropik ve anizotropik plakalarda yer değiştirme–zaman grafiği

Şekil 4.52’de, bazı plakların yer değiştirme miktarları verilmiştir. Nikel alaşımında, en büyük gerilmeler meydana gelirken, daha küçük yer değiştirmeler meydana gelmektedir. Çelikte ise nikel plağa göre daha küçük gerilmelere karşılık, biraz daha büyük yer değiştirmeler oluşmaktadır. Titanyum plakta, düşük gerilme oluşumlarına karşılık yüksek yer değiştirmeler meydana gelmekte iken, E-Camı/Epoksi kompozit plakta, izotropik malzemelerden farklı olarak yüksek gerilme ve yüksek yer değiştirme meydana gelmektedir. İzotropik malzemelerin yer değiştirmelerindeki sıralama, akma mukavemetindeki sıralamaya benzer şekilde meydana gelmektedir.



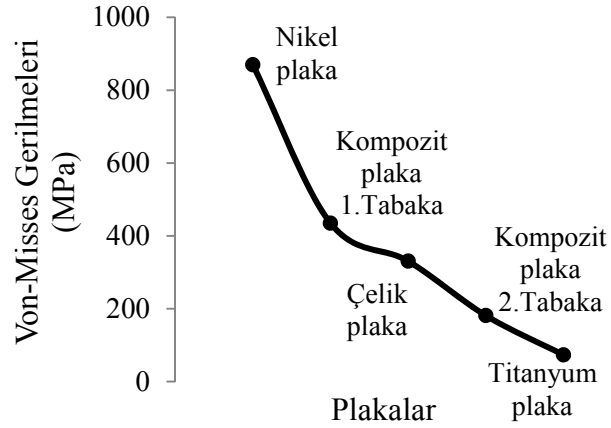
Şekil 4.53. İzotropik ve anizotropik plakalarda maksimum yer değiştirmeler

Nikel plakta, temasın 10.56 ms olduğu anda meydana gelen maksimum yer değiştirme miktarı 4.87 mm, çelik plakta temasın 11.28 ms olduğu anda meydana gelen maksimum yer değiştirme miktarı 5.54 mm ve titanyum plakta ise temasın 14.88 ms olduğu anda meydana gelen maksimum yer değiştirme miktarı 9.5 mm olmaktadır. Kompozit plakta ise temasın 14.16 ms olduğu anda meydana gelen maksimum yer değiştirme miktarı 8.85 mm değerine ulaşmaktadır (Şekil 4.53).



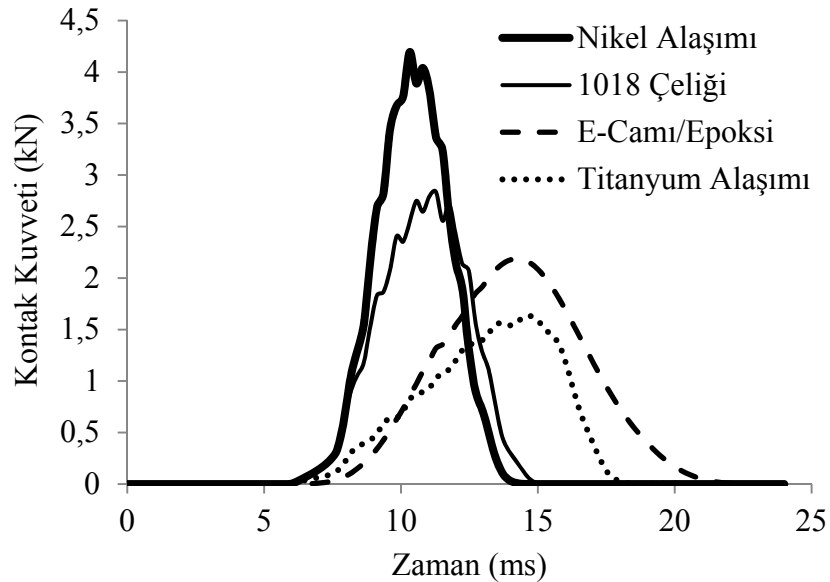
Şekil 4.54. İzotropik ve anizotropik plaklarda Von-Misses–zaman grafiği

Şekil 4.54’de, darbe yüküne maruz değişik malzemelerden imal edilmiş plaklarda, plak merkez düğümünde meydana gelen VonMisses gerilmeleri görülmektedir. Kompozit plakta, kontak zamanının 14.16 ms olduğu anda 1. ve 2. tabakada meydana gelen maksimum Von-Misses gerilmeleri sırasıyla 434.8 ve 181.3 MPa değerlerinde olmaktadır. Nikel, çelik ve titanyum plakalarda temas zamanlarının sırasıyla 9.6, 10.32 ve 12 ms olduğu anlarda meydana gelen maksimum Von-Misses gerilmeleri sırasıyla 869.8, 330.6 ve 73.2 MPa değerlerine ulaşmaktadır (Şekil 4.55).

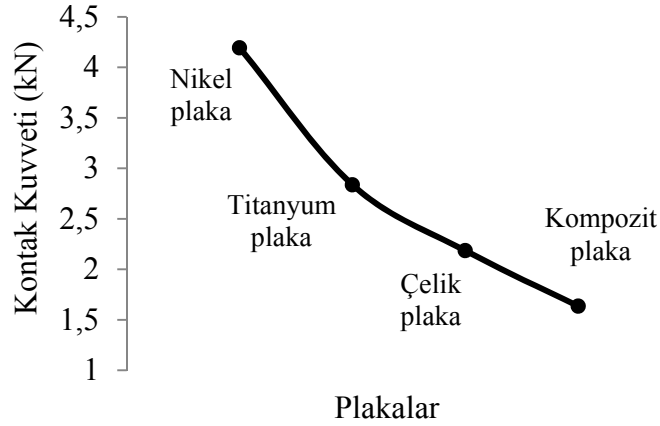


Şekil 4.55. İzotropik ve anizotropik plakalarda maksimum gerilmeler

Buradan, plak düzlemlerinde, gerilmeler ne kadar çok fazla dağılım gösteriyorsa plak merkezlerinde meydana gelen gerilme yığılmaları, o ölçüde azalma göstermektedir. Şekil 4.51-d'de titanyum alaşımı, gerilmeleri plak düzlemine daha iyi yaydığı için plak merkezindeki gerilme miktarı diğer malzemelere göre daha küçük olmaktadır (Şekil 4.55).

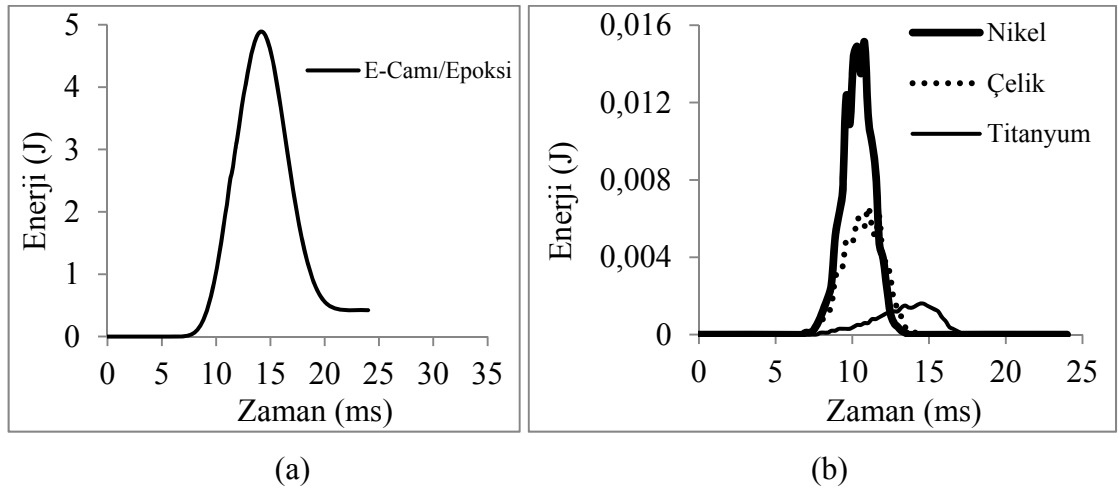


Şekil 4.56. İzotropik ve anizotropik plaklarda kontak kuvveti–zaman grafiği



Şekil 4.57. İzotropik ve anizotropik plakalarda maksimum kontak kuvvetleri

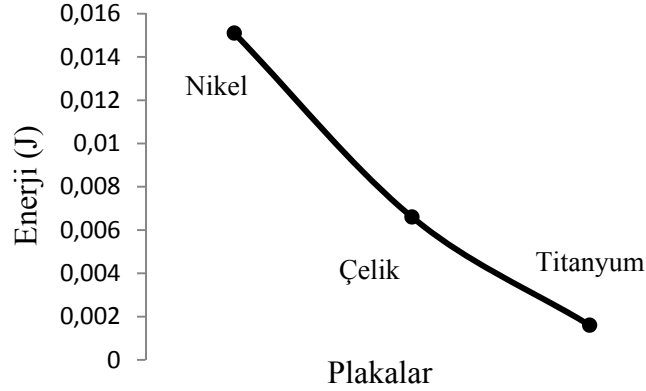
Şekil 4.56'da, nikel, çelik, titanyum ve kompozit plakalarda, temasın sırasıyla 10.32, 14.16, 11.28 ve 14.64 ms olduğu anlarda meydana gelen maksimum kontak kuvvetleri sırasıyla 4.194, 2.185, 2.836 ve 1.635 kN değerlerinde olmaktadır (Şekil 4.57). Buradaki kontak kuvvetindeki değişimler, gerilme dağılımlarındaki değişime benzerlik göstermektedir.



Şekil 4.58. İzotropik ve anizotropik plaklarda enerji-zaman grafiği

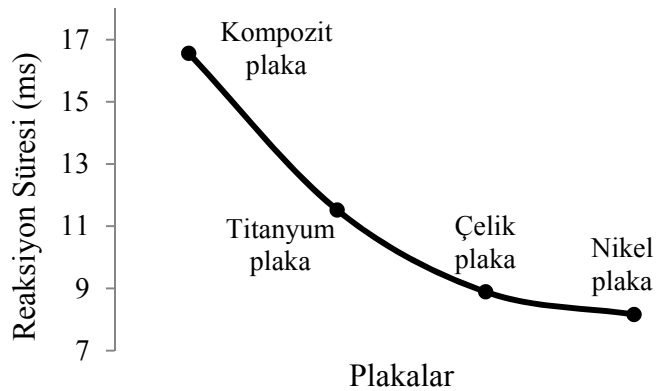
Şekil 4.58'de, izotropik ve anizotropik malzemenin darbe yüklemesi durumunda absorbe ettiği enerji miktarlarının zamana bağlı değişimi verilmiştir. Plakaların mekanik

özellikleri, enerji absorblama yeteneklerinin de farklı olmasına neden olmaktadır. İzotropik plakalardaki enerji değişimi, kontak kuvvetinin değişimiyle benzerlik göstermektedir (Şekil 4.58-b). Şekil 4.58-a'da, izotropik plakların absorbe ettiği enerji miktarları, kompozit plağa göre çok küçük değerlerde olduğu görülmektedir.



Şekil 4.59. İzotropik ve anizotropik plakalarda maksimum enerji miktarları

Kompozit plağın, temasın 14.16 ms olduğu anda absorbe ettiği enerji miktarı 4.891 J'dür. Nikel, çelik ve titanyum plakalar ise temasın sırasıyla 10.18, 11.04 ve 14.4 ms olduğu anlarda absorbe ettikleri enerjiler sırasıyla 0.0151, 0.0066 ve 0.0016 J değerinde olmaktadır (Şekil 4.59).



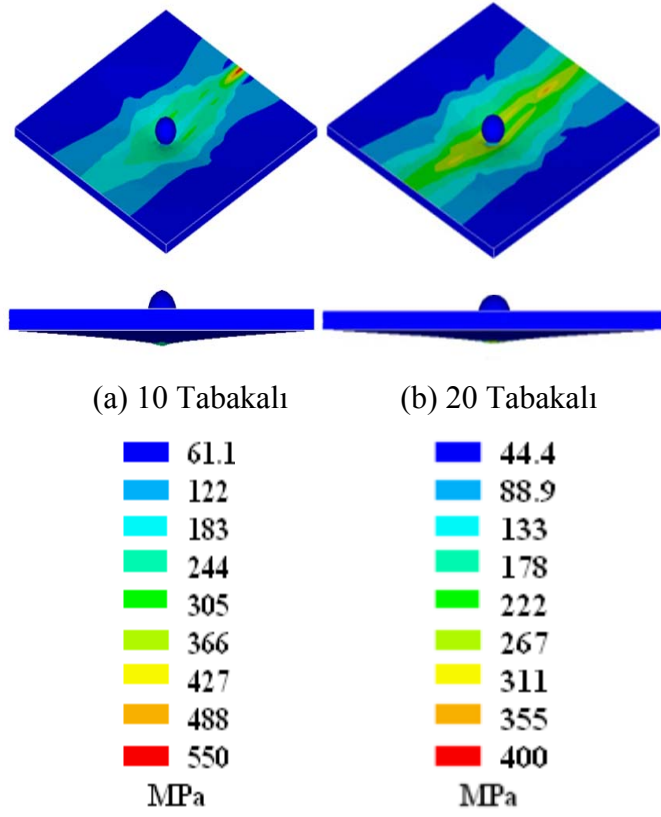
Şekil 4.60. İzotropik ve anizotropik plakalarda reaksiyon süreleri

Şekil 4.60'a bakıldığında, tüm malzemeler reaksiyon süresi bakımından farklılık arz etmektedir. Kompozit plaka, titanyum alaşımı, 1018 çeliği ve nikel alaşımının reaksiyon süreleri sırasıyla 16.56 ms, 11.52 ms, 8.89 ms ve 8.16 ms olmaktadır. Buradan, plakalara uygulanan darbe yüklerinin plaka yüzeyinde yayılma durumuna bağlı olarak, kontak sürelerini ve plak merkezindeki gerilme miktarlarını değiştirdiği görülmektedir.

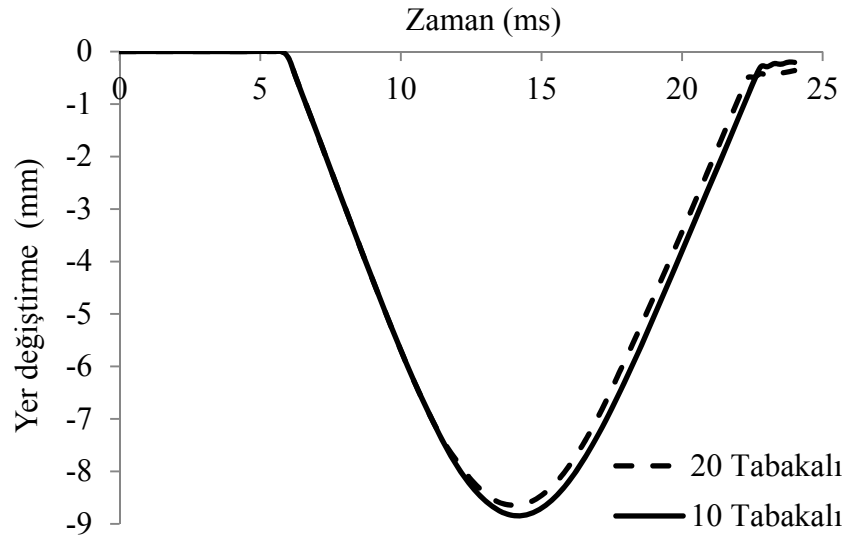
4.2.6. Tabaka sayısının darbe davranışına etkisi

Tabaka sayısının darbe davranışına etkisini incelemek amacıyla 12.7 mm çapında, 5.45 kg kütleli, küresel vurucu ile 10 ve 20 tabakalı $[0^0-90^0]$ takviye açılı, 5.11 mm kalınlıklı, 127×127mm boyutlarındaki kompozit plakalara, 1.35 m/s hızında darbe yükü uygulanmıştır. Kompozit plaka ve vurucunun mekanik özellikleri Çizelge 4.1 ve 4.3'de verilmiştir. Bu verilere göre elde edilen sonuçlar aşağıda değerlendirilmiştir.

Şekil 4.61'de tabaka sayısına bağlı olarak plakta meydana gelen gerilme dağılımları verilmiştir. Kalınlık sabit kalmak şartı ile plaktaki tabaka sayısının artışı, malzemenin rijitliğini artırmakta ve plak yüzeyinde meydana gelen gerilmeler daha küçük değerlerde olmaktadır. Burada, plaklarda meydana gelen yer değiştirme miktarları da tabaka sayısının artışı ile azalmaktadır.

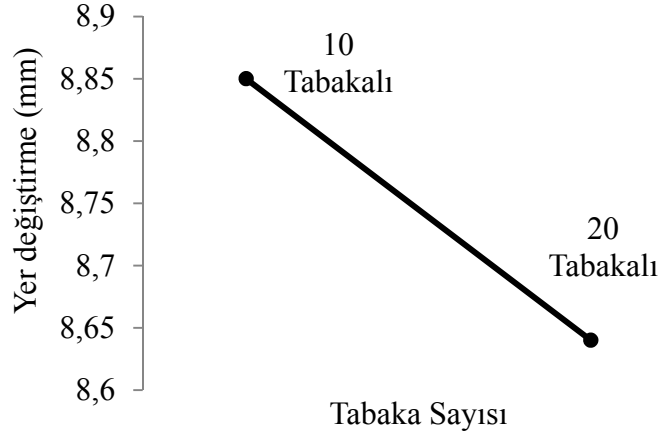


Şekil 4.61. Tabaka sayısının değişimine bağlı olarak gerilme dağılımları



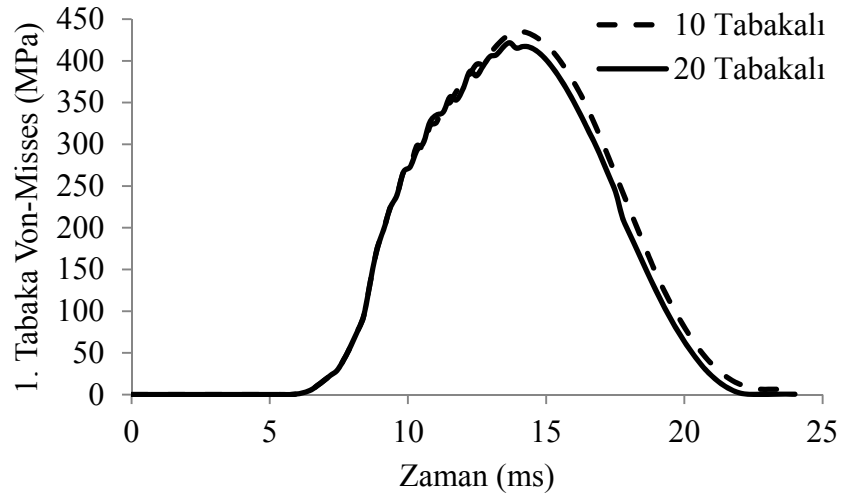
Şekil 4.62. Tabaka sayısının değişimine göre yer değiştirme–zaman grafiği

Plak kalınlığı sabit tutup, tabaka sayısını artışıyla birim hacimdeki takviye malzemesinin oranı artığından plağın rijitliği de artmaktadır. Bundan dolayı kompozit plakta yer değiştirme miktarında da azalma meydana gelmektedir (Şekil 4.62).

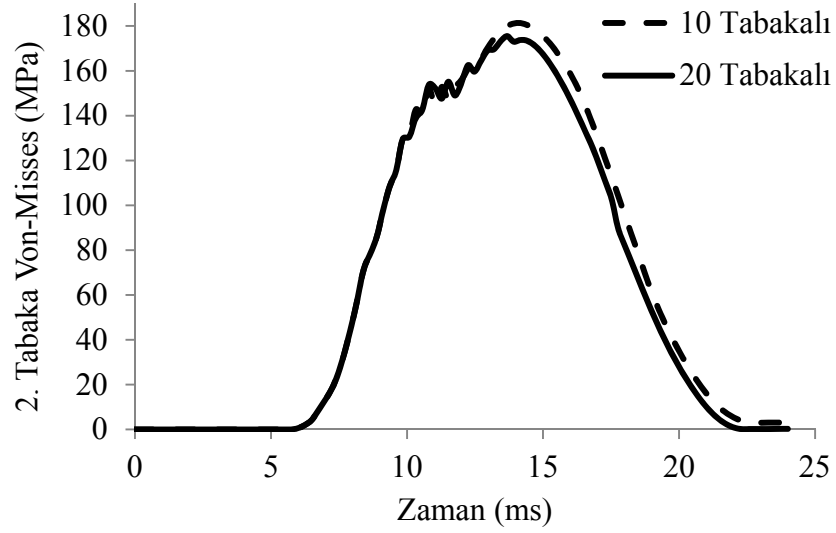


Şekil 4.63. Tabaka sayısının değişiminde maksimum yer değiştirme grafiği

Şekil 4.63'te, 10 tabakalı plakta temas zamanının 14.16 ms olduğu anda meydana gelen maksimum yer değiştirme miktarı 8.85 mm iken, tabaka sayısının 20 olduğu durumda ve temas zamanının 13.92 ms olduğu anda maksimum yer değiştirme 8.64 mm değerine ulaşmaktadır.



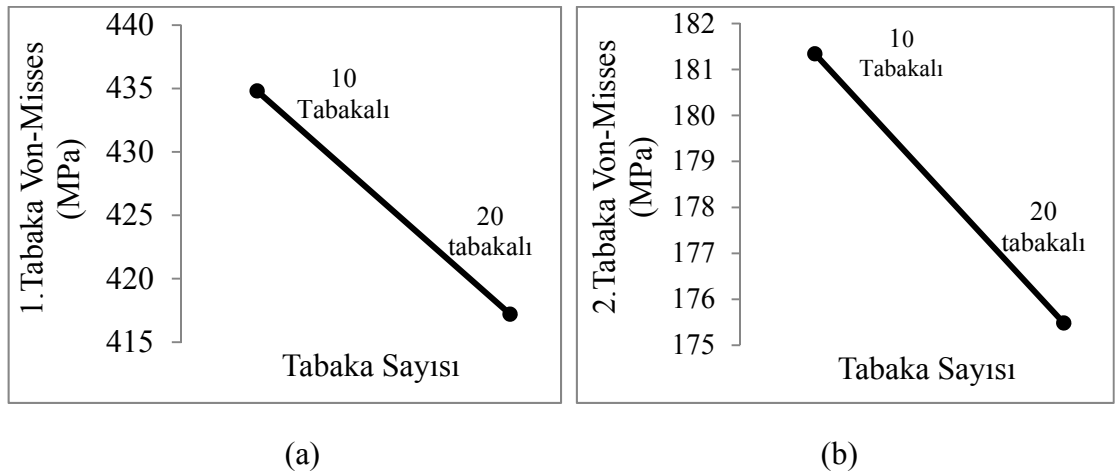
(a)



(b)

Şekil 4.64. Tabaka sayısının değişimine göre Von-Misses – zaman grafiği (a) 1. (b) 2. Tabaka

Şekil 4.64'te, tabaka sayısının artışı ile plak merkezinde meydana gelen Von-Misses gerilme değerlerinin, tabaka sayısının artışı ile birlikte azaldığı görülmektedir. Ayrıca bu gerilme değerleri üst tabakadan bir alt tabakaya geçişte de azalmaktadır. 1. tabakada meydana gelen Von-Misses gerilme değerleri Şekil 4.64-a'da verilmektedir.

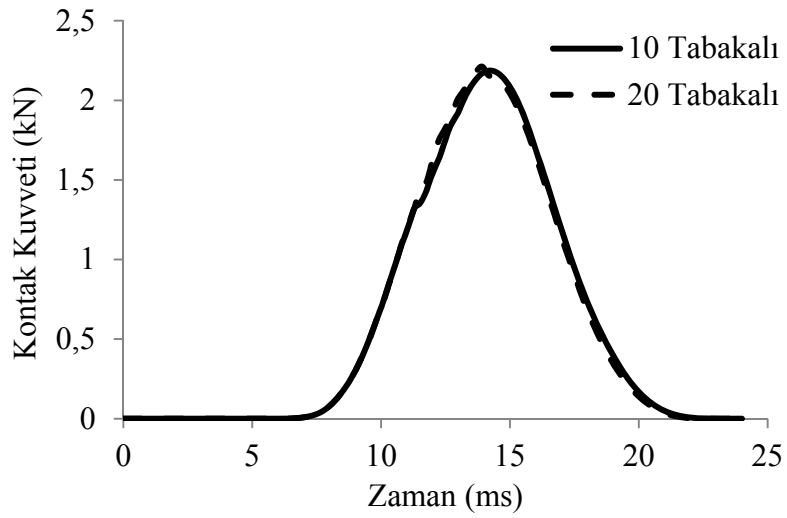


(a)

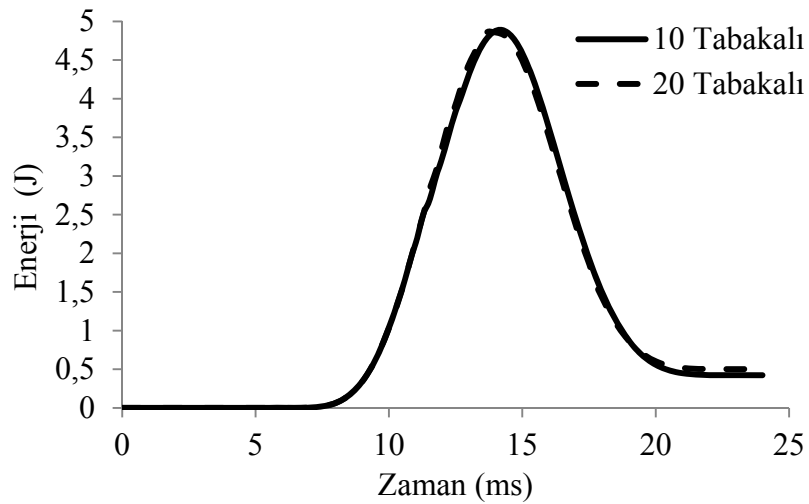
(b)

Şekil 4.65. Tabaka sayısının değişiminde maksimum Von-Misses gerilmeleri

Burada, tabaka sayısının 10 ve 20 olduğu durumlarda ve kontak zamanının 14.16 ms olduğu anda maksimum Von-Misses gerilmeleri sırasıyla 434.8 ve 417.2 MPa değerinde olmaktadır (Şekil 4.65-a). 2. Tabakada ise tabaka sayısının 10 ve 20 olduğu durumlarda ve kontak zamanının sırasıyla 14.16 ve 13.68 ms olduğu anlarda maksimum 2. Tabakadaki Von-Misses gerilmeleri sırasıyla 181.34 ve 175.48 MPa değerlerine ulaşmaktadır (4.65-b). 2. tabakada meydana gelen gerilme değerleri, 1. tabakadaki gerilme değerlerine göre yaklaşık olarak % 58 oranında azalmaktadır.

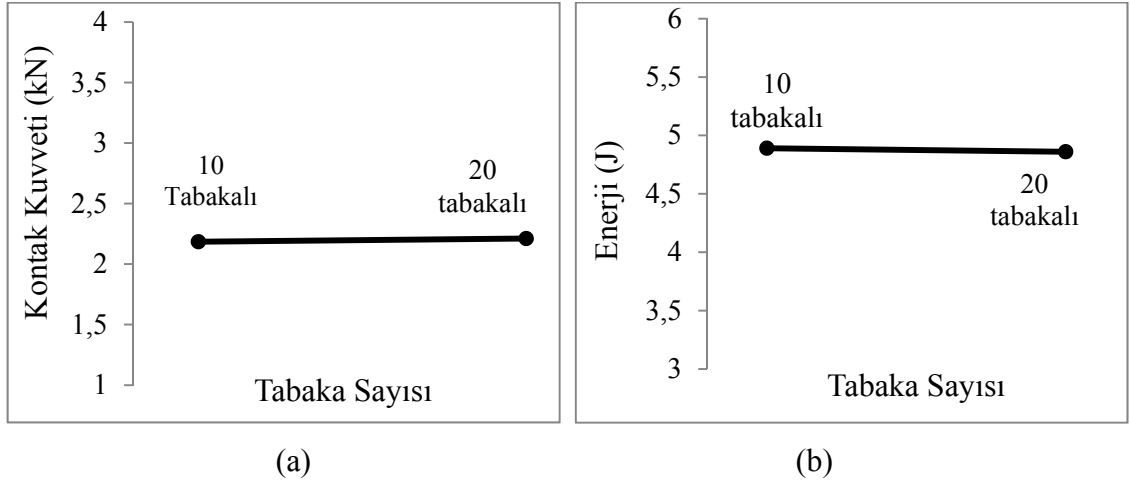


Şekil 4.66. Tabaka sayısının değişimine göre kontak kuvveti – zaman grafiği



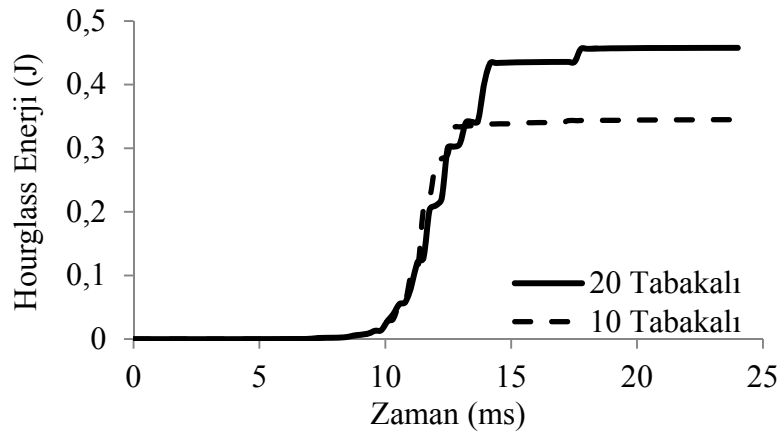
Şekil 4.67. Tabaka sayısının değişimine göre enerji – zaman grafiği

Şekil 4.66 ve Şekil 4.67’de tabaka sayısının değişimine bağlı olarak meydana gelen kontak kuvveti ve absorblanan enerji değişimleri verilmektedir. Burada, tabaka sayısının artmasıyla, kontak kuvveti ve absorblanan enerji miktarlarının hemen hemen hiç değişmediği görülmektedir.



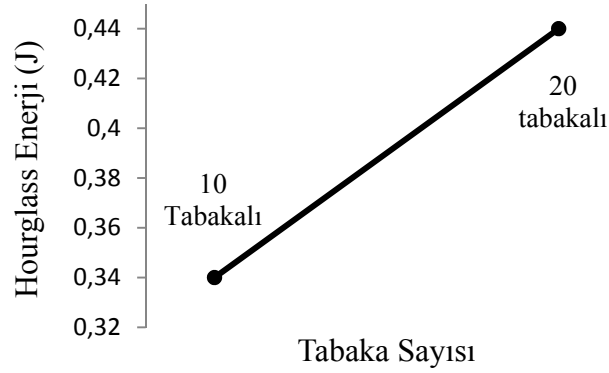
Şekil 4.68. Tabaka sayısının değişiminde maksimum kontak kuvveti/enerji

Tabaka sayısının 10 ve 20, temasın sırasıyla 14.16 ve 13.92 ms olduğu anlarda maksimum kontak kuvveti sırasıyla 2.185 ve 2.212 kN değerlerine ulaşmaktadır (Şekil 4.68-a). Tabaka sayısının 10 ve 20, temasın sırasıyla 14.16 ve 13.92 ms olduğu anda absorbe edilen maksimum enerjiler ise sırasıyla 4.89 ve 4.86 J değerlerinde olmaktadır (Şekil 4.68-b).



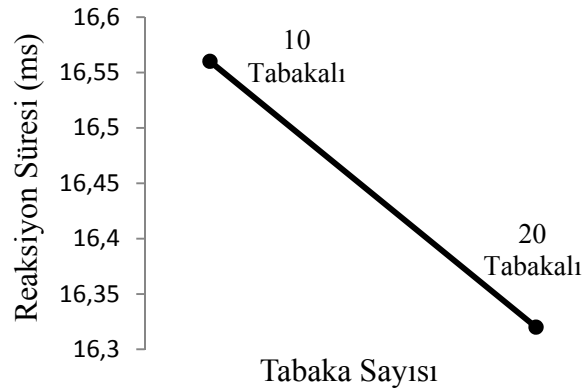
Şekil 4.69. Tabaka sayısının değişimine göre Hourglass enerji – zaman grafiği

Tabaka sayısının artışıyla plakta meydana gelen Hourglass enerji değişimi Şekil 4.69’da verilmiştir. Burada, tabaka sayısının artışıyla SEM modelinin zig-zag görünümü alması için daha çok Hourglass deformasyon enerjisi meydana gelmektedir.



Şekil 4.70. Tabaka sayısının değişiminde maksimum Hourglass enerji grafiği

Tabaka sayısının 10 olduğu ve temas zamanının 15.36 olduğu anda meydana gelen maksimum Hourglass deformasyon enerjisi 0.34 J değerindedir. Tabaka sayısının 20 olduğu durumda ve temas zamanının 15.36 ms olduğu anda meydana gelen maksimum Hourglass deformasyon enerjisi ise 0.44 J değerinde olmaktadır (Şekil 4.70).

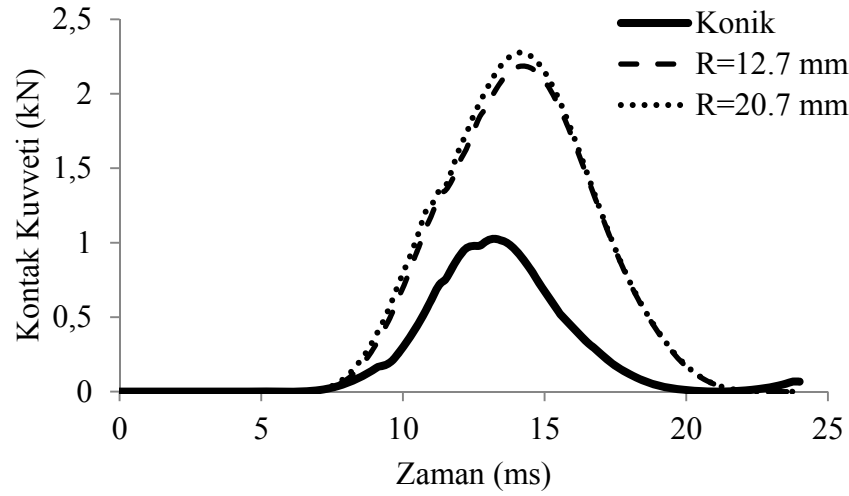


Şekil 4.71. Tabaka sayısının değişiminde reaksiyon süreleri

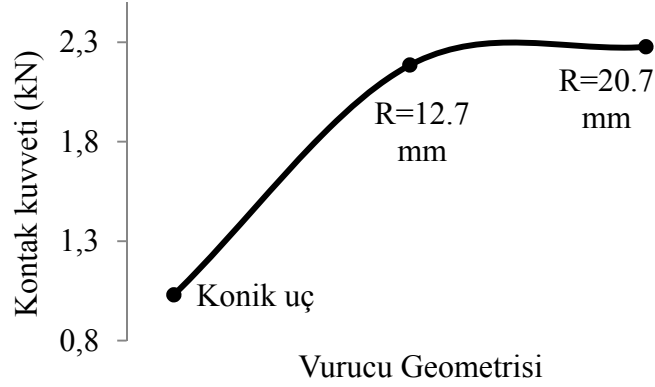
Şekil 4.71’de tabaka sayısının artışıyla reaksiyon süresinde (temas süresi) küçük azalmalar meydana gelmiştir. Burada tabaka sayısının artışının, artan plak rijitliği ile birlikte, darbe yüküne daha kısa zamanda cevap verdiği görülmektedir.

4.2.7. Vurucu geometrisinin darbe davranışına etkisi

Vurucu geometrisinin darbe davranışına etkisini incelemek amacıyla 5.45 kg kütleli, 12.7 ve 20.7 mm çaplarında küresel ve konik tipli uçlar modellenerek, 10 tabakalı, $[0^0-90^0]_{10}$ takviye açılı, 5.11 mm kalınlıklı, 127×127 mm boyutlarındaki plakalara, 1.35 m/s hızında darbe yükü uygulanmıştır. Kompozit malzeme ve vurucunun (impektörün) mekanik özellikleri tablo 4.1 ve 4.3’de gösterilmiştir. Bu veriler neticesinde ANSYS LS-DYNA yazılımı kullanarak yapılan sonlu eleman analizinin sonuçları aşağıda verilmiştir.



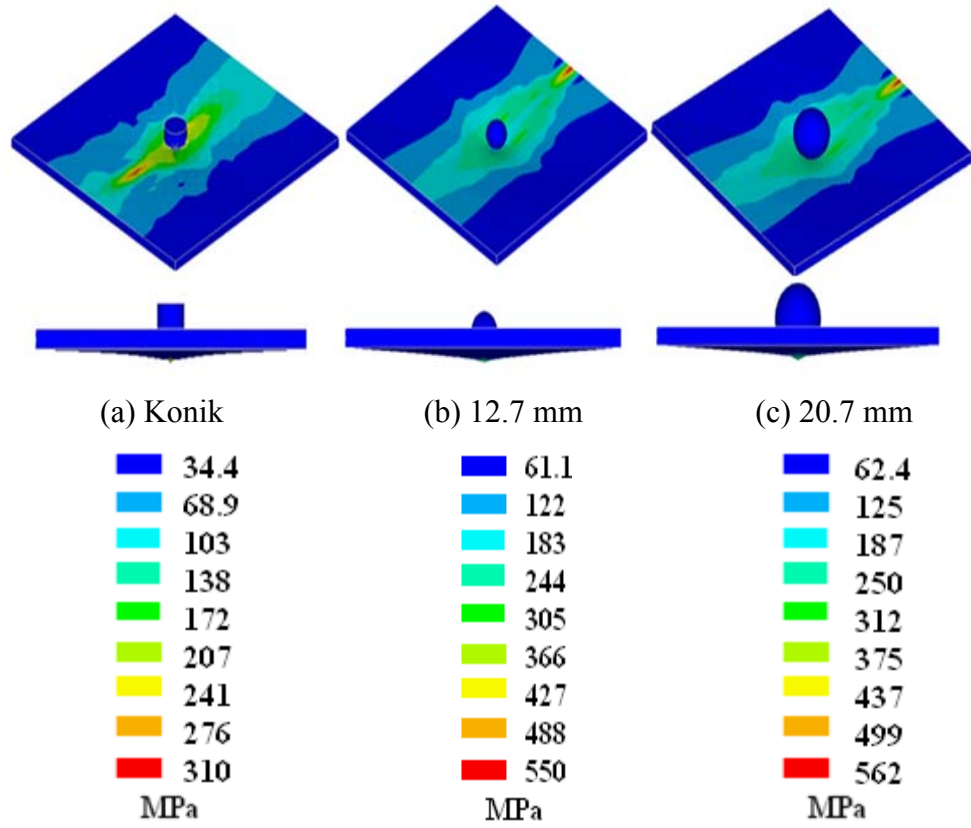
Şekil 4.72. Vurucu geometrisinin değişiminde kontak kuvveti – zaman grafiği



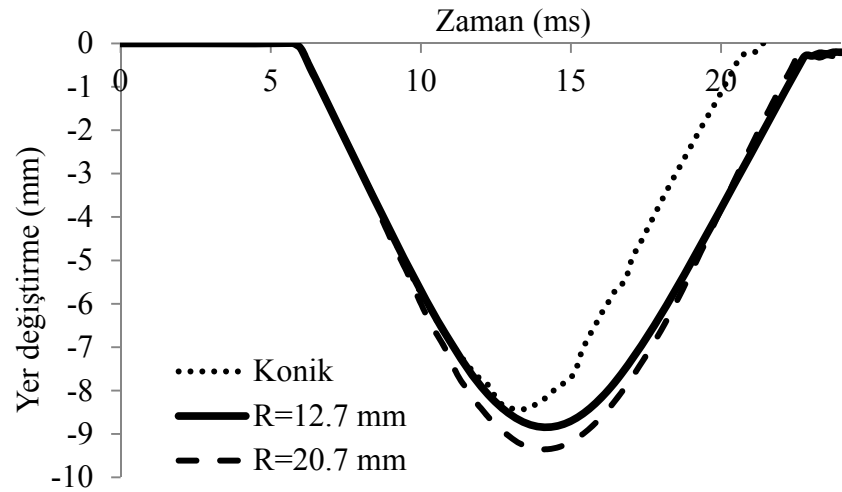
Şekil 4.73. Vurucu geometrisinin değişiminde maksimum kontak kuvvetleri

Şekil 4.72’de, farklı geometrik özelliklere sahip vurucunun meydana getirmiş olduğu kontak kuvveti, temas alanının artışıyla artış göstermektedir (Tiberkak *et al.* 2006). Konik uç ile yapılan çalışmada temas zamanının 13.2 ms olduğu anda maksimum kontak kuvveti 1.03 kN değerinde iken, vurucu çapının 12.7 ve 20.7 mm olduğu ve temas zamanının 14.16 ms olduğu anda maksimum kontak kuvvetleri sırasıyla 2.185 ve 2.277 kN değerlerine ulaşmaktadır (Şekil 4.73).

Şekil 4.74’te farklı geometrilerdeki vurucunun, plaka üzerinde meydana getirmiş olduğu gerilme dağılımı verilmiştir. Şekil 4.72’de görüldüğü gibi kontak kuvvetleri, vurucunun temas ettiği noktadaki yüzey alanı arttıkça artış gösterdiğinden, plaklarda meydana gelen gerilme değerleri de artış göstermektedir (Tiberkak *et al.* 2006).

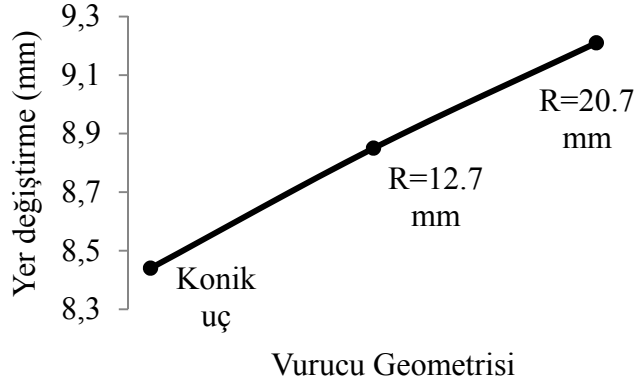


Şekil 4.74. Vurucu geometrisinin değişimine göre gerilme dağılımları



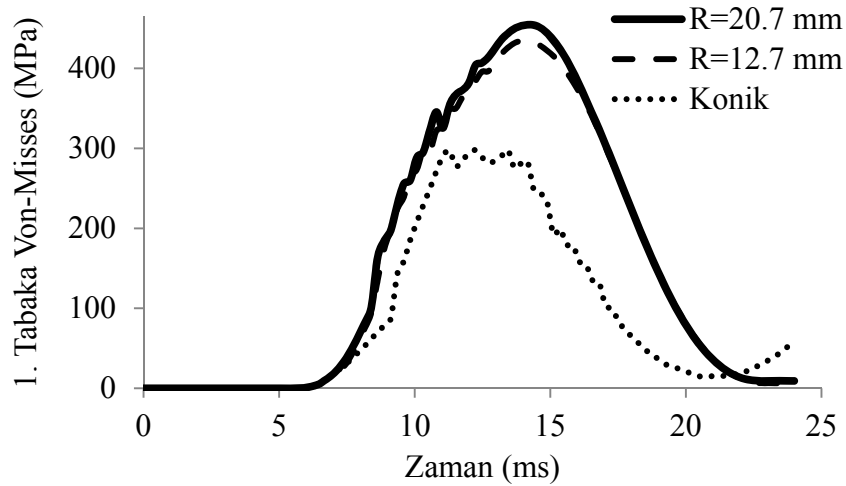
Şekil 4.75. Vurucu geometrisinin değişimine göre yer değiştirme-zaman grafiği

Şekil 4.75’de, vurucu geometrisinin değişiminde meydana gelen yer değiştirme miktarları verilmiştir. Vurucunun plağa temas ettiği alanın artışıyla, plakada meydana gelen yer değiştirme miktarları da artmaktadır.

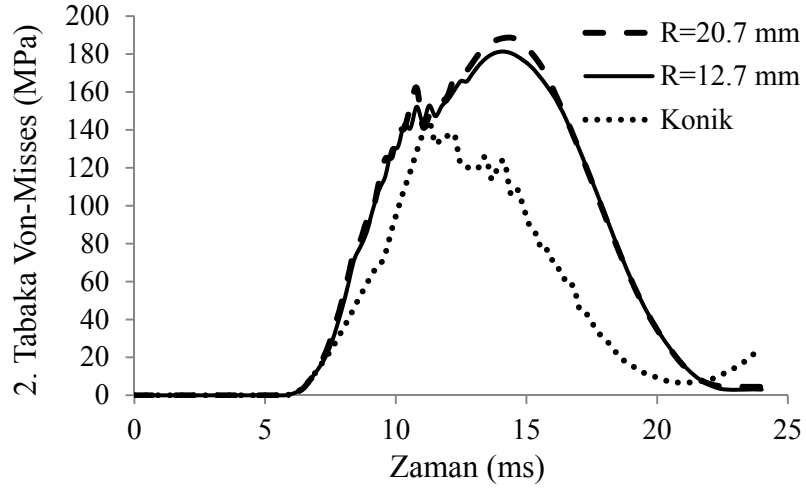


Şekil 4.76. Vurucu geometrisinin değişiminde maksimum yer değiştirmeler

Vurucu geometrisinin konik olduğu ve temas zamanının 13.2 ms olduğu anda maksimum yer değiştirme miktarı 8.44 mm değerindedir. Vurucu çapının 12.7 ve 20.7 mm olduğu ve kontak zamanının 14.16 ms olduğu anlarda maksimum yer değiştirme miktarları sırasıyla 8.85 ve 9.21 mm değerine ulaşmaktadır (Şekil 4.76).



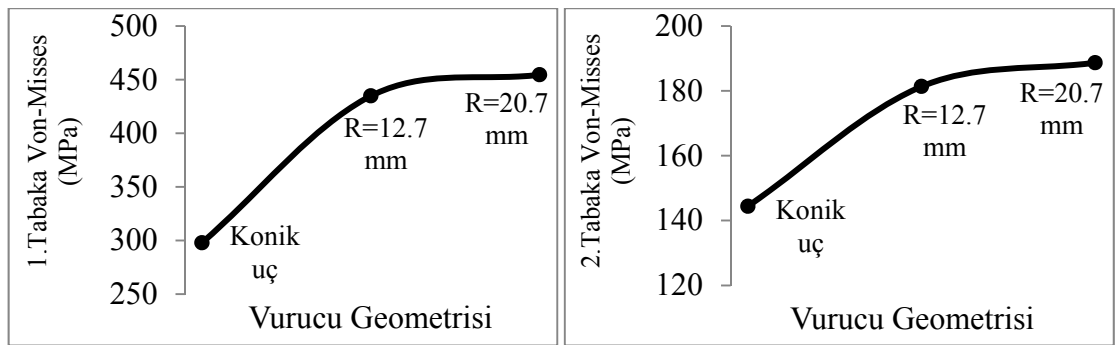
(a)



(b)

Şekil 4.77. Vurucu geometrisinin değişimine göre Von-Misses – zaman grafiği (a) 1. (b) 2. tabaka

Şekil 4.77’de, farklı geometrilerdeki vurucuların plakta oluşturduğu gerilmeler verilmiştir. Konik uçlu vurucunun plak üzerinde meydana getirdiği gerilme değeri, diğer vurucu geometrilerine göre daha az olmakta ve çap artışıyla birlikte plakta meydana gelen gerilme miktarları artmaktadır. Vurucu geometrisinin konik olduğu ve temasın 12.24 ms olduğu anda 1. tabakada meydana gelen maksimum Von-Misses gerilme değeri 297.8 MPa değerindedir. Vurucu çapının 12.7 ve 20.7 mm ve kontak zamanının 14.16 ms olduğu anda 1. tabakada meydana gelen maksimum Von-Misses gerilme değerleri sırasıyla 434.82 ve 454.58 MPa değerlerinde olmaktadır (Şekil 4.78a).

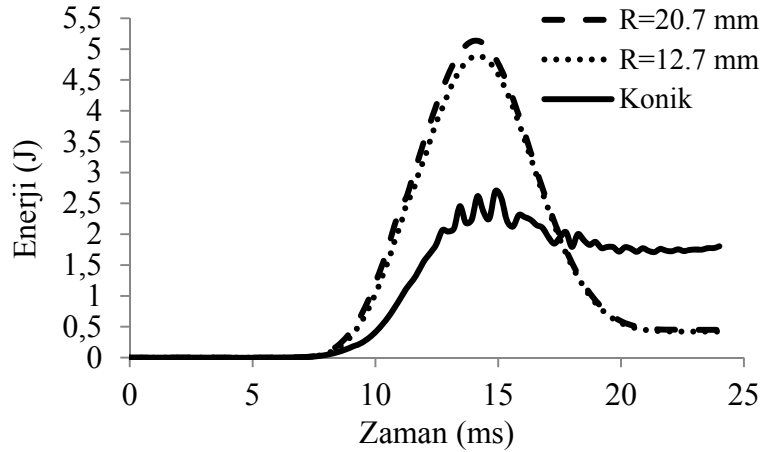


(a)

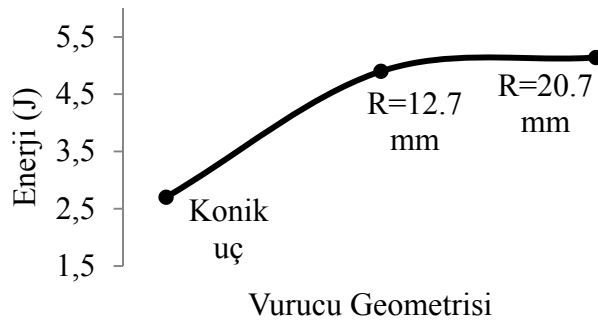
(b)

Şekil 4.78. Vurucu geometrisinin değişiminde maksimum Von-Misses gerilmesi

Şekil 4.78-b’de, 2. tabakada meydana gelen maksimum Von-Misses gerilme değerleri 1. tabakadaki duruma benzer şekilde olmakta ve değerlerinde azalma meydana gelmektedir. Burada, gerilme değerleri tabakadan tabakaya geçişlerde de azalmaktadır. Konik uç kullanıldığında 2. tabakada meydana gelen gerilme değerleri, 1. tabakadaki gerilme değerlerine göre yaklaşık olarak % 51 oranında azalmakta iken diğer vurucu geometrilerinde bu değer yaklaşık olarak % 58 oranında azalmaktadır. Vurucu geometrisinin konik olduğu ve temasın 11.28 ms olduğu anda 2. tabakada meydana gelen maksimum Von-Misses gerilme değeri 144.4 MPa değerindedir. Vurucu çapının 12.7 ve 20.7 mm ve kontak zamanının sırasıyla 14.16 ve 14.4 ms olduğu anlarda 2. tabakada meydana gelen maksimum Von-Misses gerilmeleri sırasıyla 181.33 ve 188.67 MPa değerlerinde olmaktadır (Şekil 4.78-b).

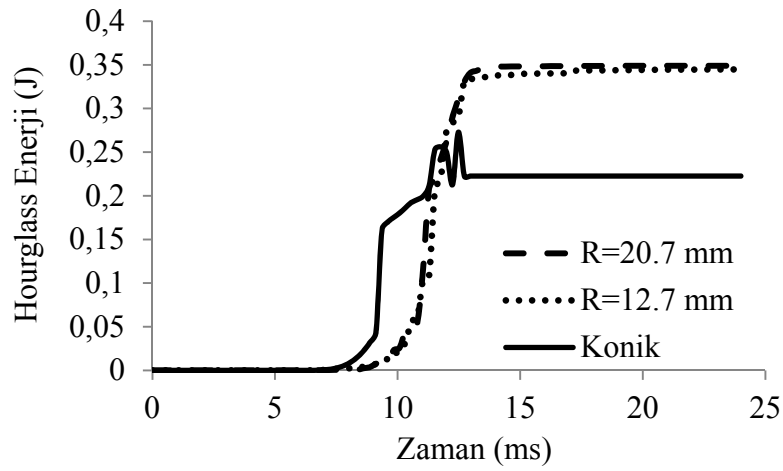


Şekil 4.79. Vurucu geometrisinin değişimine göre enerji– zaman grafiği



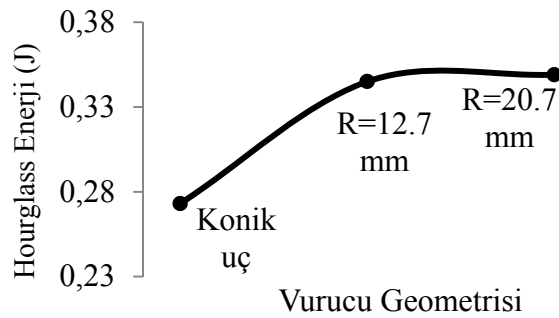
Şekil 4.80. Vurucu geometrisinin değişiminde maksimum enerji grafiği

Şekil 4.79’da plakalarda absorblanan enerji miktarının, kontak kuvvetinin değişimine benzer şekilde, temas alanının artışıyla birlikte arttığı görülmektedir. Konik uç kullanıldığında ve temas zamanının 14.88 ms olduğu anda maksimum absorbe edilen enerji miktarı 2.7 J değerinde iken, vurucu çapının 12.7 ve 20.7 mm olduğu ve temasın 14.16 ms olduğu anda maksimum absorbe edilen enerji miktarları sırasıyla 4.9 ve 5.14 J değerlerine ulaşmaktadır (Şekil 4.80)



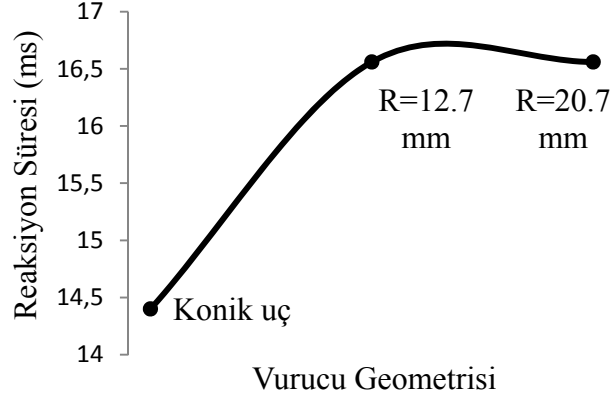
Şekil 4.81. Vurucu geometrisinin değişiminde Hourglass enerji – zaman grafiği

Şekil 4.81’de, vurucunun temas ettiği yüzey alanı arttıkça SEM modelinin zig-zag görünümü alması daha çok olmaktadır. Bu nedenle Hourglass deformasyon enerji miktarında artış görülmektedir.



Şekil 4.82. Vurucu geometrisinin değişimine göre Hourglass enerji grafiği

Konik uç kullanıldığında ve temasın 12.48 ms olduğu anda maksimum Hourglass enerji miktarı 0.273 J değerinde iken, vurucu çapının 12.7 ve 20.7 mm olduğu ve temasın sırasıyla 23.04 ve 20.16 ms olduğu anlarda maksimum Hourglass enerji miktarları sırasıyla 0.345 ve 0.349 J değerlerinde olmaktadır (Şekil 4.82).



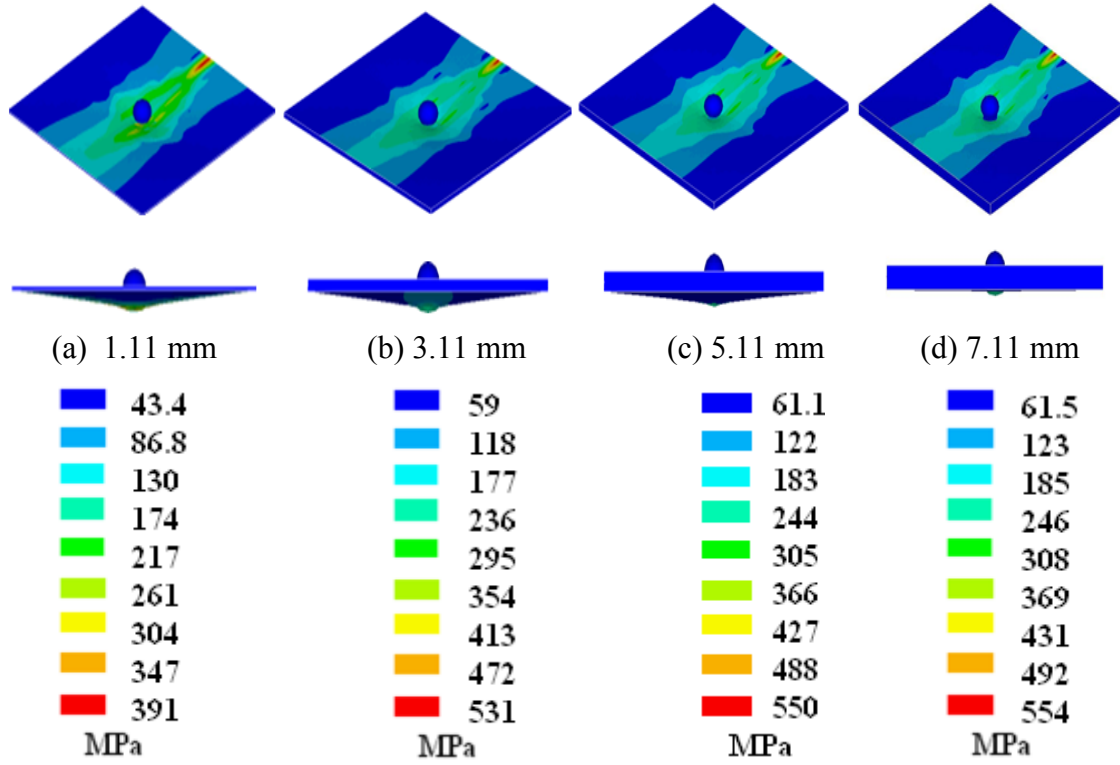
Şekil 4.83. Vurucu geometrisinin değişimine göre reaksiyon süreleri

Şekil 4.83’de görüldüğü üzere, temas alanının artmasıyla reaksiyon süresinde artış görülmektedir.

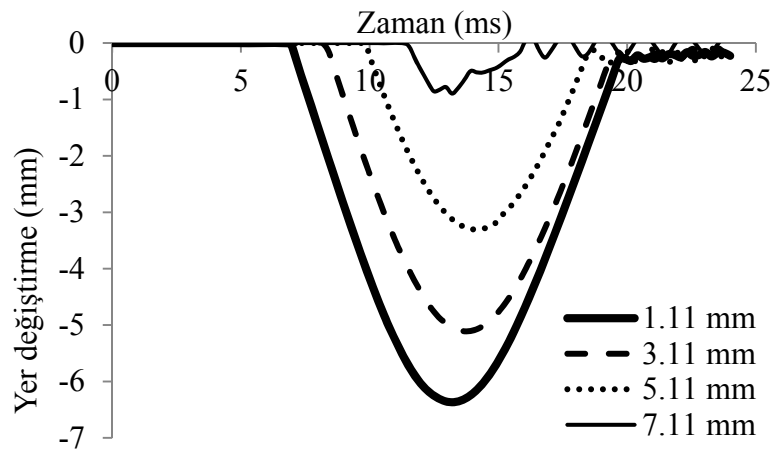
4.2.8. Plaka kalınlığının darbe davranışına etkisi

Plaka kalınlığının darbe davranışına etkisini incelemek amacıyla 12.7 mm çapında, 5.45 kg kütleli küresel vurucu, 10 tabakalı, $[0^0-90^0]_{10}$ takviye açısına sahip, 1.11, 3.11, 5.11 ve 7.11 mm kalınlıklarında, 127×127mm boyutlarındaki ve kare şeklindeki kompozit plakalara 1.35 m/s hızında darbe yükü uygulanmıştır. Kompozit malzeme ve impektörün (vurucu) mekanik özellikleri Çizelge 4.1 ve 4.3’de verilmiştir. Bu verilere göre ANSYS LS-DYNA yazılımı kullanarak yapılan sonlu eleman analizinin sonuçları aşağıda verilmiştir.

Şekil 4.84’de plaka kalınlığının artmasıyla plakaların direnci ve meydana gelen gerilme değerleri artmaktadır. Bundan dolayı kalınlığın artmasıyla yer değiştirme miktarlarında azalma meydana gelecektir.

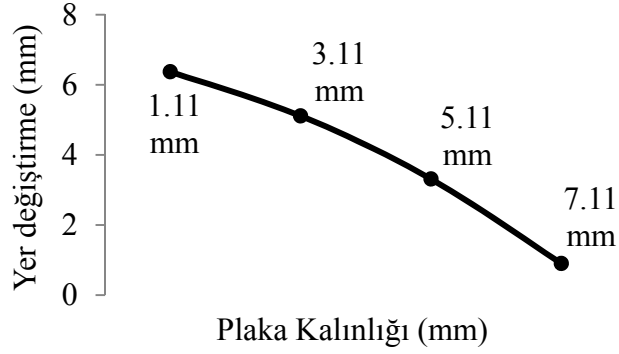


Şekil 4.84. Plaka kalınlığının değişimine göre gerilme dağılımları



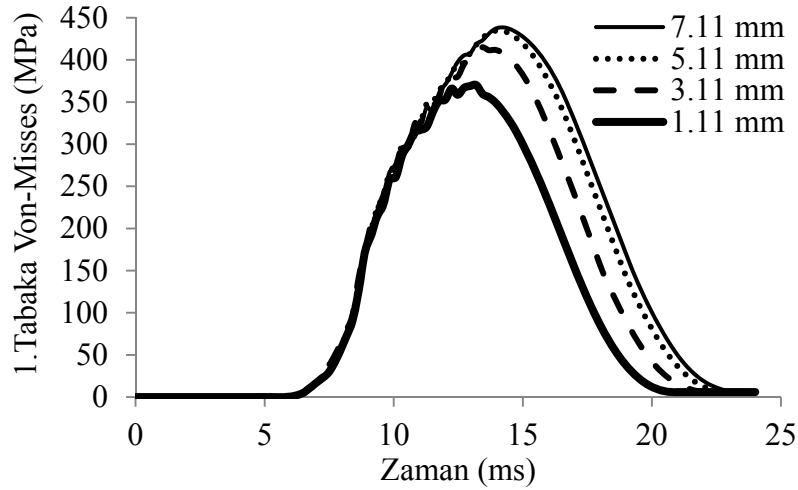
Şekil 4.85. Plaka kalınlığına bağlı olarak yer değiştirme-zaman grafiği

Şekil 4.85’de kalınlık artışı plakanın rijitliği arttığından, plaklarda meydana gelen yer değiştirme miktarında azalma meydana geldiği görülmektedir.

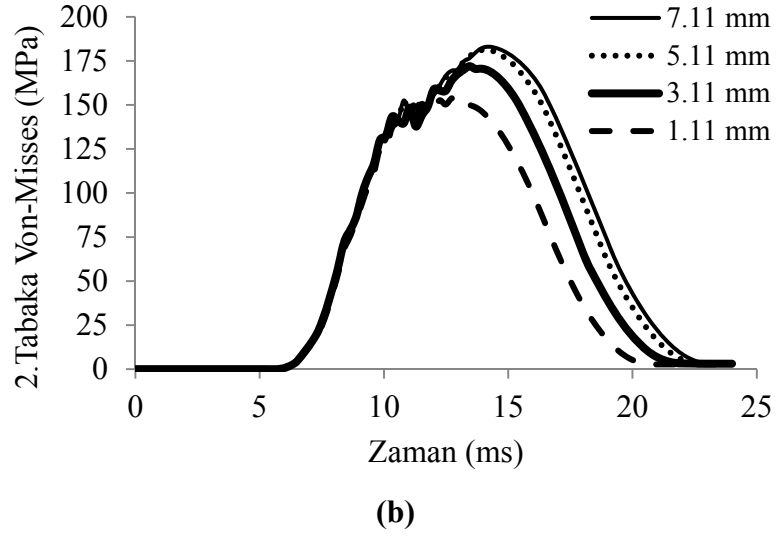


Şekil 4.86. Plaka kalınlığına bağlı olarak maksimum yer değiştirme grafiği

Kalınlığın 1.11, 3.11, 5.11 ve 7.11 mm teması sırasıyla 13.2, 13.68, 14.16 ve 13.2 ms olduğu anlarda meydana gelen maksimum yer değiştirme miktarları sırasıyla 6.37, 5.11, 3.31 ve 0.9 mm değerlerine ulaşmaktadır. Buradaki değerler plakanın alt yüzeyinin merkez düğümünün yer değiştirme miktarlarıdır (Şekil 4.86).

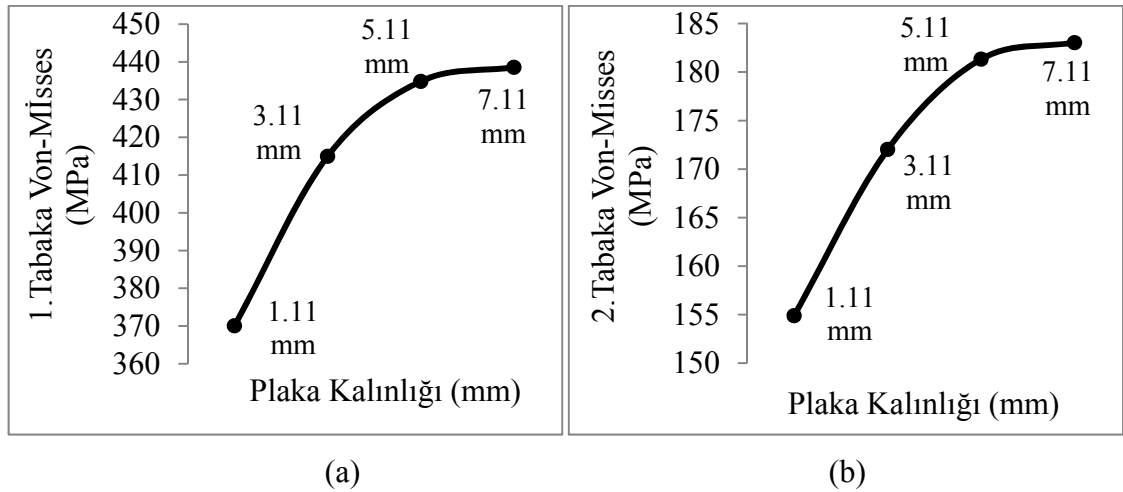


(a)



Şekil 4.87. Plaka kalınlığının değişiminde Von-Misses gerilmesi-zaman grafiği (a)1. (b) 2.Tabaka

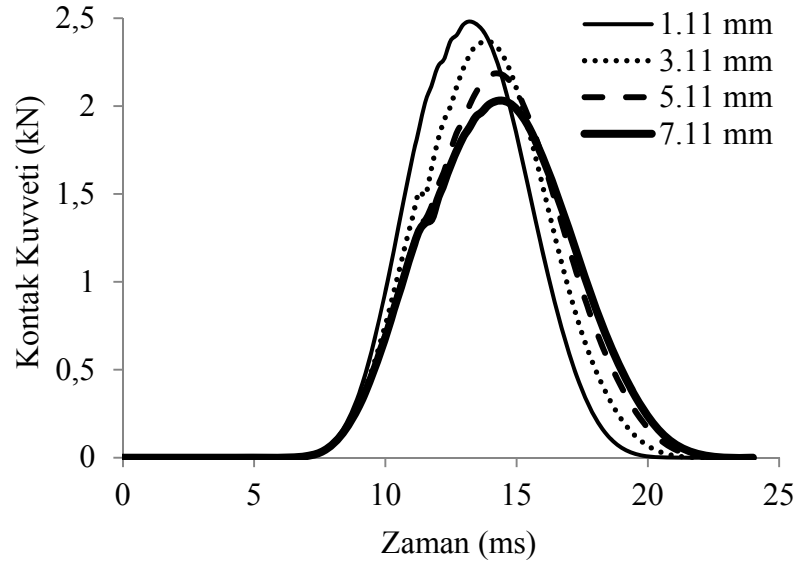
Şekil 4.87’de plaka kalınlığının artışıyla plak merkezinde meydana gelen Von-Misses gerilmeleri verilmiştir. Plâğin 1. ve 2. tabakasında, kalınlık artışıyla gerilmelerde artmaktadır (Şekil 4.87-a-b).



Şekil 4.88. Plaka kalınlığının değişiminde maksimum Von-Misses gerilmeleri

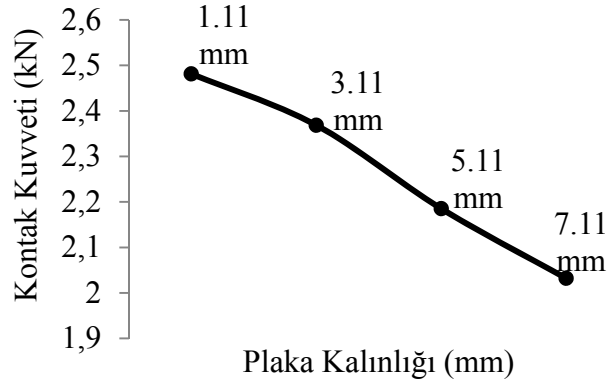
Plâğin 1. tabakasında, kalınlığın 1.11, 3.11, 5.11 ve 7.11 mm ve temasın 13.2, 13.44, 14.16 ve 14.16 ms olduğu anlarda meydana gelen maksimum gerilmeler sırasıyla 370.1,

415, 434.8 ve 438.6 MPa değerlerindedir (Şekil 4.88-a). Plağın 2. tabakasında ise, kalınlığın 1.11, 3.11, 5.11 ve 7.11 mm ve temasın 13.2, 13.44, 14.16 ve 14.16 ms olduğu anlarda meydana gelen maksimum gerilmeler sırasıyla 154.9, 172, 181.3 ve 183 MPa değerlerine ulaşmaktadır (Şekil 4.88-b). Tabaka kalınlığının değişimiyle birlikte, üst tabakalardan orta tabakalara doğru gerilme miktarı azalmakta ve 2. tabakada meydana gelen gerilme değerleri, 1. tabakadaki gerilme değerlerine göre yaklaşık olarak %58 azaldığı görülmektedir.



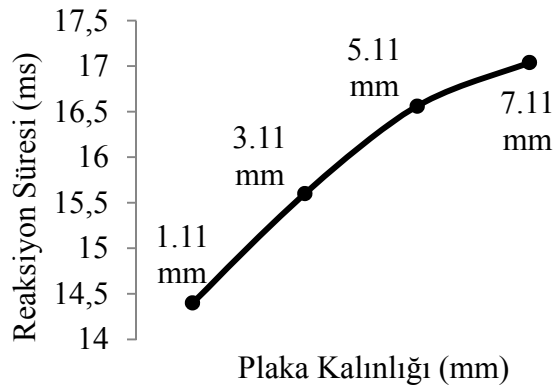
Şekil 4.89. Plaka kalınlığının değişimine göre kontak kuvveti-zaman grafiği

Plaka kalınlığının artmasıyla, plakta meydana gelen kontak kuvvetleri azalmaktadır. Burada, kalınlık boyunca nüfuziyetin, kontak kuvvet değerinde azalmaya neden olduğu düşünülmektedir (Şekil 4.89).



Şekil 4.90. Plaka kalınlığının değişimine göre maksimum kontak kuvvetleri

Kalınlığın 1.11, 3.11, 5.11 ve 7.11 mm ve temasın 13.2, 13.92, 14.16 ve 14.4 ms olduğu anlarda meydana gelen maksimum kontak kuvvetleri sırasıyla 2.481, 2.369, 2.185 ve 2.032 kN değerlerine ulaşmaktadır (Şekil 4.90).

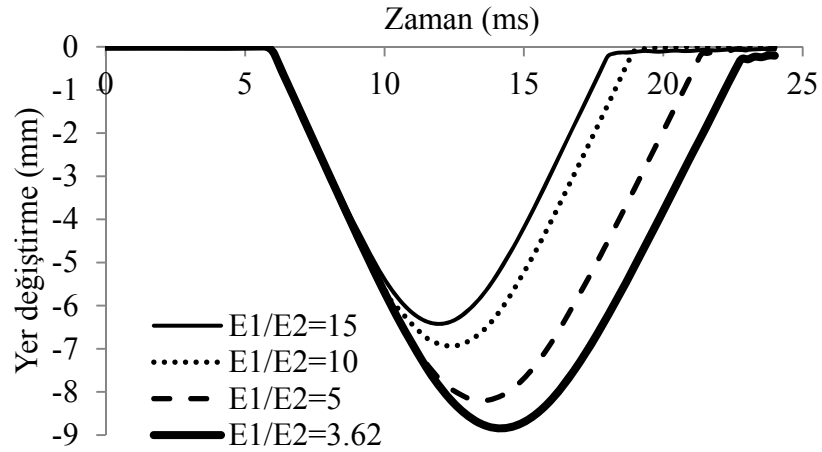


Şekil 4.91. Plaka kalınlığının değişiminde reaksiyon süreleri

Şekil 4.91’de plak kalınlığının değişiminde darbe reaksiyon süresinin kalınlığa bağlı değişimi verilmiştir. Kalınlık artışı ile birlikte nüfuziyet zamanının arttığı görülmektedir.

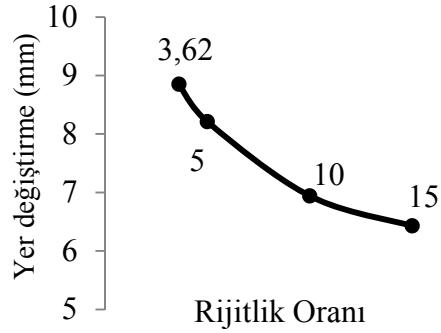
4.2.9. E_1 / E_2 Rijitlik oranının darbe davranışına etkisi

Kompozit plaklarda rijitlik oranları (E_1/E_2) kompozitin mekaniği üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu literatürden görülmektedir. Bu çalışmada, E_2 sabit tutulup, E_1 'nin değeri artırılarak, elde edilen E_1/E_2 rijitlik oranının darbe davranışına etkisini incelemiştir. Bu amaçla 12.7 mm çaplı, 5.45 kg kütleli küresel vurucu kullanılarak, $[0^0-90^0]_{10}$ çapraz takviyeli, 5.11 mm kalınlıklı, 127×127 mm boyutlarındaki kompozit plaklara 1.35 m/s hızında darbe yükü uygulanmıştır. Kompozit malzeme ve vurucunun mekanik özellikleri Çizelge 4.1 ve 4.3'de gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.



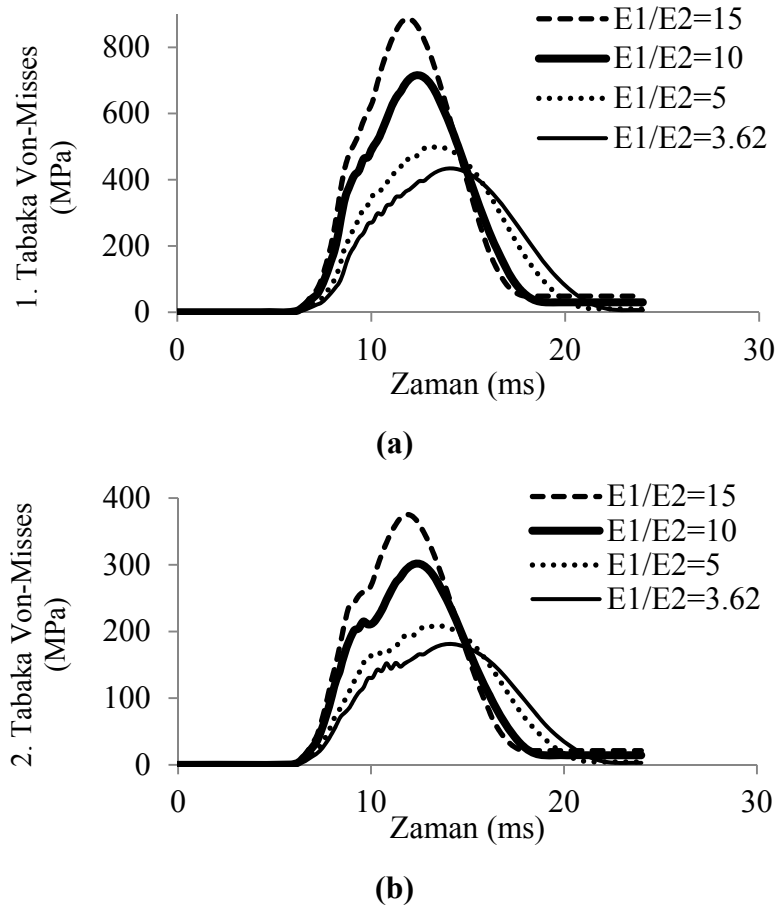
Şekil 4.92. Rijitlik oranının değişimine göre yer değiştirme- zaman grafiği

E_1/E_2 rijitlik oranının değişimine bağlı olarak kompozit plakada meydana gelen yer değiştirmeler Şekil 4.92'de verilmiştir. Malzemenin rijitlik oranının artmasıyla birlikte rijitliğinin artması, yer değiştirme miktarını azalmaktadır.



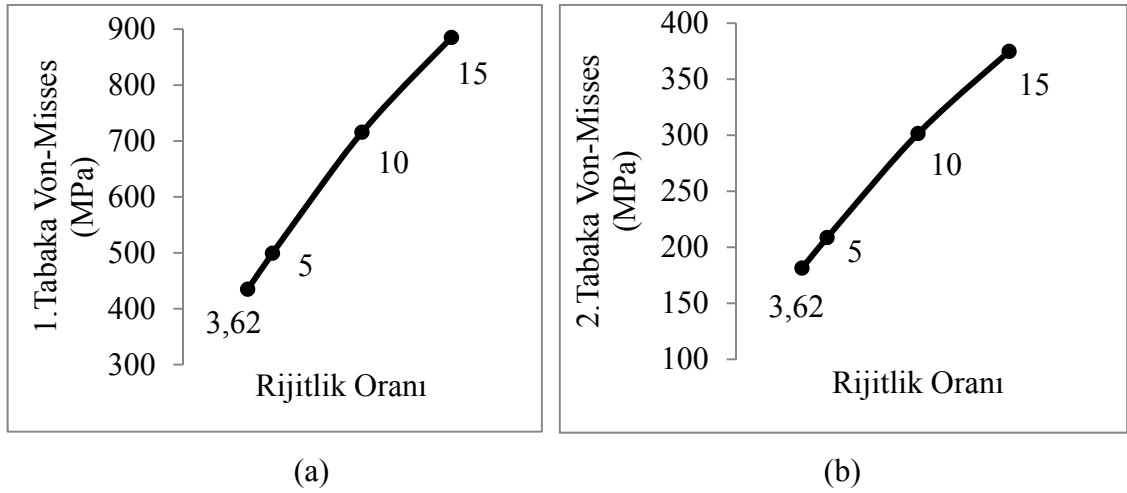
Şekil 4.93. Rijitlik oranının değişimine göre maksimum yer değiştirme grafiği

Rijitlik oranlarının 3.62, 5, 10 ve 15 ve temasın sırasıyla 14.16 ms, 13.44 ms, 12.48 ve ms, 12 ms, olduğu anlarda meydana gelen maksimum yer değiştirme değerleri sırasıyla 8.85 mm, 8.21 mm, 6.94 mm ve 6.43 mm olduğu görülmektedir (Şekil 4.93).



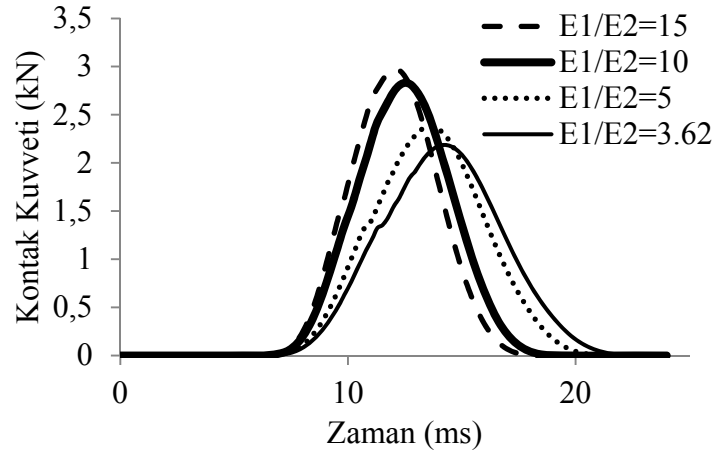
Şekil 4.94. Rijitlik oranının değişimine göre Von-Misses – zaman grafiği

Şekil 4.94'de E_1 / E_2 rijitlik oranının değişimine bağlı olarak Von-Misses gerilme değişimleri verilmiştir. Meydana gelen gerilme değişimleri, E_1/E_2 rijitlik oranının artmasıyla, hem 1.tabakada hem de 2.tabakada gerilme değerleri artmaktadır (Şekil 4.94-a-b). Bu gerilme değerleri, tabakadan tabakaya geçişte azalmakta olup, bu azalma rijitlik oranının 3.63, 5 ve 10 olduğu durumlarda yaklaşık olarak % 58 oranında iken rijitlik oranının 15 olduğu durumda ise yaklaşık %56 olmaktadır.



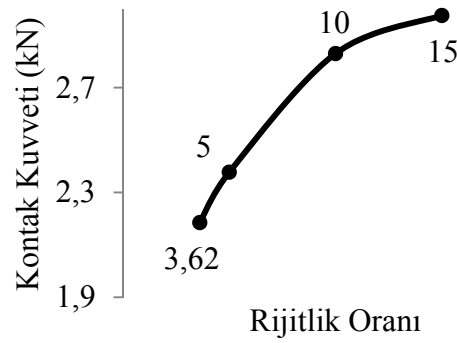
Şekil 4.95. Rijitlik oranının değişiminde maksimum Von-Misses gerilmeleri

Rijitlik oranlarının 3.62, 5, 10 ve 15 ve temasın sırasıyla 14.16 ms, 13.44 ms, 12.48 ms, ve 12 ms olduğu anlarda 1.tabakada meydana gelen maksimum Von-Misses gerilmeleri sırasıyla, 434.84 MPa, 499.06 MPa, 715.51 MPa ve 885 Mpa değerlerinde olmaktadır (Şekil 4.95-a). 2. tabakada meydana gelen Von-Misses gerilmeleri ise, rijitlik oranlarının 3.62, 5, 10 ve 15 temasın sırasıyla 14.16 ms, 13.44 ms, 12.48 ms ve 12 ms olduğu anlarda sırasıyla 181.34 MPa, 208.6 MPa, 301.56 MPa ve 374.81 MPa değerlerine ulaşmaktadır (Şekil 4.95-b).



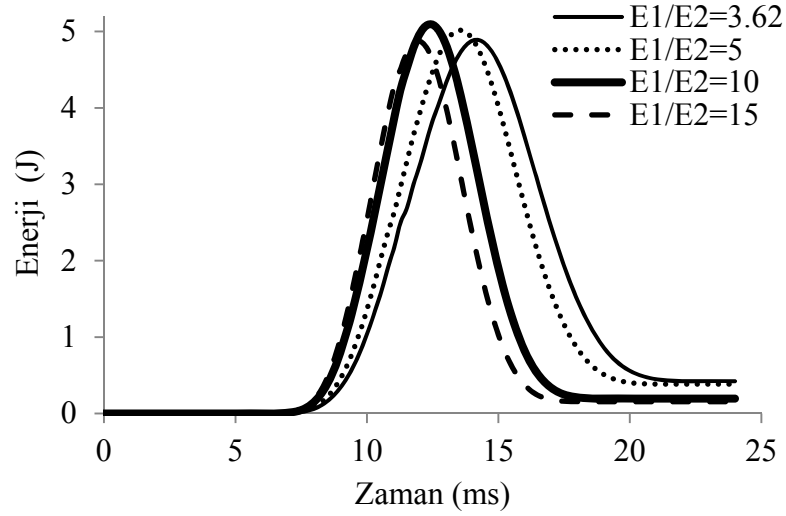
Şekil 4.96. Rijitlik oranının değişimine göre kontak kuvveti-zaman grafiği

E_1/E_2 oranı değişimiyle kompozit malzemede meydana gelen kontak kuvvetleri (reaksiyon kuvvetleri) Şekil 4.96'de verilmiştir. Rijitlik oranının artmasıyla kontak kuvvetlerinin arttığı görülmektedir.



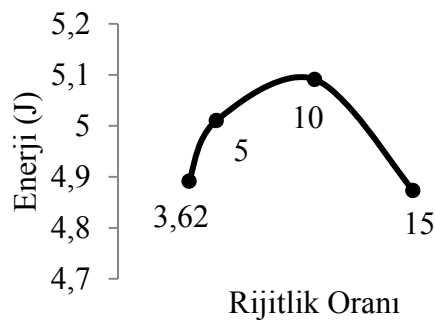
Şekil 4.97. Rijitlik oranının değişiminde maksimum kontak kuvvetleri

Rijitlik oranlarının 3.62, 5, 10 ve 15 temasın 14.16, 13.68, 12.48 ve 12 ms olduğu anlarda meydana gelen maksimum kontak kuvvetleri 2.186, 2.377, 2.83 ve 2.98 kN değerlerinde olmaktadır (Şekil 4.97).



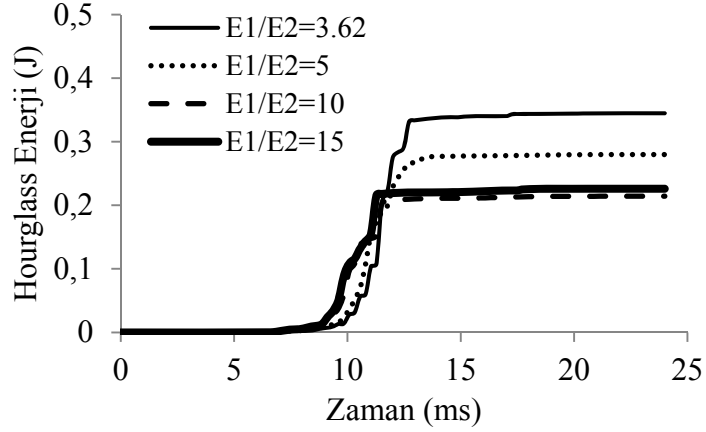
Şekil 4.98. Rijitlik oranının değişimine göre enerji - zaman grafiği

Rijitlik oranı (E_1/E_2) değişimi ile plakada absorbe edilen enerji miktarında çok büyük değişiklikler olmamakta birliktedir, oranın 10 olduğu duruma kadar atış meydana gelirken, daha sonraki oran artışlarında enerjide azalma meydana gelmektedir. Bu durumun artan plak rijitliği ile birlikte, oranın 15 ve sonraki durumlarda hasar oluşumu nedeniyle absorbe edilen enerji miktarlarında azalma meydana getirdiği düşünülmektedir (Şekil 4.98).



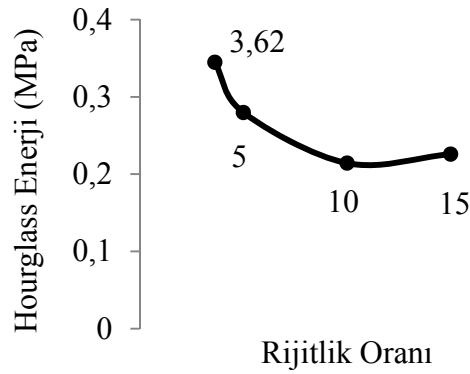
Şekil 4.99. Rijitlik oranının değişimine göre maksimum enerji grafiği

Rijitlik oranlarının 3.62, 5, 10 ve 15, temasın sırasıyla 14.16, 13.44, 12.48 ve 12 ms olduğu anlarda maksimum absorbe edilen enerji miktarları sırasıyla 4.89, 5.01, 5.09 ve 4.87 J değerlerine ulaşmaktadır (Şekil 4.99).



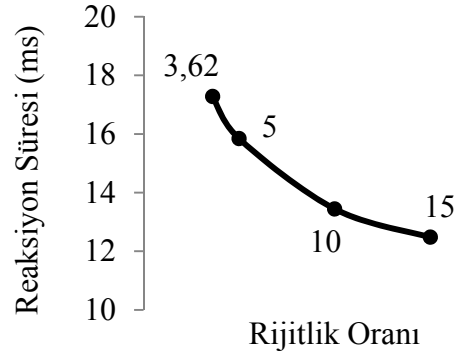
Şekil 4.100. Rijitlik oranının değişimine göre Hourglass enerjisi - zaman grafiği

Şekil 4.100'de rijitlik oranının değişiminde, Hourglass enerjisi değişimi verilmiştir. Plak rijitliğinin artışıyla birlikte, SEM modelinde zig-zag oluşumunun azaldığı görülmektedir. Rijitlik oranını 15 olduğu durumda hasar nedeniyle çarpılmalar fazla olmaktadır.



Şekil 4.101. Rijitlik oranının değişimine göre maksimum Hourglass enerjisi değerleri

Hourglass deformasyon enerjileri, rijitlik oranlarının 3.62, 5, 10 ve 15 olduğu, temasın sırasıyla 19.44, 19.2, 18.96 ve 18.48 ms olduğu onlarda sırasıyla 0.344, 0.279, 0.214 ve 0.226 J değerlerini almaktadır (Şekil 4.101).



Şekil 4.102. Rijitlik oranının değişiminde reaksiyon süreleri

Farklı rijitlik oranlarına sahip plaklara uygulanan darbe yükü durumunda meydana gelen reaksiyon süresi değişmektedir. Rijitlik oranlarının 3,62, 5, 10 ve 15 olduğu durumlarda reaksiyonun tamamlanma süreleri sırasıyla, 17,28, 15,84, 13,44, ve 12,48 ms'dir. Rijitlik oranının artışına bağlı olarak reaksiyon zamanı azalmaktadır (Şekil 4.102).

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, ANSYS LS-DYNA yazılımı kullanılarak düşük hızlı darbe yükü altında, rijitlik (E_1/E_2) oranı, takviye açısı, tabaka sayısı, plaka kalınlığı ve plaka alanı gibi faktörlerin kompozit plağın darbe davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada çeşitli geometri ve hıza sahip vurucuların tabakalı kompozit plak üzerindeki etkisi de dikkate alınmıştır. Ayrıca kompozit malzemenin maruz kaldığı şartlarda nikel alaşımı, 1018 çeliği, titanyum alaşımı gibi izotropik malzemelerin de darbe davranışları araştırılmıştır. Burada belirtilen faktörlerin darbe davranışı üzerindeki sonuçları aşağıda verilmiştir.

1. Darbe hızı arttıkça plakanın merkezinin yer değiştirme miktarı ve gerilme miktarında artış meydana gelmektedir. Hızın değişimiyle birlikte, üst tabakalardan orta tabakalara doğru gerilme miktarı azalmakta ve 2. tabakada meydana gelen gerilme değerlerinde, 1. tabakadaki gerilme değerlerine göre yaklaşık olarak % 59 oranında azalma olmuştur.
2. Kontak kuvveti, absorbe edilen enerji ve Hourglass deformasyon enerjisi hız artışıyla birlikte artış göstermiştir. Ayrıca hızın artışıyla birlikte reaksiyon süresinin azaldığı tespit edilmiştir.
3. Plaka alanının artışıyla, plak merkezinin yer değiştirme miktarı artış gösterirken, plaka merkezindeki gerilme miktarı alan artışıyla azalmaktadır. Plaka alanının değişimiyle birlikte, üst tabakalardan orta tabakalara doğru gerilme miktarı azalmakta ve 2. tabakada meydana gelen gerilme değerleri, 1. tabakadaki gerilme değerlerine göre yaklaşık olarak % 58.3 azalmaktadır.
4. Plakta meydana gelen kontak kuvveti ve Hourglass deformasyon enerjisi, plak alanı artışıyla azalırken, absorbe edilen enerji miktarı artış göstermektedir. Ayrıca plaka alanının artışıyla birlikte reaksiyon süresinin artmıştır.

5. Takviye açılarının $[0^0/0^0]_{10}$ ve $[0^0/15^0]_{10}$ olduğu durumda plakta büyük hasar oluşmaktadır. $[0^0/30^0]_{10}$, $[0^0/45^0]_{10}$ ve $[0^0/90^0]_{10}$ takviye açılarında ise hasar oluşumu az olmakta ve ayrıca açı büyüdükçe plak merkezinin yer değiştirme miktarlarında azalma meydana gelmektedir. Takviye açılarının $[0^0/0^0]_{10}$ ve $[0^0/15^0]_{10}$ olduğu durumda plakta büyük hasar oluşumu nedeniyle gerilme miktarları düşük olmaktadır. Hasarın daha az olduğu $[0^0/30^0]_{10}$ ve $[0^0/45^0]_{10}$ takviye açılarında büyük gerilmeler meydana gelmekte iken, $[0^0/90^0]_{10}$ takviye açısında ise plak merkezinde daha küçük gerilmeler oluşmaktadır.

6. Takviye açısının değişimiyle birlikte, en üst tabakadan alt tabakalara doğru darbe yükü aktarılırken, alt tabakalarda meydana gelen Von-Misses gerilmeleri de azalmaktadır. Fakat $[0^0/0^0]_{10}$ ve $[0^0/15^0]_{10}$ takviye açılarında hasar oluşumu meydana geldiği için gerilme değerlerinde çok büyük değişimler meydana gelmemektedir. Takviye açılarının $[0^0/0^0]_{10}$ ve $[0^0/15^0]_{10}$ olduğu durumda plakta büyük hasar oluştuğundan kontak kuvveti değerleri düşük olmaktadır. $[0^0/30^0]_{10}$, $[0^0/45^0]_{10}$, ve $[0^0/90^0]_{10}$ takviye açılarında ise hasar oluşumu az olduğundan kontak kuvvetleri büyük değerlere ulaşmaktadır.

7. $[0^0/0^0]_{10}$ ve $[0^0/15^0]_{10}$ takviye açılı plaklarda absorblanan enerji miktarı, meydana gelen hasar nedeniyle $[0^0/30^0]_{10}$, $[0^0/45^0]_{10}$ ve $[0^0/90^0]_{10}$ takviyeli plaklara göre daha az olmaktadır. Bunun nedeni olarak, darbe enerjisinin belirli bir kısmının plağın hasarına harcadığı söylenebilir. $[0^0/0^0]_{10}$ takviyeli plakta hasar boyutu büyük olduğundan absorbe edilen enerji az olmakla birlikte, $[0^0/15^0]_{10}$ takviyeli plakta ise hasar küçüldüğünden daha fazla enerji absorbe edilmektedir. Diğer takviye açılarında küçük hasarlar meydana geldiğinden, bunlarda absorbe edilen enerji miktarları, hasar gören plakalara göre daha büyük değerlere ulaşmaktadır.

8. Takviye açılarının $[15^0/-15^0]_{10}$, $[30^0/-30^0]_{10}$ ve $[45^0/-45^0]_{10}$ olduğu durumlarda, açı değerinin artışı ile hem yer değiştirme miktarları azalmakta hem de plak merkezindeki gerilme miktarları azalmaktadır. Ayrıca takviye açısının değişimiyle birlikte, üst tabakalardan orta tabakalara doğru gerilme miktarı azalmaktadır. $[15^0/-15^0]_{10}$ takviye

açısında, 2. tabakadaki gerilme değerleri 1. tabakadaki değerine oranla yaklaşık %15.59 daha az olurken, $[30^0/-30^0]_{10}$ ve $[45^0/-45^0]_{10}$ takviye açılarındaki ise bu durum sırasıyla yaklaşık olarak % 34.41 ve % 53.35 değerlerinde olmaktadır.

9. Takviye açılarının $[15^0/-15^0]_{10}$, $[30^0/-30^0]_{10}$ ve $[45^0/-45^0]_{10}$ olduğu ve temasın sırasıyla 14.4, 14.16 ve 14.16 ms olduğu anlarda meydana gelen maksimum kontak kuvvetleri sırasıyla 2.24, 2.37 ve 2.25 kN değerlerine ulaşmaktadır. Burada maksimum kontak kuvveti $[30^0/-30^0]_{10}$ durumunda olmaktadır. Takviye açılarının $[15^0/-15^0]_{10}$, $[30^0/-30^0]_{10}$ ve $[45^0/-45^0]_{10}$ olduğu durumlarda, açı değerinin artışı ile plakalarda absorbe edilen enerji miktarında artmaktadır.

10. Sınır şartlarının değişiminde ankastre kenar sayısının artışı plak merkezinin daha az yer değiştirmesine neden olmakta ve ayrıca daha küçük gerilmeler oluşmaktadır. Çalışmada dikkate alınan sınır şartları için, üst tabakalardan orta tabakalara doğru gerilme miktarı azalmakta ve 2. tabakada meydana gelen gerilme değerleri, 1. tabakadaki gerilme değerlerine göre yaklaşık olarak % 58 oranında azalmaktadır.

11. 2 kenar (S_2 ve S_4) ve 4 kenarın (S_1 , S_2 , S_3 ve S_4) ankastre olduğu durumlarda kontak kuvvetleri eşit ve daha büyük iken, 3 kenarın (S_2 , S_3 ve S_4) ankastre olduğu durumda ise kontak kuvveti değerinde azalma meydana gelmektedir. Bu durumun nedeninin, darbe yükünün plak yüzeyi boyunca simetrik dağılmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. 2 kenarın (S_2 ve S_4) ankastre olduğu durumda absorbe edilen enerji miktarı daha büyük değerlerde iken, 4 kenarın (S_1 , S_2 , S_3 ve S_4) ankastre olduğu durumda daha küçük olmaktadır. 3 kenarın (S_2 , S_3 ve S_4) ankastre olduğu durumda ise absorbe edilen enerji miktarı önceki durumlara göre daha küçük değerlerde olmaktadır. Ayrıca ankastre kenar sayısının artışı ile reaksiyon süresinin azaldığı görülmektedir.

12. Nikel, çelik, kompozit ve titanyum plaklar darbe yüküne maruz bırakıldıklarında en küçük yer değiştirme miktarı nikelde iken, en büyük değer titanyumda olacak şekilde sıralanmaktadır. Nikel plağın merkezinde meydana gelen gerilmeler, diğer plaklara göre yüksektir. Plakların merkezlerinde meydana gelen gerilmeler çoktan aza doğru, nikel,

kompozit, çelik, ve titanyum plaka olarak sıralanmaktadır. Ayrıca plakalarda meydana gelen kontak kuvvetleri sırasıyla çoktan aza doğru nikel, titanyum, çelik ve kompozit plaka olarak sıralanmaktadır.

13. Absorbe edilen enerji miktarı kompozit plakada yüksek değerlerde iken, diğer izotropik plakalarda çok düşük değerlerde olmaktadır. İzotropik plakalar kendi aralarında sırasıyla büyükten küçüğe doğru nikel, çelik ve titanyum plaka olarak sıralanmaktadır. Reaksiyon süresi kompozit plakada en yüksek değeri almaktadır. İzotropik plakalarda ise bu durum büyükten küçüğe doğru titanyum, çelik ve nikel plaka olarak sıralanmaktadır.

14. Kompozit plakta tabaka sayısının artması rijitliği artırmakta ve maksimum yer değiştirme miktarları azalmaktadır. Ayrıca tabaka sayısının artmasıyla, plak merkezinde meydana gelen gerilme miktarları azalmaktadır. Tabaka sayısının değişimiyle birlikte, üst tabakalardan orta tabakalara doğru gerilme miktarı azalmakta ve 2. tabakada meydana gelen gerilme değerleri, 1. tabakadaki gerilme değerlerine göre yaklaşık olarak % 58 oranında azaldığı görülmektedir.

15. Tabaka sayısının artmasıyla birlikte meydana gelen kontak kuvveti ve absorblanan enerji miktarlarında, hemen hemen hiç değişme olmamaktadır. Ayrıca, tabaka sayısının artmasıyla reaksiyon süresinde azalma meydana gelmektedir.

16. Vurucu geometrisinin değişiminde temas eden alanın artmasıyla birlikte hem kontak kuvveti hem plak merkezinde meydana gelen gerilme değerleri hem de plak merkezindeki yer değiştirme miktarları artmaktadır. Değişik vurucu geometrileri için gerilme değerleri tabakadan tabakaya geçişlerde de azalmaktadır. Konik uç kullanıldığında 2. tabakada meydana gelen gerilme değerleri, 1. tabakadaki gerilme değerlerine göre yaklaşık olarak % 51 azalmakta iken diğer vurucu geometrilerinde bu değer yaklaşık olarak % 58 oranında olmaktadır. Ayrıca temas alanının artışıyla birlikte, plakta absorbe edilen enerji miktarları ve reaksiyon süresi de artmaktadır.

17. Plak kalınlığının artmasıyla, yer değiştirme miktarları azalmakta iken, gerilme miktarları artmakta ve üst tabakadan 2. Tabakaya geçişte gerilme miktarı azalmaktadır. 2. tabakada meydana gelen gerilme değerleri, 1. tabakadaki gerilme değerlerine göre yaklaşık olarak % 58 oranında azalmaktadır. Plak kalınlığının artmasıyla kontak kuvveti değerlerinde azalma meydana gelmektedir. Ayrıca plak kalınlığının artışıyla birlikte reaksiyon süreleri de artmaktadır.

18. Plakalarda rijitlik oranının artışıyla yer değiştirme miktarlarında azalma meydana gelmekte iken, plak merkezindeki gerilme miktarlarında da artış olmaktadır. Bu gerilme değerleri, tabakadan tabakaya geçişte azalmakta olup, bu azalma rijitlik oranının 3.63, 5 ve 10 olduğu durumlarda yaklaşık olarak % 58 oranında iken rijitlik oranının 15 olduğu durumda ise yaklaşık %56 olmaktadır.

19. Rijitlik oranının artmasıyla kontak kuvvetinde artışlar olmaktadır. Rijitlik oranı arttığında, yükleme durumunda kontak kuvvetinde artış olurken, yk boşaltma durumunda ise kontak kuvvetleri azalmaktadır. Ayrıca absorbe edilen enerji miktarları rijitlik oranının artışıyla artmaktadır. Fakat rijitlik oranının 15 olduğu durumda hasar nedeniyle enerjide azalma meydana gelmektedir. Ayrıca rijitlik oranının artmasıyla reaksiyon sürelerinde azalma meydana gelmektedir.

KAYNAKLAR

- Abatan, A., Hu, H., & Olowokere, D., (1998). Impact Resistance Modeling of Hybrid Laminated Composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 11,249-260.
- Akın C., Şenel M., 2010. An Experimental Study Of Low Velocity Impact Response For Composite Laminated Plates. *DPÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi Sayı 21*, Nisan 2010.
- ANSYS LS-DYNA User's Guide, Release 12.0.
- Aran, A., (1990). Elyaf Takviyeli Karma Malzemeler ders notları. İ.T.Ü, Makine Fakültesi.
- Aslan, Z. & Karakuzu, R. (2002). Transient Dynamic Analysis of Laminated Composite Plate Subjected to Low-Velocity Impact. *Mathematical & Computational Applications*, Vol. 7, No.1, 73-82.
- Aslan, Z., Karakuzu, R. & Okutan, B. (2003). The Response of Laminated Composite Plates under Low-Velocity Impact Loading. *Composite Structures*, 59, 119-127.
- Baucom, J.N., & Zikry, M.A., (2005). Low Velocity Impact Damage Progression in Woven E-glass Composite Systems. *Composites*, 36, 658-664.
- Belingardi, G., Vadori, R. (2002). Low Velocity Impact Tests of Laminate Glass- Fiber Epoxy Matrix Composite Material Plates. *International Journal of Impact Engineering*, 27, 213-229.
- Belingardi, G., Vadori, R. (2003). Influence of Laminate Thickness in Low Velocity Impact Behavior of Composite Material Plate. *Composite Structures*, 61, 27-38.
- Cantwell W.J. , Morton J. (1991). The Impact Resistance of Composite Materials-a Review.*Composites*. Vol:22, p:347-362.
- Caprino, G., Spataro, G. ve Del Luongo S. (2004). Low-Velocity Impact Behaviour of Fibreglass-Aluminium Laminates. *Composites Part A: applied science and manufacturing*, Vol:35, p:605-616.
- Ceyhun, V., & Turan, M. (2003). Tabakalı Kompozit Malzemelerin Darbe Davranışı. *Mühendis ve Makine*, 516, 35-41.
- Chakraborty D., (2007). Delamination of laminated fiber reinforced plastic composites under multiple cylindrical impact. *Materials and Design* 28 (2007) 1142–115.
- Chiu, S. T. , Liou, Y. Y. , Chang, Y. C. , Ong. C. L. , (1997) Low velocity impact behavior of prestressed composite laminates. *Materials Chemistry and Physics* Vol:47, p:268-272.
- Dhakal N. H., Zhang Y. Z., Richardson W. O. M., Errajhi Z.A. O., (2006). The low velocity impact response of non-woven hemp fibre reinforced unsaturated polyester composites. *Composite Structures* 2006.
- Dobyns, A.L. (1981). Analysis of Simply Supported Orthotropic Plates Subjected To Static and Dynamic Loads. *AIAA Journal*, 19,642-680.
- Gautam S. Chandekar, Bhushan S. Thatte, Ajit D. Kelkar, (2010). On the Behavior of Fiberglass Epoxy Composites under Low Velocity Impact Loading. *Hindawi Publishing Corporation Advances in Mechanical Engineering*, 11 pages 10.1155/2010/621406.

- Gong, S.W., & Lam, K.Y. (1999). Transient Response of Stiffened Composite Plates Subjected to Low Velocity Impact. *Composites, Part B*, 30, 473-484.
- Goo, N.S. & Kim, S.J. (1997). Dynamic Contact Analysis of Laminated Composite Plates under Low Velocity Impact. *AIAA Journal*, 35, 1518-1521.
- Gök, K., Kişioğlu, Y. (2010). Farklı malzeme özelliklerine sahip plakaların darbe davranışlarının sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmesi. 2. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz kongresi.
- Guan Z. ve Yang C. (2002). Low-Velocity Impact and Damage Process of Composite Laminates. *Journal of composite materials*, Vol. 36, No. 07.
- Hemdan Abou-Taleb , Aly Sakr, (2009). Low Velocity Impact Of Composite Crop Straw Panels. *AUTEX Research Journal*, Vol. 9, No1, March 2009 © AUTEX.
- Hosseinzadeh, R., Shokrieh, M.M. & Lessard, L. (2006) Damage Behavior of Fiber Reinforced Composite Plates Subjected to Drop Weight Impacts. *Composite Science and Technology*, 66, 61-68.
- Hosur V. M., Islam M. M. and Jeelani S., (2008). Low-Velocity Impact Response of Braided Carbon/Epoxy Composites. *ICCES*, vol.6, no.1, pp.81-89.
- Jih CJ, Sun CT. (1993). Prediction of delamination in composite laminates subjected to low velocity impact. *J Compos Mater* Vol:27, p:684-701.
- Jones, R.M. Mc Graw-Hill (1998). *composites of metarials*, Newyork.
- Karakuzu, R., Erbil E. & Aktas M., (2010). Damage prediction in glass/epoxy laminates subjected to impact loading. *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences* Vol. 17, June 2010, pp. 186-198.
- Kim, J.K. & Kang, K.W. (2001) An Analysis of Impact Force in Plain-weave Glass/epoxy Composite Plates Subjected to Transverse Impact. *Composite Science and Technology*, 61, 135-143.
- Lal, K.M. (1982) . Prediction of Residual Tensile Strength of Transversely Impacted Composite Laminates. *Structure Solid Mech. NASA CP-2245*, pp.97-111.
- Laminates. *Journal of Reinforced Plastics Composites*, 11, 297-305.
- Lee, L.J., Huang, K.Y., & Fann, Y.J. (1993) Dynamic Responses of Composite Sandwich Plate Impacted By Rigid Ball. *Journal of Composite Materials*, 27, 1238- 1256.
- Lee, Y.S. , Kang, K.H., & Park, O. (1997). Response of Hybrid Laminated Composite Plates under Low Velocity Impact. *Computers & Structures*, 65, 965-974.
- Lin, C. J., Chang, L.C., Nien, M.H., ve Ho, H.L. (2005). Mechanical Behavior of Various Nanoparticul Filled Composites at Low-Velocity Impact. *Composite Structures*, , Vol:74, p:30-36.
- Liu, Z.S., Lee, H.P. ve Lu C. (2005). Structural Intensity Study of Plates Under Low-Velocity Impact. *International Journal of Impact Engineering*. Vol:31, p:957-975.
- Luo, R.K, Gren, E.R, Morrison, C.J. , (1999). Impact Damage Analysis of Composite Plates. *International Journal of Impact Engineering*. Vol 22, p:435-447.
- Mili, F., & Necip, B. (2001). Impact Behavior of Cross-Ply Laminated Composite Plates under Low Velocities. *Composite Structures*. 51, 237-224.
- Mitrevski, T., Marshall, I.H., Thomson, R., Jones, R. Whittingham, B. (2005). The Effect of Impactor Shape on the Impact Response of Composite Laminates. *Composite Structures*, 67, 139-148.

- Naik K. N. , Meduri S. (2001). Polymer-matrix composites subjected to low-velocity impact: effect of laminate configuration. *Composites Science and Technology* 61 (2001) 1429-1436.
- Naik, N.K., Sekher, Y.C., & Meduri, S. (2000). Damage in woven-fabric composites subjected to low-velocity impact. *Composites Science and Technology*, Vol:60, p:731-744.
- Plates. *AIAA Journal*, 21, 1448-1452.
- Rajesh Mathivanan, N., Jerald J., (2010). Experimental Investigation of Woven E-Glass Epoxy Composite Laminates Subjected to Low-Velocity Impact at Different Energy Levels. *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, Vol. 9, No.7, pp.643-652, 2010.
- Ramkumar, R.L., & Chen, P.C. (1982). Low Velocity Impact Response of Laminated Sankar, B.V. (1992). Scaling Of Low Velocity Impact for Symmetric Composite
- Sevkat E. , Liaw M. B. , Delale F. , (2008). Drop- Weight Impact Responses Of Woven Hybrid Glass – Graphite /Toughened Epoxy Composites. *Proceedings of IMECE2008. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. IMECE2008-68835.*
- Sugun, B.S., & Rao, R.M.V.G.K. (2004) Low Velocity Impact of Glass, Carbon and Kevlar Composites Using Repeated Drop Tests. . *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. Vol.23,No.15, 1583-1599.
- Sun, C.T., & Chattopadhyay, S. (1975). Dynamic Response of Anisotropic Laminated Plates under Initial Stress to Impact of a Mass. *ASME Journal of Mechanics*. 42, 693-698.
- Tiberkak R., Bachene M., Rechak S., Necib B., (2008). Damage prediction in composite plates subjected to low velocity impact. *Composite Structures* 83 (2008) 73–82.
- Tiberkak, R., Rechak, S. and Bachene M., (2006). The dynamic response of laminate composite plate under low-velocity impact. 25TH International Congres Of The Aeronautical Sciences.
- Uyaner M., Kara M., Ataberk N., (2007). E-Camı/Epoksi Tabakalı Kompozit Malzemelerin Düşük Hızlı Darbe Davranışına Numune Boyutlarının Etkisi. *Proceedings of 8th International Fracture Conference*, 7-9 November.
- Ünal, O. Yapı malzemesi ders notları.
- Whittingham, B., Marshall, I.H., Mitrevski, T., Jones, R. (2004) The Response of Composite Structures with Pre-Stress Subject to Low Velocity Impact Damage. *Composite Structures*, 66, 685-698.

ÖZGEÇMİŞ

1986 yılında İstanbul ilinde doğdu. Lise eğitimine kadar olan eğitim-öğretim sürecini İstanbul da tamamlamıştır. 2005 yılında Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü'nde üniversite öğrenim hayatına başladı ve 2006 yılında Makine Mühendisi Bölümünde çift anadal programını kazandı. 2009 yılında Çevre Mühendisliği ve 2010 yılında Makine Mühendisliğinden mezun oldu. 2010 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı.