

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

(YÜKSEK LİSANS TEZİ)

**CAM ELYAFLI KOMPOZİT
MALZEMELERİN ATMOSFERİK
ORTAMDA VE DENİZ ORTAMINDA
YORULMA SİMÜLASYONU**

Engin ÜNAL

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Bilim Dalı Kodu: 625.03.00

Sunuş Tarihi: 01/08/2006

Tez Danışmanı: Doç. Dr. K. Turgut GÜRSEL

Bornova-İZMİR

Sayın **Engin ÜNAL** tarafından YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak sunulan **“Cam Elyafı Kompozit Malzemelerin Atmosferik Ortamda ve Deniz Ortamında Yorulma Simülasyonu”** başlıklı bu çalışma E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi’nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 01/08/2006 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri:

İmza

Jüri Başkanı	: Doç. Dr. K. Turgut GÜRSEL	
Raportör Üye	: Yrd. Doç. Dr. Hüseyin ÖZDEN	
Üye	: Yrd. Doç. Dr. Gökdeniz NEŞER	

ÖZET

CAM ELYAFLI KOMPOZİT MALZEMELERİN ATMOSFERİK
ORTAMDA VE DENİZ ORTAMINDA YORULMA SİMÜLASYONU

ÜNAL, Engin

Yüksek Lisans Tezi, Makina Mühendisliği Bölümü

Tez Yöneticisi: Doç. Dr. K. Turgut GÜRSEL

Bu çalışmada; dikişsiz (non-stitch) çeşitli oryantasyonlardaki E tipi çok tabakalı cam elyafla güçlendirilmiş polyester matrisli kompozit malzemedan hazırlanan numunelerin oda sıcaklığında, havada ve deniz suyunda çekme-çekme prensibine göre yapılan yorulma testlerinin PATRAN ve NASTRAN yazılımları yardımıyla simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Analiz, deney koşullarına uygun olarak ve deney verilerinden yararlanarak önce hava içinde, daha sonra da korozif ortamı simüle eden deniz suyu ortamında kabuk elemanlar kullanılarak yapılmıştır. Son aşamada, elde edilen sonuçlar, deney sonuçlarıyla karşılaştırılarak incelenmiş ve sonuçların birbirine yakın olduğu saptanmıştır. Ayrıca, diğer yükleme koşulları (basma, eğilme, burulma), deneye gereksinim duyulmadan simüle edilerek oryantasyonun gerilme ve yorulma dağılımına etkisi incelenmiştir. Bunlara ek olarak analizler, katı elemanlar kullanılarak yapılan aynı tür analizlerle genişletilmiş ve elde edilen sonuçlar kıyaslanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Sonlu Elemanlar Yöntemi, E-Cam, Kompozit malzeme, Yorulma, Deniz ortamı, Simülasyon, Polyester matris

ABSTRACT

**SIMULATION OF FATIGUE BEHAVIOUR OF E-GLASS FIBER
REINFORCED POLYESTER COMPOSITES IN ATMOSPHERIC
AND MARINE ENVIRONMENTS**

ÜNAL, Engin

MSc, in Mechanical Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. K. Turgut GÜRSEL

In this study; fatigue tests of specimens made of composite material consisted of non-stitch E-glass reinforced multi-layer polyester resin matrix were simulated by PATRAN and NASTRAN under atmospheric and simulated seawater environments at the temperature of 23°C. Analyses were performed by means of the test data in test conditions in atmospheric and marine environments according to tension-tension principal. Finally, the results obtained were compared with the test ones. Then this analysis was repeated with different types of loading (compression, bending, and torsion) without testing in order to determine the effect of orientation over the stress and fatigue life distribution, and the results were inspected. In addition to this simulations performed with shell element types; analyses were widened with solid element types and all results obtained were compared with each other.

Key Words: Finite Element Method, E-Glass, Composite material, Fatigue, Marine environment, Simulation, Polyester matrix.

TEŞEKKÜR

Yazar, özellikle Doç. Dr. Kadri Turgut GÜRSEL, Onur KIRLI ve Oğuz AYTEKİN'e bu tezin hazırlanmasındaki yardımlarından dolayı en içten teşekkürlerini sunar. Ayrıca gereksinimleri ve fikirlerine olan yakınlığıyla bu çalışmanın programlama aşamasındaki yardımlarından dolayı BIAS firmasına şükranlarını sunmayı borç bilir, ZF LEMFÖRDER firmasına da sağladığı değerli bilgilerden ötürü çok teşekkür eder.

Engin ÜNAL

İzmir 2006

İÇİNDEKİLER

<u>Bölüm</u>	<u>Sayfa</u>
ÖZET.....	V
ABSTRACT.....	VII
TEŞEKKÜR.....	IX
İÇİNDEKİLER	XI
SEMBOLLER.....	XVII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XX
TABLolar DİZİNİ	XXV
1. GİRİŞ	1
1.1 ARAŞTIRMANIN AMACI	1
1.2 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	1
2. KOMPOZİT MALZEMELER.....	4
2.1 GİRİŞ	4
2.1.1 Tanım ve Özellikler.....	4
2.1.2 Tarihsel Gelişim	6
2.1.3 Kompozit Malzemelerin Avantajları.....	7
2.1.4 Kompozit Malzemelerin Çeşitleri ve Sınıflandırılması.....	7
2.1.5 Kompoziti Oluşturan Malzemelerin Özellikleri	9
2.1.6 Kompozit Malzemeler Teknolojisinin Amaçları.....	10
2.1.7 Kompozit Malzemelerin Günümüzdeki Yeri ve Gelecekteki Beklentiler	11
2.2 KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ ...	13
2.2.1 Tek Yönlü Katmanın Elastik Davranışı	13
2.2.1.1 Temel Katman Özellikleri	13
2.2.1.2 Gerilme – Şekil Değiştirme İlişkisi	15

2.2.1.3 Matematik ve Mühendislik Sabitleri Arasındaki Bağlıntılar	18
2.2.1.4 İnce Bir Katmandaki Gerilme – Şekil Değiştirme İlişkileri	19
2.2.1.5 Gerilme ve Şekil Değiştirmenin Transformasyonu.....	20
2.2.1.6 Elastik Parametrelerin Transformasyonu	22
2.2.1.7 Gerilme – Şekil Değiştirme İlişkilerinin Mühendislik Sabitleri Cinsinden Transformasyonu	24
2.2.1.8 Mühendislik Sabitlerinin Transformasyonu.....	25
2.2.1.9 Elastik Sabitlerin Mikro Mekanik Denklemleri	25
2.3 TEK YÖNLÜ KATMANIN MUKAVEMETİ	27
2.3.1 Kırılmanın Mikro Mekanik	27
2.3.1.1 Boyuna Çekme (Gerilme)	27
2.3.1.2 Boyuna Sıkıştırma (Basma)	29
2.3.1.3 Enine Çekme (Gerilme)	30
2.3.1.4 Enine Sıkıştırma (Basma)	31
2.3.1.5 Düzlem İçi Kesme Gerilmesi	32
2.3.2 Makro Mekanik Kırılma Teorileri	34
2.3.2.1 Maksimum Gerilme Teorisi	34
2.3.2.2 Maksimum Şekil Değiştirme Teorisi	36
2.3.2.3 Saptırıcı Şekil Değiştirme Enerjisi Teorisi (Tsai-Hill)	37
2.3.2.4 Etkileşimli Tensör Polinom Teorisi (Tsai-Wu).....	39
2.4 ÇOK YÖNLÜ LEVHANIN ELASTİK DAVRANIŞI	44
2.4.1 Şekil Değiştirme – Yer Değiştirme İlişkisi	44
2.4.2 Kompozitin Bir Tabakasındaki Gerilme – Şekil Değiştirme İlişkisi	47
2.4.3 Yük ve Moment Oluşumları.....	49
2.4.4 Genel Yük – Yer Değiştirme İlişkisi : Levhanın Kalınlık Matrisi	51
2.4.5 Yük – Yer Değiştirme İlişkisinin Tersisi : Levhanın Uygunluk Matrisi	54
2.4.6 Simetrik Levhalar	55
2.4.7 Levhanın Mühendislik Sabitleri	57

2.5 ÇOKYÖNLÜ LEVHANIN GERİLME VE KIRILMA ANALİZİ ..	58
2.5.1 Kırılma Tipleri.....	59
2.5.2 Gerilme Analizi ve İlk Katmanın Kırılması Güvenlik Faktörlerinin Bulunması.....	59
2.6 HİDROTERMAL ETKİLER	60
2.6.1 Giriş	60
2.6.1.1 Fiziksel ve Kimyasal Etkiler	61
2.6.1.2 Mekanik Özellikler Üzerindeki Etkiler	61
2.6.1.3 Hidrotermoelastik (HTE) Etkiler.....	62
2.6.2 Hidrotermal Etkiler ve Mekanik Davranış	62
2.6.3 Tekyönlü Katmanın Termal ve Neme Bağlı Genleşme Katsayıları	62
2.6.4 Tekyönlü Katmanın Hidrotermal Şekil Değiştirmesi.....	65
2.6.5 Hidrotermoelastik Gerilme – Şekil Değiştirme İlişkileri	66
3. SONLU ELEMENLAR ANALİZİ.....	69
3.1 YER DEĞİŞTİRME SAHASI.....	70
3.1.1 İki Boyutlu Şekil Değiştirme – Yer Değiştirme Sahası	70
3.2 SABİT KESİTLİ ÇUBUĞUN KATILIĞI	71
3.3 DÜĞÜM NOKTALARINDAKİ YER DEĞİŞTİRMELER VE KUVVETLER	72
3.4 BİRDEN FAZLA ELEMEN OLMASI DURUMU	74
3.4.1 Devamlılık İlişkileri	75
3.4.2 Kuvvet Denge İlişkileri	76
3.5 SONLU ELEMENLAR METODUNUN FORMÜLASYONU ...	79
3.5.1 Denge Koşulu ve Sanal Yer Değiştirme Prensibi	80
3.5.2 Sonlu Elemanlar Yer Değiştirme Metodu	86
4. YORULMA	90
4.1 YORULMA NEDİR?	90
4.2 YORULMANIN TARİHÇESİ	92

4.3 WÖHLER DİYAGRAMI.....	93
4.4 YÜKSEK DÖNGÜSEL YORULMA VE DÜŞÜK DÖNGÜSEL YORULMA.....	94
4.5 YORULMA ANALİZİ YAKLAŞIMLARI	95
4.6 GERİLME – ÖMÜR (S-N) ANALİZİ	96
4.6.1 Gerilme Çevrimleri	96
4.6.2 S-N Diyagramı	98
4.6.3 Ortalama Gerilmenin Yorulma Analizine Etkisi	104
4.6.4 Yorulma Ömrünü Etkileyen Faktörler	106
4.6.4.1 Teknolojik Boyut Etkileri	107
4.6.4.2 Nominal Gerilmeler ve Gerçek Gerilmeler (Çentik Etkisi)	109
4.6.4.3 Yüzey Etkileri	110
4.7 KOMPOZİT MALZEMELERİN YORULMA DAVRANIŞI.....	111
4.7.1 Çekme-Çekme Yorulması.....	113
4.7.1.1 Tek yönlü Levhalar	113
4.7.1.2 Çok yönlü Levhalar	116
4.7.1 Çekme-Basma Yorulması	121
5. DENEY VE SONUÇLARI.....	124
5.1 DENEYDE KULLANILAN NUMUNELER	125
5.2 NUMUNELERİN ORYANTASYONU (FİBERLERİN DİZİLİM AÇILARI).....	126
5.3 DENEYİN YAPILIŞI VE SONUÇLARI	129
6. PATRAN/NASTRAN KULLANILARAK SİMÜLE EDİLMİŞ BENZER KOMPOZİT ÇALIŞMASI ÖRNEĞİ.....	144

7. KABUK ELEMANLARLA MODELLENEN KOMPOZİT ÇEKME ÇUBUKLARININ GERİLME VE YORULMA SİMÜLASYONU VE SONUÇLARI.....	145
7.1 SİMÜLASYON	145
7.2 TEST EDİLEN NUMUNELERİN SONLU ELEMANLAR ANALİZİ SONUÇLARI	162
8. KABUK ELEMANLAR KULLANARAK SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE DEĞİŞİK YÜKLEME ÇEŞİTLERİNİN GERİLME VE YORULMA ANALİZİ	184
8.1 ÇEKME SİMÜLASYONU SONUÇLARI.....	185
8.2 BASMA SİMÜLASYONU SONUÇLARI	187
8.3 EĞİLME SİMÜLASYONU SONUÇLARI.....	189
9. KATI ELEMANLARLA MODELLENEN KOMPOZİT ÇEKME ÇUBUKLARININ GERİLME VE YORULMA SİMÜLASYONU	192
10. KATI ELEMANLARLA MODELLENMİŞ, FARKLI ORYANTASYONLARDAKİ KOMPOZİT ÇUBUKLARIN DEĞİŞİK YÜKLEMELER ALTINDAKİ GERİLME DAVRANIŞLARININ KİYASLANMASI	203
10.1 ÇEKME YÜKÜ KİYASLAMASI.....	203
10.2 BASMA YÜKÜ KİYASLAMASI	206
10.3 EĞİLME YÜKÜ KİYASLAMASI	208

10.4 BURULMA YÜKÜ KİYASLAMASI	211
11. GENEL DEĞERLENDİRME	215
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	219
ÖZGEÇMİŞ	221

SEMBOLLER

E	Elastisite modülü
G	Kayma modülü
ν	Poisson oranı
ε	Birim şekil değiştirme vektörü
σ	Gerilme
V_f	Hacimsel fiber oranı
W_f	Ağırlığa dayalı fiber oranı
V_m	Hacimsel matris oranı
W_m	Ağırlığa dayalı matris oranı
C	Katılık matrisi komponentleri
S	Uygunluk matrisi komponentleri
τ	Kayma gerilmesi
K	Katılık matrisi
γ	Kayma açısı
η	Kesme katsayısı
E_m	Matrisin elastisite modülü
E_f	Fiberin elastisite modülü
ε_{ft}^u	Fiberin kritik çekme uzaması
ε_{mt}^u	Matrisin kritik çekme uzaması
F_c	Basma yükü dayanım kuvveti
F_t	Çekme yükü dayanım kuvveti
F_s	Kesme yükü dayanım kuvveti
k_σ	Gerilme konsantrasyon faktörü
σ_{rm}	Maksimum artık gerilme

XVIII

ϵ_{rm}	Maksimum artık şekil değiştirme
k_{τ}	Kesme gerilmesi konsantrasyon faktörü
σ_{yp}	Akma gerilmesi
f	Dayanım tensörü
u, v, w	Yer değiştirme tensörleri
α	dönme açısı (eğim)
κ	Şeklin eğriliği
h	Katman yüksekliği
A, B, D	Levha katılık matrisi komponentleri
N	Düzlem içi kuvvetler
M	Düzlem içi momentler,
a, b, c, d	Levha uygunluk matrisi komponentleri
S_{fk}	Güvenlik katsayıları
α_1, α_2	Termal genleşme katsayıları
β_1, β_2	Nemsel genleşme katsayıları
c	Nem yoğunluğu katsayısı
T	Sıcaklık
e	Hidrotermal şekil değiştirme tensörü
N^{HT}	Hidrotermal kuvvet
N_D	Sonsuz ömür
σ_D	Yorulma limiti gerilmesi
σ_{max}, S_{max}	Maksimum gerilme
σ_{min}, S_{min}	Minimum gerilme
σ_m, S_m	Ortalama gerilme
σ_a, S_a	Gerilme genliği
σ_r, S_r	Gerilme sınırı aralığı

R	Gerilme oranı
A	Genlik oranı
S_y	Akma gerilmesi
S_e	Dayanıklılık (yorulma) gerilmesi
σ_f	Kırılma gerilmesi
S_u	Kopma gerilmesi
C_{size}	Bileşen boyutu faktörü
C_{notch}	Çentik faktörü
C_{surf}	Yüzey faktörü
K_f	Yorulma dayanımı indirgeme faktörü
V_r	Referans hacim
S_{er}	Referans hacim için dayanıklılık limiti
S_{eo}	Herhangi bir hacim için dayanıklılık limiti
ε_c	Kırılma şekil değiştirmesi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil

Sayfa

Şekil 2.1 - Kompozit malzemenin yapısı.....	5
Şekil 2.2 - Kompozit malzeme sistemlerinin sınıflandırılması.....	8
Şekil 2.3 - Tipik fiberlerin gerilme-şekil değiştirme grafikleri.....	9
Şekil 2.4 - Kompozit malzemelerde kullanılan fiberlerin performans haritası	10
Şekil 2.5 - Kompozitlerin yüklenme şekilleri (Normal gerilme yükleri)	14
Şekil 2.6 - Kompozitlerin yüklenme şekilleri (Kesme yükleri).....	15
Şekil 2.7 - Noktasal gerilme durumları.....	15
Şekil 2.8 - Enine izotropiye sahip ortotropik malzeme	17
Şekil 2.9 - Tek yönlü katmanda yükleme ve malzeme eksenlerine göre gerilme bileşenleri	21
Şekil 2.10 - Fiber baskın durumda kompozitin ve bileşenlerinin gerilme-şekil değiştirme eğrileri	28
Şekil 2.11 - Matris baskın durumda kompozitin ve bileşenlerinin gerilme-şekil değiştirme eğrileri	29
Şekil 2.12 - Enine çekme durumunda matristeki gerilme konsantrasyon faktörü (k_{σ}).....	30
Şekil 2.13 - Tek yönlü katmanın temel mukavemet parametreleri	33
Şekil 2.14 - Tek yönlü katmanın çift eksenli yük altındaki kırılma zarfı (Maksimum gerilme teorisi).....	35
Şekil 2.15 - Tek yönlü katmanın çift eksenli yük altındaki kırılma zarfı (Maksimum şekil değiştirme teorisi)	36
Şekil 2.16 - Temel malzeme eksenleri doğrultusunda etkiyen pozitif ve negatif kesme gerilmeleri	41
Şekil 2.17 - E-Cam/Epoksi katmanın dört farklı seviyedeki kesme yükü altında kırılma zarfı (Tsai-Wu teorisi)	44
Şekil 2.18 - Deformasyondan önceki ve sonraki katman kesitleri	45
Şekil 2.19 - Kompozit levhadaki k katmanı	48
Şekil 2.20 - Çok yönlü levhadaki doğrusal şekil değiştirme ve süreksiz gerilme değişimi.....	49
Şekil 2.21 - Tek bir katmanın üzerinde oluşabilecek kuvvetler ve momentler	49
Şekil 2.22 - Çok yönlü levhadaki her bir katmanın koordinat notasyonu	50

Şekil 2.23 - Simetrik levhadaki benzer k ve k' katmanları	56
Şekil 2.24 - Tek yönlü katmandaki termal ve neme bağlı genleşme katsayıları	63
Şekil 3.1 - Konsol giriş ve sonlu elemanlar modeli	70
Şekil 3.2 - Ana sistem ve model	71
Şekil 3.3 - Ayrıntılı model ve değişkenler	72
Şekil 3.4 - İndirgenmiş model.....	74
Şekil 3.5 - Çözüm matrisi	74
Şekil 3.6 - Birden fazla sayıda eleman olması durumunda sistem modeli	75
Şekil 3.7 - Birden fazla sayıda eleman olması durumunda çözüm matrisi	77
Şekil 3.8 - Birden fazla eleman olması durumunda sistem modeli ve sınır koşulları	78
Şekil 3.9 - İndirgenmiş çözüm matrisi	78
Şekil 3.10 - Parça üzerine gelen kuvvetlerin sembolik gösterimi.....	79
Şekil 3.11 - Sık kullanılan eleman tipleri.....	82
Şekil 3.12 - Son işlem akış şeması.....	85
Şekil 4.1 - Yorulma davranışı bölgeleri	94
Şekil 4.2 - Döngüsel gerilim çeşitleri.....	97
Şekil 4.3 - Yorulma test makinelerinin şematik resimleri.....	99
Şekil 4.4 - Dönen giriş ve eksenel yükleme testlerinin gerilme dağılımları	99
Şekil 4.5 - Yaygın yorulma testi numuneleri	100
Şekil 4.6 - Doğrusal bir S-N diyagramı	101
Şekil 4.7 - Logaritmik P-S-N eğrisi (Wöhler diyagramı)	102
Şekil 4.8 - Yorulma limitinin hesaplanması için kullanılan istatistiksel merdiven metodu	104
Şekil 4.9 - Ortalama gerilme düzeltme metotları	105
Şekil 4.10 - Kritik gerilme altındaki alan.....	108
Şekil 4.11 - Nominal gerilmelere karşı gerçek gerilmeler	110
Şekil 4.12 - Çeşitli malzemeler için yorulma dayanımının kıyaslanması	112
Şekil 4.13 - Üç tek yönlü kompozit malzemenin normalize edilmiş S-N eğrileri	113
Şekil 4.14 - Tekyönlü kompozit için hasar mekanizmaları ile yorulma ömrü diyagramı	115
Şekil 4.15 - Katman diziliminin yorulma ömrüne etkisi.....	117

Şekil 4.16 - Değişen miktarlardaki 0° fiberlerin sayısının yorulma ömrüne etkisi	118
Şekil 4.17 - Kompozit levhadaki yorulma hasarı mekanizmaları.....	118
Şekil 4.18 - Matris çatlaklarının büyümesi	119
Şekil 4.19 - Çevrim esnasında dayanım ve katılıktaki düşüş	120
Şekil 4.20 - Gerilme oranının tek yönlü kompozitin yorulma dayanımına etkisi	122
Şekil 4.21 - Çekme-çekme ve çekme-basma yorulma ömürlerinin kıyaslanması.....	123
Şekil 4.22 - Değişik tek yönlü kompozitlerin ortalama gerilmelerinin 10 ⁷ çevrimdeki yorulma ömürlerine etkisi	124
Şekil 5.1 - Deney numunesinde kullanılan değişik oryantasyonlu kompozit levhalar.....	127
Şekil 5.2 - Deney numunesinin mikroskopik görünüşü.....	128
Şekil 5.3 - Deney numunesinin mikroskopik görünüşü.....	129
Şekil 5.4 - Delaminasyona uğrayan (kırılan) numuneler	131
Şekil 5.5 - Test makinası ve numunelerin deniz ortamındaki testleri ...	132
Şekil 5.6 - 5mm kalınlığındaki 0° açıda kesilmiş numunenin atmosferik ortamdaki ve deniz ortamındaki S-N eğrisi	141
Şekil 5.7 - 5mm kalınlığındaki 45° açıda kesilmiş numunenin atmosferik ortamdaki ve deniz ortamındaki S-N eğrisi	141
Şekil 5.8 - 5mm kalınlığındaki 90° açıda kesilmiş numunenin atmosferik ortamdaki ve deniz ortamındaki S-N eğrisi	142
Şekil 5.9 - 10mm kalınlığındaki 0° açıda kesilmiş numunenin atmosferik ortamdaki ve deniz ortamındaki S-N eğrisi	142
Şekil 5.10 - 10mm kalınlığındaki 45° açıda kesilmiş numunenin atmosferik ortamdaki ve deniz ortamındaki S-N eğrisi	143
Şekil 5.11 - 10mm kalınlığındaki 90° açıda kesilmiş numunenin atmosferik ortamdaki ve deniz ortamındaki S-N eğrisi	143
Şekil 6.1 - Analizi yapılan kanat profili sanal simülasyon modeli ve sonuçları	145
Şekil 7.1 - 5mm'lik numunenin Catia V5 modeli.....	146
Şekil 7.2 - Numunenin ağ yapısı ve sınır koşulları.....	147
Şekil 7.3 - MSC Patran programına katmanların tanıtılması menüsü ...	148
Şekil 7.4 - Analiz sonucunda elde edilen katmanlardaki gerilme dağılımı	149
Şekil 7.5 - Test sonucunda elde edilen 5mm'lik ve 0 derecede kesilmiş numunenin Wöhler eğrisi.....	151

Şekil 7.6 - Test veri noktalarında üstel fonksiyon ile oluşturulmuş sonuç eğrileri	152
Şekil 7.7 - MSC Fatigue programının oluşturduğu Wöhler eğrisi	153
Şekil 7.8 - MSC Fatigue programının oluşturduğu yükleme eğrisi	153
Şekil 7.9 - Parça üzerinde değer okunan kritik nokta	155
Şekil 7.10 - Hesaplanan ve analiz programının bulduğu sonuçların kıyaslanması	158
Şekil 7.11 - Test sonucunda elde edilen ve analiz programının bulduğu sonuçların kıyaslanması	160
Şekil 7.12 - Deniz ortamındaki numune için test sonucunda elde edilen ve analiz programının bulduğu sonuçların kıyaslanması	162
Şekil 8.1 - Farklı açılarda kesilmiş numunelerin oryantasyon tabloları	184
Şekil 8.2 - Numunelerin çekme simülasyonu gerilme dağılımları	185
Şekil 8.3 - Numunelerin çekme gerilmesi altında yorulma ömrü dağılımları	186
Şekil 8.4 - Numunelerin basma simülasyonu gerilme dağılımları	187
Şekil 8.5 - Numunelerin basma gerilmesi altında yorulma ömrü dağılımları	188
Şekil 8.6 - Numunelerin eğilme yükü altındaki deformasyonu	189
Şekil 8.7 - Numunelerin eğilme yükü altındaki gerilme dağılımları (alt yüzey)	189
Şekil 8.8 - Numunelerin eğilme yükü altındaki gerilme dağılımları (üst yüzey)	190
Şekil 8.9 - Numunelerin eğilme yükü altındaki yorulma ömrü dağılımları (alt yüzey)	190
Şekil 8.10 - Numunelerin eğilme yükü altındaki yorulma ömrü dağılımları (üst yüzey)	191
Şekil 9.1 - Katı elemanlarla modellenmiş kompozit çubuğun katman görünüşü	192
Şekil 9.2 - MSC Patran'da katmanların tanıtıldığı menü	193
Şekil 9.3 - Katı ve kabuk elemanların katmanlardaki gerilme dağılımı kıyaslaması	195
Şekil 9.4 - Katı ve kabuk elemanların katmanlardaki gerilme dağılımı kıyaslaması (devam)	196
Şekil 9.5 - Katı ve kabuk elemanların katmanlardaki gerilme dağılımı kıyaslaması (devam)	197
Şekil 9.6 - Katı ve kabuk elemanların katmanlardaki gerilme dağılımı kıyaslaması (devam)	198

Şekil 9.7 - Katı ve kabuk elemanların katmanlardaki gerilme dağılımı kıyaslaması (devam).....	199
Şekil 9.8 - Katı ve kabuk elemanların katmanlardaki gerilme dağılımı kıyaslaması (devam).....	200
Şekil 9.9 - Katı modellenmiş kompozitin kesitindeki gerilme dağılımı	201
Şekil 10.1 – 0°, 45° ve 90° de kesilmiş numunelere çekme yükünün uygulanması	203
Şekil 10.2 - Numunelerin çekme yükü altında gerilme dağılımı kıyaslaması.....	204
Şekil 10.3 - Numunelerin çekme yükü altında gerilme dağılımı kıyaslaması.....	204
Şekil 10.4 - Numunelerin çekme yükü altında gerilme dağılımı kıyaslaması (kesit).....	205
Şekil 10.5 – 0°, 45° ve 90° de kesilmiş numunelere basma yükünün uygulanması	206
Şekil 10.6 - Numunelerin basma yükü altında gerilme dağılımı kıyaslaması.....	206
Şekil 10.7 - Numunelerin basma yükü altında gerilme dağılımı kıyaslaması.....	207
Şekil 10.8 - Numunelerin basma yükü altında gerilme dağılımı kıyaslaması (kesit).....	207
Şekil 10.9 – 0°, 45° ve 90° de kesilmiş numunelere eğilme yükünün uygulanması	208
Şekil 10.10 - Numunelerin eğilme yükü altında gerilme dağılımı kıyaslaması.....	209
Şekil 10.11 - Numunelerin eğilme yükü altında gerilme dağılımı kıyaslaması.....	209
Şekil 10.12 - Numunelerin eğilme yükü altında gerilme dağılımı kıyaslaması (kesit).....	210
Şekil 10.13 – 0°, 45° ve 90° de kesilmiş numunelere burulma yükünün uygulanması	211
Şekil 10.14 - Numunelerin burulma yükü altında gerilme dağılımı kıyaslaması.....	211
Şekil 10.15 - Numunelerin burulma yükü altında gerilme dağılımı kıyaslaması.....	212
Şekil 10.16 - Numunelerin burulma yükü altında gerilme dağılımı kıyaslaması (kesit).....	212

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo

Sayfa

Tablo 2.1 - Kompozit malzeme tipleri	9
Tablo 4.1 - R oranının belirttiği yükleme durumları.....	98
Tablo 4.2 - Ortalama gerilme düzeltme metotları.....	105
Tablo 4.3 - Çap değerine göre boyut katsayıları	109
Tablo 5.1 - Harflerin simgelediği açısal dağılımlar	125
Tablo 5.2 - Hazırlanan deney numunelerinin sayısı.....	126
Tablo 5.3 - 5mm'lik ve 10mm'lik numunelerin tespit edilen oryantasyonları	130
Tablo 5.4 - Statik şartlarda eksenel çekmeye maruz bırakılmış numuneler – F tipi	133
Tablo 5.4 (devam) - Statik şartlarda eksenel çekmeye maruz bırakılmış numuneler – F tipi	134
Tablo 5.5 - Yorulma testine maruz bırakılmış numuneler – F tipi	135
Tablo 5.5 (devam) - Yorulma testine maruz bırakılmış numuneler – F tipi	136
Tablo 5.5 (devam) - Yorulma testine maruz bırakılmış numuneler – F tipi	137
Tablo 5.5 (devam) - Yorulma testine maruz bırakılmış numuneler – F tipi	138
Tablo 5.5 (devam) - Yorulma testine maruz bırakılmış numuneler – F tipi	139
Tablo 5.5 (devam) - Yorulma testine maruz bırakılmış numuneler – F tipi	140
Tablo 7.1 - Hesaplanan malzeme değerleri.....	147
Tablo 7.2 - Analiz sonucu çıkan ve hesaplanan gerilme ve yorulma değerleri.....	157
Tablo 7.3 - Diğer 5mm'lik numunelerin bazılarının analiz sonuçları...	159
Tablo 7.4 – Deniz ortamındaki numune için analiz sonucu çıkan ve hesaplanan gerilme ve yorulma değerleri.....	161

Tablo 7.5 - F 05 A 00 04 780 kodlu numunenin analiz sonuçları	163
Tablo 7.6 - F 05 A 00 05 770 kodlu numunenin analiz sonuçları	164
Tablo 7.7 - F 05 A 00 06 765 kodlu numunenin analiz sonuçları	165
Tablo 7.8 - F 05 A 00 07 765 kodlu numunenin analiz sonuçları	166
Tablo 7.9 - F 05 A 00 08 780 kodlu numunenin analiz sonuçları	167
Tablo 7.10 - F 05 A 00 09 771 kodlu numunenin analiz sonuçları	168
Tablo 7.11 - F 05 A 00 10 773 kodlu numunenin analiz sonuçları	169
Tablo 7.12 - F 05 A 00 10 771 kodlu numunenin analiz sonuçları	170
Tablo 7.13 - F 05 A 00 12 765 kodlu numunenin analiz sonuçları	171
Tablo 7.14 - F 05 S 00 04 769 kodlu numunenin analiz sonuçları	172
Tablo 7.15 - F 05 S 00 05 776 kodlu numunenin analiz sonuçları	173
Tablo 7.16 - F 05 S 00 06 782 kodlu numunenin analiz sonuçları	174
Tablo 7.17 - F 05 S 00 07 774 kodlu numunenin analiz sonuçları	175
Tablo 7.18 - F 05 S 00 08 769 kodlu numunenin analiz sonuçları	176
Tablo 7.19 - F 05 S 00 09 774 kodlu numunenin analiz sonuçları	177
Tablo 7.20 - F 05 S 00 10 766 kodlu numunenin analiz sonuçları	178
Tablo 7.21 - F 05 S 00 11 780 kodlu numunenin analiz sonuçları	179
Tablo 7.22 - F 05 S 00 12 780 kodlu numunenin analiz sonuçları	180
Tablo 7.23 - MSC Fatigue yorulma ömrü sonuçlarının test sonuçlarıyla kıyaslanması	183
Tablo 19.1 - F 05 S 00 04 780 kodlu numunenin katı elemanlar kullanılarak gerçekleştirilmiş analiz sonuçları.....	194
Tablo 10.1 - Numunenin katman bazında farklı yüklemeler altındaki maksimum gerilme değerleri.....	214

1. GİRİŞ

1.1 ARAŞTIRMANIN AMACI

Bu araştırmanın amacı, kompozit malzemelerin bilgisayar ortamında modellenip sonlu elemanlar analizi ile değişik geometrileri ve oryantasyonları arasındaki mukavemet farkını test yapmaya gerek duymadan sanal simülasyonlar ile doğru bir biçimde kıyaslanabilmesini sağlayacak prosedürün ve modelleme tekniğinin geliştirilmesini sağlamaktır. Geliştirilen prosedürün tutarlılığını sağlayabilmek için, sanal benzetim sonuçları, başka bir çalışmada elde edilmiş çekme testi sonuçları ile doğrulanmıştır.

Bu yöntem ile basma, eğilme, burulma gibi, çekme dışındaki yüklemelerde de kompozit malzemelerin gerilme dağılımının ve yorulma ömrünün kıyaslanmaları hem kabuk hem de katı eleman modelleri kullanılarak incelenecektir.

1.2 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Kompozit malzemeler havacılık, otomotiv, gemi inşaatı ve inşaat uygulamalarında geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bunun nedeni yüksek özgül katılık ve dayanıma sahip olmaları sonucunda malzemenin belirli avantajlar kazanması ve potansiyel enerji kazanımı sağlamasıdır.

Kompozitler anizotropik ve homojen olmayan malzemeler oldukları için mekanik davranışları metal gibi homojen ve izotropik bir malzemeye kıyasla daha karmaşıktır. Fakat, yapılan araştırmalar göstermiştir ki, kompozit malzeme kullanımı bazı durumlarda yeterli ömür için maliyette azalma sağlamaktadır. Bunun nedeni kuvvetin etkin olduğu yönde mukavemet arttırmayı diğer yönü değiştirmeden mümkün kılmasıdır. Günümüzde, yaygınlaşan kullanımları nedeniyle birçok araştırma, fiber destekli kompozit malzemelerin yorulma davranışlarını kesin olarak saptayabilmek için yapılmaktadır.

Liao ve arkadaşları (1998) cam/vinilester kompozitleri çevresel yaşlanmaya maruz bırakarak, bu tür kompozitlerin çevresel etmenler karşısındaki dayanımını saptamaya çalışmışlardır. Numuneler ilk alındıkları halleriyle ve oda sıcaklığındaki suda birkaç defa test edilmişlerdir. Çevresel yaşlanmaya maruz bırakılmış numunelerin deney sonuçlarında malzeme dayanım ve elastisite değerlerinde düşmeler tespit edilmiştir (Liao, 1998).

Kotsikos ve arkadaşları (1999) İngiltere’de yaptıkları çalışmalarda, limanlarda ve deniz uygulamalarında kullanılan örgü ($0^{\circ}/90^{\circ}$) cam elyaf takviyeli ve izopthalik polyester reçineli matris kullanmışlardır. Deniz suyu etkisini gözlemleyebilmek için numunelerin bir kısmını 6 ay deniz suyunda bekletmişlerdir. Bütün numuneler ise 3 noktadan eğilme testine (pure bending) tabi tutularak yorulma deneyi uygulanmıştır (Erbil, 2005).

Van Paepegem ve arkadaşları (2001) düzlemsel örgülü ve $[45^\circ]$ oryantasyonlu cam/epoksi numunelerin eğilme yorulması karşısındaki gerilme dağılımlarını analitik model ile, sonlu elemanlar modeli ile ve deney sonucunda elde ederek, verileri karşılaştırmışlardır (Van Paepegem, 2001).

Pauchard ve arkadaşlarının (2002) yaptığı çalışmalarda bir gerilme korozyonu modeli suda bekletilmiş olan çok yönlü cam/epoksi levhaya uygulanmış ve kompozitin üç noktadan eğme şeklindeki statik yorulma yüklemesi altındaki davranışı, mikroskopik analizler ile incelenmiştir. Uygulanan kuvvet ise zamanın bir fonksiyonu olup değişik şekil değiştirme düzeyleri olarak verilmiştir. Araştırma sonucunda hidrotermal etkilerin birer ön gerilme olarak kompozite uygulanmasının uygun bir yöntem olduğu saptanmıştır (Pauchard, 2002).

Zuo Sun ve arkadaşları (2003) polimer matrisli kompozitlerin değişik sıcaklıklardaki ve sabit yükler altındaki dayanımlarını ve hasar oluşum süreçlerini incelemişlerdir. Sonuçta analitik ve simülasyon modelleri sonucunda elde edilen verilerin deney sonuçları ile örtüştüğü saptanmıştır (Sun, 2003).

Keller ve Tireli (2004), örgü ($0^\circ/90^\circ$) cam elyafla güçlendirilmiş polimer matrisli ve pultruzyon yöntemi ile üretilmiş kompozit malzemelerin çekme-çekme prensibiyle yorulma analizlerini yapmışlardır. Burada değişik standartlarda deney numuneleri hazırlanmış

ve değişik yükleme frekansları kullanılarak deneyler yapılmıştır (Erbil, 2005).

Hammami ve Al-Ghuilani (2004) cam/vinilester kompozitlerin dayanıklılığını ve çevresel faktörlere karşı gösterdiği direnci saptayabilmek için, kompoziti yüksek sıcaklığa, neme, deniz suyuna ve korozyon svılarına maruz bırakarak sonuçları incelemişlerdir (Hammami, 2004).

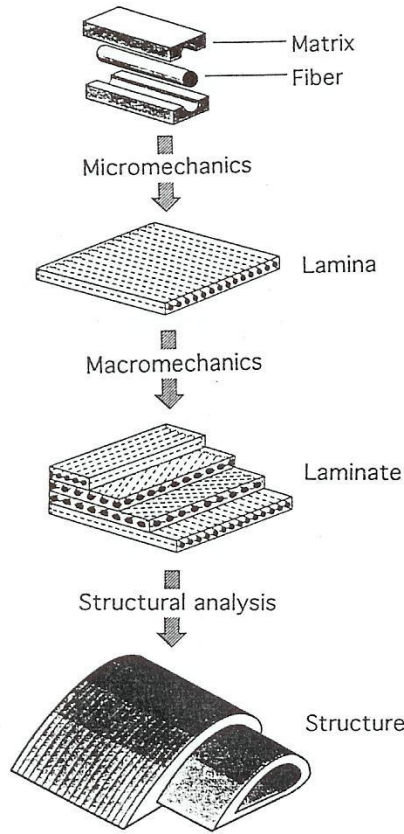
2. KOMPOZİT MALZEMELER

2.1 GİRİş

2.1.1 Tanım ve Özellikler

Yapısal bir kompozit, makroskobik ölçüde, mekanik performansı ve özellikleri kendini oluşturan iki veya daha fazla fazdan daha üstün olması için dizayn edilmiş bir malzeme sistemidir. Fazlardan biri genellikle kesintili, daha katı ve daha güçlüdür ve fiber (destek) olarak adlandırılır. Bunun yanında daha az katı ve daha zayıf olan faz ise sürekli ve matris olarak adlandırılır (şekil 2.1). Bazen, matris ve fiberin arasında meydana gelebilecek kimyasal tepkimeleri engellemek amacıyla araya bir faz daha konur ve bu ara faz olarak adlandırılır.

Kompozit malzemenin özellikleri onu oluşturan malzemelerin özelliklerine, geometrisine ve fazların dağılımına bağlıdır. En önemli parametrelerden biri de fiberin hacim (yada ağırlık) oranıdır. Fiberlerin dağılımı, malzeme sisteminin homojenliğini yada düzenini (tekyönselliğini) tayin eder. Fiberlerin geometrisi ve oryantasyonu (açısal dağılımı) ise sistemin anizotropiklik derecesini belirler.



ŞEKİL 2.1. Kompozit malzemenin yapısı (Isaac, 1994)

2.1.2 Tarihsel Gelişim

Tarihsel olarak “fiber aracılığıyla destek” düşüncesi çok eski yıllara dayanır. Eski Mısır’da kil bloklarda destek amacıyla saman kullanıldığına dair yazıtsal kaynaklar vardır. 19. yüzyılda demir çubukların duvarları desteklemekte kullanılması çelik destekli betonun gelişmesine öncülük etmiştir. İlk cam takviyeli plastik (CTP veya Glass reinforced plastics, fiberglass) tekne 1942’de inşa edilmiştir ve cam ile desteklenmiş plastik aynı zamanda elektrik malzemelerinde ve uçaklarda da kullanılmıştır. İlk boron ve yüksek dayanıklı karbon fiberler 1960’lı yılların başında piyasaya sürülmüş ve 1968’de uçak parçalarında başarıyla kullanılmıştır. Boron/alüminyum gibi metal matrisli kompozitlerle ise ilk defa 1970’de karşılaşılmıştır. 1973’de Dupont, kevlar (veya aramid) denilen fiberi geliştirmiştir. 1970’li yılların sonlarına doğru kullanılmaya başlanan bu kompozitler kısa sürede havacılık, otomotiv, spor araçları ve biyomedikal endüstrilerine yayılmış ve başarıyla uygulanmıştır. 1980’lerde yüksek elastisite modüllü fiberlerden yararlanma oranında önemli bir artış söz konusudur.

Günümüzde ise üzerinde en çok durulan konu yeni metal/matris ve seramik/matris kompozitlerin geliştirilmesidir. Bunun yanı sıra yüksek sıcaklık uygulamaları için ise karbon/karbon kompozitler geliştirilmektedir. Kullanım alanları oldukça genişleyen kompozitlerin bazı uygulama alanları arasında yer altı boruları, konteynırlar, tekneler, kara araçları, havacılık ve uzay araçları, otomotiv komponentleri, spor

araçları, biyomedikal ürünler ve yüksek mukavemet özellikleri ve düşük ağırlığın istendiği diğer birçok ürünün dizaynı yer almaktadır.

2.1.3 Kompozit Malzemelerin Avantajları

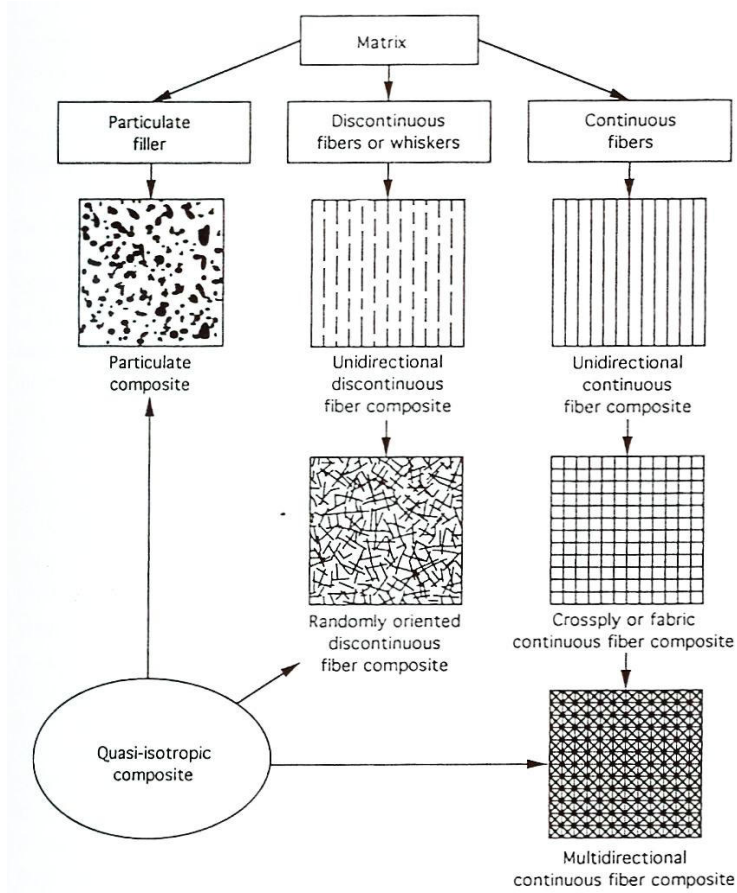
Kompozit malzemelerin yüksek dayanım, yüksek katılık, uzun yorulma ömrü, düşük yoğunluk ve istenen özelliklere adapte edilebilmesi gibi, tek fazlı diğer malzemelere göre üstün özellikleri vardır. Bunun yanı sıra korozyon dayanımı, görünüm, sıcaklığa bağlı davranış, termal izolasyon, termal geçirgenlik ve akustik izolasyon gibi ek bazı özellikler geliştirmekte mümkündür. Bu üstün yapısal performansın temelinde kompozit malzemenin yüksek özgül dayanımı (dayanımın yoğunluğa oranı) ve yüksek özgül katılığı (elastik modülün yoğunluğa oranı) yatmaktadır.

2.1.4 Kompozit Malzemelerin Çeşitleri ve Sınıflandırılması

Partikül Kompozitler : Matris içerisinde değişik boyutlarda ve şekillerde rasgele dağılmış partiküller (fiberler) bulunan kompozitlerdir (Şekil 2.2).

Süreksiz veya Kısa Fiberli Kompozitler : İçerisinde destekleyici faz olarak kısa fiberler bulunan kompozitlerdir. Bu kısa fiberler (çaplarına oranla uzundurlar) katmanda düzenli ve oryante olmuş halde bulunabilecekleri gibi partikül kompozitlerde olduğu gibi rasgele dizilmiş olarak da bulunabilirler (Şekil 2.2).

Sürekli Fiberli Kompozitler : Destek elemanı olarak uzun ve sürekli fiberler içeren, katılık ve dayanım yönünden en efektif olan kompozitlerdir. Bu kompozitlerdeki fiberler, hepsi birbirine paralel (tek yönlü, unidirectional), oryante olmuş halde (örgülü fiber, crossply) yada birden çok yönde oryante olmuş (multidirectional) halde sıralanmış olabilirler (Şekil 2.2).

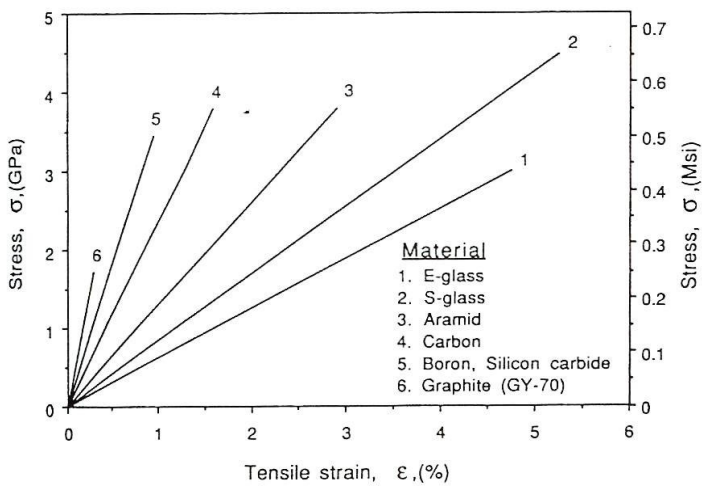


ŞEKİL 2.2. Kompozit malzeme sistemlerinin sınıflandırılması (Isaac, 1994)

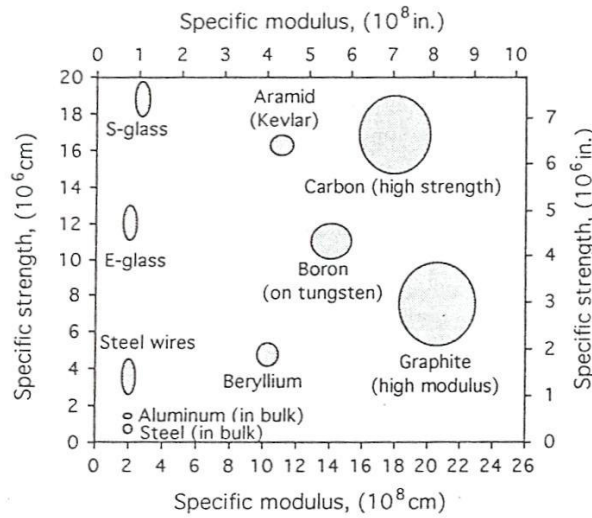
TABLO 2.1. Kompozit malzeme tipleri (Isaac, 1994)

Matrix type	Fiber	Matrix
Polymer	E-glass	Epoxy
	S-glass	Polyimide
	Carbon (graphite)	Polyester
	Aramid (Kevlar)	Thermoplastics
	Boron	(PEEK, polysulfone, etc.)
Metal	Boron	Aluminum
	Borsic	Magnesium
	Carbon (graphite)	Titanium
	Silicon carbide	Copper
	Alumina	
Ceramic	Silicon carbide	Silicon carbide
	Alumina	Alumina
	Silicon nitride	Glass-ceramic
		Silicon nitride
Carbon	Carbon	Carbon

2.1.5 Kompoziti Oluşturan Malzemelerin Özellikleri

**ŞEKİL 2.3.** Tipik fiberlerin gerilme-şekil değiştirme grafikleri (Isaac, 1994)

Tablo 2.1 kompozit malzeme oluşturabilmek için kullanılabilecek değişik fiber ve matris malzemeleri göstermektedir. Şekil 2.3’de çeşitli fiber malzemelerinin gerilme-şekil değiştirme eğrileri görülmektedir. Şekil 2.4’de ise farklı fiberler arasındaki özgül dayanım-özgül elastisite modülü bölgelerini gösteren bir performans şeması verilmektedir.



ŞEKİL 2.4. Kompozit malzemelerde kullanılan fiberlerin performans şeması (Isaac, 1994)

2.1.6 Kompozit Malzeme Teknolojisinin Amaçları

Kompozit malzemelere yönelik teknolojinin amaçları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Kompozitin ve onu oluşturan malzemelerin temel karakteristik özelliklerinin geliştirilmesi.

- Belirlenmiş çalışma şartlarına göre malzemenin optimizasyonu.
- Etkili ve verimli üretim yöntemlerinin geliştirilmesi ve bu yöntemlerin malzeme özelliği üzerindeki etkisinin anlaşılması.
- Malzeme özelliklerini ve yapısal davranışları karakterize edecek analitik prosedürlerin geliştirilmesi.
- Malzeme karakterizasyonu, gerilme ve kırılma analizi için efektif deneysel metotların geliştirilmesi.
- Dayanıklılık, hata kritizasyonu ve ömür hesabı gibi konularda araştırma ve geliştirme.

2.1.7 Kompozit Malzemelerin Günümüzdeki Yeri ve Gelecekteki Beklentiler

Kompozit malzeme teknolojisi son yirmi yılda hızlı bir şekilde gelişmiştir. Bu gelişmenin altında yatan bazı sebepler şöyle sıralanabilir:

- Malzeme bilimi ve teknolojisinin fiberler, polimerler ve seramikler alanındaki önemli gelişimi,
- Havacılık ve uzay teknolojisindeki yüksek performanslı malzeme ihtiyacı,

- Modern bilgisayar teknolojisi kullanılarak yapılan yapısal analizlerde kullanılan kuvvetli ve karmaşık nümerik metotlardaki gelişme.

Teknolojinin gelişimini uyaran ve tetikleyen ilk itici güç olarak ağırlık kazancı konusunu belirtebiliriz. İkinci sırada ise en az ilki kadar önemli olan ve diğer geleneksel malzemelerle de kıyaslanan maliyet gelmektedir. Son yıllarda ise kalite güvencesine, tekrar üretime, yapısal ömrün ve davranışın önceden tahmin edilebilmesine olan ihtiyaç bu ikiliye ek olarak aranan özellikler arasına girmiştir.

Kompozit malzemeler konusundaki ilerleme, hâlâ devam ediyor olmasına karşın önemli bir mesafe kaydetmiştir. Gelecekteki beklentiler bazı sebeplerden dolayı parlak görünmektedir. İçerik malzemelerin maliyetinde bir düşüş söz konusudur ve bunun nedeni ise genişleyen pazardır. Deneyim kazanıldıkça fabrikasyon maliyetleri düşmekte, teknikler geliştirilmekte ve otomasyon ortaya çıkmaktadır. Otomotiv sektöründeki yeni yüksek hacimli uygulamalar kompozit kullanımını yaymaktadır. Enerji kazancına yönelik ihtiyaçlar daha hafif malzemelerin ve ürünlerin kullanılmasını tetiklemektedir.

2.2 KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

2.2.1 TEK YÖNLÜ KATMANIN ELASTİK DAVRANIŞI

2.2.1.1 Temel Katman Özellikleri

Hacimsel ve ağırlığa dayalı fiber ve matris oranları gibi temel katman özellikleri denklem 2.1 - 2.6'daki gibi tanımlanır.

$$\text{Hacimsel Fiber Oranı} \quad V_f = \frac{\text{Fiberlerin Hacmi}}{\text{Kompozitin Hacmi}} \quad (2.1)$$

$$\text{Ağırlığa Dayalı Fiber Oranı} \quad W_f = \frac{\text{Fiberlerin Kütlesi}}{\text{Kompozitin Kütlesi}} \quad (2.2)$$

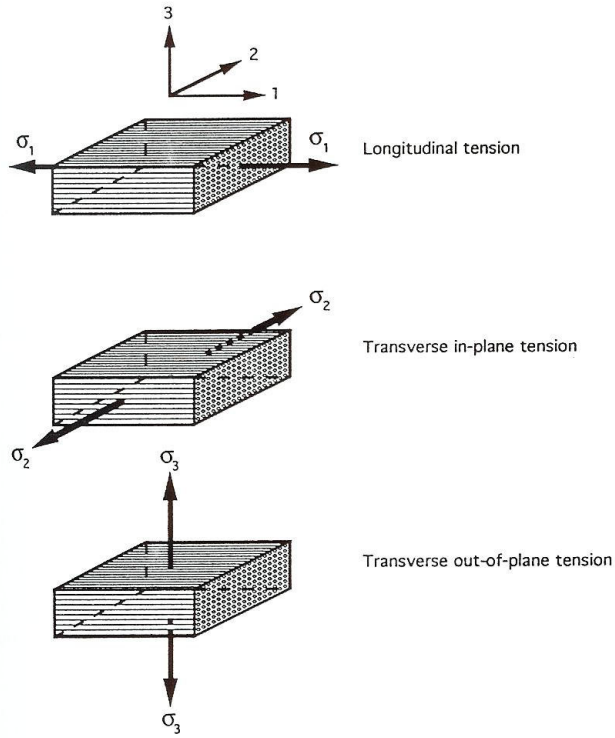
$$\text{Hacimsel Matris Oranı} \quad V_m = \frac{\text{Matrisin Hacmi}}{\text{Kompozitin Hacmi}} \quad (2.3)$$

$$\text{Ağırlığa Dayalı Matris Oranı} \quad W_m = \frac{\text{Matrisin Kütlesi}}{\text{Kompozitin Kütlesi}} \quad (2.4)$$

$$V_f + V_m = 1 \quad (2.5)$$

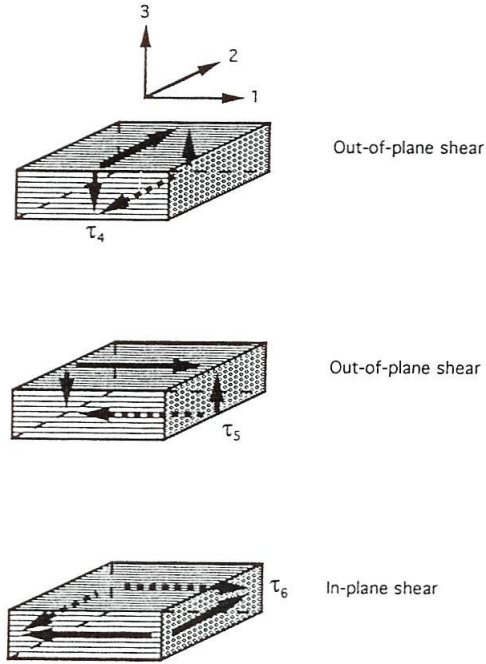
$$W_f + W_m = 1 \quad (2.6)$$

Bir kompozitin yükleme biçimleri Şekil 2.5 - 2.6'daki gibi adlandırılır.



ŞEKİL 2.5. Kompozitlerin yüklenme şekilleri (Normal gerilme yükleri)
(Isaac, 1994)

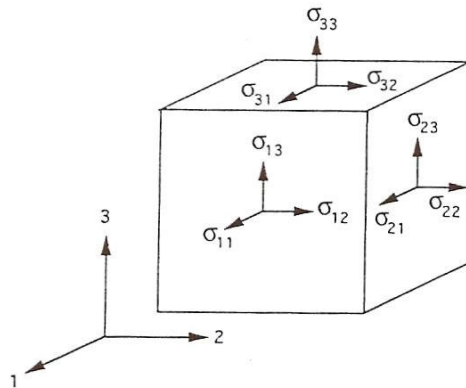
Şekil 2.5’de yükleme şekilleri Boyuna çekme, Düzlem içi enine çekme ve Düzlem dışı enine çekme olarak gösterilmektedir. Şekil 2.6’da ise yükleme biçimleri iki farklı düzlemdeki düzlem dışı kesmeler ve düzlem içi kesme olarak gösterilmektedir.



ŞEKİL 2.6. Kompozitlerin yüklenme şekilleri (Kesme yükleri) (Isaac, 1994)

2.2.1.2 Gerilme – Şekil Değiştirme İlişkisi

Bir noktadaki gerilmenin durumu dokuz adet gerilme komponenti ($i,j = 1,2,3$) ile gösterilebilir (Şekil 2.7).



ŞEKİL 2.7. Noktasal gerilme durumları (Isaac, 1994)

Aynı şekilde deformasyon durumunda dokuz adet yer değiştirme komponenti ε_{ij} ile simgelenebilir. En genel durumda gerilme ve şekil değiştirme komponentleri Denklem 2.7'deki gibi genelleştirilmiş Hooke kanunu ile ilişkilendirilebilir.

$$\begin{aligned}\sigma_{ij} &= C_{ijkl} \cdot \varepsilon_{kl} \\ \varepsilon_{ij} &= S_{ijkl} \cdot \sigma_{kl}\end{aligned}\quad (i,j,k,l = 1,2,3) \quad (2.7)$$

burada

C_{ijkl} : Katılık Komponentleri

S_{ijkl} : Uygunluk Komponentleri

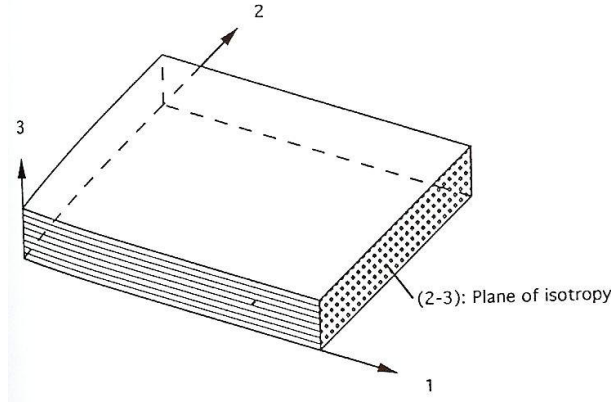
Uygunluk matrisi $[S_{ijkl}]$ katılık matrisi $[C_{ijkl}]$ nin tersidir (invers).

Bu durumda bir malzemeyi tam olarak tanımlayabilmek için 81 adet elastik sabite ihtiyaç vardır.

Fakat;

- Anizotropik malzemede gerilme ve yer değiştirme tensörlerinin simetrisinden $(\sigma_{ij} = \sigma_{ji}; \varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ji})$ bağımsız elastik sabitlerin sayısı 36'ya düşer.

- Anizotropik malzemede elastik enerji kabullerinden $(C_{ij} = C_{ji}; S_{ij} = S_{ji})$ bağımsız elastik sabit sayısı 21 e düşer.
- Genel ortotropik malzeme tanımından sabit sayısı 9 a iner.
- Ortotropik malzemede enine izotropi tanımından bağımsız elastik sabit sayısı 5 e düşer (Denklem 2.8 – 2.9).



ŞEKİL 2.8. Enine izotropiye sahip ortotropik malzeme (Isaac, 1994)

$$\begin{aligned} C_{12} &= C_{13} \\ C_{22} &= C_{33} \\ C_{55} &= C_{66} \end{aligned} \quad (2.8)$$

$$\begin{aligned} S_{12} &= S_{13} \\ S_{22} &= S_{33} \\ S_{55} &= S_{66} \end{aligned} \quad (2.9)$$

- İzotropik malzeme tanımından bağımsız elastik sabit sayısı 2'ye iner. Yani izotropik bir malzeme örneğin C_{11} ve C_{12} gibi iki katılık sabiti ile tanımlanabilir (Denklem 2.10).

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_4 \\ \tau_5 \\ \tau_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{C_{11}-C_{12}}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{C_{11}-C_{12}}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{C_{11}-C_{12}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_4 \\ \gamma_5 \\ \gamma_6 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

2.2.1.3 Matematik ve Mühendislik Sabitleri Arasındaki Bağıntılar

Daha önce değindiğimiz 9 bağımsız sabitli genel ortotropik malzemenin gerilme – şekil değiştirme ilişkisi mühendislik sabitleri cinsinden Denklem 2.11’deki gibi tanımlanabilir.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_4 \\ \gamma_5 \\ \gamma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_4 \\ \tau_5 \\ \tau_6 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Uygunluk matrisinin $[S_{ij}]$ simetrik olmasından dolayı Denklem 2.12’de görülen sonuca ulaşılır.

$$\begin{aligned}\frac{v_{12}}{E_1} &= \frac{v_{21}}{E_2} \\ \frac{v_{13}}{E_1} &= \frac{v_{31}}{E_3} \\ \frac{v_{23}}{E_2} &= \frac{v_{32}}{E_3}\end{aligned}\tag{2.12}$$

2.2.1.4 İnce Bir Katmandaki Gerilme – Şekil Değiştirme İlişkileri

İnce bir katmanın düzlemsel yüklemelere maruz kalacağı yani bir levha davranışı göstereceği göz önüne alınırsa Denklem 2.13 – 2.14’deki bağıntılar geçerli olacaktır,

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_6 \end{bmatrix}\tag{2.13}$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_6 \end{bmatrix}\tag{2.14}$$

Q ve S lerin mühendislik sabitleri cinsinden eşitleri ise Denklem 2.15 ve 2.16’daki gibidir.

$$\begin{aligned}
Q_{11} &= \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \\
Q_{22} &= \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \\
Q_{12} &= \frac{\nu_{21}E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} = \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \\
Q_{66} &= G_{12}
\end{aligned} \tag{2.15}$$

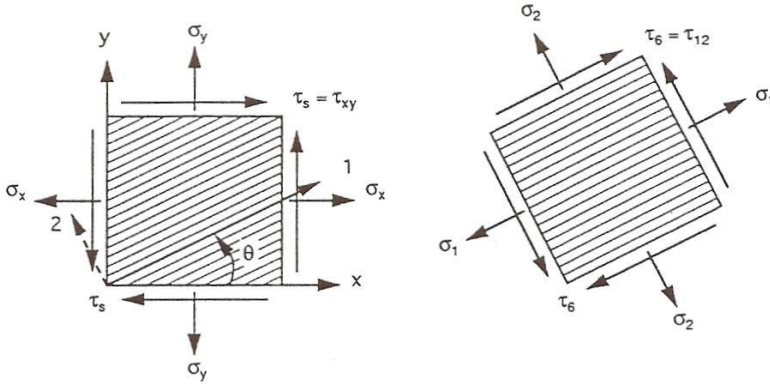
$$\begin{aligned}
S_{11} &= \frac{1}{E_1} \\
S_{22} &= \frac{1}{E_2} \\
S_{12} &= -\frac{\nu_{12}}{E_1} = -\frac{\nu_{21}}{E_2} \\
S_{66} &= \frac{1}{G_{12}}
\end{aligned} \tag{2.16}$$

Böylelikle düzlemsel yükler söz konusu olduğunda tek yönlü bir katmanın gerilme – şekil değiştirme ilişkisi birbirinden bağımsız dört sabit ile tam olarak karakterize edilebilir.

2.2.1.5 Gerilme ve Şekil Değiştirmenin Transformasyonu

Normalde katmanın esas eksenleri (x_1, x_2) yükleme eksenleriyle (x, y) çakışmazlar. Bu nedenle esas (x_1, x_2) eksenler üzerinden hesaplanmış gerilme ve şekil değiştirme komponentlerinin yükleme

eksenlerine göre dönüştürülmesi Denklem 2.17 – 2.18 yardımıyla gerçekleştirilebilir (Şekil 2.9).



ŞEKİL 2.9. Tek yönlü katmanda yükleme ve malzeme eksenlerine göre gerilme bileşenleri (Isaac, 1994)

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_6 \end{bmatrix} = [T] \cdot \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_s \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \frac{1}{2}\gamma_6 \end{bmatrix} = [T] \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \frac{1}{2}\gamma_s \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

ve transformasyon matrisi olan $[T]$ nin açılımı Denklem 2.19’da verilmiştir.

$$[T] = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & 2mn \\ n^2 & m^2 & -2mn \\ -mn & mn & m^2 - n^2 \end{bmatrix} \quad \begin{aligned} m &= \cos \theta \\ n &= \sin \theta \end{aligned} \quad (2.19)$$

Burada θ açısı pozitif x ekseninden saatin ters yönünde x_1 eksenine kadar olan açıyı göstermektedir. Bu matrislerin tersini alınırsa Denklem 2.20 ve 2.21 elde edilir.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_s \end{bmatrix} = [T^{-1}] \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_6 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \frac{1}{2}\gamma_s \end{bmatrix} = [T^{-1}] \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \frac{1}{2}\gamma_6 \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Burada,

$$[T^{-1}] = [T(-\theta)] = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & -2mn \\ n^2 & m^2 & 2mn \\ mn & -mn & m^2 - n^2 \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Gerilme ve şekil değiştirme transformasyon denklemleri malzeme özelliklerinden bağımsız olup izotropik ve anizotropik malzemeler için aynıdırlar.

2.2.1.6 Elastik Parametrelerin Transformasyonu

Yükleme eksenine göre dönüştürülmüş katsayılar arasında da Denklem 2.23 ve 2.24'deki bağıntılar söz konusudur.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{xx} & Q_{xy} & Q_{xs} \\ Q_{yx} & Q_{yy} & Q_{ys} \\ Q_{sx} & Q_{sy} & Q_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_s \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

$$\begin{aligned} Q_{xx} &= m^4 Q_{11} + n^4 Q_{22} + 2m^2 n^2 Q_{12} + 4m^2 n^2 Q_{66} \\ Q_{yy} &= n^4 Q_{11} + m^4 Q_{22} + 2m^2 n^2 Q_{12} + 4m^2 n^2 Q_{66} \\ Q_{xy} &= m^2 n^2 Q_{11} + m^2 n^2 Q_{22} + (m^4 + n^4) Q_{12} - 4m^2 n^2 Q_{66} \\ Q_{xs} &= m^3 n Q_{11} - mn^3 Q_{22} + (mn^3 - m^3 n) Q_{12} + 2(mn^3 - m^3 n) Q_{66} \\ Q_{ys} &= mn^3 Q_{11} - m^3 n Q_{22} + (m^3 n - mn^3) Q_{12} + 2(m^3 n - mn^3) Q_{66} \\ Q_{ss} &= m^2 n^2 Q_{11} + m^2 n^2 Q_{22} - 2m^2 n^2 Q_{12} + (m^2 - n^2)^2 Q_{66} \end{aligned} \quad (2.24)$$

Tersi olan uygunluk matrisi ise Denklem 2.25 ve 2.26'daki gibi ifade edilir.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} & S_{xs} \\ S_{yx} & S_{yy} & S_{ys} \\ S_{sx} & S_{sy} & S_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_s \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

$$\begin{aligned} S_{xx} &= m^4 S_{11} + n^4 S_{22} + 2m^2 n^2 S_{12} + m^2 n^2 S_{66} \\ S_{yy} &= n^4 S_{11} + m^4 S_{22} + 2m^2 n^2 S_{12} + m^2 n^2 S_{66} \\ S_{xy} &= m^2 n^2 S_{11} + m^2 n^2 S_{22} + (m^4 + n^4) S_{12} - m^2 n^2 S_{66} \\ S_{xs} &= 2m^3 n S_{11} - 2mn^3 S_{22} + 2(mn^3 - m^3 n) S_{12} + (mn^3 - m^3 n) S_{66} \\ S_{ys} &= 2mn^3 S_{11} - 2m^3 n S_{22} + 2(m^3 n - mn^3) S_{12} + (m^3 n - mn^3) S_{66} \\ S_{ss} &= 4m^2 n^2 S_{11} + 4m^2 n^2 S_{22} - 8m^2 n^2 S_{12} + (m^2 - n^2)^2 S_{66} \end{aligned} \quad (2.26)$$

2.2.1.7 Gerilme – Şekil Değiştirme İlişkilerinin Mühendislik Sabitleri Cinsinden Transformasyonu

x yönündeki normal gerilmeye ve x-y düzlemindeki kesme uzamasına karşılık gelen kesme katsayısı η_{xs} , kesme uzamasının γ_s (γ_{xy}) eksenel uzamaya (ϵ_x) oranı olan bir katsayıdır.

Kuvvet vektörü yönündeki mühendislik sabitlerinin uygunluk komponentleri cinsinden eşitlikleri Denklem 2.27'deki gibidir.

$$\begin{aligned}
 E_x &= \frac{1}{S_{xx}} \\
 E_y &= \frac{1}{S_{yy}} \\
 G_{xy} &= \frac{1}{S_{ss}} \\
 v_{xy} &= -\frac{S_{yx}}{S_{xx}} \\
 \eta_{xs} &= \frac{S_{sx}}{S_{xx}} \\
 \eta_{ys} &= \frac{S_{sy}}{S_{yy}} \\
 v_{yx} &= -\frac{S_{xy}}{S_{yy}} \\
 \eta_{sx} &= \frac{S_{xs}}{S_{ss}} \\
 \eta_{sy} &= \frac{S_{ys}}{S_{ss}}
 \end{aligned} \tag{2.27}$$

2.2.1.8 Mühendislik Sabitlerinin Transformasyonu

Kuvvet doğrultusundaki (x-y) mühendislik sabitlerinin fiberler doğrultusundaki (x_1 - x_2) sabitler cinsinden değeri Denklem 2.28 yardımıyla hesaplanır.

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{E_x} &= \frac{m^2}{E_1} (m^2 - n^2 \nu_{12}) + \frac{n^2}{E_2} (n^2 - m^2 \nu_{21}) + \frac{m^2 n^2}{G_{12}} \\
 \frac{1}{E_y} &= \frac{n^2}{E_1} (n^2 - m^2 \nu_{12}) + \frac{m^2}{E_2} (m^2 - n^2 \nu_{21}) + \frac{m^2 n^2}{G_{12}} \\
 \frac{1}{G_{xy}} &= \frac{4m^2 n^2}{E_1} (1 + \nu_{12}) + \frac{4m^2 n^2}{E_2} (1 + \nu_{21}) + \frac{(m^2 - n^2)^2}{G_{12}} \\
 \frac{\nu_{xy}}{E_x} &= \frac{\nu_{yx}}{E_y} = \frac{m^2}{E_1} (m^2 \nu_{12} - n^2) + \frac{n^2}{E_2} (n^2 \nu_{21} - m^2) + \frac{m^2 n^2}{G_{12}} \\
 \frac{\eta_{xs}}{E_x} &= \frac{\eta_{sx}}{G_{xy}} = \frac{2mn}{E_1} (m^2 - n^2 \nu_{12}) - \frac{2mn}{E_2} (n^2 - m^2 \nu_{21}) + \frac{mn^3 - m^3 n}{G_{12}} \\
 \frac{\eta_{ys}}{E_y} &= \frac{\eta_{sy}}{G_{xy}} = \frac{2mn}{E_1} (n^2 - m^2 \nu_{12}) - \frac{2mn}{E_2} (m^2 - n^2 \nu_{21}) + \frac{m^3 n - mn^3}{G_{12}}
 \end{aligned} \tag{2.28}$$

2.2.1.9 Elastik Sabitlerin Mikro Mekanik Denklemleri

i. Boyuna Özellikler

Fiberler yönündeki yükleme ile ilgili özellikler, genellikle daha güçlü, daha katı ve en büyük şekil değiştirmesi daha kısa olan fiberler tarafından oluşturulmaktadır ve Denklem 2.29 yardımıyla hesaplanır.

$$\begin{aligned}
E_1 &= V_f E_{1f} + V_m E_m \\
v_{12} &= V_f v_{12f} + V_m v_m
\end{aligned}
\tag{2.29}$$

ii. *Enine Modül*

Enine normal yükleme durumunda fiberleri saran matristeki gerilmenin durumu daha karmaşıktır ve komşu fiberler ile etkileşimden daha fazla etkilenmektedir. Enine modül matris baskın bir özellik olup bölgesel gerilmelere karşı daha hassastır.

Gerilme dağılımını basitleştiren bazı yaklaşımlar bizi yeterince tatmin edici sonuçlara götürmemektedir. Malzemenin mekaniği yaklaşımında ise fiberlerin ve matrislerin düzenli bir gerilme dağılımına maruz kaldığı farz edilir. Enine modül E_2 Denklem 2.30 ile hesaplanır.

$$\begin{aligned}
E_2 &= \frac{E_{2f} E'_m}{V_f E'_m + V_m E_{2f}} \\
E'_m &= \frac{E_m}{1 - v_m^2}
\end{aligned}
\tag{2.30}$$

iii. *Düzlemsel Kesme Modülü*

Tek yönlü kompozitin düzlemsel kesme yükü altında davranışını tayin eden en önemli etkenler enine modülde olduğu gibi matris özellikleri ve bölgesel gerilme dağılımıdır.

Deneyssel sonuçlar göstermiştir ki bu konudaki en iyi yaklaşım Halpin-Tsai yarı ampirik denklemdir (Denklem 2.31).

$$G_{12} = G_m \frac{(G_{12f} + G_m) + V_f (G_{12f} - G_m)}{(G_{12f} + G_m) - V_f (G_{12f} - G_m)} \quad (2.31)$$

2.3 TEKYÖNLÜ KATMANIN MUKAVEMETİ

2.3.1 Kırılmanın Mikro Mekanîği

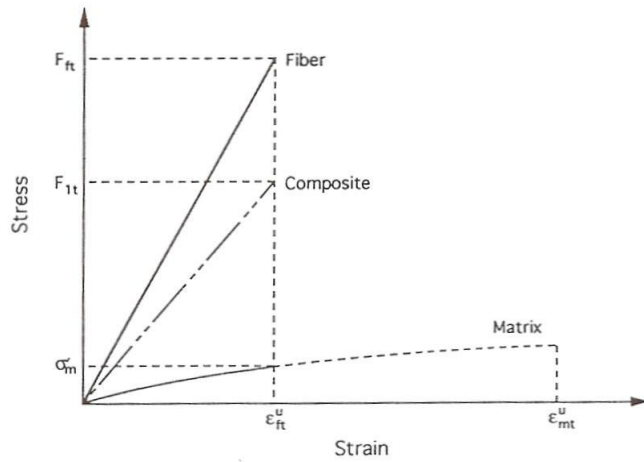
Mikro mekanik ölçüde kırılma mekanizmaları ve süreci yüklemenin cinsine göre değişiklik gösterir ve kompoziti oluşturan malzemelerin özellikleri ile yakından ilişkilidir.

2.3.1.1 Boyuna Çekme (Gerilme)

Boyuna çekmeye maruz kalan bir kompozitte en düşük kritik şekil değiştirmeye sahip faz ilk olarak kırılacaktır. Katmanın dayanımını hesaplarken kompoziti oluşturan malzemelerin kritik çekme uzamalarına bağlı olarak iki durum söz konusudur.

Fiberin kritik çekme uzamasının matristen küçük olması durumunda kompozitin boyuna uzaması, fiberin kritik çekme uzamasına ulaştığında kompozit kırılacaktır (Denklem 2.32), (Şekil 2.10).

$$\varepsilon_{ft}^u < \varepsilon_{mt}^u \quad (2.32)$$



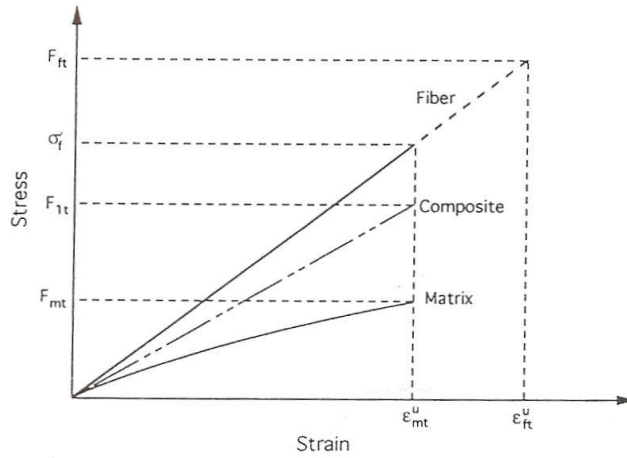
ŞEKİL 2.10. Fiber baskın durumda kompozitin ve bileşenlerinin gerilme-şekil değiştirme eğrileri (Isaac, 1994)

Bu durumda kompozitin boyuna çekme dayanımı Denklem 2.33 ile genelleştirile bilinir.

$$F_{1t} \cong F_{ft} \left(V_f + V_m \frac{E_m}{E_f} \right) \quad (2.33)$$

Matrisin kritik çekme uzamasının fiberden düşük olması durumunda ise kompozitin boyuna uzaması, matrisin kritik çekme uzamasına ulaştığında kompozit kırılacaktır (Denklem 2.34), (Şekil 2.11).

$$\varepsilon_{mt}^u < \varepsilon_{ft}^u \quad (2.34)$$



ŞEKİL 2.11. Matris baskın durumda kompozitin ve bileşenlerinin gerilme-şekil değiştirme eğrileri (Isaac, 1994)

Bu durumda ise kompozitin boyuna çekme dayanımı Denklem 2.35 ile ifade edilebilir.

$$F_{1t} \cong F_{mt} \left(V_f \frac{E_f}{E_m} + V_m \right) \quad (2.35)$$

2.3.1.2 Boyuna Sıkıştırma (Basma)

Boyuna sıkıştırma yüklemesi altında kırılma matris içindeki fiberlerin mikro düzeyde eğilmelere maruz kalmasıyla oluşur. Hacimsel oranla düşük fiber içeren kompozitlerde sıkıştırma kuvveti Denklem 2.36 ile bulunabilir.

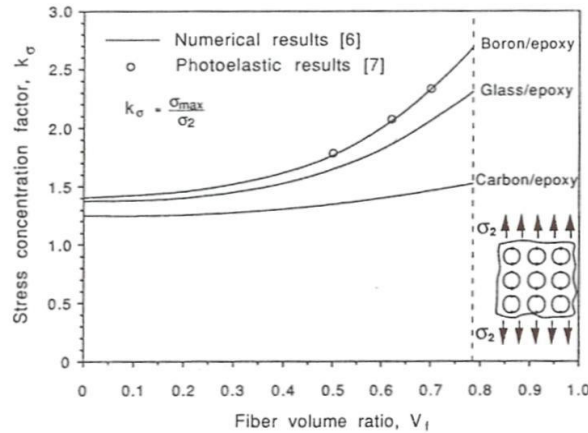
$$F_{lc} \cong 2V_f \left[\frac{E_m E_f V_f}{3(1-V_f)} \right]^{1/2} \quad (2.36)$$

Hacimsel fiber oranının daha fazla olduğu durumlarda ise kesme kuvvetinin daha baskın olduğu Denklem 2.37 ile sıkıştırma kuvveti bulunabilir.

$$F_{lc} = 2F_{6f} \left[V_f + (1-V_f) \frac{E_m}{E_f} \right] \quad (2.37)$$

2.3.1.3 Enine Çekme (Gerilme)

Tek yönlü kompozitin en kritik yükleme şekli enine çekme yüklemesidir. Bu tip yükleme matriste ve ara fazda yüksek gerilme ve şekil değiştirme birikimleri oluşturur.



ŞEKİL 2.12. Enine çekme durumunda matristeki gerilme konsantrasyon faktörü (k_σ)

(Isaac, 1994)

Enine yüklenmiş kompozitte kırılma tahmini yaparken matrisin kürlenmesinden, termal genleşmeden meydana gelen termal gerilme ve şekil değiştirmeden doğan artık gerilme ve şekil değiştirmeleri de göz önünde bulundurmak gerekmektedir.

Maksimum çekme gerilmesi kriterine göre enine çekme dayanımı Denklem 2.38 ile bulunur.

$$F_{2t} = \frac{1}{k_{\sigma}} (F_{mt} - \sigma_{rm}) \quad (2.38)$$

Maksimum çekme şekil değiştirmesine göre ise Denklem 2.39 kullanılır.

$$F_{2t} = \frac{1 - \nu_m}{k_{\sigma} (1 + \nu_m)(1 - 2\nu_m)} (F_{mt} - \varepsilon_{rm} E_m) \quad (2.39)$$

burada σ_{rm} ve ε_{rm} maksimum artık gerilme ve yer değiştirme, k_{σ} ise gerilme konsantrasyon faktörüdür (Şekil 2.12).

2.3.1.4 Enine Sıkıştırma (Basma)

Enine basma yüklemesi altındaki tek yönlü bir kompozit birçok kırılma mekanizmasına maruz kalabilir. Ara fazdaki yüksek sıkıştırma gerilmesi konsantrasyonu matriste veya fiberde sıkıştırma kırılmaları oluşturabilir. Kompozitin enine sıkıştırma dayanımı Denklem 2.40 ile hesaplanabilir.

$$F_{2c} = \frac{F_{mc} + \sigma_{rm}}{k_{\sigma}} \quad (2.40)$$

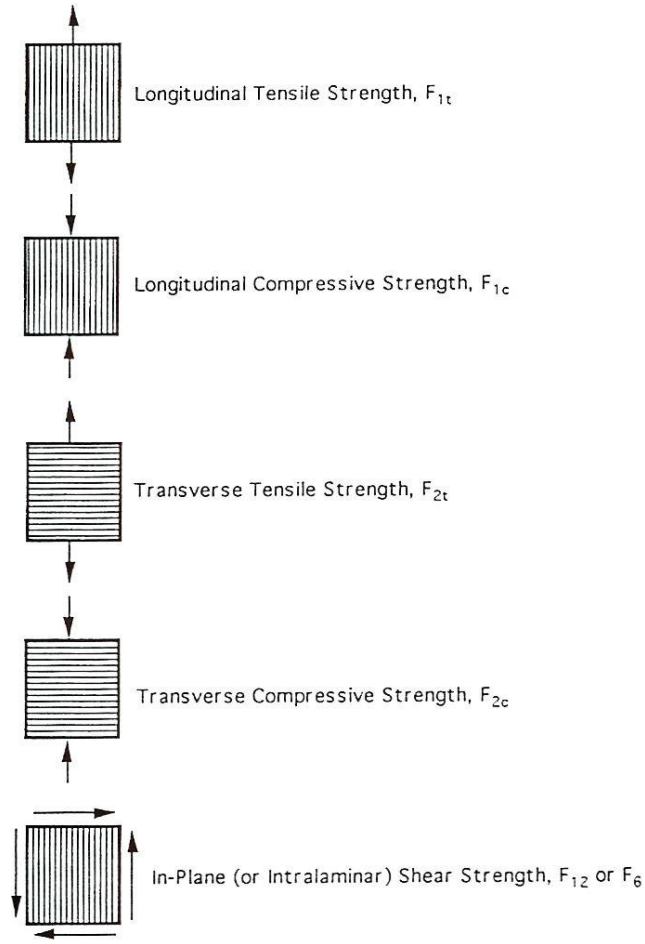
Burada F_{mc} matrisin sıkıştırma dayanımı ve σ_{rm} ise ara fazdaki maksimum artık gerilmedir (Şekil 2.13).

2.3.1.5 Düzlem İçi Kesme Gerilmesi

Düzlem içi kesme gerilmesine maruz kalan bir kompozitte fiber ve matris arasındaki ara fazda yüksek kesme gerilmesi konsantrasyonu oluşur. Bu yüksek gerilme olduğu bölgede kırılma ile sonuçlanabilir. Kompozitin düzlem içi kesme dayanımı Denklem 2.41 ile belirlenir (Şekil 2.13).

$$F_6 = \frac{F_{ms}}{k_{\tau}} \quad (2.41)$$

Burada F_{ms} matrisin kesme dayanımı ve k_{τ} ise kesme gerilmesi konsantrasyonu faktörüdür.



ŞEKİL 2.13. Tekyönlü katmanın temel mukavemet parametreleri (Isaac, 1994)

2.3.2 Makro Mekanik Kırılma Teorileri

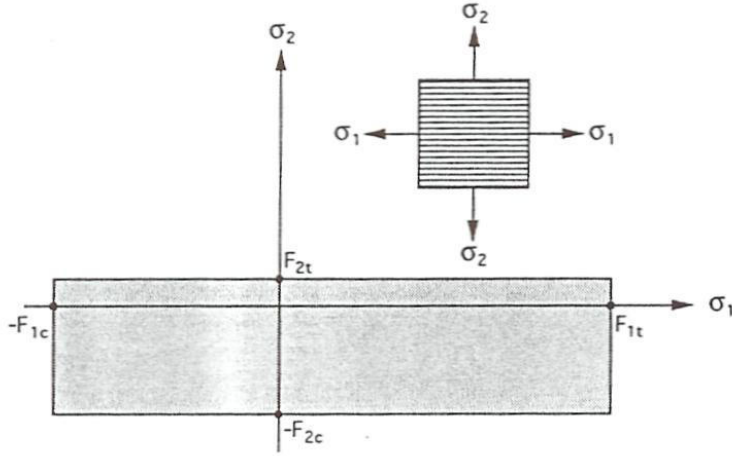
Homojen ve izotropik malzemeler için maksimum normal gerilme (Rankine), maksimum kesme gerilmesi (Tresca), maksimum şekil değiştirme enerjisi (Von Mises) ve bunun gibi iyi geliştirilmiş kırılma kriterleri mevcuttur. Kompozitler için makro mekanik kırılma teorileri ise izotropik kırılma teorilerinin katılığıının ve dayanımının anizotropik kompozitlere göre adapte edilmesiyle oluşturulmuştur.

Bütün teoriler malzeme esas eksenlerine göre olan temel mukavemet parametreleri cinsinden ifade edilebilirler. Bütün kırılma teorilerinin içerisinde en çok kullanılan ve örnek teşkil edenler şunlardır.

2.3.2.1 Maksimum Gerilme Teorisi

Maksimum gerilme teorisine göre kırılma, malzeme esas eksenindeki herhangi bir gerilme bileşeninin o yöndeki kritik dayanım gerilme bileşenine ulaştığı ve geçtiği anda meydana gelir. Katmana etki eden gerilmeler malzeme esas eksenlerine göre çözümlenir $(\sigma_1, \sigma_2, \tau_6)$ ve kırılma durumu Denklem 2.42'deki kriterlere göre ifade edilir.

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \begin{cases} F_{1t} \Leftarrow \sigma_1 > 0 \\ -F_{1c} \Leftarrow \sigma_1 < 0 \end{cases} \\ \sigma_2 &= \begin{cases} F_{2t} \Leftarrow \sigma_2 > 0 \\ -F_{2c} \Leftarrow \sigma_2 < 0 \end{cases} \\ |\tau_6| &= F_6 \end{aligned} \quad (2.42)$$



ŞEKİL 2.14. Tekyönlü katmanın çift eksenli yük altındaki kırılma zarfı (Maksimum gerilme teorisi) (Isaac, 1994)

Yüklemeye yönündeki kritik mukavemet değeri $\sigma_x > 0$ için:

$$F_{xt} = \frac{F_{1t}}{\cos^2 \theta} = \frac{F_{2t}}{\sin^2 \theta} = \frac{F_6}{\sin \theta \cos \theta} \quad (2.43)$$

ve $\sigma_x < 0$ için:

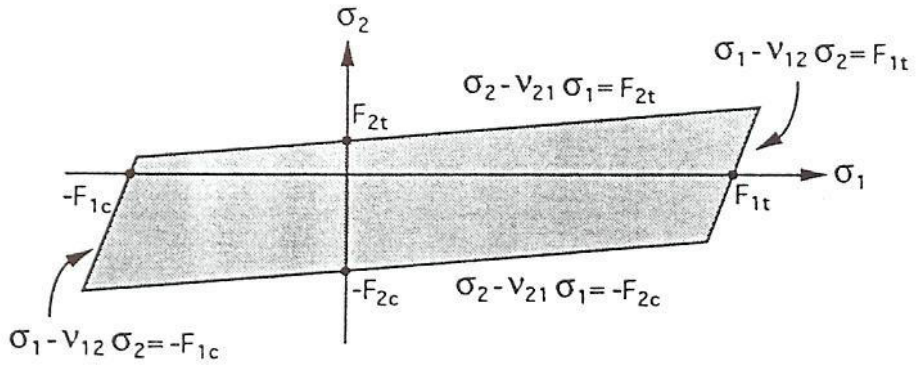
$$F_{xc} = \frac{F_{1c}}{\cos^2 \theta} = \frac{F_{2c}}{\sin^2 \theta} = \frac{F_6}{\sin \theta \cos \theta} \quad (2.44)$$

Maksimum gerilme teorisi kırılma malzemeler ve enine ve boyuna çekmeye maruz kalan kompozitler için daha geçerli olup çift yönlü yüklemeye durumunda gerilme etkileşimini hesaba katmaz (Şekil 2.14).

2.3.2.2 Maksimum Şekil Değiştirme Teorisi

Bu teoriye göre kırılma, malzeme esas eksenindeki herhangi bir şekil değiştirme bileşeninin o yöndeki kritik şekil değiştirme bileşenine ulaştığı ve geçtiği anda meydana gelir. Bu teori gerilme etkileşimlerine poisson oranına bağlı olarak izin verir ve Denklem 2.45'deki kriterle ifade edilir (Şekil 2.15).

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \begin{cases} \varepsilon_{1t}^u \Leftarrow \varepsilon_1 > 0 \\ \varepsilon_{1c}^u \Leftarrow \varepsilon_1 < 0 \end{cases} \\ \varepsilon_2 &= \begin{cases} \varepsilon_{2t}^u \Leftarrow \varepsilon_2 > 0 \\ \varepsilon_{2c}^u \Leftarrow \varepsilon_2 < 0 \end{cases} \\ |\gamma_6| &= 2|\varepsilon_{12}| = \gamma_6^u \end{aligned} \quad (2.45)$$



ŞEKİL 2.15. Tek yönlü katmanın çift eksenli yük altındaki kırılma zarfı (Maksimum şekil değiştirme teorisi) (Isaac, 1994)

2.3.2.3 Saptırıcı Şekil Değiştirme Enerjisi Teorisi (Tsai-Hill)

Saptırıcı enerji birçok araştırmacı tarafından (Von Mises, Hencky, Nadai, Novozhilov) birçok farklı formda, izotropik sünek malzemeler için kırılma kriteri olarak önerilmiştir. İki eksenli bir gerilme durumu için Von Mises akma kriteri Denklem 2.46'daki gibi verilir.

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2 = \sigma_{yp}^2 \quad (2.46)$$

Burada σ_{yp} akma gerilmesidir. Hill bu kriteri anizotropik, sünek metaller için Denklem 2.47'deki gibi modifiye etmiştir.

$$A\sigma_1^2 + B\sigma_2^2 + C\sigma_1\sigma_2 + D\tau_6^2 = 1 \quad (2.47)$$

Azzi ve Tsai ise bu kriteri ortotropik kompozit malzemeler için Denklem 2.48'deki gibi adapte etmiştir. Boyuna tek eksenli yükleme için kırılma durumu $\sigma_1'' = F_1, \sigma_2 = \tau_6 = 0$ olur.

$$A = \frac{1}{F_1^2} \quad (2.48)$$

Enine tek eksenli yükleme için kırılma durumunda $\sigma_2'' = F_2, \sigma_1 = \tau_6 = 0$ geçerlidir.

$$B = \frac{1}{F_2^2} \quad (2.49)$$

Düzlem içi kesme yükü altında kırılma durumu söz konusu olduğunda $\sigma_1 = \sigma_2 = 0, \tau_6^u = F_6$ elde edilir.

$$D = \frac{1}{F_6^2} \quad (2.50)$$

Geriye kalan C parametresi ise normal gerilmeler olan σ_1 ve σ_2 arasındaki etkileşimi hesaba katar ve iki eksenli normal bir yükleme ile hesaplanır. $\sigma_1 = \sigma_2 \neq 0, \tau_6 = 0$ olduğunda boyuna dayanım, F_1 enine dayanımdan daha yüksek olduğu için;

$$C = -\frac{1}{F_6^2} \quad (2.51)$$

elde edilir. Bu parametreleri Hill'in denkleminde yerine yazarak Tsai-Hill kriteri Denklem 2.52'deki gibi olur.

$$\frac{\sigma_1^2}{F_1^2} + \frac{\sigma_2^2}{F_2^2} + \frac{\tau_6^2}{F_6^2} - \frac{\sigma_1 \sigma_2}{F_1^2} = 1 \quad (2.52)$$

Denklem 2.52'nin ifade ettiği kırılma eğrisi $\sigma_1, \sigma_2, \tau_6$ uzayında kapalı bir yüzeydir. Kırılma eğrileri $k = \tau_6 / F_6$ sabit değerleri için Denklem 2.53 kullanılır.

$$\frac{\sigma_1^2}{F_1^2} + \frac{\sigma_2^2}{F_2^2} - \frac{\sigma_1 \sigma_2}{F_1^2} = 1 - k^2 \quad (2.53)$$

Yukarıdaki bu form ise σ_1, σ_2 eksenlerinden birleşik, dört değişik eliptik yayı ifade eder.

Tsai-Hill teorisi σ_1, σ_2 ve τ_6 gerilme bileşenleri arasında etkileşime izin verir. Fakat dezavantajı ise çekme ve basma dayanımlarını direkt olarak ayırt edememesidir.

2.3.2.4 Etkileşimli Tensör Polinom Teorisi (Tsai-Wu)

Anizotropik malzemeler için diğer teorilerdeki kısıtlamaları içermeyen ilk kırılma teorisi denemesi Gol'denblat ve Kopnov tarafından yapılmıştır. Bu teori deneysel verinin bulunmadığı örneklerde genel gerilme durumlarındaki dayanımı bulabilme yeterliliğine sahiptir. Bu teori bir koordinat sisteminden diğerine dönüşüme izin veren dayanım tensörleri kavramını kullanmaktaydı. Gerilme ve şekil değiştirme komponentlerinin sabit formunda olan bu teoremin en önemli özelliği

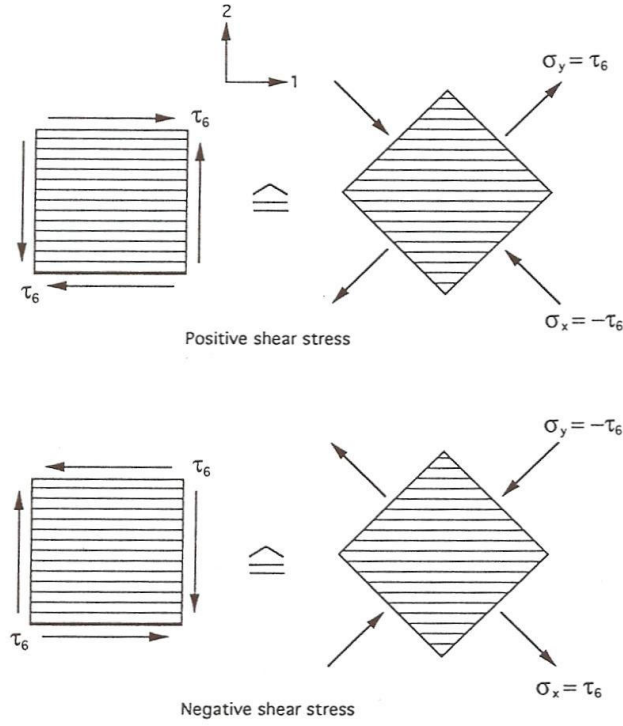
çekme ve basma dayanımları arasındaki farkı hesaba katabilme yeteneği idi. Kısaltılmış notasyon formu Denklem 2.54'deki gibi verilir.

$$(f_i \sigma_i)^a + (f_{ij} \sigma_i \sigma_j)^\beta + (f_{ijk} \sigma_i \sigma_j \sigma_k)^\gamma + \dots = 1 \quad (2.54)$$

Tsai ve Wu gerilme uzayında bir kırılma yüzeyinin varlığını kabul ederek modifiye edilmiş bir polinom tensör teoremini ortaya koydular. f_i, f_{ij} nin ikinci ve dördüncü dereceden dayanım tensörlerini gösterdiği Tsai-Wu kriteri Denklem 2.55 ile ifade edilir.

$$f_1 \sigma_1 + f_2 \sigma_2 + f_6 \tau_6 + f_{11} \sigma_1^2 + f_{22} \sigma_2^2 + f_{66} \tau_6^2 + 2f_{12} \sigma_1 \sigma_2 + 2f_{16} \sigma_1 \tau_6 + 2f_{26} \sigma_2 \tau_6 = 1 \quad (2.55)$$

Esas malzeme eksenlerinde kesme yükü ile yüklenmiş katmanın dayanımı kesme gerilmesinden bağımsız olacağı için τ_6 'nın bütün lineer terimleri kaybolacaktır (Denklem 2.56), (Şekil 2.16).



ŞEKİL 2.16. Temel malzeme eksenleri doğrultusunda etkiyen pozitif ve negatif kesme gerilmeleri (Isaac, 1994)

$$f_6 = f_{16} = f_{26} = 0 \quad (2.56)$$

Tsai-Wu kriterinin kalan terimleri ise tabakaya farklı yükler uygulayarak bulunabilir. Boyuna çekme yüklemesi altında kırılma $\sigma_1'' = F_{1t}$, $\sigma_2 = \tau_6 = 0$ ve boyuna bası yükü altında $\sigma_1'' = -F_{1c}$, $\sigma_2 = \tau_6 = 0$. Buradan 2.57'deki terimler elde edilir.

$$f_1 = \frac{1}{F_{1t}} - \frac{1}{F_{1c}}$$

$$f_{11} = \frac{1}{F_{1t}F_{1c}}$$
(2.57)

Benzer olarak enine tek eksenli çekme ve basma yükü altında Denklem 2.58 ile katsayılar hesaplanır.

$$f_2 = \frac{1}{F_{2t}} - \frac{1}{F_{2c}}$$

$$f_{22} = \frac{1}{F_{2t}F_{2c}}$$
(2.58)

Kesme yükü altında ise kırılma kriteri $\tau_6'' = F_6, \sigma_1 = \sigma_2 = 0$ Denklem 2.59'deki gibidir.

$$f_{66} = \frac{1}{F_6^2}$$
(2.59)

Diğer katsayı ise iki eksenli yükleme ile Denklem 2.60'daki gibi elde edilir. $\sigma_1'' = \sigma_2'' = F_{(12)}, \tau_6 = 0$

$$f_{12} = \frac{1}{2F_{(12)}^2} \left[1 - F_{(12)} \left(\frac{1}{F_{1t}} - \frac{1}{F_{1c}} + \frac{1}{F_{2t}} - \frac{1}{F_{2c}} \right) - F_{(12)}^2 \left(\frac{1}{F_{1t}F_{1c}} + \frac{1}{F_{2t}F_{2c}} \right) \right]$$
(2.60)

Burada $F_{(12)}$ eşit iki eksenli çekme yükü altında deneysel olarak bulunan dayanım değeridir. Çoğu durumda etkileşim katsayısı olan f_{12} kritik olmadığı için Denklem 2.61'deki yaklaşımla basitleştirilebilir.

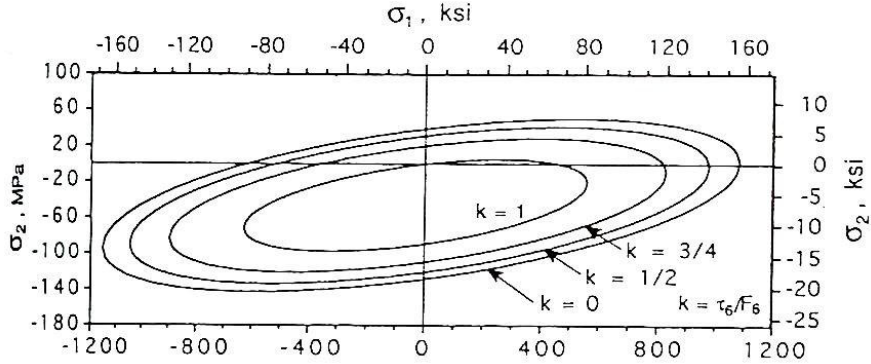
$$f_{12} \cong -\frac{1}{2}(f_{11}f_{22})^{1/2} \quad (2.61)$$

Bu parametrelerin ışığında sadeleştirilmiş Tsai-Wu kriteri Denklem 2.62'deki gibi olur.

$$f_1\sigma_1 + f_2\sigma_2 + f_{11}\sigma_1^2 + f_{22}\sigma_2^2 + f_{66}\tau_6^2 + 2f_{12}\sigma_1\sigma_2 = 1 \quad (2.62)$$

Denklem 2.62'nin ifade ettiği kırılma eğrisi $\sigma_1, \sigma_2, \tau_6$ uzayında kapalı bir yüzeydir. $\tau_6 = kF_6$ sabit kesme gerilmesi için kırılma eğrisi Denklem 2.63'deki hali alır (Şekil 2.17).

$$f_1\sigma_1 + f_2\sigma_2 + f_{11}\sigma_1^2 + f_{22}\sigma_2^2 + 2f_{12}\sigma_1\sigma_2 = 1 - k^2 \quad (2.63)$$

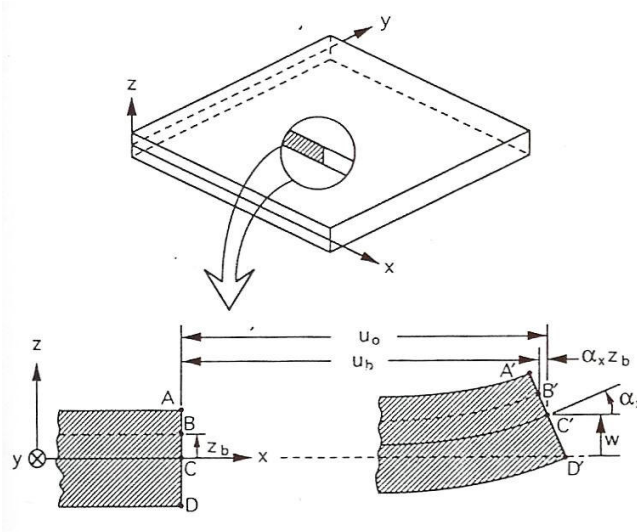


ŞEKİL 2.17. E-cam/epoksi katmanın dört farklı seviyedeki kesme yükü altında kırılma zarfı (Tsai-Wu teorisi) (Isaac, 1994)

2.4 ÇOK YÖNLÜ LEVHANIN ELASTİK DAVRANIŞI

2.4.1 Şekil Değiştirme – Yer Değiştirme İlişkisi

Şekil 2.18 kompozitin y eksenine normal olan bir kesitin deformasyondan önce ve sonrasını göstermektedir. Üstten ve alttan eşit uzaklıkta bulunan xy düzlemine kompozitin referans düzlemi denir. Referans düzleminin x ve y yönlerindeki yer değiştirmeleri u_0 ve v_0 olup, z yönünde düzlem dışı yer değiştirme (çökme) olan w ise sadece x ve y'nin fonksiyonudur.



ŞEKİL 2.18. Deformasyondan önceki ve sonraki katman kesitleri (Isaac, 1994)

$$\begin{aligned}
 u_0 &= u_0(x, y) \\
 v_0 &= v_0(x, y) \\
 w &= f(x, y)
 \end{aligned}
 \tag{2.64}$$

x ve y eksenlerindeki dönmeler (eğimler) ise Denklem 2.65’de verilmiştir.

$$\begin{aligned}
 \alpha_x &= \frac{\partial w}{\partial x} \\
 \alpha_y &= \frac{\partial w}{\partial y}
 \end{aligned}
 \tag{2.65}$$

z doğrultusundaki herhangi bir noktanın düzlemsel yer değiştirmesi genel olarak Denklem 2.66 ile ifade edilir.

$$\begin{aligned}
u &= u_0 - z \frac{\partial w}{\partial x} \\
v &= v_0 - z \frac{\partial w}{\partial y}
\end{aligned}
\tag{2.66}$$

Küçük yer değıştirmeler için elastisite teorisinden gelen klasik şekil değıştirme – yer değıştirme ilişkisini Denklem 2.67 ile verilir.

$$\begin{aligned}
\varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial u_0}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \\
\varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial v_0}{\partial y} - z \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \\
\gamma_{xy} &= \gamma_s = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} - 2z \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}
\end{aligned}
\tag{2.67}$$

Referans düzlemindeki şekil değıştirme komponentleri ise Denklem 2.68'deki gibidir.

$$\begin{aligned}
\varepsilon_x^0 &= \frac{\partial u_0}{\partial x} \\
\varepsilon_y^0 &= \frac{\partial v_0}{\partial y} \\
\gamma_s^0 &= \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x}
\end{aligned}
\tag{2.68}$$

ve şeklin eğriliğı Denklem 2.69 ile gösterilir.

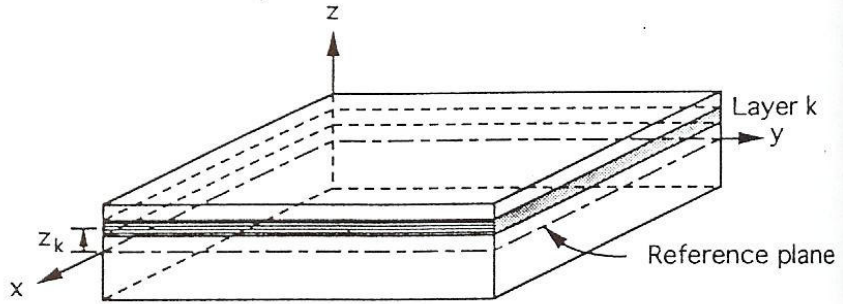
$$\begin{aligned}
\kappa_x &= -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \\
\kappa_y &= -\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \\
\kappa_s &= -\frac{2\partial^2 w}{\partial x \partial y}
\end{aligned} \tag{2.69}$$

Herhangi bir noktadaki şekil değiştirme referans düzlemdeki şekil değiştirme ve şeklin eğriliği cinsinden Denklem 2.70 ile ifade edilebilir.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_s^0 \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_s \end{bmatrix} \tag{2.70}$$

2.4.2 Kompozitin Bir Tabakasındaki Gerilme – Şekil Değiştirme İlişkisi

Çok yönlü bir kompozitte orta düzleminin referans düzlemine uzaklığı z_k olan tek bir k tabakasını ele alalım (Şekil 2.19). Bu tabakanın kompozitin koordinat sistemine göre olan gerilme – yer değiştirme ilişkisi Denklem 2.71 ile verilir.



ŞEKİL 2.19. Kompozit levhadaki k katmanı (Isaac, 1994)

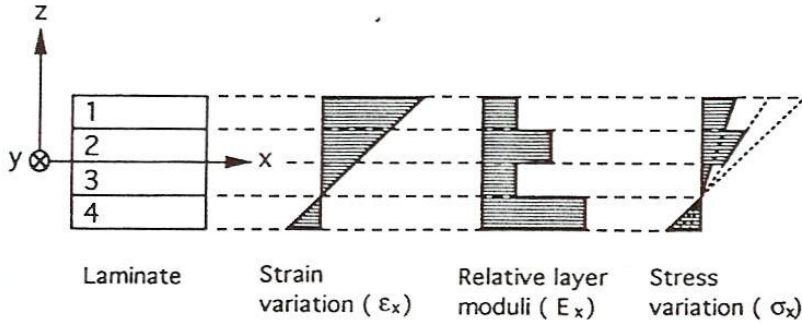
$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_s \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} Q_{xx} & Q_{xy} & Q_{xs} \\ Q_{yx} & Q_{yy} & Q_{ys} \\ Q_{sx} & Q_{sy} & Q_{ss} \end{bmatrix}_k \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_s \end{bmatrix}_k \quad (2.71)$$

Denklem 2.71, Denklem 2.70'de yerine konursa Denklem 2.72 elde edilir.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_s \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} Q_{xx} & Q_{xy} & Q_{xs} \\ Q_{yx} & Q_{yy} & Q_{ys} \\ Q_{sx} & Q_{sy} & Q_{ss} \end{bmatrix}_k \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_s^0 \end{bmatrix} + z \cdot \begin{bmatrix} Q_{xx} & Q_{xy} & Q_{xs} \\ Q_{yx} & Q_{yy} & Q_{ys} \\ Q_{sx} & Q_{sy} & Q_{ss} \end{bmatrix}_k \cdot \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_s \end{bmatrix} \quad (2.72)$$

Denklem 2.72'den de görülebileceği gibi şekil değiştirmeler kalınlık boyunca lineer bir değişim sergilerken gerilmelerde bunu görmek mümkün değildir. Transforme olmuş katılık matrisinin $[Q]_{x,y}$ tabakadan tabakaya süreksiz değişimi gerilmenin de süreksizliğini

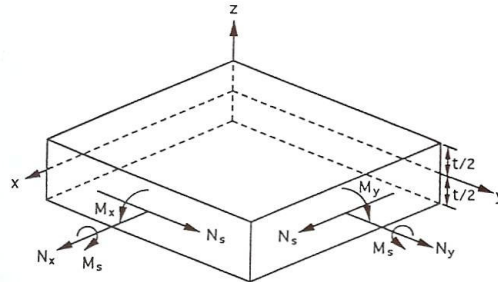
doğurur. Bunu daha iyi görebilmek Şekil 2.20’de herhangi bir dört katmanlı tabakanın diyagramı gösterilmiştir.



ŞEKİL 2.20. Çok yönlü levhadaki doğrusal şekil değiştirme ve süreksiz gerilme değişimi (Isaac, 1994)

2.4.3 Yük ve Moment Oluşumları

Gerilimin katmandan katmana süreksiz olarak değişmesi sebebiyle kompozitlerde gerilmenin integre edilmiş etkileriyle uğraşmak daha uygundur. Bu nedenle kompozitin yer değiştirmesi ile ilgili kuvvet ve momentleri kullanmak gerekmektedir (Şekil 2.21).

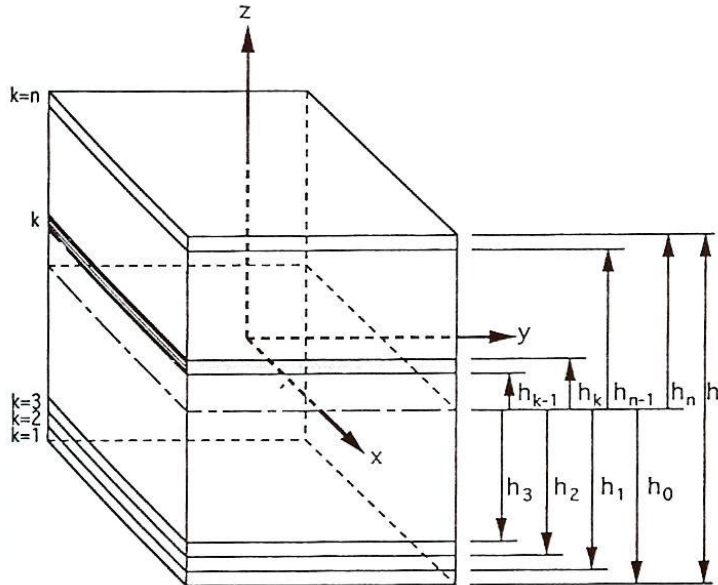


ŞEKİL 2.21. Tek bir katmanın üzerinde oluşabilecek kuvvetler ve momentler (Isaac, 1994)

Çok katmanlı ve çok yönlü bir kompozitte kuvvet ve moment oluşumları tüm katmanların etkilerinin toplamından oluşmaktadır. Böylelikle n katmanlı bir kompozitte kuvvet ve moment komponentleri Denklem 2.73 ve 2.74 ile elde edilir.

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_s \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_s \end{bmatrix}_k dz \quad (2.73)$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_s \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_s \end{bmatrix}_k z dz \quad (2.74)$$



ŞEKİL 2.22. Çok yönlü levhadaki her bir katmanın koordinat notasyonu
(Isaac, 1994)

Şekil 2.22’de h_k ve h_{k-1} k katmanının alt ve üst yüzeylerinin z koordinatlarıdır.

2.4.4 Genel Yük – Yer Değiştirme İlişkisi : Levhannın Katılık Matrisi

Çok yönlü katman söz konusu olduğunda katılık matrisi komponentleri Denklem 2.75 ile hesaplanır.

$$\begin{aligned}
 A_{ij} &= \sum_{k=1}^n Q_{ij}^k (h_k - h_{k-1}) \\
 B_{ij} &= \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n Q_{ij}^k (h_k^2 - h_{k-1}^2) \quad (i, j = x, y, s) \\
 D_{ij} &= \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n Q_{ij}^k (h_k^3 - h_{k-1}^3)
 \end{aligned} \tag{2.75}$$

Tam halde yük – yer değiştirme denklemi 2.76’daki gibidir.

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{xx} & A_{xy} & A_{xs} \\ A_{yx} & A_{yy} & A_{ys} \\ A_{sx} & A_{sy} & A_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_s^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{xx} & B_{xy} & B_{xs} \\ B_{yx} & B_{yy} & B_{ys} \\ B_{sx} & B_{sy} & B_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_s \end{bmatrix} \tag{2.76}$$

ve moment – yer değiştirme denklemi de 2.77’de görülmektedir.

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{xx} & B_{xy} & B_{xs} \\ B_{yx} & B_{yy} & B_{ys} \\ B_{sx} & B_{sy} & B_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_s^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{xx} & D_{xy} & D_{xs} \\ D_{yx} & D_{yy} & D_{ys} \\ D_{sx} & D_{sy} & D_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_s \end{bmatrix} \quad (2.77)$$

Denklem 2.76 ve 2.77 birleştirildiğinde düzlem içi kuvvetlerin ve momentlerin, düzlemsel şekil değiştirmeler ve eğrilikler ile olan ilişkisini tanımlayan Denklem 2.78 elde edilir.

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_s \\ M_x \\ M_y \\ M_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{xx} & A_{xy} & A_{xs} & B_{xx} & B_{xy} & B_{xs} \\ A_{yx} & A_{yy} & A_{ys} & B_{yx} & B_{yy} & B_{ys} \\ A_{sx} & A_{sy} & A_{ss} & B_{sx} & B_{sy} & B_{ss} \\ B_{xx} & B_{xy} & B_{xs} & D_{xx} & D_{xy} & D_{xs} \\ B_{yx} & B_{yy} & B_{ys} & D_{yx} & D_{yy} & D_{ys} \\ B_{sx} & B_{sy} & B_{ss} & D_{sx} & D_{sy} & D_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_s^0 \\ \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_s \end{bmatrix} \quad (2.78)$$

yada kısaca Denklem 2.79 ile ifade edilir.

$$\begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \epsilon^0 \\ \kappa \end{bmatrix} \quad (2.79)$$

Denklem 2.79'daki A, B ve D katılık matrisi komponentlerinin simetrik olduğuna dikkat edilmelidir (Denklem 2.80).

$$\begin{aligned} A_{ij} &= A_{ji} \\ B_{ij} &= B_{ji} \\ D_{ij} &= D_{ji} \end{aligned} \quad (i, j = x, y, s) \quad (2.80)$$

2.76 – 2.80 denklemleri geometrinin, malzeme özelliklerinin ve tabakaların sıralanış düzeninin fonksiyonları olan $[A]$, $[B]$ ve $[D]$ levha katılık matrisleri cinsinden yazılmışlardır.

Bu matrisler çok katmanlı levhaların elastik parametreleri olup önemleri aşağıda belirtilmiştir:

- A_{ij} : uzama – kısılma katılığı, düzlem içi levha modülü, düzlemsel kuvvetler ve düzlemsel şekil değiştirmeler arasındaki ilişkiyi sağlar.
- B_{ij} : birleştirici katılık, düzlem içi/bükme birleştirici modülü, düzlem içi yüklerin eğriliklerle ve momentlerin düzlem içi şekil değiştirmelerle olan ilişkisini tanımlar. Öyle ki $B_{ij} \neq 0$ ise düzlem içi kuvvetler bükme ve burulma deformasyonları yaratırlar. Momentler ise bükme ve burulmaya ek olarak orta yüzeyin uzayıp - kısılmasını sağlarlar.
- D_{ij} : eğme yada bükme levha katılığıdır; momentlerin eğriliklerle olan ilişkisini tanımlar.

2.4.5 Yük – Yer Değiştirme İlişkisinin Tersi : Levhanın Uygunluk Matrisi

Çok yönlü kompozit levhalar katmanlar arası gerilme süreksizlikleri ile karakterize edildikleri için, kalınlık boyunca sürekliliğini koruyan şekil değiştirmeler ile çalışmak daha fazla tercih edilmektedir. Bu nedenle yük – deformasyon ilişkisinin tersini almak ve şekil değiştirmeler ile eğrilikleri uygulanan yükün ve momentin fonksiyonu olarak yazmak gerekmektedir (Denklem 2.81).

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_s^0 \\ \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{xx} & a_{xy} & a_{xs} & b_{xx} & b_{xy} & b_{xs} \\ a_{yx} & a_{yy} & a_{ys} & b_{yx} & b_{yy} & b_{ys} \\ a_{sx} & a_{sy} & a_{ss} & b_{sx} & b_{sy} & b_{ss} \\ c_{xx} & c_{xy} & c_{xs} & d_{xx} & d_{xy} & d_{xs} \\ c_{yx} & c_{yy} & c_{ys} & d_{yx} & d_{yy} & d_{ys} \\ c_{sx} & c_{sy} & c_{ss} & d_{sx} & d_{sy} & d_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_s \\ M_x \\ M_y \\ M_s \end{bmatrix} \quad (2.81)$$

ya da kısaca Denklem 2.82'deki gibi ifade edilir.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon^0 \\ \kappa \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix} \quad (2.82)$$

Denklem 2.82'de [a], [b], [c] ve [d] levhanın uygunluk matrisleridirler ve levhanın katılık matrislerinden Denklem 2.83 ile elde edilirler.

$$\begin{aligned}
[a] &= [A^{-1}] - \{[B^*] \cdot [D^{*-1}]\} \cdot [C^*] \\
[b] &= [B^*] \cdot [D^{*-1}] \\
[c] &= -[D^{*-1}] \cdot [C^*] \\
[d] &= [D^{*-1}]
\end{aligned} \tag{2.83}$$

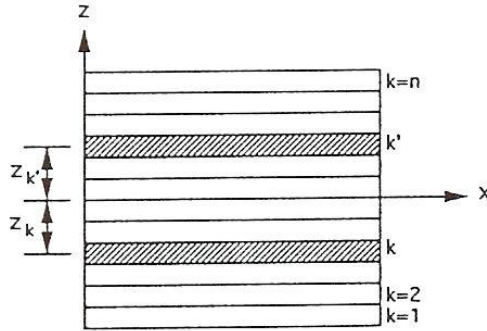
Burada;

$$\begin{aligned}
[A^{-1}] &= [A] \text{ matrisinin tersi (inversi)} \\
[B^*] &= -[A^{-1}] \cdot [B] \\
[C^*] &= [B] \cdot [A^{-1}] \\
[D^*] &= [D] - \{[B] \cdot [A^{-1}]\} \cdot [B]
\end{aligned} \tag{2.84}$$

Denklem 2.84’de açıkça görülmektedir ki katman uygunluk matrisleri simetrik iken levha uygunluk matrisinde $[b] \neq [c]$ olduğu için simetrik değildir. Aslında $[c]$ matrisi $[b]$ ’nin transpozesidir. Bu nedenle referans düzlemin şekil değiştirmelerinin uygulanan momentlerle ilişkisini tanımlayan uygunluk matrisi, eğriliklerle düzlem içi yüklerin ilişkisini tanımlayan uygunluk matrisi ile benzeşmez.

2.4.6 Simetrik Levhalar

Bir levhanın simetrik olarak tanımlanabilmesi için referans düzlemin üstünde ve altında kalan her katmanın referans düzlemden eşit uzaklıkta, aynı kalınlıkta, aynı açıda ve aynı özellikte, fakat referans düzlemin diğer tarafında bir eşinin bulunması gerekmektedir. Böylelikle levha hem geometrik hem de malzeme özelliği olarak simetrik olur (Şekil 2.23).



ŞEKİL 2.23. Simetrik levhadaki benzer k ve k' katmanları (Isaac, 1994)

Katmanlarda oluşacak olan birleştirici katılık matrisinin komponentleri toplamı birbirine mutlak değer olarak eşit fakat farklı işarette değerlerden oluşacağı için;

$$B_{ij} = 0 \quad (i,j = x, y, s)$$

olacaktır. Böylelikle simetrik bir levha için düzlem içi yüklerle düzlem dışı deformasyonlar (eğrilikler) ve eğilme - burulma momentleri ile düzlem içi deformasyonlar arasında herhangi bir birleştirici katılık matrisi oluşmayacaktır.

Bu durumda yükleme – deformasyon ilişkisi Denklem 2.85 ve 2.86 ile verilir.

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{xx} & A_{xy} & A_{xs} \\ A_{yx} & A_{yy} & A_{ys} \\ A_{sx} & A_{sy} & A_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_s^0 \end{bmatrix} \quad (2.85)$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{xx} & D_{xy} & D_{xs} \\ D_{yx} & D_{yy} & D_{ys} \\ D_{sx} & D_{sy} & D_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_s \end{bmatrix} \quad (2.86)$$

2.4.7 Levhanın Mühendislik Sabitleri

Levhanın mühendislik sabitlerini hesaplayabilmek için levha katılık matrisi komponentlerinin fonksiyonu olan 2.87 denklemleri kullanılır.

$$\begin{aligned} \overline{E}_x &= \frac{1}{ha_{xx}} & \overline{E}_y &= \frac{1}{ha_{yy}} & \overline{G}_{xy} &= \frac{1}{ha_{ss}} \\ \overline{\nu}_{xy} &= -\frac{a_{yx}}{a_{xx}} & \overline{\nu}_{yx} &= -\frac{a_{xy}}{a_{yy}} & \overline{\eta}_{sx} &= \frac{a_{xs}}{a_{ss}} \\ \overline{\eta}_{xs} &= \frac{a_{sx}}{a_{xx}} & \overline{\eta}_{ys} &= \frac{a_{sy}}{a_{yy}} & \overline{\eta}_{xs} &= \frac{a_{ys}}{a_{ss}} \end{aligned} \quad (2.87)$$

Tek bir katmanda da olduğu gibi uygunluk matrisinin simetrik olması levha mühendislik sabitleri arasındaki Denklem 2.88'in geçerliliğini sağlar.

$$\begin{aligned}
\frac{\overline{v_{xy}}}{\overline{E_x}} &= \frac{\overline{v_{yx}}}{\overline{E_y}} \\
\frac{\overline{\eta_{xs}}}{\overline{E_x}} &= \frac{\overline{\eta_{sx}}}{\overline{G_{xy}}} \\
\frac{\overline{\eta_{ys}}}{\overline{E_y}} &= \frac{\overline{\eta_{sy}}}{\overline{G_{xy}}}
\end{aligned} \tag{2.88}$$

2.5 ÇOK YÖNLÜ LEVHANIN GERİLME VE KIRILMA ANALİZİ

Levhanın kırılma analizi tek bir tabakanınkinden çok daha fazla karmaşıktır. Bir tabakanın kırılması tüm levhanın kırılması anlamına gelmez fakat levha ile ilişkili bir kırılma sürecinin ilk adımıdır. Levhanın kırılma teorileri katmanda olduğu gibi makroskobik düzeyde incelenir ve temel katman mukavemet parametreleri cinsinden ifade edilir.

Çok yönlü levhanın mukavemeti onu oluşturan katmaların mukavemetine ek olarak birçok faktörün fonksiyonudur. Çeşitli katman oryantasyonları, katılıklar, dayanımlar ile termal ve nem genişleme katsayıları levhanın yönsel karakteristiklerini etkileyen faktörlerdir. Fabrikasyon süreci artık gerilmelerin oluşmasına etkendir ve bu gerilmeler ise genel mukavemet açısından önem taşır.

2.5.1 Kırılma Tipleri

Levhanın kırılma analizinde üç değişik çeşit kırılma tipinden söz edilir: (1) ilk yada birinci katmanın kırılması (First Ply Failure), (2) tüm levhanın kırılması (Ultimate Laminare Failure), (3) delaminasyon kırılması (Interlaminar Failure). Birinci durumda levha ilk katmanının kırıldığı anda kırılmış olarak kabul edilir. İkinci durumda levha maksimum taşınabilen yük seviyesine ulaşıldığında kırılmış kabul edilir. Son durumda ise katmanlar kırılmasa bile birbirlerinden ayrıldıklarında kırılma olmuş kabul edilir.

2.5.2 Gerilme Analizi ve İlk Katmanın Kırılması Güvenlik Faktörlerinin Bulunması

İlk katmanın kırılması yaklaşımında kullanılacak olan kırılma kriteri her tabakaya ayrı ayrı uygulanır. $(\sigma_1, \sigma_2, \tau)_k$ k katmanının gerilmeleri olup Tsai – Wu kırılma kriterine Denklem 2.89'daki gibidir.

$$aS_{fk}^2 + bS_{fk} - 1 = 0 \quad (2.89)$$

Burada,

$$\begin{aligned} a &= f_{11}\sigma_{1k}^2 + f_{22}\sigma_{2k}^2 + f_{66}\tau_{6k}^2 + 2f_{12}\sigma_{1k}\sigma_{2k} \\ b &= f_1\sigma_{1k} + f_2\sigma_{2k} \end{aligned} \quad (2.90)$$

ve güvenlik katsayıları Denklem 2.91 ile hesaplanır.

$$\begin{aligned} S_{fka} &= \frac{-b + \sqrt{b^2 + 4a}}{2a} \\ S_{fkr} &= \left| \frac{-b - \sqrt{b^2 + 4a}}{2a} \right| \end{aligned} \quad (2.91)$$

Denklem 2.91’de S_{fka} gerilmenin pozitif durumundaki, S_{fkr} ise gerilmenin negatif durumundaki güvenlik faktörleridir.

Levhanın çekme ve basma dayanımları ise Denklem 2.92’deki gibidir.

$$\begin{aligned} \overline{F}_{xt} &= (S_{fka})_{\min} \\ \overline{F}_{xc} &= (S_{fkr})_{\min} \end{aligned} \quad (2.92)$$

2.6 HİDROTERMAL ETKİLER

2.6.1 GİRİŞ

Fabrikasyon sürecinin ardından kompozit yapılar çok çeşitli ısı ve neme sahip ortamlarda çalışabilirler ve bu da performanslarına etki edebilir. Bu hidrotermal etkiler ısı ve nem miktarlarındaki değişimin

sonucunda ortaya çıkar ve kompoziti oluşturan malzemelerin ısı ve nem miktarlarındaki değişimle doğrudan ilgilidir.

Hidrotermal etkilerin yapısal dizayn ve analiz aşamalarında dikkate alınması büyük önem taşır. Kompozit bir yapının performansı onun çevresel tarihinin, ısı ve nem dağılımının, çalışma ve hidrotermal gerilmelerinin ve ısı - nemden kaynaklanan özellik değişimlerinin birer fonksiyonudur. Hidrotermal etkiler aşağıdaki şekilde sınıflandırılabilir.

2.6.1.1 Fiziksel ve Kimyasal Etkiler

Polimer/Matris kompozitlerde nem emme ve salma süreçleri malzemelerin ilk hidrotermal durumuna ve çevreye bağlıdır. Polimerizasyon süreçleri kompoziti oluşturan malzemelerin hidrotermal özelliklerinin ve kompozitin ilk hidrotermal durumunun bir fonksiyonudur. Malzeme bozulması ve korozyonu hidrotermal faktörlerle ilişkilidir.

2.6.1.2 Mekanik Özellikler Üzerindeki Etkileri

Elastik ve viskoelastik (zamana bağımlı) özellikler ısı ve nem konsantrasyonu ile değişiklik gösterebilir. Kırılma ve mukavemet karakterleri, özellikle matris baskın zorlamalarda ısı ve nem miktarlarındaki değişimden etkilenebilir.

2.6.1.3 Hidrotermoelastik (HTE) Etkiler

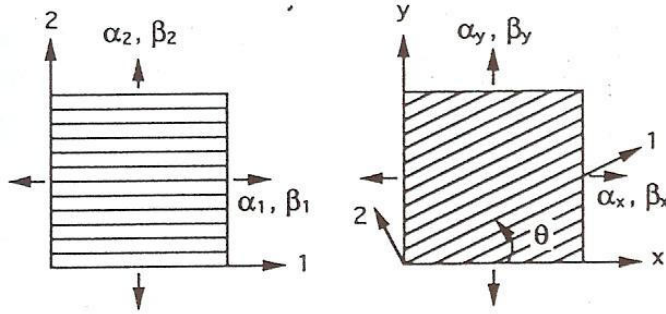
Kompozit malzeme termal ve neme bağılı genişleme faktörleri ile ilgili olarak kalıcı olmayan deformasyonlar altına girebilir. Katmanlar arası ve kompozitin geneline etkileyen gerilmeler termoelastik ve hidroelastik inhomojenite ve anizotropi sonucu meydana gelebilir.

2.6.2 HİDROTHERMAL ETKİLER VE MEKANİK DAVRANIŞ

Hidrotermal durum kompozit malzemenin gerilme – şekil değiştirme davranışını iki farklı yönde etkiler. Kompoziti oluşturan malzemelerin özellikleri ısı ve nem konsantrasyonu ile değişiklik gösterebilir. İkinci olarak ise hidrotermal durumdan ötürü fabrikasyon artık gerilmeleri değişiklik gösterebilir. Fiberler genellikle çevresel koşullara karşı daha az duyarlı olduklarından hidrotermal etkiler matris baskın zorlamalarda (Örneğin enine çekme, enine basma ve düzlem içi kesme) daha fazla dikkat çekmektedirler.

2.6.3 TEKYÖNLÜ KATMANIN TERMAL VE NEME BAĞLI GENLEŞME KATSAYILARI

Tekyönlü katmanın hidrotermal davranışı iki esas termal genişleme katsayısı (α_1, α_2) ve iki esas nemsel genişleme katsayısı (β_1, β_2) cinsinden tam olarak karakterize edilebilir. Bu katsayılar kompoziti oluşturan malzemelerin geometrik ve malzeme özellikleri ile ilişkilendirilebilir (Şekil 2.24).



ŞEKİL 2.24. Tekyönlü katmandaki termal ve neme bağlı genleşme katsayıları (Isaac, 1994)

Sürekli fiberlerden oluşan kompozit için boyuna katsayı Denklem 2.93 ile ifade edilir.

$$\alpha_1 = \frac{E_f \alpha_f V_f + E_m \alpha_m V_m}{E_f V_f + E_m V_m} \quad (2.93)$$

Burada,

E_f, E_m = Fiber ve matrisin elastisite modülleri

α_f, α_m = Fiber ve matrisin termal genleşme katsayıları

V_f, V_m = Fiber ve matrisin hacimsel oranları

Enine termal genleşme katsayısı ise Denklem 2.94'deki gibi hesaplanır.

$$\alpha_2 = \alpha_f V_f (1 + \nu_f) + \alpha_m V_m (1 + \nu_m) - \nu_{12} \alpha_1 \quad (2.94)$$

Burada,

ν_f, ν_m = Fiberin ve matrisin poisson katsayıları

$\nu_{12} = \nu_f V_f + \nu_m V_m$ = Katmanın majör Poisson katsayısı

Esas eksene göre termal katsayılar elde edildikten sonra bunlar 2.95 denklemleri yardımıyla global eksene (x,y) göre transforme edilebilir:

$$\begin{aligned}\alpha_x &= \alpha_1 m^2 + \alpha_2 n^2 \\ \alpha_y &= \alpha_1 n^2 + \alpha_2 m^2 \\ \alpha_{xy} &= \alpha_s = 2(\alpha_1 - \alpha_2)mn\end{aligned}\tag{2.95}$$

Burada $m = \cos \theta$ ve $n = \sin \theta$.

Neme bağlı genleşme denklemleri de termal denklemlere benzerdir fakat karbon, boron ve cam gibi fiberlerin genellikle nemi absorbe etmedikleri dikkate alınır ş u şekilde bir sadeleştirme yapılabilir: $\beta_f = \beta_{1f} = \beta_{2f} = 0$. Böylelikle boyuna ve enine neme bağlı genleşme katsayıları Denklem 2.96 ve 2.97 ile ifade edilir.

$$\beta_1 = \beta_m \frac{E_m V_m}{E_f V_f + E_m V_m} = \beta_m \frac{E_m V_m}{E_1}\tag{2.96}$$

ve

$$\beta_2 = \beta_m \frac{V_m}{E_1} [(1 + \nu_m) E_f V_f + (V_m - \nu_f V_f) E_m] \quad (2.97)$$

2.6.4 TEKYÖNLÜ KATMANIN HİDROTERMAL ŞEKİL DEĞİŞTİRMESİ

Bir katman sıcaklıktaki düzenli bir değişim sonucu $\Delta T = T - T_0$ yada nem yoğunluğundaki bir değişim sonucu $\Delta c = c - c_0$ (Burada T_0 ve c_0 referans hidrotermal durumu göstermektedir) hidrotermal şekil değişikliklerine maruz kalır. Termal ve neme bağlı deformasyonların birleşik olarak meydana gelmediği ve termal ve neme bağlı genleşme katsayıların sabit oldukları yaklaşımları ile katmanların esas eksenlerdeki hidrotermal şekil değiştirmeler Denklem 2.98 ile ifade edilir.

$$\begin{aligned} e_1 &= \alpha_1 \Delta T + \beta_1 \Delta c \\ e_2 &= \alpha_2 \Delta T + \beta_2 \Delta c \\ e_6 &= 0 \end{aligned} \quad (2.98)$$

ve (x,y) global eksene göre transforme edilmiş şekil değiştirmeler ise Denklem 2.99 ile hesaplanır.

$$\begin{aligned} e_x &= e_1 m^2 + e_2 n^2 \\ e_y &= e_1 n^2 + e_2 m^2 \\ e_{xy} &= e_s = 2(e_1 - e_2)mn \end{aligned} \quad (2.99)$$

Burada $m = \cos \theta$ ve $n = \sin \theta$ dır.

2.6.5 HİDROTERMOELASTİK GERİLME – ŞEKİL DEĞİŞTİRME İLİŞKİLERİ

Çok yönlü bir levha mekanik ([N], [M]) ve hidrotermal ($\Delta T, \Delta c$) yüklemelere maruz kaldığında herhangi bir k katmanı gerilme $[\sigma]_{x,y}^k$ ve deformasyon $[\varepsilon]_{x,y}^k$ durumu ile karşı karşıyadır. Hidrotermoelastik süperpozisyon prensibine göre k katmanındaki şekil değiştirme $[\varepsilon]_{x,y}^k$ katmanda bulunan gerilmenin $[\sigma]_{x,y}^k$ oluşturduğu şekil değiştirme ve hidrotermal gerilmenin toplamından oluşmaktadır.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_s \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} & S_{xs} \\ S_{yx} & S_{yy} & S_{ys} \\ S_{sx} & S_{sy} & S_{ss} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_s \end{bmatrix}_k + \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_s \end{bmatrix}_k \quad (2.100)$$

Denklem 2.100 gerilmeyi vermesi için Denklem 2.101 şeklinde transforme edilir.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_s \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} Q_{xx} & Q_{xy} & Q_{xs} \\ Q_{yx} & Q_{yy} & Q_{ys} \\ Q_{sx} & Q_{sy} & Q_{ss} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} \varepsilon_x - e_x \\ \varepsilon_y - e_y \\ \gamma_s - e_s \end{bmatrix}_k \quad (2.101)$$

Daha açık şekli Denklem 2.102'deki gibidir.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_s \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} Q_{xx} & Q_{xy} & Q_{xs} \\ Q_{yx} & Q_{yy} & Q_{ys} \\ Q_{sx} & Q_{sy} & Q_{ss} \end{bmatrix}_k + \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 + z\kappa_x - e_x \\ \varepsilon_y^0 + z\kappa_y - e_y \\ \gamma_s^0 + z\kappa_s - e_s \end{bmatrix}_k \quad (2.102)$$

Levhadaki gerilme katmandan katmana devamlı olmayan bir değişme gösterebilir. Bu nedenle gerilme – şekil değiştirme ilişkisini ifade etmenin en uygun yolu levhanın kuvvetleri ve momentleri cinsinden denklemler kullanmaktır.

2.102 denkleminin kalınlığa göre integre edilmesi ile denklem 2.103 elde edilir.

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_s \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{bmatrix} Q_{xx} & Q_{xy} & Q_{xs} \\ Q_{yx} & Q_{yy} & Q_{ys} \\ Q_{sx} & Q_{sy} & Q_{ss} \end{bmatrix}_k \left\{ \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_s^0 \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_s \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_s \end{bmatrix}_k \right\} dz \quad (2.103)$$

Daha öncede incelendiği gibi bu integrasyon sonucunda Denklem 2.104 elde edilir.

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{xx} & A_{xy} & A_{xs} \\ A_{yx} & A_{yy} & A_{ys} \\ A_{sx} & A_{sy} & A_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_s^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{xx} & B_{xy} & B_{xs} \\ B_{yx} & B_{yy} & B_{ys} \\ B_{sx} & B_{sy} & B_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_s \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} N_x^{HT} \\ N_y^{HT} \\ N_s^{HT} \end{bmatrix} \quad (2.104)$$

Burada $[A]$ ve $[B]$ levha katılık matrisleri olup $[N^{HT}]_{x,y}$ hidrotermal kuvvet olup Denklem 2.105'deki gibi ifade edilir.

$$\begin{bmatrix} N_x^{HT} \\ N_y^{HT} \\ N_s^{HT} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n \begin{bmatrix} Q_{xx} & Q_{xy} & Q_{xs} \\ Q_{yx} & Q_{yy} & Q_{ys} \\ Q_{sx} & Q_{sy} & Q_{ss} \end{bmatrix}_k + \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_s \end{bmatrix}_k t_k \quad (2.105)$$

Burada $t_k = h_k - h_{k-1}$ k katmanının kalınlığıdır.

Aynı yaklaşımla gerilmelerin integrasyonunun kalınlık ile çarpımı sonucu hidrotermal momente ulaşmak mümkündür (Denklem 2.106).

$$\begin{bmatrix} M_x^{HT} \\ M_y^{HT} \\ M_s^{HT} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n \begin{bmatrix} Q_{xx} & Q_{xy} & Q_{xs} \\ Q_{yx} & Q_{yy} & Q_{ys} \\ Q_{sx} & Q_{sy} & Q_{ss} \end{bmatrix}_k + \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_s \end{bmatrix}_k z_k t_k \quad (2.106)$$

Burada bulunan hidrotermal kuvvet ve momentlerin uygulanan mekanik kuvvet ve momentlere eklenmesi sonucu levhanın karşılaştığı gerçek kuvvet ve momentler ortaya çıkmaktadır (Denklem 2.107 ve 2.108).

$$\begin{bmatrix} \bar{N}_x \\ \bar{N}_y \\ \bar{N}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N_x^{HT} \\ N_y^{HT} \\ N_s^{HT} \end{bmatrix} \quad (2.107)$$

Benzer yaklaşımla;

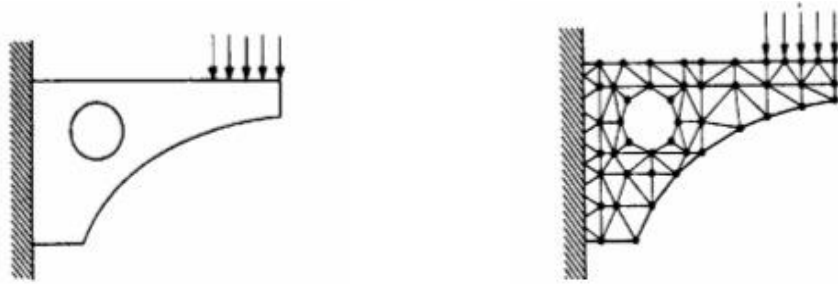
$$\begin{bmatrix} \overline{M}_x \\ \overline{M}_y \\ \overline{M}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_x^{HT} \\ M_y^{HT} \\ M_s^{HT} \end{bmatrix} \quad (2.108)$$

bulunur.

3. SONLU ELEMENLAR ANALİZİ

Sonlu elemanlar analizi (SEA), fiziksel bir modelin matematiksel olarak simgelenmesi ve bu simgenin çözümünü içeren nümerik bir tekniktir. Problemin formülasyonu ne kadar iyi yapılırsa, elde edilen sonuçlar da o kadar gerçekçi olur.

Model, sonlu sayıda elemana bölündükten sonra, her düğüm noktası çözülmesi gereken bilinmeyenler ile ilişkilendirilir. İki boyutlu bir katı için (örneğin bir kiriş gibi) x ve y yönlerindeki yer değiştirmeler bu bilinmeyenleri oluşturur. Yer değiştirmeler hesaplandıktan sonra şekil değiştirmeler, yer değiştirme fonksiyonunun kısmi integrasyonu ile integre edilerek bulunur. Elde edilen şekil değiştirmelerden ise gerilmeler hesaplanır.



ŞEKİL 3.1. Konsol kiriş ve sonlu elemanlar modeli (Arabyan, 1999)

Örnek olarak, Şekil 3.1'deki konsol kiriş incelendiğinde SEA yapılacak bölgenin sonlu sayıda elemana bölünerek ağ yapısı oluşturulur. Ağ yapısını oluşturan her elemanın üzerinde, elemanın tipine bağlı olarak değişiklik gösteren sayıda düğüm noktası bulunur ve bu eleman, sonlu sayıdaki elemanlardan birini oluşturmuş olur.

3.1 YER DEĞİŞTİRME SAHASI

Yapıdaki bütün noktaların yer değiştirmeleri, yer değiştirme sahasını oluşturur. Yer değiştirme sahası, yapıdaki herhangi bir noktanın yer değiştirmesini, referans düzleme göre ölçülmüş pozisyonunun fonksiyonu cinsinden ifade eder.

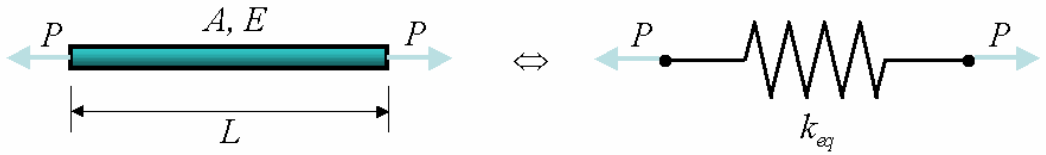
3.1.1 İki Boyutlu Şekil Değiştirme – Yer Değiştirme Sahası

Denklem 3.1, düzlemsel yer değiştirme sahasını saptamak için, şekil değiştirmelerin hesaplanmasını sağlar.

$$\begin{aligned}
\varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} \\
\varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} \\
\gamma_{xy} &= \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}
\end{aligned}
\tag{3.1}$$

3.2 SABİT KESİTLİ ÇUBUĞUN KATILIĞI

Uzunluğu L , kesit alanı A ve elastisite modülü E olan sabit kesitli bir çubuk katılığı k_{eq} olan lineer bir yay ile modellenebilir (Şekil 3.2).



ŞEKİL 3.2. Ana sistem ve model (Arabyan, 1999)

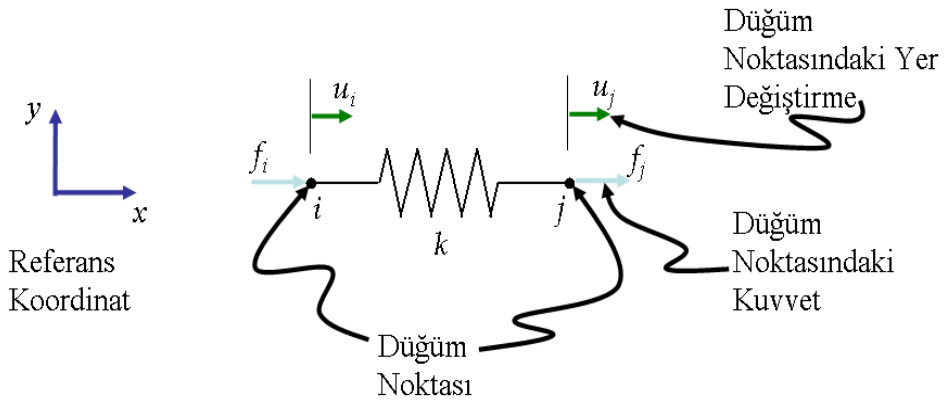
Şekil 3.2’da verilen çubukta k_{eq}

$$k_{eq} = \frac{AE}{L} \tag{3.2}$$

eşittir.

3.3 DÜĞÜM NOKTALARINDAKİ YER DEĞİŞTİRMELER VE KUVVETLER

Katılığı k olan lineer bir yay ele alınsın; yayın iki ucunda i ve j ile gösterilen iki düğüm noktası olsun. Düğüm noktalarındaki yer değiştirmeleri u_i ve u_j , kuvvetler ise f_i ve f_j ile gösterilsin.



ŞEKİL 3.3. Ayrıntılı model ve değişkenler (Arabyan, 1999)

Şekil 3.3’de verilen düğüm noktalarındaki kuvvetler ve yer değiştirmeler arasındaki ilişki Denklem 3.3 ile ifade edilebilir:

$$\begin{aligned} f_i &= k(u_i - u_j) \\ f_j &= k(u_j - u_i) \end{aligned} \quad (3.3)$$

Bu ilişkiler matris formunda Denklem 3.4’deki veya kısaca Denklem 3.5’deki gibi ifade edilebilir:

$$\begin{bmatrix} k & -k \\ -k & k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ u_j \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_i \\ f_j \end{Bmatrix} \quad (3.4)$$

$$\mathbf{k} \cdot \mathbf{u} = \mathbf{f} \quad (3.5)$$

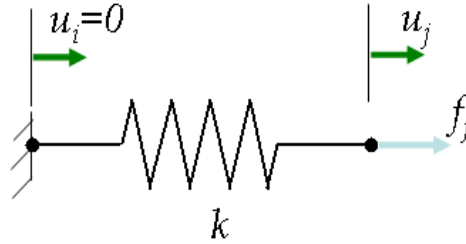
Denklem 3.5’de k elemanın katılık matrisi (daima simetriktir), u elemana ait düğüm yer değiştirme vektörü ve f ise düğüm kuvvet vektörü olarak tanımlanır.

Elemanın (noktasal) düğüm yer değiştirmeleri, aynı zamanda elemanın (noktasal) düğüm serbestlik derecesi (degrees of freedom – DOF) olarak da adlandırılır.

Denklem 3.5’de, düğüm noktalarındaki yer değiştirmeler, rastlantısal bir f kuvveti için çözülemez, çünkü k matrisi tekil bir matristir. Fiziksel olarak bunun anlamı, statik eşitliklerde yay uç noktalarının yer değiştirmeleri sadece iki uca etkiyen rastgele bir kuvvet çifti ile kesin olarak hesaplanamaz. Uçlardan birinin sabitlenmiş ya da bir yer değiştirme değerinin belirtilmiş olması gerekmektedir. Böylelikle diğer uçtaki yer değiştirme kesin olarak bulunmuş olur. Eğer düğüm noktası i mesnetlenmişse (yani yer değiştirmesi 0 ise) $\mathbf{ku}=\mathbf{f}$ Denklem 3.6’ya indirgenir ve j düğüm noktasının yer değiştirmesi Denklem 3.7 ile kolaylıkla hesaplanabilir (Şekil 3.4).

$$ku_j = f_j \quad (3.6)$$

$$u_j = \frac{f_j}{k} \quad (3.7)$$



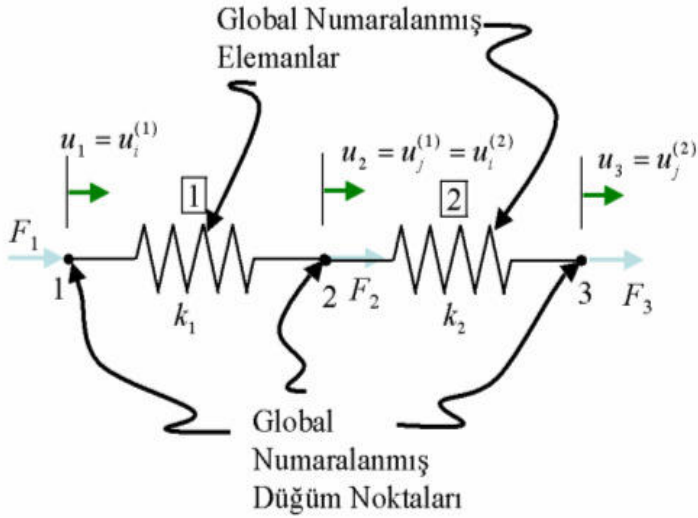
ŞEKİL 3.4. İndirgenmiş model (Arabyan, 1999)

Eğer bir yer değiştirme yada serbestlik derecesi 0'a eşitse, o yer değiştirme ile ilgili k satır ve sütunları elenir ve kalan denklem seti çözülür (Şekil 3.5).

ŞEKİL 3.5. Çözüm matrisi (Arabyan, 1999)

3.4 BİRDEN FAZLA ELEMAN OLMASI DURUMU

Birden fazla eleman olması durumu, Şekil 3.6'deki gösterilen farklı katılıklara sahip birbirine seri bağlı iki yay olarak modellenenabilir.



ŞEKİL 3.6. Birden fazla sayıda eleman olması durumunda sistem modeli
(Arabyan, 1999)

3.4.1 Devamlılık İlişkileri

İki eleman birbirine bağlandığında, bağlantı noktasındaki düğüm noktaları birleşerek tek bir düğüm noktasını oluşturur. Bunun için uygunluk koşulu gereği aynı yer değiştirme değerlerine sahip olmaları gerekmektedir (Denklem 3.8). Burada alt indisler global düğüm noktası numarasını, üst indisler global eleman numarasını ve i ile j lokal eleman numaralarını göstermektedir.

$$u_2 = u_j^{(1)} = u_i^{(2)} \quad (3.8)$$

3.4.2 Kuvvet Denge İlişkileri

Her düğüm noktasına etki eden dış kuvvetlerin toplamı, her düğüm noktasında elemana etki eden kuvvete eşit olmalıdır.

$$\begin{aligned} F_1 &= f_i^{(1)} \\ F_2 &= f_j^{(1)} + f_i^{(2)} \\ F_3 &= f_j^{(2)} \end{aligned} \quad (3.9)$$

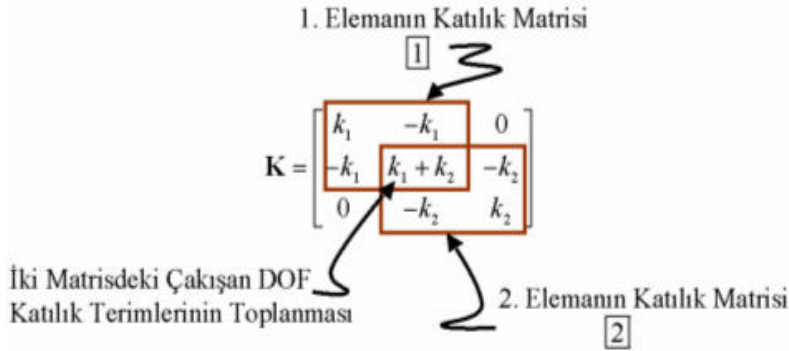
Denklem 3.9’da, F_1 , F_2 ve F_3 global olarak numaralandırılmış düğüm noktalarına etki eden dış kuvvetlerdir. Tüm bu devamlılık ve kuvvet denge ilişkileri global eşitliğe yerleştirildiğinde Denklem 3.10 elde edilir ve bu Denklem 3.11 olarak kısaltılabilir (Şekil 3.7). Burada K global katılık matrisi (daima simetriktir), U global düğüm noktası yer değiştirme vektörü ve F ise global düğüm (tekil) kuvvet vektörü yada global yük vektörü olarak adlandırılır.

$$\begin{bmatrix} k_1 & -k_1 & 0 \\ -k_1 & k_1 + k_2 & -k_2 \\ 0 & -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{Bmatrix} \quad (3.10)$$

$$\mathbf{KU}=\mathbf{F} \quad (3.11)$$

Global katılık matrisi, eleman katılık matrislerinin birleştirilmesinden oluşmuştur. Her bir eleman matrisinde olduğu gibi, global katılık matrisi K da tekil bir matristir. Tekil olma durumu matrisin

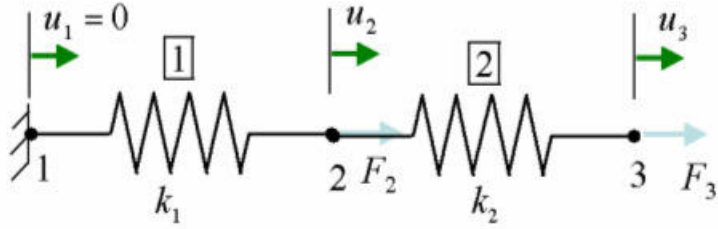
determinantı alınarak kontrol edilebilir, sonuç sıfır olacaktır. Statik olarak kararlı bir yapı elde edebilmek için yapıdaki bazı düğüm noktalarının sınırlandırılmış olması gerekmektedir. Örneğin sabitlenmiş yada bilinen yer değiştirme değerleri atanmış olmalıdır. Böylece geri kalan DOF'lar hesaplanabilir. Yapıdaki bazı düğüm noktalarını sınırlandırmak sonlu eleman yöntemiyle analiz literatüründe yapıya sınır koşulları uygulamak anlamına gelir.



ŞEKİL 3.7. Birden fazla sayıda eleman olması durumunda çözüm matrisi
(Arabyan, 1999)

Şekil 3.8’de verilen 1. düğüm noktası sabitlenmişse (yer değiştirme değeri 0 ise), eşitlik Denklem 3.12’a indirgenir (Şekil 3.7).

$$\begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_2 \\ F_3 \end{Bmatrix} \quad (3.12)$$



ŞEKİL 3.8. Birden fazla eleman olması durumunda sistem modeli ve sınır koşulları (Arabyan, 1999)

2. ve 3. düğüm noktalarındaki yer değiştirmeler ise Denklem 3.13'dan bulunabilir.

$$\begin{Bmatrix} u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} F_2 \\ F_3 \end{Bmatrix} \quad (3.13)$$

Görüldüğü gibi sınırlandırılmış global katılık matrisi tekil değildir. Eğer bir düğüm noktasının DOF'u sıfır ise K katılık matrisinin o DOF'u ile ilişkili satır ve sütunları elenir ve sadece kalan denklem seti çözülür (Şekil 3.9).

$$\begin{bmatrix} k_1 & -k_1 & 0 \\ -k_1 & k_1 + k_2 & -k_2 \\ 0 & -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{Bmatrix}$$

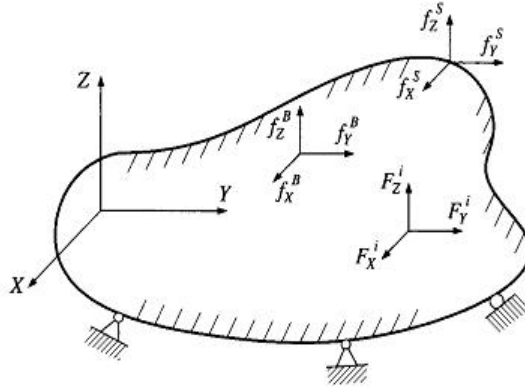
u_i ile ilgili satır(lar)

u_i ile ilgili sütun(lar)

ŞEKİL 3.9. İndirgenmiş çözüm matrisi (Arabyan, 1999)

3.5 SONLU ELEMENLAR METODUNUN FORMÜLASYONU

Denklem 3.14'deki parça üzerine gelen dış kuvvetler şu sembollerle verilmiştir (Şekil 3.10).



ŞEKİL 3.10. Parça üzerine gelen kuvvetlerin sembolik gösterimi (Arabyan, 1999)

$$f^B = \begin{bmatrix} f_x^B \\ f_y^B \\ f_z^B \end{bmatrix} \quad f^S = \begin{bmatrix} f_x^S \\ f_y^S \\ f_z^S \end{bmatrix} \quad f^i = \begin{bmatrix} f_x^i \\ f_y^i \\ f_z^i \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

f^B - Gövde kuvvetleri (Gövde hacmine dağılmış kuvvetler, yer çekim, atalet yada manyetik kuvvetler)

f^S - Yüzey kuvvetleri (bir gövdenin diğerine olan basıncı yada hidrostatik basınç)

f^i - Yoğun dış kuvvetler

Kuvvet parçanın herhangi bir noktasındaki (X,Y,Z) yer değiştirmeler U^T olsun.

$$U^T = [U(X,Y,Z), V(X,Y,Z), W(X,Y,Z)]$$

U yer değiştirmesi şu şekil değiştirmelere sebep olur :

$$\varepsilon^T = [\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}]$$

ve bunlara karşılık gelen gerilmeler :

$$\tau^T = [\tau_{xx}, \tau_{yy}, \tau_{zz}, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}]$$

Amaç verilen dış kuvvetler yardımıyla yer değiştirmeleri, şekil değiştirmeleri ve gerilmeleri hesaplamaktır.

3.5.1 Denge Koşulu ve Sanal Yer değiştirme Prensibi

Denklem 3.15'in sol tarafı yapılan iç sanal işi temsil eder. Sağ tarafı ise sanal yer değiştirme söz konusu oldukça etkin kuvvetler tarafından yapılan dış işi göstermektedir. Bu denklem sonlu elemanlar denklemlerini oluşturmak için kullanılır. Geometriyi birbiriyle düğüm noktaları yardımıyla ilişkili sonlu sayıdaki eleman ile oluşturarak yaklaşım yapılır. SEA genel olarak üç ana adım içerir :

$$\int_V \boldsymbol{\varepsilon}^{-T} \boldsymbol{\sigma} dv = \int_V \bar{\boldsymbol{U}}^T \boldsymbol{f}^B dv + \int_S \bar{\boldsymbol{U}}^{S^T} \boldsymbol{f}^S dS + \sum_i \bar{\boldsymbol{U}}^{i^T} \boldsymbol{F}^i \quad (3.15)$$

- Ön İşlem
- Matrislerin Çözümü
- Son İşlem

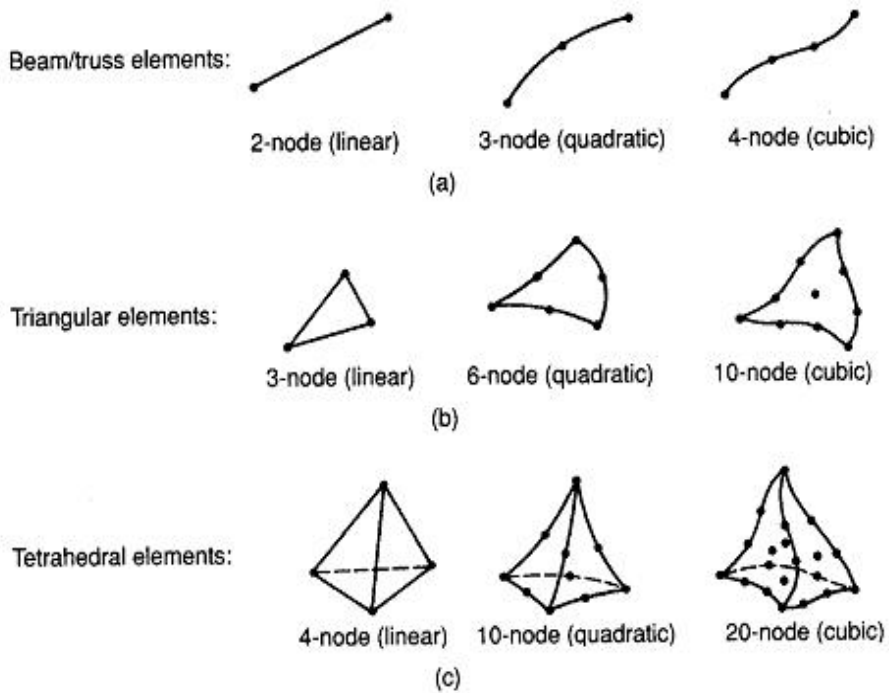
i. Ön İşlem

- Geometrinin yani modelin oluşturulması,
- Sonlu sayıda eleman içeren ağ yapısının oluşturulması,
- Sınır şartlarının, yüklerin ve kısıtlamaların eklenmesi,
- Malzeme özelliklerinin tanıtılması,
- Analiz tipinin belirlenmesi (statik yada dinamik, lineer veya lineer olmayan, düzlemsel yada üç boyutlu, vb...)

ii. Ağ Yapısının Oluşturulması

SEA’nde oluşturulan ağ yapısı, geometrinin çözücü programa tanıtılmasını sağlayan matematik çözüm yoludur. Bu sebeple, ağ yapısının kalitesi, sonucun tutarlılığı ile doğrudan ilişkilidir. Ağ yapısı ne kadar iyi olursa sonuçlar da o kadar iyi olur.

İyi görünümlü bir ağ yapısı; düzgün şekilli elemanlardan oluşmalı, eleman yoğunlukları arasındaki geçiş, düzenli ve geometrik olarak uygun olmalı ve ince, çarpık elemanlar içermemelidir. Şekil 3.11’da sık kullanılan değişik eleman tipleri ve özellikleri verilmiştir:



ŞEKİL 3.11. Sık kullanılan eleman tipleri (Arabyan, 1999)

iii. *Malzeme Özellikleri*

Malzeme özellikleri; belirli eleman bölgelerine, elemanlara, hatta büyük ölçekteki SEA kodları için elemanların içlerine atanabilir. İzotropik, lineer ve statik bir SEA söz konusu ise, gerekli malzeme

özellikleri; elastik modülü (E), poisson oranı (ν) ve kayma modülü (G)'dir. Denklem 3.16'dan görüldüğü gibi, bu üç özellik içerisinde birbirinden bağımsız sadece iki özellik tanımlanabilir.

$$G = E/2(1 + \nu) \quad (3.16)$$

Lineer olmayan bir analiz için ise, bu özelliklerin yanında malzemenin gerilme-şekil değiştirme eğrisinin de programa girilmesi gerekmektedir.

iv. Sınır Koşulları

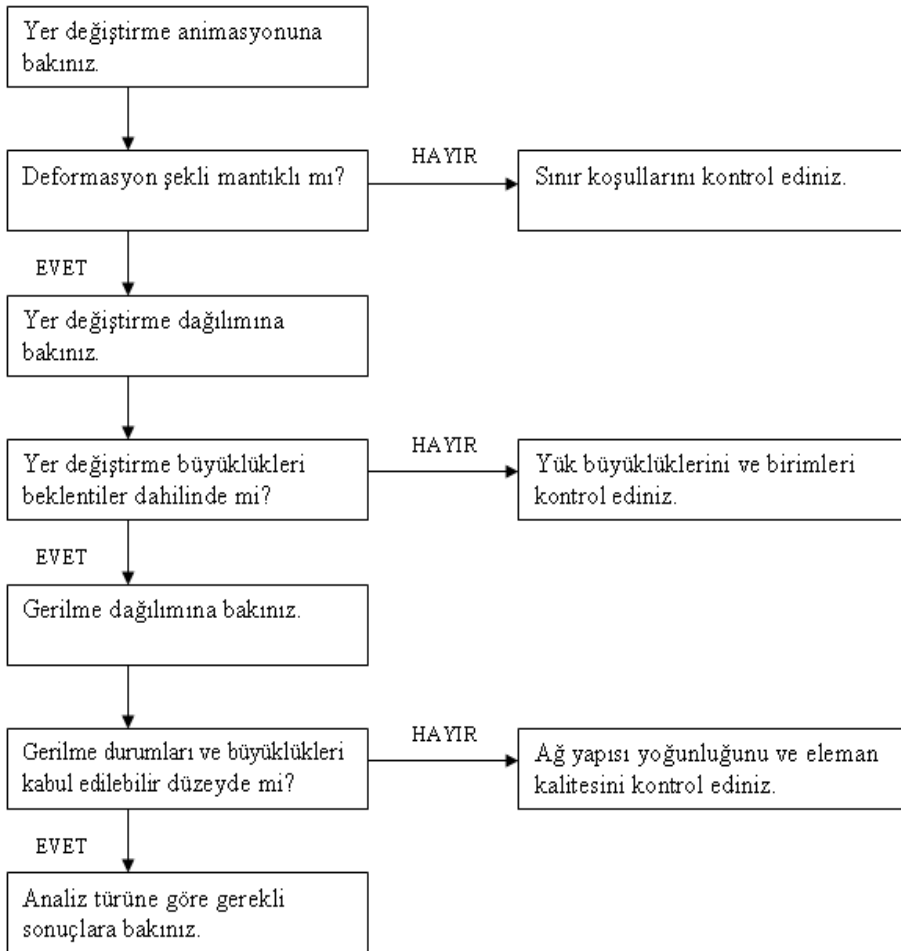
SEA'nde sınır koşulu kavramı, taşıyıcı parça üzerine gelen yükleri ve her komponentin çalışma ortamında maruz kaldığı kısıtlamaları içerir. Tutarlı sonuçlar için, gerçek çalışma ortamındaki koşullar aynen modellenmelidir.

- **Kuvvetler** : Kuvvetler, sistemin girdilerini temsil eder. Ancak, bu girdiler momentler, basınçlar, sıcaklıklar yada ivmeler şeklinde de olabilir.
- **Sınırlamalar**: Sınırlamalar, uygulanan yüke karşı oluşan tepkiler olarak kullanılırlar. Bu sınırlamalar uygulanan kuvvetlerin oluşturduğu ilerleme yada dönme şeklindeki deformasyonlara karşı direnç gösterirler.

- ***Serbestlik dereceleri:*** Global DOF'lar uzayda üç eksenle ilerleme ve üç dönme yer değiştirmesi moduna karşılık gelirler. Analizin gerçekleşebilmesi için, uygulanan kısıtlamalar parçanın altı serbestlik derecesini de ortadan kaldırmalıdır.

v. *Son İşlem*

Girdiler sonucunda koşturulan analiz sonucunda istenilen verilerin görüntülenmesi aşamasıdır. Şekil 3.12’de sistemin mantıksal ve kontrol edilmesi gereken akış şeması verilmiştir.



ŞEKİL 3.12. Son işlem akış şeması (Arabyan, 1999)

3.5.2 Sonlu Elemanlar Yer Değiştirme Metodu

MSC Patran, sonlu elemanlar analizi için yapının tüm düğüm noktalarındaki (node) yer değiştirmeleri bulabilmek amacı ile birçok denklem sisteminin çözülmesi prensibini uygulayan sonlu elemanlar yer değiştirme metodunu kullanır. Daha sonra şekil değiştirmeler eleman düzeyinde yer değiştirmelerin türevi olarak elde edilir. Gerilmeler ise malzeme sabitlerinden oluşan küçük matrisin şekil değiştirmeler ile çarpılması sonucu elde edilir.

Sonlu elemanlar metodunun çözümünde denge metodu, hibrid metodu ve karma metot gibi daha farklı yaklaşımlar da mevcuttur. Fakat basitliğinden ve genelliğinden dolayı yer değiştirme metodu yaygın olarak kullanılmaktadır.

Yer değiştirme metodunda sonlu bir elemanın içindeki bir noktanın yer değiştirmesi olan $\{u\}$ elemanın düğüm noktasındaki yer değiştirmeler cinsinden Denklem 3.17 ile ifade edilir:

$$\{u\} = [N] \cdot \{\delta\}_e \quad (3.17)$$

Burada,

$\{\delta\}_e$: Düğüm noktasındaki yer değiştirmeler

$[N]$: Şekil fonksiyonu matrisi

Şekil fonksiyonları, elemanın hacmi içerisindeki müsaade edilen yer değiştirme farkını tanımlayan polinomlardır.

$\{u\}$ vektörü eleman için uygun olan yer değiştirme komponentlerini içerir. Örneğin 3D katı elemanlar için UX, UY, UZ üç adet ötelenme; kabuk ve kiriş elemanlar için UX, UY, UZ ötelenmeleri ile ROTX, ROTY, ROTZ dönmelerini ifade eder.

Denklem 3.17'nin eleman düzeyinde şekil değiştirme–yer değiştirme ilişkisi ile birlikte kullanılması sonucunda şekil değiştirmeler düğüm noktalarındaki yer değiştirmelerin fonksiyonu olarak Denklem 3.18'deki gibi ifade edilir.

$$\{\varepsilon\} = [B] \cdot \{\delta\}_e \quad (3.18)$$

Burada $[B]$ şekil değiştirme-yer değiştirme matrisidir.

Daha sonra doğrusal gerilme-şekil değiştirme (esas) ilişkisi kullanılarak;

$$\{\sigma\} = [C] \cdot \{\varepsilon\}_e \quad (3.19)$$

eleman içerisindeki bir noktadaki gerilmeler Denklem 3.20 ile ifade edilebilir.

$$\{\sigma\} = [C] \cdot [B] \cdot \{\delta\}_e \quad (3.20)$$

Lineer statik problem için virtüel iş prensibinin uygulanması ile Denklem 3.21 veya 3.22 elde edilir.

$$[F]_e = \int [B]^T \cdot [C] \cdot [B] \cdot dV \cdot \{\delta\}_e \quad (3.21)$$

$$[F]_e = [K]_e \cdot \{\delta\}_e \quad (3.22)$$

Burada,

$$[K]_e = \int [B]^T \cdot [C] \cdot [B] \cdot dV \quad (3.23)$$

elemanın katılık matrisidir.

$[F]_e$, elemanların düğüm noktalarındaki kuvvetler olup tüm yüklemelerden (basınç, termal vb.) gelen katkıları içermelidir. Eğer sistemde bir yayılı yük “p” mevcutsa, eleman için eşdeğer düğüm noktası yükleri virtüel yük prensibi ile hesaplanır.

$$[F]_e = -\int [N]^T \cdot [p] \cdot dV \quad (3.24)$$

Tüm elemanlarda $[F]_e$ ’nin ve $[K]_e$ ’nin katkılarının toplamı ile global yapısal katılık denklemi 3.25’deki gibi ifade edilir.

$$[F] = [K] \cdot [\delta] \quad (3.25)$$

Denklem 3.25 daha sonra bilinmeyen düğüm noktası yer değiştirmeleri $\{\delta\}$ için çözülür.

Artık elemanların yer değiştirmeleri $\{\delta\}_e$ bilindiğine göre (3.20) denklemi ile her elemandaki gerilmeler hesaplanabilir.

Ayrıca elemanların yer değiştirmeleri $\{\delta\}_e$ kullanılarak eleman iç kuvvetleri Denklem 3.26 ile bulunur.

$$\{\bar{F}\} = [K]_e \cdot \{\delta\}_e \quad (3.26)$$

Tüm elemanlar için $\{\bar{F}\}_e$ 'lerin toplamından dış yük vektörü $\{F\}$ 'i çıkarırsak düğüm noktalarındaki dengelenmemiş yük vektörünü $\{R\}$ elde ederiz. Lineer statik analiz için $\{R\}$, sınırlanmış DOF (Degrees Of Freedom; Serbestlik Derecesi) haricinde sıfır olacaktır. Sadece tek noktadan mesnetlenmiş serbestlik dereceleri için $\{R\}$ değeri tepki kuvvetlerini gösterir. Numunedeki tüm tepki kuvvetlerinin toplamı, tüm dış kuvvetler toplamını dengelemelidir (MSC Patran Help Files, 2004).

MSC Patran FEA programı elemandaki şekil değiştirme enerjisini Denklem 3.27 ile hesaplar.

$$E = \frac{1}{2} \{\delta\}_e^T \cdot [K]_e \cdot \{\delta\}_e \quad (3.27)$$

4. YORULMA

4.1 YORULMA NEDİR?

Modern mühendislik komponentlerinin ve yapılarının sadece statik yüklemeye maruz kalması çok az rastlanan bir durumdur. Yapıları oluşturan parçaların büyük çoğunluğu değişken yada düzenli/düzensiz tekrarlanan (cyclic) yüklere maruz kalırlar. Bu nedenle dizayn analistleri tekrarlı, değişken ve darbeli yüklerin malzemedeki meydana getirdiği kırılmalar arasındaki farklara odaklanırlar. Bu değişik yüklemelere maruz kalan parçalarda, yükleme tipine bağlı olarak değişken yada düzenli/düzensiz tekrarlanan gerilmeler meydana gelmekte ve bu gerilmeler genellikle yapının yorulmaya bağlı olarak kırılmasına neden olmaktadır.

Yorulma, numuneyi tek uygulamada kırarak kadar büyük olmayan, sürekli tekrarlanan ve değişken yükler altında parçanın bozulmasıdır.

Dizayn mühendislerinin sıklıkla karşılaştıkları problem, makina parçalarından beklenen yüksek performans, düşük ağırlık ve uzun ömür gibi özelliklerin düşük maliyetle ve olabildiğince kısa üretim sürelerinde elde edilmesi zorunluluğudur. Birbirleriyle çelişen bu beklentilerin üstesinden gelebilmenin tek yolu daha yüksek yorulma dayanımına sahip parçaların tasarlanmasıdır. Fakat yorulma analizi ve ömür hesabına ilişkin olarak karşılaşılan problemler şöyle özetlenebilir:

- Ömür hesapları, dayanım hesaplarına kıyasla daha az doğru sonuçlar vermektedir.
- Yorulma özellikleri mekanik özellikler kullanılarak doğru bir biçimde elde edilemezler. Doğrudan ölçülmeleri gerekir.
- Doğru bir ömür hesabının yapılabilmesi için tam boyutlardaki bir prototipin test edilmesi gerekmektedir.
- Laboratuvar testleri daha elverişli şartlarda yapıldığından, çalışma ortamında karşılaşılan ömür, hesaplanan ile farklılık gösterebilir.

Bütün bu problemler, gelişmiş bilgisayar destekli analiz programları, yapılan binlerce laboratuvar testleri sonucu elde edilen veri tabanları ve bu veriler sayesinde ulaşılan ampirik formüller ile aşılmaya çalışılmaktadır.

4.2 YORULMANIN TARİHÇESİ

Bir parça ahşabın veya metalin sürekli olarak yüksek bir gerilme genliğinde aşağı-yukarı eğilmesi sonucu kırılacağı gerçeği yüzyıllardır bilinmekteydi. Fakat gerilme genliğinin malzemenin elastiklik limitinin altında kalsa da, parçanın yine de kırılacağı saptanması yeni sayılabilir.

Rapor edilen ilk yorulma araştırması, Alman maden mühendisi W.A.S. Albert'in 1829 yılında demir zincire uyguladığı tekrarlı yükleme testleri olarak bilinmektedir.

Çalışma ortamındaki bir makina parçasının bilinen en eski yorulma kırılması ise, yolcu vagonlarının dingillerinde meydana gelmiştir. Demiryollarının hızla yayılmaya başladığı 19. yüzyılın ortalarında, vagon dingillerinde meydana gelen yorulma kırılmaları sıkça karşılaşılan bir problem olarak ortaya çıkınca, bütün dikkatlerin düzenli tekrarlanan yüklemenin makina parçaları üzerindeki etkilerine yoğunlaşmasına sebep oldu. Böylelikle ilk defa birçok benzer parça akma gerilmesinin altındaki gerilmelerde milyonlarca kez yüklenerek teste tabi tutuldu. Yapılmak istenen şey ise, çalışan parçaların açıklanamayan kırılmalarının laboratuvar ortamında oluşmasını sağlamaktır.

1852-1870 yılları arasında Alman demiryolu mühendisi August Wöhler ilk sistematik yorulma araştırma laboratuvarını kurmuş ve çeşitli araştırmalar yürütmüştür. Bu yüzden Wöhler, modern yorulma düşüncesinin atası olarak kabul edilebilir. Wöhler, gerçek boyutlardaki

dingiller üzerinde testler yürütmüş, bunun yanı sıra farklı malzemelerden yapılmış küçük ölçekteki numuneleri eğilme ve eksenel düzenli tekrarlanan yüklere maruz bırakarak kırılmalarını incelemiştir.

1950’li yılların sonlarına doğru ise yorulma ömrünün tayini için iki yaklaşım geliştirildi. Manson-Coffin lokal şekil değiştirme yaklaşımı olarak bilinen birinci metodun amacı çatlak oluşumunun tahmin edilmesi ve açıklanmasıydı. Diğer metot ise “lineer elastik kırılma mekaniği” (LEFM) olarak bilinen ve çatlak ilerlemesini açıklamaya yönelik bir yöntemdir. Son yıllarda ise Miller ve meslektaşları İngiltere’deki Sheffield Üniversitesinde çatlak oluşumunu ve ilerlemesini açıklayan birleşmiş bir teori üzerinde çalışmaktadırlar.

4.3 WÖHLER DİYAGRAMI

Wöhler Diyagramı, gerilme-ömür (S-N) diyagramı yada Moore diyagramı yorulma dizaynı için tipik bir araç olup 1874 yılında Prof. Ludwig Spangenberg tarafından sunulmuştur. Diyagramın ismi ise “Yorulmanın Tarihçesi” bölümünde de bahsi geçen mühendis August Wöhler’ den (1819-1914) gelmektedir.

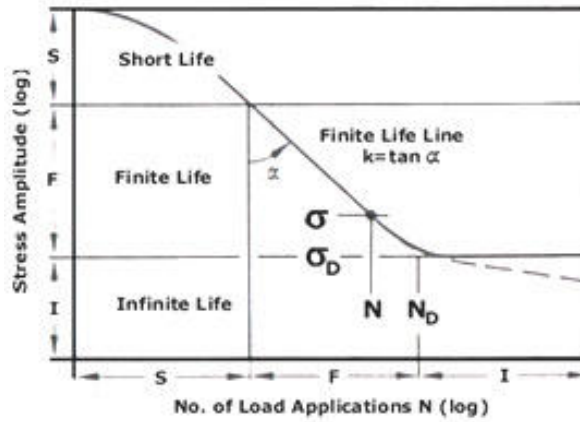
Wöhler diyagramında sunulan veri, gerilme genliğine karşılık kırılma için geçen çevrim sayısıdır. Diyagramın lineer-lineer, lineer-logaritmik ve logaritmik-logaritmik olmak üzere üç versiyonu mevcuttur.

Bunlardan en çok kullanılanı ise Şekil 4.7 deki logaritmik-logaritmik versiyonudur.

Wöhler diyagramındaki doğru, kırılma noktalarının interpolasyonudur. Herhangi bir gerilme genliği seviyesinde kırılmalar farklı çevrim sayılarında meydana gelir. Wöhler doğrusu ise bu noktaların istatistiksel analizi sonucunda oluşur. Wöhler Diyagramı ile ilgili daha fazla bilgi “Gerilme-Ömür Analizi” bölümünde verilecektir.

4.4 YÜKSEK DÖNGÜSEL YORULMA VE DÜŞÜK DÖNGÜSEL YORULMA

Wöhler Diyagramı üzerinde üç ana bölümden söz etmek mümkündür. Bunlar Şekil 4.1’de de gösterilen düşük döngüsel yorulma (Low Cycle Fatigue, LCF), yüksek döngüsel yorulma (High Cycle Fatigue, HCF) ve sonsuz ömür bölümleridir.



ŞEKİL 4.1. Yorulma davranışı bölgeleri (Mallick, 1997)

Diyagramda LCF kırılma, çevrim sayısı olarak 10 ile 10^6 çevrim arasındaki bölgeyi kapsar. Bundan daha yüksek çevrim sayıları ise HCF bölgesi olarak adlandırılır. Bu iki bölge arasındaki asıl fark, parçanın yada numunenin en fazla gerilmeye maruz kalan bölgesinin karşılaştığı plastik şekil değiştirme miktarıdır. LCF bölgesinde nispeten yüksek gerilmeler görülür, toplam şekil değiştirmenin büyük bir bölümünü plastik şekil değiştirme oluşturur. HCF bölgesinde ise düşük gerilmeler ve elastik şekil değiştirmeler hakimdir.

Wöhler Diyagramının kırılma (süreksizlik) noktası ise N_D (sonsuz ömür) olarak adlandırılan çevrim sayısında oluşur ve N_D malzeme tipine bağlı olarak değişir. Bu çevrim sayısına karşılık gelen gerilme değerine ise yorulma limiti adı verilir. Sonsuz ömür bölgesinde numune üzerine gelen gerilme, yorulma limitine eşit veya onun altındadır. Alüminyum gibi bazı malzemelerin kırılma noktaları ve dolayısıyla yorulma limitleri yoktur. Böyle durumlarda dayanıklılık limiti olarak 10^6 veya 10^7 gibi kıstas alınan bir çevrim sayısına karşılık gelen gerilme değeri esas alınır.

4.5 YORULMA ANALİZİ YAKLAŞIMLARI

Gerilme-ömür yaklaşımı, şekil değiştirme-ömür yaklaşımı, lineer elastik kırılma mekaniği yaklaşımı, değişken genliklerde yükleme yaklaşımı, kümülatif (gittikçe artan) hasar hipotezi gibi birçok yorulma analizi yaklaşımı mevcuttur. Bu tezde deney sonucunda veriler Wöhler

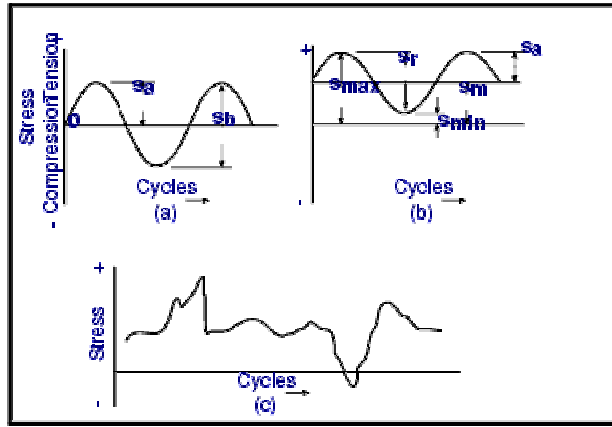
eğrileri olduğu için gerilme-ömür analizi (S-N analizi, toplam ömür analizi) kapsamlı bir biçimde incelenecektir.

4.6 GERİLME - ÖMÜR (S-N) ANALİZİ

Bu analiz, uygulanan gerilmenin elastik sınırlar içerisinde olduğu ve kırılma için geçen çevrim sayısının fazla olduğu durumlarda yorulma kırılması sürecini anlayabilmek için kullanılan yöntemdir. Bu nedenle nominal gerilme yaklaşımı, en iyi HCF bölgesinin sınırları içerisinde açıklanabilir. Gerilmelerin yüksek plastik şekil değiştirmeler yarattığı durumlarda ise, bu metot sadece yorulma ömrü hakkında kaba bir fikir edinebilmek için kullanılabilir.

4.6.1 GERİLME ÇEVİRİMLERİ

Şekil 4.2-(a)'da görülen çevrim tam geri dönüşlü sinüzoidal formdaki gerilme çevrimine örnektir. Bu çevrim tipinde maksimum ve minimum gerilmeler büyüklükçe eşit fakat zıt işaretlidirler ($R=-1$). Şekil 4.2-(b), daha genel bir durum olan maksimum ve minimum gerilmelerin birbirlerine eşit olmadığı gerilme çevrim tipidir. Şekildeki örnekte ekstrenum gerilmeler aynı işaretli olup çekme durumunu göstermektedirler. Şekil 4.2-(c) ise daha karmaşık bir durum olan ve gerçek yapılarda karşılaşılan düzensiz yükleme çevrim tipidir.



ŞEKİL 4.2. Döngüsel gerilim çeşitleri (MSC Patran, 2004)

Değişken gerilme çevrimlerini tanımlayabilmek için başlıca iki komponent kullanılır. Bunlar gerilme ortalaması (σ_m) ve gerilme genliği (σ_a) değerleridir. Bunların yanı sıra gerilme sınırı aralığı (σ_r), gerilme oranı (R) ve genlik oranı (A) gerilme çevrimini karakterize eden diğer değerlerdir (Denklem 4.1).

$$\begin{aligned}
 \sigma_r &= \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \\
 \sigma_a &= \frac{\sigma_r}{2} = \frac{(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})}{2} \\
 \sigma_m &= \frac{(\sigma_{\max} + \sigma_{\min})}{2} \\
 R &= \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \\
 A &= \frac{\sigma_a}{\sigma_m} = \frac{1 - R}{1 + R}
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

Denklem (4.1)'de parametreler şunlardır:

$\sigma_{\max}$: Çevrimdeki maksimum gerilme

$\sigma_{\min}$: Çevrimdeki minimum gerilme

σ_r : Gerilme sınır aralığı

σ_a : Gerilme genliği

σ_m : Ortalama gerilme

R : Gerilme oranı (Tablo 4.1)

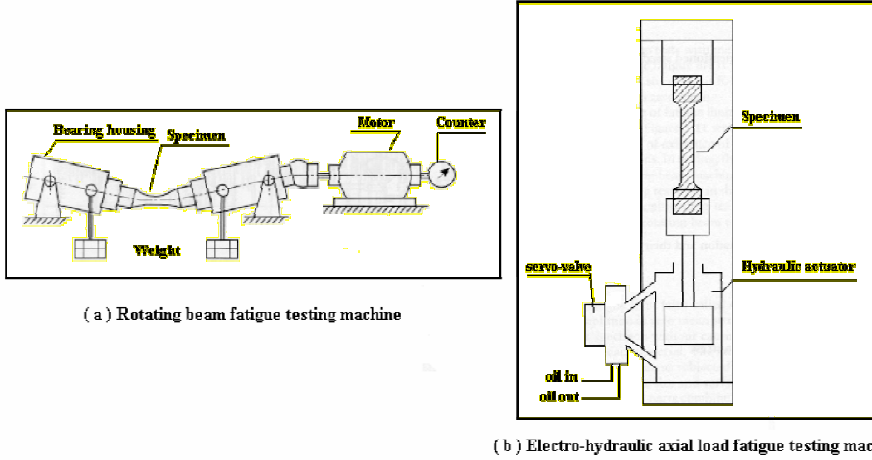
A : Genlik oranı

TABLO 4.1. R oranının belirttiği yükleme durumları

R oranı	Yükleme Durumu
$R > 1$	Hem $\sigma_{\max}$ hem de $\sigma_{\min}$ negatiftir. σ_m de negatiftir.
$R = 1$	Statik yükleme durumu.
$0 < R < 1$	Hem $\sigma_{\max}$ hem de $\sigma_{\min}$ pozitiftir. σ_m de pozitiftir. $ \sigma_{\max} > \sigma_{\min} $
$R = 0$	$\sigma_{\min} = 0$ durumudur.
$R = -1$	Tam döngüsel yükleme. $ \sigma_{\max} = \sigma_{\min} $; $\sigma_m = 0$
$R < 0$	$ \sigma_{\max} > \sigma_{\min} $; $\sigma_{\max}$ sifıra yaklaşıyor.
$R = \infty$	$\sigma_{\max} = 0$

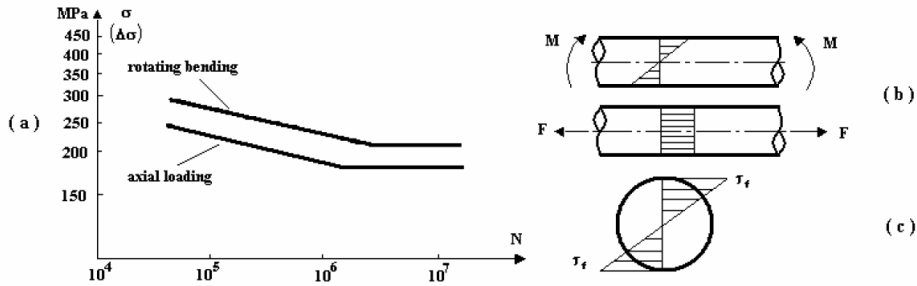
4.6.2 S – N DİYAGRAMI

Test numunelerini sabit genlikte değişken gerilmelere maruz bırakan ilk dönen test makinasını Wöhler dizayn etmiş ve üretmiştir. Moore, daha sonra bu tekniği tam tersinir eğilme yükü altındaki basit mesnetli dönen kirişe uyarlamıştır. Etkiyen kuvvet, sabit yük asılı bir ağırlık ile sağlanmakta olup numuneye boyuna kesme kuvveti uygulanmamaktadır. Moore'un bu düzeneği Şekil 4.3 de görülmektedir.



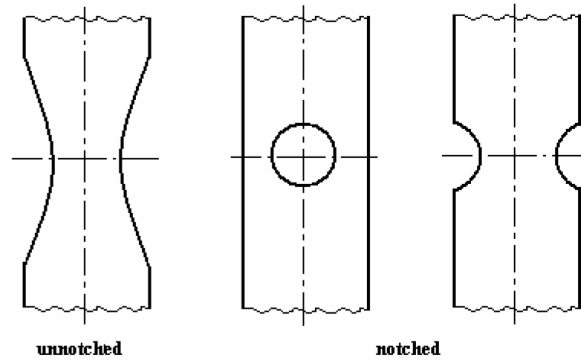
ŞEKİL 4.3. Yorulma test makinelerinin şematik resimleri (Aytekin, 2005)

Başka bir test yöntemi ise eksenel yükleme testi olup, bu test sıfırdan farklı ortalama gerilmeye sahip çevrimsel yüklerin uygulanmasına olanak tanımaktadır. Eksenel ve dönen eğilme testlerinin arasındaki esas farklılık eksenel yüklemede lineer gerilme dağılımından ziyade, tüm kesit düzenli dağılmış gerilmelere maruzdur. Şekil 4.4’de bu farklılık açıkça görülmektedir ve eksenel yükleme sonucu oluşturulmuş S-N eğrisi dönen eğilme testininkine kıyasla daha düşük sonuçlar vermektedir.



ŞEKİL 4.4. Dönen kiriş ve eksenel yükleme testlerinin gerilme dağılımları (Aytekin, 2005)

S-N eğrisini elde etmek için uygulanan genel laboratuvar prosedürü, ilk numuneyi malzemenin statik çekme dayanımının üçte ikisi gibi yüksek bir gerilmede test etmekle başlar. Doğal olarak burada kırılmanın küçük bir çevrim sayısında olması beklenir. Bu test prosedürü bir yada iki numunenin 10^7 çevrimden önce kırılmaması ile sonuçlanana dek kırılmayan her numuneye uygulanan gerilmenin azaltılması ile devam ettirilir. Bu prosedür karşısında kırılmayan numuneler için en yüksek gerilme, dayanıklılık limiti olarak kullanılır.

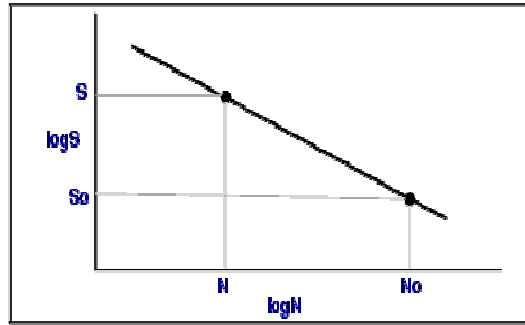


ŞEKİL 4.5. Yaygın yorulma testi numuneleri (Aytekin, 2005)

Testlerde genelde kullanılan numunelerin geometrisi Şekil 4.5’de gösterilmektedir. Çentiksiz yada düzgün yüzeyli ve gerilme artırıcıları bulunan çentikli olmak üzere temelde iki farklı tipe sahip numuneler testlerde kullanılmaktadır. Yorulma testlerinin büyük çoğunluğu Yüksek Döngüsel Yorulma bölgesinde yapılmaktadır. Bu bölgenin logaritmik-logaritmik diyagramında, gerilme aralığı ve yorulma ömrü arasında lineer bir ilişki söz konusudur (Şekil 4.6).

Doğrunun eğimi, b , Denklem (4.2) ile hesaplanır:

$$b = \frac{-(\log S - \log S_0)}{(\log N_0 - \log N)} \quad (4.2)$$



ŞEKİL 4.6. Doğrusal bir S-N diyagramı (MSC Patran, 2004)

Buradan ömür çekilirse;

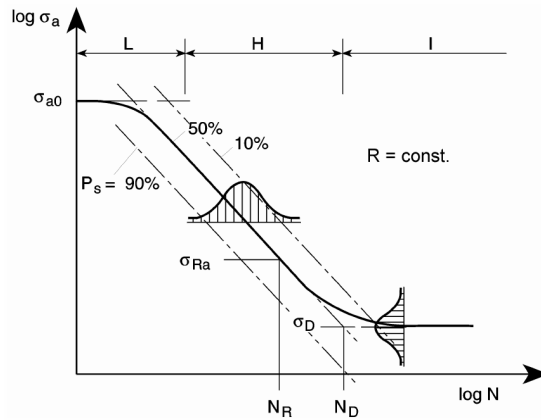
$$N = N_0 \left(\frac{S}{S_0} \right)^{\frac{1}{b}} \quad (4.3)$$

elde edilir. Denklem (4.3) göre eğim b biliniyorsa ve doğru üzerindeki herhangi bir noktanın koordinat çifti mevcutsa (N_0, S_0) istenilen herhangi bir gerilmeye karşılık gelen çevrim sayısı kolaylıkla hesaplanabilir. Genellikle sonsuz ömrünü simgeleyen N_0 , 10^6 çevrim kabul edilir ve ona karşılık gelen gerilme değeri de dayanıklılık limiti

olarak S_e şeklinde gösterilir. $1/b$ terimi yerinede k harfi kullanılarak Denklem (4.4) yazılır.

$$N = \left(\frac{S}{S_e} \right)^k \cdot 10^6 \quad (4.4)$$

Testlerde aynı numunelerin kullanılmasına karşın, yüzeylerdeki farklı geometrik mikro düzensizlikler nedeniyle sonuçlarda da belirgin bir dağılım aralığı göze çarpar. Bu nedenle elde edilen yorulma verilerinin istatistiksel analize tabi tutulmaları gerekmektedir. Kırılma olasılıklarının bütünleştirilmesiyle oluşturulan eğrilere P-S-N eğrileri adı verilir. Standart S-N eğrileri %50 olasılıkla kırılmaya karşılık gelmektedir ($P=0,5$) (Şekil 4.7).



ŞEKİL 4.7. Logaritmik P-S-N eğrisi (Wöhler diyagramı) (Aytekin, 2005)

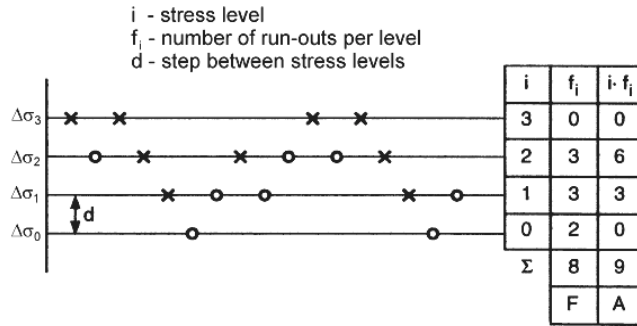
Sonsuz ömürdeki amaç; yükleme, yorulma limitinin altında olduğu için çalışma gerilmesini güvenli limitler arasında tutmaktır. Bu arada limitli ömür dizaynındaki amaç ise, gerilme düzeyine bağlı yorulma

ömrünü veren çevrim sayısını öngörmektir. Yorulma limitini deneysel olarak saptayabilmek için test sonucunda kırılmayan veya kırılan numunelerden elde edilen verilerden istatistiksel olarak değerlendirme verileri oluşturmak gerekmektedir. Bu iş için yaygın olarak kullanılan merdiven metodu şu işlemlerden ibarettir:

- Daha önceden elde edilmiş verilerden ve bilgilerden yorulma limitinin ortalama değerinin, $\Delta\sigma_m$ ve standart sapmanın d hesaplanması.
- İlk yorulma testinin $\Delta\sigma_m + d$ gerilme düzeyinde yapılması.
- Numune kırılırsa gerilme düzeyinin d kadar düşürülmesi; kırılmaz ise gerilme düzeyinin d kadar yükseltilmesi.
- 15 ila 30 numune test edilene dek bu işlemin tekrarlanması.

Bütün test sonuçlarının istatistiksel olarak değerlendirilmesi sonucunda ortalama değer ve yorulma limitinin standart sapması Denklem (4.5) ile ifade edilir. Şekil 4.8 merdiven metodunu özetlemektedir.

$$\Delta\sigma_{D,50} = \Delta\sigma_0 + d \cdot (A/F + 0.5) \quad (4.5)$$



ŞEKİL4.8. Yorulma limitinin hesaplanması için kullanılan istatistiksel merdiven metodu (Aytekin, 2005)

4.6.3 ORTALAMA GERİLMENİN YORULMA ANALİZİNE ETKİSİ

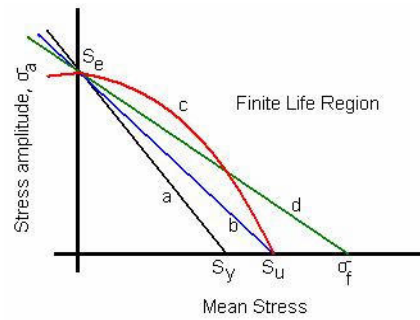
Daha öncede belirtildiği gibi laboratuarlarda test prosedürleri sonucunda elde edilen yorulma verilerinin büyük çoğunluğu tam tersinir yüklemeler uygulanarak (örneğin $R = -1$) bulunmuşlardır. Fakat daha gerçekçi çalışma ortamlarında sıfırdan farklı ortalama gerilmeye sahip yükleme durumları ile karşılaşilmektedir. Bu nedenle laboratuvar ortamında bulunan verilerin gerçek durumlara uygulanabilmesi, yorulma analizine daha gerçekçi bir yaklaşım getirecektir.

Klasik S-N eğrileri ortalama gerilmenin sıfır olduğu testlerden elde edildikleri için, ortalama gerilmenin sıfırdan farklı olduğu durumlara göre modifiye edilmeleri gerekmektedir. Ortalama gerilme ile yorulma limitini, akma dayanımını veya kopma dayanımını ilişkilendirmek için birkaç ampirik çalışma yapılmıştır. Tablo 4.2, bu ilişkileri özetlemekte ve

Şekil 4.9 ise denklemleri grafik olarak göstermektedir. Bu denklemler çekme gerilmesi durumları için geçerli olmalarına karşın diğer gerilme durumları için de uygulanmaktadırlar.

TABLO 4.2. Ortalama gerilme düzeltme metotları (Aytekin, 2005)

Ortalama Metodu	Gerilme	Denklem
Soderberg (USA, 1930)		$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_y} = 1$
Goodman (England, 1899)		$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_u} = 1$
Gerber (Germany, 1874)		$\frac{\sigma_a}{S_e} + \left(\frac{\sigma_m}{S_u}\right)^2 = 1$
Morrow (USA, 1960's)		$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{\sigma_f} = 1$



ŞEKİL 4.9. a. Soderberg
b. Goodman c. Gerber d. Morrow

Tablo 4.2’de verilen denklemlerde:

- σ_a : Gerilme genliği
 S_e : Dayanıklılık (yorulma) gerilmesi
 σ_m : Ortalama gerilme
 S_y : Akma gerilmesi
 σ_f : Kırılma gerilmesi
 S_u : Kopma gerilmesi

Elde edilen deneyimler göstermiştir ki deney sonucunda elde edilen veriler, Goodman ve Gerber eğrilerinin arasında yer almaktadır. R << 1 olduğu durumlarda iki yaklaşım arasında çok küçük farklar söz

konusu iken, R_1 'e yaklaştıkça yaklaşımlar arasındaki fark da kayda değer ölçüde artmaktadır. Bu konu ile ilgili yeterli veri olmadığı için, yapılması gereken, daha mantıklı sonuçlar veren yaklaşımın kullanılmasıdır.

4.6.4 YORULMA ÖMRÜNÜ ETKİLEYEN FAKTÖRLER

S-N eğrisi belirli şartlar altında daha önceden hazırlanmış numuneler ile yapılan yorulma testleri sonucunda elde edilirler. Fakat mekanik özelliklerde yada mikro yapıda meydana gelebilecek herhangi bir değişim S-N eğrisini etkileyecektir. Bu değişime sebebiyet verebilecek olan bazı faktörler; kimyasal çevre, döngüsel frekans, sıcaklık, artık gerilmeler, yüzey etkileri vb.dir. S-N eğrisini değişik durumlara adapte edebilmek için modifikasyon faktörleri denen bazı çarpanlar kullanılır. En çok kullanılan faktörler şunlardır:

- Bileşenlerin boyutu, C_{size}
- Çentik etkisi, C_{notch}
- Yüzey işlemlerinin etkisi, C_{surf}

Düzeltilme faktörleri hakkında daha fazla bilgi değişik yorulma kaynaklarından edinilebilir.

Bu etmenlerden bazılarını hesaba katabilmek için özgül uyarlama faktörleri sonuca uygulanır:

$$S_e = S'_e \cdot C_{notch} \cdot C_{size} \cdot C_{load} \cdot C_{surf} \cdot \dots$$

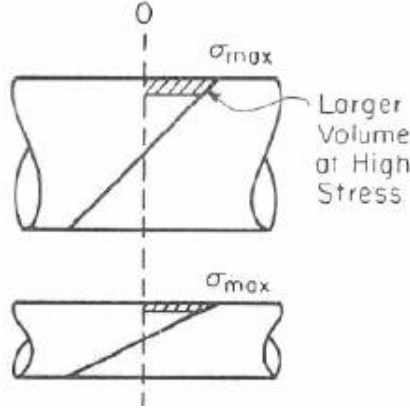
Denklem (4.6)'de $C_{notch} \cdot C_{size} \cdot C_{load} \cdot C_{surf} \cdot \dots$, yorulma dayanımı indirme faktörü K_f olarak bilinmektedir. Bütün bu modifikasyon faktörlerinin ampirik olduğu ve sadece çelikler için kullanılabileceği unutulmamalıdır.

$$K_f = 1/(C_{notch} \cdot C_{size} \cdot C_{load} \cdot C_{surf} \dots) \quad (4.6)$$

4.6.4.1 Teknolojik Boyut Etkileri

Parçanın boyutu, veya parçanın yapılacağı metal levhanın boyutu yorulma direncini etkileyebilir. Boyut arttıkça yorulma limiti düşer ve bu düşüş yorulma limitinin %10'u gibi önemli değerlere ulaşabilir. Malzemenin kristal yapısı düşünüldüğünde, çatlak oluşumu en zayıf birleşme noktasında meydana gelecek ve ilerleyecektir. Gerilmenin etki ettiği alan büyüdükçe, en zayıf birleşme noktasını kapsama olasılığı da artar. Dönen kiriş ve eğilme deneyleri göstermiştir ki, yorulma limiti değerleri numune çaplarıyla ters orantılı olarak değişim göstermektedir. Fakat eksenel yükleme testlerinde ise, boyutun yorulma limiti üzerinde hiçbir etkisinin olmadığı görülmüştür.

“Kritik hacim” konsepti Kuguell tarafından çentiklerdeki boyut etkisini açıklamak amacıyla öne sürülmüştür. Kuguell’e göre bileşenlerin genişliği arttıkça kritik gerilme düzeyindeki malzeme hacmi de artmaktadır (Şekil 4.10). (Kuguel, 1986)



ŞEKİL 4.10. Kritik gerilme altındaki alan (Aytekin, 2005)

Kuguell dayanım limiti ve bileşen hacmi arasında Denklem 4.7’deki gibi bir ampirik formül öne sürmüştür:

$$S_{eo} = S_{er} \left(\frac{V_0}{V_r} \right)^{-0,034} \quad (4.7)$$

Burada S_{er} , referans hacim V_r için dayanıklılık limitidir ve S_{eo} ise diğer bir hacim V_0 için dayanıklılık limitidir. Boyutun yorulma davranışı üzerindeki etkisine başka yaklaşımlar da mevcuttur. Başka bir örnek olarak Shigley ve Mitschke’in ortaya koyduğu basit ifade yeterince mantıklıdır (Tablo 4.3) (Shigley, 1986).

TABLO 4.3. Çap değerine göre boyut katsayıları (Aytekin, 2005)

$d \leq 0,3$ inç (8 mm) için	Csize = 1
$0,3$ inç $\leq d \leq 10$ inç için	Csize = $0,869 d^{-0,097}$
8 mm $\leq d \leq 250$ mm için	Csize = $1,189 d^{-0,097}$
Daha geniş boyutlar için	Csize = 0,6

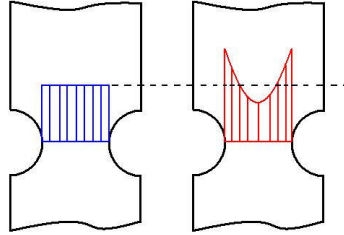
Bu denklemler silindirik parçalar için geçerlidir. Diğer geometrilerdeki parçalar için Kuguell, yuvarlak olmayan parçanın maksimum gerilmenin % 95'inin üstünde gerilmeye maruz kalan kesit alanını, aynı gerilme altındaki dönen kiriş numunesinin kesit alanına eşitlemenin yukarıdaki denklemler için uygun bir çap oluşturacağını öngörmüştür. Dikdörtgen bir kesit için Kuguell Denklem (4.8)'i önermiştir (Kuguel, 1986).

$$d_{eq} = 0,81A \quad (4.8)$$

4.6.4.2 Nominal Gerilmeler ve Gerçek Gerilmeler (Çentik Etkisi)

Nominal gerilmeler, numunenin veya parçanın kesit alanı kullanılarak hesaplanırlar ve herhangi bir gerilme eğimini içermezler. Fakat çentikler, delikler yada keskin köşeler gibi gerilme artırıcılar

nominal gerilmenin üstünde gerilmelere sebebiyet verebilirler. Bu etkiler bir çarpan ile hesaba katılır (Şekil 4.11)



ŞEKİL 4.11. Nominal gerilmelere karşı gerçek gerilmeler (Aytekin, 2005)

4.6.4.3 Yüzey Etkileri

Yorulma kırılmalarının büyük çoğunluğu parçanın yüzeyinden başlamaktadır. Bunun sebebi uygulanan gerilme çeşidinin ve çentiklerin etkisiyle yüzeyde daha yüksek gerilmelerin oluşmasıdır. Yüzeyde meydana gelebilecek herhangi bir değişim yorulma davranışını etkileyebilir. Yüzey tabakasındaki malzemenin durumu şu sebeplerden ötürü iç kısımlardan çok farklı olabilir:

- Yüksek düzeyde yüzey pürüzlülüğü,
- Artık gerilmeler,
- Mekanik özelliklerdeki değişimler.

Yukarıdaki değişimleri meydana getirebilecek birçok yüzey işlemi mevcuttur. Aşağıdaki işlemler en çok uygulanan yüzey iyileştirme işlemleridir:

- Yüzey tamamlama ve ilişkili işlemler,
- Termal işlem,
- Kimyasal işlem,
- Kaplama.

Bu konu ile ilgili daha fazla bilgi için Aytekin(2005)'in çalışması incelenebilir.

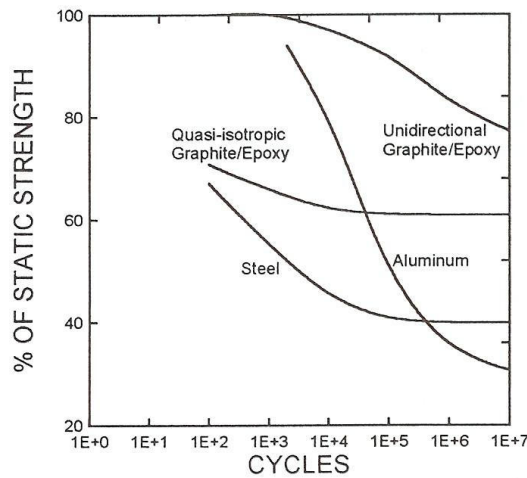
4.7 KOMPOZİT MALZEMELERİN YORULMA DAVRANIŞI

Yorulma ömrü diyagramı yada gerilme–yorulma ömrü (S-N) ilişkisi malzemenin yorulma davranışını yada direncini karakterize etmek ve ölçmek amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu diyagram belirli sayıda numuneyi, bir döngü ile sonsuz ömür öncesindeki yorulma ömrünü sağlayan değişik gerilme seviyelerinde teste tabii tutularak oluşturulur. Daha önce de belirtildiği gibi mühendislik uygulamalarında “sonsuz” ömür amaca göre 1 -10 milyon döngü arasında alınır. Sonsuz ömre karşılık gelen gerilme değeri ise malzemenin yorulma limiti yada dayanıklılık limiti olarak kabul edilir.

Yorulma, yükleme tipi (çekme-çekme, çekme-basma, kesme, burma yada bunların kombinasyonu), frekans, gerilme yada şekil değiştirme oranı, döngüsel dalga formu (sinüzoidal, üçgensel, vb.), test şartları (gerilme yada şekil değiştirme kontrollü yükleme modu) gibi birçok parametre içerir. Farklı malzeme (fiber, matris) karışımı, katman

sıralanışı, gerilmenin ve katılığın yöne bağıllığı gibi kendi parametrelerini içeren kompozit malzeme kavramıyla birleştğinde bu konu çok geniş olduğu kadar çokta kompleks bir hal alır. Bu sebepten dolayı bu bölümde bu konunun temel ve genel öğeleri sunulacaktır.

Metallerde, yorulma yada malzemenin elastik limitinin altındaki bir seviyede tekrarlayan gerilmeler sonucunda, hatalı yada gerilme artırıcıların bulunduğu bölgelerde, bölgesel plastik şekil değiştirmeler oluşur. Kısacası metallerde yorulma çatlak oluşumu ve gelişmesi ile meydana gelen bir olaydır. Fakat kompozit malzemelerdeki yorulma mekanizması çok karmaşıktır. Katman yada levha içinde meydana gelebilecek kırılma (matris çatlaması), delaminasyon (katmanlar arasında meydana gelen ayrılma), fiber kırılması gibi yorulma sonucunda oluşabilecek birkaç olasılık vardır. Bu yorulma oluşumları metallerdeki gibi soyut bir çatlak oluşturmak yerine kompozitte genel bir bozulma durumuna sebebiyet verirler.



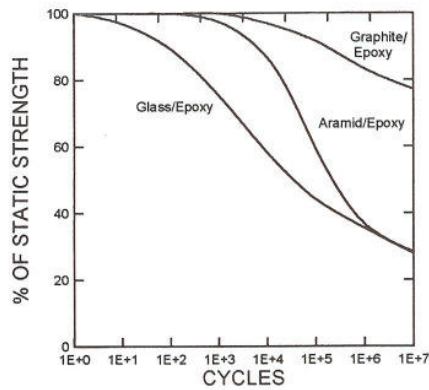
ŞEKİL 4.12. Çeşitli malzemeler için yorulma dayanımının kıyaslanması (Mallick, 1997)

Sonuç olarak tipik bir tekyönlü (unidirectional) yada izotropik özellik gösteren (quasi-isotropic) grafit/epoksi kompozitin çevrimsel çekme-çekme yüküne maruz kaldığında yorulma davranışı yapısal metallere göre daha iyidir (Şekil 4.12). Bu, yüksek yorulma dayanımı, yüksek özgül dayanım ve katılık ile birlikte kompozit malzemelerin çekici özelliklerini oluşturmaktadır. Fakat kompozit yapıların çoğu uygulamalarında değişik yükleme tiplerine, dizilimlere ve şekillere ihtiyaç duyulduğu için her durum uygun olarak değerlendirilmelidir. Aşağıda bazı durumlar ele alınmıştır.

4.7.1 ÇEKME – ÇEKME YORULMASI

4.7.1.1 Tekyönlü Levhalar

Tipik bir tekyönlü grafit/epoksi kompozitin yorulma direnci alüminyum ya da çelikle kıyaslandığında çok daha iyi olduğu görülür (Şekil 4.13).



ŞEKİL 4.13. Üç tekyönlü kompozit malzemenin normalize edilmiş S-N eğrileri
(Mallick, 1997)

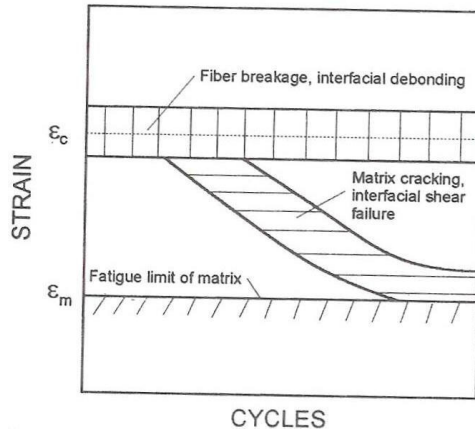
Tekyönlü katman, fiberler doğrultusunda çekme yüküne maruz bırakıldığında fiberler neredeyse bütün yükü taşır ve bu nedenle tekyönlü katmanın çekme yorulması davranışı ilk basamakta fiberlerin yorulma yüküne karşı olan hassasiyetine bağlıdır. Bunun yanında tam bir yorulma analizi için matris malzemesinin de yorulma davranışının biliniyor olması gerekir. Şekil 4.13de üç farklı, tekyönlü fiber ve epoksi matristen oluşmuş kompozitlerin S-N eğrileri görülmektedir.

Şekil 4.13de görüldüğü gibi grafit fiberler ($E = 220 - 700$ GPa) en yüksek yorulma dayanımına sahiptir. 10 milyon çevrim sonundaki yorulma dayanımı statik dayanımının %75-80'i civarındadır. Cam fiberler ($E = 70-80$ GPa) ise yorulma dayanımı en düşük olan fiberler olarak görülmektedir ve 10 milyonuncu çevrimdeki yorulma dayanımları statik dayanımlarının sadece üçte biri kadardır. Ayrıca, grafit fiberlerden daha ağır oldukları için ağırlık ve yorulma dayanımının öncelikli olduğu durumlarda kesinlikle tercih edilmezler.

Fiberlerde olduğu gibi birçok polimerik matris malzemesi mevcuttur. Bu matris malzemelerinin esas amacı polimerik kompozit malzemelerin sağlamlığını artırmaktır. Bu matris malzemelerinin kullanımı statik dayanım ve darbe dayanımı özelliklerinde gelişmeye sebep olduysa da yorulma dayanımında aynı başarıya ulaşamamıştır.

Fiberler doğrultusunda çekme-çekme yorulmasına maruz bırakılan tekyönlü bir tabakada meydana gelen hasar mekanizması uygulanan gerilme seviyesi de dahil olmak üzere birçok faktöre bağlıdır.

Yüksek gerilme/düşük çevrim yorulma bölgesinde fiber kırılması kompozitteki en zayıf fiberin dayanımını geçen gerilmelerde meydana gelir. Fiberin kırılması, kırılan uçlara yakın yerdeki ara fazda kesme gerilmesi birikimine sebep olur. Ara faz daha sonra kırılarak fiberin onu saran matristen ayrılmasına yol açabilir. Düşük gerilme/yüksek çevrim bölgesinde hasar mekanizması ilk olarak matris kırılmasının yanında ara fazda kesme gerilmesi kırılması olarak karşımıza çıkar. Yorulma ömrü diyagramındaki sonuçlar Şekil 4.14’de şematik olarak verilmiştir. Burada gerilme yerine şekil değiştirmeler cinsinden ifade söz konusudur. Fiber destekli kompozitlerde, fiberdeki ve matristeki şekil değiştirmeler kompozite uygulanan şekil değiştirme ile aynıdır ve eşittir. Fakat gerilmeler için aynı şeyden bahsedilemez.



ŞEKİL 4.14. Tekyönlü kompozit için hasar mekanizmaları ile yorulma ömrü diyagramı (Mallick, 1997)

Şekil 4.14 kompozitin kırılma şekil değiştirmesini (ϵ_c) merkez olarak oluşmuş yatay bant ara fazdaki ayrılmayla birlikte oluşan fiber

kırılmasını simgelemektedir. Eğimli olarak matrisin yorulma limitine kadar inen diğer bölge ise matris kırılmasını ve ara fazda meydana gelen kesme kırılmasını göstermektedir. Bu iki kırılma mekanizması bir bant olarak gösterilmektedir çünkü aynı anda ve yorulma ömrünün sonlarına doğru meydana gelirler.

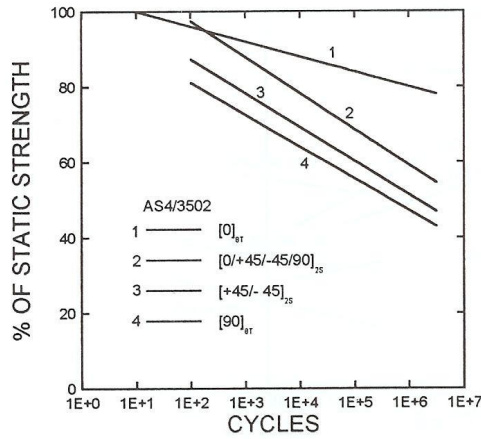
Yukarıdaki kırılma mekanizması senaryoları açıkça göstermektedir ki fiber destekli kompozitin yorulma performansı, fiber dayanımı ve matris malzemesinin yorulma limiti gibi iki limitleme faktörü ile sınırlandırılmıştır. Bu faktörlerin bağıl büyüklükleri kompozit malzemelerin yorulma dayanımının bir ölçüsü olan yorulma ömrü eğrisinin eğimini tayin eder. Bu nedenle kompozitin gerilme yerine şekil değiştirmeye karşılık kırılma çevrim sayısı, veriler yük kontrollü olarak elde edilmiş olsa dahi grafiklerde tercih edilmektedir.

Bu çeşit bir sunum, çeşitli kompozit malzemelerin kırılma mekanizmaları ve yorulma performanslarını kıyaslayabilmek açısından daha kullanışlı bir araç sağlamaktadır.

4.7.1.2 Çok yönlü Levhalar

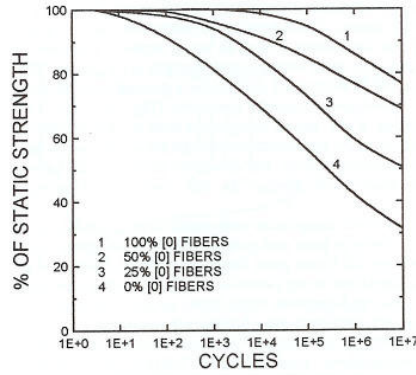
Tekyönlü levhaların kullanımı, sadece fiber doğrultusunda yük taşıyabildikleri ve diğer eksenlerdeki zayıf mekanik özellikleri nedeniyle sınırlıdır. Pratikte birçok uygulamada yük çok yönlü olduğu için farklı yönlerde katman dizilimine sahip levhalar kullanılmaktadır. Çok yönlü

levha söz konusu olduğunda statik dayanım ve yorulma direnci ilişkisi tekyönlü levhaya kıyasla daha az işleve sahiptir çünkü yapıda eksen dışı (off axis) dizilim mevcuttur. Eksen dışı katmanlar daha fazla matris bağımlı oldukları için yorulma kırılması karşısında daha hassastırlar.



ŞEKİL 4.15. Katman diziliminin yorulma ömrüne etkisi (Mallick, 1997)

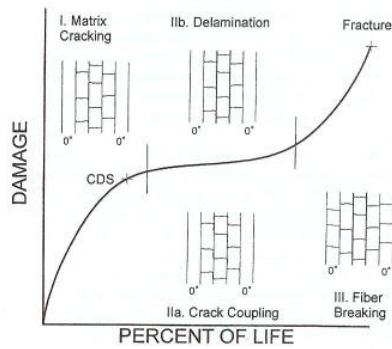
Şekil 4.15’de çeşitli grafit/ epoksi levhaların S-N eğrilerinin normalize edilmiş gerilme (yorulma gerilmesi oranına karşılık statik dayanım) cinsinden grafiği görülmektedir. $[0]_8$ tekyönlü levhanın S-N eğrisinin eğimi diğerlerine oranla en azdır çünkü yorulma karşısındaki performansı neredeyse tümüyle grafit fiberlerin yorulma dayanımına bağlıdır ve yorulma yüklemesine karşı dayanıklıdır. Ancak S-N eğrisinin eğimi ve normalize edilmiş yorulma dayanımı, eksen dışı katmanların açısı değerinin ve sayılarının artmasıyla azalmaktadır.



ŞEKİL 4.16. Değişen miktarlardaki 0° fiberlerin sayısının yorulma ömrüne etkisi (Mallick, 1997)

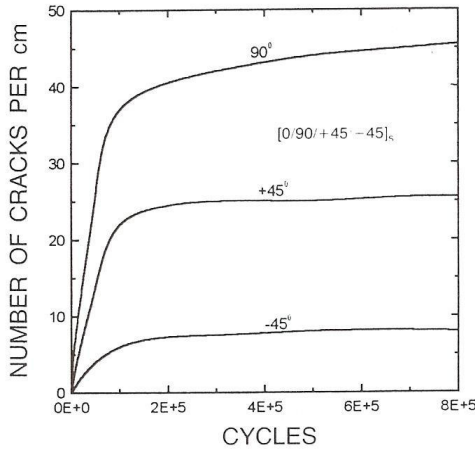
Enine levhanın $[90]_8$ yorulma dayanımı beklendiği gibi en düşüktür. Bu durum ayrıca Şekil 4.16'da $[0_n/\pm 45_m]_s$ oryantasyonlu levhalar için de gösterilmektedir. 0° li katmanların sayısı azaldıkça yorulma dayanımı ve eğim buna bağlı olarak düşmektedir.

Çekme-çekme yüküne maruz bir çok yönlü levhada yorulma kırılması mekanizmasının birkaç olasılığı vardır. Çevrime bağlı yorulma kırılması oluşumunun şematik bir gösterimi Şekil 4.17 de verilmiştir.



ŞEKİL 4.17. Kompozit levhadaki yorulma hasarı mekanizmaları (Mallick, 1997)

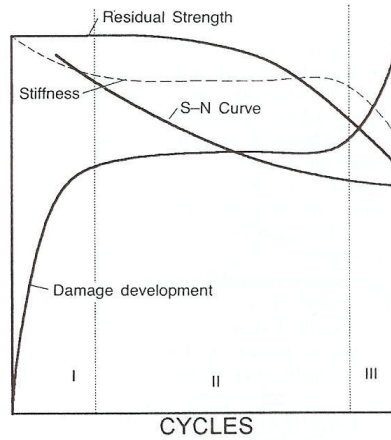
Yükleme doğrultusuna 90° açıda fiber dizilimine sahip enine katmanlarda ilk yük çevriminde yada ilerleyen çevrimlerde (yükün seviyesine bağlı olarak) çatlaklar meydana gelir. Bu genellikle “İlk Katman Kırılması” (First Ply Failure / FPF) olarak adlandırılır ve levhanın katılığında azalmaya sebep olur. Benzer iç katman kırılmaları eksen dışı katmanlarda da meydana gelebilir ve katılıkta daha da fazla azalmaya sebebiyet verir. Eksen dışı bir katmanda iyi tanımlanmış bir çatlak modeli ve çatlak sayısı yük çevrimi sonucunda iyice fazlalaşacaktır. Buna “Karakteristik Hasar Durumu” (Characteristic Damage State / CDS) adı verilir.



ŞEKİL 4.18. Enine matris çatlaklarının büyümesi (Mallick, 1997)

Şekil 4.18 da çatlak doyum noktasına ulaşmış bir grafit/epoksi levhanın değişik katmanlarındaki matris çatlak yoğunluğu verilmiştir. Karakteristik hasar durumu kompozit sistemine bağlı olduğu gibi dizilimlerle de yakından alakalıdır.

Yorulma sürecinde meydana gelen hasar çoğu kez $D = E_i/E_0$ gibi katılık yada elastik modülü cinsinden ifade edilir. Burada E_i herhangi bir yorulma çevrimindeki elastik modülü ve E_0 ise çevrim öncesi ilk elastik modülüdür. Şekil 4.19'da görüldüğü gibi hasar üç aşamada meydana gelir. Aşama I, matrisin çatlaması yüzünden katılıkta meydana gelen ani bir düşüş ile karakterize edilmiştir. Aşama II, eksen dışı (off-axis) ve eksen içi (on-axis) katmanlarda, katman ara fazlarındaki çatlak birleşmeleri ve delaminasyonlar neticesinde daha fazla matris çatlağı oluşması nedeniyle katılıkta meydana gelen küçük miktarlı fakat uzun süreli düşüşü göstermektedir. Yorulma ömrünün sonu olan Aşama III ise fiber kırılması ve delaminasyon ile birlikte hasar büyüme oranındaki artış neticesinde katılıktaki ani düşüş ile karakterize edilir.



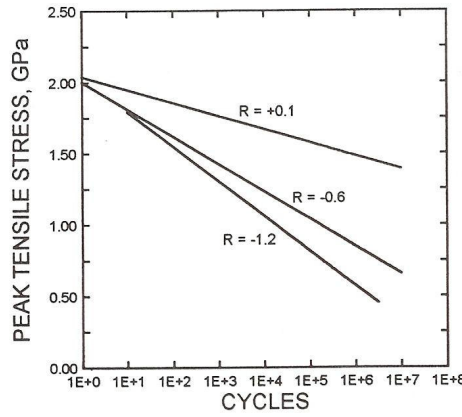
ŞEKİL 4.19. Çevrim esnasında dayanım ve katılıktaki düşüş (Mallick, 1997)

Levhanın dayanımı çevrim süresince meydana gelen hasar oluşumuyla da azalmaktadır. Bu dayanım çoğunlukla artık dayanım olarak adlandırılmaktadır. Levhanın artık dayanım eğrisinin şekli yorulma hasarı mekanizmaları ve katılık değişimleri ile yakından ilgilidir. Matris çatlakları ve erken fiber kırılmaları gibi yorulma ömrünün ilk %10-15’lik bölümünde oluşan hasar mekanizmaları levhaya bütünüyle yayılmış durumda olmalarına rağmen dayanım üzerinde küçük fakat ölçülebilir bir etkiye sahiptir. Artık dayanıma karşılık çevrim eğrisinin şekli malzeme dizilimi, yükleme durumu ve çevresel etkenler ile değişiklik gösterebilir. Artık dayanımın ilk dayanım, uygulanan gerilme seviyesi, çevrim ve çeşitli diğer parametreler cinsinden tahmin edilebilmesi ile ilgili çeşitli modeller geliştirilmiştir.

4.7.2 ÇEKME – BASMA YORULMASI

Bu başlık altında basma ortalama gerilmesinin yada negatif gerilme oranının ($R < 0$) etkileri incelenecektir. Genel olarak yüklemde basma yükü söz konusu olduğunda yorulma davranışı ile ilgili daha az bilgi mevcuttur. Bu, kompozit malzemenin ince olması ve burulmaya karşı hassasiyetinden kaynaklanan bir durumdur. Bu durum da desteksiz boy uzunluğuna bir sınırlama getirir. Çekme durumunda olduğu gibi basma durumunda da fiberler esas yük taşıyan elemanlardır. Bununla beraber bölgesel olarak dengesizliği yada mikro burulmaya bağlı kırılmayı önleyebilmek için matristen desteğe ihtiyaç duyarlar. Bu yüzden matrisin ve fiber/matris ara fazının basma yüklemesindeki rolü çekmeye oranla daha fazladır. Matris ve ara fazdaki hasar oluşumları her

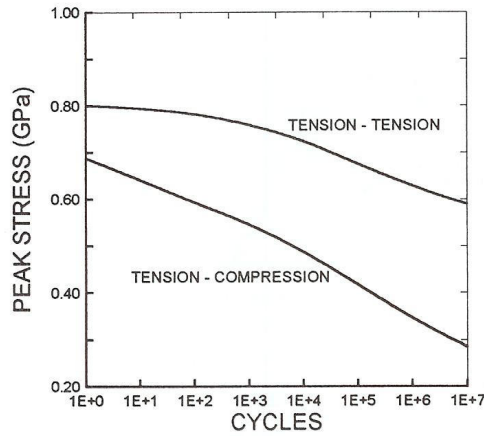
ne kadar çekme yüklemesindeki benzer sebeplerden dolayı ortaya çıksalar da basma yüklemesinde matrise duyulan ihtiyacın fazla olmasından dolayı kompozitin yorulma davranışına etkileri de daha fazladır. Buna ek olarak çekme yüklemesinde görülen yerel reçine ve ara faz hasarları fiberlerde dengesizliğe yol açar ve bu da çekme yüklemesinde oluşan fiber kırılmasından daha ciddi bir durumdur.



ŞEKİL 4.20. Gerilme oranının tekyönlü kompozitin yorulma dayanımına etkisi
(Mallick, 1997)

Şekil 4.20 de standart bir grafit/epoksi tekyönlü levhaya uygulanan çekme-çekme ve çekme-basma yüklemelerinin malzemenin yorulma dayanımına etkisi gösterilmektedir. Yükleme durumunda bir bası yükünün bulunması yorulma dayanımını düşürür ve S-N eğrisinin eğimini artırır. Aynı etki $[\pm 45/0_2]_s$, $R=0.0$ ve $R=-1.0$ olan çok yönlü bir grafit/epoksi levha için Şekil 4.21 de ele alınmıştır. Bunun sebebi yükleme doğrultusunda fibere sahip olan yada olmayan katmanlarda, katman içi (intraply) hasar oluşması ve bunun sonucu olarak kısa ömür

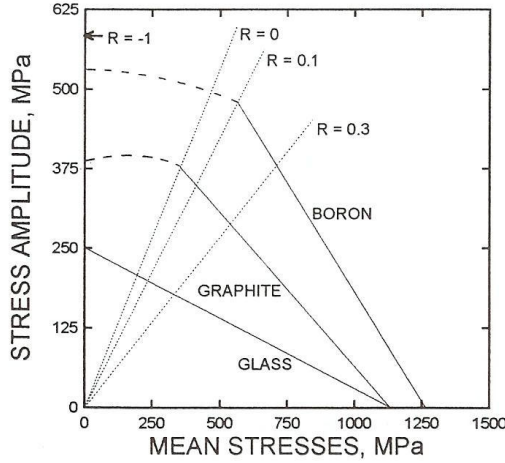
sürelerinde yerel delaminasyonların oluşumudur. Çekme yüklemesinde bu, çok ciddi bir durum oluşturmaz çünkü yükleme doğrultusundaki fiberler uygulanan yükün büyük bir kısmını desteklemeye devam ederler. Fakat basma durumunda çekme indüklenmiş hasar, bölgesel kararsızlık ve burulma ile sonuçlanabilir yada reçine veya ara fazda bir hasar meydana gelmeden önce fiberlerde mikro burulma oluşturabilir.



ŞEKİL 4.21. Çekme-çekme ve çekme-basma yorulma ömürlerinin kıyaslanması
(Mallick, 1997)

S-N eğrisi maksimum gerilme yada gerilme genliği ile, kullanılan bir gerilme oranındaki (R) ömür, arasındaki ilişkiyi ifade eder. Değişen gerilme oranlarının etkisini gösterebilmek için en yaygın kullanılan yorulma verisi sunum formatı Goodman diyagramıdır. Bu diyagram ortalama gerilme ve gerilme genliğinin çok çeşitli kombinasyonlarını belirlenmiş bir ömürdeki kırılma için tanımlar. Sabit R değerleri düz çizgiler ile ifade edilmiştir. Böylece değişik yorulma yüklemesi düzenleri saptanabilir. Bu format değişik gerilme oranı değerlerini

hesaplayabilmek için interpolasyona uygundur. Şekil 4.22’de 10^7 çevrim için birkaç çeşit tekyönlü kompozitin yorulma verileri Goodman diyagramı cinsinden verilmiştir.



ŞEKİL 4.22. Değişik tekyönlü kompozitlerin ortalama gerilmelerinin 10^7 çevrimdeki yorulma ömürlerine etkisi (Mallick, 1997)

5. DENEY VE SONUÇLARI

Erbil, 2005 çalışmasına konu olan deneyin yapılmasındaki amaç, kullanılan kompozit malzemenin atmosferik koşullardaki ve deniz ortamdaki yorulma eğrilerini (S-N) saptayıp, kıyaslayarak deniz ortamının kullanılan kompozit malzemenin yorulma dayanımı üzerindeki etkileri hakkında bilgi edinebilmektir.

Bu bölümdeki bütün bilgiler numunelerinin hazırlanışı sırasında aktif olarak görev yapan Erbil (2005)'in çalışmasından alınmıştır. İçerik olarak sadece deney hakkında diğer bölümlerde kullanılabilecek bilgileri sunmak amaçlanmıştır. Ayrıntılı bilgi için Erbil (2005)'in çalışmasından yararlanılabilir.

5.1 DENEYDE KULLANILAN NUMUNELER

Numunelerde kullanılan fiberler “COTECH” marka (Kanada) dikişli (stitched multilayer lamine) cam elyafıdır. Kullanılan elyaf tipleri ise; ELT 850, EBX 936, EQA 863, EQX 1168 ve EBX 446'dır. Bu simgeleme kodunda, E harfi fiberlerin Epoksi-Cam (E-Glass) olduğunu sondaki rakamlar ise fiberin özgül ağırlığını “g/m²” cinsinden simgelemektedir. Ortada bulunan iki harf ise fiberlerin oryantasyon (açı dağılımı) yönünü belirtmektedir. Tablo 5.1'de, kullanılan harflerin simgelediği dağılımlar verilmiştir.

TABLO 5.1. Harflerin simgelediği açısal dağılımlar

LT :	0°/90° çift eksenli (Biaxial)
BX :	+45°/-45° çift eksenli (Biaxial)
QA/QX :	0°/+45°/90°/-45° dört eksenli (Quadraxial)

Matris için kullanılan malzeme ise “dewilux” marka “dewester 196” genel amaçlı polyesterdir. Polyesterin içine ağırlıkça %2 oranında dondurucu (metil-etil keton peroksit) ilave edilip hızlandırıcı olarak ise kobalt ilavesi yapılmıştır.

Kalınlık olarak 5mm ve 10mm'lik iki kompozit plakası hazırlanmıştır. Bu plakalar daha sonra 0° , 45° ve 90° derecelerde kesilerek 2 farklı plakadan 6 farklı oryantasyon çeşidine sahip numuneler elde edilmiştir. Hazırlanan deney numunelerinin sayıları Tablo 5.2'de verilmiştir.

TABLO 5.2. Hazırlanan deney numunelerinin sayısı (Erbil, 2005)

Kalınlık	5 mm'lik numuneler		10 mm'lik numuneler	
Oryantasyon	Hava	Korozif ortam	Hava	Korozif ortam
0°	16	16	16	16
45°	16	16	16	16
90°	16	16	16	16
	Toplam: 96		Toplam: 96	

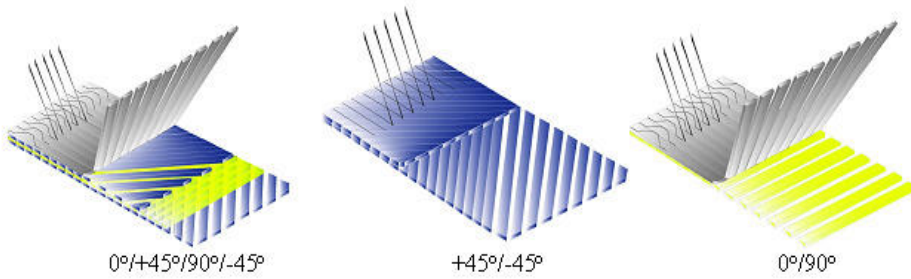
Hazır olan numunelerin üzerine sabit kalemle etiketleme yapılmıştır. Etiketlemede kullanılan kodlar şunlardır: F: Düz numune (flat); 5 ve 10: milimetre cinsinden numune kalınlıkları; A: Hava (air); S: Deniz suyu ortamı (saline); 00, 45, 90: Tabakanın kesilme yönleri; 00-16 numune numarası. [Örnek: F 05 A 45-01; 5 mm kalınlığında, 45 derecede kesilmiş 1 numaralı hava numunesi]

5.2 NUMUNELERİN ORYANTASYONU (FİBERLERİN DİZİLİM AÇILARI)

Kompozitler malzemelerde fiberlerin dizilim açıları, yani oryantasyonu kompozite mekanik özelliklerini kazandıran ve yüklerin

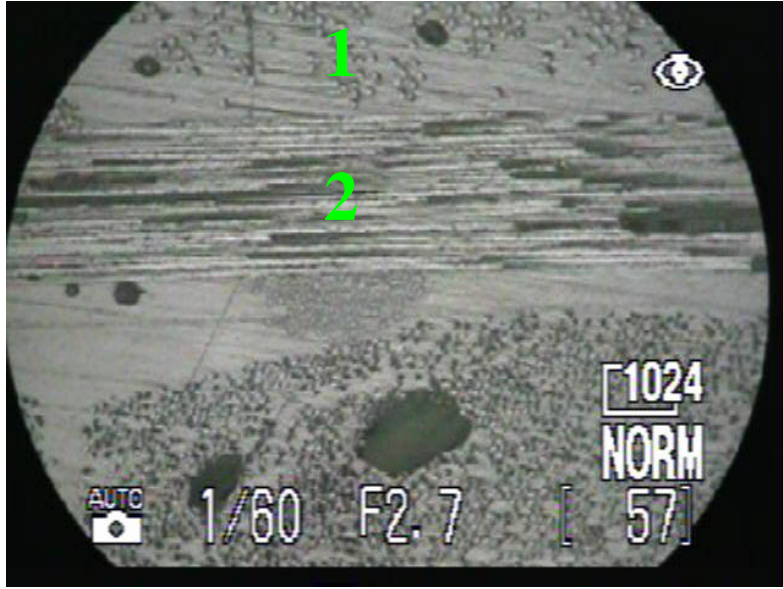
etkime doğrultusuna göre dizayn aşamasında kompozitin yapısına karar verilmesini gerektiren önemli bir kavramdır.

Deney numunelerinin oryantasyonları ile ilgili yazılı bir bilgi bulunamadığı için numunelerin mikroskopik resimleri ve üretici firmanın kataloğundaki sıralanışı dikkate alınarak fiberlerin dizilim açıları tayin edilmiştir.



ŞEKİL 5.1. Deney numunesinde kullanılan değişik oryantasyonlu kompozit levhalar
(Erbil, 2005)

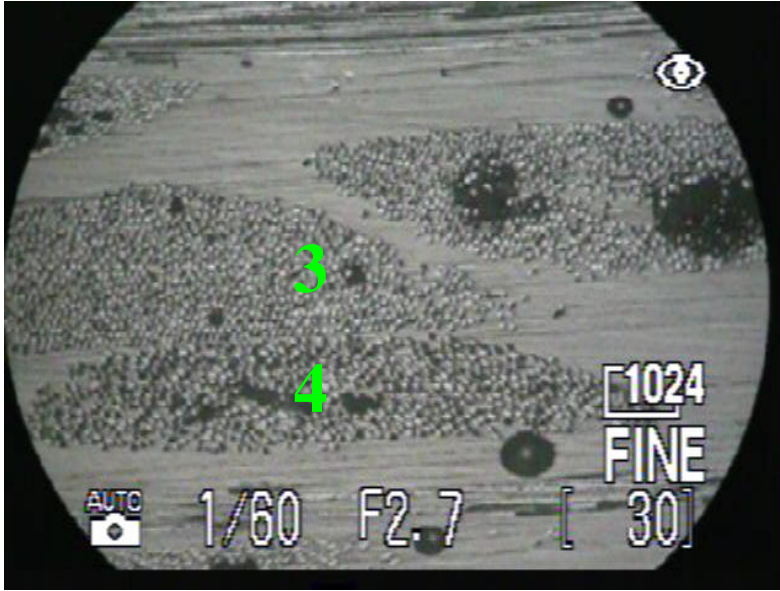
Şekil 5.1'deki fiber örgü resimleri, üretici firmanın kataloğundan alınmıştır ve katmanların açısal sıralanışı şekildeki gibidir. Kompozite büyüterek bakıldığında, açıların daha anlaşılır olarak görülebilmesi için numunelerden kesit alınmış, alınan bu kesitler parlatılmış ve tek yönde siyah işaretleyici boya sürülmüştür. Bu işlemler neticesinde elde edilen veriler değerlendirilerek açısal dağılım saptanmıştır.



ŞEKİL 5.2. Deney numunesinin mikroskobik görünüşü

Şekil 5.2’de 1 numara ile gösterilen bölgede bulunan daire şeklindeki beyaz noktalar 0° açılı yani kesite dik doğrultudaki fiberleri göstermektedir. 2 numaralı bölge ise çizgisel bir yapıya sahip olup kesit doğrultusundaki, yani 90° açılı fiber demetidir.

Şekil 5.3’de ise 3 numaralı bölge 0° ’den farklı olarak, daha sık ve küçük dairesel bir yapıdadır. 4 numaradan farkı ise daha beyazımsı olmasıdır. Yapılan araştırmalarda bu bölgenin -45° ’yi gösterdiği anlaşılmıştır. Son olarak ise, 4 numaralı bölge -45° oryantasyonlu bölgeye benzemektedir; fakat siyah boyanın sürülüş yönü nedeniyle, daha fazla boya tutarak siyahımsı bir renk almıştır ve $+45^\circ$ ’li fiberleri göstermektedir. Bu yaklaşımlarla oryantasyonlar belirlenmiş ve üretici firma kataloğu ile doğrulanmıştır.



ŞEKİL 5.3. Deney numunesinin mikroskopik görünüşü

5.3 DENEYİN YAPILIŞI VE SONUÇLARI

Deney Romanya’da Bükreş’te bulunan Research Institute for Construction Equipment and Technologies (RICET) kurumunda yapılmıştır. Hava ortamındaki numuneler 24 saat boyunca 23°C’de %50 nemli açık hava ortamında bekletilmiştir. Deniz suyu ortamını modelleyebilmek için %3,5 NaOH çözeltisi kullanılmıştır. Deniz suyundan etkilenmiş olması planlanan numuneler, (deniz ortamının etkisini görmek için) 30 gün boyunca bu çözeltide bekletilmiştir. Bu çözelti 7., 15. ve 23. günlerde yenilenerek konsantrasyonun sürekli olarak aynı kalması sağlanmıştır.

TABLO 5.3. 5mm'lik ve 10mm'lik numunelerin tespit edilen oryantasyonları

5mm	10mm
0 90 ELT 850	-45 90 EQX 1168
-45 +45 EBX 936	+45 0
-45 90 +45 0 EQA 863	-45 90 +45 0 EQX 1168
-45 +45 EBX 936	-45 +45 EBX 446
90 0 ELT 850	-45 90 +45 0 EQA 863
	-45 90 +45 0 EQA 863
	-45 90 +45 0 EQA 863
	-45 90 +45 0 EQA 863
	-45 +45 EBX 446
	-45 90 +45 0 EQX 1168
	-45 90 +45 0 EQX 1168

Yorulma ömrü deneyinden önce, numunelere uygulanacak yaklaşık gerilmeleri bulabilmek için, atmosferik ve deniz ortamındaki numunelerden 5 mm ve 10 mm kalınlığında ve de her oryantasyondan 3 tanesine statik çekme deneyi uygulanmıştır. Bu sayede malzemenin çekme kopma mukavemeti (ultimate tensile strength) bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar Tablo 5.4’de verilmiştir.

İkinci aşamada, yorulma deneyine maruz bırakılan numunelere, 7,5 Hz’lik kuvvetler, çekme - çekme (tension - tension) prensibine göre uygulanmıştır. Numuneye ilk uygulanan kuvvet, statik çekme gerilmesi deney sonuçlarından çıkan değerin %85 – 95 oranında azaltılmasıyla saptanmıştır. Böylelikle, uygulanan kuvvete karşı gelen çalışma çevrim sayıları bulunmuştur. Uygulanan kuvvetler kesit alanına bölünerek gerilmelere geçilmiştir. Bu hesaplama sonucunda bulunan gerilmelerin nominal gerilmeler olduğuna dikkat edilmelidir. Bilinen gerilmeler ve çevrim sayıları kullanılarak kompozitin Wöhler (S-N) eğrileri çizilmiştir. Her kalınlık ve oryantasyon için 9 numune test edilmiştir. Bu deneyin sonuçları Tablo 5.5 ve Şekil 5.6 – 5.11’de verilmiştir.



ŞEKİL 5.4. Delaminasyona uğrayan (kırılan) numuneler (Erbil, 2005)



ŞEKİL 5.5. Test makinası ve numunelerin deniz ortamındaki testleri (Erbil, 2005)

TABLO 5.4. Statik şartlarda eksenel çekmeye maruz bırakılmış numuneler – F tipi (Erbil, 2005)

Numune Tipi	Kesit Alanı (mm ²)	Kırılma Yüğü (N)		Çekme Dayanımı (MPa)	
		24 saat 23°C'de %50 nemli ortamda bekletilmiş numuneler	30 gün %3.5'luk NaOH çözeltisinde bekletilmiş numuneler	24 saat 23°C'de %50 nemli ortamda bekletilmiş numuneler	30 gün %3.5'luk NaOH çözeltisinde bekletilmiş numuneler
F 05 A 00-01	74,9	15 420	-	205,9	-
F 05 A 00-02	75,3	14 800	-	196,6	-
F 05 A 00-03	76,3	14 930	-	195,7	-
F 05 S 00-01	78,0	-	15 000	-	192,3
F 05 S 00-02	76,5	-	14 970	-	195,7
F 05 S 00-03	76,6	-	15 300	-	199,6
F 05 A 45-01	79,9	13 100	-	163,8	-
F 05 A 45-02	77,9	13 400	-	172,0	-
F 05 A 45-03	77,1	13 300	-	172,5	-
F 05 S 45-01	73,7	-	13 500	-	183,2
F 05 S 45-02	76,5	-	11 600	-	151,6
F 05 S 45-03	76,7	-	11 800	-	153,8
F 05 A 90-01	73,5	14 850	-	202,1	-
F 05 A 90-02	75,0	14 500	-	193,3	-
F 05 A 90-03	76,0	13 500	-	177,6	-
F 05 S 90-01	73,2	-	15 600	-	213,0
F 05 S 90-02	73,2	-	14 700	-	200,8
F 05 S 90-03	73,3	-	15 000	-	204,6
F 10 A 00-01	169,5	29 700	-	175,2	-
F 10 A 00-02	162,9	31 200	-	191,5	-

F 10 A 00-03	162,0	33 000	-	203,7	-
F 10 S 00-01	163,6	-	28 300	-	173,0
F 10 S 00-02	162,9	-	33 680	-	206,7
F 10 S 00-03	160,4	-	33 500	-	208,9
F 10 A 45-01	168,1	33 000	-	196,3	-
F 10 A 45-02	170,1	36 200	-	212,8	-
F 10 A 45-03	173,4	34 300	-	197,8	-
F 10 S 45-01	175,0	-	33 000	-	188,6
F 10 S 45-02	173,4	-	36 500	-	210,5
F 10 S 45-03	174,7	-	36 800	-	210,7
F 10 A 90-01	170,5	33 300	-	195,3	-
F 10 A 90-02	167,4	35 400	-	211,4	-
F 10 A 90-02	170,0	32 000	-	188,2	-
F 10 S 90-01	165,0	-	34 600	-	209,7
F 10 S 90-02	169,1	-	26 500	-	156,72
F 10 S 90-03	167,0	-	28 400	-	170,1

TABLO 5.4. (Devamı) Statik şartlarda eksenel çekmeye maruz bırakılmış numuneler – F tipi (Erbil, 2005)

TABLO 5.5. Yorulma testine maruz bırakılmış numuneler – F tipi (Erbil, 2005)

Numune Tipi	Kesit Alanı (mm ²)	Yorulma			Deniz Ortamında Yorulma		
		Çevrim Sayısı	Kırılma Yükü (N)	Çekme Dayanımı (MPa)	Çevrim Sayısı	Kırılma Yükü (N)	Çekme Dayanımı (MPa)
F 05 A 00-04	78,0	1400	10296	132,0	-	-	-
F 05 A 00-05	77,0	4030	8393	109,0	-	-	-
F 05 A 00-06	76,5	5752	8002	104,6	-	-	-
F 05 A 00-07	76,5	7079	7497	98,0	-	-	-
F 05 A 00-08	78,0	206321	6708	86,0	-	-	-
F 05 A 00-09	77,1	239052	6700	86,9	-	-	-
F 05 A 00-10	77,3	450000	5821	75,3	-	-	-
F 05 A 00-11	77,1	854028	5351	69,4	-	-	-
F 05 A 00-12	76,5	1027600	5049	66,0	-	-	-
F 05 S 00-04	76,9	-	-	-	5000	7944	103,3
F 05 S 00-05	77,6	-	-	-	19200	6324	81,5
F 05 S 00-06	78,2	-	-	-	50500	6000	76,7
F 05 S 00-07	77,4	-	-	-	185241	5797	74,9
F 05 S 00-08	76,9	-	-	-	251123	5629	73,2
F 05 S 00-09	77,4	-	-	-	535000	5341	69,0
F 05 S 00-10	76,6	-	-	-	700203	4887	63,8
F 05 S 00-11	78,0	-	-	-	845754	4797	61,5
F 05 S 00-12	78,0	-	-	-	1035230	4524	58,0

Tablo 5.5. Devamı

Numune Tipi	Kesit Alanı (mm ²)	Yorulma			Deniz Ortamında Yorulma		
		Çevrim Sayısı	Kırılma Yükü (N)	Çekme Dayanımı (MPa)	Çevrim Sayısı	Kırılma Yükü (N)	Çekme Dayanımı (MPa)
F10 A 00-04	169,5	5100	17747	104,7	-	-	-
F10 A 00-05	169,5	36000	17260	101,8	-	-	-
F10 A 00-06	169,5	145256	14000	88,0	-	-	-
F10 A 00-07	169,3	203025	12700	75,0	-	-	-
F10 A 00-08	169,1	239776	11330	67,0	-	-	-
F10 A 00-09	169,5	487000	10136	59,8	-	-	-
F10 A 00-10	169,1	530022	9808	58,0	-	-	-
F10 A 00-11	162,9	789541	8976	55,1	-	-	-
F10 A 00-12	162,9	1100000	8700	53,4	-	-	-
F10 S 00-04	162,3	-	-	-	5200	17042	105,0
F10 S 00-05	169,5	-	-	-	33020	17425	102,8
F10 S 00-06	169,3	-	-	-	200310	12867	76,0
F10 S 00-07	169,1	-	-	-	261300	12057	71,3
F10 S 00-08	169,5	-	-	-	402315	9950	58,7
F10 S 00-09	169,1	-	-	-	556897	9689	57,3
F10 S 00-10	169,5	-	-	-	750036	9322	55,0
F10 S 00-11	165,5	-	-	-	1007760	8770	52,7
F10 S 00-12	166,8	-	-	-	1083897	7730	46,5

Tablo 5.5. Devamı

Numune Tipi	Kesit Alanı (mm ²)	Yorulma			Deniz Ortamında Yorulma		
		Çevrim Sayısı	Kırılma Yükü (N)	Çekme Dayanımı (MPa)	Çevrim Sayısı	Kırılma Yükü (N)	Çekme Dayanımı (MPa)
F 05 A 45-04	79,1	6100	7594	96,0	-	-	-
F 05 A 45-05	77,5	7888	8447	109,0	-	-	-
F 05 A 45-06	77,5	130015	7052	91,0	-	-	-
F 05 A 45-07	82,1	260625	6814	83,0	-	-	-
F 05 A 45-08	78,2	356900	6358	81,3	-	-	-
F 05 A 45-09	79,1	498751	6130	77,5	-	-	-
F 05 A 45-10	82,1	760031	6100	74,3	-	-	-
F 05 A 45-11	80,1	845752	5687	71,0	-	-	-
F 05 A 45-12	80,6	1008100	5400	67,0	-	-	-
F 05 S 45-04	79,2	-	-	-	50008	8078	102,0
F 05 S 45-05	77,3	-	-	-	103054	7081	91,6
F 05 S 45-06	75,6	-	-	-	145000	6577	87,0
F 05 S 45-07	79,2	-	-	-	175041	6764	85,4
F 05 S 45-08	80,2	-	-	-	450061	6103	76,1
F 05 S 45-09	79,2	-	-	-	521412	5853	73,9
F 05 S 45-10	75,6	-	-	-	710100	5368	71,0
F 05 S 45-11	80,0	-	-	-	806986	3379	44,72
F 05 S 45-12	79,2	-	-	-	1007071	4831	61,0

Tablo 5.5. Devamı

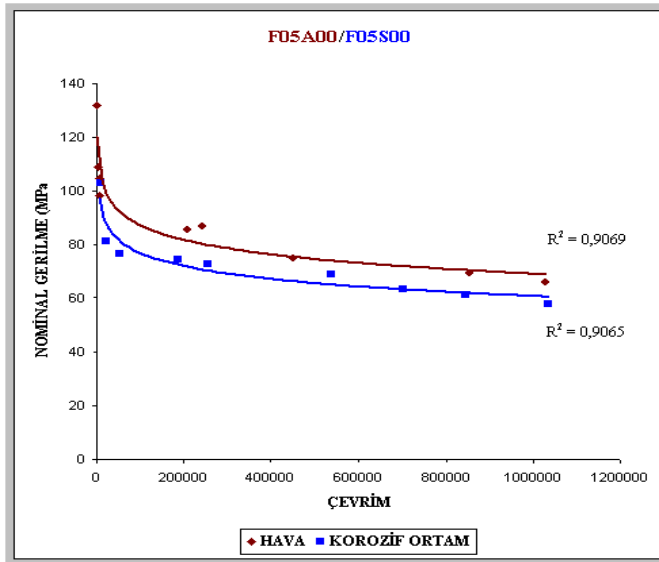
Numune Tipi	Kesit Alanı (mm ²)	Yorulma			Deniz Ortamında Yorulma		
		Çevrim Sayısı	Kırılma Yükü (N)	Çekme Dayanımı (MPa)	Çevrim Sayısı	Kırılma Yükü (N)	Çekme Dayanımı (MPa)
F 10 A 45-04	169,5	78903	19204	113,3	-	-	-
F 10 A 45-05	162,0	101088	17334	107,0	-	-	-
F 10 A 45-06	175,0	127845	17377	99,3	-	-	-
F 10 A 45-07	162,9	237000	14824	91,0	-	-	-
F 10 A 45-08	168,1	303040	13919	82,8	-	-	-
F 10 A 45-09	168,1	403272	12776	76,0	-	-	-
F 10 A 45-10	173,8	603000	12687	73,0	-	-	-
F 10 A 45-11	174,7	761000	12281	70,3	-	-	-
F 10 A 45-12	170,2	1016102	11352	66,7	-	-	-
F 10 S 45-04	170,4	-	-	-	69032	19426	114,0
F 10 S 45-05	162,9	-	-	-	100009	18245	112,0
F 10 S 45-06	163,6	-	-	-	131070	16687	102,0
F 10 S 45-07	170,1	-	-	-	130000	16500	97,0
F 10 S 45-08	168,0	-	-	-	371011	13205	78,6
F 10 S 45-09	164,9	-	-	-	400030	12137	73,6
F 10 S 45-10	168,4	-	-	-	650000	11737	69,7
F 10 S 45-11	170,4	-	-	-	791030	10906	64,0
F 10 S 45-12	179,3	-	-	-	1036316	10776	60,1

Tablo 5.5. Devamı

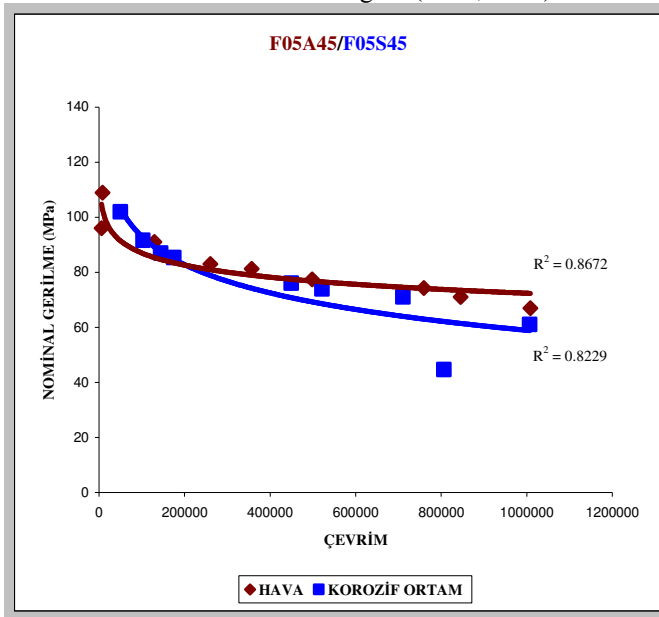
Numune Tipi	Kesit Alanı (mm ²)	Yorulma			Deniz Ortamında Yorulma		
		Çevrim Sayısı	Kırılma Yükü (N)	Çekme Dayanımı (MPa)	Çevrim Sayısı	Kırılma Yükü (N)	Çekme Dayanımı (MPa)
F 05 A 90-04	78,2	30582	8399	107,4	-	-	-
F 05 A 90-05	80,6	121004	8141	101,0	-	-	-
F 05 A 90-06	75,6	200304	6464	85,5	-	-	-
F 05 A 90-07	79,2	265000	5623	71,0	-	-	-
F 05 A 90-08	78,2	365214	5529	70,7	-	-	-
F 05 A 90-09	80,5	503018	5579	69,3	-	-	-
F 05 A 90-10	77,4	755049	4977	64,3	-	-	-
F 05 A 90-11	79,6	803219	4856	61,0	-	-	-
F 05 A 90-12	79,6	1070101	4696	59,0	-	-	-
F 05 S 90-04	81,1	-	-	-	2534	9408	116,0
F 05 S 90-05	79,6	-	-	-	14216	7403	93,0
F 05 S 90-06	79,6	-	-	-	61250	6368	80,0
F 05 S 90-07	78,0	-	-	-	130300	5226	67,0
F 05 S 90-08	80,5	-	-	-	403000	5071	63,0
F 05 S 90-09	79,2	-	-	-	504887	4839	61,1
F 05 S 90-10	80,2	-	-	-	750003	4467	55,7
F 05 S 90-11	79,2	-	-	-	874023	4277	54,0
F 05 S 90-12	79,6	-	-	-	1060000	4220	53,0

Tablo 5.5. Devamı

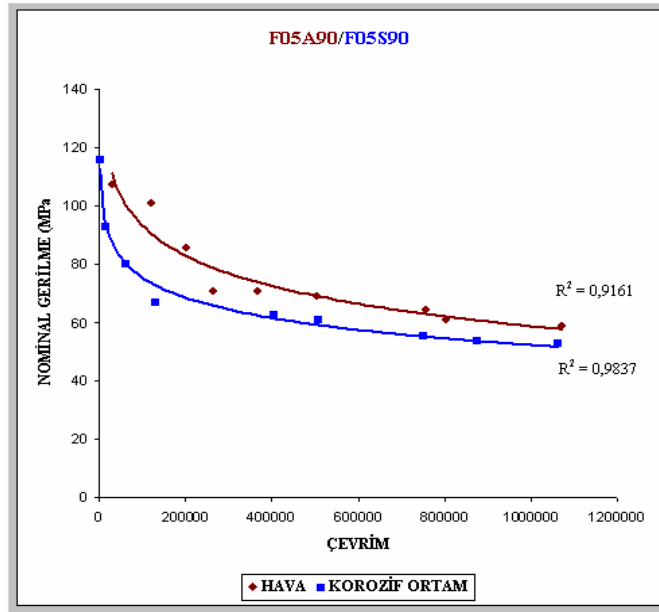
Numune Tipi	Kesit Alanı (mm ²)	Yorulma			Deniz Ortamında Yorulma		
		Çevrim Sayısı	Kırılma Yükü (N)	Çekme Dayanımı (MPa)	Çevrim Sayısı	Kırılma Yükü (N)	Çekme Dayanımı (MPa)
F 10 A 90-04	165,0	7018	19800	120,0	-	-	-
F 10 A 90-05	168,2	20007	15306	91,0	-	-	-
F 10 A 90-06	169,1	88754	16758	99,1	-	-	-
F 10 A 90-07	170,5	185000	14782	86,7	-	-	-
F 10 A 90-08	173,4	255000	12311	71,0	-	-	-
F 10 A 90-09	169,1	481000	11465	67,8	-	-	-
F 10 A 90-10	168,2	603447	10597	63,0	-	-	-
F 10 A 90-11	165,0	800121	9471	57,4	-	-	-
F 10 A 90-12	170,0	1031000	9180	54,0	-	-	-
F 10 S 90-04	165,0	-	-	-	51000	18100	109,7
F 10 S 90-05	168,2	-	-	-	98432	16484	98,0
F 10 S 90-06	165,8	-	-	-	120000	14259	86,0
F 10 S 90-07	173,2	-	-	-	210810	12297	71,0
F 10 S 90-08	168,9	-	-	-	350185	10978	65,0
F 10 S 90-09	165,0	-	-	-	468063	10197	61,8
F 10 S 90-10	168,2	-	-	-	691025	9486	56,4
F 10 S 90-11	173,4	-	-	-	855210	9242	53,3
F 10 S 90-12	168,0	-	-	-	1050350	8618	51,3



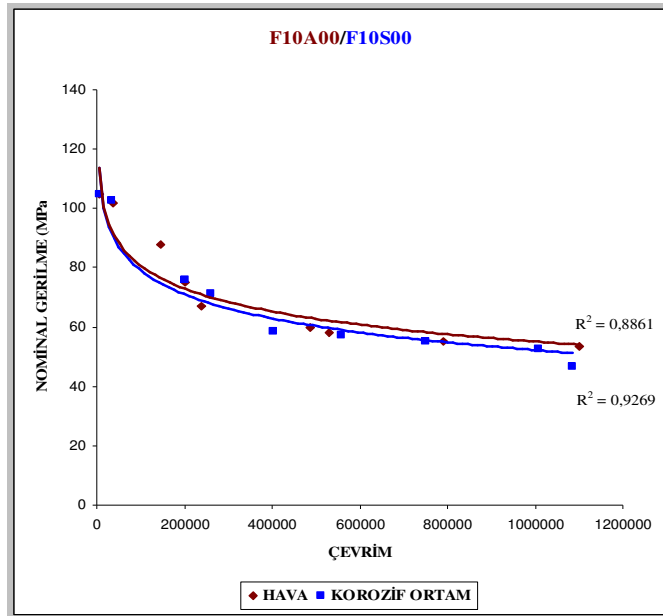
ŞEKİL 5.6. 5mm kalınlığındaki 0° açıda kesilmiş numunenin atmosferik ortamdaki ve deniz ortamındaki S-N eğrisi (Erbil, 2005)



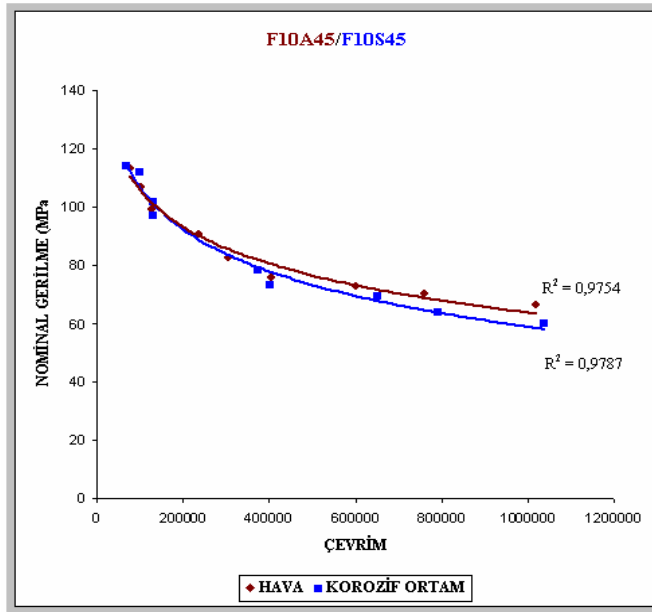
ŞEKİL 5.7. 5mm kalınlığındaki 45° açıda kesilmiş numunenin atmosferik ortamdaki ve deniz ortamındaki S-N eğrisi (Erbil, 2005)



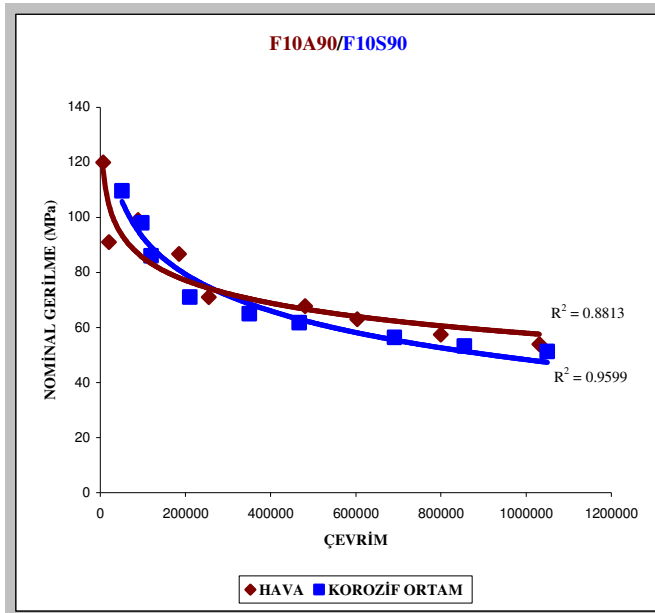
ŞEKİL 5.8. 5mm kalınlığındaki 90° açıda kesilmiş numunenin atmosferik ortamdaki ve deniz ortamındaki S-N eğrisi (Erbil, 2005)



ŞEKİL 5.9. 10mm kalınlığındaki 0° açıda kesilmiş numunenin atmosferik ortamdaki ve deniz ortamındaki S-N eğrisi (Erbil, 2005)



ŞEKİL 5.10. 10mm kalınlığındaki 45° açıda kesilmiş numunenin atmosferik ortamdaki ve deniz ortamındaki S-N eğrisi (Erbil, 2005)

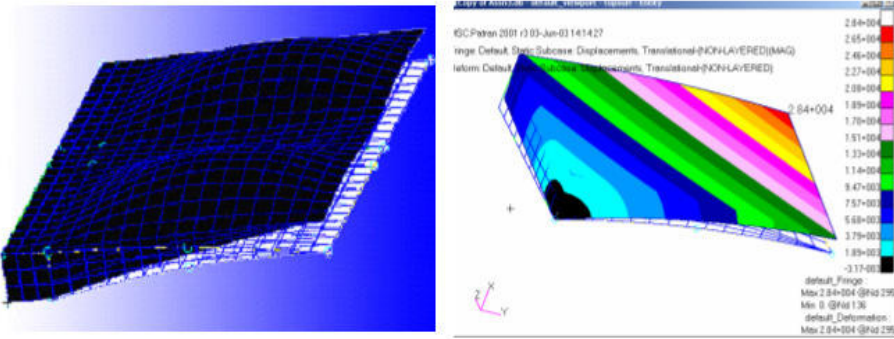


ŞEKİL 5.11. 10mm kalınlığındaki 90° açıda kesilmiş numunenin atmosferik ortamdaki ve deniz ortamındaki S-N eğrisi (Erbil, 2005)

6. PATRAN/NASTRAN KULLANILARAK SİMÜLE EDİLMİŞ BENZER KOMPOZİT ÇALIŞMASI ÖRNEĞİ

Bu çalışmanın diğer bir amacı da daha önceden test yoluyla elde edilmiş verileri, PATRAN/NASTRAN analiz programı ile simüle edip sonuçları kıyaslamaktır. Yapılacak olan analiz sırasında kullanılacak olan modelleme yöntemlerinin daha önceden kullanılmış ve literatüre girmiş bir durum olduğunun kanıtlanması tezin geçerliliği açısından önem taşımaktadır. Bu yüzden analize başlamadan önce benzer bir araştırma incelenerek bu bölümde referans amaçlı olarak sunulacaktır.

Middendorf tarafından yapılmış olan #3049731 numaralı araştırma çalışmasında, kompozit malzemeden imal edilmiş bir uçak kanat profil ucu PATRAN/NASTRAN programı kullanılarak yapısal analize tabi tutulmuştur. Öncelikle katı olarak modellenen kanat profilinin ağ yapısı için çeşitli elemanlar seçilerek eleman şeklinin analiz sonucuna etkisi de araştırılmıştır. Ağ yapısı oluşturulduktan sonra sınır koşulu olarak kanat üzerine 10kPa'lık bir yük uygulanmış ve kanat ana kirişi altı noktadan sabitlenmiştir. Analiz sonuçlarını kıyaslayabilmek amacı ile bir, iki, üç ve dört katmanlı kompozit malzeme, kanat profilini modellemek için kullanılmıştır (Şekil 6.1).



ŞEKİL 6.1. Analizi yapılan kanat profili sanal simülasyon modeli ve sonuçları
(Middendorf, 1997)

Bu makale PATRAN/NASTRAN program çiftinin kompozit modelleme ve analizi için kullanılabilirliğini ve elde edilen sonuçların yaklaşıklığını göstermek açısından önem taşımaktadır. İlerleyen bölümlerde bu kompozit modelleme tekniğinin benzeri test çubuklarının sanal simülasyonunda kullanılacaktır.

7. KABUK ELEMANLARLA MODELLENEN KOMPOZİT ÇEKME ÇUBUKLARININ GERİLME VE YORULMA SİMÜLASYONU VE SONUÇLARI

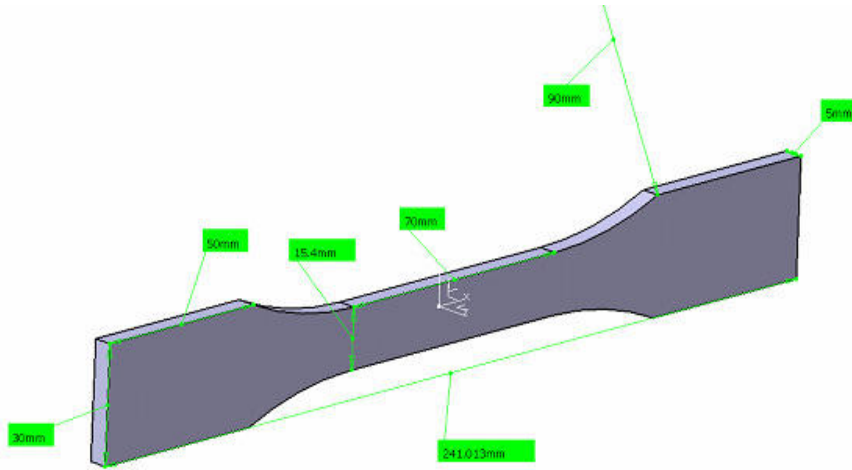
7.1 SİMÜLASYON

Testi yapılan kompozit çekme çubuklarının yorulma ömürlerinin bilgisayar programları yardımıyla hesaplanabilmesi, değişik yüklemeler altında parçaların test edilmeden sonlu elemanlar yöntemi ve paket

programlar aracılığı ile analizinin ne denli mümkün olacağını görmek açısından önem taşımakta idi.

Değişik yükleme durumları ele alınmadan önce paket programlarda kompozit malzeme modellemenin ve yorulma analizi gerçekleştirmenin ne derece yaklaşık sonuçlar verebileceğini görebilmek amacı ile yapılmış olan test, birebir paket programlar ve sonlu elemanlar yöntemi aracılığı ile simüle edilmiş ve çıkan sonuçların test sonuçları ile kıyaslaması yapılmıştır.

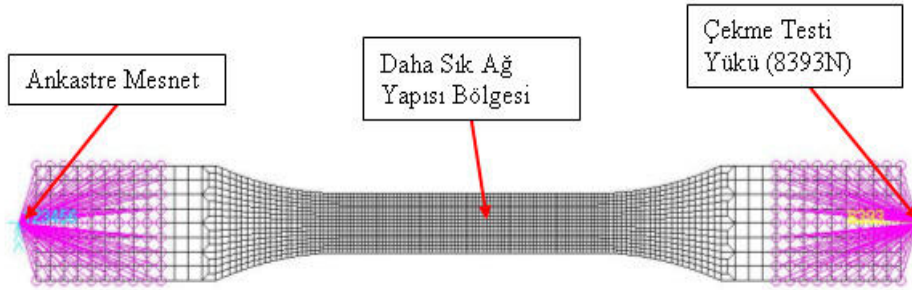
İlk etapta test sırasında kullanılan numune CATIA V5 katı modelleme programı yardımıyla modellenmiştir.



ŞEKİL 7.1. 5mm'lik numunenin Catia V5 modeli

Numune kalınlıkları (5mm ve 10mm) kabuk teoremine uygun olduğundan ve kabuk ağ yapısı ile daha hızlı sonuç alınabileceğinden ötürü hazırlanan üç boyutlu modelin sadece yüzeyi analiz için kullanılmıştır.

Bir ön işlem ve son işlem programı olan MSC Patran paket programı ile yüzeyin kritik bölgelerinde daha sık olmak üzere dörtgen (quadrant) elemanlar ile ağ yapısı hazırlanmıştır. Test makinesinin tutma çenelerinin gerçekçi olarak simüle edilebilmesi için sabit tutulan ve yük uygulanan noktalarda MPC (multi-point constrain)'ler kullanılmıştır (Şekil 7.2). Parçanın bir tarafı ankastre olarak (6 serbestlik derecesinde) mesnetlendi. Diğer tarafa ise Şekil 7.2'deki gibi test yükü uygulanmıştır.



ŞEKİL 7.2. Numunenin ağ yapısı ve sınır koşulları

Analiz programına malzemeyi kompozit olarak tanıtabilmek için ilk etapta bir ortotropik malzeme tanımı yapıldı. Bu malzemenin Elastik Modülleri, Kayma Modülü ve Poisson Oranı 7.1 denklemleri yardımı ile çeşitli kaynaklardan elde edilen E-cam'ın ve polyesterin malzeme özellikleri kullanılarak hesaplanmıştır (Tablo 7.1).

E-Cam	
$E_f =$	74000 MPa
$G_{12f} =$	30000 MPa
$\nu_{rf} =$	0,25
$\nu_f =$	0,55
Polyester	
$E_m =$	4500 MPa
$G_m =$	2400 MPa
$\nu_{rm} =$	0,4
$\nu_m =$	0,45

E-Cam/Polyester	
$E_1 =$	42725 MPa
$E_2 =$	9308 MPa
$G_{12} =$	4858 MPa
$\nu_{r} =$	0,318

TABLO 7.1 Hesaplanan malzeme değerleri (E-Camın ve polyesterin malzeme değerleri kaynakçadaki kaynaklardan derlenmiştir.)

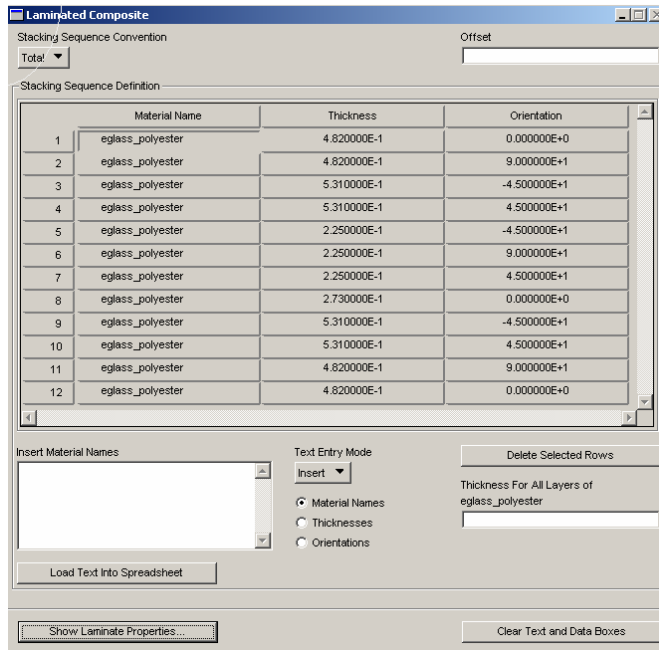
$$E_1 = E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_m$$

$$G_{12} = \frac{(G_f \cdot G_m)}{(V_f \cdot G_m + V_m \cdot G_f)}$$

$$\nu = V_f \cdot \nu_f + V_m \cdot \nu_m \quad (7.1)$$

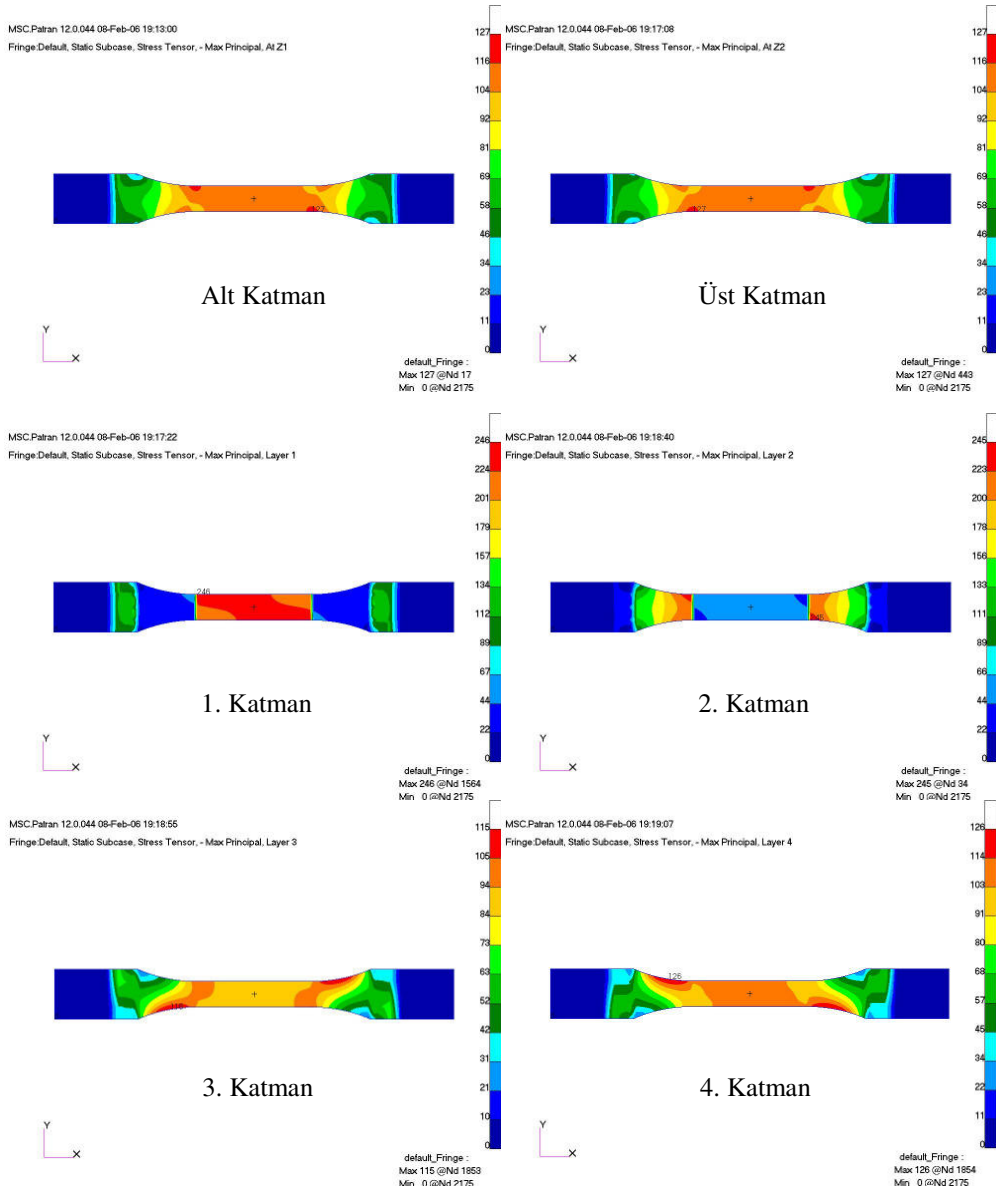
$$E_2 = E_m \cdot \left[\frac{1}{(1 - V_f) + \frac{E_m}{E_f} \cdot V_f} \right]$$

Oluşturulan ortotropik malzeme ise kompozitin her katmanındaki lamina olarak tanımlanmıştır. Her katmanın oryantasyonu ve kalınlığı girilerek kompozit malzeme özelliği programa tanımlanmıştır.



ŞEKİL 7.3. MSC Patran programına katmanların tanıtılması menüsü

Bu işlemlerin ardından model analize gönderilmeye hazır hale gelmiştir. MSC Nastran çözücü (solver) programı ile gerilme analizi gerçekleştirilmiştir. Çıkan sonuçlar yine MSC Patran programına alınarak katmanlardaki ve kompozitin genelindeki gerilme dağılımı incelenmiştir (Şekil 7.4).



ŞEKİL 7.4. Analiz sonucunda elde edilen katmanlardaki gerilme dağılımı

MSC.Patran 12.0.044 08-Feb-06 19:19:20
Fringe.Default, Static Subcase, Stress Tensor, - Max Principal, Layer 5



5. Katman

Y
X

default_Fringe :
Max 121 @Nd 1870
Min 0 @Nd 2175

MSC.Patran 12.0.044 08-Feb-06 19:20:02
Fringe.Default, Static Subcase, Stress Tensor, - Max Principal, Layer 6



6. Katman

Y
X

default_Fringe :
Max 230 @Nd 51
Min 0 @Nd 2175

MSC.Patran 12.0.044 08-Feb-06 19:20:15
Fringe.Default, Static Subcase, Stress Tensor, - Max Principal, Layer 7



7. Katman

Y
X

default_Fringe :
Max 122 @Nd 1854
Min 0 @Nd 2175

MSC.Patran 12.0.044 08-Feb-06 19:20:26
Fringe.Default, Static Subcase, Stress Tensor, - Max Principal, Layer 8



8. Katman

Y
X

default_Fringe :
Max 224 @Nd 444
Min 0 @Nd 2175

MSC.Patran 12.0.044 08-Feb-06 19:20:37
Fringe.Default, Static Subcase, Stress Tensor, - Max Principal, Layer 9



9. Katman

Y
X

default_Fringe :
Max 127 @Nd 1870
Min 0 @Nd 2175

MSC.Patran 12.0.044 08-Feb-06 19:18:01
Fringe.Default, Static Subcase, Stress Tensor, - Max Principal, Layer 10



10. Katman

Y
X

default_Fringe :
Max 117 @Nd 1837
Min 0 @Nd 2175

MSC.Patran 12.0.044 08-Feb-06 19:18:13
Fringe.Default, Static Subcase, Stress Tensor, - Max Principal, Layer 11



11. Katman

Y
X

default_Fringe :
Max 250 @Nd 18
Min 0 @Nd 2175

MSC.Patran 12.0.044 08-Feb-06 19:18:29
Fringe.Default, Static Subcase, Stress Tensor, - Max Principal, Layer 12



12. Katman

Y
X

default_Fringe :
Max 236 @Nd 444
Min 0 @Nd 2175

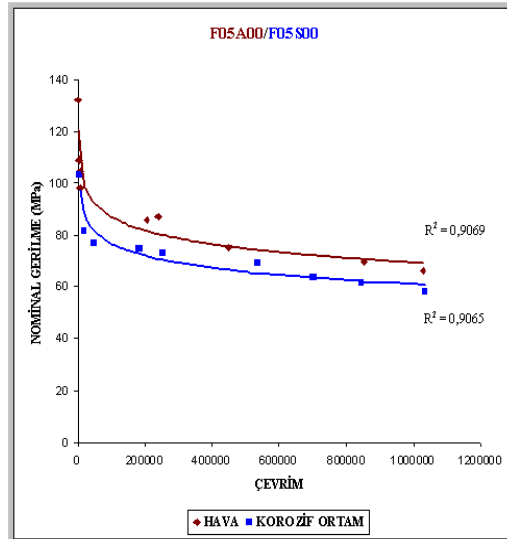
ŞEKİL 7.4. (Devam) Analiz sonucunda elde edilen katmanlardaki gerilme dağılımı

5-12. Katmanlar

Şekil 7.4’de sırasıyla kompozitin üst yüzeyinin, kompozitin alt yüzeyinin ve sonrasında ise 1’den 12’ye kadar tüm katmanlardaki gerilme dağılımı görülmektedir.

MSC Nastran’ın oluşturduğu çözüm dosyası ile MSC Patran’ın bir modülü olan MSC Fatigue programına girdi olarak verilir ve hesaplanan gerilme dağılımları üzerinden yorulma ömrü hesaplanır.

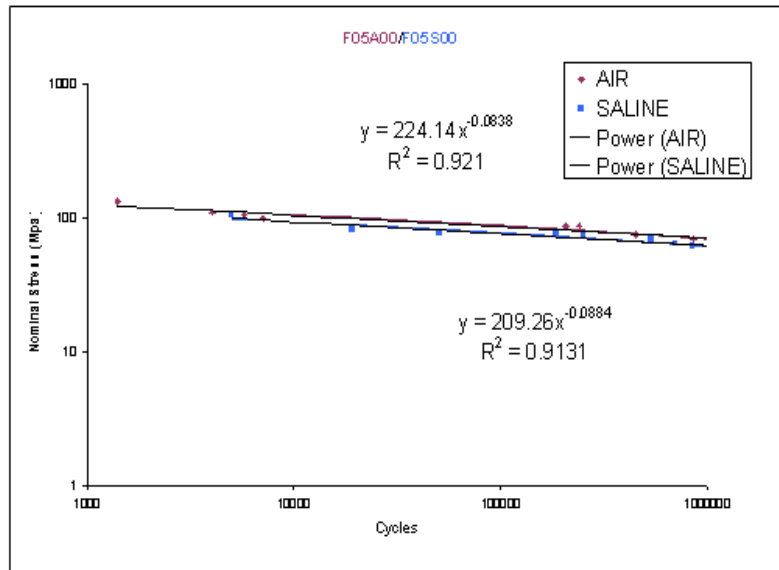
MSC Fatigue programı yorulma ömrü hesaplayabilmek için sonuç dosyasından başka malzeme Wöhler Eğrisine de ihtiyaç duyar. MSC Patran programının veri bankasında birçok malzeme için hazır Wöhler Eğrileri mevcuttur fakat bu analiz için test sonucunda oluşturulmuş Wöhler Eğrisi (Şekil 7.5) programa tanıtılarak kullanılacaktır.



ŞEKİL 7.5. Test sonucunda elde edilen 5mm’lik ve 0° kesilmiş numunenin Wöhler eğrisi

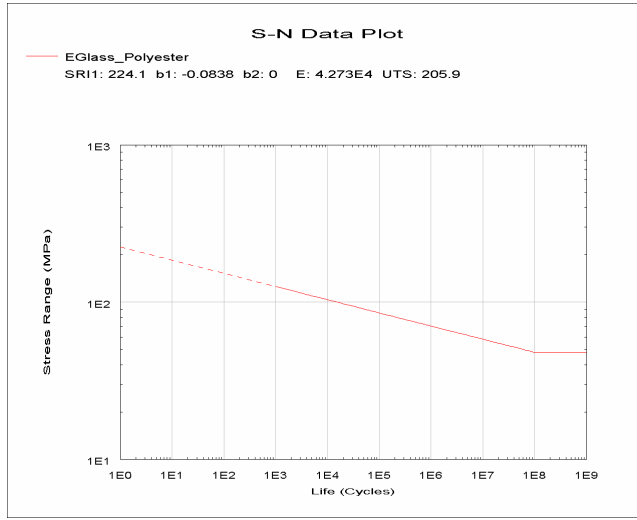
Şekil 7.5’de, test sonucunda 5mm’lik numune ve üç farklı oryantasyondan birincisi kullanılarak elde edilmiş Wöhler Eğrisini görülmektedir. Bu eğri test noktalarından uygun logaritmik eğrinin geçirilmesi ile oluşturulmuştur.

Bu eğri karakterini MSC Fatigue programına tanıtabilmek için öncelikle eğri üzerinde bir sonsuz ömür noktasına karar vermek gerekir. Bu çalışmada sonsuz ömür noktası 10^8 çevrim olarak kullanılmıştır. Bu noktadan sonra eğrinin eğiminin sıfır derece olduğu kabul edilmiştir. Sonrasında ise bu noktanın öncesindeki eğrinin eğimine ve y eksenini (Nominal Gerilme Eksenini) kestiği noktanın değerine ihtiyaç duyulmaktadır. Tüm bu verileri elde edebilmek için test sonucu elde edilen veri noktalarından bir üstel eğri geçirilmiştir (Şekil 7.6).

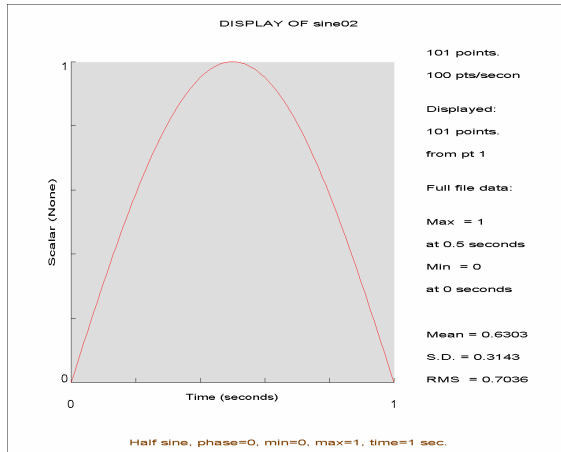


ŞEKİL 7.6. Test veri noktalarında üstel fonksiyon ile oluşturulmuş sonuç eğrileri

Oluşturulan üstel eğrilerin denklemlerindeki katsayı eğrinin y eksenini (Nominal Gerilme Eksenini) kestiği noktanın değerini, üstel sayı ise eğrinin eğimini vermektedir. Bu değerlerin MSC Fatigue programında yerine yazılması ile programda kullanılacak olan Wöhler Eğrisi oluşturulmuştur (Şekil 7.7).



ŞEKİL 7.7. MSC Fatigue programının oluşturduğu Wöhler eğrisi



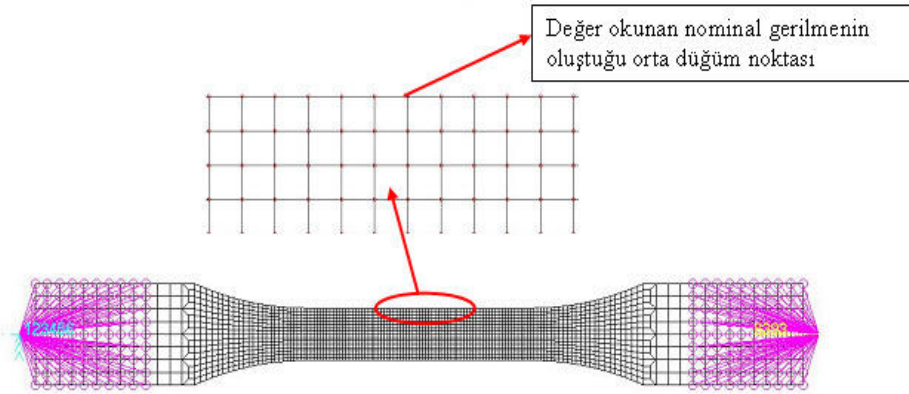
ŞEKİL 7.8. MSC Fatigue programının oluşturduğu yükleme eğrisi

Parçaya yük çekme ve bırakma şeklinde verilmektedir. Yüklemenin grafiksel gösterimi Şekil 7.8'deki gibidir.

Gerektiğinde MSC Fatigue programı ortalama gerilme düzeltmesini birkaç yöntem (Goodman, Gerber, Çoklu ortalama eğrileri gibi) ile yapabilmektedir. Fakat araştırmada Wöhler eğrisi ortalama gerilmenin sıfır olmadığı bir gerilme durumu için hesaplandığına göre (Şekil 7.8) ortalama gerilme düzeltmesi yapmak gerekmez.

Bütün bu veriler programa tanıtıldıktan sonra yorulma analizi MSC Nastran çözücü programında gerçekleştirilir. Sonuçlar MSC Patran programı ile son işleme tabi tutulur.

Sonuçları daha rahat kıyaslayabilmek için tek bir düğüm noktası üzerinden alınan gerilme değerini ve yorulma ömrü değerini kıyaslamak uygun olacaktır. Bu nedenle uygun bir düğüm noktası seçilmiştir. Seçilen bu düğüm noktası nominal gerilmenin görüldüğü parçanın tam orta noktasından alınmıştır (Şekil 7.9).



ŞEKİL 7.9. Parça üzerinde değer okunan kritik nokta

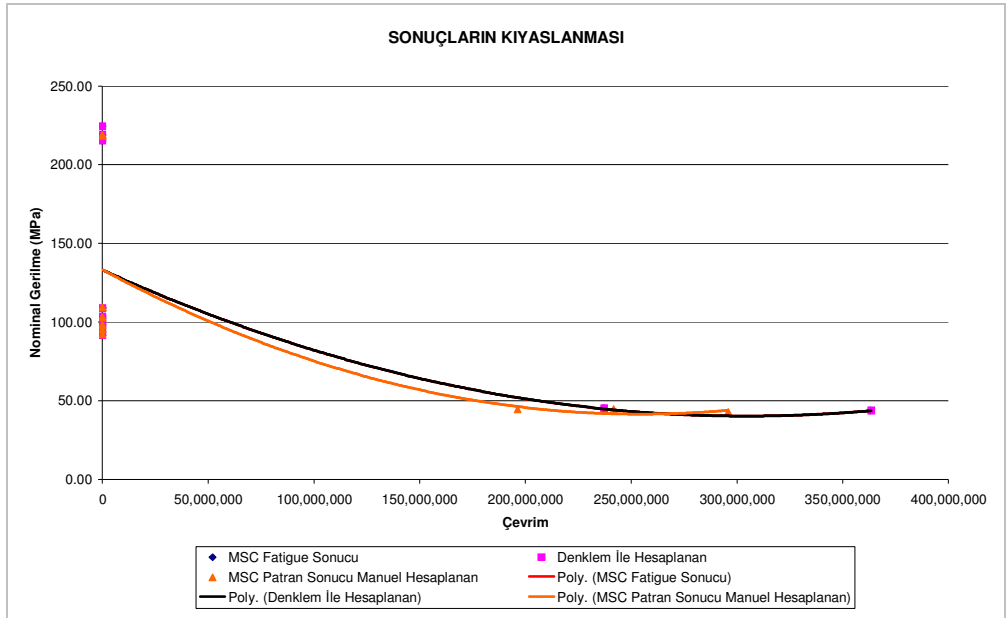
Tablo 7.1’de analiz edilen bir numunenin gerilme ve yorulma analiz sonuçları verilmektedir.

- “Max Principal” başlıklı sütun gerilme analizi sonucunda MSC Patran programının değer hesaplanan noktalardan ortalama olarak, düğüm noktalarında yeniden hesapladığı gerilme değerlerini göstermektedir (Tablo 7.2).
- “MSC Nastran” başlıklı sütun, gerilme analizi sonuçlarının MSC Nastran çözücü programı tarafından hesaplanmış, fakat MSC Patran son işlemci programı tarafından işlenmemiş ham gerilme sonuçlarını yani hesaplama noktalarındaki gerilme sonuçlarını göstermektedir (Tablo 7.2).

- “Çevrim” başlıklı sütun ise, MSC Fatigue programı tarafından hesaplanan yorulma çevrim değerlerini göstermektedir. Simülasyon sonucunda elde edilen çevrim sonuçları bu sütundakilerdir (Tablo 7.2).
- “Hesaplanan (Patran)” başlıklı sütun MSC Patran tarafından işlenmiş gerilme değerlerini (Max. Principal başlıklı sütun) MS Excel tarafından hesaplanan eğri denkleminde (sayfa 7) kullanınca, çıkan yorulma çevrim değerlerini göstermektedir (Tablo 7.2).
- “Hesaplanan (Nastran)” başlıklı sütun ise, MSC Nastran tarafından hesaplanmış ve işlenmemiş gerilme değerlerini (MSC Nastran başlıklı sütun) yine MS Excel tarafından hesaplanan eğri denkleminde (Şekil 7.6) yerine koyunca çıkan yorulma çevrim değerlerini göstermektedir (Tablo 7.2).

TABLO 7.2. Analiz sonucu çıkan ve hesaplanan gerilme ve yorulma değerleri

Katman	Açı	Kalınlık	Max Principal	MSC NASTRAN	Çevrim	Hesaplanan (Patran)	Hesaplanan (Nastran)
Üst			109,00 MPa	109,38 MPa	5.218	5.447	5.226
Alt			109,00 MPa	109,38 MPa	5.218	5.447	5.226
1	0	0,428	224,46 MPa	218,75 MPa	1	1	1
2	90	0,428	45,25 MPa	44,53 MPa	Kırılmadı	196.256.825	237.345.446
3	-45	0,531	93,89 MPa	95,31 MPa	26.958	32.309	27.014
4	45	0,531	103,81 MPa	103,13 MPa	10.530	9.747	10.546
5	-45	0,225	97,59 MPa	98,44 MPa	18.344	20.386	18.382
6	90	0,225	44,46 MPa	44,53 MPa	Kırılmadı	241.739.835	237.345.446
7	45	0,225	98,62 MPa	98,44 MPa	18.344	17.988	18.382
8	0	0,272	219,03 MPa	218,75 MPa	Kırıldı	1	1
9	-45	0,531	102,23 MPa	103,13 MPa	10.530	11.705	10.546
10	45	0,531	91,40 MPa	92,19 MPa	40.129	44.578	40.212
11	90	0,428	43,72 MPa	42,97 MPa	Kırılmadı	295.952.365	363.438.589
12	0	0,428	215,10 MPa	218,75 MPa	1	2	1



ŞEKİL 7.10. Hesaplanan ve analiz programının bulduğu sonuçların kıyaslanması

Açıkça görülmektedir ki gerilmedeki küçük sayılabilecek bir değişim eğri bir üstel fonksiyon olduğu için çevrim hesabında büyük farklar oluşturabilmektedir. Bunun yanı sıra görülen bir diğer husus ise, MSC Fatigue programının basit bir hesap yöntemiyle Wöhler eğrisi üzerinden düğüm noktalarındaki gerilmelere karşılık gelen çevrim değerlerini bulduğudur. Fakat bunu büyük geometrilere binlerce düğüm noktasında yapabildiğini düşünürsek, işlemlerimizi ne kadar hızlandırdığını anlayabiliriz. Ayrıca program yardımı ile parça üzerindeki yorulma ömrü dağılımını görmek de mümkündür. Bunun yanında katman bazında gerilme ve yorulma dağılımında görülebilmesini mümkün kıldığı için dizayn aşamasında katmanların ne şekilde ve ne kadar kullanılması gerektiğinin anlaşılmasını sağlamaktadır.

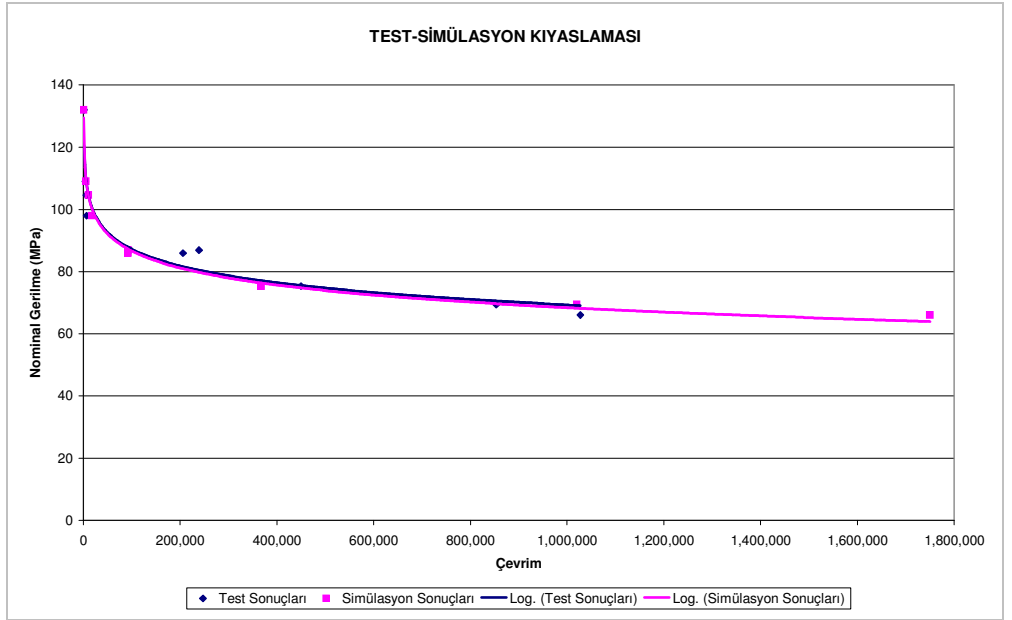
Test sonucunda görülen yorulma çevrimi değeri 4030 çevrim iken, paket programlar yardımıyla hesaplanan değer 5218 çevrimdir. Bu aradaki fark test veri noktalarından eğri geçirirken nokta ve eğri arasındaki farktan kaynaklanmaktadır.

Ayrıca, sonlu elemanlar yönteminin kesin sonuçlar bulmak için değil de iki farklı parça arasında test yapılmaksızın kıyaslama yapabilmek amacı ile kullanıldığı unutulmamalıdır. Bu test ve analiz sonucunda bu bölümde anlatılan kalibre edilmiş yöntem ile kompozitlerde yorulma analizi kıyaslaması yapmak mümkün olmuştur.

Bu sonlu elemanlar yöntemi, bazı 5mm'lik test numunelerine uygulanmış ve sonuçlar Tablo 7.3'de verilmiştir.

TABLO 7.3. 5mm'lik test numunelerinden bazılarının analiz sonuçları

Numune Adı	ÇEVİRİM SAYISI	
	Test Sonucu	Programda Hesaplanan
F_05_A_00_04_780	1.400	447
F_05_A_00_05_770	4.030	5.218
F_05_A_00_06_765	5.752	10.530
F_05_A_00_07_765	7.079	18.344
F_05_A_00_08_780	206.321	92.700
F_05_A_00_09_771	239.052	92.700
F_05_A_00_10_773	450.000	368.000
F_05_A_00_11_771	854.028	1.020.000
F_05_A_00_12_765	1.027.600	1.750.000



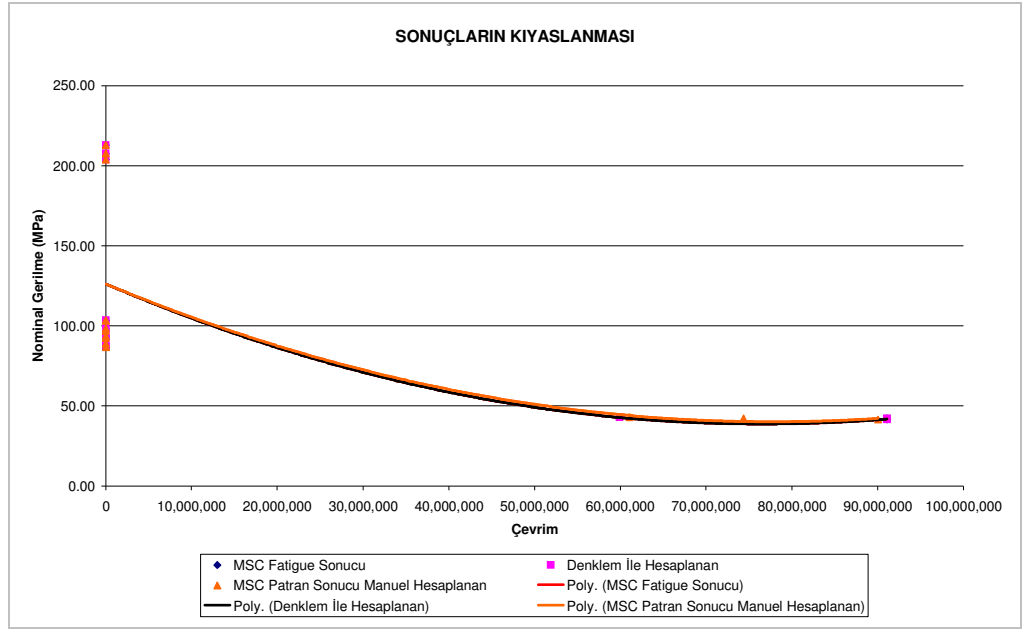
ŞEKİL 7.11. Test sonucunda elde edilen ve analiz programının bulduğu sonuçların kıyaslanması

Kullanılan bu yöntemde sadece girilen Wöhler Eğrisinin havada değil de tuzlu ortamda elde edilmiş olanı programa tanıtılarak kompozitlerin tuzlu ortamda yorulma analizlerini simüle edebilmek mümkündür.

Bu yöntemle kompozit malzemenin deniz ortamında yapılmış yorulma analizi sonuçları Tablo 7.4’de verilmiştir.

TABLO 7.4. Deniz ortamındaki numune için analiz sonucu çıkan ve hesaplanan gerilme ve yorulma değerleri

Katman	Açı	Kalınlık	Max Principal	MSC FATIGUE			POWER CURVE CALCULATION	
				MSC NASTRAN	Çevrim		Hesaplanan(Patran)	Hesaplanan(Nastran)
Üst			103,32 MPa	103,13 MPa	2.996		2.931	2.994
Alt			103,32 MPa	103,13 MPa	2.996		2.931	2.994
1	0	0,482	212,80 MPa	218,75 MPa	1		1	1
2	90	0,482	42,90 MPa	42,97 MPa	59.900.000		61.071.415	59.910.054
3	-45	0,531	89,02 MPa	89,06 MPa	15.730		15.822	15.729
4	45	0,531	98,42 MPa	98,44 MPa	5.070		5.078	5.070
5	-45	0,225	92,53 MPa	92,19 MPa	10.649		10.218	10.648
6	90	0,225	42,16 MPa	41,41 MPa	91.100.000		74.373.653	91.103.604
7	45	0,225	93,50 MPa	92,19 MPa	10.649		9.078	10.648
8	0	0,273	207,66 MPa	206,25 MPa	1		1	1
9	-45	0,531	96,93 MPa	98,44 MPa	5.070		6.036	5.070
10	45	0,531	86,66 MPa	85,94 MPa	23.562		21.444	23.560
11	90	0,482	41,45 MPa	41,41 MPa	91.100.000		90.027.944	91.103.604
12	0	0,482	203,95 MPa	206,25 MPa	1		1	1
Test	5.000	Çevrim						



ŞEKİL 7.12. Deniz ortamındaki numune için test sonucunda elde edilen ve analiz programının bulduğu sonuçların kıyaslanması

7.2 TEST EDİLEN NUMUNELERİN SONLU ELEMANLAR ANALİZ SONUÇLARI

Test edilen diğer numunelerin sonlu elemanlar analizi sonuçları bu bölümde verilmiştir. Test numunesi adındaki A harfi havada test edilen numuneleri, S harfi ise tuzlu ortamda test edilen numuneleri göstermektedir. Bölüm 7’de havada test edilen numuneler için anlatılan sonlu elemanlar analizi koşulları deniz ortamı için sadece Wöhler eğrisi değiştirilerek aynen uygulanmıştır. Sonuçlar Tablo 7.5 – 7.22’de verilmiştir.

TABLO 7.5. F 05 A 00 04 780 kodlu numunenin analiz sonuçları

TEST NUMUNESİ F 05 A 00 04 780			MSC FATIGUE				ÜSTEL EĞRİ İLE HESAPLAMA			
KATMAN	Açı	Kalınlık	Max Principal		Gerilme Değeri		Çevrim	Hesaplanan (Patran)	Hesaplanan (Nastran)	% (*)
Alt			132,00	MPa	134,38	MPa	447	555	448	0,245
Üst			132,00	MPa	134,38	MPa	447	555	448	0,245
1	0	0,482	271,82	MPa	268,75	MPa	1	0	0	
2	90	0,482	54,79	MPa	54,69	MPa	20.400.000	19.980.885	20.445.071	0,221
3	-45	0,531	113,71	MPa	115,63	MPa	2.688	3.289	2.693	0,172
4	45	0,531	125,72	MPa	128,13	MPa	790	992	791	0,130
5	-45	0,225	118,18	MPa	115,63	MPa	2.688	2.075	2.693	0,172
6	90	0,225	53,84	MPa	54,69	MPa	20.400.000	24.611.371	20.445.071	0,221
7	45	0,225	119,43	MPa	121,88	MPa	1.434	1.831	1.437	0,187
8	0	0,273	265,24	MPa	268,75	MPa	1	0	0	
9	-45	0,531	123,80	MPa	121,88	MPa	1.434	1.192	1.437	0,187
10	45	0,531	110,68	MPa	109,38	MPa	5.218	4.538	5.226	0,150
11	90	0,482	52,94	MPa	51,56	MPa	41.200.000	30.130.859	41.259.820	0,145
12	0	0,482	260,49	MPa	256,25	MPa	1	0	0	
Test Sonucu								1400	Çevrim	

* Yüzde sütunu hesaplanan (NASTRAN) değeri ile MSC Fatigue programının bulduğu çevrim değerleri arasındaki farkın oranını göstermektedir.

TABLO 7.6. F 05 A 00 05 770 kodlu numunenin analiz sonuçları

TEST NUMUNESİ F 05 A 00 05 770			MSC FATIGUE					ÜSTEL EĞRİ İLE HESAPLAMA		
KATMAN	Açı	Kalınlık	Max Principal		Gerilme Değeri		Çevrim	Hesaplanan (Patran)	Hesaplanan (Nastran)	% (*)
Alt			109,00	MPa	109,38	MPa	5.218	5.447	5.226	0,150
Üst			109,00	MPa	109,38	MPa	5.218	5.447	5.226	0,150
1	0	0,428	224,46	MPa	218,75	MPa	1	1	1	
2	90	0,428	45,25	MPa	44,53	MPa	Kırılmadı	196.256.825	237.345.446	
3	-45	0,531	93,89	MPa	95,31	MPa	26.958	32.309	27.014	0,208
4	45	0,531	103,81	MPa	103,13	MPa	10.530	9.747	10.546	0,151
5	-45	0,225	97,59	MPa	98,44	MPa	18.344	20.386	18.382	0,208
6	90	0,225	44,46	MPa	44,53	MPa	Kırılmadı	241.739.835	237.345.446	
7	45	0,225	98,62	MPa	98,44	MPa	18.344	17.988	18.382	0,208
8	0	0,272	219,03	MPa	218,75	MPa	1	1	1	
9	-45	0,531	102,23	MPa	103,13	MPa	10.530	11.705	10.546	0,151
10	45	0,531	91,40	MPa	92,19	MPa	40.129	44.578	40.212	0,207
11	90	0,428	43,72	MPa	42,97	MPa	Kırılmadı	295.952.365	363.438.589	
12	0	0,428	215,10	MPa	218,75	MPa	1	2	1	

Test Sonucu

4030

Çevrim

* Yüzde sütunu hesaplanan (NASTRAN) değeri ile MSC Fatigue programının bulduğu çevrim değerleri arasındaki farkın oranını göstermektedir.

TABLO 7.7. F 05 A 00 06 765 kodlu numunenin analiz sonuçları

TEST NUMUNESİ F 05 A 00 06 765			MSC FATIGUE					ÜSTEL EĞRİ İLE HESAPLAMA		
KATMAN	Açı	Kalınlık	Max Principal		Gerilme Değeri		Çevrim	Hesaplanan (Patran)	Hesaplanan (Nastran)	% (*)
Alt			104,62	MPa	103,13	MPa	10.530	8.884	10.546	0,151
Üst			104,62	MPa	103,13	MPa	10.530	8.884	10.546	0,151
1	0	0,482	215,47	MPa	218,75	MPa	1	2	1	
2	90	0,482	43,44	MPa	42,97	MPa	Kırılmadı	319.519.962	363.438.589	
3	-45	0,531	90,14	MPa	89,06	MPa	60.600	52.608	60.685	0,140
4	45	0,531	99,66	MPa	98,44	MPa	18.344	15.862	18.382	0,208
5	-45	0,225	93,69	MPa	92,19	MPa	40.129	33.168	40.212	0,207
6	90	0,225	42,69	MPa	42,97	MPa	Kırılmadı	393.349.356	363.438.589	
7	45	0,225	94,67	MPa	95,31	MPa	26.958	29.278	27.014	0,208
8	0	0,273	210,27	MPa	206,25	MPa	1	2	3	
9	-45	0,531	98,15	MPa	98,44	MPa	18.344	19.036	18.382	0,208
10	45	0,531	87,74	MPa	89,06	MPa	60.600	72.504	60.685	0,140
11	90	0,482	41,97	MPa	41,41	MPa	Kırılmadı	481.159.241	565.534.763	
12	0	0,482	206,52	MPa	206,25	MPa	1	3	3	

Test Sonucu

5752

Çevrim

* Yüzde sütunu hesaplanan (NASTRAN) değeri ile MSC Fatigue programının bulduğu çevrim değerleri arasındaki farkın oranını göstermektedir.

TABLO 7.8. F 05 A 00 07 765 kodlu numunenin analiz sonuçları

TEST NUMUNESİ F 05 A 00 07 765			MSC FATIGUE				ÜSTEL EĞRİ İLE HESAPLAMA		
KATMAN	Açı	Kalınlık	Max Principal		Gerilme Değeri	Çevrim	Hesaplanan (Patran)	Hesaplanan (Nastran)	% (*)
Alt			98,02	MPa	98,44	MPa	18.344	18.382	0,208
Üst			98,02	MPa	98,44	MPa	18.344	18.382	0,208
1	0	0,482	201,87	MPa	206,25	MPa	1	3	
2	90	0,482	40,69	MPa	41,41	MPa	Kırılmadı	695.565.560	
3	-45	0,531	84,45	MPa	85,94	MPa	92.700	92.937	0,255
4	45	0,531	93,37	MPa	92,19	MPa	40.129	34.530	0,207
5	-45	0,225	87,78	MPa	89,06	MPa	60.600	72.203	0,140
6	90	0,225	39,99	MPa	39,84	MPa	Kırılmadı	856.285.640	
7	45	0,225	88,70	MPa	89,06	MPa	60.600	63.735	0,140
8	0	0,273	197,00	MPa	196,88	MPa	5	5	-0,011
9	-45	0,531	91,96	MPa	92,19	MPa	40.129	41.439	0,207
10	45	0,531	82,21	MPa	82,81	MPa	144.000	157.834	0,413
11	90	0,482	39,32	MPa	39,84	MPa	Kırılmadı	1.047.441.095	
12	0	0,482	193,48	MPa	190,63	MPa	7	6	0,090

Test Sonucu

7079

Çevrim

* Yüzde sütunu hesaplanan (NASTRAN) değeri ile MSC Fatigue programının bulduğu çevrim değerleri arasındaki farkın oranını göstermektedir.

TABLO 7.9. F 05 A 00 08 780 kodlu numunenin analiz sonuçları

TEST NUMUNESİ F 05 A 00 08 780			MSC FATIGUE					ÜSTEL EĞRİ İLE HESAPLAMA		
KATMAN	Açı	Kalınlık	Max Principal		Gerilme Değeri		Çevrim	Hesaplanan (Patran)	Hesaplanan (Nastran)	% (*)
Alt			86,00	MPa	85,94	MPa	92.700	92.139	92.937	0,255
Üst			86,00	MPa	85,94	MPa	92.700	92.136	92.937	0,255
1	0	0,482	177,09	MPa	178,13	MPa	15	17	16	3,426
2	90	0,482	35,70	MPa	35,16	MPa	1	3.319.598.182	3.985.439.992	
3	-45	0,531	74,08	MPa	73,44	MPa	605.000	546.436	606.455	0,241
4	45	0,531	81,91	MPa	82,81	MPa	144.000	164.868	144.595	0,413
5	-45	0,225	77,00	MPa	76,56	MPa	368.000	344.807	368.834	0,227
6	90	0,225	35,08	MPa	35,16	MPa	1	4.088.905.951	3.985.439.992	
7	45	0,225	77,81	MPa	76,56	MPa	368.000	304.264	368.834	0,227
8	0	0,273	172,81	MPa	171,88	MPa	24	22	24	-1,005
9	-45	0,531	80,66	MPa	79,69	MPa	228.000	197.989	228.825	0,362
10	45	0,531	72,11	MPa	73,44	MPa	605.000	753.942	606.455	0,241
11	90	0,482	34,49	MPa	35,16	MPa	1	5.005.911.804	3.985.439.992	
12	0	0,482	169,71	MPa	171,88	MPa	24	28	24	-1,005
Test Sonucu							206.321	Çevrim		

* Yüzde sütunu hesaplanan (NASTRAN) değeri ile MSC Fatigue programının bulduğu çevrim değerleri arasındaki farkın oranını göstermektedir.

TABLO 7.10. F 05 A 00 09 771 kodlu numunenin analiz sonuçları

TEST NUMUNESİ F 05 A 00 09 771			MSC FATIGUE				ÜSTEL EĞRİ İLE HESAPLAMA			
KATMAN	Açı	Kalınlık	Max Principal		Gerilme Değeri		Çevrim	Hesaplanan (Patran)	Hesaplanan (Nastran)	% (*)
Alt			86,92	MPa	85,94	MPa	92.700	81.180	92.937	0,255
Üst			86,92	MPa	85,94	MPa	92.700	81.177	92.937	0,255
1	0	0,482	179,01	MPa	178,13	MPa	15	15	16	3,426
2	90	0,482	36,08	MPa	36,72	MPa	Kırılmadı	2.919.570.475	2.371.603.233	
3	-45	0,531	74,88	MPa	73,44	MPa	605.000	480.669	606.455	0,241
4	45	0,531	82,80	MPa	82,81	MPa	144.000	144.942	144.595	0,413
5	-45	0,225	77,83	MPa	76,56	MPa	368.000	303.059	368.834	0,227
6	90	0,225	35,46	MPa	35,16	MPa	Kırılmadı	3.594.164.265	3.985.439.992	
7	45	0,225	78,65	MPa	79,69	MPa	228.000	267.518	228.825	0,362
8	0	0,273	174,69	MPa	171,88	MPa	24	20	24	-1,005
9	-45	0,531	81,54	MPa	82,81	MPa	144.000	173.940	144.595	0,413
10	45	0,531	72,90	MPa	73,44	MPa	605.000	662.458	606.455	0,241
11	90	0,482	34,87	MPa	35,16	MPa	Kırılmadı	4.396.523.417	3.985.439.992	
12	0	0,482	171,57	MPa	171,88	MPa	24	24	24	-1,005

Test Sonucu

239.052

Çevrim

* Yüzde sütunu hesaplanan (NASTRAN) değeri ile MSC Fatigue programının bulduğu çevrim değerleri arasındaki farkın oranını göstermektedir.

TABLO 7.11. F 05 A 00 10 773 kodlu numunenin analiz sonuçları

TEST NUMUNESİ F 05 A 00 10 773			MSC FATIGUE					ÜSTEL EGRI İLE HESAPLAMA		
KATMAN	Açı	Kalınlık	Max Principal		Gerilme Değeri		Çevrim	Hesaplanan (Patran)	Hesaplanan (Nastran)	% (*)
Alt			75,32	MPa	76,56	MPa	368.000	448.455	368.834	0,227
Üst			75,32	MPa	76,56	MPa	368.000	448.442	368.834	0,227
1	0	0,482	155,12	MPa	153,13	MPa	94	81	94	0,305
2	90	0,482	31,27	MPa	32,03	MPa	Kırılmadı	16.128.364.478	12.103.809.457	
3	-45	0,531	64,89	MPa	64,06	MPa	3.090.000	2.655.282	3.094.552	0,147
4	45	0,531	71,75	MPa	70,31	MPa	1.020.000	800.698	1.018.965	-0,101
5	-45	0,225	67,45	MPa	67,19	MPa	1.750.000	1.674.158	1.752.939	0,168
6	90	0,225	30,73	MPa	30,47	MPa	Kırılmadı	19.854.962.806	21.979.544.948	
7	45	0,225	68,16	MPa	67,19	MPa	1.750.000	1.477.831	1.752.939	0,168
8	0	0,273	151,38	MPa	153,13	MPa	94	108	94	0,305
9	-45	0,531	70,66	MPa	70,31	MPa	1.020.000	960.893	1.018.965	-0,101
10	45	0,531	63,17	MPa	76,56	MPa	368.000	3.659.500	368.834	0,227
11	90	0,482	30,22	MPa	30,47	MPa	Kırılmadı	24.287.418.703	21.979.544.948	
12	0	0,482	148,67	MPa	146,88	MPa	155	134	155	0,019

Test Sonucu

450.000

Çevrim

* Yüzde sütunu hesaplanan (NASTRAN) değeri ile MSC Fatigue programının bulduğu çevrim değerleri arasındaki farkın oranını göstermektedir.

TABLO 7.12. F 05 A 00 10 771 kodlu numunenin analiz sonuçları

TEST NUMUNESİ F 05 A 00 11 771			MSC FATIGUE				ÜSTEL EĞRİ İLE HESAPLAMA			
KATMAN	Açı	Kalınlık	Max Principal		Gerilme Değeri		Çevrim	Hesaplanan (Patran)	Hesaplanan (Nastran)	% (*)
Alt			69,42	MPa	70,31	MPa	1.020.000	1.187.411	1.018.965	-0,101
Üst			69,42	MPa	70,31	MPa	1.020.000	1.187.377	1.018.965	-0,101
1	0	0,482	142,97	MPa	140,63	MPa	260	214	260	0,183
2	90	0,482	28,82	MPa	28,91	MPa	Kırılmadı	42.704.344.595	41.203.376.561	
3	-45	0,531	59,81	MPa	60,94	MPa	5.610.000	7.030.713	5.620.505	0,187
4	45	0,531	66,13	MPa	67,19	MPa	1.750.000	2.120.051	1.752.939	0,168
5	-45	0,225	62,16	MPa	60,94	MPa	5.610.000	4.432.826	5.620.505	0,187
6	90	0,225	28,32	MPa	28,91	MPa	Kırılmadı	52.571.637.407	41.203.376.561	
7	45	0,225	62,82	MPa	64,06	MPa	3.090.000	3.912.980	3.094.552	0,147
8	0	0,273	139,52	MPa	140,63	MPa	260	286	260	0,183
9	-45	0,531	65,12	MPa	64,06	MPa	3.090.000	2.544.208	3.094.552	0,147
10	45	0,531	58,22	MPa	57,81	MPa	10.500.000	9.689.720	10.534.157	0,325
11	90	0,482	27,85	MPa	27,34	MPa	Kırılmadı	64.307.700.194	79.952.492.516	
12	0	0,482	137,02	MPa	134,38	MPa	447	355	448	0,245
							Test Sonucu	854.028	Çevrim	

* Yüzde sütunu hesaplanan (NASTRAN) değeri ile MSC Fatigue programının bulduğu çevrim değerleri arasındaki farkın oranını göstermektedir.

TABLO 7.13. F 05 A 00 12 765 kodlu numunenin analiz sonuçları

TEST NUMUNESİ F 05 A 00 12 765			MSC FATIGUE					ÜSTEL EĞRİ İLE HESAPLAMA		
KATMAN	Açı	Kalınlık	Max Principal		Gerilme Değeri		Çevrim	Hesaplanan (Patran)	Hesaplanan (Nastran)	% (*)
Alt			66,01	MPa	67,19	MPa	1.750.000	2.163.627	1.752.939	0,168
Üst			66,01	MPa	67,19	MPa	1.750.000	2.163.565	1.752.939	0,168
1	0	0,482	135,95	MPa	134,38	MPa	447	390	448	0,245
2	90	0,482	27,41	MPa	27,34	MPa	Kırılmadı	77.812.816.917	79.952.492.516	
3	-45	0,531	56,87	MPa	57,81	MPa	10.500.000	12.811.525	10.534.157	0,325
4	45	0,531	62,88	MPa	64,06	MPa	3.090.000	3.862.906	3.094.552	0,147
5	-45	0,225	59,11	MPa	57,81	MPa	10.500.000	8.077.302	10.534.157	0,325
6	90	0,225	26,93	MPa	27,34	MPa	Kırılmadı	95.792.519.850	79.952.492.516	
7	45	0,225	59,74	MPa	60,94	MPa	5.610.000	7.129.987	5.620.505	0,187
8	0	0,273	132,68	MPa	134,38	MPa	447	522	448	0,245
9	-45	0,531	61,93	MPa	60,94	MPa	5.610.000	4.635.753	5.620.505	0,187
10	45	0,531	55,36	MPa	54,69	MPa	20.400.000	17.656.861	20.445.071	0,221
11	90	0,482	26,48	MPa	25,78	MPa	Kırılmadı	117.176.964.411	161.387.994.888	
12	0	0,482	130,31	MPa	128,13	MPa	790	647	791	0,130

Test Sonucu 1.027.600 Çevrim

* Yüzde sütunu hesaplanan (NASTRAN) değeri ile MSC Fatigue programının bulduğu çevrim değerleri arasındaki farkın oranını göstermektedir.

TABLO 7.14. F 05 S 00 04 769 kodlu numunenin analiz sonuçları

TEST NUMUNESİ F 05 S 00 04 769			MSC FATIGUE				ÜSTEL EĞRİ İLE HESAPLAMA			
KATMAN	Açı	Kalınlık	Max Principal	Gerilme Değeri		Çevrim	Hesaplanan (Patran)	Hesaplanan (Nastran)	% (*)	
Alt			103,32	MPa	103,13	MPa	3.002	2.931	2.994	-0,265
Üst			103,32	MPa	103,13	MPa	3.002	2.931	2.994	-0,265
1	0	0,482	212,80	MPa	218,75	MPa	1	1	1	
2	90	0,482	42,90	MPa	42,97	MPa	60.000.000	61.071.415	59.910.054	-0,150
3	-45	0,531	89,02	MPa	89,06	MPa	15.764	15.822	15.729	-0,221
4	45	0,531	98,42	MPa	98,44	MPa	5.081	5.078	5.070	-0,215
5	-45	0,225	92,53	MPa	92,19	MPa	10.672	10.218	10.648	-0,221
6	90	0,225	42,16	MPa	41,41	MPa	91.300.000	74.373.653	91.103.604	-0,215
7	45	0,225	93,50	MPa	92,19	MPa	10.672	9.078	10.648	-0,221
8	0	0,273	207,66	MPa	206,25	MPa	1	1	1	
9	-45	0,531	96,93	MPa	98,44	MPa	5.081	6.036	5.070	-0,215
10	45	0,531	86,66	MPa	85,94	MPa	23.613	21.444	23.560	-0,223
11	90	0,482	41,45	MPa	41,41	MPa	91.300.000	90.027.944	91.103.604	-0,215
12	0	0,482	203,95	MPa	206,25	MPa	1	1	1	
Test Sonucu							5.000	Çevrim		

* Yüzde sütunu hesaplanan (NASTRAN) değeri ile MSC Fatigue programının bulduğu çevrim değerleri arasındaki farkın oranını göstermektedir.

TABLO 7.15. F 05 S 00 05 776 kodlu numunenin analiz sonuçları

TEST NUMUNESİ F 05 S 00 05 776			MSC FATIGUE					ÜSTEL EĞRİ İLE HESAPLAMA		
KATMAN	Açı	Kalınlık	Max Principal		Gerilme Değeri		Çevrim	Hesaplanan (Patran)	Hesaplanan (Nastran)	%
Alt			81,52	MPa	82,81	MPa	35.903	42.813	35.823	-0,223
Üst			81,51	MPa	82,81	MPa	35.903	42.889	35.823	-0,223
1	0	0,482	167,88	MPa	165,63	MPa	14	12	14	0,600
2	90	0,482	33,84	MPa	33,59	MPa	Kırılmadı	892.327.589	969.845.430	
3	-45	0,531	70,23	MPa	70,31	MPa	229.000	231.288	228.054	-0,413
4	45	0,531	77,65	MPa	76,56	MPa	87.200	74.198	87.031	-0,194
5	-45	0,225	72,99	MPa	73,44	MPa	140.000	149.373	139.446	-0,396
6	90	0,225	33,26	MPa	33,59	MPa	Kırılmadı	1.087.225.986	969.845.430	
7	45	0,225	73,76	MPa	73,44	MPa	140.000	132.715	139.446	-0,396
8	0	0,273	163,82	MPa	165,63	MPa	14	16	14	0,600
9	-45	0,531	76,47	MPa	76,56	MPa	87.200	88.246	87.031	-0,194
10	45	0,531	68,36	MPa	67,19	MPa	382.000	313.738	381.405	-0,156
11	90	0,482	32,70	MPa	32,03	MPa	Kırılmadı	1.316.793.539	1.662.517.033	
12	0	0,482	160,89	MPa	159,38	MPa	22	20	22	-1,082

Test Sonucu

19.200

Çevrim

* Yüzde sütunu hesaplanan (NASTRAN) değeri ile MSC Fatigue programının bulduğu çevrim değerleri arasındaki farkın oranını göstermektedir.

TABLO 7.16. F 05 S 00 06 782 kodlu numunenin analiz sonuçları

TEST NUMUNESİ										
F 05 S 00 06 782					MSC FATIGUE		ÜSTEL EĞRİ İLE HESAPLAMA			
KATMAN	Açı	Kalınlık	Max Principal		Gerilme Değeri	Çevrim	Hesaplanan (Patran)	Hesaplanan (Nastran)	% (*)	
<i>Alt</i>			76,74	MPa	76,56	MPa	87.200	84.777	87.031	-0,194
<i>Üst</i>			76,74	MPa	76,56	MPa	87.200	84.775	87.031	-0,194
<i>1</i>	0	0,482	158,05	MPa	159,38	MPa	22	24	22	-1,082
<i>2</i>	90	0,482	31,86	MPa	32,03	MPa	Kırılmadı	1.766.201.771	1.662.517.033	
<i>3</i>	-45	0,531	66,11	MPa	67,19	MPa	382.000	457.949	381.405	-0,156
<i>4</i>	45	0,531	73,11	MPa	73,44	MPa	140.000	146.789	139.446	-0,396
<i>5</i>	-45	0,225	68,72	MPa	67,19	MPa	382.000	295.570	381.405	-0,156
<i>6</i>	90	0,225	31,31	MPa	32,03	MPa	Kırılmadı	2.151.005.554	1.662.517.033	
<i>7</i>	45	0,225	69,44	MPa	70,31	MPa	229.000	262.564	228.054	-0,413
<i>8</i>	0	0,273	154,24	MPa	153,13	MPa	34	32	34	0,635
<i>9</i>	-45	0,531	72,00	MPa	73,44	MPa	140.000	174.490	139.446	-0,396
<i>10</i>	45	0,531	64,36	MPa	64,06	MPa	655.000	620.722	653.691	-0,200
<i>11</i>	90	0,482	30,79	MPa	30,47	MPa	Kırılmadı	2.603.644.964	2.926.714.227	
<i>12</i>	0	0,482	151,48	MPa	153,13	MPa	34	39	34	0,635
								Test Sonucu	50.500	Çevrim

* Yüzde sütunu hesaplanan (NASTRAN) değeri ile MSC Fatigue programının bulduğu çevrim değerleri arasındaki farkın oranını göstermektedir.

TABLO 7.17. F 05 S 00 07 774 kodlu numunenin analiz sonuçları

TEST NUMUNESİ F 05 S 00 07 774			MSC FATIGUE				ÜSTEL EĞRİ İLE HESAPLAMA			
KATMAN	Açı	Kalınlık	Max Principal		Gerilme Değeri		Çevrim	Hesaplanan (Patran)	Hesaplanan (Nastran)	% (*)
Alt			74,91	MPa	73,44	MPa	140.000	111.377	139.446	-0,396
Üst			74,91	MPa	73,44	MPa	140.000	111.374	139.446	-0,396
1	0	0,482	154,28	MPa	153,13	MPa	34	31	34	0,635
2	90	0,482	31,10	MPa	30,47	MPa	Kırılmadı	2.320.578.523	2.926.714.227	
3	-45	0,531	64,54	MPa	64,06	MPa	655.000	601.160	653.691	-0,200
4	45	0,531	71,36	MPa	70,31	MPa	229.000	192.951	228.054	-0,413
5	-45	0,225	67,08	MPa	67,19	MPa	382.000	388.243	381.405	-0,156
6	90	0,225	30,56	MPa	30,47	MPa	Kırılmadı	2.826.032.359	2.926.714.227	
7	45	0,225	67,79	MPa	67,19	MPa	382.000	344.946	381.405	-0,156
8	0	0,273	150,56	MPa	153,13	MPa	34	41	34	0,635
9	-45	0,531	70,28	MPa	70,31	MPa	229.000	229.367	228.054	-0,413
10	45	0,531	62,83	MPa	64,06	MPa	655.000	814.803	653.691	-0,200
11	90	0,482	30,05	MPa	30,47	MPa	Kırılmadı	3.420.864.385	2.926.714.227	
12	0	0,482	147,87	MPa	146,88	MPa	55	51	55	-0,324
Test Sonucu								185.241	Çevrim	

* Yüzde sütunu hesaplanan (NASTRAN) değeri ile MSC Fatigue programının bulduğu çevrim değerleri arasındaki farkın oranını göstermektedir.

TABLO 7.18. F 05 S 00 08 769 kodlu numunenin analiz sonuçları

TEST NUMUNESİ F 05 S 00 08 769			MSC FATIGUE				ÜSTEL EĞRİ İLE HESAPLAMA			
KATMAN	Açı	Kalınlık	Max Principal		Gerilme Değeri		Çevrim	Hesaplanan (Patran)	Hesaplanan (Nastran)	% (*)
Alt			73,21	MPa	73,44	MPa	140.000	144.356	139.446	-0,396
Üst			73,21	MPa	73,44	MPa	140.000	144.352	139.446	-0,396
1	0	0,482	150,78	MPa	153,13	MPa	34	41	34	0,635
2	90	0,482	30,40	MPa	30,47	MPa	Kırılmadı	3.007.709.900	2.926.714.227	
3	-45	0,531	63,08	MPa	64,06	MPa	655.000	779.198	653.691	-0,200
4	45	0,531	69,74	MPa	70,31	MPa	229.000	250.079	228.054	-0,413
5	-45	0,225	65,56	MPa	64,06	MPa	655.000	503.209	653.691	-0,200
6	90	0,225	29,87	MPa	30,47	MPa	Kırılmadı	3.662.836.994	2.926.714.227	
7	45	0,225	66,25	MPa	67,19	MPa	382.000	447.087	381.405	-0,156
8	0	0,273	147,15	MPa	146,88	MPa	55	54	55	-0,324
9	-45	0,531	68,68	MPa	67,19	MPa	382.000	297.277	381.405	-0,156
10	45	0,531	61,40	MPa	60,94	MPa	1.150.000	1.056.114	1.150.969	0,084
11	90	0,482	29,37	MPa	28,91	MPa	Kırılmadı	4.433.793.971	5.309.981.601	
12	0	0,482	144,52	MPa	146,88	MPa	55	66	55	-0,324
Test Sonucu							251.123	Çevrim		

* Yüzde sütunu hesaplanan (NASTRAN) değeri ile MSC Fatigue programının bulduğu çevrim değerleri arasındaki farkın oranını göstermektedir.

TABLO 7.19. F 05 S 00 09 774 kodlu numunenin analiz sonuçları

TEST NUMUNESİ F 05 S 00 09 774			MSC FATIGUE				ÜSTEL EĞRİ İLE HESAPLAMA			
KATMAN	Açı	Kalınlık	Max Principal		Gerilme Değeri		Çevrim	Hesaplanan (Patran)	Hesaplanan (Nastran)	% (*)
Alt			69,02	MPa	70,31	MPa	229.000	281.379	228.054	-0,413
Üst			69,02	MPa	70,31	MPa	229.000	281.371	228.054	-0,413
1	0	0,482	142,14	MPa	140,63	MPa	90	79	90	-0,382
2	90	0,482	28,65	MPa	28,91	MPa	Kırılmadı	5.862.641.150	5.309.981.601	
3	-45	0,531	59,46	MPa	60,94	MPa	1.150.000	1.518.754	1.150.969	0,084
4	45	0,531	65,75	MPa	67,19	MPa	382.000	487.465	381.405	-0,156
5	-45	0,225	61,81	MPa	60,94	MPa	1.150.000	980.844	1.150.969	0,084
6	90	0,225	28,16	MPa	28,91	MPa	Kırılmadı	7.139.607.906	5.309.981.601	
7	45	0,225	62,46	MPa	60,94	MPa	1.150.000	871.460	1.150.969	0,084
8	0	0,273	138,72	MPa	140,63	MPa	90	105	90	-0,382
9	-45	0,531	64,75	MPa	64,06	MPa	655.000	579.466	653.691	-0,200
10	45	0,531	57,89	MPa	57,81	MPa	2.090.000	2.058.493	2.087.812	-0,105
11	90	0,482	27,69	MPa	27,34	MPa	Kırılmadı	8.642.364.671	9.954.307.129	
12	0	0,482	136,24	MPa	134,38	MPa	150	128	150	-0,039

Test Sonucu

535.000

Çevrim

* Yüzde sütunu hesaplanan (NASTRAN) değeri ile MSC Fatigue programının bulduğu çevrim değerleri arasındaki farkın oranını göstermektedir.

TABLO 7.20. F 05 S 00 10 766 kodlu numunenin analiz sonuçları

TEST NUMUNESİ F 05 S 00 10 766			MSC FATIGUE					ÜSTEL EĞRİ İLE HESAPLAMA		
KATMAN	Açı	Kalınlık	Max Principal		Gerilme Değeri		Çevrim	Hesaplanan (Patran)	Hesaplanan (Nastran)	% (*)
Alt			63,81	MPa	64,06	MPa	655.000	683.406	653.691	-0,200
Üst			63,81	MPa	64,06	MPa	655.000	683.393	653.691	-0,200
1	0	0,482	131,42	MPa	134,38	MPa	150	193	150	-0,039
2	90	0,482	26,49	MPa	25,78	MPa	Kırılmadı	14.237.839.673	19.372.121.009	
3	-45	0,531	54,97	MPa	54,69	MPa	3.920.000	3.691.624	3.914.663	-0,136
4	45	0,531	60,79	MPa	60,94	MPa	1.150.000	1.183.312	1.150.969	0,084
5	-45	0,225	57,14	MPa	57,81	MPa	2.090.000	2.382.668	2.087.812	-0,105
6	90	0,225	26,03	MPa	25,78	MPa	Kırılmadı	17.339.835.161	19.372.121.009	
7	45	0,225	57,74	MPa	57,81	MPa	2.090.000	2.116.596	2.087.812	-0,105
8	0	0,273	128,25	MPa	128,13	MPa	258	254	257	-0,395
9	-45	0,531	59,87	MPa	60,94	MPa	1.150.000	1.406.619	1.150.969	0,084
10	45	0,531	53,51	MPa	54,69	MPa	3.920.000	5.003.761	3.914.663	-0,136
11	90	0,482	25,60	MPa	25,78	MPa	Kırılmadı	20.988.683.783	19.372.121.009	
12	0	0,482	125,96	MPa	128,13	MPa	258	312	257	-0,395

Test Sonucu

700.203

Çevrim

* Yüzde sütunu hesaplanan (NASTRAN) değeri ile MSC Fatigue programının bulduğu çevrim değerleri arasındaki farkın oranını göstermektedir.

TABLO 7.21. F 05 S 00 11 780 kodlu numunenin analiz sonuçları

TEST NUMUNESİ F 05 S 00 11 780			MSC FATIGUE				ÜSTEL EĞRİ İLE HESAPLAMA			
KATMAN	Açı	Kalınlık	Max Principal		Gerilme Değeri		Çevrim	Hesaplanan (Patran)	Hesaplanan (Nastran)	% (*)
Alt			61,51	MPa	60,94	MPa	1.150.000	1.035.083	1.150.969	0,084
Üst			61,51	MPa	60,94	MPa	1.150.000	1.035.058	1.150.969	0,084
1	0	0,482	126,69	MPa	128,13	MPa	258	292	257	-0,395
2	90	0,482	25,54	MPa	25,78	MPa	Kırılmadı	21.564.532.664	19.372.121.009	
3	-45	0,531	52,99	MPa	51,56	MPa	7.630.000	5.591.308	7.616.671	-0,175
4	45	0,531	58,60	MPa	57,81	MPa	2.090.000	1.792.230	2.087.812	-0,105
5	-45	0,225	55,08	MPa	54,69	MPa	3.920.000	3.608.768	3.914.663	-0,136
6	90	0,225	25,10	MPa	25,78	MPa	Kırılmadı	26.262.712.648	19.372.121.009	
7	45	0,225	55,66	MPa	54,69	MPa	3.920.000	3.205.775	3.914.663	-0,136
8	0	0,273	123,63	MPa	121,88	MPa	454	385	452	-0,338
9	-45	0,531	57,71	MPa	57,81	MPa	2.090.000	2.130.449	2.087.812	-0,105
10	45	0,531	51,59	MPa	51,56	MPa	7.630.000	7.578.651	7.616.671	-0,175
11	90	0,482	24,68	MPa	24,22	MPa	Kırılmadı	31.789.228.377	39.285.376.994	
12	0	0,482	121,42	MPa	121,88	MPa	454	472	452	-0,338
Test Sonucu							845.754	Çevrim		

* Yüzde sütunu hesaplanan (NASTRAN) değeri ile MSC Fatigue programının bulduğu çevrim değerleri arasındaki farkın oranını göstermektedir.

TABLO 7.22. F 05 S 00 12 780 kodlu numunenin analiz sonuçları

TEST NUMUNESİ F 05 S 00 12 780			MSC FATIGUE				ÜSTEL EĞRİ İLE HESAPLAMA			
KATMAN	Açı	Kalınlık	Max Principal		Gerilme Değeri		Çevrim	Hesaplanan (Patran)	Hesaplanan (Nastran)	% (*)
Alt			58,01	MPa	57,81	MPa	2.090.000	2.008.344	2.087.812	-0,105
Üst			58,01	MPa	57,81	MPa	2.090.000	2.008.299	2.087.812	-0,105
1	0	0,482	119,48	MPa	121,88	MPa	454	567	452	-0,338
2	90	0,482	24,08	MPa	24,22	MPa	Kırılmadı	41.841.089.992	39.285.376.994	
3	-45	0,531	49,98	MPa	49,22	MPa	12.900.000	10.848.685	12.892.376	-0,059
4	45	0,531	55,26	MPa	54,69	MPa	3.920.000	3.477.421	3.914.663	-0,136
5	-45	0,225	51,95	MPa	51,56	MPa	7.630.000	7.002.004	7.616.671	-0,175
6	90	0,225	23,67	MPa	24,22	MPa	Kırılmadı	50.956.933.229	39.285.376.994	
7	45	0,225	52,49	MPa	51,56	MPa	7.630.000	6.220.087	7.616.671	-0,175
8	0	0,273	116,59	MPa	115,63	MPa	823	747	821	-0,275
9	-45	0,531	54,43	MPa	54,69	MPa	3.920.000	4.133.659	3.914.663	-0,136
10	45	0,531	48,65	MPa	49,22	MPa	12.900.000	14.704.659	12.892.376	-0,059
11	90	0,482	23,27	MPa	22,66	MPa	Kırılmadı	61.679.879.904	83.556.351.468	
12	0	0,482	114,51	MPa	115,63	MPa	823	916	821	-0,275

Test Sonucu

1.035.230

Çevrim

* Yüzde sütunu hesaplanan (NASTRAN) değeri ile MSC Fatigue programının bulduğu çevrim değerleri arasındaki farkın oranını göstermektedir.

Tabloların “%(*)” satırları, tablolarda her katman için verilmiş olan iki farklı ömür değerinin arasındaki farkı yüzde olarak yansıtmaktadır. Bu iki farklı sonuçtan biri, MSC Fatigue programının girilen verilerle numunenin her düğüm noktasında hesapladığı ömür çevrim sayısı, diğeri ise programa girdi olarak verilen basitleştirilmiş Wöhler eğrilerinin (Örneğin Şekil 7.6) denklemleri yardımıyla MSC Fatigue programının kullandığı önceden hesaplanmış gerilmeler ile analitik olarak hesaplanan ömür çevrim değeridir.

Tablolar incelendiğinde değerler arasındaki maksimum sapmanın %3,426 (Tablo 7.10, Test Numunesi F 05 A 00 09 771, 1.Katman) olduğu görülebilir. Bu maksimum sapma durumunda dahi iki sonuç arasındaki fark sadece 1 çevrimdir. Bu sonuç bize MSC Fatigue programının yorulma ömrü hesabı yaparken izlediği yol hakkında bir fikir verir. İzlenen yol analitik hesaptan pek farklı değildir. Öyle ise niçin paket program kullanma gereği duyulmaktadır? Bu soruyu şu maddeler ile cevaplandırmak mümkündür:

- MSC Fatigue programı her düğüm noktasındaki yorulma ömür değerini ki, düğüm noktası sayısı geometrinin büyüklüğüne ve ağ yapısına bağlı olarak binlerce olabilir; çok kısa sürelerde hesaplama yeteneğine sahiptir.
- Bu çalışma için kullanılmasına gerek olmayan, fakat çoğu durumda ihtiyaç duyulan ve analitik olarak hesabı kolay olmayan ortalama gerilme düzeltmesini birden fazla sayıda farklı yöntem ile yapabilme yeteneği mevcuttur.

- Parça üzerinde, sonuçları renklerle derecelendirme özelliği sayesinde, karmaşık durumlarda kritik noktaların kolay anlaşılabilmesini sağlar.
- Sonuçlar katman bazında da hesaplanabildiği ve görüntülenebildiği için katmanların kalınlığının ve diziliminin parça üzerindeki etkileri incelenebilir.

Bu bölümün daha önemli diğer bir sonucu ise, programın hesapladığı ömür çevrim değerleri ile test sonuçlarının kıyaslanmasıdır. Test sonuçlarıyla MSC Fatigue programı tarafından hesaplanan alt (ya da st) katmandaki yorulma ömrü çevrim değerinin karşılaştırması Tablo 7.23’de yapılmıştır. Bu tabloda % sütunu, MSC Fatigue ve test yorulma ömür sonuçları arasındaki farkı yüzde olarak göstermektedir.

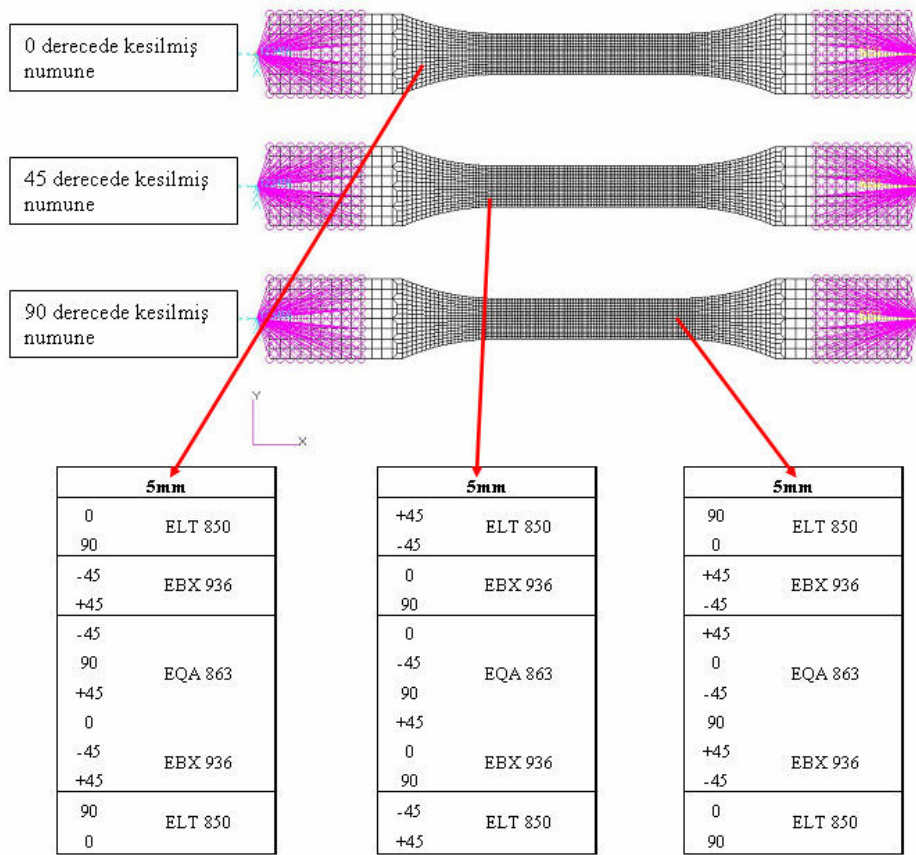
Simülasyon sonuçlarının önemli bir bölümü test sonuçlarına yakındır. Ortaya çıkan birkaç büyük fark test numunelerinin hazırlanma ve deney koşullarından kaynaklanmaktadır.

TABLO 7.23. MSC Fatigue yorulma ömrü sonuçlarının test sonuçlarıyla kıyaslanması

YORULMA ÖMRÜ ÇEVİRİM SAYISI			
TEST NUMUNESİ	MSC FATIGUE	TEST	%
F 05 A 00 04 780	447	1400	68
F 05 A 00 05 770	5218	4030	-29
F 05 A 00 06 765	10530	5752	-83
F 05 A 00 07 765	18344	7079	-159
F 05 A 00 08 780	92700	206321	55
F 05 A 00 09 771	92700	239052	61
F 05 A 00 10 773	368000	450000	18
F 05 A 00 11 771	1020000	854028	-19
F 05 A 00 12 765	1750000	1027600	-70
F 05 S 00 04 769	3002	5000	40
F 05 S 00 05 776	35903	19200	-87
F 05 S 00 06 782	87200	50500	-73
F 05 S 00 07 774	140000	185241	24
F 05 S 00 08 769	140000	251123	44
F 05 S 00 09 774	229000	535000	57
F 05 S 00 10 766	655000	700203	6
F 05 S 00 11 780	1150000	845754	-36
F 05 S 00 12 780	2090000	1035230	-102

8. KABUK ELEMANLAR KULLANARAK SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE DEĞİŞİK YÜKLEME ÇEŞİTLERİNİN GERİLME VE YORULMA ANALİZİ

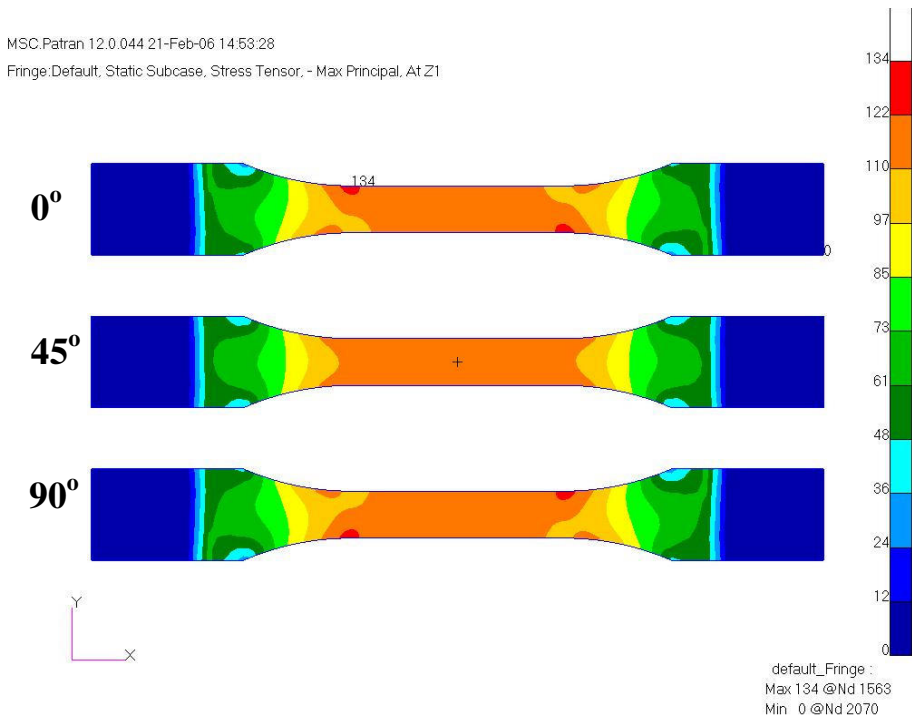
Wöhler Eğrisi bulunan üç farklı açısall dağılıma sahip kompozit çekme çubuklarının değişik yükleme durumlarına karşı dayanımlarını kıyaslamak amacı ile, aynı geometriye sahip üç numuneye farklı oryantasyon tanımlanarak çekme, basma ve eğilme yükleri uygulanmıştır.



ŞEKİL 8.1. Farklı açılarda kesilmiş numunelerin oryantasyon tabloları

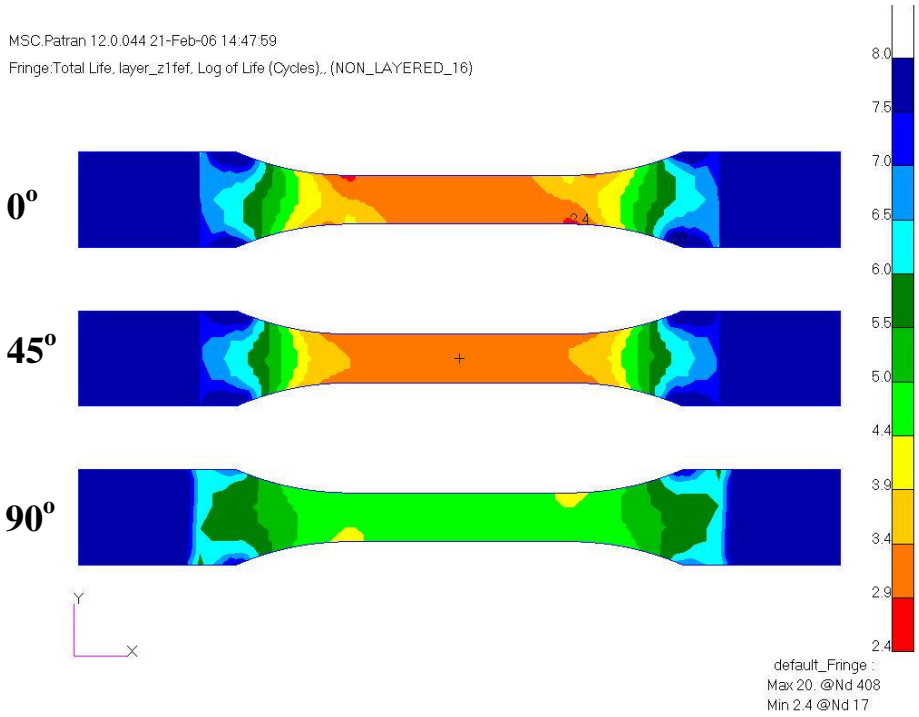
8.1. ÇEKME SİMÜLASYONU SONUÇLARI

Numunelerin bir tarafları ankastre olarak altı serbestlik derecesinde mesnetlenmiştir. Diğer taraftan ise çekme yükü kıyaslaması için test yüklerinden biri olan 8398N her numuneye uygulanmıştır. Çıkan gerilme dağılımları Şekil 8.2’de verilmiştir.



ŞEKİL 8.2. Numunelerin çekme simülasyonu gerilme dağılımları

Bu gerilmeler ve her oryantasyondaki (atmosferik ortamdaki) Wöhler eğrileri girdi olarak kullanılarak, MSC Fatigue programı ile Şekil 8.3’de görülen yorulma dağılımları elde edilmiştir.



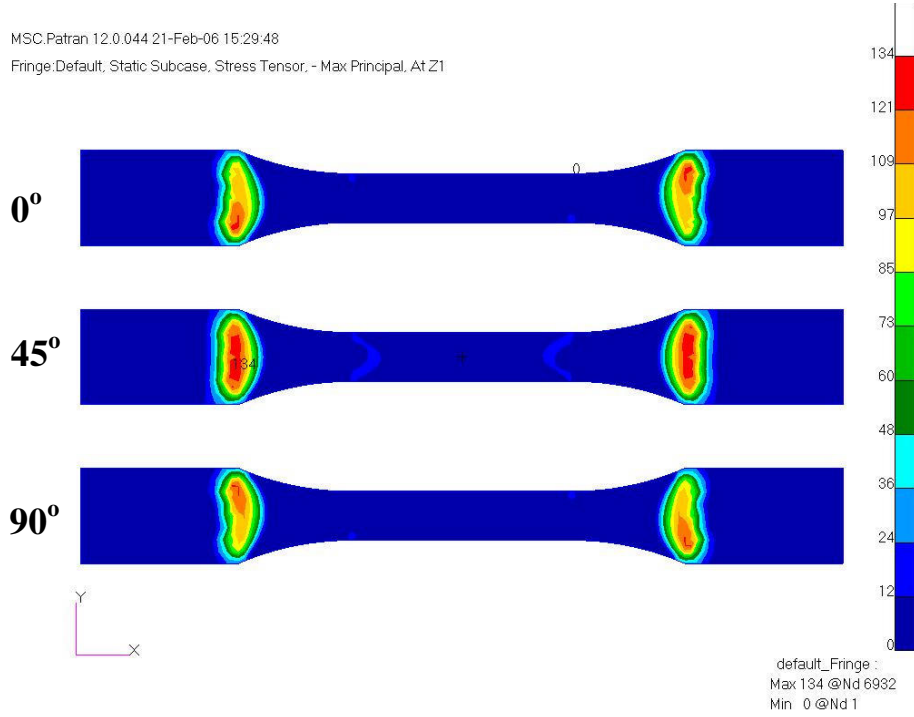
ŞEKİL 8.3. Numunelerin çekme gerilmesi altında yorulma ömrü dağılımları

Şekil 8.2’de görüldüğü gibi gerilme durumu açısından en kritik olan parça 0° ve 90°’de kesilen numuneler iken, yorulma dağılımı incelendiğinde 90°’de kesilmiş numunenin en yüksek dayanıma sahip olduğu görülebilir (Şekil 8.3). Bu çelişkinin sebebi, 90°’de kesilmiş numunenin test sonucunda elde edilmiş olan Wöhler eğrisinin diğer oryantasyonlardaki eğrilere göre aynı gerilme değerindeki yorulma ömrü açısından daha yüksek değerlere sahip olmasıdır.

Sonuç olarak diyebiliriz ki, yorulma ömrü açısından çekme yüklemesine en dayanıklı numune 90°’de kesilmiş olan iken, en düşük yorulma dayanımına sahip olan ise 0°’de kesilmiş olan numunedir.

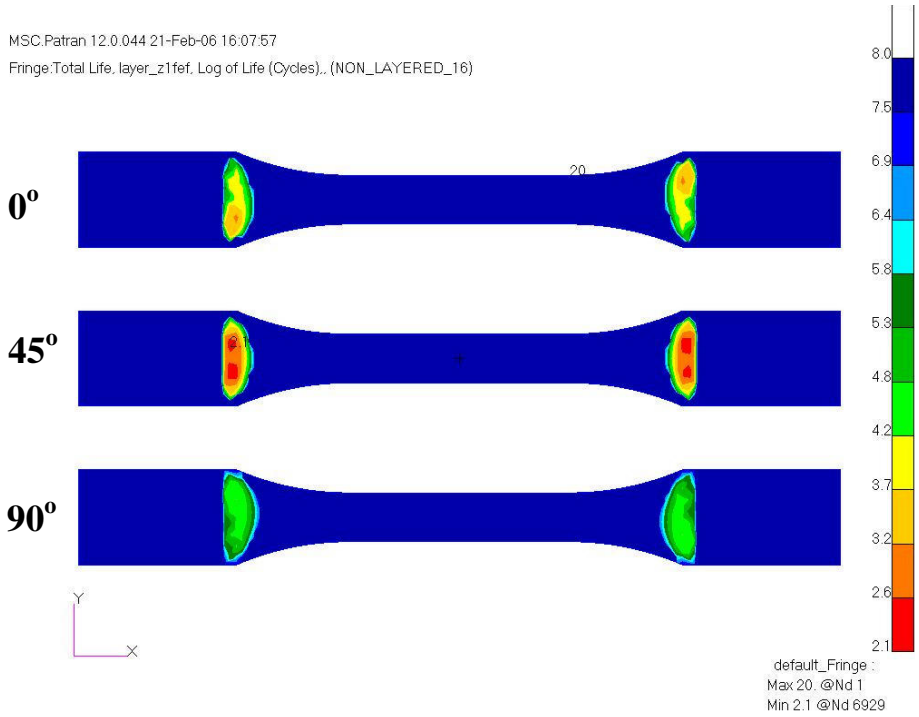
8.2 BASMA SİMÜLASYONU SONUÇLARI

Sonuçları görüntüleyebilmek için yeterli gerilme oluşturabilmek amacı ile basma yükü olarak 200.000N tüm numunelere uygulanmıştır. Numunelerin diğer kenarları ise ankastre mesnet olarak sabitlenmiştir. Analiz sonucunda çıkan gerilme dağılımları Şekil 8.4'deki gibidir.



ŞEKİL 8.4. Numunelerin basma simülasyonu gerilme dağılımları

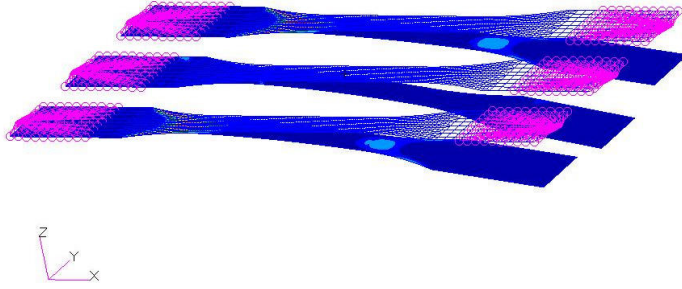
Bu gerilmeler ve her oryantasyondaki (atmosferik ortamdaki) Wöhler eğrileri girdi olarak kullanılarak, MSC Fatigue programı ile Şekil 8.5'de görülen yorulma dağılımları elde edilmiştir. **Gerek kabuk eleman kullanıldığından, gerekse de geçiş bölgesindeki ağ yapısı nedeniyle maksimum gerilmeler kesit ortasından uzak bölgelerde çıkmıştır.**



ŞEKİL 8.5. Numunelerin basma gerilmesi altında yorulma ömrü dağılımları

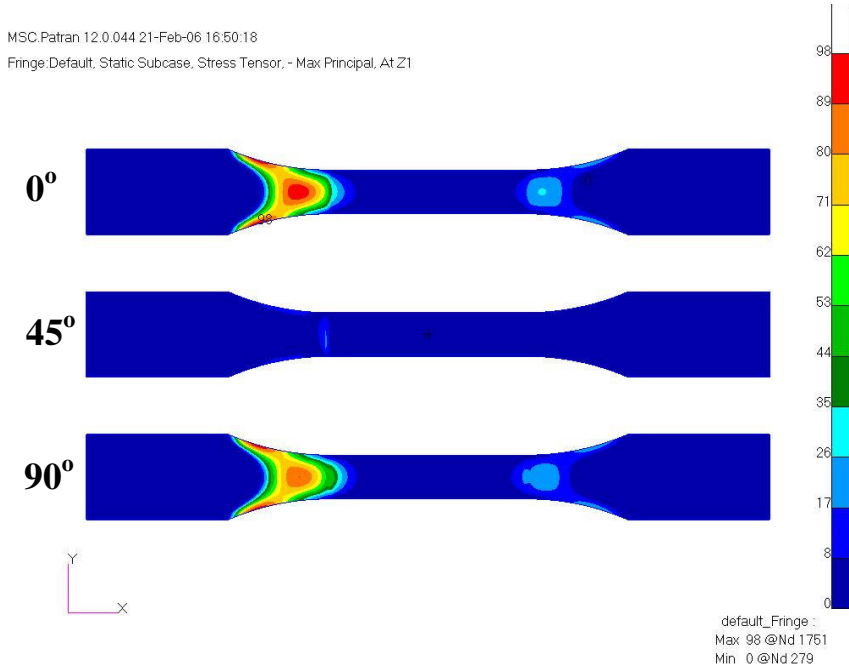
Şekil 8.4'den görülebileceği gibi gerilme dağılımı açısından basma yüküne karşı en dayanıksız numune 45°'de kesilmiş olmandır. Wöhler eğrisindeki avantajından dolayı yorulma ömrü kıyaslamasında ise en dayanıklı parça yine 90°'de kesilmiş olan numunedir. Yorulma ömrü bakımından en kritik olan numune ise üzerinde en yüksek gerilme dağılımı görülen 45°'de kesilmiş olan numunedir, çünkü toplam 45° oryantasyonlu katman sayısı diğerlerine oranla iki kat fazladır.

8.3 EĞİLME SİMÜLASYONU SONUÇLARI

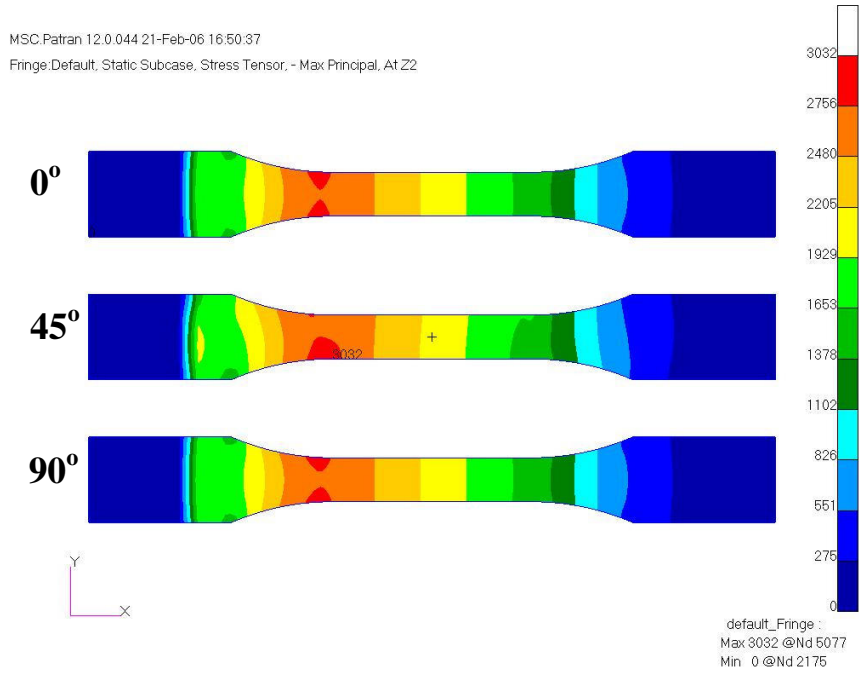


ŞEKİL 8.6. Numunelerin eğilme yükü altındaki deformasyonu

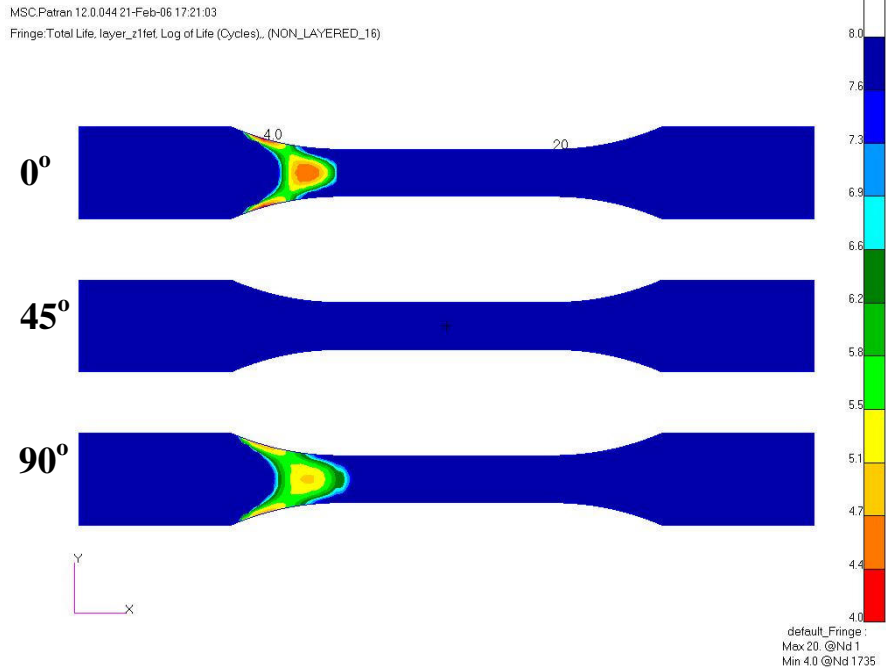
Eğilme yükü olarak 1000N kuvvet Şekil 8.6'daki gibi $-z$ yönünde uygulanmıştır. Diğer taraf ise ankastre olarak mesnetlenmiştir. Gerilme dağılımları Şekil 8.7 ve Şekil 8.8'deki gibidir.



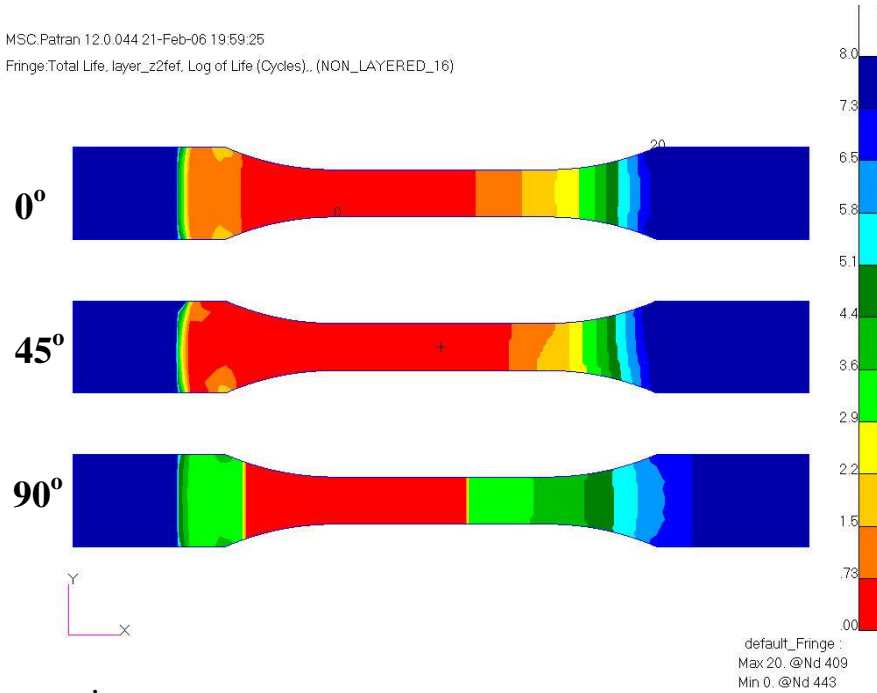
ŞEKİL 8.7. Numunelerin eğilme yükü altındaki gerilme dağılımları (alt yüzey)



ŞEKİL 8.8. Numunelerin eğilme yükü altındaki gerilme dağılımları (üst yüzey)



ŞEKİL 8.9. Numunelerin eğilme yükü altındaki yorulma ömrü dağılımları (alt yüzey)



ŞEKİL 8.10. Numunelerin eğilme yükü altındaki yorulma ömrü dağılımları (üst yüzey)

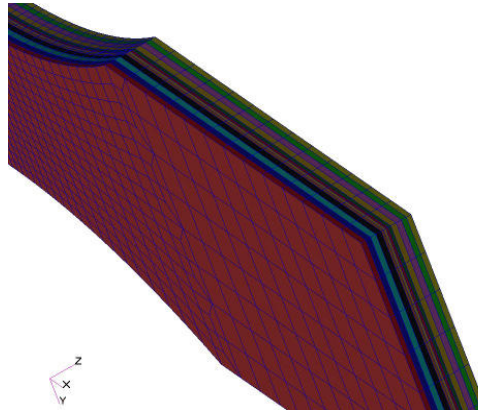
Şekil 8.7 ve 8.8'den görülebileceği gibi eğilme yükü altında gerilme dağılımı olarak en kritik numune 0°'de kesilmiş olan iken, en az gerilmeye sahip olan ise 45°'de kesilmiş numunedir. Ancak numuneler oldukça benzer bir yapıya sahiptir. Farklılık, farklı oryantasyona sahip katmanların yerini değiştirmesine dayandığından sonuçlar da birbirine benzer çıkmaktadır.

Yorulma dağılımlarının kıyaslamasını yapabilmek için ise, Şekil 8.9 ve Şekil 8.10 incelenmelidir. Gerilme dağılımında olduğu gibi en kritik numune 0°'de kesilmiş olmalıdır. Sonuç olarak diyebiliriz ki yorulma eğrisine bağlı olarak her yük koşulunda yorulmaya en dayanıklı numune 90°'de kesilmiş olmalıdır.

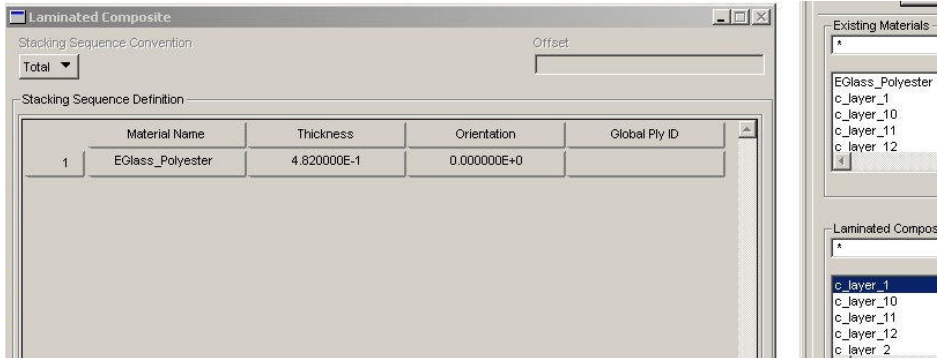
9. KATI ELEMANLARLA MODELLENEN KOMPOZİT ÇEKME ÇUBUKLARININ GERİLME VE YORULMA SİMÜLASYONU

Bölüm 7’de gerçekleştirilmiş analizlerde kompozit çubuk, kabuk elemanlar ile modellenip sonuçlar incelenmiştir. Fakat bilindiği gibi kabuk elemanlar kalınlık yönünde gerilme taşıyamadıkları için değişik bazı yükleme koşullarının kıyaslanması mümkün olmamaktadır. Bu sebeple, bu bölümde katı elemanlar ile modellenmiş kompozit çubuğun analizi gerçekleştirilecek, sonuçlar verilecek ve kabuk eleman ile kıyaslaması yapılacaktır.

Kabuk modelden farklı olarak, katı elemanlar ile kompozit çubuğu modellerken her katman için bir sıra katı eleman kullanılmıştır (Şekil 9.1). Her sıra eleman için oryantasyon yönüne bağlı olarak ayrı bir kompozit özelliği oluşturularak, her katmana bu özellikler uygun olarak atanmıştır (Şekil 9.2). Yükleme ve diğer sınır koşulları, Bölüm 7’de verilen kabuk elemanlara ait analiz ile aynıdır.



ŞEKİL 9.1 : Katı elemanlarla modellenmiş kompozit çubuğun katman görünüşü



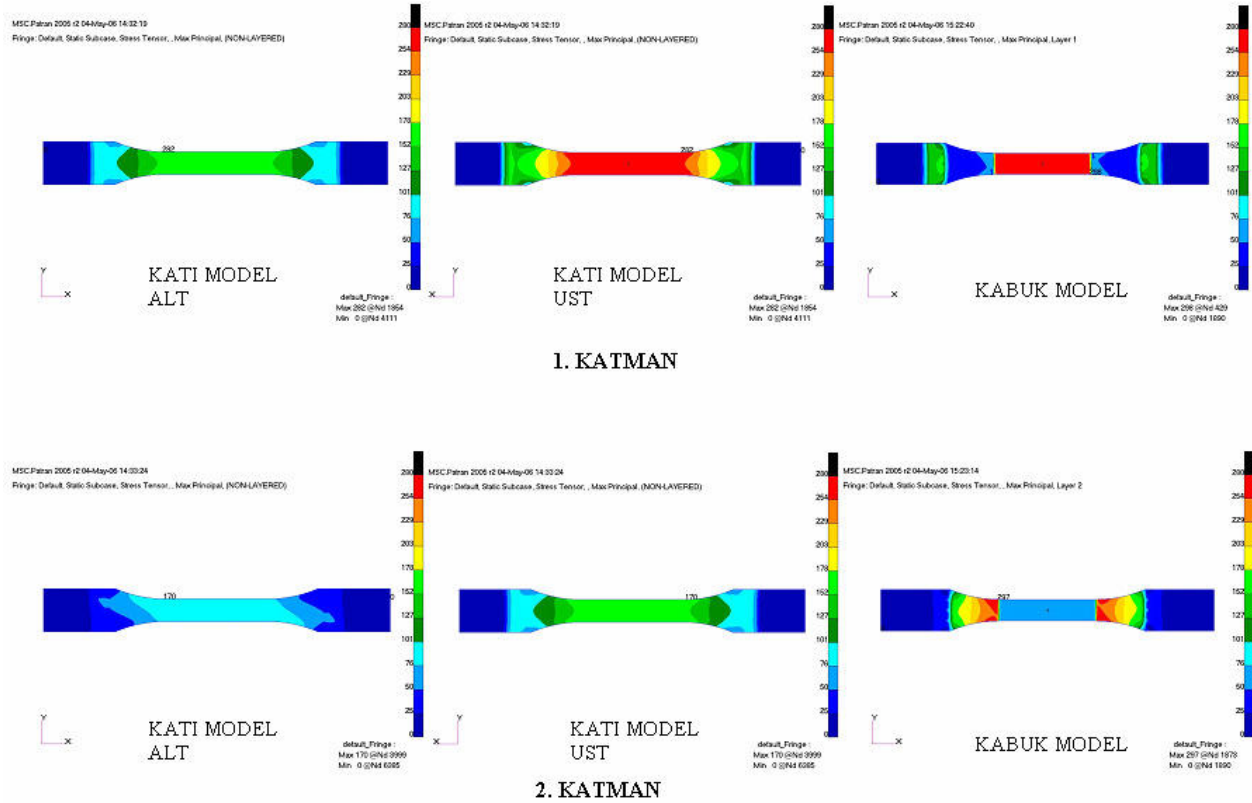
ŞEKİL 9.2. MSC Patran’da katmanların tanımlandığı menü

Yapılan analiz sonucunda elde edilen gerilme ve yorulma değerleri Tablo 9.1 ve Şekil 9.3 – 9.8’de kıyaslamalı olarak verilmiştir.

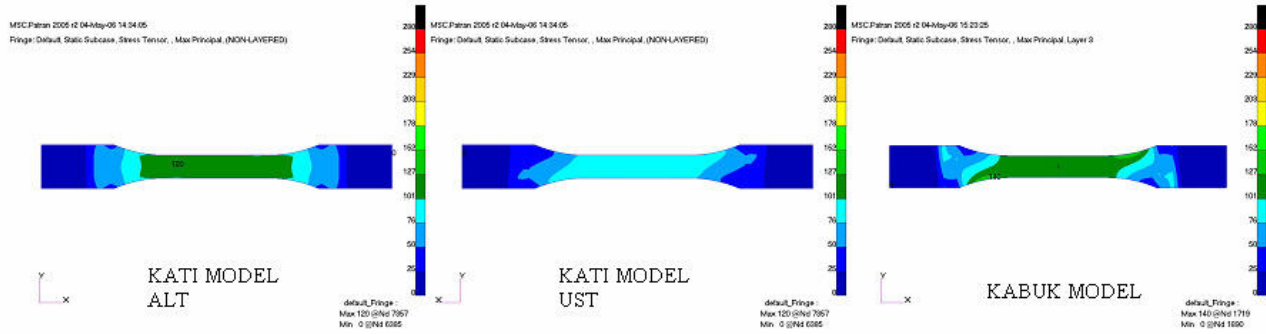
TABLO 9.1. F 05 S 00 04 780 kodlu numunenin katı elemanlar kullanılarak gerçekleştirilmiş analiz sonuçları

TEST NUMUNESİ F 05 A 00 04 780			MSC FATIGUE				KATI MODELLENMİŞ KOMPOZİT		
Katman	Açı	Kalınlık	Max Principal		Gerilme Değeri		Çevrim	Gerilme Değeri	Çevrim
Alt			132,00	MPa	134,38	MPa	447	-	-
Üst			132,00	MPa	134,38	MPa	447	-	-
1	0	0,482	271,82	MPa	268,75	MPa	1	282	MPa 1
2	90	0,482	54,79	MPa	54,69	MPa	20.400.000	170	MPa 16
3	-45	0,531	113,71	MPa	115,63	MPa	2.688	120	MPa 10530
4	45	0,531	125,72	MPa	128,13	MPa	790	120	MPa 10530
5	-45	0,225	118,18	MPa	115,63	MPa	2.688	120	MPa 10530
6	90	0,225	53,84	MPa	54,69	MPa	20.400.000	91	MPa 60560
7	45	0,225	119,43	MPa	121,88	MPa	1.434	196	MPa 7
8	0	0,273	265,24	MPa	268,75	MPa	1	196	MPa 7
9	-45	0,531	123,80	MPa	121,88	MPa	1.434	196	MPa 7
10	45	0,531	110,68	MPa	109,38	MPa	5.218	120	MPa 10530
11	90	0,482	52,94	MPa	51,56	MPa	41.200.000	170	MPa 16
12	0	0,482	260,49	MPa	256,25	MPa	1	282	MPa 1

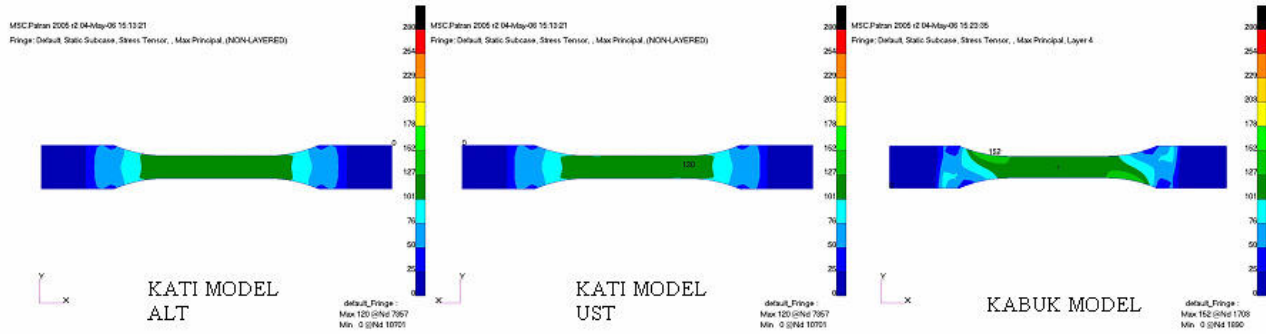
Test Sonucu 1400 Çevrim



ŞEKİL 9.3. Katı ve kabuk elemanların katmanlardaki gerilme dağılımı kıyaslaması

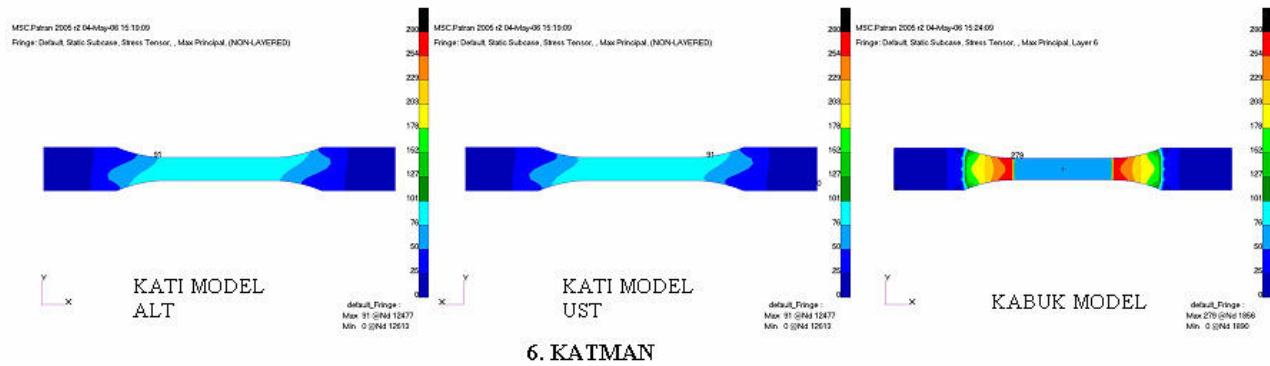
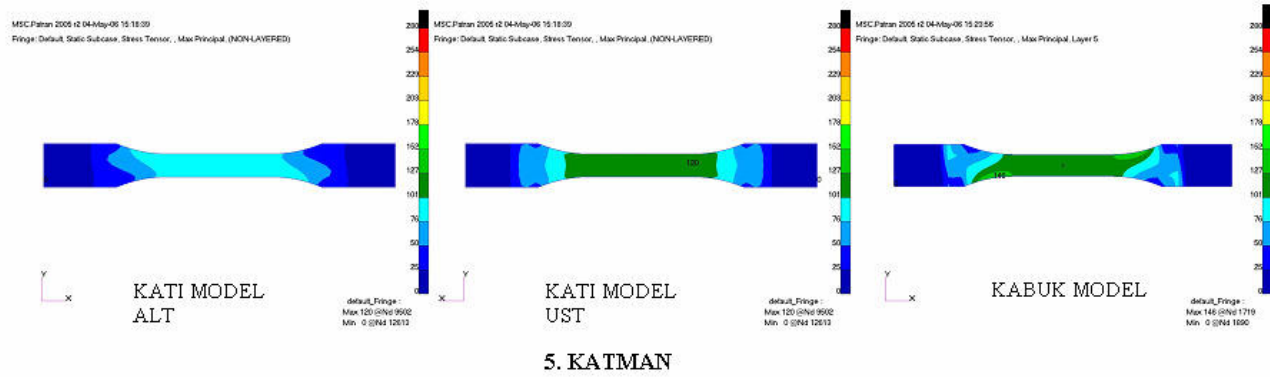


3. KATMAN

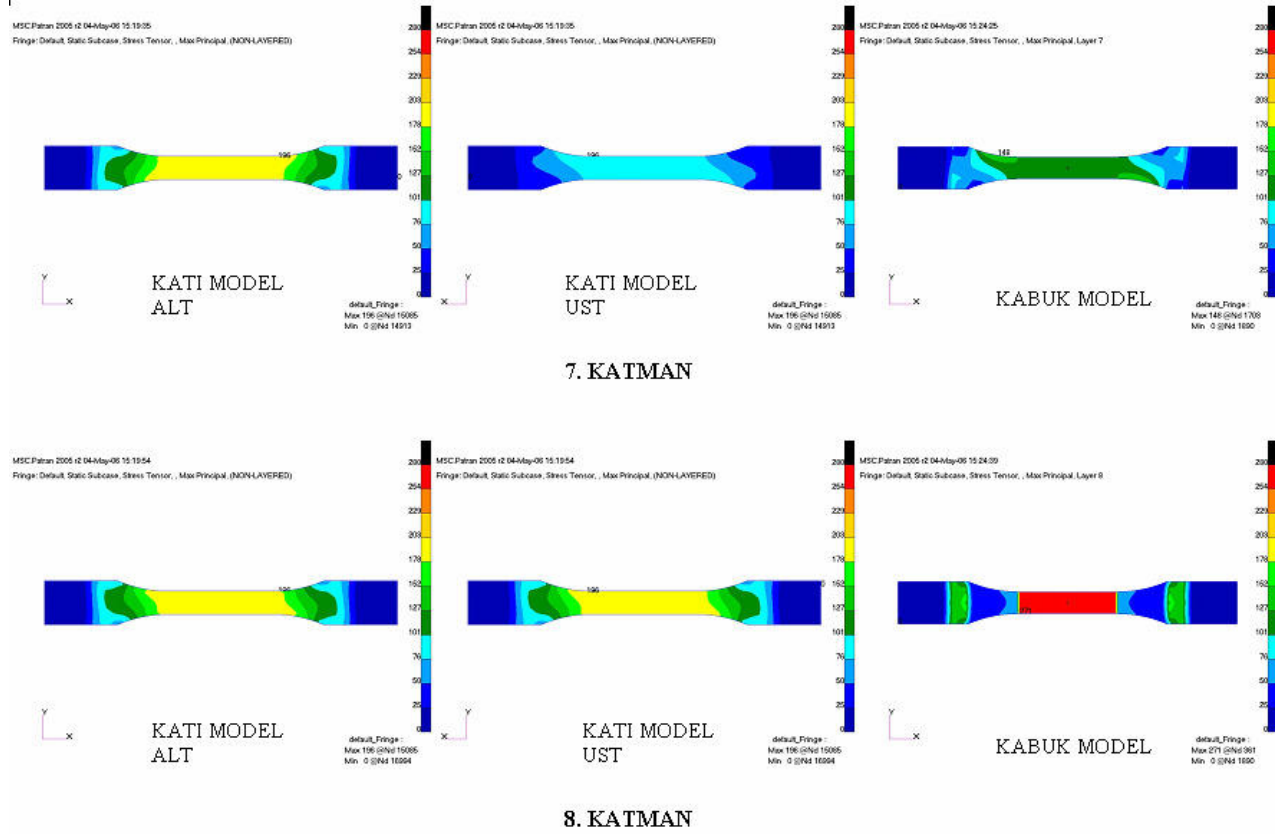


4. KATMAN

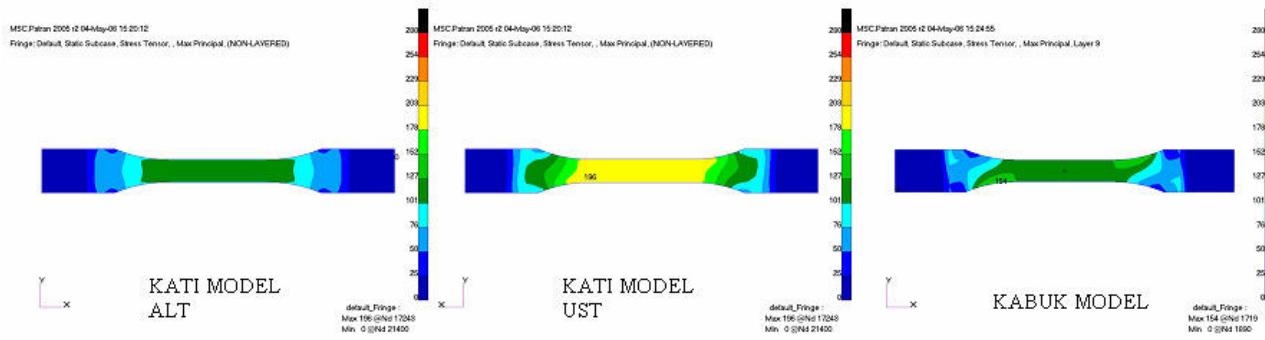
ŞEKİL 9.4. Katı ve kabuk elemanların katmanlardaki gerilme dağılımı kıyaslaması (devam)



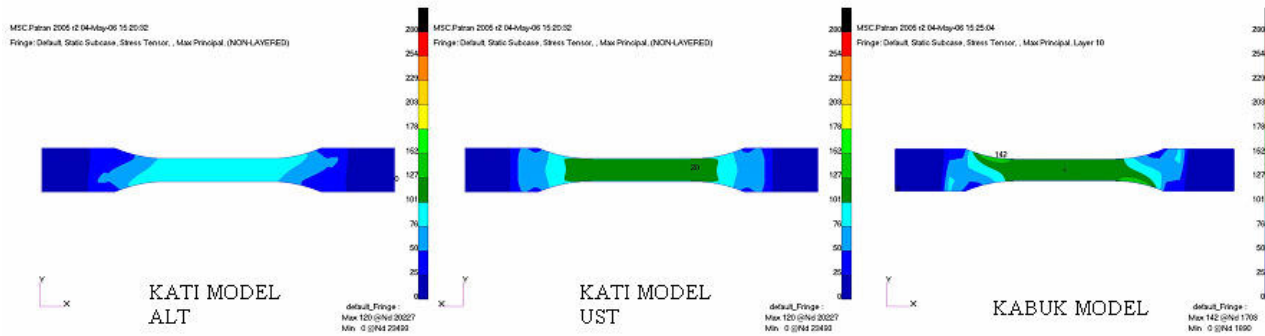
ŞEKİL 9.5. Katı ve kabuk elemanların katmanlardaki gerilme dağılımı kıyaslaması (devam)



ŞEKİL 9.6. Katı ve kabuk elemanların katmanlardaki gerilme dağılımı kıyaslaması (devam)

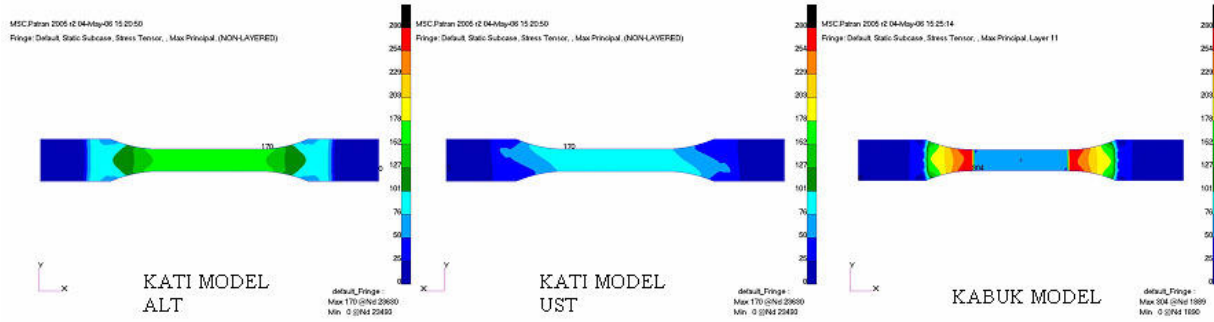


9. KATMAN

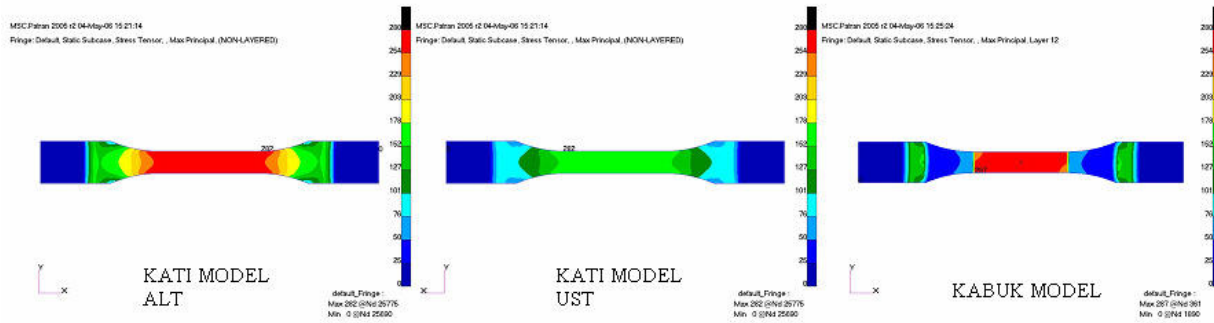


10. KATMAN

ŞEKİL 9.7. Katı ve kabuk elemanların katmanlardaki gerilme dağılımı kıyaslaması (devam)

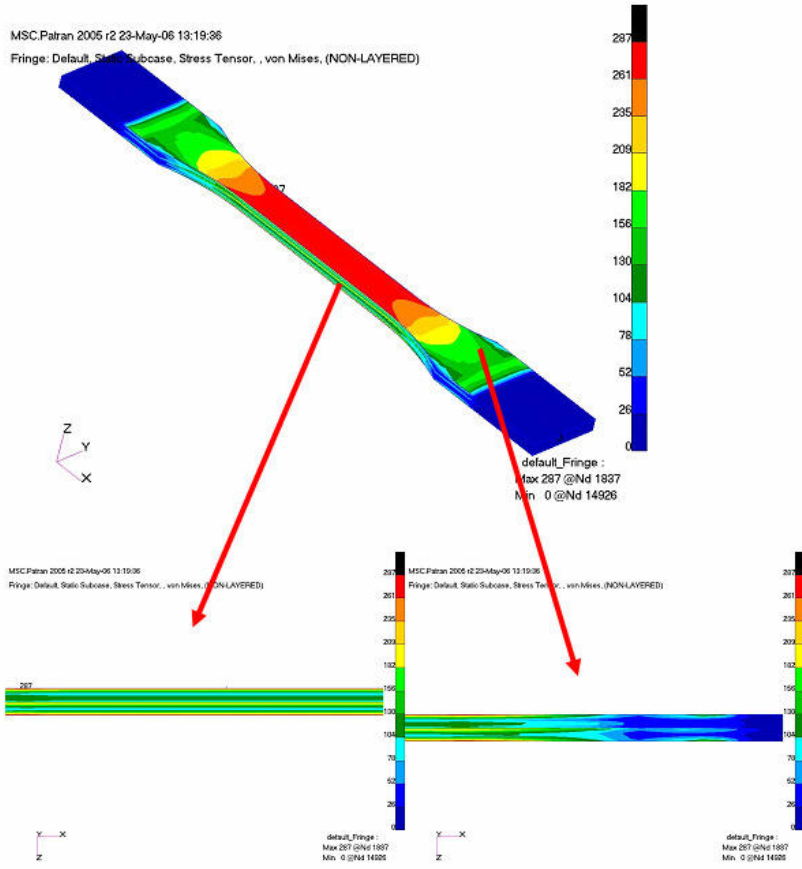


11. KATMAN



12. KATMAN

ŞEKİL 9.8. Katı ve kabuk elemanların katmanlardaki gerilme dağılımı kıyaslaması (devam)



ŞEKİL 9.9. Katı modellenmiş kompozitin kesitindeki gerilme dağılımı

Sonuçlardan da görülebileceği gibi, katı olarak modellenen kompozit levhanın gerilme dağılımı kabuk olarak modellenen kompozite göre enine kesitte ve kalınlık yönünde daha homojen bir dağılım göstermektedir. Uygulanan kuvvet, katmanlar arasında daha gerçekçi ve daha homojen bir şekilde paylaşılarak taşınmaktadır. Bu sebeple, katman yorulma ömürleri arasında kabuk modele kıyasla farklılıklar göze çarpmaktadır. Ayrıca çekme düzeneğinin çenesi gerçekçi olarak modellendiği için çene tarafından tutulan ve çekme kuvvetine doğrudan

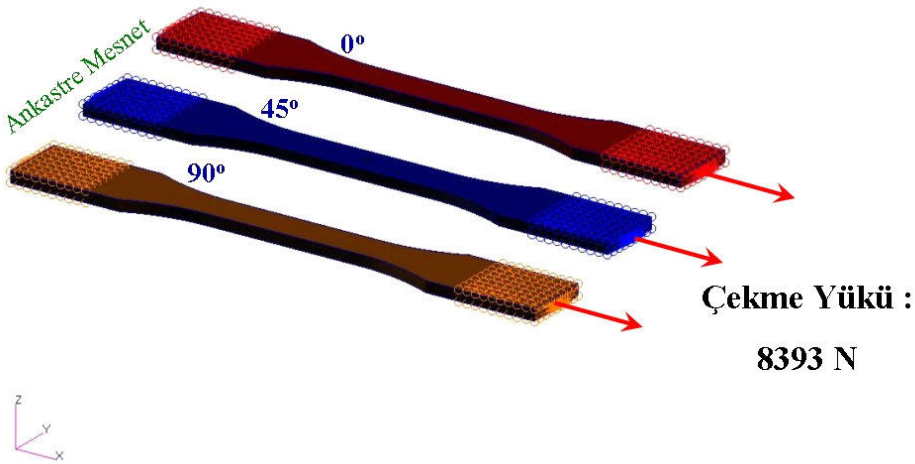
maruz kalan en alt ve en üst katmanlarda gerilme beklendiği gibi daha yüksek çıkmış yorulma ömrü de buna bağlı olarak azalmıştır. Orta katmanlarda ise bu etki gözlenmemektedir.

10. KATI ELEMANLARLA MODELLENMİŞ, FARKLI ORYANTASYONLARDAKİ KOMPOZİT ÇUBUKLARIN DEĞİŞİK YÜKLEMELER ALTINDAKİ GERİLME DAVRANIŞLARININ KIYASLANMASI

Bu kısımda Bölüm 9’da anlatılan katı kompozit modelleme tekniği ile modellenen ve testlerde kullanılmış olan üç farklı oryantasyondaki çekme çubuklarına çekme, basma, eğilme ve burulma yükleri uygulanmış ve gerilme dağılımları incelenmiştir.

10.1 ÇEKME YÜKÜ KIYASLAMASI

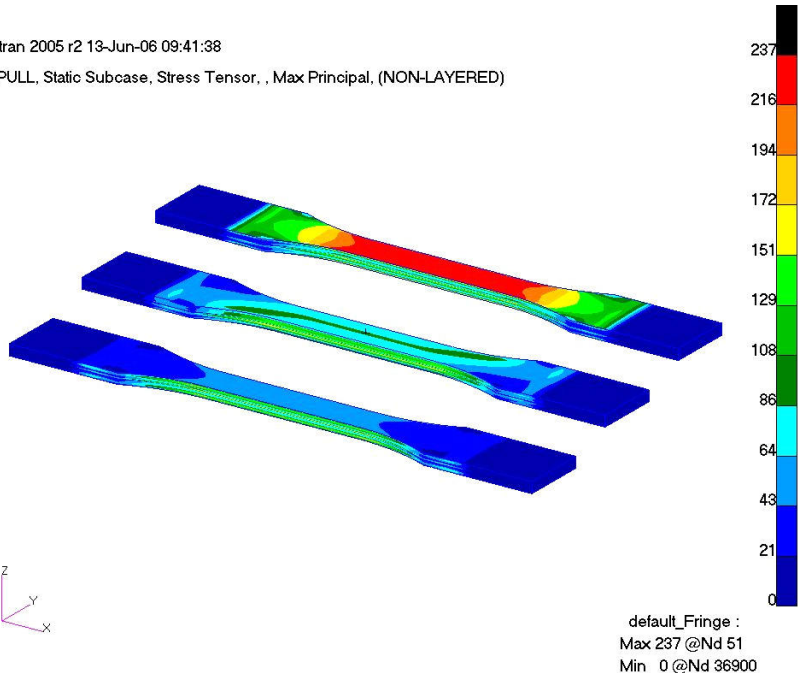
Şekil 10.1’den de görülebileceği gibi farklı oryantasyonlardaki numuneler katı elemanlarla modellenmiş ve test yüklerinden biri olan 8393N’luk çekme yükü ile yüklenmiştir.



ŞEKİL 10.1. 0°, 45° ve 90°’de kesilmiş numunelere çekme yükünün uygulanması

MSC.Patran 2005 r2 13-Jun-06 09:41:38

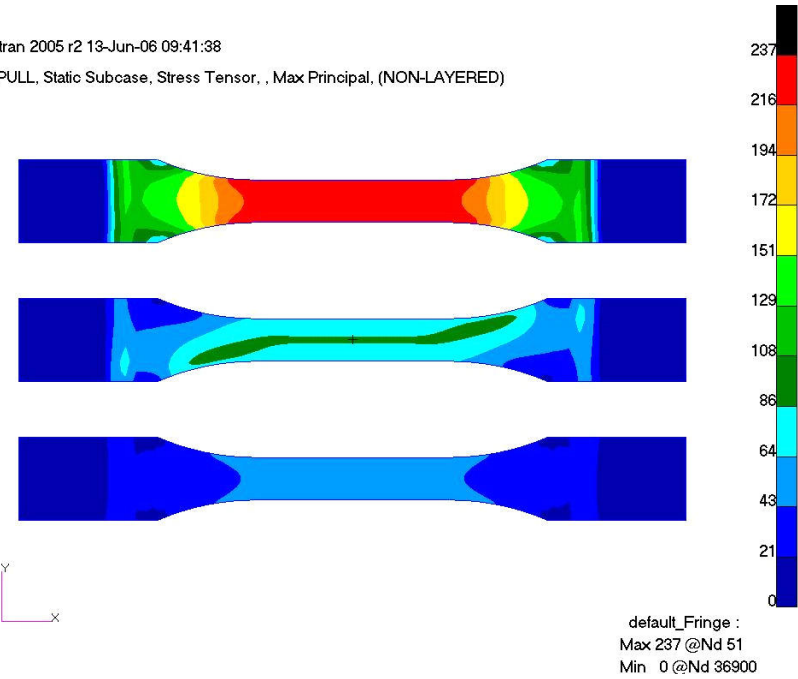
Fringe: PULL, Static Subcase, Stress Tensor, , Max Principal, (NON-LAYERED)



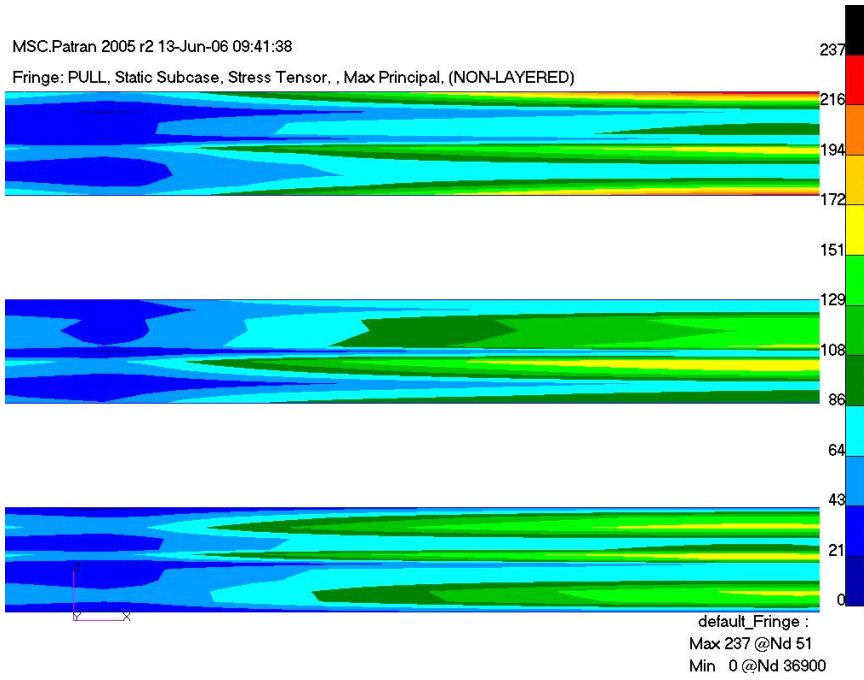
ŞEKİL 10.2. Numunelerin çekme yükü altında gerilme dağılımı kıyaslaması

MSC.Patran 2005 r2 13-Jun-06 09:41:38

Fringe: PULL, Static Subcase, Stress Tensor, , Max Principal, (NON-LAYERED)



ŞEKİL 10.3. Numunelerin çekme yükü altında gerilme dağılımı kıyaslaması

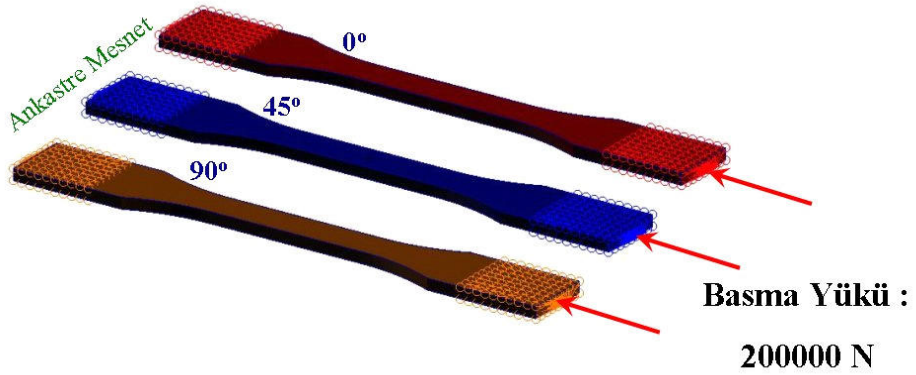


ŞEKİL 10.4. Numunelerin çekme yükü altında gerilme dağılımı kıyaslaması (kesit)

Şekil 10.2, 10.3 ve 10.4’de görülebileceği gibi katı olarak modellenmiş kompozit çubukların içinde çekme yüküne karşı en kritik gerilme dağılımı gösteren numune 0° ’de kesilmiş olandır. Bu numunenin en alt ve en üst katmanı 0° oryantasyonlu fiber içerdiği için daha fazla yük taşımış ve üzerinde daha yüksek gerilmeler oluşmuştur. Bu durum da yorulma ömrünü olumsuz olarak etkilemektedir. Diğer iki numunenin ise çekme yüküne karşı daha iyi bir gerilme dağılımına sahip oldukları görülmektedir. 0° ’li fiberler orta katmanlarda oldukları için 0° ’de kesilmiş numunede olduğu kadar yüksek gerilme taşıyamamaktadırlar.

10.2 BASMA YÜKÜ KIYASLAMASI

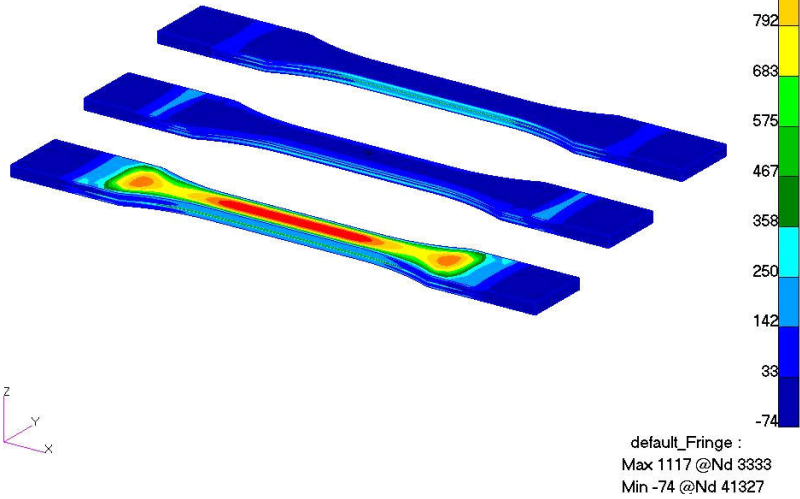
Basma yükü olarak 200.000N numunelere uygulanmıştır (Şekil 10.5).



ŞEKİL 10.5. 0°, 45° ve 90°'de kesilmiş numunelere basma yükünün uygulanması

MSC.Patran 2005 r2 13-Jun-06 10:03:39

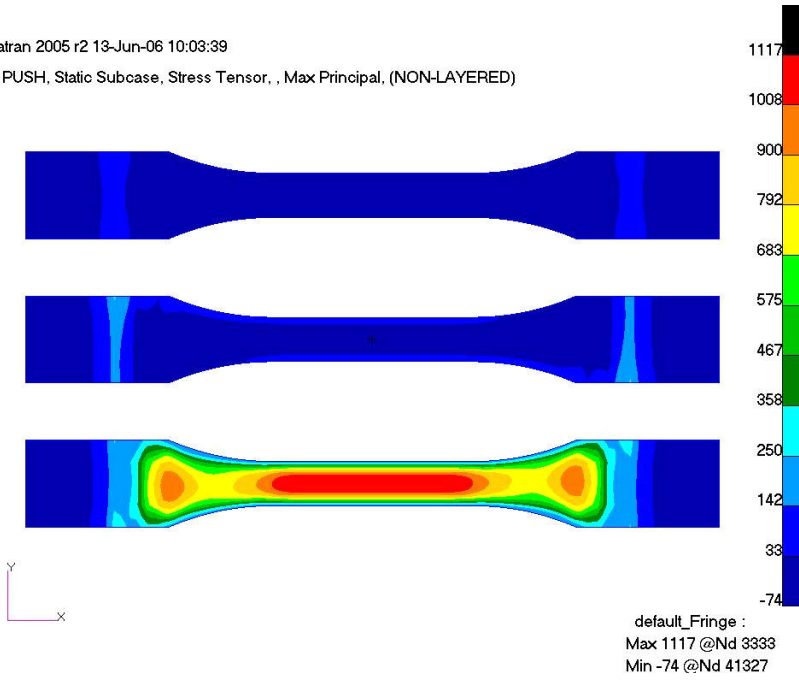
Fringe: PUSH, Static Subcase, Stress Tensor, , Max Principal, (NON-LAYERED)



ŞEKİL 10.6. Numunelerin basma yükü altında gerilme dağılımı kıyaslaması

MSC.Patran 2005 r2 13-Jun-06 10:03:39

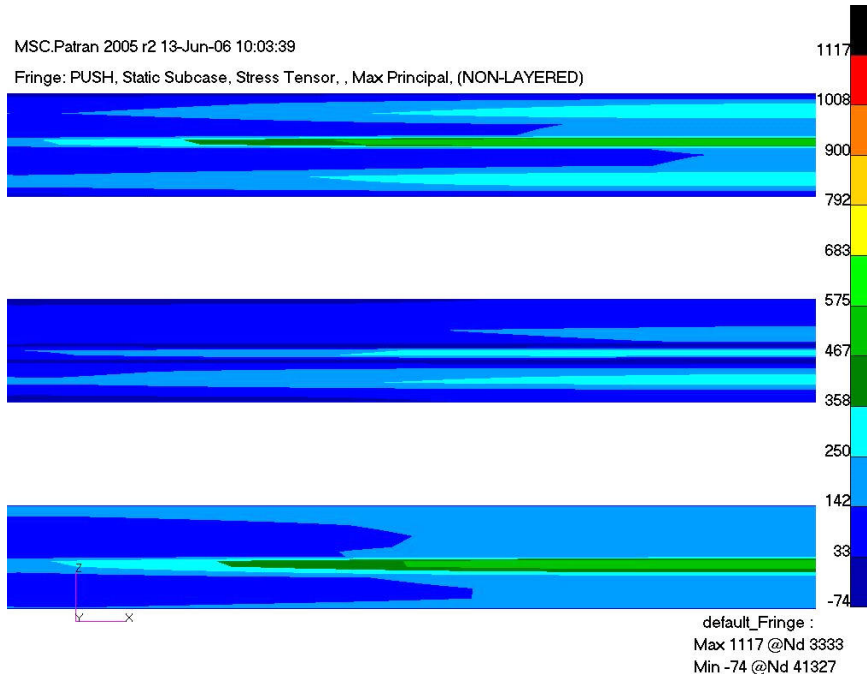
Fringe: PUSH, Static Subcase, Stress Tensor, , Max Principal, (NON-LAYERED)



ŞEKİL 10.7. Numunelerin basma yükü altında gerilme dağılımı kıyaslaması

MSC.Patran 2005 r2 13-Jun-06 10:03:39

Fringe: PUSH, Static Subcase, Stress Tensor, , Max Principal, (NON-LAYERED)

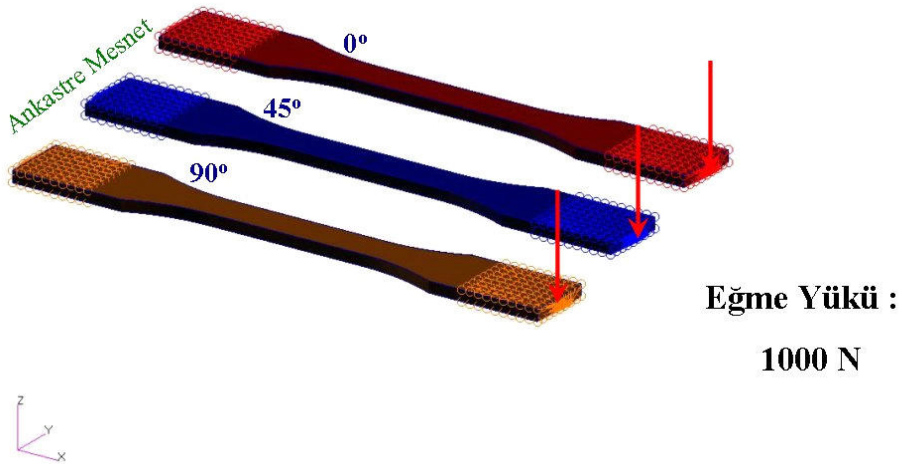


ŞEKİL 10.8. Numunelerin basma yükü altında gerilme dağılımı kıyaslaması (kesit)

Şekil 10.6, 10.7 ve 10.8'den de görülebileceği gibi basma yüklemesi altında en kritik gerilmeler 90° 'de kesilmiş numunelerde ortaya çıkmaktadır. Bu yükleme altında en iyi durumda olan numune ise kabuk elemanlarla modellenmiş kıyaslamada da olduğu gibi 45° 'de kesilmiş olan numune olmakla birlikte, 0° 'de kesilmiş olan numunenin sonuçları da 45° 'de kesilmiş olan numuneye yakındır.

10.3 EĞİLME YÜKÜ KİYASLAMASI

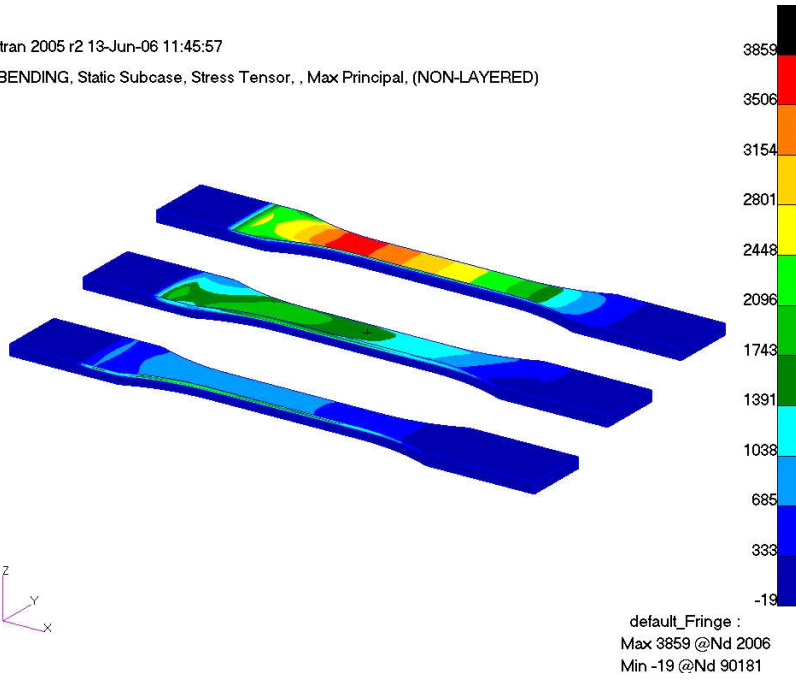
Şekil 10.9'da görüldüğü gibi eğilme yükü olarak 1000N -z yönünde numunelere uygulanmıştır.



ŞEKİL 10.9. 0° , 45° ve 90° 'de kesilmiş numunelere eğilme yükünün uygulanması

MSC.Patran 2005 r2 13-Jun-06 11:45:57

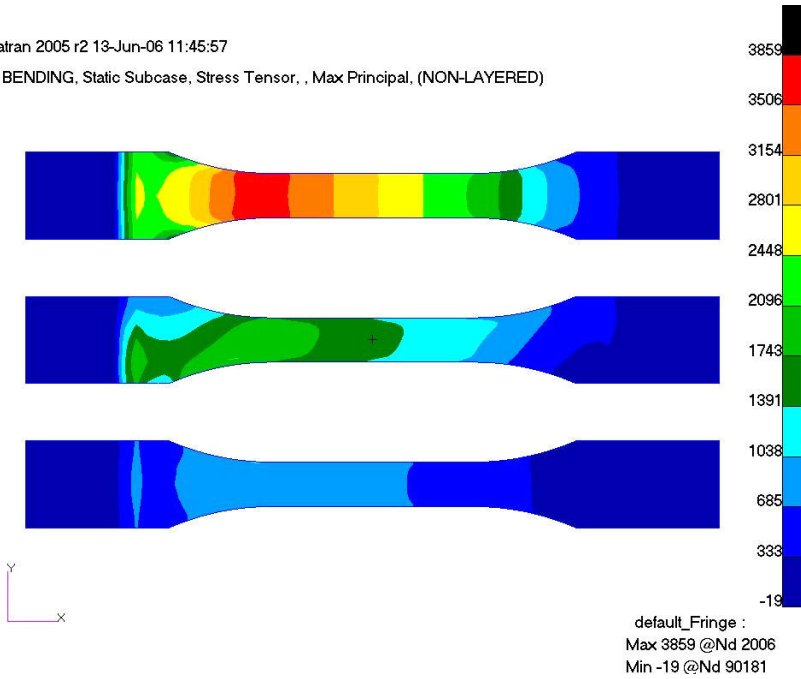
Fringe: BENDING, Static Subcase, Stress Tensor, , Max Principal, (NON-LAYERED)



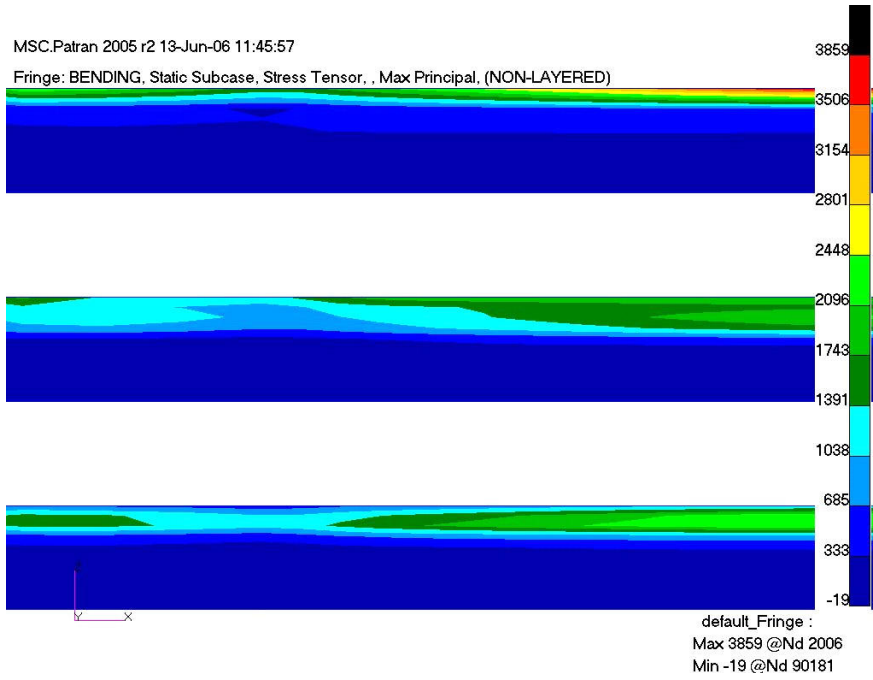
ŞEKİL 10.10 : Numunelerin eğilme yükü altında gerilme dağılımı kıyaslaması

MSC.Patran 2005 r2 13-Jun-06 11:45:57

Fringe: BENDING, Static Subcase, Stress Tensor, , Max Principal, (NON-LAYERED)



ŞEKİL 10.11 : Numunelerin eğilme yükü altında gerilme dağılımı kıyaslaması

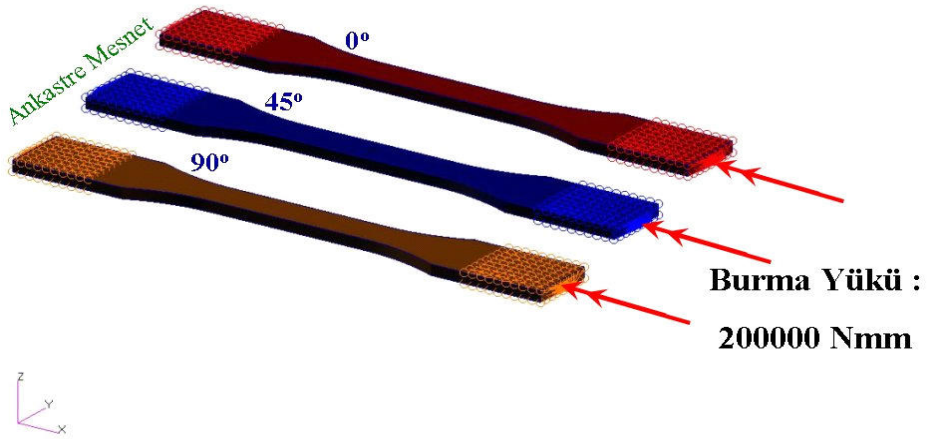


ŞEKİL 10.12 : Numunelerin eğilme yükü altında gerilme dağılımı kıyaslaması (kesit)

Şekil 10.9’da görülen eğilme yüklemede, kritik olan üst katmanlardaki çekme gerilmesi olduğu için, çekme yüklemede olduğu gibi en kritik numune Şekil 11.10, 11.11 ve 11.12’de verildiği gibi 0°’de kesilmiş olmalıdır. Diğer numuneler arasında ise 45°’de kesilmiş olan 90°’de kesilmiş olana göre daha kritik gerilme dağılımına sahiptir.

10.4 BURULMA YÜKÜ KIYASLAMASI

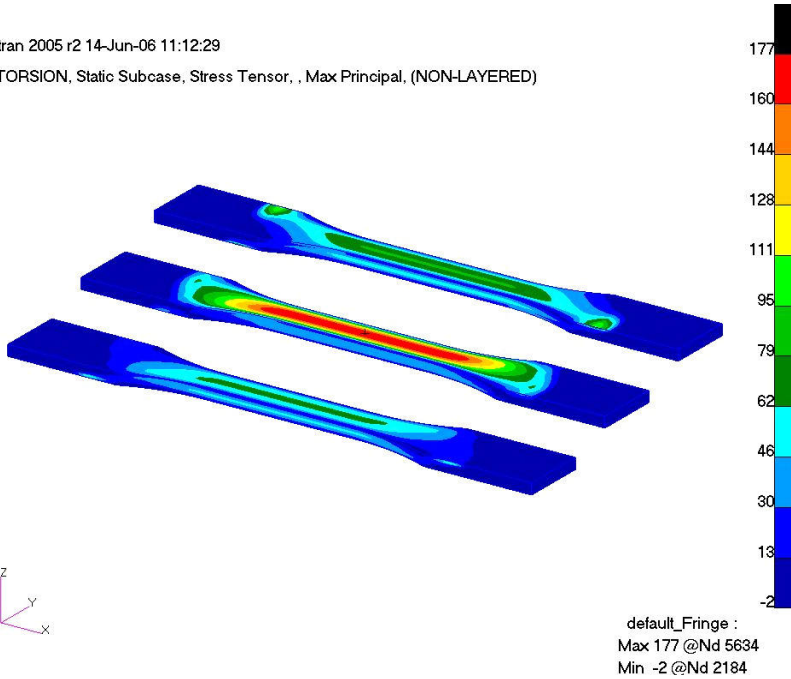
Burulma yükü olarak +x yönünde 200.000Nmm moment uygulanmıştır (Şekil 10.13).



ŞEKİL 10.13. 0°, 45° ve 90°'de kesilmiş numunelere burulma yükünün uygulanması

MSC.Patran 2005 r2 14-Jun-06 11:12:29

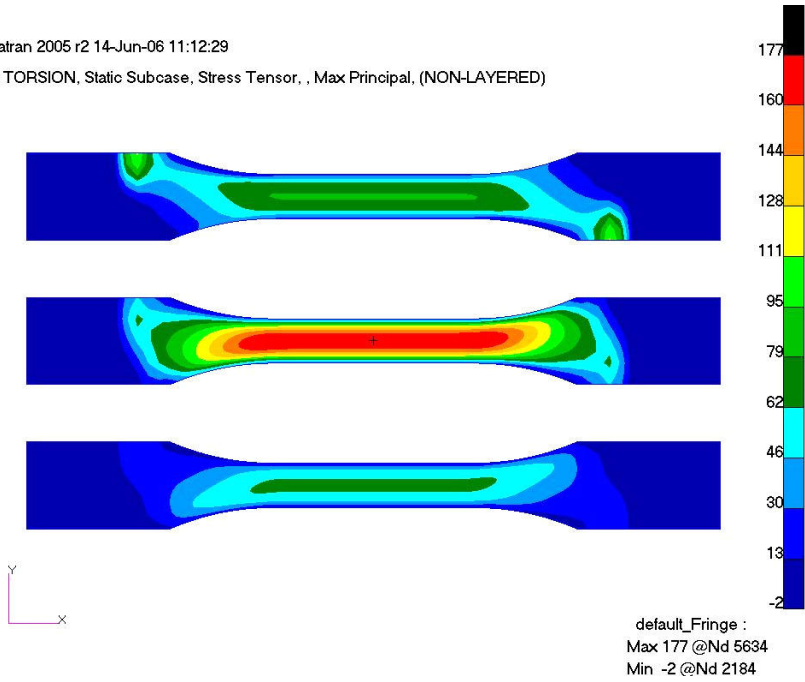
Fringe: TORSION, Static Subcase, Stress Tensor, , Max Principal, (NON-LAYERED)



ŞEKİL 10.14. Numunelerin burulma yükü altında gerilme dağılımı kıyaslaması

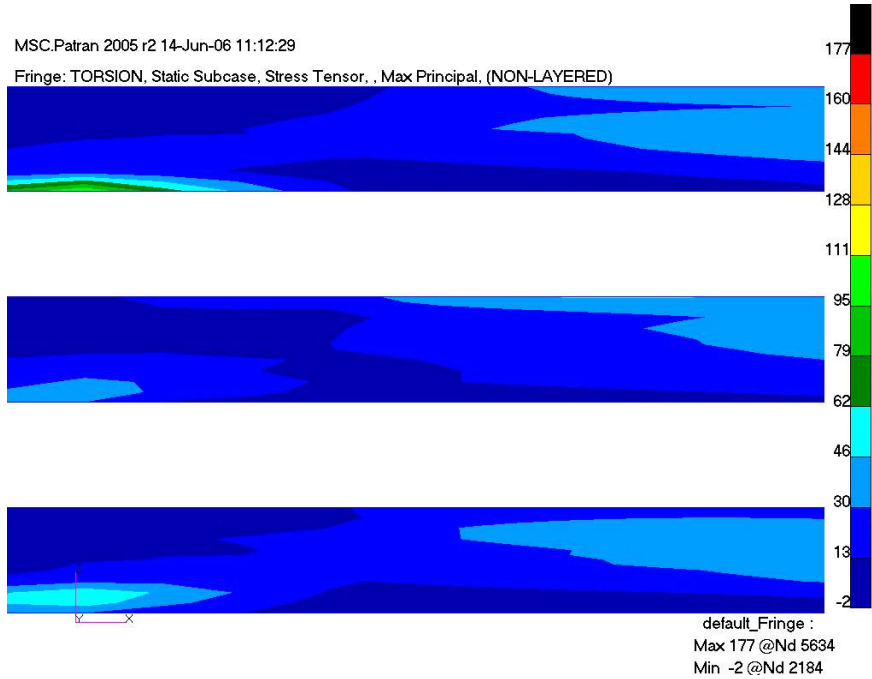
MSC.Patran 2005 r2 14-Jun-06 11:12:29

Fringe: TORSION, Static Subcase, Stress Tensor, , Max Principal, (NON-LAYERED)

**ŞEKİL 10.15.** Numunelerin burulma yükü altında gerilme dağılımı kıyaslaması

MSC.Patran 2005 r2 14-Jun-06 11:12:29

Fringe: TORSION, Static Subcase, Stress Tensor, , Max Principal, (NON-LAYERED)

**ŞEKİL 10.16.** Numunelerin burulma yükü altında gerilme dağılımı kıyaslaması (kesit)

Burulma zorlaması altında en dayanıklı numune 90° 'de kesilmiş olan iken en kritik numune ise 45° 'de kesilmiş olandır (Şekil 10.14, 10.15 ve 10.16). Çünkü toplam olarak katmanların %50'sini oluşturan 45° oryantasyonlu katmanların yük taşımaya olan etkileri oldukça düşüktür.

Bu kısımda incelenmiş tüm yükleme durumları için numunelerin her katmanında görülen maksimum gerilme değeri sonuçları Tablo 10.1'de verilmiştir.

TABLO 10.1. Numunenin katman bazında farklı yüklemeler altındaki maksimum gerilme değerleri

KATMAN	ÇEKME SİMÜLASYONU GERİLME DEĞERLERİ			BASMA SİMÜLASYONU GERİLME DEĞERLERİ			EĞİLME SİMÜLASYONU GERİLME DEĞERLERİ			BURULMA SİMÜLASYONU GERİLME DEĞERLERİ		
	0	45	90	0	45	90	0	45	90	0	45	90
1	237	93	140	569	260	1117	3859	2101	2425	114	177	65
2	143	148	160	569	181	556	2256	2388	2462	72	98	101
3	99	148	160	567	519	204	814	2388	2462	66	37	101
4	101	137	101	159	521	212	792	1671	1016	66	39	83
5	101	167	162	721	521	226	467	532	557	56	39	48
6	75	167	165	724	521	226	193	412	286	50	39	48
7	162	84	165	724	521	732	105	162	201	51	39	49
8	162	175	78	151	521	732	60	140	126	61	40	49
9	162	175	101	151	581	726	59	465	126	67	40	84
10	97	147	164	559	581	187	199	465	96	67	103	103
11	138	112	164	560	576	513	199	463	212	72	105	103
12	228	114	143	560	253	1031	198	125	425	112	105	66

11. GENEL DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada heterojen bir kompozit malzemenin, sonlu elemanlar yöntemi tabanlı paket programlar aracılığı ile modellenmesi ve analiz sonunda çıkan gerilme sonuçları aracılığıyla yorulma analizi yapılması incelenmiştir. Ayrıca, kabuk ve katı elemanlar kullanılarak gerçekleştirilen analize eleman tipinin etkisi araştırılmıştır. Tüm analiz sonuçları, deney sonuçlarıyla karşılaştırılarak desteklenmiş ve ayrıntılı sonuçlarla yorumlara Bölüm 7.2 ve 8-10'da yer verilmiştir.

Kabuk elemanlar kullanılarak yapılan analiz sonucunda, kompozitin bir bütün olarak sonuçlarına ulaşmak yerine her katmanındaki gerilme ve yorulma dağılımlarını ya da paket program yardımı ile katmanlardaki sonuçların toplamını, ortalamasını veya maksimum değerlerini elde etmek mümkündür. Fakat katı eleman kullanıldığında kompozitin bir bütün halinde çalışması sonucu ulaşılan sonuçlar daha homojen ve daha doğrudur. Kalınlık yönünde de inceleme yapılmasına olanak sağladığından, boyuna en kesitte gerilme yaratan (burulma gibi) yükleme şekillerinin incelenebilmesini mümkün kılar.

Katı elemanlar kullanılarak modellenen kompozit numunelere ait analiz sonuçlardan da görülebileceği gibi, kompozit levhanın gerilme dağılımı kabuk olarak modellenen kompozite göre enine kesitte ve kalınlık yönünde daha homojen bir dağılım göstermektedir. Uygulanan kuvvet, katmanlar arasında daha gerçekçi ve daha homojen bir şekilde paylaşılarak taşınmaktadır. Bu sebeple, katman yorulma ömürleri

arasında kabuk modele kıyasla farklılıklar göze çarpmaktadır. Ayrıca çekme düzeneğinin çenesi gerçekçi olarak modellendiği için, çene tarafından tutulan ve çekme kuvvetine doğrudan maruz kalan en alt ve en üst katmanlarda gerilme beklendiği gibi daha yüksek çıkmış yorulma ömrü de buna bağlı olarak azalmıştır. Orta katmanlarda ise bu etki gözlenmemektedir.

Katı elemanlı analiz yöntemi kullanılarak, daha karmaşık geometrilere sahip kompozit malzemelerin daha kompleks yükleme koşulları altında analizlerini yaparak elde edilen sonuçları karşılaştırmak mümkündür.

Ayrıca sonuçlar katman bazında incelenebildiği için, kompozit parçanın maruz kaldığı yükleme durumuna bağlı olarak kullanılacak oryantasyon ve kalınlık gibi dizayn parametrelerine karar vermek mümkündür.

Bu çalışmada görüldüğü gibi, test sonuçlarından da yararlanarak, doğru malzeme karakteristiğini yansıtan Wöhler eğrileri kullanarak, testleri sürekli olarak tekrarlamadan gerilme analizleri yardımıyla, gerçeğe yakın yorulma ömür analizi sonuçlarına ulaşmak mümkündür. Böylelikle, dizayn elemanlarının kritik bölgelerini önceden saptayarak gerekli düzeltmeler yapmak, dizayn ve malzeme mühendislerine zaman ve maliyet açılarından çok önemli katkılarda bulunması beklenmektedir.

Sonlu elemanlar yönteminin kesin sonuçlar bulmak için değil de iki farklı parça arasında test yapılmaksızın kıyaslama yapabilmek amacı ile kullanıldığı unutulmamalıdır. Bu test ve analiz sonucunda bu tezde anlatılan kalibre edilmiş yöntem ile kompozitlerde yorulma analizi kıyaslaması yapmak mümkün olmuştur.

Yorulma ömrü kıyası yaparken sonlu elemanlar yöntemini kullanan bir paket program kullanmanın sağlayacağı yararlar aşağıda verilmiştir:

- MSC Fatigue programı her düğüm noktasındaki yorulma ömür değerini ki, düğüm noktası sayısı geometrinin büyüklüğüne ve ağ yapısına bağlı olarak binlerce olabilir; çok kısa sürelerde hesaplama yeteneğine sahiptir.
- Bu çalışma için kullanılmasına gerek olmayan, fakat çoğu durumda ihtiyaç duyulan ve analitik olarak hesabı kolay olmayan ortalama gerilme düzeltmesini birden fazla sayıda farklı yöntem ile yapabilme yeteneği mevcuttur.
- Parça üzerinde, sonuçları renkler ile derecelendirme özelliği sayesinde, karmaşık durumlarda kritik noktaların kolay anlaşılabilmesini sağlar.
- Sonuçlar katman bazında da hesaplanabildiği ve görüntülenebildiği için katmanların kalınlığının ve diziliminin parça üzerindeki etkileri incelenebilir.

Bu tez kapsamında gerçekleştirilmemiş, fakat tezin devamı niteliğinde araştırılabilecek konular aşağıda sıralanmıştır:

- Daha karmaşık parçalar, test numuneleri ve değişik oryantasyona sahip kompozitler modellenerek, değişik yükleme koşullarında kıyaslamaları yapılabilir.
- Deniz ortamında yorulma analizi yapabilmek için, her seferinde deniz ortamındaki Wöhler eğrisini elde edebilmek amacıyla test yapmak yerine, parçaya ön gerilme uygulanarak ve atmosferik ortamdaki Wöhler eğrisi kullanılarak sonuçların elde edilebilmesine yönelik çalışmalar yapılabilir.
- Ön form verilmiş yüzeylere sahip geometrilere kompozit malzeme tanımlı yapabilmek ve üretim koşullarını da simülasyon parametresi olarak analize dahil edebilmek için, yine “MSC Laminate Modeller” isimli program kullanılıp sonuçlar kıyaslanabilir.

KAYNAK DİZİNİ

Aytekin, O., 2005, Numerical and Experimental Investigation of Fatigue Life in Deep Drawn Parts, Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ.

Arabyan, A., 1999, EMAE 415 Lectures Finite Element Analysis, University of Arizona.

Erbil, C., 2005, Cam Elyafli Kompozit Malzemelerin Korozi Ortamda Yorulması, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi.

Filippini, M., 1994, A Critical Analysis of Multiaxial Fatigue Criteria, Graduate Thesis, Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano.

Hammami, A.; Al-Ghuilani N., 2004, Durability and Environmental Degradation of Glass-Vinylester Composites , Society of Plastics Engineers, Vol.25, No.6.

Isaac, M. D.; Ori, Ishai, 1994, Engineering Mechanics of Composite Materials, Oxford University Press.

Kaw, A. K., 1997, Mechanics of Composite Materials, CRC Press.

Kuguel, R., 1986, A Relation between Theoretical Stress Concentration Factor and Fatigue Notch Factor Deduced from the Concept of Highly Stressed Volume, Proceedings of the American Society for Testing and Materials, vol. 61, ASTM, pp 732-748.

Liao, K.; Schultheisz, C.R., Hunston, D.L., 1998, Effects of Environmental Ageing on the Properties of Pultruded GFRP, Composites Part B 30, 485-493, Elsevier Science Ltd.

Mallick, P. K., 1997, Composites Engineering Handbook, Marcel Dekker Inc., New York.

MSC Patran, 2004, MSC Patran Help Files, MSC.

Middendorf, J., 1997, Analysis of Composite Aerospace Structures, CRC Press, #3049731.

Pauchard, V.; Chateauminois, F.; Grosjean, F.; Odru, P., 2002, In Situ Analysis of Delayed Fibre Failure Within Water-Aged GFRP Under Static Fatigue Conditions, International Journal of Fatigue, Elsevier Science Ltd., 24(2002) 447-454.

Sun, Z.; Isaac, M. D.; Luo, J. J., 2003, Modelling of Fatigue Damage in a Polymer Matrix Composite, Elsevier Science Ltd., Materials Science and Engineering, 302-311.

Shigley, J. E.; Mischke, C. R., 1986, Standart Handbook of Machine Design, McGraw-Hill Inc., ISBN 0-07-056892-8.

Van Paepegem, W.; Degrieck, J.; De Baets P., 2001, Finite Element Approach for Modelling Fatigue Damage in Fibre Reinforced Composite Materials, Composites Part B, 32(7), 575-588.

ÖZGEÇMİŞ

Yazar 26/01/1980, İzmir, Türkiye doğumludur. Türkiye Cumhuriyeti vatandaşıdır. İlk, orta ve lise öğrenimini İzmir de tamamlamıştır. Lisans eğitimini Yıldız Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Gemi İnşaatı Mühendisliği bölümünde derece ile bitirmiştir. Bir yıldır otomotiv sektöründe Sonlu Elemanlar Analizi Mühendisliği yapmaktadır.