

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DELİKLİ KOMPOZİT PLAKALARIN MEKANİK DAYANIMININ SONLU
ELEMENLAR YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Emre ÖZASLAN

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mehmet Ali GÜLER

NİSAN 2019

Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

.....
Prof. Dr. Osman EROĞUL
Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

.....
Doç. Dr. Murat Kadri AKTAŞ
Anabilim Dalı Başkanı

TOBB ETÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 161511065 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Emre ÖZASLAN**'ın ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "**DELİKLİ KOMPOZİT PLAKALARIN MEKANİK DAYNIMININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ**" başlıklı tezi **12.04.2019** tarihinde aşağıda imzaları olan jüri tarafından kabul edilmiştir

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Mehmet Ali GÜLER**
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Erdem ACAR (Başkan)**
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Doç. Dr. Ercan GÜRSES
Orta Doğu Teknik Üniversitesi

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, alıntı yapılan kaynaklara eksiksiz atıf yapıldığını, referansların tam olarak belirtildiğini ve ayrıca bu tezin TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.

Emre ÖZASLAN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

DELİKLİ KOMPOZİT PLAKALARIN MEKANİK DAYANIMININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ

Emre ÖZASLAN

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mehmet Ali GÜLER

Tarih: Nisan 2019

Kompozit malzemeler yüksek özgül dayanımları ve dirençlilik gibi malzeme özellikleri sebebiyle özellikle havacılık ve uzay alanlarında olmak üzere birçok alanda yüksek cazibeye sahiptir. Bununla birlikte kompozit malzemelerin ortotropik mekanik davranışı izotropik davranış gösteren malzemelerden daha karmaşıktır. Özellikle yapıda delik açılarak oluşturulabilecek bir süreksizlik bu davranışı daha da karmaşık bir hale getirmektedir. Dolayısıyla güvenli tasarımlar yapabilmek için çok sayıda test yapılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Fakat uygun yöntemler uygulanarak sonlu elemanlar analizleriyle yapılan çalışmalarla bu test sayısında azaltmaya gidilebilir.

Tez kapsamında, öncelikle kompozit malzemeler hakkında genel bilgiler verilmiş, kompozit malzemelerdeki gerilme konsantrasyonu ve dayanım hakkındaki literatür araştırması özetlenmiştir. Ardından teorik olarak altyapı oluşturabilmek adına temel kompozit mekaniği, lamina hasar teorileri ve gerilme konsantrasyonu içeren katmanlı kompozitler için hasar tespit yöntemlerinden bahsedilmiştir. Daha sonra tek delikli katmanlı kompozit numuneler için sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ve deneysel olarak

gerilme konsantrasyonu ve mekanik dayanım konuları incelenmiştir. Farklı numune genişliklerinde ve delik çaplarında üretilen numuneler için, delik çapı boyutu değişiminin gerilme konsantrasyonu ve dayanıma olan etkileri irdelenmiştir. Delik çapı ve numune genişliği oranı ele alınarak, sonlu-sonsuz plaka genişliği durumları tartışılmıştır. Ayrıca delik çapı ve numune genişliği aynı oranda arttırılarak, delikli kompozit plakalar için boyut etkisi incelenmiştir. Tüm numune konfigürasyonu için mekanik dayanım tahmini Noktasal Gerilme Kriteri (PSC) yöntemi kullanılarak yapılmış ve deneysel çalışmalarla doğrulama gerçekleştirilmiştir. İkinci aşama olarak iki delik etkileşim durumu numerik ve deneysel olarak ele alınmıştır. Çok yönlü katmanlı kompozit numunelere birbirleriyle etkileşime giren iki delik açılmıştır. Delikleri yükleme yönüne göre farklı pozisyonlarda konumlandırılarak oluşturulan farklı tipteki numuneler için gerilme konsantrasyonu ve dayanım incelenmesi yapılmıştır. İki deliğin konumlandırılmasının ve etkileşiminin gerilme konsantrasyonu ve dayanıma olan etkileri tartışılmıştır. Farklı pozisyonlarda konumlandırılan etkileşimli çift deliğe sahip kompozit numunelerin her bir laminasındaki gerilme konsantrasyonu durumu numerik olarak incelenmiştir. Tüm çift delikli numune tipleri için hasara sebep olacak kritik kesidin neresi olacağı tartışılmıştır. Hasar tespiti için kullanılan PSC yönteminin çift delikli numuneler için hangi koşullar altında uygulanabileceği tartışılmıştır. Bu koşullara uymayan numuneler için tek delikli numune dayanım tahmininde kullanılan PSC yöntemi modifiye edilerek mekanik dayanım tahmini yapabilen bir yöntem (EPSC) geliştirilmiş ve deneysel olarak doğrulama çalışmaları yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Sonlu elemanlar analizi, Kompozitler, Mekanik dayanım, Gerilme konsantrasyonu, Delikli kompozit.

ABSTRACT

Master of Science

INVESTIGATION OF MECHANICAL STRENGTH OF OPEN HOLE COMPOSITE PLATES WITH FINITE ELEMENT METHOD

Emre ÖZASLAN

TOBB University of Economics and Technology
Institute of Natural and Applied Sciences
Mechanical Engineering Science Programme

Supervisor: Prof. Dr. Mehmet Ali GÜLER

Date: April 2019

Composite materials have a growing appeal in many different fields, especially in aerospace and aeronautical due to their superior material properties such as high specific strength and stiffness. However, the orthotropic composite materials exhibit a more complex mechanical behavior than the isotropic ones. In particular, a discontinuity that can be created by drilling a hole in the structure makes this behavior even more complicated. Therefore, a large number of tests are needed to make safe designs. However, by using appropriate methods and finite element analysis, it is possible to decrease the number of these tests. Within the scope of the thesis, firstly general information about composite materials is given and the literature research about the stress concentration and strength in composite materials is summarized.

Then, basic mechanics of composites, lamina level failure theories and strength prediction methods for layered composites with circular hole are mentioned in order to establish a theoretical background. Stress concentration and mechanical strength of layered composite specimens with one open circular hole are investigated by

numerically and experimentally. For specimens manufactured in different width and hole diameter, the effect of hole diameter size change on stress concentration and strength is examined. By examining the hole diameter to specimen width ratio, the finite-infinite specimen width conditions are discussed. In addition, the size effect for the notched composite specimens is investigated by increasing the hole diameter and specimen width at the same rate. The mechanical strength estimation for the whole specimen configuration is performed using the Point Stress Criteria (PSC) method and validation was performed by experimental studies. As the second step, the situation of two-hole interaction is investigated numerically and experimentally. Interacting two holes are created on the multidirectional layered composite specimens. For different types of specimens formed by positioning the holes in different positions according to loading direction, stress concentration and strength are investigated. The effects of positioning and interaction of two holes on stress concentration and strength are discussed. The stress concentration situation in each lamina of the composite specimens with interacting holes located at different positions is examined numerically. For all specimen types, it is discussed where the critical section is likely to cause damage. It is discussed under which conditions PSC method used for strength prediction could be applied for double-hole specimens. For specimens that do not comply with these conditions, the PSC method used in the prediction of single-hole specimen strength is modified and a method (EPSC) capable of estimating mechanical strength of two interacted hole situation is developed and validated experimentally.

Keywords: Finite element analysis, Composites, Mechanical strength, Stress concentration, Open hole composite.

TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca değerli yardımlarını sunan hocam Prof.Dr. Mehmet Ali GÜLER ve TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Bölümü öğretim üyelerine, çalışma süresince kıymetli tecrübelerinden yararlandığım ve karşılaőtığım sıkıntılarını aşmamda desteklerini hiçbir zaman eksik etmeyen başta Bülent Acar ve Ali Yetgin olmak üzere ROKETSAN'daki iş arkadaşlarıma, her zaman yanımda olan kıymetli aileme ve kız arkadaşım Çağla'ya çok teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİL LİSTESİ	xi
ÇİZELGE LİSTESİ	xiv
KISALTMALAR	xv
SEMBOL LİSTESİ	xvi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	3
1.2 Tezin Ana Hatları	4
2. GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	5
2.1 Kompozit Malzemelerin Yapısı	5
2.1.1 Fiberler	5
2.1.2 Matrisler	7
2.2 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	7
2.2.1 Fiber geometrisine göre kompozitler	7
2.2.2 Matris malzemesine göre kompozitler	9
2.3 Kompozit Malzemelerde Gerilme Konsantrasyonu	10
2.4 Delikli Kompozit Yapılarda Dayanım	13
3. TEORİK ALTYAPI	21
3.1 Kompozit Malzeme Mekaniği	21
3.1.1 Kompozit lamina mekaniği	21
3.1.2 Kompozit katman mekaniği	27
3.2 Delik Çevresi Gerilme Dağılımı	32
3.3 Lamina Hasar Analizi	34
3.3.1 Hasar tipiyle ilişkili hasar kriterleri	35
3.3.2 Hasar tipiyle ilişkili olmayan hasar kriterleri	38
3.3.3 Hasar kriterlerinin karşılaştırılması	39
3.4 Katman Hasar Analizi	42
3.4.1 İlerlemeli hasar analizi	42
3.4.2 Doğrusal elastik kırılma mekaniği temelli yöntemler	43
3.4.3 Noktasal gerilme kriteri (PSC) ve ortalama gerilme kriteri (ASC) yöntemleri	45
4. TEK DELİKLİ KOMPOZİT NUMUNELER İÇİN GERÇEKLEŞTİRİLEN TEST VE ANALİZ ÇALIŞMALARI	49
4.1 Tek Delikli Numuneler İçin Malzeme Karakterizasyon Testleri	49
4.2 Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Gerilme Konsantrasyonu İncelenmesi	56
4.2.1 Sonlu elemanlar modeli	57
4.2.2 Gerilme konsantrasyonu faktörü (GKF) incelenmesi	61

4.3 Kompozit Katman Çekme Testleri	66
4.3.1 NOHT numuneleri çekme testleri	67
4.3.2 OHT numuneleri testleri	70
4.4 OHT Numuneleri İçin PSC Yönteminin Uygulanması	72
5. ÇİFT DELİKLİ NUMUNELER İÇİN GERÇEKLEŞTİRİLEN TEST VE ANALİZ ÇALIŞMALARI	77
5.1 Problemin Tanıtılması	77
5.2 Numune Geometrileri	80
5.3 Çift Delikli Numuneler İçin Malzeme Karakterizasyon Testleri	81
5.4 Sonlu Elemanlar Yöntemiyle GKF İncelenmesi	84
5.4.1 Sonlu elemanlar modeli	85
5.4.2 GKF incelemesi	88
5.5 Çift Delikli Konfigürasyon İçin PSC Yöntemi Uygulanabilirliğinin İrdelenmesi	93
5.5.1 Çift delikli durum dayanım tahmini için öne sürülen yöntem (EPSC)	95
5.6 NOHT ve OHT Numuneleri İçin Gerçekleştirilen Test Çalışmaları	100
5.7 A Bölgesi Numuneleri İçin PSC Yöntemi Kullanılarak Dayanım Tahmini Yapılması	103
5.8 B Bölgesi Numuneleri İçin EPSC Yöntemi Kullanılarak Dayanım Tahmini Yapılması	106
5.9 Genel Sonuçların Verilmesi	110
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	113
KAYNAKLAR	115
ÖZGEÇMİŞ	119

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1: Çeşitli malzemelerin yıllara göre kullanımlarının özgül ağırlığa göre grafiği [1]	2
Şekil 2.1: Fiber ve matrislerle kompozitin oluşturulması	5
Şekil 2.2: Farklı fiber yapılarındaki kompozit malzemeler	6
Şekil 2.3: Fiber geometrisine göre kompozitler	8
Şekil 2.4: Soldan sağa; Tek yönlü (İng. UD) kompozit, Örgülü (İng. Woven) kompozit, Filaman sargılı kompozit	9
Şekil 2.5: Farklı lamina hasar kriterlerinin kullanılma oranları [2]	15
Şekil 3.1: Global ve lokal eksen takımları	25
Şekil 3.2: Katmandaki tepki kuvvetleri ve momentlerinin notasyonu	28
Şekil 3.3: a) Katman kalınlığı boyunca lamina dizilimi b) Katman kalınlığı boyunca gerinim değişimi c) Katman kalınlığı boyunca gerilme değişimi	29
Şekil 3.4: Katman kalınlığı boyunca lamina konumlarının orta düzleme olan uzaklıklarının şematik gösterimi	29
Şekil 3.5: Tek yönlü çekme yükü altındaki delikli kompozit plaka	33
Şekil 3.6: Lamina hasar tipleri	35
Şekil 3.7: Farklı lamina hasar kriterleri için 11-22 düzlemi hasar sınırları grafiği	40
Şekil 3.8: Farklı lamina hasar kriterleri için 11-12 düzlemi hasar sınırları grafiği	41
Şekil 3.9: Farklı lamina hasar kriterleri için 22-12 düzlemi hasar sınırları grafiği	41
Şekil 3.10: Tek yönlü çekme yüklemesi altında delik çevresinde oluşan yoğun enerji bölgesi	44
Şekil 3.11: PSC yöntemi	46
Şekil 3.12: ASC yöntemi	47
Şekil 4.1: Testlerde kullanılan 200 kN kapasiteli Instron çekme cihazı	50
Şekil 4.2: Numune üzerine gerinimölçer yerleşimi	50
Şekil 4.3: ESAM veri toplama sistemi ve veri işleme bilgisayarı	51
Şekil 4.4: Malzeme karakterizasyon numunelerinin şematik gösterimi	52
Şekil 4.5: a) Fiber yönü (Tip-2) numunesi b) Matris yönü (Tip-3) numunesi c) Kayma yönü (Tip-4) numunesi	53
Şekil 4.6: Tip-2 numuneleri gerilme-gerinim eğrileri	54
Şekil 4.7: Tip-3 numuneleri gerilme-gerinim eğrileri	54
Şekil 4.8: Tip-4 numuneleri gerilme-gerinim eğrileri	55
Şekil 4.9: Tek delikli numune şematik gösterimi	57
Şekil 4.10: Sınır koşulları ve yükleme	58
Şekil 4.11: Eleman boyutu - Delik kenarı ortalama çekme yönü katman gerilmesi	59
Şekil 4.12: Ağ yapısı görünümü	60
Şekil 4.13: Kompozit katman modeli	61
Şekil 4.14: Farklı W/D oranları için delik kenarındaki katman maksimum GKF değerleri	63

Şekil 4.15: Farklı W/D oranları için her bir lamina delik kenarındaki maksimum GKF değerleri	64
Şekil 4.16: OHT-1 numunesi için her lamina ve katman için delik çevresindeki GKF dağılımı	65
Şekil 4.17: Farklı W/D oranları için verilen patika boyunca katman gerilme dağılımı	66
Şekil 4.18: NOHT numuneleri için test-analiz karşılaştırması	68
Şekil 4.19: NOHT numuneleri için hasar bölgeleri a) Tab bölgesi b) Orta bölge . . .	69
Şekil 4.20: OHT numuneleri için test-analiz karşılaştırması	71
Şekil 4.21: OHT numuneleri için test sonrası hasar görüntüsü	72
Şekil 4.22: OHT-2 için kopma yükü altında verilen patika için ortalama katman gerilmesi dağılımı	73
Şekil 4.23: OHT numuneleri için PSC yöntemi uygulanması sonucu verilen patika boyunca oluşan ortalama katman gerilmesi dağılımı	74
Şekil 4.24: Farklı W/D oranlarındaki OHT numunelerinin dayanım karşılaştırması (Test-PSC)	75
Şekil 4.25: Aynı W/D oranında fakat farklı W ve D boyutlarındaki OHT numunelerinin dayanım karşılaştırması (Test-PSC)	76
Şekil 5.1: Etkileşimli ve etkileşimsiz delikli durumlar için ortalama çekme yönü katman gerilmesi dağılımları	79
Şekil 5.2: Çift delikli katmanlı kompozit numunelerin şematik görünümü	80
Şekil 5.3: Deliksiz, tek delikli ve farklı oryantasyonlarda yerleştirilmiş çift delikli numuneler	81
Şekil 5.4: Fiber yönü numuneleri çekme testi sonuçları	82
Şekil 5.5: Matris yönü (fibere dik yön) numuneleri çekme testi sonuçları	83
Şekil 5.6: Kayma yönü numuneleri çekme testi sonuçları	84
Şekil 5.7: Katmanın laminalar modellenerek oluşturulması	86
Şekil 5.8: Eleman boyutu - Delik kenarı ortalama çekme yönü katman gerilmesi	87
Şekil 5.9: Sonlu elemanlar modeli ve ağ yapısı	88
Şekil 5.10: Farklı numune tipleri için delik çevresindeki maksimum katman GKF değerleri	89
Şekil 5.11: Farklı çift delikli numuneler için her laminadaki delik kenarı maksimum GKF değerleri	90
Şekil 5.12: Farklı tipteki OHT numuneleri için 0° laminasındaki delik çevresi GKF dağılımı	92
Şekil 5.13: Farklı tipteki OHT numuneleri için 90° laminasındaki delik çevresi GKF dağılımı	92
Şekil 5.14: Farklı tipteki OHT numuneleri için 45° laminasındaki delik çevresi GKF dağılımı	93
Şekil 5.15: Farklı tipteki OHT numuneleri için -45° laminasındaki delik çevresi GKF dağılımı	93
Şekil 5.16: Hasar sebebiyle doğrusal olmayan davranış görülen bölgeler a) Tek delikli durum b) Etkileşimli çift delikli durum	95

Şekil 5.17: Tek delikli ve çift delikli durumlarda delik kenarında oluşan çekme yönü ortalama gerilme dağılımları	96
Şekil 5.18: Tek delikli ve etkileşimli çift delikli durumlar için delik kenarı üzerindeki maksimum katman gerilmesi görülen noktaların şematik gösterimi	98
Şekil 5.19: Çift delikli numuneler için olası kritik bölgeler	99
Şekil 5.20: Farklı tipteki çift delikli OHT numuneleri için delik çevresinde görülen maksimum katman GKF konumları	100
Şekil 5.21: NOHT numuneleri için gerilme-gerinim eğrileri (test-SEY)	101
Şekil 5.22: OHT1 numuneleri için gerilme-gerinim eğrileri (test-SEY)	102
Şekil 5.23: Farklı tiplerdeki çift delikli OHT numuneleri için çekme testlerinden elde edilen tipik gerilme-gerinim eğrileri	103
Şekil 5.24: OHT1 numunesi için dayanım yükü altında delik kenarından serbest kenara çizilen patika boyunca çizdirilen ortalama çekme yönü katman gerilme dağılımı	104
Şekil 5.25: OHT5 ve OHT6 numuneleri için kullanılan gerinimölçer konumlandırması (ölçüler mm)	105
Şekil 5.26: OHT5 ve OHT6 numuneleri için delik çevresi gerinimölçer sonuçları	106
Şekil 5.27: OHT2, OHT3 ve OHT4 numuneleri için kullanılan gerinimölçer konumlandırması (ölçüler mm)	107
Şekil 5.28: OHT2, OHT3 ve OHT4 numuneleri için delik çevresi gerinimölçer sonuçları	108
Şekil 5.29: OHT1 ve OHT2 numuneleri kullanılarak modifiye edilmiş karakteristik uzunluğun bulunması	109
Şekil 5.30: OHT3 ve OHT4 numuneleri için EPSC yöntemiyle hasar yükünün tahmin edilmesi	110
Şekil 5.31: Tüm çift delikli OHT numuneleri için dayanım ve maksimum katman GKF karşılaştırması	111

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 4.1: Malzeme karakterizasyon numuneleri için geometrik bilgiler.	51
Çizelge 4.2: Lamina direngenlik özellikleri.	55
Çizelge 4.3: Lamina dayanım değerleri.	56
Çizelge 4.4: Delikli numunelere ait geometrik bilgiler.	56
Çizelge 4.5: Max. GKF için Analiz ve Analitik hesap karşılaştırması.	62
Çizelge 4.6: Çekme testi gerçekleştirilen numunelere ait geometrik bilgiler.	67
Çizelge 4.7: NOHT numuneleri test sonuçları.	69
Çizelge 4.8: OHT numuneleri test sonuçları.	72
Çizelge 4.9: Farklı W/D oranlarındaki OHT numunelerinin dayanım karşılaştırması (Test-PSC).	75
Çizelge 4.10: Aynı W/D oranında fakat farklı boyutlardaki OHT numunelerinin dayanım karşılaştırması (Test-PSC).	76
Çizelge 5.1: Deliksiz, tek delikli ve farklı oryantasyonlarda yerleştirilmiş çift delikli numunelere ait bilgiler.	81
Çizelge 5.2: Lamina direngenlik değerleri.	84
Çizelge 5.3: Lamina dayanım değerleri.	84
Çizelge 5.4: OHT5 ve OHT6 numuneleri için test ve PSC yöntemi hasar yükü karşılaştırması.	106
Çizelge 5.5: OHT3 ve OHT4 numuneleri için test ve EPSC yöntemi hasar yükü karşılaştırması.	110
Çizelge 5.6: OHT3 ve OHT4 numuneleri için test ve EPSC yöntemi hasar yükü karşılaştırması.	111

KISALTMALAR

UD	: Unidirectional
SEY	: Sonlu Elemanlar Yöntemi
ESPI	: Electron Speckle Pattern Interferometer
LEKM	: Lineer Elastik Kırılma Mekaniği
SHM	: Sürekli Hasar Mekaniği
PSC	: Point Stress Criteria
EPSC	: Extended Point Stress Criteria
ASC	: Average Stress Criteria
DIC	: Digital Image Correlation
DOE	: Design of Experiment
APDL	: ANSYS Parametric Design Language
GKF	: Gerilme Konsantrasyon Faktörü
OHT	: Open Hole Tension
NOHT	: Non-Open Hole Tension

SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

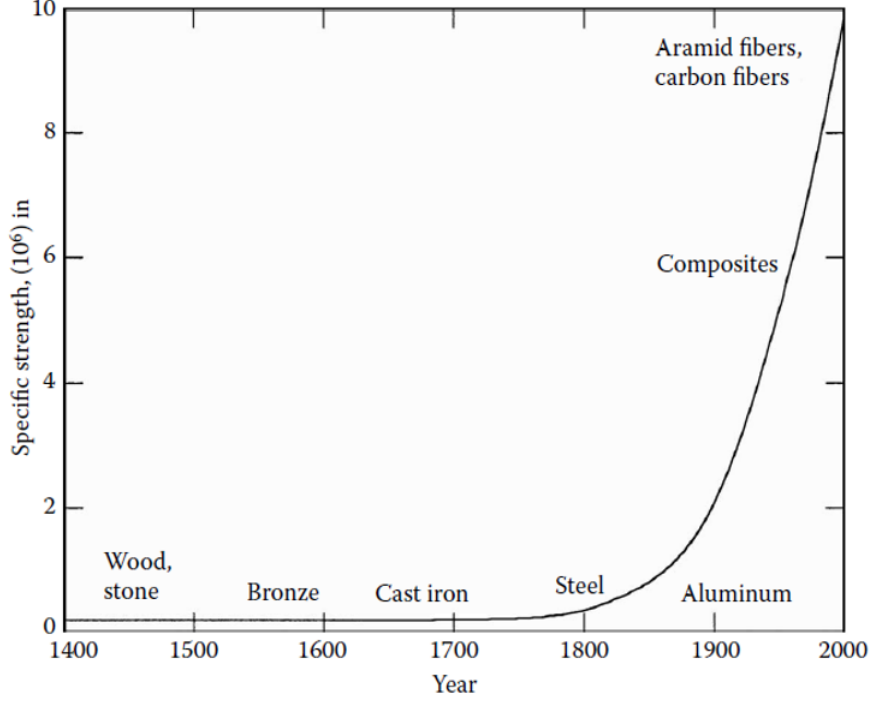
Simgeler	Açıklama
a	Yoğun enerji bölgesi uzunluğu
d_0	PSC yöntemi için karakteristik uzunluk
d'_0	EPSC yöntemi için karakteristik uzunluk
D	Delik çapı
E_1	Fiber yönü modülüs
E_2	Matris yönü modülüs
G_{12}	Kayma modülü
K^{lamina}	Lamina gerilme konsantrasyonu faktörü
K^{katman}	Katman gerilme konsantrasyonu faktörü
K_{Ic}	Gerilme yoğunluk faktörü
L	Numune boyu
P	Delik merkezleri arası mesafe
S	Kayma dayanımı
t	Numune kalınlığı
ν_{12}	Poisson oranı
Y_t	Matris yönü dayanım
X_t	Fiber yönü dayanım
X_T^L	Deliksiz kompozit dayanımı
W	Numune genişliği
θ	Saat yönünde delikler arası açı
σ'_0	EPSC yöntemine göre kritik gerilme
σ_0	PSC yöntemine göre kritik gerilme
$\sigma_{y,maksimum}^{katman}$	Katman için y yönü maksimum gerilme
$\sigma_{y,nominal}^{katman}$	Katman için y yönü nominal gerilme
$\sigma_{y,nominal}^{i,lamina}$	i . lamina için y yönü nominal gerilme
$\sigma_y^{i,lamina}$	i . lamina için y yönü gerilme

1. GİRİŞ

Kompozit malzemeler, iki ya da daha fazla malzemenin, yeni ve özgün malzeme özelliklerine sahip olacak şekilde makro düzeyde bir araya getirilmesiyle oluşur. Özellikle yüksek dayanım ve düşük ağırlık avantajlarından dolayı, özellikle 1960'lı yıllardan itibaren kullanım alanı hızla artmıştır. Günümüzde havacılık, otomotiv, spor, yat endüstrisi gibi birçok endüstriyel alanda gözde malzeme olarak tercih edilmektedir [1].

Yüksek dayanıma sahip olan kompozit malzemeler çelik malzemelerin yerine kullanılmasıyla %60-80, alüminyum malzemelerin yerine kullanılmasıyla %20-50 civarlarında ağırlıkça hafifletme avantajı verebilirler [3].

Kopma mukavemetinin malzeme yoğunluğuna oranı özgül dayanım olarak tanımlanır. Bir malzemenin özgül dayanımının yüksek olması o malzemenin eşit kütledeki başka bir malzemedен daha dayanıklı olduğunu gösterir. Şekil 1.1'den görüldüğü üzere kompozit malzemeler çelik, alüminyum gibi birçok izotropik malzemedен çok daha yüksek özgül dayanıma sahiptir. Grafikten görüldüğü gibi kompozit malzemeler, diğer malzemelerle aynı dayanımı daha düşük ağırlıkta gösterebilirler [1].



Şekil 1.1: Çeşitli malzemelerin yıllara göre kullanımlarının özgül ağırlığa göre grafiği [1]

Kompozitler, yüksek dayanım ve düşük ağırlık özelliklerinin yanında; yüksek rijitlik, yüksek aşınma dayanımı, yüksek yorulma dayanımı, iyi akustik yalıtım gibi avantajlara da sahiptirler. Fakat tüm bu avantajların yanında; mekanik davranışlarının izotropik malzemelere göre daha karmaşık olması, malzeme özelliklerinin izotropik malzemelere göre saçılımlı olması, üretimindeki zorluklar, yüksek maliyet gibi dezavantajlara da sahiptir.

Gerilme konsantrasyonu (yığılması), yapı üzerindeki geometrik süreksizliklerden dolayı kaynaklanan ani, noktasal gerilme artışları olarak adlandırılır. Bu geometrik süreksizlikler, kesit geometrisindeki değişiklikler, delikler vb. etkilerden dolayı olabilir. Yapıda gerilme konsantrasyonu bulunması yüksek seviyelerde gerilme oluşumuna sebep olduğundan yapının dayanımını ciddi şekilde etkilemektedir. Gerilme konsantrasyonunun bilinmesi yapının dayanımı hakkında yorum yapılabilmesi bakımından önemlidir.

Kompozit malzemelerde gerilme konsantrasyonu izotropik malzemelere göre farklılık göstermektedir. Kompozit malzemeler farklı yönlerde farklı malzeme özelliklerine sahip olabildikleri için çoğunlukla izotropik malzemelere göre yüksek gerilme konsantrasyonuna sahip olabilirler. Kompozit malzemelerde gerilme konsantrasyonu;

kullanılan fiber ve matris malzemesi, katman açısı konfigürasyonu ve dizilimi gibi çeşitli parametrelere göre değişim göstermektedir. Ayrıca kompozit katmanlar farklı yönlerde dizilmiş laminalardan oluşmaları sebebiyle kalınlık boyunca her bir laminadaki maksimum gerilme konsantrasyonu değeri de farklılık göstermektedir.

Dolayısıyla kompozit malzemeler için gerilme konsantrasyonu ve dayanım arasındaki ilişkiyi kavramak güvenilir yapılar tasarlamak için son derece önemlidir.

1.1 Tezin Amacı

Tez kapsamında kompozit yapılarda gerilme konsantrasyonu ve mekanik dayanım tahmini konuları ele alınmıştır. Kompozit malzeme olarak tek yönlü (İng. unidirectional-UD) karbon fiber epoksi reçine malzemesi kullanılmıştır. Kompozit laminalar farklı yönlerde dizilerek çok yönlü (İng. multidirectional) katmanlar elde edilmiştir. Gerilme konsantrasyonu, katmanlar üzerine delikler açılarak yaratılmıştır.

Öncelikle kompozit malzemeler hakkında genel bilgiler verilmiş, kompozit malzemelerdeki gerilme konsantrasyonu ve dayanım hakkındaki literatür araştırması özetlenmiştir. Ardından teorik olarak altyapı oluşturabilmek adına temel kompozit mekaniği, lamina hasar teorileri ve gerilme konsantrasyonu içeren katmanlı kompozitler için hasar tespit yöntemlerinden bahsedilmiştir.

Daha sonra tek delikli katmanlar için sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ve deneysel olarak gerilme konsantrasyonu ve mekanik dayanım konuları incelenmiştir. Delik çapı boyutunun değişiminin gerilme konsantrasyonu ve dayanıma olan etkileri irdelenmiştir. Delik çapı ve numune genişliği oranı ele alınarak, sonlu-sonsuz plaka durumları tartışılmıştır. Ayrıca delik çapı ve numune genişliği aynı oranda artırılarak, delikli kompozit plakalar için boyut etkisi incelenmiştir. Tüm numune konfigürasyonu için mekanik dayanım tahmini yapılmış ve deneysel çalışmalarla doğrulama gerçekleştirilmiştir.

İkinci aşama olarak iki delik etkileşim durumu ele alınmıştır. Çok yönlü katmanlara birbirleriyle etkileşime giren iki delik açılmıştır. Delikler yükleme yönüne göre farklı pozisyonlarda konumlandırılarak oluşturulan farklı numuneler için gerilme konsantrasyonu ve dayanım incelenmesi yapılmıştır. İki deliğin konumlandırılmasının ve etkileşiminin gerilme konsantrasyonu ve dayanıma olan etkileri tartışılmıştır. Ayrıca farklı delik pozisyonlarındaki numunelerde mekanik dayanım tahmini yapabilen bir

yöntem geliştirilmiş ve deneysel olarak doğrulama çalışmaları yapılmıştır.

Böylece çok yönlü kompozit katmanlar için tek delik ve etkileşimli çift delik durumlarındaki gerilme konsantrasyonu ve dayanım konuları ayrıntılı olarak incelenmiştir.

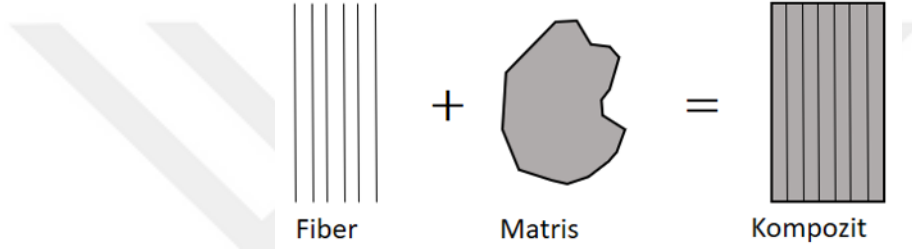
1.2 Tezin Ana Hatları

Tez, 1.Bölüm'de giriş, amaç ve anahatların anlatıldığı kısımla başlamaktadır. Giriş kısmının devamında kompozit malzemeler hakkında genel bilgilerin ve gerilme konsantrasyonu ve dayanım konularının ayrıntılı olarak incelendiği literatür araştırmasının bulunduğu 2.Bölüm bulunmaktadır. 3.Bölüm'de tez kapsamında kullanılan yöntemler ve teorik altyapı kısımları incelenmiştir. Bu bölümde gerilme konsantrasyonu tespiti için kullanılabilen analitik yöntemler, kompozitler için hasar teorileri, gerilme konsantrasyonu içeren kompozit yapılar için kullanılan hasar yöntemleri anlatılmıştır. 4.Bölüm'de tek delikli, 5.Bölüm'de ise etkileşimli çift delikli numuneler üretilerek gerçekleştirilen deneysel ve numerik yöntemler ve uygulamalar anlatılmıştır. 6.Bölüm elde edilen sonuçların ve çıkarımların özetini içermektedir.

2. GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1 Kompozit Malzemelerin Yapısı

Kompozit malzemeler genel olarak fiber ve matrislerin bir araya getirilmesiyle oluşurlar. Farklı fiziksel ve elastik özelliklere sahip olan fiber ve matrisler bir araya getirilerek istenen malzeme özelliklerine sahip kompozitleri oluştururlar.

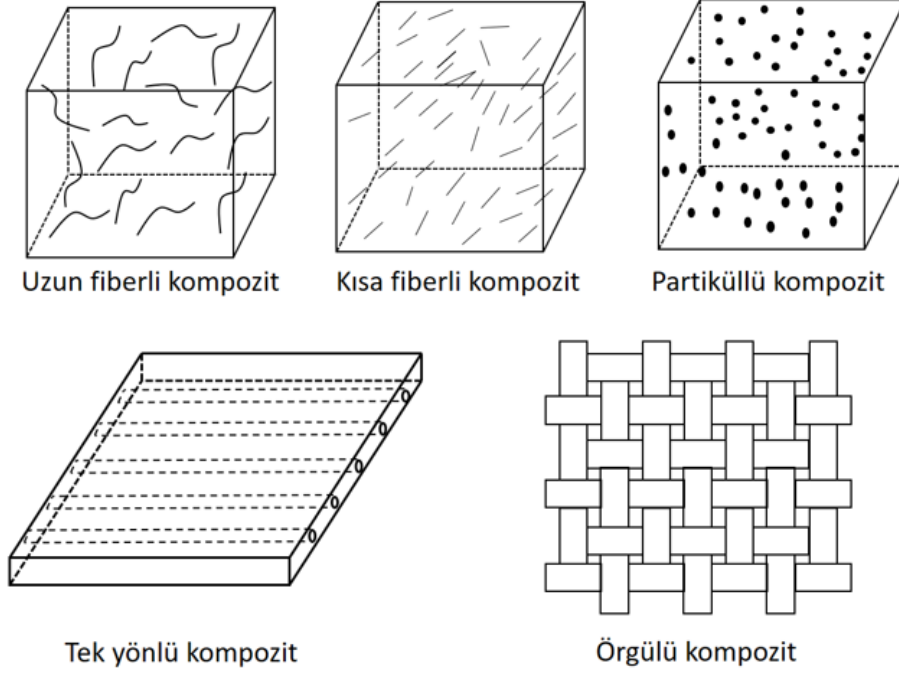


Şekil 2.1: Fiber ve matrislerle kompozitin oluşturulması

Şekil 2.1’de görüldüğü gibi kompozitler iki fazın bir araya gelmesiyle oluşur. Bu birleşimde matrisler ana fazdır. Fiberler ise yardımcı (ikincil) fazdır. Ana faz olan matrisler bağlayıcılık görevi yapar. İkincil faz olan fiberlerin görevi ise taşıyıcılıktır. Matrisler dış etkilere karşı ve birbirlerine karşı fiberleri çevreleyip onları korurlar. Yükün esas taşınması görevini ise fiberler gerçekleştirir. Yani kompozitlerde gerilme-şekil değiştirme ilişkisini esas olarak belirleyen kısım fiberlerdir.

2.1.1 Fiberler

Fiberler istenen malzeme özelliğine göre matris içinde uzun-sürekli, kısa ya da partiküller halinde bulunabilirler. Uzun ve sürekli fiberler darbe dayanımı, yüksek yüzey kalitesi, ölçüsel hassasiyet bakımından kısa fiberlere karşı avantajlıdır. Fakat kısa fiberlerin de uzun ve sürekli fiberlere karşı düşük maliyet, kolay işlenebilirlik ve çatlak ihtimalinin daha az olmasından dolayı yüksek dayanım gibi avantajları mevcuttur [1]. Farklı fiber yapılarındaki kompozit malzemeler Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.2: Farklı fiber yapılarındaki kompozit malzemeler

Fiberlerin yön olarak matris içinde nasıl yer aldıkları kompozitin mekanik davranışını doğrudan etkiler. Fiberler hangi yönde yerleştirilmişlerse o yönde kompozit malzemenin rijitliği ve dayanımı yüksektir. Kompozit malzemenin taşıdığı yükün yaklaşık %70-90'ı fiberler tarafından taşınır [3].

Fiberler büyük çoğunlukla silindirik olarak üretilirler. Bu şekilde üretilmelerindeki en büyük sebep, silindirik şekilde imalatın kolay yapılabilmesidir. Köşeli bir şekilde üretilen fiberin de dayanımı yüksek olabilir fakat üretim zorluğundan dolayı bu şekiller çok fazla tercih edilmemektedirler.

Kullanılan fiberin malzemesi de kompozitin mekanik özelliklerini doğrudan etkiler. Fiber malzemesi olarak en çok kullanılan malzeme türleri karbon, cam, aramid ve boron olarak sıralanabilir. Cam fiberler kimyasal ve elektriksel özellikler bakımından iyiye, yüksek rijitlik ve mukavemet bakımından karbon fiberlerin gerisindedir. Aramid fiberler de mukavemet açısından avantajlıdır fakat en büyük dezavantajı matrise yapışmada çıkardığı zorluklardır. Cam fiberlerden daha hafiflerdir. Bu nedenle cam fiberlerden daha pahalıdır. Boron fiberler de yüksek rijitlik ve mukavemete sahiptir. Fakat işlenmesi zor bir malzeme olduğundan pahalıdır [1].

2.1.2 Matrisler

Matrislerin görevi daha önce de belirtildiği gibi bağlayıcılıktır. Fiberleri bir arada tutarlar. Kompozit malzemeye gelen yükler matrisler tarafından fiberler taşınır. Aynı zamanda matrisler fiberlerin birbirlerine karşı ve çevrenin fiberlere karşı olan etkisine karşı yalıtım görevi yaparlar. Genel olarak fiberlere göre düşük malzeme özelliklerine sahiptirler. Fakat yine de kompozit malzemenin önemli bazı mekanik özellikleri doğrudan matrisin mekanik özelliklerinden etkilenir. Bunlar; transvers modül ve dayanım, kayma modül ve dayanımı, termal genleşme katsayısı, yorulma dayanımı gibi mekanik özelliklerdir.

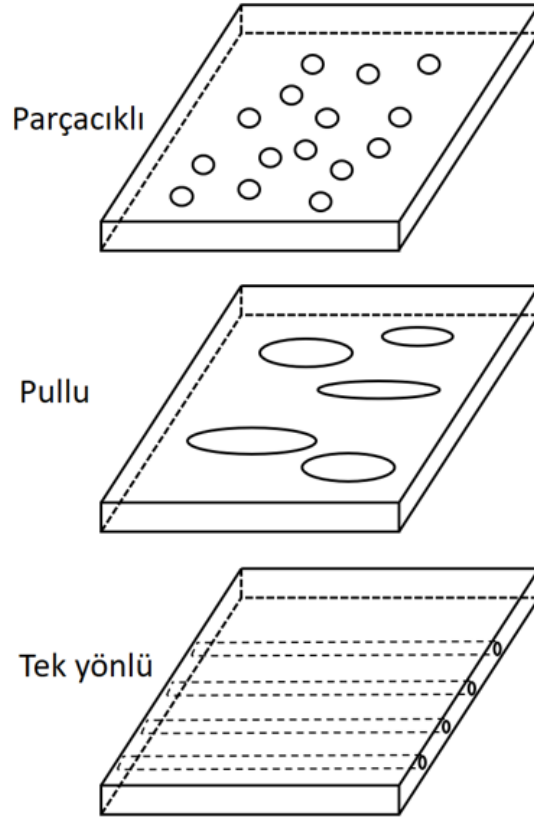
Kullanılan malzemeye göre matrisler gevrek, sünek, elastik ya da plastik davranış gösterebilirler. En çok kullanılan matris malzemeleri; karbon, seramik, cam, metal ve polimerdir. Seramik matrisler genel olarak yüksek sıcaklıkta görev yapılacak yerlerde kullanılırlar. Karbon matrisler birim ağırlıklarına göre yüksek sıcaklık kapasitesine sahiptirler. Cam matrisli kompozitler genel olarak elektriksel parçalarda ve ısı direnç gereken yerlerde kullanılırlar. Ucuz oldukları için en çok kullanılan matris malzemesi polimerlerdir. Polimerlerin aynı zamanda iyi nem tutabilme kapasiteleri ve proses kolaylığı gibi avantajları da vardır [1].

2.2 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozitler fiberlerin geometrisi ya da matrislerin malzemesine göre sınıflandırılabilirler.

2.2.1 Fiber geometrisine göre kompozitler

Fiberlerinin geometrisine göre kompozit malzemeler 3 sınıfta incelenebilir. Bunlar Şekil 2.3'de gösterildiği gibi; parçacık takviyeli kompozitler, pullu kompozitler ve fiber takviyeli tek yönlü kompozitlerdir.

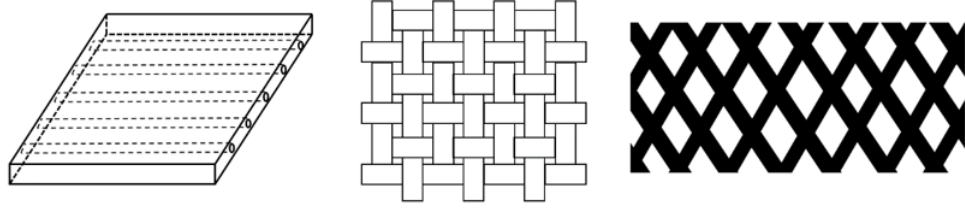


Şekil 2.3: Fiber geometrisine göre kompozitler

Parçacıklı kompozitler, matris içine saçılmış partiküllerden oluşurlar. Yüksek dayanım, yüksek çalışma sıcaklığı, oksitlenme direnci gibi avantajları vardır. Partiküller rastgele dağıtıldığından, malzeme özellikleri yönsel olarak az değişiklik gösterir ve izotropik malzeme gibi davranış sergilerler [1].

Pullu elyaf takviyeli kompozitler, fiberlerin büyük parçalar halinde matris için bulunmasıyla oluşturulurlar. Eğilme rijitliği yüksek ve nispeten ucuzdur. Fakat parçalar halindeki fiberlerin oryantasyonundaki zorluklardan dolayı kullanımı kısıtlıdır [1].

Tek yönlü fiber takviyeli kompozitler, kullanımı en geniş kompozit tipidir. Sürekli ya da kesik fiberlerden oluşabilirler. Yüksek mukavemet ve rijitliğe sahiptirler. Bu fiberler kullanılarak tek bir lamina oluşturulur. Bu laminaların birleştirilmesiyle de katmanlar (İng. laminate) oluşturulur. Fiber takviyeli kompozitler Şekil 2.4'de gösterildiği gibi; tek yönlü (İng. UD), örgülü (İng. woven), filaman sargı gibi farklı tiplerde bulunabilirler. Filaman sargılı kompozit malzemeler yüksek özgül dayanımları sebebiyle özellikle havacılık alanında sıkça kullanılmaktadır [4][5].



Şekil 2.4: Soldan sağa; Tek yönlü (İng. UD) kompozit, Örgülü (İng. Woven) kompozit, Filaman sargılı kompozit

2.2.2 Matris malzemesine göre kompozitler

Polimer matrisli kompozitler; kompozit yapılarda en çok kullanılan matris çeşididir. Polimer matrisin içine küçük çaplı fiberlerin koyulmasıyla kompozit oluşturulur. Düşük maliyet, yüksek dayanım ve kolay üretim yönteminden dolayı kullanım alanı geniştir. Bunların yanında düşük işletme sıcaklığı, düşük elastik malzeme özellikleri gibi dezavantajları da mevcuttur. Polimer matris malzemelerine örnek olarak; epoksi, polyester, üretan verilebilir [1].

Metal matrisli kompozitler; adından da anlaşılacağı üzere matris malzemesi metal olan kompozit grubudur. Matris malzemesi genel olarak alüminyum, magnezyum ve titanyumdur. Fiber olarak da karbon ya da silikon karbid kullanılır. Metal matrise fiberler eklenerek bazı malzeme özellikleri artırılırken, bazı malzeme özellikleri de azaltılır. Örneğin, metal matrise fiberler eklenerek elastik özellikler ve dayanım artırılırken, termal genleşme ve elektrik iletkenliği özellikleri azaltılabilir. Böylece istenen kullanım alanında ihtiyaçları sağlayacak malzeme özellikleri elde edilmiş olunur. Bunların yanında genel olarak metal matrise fiber eklenmesi malzeme tokluğunu da azaltır [1].

Seramik matrisli kompozitler; alümina silikad, alümina kalsiyum gibi seramik matrislere karbon gibi fiberlerin eklenmesiyle oluşurlar. Yüksek dayanım, yüksek sertlik değerleri, yüksek işletme sıcaklığı düşük yoğunluk gibi avantajları vardır. Seramikler düşük kırılma tokluğuna sahiptirler. Bu neden dolayı çekme ya da darbe yüklemelerine maruz kaldıklarında kolayca hasara uğrarlar. Bu nedenle seramik matrisler karbon fiberlerle güçlendirilerek kırılma toklukları da artırılmış olunur [1].

Karbon-karbon kompozitler; karbon matris içine karbon fiber yedirilerek oluşturulmuş kompozit yapılardır. Çok yüksek sıcaklıklarda kullanılma imkânları vardır. Karbonlar

da seramikler gibi kırılğan malzemelerdir. Bu nedenle karbon fiber karbon matris içine yedirilerek karbon-karbon kompozitler oluşturulur ve bu kompozitler kırılğanlığı azaltır. Aynı zamanda iyi çekme ve basma dayanımı, düşük yoğunluk, yüksek yorulma dayanımı, yüksek ısı iletkenlik ve yüksek sürtünme katsayısı gibi özelliklere de sahiptir [1].

2.3 Kompozit Malzemelerde Gerilme Konsantrasyonu

Kompozit malzemelerin yönsel olarak farklı direngenliğe sahip olmasından ötürü gerilme konsantrasyonu izotropik malzemelere göre farklılık göstermektedir. Dolayısıyla farklı açılarda oluşturulmuş çok yönlü kompozit katmanlar için gerilme durumu ve gerilme konsantrasyonu konuları birçok araştırmacı tarafından incelenmeye değer bulunmuştur. Literatürde genel olarak delikli kompozit yapılarda gerilme konsantrasyonu, teorik ve numerik hesaplaması, deneysel yolla gerilme konsantrasyonunun tespit edilmesi, gerilme konsantrasyonuna etki eden bazı parametrelerin etkilerinin incelenmesi olarak ele alınmıştır.

Toubal, Karama ve Lorrain [6], yaptıkları çalışmada merkezinde delik bulunan örgülü kompozit plakadaki gerilme konsantrasyonunu incelemişlerdir. Delik kenarından plaka kenarına kadar çekme yönündeki gerilme dağılımını, analitik, numerik ve deneysel yolla (İng. speckle pattern interferometer (ESPI)) bulmuşlar ve sonuçları karşılaştırmışlardır. Delik kenarındaki gerinim konsantrasyonunun yükleme yönüne göre çok hassas olduğunu belirtmişlerdir. Bu nedenle çekme yönünde dizilmiş 0° li numunelerde, analitik ve numerik yolla bulunan gerilme konsantrasyonu değerleri 90° ve 45° li katmanlara göre deneysel verilerle daha uyumlu çıkmıştır. Genel olarak deneysel sonuçlar analitik ve numerik sonuçlarla delik kenarında çok uyumlu değilken, delikten uzaklaştıkça daha uyumlu hale gelmiştir.

Dirikoğlu ve Aktaş [7], yaptıkları çalışmada üzerinde delik bulunan karbon-epoksi kompozit numunenin tek yönlü çekmeye maruz bırakılması durumunda üzerinde görülen gerilme yoğunluk faktörünü (İng. Stress intensity factor) analitik ve numerik yolla tespit etmişler ve karşılaştırmışlardır. Gerilme yoğunluk faktörünü, kritik çatlak uzunluğu ifadesine bağlı olarak ampirik ifadeler yardımıyla bulmuşlardır. Delik çapı arttıkça gerilme yoğunluk faktörünün azaldığını göstermişlerdir.

Farsakh, Almasri ve Qa [8] tarafından yapılan çalışmada, kompozit aç ı değ işiminin

gerilme konsantrasyonu üzerindeki etkileri incelenmiştir. Plaka uzunluk/genişlik, delik çapı/plaka uzunluğu, delik çapı/plaka genişliği gibi parametrelerin gerilme konsantrasyonu üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca genelde doğrusal bölge içinde incelenen gerilme konsantrasyonunu doğrusal olmayan bölgede de inceleyerek, doğrusal olmayan malzeme etkisinin gerilme konsantrasyonu üzerindeki etkisi üzerinde çalışılmıştır. Tek yönlü yükleme altında oluşan gerilme konsantrasyonu faktörünün büyük ölçüde fiber açılı dizilimine bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Delik çapı sabit iken plaka genişliğinin azalmasıyla gerilme konsantrasyonu faktörünün önemli seviyelerde arttığını ortaya koymuşlardır. Ayrıca lineer olmayan malzeme etkisinin, delik çapı sabit iken delik genişliğinin azalması durumunda daha önemli hale geldiği vurgulanmıştır.

Kumar ve diğerleri [9] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, üç farklı kompozit malzeme ele alınarak gerilme konsantrasyonu faktörü delikli plakalar için ANSYS APDL sonlu elemanlar yazılımıyla incelenmiştir. Tek eksenli ve iki eksenli yüklemeler incelenmiştir. İki eksenli yükleme için yükleme oranı 1 alınmıştır. Ayrıca sonlu elemanlar modelinde basit mesnetli ve ankastre mesnetli sınır koşulları uygulanarak, sınır koşullarının etkisi üzerinde de durulmuştur. Her iki sınır koşulu için de, tek eksenli çekme yüklemesinde, kayma gerilmeleri konsantrasyonu faktörünün çekme yönündeki gerilme konsantrasyonu faktöründen daha yüksek çıktığı görülmüştür. Tek eksenli yükleme altında, genel olarak ankastre sınır koşulunda basit mesnetli sınır koşuluna göre daha yüksek gerilme konsantrasyonu faktörleri görülmüştür. İki eksenli yükleme altında Y yönündeki gerilme konsantrasyonu faktörünün X yönündeki ve kayma yönündeki gerilme konsantrasyonu faktörüne göre daha fazla olduğu belirtilmiştir.

Bakhshandeh ve diğerleri [10], gerçekleştirdikleri çalışmada sonlu genişlikte, ortasında delik bulunan kompozit plaka üzerindeki gerilme konsantrasyonu faktörünü incelemişlerdir. Delik çapı/plaka genişliği ve ortotropi oranının (E_1/E_2) gerilme konsantrasyonu faktörüne olan etkileri üzerinde durulmuştur. Yapılan çalışmada, ortotropi oranının düşük olduğu durumlarda, delik çapı/genişlik oranı değişiminin gerilme konsantrasyonu faktörünün değişimine etkisinin azaldığı görülmüştür. Aynı şekilde yüksek delik çapı/genişlik oranlarında, ortotropi oranı değişiminin gerilme konsantrasyonu faktörünün değişimine etkisinin azaldığı tespit edilmiştir. Analitik

olarak yaptıkları hesaplamaların delik çapı/genişlik oranının 0.8 olduğu durumlara kadar numerik hesaplarla uyumlu sonuçlar verdiği belirtilmiştir.

Wu ve Mu [11], izotropik ve ortotropik malzemelerde kullanılmak üzere, üzerinde delik bulunan bir plaka ve silindirik yapı için ampirik bir gerilme konsantrasyonu hesaplaması yapmışlar ve sonlu elemanlar analizleriyle bu hesaplamayı doğrulamışlardır. Çalışmalarında gerilme konsantrasyonunun düz plakalar için delik çapı/plaka genişliği, silindirler için delik çapı/silindir çapı oranlarına doğrudan bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Öne sürülen ampirik hesaplama metodunun tek eksenli yükleme koşullarında başarılı olduğunu fakat iki eksenli yükleme koşullarında hesaplama ve sonlu elemanlar hesaplamasının bir miktar farklılık gösterdiğini açıklamışlardır.

Jain [12], delikli bir kompozit plakaya transvers yönde yükleme vererek gerilme konsantrasyonu durumunu incelemiştir. Plakaya farklı sınır koşulları vererek sınır koşulları etkisini ve aynı zamanda bir izotropik iki farklı kompozit malzeme kullanarak malzeme etkisini gözlemlemiştir. Plakanın tüm kenar çevresi boyunca tüm yönlerde tutulması sınır koşulu için gerilme konsantrasyonunun kenarlarda, bunun dışındaki sınır koşulları için gerilme konsantrasyonunun delik çevresinde oluştuğunu gözlemlemiştir. Tüm sınır koşullarında delik çapı/plaka genişliği oranının gerilme konsantrasyonuna etkisi kompozit malzemede izotropik malzemeye göre daha fazla olmuştur. Kompozit malzemede izotropik malzemeye göre daha fazla gerilme konsantrasyonu gözlemlenmiştir. Kayma yönünde gerilme konsantrasyonu faktörü kompozit malzemelerde izotropik malzemeye göre daha yüksek çıktığı belirtilmiştir.

Pandita, Nishiyabu ve Verpoest [13], dengeli katman dizilimine sahip düzlem örgülü eliptik ve dairesel deliklere sahip kompozit plakalar için gerilme konsantrasyonu çalışması gerçekleştirmişlerdir. Deneysel olarak delik dibindeki gerinimi ölçüp, bu ölçümü kullanarak analitik yolla gerilme hesabı yapmışlardır. Gerilme hesabından sonra ise gerilme konsantrasyonu faktörünü hesaplamışlardır. Hesapladıkları gerilme konsantrasyonu faktörü fiberlerin çekme yönünde dizildiği numuneler için analitik hesapla bulunan gerilme konsantrasyonu faktörüyle uyumluyken, fiberlerin çekme yönüyle 45° açıyla dizildiği numunelerle uyumlu çıkmamıştır.

Henshaw, Sorem ve Glaessgen [14], birden fazla deliğin tek eksenli çekme ve kayma yüklemesi altında gerilme konsantrasyonu durumunu incelemişlerdir. Bu tarz karmaşık

durumların teorik yolla ifadesi olmadığından sonlu elemanlar yöntemi kullanılması gerektiğini belirtmişlerdir. Çalışmalarında birden fazla delik olması durumunda tek delikli duruma göre gerilme konsantrasyonu faktörünün 2 kata kadar artabileceğini belirtmişlerdir. Ayrıca deliklerin birbirlerine göre konumunun da etkisini incelemişler ve 2 etkileyici deliğin merkez deliğinin 45° arkası olması durumunda, 3 deliğin de aynı hizada olması durumuna göre daha fazla gerilme konsantrasyonu oluşturduğuna dikkat çekmişlerdir. En fazla gerilme konsantrasyonu oluşan durumun ise deliklerin aynı büyüklükte ve yan yana olması durumunda olduğunu belirtmişlerdir.

2.4 Delikli Kompozit Yapılarda Dayanım

Fiber ve matrislerden oluşan kompozitlerin hasar değerlendirmesi yapısı itibariyle izotropik malzemelerden farklı olarak ele alınmaktadır. Fiber ve matris olmak üzere iki temel bileşenden oluşan kompozitlerde farklı hasar modları meydana gelmektedir. Kompozitlerdeki hasar modları fiber hasarı, matris hasarı ya da delaminasyon (laminaların birbirinden ayrılması) şeklinde görülebilir. Tek bir laminanın (İng. ply) hasara uğraması katmanın tamamen yapısal bütünlüğünün bozulmasına sebep olmayabilir. Eğer diğer laminalar yük taşımaya devam edebiliyorsa katmanın yapısal bütünlüğü bozulmamıştır. Dolayısıyla fiber takviyeli kompozitlerin dayanımı konusunda araştırmalar, lamina hasarı ve katman hasarı olarak ayrı ayrı incelenebilir. Lamina hasarı, tek açıdan oluşan bir kompozit katmanın ya da farklı açılı laminalardan oluşmuş bir kompozit katmanın tek bir açısındaki hasar durumunun incelenmesidir. Çeşitli hasar kriterleri kullanılarak laminanın hasara uğrayıp uğramadığı tespit edilir. Lamina hasar modları genel olarak 3 şekilde görülmektedir. Bunlar; fiber kırılması, transverse matris kırılması ve kayma yönünde matris kırılmasıdır [15]. Hasar kriterleri kullanılarak laminanın hasara uğrayıp uğramadığı tespit edilmektedir. Bazı hasar kriterleri laminanın hasara uğramasının yanında, hangi şekilde hasara uğradığını yani hasar modunu da tespit ederken bazıları sadece hasara uğrayıp uğramadığını tespit eder. Aynı şekilde bazı hasar kriterleri farklı hasar modlarını birleştirerek hasar tespiti yaparken, bazı hasar kriterleri sadece bir mod üzerinden hasar tespiti yapabilir. Hasar kriterleri daha ayrıntılı olarak Bölüm 3'te incelenecektir.

Katman hasarı ise, kompozit plakanın yapısal bütünlüğünün tamamen bozulduğu durumun incelendiği hasar şeklidir. Farklı açılar kullanılarak oluşturulmuş

kompozit katmanın hasar durumunun belirlenmesidir. Katmanın tamamıyla yapısal bütünlüğünün bozulduğu ve yük taşıyamadığı durumdur.

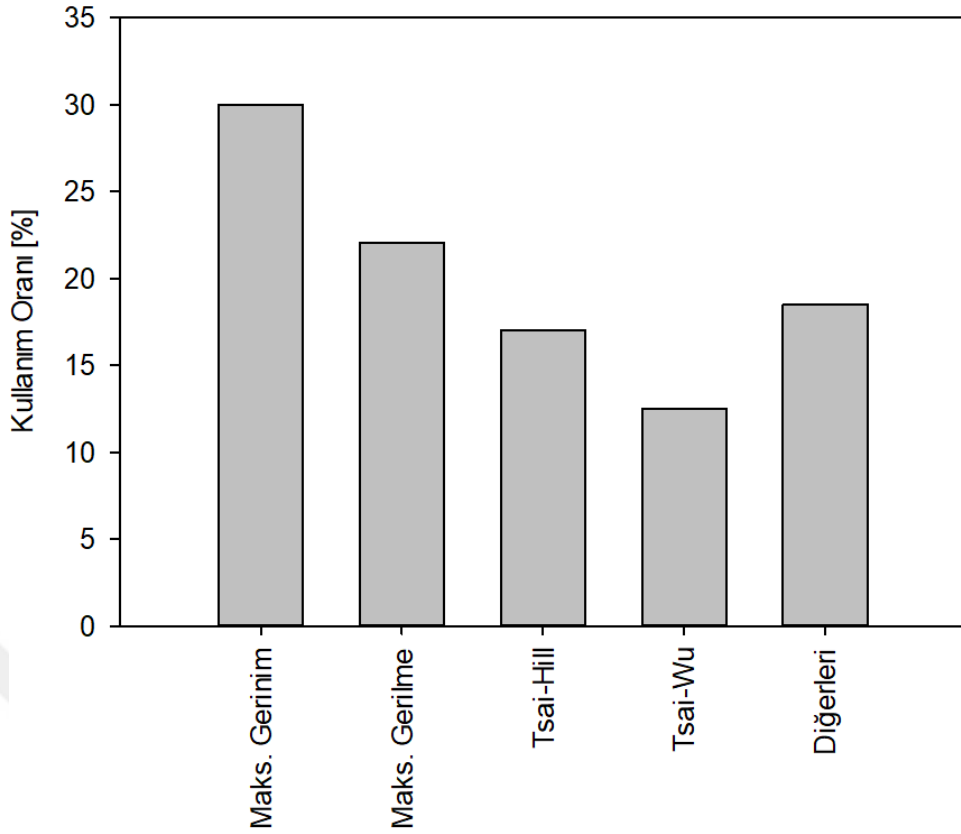
Yapılan deneysel çalışmalarda katman hasarının genel olarak ilerleyerek gerçekleştiği görülmüştür. İlerlemiş hasar analizi yapılırken öncelikle daha önce bahsedilen hasar kriterleri kullanılarak her bir lamina için hasar değerlendirilmesi yapılır. Hasara uğrayan laminaların rijitlik değerleri düşürülerek analize devam edilir. Bu şekilde ilerleyerek katmanın hasar tespiti yapılır [15]. İlerlemiş hasar analizi doğruluk bakımından faydalı bir yöntem olsa da uzun çözüm süreleri bakımından büyük yapılar için kullanışlı bir yöntem değildir.

İlerlemiş hasar analizinin yanında fiber baskın katman dizilimlerinde, laminanın fiber dayanım limitinin aşılması katmanın hasara uğraması olarak değerlendirilir. Fakat bu durum gerilme konsantrasyonu içeren yapılar için başarılı bir yöntem değildir [15].

Üzerinde süreksizlik bulunan bir yapıda, gerilme konsantrasyonu oluşacağından dolayı bölgesel olarak yüksek gerilme seviyeleri görülür. Bu tip yapıların hasar analizleri sürekli yapılardan farklı olarak incelenmektedir.

Gerilme konsantrasyonu içeren katmanlı kompozit yapıların katman hasar analizi için Lineer Elastik Kırılma Mekaniği (LEKM), Sürekli Hasar Mekaniği (SHM) gibi yöntemler kullanılabilir.

Fiber takviyeli kompozitlerin dayanımı konusunda farklı hasar kriterleri literatürde bulunmaktadır. Kompozitlerin karmaşık yapısından dolayı, genellikle deneysel yollarla doğrulanmaya ihtiyaç duyulan bu hasar kriterleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Sun [2], endüstride yaygın olarak kullanılan hasar kriterlerinin kullanım oranlarıyla ilgili olarak bir araştırma gerçekleştirmiştir. Bu araştırma sonucuna göre Şekil 2.5’de gösterildiği gibi, tüm araştırmacılar tarafından benimsenmiş net bir kriter olmamakla birlikte, farklı hasar kriterlerinin kullanım oranı birbirine denk görülmektedir. Farklı yükleme koşulları, malzeme tipleri, açılı konfigürasyonu, malzeme gibi parametrelerin hasar modunu etkilemesinden dolayı hasar kriterlerinin kullanım çeşitliliğinin de arttığı görülmektedir.



Şekil 2.5: Farklı lamina hasar kriterlerinin kullanılma oranları [2]

Whitney and Nuismer [16], gerilme konsantrasyonu içeren yapıların dayanım tespiti için, tek yönlü yükleme altında gerilme dağılımı bazlı iki benzer yöntem önermişlerdir. Bu yöntemler, noktasal gerilme kriteri (ing. Point Stress Criteria, PSC) ve ortalama gerilme kriteri (ing. Average Stress Criteria, ASC)dir. PSC yöntemine göre; gerilme konsantrasyonu yaratan süreksizlikten kritik mesafe kadar uzaklıkta görülen gerilme değeri, kullanılan katmanın gerilme konsantrasyonu içermeyen dayanımına eşit olduğu durumda, gerilme konsantrasyonu içeren durum için maksimum hasar yükü durumuna erişilmiştir. ASC yönteminde ise, gerilme konsantrasyonu içeren durumun maksimum hasar yükü, süreksizlikten kritik mesafe kadar uzaklıkta olan kısımdaki ortalama gerilme değerinin gerilme konsantrasyonu içermeyen durumdaki katman dayanımına eşit olduğu durumdur. Bu yöntemin avantajları kolay kullanıma sahip olması ve yüksek doğrulukta sonuçlar vermesidir. Yöntemin dezavantajları ise sadece tek yönlü yükleme altında kullanılması ve fazladan deney verisine ihtiyaç duyulmasıdır.

Özaslan, Yetgin ve Acar [17], 2x2 örgülü kompozitler için farklı delik çaplarında

gerilme konsantrasyonu ve dayanım konusunu incelemişlerdir. Çalışmalarında çekme yükünün eksantrik verilmesi durumunda da ASC yöntemiyle dayanım tahmininin başarılı bir şekilde bulunabildiği ortaya konulmuştur.

Camanho ve diğerleri [18], bir sonlu kırılma mekaniği modeli kullanarak delikli kompozit katmanın dayanımını tespit etmişlerdir. Sonlu kırılma mekaniği modelinde, gerilme bazlı ve enerji bazlı kriterler gerekli koşulları sağladığında hasar oluşacağı belirtilmektedir. Bu modeldeki gerilme bazlı kriter ortalama gerilme kriteri (ASC) modeliyle aynıdır. Yani model ASC modeline enerji kriterinin eklenmesini içermektedir. ASC modelinde kalibre amaçlı olarak delikli bir numunenin dayanım değerine ihtiyaç varken bu modelde delikli numunenin dayanımına ihtiyaç yoktur. Girdi olarak kullanılan kompozit malzemenin elastik özellikleri, katmanın deliksiz dayanımı ve kırılma tokluğu değerleri kullanılmaktadır. Gerilme bazlı dayanım kriteri için ve enerji bazlı dayanım kriteri için birer denklem oluşturularak, bahsedilen girdilerle birlikte bu denklem seti çözülür ve çatlak ilerlemesi için kırılma tokluğuna eşit olan kritik mesafe bulunur. Bu mesafenin kullanılmasıyla da numuneyi hasara uğratan gerilme hesabı yapılır. Çalışmada öne sürülen yöntem diğer hasar tahmini yöntemlerle karşılaştırılmış ve uygun sonuçlar verdiği belirtilmiştir.

Camanho, Maimi ve Davila [19], sürekli hasar modelini kullanarak delikli karbon-epoksi kompozit numunelerin dayanımını ve boyut etkisini incelemişlerdir. Sürekli hasar modelinin diğer yöntemlere göre iki büyük avantajının; farklı yönlerde yükleme-sınır koşulları altında geçerli olması ve kalibre amaçlı bir teste ihtiyaç duymaması olarak belirtmişlerdir. Sürekli hasar modeli iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada hasar aktivasyon denklemleri kullanılarak hasar başlangıcı tespit edilir. Hasar başlangıcı fiber hasarı, matris hasarı ya da kayma yönü hasarı olarak başlayabilir. İkinci aşamada ise görülen hasar tipine göre malzemenin elastik modülü düşürülerek, hasar ilerleme denklemleri çözülür. Bu şekilde devam eden iterasyonlarla maksimum hasar yükü bulunulur. Çalışmada öne sürülen yöntem diğer hasar tahmini yöntemleriyle karşılaştırılmış ve yüksek doğrulukta sonuçlar verdiği gösterilmiştir.

Wisnom, Khan ve Hallet [20], boyut oransal artışının dayanım ve hasar mekanizmasına olan etkisini incelemek amacıyla tek yönlü ve sanki-izotropik kompozit numuneler için çekme testi çalışması gerçekleştirmişlerdir. Boyutsal oran artımını, numune kalınlık, genişlik ve boy uzunluklarını aynı oranda arttırarak incelemişlerdir. Çalışma

sonucunda, tek yönlü numunelerin boyut oranı 8 kat arttırıldığında dayanımın %14 azaldığı görülmüştür. Alt katman sanki-izotropik numunelerin bahsedilen ölçüleri 4 kat arttırıldığında dayanım %10 artarken, lamina seviyesi numunelerin ölçüleri 8 kat arttırılınca dayanım değerinin %62 düştüğü gözlemlenmiştir. Bu durumun sebebi olarak, lamina seviyesi numunelerde kalınlığın artmasıyla birlikte $45^{\circ}/0^{\circ}$ laminaları arasında delaminasyon hasar modunun oluşması olduğu belirtilmiştir.

Hallet, Jiang ve Wisnom [21], gerçekleştirdikleri çalışmada, $0^{\circ}/90^{\circ}/+45^{\circ}/-45^{\circ}$ açılarından oluşan sanki-izotropik dizilimlerde açıların yerleşim sırasının değişiminin ve kalınlıklarının arttırılmasının delikli numune dayanımına ve hasar moduna olan etkisi incelenmiştir. Olası tüm dizilim durumları numerik olarak incelenip hasar yükleri ve modları belirlenmiştir. Birbirinden farklı hasar davranışı gösteren iki dizilim seçilerek, kalınlıkları arttırılmış ve kalınlık artışının dayanıma olan etkisi incelenmiştir. Çalışma sonucunda, açıların dizilim şeklinin değişmesi sonucu dayanımı en yüksek dizilim ile en düşük dizilim arasında %28'lik bir fark olduğu ortaya konmuştur. Bu durumun sebebi olarak, bazı açı dizilimi durumlarında son fiber hasarından önce, katmanlar arası delaminasyon hasarı olduğu belirtilmiştir. Ayrıca lamina kalınlığının arttırılması durumunda, bazı dizilimlerin dayanımında değişiklik olmazken bazı dizilimlerin dayanımlarının yaklaşık %30 oranında azaldığı gözlemlenmiştir. Hasar modunun ise fiber hasarından delaminasyon hasarına döndüğü belirtilmiştir.

Yuan ve diğerleri [22], ince karbon fiber angle-ply katmanlar için çekme dayanımı ve hasar modlarını deneysel ve numerik olarak incelemişlerdir. Çalışmada fiber alansal ağırlığın ve açı diziliminin dayanıma ve hasar moduna olan etkisi incelenmiştir. Çalışma sonucunda, yaklaşık 55° ve üstü açı dizilimleri için hasar modu matris kırılmasıyken 25° - 55° arası açı dizilimlerinde delaminasyon ve 25° altındaki açı dizilimlerinde fiber hasar modları gözlemlenmiştir. Ayrıca fiber alansal ağırlığı azaldıkça, fiber hasar modunun daha fazla gözlemlendiği ortaya konulmuştur. Fiber alansal ağırlığının azalması, katman kalınlığının ve hacimsel fiber oranının azalması anlamına gelmektedir. Katman kalınlığı azalırken dayanım artarken, hacimsel fiber oranının azalması dayanımı azaltmaktadır. Böylece fiber alansal ağırlığının azalması sonucunda oluşan hasar modu monoton bir şekilde değişmemektedir.

Abdellah [23], tek yönlü karbon fiber kompozitlerin fiber yönü kırılma tokluğunu tahmin etmeye yönelik olarak bir çalışma gerçekleştirmiştir. Böylece kırılma

tokluğunu kullanarak delikli kompozit dayanımını kohezif bölge yasası (İng. Cohesive zone law) yöntemiyle tahmin etmeye çalışmıştır. Çalışmada doğrusal ve eksponansiyel kohezif yasaları karşılaştırılmış ve doğrusal kohezif yasaının deneysel sonuçlarla daha iyi uyum sağladığı gözlemlenmiştir. Ayrıca çatlak açılma uzunluğunun kırılma tokluğu ve dayanıma etkisinin çok yüksek olduğu vurgulanmıştır.

Eriksson ve Aronsson [24], hasar bölgesi kriteri olarak adlandırdıkları hasar tahmini yöntemini öne sürmüşlerdir. Bu yöntemde göre kritik hasar bölgesi uzunluğu ve deliksiz katman dayanımı girdileri kullanılarak delikli katman hasar yükü tahmin edilebilmektedir. Yöntem için gerekli olan kritik hasar bölgesi uzunluğu analitik olarak elde edilmiştir.

Waddoups, Eisenmann ve Kaminski [25], karakteristik uzunluk ve gerilme yığılması faktörünü kullanarak elastik kırılma mekaniği tabanlı bir hasar tahmin metodu öne sürmüşlerdir.

Singh ve diğerleri [26], 3 ve 4 delikli pimli kompozit numunelerde bazı geometrik parametrelerin dayanıma olan etkilerini deney tasarımı (İng. Design of Experiment-DOE) çalışması gerçekleştirilerek incelemiştir. Çalışmada geometrik değişkenleri; yükleme yönündeki serbest kenardan delik çapına olan uzaklık, yükleme yönünde iki delik arası uzaklık, yükleme yönünde dik yönde iki delik arası uzaklık ve yükleme yönünde dik yöndeki serbest kenardan delik çapına uzaklık olarak belirlemiştir. Çalışma sonucunda dayanıma en büyük etkisi olan geometrik parametrelerin, yükleme yönündeki serbest kenardan delik çapına olan uzaklık ve yükleme yönünde iki delik arası uzaklık olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilerek, deneysel çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

Khedkar ve diğerleri [27], iki deliğin farklı konumlarda açıldığı 3 numune tipini tek yönlü basma yüklemesi altında incelemiştir. İlerleyen hasar analizi gerçekleştirilerek hasar yükünü bulmayı amaçlamışlardır. Aynı zamanda görsel görüntü işleme (İng. Digital Image Correlation-DIC) yöntemiyle gerinim ölçümü yapıp, analiz doğrulama çalışması yapmışlardır. Çalışma sonucunda iki deliğin yükleme yönünde açılmasının dayanımı arttırdığını ortaya koymuşlardır.

Ubaid ve diğerleri [28], iki deliğin farklı konumlarda açıldığı karbon fiber kompozit numunelerin tek yönlü çekme yüklemesi altında dayanımını incelemiştir. DIC ölçümü alınarak analiz doğrulama çalışması gerçekleştirilmiştir. İlerleyen hasar analizi

çalışması gerçekleştirilerek dayanım tespit çalışması yapılmıştır. Yükleme yönünde açılan deliklerin, yüklemeye dik yönde açılan deliklere göre yaklaşık %28 daha fazla dayanıma sahip olduğu belirtilmiştir. Ayrıca farklı delik konfigürasyonlarının gerilme konsantrasyonuna olan etkileri incelenmiştir. Yük yönünde açılan iki delikli durumda, deliklerin birbirlerine yaklaşmasıyla gerilme konsantrasyonunun azaldığı görülmüştür. Ghezzi ve diğerleri [29], gerçekleştirdikleri çalışmada iki delikli karbon fiber kompozit numunelerin çekme yükü altında gerilme dağılımını deneysel ve numerik olarak incelemişlerdir. Deliklerin yüklemeye dik yönde ve yüklemeye dik olarak açıldığı durumlar incelenmiştir. Gerilme dağılımının delikler arası mesafeye bağlı olarak hangi durumda etkilendiğini belirtmişlerdir. Yükleme yönünde açılan deliklerin incelendiği durumda, delikler arası mesafenin gerilme konsantrasyonuna etkisi olmadığını vurgulamışlardır. Deneysel çalışmalarında bu durumun dayanım için geçerli olduğunu ortaya koymuşlardır.

Kazemahvazi, Kilele ve Zenkert [30], tek yönlü cam fiber vinil-ester matris kompozitlerde çoklu delikli durumlar için çekme yüklemesi altında dayanımı deneysel ve yarı analitik bir yöntemle incelemişlerdir. Öncelikle belirli bir dizide ve yoğunlukta delikler açılarak deneysel yolla dayanım tespiti yapılmış ve bu verileri analitik modellerine girdi yaparak rastgele açılmış delikli durumun dayanım tahmini yapılmıştır. Çalışmalarının sonucunda, delik diziliminin değişmesinin hasar modunu da değiştirdiğini belirtmişlerdir. Çok delikli durumlarda baskın hasar modu kesme (İng. shear) olurken, az delikli durumlarda net kesit hasarının olduğunu gözlemlemişlerdir. Net kesit hasar modu için deliklerin nasıl dizildiğinin değil, delik sayısının belirleyici olduğunu vurgulamışlardır. Bununla birlikte kesme hasar modu için hem delik sayısının hem de delik diziliminin etkin olduğunu gözlemlemişlerdir.

Eugene ve diğerleri [31], farklı delik dizilimlerinin dayanıma olan etkisini deneysel bir çalışmayla incelemişlerdir. Deneysel çalışmada, aynı çaptaki iki deliğin yüklemeye yönünde sıralı açılması durumundaki dayanımın tek delikli durumun dayanımından az da olsa yüksek çıktığı görülmüştür. Deliklerin yan yana açılması durumundaki dayanım değeri ise yüklemeye yönündeki sıralı dizilime göre düşüktür. Ayrıca 4 delikli durumlar için, deliklerin baklava dilimi şeklinde açılması durumundaki dayanım, deliklerin kare açılması durumuna göre daha düşük olduğu belirtilmiştir.

Xu, Man ve Yue [32], açı dizilimi, delik boyutu, delik sayısı, delik dizilimi,

elipslik oranı ve yükleme durumu gibi parametrelerin dayanım üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Dayanımı analitik olarak tahmin edip, deneysel verilerle karşılaştırmışlardır. Delik konumlandırmasının dayanımı doğrudan etkilediği belirtilmiştir. Özellikle çekme ve basma yüklerinde bu etki daha belirginken, kayma yüklemesi altında delik konumlandırılması etkisinin daha az etkili olduğu belirtilmiştir.



3. TEORİK ALTYAPI

Tek yönlü (UD) kompozit malzemeler daha önce de belirtildiği gibi doğası gereği ortotropik özellik göstermektedir. Bu malzemelerin ortotropik davranışı doğal olarak mekanik davranışını da değiştirmektedir. Kompozit yapılarda gerilme dağılımı, gerilme konsantrasyonu ve dayanım konularını kavrayabilmek için temel kompozit mekaniğinde bilgi sahibi olunması gerekmektedir. Bu bölümde temel kompozit mekaniğinden, kompozit laminalar için geliştirilen bazı hasar kriterlerinden ve gerilme konsantrasyonu içeren katmanlar için hasar yöntemlerinden bahsedilecektir.

3.1 Kompozit Malzeme Mekaniği

Kompozit malzemelerin mekaniği kompozit yapısı gereği temel olarak 2 alt başlıkta incelenmektedir. Bunlar lamina seviyesi (tek bir kompozit ply) ve katman seviyesi (birden fazla laminadan oluşan kompozit katman) durumlarıdır. Bu bölümde öncelikler lamina seviyesi temel kompozit mekaniği ve daha sonra katman seviyesi temel kompozit mekaniği konularına değinilecektir.

3.1.1 Kompozit lamina mekaniği

İzotropik malzemeler için gerilme-gerinim ilişkisini ifade etmek için kullanılan Hooke yasası üç boyutlu olarak şu şekilde ifade edilmektedir;

$$\begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

Burada ν Poisson oranıdır ve G kayma modülü ν ve E (Young modülü) cinsinden aşağıdaki gibi yazılabilmektedir;

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (3.2)$$

Böylelikle birbirinden bağımsız 2 bilinmeyen malzeme parametresiyle gerilme-gerinim ilişkisi izotropik malzemeler için kurulabilmektedir.

Hooke yasası farklı malzemeler için 1-2-3 ortogonal düzlemde en genel haliyle şu şekilde yazılabilir;

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

Burada 6x6 $[C]$ matrisi direngenlik matrisi olarak adlandırılır ve 36 sabiti bulunmaktadır. $[C]$ matrisinin tersinin alınmasıyla compliance matrisi olan $[S]$ matrisi bulunur ve gerilme-gerinim ilişkisi $[S]$ matrisiyle şu şekilde ifade edilir;

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

$[C]$ matrisi simetrik bir matris olduğundan dolayı 36 sabit 21'e indirgenmiş olur. Böylece en genel hal için 21 bağımsız elastik malzeme özelliği ile gerilme-gerinim ilişkisi 3 boyutlu durum için belirlenmiş olur.

Kompozit malzemeler genellikle yapıları itibariyle ortotropik özellik gösterirler. Ortotropi, birbirine dik 3 yönde simetrik malzeme özelliği gösterme durumudur. Yani genel olarak kompozit malzemeler birbirine dik 3 yönde farklı malzeme özelliği gösterirler. Bu durum için direngenlik matrisi şu şekilde indirgenmiş olur;

$$\begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

Tez kapsamında da kullanılan tek yönlü kompozitler ise transverse izotropik olarak adlandırılırlar. Transverse izotropik malzemelerde ortotropik malzemelerdeki 2 ve 3 yönleri kendi içlerinde izotropik davranırlar. Böylece malzemede temel olarak 2 yönde farklı davranış görülür (1 yönü ve 2-3 yönü). Transverse izotropik bir malzeme için ise direngenlik matrisi şu şekilde yazılır;

$$\begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{23} & C_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{C_{22}-C_{23}}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

Transverse izotropik bir malzeme için ise birbirinden bağımsız 5 elastik sabit ile gerilme-gerinim ilişkisi kurulabilir.

Tek yönlü kompozit malzemeler genel olarak ince ve düzlem dışı yüklemeleri taşımadıklarından dolayı laminalar için düzlem gerilme durumu kabulü yapılabilir. Böylece gerilme-gerinim ilişkisi 3 boyuttan 2 boyuta indirgenmiş olunur. 2 boyutlu durum için direngenlik matrisi şu şekilde yazılır;

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{pmatrix} \quad (3.7)$$

Burada direngenlik matrisi $[Q]$ matrisiyle gösterilmiştir. Compliance matrisi 3 boyutta olduğu gibi direngenlik matrisinin tersinin alınmasıyla bulunur ve gerilme-gerinim ilişkisi compliance matrisi cinsinden şu şekilde ifade edilir;

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

[S] matrisinin elemanları mühendislik sabitleri kullanılarak şu şekilde bulunabilir;

$$E_1 \equiv \frac{\sigma_1}{\varepsilon_1} = \frac{1}{S_{11}} \quad (3.9)$$

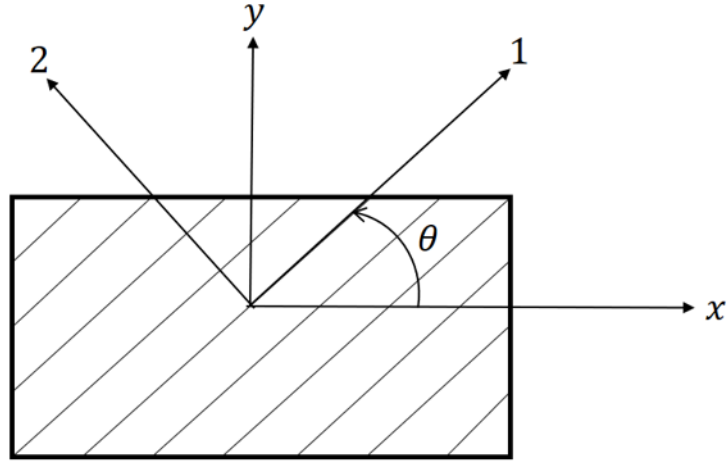
$$\nu_{12} \equiv -\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = -\frac{S_{12}}{S_{11}} \quad (3.10)$$

$$E_2 \equiv \frac{\sigma_2}{\varepsilon_2} = \frac{1}{S_{22}} \quad (3.11)$$

$$G_{12} \equiv \frac{\tau_{12}}{\gamma_{12}} = \frac{1}{S_{66}} \quad (3.12)$$

Böylece E_1 (fiber yönü modülüs), E_2 (matris yönü modülüs), ν_{12} (düzlem Poisson oranı) ve G_{12} (düzlem kayma modülü) mühendislik sabitleriyle 2 boyutta tek yönlü kompozit malzemeler için gerilme-gerinim ilişkisi kurulmuş olunur.

Katmanlar genel olarak tek yönlü laminalardan değil, farklı yüklemelere de cevap verebilmek adına üst üste dizilmiş farklı açılardan oluşan laminalardan meydana gelir. Dolayısıyla katman mekaniğini çözebilmek için açılı durum için lamina mekaniğini incelemek gerekmektedir. Kompozitlerde notasyon olarak x-y-z global koordinat sistemini, 1-2-3 ise lamina lokal koordinat sistemini tanımlamak için kullanılır. Açılı bir laminadaki global ve lokal eksen takımları Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1: Global ve lokal eksen takımları

Global ve lokal yöndeki gerilme dönüşümü;

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = (T)^{-1} \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{pmatrix} \quad (3.13)$$

Denklemden yer alan $[T]$ dönüşüm matrisidir ve şu şekilde ifade edilir;

$$(T) = \begin{pmatrix} c^2 & s^2 & 2sc \\ s^2 & c^2 & -2sc \\ -sc & sc & c^2 - s^2 \end{pmatrix} \quad (3.14)$$

Burada $c = \cos(\theta)$ ve $s = \sin(\theta)$ olarak ifade edilir. Denklem (3.7), Denklem (3.13) ile birlikte şu şekilde yazılabilir;

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = (T)^{-1} (Q) \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{pmatrix} \quad (3.15)$$

Benzer şekilde gerinim için de global-lokal koordinat sistemi dönüşümü şu şekilde yapılabilir;

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12}/2 \end{pmatrix} = (T) \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy}/2 \end{pmatrix} \quad (3.16)$$

Gerinim için dönüşüm denklemi şu şekilde de yazılabilir;

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{pmatrix} = (R)(T)(R)^{-1} \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} \quad (3.17)$$

Bu denklemde yer alan $[R]$ matrisi Reuter matrisidir ve şu şekilde ifade edilir;

$$(R) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{pmatrix} \quad (3.18)$$

Reuter matrisi kullanılarak gerinim dönüşüm denklemlerinin 3.satırında bulunan $1/2$ ifadesi ortadan kaldırılmış olur.

Tüm denklemler göz önüne alındığında Denklem (3.13);

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = (T)^{-1}(Q)(R)(T)(R)^{-1} \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} \quad (3.19)$$

şeklinde yazılabilir. Gerinim ifadesinin solunda yazılan matris çarpımları da düzenlenerek denklem şu şekilde indirgenir;

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \overline{Q}_{11} & \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{16} \\ \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{22} & \overline{Q}_{26} \\ \overline{Q}_{16} & \overline{Q}_{26} & \overline{Q}_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} \quad (3.20)$$

Denklemde yer alan $[\overline{Q}]$ matrisi her bir lamina için lokal eksenden global eksene döndürülmüş stiffness matrisidir. Böylelikle her lamina için lokal eksen takımına bağlı olarak verilen mühendislik katsayıları kullanılarak lokal direngenlik matrisi oluşturulmuş, ardından bu lokal direngenlik matrisi lamina açısına bağlı olarak global yöne döndürülmüş ve döndürülmüş direngenlik matrisi elde edilmiştir. Döndürülmüş stiffness matrisi de kullanılarak global eksende verilen yüklemeler için global eksen takımındaki gerinim değerleri elde edilmiş olur. Ardından istenirse global yöndeki gerilme ve gerinim değerleri dönüşüm matrisi kullanılarak lokal eksen takımına dönüştürülebilir.

3.1.2 Kompozit katman mekaniği

Tek bir lamina için gerilme-gerinim ilişkisinden sonra bu bölümde birden fazla açılı laminanın bir araya getirilmesiyle oluşturulan katmanın mekaniği incelenecektir.

İzotropik bir kiriş elemana P çekme yükü ve M eğilme momenti birlikte uygulandığında, kirişte oluşan aksenal gerinim;

$$\epsilon_{xx} = \left(\frac{1}{AE} \right) P + \left(\frac{z}{EI} \right) M \quad (3.21)$$

olarak ifade edilir. Burada A kirişin kesit alanı, E kirişin Young modülü, z kalınlık yönünde kiriş merkezinden uzaklık ve I eylemsizlik alan momenti olarak adlandırılır. Yükleme ve malzemeyle ilgili sabitler indirgenirse, denklem basitçe şu şekilde yazılabilir;

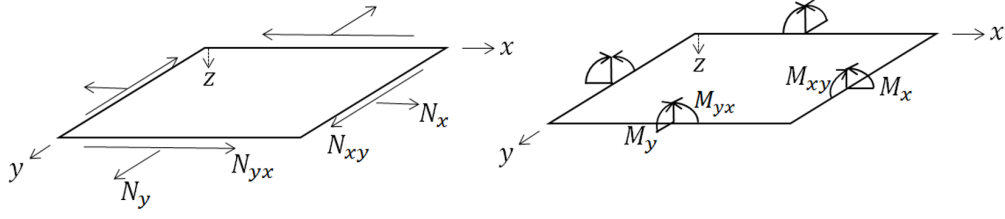
$$\epsilon_{xx} = \epsilon_0 + z\kappa \quad (3.22)$$

Burada ϵ_0 kirişin merkezinde, yani $z = 0$ noktasındaki çekme yüküne bağlı olarak oluşan gerinim ve κ ise moment yüklemesine bağlı olarak oluşan dönüdür.

Kompozit katmanların mekaniği klasik katman teorisi (İng. Classical Laminate Theory - CLT) kullanılarak hesaplanır ve temelde Denklem (3.21) baz alınarak hesaplamalar yapılır. Klasik katman teorisinin uygulanabilmesi için yapılan kabuller [1];

- her lamina ortotropik,
- her lamina kendi içerisinde homojen,
- kalınlık boyunca orta düzleme dik ve paralel olan yüzeyler, yükleme boyunca düz ve paralel olarak kalırlar ($\gamma_{xz} = \gamma_{yz} = 0$),
- katman incedir ve düzlem gerilme durumu geçerlidir,
- deplasmanlar sürekli ve katman kalınlığından önemli ölçüde küçüktür,
- tüm laminalar elastik,
- laminalar arası kayma yoktur şeklinde sıralanabilir.

Bir katmandaki tepki kuvvetleri ve momentleri Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2: Katmandaki tepki kuvvetleri ve momentlerinin notasyonu

Dolayısıyla kompozit katmanlar için global eksen takımındaki gerinim ilişkisi orta düzlemdeki gerinimlere ve kalınlık yönünden orta mesafeye olan uzaklık bakımından şu şekilde yazılabilir;

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{pmatrix} + z \begin{pmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{pmatrix} \quad (3.23)$$

Bu denkleme göre katman kalınlığı boyunca gerinimin orta düzlemden uzaklığa bağlı olarak doğrusal olarak değiştiği görülebilir. Ayrıca gerinimin katman genişliği boyunca uzanan eksenden ve katman boyunca uzanan eksende de bağımsız olduğu görülmektedir.

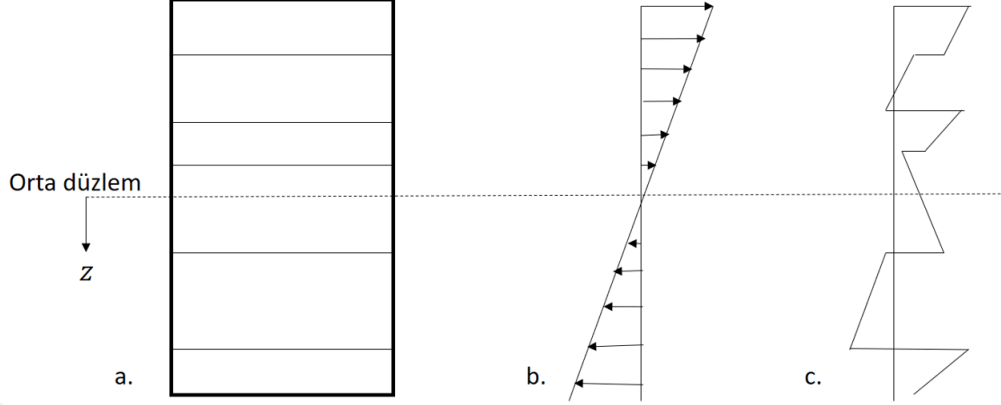
Denklem (3.23) ve Denklem (3.20) birlikte yazılarak katman için gerilme-gerinim ilişkisi şu şekilde kurulabilir;

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \overline{Q}_{11} & \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{16} \\ \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{22} & \overline{Q}_{26} \\ \overline{Q}_{16} & \overline{Q}_{26} & \overline{Q}_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{pmatrix} + z \begin{pmatrix} \overline{Q}_{11} & \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{16} \\ \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{22} & \overline{Q}_{26} \\ \overline{Q}_{16} & \overline{Q}_{26} & \overline{Q}_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{pmatrix} \quad (3.24)$$

Denkleme bakıldığında her bir laminanın döndürülmüş direngenlik matrisi orta düzlemdeki gerinim ve dönülerle çarpılarak, orta düzleme olan uzaklığına göre her bir laminadaki global eksen takımına göre gerilme değerlerinin bulunduğu görülmektedir. Aynı denklemden görüleceği üzere gerilme her bir lamina kalınlığı boyunca orta düzleme olan uzaklığa göre doğrusal olarak değişmektedir. Fakat laminalar arası geçişte, laminanın global eksen takımındaki açısına göre döndürülmüş direngenlik

matrisi deęiőeceęinden dolayı gerilme değerinin de deęiőeceęi görülmektedir.

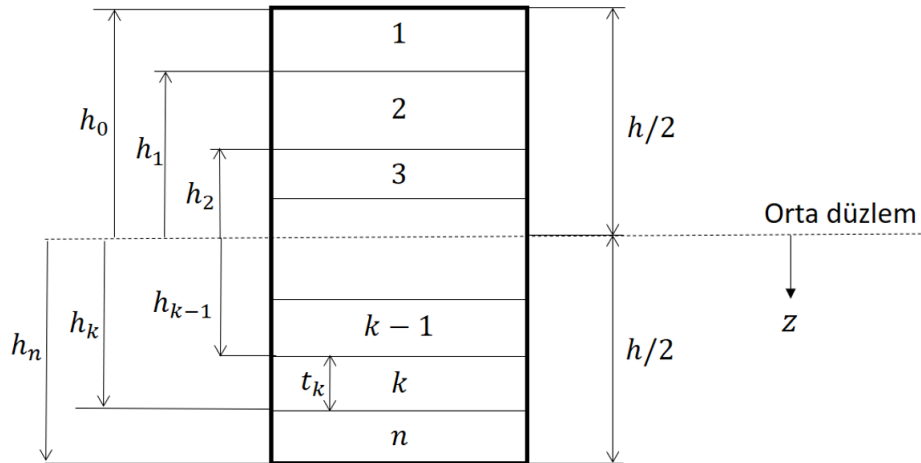
Lamina kalınlığı boyunca gerinimin doğrusal, gerilmenin ise lamina kalınlığı boyunca doğrusal fakat laminalar arası geçişte farklı deęiőimleri Şekil 3.3'de Şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.3: a) Katman kalınlığı boyunca lamina dizilimi b) Katman kalınlığı boyunca gerinim değişimi c) Katman kalınlığı boyunca gerilme değişimi

Orta düzlemdeki gerinim ve d n lere bağlı olarak her bir laminanın global eksen takımına göre gerilme ve gerinimlerinin nasıl elde edileceği gösterilmiştir. Bu noktada ise orta düzlemdeki gerinim ve d n lerin nasıl hesaplanacağı gösterilecektir.

Her bir laminanın orta düzleme olan uzaklıklarına bağlı olarak bir katmanın kalınlık boyunca gösterimi Şekil 3.4'de gösterilmiştir. Verilen yüklemeler altında katmana etki eden kuvvet-moment dağılımı bulunacak ve ardından her bir lamina için gerilme ve gerinim hesabına geçilecektir.



Şekil 3.4: Katman kalınlığı boyunca lamina konumlarının orta düzleme olan uzaklıklarının Şematik gösterimi

Katman kalınlığına gelen kuvvet ve momentler şu şekilde ifade edilebilir;

$$\begin{pmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{pmatrix} = \int_{-h/2}^{h/2} \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} dz \quad (3.25)$$

$$\begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{pmatrix} = \int_{-h/2}^{h/2} \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} z dz \quad (3.26)$$

Burada N_x ve N_y birim genişlik başına düşen normal kuvvetler, N_{xy} birim genişlik başına düşen kayma kuvveti, M_x ve M_y birim genişlik başına düşen eğilme momentleri ve M_{xy} birim genişlik başına düşen burulma (İng. twisting) momentidir. Denklemler her bir lamina için yazılacak olursa;

$$\begin{pmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{pmatrix} = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix}_k dz \quad (3.27)$$

$$\begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{pmatrix} = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix}_k z dz \quad (3.28)$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu denklemler Denklem (3.24) ile birleştirilirse;

$$\begin{pmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{pmatrix} = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{pmatrix} \overline{Q}_{11} & \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{16} \\ \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{22} & \overline{Q}_{26} \\ \overline{Q}_{16} & \overline{Q}_{26} & \overline{Q}_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{pmatrix}_k dz + \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{pmatrix} \overline{Q}_{11} & \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{16} \\ \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{22} & \overline{Q}_{26} \\ \overline{Q}_{16} & \overline{Q}_{26} & \overline{Q}_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{pmatrix}_k z dz \quad (3.29)$$

$$\begin{aligned}
\begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{pmatrix} &= \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{pmatrix} \overline{Q}_{11} & \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{16} \\ \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{22} & \overline{Q}_{26} \\ \overline{Q}_{16} & \overline{Q}_{26} & \overline{Q}_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{pmatrix}_k z dz + \\
&+ \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{pmatrix} \overline{Q}_{11} & \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{16} \\ \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{22} & \overline{Q}_{26} \\ \overline{Q}_{16} & \overline{Q}_{26} & \overline{Q}_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{pmatrix}_k z^2 dz
\end{aligned} \tag{3.30}$$

Denklemler daha sade bir şekilde ifade edilecek olursa;

$$\begin{aligned}
\begin{pmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{pmatrix} + \\
&+ \begin{pmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{pmatrix}
\end{aligned} \tag{3.31}$$

$$\begin{aligned}
\begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{pmatrix} + \\
&+ \begin{pmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{pmatrix}
\end{aligned} \tag{3.32}$$

Böylece katman için ABD matrisi yani katmanın direngenlik matrisi bulunmuş olur. Burada $[A]$ matrisi düzlem kuvvet ve normal gerinim için direngenlik matrisi, $[D]$ matrisi eğilme direngenlik matrisi ve $[B]$ matrisi ise kuvvet ve moment tabanlı oluşan gerinimleri ilişkilendiren direngenlik matrisidir.

Katmanda bulunan her bir lamina için gerilme ve gerinim hesabını özetlemek gerekirse; öncelikle farklı açılardan oluşan her bir lamina için döndürülmüş direngenlik matrisi bulunur. Döndürülmüş direngenlik matrisleri kullanılarak katmanın ABD matrisi yani katman direngenliği bulunur. Yüklemeler Denklem (3.31) ve Denklem (3.32)'ye yerleştirilerek orta düzlemdeki gerinim ve dönüler hesaplanır. Orta düzlemdeki gerinim ve dönüler Denklem (3.24)'e konularak her bir lamina için global

eksen takımına göre gerilme değerleri bulunur. Eğer istenirse dönüştürme matrisi kullanılarak fiber ve matris yönlerindeki gerilme ve gerinimler hesaplanır.

3.2 Delik Çevresi Gerilme Dağılımı

Sonsuz genişlikteki delikli kompozit plakalar için, çekme yükü altında delik çevresindeki gerilme dağılımı analitik olarak bulunmuştur [33]. Şekil 3.5’de gösterildiği gibi p çekme yükü altındaki r yarıçaplı delikli kompozit plakada delik çevresindeki çevresel gerilme dağılımı her bir θ açısı için;

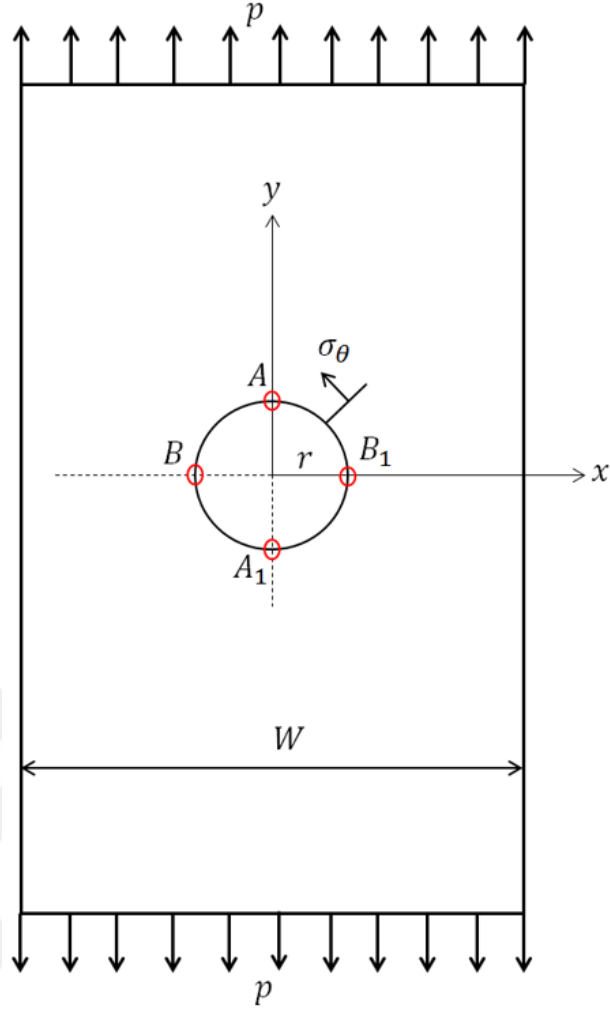
$$\sigma_{\theta} = p \frac{E_{\theta}}{E_x} [-k \cos^2 \theta + (1+n) \sin^2 \theta] \quad (3.33)$$

$$E_{\theta} = \frac{E_x}{\cos^4 \theta + \left(\frac{E_y}{G_{xy}} - 2\nu_{yx}\right) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \frac{E_y}{E_x} \sin^4 \theta} \quad (3.34)$$

$$k = \sqrt{\frac{E_x}{E_y}} \quad (3.35)$$

$$n = \sqrt{2 \left(\sqrt{\frac{E_x}{E_y}} - \nu_{xy} \right) + \frac{E_x}{G_{xy}}} \quad (3.36)$$

denklemleriyle bulunabilir. Burada E_x kompozit katmanın x yönündeki direngenliği, E_y y yönündeki direngenliği, ν_{xy} xy düzlemindeki Poisson oranı ve G_{xy} xy düzlemindeki kayma direngenliğidir.



Şekil 3.5: Tek yönlü çekme yükü altındaki delikli kompozit plaka

Bu denkleme göre Şekil 3.5’de gösterilen A1 ve A noktalarındaki çevresel gerilmeler;

$$\sigma_{\theta} = -\frac{p}{k} \quad (3.37)$$

B1 ve B noktalarındaki çevresel gerilmeler ise;

$$\sigma_{\theta} = p(1+n) \quad (3.38)$$

şeklinde ifade edilebilir. Tek yönlü çekme yükü altında delik merkezinden y eksenini boyunca çekme yönündeki ortalama katman gerilme dağılımı ise;

$$\frac{\sigma_x(0,y)}{\sigma^{\infty}} = \frac{1}{2} \left[2 + \left(\frac{R}{y}\right)^2 + 3\left(\frac{R}{y}\right)^4 - (K_t^{\infty} - 3) \left\{ 5\left(\frac{R}{y}\right)^6 - 7\left(\frac{R}{y}\right)^8 \right\} \right] \quad (3.39)$$

$$K_t^\infty = 1 + n \quad (3.40)$$

Denklemleriyle bulunabilir. Burada gösterilen K_t^∞ gerilme konsantrasyonu değerini göstermektedir. Kompozit malzeme için gerilme konsantrasyonunun global eksenlerdeki ortalama elastiklik modülüne (E_x, E_y, G_{xy}) ve Poisson oranına (ν_{xy}) bağlı olduğu görülmektedir. Daha net bir ifadeyle sonsuz plakada bulunan bir delik kenarındaki gerilme konsantrasyonu malzemeye, katman açısı dizilimi ve açı değerlerine bağlıdır.

Tan [34], Lekhnitskii'nin [33] sonsuz genişlikteki plaka için bulunduğu gerilme dağılımını bir düzeltme faktörü kullanarak sonlu genişlikteki plaka için türetmiştir. Buna göre sonsuz plaka gerilme konsantrasyonu (K_t^∞) ve sonlu plaka gerilme konsantrasyonu (K_t) arasındaki oran;

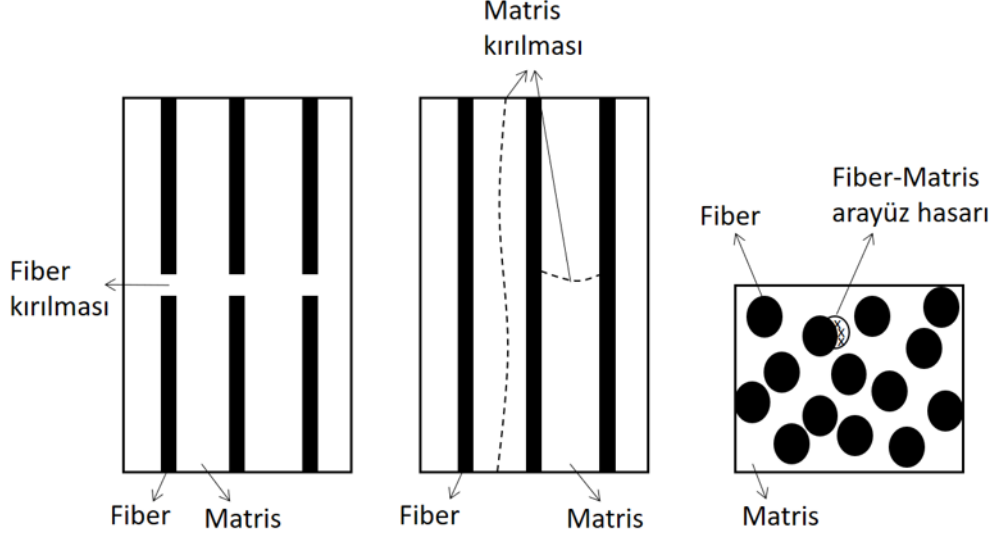
$$\frac{K_t^\infty}{K_t} = \frac{3 \left(1 - \frac{2R}{W}\right)}{2 + \left(1 - \frac{2R}{W}\right)^3} + \frac{1}{2} \left(\frac{2R}{W} M\right)^6 (K_t^\infty - 3) \left[1 - \left(\frac{2R}{W} M\right)^2\right] \quad (3.41)$$

$$M^2 = \frac{\sqrt{1 - 8 \left[\frac{3 \left(1 - \frac{2R}{W}\right)}{2 + \left(1 - \frac{2R}{W}\right)^3} - 1 \right]} - 1}{2 \left(\frac{2R}{W}\right)^2} \quad (3.42)$$

şeklinde ifade edilir.

3.3 Lamina Hasar Analizi

Kompozit laminalar için lamina içi hasar 3 farklı tipte olabilir. Bunlar; fiber hasarı, transverse yönde matris hasarı, kayma yönü matris hasarıdır [15]. Lamina içi hasarların şematik olarak gösterilmi Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6: Lamina hasar tipleri

Hasar kriterleri kompozit laminaların hasara uğrayıp uğramadıklarının kontrolünün yapılması için kullanılan, genellikle deneysel bazlı oluşturulmuş gerilme veya gerinim tabanlı kriterlerdir. Bazı lamina hasar teorileri farklı hasar tiplerine göre farklı kriterler sunarken, bazı teoriler ise tüm hasar tiplerini kapsayan tek bir kriter öne sürmektedir. Aynı şekilde bazı hasar teorileri her bir yöndeki gerilme veya gerinim için sadece o yöndeki gerilme veya gerinim değerini kullanırken, bazı hasar teorilerinde farklı yöndeki gerilme veya gerinimler ilişkilendirilerek hasar kriteri oluşturulabilir.

3.3.1 Hasar tipiyle ilişkili hasar kriterleri

Bu başlıkta bahsedilen hasar kriterleri kompozit malzemelerin homojen olmayan mekanik davranışını göz önünde bulundurarak geliştirilmiş hasar kriterleridir.

a) Maksimum gerinim hasar kriteri

Bu hasar kriteri basit olarak, bir yönde oluşan gerinimin laminanın dayanım limit geriniminden fazla olması durumunda hasar oluşacağını öne sürer. Kompozit laminalar için bahsedilen 3 farklı hasar tipi göz önünde bulundurulur. Bunlar; maksimum fiber gerinimini için hasar, maksimum matris gerinimi için hasar ve maksimum kayma gerinimi için hasar tipleridir.

Fiber hasarı;

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &\geq \varepsilon_{1T}^u \\ |\varepsilon_1| &\geq \varepsilon_{1C}^u\end{aligned}\quad (3.43)$$

Matris hasarı;

$$\begin{aligned}\varepsilon_2 &\geq \varepsilon_{2T}^u \\ |\varepsilon_2| &\geq \varepsilon_{2C}^u\end{aligned}\quad (3.44)$$

Kayma hasarı;

$$|\varepsilon_{12}| \geq \varepsilon_{12}^u \quad (3.45)$$

koşulları gerçekleştiğinde oluşur.

b) Maksimum gerilme hasar kriteri

Maksimum gerilme kriterine benzer olarak bu kriterde de bir yönde oluşan gerilmenin laminanın dayanım limit gerilmesinden fazla olması durumunda hasar oluşacağı belirtilir. Yine 3 farklı hasar tipi göz önünde bulundurulur ve farklı yönlerdeki gerilmeler arasındaki etkileşim ihmal edilir.

Fiber hasarı;

$$\begin{aligned}\sigma_1 &\geq \sigma_{1T}^u \\ |\sigma_1| &\geq \sigma_{1C}^u\end{aligned}\quad (3.46)$$

Matris hasarı;

$$\begin{aligned}\sigma_2 &\geq \sigma_{2T}^u \\ |\sigma_2| &\geq \sigma_{2C}^u\end{aligned}\quad (3.47)$$

Kayma hasarı;

$$|\sigma_{12}| \geq \sigma_{12}^u \quad (3.48)$$

koşulları gerçekleştiğinde oluşur.

c) Hashin-Rotem hasar kriteri

Bu hasar kriteri fiber yönü hasarı ve matris yönü hasarı olmak üzere 2 farklı hasar

tipini ele alır. Bu hasar tiplerini de kendi içlerinde çekme ve basma hasarları olarak değerlendirir. Ayrıca matris yönü hasar formülünde kayma gerilmesini de hesaba katarak farklı yöndeki gerilmelerin etkileşimini hesaba katmış olur.

Fiber hasarı;

$$\begin{aligned}\sigma_1 &\geq \sigma_{1T}^u \\ |\sigma_1| &\geq \sigma_{1C}^u\end{aligned}\quad (3.49)$$

Matris çekme hasarı;

$$\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_{2T}^u}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{\sigma_{12}^u}\right)^2 \geq 1 \quad (3.50)$$

Matris basma hasarı;

$$\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_{2C}^u}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{\sigma_{12}^u}\right)^2 \geq 1 \quad (3.51)$$

koşulları gerçekleştiğinde oluşur [35].

d) Hashin hasar kriteri

Hashin daha sonra Hashin-Rotem kriterini geliştirmiş ve farklı yöndeki gerilmelerin belirli bir hasar tipine olan etkisini daha ayrıntılı ele alarak Hashin kriterini önermiştir.

Fiber çekme hasarı;

$$\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_{1T}^u}\right)^2 + \frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2}{(\sigma_{12}^u)^2} \geq 1 \quad (3.52)$$

Fiber basma hasarı;

$$|\sigma_1| \geq \sigma_{1C}^u \quad (3.53)$$

Matris çekme hasarı;

$$\left(\frac{\sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_{2T}^u}\right)^2 + \frac{\sigma_{23}^2 - \sigma_2\sigma_3}{(\sigma_{23}^u)^2} + \frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2}{(\sigma_{12}^u)^2} \geq 1 \quad (3.54)$$

Matris basma hasarı;

$$\left[\left(\frac{\sigma_{2C}^u}{2\sigma_{23}^u} \right)^2 - 1 \right] \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_{2C}^u} + \left(\frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2\sigma_{23}^u} \right)^2 + \frac{\sigma_{23}^2 - \sigma_2\sigma_3}{(\sigma_{23}^u)^2} + \frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2}{(\sigma_{12}^u)^2} \geq 1 \quad (3.55)$$

koşulları gerçekleştiğinde oluşur [36].

3.3.2 Hasar tipiyle ilişkili olmayan hasar kriterleri

Bu gruptaki hasar tipleri daha önce bahsedilen lamina hasar tiplerini ayırtılmayıp, lamina hasarını tek bir denklem kullanarak ele alır. Matematiksel ifadelerle hasar yüzeyini lamina malzeme dayanımları cinsinden yazarak hasar kriterleri oluşturulur. Genel olarak deneysel tabanlı çalışmalara eğri uydurma işlemi gerçekleştirilerek oluşturulmuş kriterlerdir.

a) Tsai-Wu hasar kriteri

Tsai-Wu kriterine göre hasar;

$$F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\sigma_{12}^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 \geq 1 \quad (3.56)$$

koşulu gerçekleştiğinde oluşur. Burada;

$$\begin{aligned} F_1 &= \frac{1}{\sigma_{1T}^u} + \frac{1}{\sigma_{1C}^u} \\ F_2 &= \frac{1}{\sigma_{2T}^u} + \frac{1}{\sigma_{2C}^u} \\ F_{11} &= -\frac{1}{\sigma_{1T}^u\sigma_{1C}^u} \\ F_{22} &= -\frac{1}{\sigma_{2T}^u\sigma_{2C}^u} \\ F_{66} &= \frac{1}{(\sigma_{12}^u)^2} \end{aligned} \quad (3.57)$$

ve

$$F_{12} = \frac{1}{2\sigma_{biax}^2} \left[1 - \left(\frac{1}{\sigma_{1T}^u} + \frac{1}{\sigma_{1C}^u} + \frac{1}{\sigma_{2T}^u} + \frac{1}{\sigma_{2C}^u} \right) \sigma_{biax} + \left(\frac{1}{\sigma_{1T}^u\sigma_{1C}^u} + \frac{1}{\sigma_{2T}^u\sigma_{2C}^u} \right) \sigma_{biax}^2 \right] \quad (3.58)$$

olarak ifade edilir. σ_{biax} değeri eşeksenli gerilme dayanımıdır. Eğer bu değer bilinmiyorsa F_{12} deneysel olarak bulunmalıdır [37][38].

b) Tsai-Hill hasar kriteri

Tsai-Hill kriterine göre hasar;

$$\frac{\sigma_1^2}{\sigma_1^u} - \frac{\sigma_1 \sigma_2}{\sigma_1^u} + \frac{\sigma_2^2}{\sigma_2^u} + \frac{\sigma_{12}^2}{\sigma_{12}^u} \geq 1 \quad (3.59)$$

koşulu gerçekleştiğinde oluşur. Burada;

$\sigma_1 \geq 0$ ise $\sigma_1^u = \sigma_{1T}^u$, değil ise $\sigma_1^u = \sigma_{1C}^u$ kullanılır. Benzer şekilde $\sigma_2 \geq 0$ ise $\sigma_2^u = \sigma_{2T}^u$, değil ise $\sigma_2^u = \sigma_{2C}^u$ kullanılır [39].

c) Azzi-Tsai hasar kriteri

Tsai-Hill hasar kriterine çok benzer olan Azzi-Tsai hasar kriterinin tek farkı fiber ve matris yönü gerilme çarpımının mutlak değerle ifade edilmesidir. Bu kriter gere göre hasar;

$$\frac{\sigma_1^2}{\sigma_1^u} - \frac{|\sigma_1 \sigma_2|}{\sigma_1^u} + \frac{\sigma_2^2}{\sigma_2^u} + \frac{\sigma_{12}^2}{\sigma_{12}^u} \geq 1 \quad (3.60)$$

koşulu gerçekleştiğinde oluşur [40].

c) Hoffman hasar kriteri

Hoffman kriterine göre hasar;

$$\frac{\sigma_1 \sigma_2 - \sigma_1^2}{\sigma_{1T}^u \sigma_{1C}^u} - \frac{\sigma_2^2}{\sigma_{2T}^u \sigma_{2C}^u} + \sigma_1 \frac{\sigma_{1T}^u + \sigma_{1C}^u}{\sigma_{1T}^u \sigma_{1C}^u} + \sigma_2 \frac{\sigma_{2T}^u + \sigma_{2C}^u}{\sigma_{2T}^u \sigma_{2C}^u} + \frac{\sigma_{12}^2}{\sigma_{12}^u} \geq 1 \quad (3.61)$$

koşulu gerçekleştiğinde hasar oluşur [41].

3.3.3 Hasar kriterlerinin karşılaştırılması

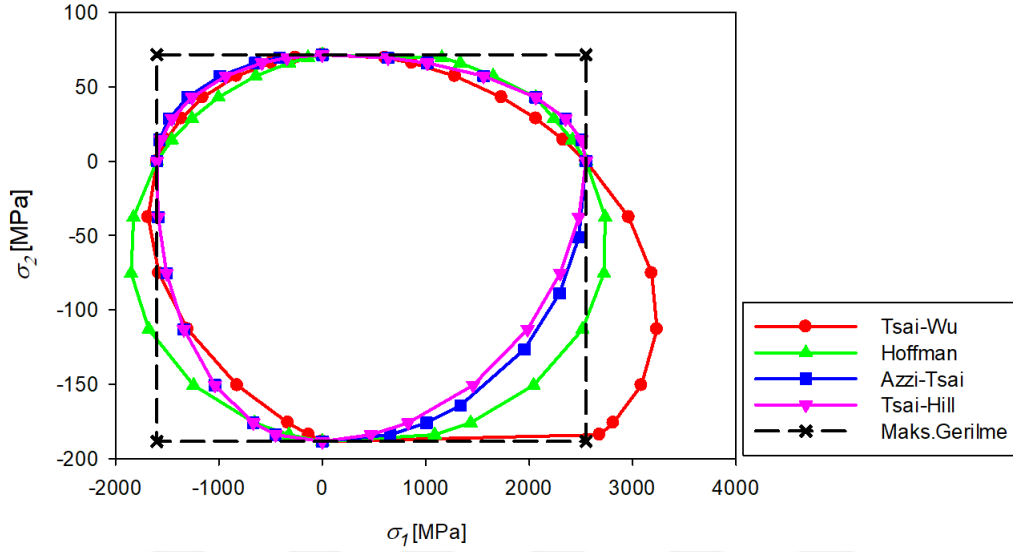
Bahsedilen hasar kriterlerinin karşılaştırılması için bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada basit kare şeklinde ince bir kompozit plaka düşünülmüş ve bu plakaya iki eksenli farklı yönlerde çekme/basma/kayma yüklemeleri uygulanması durumunda hasar kriterlerinin hasar sınırları çizdirilmiştir. Böylece hasar kriterlerinin arasındaki fark açık şekilde görülmüştür.

Çalışma için literatürde sıkça kullanılan bir malzeme olan IM7-8551-7 karbon epoksi kompozit malzemesi kullanılmıştır. Bu malzeme için malzeme özellikleri;

$$E_1 = 167 \text{ GPa}, E_2 = 8.43 \text{ GPa}, G_{12} = 4.93 \text{ GPa}, \nu_{12} = 0.27$$

dayanım değerleri ise,

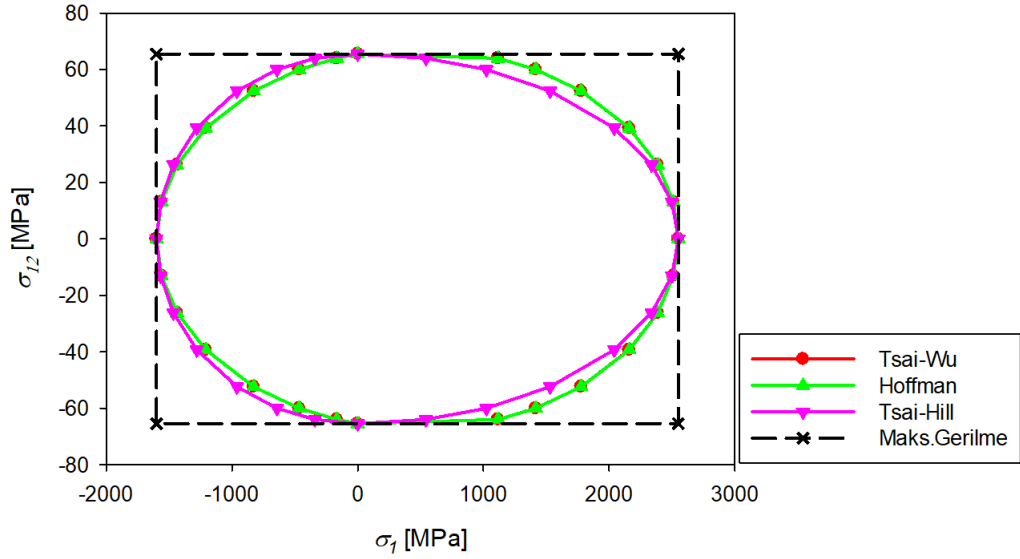
$\sigma_{1T}^u = 2550$ MPa, $\sigma_{1C}^u = 1600$ MPa, $\sigma_{2T}^u = 71.5$ MPa, $\sigma_{2C}^u = 188.5$ MPa, $\sigma_{12}^u = 65.5$ MPa olarak verilmiştir [1].



Şekil 3.7: Farklı lamina hasar kriterleri için 11-22 düzlemi hasar sınırları grafiği

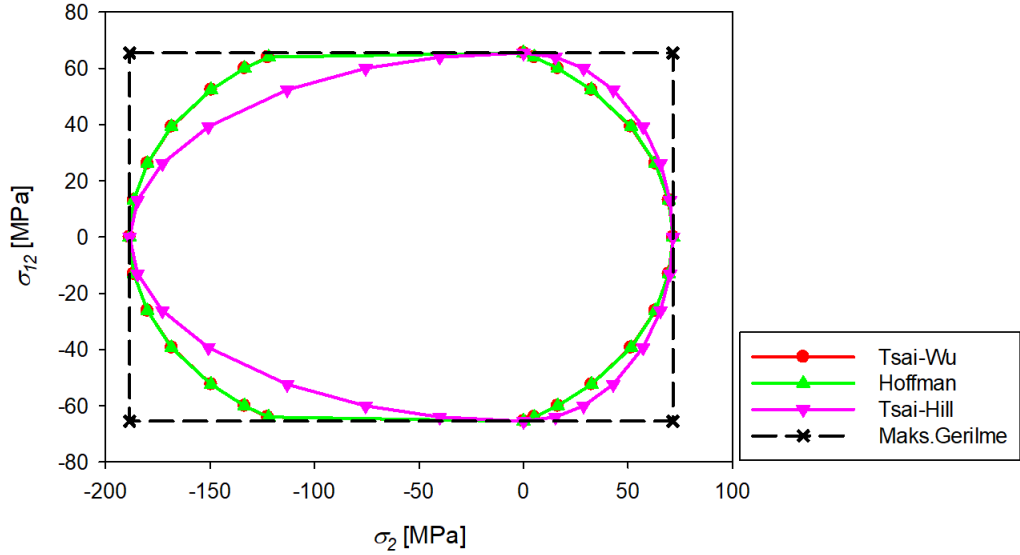
Şekil 3.7'de $\sigma_1 - \sigma_2$ düzleminde, bazı hasar kriterlerinin karşılaştırmasını göstermektedir. Hasar sınırları grafiğine göre, yapı üzerinde oluşan gerilmelerin hasar sınırları çizgilerinin orijine yakın olan tarafı olması durumunda hasarın oluşmayacağı, diğer tarafta yer alması ise hasarın oluşacağı göstergesidir. 1-2 düzlemi için maksimum gerilme, Hashin ve Hashin-Rotem kriterlerinin aynı şekli oluşturacağı bilinmektedir. Çünkü bu kriterlerde 1 yönü ve 2 yönü etkileşimi bulunmamaktadır.

1-2 düzleminde her iki yönünde pozitif olduğu bölgeye bakıldığında en koruyucu kriterin Tsai-Wu en kapsayıcı kriterin ise maksimum gerilme kriteri olduğu görülmektedir. Her iki yönün negatif olduğu bölgede de bu durumun değişmediği görülmektedir. Fakat bu duruma ek olarak Hoffman kriterinin 1 yönünde malzeme dayanımını aşan gerilmelerde dahi bir noktaya kadar hasar oluşmadığını gösterdiği görülmektedir. 1 yönünün pozitif 2 yönünün negatif olduğu gerilme durumunda, en kapsayıcı kriter Tsai-Wu iken en koruyucu kriterin ise Tsai-Hill olduğu görülmektedir. Bu bölgede de Tsai-Wu kriterine göre 1 yönünde malzeme dayanımını aşan gerilmelerde dahi bir noktaya kadar hasar oluşmadığı gözlemlenmiştir. 1 yönünün negatif 2 yönünün pozitif olduğu bölgede, en kapsayıcı kriter maksimum gerilme iken en koruyucu kriterin ise Hoffman hasar kriteri olduğu görülmektedir.



Şekil 3.8: Farklı lamina hasar kriterleri için 11-12 düzlemi hasar sınırları grafiği

Şekil 3.8’de $\sigma_1 - \sigma_{12}$ düzlemindeki farklı hasar kriterlerinin hasar sınırlarını göstermektedir. Azzi-Tsai kriteri bu düzlemde Tsai-Hill kriteriyle aynı sınırları vermektedir. Ayrıca Tsai-Wu ve Hoffman kriterleri de aynı sınırları vermektedir. Şekil 3.8’e göre maksimum gerilme kriteri tüm 1-12 düzlemi bölgelerinde en kapsayıcı kriterken, 1 yönünün negatif olduğu bölgelerde Tsai-Wu, pozitif olduğu bölgelerde ise Tsai-Hill kriterlerinin daha koruyucu oldukları görülmüştür.



Şekil 3.9: Farklı lamina hasar kriterleri için 22-12 düzlemi hasar sınırları grafiği

Şekil 3.9’da ise $\sigma_2 - \sigma_{12}$ düzleminde hasar kriterleri karşılaştırılmıştır. Bu düzlemde Azzi-Tsai ve Tsai-Hill kriterleri yine aynı sınırlara sahiptir. 1-12 düzlemin olduğu gibi bu düzlemde de tüm bölgelerde en kapsayıcı kriter maksimum gerilme kriteridir.

En koruyucu kriter ise 2 yönü gerilmelerin pozitif olduğu bölgede Hoffman, negatif olduğu bölgede ise Tsai-Hill kriteridir.

Tüm hasar sınırları grafiklerine bakıldığında farklı kriterlerin farklı yükleme tipi ve yönlerinde farklı sonuçlar verdikleri görülmektedir. Dolayısıyla malzeme ve yüklemeye uygun olarak hasar kriterleri seçilmelidir. Bu durum kompozit laminalarda tek bir hasar kriterinin neden uygun olmadığının açıklamasıdır.

3.4 Katman Hasar Analizi

Önceki kısımda bahsedilen hasar kriterleri tek bir lamina için lamina için (İng. intraply) oluşturulmuş hasar kriterleridir. Fakat genel olarak kompozit yapılar katmanlar halinde bulunmaktadır. Dolayısıyla kompozit bir yapının hasar değerlendirmesi yapılırken katman hasarı göz önünde bulundurulmalıdır. Bu kısımda, gerilme konsantrasyonu içeren kompozit katmanlar için hasar analizi yöntemleri anlatılmıştır.

3.4.1 İlerlemeli hasar analizi

İlerlemeli hasar analizi, her bir laminadaki gerilme durumuna göre lamina dirençlik değerinin güncellenmesiyle gerilme dağılımının yeniden elde edilmesine olanak sağlar. Böylece katmanda her bir lamina için hasara uğramaları durumunda dirençlik güncellenmesi yapılmakta ve hasar olması durumunda katman ortalama dirençliği de güncellenmektedir.

İlerlemeli hasar analizi genel olarak 3 aşamada gerçekleştirilir [15]. İlk aşamada gerilme analizi yapılarak her bir laminadaki fiber/matris yönlerindeki gerilme dağılımları bulunur. Gerilme analizinin ardından, önceki kısımda belirtilen lamina hasar kriterlerinden uygun olanı seçilerek her bir lamina için hasar tespiti yapılır. Bu aşamada hasara uğrayan lamina varsa uygun bir dirençlik azaltma fonksiyonu seçilerek dirençlik azaltması yapılır. Analiz aynı adımlarla tekrarlı bir şekilde gerçekleştirilerek son hasar yükü tespit edilmeye çalışılır.

Hasar kriterine göre hasara uğrayan bir laminada uygun dirençlik azaltma fonksiyonu seçilerek bir dirençlik azaltma parametresi hesaplanır. Bulunan dirençlik azaltma parametresi kullanılarak güncellenen compliance matrisi [42];

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{12} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{1}{(1-d_f)E_1} & \frac{-v_{21}}{E_2} & 0 \\ \frac{-v_{21}}{E_1} & \frac{1}{(1-d_m)E_1} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2(1-d_s)G_{12}} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix} \quad (3.62)$$

denklemleriyle ifade edilebilir. Burada d_f fiber için hasar indisi, d_m matris için hasar indisi ve d_s kayma hasar indisini gösterir. Compliance matrisinin tersi alınarak oluşturulan direngenlik matrisi ise;

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} (1-d_f)E_1 & (1-d_f)(1-d_m)v_{21}E_1 & 0 \\ (1-d_f)(1-d_m)v_{12}E_2 & (1-d_m)E_2 & 0 \\ 0 & 0 & 2D(1-d_s)G_{12} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{12} \end{Bmatrix} \quad (3.63)$$

denklemleriyle gösterilir. Burada;

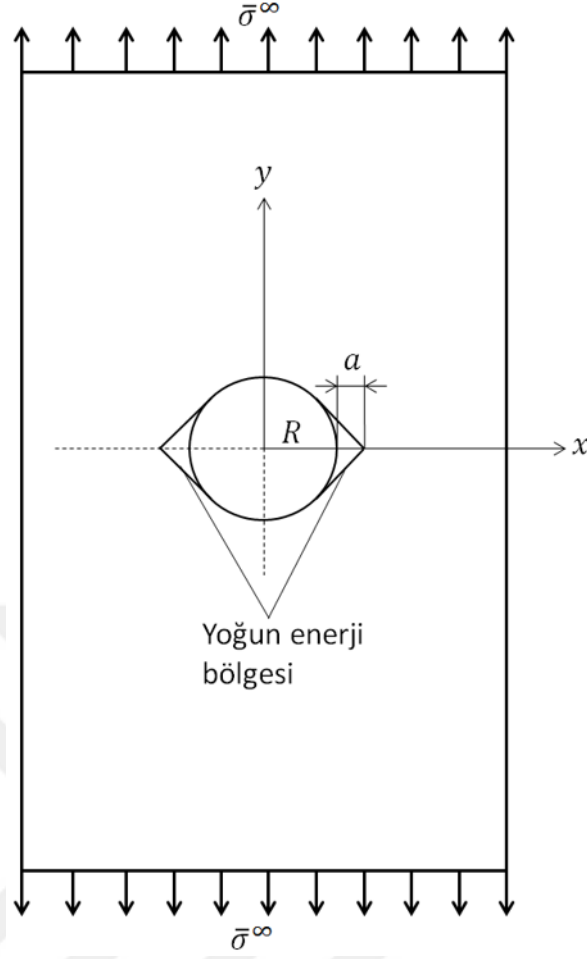
$$D = 1 - (1-d_f)(1-d_f)v_{12}v_{21} \quad (3.64)$$

olarak ifade edilir. Böylelikle her bir lamina için güncellenmiş direngenlik matrisiyle gerilme dağılımı tekrar hesaplanır.

İlerlemeli hasar analizi katman dayanımı tespiti için gerçekçi sonuçlar vermeye yakın gibi görünse de pratik kullanım açısından bir takım dezavantajlara da sahiptir. Öncelikle uygun hasar kriteri ve direngenlik azaltma fonksiyonu seçimi yapılması gerekmektedir. Bu uygun hasar kriteri ve direngenlik azaltma fonksiyonu çifti seçilmesi için çokça analiz ve teste ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca modelleme için gerilme analizinde kullanılan malzeme özellikleri dışında kırılma tokluğu gibi ek malzeme özelliklerine de ihtiyaç duyulabilmektedir. Bu durum da test sayısını arttırmaktadır. Son olarak hesaplama süresi de oldukça uzun olabilmektedir. Böylece tekrarlı analiz yapılması durumunda çözüm süresi çok uzamaktadır.

3.4.2 Doğrusal elastik kırılma mekaniği temelli yöntemler

Doğrusal elastik kırılma mekaniği temelli hasar kriteri ilk olarak Waddoups [25] tarafından ortaya konulmuştur. Bu yöntemde göre kompozit katman son hasar yükünden önce delik çevresinde, delik kenarından a mesafesi boyunda kritik olmayan yoğun enerji bölgesi oluşur. Bu durum Şekil 3.10'da gösterilmiştir.



Şekil 3.10: Tek yönlü çekme yüklemesi altında delik çevresinde oluşan yoğun enerji bölgesi

Delik kenarındaki kritik gerilme yoğunluk faktörü [19];

$$K_{Ic} = f(a, R) \bar{\sigma}^{\infty} \sqrt{\pi a} \quad (3.65)$$

denklemlerle hesaplanır. Denklemlerde geçen $f(a, R)$ delik kenarındaki iki çatlaktan yayılan gerilme yoğunluk faktörü olup Bowie çözümüyle [19];

$$f(a, R) = 0.5 \left(3 - \frac{a}{d/2 + a} \right) \left[1 + 1.243 \left(1 - \frac{a}{d/2 + a} \right)^3 \right] \quad (3.66)$$

bulunabilir. Waddoups deliksiz kompozit katman dayanımını delik çapının sıfır olması durumu gibi varsayarak, deliksiz kompozit katman için kritik gerilme yoğunluk faktörünü [19];

$$K_{Ic} = X_T^L \sqrt{\pi a} \quad (3.67)$$

denklemiyle ifade eder. Burada X_T^L deliksiz kompozit katman dayanımıdır. Sonuç olarak delikli kompozit katman dayanımı Denklem (3.65) ve Denklem (3.67) kullanılarak;

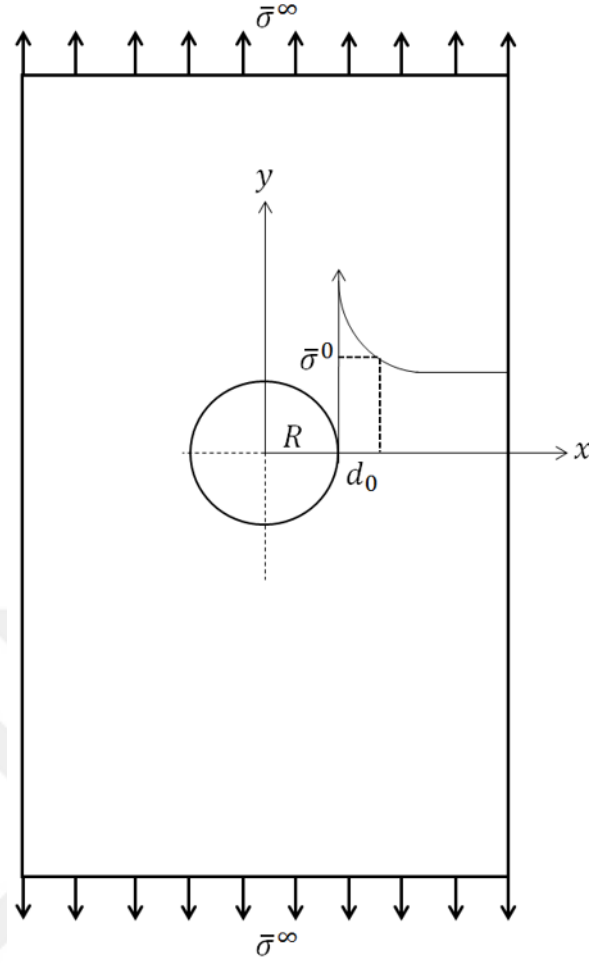
$$\bar{\sigma}^\infty = X_T^L / f(a, R) \quad (3.68)$$

denklemiyle bulunabilir. Dolayısıyla delikli kompozit dayanımı yoğun enerji bölgesi uzunluğu (a) ve deliksiz katman dayanımı (X_T^L) girdileriyle bulunabilmektedir.

3.4.3 Noktasal gerilme kriteri (PSC) ve ortalama gerilme kriteri (ASC) yöntemleri

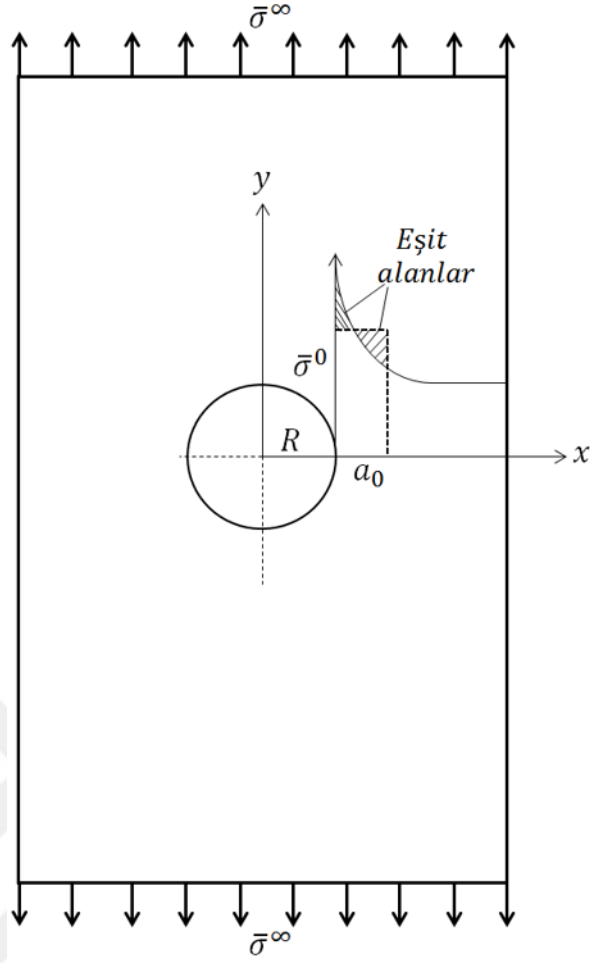
PSC ve ASC yöntemleri Whitney ve Nuismer [16] tarafından ortaya konmuştur. Delikli kompozit plakaların son hasar yükünü tahmin etmek için kullanılan bu yöntem delik çevresindeki gerilme dağılımını dikkate alır. Bu yöntemlere göre delik kenarından plaka serbest kenarına doğru çizilen bir patika boyunca oluşan normal katman gerilme dağılımı, deliksiz kompozit katman dayanımıyla ilişkilendirilerek delikli kompozit katman dayanımı bulunur.

PSC yöntemine göre, delikli kompozit plakada delik kenarından karakteristik uzunluk (d_0) kadar uzaklıktaki çekme yönü ortalama katman gerilmesi, aynı katman konfigürasyonunun deliksiz dayanımına eşit olduğu yükleme değeri ($\bar{\sigma}^\infty$) delikli katmanın dayanımıdır. Bu yöntemle göre delikli katman dayanımını hesaplayabilmek için karakteristik uzunluk (d_0) ve deliksiz dayanım ($\bar{\sigma}^0$) girdilerine ihtiyaç vardır. Karakteristik uzunluk ise referans bir delikli katman testinden bulunarak diğer delikli katmanların dayanımı PSC yöntemiyle bulunabilir. Yöntemin şematik olarak gösterimi Şekil 3.11'de verilmiştir.



Şekil 3.11: PSC yöntemi

Whitney ve Nuismer'in [16] bir diğer hasar tespit yöntemi ise ASC yöntemidir. PSC yöntemine çok benzeyen ASC yönteminde ise, delik kenarından karakteristik uzunluk (a_0) kadar uzaklıktaki bir mesafedeki ortalama çekme yönü katman gerilmesi, aynı katman konfigürasyonundaki deliksiz dayanıma ($\bar{\sigma}^0$) eşit olduğunda hasar gerçekleşir. Delikli katman dayanımını bulabilmek için PSC yöntemi gibi bu yöntem de deliksiz katman dayanımına ($\bar{\sigma}^0$) ve karakteristik uzunluk (a_0) bilgilerine ihtiyaç duyar. Dolayısıyla bir delikli katman numunesi referans seçilene a_0 belirlenir. Daha sonra diğer delikli numune dayanımları bulunabilir. ASC yönteminin şematik gösterimi Şekil 3.12'de gösterilmiştir.



Şekil 3.12: ASC yöntemi

Tez kapsamında pratik uygulanabilirliğinin yanında, dayanım tahmininde yüksek doğruluk oranına sahip olan PSC yöntemi ele alınmıştır. Bu yöntemin kullanım alanındaki kısıtlamalar ve bu kısıtlamaları aşmak için yöntemin modifiye edilmiş hali çift delikli kompozit numuneleri çalışmalarında ayrıntılı olarak açıklanmıştır.



4. TEK DELİKLİ KOMPOZİT NUMUNELER İÇİN GERÇEKLEŞTİRİLEN TEST VE ANALİZ ÇALIŞMALARI

Bu bölümde tek delikli katmanlı kompozit numuneler için gerçekleştirilen testler ve sonlu elemanlar analizleri anlatılmıştır. Öncelikle bu bölümde kullanılan kompozit malzeme için karakterizasyon testlerinden bahsedilmiştir. Malzeme karakterizasyon testlerinden elde edilen malzeme özellikleri kullanılarak, sonlu elemanlar yöntemiyle farklı delik çaplarındaki tek delikli numuneler için gerilme konsantrasyon faktörleri incelenmiştir. Daha sonra tek delikli numuneler için gerçekleştirilen çekme testleri anlatılmıştır. Son olarak da tek delikli numunelerin çekme yükü altındaki dayanımları, önceki bölümlerde bahsedilen PSC yöntemiyle tahmin edilmiştir.

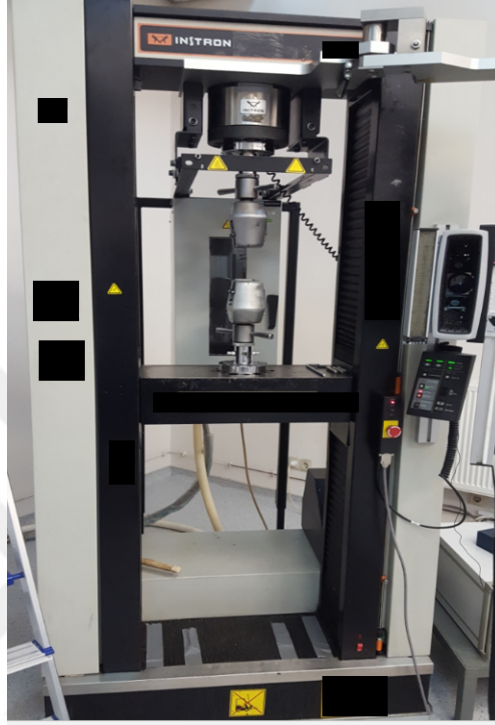
4.1 Tek Delikli Numuneler İçin Malzeme Karakterizasyon Testleri

Bu bölümde bahsedilen test çalışmalarında kullanılmak üzere karbon/epoksi tek yönlü kompozit malzeme kullanılmıştır. Kullanılan kompozit malzemenin ürün kodu "MTP H 510 CFA 200 12 UD RC4"dir. Bu malzeme çifti için üreticinin tavsiyesiyle gerçekleştirilmesi gereken kür döngüsü, 2 saat 80°C ardından 1 saat 150°C'dir. Kürleme döngüsü boyunca 7 bar basınç uygulanmalıdır. Soğutma esnasında soğutma hızı 3°C/dk hızını aşmamalıdır. Tüm kompozit numuneler bu üretim parametrelerine göre CES İleri Kompozit ve Savunma Teknolojileri A.Ş.tarafından üretilmiştir. Bu koşullar altında gerçekleştirilen üretim sonrasında elde edilen numuneler için bir lamina kalınlığı yaklaşık olarak 0.26 mm olarak ölçülmüştür. Bir laminadaki hacimsel fiber oranı ise ASTM D3171 [43] standardına göre %58 olarak ölçülmüştür.

Üretilen katmanlı kompozit numunelerin mekanik davranışının incelenebilmesi için öncelikle malzeme karakterizasyon testleri gerçekleştirilmiştir. Bu malzeme karakterizasyon testlerinde malzemenin fiber yönü, matris yönü (fibere dik yön), kayma yönü (numune düzlemi) modülüs ve dayanımları bulunmuştur. Ayrıca numune düzlemi Poisson oranı bulunmuştur.

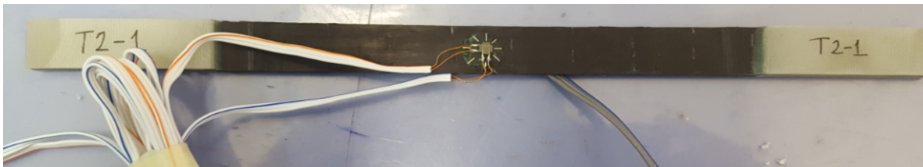
Malzeme karakterizasyon testleri fiber yönü ve fiber yönüne dik özellikler için ASTM D 3039/D 3039M-17 [44] ve kayma yönü özellikler için ASTM D 3518/3518M-18 [45] standartlarına göre gerçekleştirilmiştir.

Testler Şekil 4.1’de gösterilen 200 kN kapasiteli Instron çekme cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.1: Testlerde kullanılan 200 kN kapasiteli Instron çekme cihazı

Tekrarlanabilirlik göz önünde bulundurularak her malzeme özelliği testi için 5’er numune kullanılmıştır. Testler esnasında yük ölçümü Instron çekme cihazının yük hücresi tarafından gerçekleştirilmiştir. Gerinim ölçümleri ise TML marka FCA-3-350-11-3LT kodlu 2 eksenli gerinimölçerler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Gerinimölçerlerin numune üzerine yerleşimi Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2: Numune üzerine gerinimölçer yerleşimi

Gerinim ölçümleri için kullanılan veri toplama sistemi ESAM veri toplama sistemidir. ESAM veri toplama sistemi ve veri işleme bilgisayarı Şekil 4.3’de gösterilmiştir. Veri toplama hızı saniyede 1000 veri olacak şekilde ayarlanmıştır.

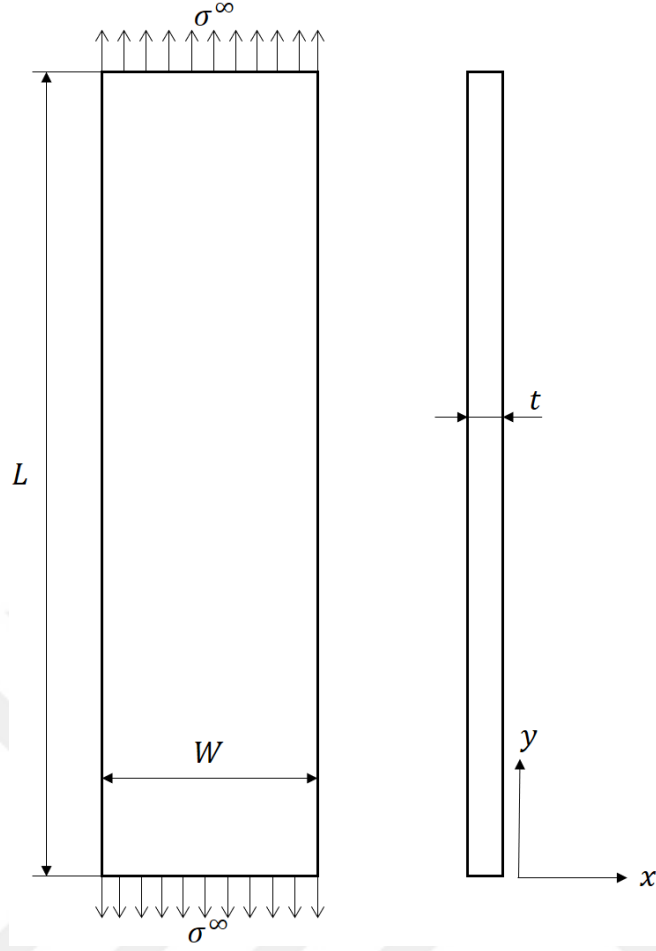


Şekil 4.3: ESAM veri toplama sistemi ve veri işleme bilgisayarı

Malzeme karakterizasyon testlerinde kullanılan numnelere ait geometrik bilgiler Çizelge 4.1’de ve şematik gösterimleri Şekil 4.4’de gösterilmiştir. Çizelge 4.1 fiber yönü (Tip-2), matris yönü (Tip-3) ve kayma yönü (Tip-4) malzeme özellikleri için kullanılan numune bilgilerini göstermektedir.

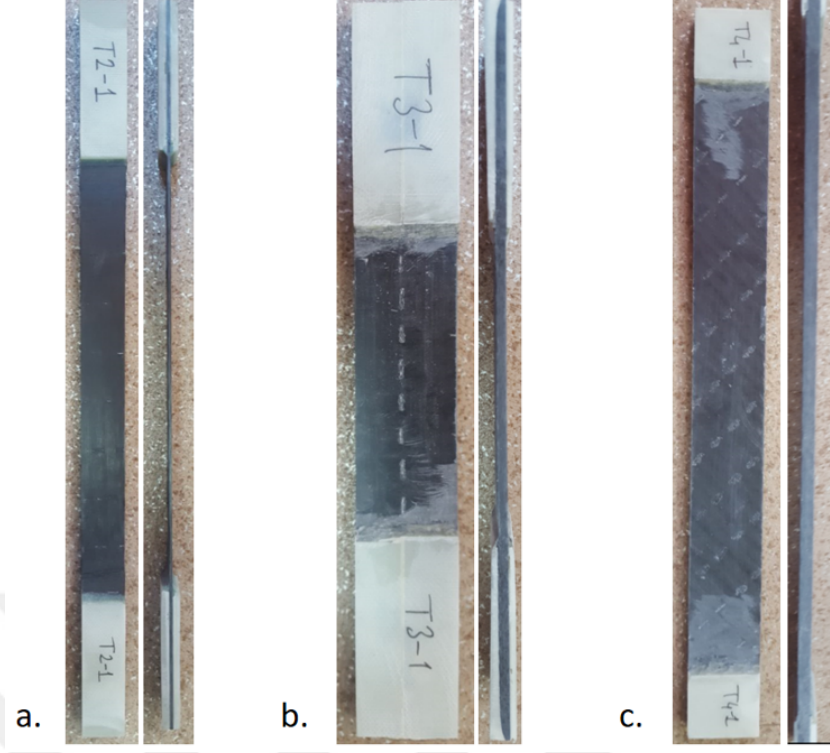
Çizelge 4.1: Malzeme karakterizasyon numuneleri için geometrik bilgiler.

Numune Tipi	En (W) [mm]	Boy (L) [mm]	Kalınlık (t) [mm]	Numune Sayısı	Katman Dizilimi
Tip-2	15	250	1.04	5	$(0)_4$
Tip-3	25	250	2.6	5	$(90)_{10}$
Tip-4	25	250	4.16	5	$(+45/-45)_{4s}$



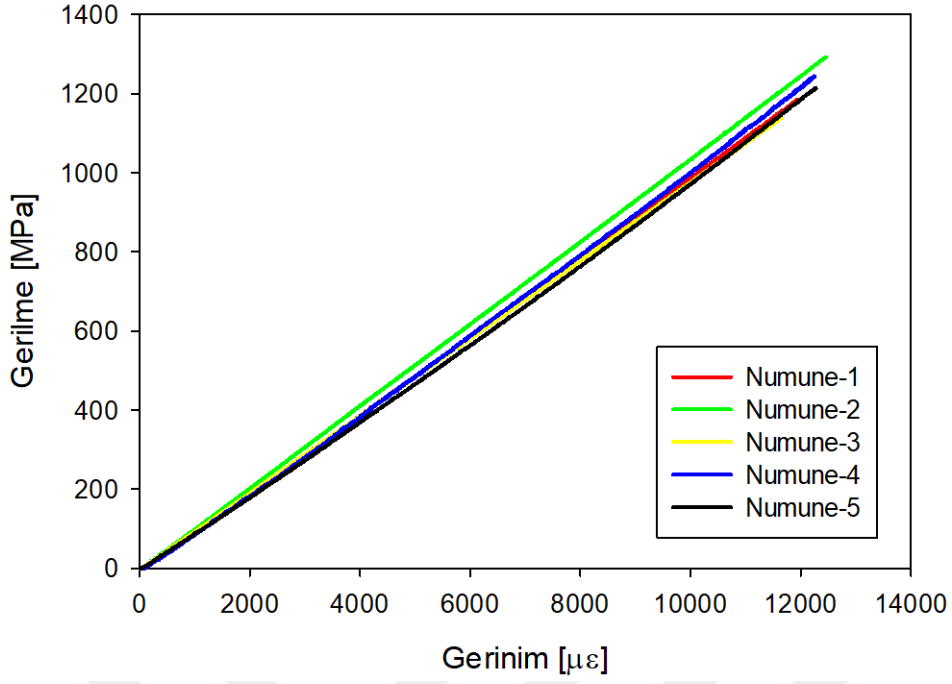
Şekil 4.4: Malzeme karakterizasyon numunelerinin şematik gösterimi

Bahsedilen malzeme özelliklerini elde etmek için kullanılan malzeme karakterizasyon numuneleri Şekil 4.5’de gösterilmiştir.



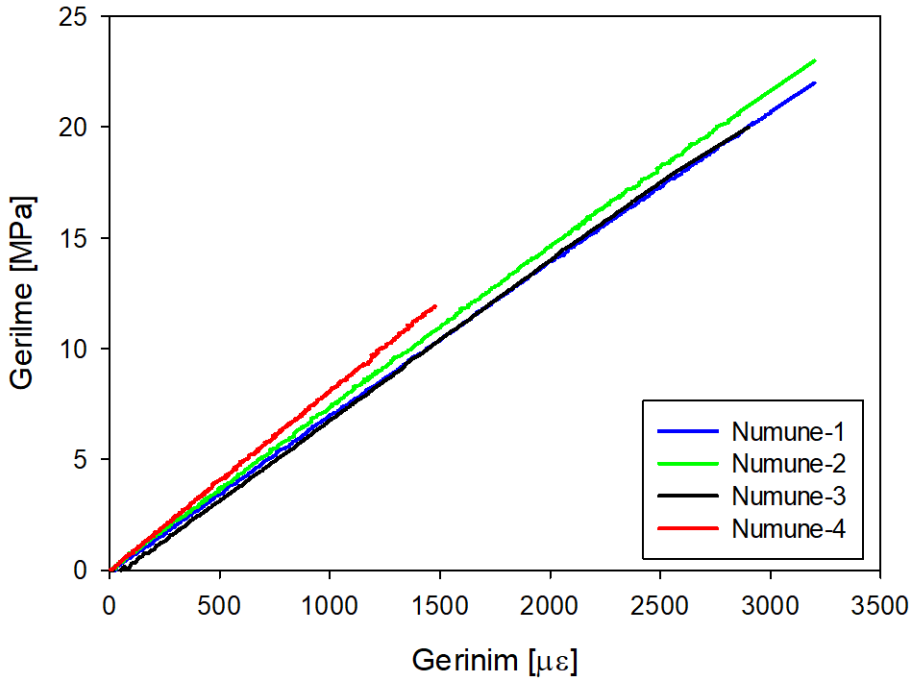
Şekil 4.5: a) Fiber yönü (Tip-2) numunesi b) Matris yönü (Tip-3) numunesi c) Kayma yönü (Tip-4) numunesi

Çekme testleri sonucunda beklenildiği gibi Tip-2 numunelerinde doğrusal bir davranış ve kırılma hasar modu gözlemlenmiştir. Testi gerçekleştirilen 5 numuneden de sağlıklı yük ve gerinim verisi alınmıştır. Tip-2 numunelerine ait gerilme-gerinim eğrileri Şekil 4.6'da verilmiştir.



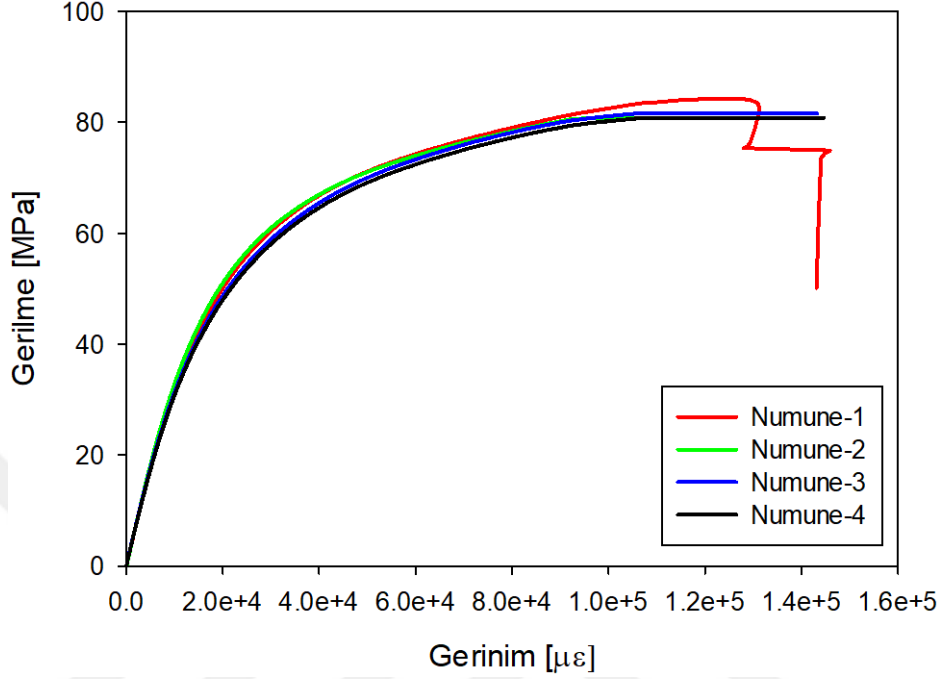
Şekil 4.6: Tip-2 numuneleri gerilme-gerinim eğrileri

Tip-3 numunelerinde de beklenildiği gibi doğrusal davranışlar görülmüş ve kırılma hasar modu gözlemlenmiştir. 4 numaralı numuneden test esnasında belirli bir yükten sonra gerinimölçerin yüzeyden ayrılması sebebiyle gerinim verisi alınamamıştır. Tip-3 numuneleri için gerilme-gerinim eğrileri Şekil 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4.7: Tip-3 numuneleri gerilme-gerinim eğrileri

Tip-4 numunelerinde ise yine beklenildiği gibi doğrusal bir bölge ve ardından yükün artmasıyla birlikte doğrusal olmayan bir davranış gözlemlenmiştir. Tip-4 numunelerine ait gerilme-gerinim eğrileri Şekil 4.8’de verilmiştir. Bir adet numuneden test esnasında kablo kopması sebebiyle veri alınamamıştır.



Şekil 4.8: Tip-4 numuneleri gerilme-gerinim eğrileri

Malzeme karakterizasyon testleri sonucunda bahsedilen standartlara göre hesaplanan lamina seviyesi mekanik özellikler Çizelge 4.2’de ve Çizelge 4.3’de verilmiştir. Burada verilen E_1 fiber yönü, E_2 matris yönü ve G_{12} kayma modülüsüdür. ν_{12} Poisson sayısıdır. X_f fiber yönü, Y_f matris yönü çekme dayanımı ve S ise kayma dayanımıdır.

Çizelge 4.2: Lamina direngenlik özellikleri.

Malzeme Özelliği	
E_1	100 GPa
E_2	7.4 GPa
G_{12}	3.8 GPa
ν_{12}	0.32

Çizelge 4.3: Lamina dayanım değerleri.

Mekanik Dayanım [MPa]	
X_t	1200
Y_t	23
S	73

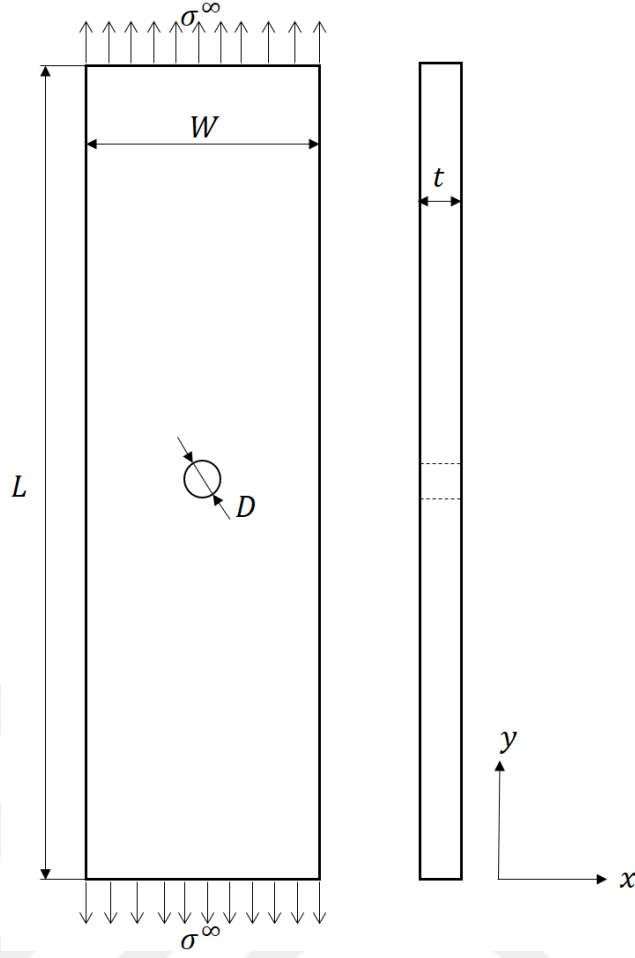
Böylece lamina malzeme özellikleri başarılı bir şekilde bulunmuştur.

4.2 Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Gerilme Konsantrasyonu İncelenmesi

Bu bölümde, malzeme karakterizasyon testlerinden elde edilen malzeme özellikleri kullanılarak delikli kompozit katman için sonlu elemanlar yöntemiyle (SEY) gerilme konsantrasyonu konusu incelenmiştir. Farklı plaka genişliği (W) / delik çapı (D) oranları analiz edilerek sonlu plaka - sonsuz plaka kavramları üzerinde durulmuştur. Analiz edilen numunelere ait geometrik bilgiler ve şematik gösterim Çizelge 4.4 ve Şekil 4.9'da verilmiştir.

Çizelge 4.4: Delikli numunelere ait geometrik bilgiler.

Numune Tipi	(W) [mm]	(L) [mm]	(t) [mm]	(D) [mm]	Katman Dizilimi
OHT-1	36	250	4.16	3	(45/90/ – 45/0) _{2s}
OHT-2	36	250	4.16	6	(45/90/ – 45/0) _{2s}
OHT-3	36	250	4.16	10	(45/90/ – 45/0) _{2s}
OHT-4	36	250	4.16	12	(45/90/ – 45/0) _{2s}

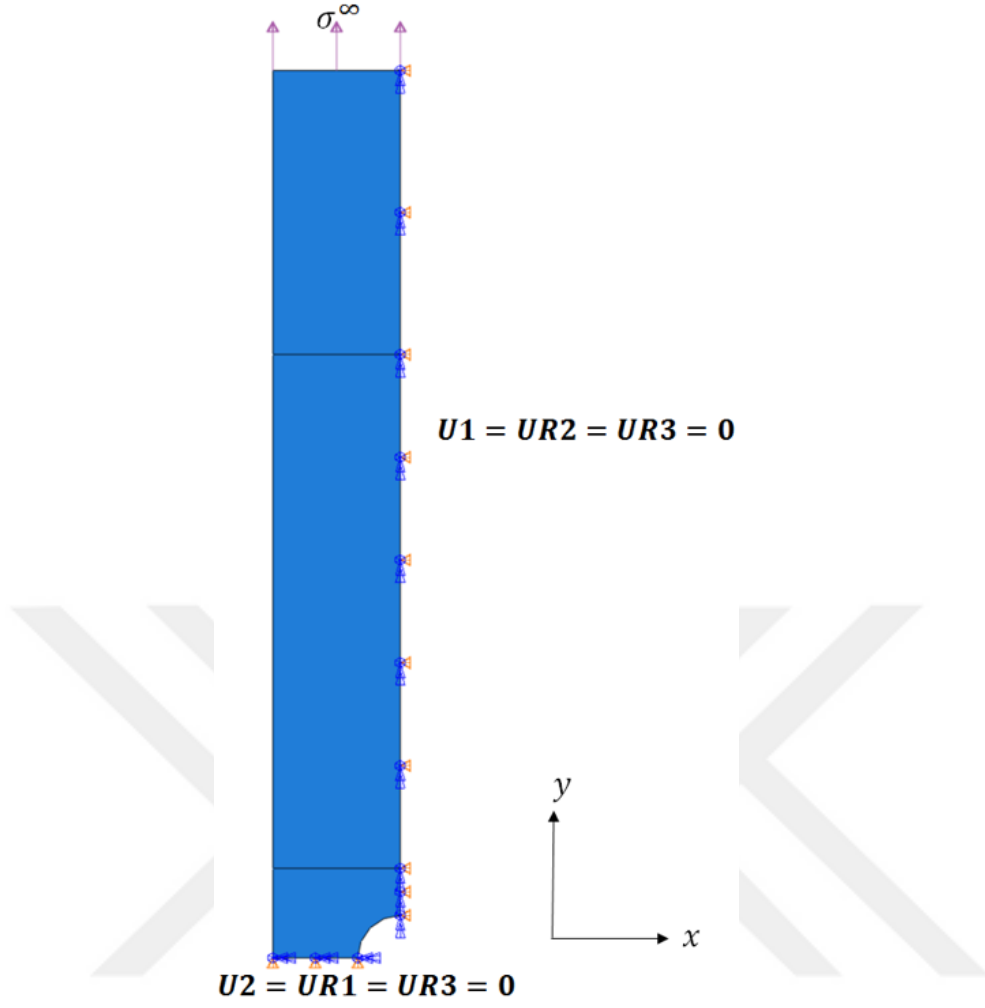


Şekil 4.9: Tek delikli numune şematik gösterimi

Dolayısıyla malzeme, katman dizilimi, lamina açıları, numune boyu ve genişliği sabit kalacak şekilde delik çapının artırılmasıyla gerilme konsantrasyonu faktörünün nasıl etkilendiği incelenmiştir.

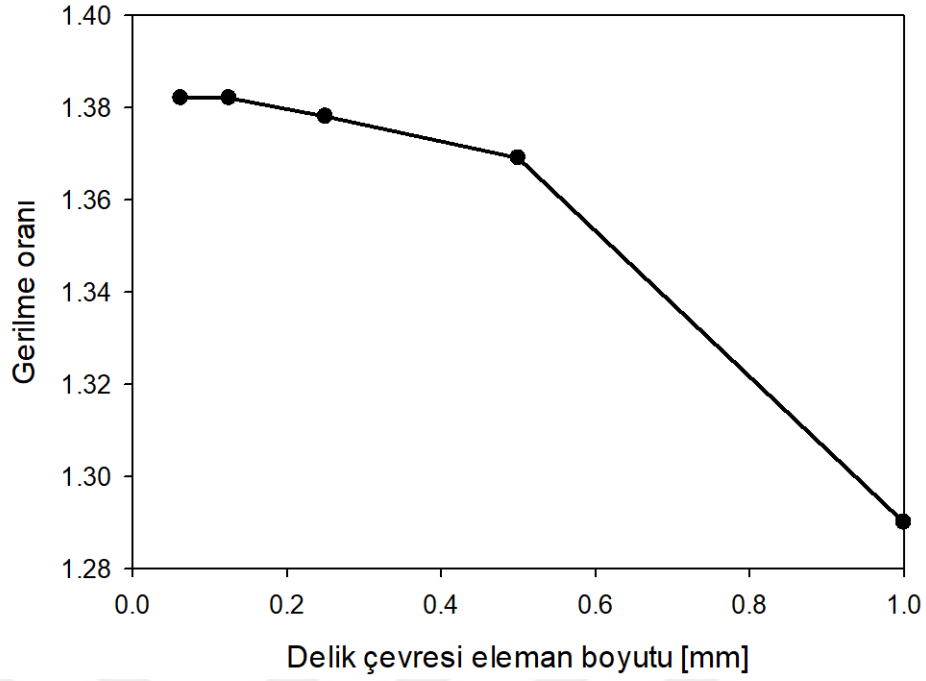
4.2.1 Sonlu elemanlar modeli

Sonlu elemanlar analizleri Abaqus 2016 [46] yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analizlerde tam integrasyon sonlu-membran-gerinim kabuk S4 elemanı kullanılmıştır. Çizelge 4.4'den de görüleceği üzere katman dizilimi dengeli ve simetrik olduğundan uygun simetrik sınır koşulları uygulanarak çeyrek modelleme yeterli görülmüştür. Böylece modelleme ve analizin hesap süresi azaltılmıştır. Sınır koşulları ve yükleme yönü Şekil 4.10'da gösterilmiştir.



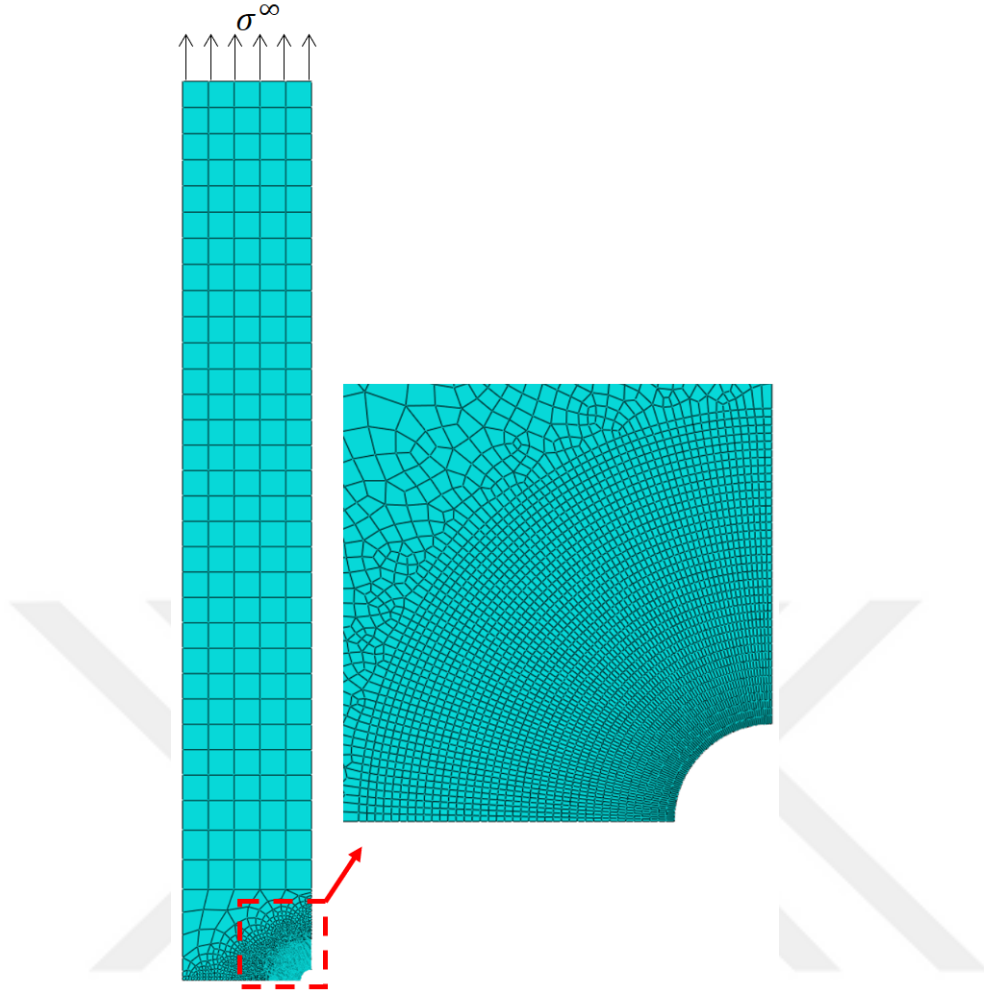
Şekil 4.10: Sınır koşulları ve yükleme

Delik kenarında yüksek gerilme gradyanı beklendiğinden dolayı, delik çevresinde çok yoğun, delikten uzak bölgelerde az yoğun eleman ağ yapısı kullanılmıştır. Uygun eleman ağ yapısı belirlemek için eleman sayısı yakınsaması çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, yük değeri değiştirilmeden, delik çevresindeki eleman sayısı değiştirilerek farklı analizler koşturulmuş ve en uygun eleman sayısına ulaşılması hedeflenmiştir. Bu çalışma OHT-1 geometrisi üzerinde gerçekleştirilmiştir.



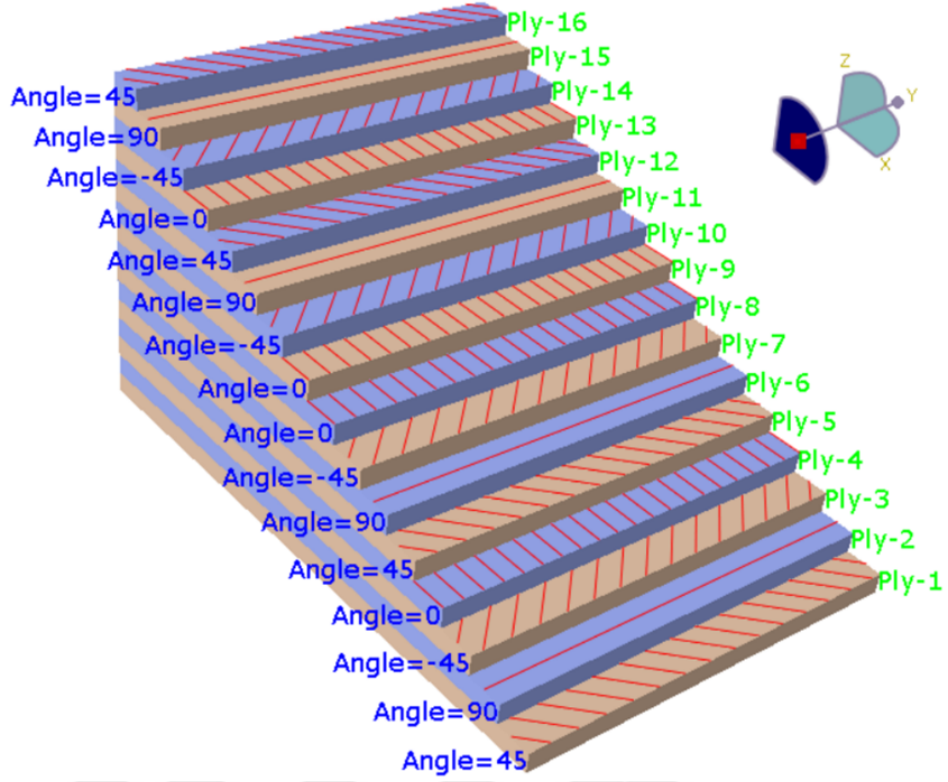
Şekil 4.11: Eleman boyutu - Delik kenarı ortalama çekme yönü katman gerilmesi eğrisi

Ağ eleman sayısı yakınsama çalışması Şekil 4.11’de gösterilmiştir. Bu çalışmada delik çevresindeki çekme yönü ortalama katman gerilme değeri, yüke bölünerek Y ekseninde görülen gerilme oranı bulunmuştur. Yani buradaki gerilme oranı, delik çevresindeki her bir noktadaki katman çekme yönü gerilme değerinin, uygulanan yüke göre normalize edilmiş halidir. Ağ eleman boyutu küçüldükçe bu değer artmış ve ağ eleman boyutu 0.125 mm olduktan sonra değişiklik göstermemiştir. Dolayısıyla delik çevresi eleman boyutu olarak 0.125 mm değeri belirlenmiştir. Bu şekilde oluşturulan modelde 3233 eleman ve 3398 düğüm noktası bulunmaktadır. Diğer tipteki geometrilerde de benzer şekilde eleman sayısı ve düğüm noktası sayısı bulunmaktadır. Ağ yapısı Şekil 4.12’de gösterilmiştir.



Şekil 4.12: Ağ yapısı görünümü

Malzeme karakterizasyon testlerinden elde edilen lamina seviyesi mekanik özellikler sonlu elemanlar modelinde her bir laminaya atanmıştır. Her bir lamina kendi açı oryantasyonunda verilen mekanik özelliklerle modellenmiştir. Böylece teorik altyapı bölümünde bahsedilen klasik katman teorisine uygun olarak sonlu elemanlar yöntemiyle her bir lamina için gerilme-gerinim değerleri bulunmuştur. Her bir laminanın kendi açısıyla üst üste konularak oluşturulan sonlu elemanlar modeli Şekil 4.13’de gösterilmiştir.



Şekil 4.13: Kompozit katman modeli

4.2.2 Gerilme konsantrasyonu faktörü (GKF) incelenmesi

Modellenen delikli kompozit model kullanılarak her bir lamina için delik çevresi GKF dağılımı incelenmiştir. Her bir lamina için GKF değeri;

$$K^{lamina} = \frac{\sigma_y^{i,lamina}}{\sigma_{y,nominal}^{i,lamina}} \quad (4.1)$$

denklemlerle hesaplanmıştır. Burada, K^{lamina} belirtilen lamina için gerilme konsantrasyonu faktörü, $\sigma_y^{i,lamina}$ belirtilen lamina için çekme yönündeki herhangi bir noktadaki gerilme değeri ve $\sigma_{y,nominal}^{i,lamina}$ belirtilen lamina için delikten yeteri kadar uzaklıktaki nominal gerilme değeridir. Böylece her bir lamina için, lamina başına düşen gerilme değeri kullanılarak maksimum GKF hesaplanmış olunur. Katmanın GKF hesabı için ise;

$$K^{katman} = \frac{\sigma_{y,maksimum}^{katman}}{\sigma_{y,nominal}^{katman}} \quad (4.2)$$

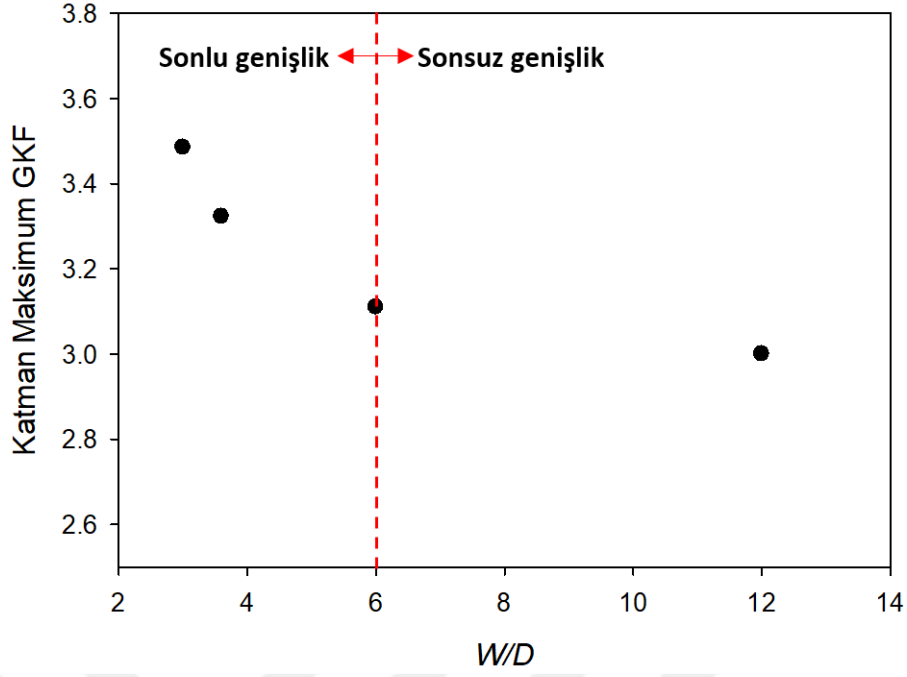
denklemleri kullanılmıştır. Burada, K^{katman} belirtilen katman için gerilme konsantrasyonu faktörü, σ_y^{katman} katman için herhangi bir noktadaki çekme yönü ortalama gerilme değeri ve $\sigma_{y,nominal}^{katman}$ katman için delikten yeteri kadar uzaklıktaki nominal çekme yönü ortalama gerilme değeridir.

Farklı genişlik/delik çapı (W/D) oranlarına sahip geometriler için delik kenarındaki katman maksimum GKF değerleri Şekil 4.14'de gösterilmiştir. Bu grafikten de anlaşılacağı üzere W/D oranının 6 ve 6'dan büyük olması durumunda katmanda görülen maksimum GKF değeri yaklaşık 3 iken, W/D oranının azalmasıyla maksimum katman GKF değerinde artış başlamaktadır. W/D oranının 6'dan 3'e düşmesiyle katman maksimum GKF değerinin yaklaşık %16.2 arttığı görülmüştür. W/D oranının belirli bir seviyeden sonra azalmasıyla katman maksimum GKF değerinin artış göstermesi, plakanın sonsuz genişlikten sonlu bir genişliğe geçtiğinin göstermektedir. Bu geçiş W/D oranı Şekil 4.14'de kırmızı kesik çizgilerle gösterilmiştir. Belirtilen W/D sınırından daha küçük W/D oranlarına inildiğinde plaka artık sonsuz değil, sonlu bir plaka gibi davranmaktadır. Böylece delik kenarındaki gerilmeler plaka serbest kenarından etkilenmekte ve artış göstermektedir. Bu şekilde de katmanın maksimum GKF değerinde artış gözlemlenmiştir.

Nümerik olarak farklı W/D oranındaki geometriler için bulunan maksimum GKF değerleri, Denlem.3.39-3.41'de verilen analitik sonuçlarla Çizelge 4.5'de karşılaştırılmıştır. Analiz ve Lekhnitskii [33] formülasyonu maksimum GKF sonuçları arasındaki fark W/D oranı azaldıkça artmaktadır. Çünkü Lekhnitskii formülasyonunda sonlu-sonsuz plaka kavramı etkisi bulunmamaktadır. Formülasyona Tan düzeltme faktörü [34] eklendiğinde analiz ve analitik çözüm arasındaki maksimum GKF farkının %1'in altına düştüğü görülmektedir. Böylece sonlu plaka ve sonsuz plaka terimleri arasındaki farklılık nümerik ve analitik olarak gösterilmiştir.

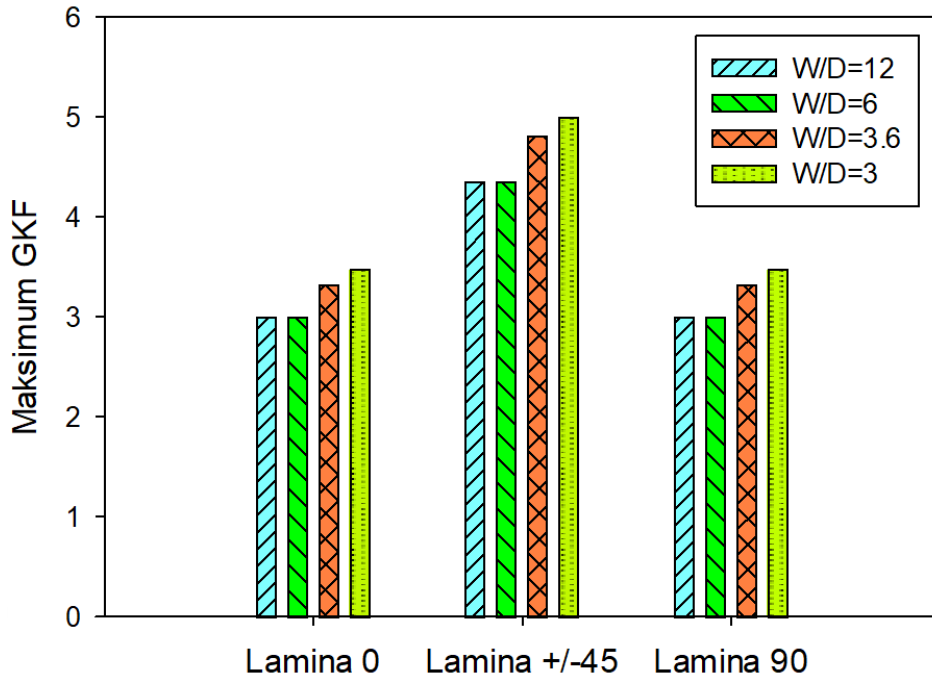
Çizelge 4.5: Max. GKF için Analiz ve Analitik hesap karşılaştırması.

W/D	Analiz GKF	Lekhnitskii GKF	Analiz-Lekhnitskii Farkı [%]	Tan GKF	Analiz-Tan Farkı [%]
12	3.03	3	1.00	3.02	0.33
6	3.11	3	3.67	3.09	0.65
3.6	3.32	3	10.67	3.29	0.91
3	3.48	3	16.00	3.45	0.87



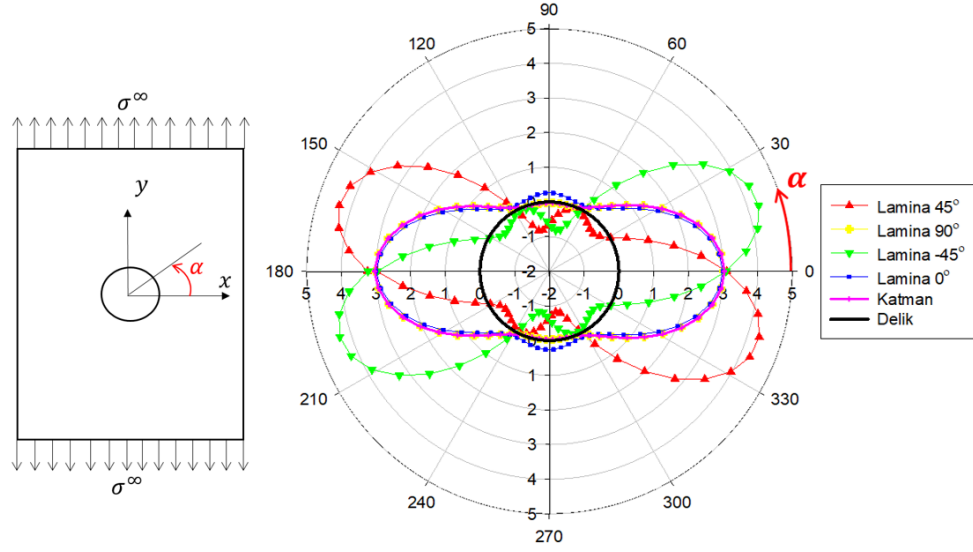
Şekil 4.14: Farklı W/D oranları için delik kenarındaki katman maksimum GKF değerleri

Katman için delik kenarındaki maksimum GKF incelenmesinin yanı sıra her bir lamina için delik kenarı maksimum GKF incelenmesi, laminaların davranışlarının anlaşılması açısından önemlidir. Şekil 4.15’de farklı W/D oranlarına sahip geometriler için çekme yükü altında her bir laminadaki delik kenarı maksimum GKF değerleri çizdirilmiştir. Bu grafiğe göre 0° ve 90° laminalarının maksimum GKF değerlerinin eşit olduğu görülmektedir. Katman GKF değerlerinde olduğu gibi 0° ve 90° laminalarında da W/D oranı 6 ve daha yüksek olduğunda maksimum GKF değerinin yaklaşık 3 olduğu görülmektedir. W/D oranının 6’nın altına düşmesiyle GKF değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. W/D oranının 6’dan 3’e düşmesiyle bu laminalardaki maksimum GKF değerleri %16.2 artış göstermiştir. $+45^\circ$ ve -45° laminalarının GKF değerlerinin ise W/D oranının 6 ve 6’dan büyük olduğu durumlarda 4.35 civarında olduğu görülmektedir. W/D oranının 6’dan 3’e düşürülmesiyle bu laminalardaki maksimum GKF değerlerinin %15 civarı artış gösterdiği tespit edilmiştir. Böylece katman maksimum GKF değerlerinde olduğu gibi her bir lamina için de delik çevresindeki maksimum GKF değerlerinin, plakanın sonsuz genişlikten sonlu genişliğe geçişiyle arttığı görülmüştür.



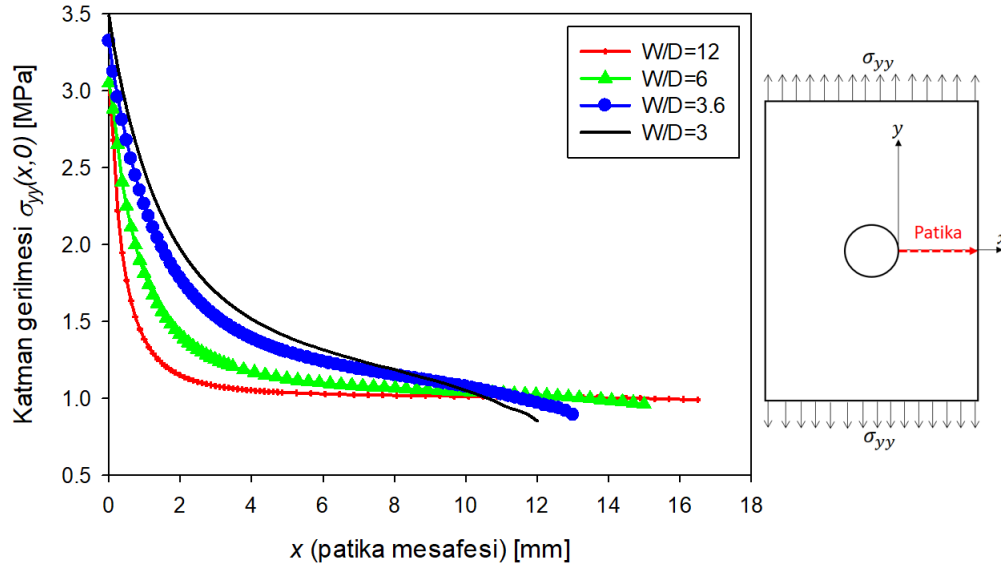
Şekil 4.15: Farklı W/D oranları için her bir lamina delik kenarındaki maksimum GKF değerleri

Delik kenarındaki maksimum GKF değeriyle birlikte, maksimum GKF'nin delik çevresinde açısız olarak hangi konumda olduğu da hasar mekanizmasını anlamak adına önemlidir. Şekil 4.16'da OHT-1 numunesi için her bir laminadaki ve katmanın ortalama GKF değerleri delik çevresi boyunca çizdirilmiştir. Çizilen polar grafikten görüleceği üzere 90° ve 0° laminaları benzer davranış göstermektedir. Bu laminalar açısız olarak 0° ve 90° konumunda maksimum GKF değerine ulaşmaktadırlar. Dolayısıyla bu laminalar için hasar başlangıcının bu noktalarda olması beklenmektedir. 45° laminasında maksimum GKF değeri yaklaşık 163° ve 343° noktalarında, -45° laminası için ise 197° ve 17° noktalarında olduğu görülmektedir. Ayrıca $\pm 45^\circ$ laminalarındaki maksimum GKF değerinin 0° ve 90° laminalarından daha fazla olduğu da görülmektedir. Delik çevresindeki katman maksimum GKF değerinin de 0° laminasıyla benzer davranış sergilediği görülmektedir. Çekme yönünde 0° laminasının en fazla direngenliğe sahip olmasından ötürü ve $\pm 45^\circ$ lamina GKF dağılımının x eksenine göre simetrik olmasından dolayı katmanın GKF dağılımının da 0° laminasına benzer davranış göstermesi beklenen bir durumdur.



Şekil 4.16: OHT-1 numunesi için her lamina ve katman için delik çevresindeki GKF dağılımı

Delik kenarındaki maksimum GKF değerine ek olarak, delik kenarından plaka serbest kenarına doğru, yükleme yönünde dik bir patika boyunca oluşturulan çekme yönü ortalama katman gerilme dağılımı da, kompozit plaka için dayanım anlamında yorum yapılabilmesine olanak sağlar. Şekil 4.17’de farklı W/D oranına sahip kompozit plakalar için aynı yükleme değeri altında gösterilen patika boyunca çekme yönü ortalama katman gerilme dağılımı çizdirilmiştir. Bu şekilden W/D oranı 6’nın altına düşünce delik dibindeki ortalama katman gerilme seviyesinin artış gösterdiği görülebilir. Ayrıca delik çapı arttıkça gösterilen patika boyunca gerilme seviyelerinin artış gösterdiği de görülmektedir. Patika boyunca görülen gerilme seviyelerindeki bu artış kompozit numunenin dayanımını azaltıcı etki yaratmaktadır.



Şekil 4.17: Farklı W/D oranları için verilen patika boyunca katman gerilme dağılımı

4.3 Kompozit Katman Çekme Testleri

Delikli kompozit plakalar için delik çevresindeki gerilme dağılımının ve GKF dağılımının incelenmesinden sonra belirtilen numuneler için çekme testlerine geçilmiştir. Çekme testleri gerçekleştirilen numunelere ait geometrik bilgiler Çizelge 4.6'da verilmiştir. Bu numunelerden NOHT numunesi delikli numunelerle aynı malzeme, katman dizilimi ve boyutlara sahip deliksiz numunelerdir. Teorik altyapı bölümünde bahsedilen PSC yönteminin kullanılabilmesi için deliksiz numune dayanımına da ihtiyaç olduğundan dolayı bu numuneler için de çekme testleri gerçekleştirilmiştir. OHT-2 numunesinin W ve D boyutları 0.5 ile ölçeklendirilerek OHT-6, 1.33 ile ölçeklendirilerek OHT-5 numuneleri elde edilmiştir. Böylece aynı W/D oranlarına fakat farklı geometrik ölçülere sahip numuneler test edilerek kompozit plakalar için boyut etkisi incelenecektir. Daha önce de belirtildiği gibi farklı W/D oranına sahip OHT-1, OHT-2, OHT-3 ve OHT-4 numuneleri de test edilerek farklı W/D oranının kompozit dayanımına olan etkisi incelenmiş olacaktır.

Çizelge 4.6: Çekme testi gerçekleştirilen numunelere ait geometrik bilgiler.

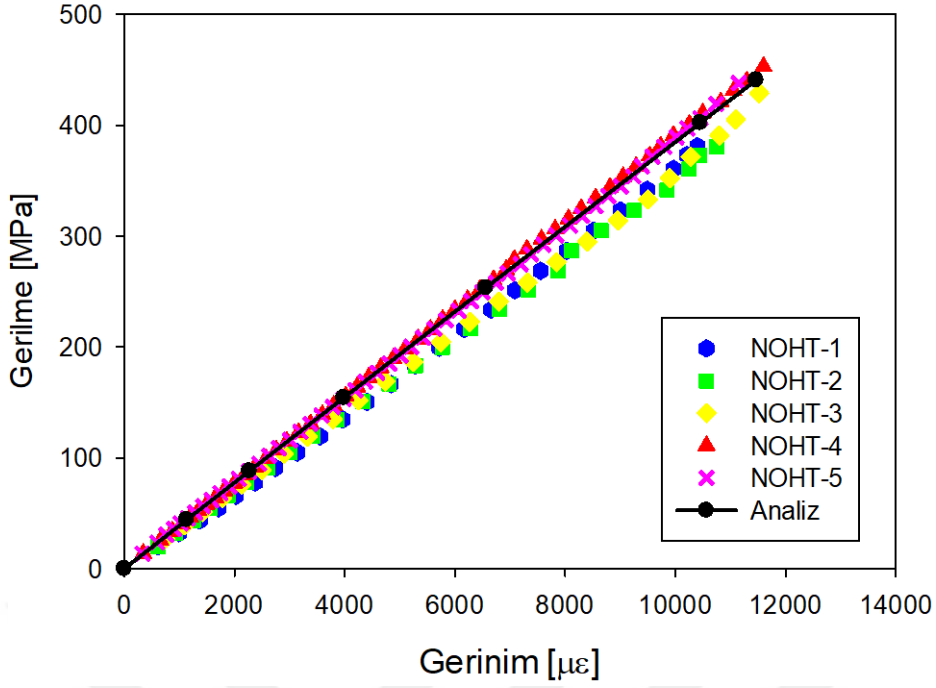
Numune Adı	(W) [mm]	(L) [mm]	(t) [mm]	(D) [mm]	Katman Dizilimi
NOHT	36	250	4.16	-	(45/90/ - 45/0) _{2s}
OHT-1	36	250	4.16	3	(45/90/ - 45/0) _{2s}
OHT-2	36	250	4.16	6	(45/90/ - 45/0) _{2s}
OHT-3	36	250	4.16	10	(45/90/ - 45/0) _{2s}
OHT-4	36	250	4.16	12	(45/90/ - 45/0) _{2s}
OHT-5	48	250	4.16	8	(45/90/ - 45/0) _{2s}
OHT-6	24	250	4.16	4	(45/90/ - 45/0) _{2s}

NOHT ve OHT numunelerinin çekme testlerinde de malzeme karakterizasyon numunelerinin testlerinde kullanılan test altyapısı kullanılmıştır. Tekrarlanabilirliği sağlamak için her numuneden 5'er adet çekme testi gerçekleştirilmiştir. Delikli kompozit plaka çekme testleri ASTM D5766/D5766M-11 [47] standardına göre gerçekleştirilmiştir.

4.3.1 NOHT numuneleri çekme testleri

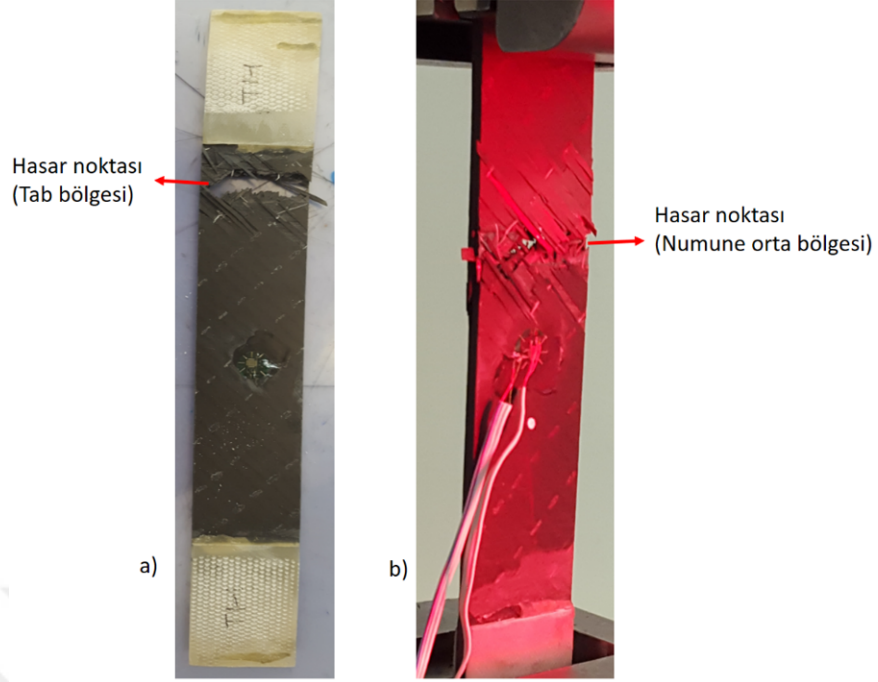
Malzeme karakterizasyon testlerinin ardından ilk olarak deliksiz numunelerin çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testlerden elde edilen dayanım sonuçları PSC yöntemiyle delikli numunelerin dayanımlarını tahmin edebilmek için kullanılmıştır. Ayrıca bu testten video ekstensometre yardımıyla gerinim verisi toplanmıştır. Böylece deliksiz numunelerden elde edilen gerinim verisi sonlu elemanlar modelinin rijitlik bakımından doğrulanması amacıyla da kullanılmıştır.

Şekil 4.18'de çekme testi gerçekleştirilen 5 adet NOHT numunesinin gerilme-gerinim grafiği verilmiştir. Grafikten de görüleceği üzere tüm numuneler yükleme boyunca doğrusal davranmıştır. Numunelerin davranışları da birbirlerine benzerdir. Sonuç olarak gerilme-gerinim grafiğine bakarak testlerin tutarlı bir şekilde tamamlandığı görülebilir. Ayrıca malzeme karakterizasyon testlerinden elde edilen malzeme verileri kullanılarak oluşturulan sonlu elemanlar modeli de NOHT numuneleriyle benzer gerilme-gerinim davranışı göstermektedir. Dolayısıyla malzeme karakterizasyon testleri, katman davranışı ve sonlu elemanlar modeli birbirleriyle uyum içerisindedir.



Şekil 4.18: NOHT numuneleri için test-analiz karşılaştırması

NOHT numuneleri testlerinde 2 numunenin çekme cihazı çenelerine yakın bölgelerden hasara uğradıkları tespit edilmiştir. Çekme testi esnasında numuneler tab bölgelerinde çekme cihazı çeneleri sıkılması suretiyle sıkıştırılmaktadır. Bu sıkıştırma işlemi numunelerin tab bölgelerinde gerilme konsantrasyonu yaratmakta ve bazı numuneler bu bölgelerden hasarlanmaktadır. Dolayısıyla bu numuneler gerçek dayanım yüklerine çıkamadan, tab bölgesinde oluşan gerilme konsantrasyonu sebebiyle erken hasara uğramaktadır. Benzer tespit Wang ve arkadaşları [48] tarafından da gözlemlenmiştir. Tab bölgesinden ve numune orta bölgesinden hasara uğrayan numunelerin test sonrası görüntüleri Şekil 4.19'da gösterilmiştir.



Şekil 4.19: NOHT numuneleri için hasar bölgeleri a) Tab bölgesi b) Orta bölge

NOHT dayanımı hesaplanırken tab bölgesinde oluşan gerilme konsantrasyonu durumu göz önünde bulundurulmuş ve tab bölgesinden hasara uğrayan 2 numunenin dayanımı NOHT dayanım hesabında ortalamaya katılmamıştır. NOHT numuneleri için test sonuçları Çizelge 4.7’de verilmiştir. Dolayısıyla deliksiz katman dayanımı (σ_0) 440 MPa olarak bulunmuştur. Bu değer delikli katman dayanımlarını PSC yöntemiyle bulmak için girdi olarak kullanılacaktır.

Çizelge 4.7: NOHT numuneleri test sonuçları.

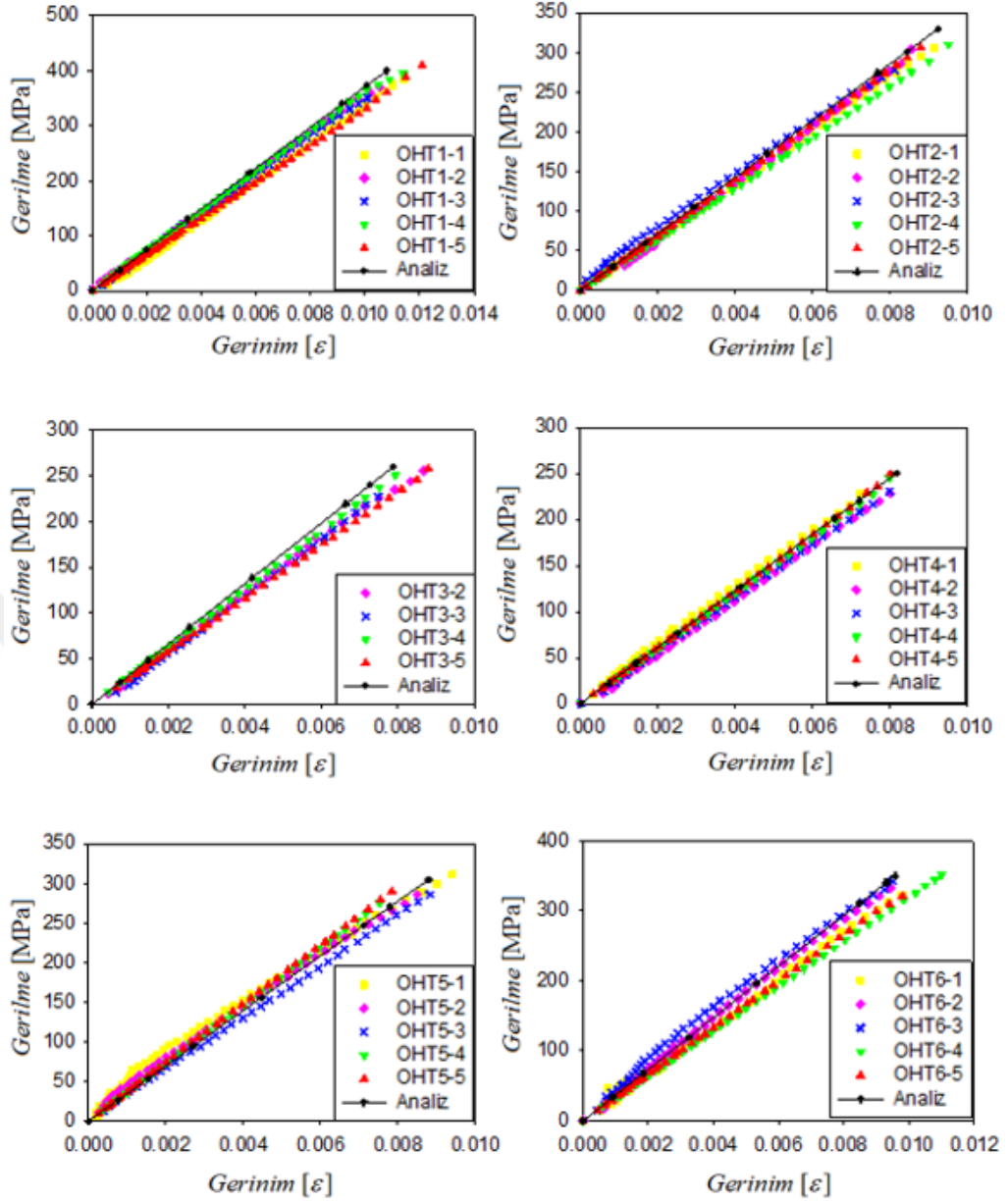
Numune No	Dayanım [MPa]
*NOHT-1	388
*NOHT-2	381
NOHT-3	429
NOHT-4	453
NOHT-5	438
Ortalama	440

*Ortalama hesabına katılmayan numuneler

4.3.2 OHT numuneleri testleri

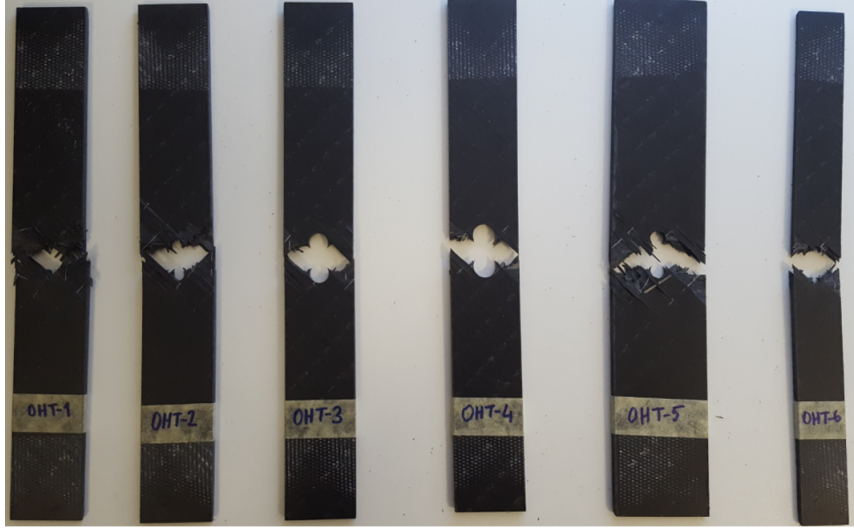
Delikli numune (OHT) testleri de malzeme karakterizasyon ve NOHT numuneleri testlerinde kullanılan sistemler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Daha önce Çizelge 4.6'da verilen OHT isimli numuneler test edilmiştir. Tekrarlanabilirliği sağlamak adına her numune tipinden 5 adet çekme testi gerçekleştirilmiştir.

Her bir numune çekme testi için elde edilen gerilme-gerinim grafikleri analiz sonuçlarıyla karşılaştırmalı olarak Şekil 4.20'de verilmiştir. Şekil 4.20'ye göre tüm numune tipleri tüm tekrarlı testlerde benzer ve doğrusal bir davranış göstermiştir. Bu grafiklere göre numunelerin kırılma fiber hasarı sergiledikleri sonucu çıkarılabilir. Çünkü yük eğrisinden herhangi bir doğrusal olmayan davranış ya da belirli noktalarda ani düşüşler gözlemlenmemiştir. Numuneler maksimum yüklerine kadar çıkıp daha sonra ani kırılma fiber hasarına uğramışlardır. Test sonrasında hasara uğramış numuneler de incelendiğinde kırılma fiber hasar modu gözlemlenmiştir. Ayrıca analiz sonuçlarından elde edilen gerilme-gerinim eğrilerinin de beklenildiği gibi test sonuçlarıyla uyumlu oldukları görülmüştür (Şekil 4.20).



Şekil 4.20: OHT numuneleri için test-analiz karşılaştırması

Her numune tipinden birer adet test sonrası görüntüsü Şekil 4.21’de verilmiştir. Test sonrası hasara uğramış numunelere bakıldığında kırılğan fiber hasar tipinin tüm numunelerde olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum da gerilme-gerinim grafiklerini doğrulamaktadır. Numunelerde herhangi bir delaminasyon ya da matris ağırlıklı bir hasar tipi görülmemektedir. Tüm numunelerin hedeflendiği gibi delik çevresinden kırılğan fiber hasarına uğradıkları gözlemlenmiştir. Böylelikle OHT numunelerinin testleri başarıyla tamamlanmıştır.



Şekil 4.21: OHT numuneleri için test sonrası hasar görüntüsü

OHT numuneleri için testler sonrası elde edilen ortalama dayanımlar Çizelge 4.8’de özetlenmiştir.

Çizelge 4.8: OHT numuneleri test sonuçları.

Numune No	OHT-1 [MPa]	OHT-2 [MPa]	OHT-3 [MPa]	OHT-4 [MPa]	OHT-5 [MPa]	OHT-6 [MPa]
1	386.9	314.2	253.0	228.9	310.7	323.6
2	373.5	304.2	256.3	228.5	286.4	332.7
3	353.7	288.3	228.9	230.5	283.5	342.2
4	395.9	314.2	249.3	245.3	275.2	351.2
5	410.1	309.9	258.3	249.1	292.5	320.9
Ortalama	384	306.1	249.2	236.5	289.7	334.1
St.Sapma	21.6	10.8	11.8	9.9	13.3	12.7
% CV	5.6	3.5	4.8	4.2	4.6	3.8

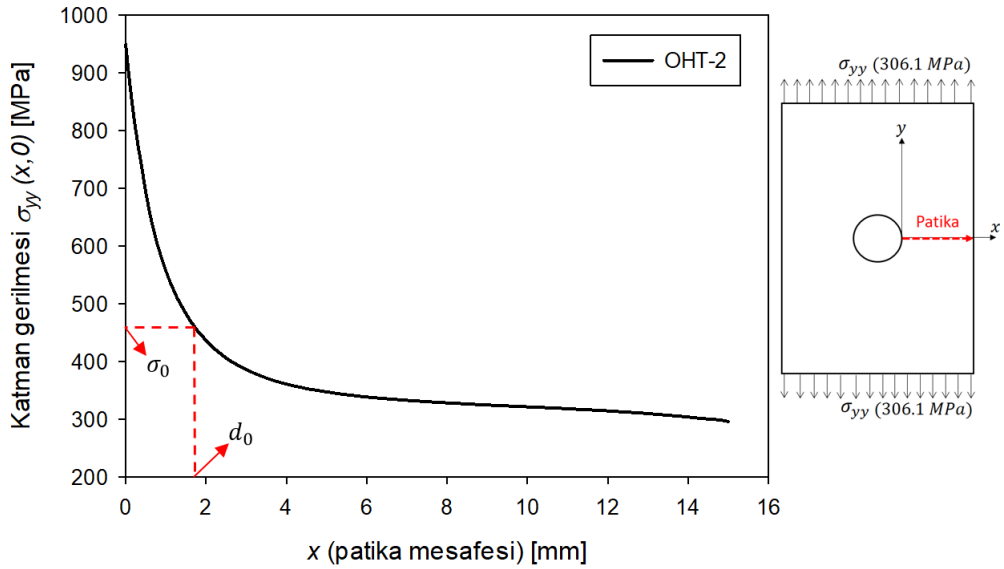
Test sonuçlarına bakıldığında her OHT tipinin kendi içerisinde gerçekleştirilen testlerde düşük varyasyon katsayısına sahip olduğu görülmektedir. Böylece testlerin tekrarlanabilirlik açısından uygun görülmüştür.

4.4 OHT Numuneleri İçin PSC Yönteminin Uygulanması

OHT çekme testlerinin ardından, bu numunelerin dayanımlarını tahmin edebilmek için PSC yöntemi uygulanmıştır. Teorik altyapı bölümünde de açıklandığı üzere PSC yönteminin uygulanabilmesi için aynı malzeme ve katman dizilimindeki deliksiz numune dayanımına ve bir adet referans delikli numune dayanımına ihtiyaç vardır.

Bu girdilerle farklı delik çapı ya da genişlikteki diğer delikli numunelerin dayanımları tahmin edilebilir. Çalışmada referans delikli numune olarak OHT-2 numunesi seçilmiştir. Dolayısıyla NOHT ve OHT-2 dayanımları kullanılarak diğer tipteki OHT numunelerinin dayanımları tahmin edilmiştir.

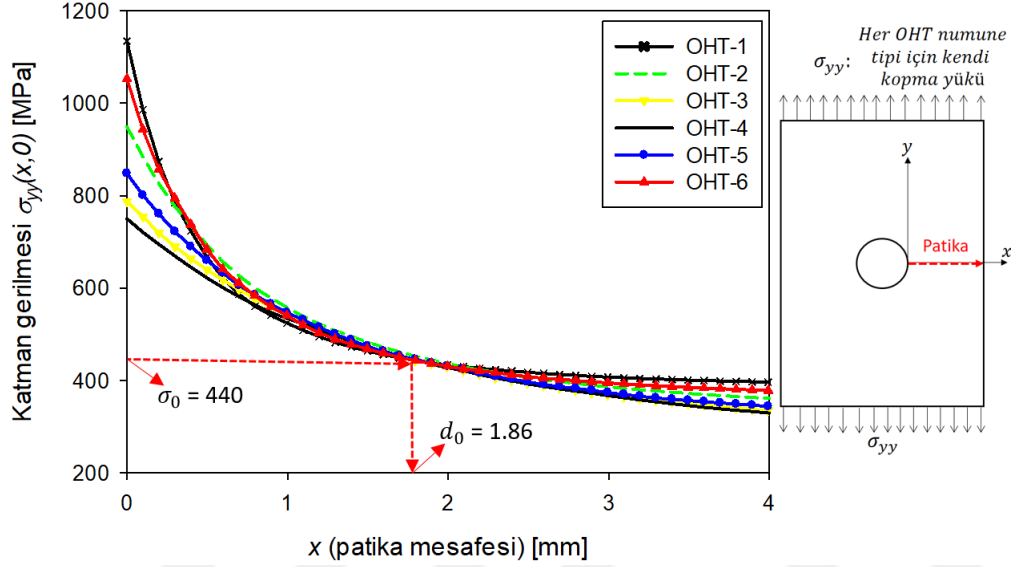
OHT-2 numunesi için çekme testlerinden elde edilen ortalama dayanım yükü altında sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analiz sonucuyla Şekil 4.22’de gösterilen delik kenarından numune serbest kenarına doğru uzanan patika boyunca çekme yönü ortalama katman gerilmesi çizdirilmiştir. PSC yöntemi gereği, bu gerilme dağılımının NOHT dayanımına (σ_0) denk gelen y mesafesi karakteristik uzunluk (d_0) olarak tanımlanmaktadır. Yapılan çalışmada $\sigma_0 = 440$ MPa ve $d_0 = 1.86$ mm olarak bulunmuştur. Bu karakteristik uzunluk kullanılarak aynı şekilde NOHT dayanımını verecek gerilme dağılımları sonlu elemanlar yöntemiyle bulunacak ve diğer tipteki OHT numunelerinin dayanımları tahmin edilmiş olacaktır.



Şekil 4.22: OHT-2 için kopma yükü altında verilen patika için ortalama katman gerilmesi dağılımı

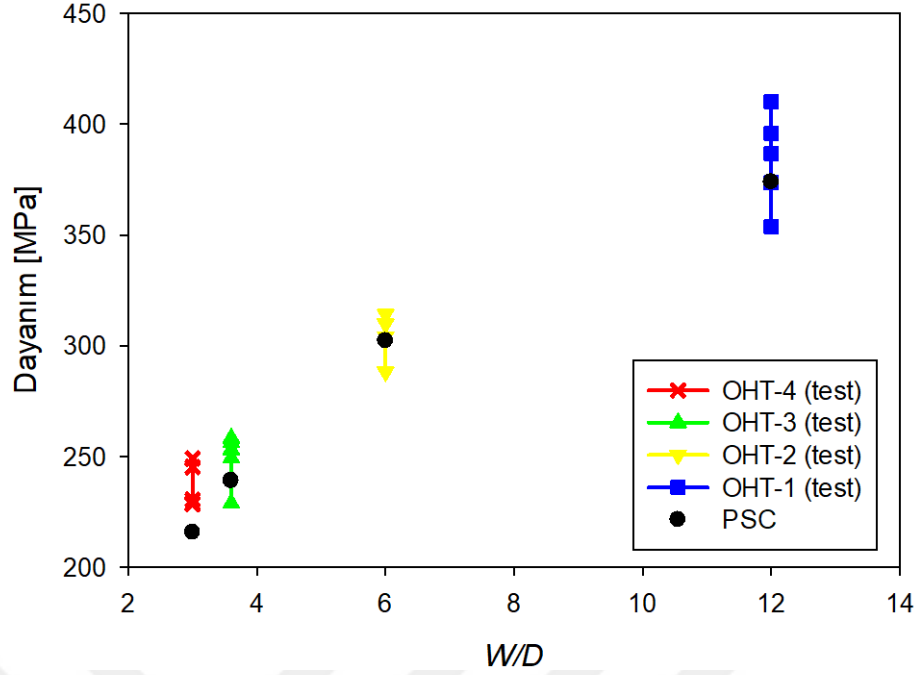
Böylece NOHT ve OHT-2 numuneleri kullanılarak (σ_0) ve (d_0) değerleri bulunmuştur. Daha sonra sonlu elemanlar analizleriyle diğer OHT numunelerine delik kenarından karakteristik uzunluk kadar uzaktaki bir noktada NOHT dayanımına eşit olan ortalama katman gerilme değeri bulununcaya kadar yük verilmiştir. Delik kenarından karakteristik uzunluk kadar uzaktaki noktada okunan ortalama katman gerilme değeri NOHT dayanımına eşit olduğundaki yükleme değeri bu OHT numuneleri için kopma dayanımıdır. Dolayısıyla tüm OHT numuneleri için kopma yükleri altında

gerçekleştirilen analizlerde, delik kenarından numune serbest kenarına doğru çizilen bir patika boyunca oluşan ortalama katman gerilme eğrileri bu noktada kesişimlidir. Şekil 4.23’de gösterildiği gibi, farklı OHT tiplerindeki numunelere delik kenarından karakteristik uzunluk kadar uzaklıktaki bir noktada ortalama katman gerilmesinin NOHT dayanımına eşit olacağı yükler verilmiştir. Dolayısıyla bu yüklemeler için farklı tipteki OHT numuneleri aynı noktada kesişim göstermektedir. Kesişim noktası kırmızı kesikli çizgilerle gösterilmiştir.



Şekil 4.23: OHT numuneleri için PSC yöntemi uygulanması sonucu verilen patika boyunca oluşan ortalama katman gerilmesi dağılımı

Şekil 4.24’de farklı W/D oranına sahip OHT numunelerinin test sonuçları ve PSC yöntemiyle tahmin edilen dayanımları karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Test sonuçlarına göre delik çapının 4 kat azalmasının kompozit katman dayanımını %62.4 arttırdığı görülmüştür. OHT-2 numunesi PSC yönteminin kullanılabilmesi için referans olarak seçilen numune olup, diğer tipteki OHT numune dayanımlarının başarılı bir şekilde tahmin edildiği görülmektedir. Fakat W/D oranının en düşük değer olan 3 seviyesine inildiğinde PSC tahmini ortalamanın altında kalmaktadır. Bu numunelerin delik çapı plaka genişliğine göre büyük olduğundan dolayı, delik kenarındaki ortalama katman gerilme dağılımı serbest kenardan etkilenmekte ve bu durumun PSC dayanım tahminini olumsuz yönde etkilediği değerlendirilmiştir.



Şekil 4.24: Farklı W/D oranlarındaki OHT numunelerinin dayanım karşılaştırması (Test-PSC)

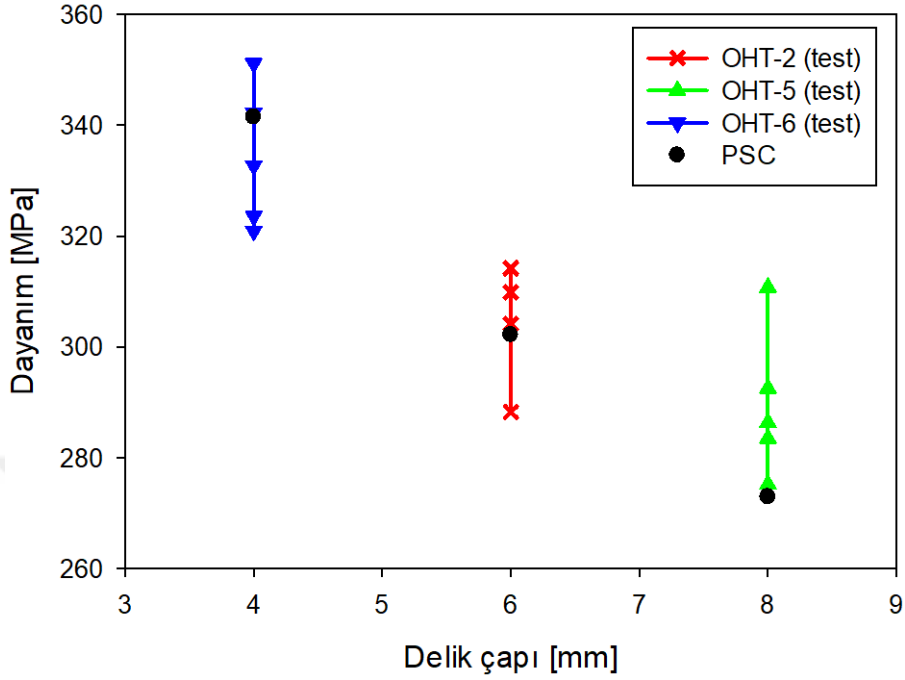
PSC tahminleri ve test sonuçlarının numerik olarak karşılaştırması Çizelge 4.9'da verilmiştir. Tabloya göre PSC yönteminin en kötü %8.7 farkla test sonuçlarını başarıyla tahmin edebildiği görülmektedir.

Çizelge 4.9: Farklı W/D oranlarındaki OHT numunelerinin dayanım karşılaştırması (Test-PSC).

Numune Adı	Dayanım (Test) [MPa]	Dayanım (Analiz) [MPa]	Fark [%]
OHT-1	384	374	2.6
OHT-2	306.1	-	-
OHT-3	249.2	239	4.1
OHT-4	236.5	216	8.7

Şekil 4.25'de aynı W/D oranında fakat ölçeklendirilmiş delik çapı ve plaka genişliklerine sahip OHT numunelerinin test sonuçları ve PSC yöntemiyle tahmin edilen dayanımları karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Test sonuçlarına göre delik çapı ve numune genişliğinin 2 kat artırılmasının kompozit katman dayanımını ortalama %13.2 azalttığı görülmüştür. OHT-2 numunesi bu numuneler için de PSC yönteminin kullanılabilmesi için referans olarak seçilen numune olup, diğer tipteki OHT numune dayanımlarının başarılı bir şekilde tahmin edildiği görülmektedir. PSC

yönteminin geometrik boyutları daha küçük olan numunenin (OHT-6) dayanımını büyük olan numuneye (OHT-5) göre daha az bir hata farkıyla bulunabildiği görülmüştür.



Şekil 4.25: Aynı W/D oranında fakat farklı W ve D boyutlarındaki OHT numunelerinin dayanım karşılaştırması (Test-PSC)

PSC tahminleri ve test sonuçları aynı W/D oranındaki numuneler için numerik olarak karşılaştırmalı şekilde Çizelge 4.10'da verilmiştir. Tabloya göre PSC yönteminin en kötü %6.3 farkla test sonuçlarını başarıyla tahmin edebildiği görülmektedir.

Çizelge 4.10: Aynı W/D oranında fakat farklı boyutlardaki OHT numunelerinin dayanım karşılaştırması (Test-PSC).

Numune Adı	Dayanım (Test) [MPa]	Dayanım (Analiz) [MPa]	Fark [%]
OHT-2	384	-	-
OHT-5	289.7	271.4	6.3
OHT-6	334.1	341.5	2.2

5. ÇİFT DELİKLİ NUMUNELER İÇİN GERÇEKLEŞTİRİLEN TEST VE ANALİZ ÇALIŞMALARI

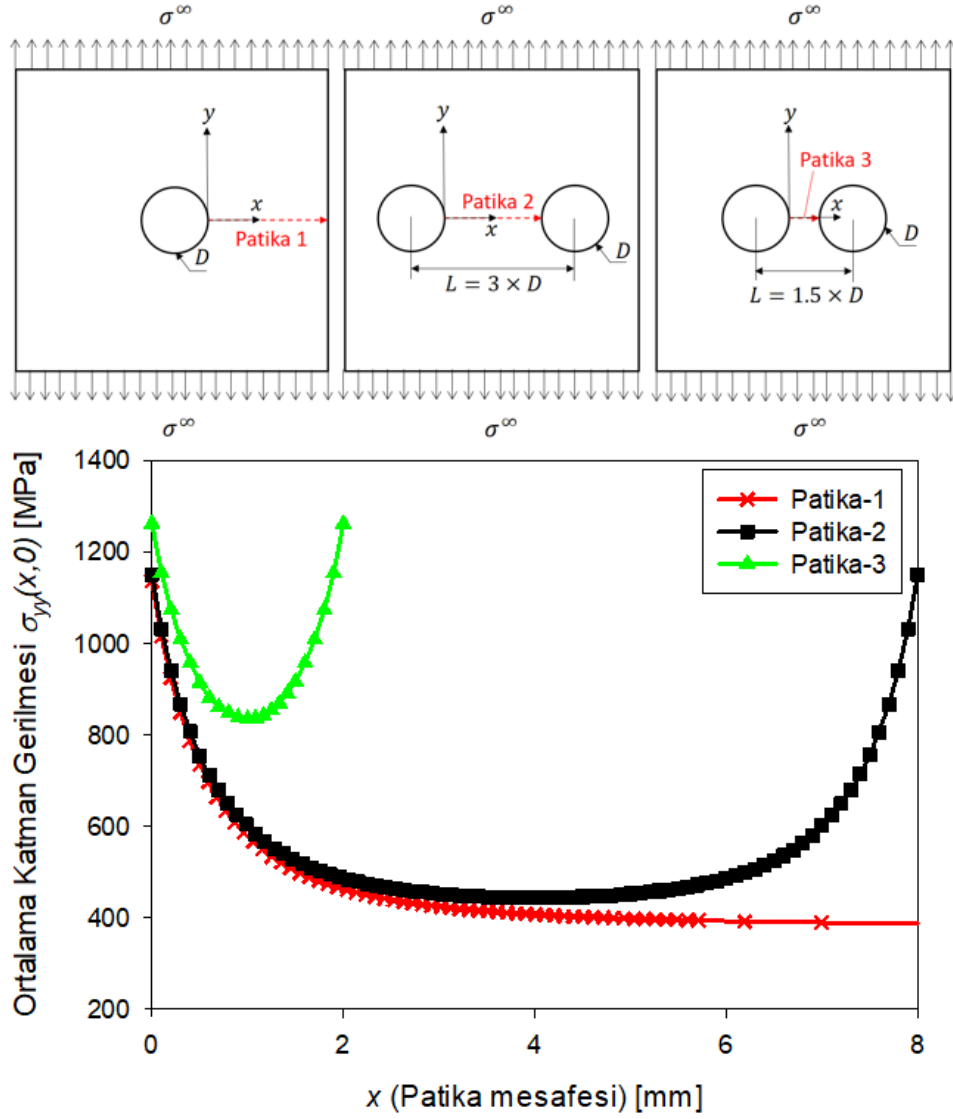
Bu bölümde çift delikli katmanlı kompozit numuneler için gerçekleştirilen test ve analiz çalışmalarından bahsedilmiştir. Çift delikli yapının özellikle incelenmesinin sebebi, delikler arasında etkileşim yaratılıp bu durumun gerilme konsantrasyonu ve dayanıma olan etkilerinin incelenmesidir. Dolayısıyla tez kapsamında incelenen çift delikli kompozit numuneler etkileşimli çift deliğe sahip numunelerdir. Bu bölümde de genel olarak, tek delikli numunelerde olduğu gibi gerilme konsantrasyonu ve dayanım konuları ele alınmıştır. Delikler çekme yönüne göre farklı oryantasyonlarda konumlandırılıp, konumlandırmanın delik etkileşimine olan etkisi gerilme konsantrasyonu ve dayanım özelinde irdelenmiştir. Bu bölümde, öncelikle incelenen çift delikli katmanlı kompozit numuneler malzeme ve geometrik yapıları itibariyle tanıtılmıştır. Aynı zamanda etkileşim terimi tanımlaması yapılmıştır. Daha sonra çift delikli katmanlı kompozit numuneler için farklı delik konumlandırmalarında gerilme konsantrasyonu konusu SEY ile numerik olarak incelenmiştir. Bu tip çift delikli kompozit yapılar için gerilme konsantrasyonunun analitik bir çözümü bulunmadığından, konu sadece numerik olarak incelenmiştir. Ardından etkileşimli çift delikli numuneler için PSC yönteminin uygulanabilirliği tartışılmıştır. PSC yönteminin delik etkileşimi sebebiyle bazı durumlarda uygulanamayacağı değerlendirilmiş ve bu durumlar için alternatif olarak genişletilmiş PSC yöntemi (EPSC) öne sürülmüştür. Son olarak, belirtilen çift delikli katmanlı kompozit numuneler için test çalışmaları ve PSC-EPSC yöntemleriyle bu numunelerin dayanım tahminleri yapılmıştır.

5.1 Problemin Tanıtılması

Çift delikli kompozit numunelerin oluşturulmasının temel amacı, delikler arasında etkileşim yaratarak bu durumun gerilme konsantrasyonu ve dayanıma olan etkilerini incelemektir. Dolayısıyla oluşturulacak geometrilerde bulunan deliklerin birbirleri ile etkileşim içerisinde olması istenmektedir.

Etkileşim, çekme yükü altında deliklerin etrafındaki gerilme dağılımlarının birbirlerinden etkilenmesi demektir. Ghezze ve arkadaşları [29], gerçekleştirdikleri çalışmada tek eksenli yükleme için iki delik merkezi arasındaki mesafenin, delik çapının 1.5 katına düşürülmesiyle deliklerin etkileşime gireceğini belirtmiştir. Ayrıca etkileşimin, delik merkezleri arası mesafenin delik çapının 3 katının altındaki bir değere düşürülmesiyle başlayacağını göstermişlerdir. Tez kapsamında üretilecek olan çift delikli katmanlı kompozit numunelerin geometrilerini belirlemeden önce, deliklerin etkileşimde olmalarından emin olmak için delikler arası mesafenin etkileşime olan etkisi numerik olarak incelenmiştir. Aynı yükleme miktarı altında, tek delikli, delik merkezleri arası mesafe delik çapının 3 katı ve 1.5 katı olan durumlar karşılaştırılmıştır. Tez çalışması boyunca çift delikli geometrilerin tümünde iki delik çapı da birbirine eşit tutulmuştur.

Şekil 5.1’de tek delikli ve farklı delik merkezi mesafelere sahip çift delikli katmanlı kompozit plakaların tek yönde çekme yüküne maruz kalmaları durumunda delik kenarında oluşan çekme yönü ortalama katman gerilmesi dağılımları verilmiştir. Deliklerin etkileşimde olabilmeleri için, bir delik kenarından diğer delik kenarına yükleme yönüne dik yönde çizilen bir patika boyunca oluşan ortalama katman gerilme dağılımının tek delikli duruma göre daha fazla olması gerekmektedir.

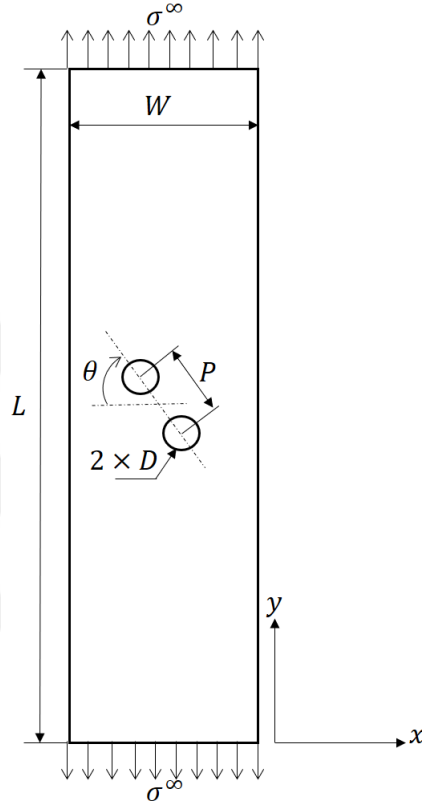


Şekil 5.1: Etkileşimli ve etkileşimsiz delikli durumlar için ortalama çekme yönü katman gerilmesi dağılımları

Şekil 5.1'den de görüleceği üzere iki delik merkezi arası mesafe bir delik çapının 1.5 katı olduğu durumda oluşan delik kenarı çekme yönü ortalama katman gerilme seviyesi (Patika-3) açık bir şekilde tek delikli duruma (Patika-1) göre daha yüksektir. Delik merkezleri arası mesafe delik çapının 3 katı olduğunda (Patika-2) ise delik kenarı çekme yönü ortalama katman gerilme dağılımı tek delikli durumla benzer seviyededir. Böylece çift delikli durum için Ghezzi ve arkadaşlarının [29] belirttiği gibi delik merkezleri arası mesafenin bir delik çapının 1.5 katı olduğu durumda deliklerin etkileşim halinde oldukları görülmüştür. Dolayısıyla tez kapsamında gerçekleştirilen çift delikli katmanlı kompozit plaka çalışmalarında delik merkezleri arası mesafe bir delik çapının 1.5 katı olması şeklinde planlanmıştır.

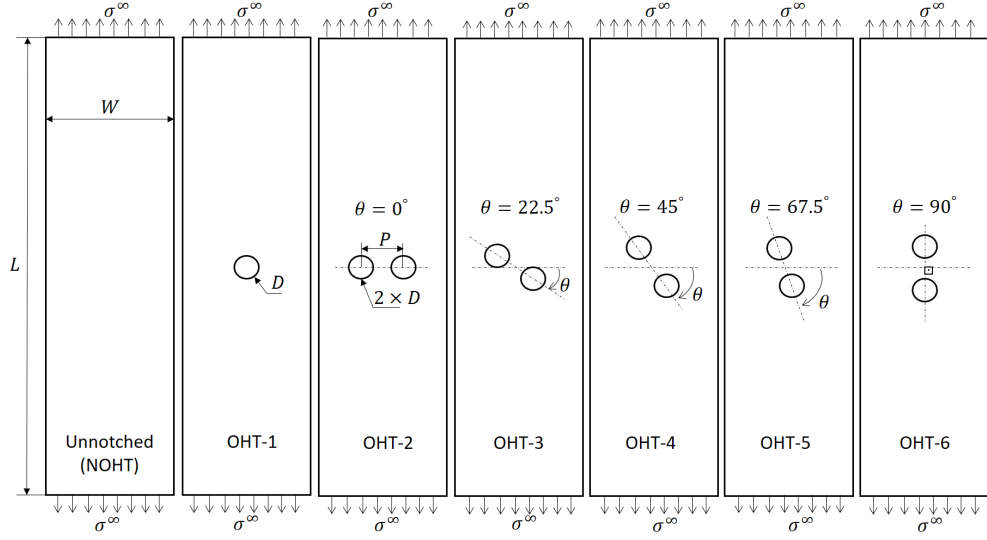
5.2 Numune Geometrileri

Tez kapsamında üzerinde çalışılan çift delikli katmanlı kompozit numuneler için şematik gösterim Şekil 5.2’de verilmiştir. Sabit delik çapındaki (D) ve delik merkezleri arası uzaklıktaki (P) katmanlı kompozit numunelerde delikler arası açı (θ) numune orta noktasından sayfa düzlemine dik eksen etrafında saat yönü pozitif olacak şekilde değiştirilerek farklı oryantasyondaki numuneler oluşturulmuştur.



Şekil 5.2: Çift delikli katmanlı kompozit numunelerin şematik görünümü

Tez çalışmasındaki bu bölümde sadece delikler arası etkileşim değil, farklı delik oryantasyonlarındaki gerilme durumu da analiz edilmiştir. Dolayısıyla iki delik farklı oryantasyonlarda konumlandırılarak bu durumun gerilme konsantrasyonu ve dayanıma olan etkileri incelenmiştir. Farklı delik oryantasyonundaki numuneler, deliklerin numune orta noktasından sayfa düzleminde dik eksen yönünde saat yönünde belirli açılarda döndürülmesiyle oluşturulmuşlardır. Toplamda 5 farklı oryantasyonda yerleştirilmiş numune tipleri kullanılmıştır. Deliksiz, tek delikli ve farklı oryantasyonlarda yerleştirilmiş çift delikli numunelerin geometrik gösterimleri ve isimlendirmeleri Şekil 5.3’de gösterilmiştir. Numunelere ait ayrıntılı bilgiler ise Çizelge 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.3: Deliksiz, tek delikli ve farklı oryantasyonlarda yerleştirilmiş çift delikli numuneler

Çizelge 5.1: Deliksiz, tek delikli ve farklı oryantasyonlarda yerleştirilmiş çift delikli numunelere ait bilgiler.

Numune Adı	(W) [mm]	(L) [mm]	(t) [mm]	(D) [mm]	(P) [mm]	(θ) [°]	Katman Dizilimi
NOHT	36	250	2.24	-	-	-	(45/90/ - 45/0) _s
OHT-1	36	250	2.24	4	-	-	(45/90/ - 45/0) _s
OHT-2	36	250	2.24	2x4	6	0 ⁰	(45/90/ - 45/0) _s
OHT-3	36	250	2.24	2x4	6	22.5 ⁰	(45/90/ - 45/0) _s
OHT-4	36	250	2.24	2x4	6	45 ⁰	(45/90/ - 45/0) _s
OHT-5	36	250	2.24	2x4	6	67.5 ⁰	(45/90/ - 45/0) _s
OHT-6	36	250	2.24	2x4	6	90 ⁰	(45/90/ - 45/0) _s

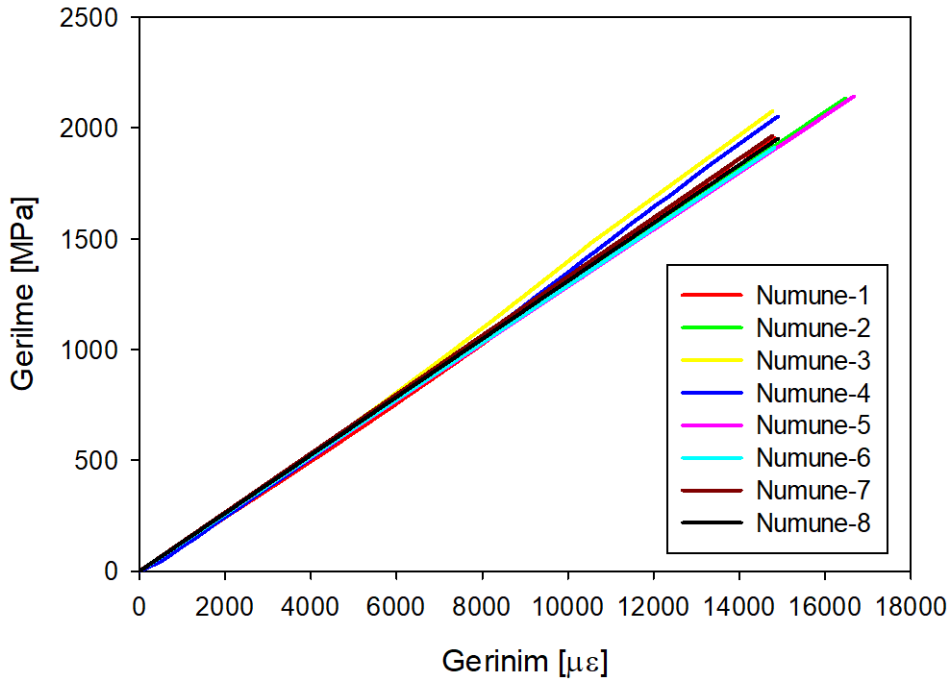
5.3 Çift Delikli Numuneler İçin Malzeme Karakterizasyon Testleri

Çift delikli katmanlı kompozit plakalar için havacılık alanında çokça kullanılan SIGRAPREG C U310-0/NF-E340/35% tek yönlü karbon fiber epoksi matris malzemesi seçilmiştir. Numune üretimleri ODAK Kompozit A.Ş. tarafından gerçekleştirilmiştir. Numuneler üretici tavsiyesiyle 100°C'de 1 saat ve 150°C'de 2 saat tutulmak suretiyle kürlenmiştir. Kürlenme prosesi boyunca 6 bar basınç uygulanmıştır. Numune üretiminden sonra fiber ve matris hacimsel oranları sırasıyla %65 ve %35 olarak ölçülmüştür. Kürlenme sonrasında plaka halinde çıkan numuneler su soğutmalı elmas testere kullanılarak dilimlere ayrılmış ve istenilen numune boyutlarına

getirilmiştir. Kırılmış her bir ply kalınlığı yaklaşık 0.28 mm olarak ölçülmüştür. Her bir numune tipinde 8 katman bulunduğundan, tüm numunelerin ortalama kalınlıkları 2.24 mm'dir.

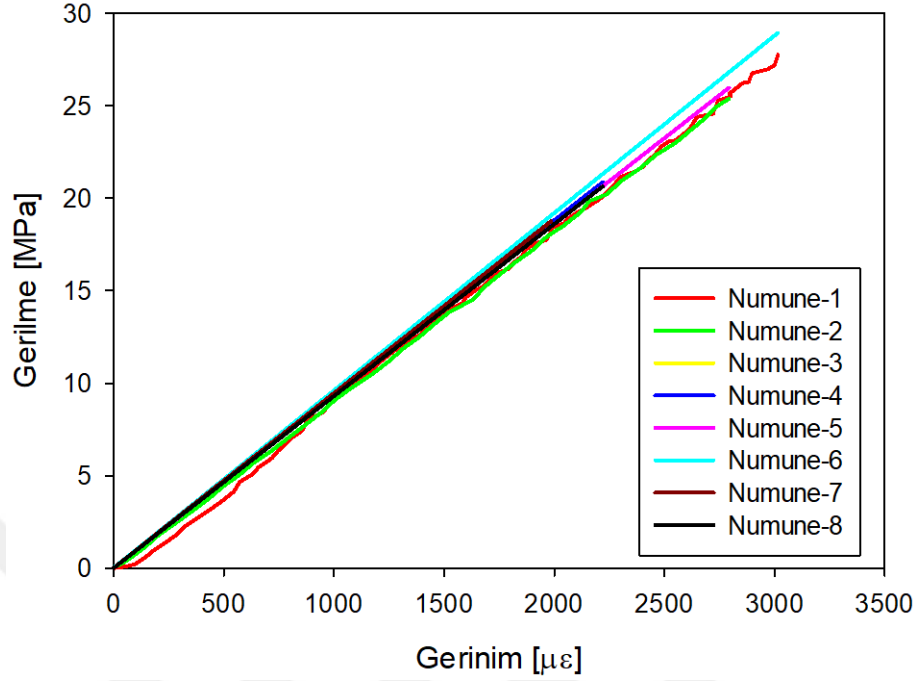
Malzeme karakterizasyon testlerinde tek delikli numunelerde olduğu gibi malzemenin fiber yönü, matris yönü (fibere dik yön), kayma yönü (numune düzlemi) modülüs ve dayanımları bulunmuştur. Ayrıca numune düzlemi Poisson oranı bulunmuştur. Malzeme karakterizasyon testleri fiber yönü ve fiber yönüne dik özellikler için ASTM D 3039/D 3039M-17 [44] ve kayma yönü özellikler için ASTM D 3518/3518M-18 [45] standartlarına göre gerçekleştirilmiştir. Tekrarlanabilirlik göz önünde bulundurularak her malzeme özelliği testi için 8'er numune kullanılmıştır. Testler esnasında yük ölçümü Instron çekme cihazının yük hücresi tarafından gerçekleştirilmiştir. Gerinim ölçümleri ise TML marka FCA-3-350-11-3LT kodlu 2 eksenli gerinimölçerler ve video ekstensometre cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Test esnasında kullanılan altyapı tek delikli numune testlerinde kullanılan test altyapısıdır.

Fiber yönü numuneleri için çekme testleri sonucunda beklenildiği gibi doğrusal bir davranış ve kırılma hasar modu gözlemlenmiştir. Testi gerçekleştirilen 8 adet numuneden de sağlıklı veri alınmıştır. Fiber yönü numunelerine ait gerilme-gerinim eğrileri Şekil 5.4'de verilmiştir.



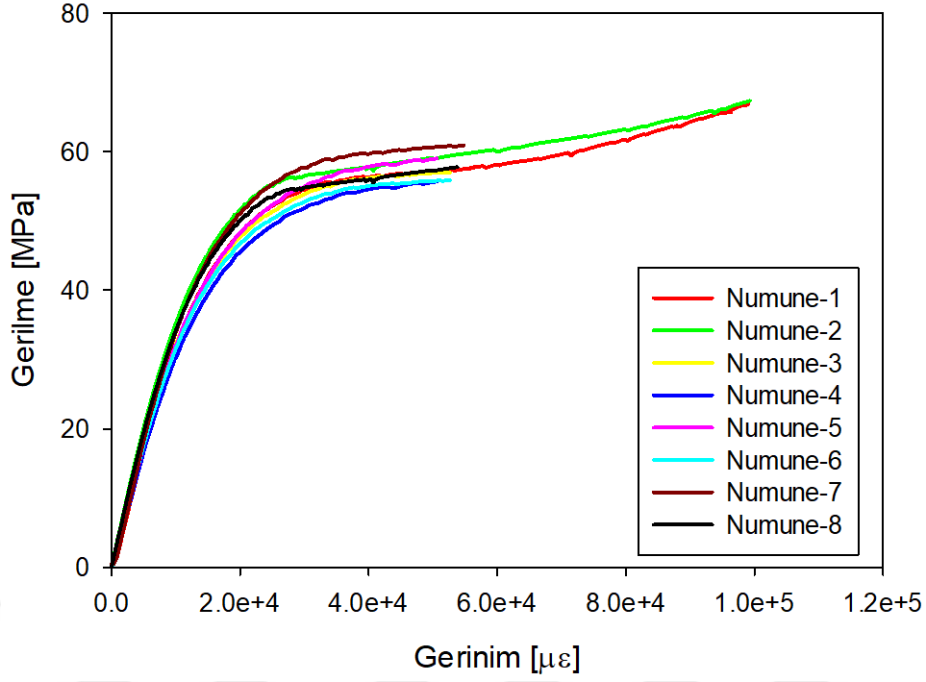
Şekil 5.4: Fiber yönü numuneleri çekme testi sonuçları

Matris yönü (fibere dik yön) numunelerinde de beklenildiği gibi doğrusal davranışlar görülmüş ve kırılma hasar modu gözlemlenmiştir. Matris yönü numuneleri için gerilme-gerinim eğrileri Şekil 5.5’de verilmiştir.



Şekil 5.5: Matris yönü (fibere dik yön) numuneleri çekme testi sonuçları

Kayma yönü numunelerinde ise yine beklenildiği gibi doğrusal bir bölge ve ardından yükün artmasıyla birlikte doğrusal olmayan bir davranış gözlemlenmiştir. Kayma yönü numunelerine ait gerilme-gerinim eğrileri Şekil 5.6’da verilmiştir.



Şekil 5.6: Kayma yönü numuneleri çekme testi sonuçları

Malzeme karakterizasyon testlerinden elde edilen lamina bazındaki mekanik özellikler Çizelge 5.2 ve Çizelge 5.3’de verilmiştir.

Çizelge 5.2: Lamina direngelik değerleri.

Malzeme Özelliği	
E_1	130 GPa
E_2	9.4 GPa
G_{12}	3.5 GPa
ν_{12}	0.33

Çizelge 5.3: Lamina dayanım değerleri.

Mekanik Dayanım [MPa]	
X_t	2100
Y_t	25
S	40

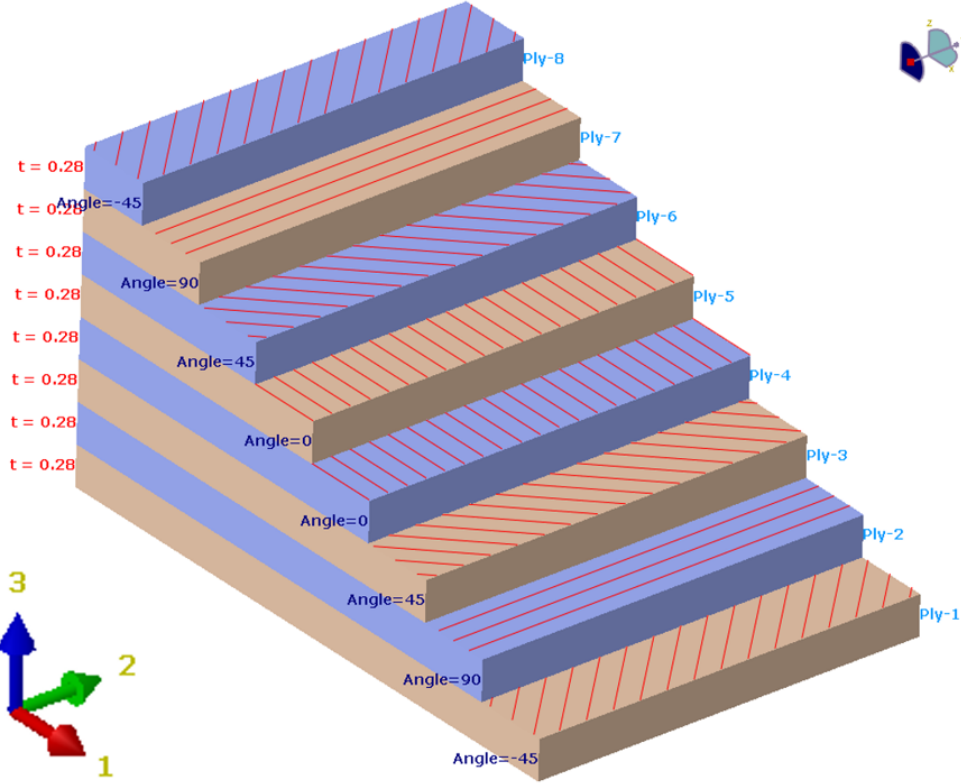
5.4 Sonlu Elemanlar Yöntemiyle GKF İncelenmesi

Bu bölümde SEY kullanılarak çift delikli katmanlı kompozitler için GKF incelemesi yapılmıştır. Delikler etkileşimde ve farklı oryantasyonlarda yerleştirildikleri için hem maksimum GKF değeri hem de maksimum GKF’nin delik çevresindeki konumu

numuneler arasında farklılık gösterebilmektedir. Dolayısıyla SEY kullanılarak Çizelge 5.1'de geometrik bilgileri verilen çift delikli numuneler için GKF incelenmesi gerçekleştirilmiştir.

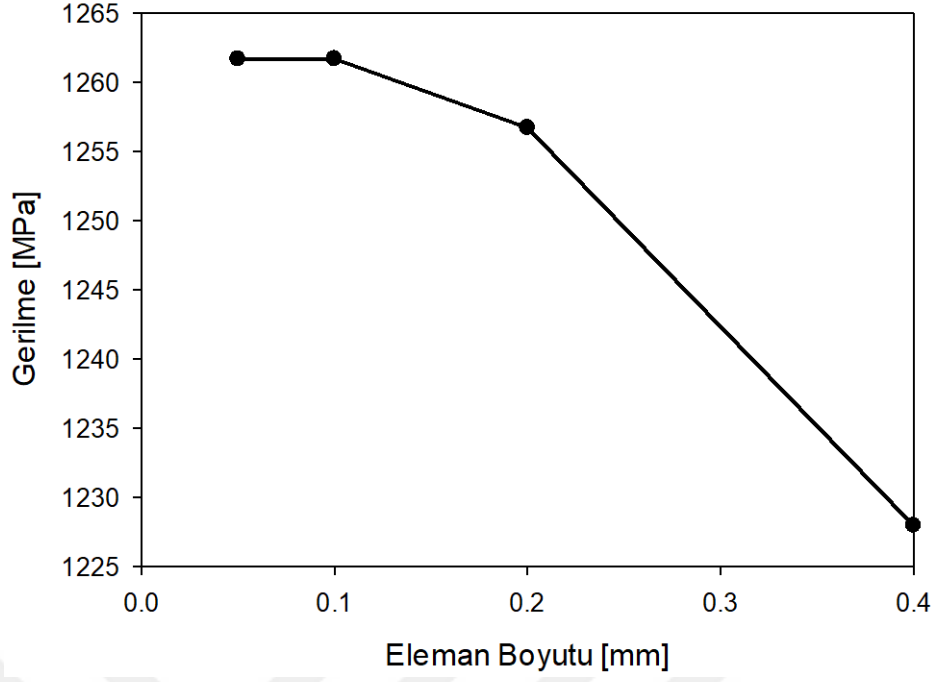
5.4.1 Sonlu elemanlar modeli

Sonlu elemanlar analizleri Abaqus 2016 [46] ticari yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tek delikli numunelerde olduğu gibi, katmanlar, laminaların her biri modellenerek oluşturulmuştur. Malzeme karakterizasyon testlerinden elde edilen doğrusal elastik malzeme özellikleri her bir laminanın açısız oryantasyonuyla birlikte girilerek laminalar oluşturulmuştur. Tüm çift delikli numuneler Çizelge 5.1'de gösterildiği gibi 8 laminadan oluşmaktadır. Laminaların kendi açısı oryantasyonlarında üst üste dizilerek katmanı oluşturdukları analiz modeli Şekil 5.7'de gösterilmiştir.



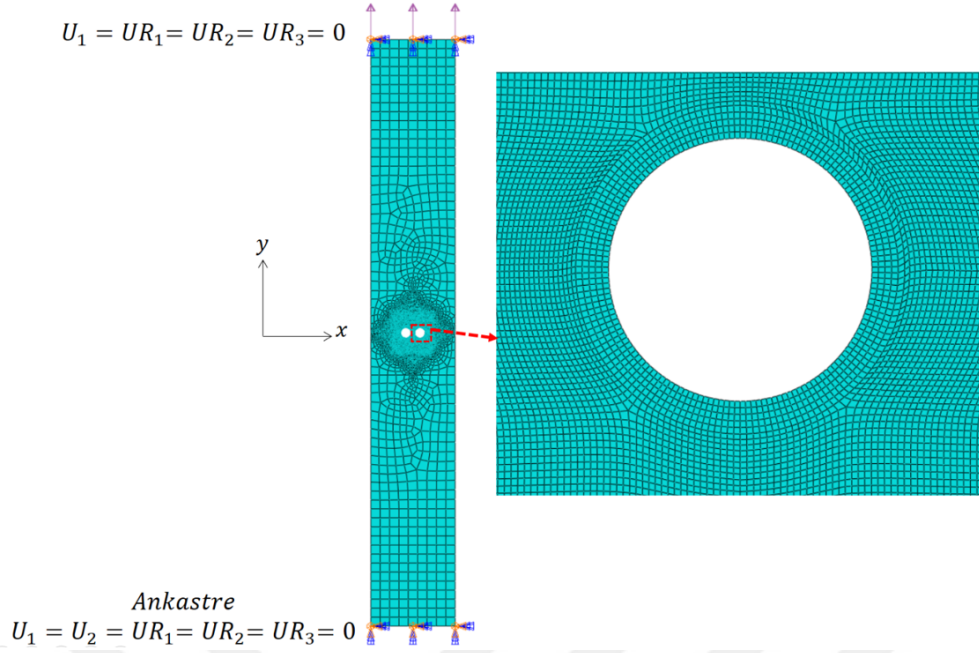
Şekil 5.7: Katmanın laminalar modellenerek oluşturulması

Ağ eleman sayısı yakınsama çalışması Şekil 5.8’de gösterilmiştir. Yakınsama çalışması OHT2 numunesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Eleman boyutunun küçültüldükçe delik kenarındaki katman gerilmesi artmış ve eleman boyutu 0.1 mm’nin altına indiği durumda değişiklik görülmemiştir. Buna göre delik çevresindeki eleman boyutunun 0.1 olması yeterli görülmüştür. Bu şekilde oluşturulan modelde 21280 eleman ve 21500 düğüm noktası bulunmaktadır. Diğer tipteki geometrilerde de benzer şekilde eleman sayısı ve düğüm noktası sayısı bulunmaktadır.



Şekil 5.8: Eleman boyutu - Delik kenarı ortalama çekme yönü katman gerilmesi eğrisi

Farklı açılardaki laminaların, deliklerin farklı pozisyonlarda konumlandırıldığı durumlardaki davranışını gözlemlemek amacıyla, numunelerin tamamı modellenmiştir. Çekme cihazının çene bölgesi numunenin çekme yönü hariç diğer yönlerdeki hareket serbestliğini kısıtlamaktadır. Bu durum göz önünde bulundurularak sonlu elemanlar modelinde, numunenin bir ucunun tüm yönde hareket serbestliği kısıtlanmıştır. Diğer ucunda ise sadece çekme yönü hareket serbestliği verilmiştir. Yükleme, sınır koşulları ve ağ yapısı Şekil 5.9'da gösterilmiştir.



Şekil 5.9: Sonlu elemanlar modeli ve ağ yapısı

5.4.2 GKF incelemesi

SEY ile modellenen farklı tipteki çift delikli kompozit katmanlar her bir laminadaki delik çevresi GKF dağılımı incelenmiştir. Her bir lamina için GKF değeri;

$$K^{lamina} = \frac{\sigma_y^{i,lamina}}{\sigma_{y,nominal}^{i,lamina}} \quad (5.1)$$

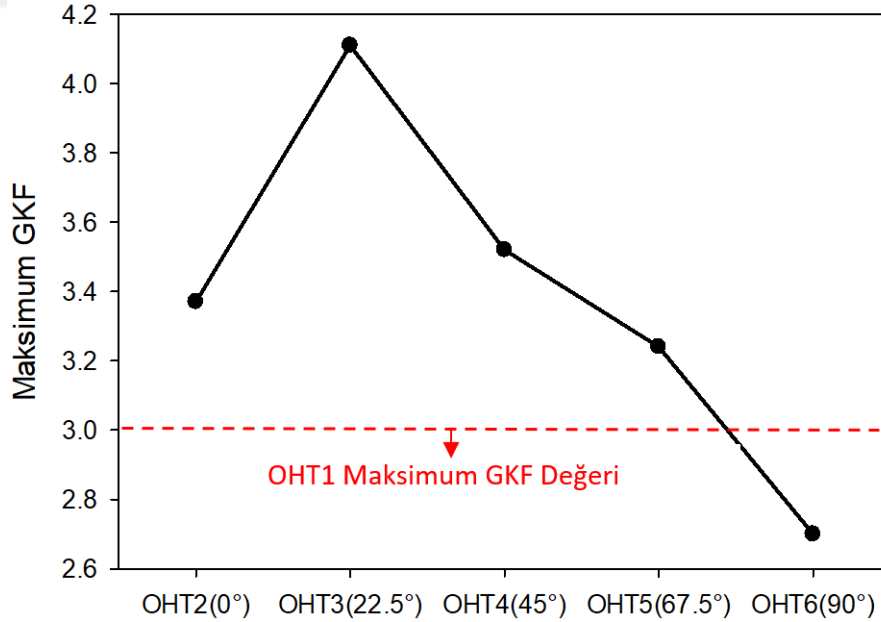
denklemlerle hesaplanmıştır. Burada, K^{lamina} belirtilen lamina için gerilme konsantrasyonu faktörü, $\sigma_y^{i,lamina}$ belirtilen lamina için herhangi bir noktadaki çekme yönü gerilme değeri ve $\sigma_{y,nominal}^{i,lamina}$ belirtilen lamina için delikten yeteri kadar uzaklıktaki nominal gerilme değeridir. Böylece her bir lamina için, lamina başına düşen gerilme değeri kullanılarak maksimum GKF hesaplanmış olunur. Katmanın GKF hesabı için ise;

$$K^{katman} = \frac{\sigma_y^{katman}}{\sigma_{y,nominal}^{katman}} \quad (5.2)$$

denklemleri kullanılmıştır. Burada, K^{katman} belirtilen katman için gerilme konsantrasyonu faktörü, σ_y^{katman} katman için herhangi bir noktadaki çekme yönü ortalama gerilme değeri ve $\sigma_{y,nominal}^{katman}$ katman için delikten yeteri kadar uzaklıktaki nominal çekme yönü

ortalama gerilme değeridir.

Öncelikle katman için GKF incelemesi yapılmıştır. Farklı oryantasyonlarda deliklere sahip numuneler için delik çevresindeki maksimum katman GKF değerleri Denklem (5.2) kullanılarak bulunmuştur. Farklı numune tipleri için delik çevresinde görülen maksimum katman GKF'leri Şekil 5.10'da gösterilmiştir. OHT2 (0°) numunelerinde delik etkileşiminden dolayı maksimum katman GKF değeri tek delikli sonsuz genişlikteki numuneden (OHT1) yaklaşık olarak %12.3 daha fazla çıkmaktadır. Delikler arası açı 22.5°'ye çıkarıldığı (OHT3 numunesi) durumda maksimum katman GKF değeri tek delikli OHT1 numunesine göre yaklaşık %37 artış göstermiştir. Delikler arası açının daha da arttırıldığı OHT4 (45°) numunelerinde ise maksimum katman GKF değeri OHT2 numunesine benzer seviyelerdedir. OHT5 numunelerinde de maksimum katman GKF değerindeki düşüş trendi devam etmektedir. Yine de OHT5 numunelerinde görülen maksimum katman GKF değeri tek delikli OHT1 numunesine göre yaklaşık %8 daha fazladır. Deliklerin 90° olarak yüklemeye paralel yerleştirildikleri OHT6 numunelerinde ise diğer çift delikli numunelerin aksine, delik etkileşimi maksimum katman GKF değerini düşürmüştür. Bu numunelerde görülen maksimum katman GKF değeri tek delikli OHT1 numunelerinden yaklaşık olarak %10 daha azdır.

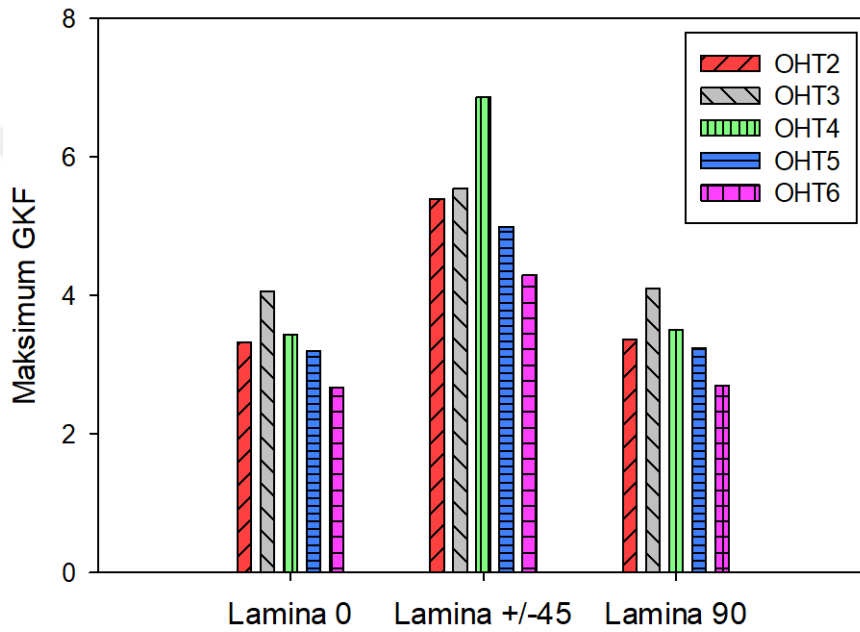


Şekil 5.10: Farklı numune tipleri için delik çevresindeki maksimum katman GKF değerleri

Dolayısıyla katmanlar için delik çevresinde görülen maksimum katman GKF

değerlerine göre, delik etkileşiminin OHT6 numunesi hariç diğer çift delikli numunelerin dayanımlarını olumsuz yönde etkilemesi beklenmektedir. En büyük etkinin ise OHT3 numunesinde görülmesi beklenmektedir. OHT4 ve OHT2 numunelerindeki davranış birbirlerine benzer seviyededir. OHT6 numunesinde ise OHT1 numunesinden daha düşük maksimum katman GKF değeri görüldüğünden tek delikli OHT1 numunesinden daha yüksek dayanım beklenmektedir.

Katman GKF incelemesinden sonra her bir lamina için de GKF incelemesi yapılmıştır. Şekil 5.11’de çift delikli OHT numuneleri için farklı açılardaki her bir laminadaki maksimum GKF değerleri verilmiştir.

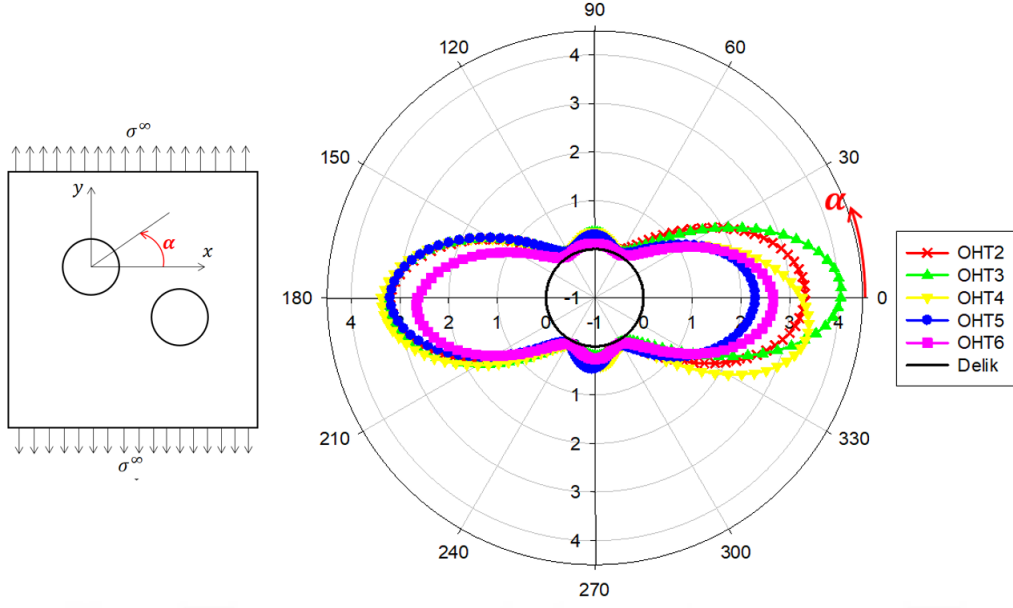


Şekil 5.11: Farklı çift delikli numuneler için her laminadaki delik kenarı maksimum GKF değerleri

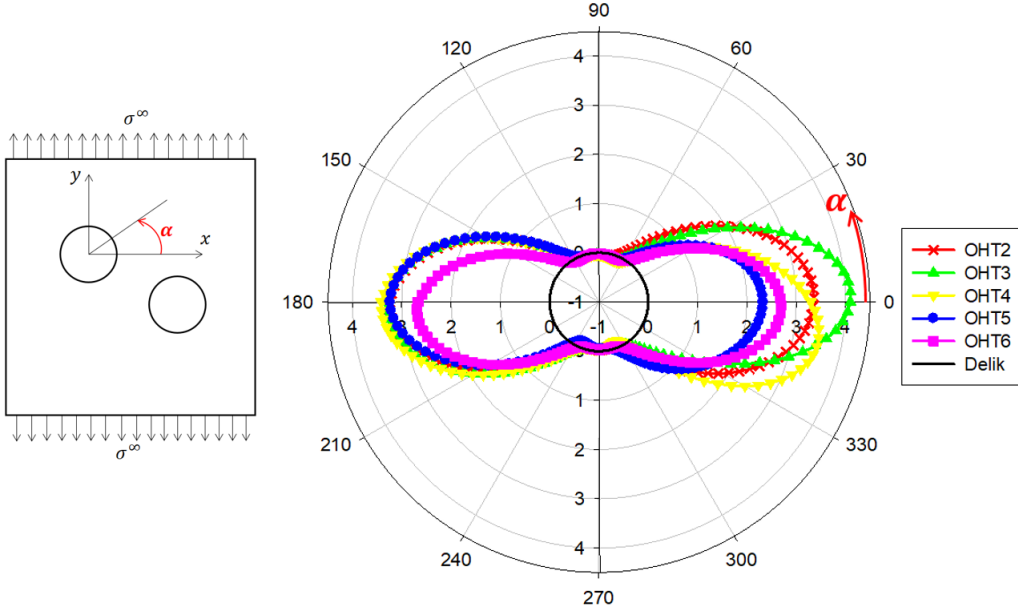
0° ve 90° laminalarında katman maksimum GKF davranışına benzer davranış görülmektedir. OHT2 numune tipi için maksimum GKF değeri tek delikli (OHT1) duruma göre yaklaşık %10’luk bir artış göstermiştir. Delik etkileşiminin etkisi OHT3 numune tipinde daha fazla olmuş ve bu artış oranı %35 civarına kadar çıkmıştır. Delikler arasındaki açı arttıkça OHT4 ve OHT5 numune tipleri için 0° ve 90° laminalarında görülen maksimum GKF değerlerinde azalma eğilimi başlamıştır. Yine de bu numune tiplerinde 0° ve 90° laminaları için görülen maksimum GKF değeri delik etkileşiminden dolayı tek delikli numunede görülen GKF değerinden yüksektir. OHT6 numunesinde ise katman GKF davranışında olduğu gibi, OHT1 numunesinden daha düşük GKF değeri görülmüştür.

$\pm 45^\circ$ laminalarında tek delikli numunelerde olduğu gibi yine diğer laminalardan daha yüksek GKF değerleri görülmüştür. OHT2 numunesinde bu laminalar için görülen maksimum GKF değeri tek delikli duruma göre yaklaşık %24 artış göstermiştir. OHT3 numunesinde de OHT2 numunesine benzer seviyelerde maksimum GKF görülmüştür. 0° ve 90° laminalarından farklı olarak $\pm 45^\circ$ laminalarında maksimum GKF OHT3 değil OHT4 numunelerinde görülmüştür. OHT4 numune tipi için $\pm 45^\circ$ laminalarında görülen maksimum GKF değeri tek delikli duruma göre yaklaşık %58 artış göstermiştir. Yani delik etkileşiminin $\pm 45^\circ$ laminalarına olan etkisi delikler arası açının 45° olmasıyla en yüksek seviyeye ulaşmıştır. OHT5 numune tipi de OHT2 ve OHT3 numuneleriyle benzer seviyede maksimum GKF değerine sahiptir. OHT6 numune tipinde ise $\pm 45^\circ$ laminalarında görülen maksimum GKF değeri tek delikli duruma benzer seviyelerdedir.

Laminalarda görülen maksimum GKF değerinin yanı sıra maksimum GKF'nin delik çevresindeki konumu da katman davranışının anlaşılması bakımından önemlidir. Şekil 5.12'de 0° laminası için farklı delik oryantasyonlarındaki çift delikli numuneler için delik çevresi GKF dağılımı verilmiştir. Bu şekle bakıldığında delik çevresi GKF değerinin OHT2, OHT3 ve OHT4 numuneleri için diğer deliklerin etkileşim halinde olduğu tarafta yüksek olduğu görülmektedir. OHT5 numunesi için deliklerin etkileşim halinde olmadığı bölgede daha yüksek GKF değerleri görülmektedir. OHT6 numunesi için ise 0° ve 90° konumlarında aynı GKF değerleri görülmüştür. OHT2 ve OHT6 numunelerinde maksimum GKF değeri 0° ve 90° konumlarında oluşurken, OHT3, OHT4 ve OHT5 numunelerinde görülen maksimum GKF konumlarının 0° ve 90° konumlarından saptığı görülmektedir. Şekil 5.13'de ise farklı tipteki OHT numunelerinin 90° laminası için delik çevresindeki GKF dağılımı verilmiştir. 90° laminalarının davranışı 0° laminalarıyla benzerlik göstermektedir.



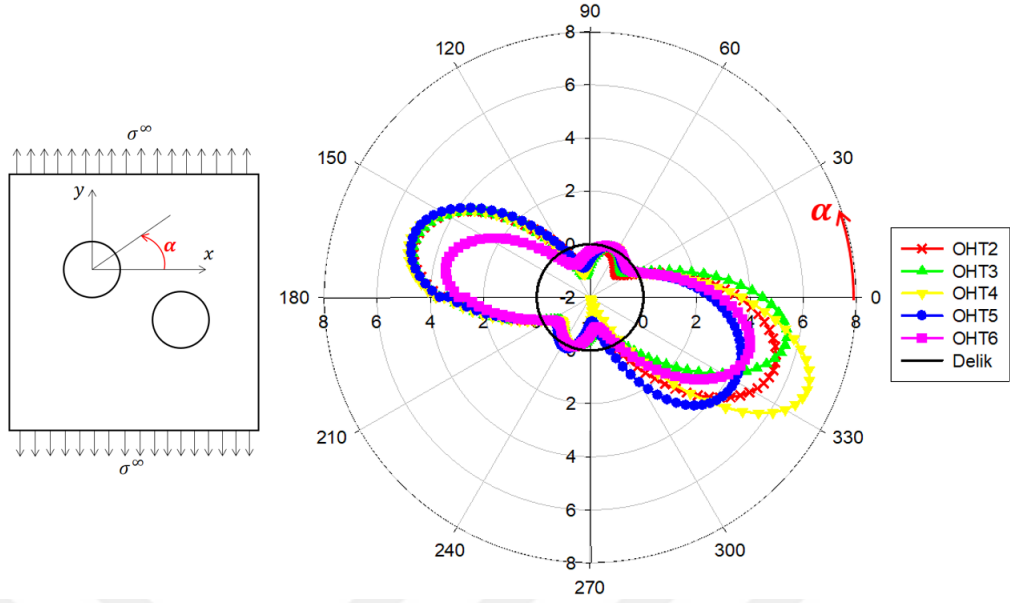
Şekil 5.12: Farklı tipteki OHT numuneleri için 0° lamasındaki delik çevresi GKF dağılımı



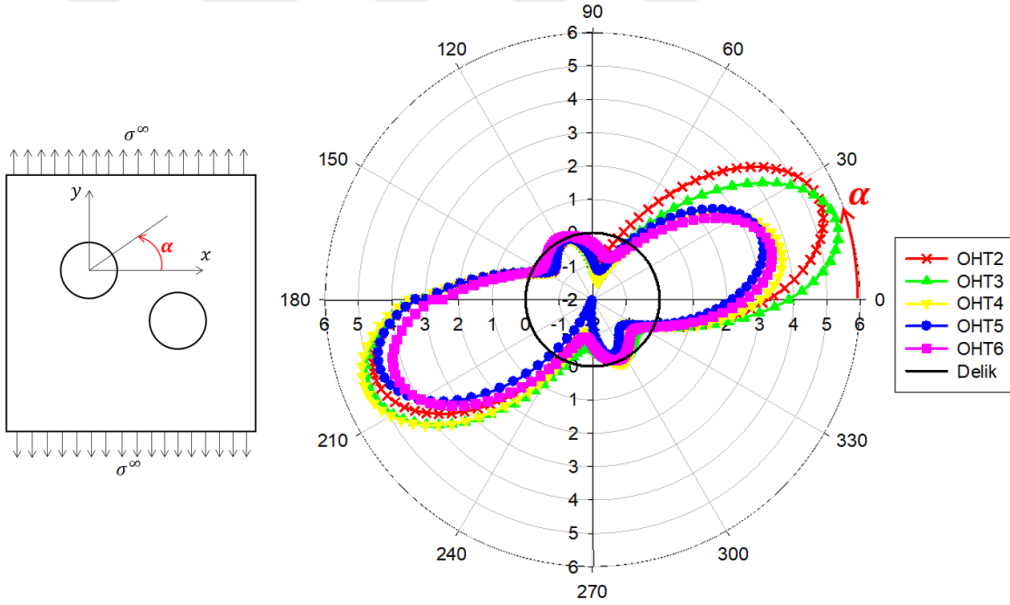
Şekil 5.13: Farklı tipteki OHT numuneleri için 90° lamasındaki delik çevresi GKF dağılımı

$\pm 45^\circ$ laminaları için farklı tipteki OHT numunelerinin delik çevresi GKF dağılımı Şekil 5.14 ve Şekil 5.15’de verilmiştir. Bu grafiklere bakıldığında delikler arası etkileşimin $\pm 45^\circ$ laminalarındaki delik çevresi gerilme dağılımını hem büyüklük hem de davranış olarak değiştirdiği görülmektedir. 45° laması için, delik etkileşiminin olduğu tarafta en fazla GKF artışı OHT4 numunesi için görülmüştür. -45° laması için ise OHT4, OHT5 ve OHT6 numunelerinde delik etkileşiminin GKF değerini azalttığı

görülmektedir.



Şekil 5.14: Farklı tipteki OHT numuneleri için 45° laminasındaki delik çevresi GKF dağılımı



Şekil 5.15: Farklı tipteki OHT numuneleri için -45° laminasındaki delik çevresi GKF dağılımı

5.5 Çift Delikli Konfigürasyon İçin PSC Yöntemi Uygulanabilirliğinin İrdelenmesi

Teorik altyapı bölümünde delikli katmanlı kompozit plakalar için PSC yöntemiyle dayanım tahmini yapılması konusu aktarılmıştı. Bu bölümde ise çift delikli

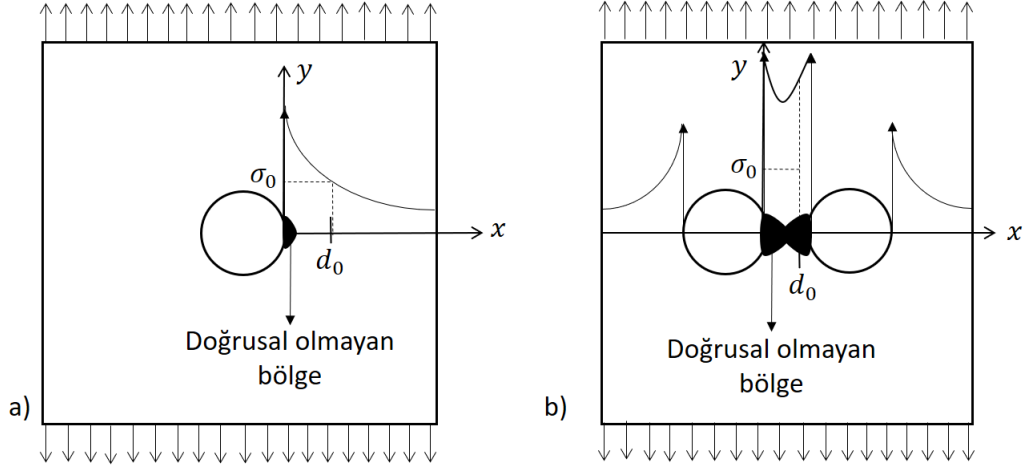
numunelerin test sonuçlarına geçmeden önce PSC yönteminin çift delikli kompozit numuneler için kullanılabilirliği tartışılmıştır. Çift delikli durum için PSC yönteminin tartışılma nedeni, deliklerin etkileşim halinde olmasıdır. Çift delikli numuneler için gerçekleştirilen GKF incelemesinde de görüldüğü üzere, deliklerin etkileşim halinde olması delik çevresindeki gerilme dağılımı etkilemektedir. Dolayısıyla bu durum numune dayanımına da etki etmektedir. Çift delikli etkileşimli deliklere sahip numuneler için PSC yönteminin uygulanabilirliğinin incelenmesi bu açıdan kritiktir.

PSC ya da doğrusal elastik kırılma mekanik temelli diğer dayanım tahmin yöntemlerinde, gerilme konsantrasyonu içeren yapılar için, doğrusal elastik bölge yeterince büyük olmalıdır. Bu tip yapılarda gerilme konsantrasyonu kaynağının yakın çevresinde yüklemeye birlikte hasar başlangıcı erken görülebilir. Bu öncü hasar oluşumu, oluştuğu bölgede doğrusal olmayan bir davranışa sebep olur. Dolayısıyla dayanım tahmin yöntemlerinin kullanım alanı bu doğrusal olmayan alanın dışında olmalıdır. Yani PSC yönteminin kullanılabilmesi için, doğrusal davranış göstermeyen bölge doğrusal davranış gösteren bölgeye göre yeterince küçük olmalıdır. Aksi takdirde PSC yöntemi gerilme konsantrasyonu içeren yapının dayanım tahmini için kullanılamaz [49].

PSC yöntemi daha önce de belirtildiği gibi delik kenarından karakteristik uzunluk kadar uzaklıkta oluşan gerilme değeri kullanılarak uygulanmaktadır. Dolayısıyla PSC yönteminin uygulanabilmesi için kullanıldığı bölgedeki davranış doğrusal elastik davranış olmalıdır. Tek delikli durum için delik kenarından karakteristik uzunluk kadar uzaklıktaki bölgede doğrusal olmayan bir davranışa sebep olacak bir faktör bulunmamaktadır. Bu sebeple PSC yöntemi tek delikli durum için rahatlıkla kullanılabilmiştir.

Tek delikli durumun aksine, yapıda birbirleriyle etkileşim yaratacak kadar yakın iki delik bulduran durumlarda PSC yönteminin kullanılabilmesi sorgulanmalıdır. Böyle bir durumda, PSC yönteminin kullanılması için gerekli olan delik kenarından karakteristik uzunluk kadar uzaklıktaki gerilme değeri, delik etkileşimi sebebiyle doğrusal olmayan davranış gösteren bölge içinde kalabilir. Bu durum da PSC yönteminin kullanılmasını olanaksız kılar.

Doğrusal olmayan bölgenin karakteristik uzunlukla olan karşılaştırması tek delikli ve etkileşimli çift delikli durumlar için Şekil 5.16'da şematik olarak gösterilmiştir.



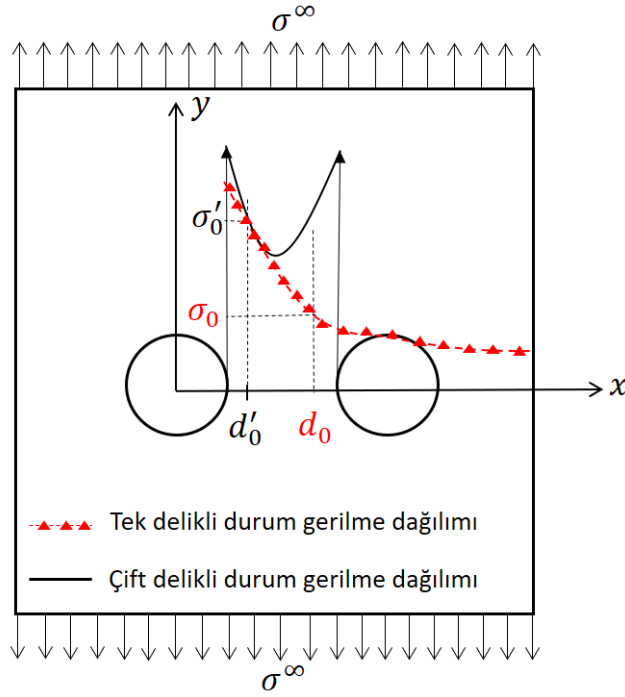
Şekil 5.16: Hasar sebebiyle doğrusal olmayan davranış görülen bölgeler a) Tek delikli durum b) Etkileşimli çift delikli durum

Şekil 5.16.a tek delikli durum için, PSC yönteminin kullanılması için gerekli olan karakteristik uzunluğun (d_0) delik kenarındaki doğrusal olmayan bölgeden yeterince uzakta olduğunu göstermektedir. Böylece PSC yöntemi kullanılabilir olmaktadır. Şekil 5.16.b ise karakteristik uzunluğun (d_0) doğrusal olmayan bölge içinde kaldığı görülmektedir. Dolayısıyla bu durum için PSC yönteminin kullanılması olanaksızdır.

5.5.1 Çift delikli durum dayanım tahmini için öne sürülen yöntem (EPSC)

Önceki kısımda belirtildiği gibi etkileşimli çift deliğin bulunduğu bazı durumlarda PSC yönteminde kullanılan karakteristik uzunluk doğrusal olmayan davranış gösteren bölge içerisinde kalır ve böylece PSC yöntemi uygulanamaz. Bu durumda PSC yöntemini uygulanabilir hale getirmek için yeni bir karakteristik uzunluğa ihtiyaç vardır.

Dolayısıyla çift delikli durum için Şekil 5.17'de gösterilen modifiye edilmiş karakteristik uzunluk (d'_0) bulunmalıdır. Bu mesafedeki gerilme değeri (σ'_0) ise modifiye edilmiş noktadaki ortalama çekme yönü katman gerilmesidir. Dolayısıyla ortaya sürülen yöntemde hesaplamalar tek delikli numunelerde bulunan, PSC yönteminin bulduğu d_0 ve σ_0 olmamalı, d'_0 ve σ'_0 noktaları olmalıdır.



Şekil 5.17: Tek delikli ve çift delikli durumlarda delik kenarında oluşan çekme yönü ortalama gerilme dağılımları

Dolayısıyla EPSC yönteminde kritik gerilme değeri (σ'_0), deliksiz dayanım değerinden (σ_0) daha yüksek olmalıdır. EPSC yöntemine göre, delik kenarından modifiye edilmiş karakteristik uzunluk (d'_0) kadar uzaklıktaki gerilme değeri kritik gerilme değerine (σ'_0) ulaştığında hasar oluşur. Belirli bir delik oryantasyonu kullanılarak d'_0 ve σ'_0 değerleri bulunur ve diğer oryantasyondaki numunelerin dayanımı tahmin edilir.

EPSC yönteminin uygulanma basamakları şu şekilde sıralanabilir:

- öncelikle SEY ile çekme yükü referans numunenin testlerinden elde edilen hasar yükü olmak üzere, çift delikli referans numune için analiz gerçekleştirilir,
- analizden delik kenarındaki maksimum katman GKF değerinin konumu bulunur,
- bulunan maksimum GKF konumu kullanılarak Şekil 5.18'de gösterildiği gibi EPSC yöntemi için bir koordinat sistemi oluşturulur,
- yeni oluşturulan koordinat sisteminin x' eksenini boyunca katman ortalama gerilme dağılımı çizdirilir,
- bunun yanında, tek delikli numune için de testlerden elde edilen hasar yükü altında, katman ortalama gerilme dağılımı delik kenarından serbest kenara doğru çizdirilir,
- tek delikli ve referans çift delikli numuneler için çizdirilen gerilme dağılımlarının birbirlerini kestikleri noktadan Şekil 5.17'de gösterildiği gibi karakteristik uzunluk d'_0

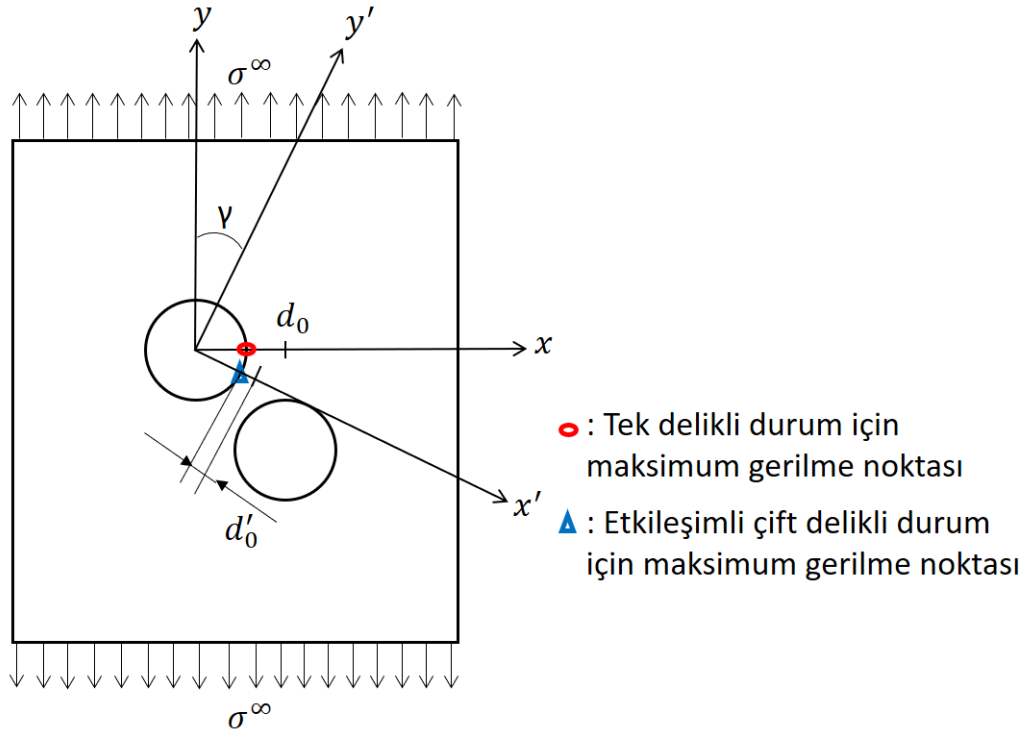
ve kritik gerilme σ'_0 değerleri bulunur,

- bulunan karakteristik uzunluk ve kritik gerilme değerleri kullanılarak PSC yönteminde olduğu gibi diğer çift delikli numunelerin dayanımları tahmin edilir.

PSC ve EPSC yöntemleri için kritik gerilmeler oranı (σ'_0/σ_0) çift delikli durumdaki doğrusal olmayan davranışın seviyesini gösterir. Taylor [49], bu oran için analitik bir formülasyonun olmadığını ve deneysel olarak bulunabileceğini bildirmiştir. Polimer ve metal malzemelerde bu oranın 2 ile 10 arasında değişiklik gösterebileceğini belirtmiştir. Kinloch [50], ise bu oranın polimer malzemeler için 5.5 civarında olduğunu belirtmiştir.

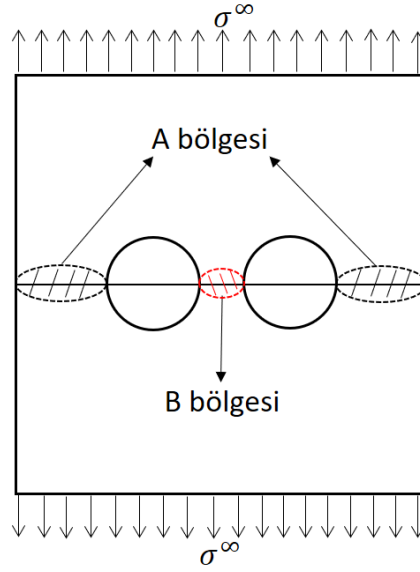
Taylor [49], kompozit malzemeler için bu oranın, kompozitin kırılğan yapısından dolayı teorik olarak 1 olması gerektiğini belirtmiştir. Fakat çift etkileşim durumunda doğrusal olmayan bölge oluşumu bu değeri 1'den saptırmaktadır. Tez kapsamında bu oran deneysel olarak bulunmuş ve farklı delik oryantasyonları için kullanılmıştır.

Etkileşimli çift delikli durumda EPSC yönteminin uygulanabilmesi için gereken başka bir konu ise maksimum katman gerilmesinin deliğin neresinde oluştuğudur. Şekil 5.18'de gösterildiği gibi tek delikli durumda maksimum ortalama katman gerilmesi kırmızı yuvarlakla işaretlenen noktada görülmektedir. Farklı oryantasyondaki çift delikli durumda ise maksimum katman gerilmesi iki delik arasında herhangi bir noktada olabilir (mavi üçgen ile işaretlenen nokta). Dolayısıyla karakteristik uzunluk noktası tek delikli durumda olduğu gibi çekme yönünde dik eksen üzerinde değil ($x - \text{ekseni}$), γ açısı kadar döndürülmüş başka bir eksen üzerinde ($x' - \text{ekseni}$) olabilir. Dolayısıyla modifiye edilmiş karakteristik uzunluğa (d'_0) bu eksen üzerinden ulaşılmalıdır.



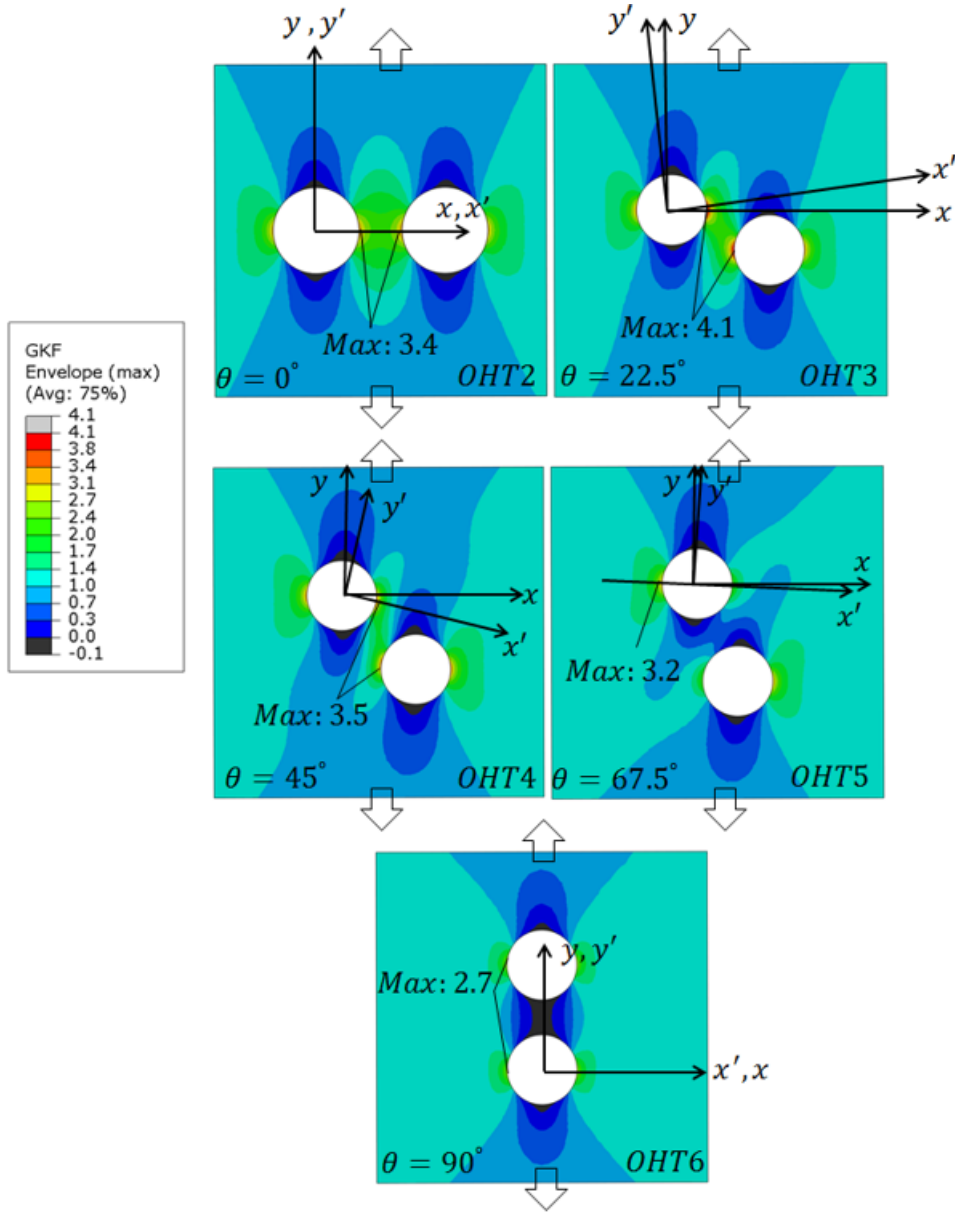
Şekil 5.18: Tek delikli ve etkileşimli çift delikli durumlar için delik kenarı üzerindeki maksimum katman gerilmesi görülen noktaların şematik gösterimi

PSC ve EPSC yöntemleri numunelerin gerilme konsantrasyonunun yer aldığı kritik bölgelerinde çalışmaktadır. Tek delikli durum için kritik bölge tanımı basittir. Delik kenarından serbest kenara doğru uzanan bölge kritik bölgedir. Fakat çift delikli durumda iki kritik bölge adayı bulunmaktadır. Bu kritik bölgeler Şekil 5.19’da gösterilmiştir. Numunelerin gösterilen iki kritik kesitten birinden hasara uğramaya başlayacağı bilinmektedir. Bu bölgelerden A bölgesi tek delikli durumdaki gibi delik kenarından numune serbest kenarına uzanan bölgeyi tanımlar. B bölgesi ise iki delik arasındaki bölgeyi tanımlamaktadır. Maksimum katman GKF değerinin delik çevresi üzerindeki konumuna göre numunenin A bölgesi ya da B bölgesi numunesi olduğuna karar verilir. Daha sonra bu numuneler için, belirtilen bölgelerdeki doğrusal olmayan bölge yeterince küçük bir alandaysa PSC yöntemi, daha büyük bir alandaysa EPSC yöntemi uygulanır.



Şekil 5.19: Çift delikli numuneler için olası kritik bölgeler

Farklı tiplerdeki OHT numuneleri için numerik olarak gerçekleştirilen delik çevresi maksimum katman GKF incelemesi sonucunda A ve B bölgeleri numuneleri tespit edilmiştir. Maksimum katman GKF değerine A bölgesi tarafında ulaşan numuneler A bölgesi, B bölgesi tarafında ulaşan numuneler B bölgesi numuneleri olarak isimlendirilmiştir. Şekil 5.20'den de görüleceği üzere OHT2, OHT3 ve OHT4 numuneleri için delik çevresindeki maksimum katman GKF değerleri B bölgesinde, OHT5 ve OHT6 numuneleri için maksimum GKF değerleri A bölgesinde görülmüştür. Dolayısıyla farklı tipteki numuneler için dayanım tahminleri yapılırken kritik kesitteki gerilme dağılımları dikkate alınmalıdır. Ayrıca Şekil 5.20'de her bir numune tipi için global eksen takımı $(x - y)$ ve lokal eksen takımı $(x' - y')$ gösterilmiştir. Lokal eksen takımında $-x'$ eksenini delik merkezinden delik kenarında maksimum katman GKF değerinin görüldüğü nokta boyunca uzanan eksendir. OHT2 ve OHT6 numuneleri için bu iki eksen takımı ortak iken, OHT3, OHT4 ve OHT5 numunelerinde bir miktar farklılık görülmektedir. PSC veya EPSC yöntemleri uygulanırken kullanılan karakteristik uzunluklar lokal eksen takımındaki $-x'$ eksenini üzerinde bulunmalıdır. Çünkü maksimum GKF değeri bu eksen üzerinde bulunmaktadır.



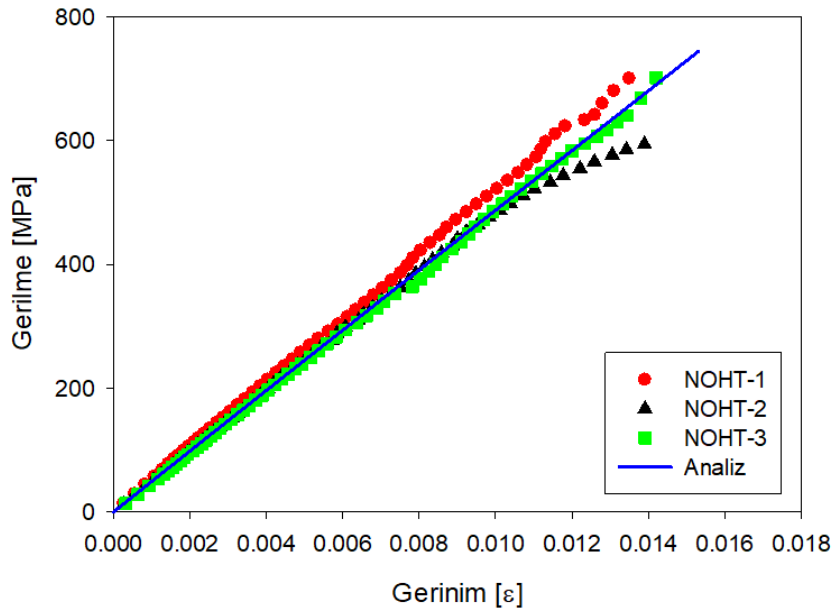
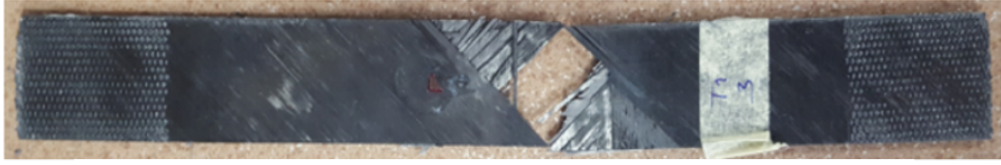
Şekil 5.20: Farklı tipteki çift delikli OHT numuneleri için delik çevresinde görülen maksimum katman GKF konumları

5.6 NOHT ve OHT Numuneleri İçin Gerçekleştirilen Test Çalışmaları

Daha önceki bölümlerde malzeme karakterizasyon testleri tamamlanan Çizelge 5.1’de verilen numuneler için çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Deliksiz (NOHT), tek delikli (OHT1) ve farklı oryantasyonlardaki çift delikli (OHT2, OHT3, OHT4, OHT5 ve OHT6) numuneleri için çekme testleri yapılmıştır.

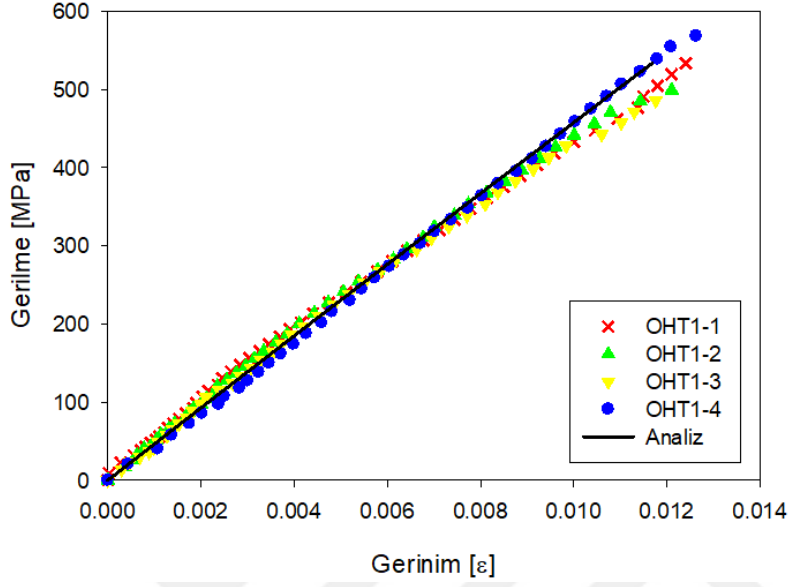
NOHT numuneleri hem PSC yönteminde kullanılmak için hem de sonlu elemanlar modelini dirençlilik anlamında doğrulamak için kullanılmıştır. 3 adet NOHT

numunesi test edilmesi yeterli görülmüştür. OHT numunelerinden beşer adet çekme testi ASTM D5766 / D5766M-11 standardına [47] göre gerçekleştirilmiştir. NOHT numuneleri için gerçekleştirilen çekme testlerinden elde edilen gerilme-gerinim grafiği Şekil 5.21’de verilmiştir. NOHT numuneleri için gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizinin test verileriyle gerilme-gerinim davranışı anlamında uyumlu olduğu görülmektedir. NOHT numunelerinde doğrusal bir gerilme-gerinim davranışı ve numune orta kısmına yakın bölgede kırılma fiber hasar modu gözlemlenmiştir. Testler sonucunda NOHT numuneleri için ortalama dayanım değeri ($\sigma_0 = 703$ MPa) olarak bulunmuştur.



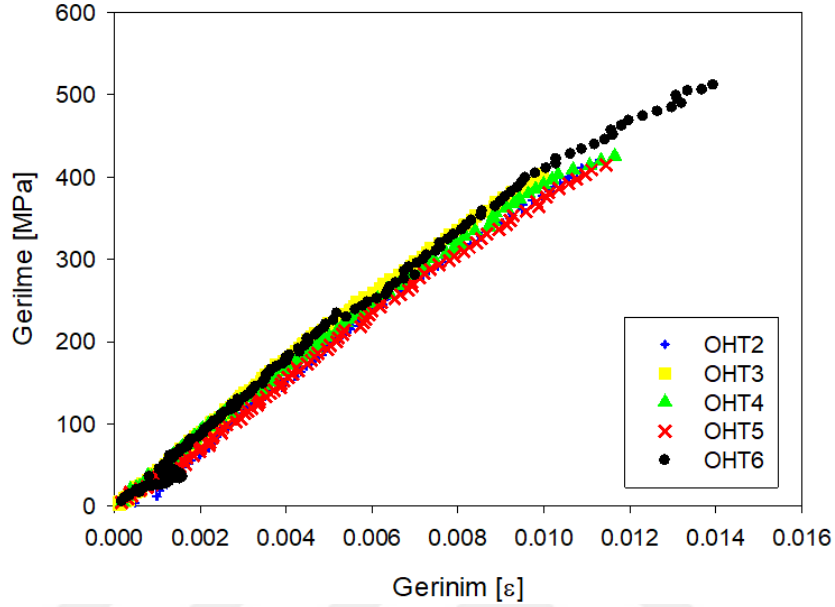
Şekil 5.21: NOHT numuneleri için gerilme-gerinim eğrileri (test-SEY)

NOHT numunelerinin ardından tek delikli OHT1 numuneleri için çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testlerden elde edilen gerilme-gerinim eğrilerinin sonlu elemanlar analiziyle karşılaştırmalı olarak gösterimi Şekil 5.22’de verilmiştir. OHT1 numunelerinde doğrusal bir gerilme-gerinim davranışı ve deliğin bulunduğu bölümde kırılma fiber hasar modu gözlemlenmiştir. OHT1 numuneleri için ortalama dayanım değeri 535.5 MPa olarak bulunmuştur.



Şekil 5.22: OHT1 numuneleri için gerilme-gerinim eğrileri (test-SEY)

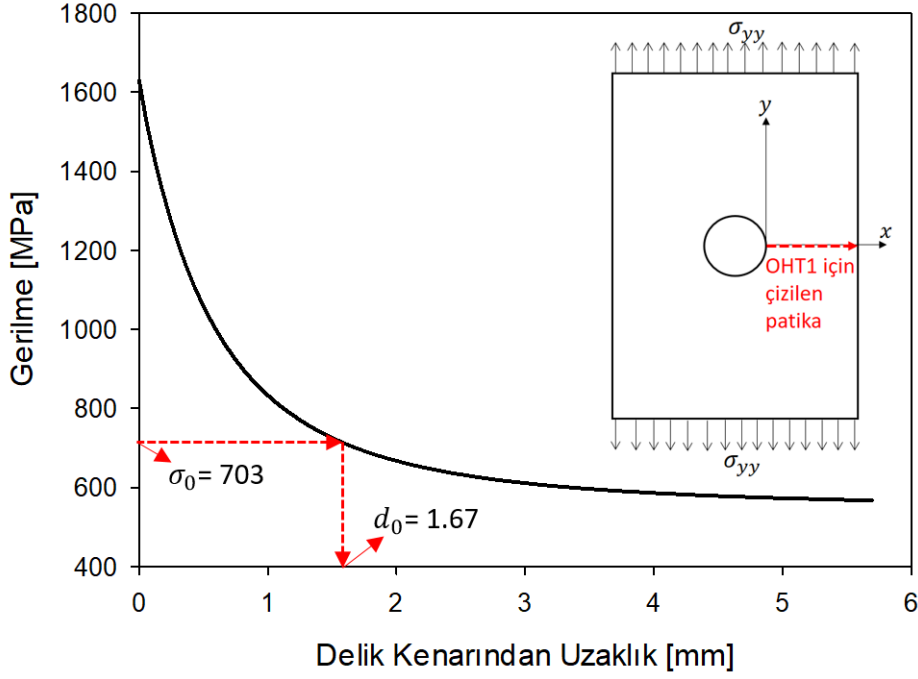
NOHT ve OHT1 numunelerinin ardından farklı tiplerdeki çift delikli OHT numuneleri için çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Farklı tiplerdeki çift delikli OHT numuneleri için çekme testlerinden elde edilen gerilme-gerinim eğrileri Şekil 5.23'de verilmiştir. Testlerden elde edilen gerilme-gerinim eğrilerinden büyük oranda doğrusal bir davranış gözlemlenmiştir.



Şekil 5.23: Farklı tiplerdeki çift delikli OHT numuneleri için çekme testlerinden elde edilen tipik gerilme-gerinim eğrileri

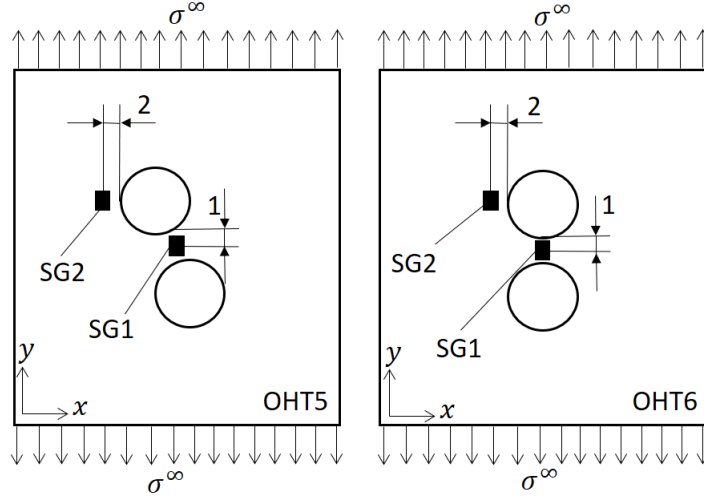
5.7 A Bölgesi Numuneleri İçin PSC Yöntemi Kullanılarak Dayanım Tahmini Yapılması

PSC yönteminin kullanılabilmesi için karakteristik uzunluğa ihtiyaç olduğu önceki bölümlerde belirtilmişti. Karakteristik uzunluk NOHT ve OHT1 numunelerinin dayanımları kullanılarak SEY ile bulunmuştur. Şekil 5.24'de OHT1 numunesi için dayanım yükü (535.5 MPa) altında delik kenarından serbest kenara çizilen patika boyunca çizdirilen ortalama çekme yönü gerilme dağılımı verilmiştir. Bu gerilme dağılımında NOHT dayanımına ($\sigma_0 = 703$ MPa) denk gelen mesafe karakteristik uzunluktur ($d_0 = 1.67$ mm). PSC yönteminin uygulanabilmesi için bu mesafe kullanılmalıdır.



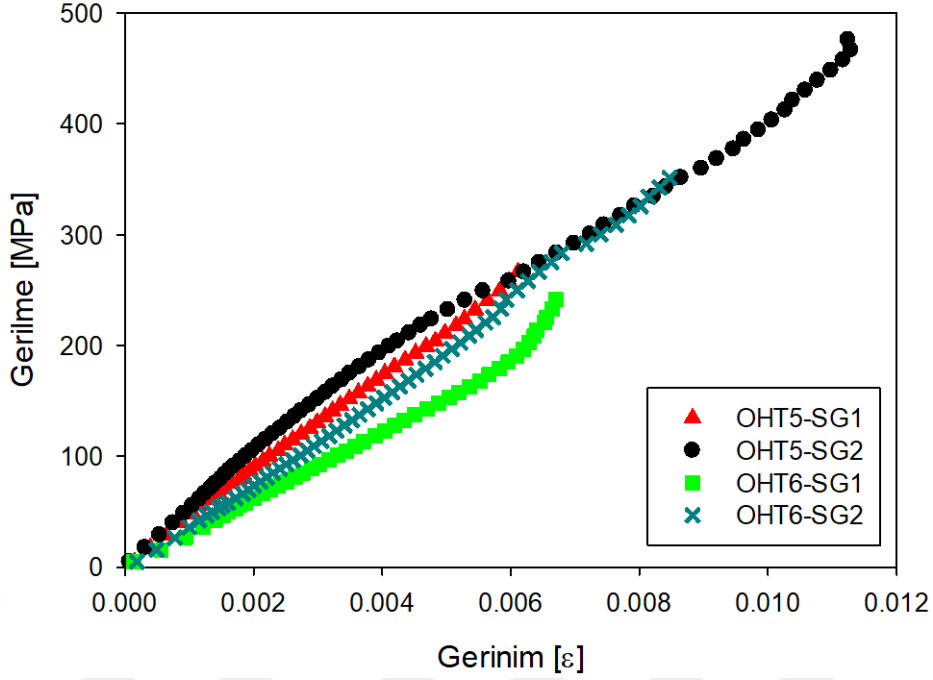
Şekil 5.24: OHT1 numunesi için dayanım yükü altında delik kenarından serbest kenara çizilen patika boyunca çizdirilen ortalama çekme yönü katman gerilme dağılımı

Daha önce de belirttiği üzere PSC yönteminin uygulanabilmesi için karakteristik uzunluk delik kenarında oluşan doğrusal olmayan bölgeden yeterince uzakta olmalıdır. Bu yargıyı desteklemek adına A bölgesi numuneleri (OHT5 ve OHT6) için delik kenarından gerinim ölçümü gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.25’de gösterilen bölgelere 1 mm ölçüm uzunluğundaki gerinim ölçerler yerleştirilmiştir. Bu gerinim ölçerler yaklaşık olarak karakteristik uzunluk bölgesindedir. Dolayısıyla bu gerinimölçerlerden alınan veriler, PSC yönteminin uygulanabilmesi için doğrusal bir davranış göstermelidirler. Özellikle bu numune tipleri için kritik kesit A kesidi olduğunda 2 numaralı gerinimölçerlerin doğrusal davranış göstermesi PSC yönteminin uygulanabilmesi için kritiktir.



Şekil 5.25: OHT5 ve OHT6 numuneleri için kullanılan gerinimölçer konumlandırması (ölçüler mm)

Bu gerinimölçerlerden yükleme boyunca alınan gerinim verileri Şekil 5.26'da gösterilmiştir. Gerinim ölçümlerinden görüleceği üzere gerinimölçerler yüklemenin çok büyük bir kısmında doğrusal davranış göstermişlerdir. Hasar yükünden hemen önce gerinimölçerin yapıştığı yüzeyde oluşan matris hasarları doğrusal davranıştan sapmalar gösterse de bu sapmaların genel doğrusal davranışa etkisinin az olduğu görülmektedir. Doğrusal olmayan davranış için düşük yük seviyelerinde dahi doğrusallıktan sapmalar beklenmektedir. Fakat bu ölçümlerde böyle bir davranış gözlemlenmemiştir. Dolayısıyla A bölgesi numuneleri olan OHT5 ve OHT6 numuneleri için PSC yöntemi uygulanabilir.



Şekil 5.26: OHT5 ve OHT6 numuneleri için delik çevresi gerinimölçer sonuçları

PSC yöntemi sonlu elemanlar analizi ile A bölgesi numuneleri için deliksiz dayanım 703 MPa ve karakteristik uzunluk 1.67 mm alınarak uygulanmıştır. Yani tahmin edilen hasar yüklerinde delik kenarından 1.67 mm uzaklıktaki ortalama katman gerilmesi 703 MPa olarak bulunmuştur. Test yoluyla ve PSC tahminiyle bulunan numune dayanımları Çizelge 5.4’de özetlenmiştir. PSC yönteminin numune dayanımlarını %5’in altında hata payıyla başarıyla tahmin edebildiği görülmüştür.

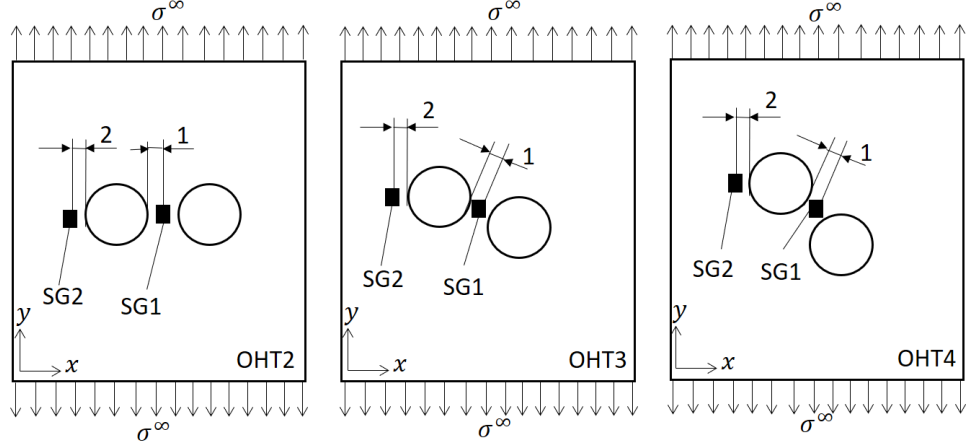
Çizelge 5.4: OHT5 ve OHT6 numuneleri için test ve PSC yöntemi hasar yükü karşılaştırması.

Numune Adı	Dayanım (Test) [MPa]	Dayanım (PSC) [MPa]	Fark [%]
OHT-5	481.2	504.7	4.88
OHT-6	540	563	4.26

5.8 B Bölgesi Numuneleri İçin EPSC Yöntemi Kullanılarak Dayanım Tahmini Yapılması

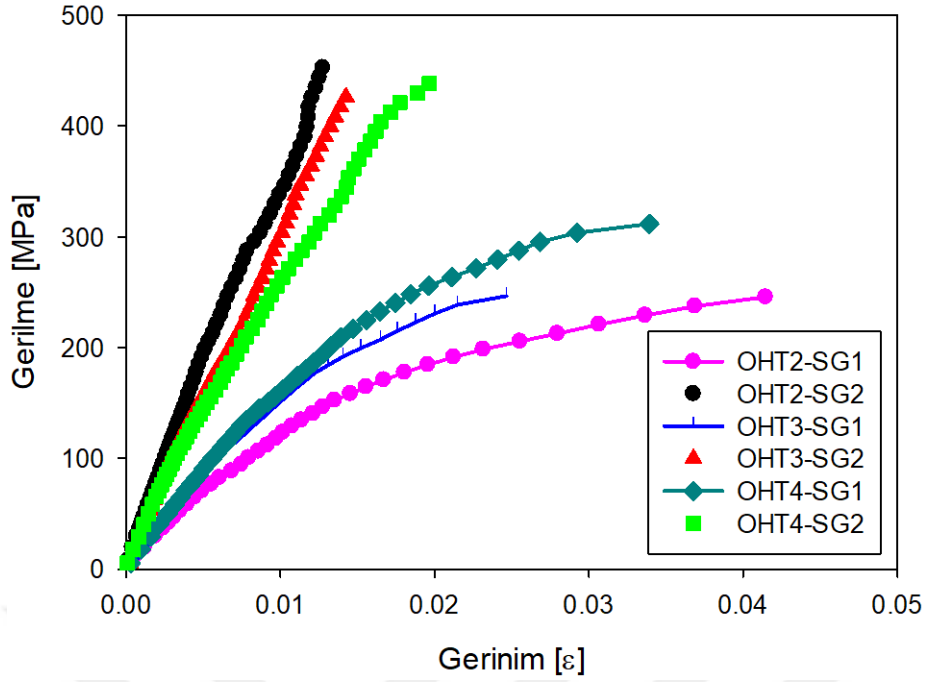
A bölgesi numunelerinde olduğu gibi B bölgesi numuneleri (OHT2, OHT3 ve OHT4) için de delik çevresinden gerinim ölçümü gerçekleştirilerek PSC yönteminin uygulanabilirliği test edilmiştir. Benzer şekilde B bölgesi numuneleri için

delik çevresine konumlandırılan gerinimölçerlerin şematik gösterimi Şekil 5.27’de verilmiştir. Daha önce de belirtildiği gibi bu numunelerin kritik kesidine yerleştirilen 1 numaralı gerinimölçerlerin doğrusal bir davranış göstermeleri halinde PSC, doğrusal olmayan bir davranış göstermeleri halinde ise EPSC yöntemleri dayanım tahmini için kullanılmalıdır.



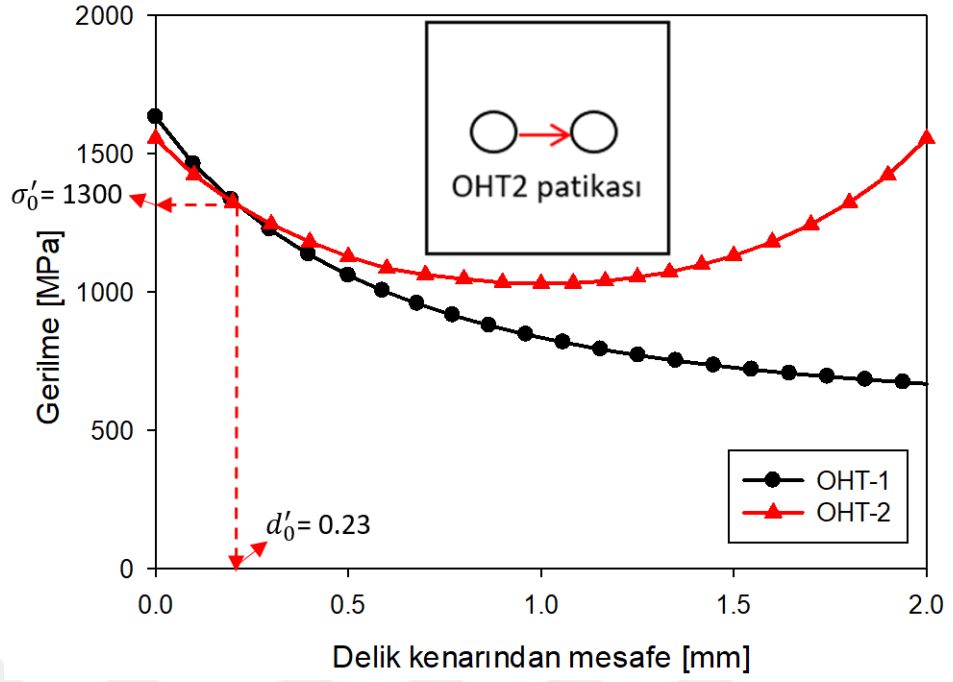
Şekil 5.27: OHT2, OHT3 ve OHT4 numuneleri için kullanılan gerinimölçer konumlandırması (ölçüler mm)

Bu gerinimölçerlerden yükleme boyunca alınan gerinim verileri Şekil 5.28’de gösterilmiştir. Gerinim ölçümlerinden görüleceği üzere, B bölgesi numuneleri için kritik kesitte bulunan 1 numaralı gerinimölçerler çok düşük yük seviyelerinde dahi doğrusal olmayan gerinim davranışı sergilemişlerdir. Diğer taraftan kritik kesitte olmayan gerinimölçerler ise yükleme boyunca doğrusal davranış göstermişlerdir. Dolayısıyla bu numuneler için açık bir şekilde ifade edilebilir ki kritik kesitleri B kesididir ve bu kesitte doğrusal olmayan bir davranış mevcuttur. Doğrusal olmayan davranış PSC yöntemi için kullanılan karakteristik uzunluk mesafesinin içinde kaldığından PSC yöntemi bu numuneler için uygulanabilir değildir. Dolayısıyla bu numunelerin hasar tahmini için EPSC yöntemi kullanılmıştır.



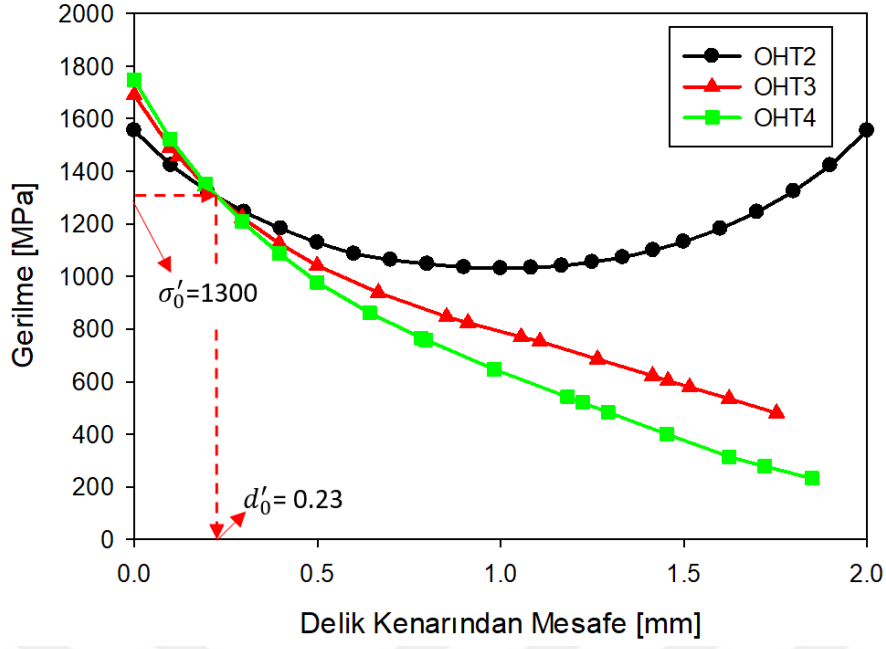
Şekil 5.28: OHT2, OHT3 ve OHT4 numuneleri için delik çevresi gerinimölçer sonuçları

EPSC yönteminin uygulanması için OHT2 numunesi referans numunesi olarak seçilmiş, OHT1 ve OHT2 numunelerinin dayanımları (sırasıyla 534.5 MPa ve 449 MPa) kullanılarak modifiye edilmiş karakteristik uzunluk (d'_0) ve kritik gerilme değeri (σ'_0) bulunmuştur. OHT1 ve OHT2 numunelerinin dayanım yüklemesi altında delik kenarında çizdirilen çekme yönü ortalama katman gerilme dağılımlarının kesiştiği noktada modifiye edilmiş karakteristik uzunluk ve kritik gerilme değerleri bulunmuştur. Modifiye edilmiş karakteristik uzunluk $d'_0 = 0.23$ mm ve kritik gerilme değeri $\sigma'_0 = 1300$ MPa olarak bulunmuştur. Buna göre kritik gerilme ve deliksiz dayanım oranı (σ'_0/σ_0) 1.85 olarak bulunmuştur. Modifiye edilmiş karakteristik uzunluğun sonlu elemanlar analizi kullanılarak bulunması Şekil 5.29'da gösterilmiştir.



Şekil 5.29: OHT1 ve OHT2 numuneleri kullanarak modifiye edilmiş karakteristik uzunluğun bulunması

OHT3 ve OHT4 numunelerinin dayanımları EPSC yöntemiyle kritik gerilme 1300 MPa ve karakteristik uzunluk 0.23 mm değerleri kullanılarak bulunmuştur. Bu numuneler için EPSC yöntemiyle tahmin edilen hasar yükü altında kritik kesitlerinde oluşan ortalama katman gerilme dağılımlarının karakteristik uzunluk noktasında kesişmeleri Şekil 5.30'da gösterilmiştir.



Şekil 5.30: OHT3 ve OHT4 numuneleri için EPSC yöntemiyle hasar yükünün tahmin edilmesi

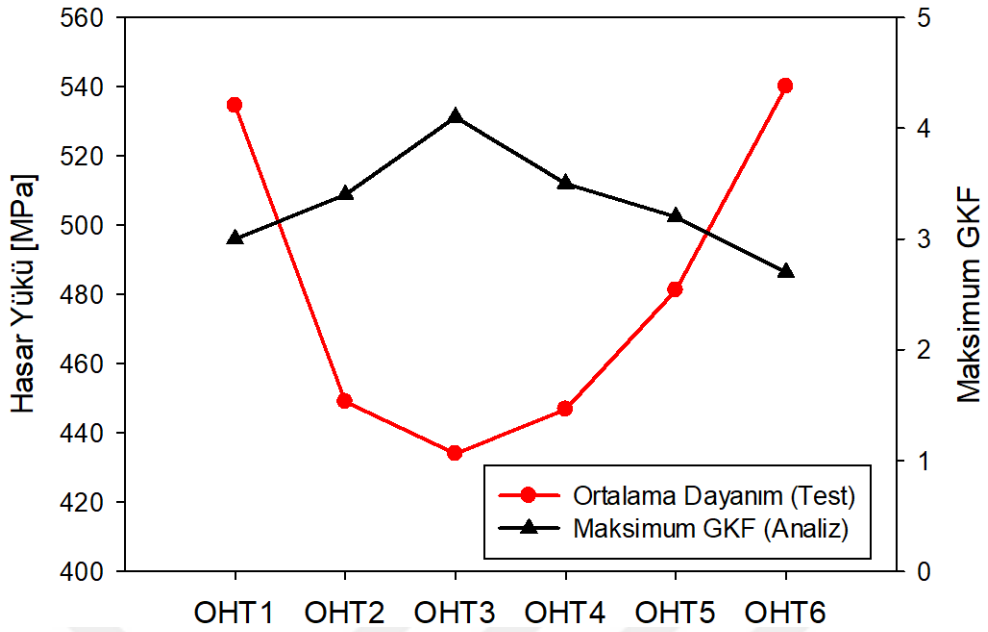
OHT3 ve OHT4 numuneleri için test yoluyla ve EPSC tahminiyle bulunan numune dayanımları Çizelge 5.5’de özetlenmiştir. EPSC yönteminin numune dayanımlarını maksimum %5 hata payıyla başarıyla tahmin edebildiği görülmüştür.

Çizelge 5.5: OHT3 ve OHT4 numuneleri için test ve EPSC yöntemi hasar yükü karşılaştırması.

Numune Adı	Dayanım (Test) [MPa]	Dayanım (EPSC) [MPa]	Fark [%]
OHT-3	434	413.6	4.70
OHT-4	446.8	471.2	5.46

5.9 Genel Sonuçların Verilmesi

Numune dayanımlarının delik oryantasyonu değişmesinden etkilendiği görülmüştür. Farklı oryantasyonlardaki çift delikli OHT numuneleri için çekme testinden elde edilen dayanımlar ve sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen maksimum katman GKF değerleri Şekil 5.31’de gösterilmiştir.



Şekil 5.31: Tüm çift delikli OHT numuneleri için dayanım ve maksimum katman GKF karşılaştırması

22.5° açıyla yerleştirilmiş deliklere sahip OHT3 numunesinin maksimum katman GKF ve minimum dayanıma sahip olduğu görülmüştür. Bu numunenin dayanımını EPSC yöntemi %4.7 hata payıyla tahmin etmiştir. 90° açıyla yerleştirilmiş deliklere sahip OHT6 numunesinin ise minimum katman GKF ve maksimum dayanıma sahip olduğu görülmektedir. PSC yöntemi bu numune dayanımını %4.3 hata payıyla tahmin edebilmiştir. OHT6 için maksimum katman GKF değerinin 3'ün altına düştüğü ve dayanımının aynı zamanda tek delikli numune (OHT1) dayanımından daha fazla olduğu da görülmüştür. Dolayısıyla delikleri çekme yönüne seri bir şekilde açmak delik kenarındaki maksimum katman GKF değerini azaltmış ve tek delikli duruma göre dayanımı arttırmıştır.

Son olarak PSC ve EPSC yöntemleri için kullanılan kritik gerilme ve karakteristik uzunluk değerleri Çizelge 5.6'da karşılaştırılmıştır.

Çizelge 5.6: OHT3 ve OHT4 numuneleri için test ve EPSC yöntemi hasar yükü karşılaştırması.

	PSC	EPSC
Karakteristik uzunluk [mm]	1.67	0.85
Kritik gerilme [MPa]	703	1300



6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yüksek lisans tezimde ana amaç, çok katmanlı kompozit yapılar için tek delikli ve etkileşimli çift delik durumlarındaki gerilme konsantrasyonu davranışını anlamak ve bu yapıların çekme yükü altındaki mekanik dayanımını tahmin edebilmektir. Tez çalışması sonucunda elde edilen çıktılar bu bölümde özetlenmiştir.

Tek delikli katmanlar için; W/D oranının yaklaşık 6'dan yüksek olduğu durumlarda kompozit plakanın sonsuz genişlikteki plaka gibi davrandığını, düşük olduğu durumlarda ise sonlu genişlikteki plaka gibi davrandığı ortaya konulmuştur. Sonlu genişlikteki plaka gibi davranmasının sonucu olarak, kompozit katmanda görülen delik kenarı maksimum GKF değerinde artış görülmüştür. Ayrıca bu kompozit katmanlardaki delik çapının 4 kat azaltılmasıyla dayanımlarının yaklaşık %62.4 oranında artış görüldüğü deneysel olarak ortaya konmuştur. PSC yönteminin de bu numunelerin mekanik dayanımlarını en çok %8.7 hata payıyla tahmin edebildiği bulunmuştur.

Tek delikli numunelerde ikinci çalışma olarak delik çapı ve numune genişliği aynı oranda arttırılarak, delikli kompozit plakalar için boyut etkisi incelenmiştir. Bu numunelerde teorik olarak da beklendiği gibi boyut artışının maksimum GKF değerine etkisi yokken, 2 katlık boyut artışının mekanik dayanımı yaklaşık %13.2 azalttığı deneysel olarak bulunmuştur. Yine PSC yönteminin bu numune mekanik dayanımlarını en çok %6.2 hata payıyla tahmin edebildiği belirtilmiştir.

Çift delikli kompozit katmanlarda, aynı çaptaki iki deliğin bulunduğu durumda, delik merkezleri arası mesafe delik çapının 1.5 katı ve altında olduğu durumlarda etkileşimin başladığı gösterilmiştir. İki deliğin yükleme yönüne göre saat yönünde 22.5° döndürülmesiyle oluşan durumda maksimum katman GKF değerine ulaşılmıştır. 90° döndürülme durumunda ise oluşan GKF'nin tek delikli durumdan daha düşük çıktığı bulunmuştur. Gerçekleştirilen çekme testlerinde ise maksimum GKF'leri doğrulayan sonuçlar olarak en düşük mekanik dayanım delikleri 22.5° ile yerleştirilen numunelerde en yüksek dayanım ise delikleri 90° ile konumlandırılan numunelerde

gözlemlenmiştir.

Ayrıca etkileşimli çift delikli numuneler için PSC yönteminin uygulanabilirliği tartışılmıştır. Bunun sonucunda bazı durumlar için PSC yöntemi uygulanabilirken, bazı durumlarda ise uygulanamayacağı belirtilmiştir. PSC yöntemi, uygulanabildiği çift delikli numunelerde en çok %4.88 hata payıyla mekanik dayanımı başarılı bir şekilde bulmuştur. PSC yönteminin uygulanamayacağı durumlar için ise EPSC yöntemi önerilmiştir. EPSC yöntemi, uygulanabildiği numunelerde en çok %5.46 hata payıyla mekanik dayanımı başarılı bir şekilde tahmin edebilmiştir.

Tez çalışması sonucu elde edilen bulguların ve ortaya sürülen yöntemin yardımı ile mühendisler, tasarımlarındaki delikli kompozit parçalar için mekanik dayanım tespiti yapabileceklerdir. Ayrıca tasarımlarda gerekli olan yüksek maliyetli test yüklerini de azaltacaklardır.

KAYNAKLAR

- [1] **Kaw, A.K.**, *Mechanics of Composite Materials*, CRC press, (2005).
- [2] **Sun, C.T.**, *Comparative Evaluation of Failure Analysis Methods for Composite Laminates*, Technical report, U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, (1996).
- [3] **Mazumdar, S.**, *Composites Manufacturing: Materials, Product, And Process Engineering*, CRC press, (2001).
- [4] **Özaslan, E., Acar, B., Yetgin, A.**, Desing and Validation of a Filament Wound Composite Rocket Motor Case, *ASME 2018 Pressure Vessels and Piping Conference, V03AT03A007-V03AT03A007*. American Society of Mechanical Engineers, (2018).
- [5] **Özaslan, E., Yetgin, A., Coşkun, V., Acar, B., Olğar, T.**, The effects of layer-by-layer thickness and fiber volume fraction variation on the mechanical performance of a pressure vessel, *ASME 2018 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, V001T03A006-V001T03A006*. American Society of Mechanical Engineers, (2018).
- [6] **Toubal, L., Karama, M., Lorrain, B.**, (2005). Stress concentration in a circular hole in composite plate. *Composite structures*, 68(1):31-36.
- [7] **Dirikoğlu, M.H., Aktaş, A.**, (2000). Analytical and finite element comparisons of stress intensity factors of composite materials. *Composites structures*, 50(1):99-102.
- [8] **Abu-Farsakh, G.A., Almasri, H.A., Qa, H.D.**, (2015). Stress concentration around a central hole as affected by material nonlinearity in fibrous composite laminated plates subject to in-plane loading. *Science and Engineering of Composite Materials*, 22(1):31–36.
- [9] **Kumar, A., Agrawal, A., Ghadai, R., Kalita, K.**, (2016). Analysis of stress concentration in orthotropic laminates. *Procedia Technology*, 23:156–162.
- [10] **Bakhshandeh, K., Rajabi, I., Rahimi, F.**, (2008). Investigation of stress concentration factor for finite-width orthotropic rectangular plates with a circular opening using three-dimensional finite element model. *Strojniski Vestnik*, 54(2):140.
- [11] **Wu, C.H., Mu, B.**, (2003). On stress concentrations for isotropic/orthotropic plates and cylinders with a circular hole. *Composites Part B: Engineering*, 34(2):127–134.

- [12] **Jain, K.N., Mittal, N.,** (2009). Analysis of stress concentration and deflection in isotropic and orthotropic rectangular plates with central circular hole under transverse static loading. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 36:446–452.
- [13] **Pandita, S.D., Nishiyabu, K., Verpoest, I.,** (2003). Strain concentrations in woven fabric composites with holes. *Composite Structures*, 59(3):361–368.
- [14] **Henshaw, J.M., Sorem, J.R., Glaessgen, E.H.,** (1996). Finite element analysis of ply-by-ply and equivalent stress concentrations in composite plates with multiple holes under tensile and shear loading. *Composite structures*, 36(1-2):45–58.
- [15] **Camanho, P.P.,** Failure criteria for fibre-reinforced polymer composites. Secção de Mecânica Aplicada, Departamento de Engenharia Mecânica e Gestao Industrial, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2002.
- [16] **Whitney, J.M., Nuismer, R.J.,** (1974). Stress fracture criteria for laminated composites containing stress concentrations. *Journal of Composite Materials*, 8(3):253–265.
- [17] **Özaslan, E., Yetgin, A., Acar, B.,** (2019). Stress concentration and strength prediction of 2x2 twill weave fabric composite with a circular hole. *Journal of Composite Materials*, 53(4):463–474.
- [18] **Camanho, P.P., Erçin, G.H., Catalanotti, G., Mahdi, S., Linde, P.,** (2012). A finite fracture mechanics model for the prediction of the open-hole strength of composite laminates. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 43(8):1219–1225.
- [19] **Camanho, P.P., Maimi, P., Davila, C.G.,** (2007). Prediction of size effects in notched laminates using continuum damage mechanics. *Composites Science and Technology*, 67(13):2715–2727.
- [20] **Wisnom, M.R., Khan, B., Hallett, S.R.,** (2008). Size effects in unnotched tensile strength of unidirectional and quasi-isotropic carbon/epoxy composites. *Composite Structures*, 84(1):21–28.
- [21] **Hallett S.R., Jiang, G.W., Wisnom, M.R.,** (2009). Effect of stacking sequence on open-hole tensile strength of composite laminates. *AIAA journal*, 47(7):1692–1699.
- [22] **Yuan, Y., Yao, X., Liu, B., Yang, H., Imtiaz, H.,** (2017). Failure modes and strength prediction of thin ply cfrp angle-ply laminates. *Composite Structures*, 176:729–735.
- [23] **Abdellah, M.Y.,** (2018). Comparative study on prediction of fracture toughness of cfrp laminates from size effect law of open hole specimen using cohesive zone model. *Engineering Fracture Mechanics*, 191:277–285.

- [24] Eriksson, I., Aronson, G.G., (1990). Strength of tensile loaded graphite/epoxy laminates containing cracks, open and filled holes. *Journal of Composite Materials*, 24(5):456–482.
- [25] Waddoups, M.E., Eisenmann, J.R., Kaminski, B.E., (1971). Macroscopic fracture mechanics of advanced composite materials. *Journal of Composite Materials*, 5(4):446–454.
- [26] Singh, M., Saini, J.S., Bhunia, H., (2018), To study the contribution of different geometric parameters on the failure load for multi holes pin joints prepared from glass/epoxy nanoclay laminates. *Journal of Composite Materials*, 52(5):629–644.
- [27] Khedkar, S., Chinthapenta, V., Madhavan, M., Ramji, M., (2015). Progressive failure analysis of cfrp laminate with interacting holes under compressive loading. *Journal of Composite Materials*, 49(26):3263–3283.
- [28] Ubaid, J., Kashfuddoja, M., Ramji, M., (2014). Strength prediction and progressive failure analysis of carbon fiber reinforced polymer laminate with multiple interacting holes involving three dimensional finite element analysis and digital image correlation. *International Journal of Damage Mechanics*, 23(5):609–635.
- [29] Ghezzi, F., Giannini, G., Cesari, F., Caligiana, G., (2008). Numerical and experimental analysis of the interaction between two notches in carbon fibre laminates. *Composites Science and Technology*, 68(3-4):1057–1072.
- [30] Kazemahvazi, S., Kiele, J., Zenkert, D., (2010). Tensile strength of ud-composite laminates with multiple holes. *Composites Science and Technology*, 70(8):1280–1287.
- [31] Eugene, D.J., Russel, K., Wen, S.C., Selvaraj, S., (2009), Strength of composite laminate with multiple holes. *University of Texas at Arlington, The Boeing Company*, 1–9.
- [32] Xu, X., Man, H.C., Yue, T.M., (2000). Strength prediction of composite laminates with multiple elliptical holes. *International journal of Solids and Structures*, 37(21):2887–2900.
- [33] Lekhtiskii, S.G., (1968). Anisotropic plates. Technical report, Foreign Technology Div Wright-Patterson Afb Oh.
- [34] Tan, S.C., (1988). Finite-width correction factors for anisotropic plate containing a central opening. *Journal of Composite Materials*, 22(11):1080–1097.
- [35] Hashin, Z., Rotem, A., (1973). A fatigue failure criterion for fiber reinforced materials. *Journal of Composite Materials*, 7(4):448–464.
- [36] Hashin, Z., (1980). Failure criteria for unidirectional fiber composites. *Journal of Applied Mechanics*, 47(2):329–334.
- [37] Tsai, S., Wu, E.M., (1971). A general theory of strength for anisotropic materials. *Journal of Composite Materials*, 5(1):58–80.

- [38] **Smith, L.J.**, (1988). Predictions of the original and truncated maximum-strain failure models for certain fibrous composite laminates. *Composites Science and Technology*, 58(7):1151–1178.
- [39] **Tsai, S.W.**, Strength characteristics of composite materials nasa-cr 224. National Aeronautics and Space Agency, Washington, DC, (1965).
- [40] **Azzi, V.D., Tsai, S.W.**, (1965). Anisotropic strength of composites. *Experimental Mechanics*, 5(9):283–288.
- [41] **Hoffman, O.**, (1967). The brittle strength of orthotropic materials. *Journal of Composite Materials*, 1(2):200–206.
- [42] **Lapczyk, I., Hurtade, J.A.**, (2007). Progressive damage modeling in fiber-reinforced materials. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38(11):2333–2341.
- [43] **ASTM.**, Standard test method for constituent content of composite materials. Standard ASTM D3171-15, American Society of Testing Materials, West Conshohocken, PA, (2015).
- [44] **ASTM.**, Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials. Standard ASTM D3039 / D3039M-17, American Society of Testing Materials, West Conshohocken, PA, (2017).
- [45] **ASTM.**, Standard test method for in-plane shear response of polymer matrix composite materials by tensile test of a +/- 45 laminate. Standard ASTM D3518 / D3518M-18, American Society of Testing Materials, West Conshohocken, PA, (2018).
- [46] **ABAQUS.**, Theory and user's manuals. Dassault systems, USA, (2016).
- [47] **ASTM.**, Standard test method for open-hole tensile strength of polymer matrix composite laminates. Standard, American Society of Testing Materials, West Conshohocken, PA, (2018).
- [48] **Wang, J., Callus, P.J., Bannister, M.K.**, (2004). Experimental and numerical investigation of the tension and compression strength of un-notched and notched quasi-isotropic laminates. *Composite Structures*, 64(3-4):297–306.
- [49] **Taylor, D.**, (2008). The theory of critical distances. *Engineering Fracture Mechanics*, 75(7):1696–1705.
- [50] **Kinloch, A.J., Shaw, S.J., Tod, D.A., Hunston, D.L.**, (1983). Deformation and fracture behaviour of a rubber-toughened epoxy: 1. microstructure and fracture studies. *Polymer*, 24(10):1341–1354.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Emre Özaslan
Uyruğu : TC
Doğum Tarihi ve Yeri : 01.01.1992 Gaziantep
E-posta : ozaslane@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2015, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi,
Makine Mühendisliği Bölümü

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

Yıl	Yer	Görev
2015-Devam ediyor	Roketsan A.Ş.	Yapısal Analiz ve Test Mühendisi

YABANCI DİL: İngilizce

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Özaslan, E.**, Guler, M.A., Acar, B., 2018. Experimental and numerical investigation of stress concentration and strength prediction of carbon/epoxy composites, European Conference on Fracture 22, August 26-31, Belgrade, Serbia.
- **Özaslan, E.**, Guler, M.A., Yetgin, A., Acar, B., 2019 (Accepted). Stress Analysis and Strength Prediction of Composite Laminates with Two Interacting Holes, Composite Structures. . . .