

**T.C.
İZMİR DEMOKRASİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MEKANİK BİLİM DALI**

**KOMPOZİT LAMİNATLARDA YER ALAN FARKLI
ŞEKİLLERDEKİ ÇENTİKLERİN FARKLI YÜKLEME HIZLARINDA
MEKANİK ÖZELLİK DEĞİŞİMLERİNİN SONLU ELEMANLAR
YÖNTEMİ İLE BELİRLENMESİ**

Demirali SEVENER

**Danışman
Doç. Dr. Engin ERBAYRAK**



İZMİR-2025

Demirali
SEVENER

KOMPOZİT LAMİNATLARDA YER ALAN FARKLI ŞEKİLLERDEKİ
ÇENTİKLERİN FARKLI YÜKLEME HIZLARINDA MEKANİK ÖZELLİK
DEĞİŞİMLERİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE BELİRLENMESİ

2025

TEZ ONAYI

Demirali SEVENER tarafından hazırlanan "**Kompozit Laminatlarda Yer Alan Farklı Şekillerdeki Çentiklerin Farklı Yükleme Hızlarında Mekanik Özellik Değişimlerinin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Belirlenmesi**" adlı tez çalışması 15/01/2025 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri önünde İzmir Demokrasi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak başarı ile savunulmuştur.

Danışman **Doç. Dr. Engin ERBAYRAK**
İzmir Demokrasi Üniversitesi

Jüri Üyesi **Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Murat YAVUZ**
İzmir Demokrasi Üniversitesi

Jüri Üyesi **Dr. Öğr. Üyesi Coşkun HARMANŞAH**
Ege Üniversitesi

TAAHHÜTNAME

Bu tezin İzmir Demokrasi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Demirali SEVENER



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	I
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	III
ŞEKİLLER DİZİNİ	IV
TABLO DİZİNİ	VII
TEŞEKKÜR.....	VIII
ÖZET	IX
ABSTRACT.....	X
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatürde Yapılan Çalışmalar	2
1.2. Tezin Amacı	9
2. GENEL BİLGİLER	11
2.1. Kompozit Malzeme	11
2.1.1. Matris Elemanı	12
2.1.2. Takviye Elemanı	12
2.2. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları	13
2.3. Kompozit Malzemelerin Avantajları ve Dezavantajları	14
2.3.1. Kompozit Malzemelerin Avantajları.....	14
2.3.2. Kompozit Malzemelerin Dezavantajları	15
2.4. Matris Elemanına Göre Kompozit Malzemeler	15
2.4.1. Polimer Matris Kompozitler.....	15
2.4.1.1. Termoplastik.....	16
2.4.1.2. Termoset	17
2.4.1.3. Elastomer	18
2.4.2. Metal Matris Kompozitler	19
2.4.3. Seramik Matris Kompozitler	20
2.5. Takviye Elemanına Göre Kompozit Malzemeler	20
2.5.1. Cam Elyaf.....	21
2.5.2. Karbon Elyaf	21
2.5.3. Aramid Elyaf	21
2.6. Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri	22
2.6.1. Elle Yatırma Yöntemi	22
2.6.2. Püskürtme Yöntemi.....	23
2.6.3. Pultrüzyon Yöntemi	23
2.6.4. Vakum İnfüzyon Yöntemi.....	24
3. MATERYAL VE YÖNTEMLER	26
3.1. Materyal	26
3.2. Yöntem.....	27
3.2.1. Model Doğrulama Aşaması.....	28
3.2.2. Sabit Hızda Çekme Testi ve Çentik Etkisi Aşaması	30
3.2.3. Yüksek Hızda Çekme Testi ve Çentik Etkisi Aşaması	31
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	33
4.1. Model Doğrulamasında Kullanılan Numunelerin Çekme Testi Analiz Sonuçları.....	33
4.2. Doğrulanmış Model Üzerinde Açılan Dairesel ve Kare Delikli Numunelerin Çekme Testi Analiz Sonuçları ve Çentik Etkisi İncelemesi.....	34
4.3. Yüksek Hızlarda Çekme Testi Analiz Sonuçları ve Çentik Etkisi İncelemesi.....	45

5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	68
KAYNAKLAR	70
ÖZGEÇMİŞ	76



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

°C	Derece
%	Yüzde
E_X	X Eksenindeki Young Modülü
E_Y	Y Eksenindeki Young Modülü
U_x	X yönündeki doğrusal şekil değişimi
U_y	Y yönündeki doğrusal şekil değişimi
U_z	Z yönündeki doğrusal şekil değişimi
RotX	X yönündeki dönme
RotY	Y yönündeki dönme
RotZ	Z yönündeki dönme
ASTM	American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Malzeme Derneği)
gr	Gram
J	Joule
MPa	Megapaskal
MÖ	Milattan Önce
PAN	Poliakrilonitril
PVC	Polivinil Klorür
X	X Eksen
Y	Y Eksen
Z	Z Eksen
XY	XY Düzlemi
YZ	YZ Düzlemi
ZX	ZX Düzlemi

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Tarihteki İlk Kompozit Papirüs Kağıdı	11
Şekil 2.2. Bir Kompozit Materyalin Çeşitli Katları	12
Şekil 2.3. A380 Airbus Uçağında Kompozit Malzeme Kullanılan Kısımlar	13
Şekil 2.4. Elle Yatırma Yöntemi.....	22
Şekil 2.5. Püskürtme Yöntemi	23
Şekil 2.6. Pultrüzyon Yöntemi.....	24
Şekil 2.7. Vakum İnfüzyon Yöntemi	25
Şekil 3.1. ASTM D 638 Tip 1 Çizimi (Bütün ebatlar mm'dir.).....	28
Şekil 3.2. Sınır Şartları ve Ağ Yapısı Oluşturulmuş Materyal	28
Şekil 3.3. Dairesel Deliğe Sahip Materyallerin Ağ Sunumları.....	31
Şekil 3.4. Kare Deliğe Sahip Materyallerin Ağ Sunumları	31
Şekil 4.1. Analiz Sonuçları ile Beraber Literatürle Modelin Doğrulanması.....	33
Şekil 4.2. Örgü Cam/Epoksi Kompozit Çekme Testi Kopma Aşamaları.....	34
Şekil 4.3. Örgü Karbon/Epoksi Kompozit Çekme Testi Kopma Aşamaları	34
Şekil 4.4. Örgü Cam/Epoksi Kompozit Malzemede 0.05 mm/dak Hız Değerindeki Daire ve Kare Geometrilere Açılan Deliklerin Karşılaştırılması.....	37
Şekil 4.5. Örgü Karbon/Epoksi Kompozit Malzemede 0.05 mm/dak Hız Değerindeki Daire ve Kare Geometrilere Açılan Deliklerin Karşılaştırılması.....	37
Şekil 4.6. Örgü Cam/Epoksi Kompozit 3 mm Çap Delik 0.05 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları.....	38
Şekil 4.7. Örgü Cam/Epoksi Kompozit 6 mm Çap Delik 0.05 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları.....	38
Şekil 4.8. Örgü Cam/Epoksi Kompozit 9 mm Çap Delik 0.05 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları.....	39
Şekil 4.9. Örgü Cam/Epoksi Kompozit 3x3 mm ² Kare Delik 0.05 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları.....	40
Şekil 4.10. Örgü Cam/Epoksi Kompozit 6x6 mm ² Kare Delik 0.05 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları.....	41
Şekil 4.11. Örgü Cam/Epoksi Kompozit 9x9 mm ² Kare Delik 0.05 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları.....	41
Şekil 4.12. Örgü Karbon/Epoksi Kompozit 3 mm Çap Delik 0.05 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları.....	42
Şekil 4.13. Örgü Karbon/Epoksi Kompozit 6 mm Çap Delik 0.05 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları.....	42
Şekil 4.14. Örgü Karbon/Epoksi Kompozit 9 mm Çap Delik 0.05 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları.....	43
Şekil 4.15. Örgü Karbon/Epoksi Kompozit 3x3 mm ² Kare Delik 0.05 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları.....	44
Şekil 4.16. Örgü Karbon/Epoksi Kompozit 6x6 mm ² Kare Delik 0.05 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları.....	45
Şekil 4.17. Örgü Karbon/Epoksi Kompozit 9x9 mm ² Kare Delik 0.05 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları.....	45
Şekil 4.18. Örgü Cam/Epoksi Kompozit Malzemede 20000, 30000 ve 40000 mm/dak Hız Değerlerindeki Daire ve Kare Geometrilere Açılan Deliklerin Karşılaştırılması.....	48

Şekil 4.19. Örgü Karbon/Epoksi Kompozit Malzemede 20000, 30000 ve 40000 mm/dak Hız Değerlerindeki Daire ve Kare Geometrilere Açılan Deliklerin Karşılaştırılması.....	48
Şekil 4.20. Örgü Cam/Epoksi Kompozit 3 mm Çap Delik 20000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları.....	49
Şekil 4.21. Örgü Cam/Epoksi Kompozit 6 mm Çap Delik 20000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları.....	49
Şekil 4.22. Örgü Cam/Epoksi Kompozit 9 mm Çap Delik 20000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları.....	50
Şekil 4.23. Örgü Cam/Epoksi Kompozit 3x3 mm ² Kare Delik 20000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları.....	50
Şekil 4.24. Örgü Cam/Epoksi Kompozit 6x6 mm ² Kare Delik 20000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları.....	51
Şekil 4.25. Örgü Cam/Epoksi Kompozit 9x9 mm ² Kare Delik 20000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları.....	51
Şekil 4.26. Örgü Karbon/Epoksi Kompozit 3 mm Çap Delik 20000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları.....	52
Şekil 4.27. Örgü Karbon/Epoksi Kompozit 6 mm Çap Delik 20000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları.....	52
Şekil 4.28. Örgü Karbon/Epoksi Kompozit 9 mm Çap Delik 20000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları.....	52
Şekil 4.29. Örgü Karbon/Epoksi Kompozit 3x3 mm ² Kare Delik 20000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları.....	53
Şekil 4.30. Örgü Karbon/Epoksi Kompozit 6x6 mm ² Kare Delik 20000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları.....	54
Şekil 4.31. Örgü Karbon/Epoksi Kompozit 9x9 mm ² Kare Delik 20000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları.....	54
Şekil 4.32. Örgü Cam/Epoksi Kompozit 3 mm Çap Delik 30000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları.....	55
Şekil 4.33. Örgü Cam/Epoksi Kompozit 6 mm Çap Delik 30000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları.....	56
Şekil 4.34. Örgü Cam/Epoksi Kompozit 9 mm Çap Delik 30000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları.....	56
Şekil 4.35. Örgü Cam/Epoksi Kompozit 3x3 mm ² Kare Delik 30000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları.....	57
Şekil 4.36. Örgü Cam/Epoksi Kompozit 6x6 mm ² Kare Delik 30000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları.....	57
Şekil 4.37. Örgü Cam/Epoksi Kompozit 9x9 mm ² Kare Delik 30000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları.....	58
Şekil 4.38. Örgü Karbon/Epoksi Kompozit 3 mm Çap Delik 30000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları.....	58
Şekil 4.39. Örgü Karbon/Epoksi Kompozit 6 mm Çap Delik 30000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları.....	59
Şekil 4.40. Örgü Karbon/Epoksi Kompozit 9 mm Çap Delik 30000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları.....	59
Şekil 4.41. Örgü Karbon/Epoksi Kompozit 3x3 mm ² Kare Delik 30000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları.....	60
Şekil 4.42. Örgü Karbon/Epoksi Kompozit 6x6 mm ² Kare Delik 30000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları.....	61

Şekil 4.43. Örgü Karbon/Epoksi Kompozit 9x9 mm ² Kare Delik 30000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları.....	61
Şekil 4.44. Örgü Cam/Epoksi Kompozit 3 mm Çap Delik 40000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları.....	62
Şekil 4.45. Örgü Cam/Epoksi Kompozit 6 mm Çap Delik 40000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları.....	62
Şekil 4.46. Örgü Cam/Epoksi Kompozit 9 mm Çap Delik 40000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları.....	63
Şekil 4.47. Örgü Cam/Epoksi Kompozit 3x3 mm ² Kare Delik 40000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları.....	64
Şekil 4.48. Örgü Cam/Epoksi Kompozit 6x6 mm ² Kare Delik 40000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları.....	64
Şekil 4.49. Örgü Cam/Epoksi Kompozit 9x9 mm ² Kare Delik 40000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları.....	64
Şekil 4.50. Örgü Karbon/Epoksi Kompozit 3 mm Çap Delik 40000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları.....	65
Şekil 4.51. Örgü Karbon/Epoksi Kompozit 6 mm Çap Delik 40000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları.....	65
Şekil 4.52. Örgü Karbon/Epoksi Kompozit 9 mm Çap Delik 40000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları.....	66
Şekil 4.53. Örgü Karbon/Epoksi Kompozit 3x3 mm ² Kare Delik 40000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları.....	67
Şekil 4.54. Örgü Karbon/Epoksi Kompozit 6x6 mm ² Kare Delik 40000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları.....	67
Şekil 4.55. Örgü Karbon/Epoksi Kompozit 9x9 mm ² Kare Delik 40000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları.....	67

TABLO DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 3.1. Örgü Cam/Epoksi Kompozit Malzeme Özellikleri	26
Tablo 3.2. Örgü Karbon/Epoksi Kompozit Malzeme Özellikleri.....	27
Tablo 4.1. Örgü Cam/Epoksi Malzemesinin 0.05 mm/dak Hızında Çekme Testinde Farklı Dairesel Çaptaki Deliklerin Çentik Etkisi.....	35
Tablo 4.2. Örgü Cam/Epoksi Malzemesinin 0.05 mm/dak Hızında Çekme Testinde Farklı Kare Boyutlarındaki Deliklerin Çentik Etkisi.....	35
Tablo 4.3. Örgü Karbon/Epoksi Malzemesinin 0.05 mm/dak Hızında Çekme Testinde Farklı Dairesel Çaptaki Deliklerin Çentik Etkisi.....	35
Tablo 4.4. Örgü Karbon/Epoksi Malzemesinin 0.05 mm/dak Hızında Çekme Testinde Farklı Kare Boyutlarındaki Deliklerin Çentik Etkisi.....	36
Tablo 4.5. Örgü Cam/Epoksi Malzemesinin Farklı Yüksek Hızlarda Çekme Testinde Farklı Dairesel Çaptaki Deliklerin Çentik Etkisi.....	46
Tablo 4.6. Örgü Cam/Epoksi Malzemesinin Farklı Yüksek Hızlarda Çekme Testinde Farklı Kare Boyutlarındaki Deliklerin Çentik Etkisi.....	46
Tablo 4.7. Örgü Karbon/Epoksi Malzemesinin Farklı Yüksek Hızlarda Çekme Testinde Farklı Dairesel Çaptaki Deliklerin Çentik Etkisi.....	46
Tablo 4.8. Örgü Karbon/Epoksi Malzemesinin Farklı Yüksek Hızlarda Çekme Testinde Farklı Kare Boyutlarındaki Deliklerin Çentik Etkisi.....	47

TEŞEKKÜR

Çalışmamın her aşamasında bana destek olan, bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren danışman hocam Sayın Doç. Dr. Engin ERBAYRAK'a, öğrenim hayatım boyunca beni maddi ve manevi olarak her türlü konuda sonsuz desteklerini esirgemeyen ve hep yanımda olan annem Suna SEVENER, babam Kamil SEVENER ve abilerim Hasan SEVENER ve Murat SEVENER'e benim kocaman güzel aileme yürekten çok teşekkür ederim iyi ki varsınız.

Demirali SEVENER
İzmir, 2025



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Kompozit Laminatlarda Yer Alan Farklı Şekillerdeki Çentiklerin Farklı Yükleme Hızlarında Mekanik Özellik Değişimlerinin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Belirlenmesi

Demirali SEVENER

**İzmir Demokrasi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Doç. Dr. Engin ERBAYRAK

Günümüzde gelişen teknoloji ile beraber havacılık, otomotiv, savunma sanayi gibi çeşitli alanlarda kompozit malzemelerin kullanımı yaygın hale gelmiştir. Kompozit malzemeler matris ve takviye elemanlarından oluşur ve en az iki farklı malzeme içermektedirler. Bu malzemelerin üretilmesinin temel amacı daha üstün mekanik özelliklere ve dayanıma sahip, muadillerine göre avantajları daha yüksek olan malzemeler üretmektir. Bu tez çalışmasında literatürde yaygın olarak kullanılan örgü cam/epoksi ile örgü karbon/epoksi kompozit malzemeleri tercih edilmiştir. Yapılan araştırma bir sonlu eleman analizi içermektedir ve kullanılan uygulama LS-DYNA'dır. Temel olarak bir çekme testi analizi yapılmıştır ve farklı geometrilere delikler açılarak çentik etkisi incelenmiştir. Kullanılan çekme testi numunesi ASTM D 638 Tip 1 kriterlerini içermektedir. Bu çalışma üç aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada model doğrulaması yapılmıştır bunun için literatürde yapılan benzer bir çalışma baz alınmıştır. Çekme testleri baz alınan literatürdeki benzer sınır şartlarını içermektedir. Model doğrulamasında, yapılan analiz sonucu elde edilen gerilme gerinim grafiği baz alınan literatürdeki deneysel verilerden elde edilen gerilme gerinim grafiği ile karşılaştırılarak model doğrulaması yapılmıştır. İkinci aşamada doğrulanan model üzerinde 3, 6 ve 9 mm çaplarında dairesel ve 3x3, 6x6 ve 9x9 mm² boyutlarında kare delikler açılmıştır ve 0.05 mm/dak sabit hızında çentik etkisi incelenmiştir. Maksimum çekme gerilmesi değerleri üzerinde oluşturulan çentiklerin etkileri tespit edilmiştir. Üçüncü ve son aşamada ise ikinci aşamada kullanılan numuneleri 20000, 30000 ve 40000 mm/dak farklı yüksek hızlarda çekme testi analizleri gerçekleştirilmiştir. Çentik etkisinin maksimum çekme gerilmesi üzerindeki etkisi tespit edilmiştir. Yapılan tez çalışmasının sonucunda çekme hızı arttıkça çentik etkisinin azaldığı, deliklerin boyutları arttıkça çentik etkisinin arttığını ve son olarak da kare deliklerin çentik etkisine karşı daha düşük hassasiyet gösterdiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Örgü cam/epoksi kompozit, örgü karbon/epoksi kompozit, sonlu eleman yöntemi, çekme testi, çentik etkisi, yüksek yükleme hızı.

2025, 76 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

Assessment of Mechanical Properties of Composite Laminates with Various Notch Geometries Under Different Loading Rates Using the Finite Element Method

Demirali SEVENER

**İzmir Demokrasi University
Graduate School of Applied and Natural Sciences
Department of Mechanical Engineering**

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Engin ERBAYRAK

Today, with the developing technology, the use of composite materials in various fields such as aviation, automotive, defense industry has become widespread. Composite materials consist of matrix and reinforcement elements and contain at least two different materials. The main purpose of producing these materials is to produce materials with superior mechanical properties and strength, which have higher advantages compared to their counterparts. In this thesis study, woven glass/epoxy and woven carbon/epoxy composite materials, which are widely used in the literature, were preferred. The research includes a finite element analysis and the application used is LS-DYNA. Basically, a tensile test analysis was performed and the notch effect was investigated by drilling holes in different geometries. The tensile test sample used contains ASTM D 638 Type 1 criteria. This study was carried out in three stages. In the first stage, model validation was performed and a similar study in the literature was used as a basis. Tensile tests include similar boundary conditions in the literature on which they are based. In model verification, the stress strain graph obtained as a result of the analysis was compared with the stress strain graph obtained from the experimental data in the literature and the model was validated. In the second stage, circular holes with diameters of 3, 6 and 9 mm and square holes with dimensions of 3x3, 6x6 and 9x9 mm² were drilled on the verified model and the notch effect was investigated at a constant speed of 0.05 mm/min. The effects of the notches created on the maximum tensile stress values have been determined. In the third and final stage, tensile test analyses were performed on the samples used in the second stage at different high speeds of 20000, 30000 and 40000 mm/min. The effect of the notch effect on the maximum tensile stress was determined. As a result of the thesis study, it has been determined that the notch effect decreases as the tensile speed increases, the notch effect increases as the dimensions of the holes increase and finally, square holes show lower sensitivity to the notch effect.

Keywords: Woven glass/epoxy composite, woven carbon/epoxy composite, finite element method, tensile test, notch effect, high loading rates.

2025, 76 pages

1. GİRİŞ

Günümüz döneminde sürekli iyileştirilen ve değişen bir ürün tipi olarak tercih edilen kompozit ürünler imalat sektöründe onlarca farklı iş dalında tercih edilmektedirler. Nitekim misal vermek gerekirse ; otomotiv, havacılık, denizcilik, spor materyalleri şeklinde söyleyebiliriz ve bu ürünler bu tip alanlarda sıkça tercih edilmektedirler. Kompozit ürünlerin imal edilmesi sürecinde ise iki yahut gerektiğinde çok sayıda ürünün bütün hale getirilmesi ile icra edilmektedir. Bu ürünlerin genel olarak bilinen artıları ; mekanik verimi yüksek, kütlesi düşük, aşınma dayanımı iyi, dayanıklılığı fazla şeklinde sıralanabilir [1].

Temelinde bu tür malzemeleri sınıflandırsak takviye elemanı ile matris elemanından meydana gelmektedirler. Takviye elemanları malzemelerin niteliklerini arttırır. Matris elemanı ise takviye elemanlarına katkı sağlar, muhafaza eder, meydana gelebilecek hasarlarda oluşacak zorlamaları takviye elemanlarına dağıtır [2].

Epoksi matris malzemeleri matris elemanlarının bir grubu olan termoset içinde yer almaktadırlar. Yaygın bir şekilde tercih edilmektedirler. Kullanım sahaları için ; havacılık sanayi, elektronik, kaplama materyalleri, bağlayıcılar, elektronik levhalarda izolasyon şeklinde söylenebilir. Nitelikleri için ise ; yüksek ısı, yüksek mekanik yüksek yalıtkanlık, korozyon dayanımı olarak sıralanabilmektedir [3].

Cam fiber materyalleri çağımızda sık tercih edilen polimer kompozit materyallerindendir. Faydalı nitelikleri arasında ; dayanımı fazla, kimyasal dayanım, yüksek izolasyon şeklinde sıralanabilmektedir. Kullanım sahaları için ; spor materyalleri, gemi yapısında, havacılıkta, otomotiv parçalarında, ev eşyaları şeklinde söylenebilir [4].

Karbon fiber materyalleri de bir diğer değerli polimer kompozit materyallerindendir. Faydalı nitelikleri arasında ; düşük ağırlık, dayanımı fazla, fazla sertlik, yorulma dayanımı yüksek şeklinde sıralanabilmektedir. Bu niteliklerin yanı sıra büyük ölçeklerdeki parçalar ile karışık dizaynların imalatında da tercih edilmektedirler. Kullanım sahaları için ; araba sanayisi, havacılık, spor materyalleri şeklinde söylenebilir [5].

Yapılan çalışmada amacımız literatürde ve sanayide yaygın olarak kullanılan örgü cam/epoksi ve örgü karbon/epoksi kompozit malzemelerini kullanarak sonlu elemanlar analizi programı olan LS-DYNA'da çekme testi gerçekleştirmektir. Öncelikle oluşturulan model, literatürde yapılan benzer bir çalışma ile kıyaslanacak ve model doğrulanacaktır. Daha sonra numunelerin ortasına farklı boyutlarda kare ve dairesel çaplarda delikler açarak oluşacak çentik etkisinin maksimum çekme gerilmesine etkisi incelenecektir. Testler öncelikle sabit hızda (0.05 mm/dak) daha sonra da farklı yüksek hızlarda (20000, 30000 ve 40000 mm/dak) test edilecektir.

1.1. Literatürde Yapılan Çalışmalar

Literatürde cam ve karbon kompozit malzeme üzerine yapılmış birçok araştırma bulunmaktadır.

Erbayrak ve ark. yapmış oldukları çalışmada örgü karbon, örgü cam ve hibrit sınıflarıyla epoksi matris elemanını tercih etmişlerdir. Deneysel ile sayısal olarak çekme testlerinin sonuçları araştırılmıştır. Tercih edilen numune standartını ASTM D 3039 olarak belirlemişlerdir. Oluşturulan numuneler için 8 kat tercih edilmiştir. Gerçekleştirilen testler için iki farklı değişken kullanmışlardır. Bunlar ; farklı hızlar ve farklı ısılardır. Hızlar ; 0.05, 0.5, 2.5 ile 5 mm/dak değerindedir. Isılar ; oda ısısı 23°C, 60°C ile 100°C değerindedir. Deneylerin bitiminde mikroyapısal neticeleri de gözlemlemişlerdir. Nümerik analizler LS-DYNA uygulamasında gerçekleştirilmiştir. Deneysel ile nümerik sonuçlar mukayese edilmiştir. Hız değerlerinde yükselme yapıldıkça maksimum çekme gerilmesi değerlerinde yükselme, sıcaklık değerlerinde yükselme yapıldıkça da maksimum çekme gerilmesi değerlerinde azalma meydana gelmiştir [6].

Erbayrak ve ark. yapmış oldukları bir başka çalışmada örgü karbon, örgü cam ve hibrit sınıflarıyla epoksi matris elemanını tercih etmişlerdir. Deneysel ile sayısal olarak darbe testlerinin sonuçları araştırılmıştır. Tercih edilen numune standartını ASTM D 3029 olarak belirlemişlerdir. Oluşturulan numuneler için 8 kat tercih edilmiştir. Değişken olarak darbe enerjisi değerleri verilmiştir. Bunlar ; 10, 20, 30 ile 40 J (Joule) darbe enerjisi verileridir. Elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir [7].

Elanchezhian ve ark. yapmış oldukları çalışmada karbon, cam materyalleri ve epoksi matris elemanını tercih etmişlerdir. Gerçekleştirilen araştırmada deneysel çekme, eğilme ile darbe incelenmiştir. Tercih edilen çekme numunesi standartını ASTM D 638 olarak belirlemişlerdir. Oluşturulan çekme malzemelerinde 3.5 ile 4.5 mm ölçülerinde iki ayrı kalınlık belirlemişlerdir. Ayriyetten çekme testinde değişik hız ile değişik ısı şeklinde de iki ayrı değişken belirlemişlerdir. Verilen hızlar ; 1.5 ile 2.5 mm/dak şeklindedir. Verilen ısılar ise ; 35°C ve 70°C şeklindedir. Arızalı malzemeleri taramalı elektron mikroskopuyla deney bitiminde değerlendirmişlerdir. Bulunan neticelerden çıkarılan grafik ile yükselen yahut düşen gerilme değerleri gözlemlenmiştir [8].

Mahato ve ark. yapmış oldukları incelemede dokuma kumaş e-cam türünü ve epoksi matris elemanını tercih etmişlerdir. Yürütülen incelemede statik çekme testi deneysel olarak icra edilmiştir. Tercih edilen deney malzemelerinin ölçütünü ASTM D 3039 olarak belirlemişlerdir. Oluşturulan çekme malzemelerinde fiber materyallerinde %50, %70 ölçülerinde iki ayrı hacim belirlemişlerdir. Birden fazla kata sahip malzemeler oluşturulmuştur. Ayriyetten deneyde çeşitli hız ile çeşitli ısı şeklinde de iki ayrı kriter belirlemişlerdir. Verilen hızlar ; 1, 10, 100, 500, 1000 mm/dak biçimindedir. Verilen ısılar ise ; oda ısısı 25°C, 70°C, 90°C, 110°C biçimindedir. Weibull incelemeleri gerçekleştirmişlerdir, saptanan çıktılar simülasyon ile gerçekleştirilen çıktılarla mukayese maksadıyla deneysel çıktıyla icra edilmiştir. Arızalı ürünleri taramalı elektron mikroskobu ile deney bitiminde hızı 1 ile 1000 mm/dak olan ayrı ısı ile ayrı hacim ölçüleri için değerlendirmişlerdir. Edindikleri neticeler dolayısıyla oluşturulan grafikler ile fazlalaşan yahut küçülen gerilme verilerini analiz etmişlerdir [9].

Chafiq ve ark. yapmış oldukları incelemede dokuma kumaş e-cam, dokuma kumaş bazalt, dokuma kumaş karbon ve hibrit sınıflarıyla epoksi matris elemanını tercih etmişlerdir. Deneysel şekilde çekme testlerinin sonuçları araştırılmıştır. Tercih edilen materyallerin kriterlerini ASTM D 3039 olarak belirlemişlerdir. Oluşturulan numuneler birden fazla kata sahiptir ve hacim değerleri %50'dir. Yapılan testler için değişkenleri hız olarak ; 2 ile 100 mm/dak, ısı için ise ; oda ısısı 25°C şeklinde tanımlamışlardır [10].

Dasari ve ark. yapmış oldukları incelemede düz dokuma tipi karbon, düz dokuma tipi cam ve hibrit sınıflarıyla epoksi matris elemanını tercih etmişlerdir. Deneysel şekilde çekme testlerinin sonuçları incelenmiştir. Tercih edilen materyallerin ölçütlerini ASTM D 3039 olarak belirlemişlerdir. Oluşturulan materyaller 5 katmana sahiptir ve cam ile karbon haricinde 4 değişik hibrit sıralaması da oluşturulmuştur. Ayriyetten deneyde çeşitli hız ile çeşitli ısı şeklinde de iki ayrı kriter belirlemişlerdir. Hız verileri ; 0.1, 10, 100 mm/dak biçimindedir. Isı verileri ise ; 30°C, 70°C, 110°C biçimindedir. Arızalı materyalleri taramalı elektron mikroskobu ile deney bitiminde değerlendirmişlerdir. Elde edilen neticelerden çıkarılan grafik ile artan yahut azalan gerilme verilerini değerlendirmişlerdir [11].

Mahato ve ark. yapmış oldukları incelemede dokuma kumaş e-cam ve epoksi matris materyalini tercih etmişlerdir. Deneysel şekilde çekme testlerinin sonuçları araştırılmıştır. Tercih edilen materyallerin kriterlerini ASTM D 3039 olarak belirlemişlerdir. Oluşturulan numuneler 10 katmana sahiptir ve hacim değerleri %60'dır. Ayriyetten deneyde çeşitli hız verileri belirlemişlerdir. Verilen hızlar ; 1, 10, 100, 500, 1000 mm/dak biçimindedir. Verilen ısı ise ; oda ısı 30°C'dir. Arızalı materyalleri taramalı elektron mikroskobuyla deney bitiminde değerlendirmişlerdir. Bulunan neticeleri incelemişlerdir [12].

Ahmed ve ark. yapmış oldukları incelemede karbon ve polipropilen matris materyalini tercih etmişlerdir. Deneysel şekilde çekme testlerinin sonuçları hem koruyucu kaplamalarının çıkarılmış halde olan hem de çıkarılmamış halde olan kompozit numuneleri için araştırılmıştır. Tercih edilen materyallerin kriterlerini ASTM D 638-10 olarak belirlemişlerdir. Oluşturulan numunelerin hacim değerleri %20'dir. Ayriyetten deneyde çeşitli hız ile çeşitli ısı şeklinde de iki ayrı kriter belirlemişlerdir. Verilen hızlar ; 0.2, 2 ve 20 mm/dak biçimindedir. Verilen ısılar ise ; 25°C, 40°C, 60°C, 80°C ve 100°C'dir. Arızalı materyalleri taramalı elektron mikroskobuyla deney bitiminde değerlendirmişlerdir. Bulunan neticeleri incelemişlerdir [13].

Zhang ve ark. yapmış oldukları incelemede tek yönlü karbon, düz dokuma karbon ve epoksi matris materyalini tercih etmişlerdir. Deneysel şekilde çekme

testlerinin sonuçları araştırılmıştır. Tercih edilen materyallerin kriterlerini yarı statik ile hızı az deneylerde ASTM D 3039 / D 3039M-07 ile ASTM D 7565 / D 7565M-10 olarak belirlemişlerdir, hızı fazla olan deneylerde ise deney aletine göre düzenlenmiştir. Ayriyetten deneyde çeşitli hız kriterleri belirlemişlerdir. Verilen hızlar yarı statik ve hızı az için ; 1, 10 ve 100 mm/dak, hızı fazla için ; 0.1, 1, 3, 6, 9 ve 12 m/s biçimindedir. Dinamik yükselme etkisi ; çekme mukavemeti, young modülü, arıza gerinimi değerlerinin uygulamalı denklemleri çıkarılmıştır. Arızalı materyalleri deney bitiminde değerlendirmişlerdir. Bulunan neticeleri incelemişlerdir [14].

Zhang ve ark. yapmış oldukları incelemede tek yönlü dokunmuş karbon ve epoksi matris materyalini tercih etmişlerdir. Deneysel şekilde yarı statik, hızı az ve hızı fazla çekme testlerinin sonuçları araştırılmıştır. Tercih edilen materyallerin kriterlerini ASTM D 3039 olarak belirlemişlerdir, numune ölçüleri ise deneylere göre düzenlenmiştir. Ayriyetten deneyde çeşitli hız kriterleri belirlemişlerdir. Yarı statik ve hızı az olanlarda eyleyicinin uzamadaki hızı için ; 1, 10, 50, 100 ve 1000 mm/dak biçimindedir. Hızı fazla olanlarda eyleyicinin hız verileri ; 1, 2, 4, 5, 7, 10, 12, 15, 16, 17, 18 ve 20 m/s biçimindedir. Dinamik yükselme etkisi denklemleri çıkarılmıştır. Arızalı materyalleri deney bitiminde değerlendirmişlerdir. Bulunan neticeleri incelemişlerdir [15].

Elkazaz ve ark. yapmış oldukları incelemede gelişigüzel yayılmış cam fiber ve elastomer matris türü olan poliüretan materyalini tercih etmişlerdir. Deneysel şekilde çekme testlerinin sonuçları incelenmiştir. Tercih edilen materyallerin kriterlerini ASTM D 638-84 olarak belirlemişlerdir. Oluşturulan çekme malzemelerinde fiber materyallerinde %0, %0.25, %0.50, %0.75 ölçülerinde 4 ayrı hacim belirlemişlerdir, fiber materyallerinin uzunlukları iki ayrı biçimde 5 ile 10 mm olarak oluşturulmuştur. Ayriyetten deneyde çeşitli hız kriteri de belirlemişlerdir. Verilen hızlar ; 5, 50, 500 mm/dak biçimindedir. Bulunan neticeleri incelemişlerdir [16].

Mahato ve ark. yapmış oldukları incelemede dokuma kumaş e-cam ve epoksi matris materyalini çok duvarlı karbon nanotüp uygulaması ile beraber kullanmayı tercih etmişlerdir. Deneysel şekilde çekme testlerinin sonuçları incelenmiştir. Tercih edilen materyallerin kriterlerini ASTM D 3039 olarak belirlemişlerdir. Oluşturulan numuneler 10 katmana sahiptir ve hacim değerleri %60'dır. Ayriyetten deneyde çeşitli

hız ile çeşitli çok duvarlı karbon nanotüp uygulaması değerleri şeklinde de iki ayrı kriter belirlemişlerdir. Verilen hızlar ; 1, 10 ile 100 mm/dak biçimindedir. Verilen çok duvarlı karbon nanotüp değerleri ise ; %0.1, %0.3, %0.5'dir. Arızalı materyalleri taramalı elektron mikroskopuyla deney bitiminde değerlendirmişlerdir. Ayriyetten cam geçiş ısısına olan tesirlerini, diferansiyel taramalı kalorimetri tahlili ile araştırmışlardır. Elde edilen neticeleri incelemişlerdir [17].

Mahato ve ark. yapmış oldukları incelemede 3K düz dokuma kumaş e-cam ve epoksi matris materyalini tercih etmişlerdir. Deneysel şekilde çekme testlerinin sonuçları ayriyetten sıvı haldeki nitrojen koşulu ile aşırı alçak ısı kullanımları çeşitli vakitlerde incelenmiştir. Tercih edilen materyallerin kriterlerini ASTM D 3039 olarak belirlemişlerdir. Oluşturulan numuneler 9 kata sahiptir ve kütle değerleri %50'dir. Ayriyetten deneyde koşullandırılmış ile koşullandırılmamış materyallerde çeşitli hız ile çeşitli koşullandırma vakitleri şeklinde de iki ayrı kriter belirlemişlerdir. Verilen hızlar ; 1, 10, 100, 500, 1000 mm/dak biçimindedir. Verilen koşullandırma vakitleri ise ; 0.25, 1, 4, 8 saattir. Bozukluğa uğramış materyalleri taramalı elektron mikroskopuyla deney bitiminde değerlendirmişlerdir. Isı düzenlemeli diferansiyel taramalı kalorimetri ile numunedeki polimer halinin cam geçiş ısısını bulabilmek adına tespitler yapmışlardır. Dinamik mekanik termal tahlil aleti ile beraber numunelerin mekanik ile termomekanik cevapları incelenmiştir. Bunun için 3 noktalı eğme aleti kullanılmıştır. Tercih edilen materyallerin kriterlerini ASTM D 7028 olarak belirlemişlerdir [18].

Mahato ve ark. yapmış oldukları incelemede dokuma kumaş e-cam ve epoksi matris materyalini tercih etmişlerdir. Deneysel şekilde çekme testlerinin sonuçları ayriyetten kısa vadeli ısı şok koşulu uygulaması ile de değerlendirilmiştir. Tercih edilen materyallerin kriterlerini ASTM D 3039 olarak belirlemişlerdir. Oluşturulan numuneler 9 kata sahiptir ve kütle değerleri %50'dir. Ayriyetten deneyde koşullandırılmış ile koşullandırılmamış materyallerde çeşitli hız kriterleri belirlemişlerdir. Verilen hızlar ; 1, 10, 100, 500, 1000 mm/dak biçimindedir. Verilen ısı, koşullandırılmamış materyaller için oda ısısı 30°C'dir. Bozukluğa uğramış materyalleri taramalı elektron mikroskopuyla deney bitiminde değerlendirmişlerdir. Numunedeki polimer halinin uygulama ısısını öğrenmek adına diferansiyel taramalı kalorimetri ile tespitler gerçekleştirmişlerdir [19].

Gupta ve ark. yapmış oldukları incelemede 3 K tek yönlü karbon ile epoksi matris materyalini tercih etmişlerdir. Deneysel şekilde çekme testlerinin neticeleri materyalde merkeze çeşitli delikler (dairesele ile kare) hazırlayarak gerçekleştirecek çentik reaksiyonlarını değerlendirmişlerdir. Tercih edilen materyallerin kriterlerini 200 mm x 36 mm x 2.1 mm olarak belirlemişlerdir. Oluşturulan numuneler 8 kata sahiptir, çeşitli iki yerleştirme icra edilmiştir. Verilen yerleştirmeler ; $[0/90]_{2s}$ (çaprazlama) ile $[0]_8$ (boyuna) tarzındadır. Verilen hız ; 2 mm/dak'dır. Verilen ısı ; oda ısısıdır. Ayriyetten deneyde çeşitli dairesele ile kare deliklerin kriterlerini belirlemişlerdir. Verilen dairesele çaplar ; 6, 7 mm biçimindedir. Verilen kare ebatları ; 5.317 mm x 5.317 mm, 6.202 mm x 6.202 mm biçimindedir. Bozukluğa uğramış materyalleri taramalı elektron mikroskopuyla deney bitiminde değerlendirmişlerdir. Edinilen gösterimler neticesinde çentik reaksiyonunda çekme gerilmesi verileri, dairesele deliğe sahip materyallerde kare deliğe sahip materyallere kıyasla daha düşük olduğu izlenilmiştir. Yerleştirme olarak incelendiğinde de $[0]_8$ yerleşiminin dayanıklılığı daha büyüktür [20].

Gupta ve ark. yapmış oldukları incelemede tek yönlü karbon ile epoksi materyallerini tercih etmişlerdir. Deneysel şekilde çekme ile eğilme testlerinin neticeleri materyalde merkeze dairesele delikler hazırlayarak gerçekleştirecek çentik reaksiyonlarını değerlendirmişlerdir. Tercih edilen çekme materyallerinin kriterlerini 200 mm x 36 mm x 2.1 mm olarak belirlemişlerdir. Oluşturulan numuneler 8 kata sahiptir, çeşitli iki yerleştirme icra edilmiştir. Verilen yerleştirmeler ; $[0/90]_{2s}$ (çaprazlama) ile $[0]_8$ (boyuna) tarzındadır. Verilen hız ; 2 mm/dak'dır. Verilen ısı ; oda ısısıdır. Ayriyetten deneyde dairesele deliklerin kriterlerini belirlemişlerdir. Verilen dairesele çaplar ; 6 mm biçimindedir. Bozukluğa uğramış materyalleri taramalı elektron mikroskopuyla deney bitiminde değerlendirmişlerdir. Edinilen gösterimler neticesinde çentik reaksiyonunda çekme gerilmesi verileri, dairesele deliğe sahip materyallerde deliğe sahip olmayan materyallere kıyasla daha alçak olduğu izlenilmiştir. Yerleştirme olarak incelendiğinde de $[0]_8$ yerleşiminin dayanıklılığı daha büyüktür [21].

Jhanji ve Kumar yapmış oldukları incelemede çift yönlü karbon ile epoksi materyallerini tercih etmişlerdir. Deneysel şekilde çekme testlerinin neticeleri materyalde 3 çeşitli dairesele delikler hazırlayarak gerçekleştirecek çentik reaksiyonlarını

değerlendirmişlerdir. Bu unsurlar ; materyalin merkezine 1 delik, materyal merkezine 2 delik (4 mm mesafe aralığı tüm deliklerde), materyal merkezine 4 delik (4 mm mesafe aralığı tüm deliklerde) biçimindedir. Tercih edilen çekme materyallerinin kriterlerini ASTM D 3039 olarak 250 mm x 25 mm boyutlarında belirlemişlerdir. Oluşturulan numuneler 7 kata sahiptir. Verilen hız ; 0.15 mm/dak'dır. Dış etkilere uygun olarak incelenmiştir. Ayriyetten deneyde dairesel deliklerin kriterlerini belirlemişlerdir. Verilen dairesel çaplar ; 3.2 mm biçimindedir. Oluşturulan deliklerin neticesinde çentik reaksiyonunda maksimum dayanıma ulaşan materyal 4 deliği bulunan materyaldir [22].

Zahari ve ark. yapmış oldukları incelemede dengesiz dokunmuş c-cam materyaliyle beraber epoksi materyalini tercih etmişlerdir. Deneysel şekilde çekme testlerinin neticeleri materyalde merkeze çeşitli dairesel delikler hazırlayarak gerçekleşecek çentik reaksiyonlarını değerlendirmişlerdir. Tercih edilen materyallerin kriterlerini ASTM 3039 olarak 250 mm x 25 mm x 2 mm boyutlarında belirlemişlerdir. Oluşturulan numuneler 8 kata sahiptir. Verilen hız ; araştırmacılar kendi usullerince değişmeyen bir hız vermişlerdir. Verilen dairesel çaplar ; 3, 6, 7, 10 mm biçimindedir. Ayriyetten deneyde materyallerin çeşitli yerleştirme kriterlerini belirlemişlerdir. Verilen yerleştirmeler ; $[90]_8$, $[(45/135)_2]_s$, $[45]_8$, $[(0/60)_2]_s$, $[(0/90)_2]_s$ tarzındadır. Çeşitli yerleştirmeler arasında $[(0/90)_2]_s$ yerleşimi yük deplasman çıktıları gözlemlenince en büyük yük verisi bu materyalde oluşmuştur. Deliği bulunan materyallerde $[(0/90)_2]_s$ yerleşimde en büyük yük verisi deliğe sahip olmayan materyalin ardından delik çapı 3 mm olan materyalde oluşmaktadır, deliğin ölçüsü büyüdükçe bu veri alçalmaktadır. Bozukluğa uğramış materyallerin kusur modlarını deney bitiminde değerlendirmişlerdir [23].

Liu ve ark. yapmış oldukları incelemede tek yönlü karbon ile epoksi materyalini tercih etmişlerdir. Deneysel şekilde çekme testlerinin neticelerinde materyalde merkeze çeşitli dairesel delikler hazırlayarak gerçekleşecek çentik reaksiyonlarını değerlendirmişlerdir. Tercih edilen materyallerin kriterlerini 250 mm x 25 mm x 2 mm boyutlarında belirlemişlerdir. Sıralama biçimi $[0/90]_{4s}$ tarzındadır. Deney ASTM D 5766 kriterlerinde gerçekleştirilmiştir. Verilen hız ; 2 mm/dak biçimindedir. Verilen dairesel çaplar ; 7.5, 12.5, 17.5 mm biçimindedir. Ayriyetten deneyde çeşitli ısı kriterleri belirlemişlerdir. Verilen ısılar ; 20°C, -60°C'dir.

Bozukluğa uğramış materyalleri optik mikroskobuyla deney bitiminde değerlendirmişlerdir. Edinilen en yüksek kuvvet verisi -60°C 'de gelmiştir. Delikli materyallerde çaplar büyüdükçe mukavemet değerleri düşmektedir. Isı değeri -60°C 'deki çıktıları bakarsak 7.5 mm ile 12.5 mm çaplı deliğe sahip olan materyallerde mukavemet verilerinde 20°C 'ye göre kıyaslayınca yükselme tespit edilmiştir. Çapı 17.5 mm olan deliğe sahip materyallerde ise 20°C ile -60°C 'deki çıkan dayanım verileri hemen hemen yakın çıkmıştır [24].

Sun ve ark. yapmış oldukları incelemede e-cam ile epoksi materyalini tercih etmişlerdir. Deneysel ile sayısal analiz şeklinde çekme testlerinin neticelerinde materyalin merkezine dairesel delikler hazırlayarak gerçekleştirecek çentik reaksiyonlarını değerlendirmişlerdir. Sayısal analiz ABAQUS uygulaması ile yapılmıştır. Materyallerin sıralama biçimi $[0/90]_5$ tarzındadır. Oluşturulan materyallerin hacim değerleri hemen hemen %55'dir. Verilen dairesel çap ; 5 mm biçimindedir. Dinamik deneyler için verilen hız değerleri ; 0.05, 0.5, 5 m/s biçimindedir. Sayısal analiz için verilen hız değerleri ; 0.05, 0.25, 0.5, 2.5, 5 m/s biçimindedir. Deliğe sahip materyallerin dayanım değerleri için, yükleme hızı yükseldikçe değerlerde büyüme izlenilmiştir. Uygulanan nümerik analizle beraber çıkan neticelerin deney neticeleriyle uyumlu olduğu görülmüştür. Sayısal analizle beraber materyalin hasarını öngörmek amacıyla arıza yapısı tasarlanmıştır. Materyallerin arıza oluşum aşamalarını incelemişlerdir [25].

1.2. Tezin Amacı

Yapılan tez çalışmasında günümüzde yaygın olarak kullanılan ve popüler olan bir malzeme türü olan kompozit malzemeler üzerine sonlu elemanlar analizi çalışması yapılmıştır. Nümerik analiz çalışması LS-DYNA programı yardımı ile yapılmıştır ve burada çekme testi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen maksimum çekme gerilmesi değerleri incelenmiştir. Literatürde ve sanayide sık olarak tercih edilen ve kullanılan örgü cam/epoksi ve örgü karbon/epoksi kompozit malzemeleri üzerine çalışılmıştır. Çentik etkisi incelenmiştir. Farklı yüksek hızlarda çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Tez çalışması genel olarak 3 aşamada incelenmektedir.

İlk aşamada model doğrulaması yapılmıştır. Bu kısımda literatürden yararlanarak örgü cam/epoksi ve örgü karbon/epoksi malzemelerinin özellikleri araştırılmıştır [6,7,26,27]. Daha sonra kullanmış olduğumuz malzemeleri kullanarak çekme testi gerçekleştirmiş olan uygun bir kaynak literatürde araştırılıp bulunmuştur ve model doğrulaması için karşılaştırma yapmak üzere bulunan kaynak baz alınmıştır ve uygulanmış olan sınır şartları kullanılmıştır [6]. Sınır şartlarını ve malzeme özelliklerini kullanarak çekme testi yapılmış ve elde edilen gerilme gerinim grafiği kıyaslanarak oluşturulan malzeme modeli doğrulanmıştır.

İkinci aşamada doğrulanan model üzerinde çentik etkisi incelemesi amacı ile numunenin tam ortasına farklı boyutlarda kare ve farklı çaplarda dairesel delikler açılmış ve sabit hızda (0.05 mm/dak) çekme testleri yapılmıştır.

Üçüncü ve son aşamada ise bu sefer ikinci aşamada yapılan ve kullanılan numuneler kullanılarak çentik etkisini farklı yüksek hızlarda (20000, 30000 ve 40000 mm/dak) gerçekleştirip incelenmiştir.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Kompozit Malzeme

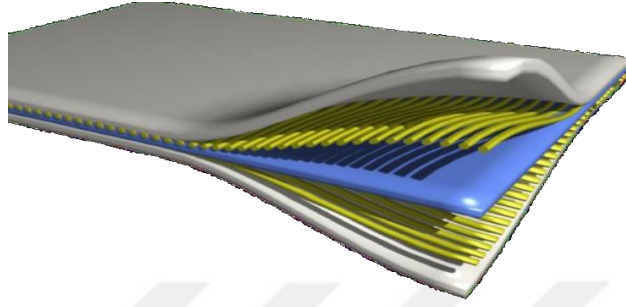
Kompozit malzemelerin ne olduğunu anlatmadan önce tarihçesine kısaca bakacak olursak bunun ilk örneğini yaklaşık olarak MÖ 4000 yıl önce Mısırlılar tarafından yapılan çeşitli bilgilerin yazılıp saklanabilmesi için papirüs bitkisinden o dönemin şartlarında şekil 2.1.'de gösterildiği gibi papirüs isimli bir kağıt elde etmişlerdir. Bu şekilde kompozit malzemelerinin üretiminin başlamış olduğunu söyleyebiliriz ve bu üretim gelişerek günümüze kadar devam etmiştir [28].



Şekil 2.1. Tarihteki İlk Kompozit Papirüs Kağıdı [28]

Günümüzde ise havacılık, uzay, askeri, tıp, otomotiv sanayi gibi birçok sanayide yaygın olarak üretilen ve kullanılan malzemelerden biri kompozit malzemelerdir. Kompozit malzeme üretiminde amaç malzemede olması veyahutta arttırılması istenilen özelliklerde bir ürün elde etmektir. Örnek olarak ; mekanik, termal, darbe dayanımı, aşınma dayanımı, yüksek sertlik gibi özellikleri sıralayabiliriz. Kompozit malzemeler temel olarak iki ana fazdan meydana gelirler. Sırasıyla birinci faz matris elemanı ve ikinci faz ise takviye elemanı şeklinde belirtilmektedirler. Bu

malzemeler yapısal olarak kimyasal ve fiziksel nitelikleri değişik ve kendi aralarında çözünmeden iki materyalin kimi zaman da ikiden fazla materyalin bir araya getirilip birleştirilmesiyle üretilmektedirler. Şekil 2.2.'de bir kompozit materyalin çeşitli katları görülmektedir. Bu şekilde son ürün için istenilen yüksek nitelikteki özelliklere sahip bir kompozit malzeme elde edilmiş olunur [29,30,31].



Şekil 2.2. Bir Kompozit Materyalin Çeşitli Katları [32]

Matris elemanına göre kompozit malzeme çeşitlerine bakacak olursak bunlar ; polimer, metal, seramik matris şeklinde söylenebilir. Takviye elemanına göre kompozit malzeme çeşitlerine bakacak olursak bunlar genellikle ; elyaf , parçacık veya tanecik şeklinde söylenebilir [30].

2.1.1. Matris Elemanı

Matris elemanı, kompozit sistemi meydana getiren matris dışındaki ürünlerin birleştirilmesini, arzu edilen biçimi kazanmasını karşılayan üründür. Matris elemanının temel amacı, zorlamaları takviye elemanlarına iletme, yapısal olarak bir beraberlik oluşturmak ve malzemeyi meydana gelebilecek mekanik ve ekolojik tahribatlara karşı muhafaza etmektir. Matris, kompozit ürünlerde ortaya çıkabilecek liflerde çatlama ve kopmaları engelleyerek tok bir yapı meydana getirir [31,33,34].

2.1.2. Takviye Elemanı

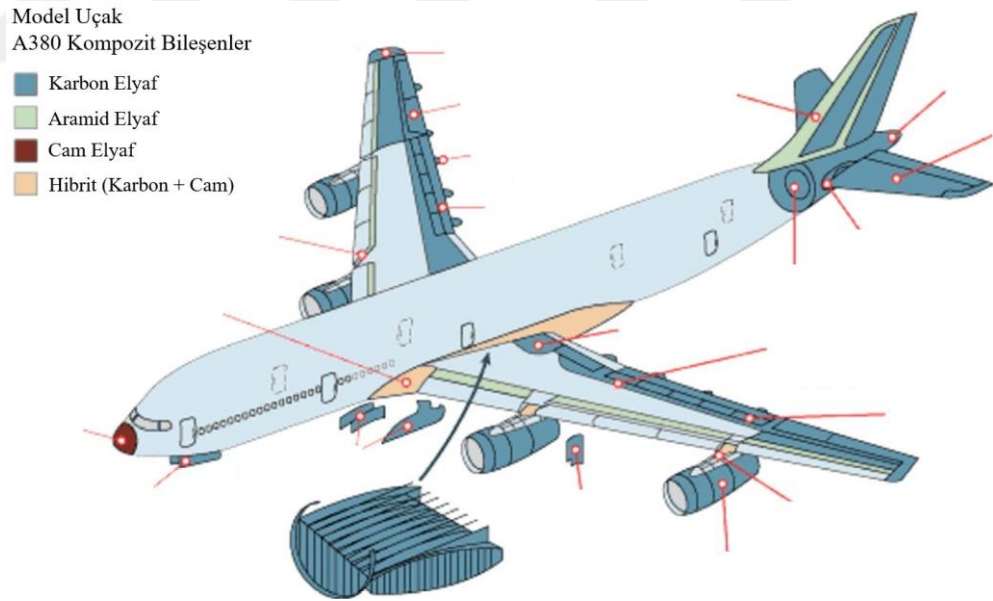
Takviye malzemeleri temel dayanıklılığı oluşturmaktadırlar, ana işlevi kompozit sistemi meydana getiren matris malzemesine katkıda bulunmak, ürüne üstün

mekanik nitelikler kazandırmak, oluşacak ağırlığı sırtlamak, ürün hacmini yükseltmektir [31,33,34].

2.2. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları

Kompozit materyaller çağımızda birçok farklı sektörde kullanılmaktadırlar. Bunlara örnek olarak ; havacılık, savunma, toplu taşıma, yapı, askeri gibi farklı endüstri sınıflarını söyleyebiliriz [32,35,36].

Havacılık alanında yapılanlar ; kabin odası, burun kısmı, iniş takımı kapısı, arka kenar panelleri gibi farklı elemanları imal etmek kayda değer bir şekilde çoğalmıştır. Havacılıkta bu tür üretilmiş materyaller, metal malzemelerden üretilmiş elemanlarla karşılaştırılırsa daha hafif elemanlar elde edilmiş olunur. Şekil 2.3.'te bir A380 Airbus uçak modeli üstünde kompozit malzeme kullanılan kısımlar görülmektedir.



Şekil 2.3. A380 Airbus Uçağında Kompozit Malzeme Kullanılan Kısımlar [32]

Hızlı raylı sistemlerde kullanılması ; daha fazla hız, düşük ray yıpranması, enerji kullanımında düşüş benzeri imkanlar sebebiyle ciddi miktarda yükselmiştir.

Izgara ve Kafeslerde ; metal malzemeden yapılanlar fiyat, direnç ve aşınma dayanımı gibi taraflardan engellerle karşılaşmaktadırlar. Fakat, kompozit malzemelerin kullanımı faydalı işlevsellikleri ile nitelikleri sebebiyle çağımızda çok fazla uygulanmaktadır [32].

Otomotiv sanayi alanında ; elemanlarda birleştirmeyi rahatlatma becerisi, seri döngü zamanı, daha az masraflı olması sebebiyle yük düşürme amacıyla potansiyel taşırlar. Kompozit materyalden yapılan bir yay elemanı için yorulma süresi çelik malzemesine göre kıyasla beş katından çok olduğu görülmüştür. Bu tür materyalden üretilmiş olan yay malzemesi çelik malzemesine göre kıyaslandığında daha nazik olarak araç kullanımına yardımcı olur, bunun yanı sıra da yol sarsıntısında oluşan yüklenmelere daha çabuk karşılık gösterir [35].

Askeri alanda kullanımında ise farklı birçok bileşende rastlayabiliriz. Bunlar ; yelek, kask, kalkan, zırh gibi birçok ekipmanlarda kullanılabilmektedirler [36].

2.3. Kompozit Malzemelerin Avantajları ve Dezavantajları

2.3.1. Kompozit Malzemelerin Avantajları

Kompozit malzemelerin neden kullanıldığına dair sahip oldukları avantajları şu şekilde sıralanabilmektedirler ;

- Kimyasal ve korozyona üstün dayanım,
- Hafiflik,
- Karışık ürün yapısında basit şekilde imal etme,
- Takım fiyatı fazla uygundur,
- Aşırı ısı değerlerinde ve iklim şartlarına karşı direnç,
- Üstün mukavemet,
- Tutuşma riski az,
- Mekanik nitelikleri, takviyenin elemanında farklı şekilde hizalanmalar ile veyahutta kompoziti birden çok katmandan oluşturarak dizayn kişiselleştirilebilir,

- Darbe dayanımı [37,38].

2.3.2. Kompozit Malzemelerin Dezavantajları

Kompozit malzemelerin sahip oldukları dezavantajları ise şu şekilde sıralanabilmektedirler ;

- Ürünün yapısı, metal ürünün yapısına kıyasla karışık mekanik nitelikler içermektedir,
- Tamir aşaması metale göre karışıktır,
- Metale göre daha fazla dayanım ve kırılma dayanıklılığı özellik birleşim kalitesini içermemektedir,
- İmal etme fiyatı fazladır,
- Gözükmeyen darbe tahribatı [37,38].

2.4. Matris Elemanına Göre Kompozit Malzemeler

Matris elemanlarına göre kompozit malzeme çeşitleri 3'e ayrılmaktadır. Bunlar ; polimer matris kompozitler, metal matris kompozitler ve seramik matris kompozitler şeklinde söylenebilir [39,40].

2.4.1. Polimer Matris Kompozitler

Polimer matrisli kompozit malzemeler uygulamalarda çok sık tercih edilmektedirler. Çok çabuk büyüyen aynı zamanda en geniş kapsamlı olan gruptur. Termoset ile termoplastik matrisler, polimer matris kompozit materyallerde matris sıfatıyla faydalanılmaktadırlar. Polimer matris kompozit malzemelerde bilhassa ana materyal olan matris malzemesi polimer çeşidinden meydana gelmektedir [41].

Materyalde üstün elektromanyetik, kimyasal aşınma dayanımı, optik, aşınma mukavemeti, izolasyon, aşırı frekans dielektrik nitelikleri vardır. Üretilen materyallerde mekanik, fiziksel, hasar, aşınma dayanımı, kimyasal nitelikleri devamlı

geliştirilmiştir. Bu neticede de polimer matrisli kompozitler meydana gelmiştir [41,42].

Fazla yük esnasında, çatlama takviye elemanlarında gerçekleşir fakat yükleme matris elemanı ile beraber malzemedeki diğer takviye elemanlarına da iletilir. Bu sebeple, malzemelerde yüzey kısımlarında kırılmalar meydana gelmez aynı zamanda fazla yük esnasında ani arıza meydana gelmez [42].

Polimer matris uygulamalarında kullanılan bazı matris çeşitlerini sıralamak istersek bunlar ;

- Polietilen
- Teflon
- Epoksi
- Melamin
- Polivinil klorür (PVC)
- Lexan
- Vinil kauçuk
- Polyester
- Polistiren
- Poli
- Naylon
- Pestisitler
- Poliakrilonitril (PAN)

şeklinde yazılabilir [41,42].

2.4.1.1. Termoplastik

Bu malzeme çeşidi lineer bağlantı molekülüyle tanımlanır aynı zamanda defalarca eritme yapılabilir ya da tekrardan işleme tabi tutulabilir. Bu tip malzemelerde defalarca gerçekleştirilen eritme ile tekrardan işleme yapılabilse de, ısı etkisinin tanımlanmış olan ısıda, fazla ısı ya da fazla durma zamanı gibi durumlarda bilhassa

darbe nitelikleri benzeri polimer niteliklerine zarar verebileceği düşünülmektedir. Termoplastik matris malzemesini eritebilmek amacıyla, sıvılaştırma sıcaklığının üstündeki bir ısıya çıkılmalıdır. Çoğunlukla, birçok termoplastik matris, epoksi benzeri termoset matrislere kıyasla erimesi güçtür. Viskoziteleri yükselen ısıyla düşer, fakat buradaki risk ise eğer ısı daha da artarsa matris malzemesinde ayrışma meydana gelir. Bu malzemelerde, belli bir ölçüde geriye dönme gibi faydalı bir durumu mevcuttur. Bunu yapabilmek ve biçimlendirebilmek istenirse sıcaklık ile basınç işlemi yapılır. Dezavantaj için, fazlaca genleşme ve fazlaca viskozite nitelikleri söylenebilmektedir [43].

Kompozit malzemelerde sık olarak istifade edilen termoplastik matris malzemeleri ;

- Polipropilen,
- Naylon,
- Termoplastik polyesterler,
- Polikarbonatlar,
- Sıvı kristal polimer,
- Ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen,
- Yüksek yoğunluklu polietilen,

şeklinde sıralanabilirler [43,44].

2.4.1.2. Termoset

Termoset matrislerin kullanımı havacılık sanayi, enerji üretimlerinde, otomotiv sanayisi şeklinde sık olarak birçok sektörde tercih edilmektedir [45].

Termoset matrislerde molekül yapılarının çapraz biçimde bağ oluşturmaları, tepkimede ısı açığa çıkması, kimyasal çekme, termal fiziksel ile termal mekanik niteliklerin iyileştirilmesi bu halde meydana gelmektedir. Kimyasal çekme, termal genleşme/büzülme ile olan bağlantısı nedeniyle karakterize edilmesi zor olan termoset matrisinin bu tür bir özelliğidir [46].

Avantajları arasında ; başta matris sıvı halde olduğu için uygulaması basittir, bu matris tipi termoplastik matrislerle karşılaştırılınca uygulama esnasında düşük ısıya ihtiyaç duyarlar, kompozit üretimleri esnasında malzemeler ekonomik olan model yapılarında uygulanabilirler, bu şekilde kompozit üretimleri esnasında az miktarda basınca ihtiyaç duyulmaktadır şeklinde söylenebilir.

Dezavantajları için ise ; katılma zamanı fazladır, tekrar tekrar kullanılamazlar yani geri dönüşümde bazı sıkıntıları mevcuttur şeklinde söylenebilir.

Fakat termoset matrisler kompozit üretimlerinde, yüksek mekanik nitelikleri sağlamasından dolayı çoğunlukla tercih edilmektedirler [47].

Kompozit malzemelerde sık olarak istifade edilen termoset matris malzemeleri ise ;

- Epoksi
- Polyester
- Poliüretanlar
- Silikonlar
- Fenolikler
- Vinilester

şeklinde sıralanabilirler [45,48].

2.4.1.3. Elastomer

Elastomer matrisler, Uluslararası Temel ve Uygulamalı Kimya Birliği açıklamasında kauçuk emsali esneme kabiliyetine sahip olan polimer malzemeler olarak betimlenebilirler [49].

Kullanım alanları olarak ; ziraat, savunma sanayi, otomotiv sanayi, paketleme, tıbbi servisler ile gündelik hayatımızda sıkça tercih edilmektedir.

Elastomer matrislerin nitelikleri için ; alçak cam geçiş ısı değeri, elastikiyet değeri fazla, az dayanıklılık, viskoelastik tutum, elastikiyet modülü alçak, kırılma dayanımı fazla, yüksek termal dayanım, çevre ısılarında rahat şekil değiştirme, hasara uğramadan evvel fevkalade uzama ile esnek olma durumu gibi çeşitli ifadeler verilebilir [49,50].

Kompozit malzemelerde sık olarak istifade edilen elastomer matris malzemeleri ise ;

- Kauçuk
- Polibütadien
- Polikloropren

şeklinde sıralanabilirler [51].

2.4.2. Metal Matris Kompozitler

Metal matrisler, devamlı çoğalan ve sanayilerde tercih edilen ağırlığı düşük, verimli materyallerdir [52].

Kullanım alanları olarak ; savunma sanayi, kara taşımacılığı, havacılık, elektronik, eğlence, altyapı sanayilerinde sıkça tercih edilmektedir [53].

Metal matrislerin nitelikleri için ; düşük yoğunluk, dayanıklılığı yüksek, yüksek sertlik, yüksek elastik modül, termal iletimi fazla, elektrik iletimi fazla, yüksek aşınma dayanımı şeklinde sıralayabiliriz [52,53]. Fakat tokluk özellikleri az, maliyet açısından ise biraz fazladır [52].

Kompozit malzemelerde sık olarak istifade edilen metal matris malzemeleri ise ;

- Alüminyum

- Magnezyum
- Çelik

şeklinde sıralanabilirler [52].

2.4.3. Seramik Matris Kompozitler

Seramik matrislerin niteliklerini ; yüksek dayanıklılık, yüksek aşınmaya karşı dayanım, kırılma tokluğu fazla, fazla ısı kararlılığı, yüksek ısıl şok dayanımı şeklinde sıralayabiliriz.

Kullanım alanları olarak ; savunma sanayi, havacılık, otomotiv sanayi, elektrik ile elektronik, güç ile enerji, biyomedikal sanayilerinde tercih edilmektedir [54].

Kompozit malzemelerde sık olarak istifade edilen seramik matris malzemeleri ise ;

- Silisyum karbür
- Silisyum nitrür
- Alümina
- Zirkonyum
- Alüminyum titanat
- Alüminyum nitrür

şeklinde sıralanabilirler [55].

2.5. Takviye Elemanına Göre Kompozit Malzemeler

Kompozit üretiminde takviye elemanı olarak cam elyaf ve karbon elyaf malzemeleri sıkça tercih edilmektedir. Bunların başlıca sebepleri arasında ; iyi dayanım, iyi sertlik, iyi sönümleme, yüksek korozyon ile yorulma dayanımı şeklinde sıralanabilmektedir. Havacılık ve otomotiv sanayi gibi birçok farklı alanda tercih edilmektedir [56]. Bu iki malzemenin yanı sıra bir diğer sıkça tercih edilen malzeme

ise aramid malzemedir. Fazla çekme mukavemeti ile young modülü vardır. Bu sebeple de bu malzeme askeri olarak silah sanayisinde, çelik konstrüksiyonlara alternatif olarak, kask, zırh gibi malzemelerde oldukça fazla kullanılmaktadır [57].

2.5.1. Cam Elyaf

Kullanım açısından cam elyaf malzemeler ; havacılık sanayi, otomotiv sanayi, denizde kullanılan yapılarda, elektronik gibi birçok farklı alanda tercih edilmektedirler. Sahip oldukları nitelikler açısından ; termal iletimi az, iyi dayanım, yüksek elektrik yalıtımı, tutuşmazlık, sertlik, kimyasal dayanıklılık şeklinde sıralanabilirler. Dezavantajları için ise ; karbon fiber malzemelere kıyasla ortalama düzeyde az modülleri vardır. Birçok cam elyaf türü mevcuttur. Bunlar ; A, C, D, E, AR, R, S, S-2 şeklinde gruplandırılabilirler [58].

2.5.2. Karbon Elyaf

Çağımızda, PAN iplikleri, viskoz suni iplik, mezofaz asfalt yahut petrol artıkları karbon elyafların imalatında çok fazla tercih edilmektedir. Karbon elyaf imalatında en sık kullanılan ham madde ise PAN iplikleridir. Kullanım açısından karbon elyaf malzemeler ; havacılık, otomotiv, deniz sevkiyatı, silahlı kuvvetler, sağlık, spor şeklinde birçok farklı alanda tercih edilmektedirler. Sahip oldukları nitelikler açısından ; ağırlığı düşük, sertliği fazla, çekme direnci fazla, yorulma dayanımı, titreşim önlemesi yüksek, fazla ısı tutarlılığı, aşınma direnci fazla, ısıl genişleme oranı az şeklinde sıralanabilirler. Dezavantajları için ise ; cam fiber, plastik fiber yahut organik şekilde mevcut fiberlere kıyasla fazla masraflıdırlar. Birçok karbon elyaf türü mevcuttur [58].

2.5.3. Aramid Elyaf

Verimi fazla olan bir doğal fiber materyali içinde yer almış aramid fiberler ile kompozit malzemelerinin nitelikleri ; mekanik niteliği fazla, düşük ağırlık, termal dayanımı fazla, yangın koruyucu, kimyasal denge, izolasyon şeklinde üstün nitelikleri bulunmaktadır.

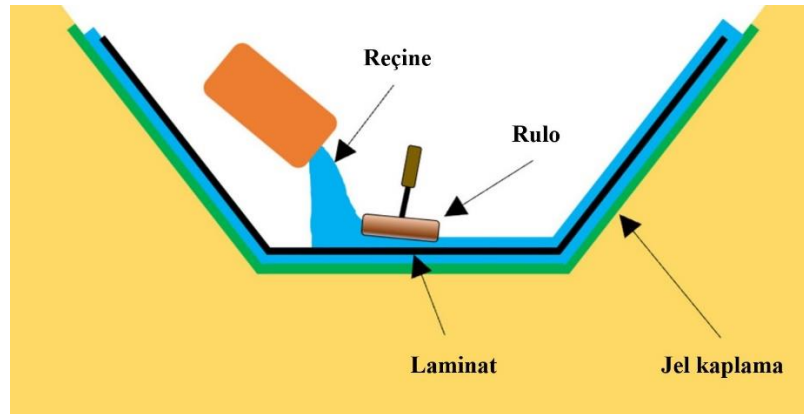
Kullanım alanları olarak ; havacılık, silah sanayi, zırhlı yelekler, otomotiv sanayi, şahsi güvenlik, elektrik izolasyonu, sanayi filtreleri, üst düzey tüketim malları gibi yerlerde sık şekilde tercih edilmektedirler.

Farklı çeşitleri bulunmaktadır. Bunlardan birkaçı ; nomex, kevlar, kevlar-29, kevlar-49, kevlar-49 AP, kevlar-149, kevlar-KM şeklinde isimlendirilmektedirler [59].

2.6. Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri

2.6.1. Elle Yatırma Yöntemi

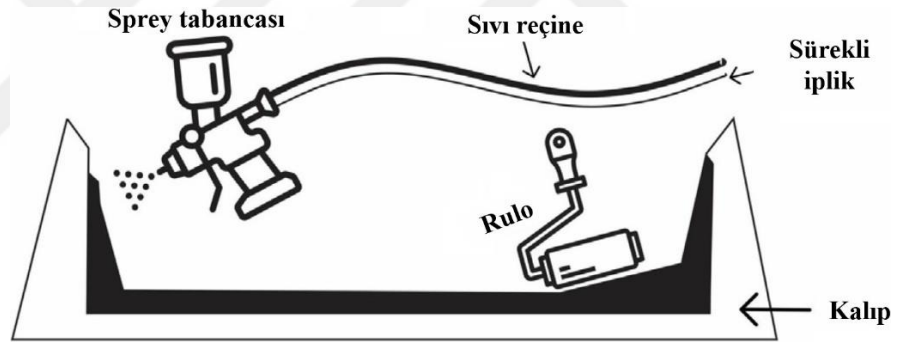
Kullanılan bu yöntemde, fiber materyalleri oluşturulmuş olan kalıp üstüne el ile koyulur devamında ise üstüne reçine dökülür üretim süreci bu şekilde gerçekleşmektedir. Fiber materyaller kalıp üstüne yerleştirilmeden evvel oluşturulan kalıbın üstüne jel malzemesi yerleştirilmektedir. Kullanılan reçine malzemesi burada polyester, epoksi şeklinde termoset eriyik haldeki bir matris malzemesidir. Fiber materyallerin üstüne yerleştirilen matris malzemesi, üretilecek olan malzemenin kalınlık ölçüsüne göre tabaka tabaka olarak rulo yardımı ile dağıtılır. Fiber malzemesi için tercih edilen malzemeler ; cam, karbon, kevlar şeklinde yapay malzemelerdir. Elde edilen katmanlı malzemenin takviye elemanı kütle yüzdesi %30 - %50 üstündedir. Şekil 2.4.'de elle yatırma yönteminin gösterimi verilmiştir [60].



Şekil 2.4. Elle Yatırma Yöntemi [60]

2.6.2. Püskürtme Yöntemi

Bu yöntemde, püskürtme işlevi gören bir tabanca yardımı ile daha önceden oluşturulmuş bir kalıp üstüne parçalanmış takviye elemanı iplikleri ile beraber reçine matris malzemesi eş zamanlı olarak dağıtılmaktadır. Rulo uygulaması ile beraber matris malzemesi ile takviye elemanı bir araya getirilir. Oluşturulan malzemenin katılaşması için çevresel şartlarda ortam ısisına gelene dek beklenir. Parçalanmış olan katmanlı malzemede uygunluk sağlanmaktadır. Ayriyetten karışık biçimler için bu yöntemin uygulanması el ile yatırma yöntemine göre daha çabuk gerçekleşmektedir. Bu yöntemde işlemi gerçekleştiren kişi kaplamada kalınlık ile yoğunluğu düzenleyebilir, böylelikle sistem yer değiştirebilen elemanlara sahip olduğundan dolayı otomasyon sağlanır bunun yanı sıra uygulanması istenilen sahalarda imalatı mümkün kılar. Şekil 2.5.'de püskürtme yönteminin gösterimi verilmiştir [61].

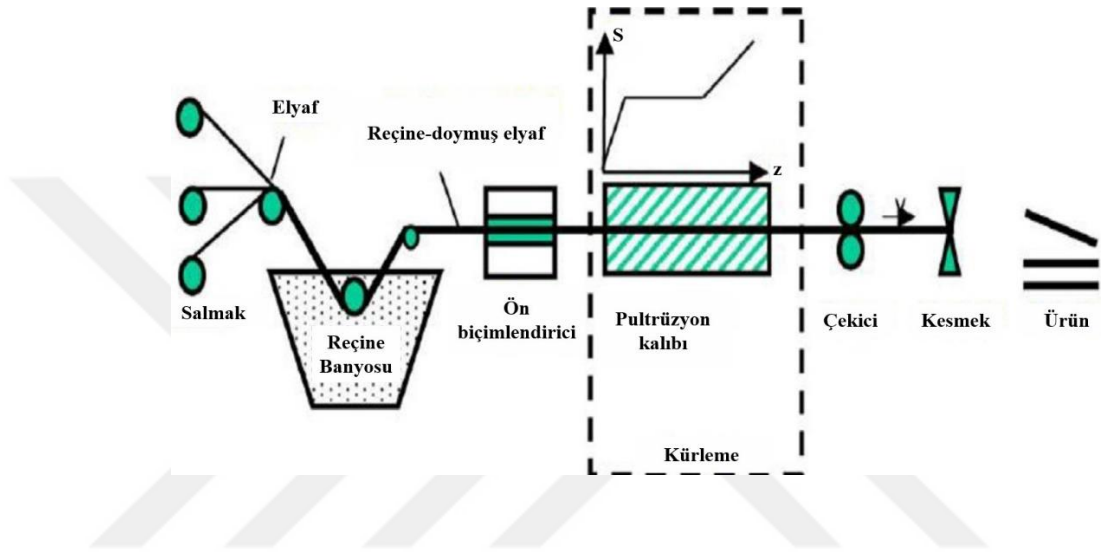


Şekil 2.5. Püskürtme Yöntemi [61]

2.6.3. Pultrüzyon Yöntemi

Kullanılan yöntem, kesit yüzeyi bilinen bir materyalin imalatında devamlı bir süreçtir. Bu süreçte takviye elemanı malzemeleri rulolarından salınmaya başlar salınan malzeme reçine matris elemanının bulunduğu kaba doğru ilerler, burada takviye elemanı bütünüyle batırılıp nemlendirilir. Nemli doygun duruma gelen takviye elemanı daha sonra sıcak hale gelmiş olan kap içine geçiş yapar, materyaldeki sertleşme aşaması sıcak olması sebebiyle burada gerçekleşir. Tutucu aparatları yardımı ile sertleşen materyaller bu kısımdan çekilir. Sonra kesme aparatı ile beraber üretilen

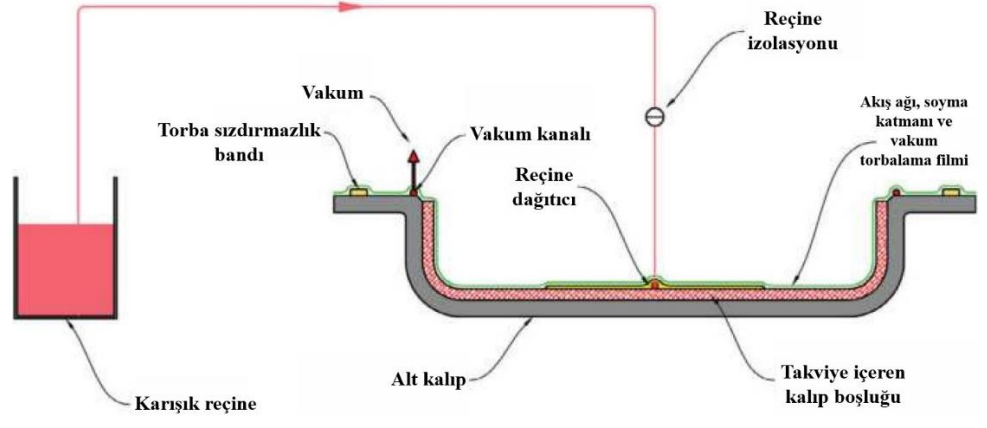
numune parçalara bölünür. Bu mekanizmada çoğunlukla reçine kabı ile sıcaklaştırılmış kabın dahilinde ön biçimlendirici mevcuttur. Tercih edilen takviye elemanları için ; e-cam, karbon, aramid şeklinde söylenebilir. Tercih edilen matris elemanları için ise ; epoksi, doymamış polyester, vinil ester şeklinde söylenebilir. Kullanılan yöntemin artıları ; imalat oran değeri fazlaca olan devamlı süreci vardır, imalat ücretleri azdır, materyal kesitleri düzenlidir. Şekil 2.6.'da pultrüzyon yönteminin gösterimi verilmiştir [62].



Şekil 2.6. Pultrüzyon Yöntemi [62]

2.6.4. Vakum İnfüzyon Yöntemi

Uygulanan bir başka yöntemde, vakum basınç yöntemi ile beraber matris elemanı olan reçine malzemesinin tercih edilen katman malzemesine aktarılmasını sağlar. Matris malzemesinin aynı seviyede katmanlara yayılması amacıyla akış alanı, kalıp üstüne koyulan takviye elemanlarının üstüne konumlandırılır. Matris elemanı dağıtılmadan evvel vakum işlemi gerçekleştirilir. Bu yöntemin nitelikleri ; düzgün fiber matris derecesi, minimum matris ziyarı, matris uygulanması dengeli, düşük matris bileşeni sebebiyle düşük kütle, ekipman ücreti az, geniş ölçekte malzemeler imal edilebilir şeklinde sıralanabilmektedir. Şekil 2.7.'de vakum infüzyon yönteminin görseli verilmiştir [63].



Şekil 2.7. Vakum İnfüzyon Yöntemi [63]

3. MATERYAL VE YÖNTEMLER

3.1. Materyal

Bu kısımda kompozit malzemeler için daha önceden de tezde anlatıldığı gibi üstün özelliklere sahip olmalarından dolayı tercih edilmektedirler ve yapılan tez çalışmasında bu malzemeler arasında yaygın olarak kullanılan malzemelerden olan örgü cam/epoksi kompozit malzeme ile örgü karbon/epoksi kompozit malzemelerin kullanımı tercih edilmiştir. Bu malzemeleri sayısal yöntemlerde kullanabilmek amacı ile materyallerin nitelikleri literatürde araştırılmıştır. Bulunan nitelikler arasında sürekli deneme yoluyla da bulunması gereken maksimum gerilme için bizim modelimizde uygun olan young modülü, çekme dayanımı ve kayma modülü malzeme değerleri bulunmuştur.

Kullanılan örgü cam/epoksi kompozit malzeme ile örgü karbon/epoksi kompozit malzemelerinin özellikleri sırasıyla tablo 3.1. ve tablo 3.2.'de gösterilmektedir ;

Tablo 3.1. Örgü Cam/Epoksi Kompozit Malzeme Özellikleri [6, 7, 26]

Özellikler	Değerler	Birimler
Yoğunluk	$1.9 e^{-3}$	gr/mm^3
Young modülü (E_X)	38000	MPa
Young modülü (E_Y)	38000	MPa
Poisson oranı XY	0.159	-
Kayma modülü XY	3407	MPa
Kayma modülü YZ	3407	MPa
Kayma modülü ZX	3407	MPa
Basınç dayanımı X	307	MPa
Basınç dayanımı Y	307	MPa
Çekme dayanımı X	657	MPa
Çekme dayanımı Y	657	MPa
Kayma dayanımı XY	80	MPa
Etkin kopma gerinimi (%)	2.29	-

Tablo 3.2. Örgü Karbon/Epoksi Kompozit Malzeme Özellikleri [6, 7, 27]

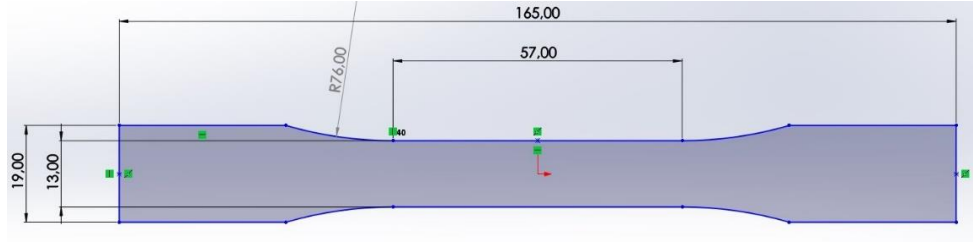
Özellikler	Değerler	Birimler
Yoğunluk	$1.48 e^{-3}$	gr/mm^3
Young modülü (E_X)	120000	MPa
Young modülü (E_Y)	120000	MPa
Poisson oranı XY	0.13	-
Kayma modülü XY	6560	MPa
Kayma modülü YZ	5000	MPa
Kayma modülü ZX	5000	MPa
Basınç dayanımı X	591	MPa
Basınç dayanımı Y	591	MPa
Çekme dayanımı X	987.5	MPa
Çekme dayanımı Y	987.5	MPa
Kayma dayanımı XY	118.6	MPa
Etkin kopma gerinimi (%)	1.012	-

3.2. Yöntem

Bu bölümde gerçekleştirilecek olan çekme testlerimizi simüle edebileceğimiz ve oluşacak hasarları görebilmek için kullandığımız yöntem olan sayısal analiz yönteminden bahsedilecektir. Burada kullanmış olduğumuz program LS-DYNA uygulamasıdır. Bu program ile malzememizin modellemesi yapılacak ve oluşan hasarlar incelenecektir. Bunlardan önce malzemelerimiz için çekme testlerinde kullanacağımız numune tipimiz belirlenecektir ve SolidWorks uygulamasında çizimi gerçekleştirilecektir. İlk aşama olarak malzeme modelimizin doğrulaması yapılacaktır. Bunun için literatürde yer almış olan benzer sınır şartlarında, aynı tip malzemeler üzerinde yapılmış, aynı hızda (0.05 mm/dak) çekme testleri gerçekleştirilmiş olan bir deneysel sonuçla karşılaştırılacaktır [6]. İkinci aşama olarak 0.05 mm/dak sabit hızında çekme testleri çentik etkisini incelemek için gerçekleştirilecektir. Burada kullanılacak olan çentikler malzeme numunesinin tam ortasına açılacaktır ve farklı geometrilere sahip olacaklardır. Deliklerin geometrileri ; 3, 6 ve 9 mm çapında dairesel delikler ile 3x3, 6x6 ve 9x9 mm² boyutlarında kare delikler şeklindedir. Üçüncü ve son aşama olan çentik etkisine bu sefer de yüksek hızlarda (20000, 30000 ve 40000 mm/dak) çekme testleri gerçekleştirip elde edilecek sonuçlar incelenecektir.

Malzeme modelimizin anlatımında ilk başta numune kriterlerimiz belirlenmiştir. Bu kriterimiz ASTM D 638 Tip 1 şeklindedir ve numunemiz

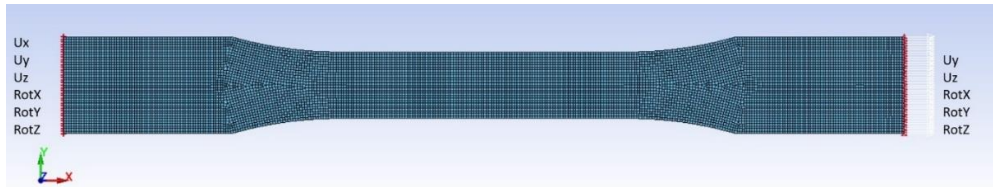
SolidWorks uygulamasında şekil 3.1.'deki gibi uygun boyutlarda dizayn edilmiştir [64, 65].



Şekil 3.1. ASTM D 638 Tip 1 Çizimi (Bütün ebatlar mm'dir.)

3.2.1. Model Doğrulama Aşaması

İlk aşama için oluşturulan model çizimini LS-DYNA uygulamasında kullanabilmek için IGES File şeklinde kaydedilmiştir. Model kurulumu model doğrulaması için LS-PrePost uygulaması açılır, burada ilk olarak çizimde IGES File olarak kayıt edilen dosya *Import* komutundan açılır. Ardından *Element and Mesh* komutundan *Auto Mesher* komutu açılır ve burada ağ çeşidini karışık, eleman boyutu da 0.5 mm olarak seçerek numune sonlu elemanlarına ayrıştırılmıştır. Burada akabinde düğüm noktası 10759, eleman adedi 10395 olarak belirlenmiştir. *Model and Part* bölümünden sınır şartlarını oluşturmak için *Create Entity* kısmından *Boundary* ve *Spc* seçilerek burada materyalimizin sabitlenecek kenarına ankastre kiriş, hareket sağlanacak kenarına yalnızca X doğrultusunda hareketi özgür yapan mafsal mesnet tercih edilmiştir. Şekil 3.2.'de sınır şartları ve ağ yapısı oluşturulmuş materyal sunulmaktadır.



Şekil 3.2. Sınır Şartları ve Ağ Yapısı Oluşturulmuş Materyal

Örgü karbon/epoksi kompozit malzemeye örgü cam/epoksi kompozit malzemelerinin modellenebilmesi amacıyla *Model and Part* kısmından *Keyword Manager* açılır ve burada *MAT* kısmından *MAT 54/55* Geliştirilmiş Kompozit Hasar materyal modeli tercih edilmiştir. Kullanılacak bileşenlerin mekanik nitelikleri için tablo 3.1., tablo 3.2.'deki veriler kullanılmıştır. Model doğrulaması literatürde bulunan hız verileri kullanılarak gerçekleştirilmemiştir. Model doğrulamada yer değiştirme verileri kullanılmıştır. Bu nedenle literatürde bulunan 0.05 mm/dak hız verisinde edinilen gerinim verisi, *EFS* yani etkin kopma gerinimi bölümünde kullanılmıştır. Yanı sıra young modülü, çekme dayanımı, kayma modülü verilerinde analizimiz için makul olan verileri, bulunması gereken maksimum çekme gerilmesi verisi için devamlı denemeler sonucunda tespit edilmiştir.

Materyallerimiz için baz alınan literatürde belirtilen katmanlı uygulama *Part_Composite* kısmında 8 katlı, her bir katı 0.25 mm olacak şekilde hazırlanmıştır ve açı değerine 0 yazılmıştır yani bir açı verilmemiştir.

Element Tools bölümünde *Move or Copy* kısmında *PID* yani hedef parça kimliği seçeneğinde oluşturulan *Part_Composite* seçilmiştir ve tüm elemanlara uygulanmıştır. Sonra *Keyword Manager* kısmından *Part* bölümünden *Part* verisi silinmiştir, sadece *Composite* kalmıştır.

Define_Curve yani eğri tanımlama bölümünden malzememizin yapacağı hareketi, hareket-süre verileri şeklinde tanımlanmıştır. Yalnız model doğrulaması aşamasında burada hız verisi değilde istediğimiz 0.05 mm/dak hıza karşılık gelen yer değiştirme verileri yazılmıştır. Burada da devamlı denemeler sonucunda elde etmemiz gereken maksimum çekme gerilmesine göre en uygun olan yer değiştirme verileri alınmıştır.

Boundary_prescribed_motion_set bölümünden yani öngörülen hareket tanımlamasından hazırlanan modelde materyalin hangi ekseninde yer değiştirme gerçekleştireceği, hangi belirtilen eğri verilerinde hareketi yapacağını, materyalin hangi kenarından hareket yapacağı belirtilir bu noktada da hareketin gerçekleşmesi istenilen sadece X yönünde yer değiştirmenin özgürlüğünü mümkün kılan mafsallı mesnet kenarı belirtilmiştir.

Control_Termination bölümünde *ENDTIM* kısmında analizimizin gerçekleşeceği toplam süreyi belirledik.

Control_Timestep bölümünde bir zaman aralığı girmedik boş bıraktık bu sayede zaman aralığını LS-DYNA otomatik olarak kendisi belirlemiş oldu.

Database_ASCII_option bölümünde analiz sonunda incelemek istediğimiz veri dosyalarını seçtik ve bu verileri hangi zaman aralığında ölçmesini istiyorsak ona göre giriş yaptık. Daha sonra *Binary_D3Plot* bölümünde grafiği oluşturması için çıktı veritabanı oluşturulur ve grafik halinde görebilmemizi sağlar. *Extent_Binary* bölümü ise *d3plot*, *d3thdt*, *d3part* ikili çıktı verilerinin kontrolünü sağlar. *Extent_Ssstat* bölümünde de bir veya daha fazla alt sistem tanımlanır. *Nodal_Force_Group* bölümünde *ASCII* dosyası *nodfor*'a çıkış için bir düğüm kuvveti grubu verir. *NSID* alanına hareket sağlanacak kenar tanımlanmıştır.

Son olarak modelin *k* dosyası kayıt edilir ve LS-Run uygulamasında analiz yürütülür. Bu adımlar ilk aşama için malzeme modeli oluşturulurken yani deliksiz doğrulama numunesinde kullanılmıştır [66,67].

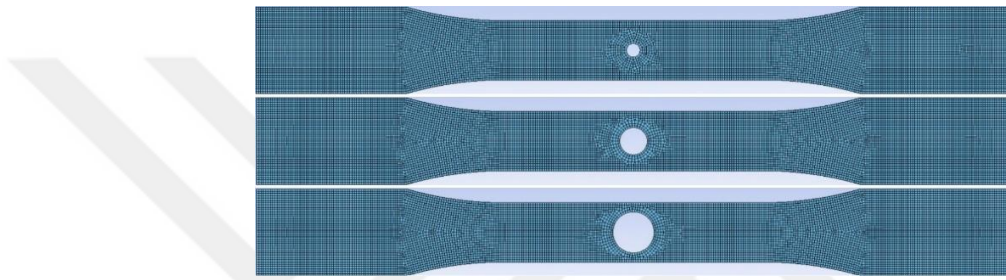
3.2.2. Sabit Hızda Çekme Testi ve Çentik Etkisi Aşaması

İkinci aşamada çentik etkisi incelemesi için yapılan numuneler için yapılan aşamalar genel olarak model doğrulaması aşamasıyla aynıdır. Aradaki tek fark olarak materyallerin merkezine 3, 6, 9 mm çaplarına sahip dairesel deliklerle 3x3, 6x6, 9x9 mm² boyutlarında kare delikler oluşturulmuştur ve bunların sonucunda değişmiştir. Delikler sebebiyle değişen, sadece düğüm noktaları ve eleman sayılarıdır. Bunlar ;

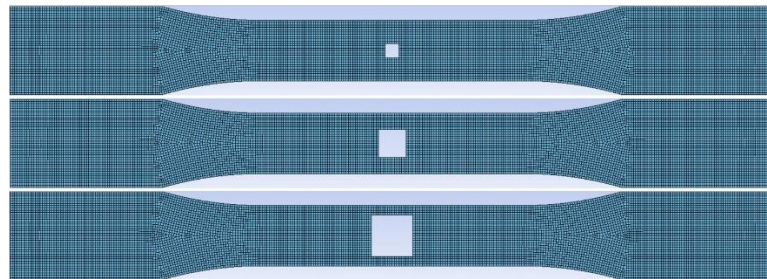
- 3 mm çapa sahip dairesel delikte 10691 tane düğüm noktasıyla 10324 tane eleman sayısı,
- 6 mm çapa sahip dairesel delikte 10606 tane düğüm noktasıyla 10232 tane eleman sayısı,
- 9 mm çapa sahip dairesel delikte 10473 tane düğüm noktasıyla 10090 tane eleman sayısı,

- 3x3 mm² ölçülerinde kare delikte 10733 tane düğüm noktasıyla 10359 tane eleman sayısı,
- 6x6 mm² ölçülerinde kare delikte 10640 tane düğüm noktasıyla 10250 tane eleman sayısı,
- 9x9 mm² ölçülerinde kare delikte 10473 tane düğüm noktasıyla 10072 tane eleman sayısı,

şeklinde tespit edilmiştir. Şekil 3.3. ve şekil 3.4.'te dairesel ve kare delikli ağ yapısı oluşturulmuş materyaller sunulmaktadır.



Şekil 3.3. Dairesel Deliğe Sahip Materyallerin Ağ Sunumları



Şekil 3.4. Kare Deliğe Sahip Materyallerin Ağ Sunumları

3.2.3. Yüksek Hızda Çekme Testi ve Çentik Etkisi Aşaması

Üçüncü ve son aşamada ikinci aşamada oluşturulan numunelerin analizlerini yüksek hızlarda test ederek sonuçlardaki değişimler incelenecektir. Burada model dosyalarındaki bazı aşamalarda farklılıklar olmuştur.

Örgü karbon/epoksi kompozit malzemeyle örgü cam/epoksi kompozit malzemelerinin malzeme kartı *MAT 54/55* Geliştirilmiş Kompozit Hasar materyal modelindeki tek fark artık hız kullanımı olacağı için yer değiştirme kullanılan birinci ve ikinci aşamalarda kullanılan *EFS* değeri bu sefer yazılmamıştır.

Define_Curve bölümündeki fark, artık hız verisi kullanıldığı için hız değerleri girilmiştir.

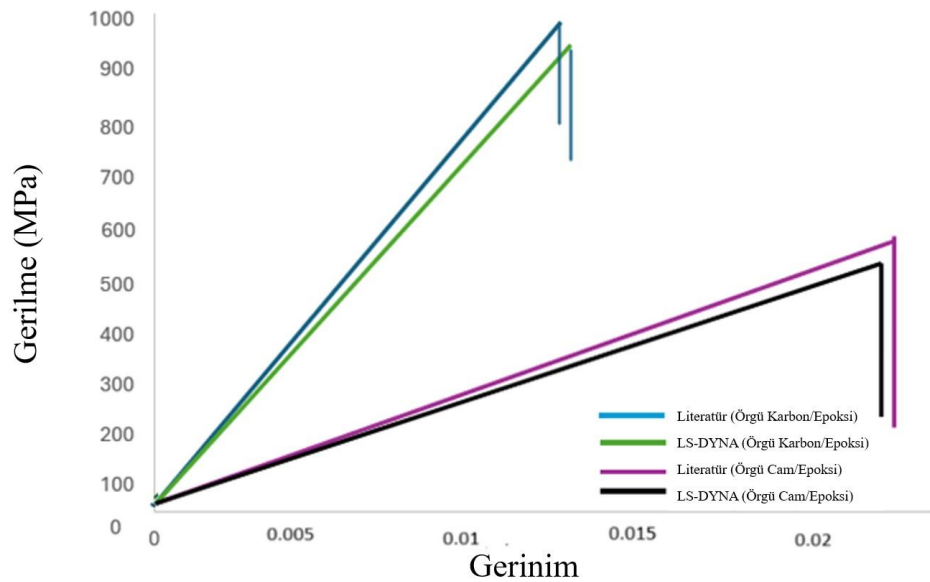
Boundary_prescribed_motion_set bölümünde tek fark yer değiştirme değil de hangi ekseninde hız yapacağı seçilmiştir.

Control_Termination bölümündeki fark, *ENDTIM* alanında analizimizin gerçekleşeceği toplam sürelerde her iki malzeme için de değişimler olmuştur. Denemeler yapılarak uygun çözüm süreleri bulunmuştur.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

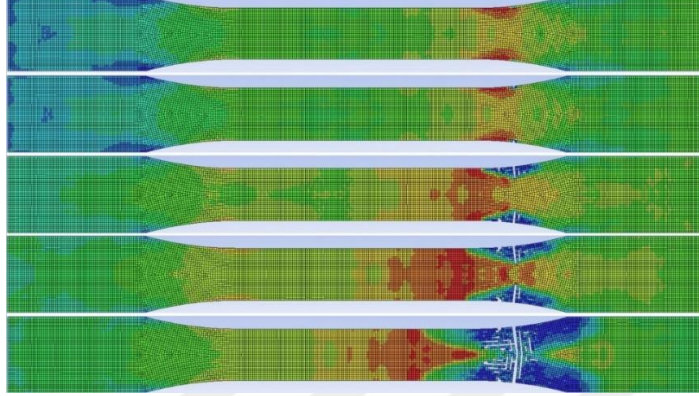
4.1. Model Doğrulamasında Kullanılan Numunelerin Çekme Testi Analiz Sonuçları

Model doğrulamasında elde edilen sonuçlara göre doğrulama yapmak için literatürde yer alan bir kaynak baz alınmıştır, bu kaynaktan 0.05 mm/dak hızdaki deneyin gerilme gerinim grafiği alınmıştır [6]. Literatür ile elde edilen gerilme gerinim grafiği karşılaştırılmıştır ve grafikteki değerlerin arasındaki yüzde farklar hesaplanmıştır. Model doğrulaması için bulunan yüzde farklar maksimum çekme gerilmesinde ; cam için %3.33, karbon için ise %4.36 şeklindedir. Model doğrulaması için bulunan yüzde farklar gerinim değerlerinde ; cam için %4.3, karbon için ise %2.1 şeklindedir. Bu kıyaslama sonucu modelimiz doğrulanmıştır. Şekil 4.1.'de literatürde bulunan gerilme gerinim grafiğinin LS-DYNA sonlu eleman analizi sonucunda bulunan değerlerle karşılaştırması gösterilmiştir. LS-DYNA sonlu eleman analizi sonucu elde edilen maksimum çekme gerilmesi değerleri örgü cam/epoksi ve örgü karbon/epoksi malzemeleri için sırasıyla 593 MPa ile 933 MPa şeklindedir.

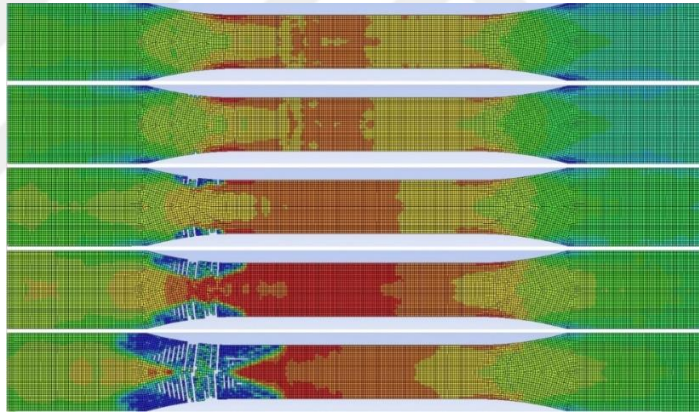


Şekil 4.1. Analiz Sonuçları ile Beraber Literatürle Modelin Doğrulanması

Doğrulanmış numunelerin çekme testleri sonucunda örgü cam/epoksi ve örgü karbon/epoksi malzemelerinin gerçekleşen kopma aşamaları sırasıyla şekil 4.2. ve şekil 4.3.'te gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Örgü Cam/Epoksi Kompozit Çekme Testi Kopma Aşamaları



Şekil 4.3. Örgü Karbon/Epoksi Kompozit Çekme Testi Kopma Aşamaları

Şekil 4.2. ve şekil 4.3.'te gösterilen hasar aşamaları incelendiğinde arızanın devamında çatlak oluşumu ve devamı fark edilmiştir, neticesinde kopma meydana gelmiştir. Hasarın devamı açısal şekilde meydana gelmiştir. Bu olayın yükleme esnasında ortaya çıkan yanıl kuvvetlerden meydana geldiği tahmin edilmektedir.

4.2. Doğrulanmış Model Üzerinde Açılan Dairesel ve Kare Delikli Numunelerin Çekme Testi Analiz Sonuçları ve Çentik Etkisi İncelemesi

Literatüre göre yer alan 0.05 mm/dak hızında doğrulanmış modelimiz üzerinden yapılan testlerden sonra farklı delikler açarsak örgü cam/epoksi ve örgü karbon/epoksi kompozitler için nasıl sonuçlar elde edebileceğimize baktık ve çıkan sonuçları inceledik. Dairesel ve kare delikler için örgü cam/epoksi ve örgü karbon/epoksi malzemelerinde analiz sonucu bulunan maksimum çekme gerilmesi neticelerini sırasıyla tablo 4.1., tablo 4.2., tablo 4.3. ve tablo 4.4.'te verilmektedir.

Tablo 4.1. Örgü Cam/Epoksi Malzemesinin 0.05 mm/dak Hızında Çekme Testinde Farklı Dairesel Çaptaki Deliklerin Çentik Etkisi

0.05 mm/dak	
Delik çapları (mm)	Maksimum çekme gerilmesi (MPa)
3	329
6	291
9	281

Tablo 4.2. Örgü Cam/Epoksi Malzemesinin 0.05 mm/dak Hızında Çekme Testinde Farklı Kare Boyutlarındaki Deliklerin Çentik Etkisi

0.05 mm/dak	
Kare boyutları (mm ²)	Maksimum çekme gerilmesi (MPa)
3x3	524
6x6	457
9x9	432

Tablo 4.3. Örgü Karbon/Epoksi Malzemesinin 0.05 mm/dak Hızında Çekme Testinde Farklı Dairesel Çaptaki Deliklerin Çentik Etkisi

0.05 mm/dak	
Delik çapları (mm)	Maksimum çekme gerilmesi (MPa)
3	643
6	606
9	508

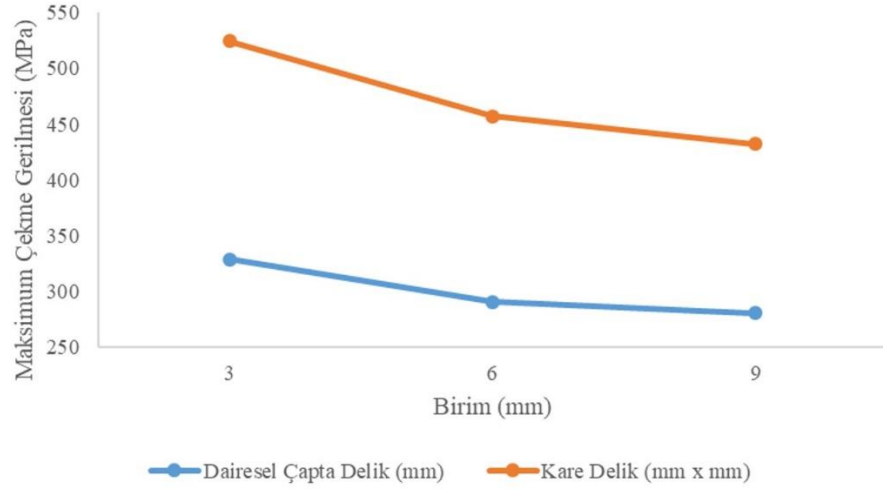
Tablo 4.4. Örgü Karbon/Epoksi Malzemesinin 0.05 mm/dak Hızında Çekme Testinde Farklı Kare Boyutlarındaki Deliklerin Çentik Etkisi

0.05 mm/dak	
Kare boyutları (mm ²)	Maksimum çekme gerilmesi (MPa)
3x3	765
6x6	748
9x9	737

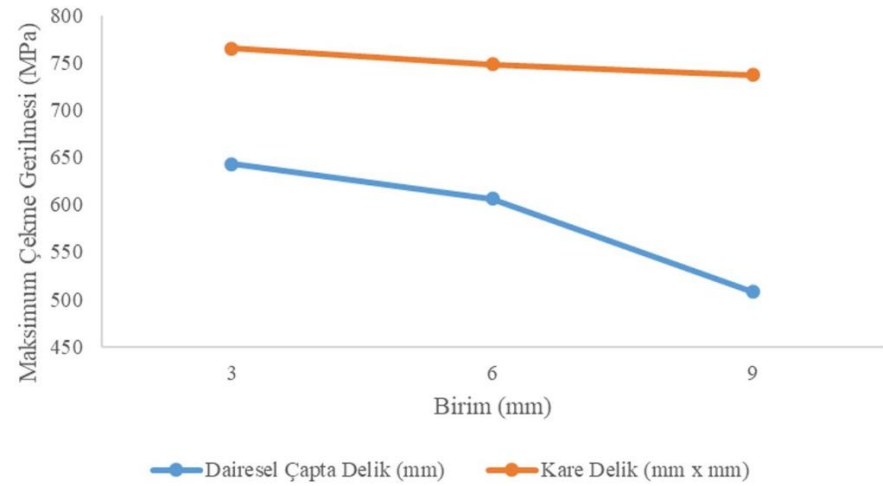
Örgü cam/epoksi ve örgü karbon/epoksi kompozit malzemeleri için doğrulanmış model üzerinde açılan dairesel ve kare delikli numunelerin 0.05 mm/dak hızda yapılan çekme testlerinden elde edilen veriler sonucunda çentik etkisine bakılmıştır. Elde edilen maksimum çekme gerilmesi değerleri sırasıyla örgü cam/epoksi ve örgü karbon/epoksi kompozit malzemeleri için şekil 4.4. ve şekil 4.5.'deki grafiklerde kıyaslanmıştır. Grafikleri yorumlamak istersek ;

- Bariz olarak ilk görülen sonuçlarda çentik etkisinden en az etkilenen delikli numuneler kare delikli numunelerdir yani kare delikli numuneler çentik etkisine karşı düşük duyarlıdırlar diyebiliriz.
- Kare delikli numunelerin, analiz sonuçlarında elde edilen maksimum çekme gerilmelerini daha az düşürdüğü görülmüştür.
- Dairesel deliklerin çapı arttıkça ve kare deliklerin boyutları büyüdükçe numunede deliklerin olduğu alanda genişliğin azalmasıyla elde edilen maksimum çekme gerilmesi değerleri düşmektedir.

Bu sonuçlara benzer sonuçlar elde edilen ve literatürde yer alan benzer bir araştırmada araştırmacılar kare ve dairesel delikli kompozit malzemede çekme testleri sonucunda elde ettikleri maksimum çekme gerilmesi değerlerini kıyaslamışlardır [20].



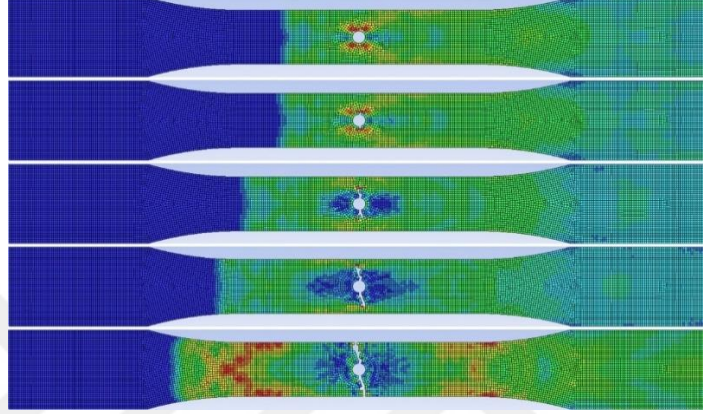
Şekil 4.4. Örgü Cam/Epoksi Kompozit Malzemede 0.05 mm/dak Hız Değerindeki Daire ve Kare Geometrilere Açılan Deliklerin Karşılaştırılması



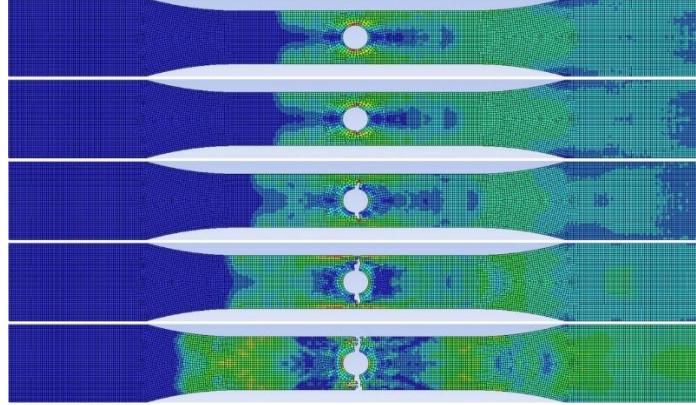
Şekil 4.5. Örgü Karbon/Epoksi Kompozit Malzemede 0.05 mm/dak Hız Değerindeki Daire ve Kare Geometrilere Açılan Deliklerin Karşılaştırılması

Örgü cam/epoksi kompozit malzemede 3, 6 ve 9 mm çaplarda dairesel delikli materyallerin 0.05 mm/dak hızında çekme testi sonucu elde edilen analiz görüntüleri incelenerek şekil 4.6., şekil 4.7. ve şekil 4.8.'de malzemenin kopma aşamaları verilmiştir. Burada genel olarak ;

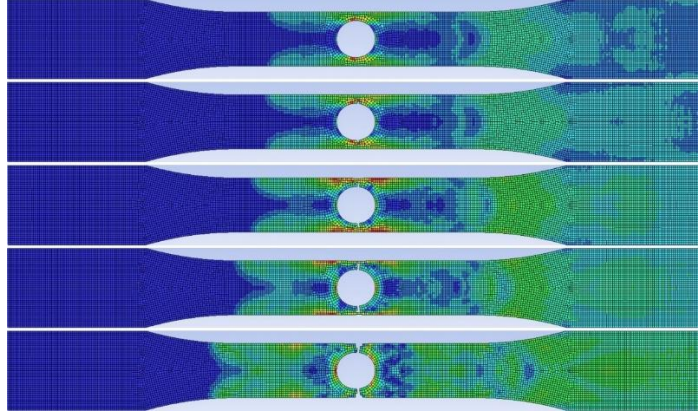
- Malzemenin kopma aşaması beklenildiği gibi genişliğin azalmış olduğu dairesel deliğin açılmış olduğu kısımda gerçekleşmiştir.
- Gerilme birikmesi ve maksimum çekme gerilmesi değerlerini de bu kısımda görürüz.
- Kopma, bir çatlak oluşumu şeklinde başlar ve bir çatlak ilerlemesi şeklinde ilerleyerek gerçekleşmiştir.



Şekil 4.6. Örgü Cam/Epoksi Kompozit 3 mm Çap Delik 0.05 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları



Şekil 4.7. Örgü Cam/Epoksi Kompozit 6 mm Çap Delik 0.05 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları



Şekil 4.8. Örgü Cam/Epoksi Kompozit 9 mm Çap Delik 0.05 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları

Örgü cam/epoksi kompozit malzemede 3x3, 6x6 ve 9x9 mm² boyutlarında kare delikli materyallerin 0.05 mm/dak hızında çekme testi sonucu elde edilen analiz görüntüleri incelenerek şekil 4.9., şekil 4.10. ve şekil 4.11.'de malzemenin kopma aşamaları verilmiştir. Burada genel olarak ;

- Malzemenin kopma aşaması beklenildiği gibi genişliğin azalmış olduğu kare deliğin açılmış olduğu kısımda gerçekleşmiştir.
- Gerilme birikmesi ve maksimum çekme gerilmesi değerlerini de bu kısımda görürüz.
- Kopma, bir çatlak oluşumu şeklinde başlar ve bir çatlak ilerlemesi şeklinde ilerleyerek kopma gerçekleşmiştir. Başlangıçta ise kopmanın olması gereken yerlerde yani keskin köşelerin olduğu tarafta başlamıştır.

Şekil 4.9.'da örgü cam/epoksi kompozit malzemede 3x3 mm² kare delik için söylenebilecek bir fark ;

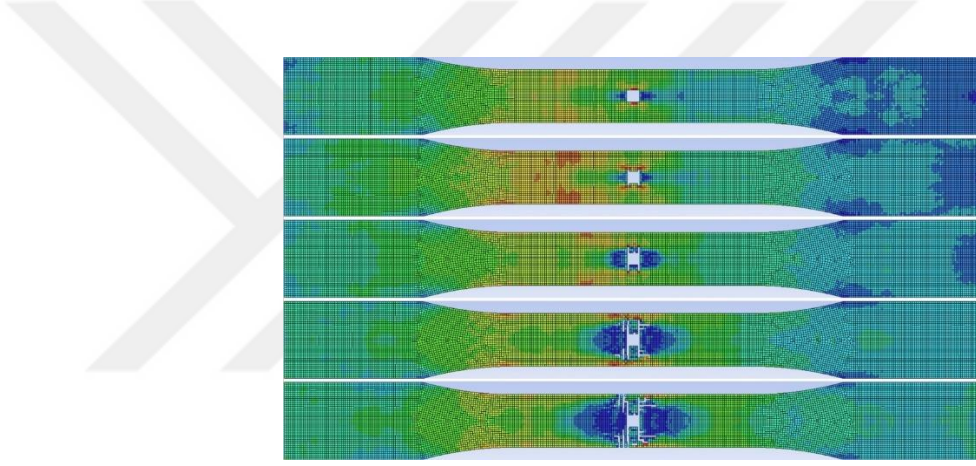
- Çatlak deliğin her bir kenarından başlamış ama numunenin sol tarafından çatlak daha fazla ilerlemiştir ve numune bu taraftan kopmuştur.

Şekil 4.10.'da örgü cam/epoksi kompozit malzemede 6x6 mm² kare delik için söylenebilecek bir fark ;

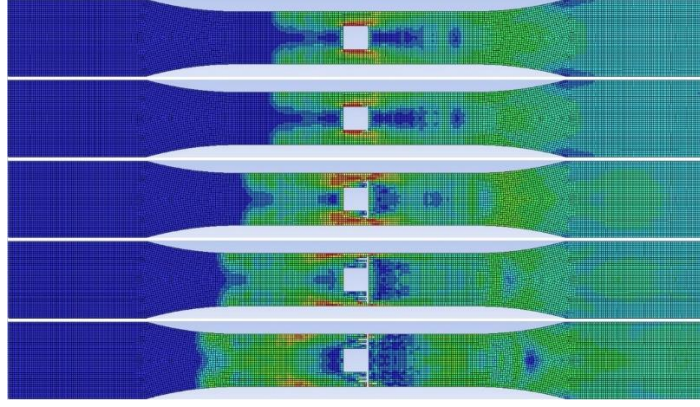
- Çatlak deliğin sağ tarafından başlamıştır. Çatlak daha fazla ilerlemiştir ve numune bu taraftan kopmuştur.

Şekil 4.11.'de örgü cam/epoksi kompozit malzemede 9x9 mm² kare delik için söylenebilecek bir fark ;

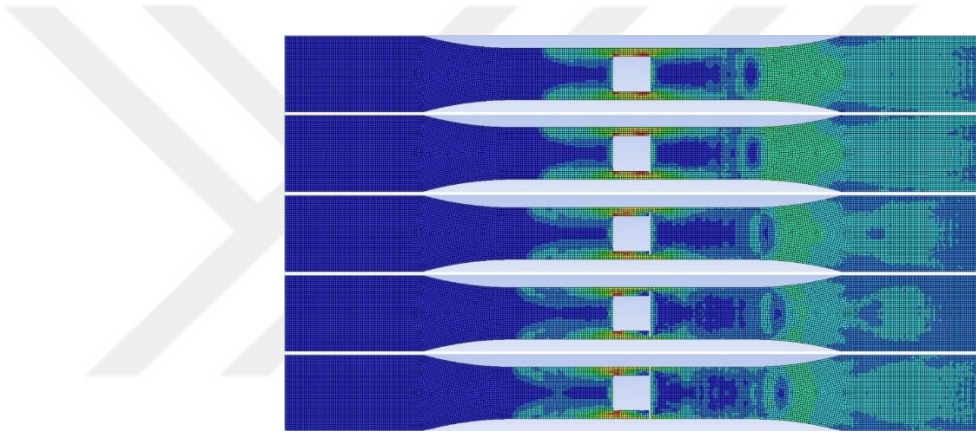
- Çatlak deliğin sağ tarafından başlamıştır. Çatlak daha fazla ilerlemiştir ve numune bu taraftan kopmuştur.



Şekil 4.9. Örgü Cam/Epoksi Kompozit 3x3 mm² Kare Delik 0.05 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları



Şekil 4.10. Örgü Cam/Epoksi Kompozit 6x6 mm² Kare Delik 0.05 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları



Şekil 4.11. Örgü Cam/Epoksi Kompozit 9x9 mm² Kare Delik 0.05 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları

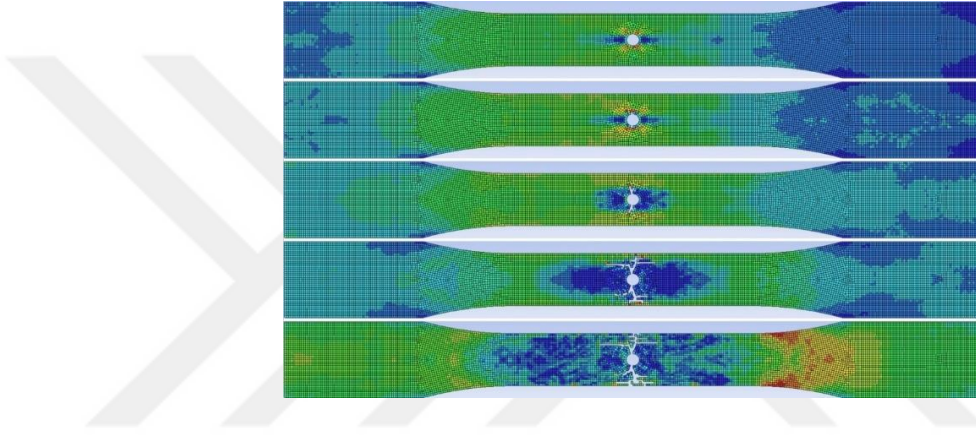
Örgü karbon/epoksi kompozit malzemede 3, 6 ve 9 mm çaplarda dairesel delikli materyallerin 0.05 mm/dak hızında çekme testi sonucu elde edilen analiz görüntüleri incelenerek şekil 4.12., şekil 4.13. ve şekil 4.14.'te malzemenin kopma aşamaları verilmiştir. Burada genel olarak ;

- Malzemenin kopma aşaması beklenildiği gibi genişliğin azalmış olduğu dairesel deliğin açılmış olduğu kısımda gerçekleşmiştir.
- Gerilme birikmesi ve maksimum çekme gerilmesi değerlerini de bu kısımda görürüz.

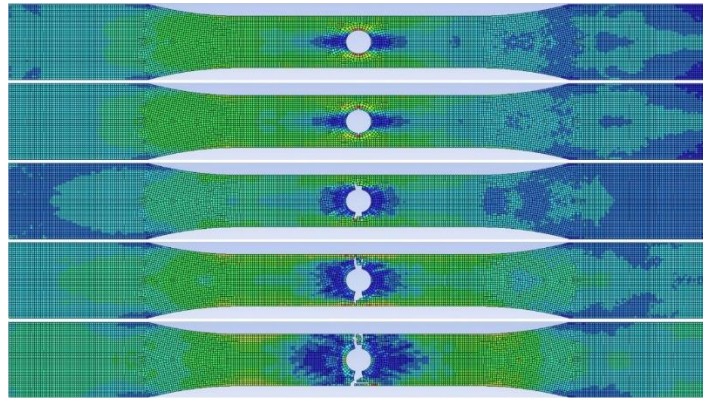
- Kopma, bir çatlak oluşumu şeklinde başlar ve bir çatlak ilerlemesi şeklinde ilerleyerek gerçekleşmiştir.

Şekil 4.12.'de örgü karbon/epoksi kompozit malzemede 3 mm çapında delik için söylenebilecek bir fark ;

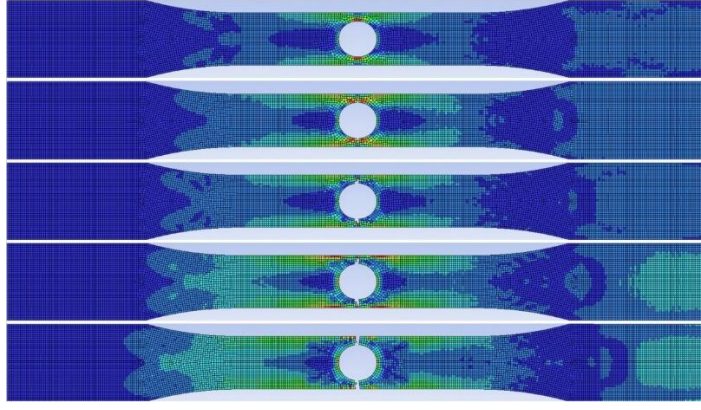
- Çatlak delik etrafında başlamıştır. Çatlak ilerlemesi 2 yolda çatallanmıştır. Numunenin sağ tarafına yakın olan çatlaktan ilerleyerek numune bu kısım tarafından kopmuştur.



Şekil 4.12. Örgü Karbon/Epoksi Kompozit 3 mm Çap Delik 0.05 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları



Şekil 4.13. Örgü Karbon/Epoksi Kompozit 6 mm Çap Delik 0.05 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları



Şekil 4.14. Örgü Karbon/Epoksi Kompozit 9 mm Çap Delik 0.05 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları

Örgü karbon/epoksi kompozit malzemede 3x3, 6x6 ve 9x9 mm² boyutlarında kare delikli materyallerin 0.05 mm/dak hızında çekme testi sonucu elde edilen analiz görüntüleri incelenerek şekil 4.15., şekil 4.16. ve şekil 4.17.'de malzemenin kopma aşamaları verilmiştir. Burada genel olarak ;

- Malzemenin kopma aşaması beklenildiği gibi genişliğin azalmış olduğu kare deliğin açılmış olduğu kısımda gerçekleşmiştir.
- Gerilme birikmesi ve maksimum çekme gerilmesi değerlerini de bu kısımda görürüz.
- Kopma, bir çatlak oluşumu şeklinde başlar ve bir çatlak ilerlemesi şeklinde ilerleyerek kopma gerçekleşmiştir. Başlangıçta ise kopmanın olması gereken yerlerde yani keskin köşelerin olduğu tarafta başlamıştır.

Şekil 4.15.'de örgü karbon/epoksi kompozit malzemede 3x3 mm² kare delik için söylenebilecek bir fark ;

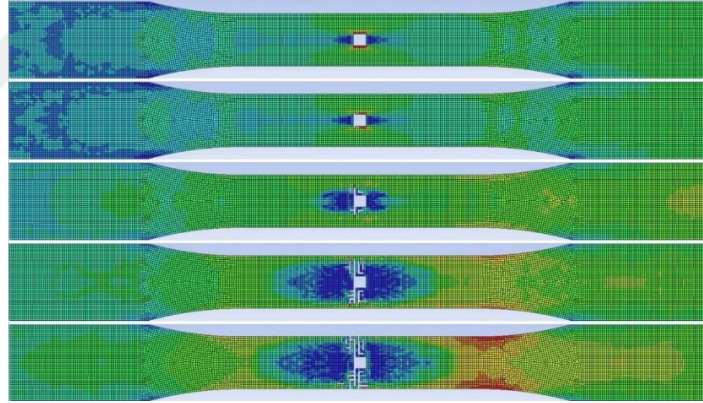
- Çatlak deliğin sol kısmındaki kenarlarından başlamıştır. Numunenin sol tarafından çatlak daha fazla ilerlemiştir ve numune bu taraftan kopmuştur.

Şekil 4.16.'da örgü karbon/epoksi kompozit malzemede 6x6 mm² kare delik için söylenebilecek bir fark ;

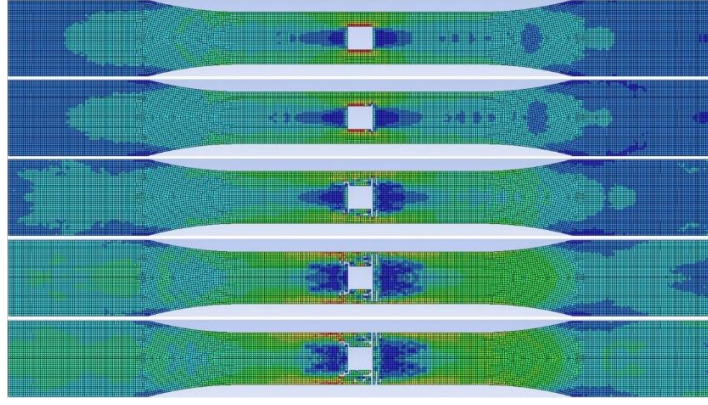
- Çatlak deliğin sağ kısmındaki kenarlarından başlamıştır. Daha sonra deliğin sol kısmındaki kenarlarında da ufak bir çatlak oluşmuştur. Çatlak asıl olarak sağ tarafta büyümüşür ve çatlak daha fazla ilerleyip numune bu kısım tarafından kopmuştur.

Şekil 4.17.'de örgü karbon/epoksi kompozit malzemede 9x9 mm² kare delik için söylenebilecek bir fark ;

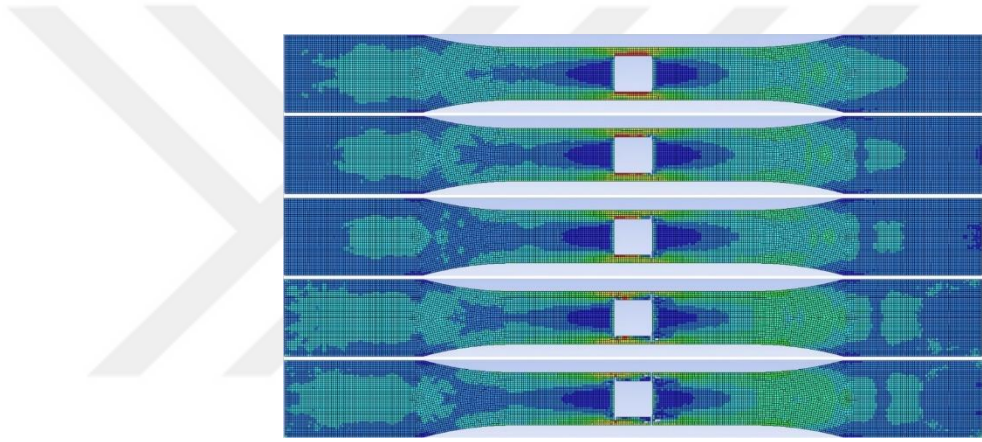
- Çatlak deliğin sağ kısmındaki kenarlarından başlamıştır. Daha sonra deliğin sol kısmındaki kenarlarında da ufak bir çatlak oluşmuştur. Çatlak asıl olarak sağ tarafta büyümüşür ve çatlak daha fazla ilerleyip numune bu kısım tarafından kopmuştur.



Şekil 4.15. Örgü Karbon/Epoksi Kompozit 3x3 mm² Kare Delik 0.05 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları



Şekil 4.16. Örgü Karbon/Epoksi Kompozit 6x6 mm² Kare Delik 0.05 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları



Şekil 4.17. Örgü Karbon/Epoksi Kompozit 9x9 mm² Kare Delik 0.05 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları

4.3. Yüksek Hızlarda Çekme Testi Analiz Sonuçları ve Çentik Etkisi İncelemesi

Doğrulanmış modelimiz üzerinden yapılan 0.05 mm/dak hızında çekme testi yapılan numuneleri bu aşamada 20000, 30000 ve 40000 mm/dak hızlarında analiz edilmiştir. Dairesel ve kare delikler için örgü cam/epoksi ve örgü karbon/epoksi malzemelerinde analiz sonucu bulunan maksimum çekme gerilmesi neticeleri sırasıyla tablo 4.5., tablo 4.6., tablo 4.7. ve tablo 4.8.'de verilmektedir.

Tablo 4.5. Örgü Cam/Epoksi Malzemesinin Farklı Yüksek Hızlarda Çekme Testinde Farklı Dairesel Çaptaki Deliklerin Çentik Etkisi

20000 mm/dak		30000 mm/dak		40000 mm/dak	
Delik çapları (mm)	Maksimum çekme gerilmesi (MPa)	Delik çapları (mm)	Maksimum çekme gerilmesi (MPa)	Delik çapları (mm)	Maksimum çekme gerilmesi (MPa)
3	505	3	511	3	535
6	406	6	421	6	430
9	377	9	390	9	395

Tablo 4.6. Örgü Cam/Epoksi Malzemesinin Farklı Yüksek Hızlarda Çekme Testinde Farklı Kare Boyutlarındaki Deliklerin Çentik Etkisi

20000 mm/dak		30000 mm/dak		40000 mm/dak	
Kare boyutları (mm ²)	Maksimum çekme gerilmesi (MPa)	Kare boyutları (mm ²)	Maksimum çekme gerilmesi (MPa)	Kare boyutları (mm ²)	Maksimum çekme gerilmesi (MPa)
3x3	543	3x3	562	3x3	586
6x6	501	6x6	517	6x6	546
9x9	482	9x9	507	9x9	513

Tablo 4.7. Örgü Karbon/Epoksi Malzemesinin Farklı Yüksek Hızlarda Çekme Testinde Farklı Dairesel Çaptaki Deliklerin Çentik Etkisi

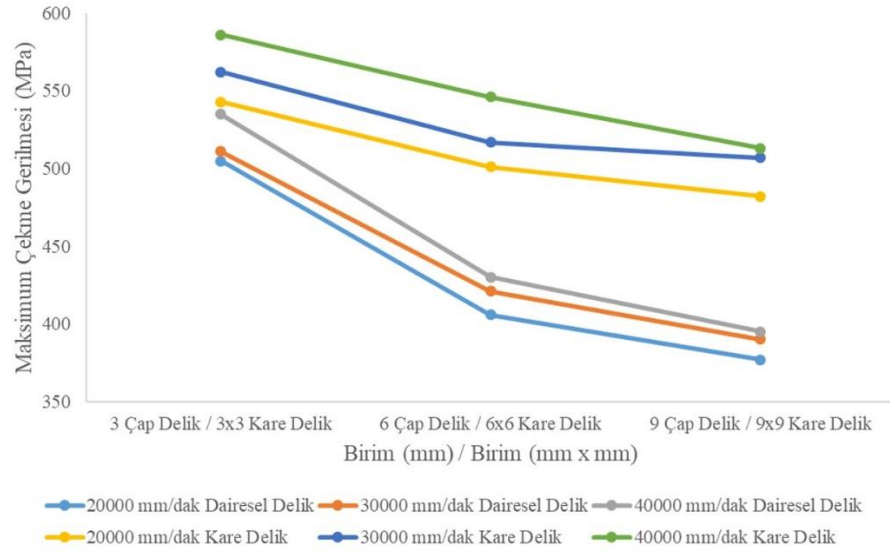
20000 mm/dak		30000 mm/dak		40000 mm/dak	
Delik çapları (mm)	Maksimum çekme gerilmesi (MPa)	Delik çapları (mm)	Maksimum çekme gerilmesi (MPa)	Delik çapları (mm)	Maksimum çekme gerilmesi (MPa)
3	709	3	713	3	731
6	664	6	691	6	700
9	573	9	595	9	641

Tablo 4.8. Örgü Karbon/Epoksi Malzemesinin Farklı Yüksek Hızlarda Çekme Testinde Farklı Kare Boyutlarındaki Deliklerin Çentik Etkisi

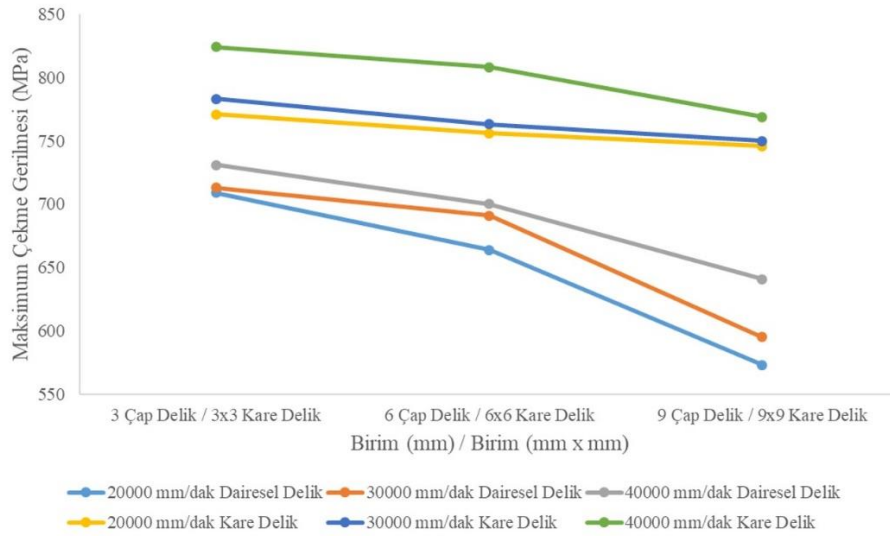
20000 mm/dak		30000 mm/dak		40000 mm/dak	
Kare boyutları (mm ²)	Maksimum çekme gerilmesi (MPa)	Kare boyutları (mm ²)	Maksimum çekme gerilmesi (MPa)	Kare boyutları (mm ²)	Maksimum çekme gerilmesi (MPa)
3x3	771	3x3	783	3x3	824
6x6	756	6x6	763	6x6	808
9x9	746	9x9	750	9x9	769

Örgü cam/epoksi ve örgü karbon/epoksi kompozit malzemeleri için doğrulanmış model üzerinde açılan dairesel ve kare delikli numunelerin 20000, 30000 ve 40000 mm/dak hızlarında yapılan çekme testlerinden elde edilen veriler sonucunda çentik etkisine bakılmıştır. Elde edilen maksimum çekme gerilmesi değerleri sırasıyla örgü cam/epoksi ve örgü karbon/epoksi kompozit malzemeleri için şekil 4.18. ve şekil 4.19.'daki grafiklerde kıyaslanmıştır. Grafikleri yorumlamak istersek genel olarak ikinci aşama sonuçlarına benzerdir, bunlar ;

- Bariz olarak ilk görülen sonuçlarda çentik etkisinden en az etkilenen delikli numuneler kare delikli numunelerdir yani kare delikli numuneler çentik etkisine karşı düşük duyarlıdırlar diyebiliriz.
- Kare delikli numunelerin, analiz sonuçlarında elde edilen maksimum çekme gerilmelerini daha az düşürdüğü görülmüştür.
- Dairesel deliklerin çapı arttıkça ve kare deliklerin boyutları büyüdükçe numunede deliklerin olduğu alanda genişliğin azalmasıyla elde edilen maksimum çekme gerilmesi değerleri düşmektedir.
- Delik boyutları farketmeksizin çekme hızı arttıkça elde edilen maksimum çekme gerilmesinde artma gözlenmektedir.



Şekil 4.18. Örgü Cam/Epoksi Kompozit Malzemede 20000, 30000 ve 40000 mm/dak Hız Değerlerindeki Daire ve Kare Geometrilere Açılan Deliklerin Karşılaştırılması



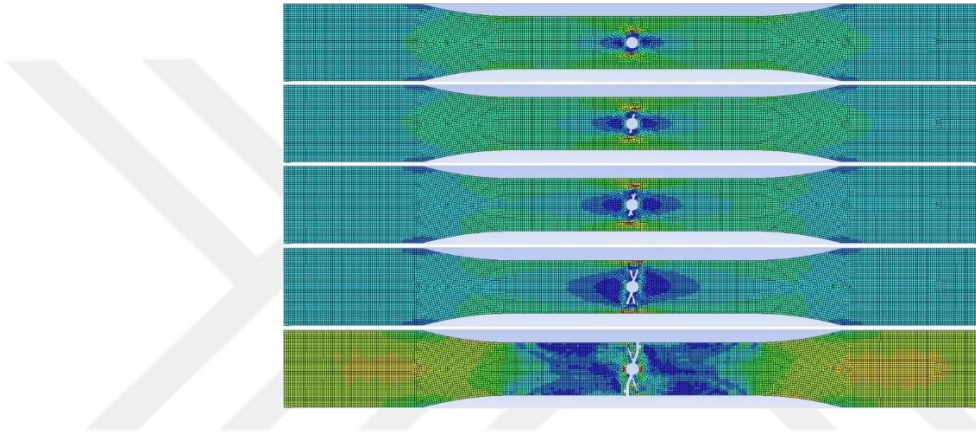
Şekil 4.19. Örgü Karbon/Epoksi Kompozit Malzemede 20000, 30000 ve 40000 mm/dak Hız Değerlerindeki Daire ve Kare Geometrilere Açılan Deliklerin Karşılaştırılması

Örgü cam/epoksi kompozit malzemede 3, 6 ve 9 mm çaplarda dairesel delikli materyallerin 20000 mm/dak hızında çekme testi sonucu elde edilen analiz görüntüleri

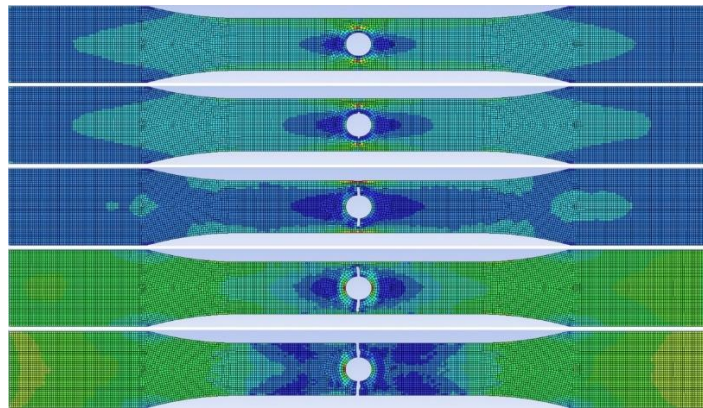
incelenerek şekil 4.20., şekil 4.21. ve şekil 4.22.'de malzemenin kopma aşamaları verilmiştir. Burada genel olarak ikinci aşamaya benzer tepkiler görülmektedir.

Şekil 4.20.'de örgü cam/epoksi kompozit malzemede 3 mm çapında delik için söylenebilecek bir fark ;

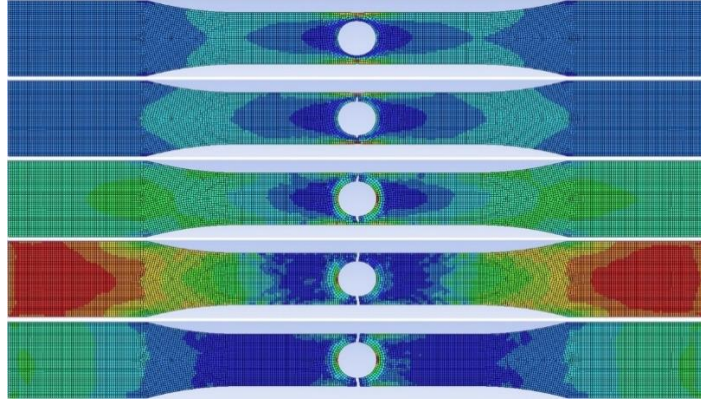
- Çatlak delik etrafında başlamıştır. Çatlak ilerlemesi 2 yolda çatallanmıştır. Numunede çatlağın ilk başladığı hattın olduğu çatlaktan ilerleyerek numune bu kısım tarafından kopmuştur.



Şekil 4.20. Örgü Cam/Epoksi Kompozit 3 mm Çap Delik 20000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları

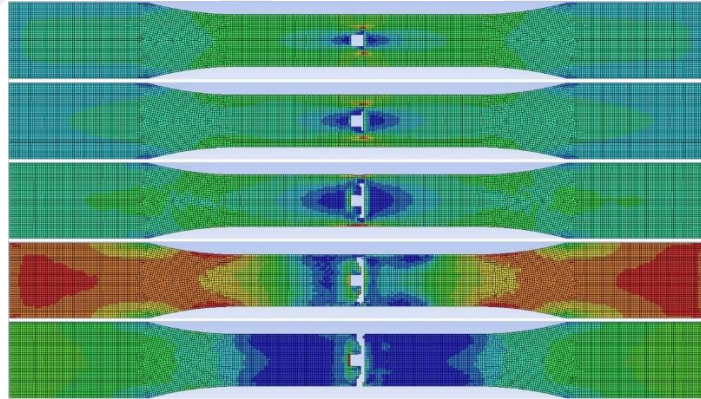


Şekil 4.21. Örgü Cam/Epoksi Kompozit 6 mm Çap Delik 20000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları

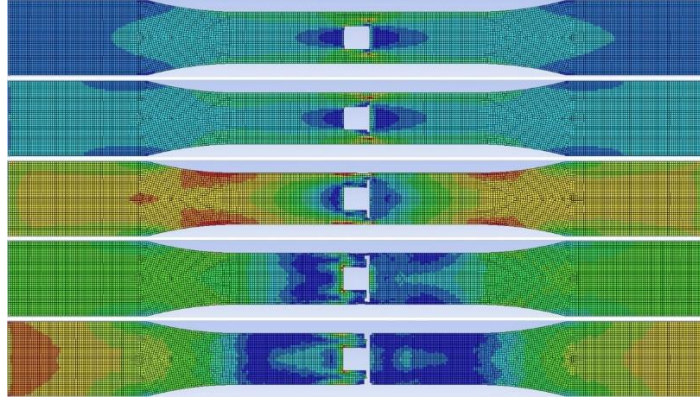


Şekil 4.22. Örgü Cam/Epoksi Kompozit 9 mm Çap Delik 20000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları

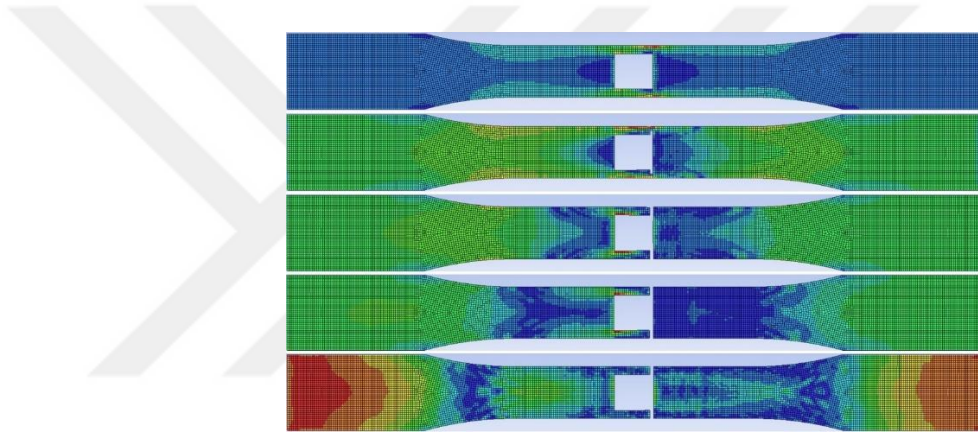
Örgü cam/epoksi kompozit malzemede 3x3, 6x6 ve 9x9 mm² boyutlarında kare delikli materyallerin 20000 mm/dak hızında çekme testi sonucu elde edilen analiz görüntüleri incelenerek şekil 4.23., şekil 4.24. ve şekil 4.25.'de malzemenin kopma aşamaları verilmiştir. Burada genel olarak ikinci aşamaya benzer tepkiler görülmektedir.



Şekil 4.23. Örgü Cam/Epoksi Kompozit 3x3 mm² Kare Delik 20000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları

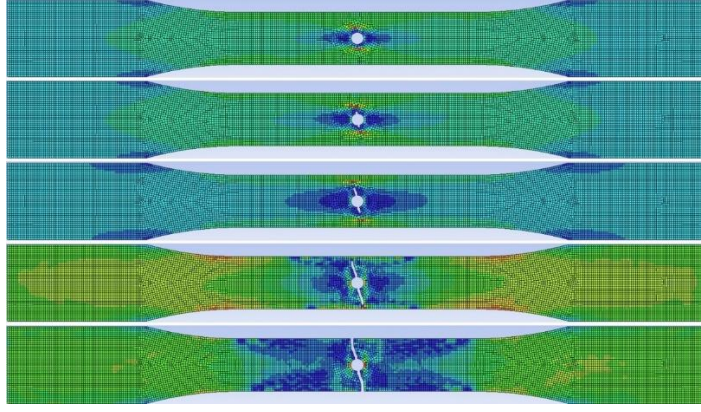


Şekil 4.24. Örgü Cam/Epoksi Kompozit 6x6 mm² Kare Delik 20000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları

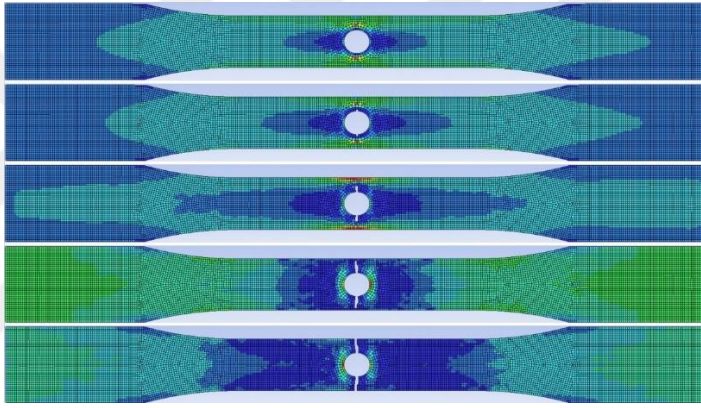


Şekil 4.25. Örgü Cam/Epoksi Kompozit 9x9 mm² Kare Delik 20000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları

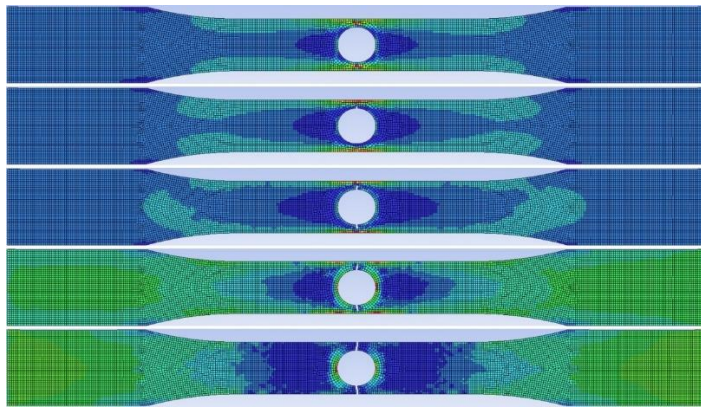
Örgü karbon/epoksi kompozit malzemedede 3, 6 ve 9 mm çaplarda dairesel delikli materyallerin 20000 mm/dak hızında çekme testi sonucu elde edilen analiz görüntüleri incelenerek şekil 4.26., şekil 4.27. ve şekil 4.28.'de malzemenin kopma aşamaları verilmiştir. Burada genel olarak ikinci aşamaya benzer tepkiler görülmektedir.



Şekil 4.26. Örgü Karbon/Epoksi Kompozit 3 mm Çap Delik 20000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları



Şekil 4.27. Örgü Karbon/Epoksi Kompozit 6 mm Çap Delik 20000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları



Şekil 4.28. Örgü Karbon/Epoksi Kompozit 9 mm Çap Delik 20000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları

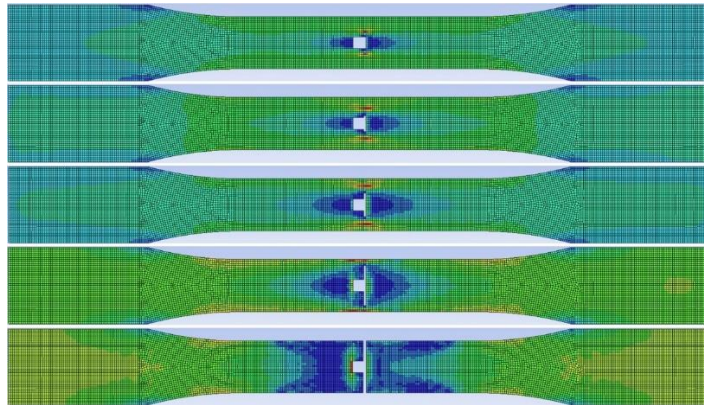
Örgü karbon/epoksi kompozit malzemede 3x3, 6x6 ve 9x9 mm² boyutlarında kare delikli materyallerin 20000 mm/dak hızında çekme testi sonucu elde edilen analiz görüntüleri incelenerek şekil 4.29., şekil 4.30. ve şekil 4.31.'de malzemenin kopma aşamaları verilmiştir. Burada genel olarak ikinci aşamaya benzer tepkiler görülmektedir.

Şekil 4.30.'da örgü karbon/epoksi kompozit malzemede 6x6 mm² kare delik için söylenebilecek bir fark ;

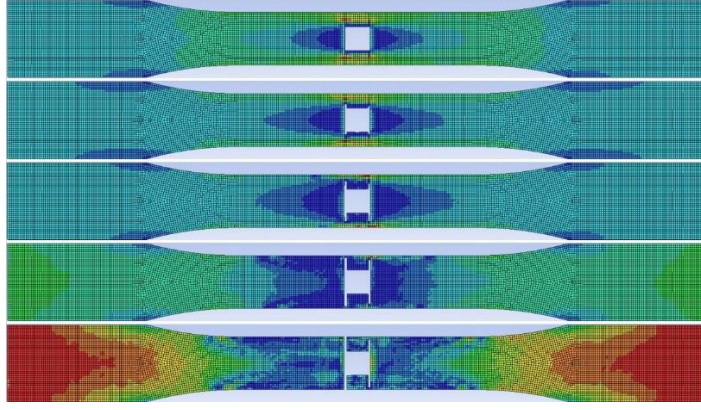
- Çatlak deliğin her bir kenarından başlamıştır. Çatlak asıl olarak sol tarafta büyümüşür ve çatlak daha fazla ilerleyip numune bu kısım tarafından kopmuştur.

Şekil 4.31.'de örgü karbon/epoksi kompozit malzemede 9x9 mm² kare delik için söylenebilecek bir fark ;

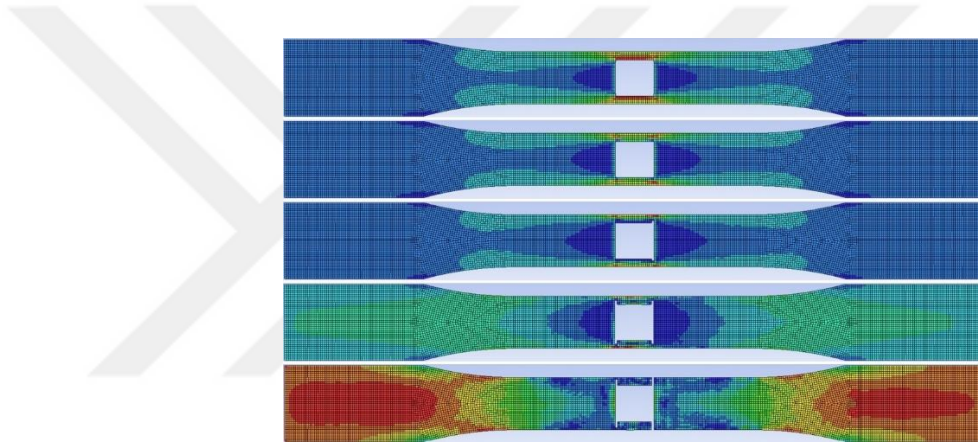
- Çatlak deliğin sağ kısmındaki kenarlarından başlamıştır. Daha sonra deliğin sol kısmındaki kenarlarında da ufak bir çatlak oluşmuştur. Çatlak asıl olarak sağ tarafta büyümüşür ve çatlak daha fazla ilerleyip numune bu kısım tarafından kopmuştur.



Şekil 4.29. Örgü Karbon/Epoksi Kompozit 3x3 mm² Kare Delik 20000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları



Şekil 4.30. Örgü Karbon/Epoksi Kompozit 6x6 mm² Kare Delik 20000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları



Şekil 4.31. Örgü Karbon/Epoksi Kompozit 9x9 mm² Kare Delik 20000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları

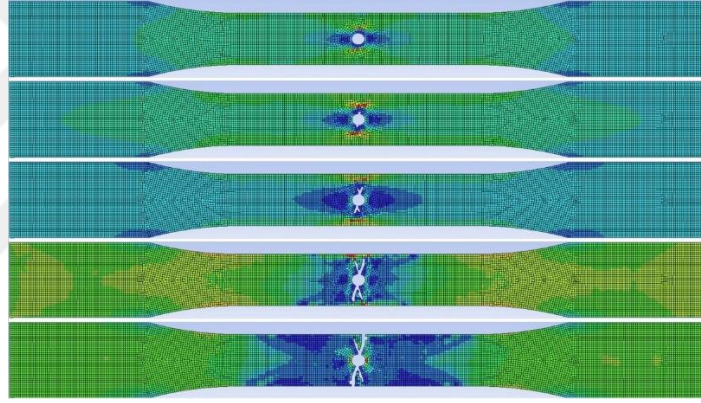
Örgü cam/epoksi kompozit malzemede 3, 6 ve 9 mm çaplarda dairesel delikli materyallerin 30000 mm/dak hızında çekme testi sonucu elde edilen analiz görüntüleri incelenerek şekil 4.32., şekil 4.33. ve şekil 4.34.’te malzemenin kopma aşamaları verilmiştir. Burada genel olarak ikinci aşamaya benzer tepkiler görülmektedir.

Şekil 4.32.’de örgü cam/epoksi kompozit malzemede 3 mm çapında delik için söylenebilecek bir fark ;

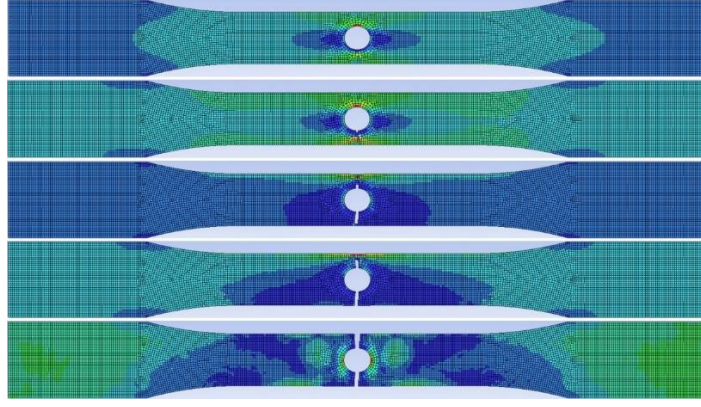
- Çatlak delik etrafında başlamıştır. Çatlak ilerlemesi 2 yolda çatallanmıştır. Numunede çatlağın ilk başladığı hattın olduğu çatlaktan ilerleyerek numune bu kısım tarafından kopmuştur.

Şekil 4.33.'de örgü cam/epoksi kompozit malzemede 6 mm çapında delik için söylenebilecek bir fark ;

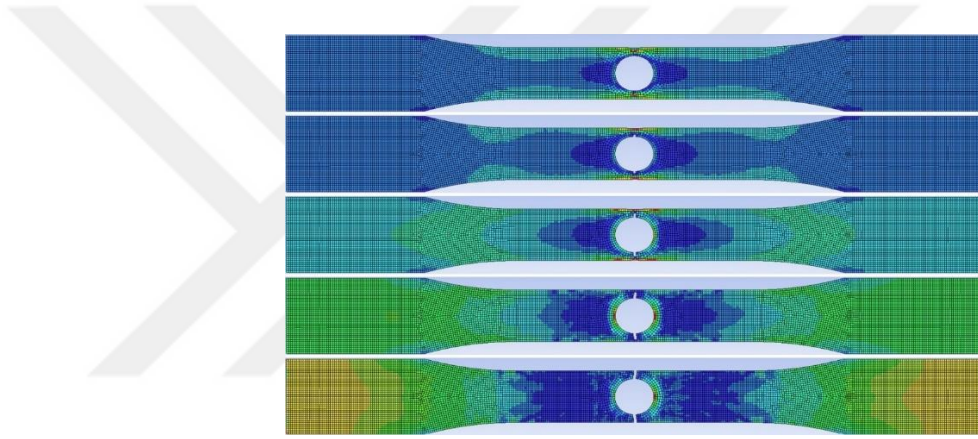
- Çatlak delik etrafında başlamıştır. Çatlak ilk olarak deliğin alt kısmından başlamıştır fakat sonra deliğin üst kısmından da çatlak oluşmuştur. Numune çatlağın ilerlemesiyle beraber önce deliğin alt kısmının olduğu sonra da deliğin üst kısmının olduğu taraftan kopmuştur.



Şekil 4.32. Örgü Cam/Epoksi Kompozit 3 mm Çap Delik 30000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları



Şekil 4.33. Örgü Cam/Epoksi Kompozit 6 mm Çap Delik 30000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları

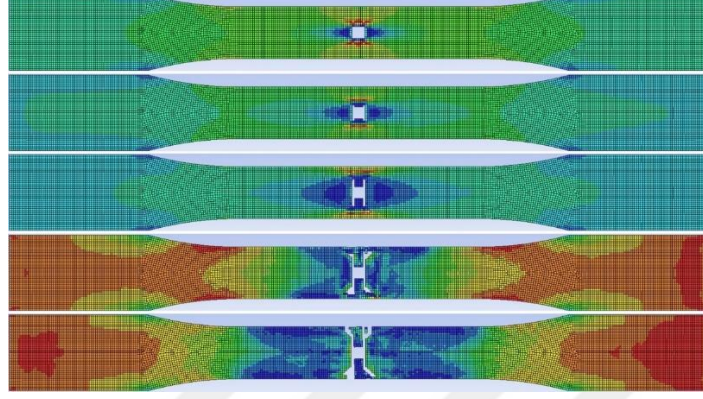


Şekil 4.34. Örgü Cam/Epoksi Kompozit 9 mm Çap Delik 30000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları

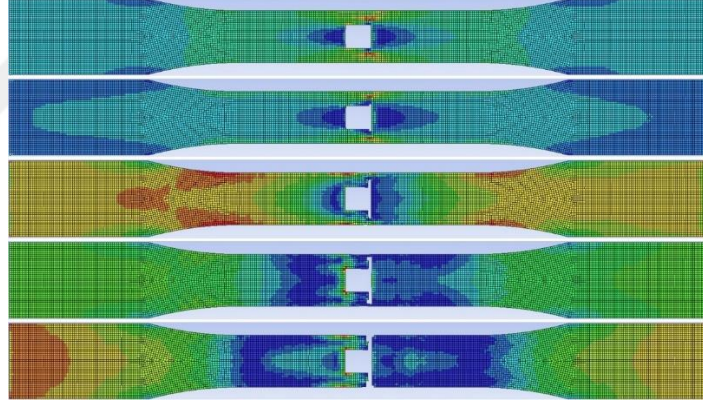
Örgü cam/epoksi kompozit malzemedeki 3x3, 6x6 ve 9x9 mm² boyutlarında kare delikli materyallerin 30000 mm/dak hızında çekme testi sonucu elde edilen analiz görüntüleri incelenerek şekil 4.35., şekil 4.36. ve şekil 4.37.'de malzemenin kopma aşamaları verilmiştir. Burada genel olarak ikinci aşamaya benzer tepkiler görülmektedir.

Şekil 4.35.'te örgü cam/epoksi kompozit malzemedeki 3x3 mm² kare delik için söylenecek bir fark ;

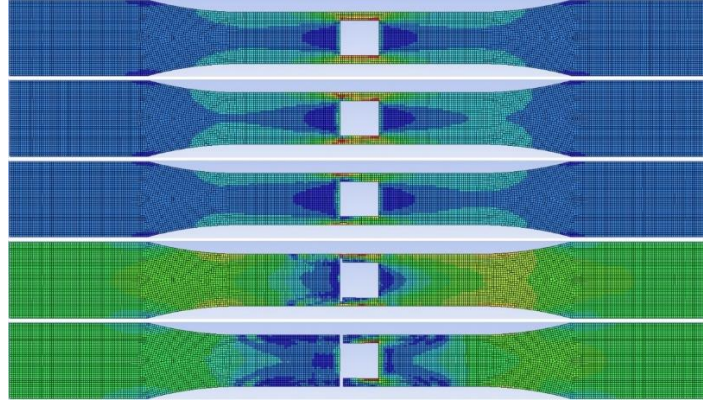
- Çatlak deliğın her bir kenarından başlamış ve ilerlemiştir ama deliğın 3 kenarından daha fazla ilerleyip bu kenarların olduğu taraftan kopmuştur.



Şekil 4.35. Örgü Cam/Epoksi Kompozit 3x3 mm² Kare Delik 30000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları

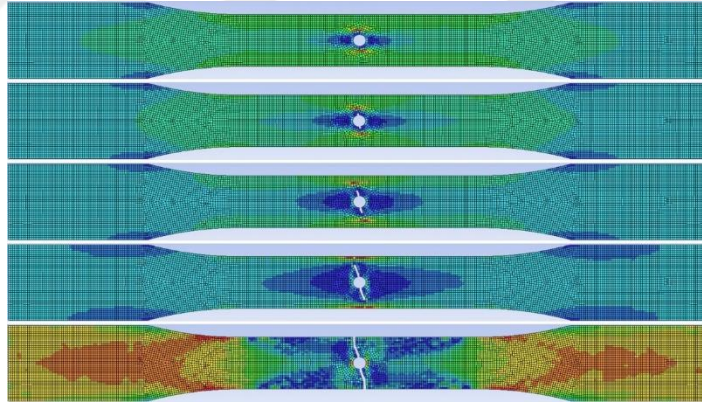


Şekil 4.36. Örgü Cam/Epoksi Kompozit 6x6 mm² Kare Delik 30000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları

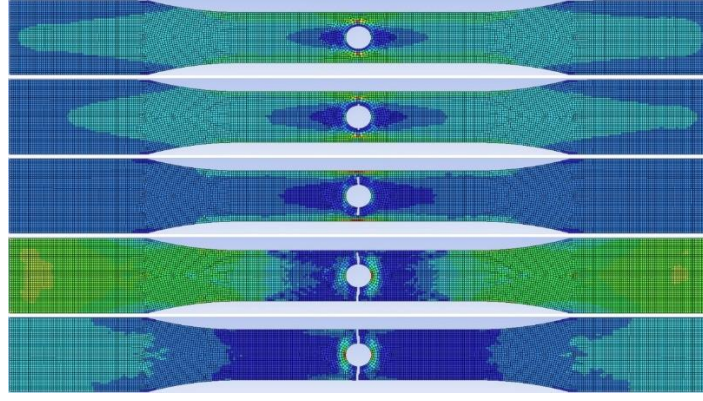


Şekil 4.37. Örgü Cam/Epoksi Kompozit 9x9 mm² Kare Delik 30000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları

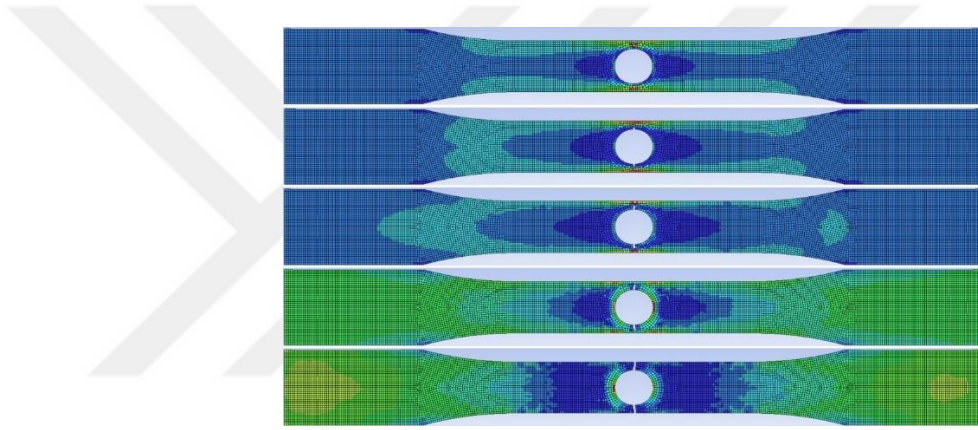
Örgü karbon/epoksi kompozit malzemede 3, 6 ve 9 mm çaplarda dairesel delikli materyallerin 30000 mm/dak hızında çekme testi sonucu elde edilen analiz görüntüleri incelenerek şekil 4.38., şekil 4.39. ve şekil 4.40.'ta malzemenin kopma aşamaları verilmiştir. Burada genel olarak ikinci aşamaya benzer tepkiler görülmektedir.



Şekil 4.38. Örgü Karbon/Epoksi Kompozit 3 mm Çap Delik 30000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları



Şekil 4.39. Örgü Karbon/Epoksi Kompozit 6 mm Çap Delik 30000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları



Şekil 4.40. Örgü Karbon/Epoksi Kompozit 9 mm Çap Delik 30000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları

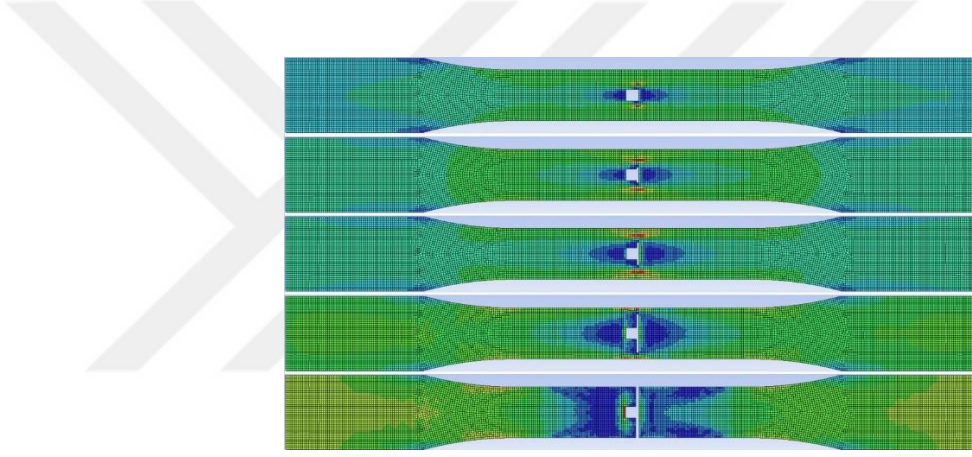
Örgü karbon/epoksi kompozit malzemede 3x3, 6x6 ve 9x9 mm² boyutlarında kare delikli materyallerin 30000 mm/dak hızında çekme testi sonucu elde edilen analiz görüntüleri incelenerek şekil 4.41., şekil 4.42. ve şekil 4.43.'te malzemenin kopma aşamaları verilmiştir. Burada genel olarak ikinci aşamaya benzer tepkiler görülmektedir.

Şekil 4.42.'de örgü karbon/epoksi kompozit malzemede 6x6 mm² kare delik için söylenebilecek bir fark ;

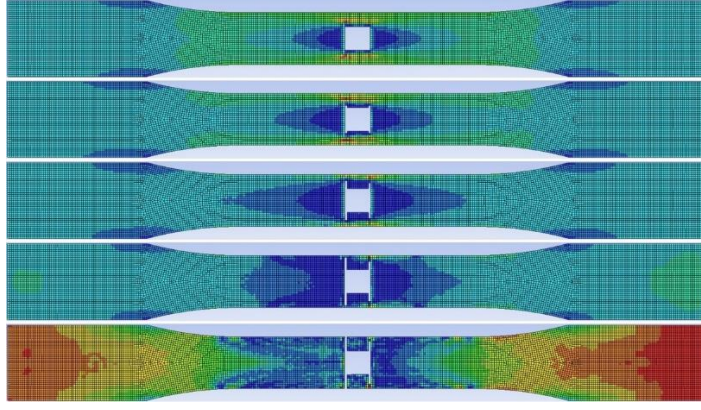
- Çatlak deliğın her bir kenarından başlamıştır. Çatlak asıl olarak sol tarafta büyümüşdür ve çatlak daha fazla ilerleyip numune bu kısım tarafından kopmuştur.

Şekil 4.43.'te örgü karbon/epoksi kompozit malzemede 9x9 mm² kare delik için söylenebilecek bir fark ;

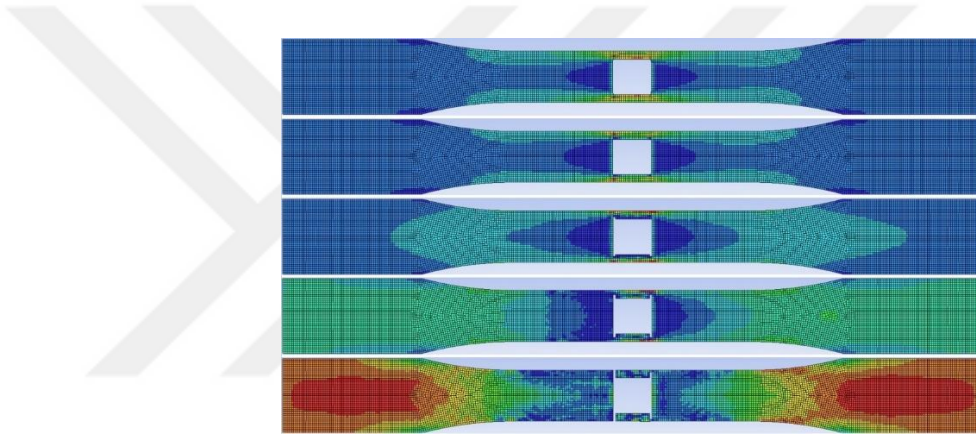
- Çatlak deliğın olduğı kısımdaki 3 kenarından başlamıştır. Daha sonra 4. kenarından da çatlak oluşmuştur. Çatlak asıl olarak sol tarafta büyümüşdür ve çatlak daha fazla ilerleyip numune bu kısım tarafından kopmuştur.



Şekil 4.41. Örgü Karbon/Epoksi Kompozit 3x3 mm² Kare Delik 30000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları



Şekil 4.42. Örgü Karbon/Epoksi Kompozit 6x6 mm² Kare Delik 30000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları

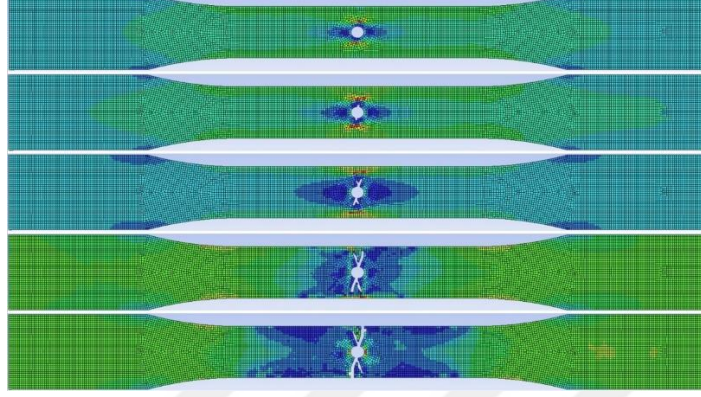


Şekil 4.43. Örgü Karbon/Epoksi Kompozit 9x9 mm² Kare Delik 30000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları

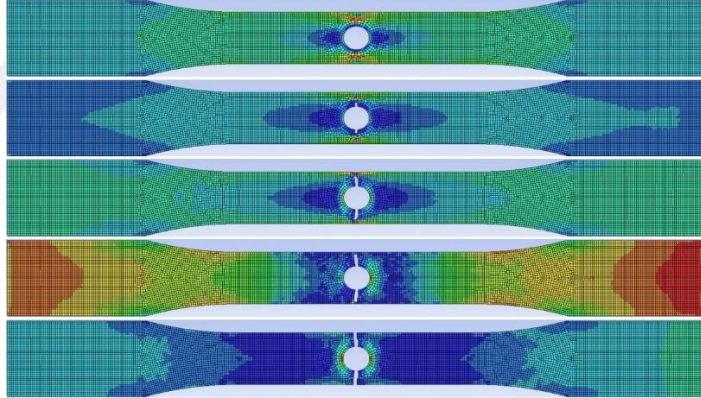
Örgü cam/epoksi kompozit malzemede 3, 6 ve 9 mm çaplarda dairesel delikli materyallerin 40000 mm/dak hızında çekme testi sonucu elde edilen analiz görüntüleri incelenerek şekil 4.44., şekil 4.45. ve şekil 4.46.'da malzemenin kopma aşamaları verilmiştir. Burada genel olarak ikinci aşamaya benzer tepkiler görülmektedir.

Şekil 4.44.'te örgü cam/epoksi kompozit malzemede 3 mm çapında delik için söylenebilecek bir fark ;

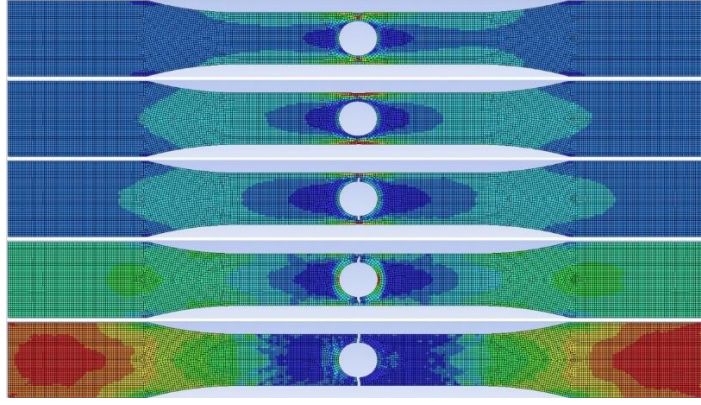
- Çatlak delik etrafında başlamıştır. Çatlak ilerlemesi 2 yolda çatallanmıştır. Numunede çatlağın ilk başladığı hattın olduğu çatlaktan ilerleyerek numune bu kısım tarafından kopmuştur.



Şekil 4.44. Örgü Cam/Epoksi Kompozit 3 mm Çap Delik 40000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları



Şekil 4.45. Örgü Cam/Epoksi Kompozit 6 mm Çap Delik 40000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları

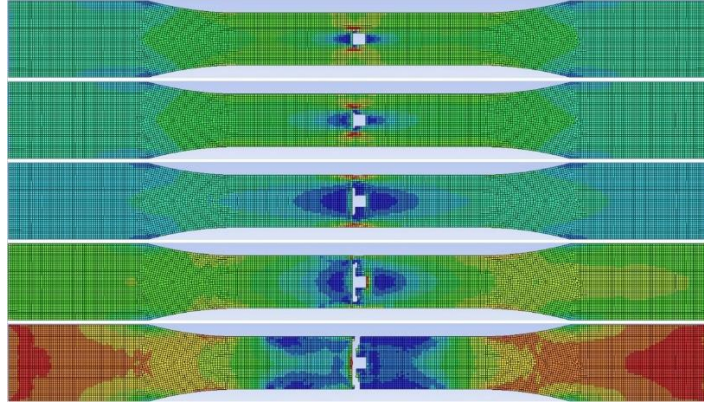


Şekil 4.46. Örgü Cam/Epoksi Kompozit 9 mm Çap Delik 40000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları

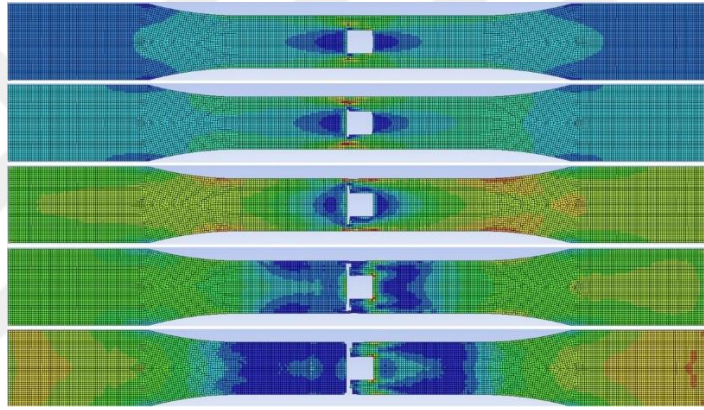
Örgü cam/epoksi kompozit malzemede 3x3, 6x6 ve 9x9 mm² boyutlarında kare delikli materyallerin 40000 mm/dak hızında çekme testi sonucu elde edilen analiz görüntüleri incelenerek şekil 4.47., şekil 4.48. ve şekil 4.49.'da malzemenin kopma aşamaları verilmiştir. Burada genel olarak ikinci aşamaya benzer tepkiler görülmektedir.

Şekil 4.49.'da örgü cam/epoksi kompozit malzemede 9x9 mm² kare delik için söylenebilecek bir fark ;

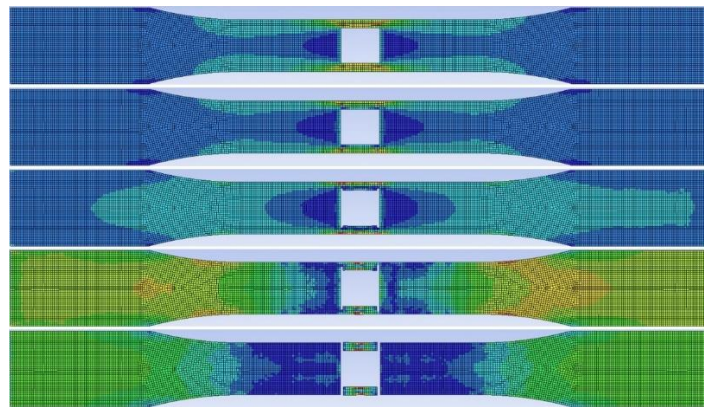
- Çatlak deliğin her bir kenarından başlamış ve ilerlemiştir. Çatlak daha fazla ilerleyip bu kenarların olduğu taraftan kopmuştur.



Şekil 4.47. Örgü Cam/Epoksi Kompozit $3 \times 3 \text{ mm}^2$ Kare Delik 40000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları

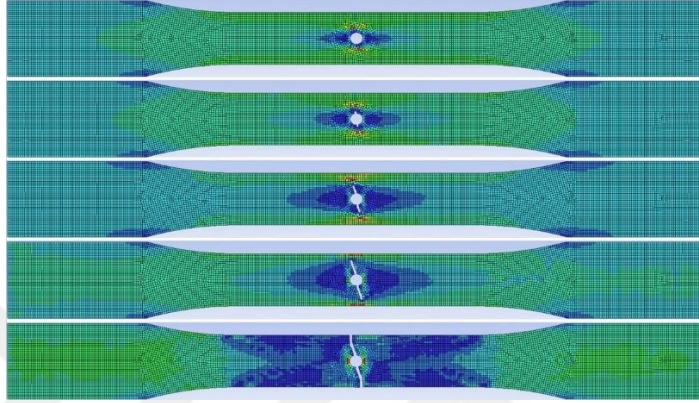


Şekil 4.48. Örgü Cam/Epoksi Kompozit $6 \times 6 \text{ mm}^2$ Kare Delik 40000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları

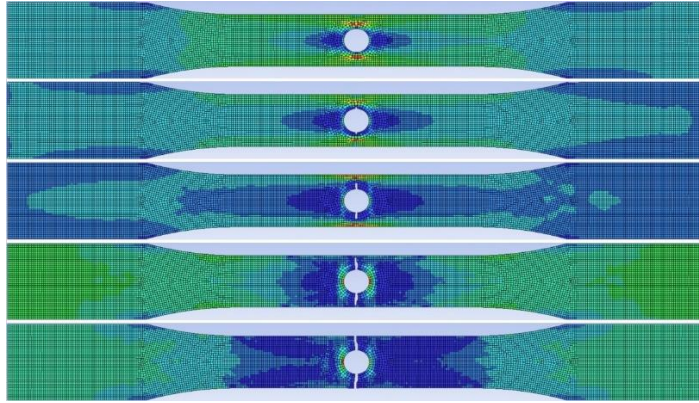


Şekil 4.49. Örgü Cam/Epoksi Kompozit $9 \times 9 \text{ mm}^2$ Kare Delik 40000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları

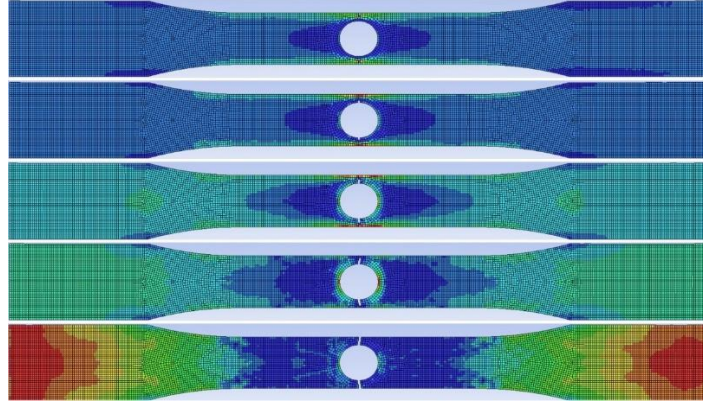
Örgü karbon/epoksi kompozit malzemede 3, 6 ve 9 mm çaplarda dairesel delikli materyallerin 40000 mm/dak hızında çekme testi sonucu elde edilen analiz görüntüleri incelenerek şekil 4.50., şekil 4.51. ve şekil 4.52.'de malzemenin kopma aşamaları verilmiştir. Burada genel olarak ikinci aşamaya benzer tepkiler görülmektedir.



Şekil 4.50. Örgü Karbon/Epoksi Kompozit 3 mm Çap Delik 40000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları



Şekil 4.51. Örgü Karbon/Epoksi Kompozit 6 mm Çap Delik 40000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları

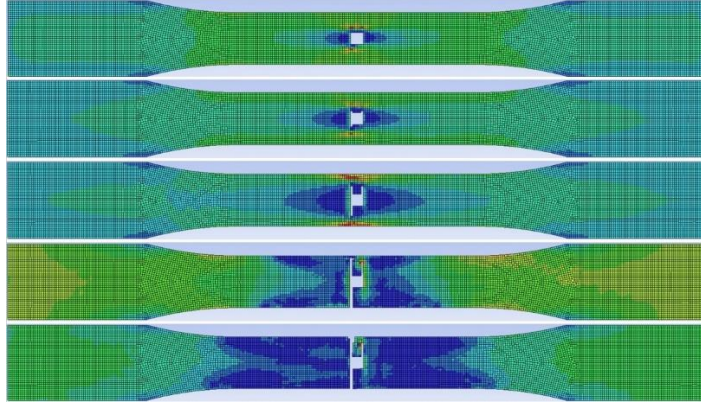


Şekil 4.52. Örgü Karbon/Epoksi Kompozit 9 mm Çap Delik 40000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları

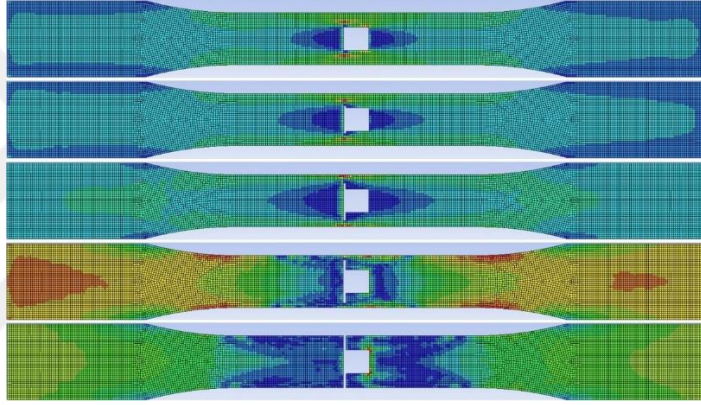
Örgü karbon/epoksi kompozit malzemede 3x3, 6x6 ve 9x9 mm² boyutlarında kare delikli materyallerin 40000 mm/dak hızında çekme testi sonucu elde edilen analiz görüntüleri incelenerek şekil 4.53., şekil 4.54. ve şekil 4.55.'te malzemenin kopma aşamaları verilmiştir. Burada genel olarak ikinci aşamaya benzer tepkiler görülmektedir.

Şekil 4.53.'te örgü karbon/epoksi kompozit malzemede 3x3 mm² kare delik için söylenebilecek bir fark ;

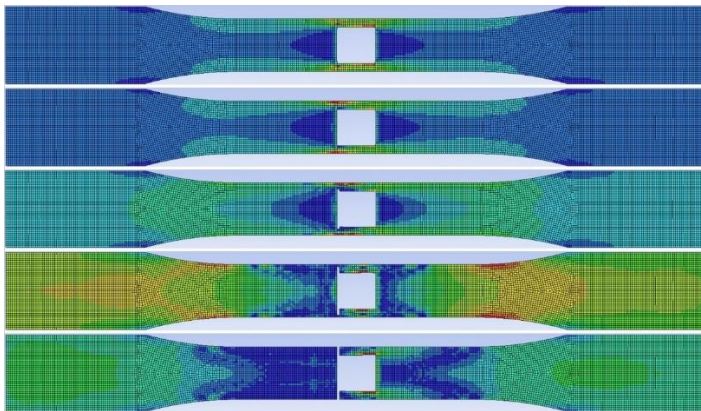
- Çatlak deliğın olduğu kısımdaki 3 kenarından başlamıştır. Çatlak asıl olarak sol tarafta büyümüşür ama numune önce alt kısmın olduğu taraftan sonra da üst kısmının olduğu taraftan kopmuştur.



Şekil 4.53. Örgü Karbon/Epoksi Kompozit $3 \times 3 \text{ mm}^2$ Kare Delik 40000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları



Şekil 4.54. Örgü Karbon/Epoksi Kompozit $6 \times 6 \text{ mm}^2$ Kare Delik 40000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları



Şekil 4.55. Örgü Karbon/Epoksi Kompozit $9 \times 9 \text{ mm}^2$ Kare Delik 40000 mm/dak Hız Değerindeki Kopma Aşamaları

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan tez çalışmasında literatürde yaygın olarak kullanılan örgü cam/epoksi ile örgü karbon/epoksi malzemesinin çekme testleri gerçekleştirilmiştir. İlk olarak model doğrulama işlemi yapılmıştır ve daha sonra doğrulanan model üzerinden numunelerin merkezinde farklı daire ve kare geometrilerde delikler açılarak 0.05 mm/dak ile farklı yüksek hızlarda (20000, 30000 ve 40000 mm/dak) çentik etkisine bakılmıştır. İlk aşamada 0.05 mm/dak sabit hızda deliksiz numunede çekme testi gerçekleştirilip elde edilen gerilme gerinim grafiği neticelerini literatürde yer alan benzer bir çalışma ile karşılaştırılarak oluşturulan modelimiz doğrulanmıştır. İkinci aşama olarak aynı 0.05 mm/dak sabit hızda bu sefer numunelerde 3, 6 ve 9 mm çaplarında dairesel ve 3x3, 6x6 ve 9x9 mm² boyutlarında kare delikler açılmıştır. Bu aşamada oluşacak çentik etkisinin maksimum çekme dayanımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Üçüncü ve son aşamada da ikinci aşamada kullanılan numuneleri bu sefer de 20000, 30000 ve 40000 mm/dak olacak şekilde farklı yüksek hızlarda çekme testleri gerçekleştirip çentik etkisinin maksimum çekme dayanımı üzerindeki etkisine bakılmıştır. Yapılan analizlerin sonucunda genel olarak çıkarılabilecek sonuçlar ;

- Bu çalışmada kare ve dairesel delikli numunelerde kopma aşaması beklenildiği gibi delik çevresinde gerçekleşmiştir. Çoğunlukla delik boyutu arttıkça boyuna çatlak daha fazla gözükmemektedir fakat delik boyutu azaldıkça enine çatlak daha fazla gözükmemektedir,
- Çentik etkisinin maksimum çekme dayanımına etkisi kare delikli numunelerde dairesel delikli numunelere kıyasla daha azdır. Yani kare delikli numuneler çentik etkisine karşı daha az duyarlıdır,
- Dairesel ve kare delikli numunelerde delik boyutu büyüdükçe elde edilen maksimum çekme gerilmesinde azalma, delik boyutu küçüldükçe de elde edilen maksimum çekme gerilmesinde artma gözlenmektedir,
- Delik boyutları farketmeksizin çekme hızı arttıkça elde edilen maksimum çekme gerilmesinde artma gözlenmektedir,
- Çentik etkisinde elde edilen maksimum çekme gerilmesi en yüksek 40000 mm/dak hızında ve 3x3 mm² boyutundaki kare delikli numunede

gelmiştir, en düşük ise 0.05 mm/dak hızında ve 9 mm çaplı dairesel delikli numunede gelmiştir,

şeklinde sıralanabilmektedir.

Kompozit laminatlarda farklı şekillerde deliklerin açılması ve farklı yüksek çekme hızlarında analizlerinin yapılması sonucu gelecek çalışmalar için bu bağlamda bağlantı elemanlarının kullanımlarında da değerlendirilmesi göz önüne alınarak bu konu üstüne de yapılabilecek çalışmalar düşünülebilir.



KAYNAKLAR

- [1] Krauklis, A.E., Karl, C.W., Gagani, A.I., Jørgensen, J.K. Composite material recycling technology—state-of-the-art and sustainable development for the 2020s. *Journal of Composites Science*. 2021, 5(1), 28(1-33).
<https://doi.org/10.3390/jcs5010028>
- [2] Panwar, V., Gupta, P., Bagha, A.K., Chauhan, N. A review on studies of finite element model updating and updating of composite materials. *Materials Today: Proceedings*. 2018, 5(14), 27912-27918.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.10.030>
- [3] Jayan, J.S., Saritha, A., Joseph, K. Innovative materials of this era for toughening the epoxy matrix: a review. *Polymer Composites*. 2018, 39(S4), E1959-E1986.
<https://doi.org/10.1002/pc.24789>
- [4] Kumre, A., Rana, R.S., Purohit, R. A Review on mechanical property of sisal glass fiber reinforced polymer composites. *Materials Today: Proceedings*. 2017, 4(2), 3466-3476.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.02.236>
- [5] Das, T.K., Ghosh, P., Das, N.C. Preparation, development, outcomes, and application versatility of carbon fiber-based polymer composites: a review. *Advanced Composites and Hybrid Materials*. 2019, 2, 214-233.
<https://doi.org/10.1007/s42114-018-0072-z>
- [6] Erbayrak, E., Gumus, B.E., Yuncuoglu, E.U., Kahraman, Y. Investigations of strain rate effects on the mechanical properties of hybrid composite laminate under varying temperatures. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2020, 45, 9709-9724.
<https://doi.org/10.1007/s13369-020-04903-x>
- [7] Erbayrak, E., Yuncuoglu, E.U., Kahraman, Y., Gumus, B.E. An experimental and numerical determination on low-velocity impact response of hybrid composite laminate. *Iranian journal of science and technology, transactions of mechanical engineering*. 2021, 45, 665-681.
<https://doi.org/10.1007/s40997-020-00402-4>
- [8] Elanchezhian, C., Ramnath, B.V., Hemalatha, J. Mechanical behaviour of glass and carbon fibre reinforced composites at varying strain rates and temperatures. *Procedia Materials Science*. 2014, 6, 1405-1418.
<https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.120>
- [9] Mahato, K.K., Dutta, K., Ray, B.C. High-temperature tensile behavior at different crosshead speeds during loading of glass fiber-reinforced polymer composites. *Journal of Applied Polymer Science*. 2017, 134(16), 44715(1-12).
<https://doi.org/10.1002/app.44715>
- [10] Chafiq, J., Oucht, I., El Fqih, M.A. Investigations of tensile behavior of basalt/glass/carbon/hybrid fiber composite. *Materials Today: Proceedings*. 2022, 52, 53-59.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.142>
- [11] Dasari, S., Saurabh, S., Prusty, R.K. Temperature and loading speed sensitivity of glass/carbon inter-ply hybrid polymer composites on tensile loading. *Journal of Applied Polymer Science*. 2021, 138(9), 49928(1-16).
<https://doi.org/10.1002/app.49928>
- [12] Mahato, K.K., Biswal, M., Rathore, D.K., Prusty, R.K., Dutta, K., Ray, B.C. Effect of loading rate on tensile properties and failure behavior of glass fibre/epoxy composite. *IOP Conference Series: Materials science and engineering*. 2016, 115, 012017(1-6).

<https://doi.org/10.1088/1757-899X/115/1/012017>

[13] Ahmed, K., Qin, X., Pang, Y., Shao, Y., Islam, S.R., Yang, Y., Hamada, H., Yu, L. Effect of de-sizing on the structural and mechanical properties of carbon fiber reinforced polypropylene composites molded by the novel direct fiber feeding injection molding technology. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. 2023, 36(5), 1847-1876.

<https://doi.org/10.1177/08927057221077872>

[14] Zhang, X., Shi, Y., Li, Z.X. Experimental study on the tensile behavior of unidirectional and plain weave CFRP laminates under different strain rates. *Composites Part B: Engineering*. 2019, 164, 524-536.

<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.01.067>

[15] Zhang, X., Hao, H., Shi, Y., Cui, J., Zhang, X. Static and dynamic material properties of CFRP/epoxy laminates. *Construction and Building Materials*. 2016, 114, 638-649.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.003>

[16] Elkazaz, E., Crosby, W.A., Ollick, A.M., Elhadary, M. Effect of fiber volume fraction on the mechanical properties of randomly oriented glass fiber reinforced polyurethane elastomer with crosshead speeds. *Alexandria Engineering Journal*. 2020, 59(1), 209-216.

<https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.12.024>

[17] Mahato, K.K., Rathore, D.K., Prusty, R.K., Dutta, K., Ray, B.C. Tensile behavior of MWCNT enhanced glass fiber reinforced polymeric composites at various crosshead speeds. *IOP Conference series: materials science and engineering*. 2017, 178, 012006(1-7).

<https://doi.org/10.1088/1757-899X/178/1/012006>

[18] Mahato, K.K., Dutta, K., Ray, B.C. Loading rate sensitivity of liquid nitrogen conditioned glass fiber reinforced polymeric composites: An emphasis on tensile and thermal responses. *Journal of Applied Polymer Science*. 2018, 135(9), 45856(1-11).

<https://doi.org/10.1002/app.45856>

[19] Mahato, K.K., Rathore, D.K., Dutta, K., Ray, B.C. Effect of loading rates of severely thermal-shocked glass fiber/epoxy composites. *Composites Communications*. 2017, 3, 7-10.

<https://doi.org/10.1016/j.coco.2016.11.001>

[20] Gupta, S., Prusty, R.K., Ray, B.C., Pal, S. Strength degradation and fractographic analysis of carbon fiber reinforced polymer composite laminates with square/circular hole using scanning electron microscope micrographs. *Journal of Applied Polymer Science*. 2021, 138(8), 49878(1-10).

<https://doi.org/10.1002/app.49878>

[21] Gupta, S., Pal, S., Ray, B.C. An analysis on tensile and flexural loading response for unidirectional CFRP laminate with cutout/hole: Geometrical design effect on the material strength. *Journal of Applied Polymer Science*. 2022, 139(46), 53139(1-10).

<https://doi.org/10.1002/app.53139>

[22] Jhanji, K.P., Kumar, R.A. Variation in tensile strength and failure mechanisms of carbon fiber reinforced plastics in presence of single, double and four holes along the loading direction. *Materials Today: Proceedings*. 2021, 47, 6116-6119.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.028>

[23] Zahari, R., Kamarulazizi, S., Majid, D.L.A.A. Tensile behaviour of unbalanced woven c-glass/epoxy composite laminated plate with and without circular cutouts. *Jurnal Mekanikal*. 2012, 34(1), 57-65.

- [24] Liu, J., Wang, L., He, Y., Zhang, Y., Yuan, X., Li, W. Experimental study of notched tensile strength of large open-hole carbon fiber reinforced polymer laminates at low temperature. *Composites Communications*. 2023, 39, 101546(1-5).
<https://doi.org/10.1016/j.coco.2023.101546>
- [25] Sun, J., Jing, Z., Wu, J., Wang, W., Zhang, D., Zhao, J. Strain rate effects on dynamic tensile properties of open-hole composite laminates. *Composites Communications*. 2020, 19, 226-232.
<https://doi.org/10.1016/j.coco.2020.04.004>
- [26] Gunaryo, K., Heriana, H., Sitompul, M.R., Kuswoyo, A., Hadi, B.K. Experimentation and numerical modeling on the response of woven glass/epoxy composite plate under blast impact loading. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*. 2020, 15, 1-9.
<https://doi.org/10.1186/s40712-020-0116-3>
- [27] Han, M.G., Chang, S.H. Draping simulation of carbon/epoxy plain weave fabrics with non-orthogonal constitutive model and material behavior analysis of the cured structure. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2018, 110, 172-182.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.04.022>
- [28] Herakovitch, C.T. Mechanics of composites: A historical review. *Mechanics Research Communications*. 2012, 41, 1-20.
<https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2012.01.006>
- [29] Hsissou, R., Seghiri, R., Benzekri, Z., Hilali, M., Rafik, M., Elharfi, A. Polymer composite materials: A comprehensive review. *Composite structures*. 2021, 262, 113640(1-15).
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113640>
- [30] Groover, M.P. *Modern İmalatın Prensipleri* (M. Yurdakul ve Y.T. İç, Çev.). Ankara, Nobel Akademik Yayıncılık, 2019, 1002 s.
- [31] Dandekar, C.R., Shin, Y.C. Modeling of machining of composite materials: A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2012, 57, 102-121.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.01.006>
- [32] Sharma, S., Sudhakara, P., Nijjar, S., Saini, S., Singh, G. Recent Progress of Composite Materials in various Novel Engineering Applications. *Materials Today: Proceedings*. 2018, 5(14), 28195-28202.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.10.063>
- [33] Yastımoğlu, F., Özkan, A. Tekrarlanan Yükler Altında Kompozit Malzemelerin Yapılarının İncelenmesini Amaçlayan Deney Aygıtı Tasarımı. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*. 2017, 5(1), 56-66.
- [34] Bahl, S. Fiber reinforced metal matrix composites - a review. *Materials Today: Proceedings*. 2021, 39, 317-323.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.423>
- [35] Sajan, S., Selvaraj, D.P. A review on polymer matrix composite materials and their applications. *Materials Today: Proceedings*. 2021, 47, 5493-5498.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.034>
- [36] Doddamani, S., Kulkarni, S.M., Joladarashi, S., Kumar T.S., M., Gurjar, A.K. Analysis of light weight natural fiber composites against ballistic impact: A review. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*. 2023, 6(3), 450-468.
<https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2023.01.003>
- [37] Thori, P., Sharma, P., Bhargava, M. An approach of composite materials in industrial machinery: advantages, disadvantages and applications. *International Journal of Research in Engineering and Technology*. 2013, 2(12), 350-355.

<https://doi.org/10.15623/ijret.2013.0212060>

[38] Mrazova, M. Advanced composite materials of the future in aerospace industry. Incas bulletin. 2013, 5(3), 139-150.

<https://doi.org/10.13111/2066-8201.2013.5.3.14>

[39] Müzel, S.D., Bonhin, E.P., Guimarães, N.M., Guidi, E.S. Application of the finite element method in the analysis of composite materials: A review. Polymers. 2020, 12(4), 818(1-59).

<https://doi.org/10.3390/polym12040818>

[40] Makhkamov, N.Y., Yusupov, G.U., Tursunov, T., Djalilov, K. Properties of metal-based and nonmetal-based composite materials: A brief review. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020, 614(1), 012068(1-6).

<https://doi.org/10.1088/1755-1315/614/1/012068>

[41] Sharma, A.K., Bhandari, R., Sharma, C., Dhakad, S.K., Pinca-Bretotean, C. Polymer matrix composites: A state of art review. Materials Today: Proceedings. 2022, 57, 2330-2333.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.592>

[42] Chohan, J.S., Boparai, K.S., Singh, R., Hashmi, M.S.J. Manufacturing techniques and applications of polymer matrix composites: a brief review. Advances in Materials and Processing Technologies. 2022, 8(1), 884-894.

<https://doi.org/10.1080/2374068X.2020.1835012>

[43] Akca, E., Gursel, A. A review on the matrix toughness of thermoplastic materials. Periodicals of Engineering and Natural Sciences. 2015, 3(2), 1-8.

<http://dx.doi.org/10.21533/pen.v3i2.52>

[44] Qiao, Y., Fring, L.D., Pallaka, M.R., Simmons, K.L. A review of the fabrication methods and mechanical behavior of continuous thermoplastic polymer fiber-thermoplastic polymer matrix composites. Polymer Composites. 2023, 44(2), 694-733.

<https://doi.org/10.1002/pc.27139>

[45] Morici, E., Dintcheva, N.T. Recycling of thermoset materials and thermoset-based composites: challenge and opportunity. Polymers. 2022, 14(19), 4153 (1-12).

<https://doi.org/10.3390/polym14194153>

[46] Nawab, Y., Shahid, S., Boyard, N., Jacquemin, F. Chemical shrinkage characterization techniques for thermoset resins and associated composites. Journal of Materials Science. 2013, 48, 5387-5409.

<https://doi.org/10.1007/s10853-013-7333-6>

[47] Thakur, V.K., Thakur, M.K. Processing and characterization of natural cellulose fibers/thermoset polymer composites. Carbohydrate polymers. 2014, 109, 102-117.

<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.03.039>

[48] Mishnaevsky Jr, L., Branner, K., Petersen, H.N., Beauson, J., McGugan, M., Sørensen, B.F. Materials for wind turbine blades: An overview. Materials. 2017, 10(11), 1285(1-24).

<https://doi.org/10.3390/ma10111285>

[49] Papageorgiou, D.G., Kinloch, I.A., Young, R.J. Graphene/elastomer nanocomposites. Carbon. 2015, 95, 460-484.

<https://doi.org/10.1016/j.carbon.2015.08.055>

[50] Wang, R., Zhang, J., Kang, H., Zhang, L. Design, preparation and properties of bio-based elastomer composites aiming at engineering applications. Composites Science and Technology. 2016, 133, 136-156.

<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2016.07.019>

- [51] Çakmakkaya, M., Kunt, M., Terzi, O. Investigation of polymer matrix composites in automotive consoles. *International Journal of Automotive Science And Technology*. 2019, 3(3), 51-56.
<https://doi.org/10.30939/ijastech..513332>
- [52] Bains, P.S., Sidhu, S.S., Payal, H.S. Fabrication and machining of metal matrix composites: a review. *Materials and Manufacturing Processes*. 2016, 31(5), 553-573.
<https://doi.org/10.1080/10426914.2015.1025976>
- [53] Zhou, M.Y., Ren, L.B., Fan, L.L., Zhang, Y.W.X., Lu, T.H., Quan, G.F., Gupta, M. Progress in research on hybrid metal matrix composites. *Journal of Alloys and Compounds*. 2020, 838, 155274(1-40).
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.155274>
- [54] Sun, J., Ye, D., Zou, J., Chen, X., Wang, Y., Yuan, J., Liang, H., Qu, H., Binner, J., Bai, J. A review on additive manufacturing of ceramic matrix composites. *Journal of Materials Science & Technology*. 2023, 138, 1-16.
<https://doi.org/10.1016/j.jmst.2022.06.039>
- [55] Sommers, A., Wang, Q., Han, X., T'Joens, C., Park, Y., Jacobi, A. Ceramics and ceramic matrix composites for heat exchangers in advanced thermal systems—A review. *Applied Thermal Engineering*. 2010, 30(11-12), 1277-1291.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.02.018>
- [56] Shetty, N., Shahabaz, S.M., Sharma, S.S., Shetty, S.D. A review on finite element method for machining of composite materials. *Composite Structures*. 2017, 176, 790-802.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.06.012>
- [57] Czech, K., Oliwa, R., Krajewski, D., Bulanda, K., Oleksy, M., Budzik, G., Mazurkow, A. Hybrid polymer composites used in the arms industry: A review. *Materials*. 2021, 14(11), 3047(1-17).
<https://doi.org/10.3390/ma14113047>
- [58] Rajak, D.K., Wagh, P.H., Linul, E. Manufacturing technologies of carbon/glass fiber-reinforced polymer composites and their properties: A review. *Polymers*. 2021, 13(21), 3721(1-42).
<https://doi.org/10.3390/polym13213721>
- [59] He, A., Xing, T., Liang, Z., Luo, Y., Zhang, Y., Wang, M., Huang, Z., Bai, J., Wu, L., Shi, Z., Zuo, H., Zhang, W., Chen, F., Xu, W. Advanced aramid fibrous materials: fundamentals, advances, and beyond. *Advanced Fiber Materials*. 2024, 6, 3-35.
<https://doi.org/10.1007/s42765-023-00332-1>
- [60] Lunetto, V., Galati, M., Settineri, L., Iuliano, L. Sustainability in the manufacturing of composite materials: A literature review and directions for future research. *Journal of Manufacturing Processes*. 2023, 85, 858-874.
<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.12.020>
- [61] Rajak, D.K., Pagar, D.D., Kumar, R., Pruncu, C.I. Recent progress of reinforcement materials: a comprehensive overview of composite materials. *Journal of Materials Research and Technology*. 2019, 8(6), 6354-6374.
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.09.068>
- [62] Biswal, T., BadJena, S.K., Pradhan, D. Synthesis of polymer composite materials and their biomedical applications. *Materials Today: Proceedings*. 2020, 30, 305-315.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.567>
- [63] Zin, M.H., Razzi, M.F., Othman, S., Liew, K., Abdan, K., Mazlan, N. A review on the fabrication method of bio-sourced hybrid composites for aerospace and automotive applications. *Materials science and engineering*. 2016, 152, 012041(1-12).

<https://doi.org/10.1088/1757-899X/152/1/012041>

[64] Miller, A., Brown, C. and Warner, G. Guidance on the use of existing ASTM polymer testing standards for ABS parts fabricated using FFF. Smart and Sustainable Manufacturing Systems. 2019, 3(1), 122-138.

<https://doi.org/10.1520/ssms20190051>

[65] Zamoski, R., Kypta, C.J., Young, B.A., Sanei, S.H.R., Hollinger, A.S. Mechanical and electrical properties of injection-molded mwcnt-reinforced polyamide 66 hybrid composites. Journal of Composites Science. 2020, 4(4), 177(1-14).

<https://doi.org/10.3390/jcs4040177>

[66] ANSYS. (t.y.). LS-DYNA dev Keyword Manual Vol I. Erişim adresi ; <https://lsdyna.ansys.com/manuals/>

[67] ANSYS. (t.y.). LS-DYNA dev Keyword Manual Vol II – Material Models. Erişim adresi ; <https://lsdyna.ansys.com/manuals/>

