

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BÜNYESİNDE ÇATLAK BULUNAN LEVHANIN BORON-EPOKSİ YAMA İLE
TAMİRİNDE İKİ FARKLI YAPIŞTIRICININ BİRLİKTE KULLANILMASININ
KAYMA GERİLMELERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

MUSTAFA ÇAY

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
KONSTRÜKSİYON PROGRAMI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. HALİL ÖZER**

İSTANBUL, 2016

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BÜNYESİNDE ÇATLAK BULUNAN LEVHANIN BORON-EPOKSİ YAMA İLE
TAMİRİNDE İKİ FARKLI YAPIŞTIRICININ BİRLİKTE KULLANILMASININ
KAYMA GERİLMELERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

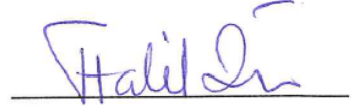
Mustafa ÇAY tarafından hazırlanan tez çalışması 29.04.2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

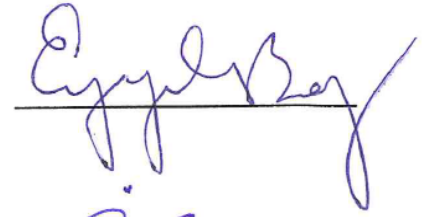
Prof. Dr. Halil ÖZER
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

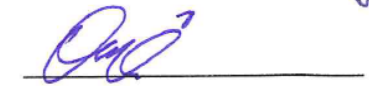
Prof. Dr. Halil ÖZER
Yıldız Teknik Üniversitesi



Doç. Dr. Eyüp BAĞCI
Yıldız Teknik Üniversitesi



Yrd. Doç. Dr. Özkan ÖZ
Karabük Üniversitesi



ÖNSÖZ

Bu çalışmayı seçmem ve bu alanda ilerleme kaydetmemde bilgi ve tecrübesiyle bana yol gösteren saygıdeğer Hocam, Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Mekanik A.B.D. öğretim üyelerinden Prof. Dr. Halil ÖZER' e teşekkürü borç bilirim. Yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmam boyunca bana her zaman destek olan Altınay Robot Teknolojileri A.Ş. Ürün&Sistem departmanı müdürü Sn. Ali KAYA' ya ve her anımda desteği ile yanımda olan müstakbel eşim Yeliz ÇAY' a şükranlarımı sunarım.

Mart, 2016

Mustafa ÇAY

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xv
BÖLÜM 1	
GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti.....	1
1.2 Tezin Amacı.....	5
1.3 Orjinal Katkı	6
BÖLÜM 2	
YAPIŞTIRICILAR VE YAPIŞTIRMA BAĞLANTILARI	7
2.1 Yapıştırma Bağlantıları	7
2.2 Yapıştırıcılar	8
2.2.1 Akrilik Yapıştırıcılar	8
2.2.2 Epoksi Yapıştırıcılar	8
2.2.3 Adezyon Kuvveti	9
2.2.4 Kohezyon Kuvveti	9
2.3 Formları Açısından Yapıştırıcılar	9
2.3.1 Macun Tip Yapıştırıcılar	9
2.3.2 Film Tip Yapıştırıcılar.....	10
2.3.3 Düşük Viskoziteli Yapıştırıcılar	10
2.3.4 Reçineler.....	10
2.3.5 Düşük Yoğunluklu Yapıştırıcılar	10

2.3.6	Köpükler	11
2.4	Yapıştırma Bağlantı Çeşitleri	11
2.4.1	Tek Bindirmeli Yapıştırma Bağlantıları (Single Lap Joint)	11
2.4.2	Çift Bindirmeli Yapıştırma Bağlantıları (Double Lap Joint)	11
2.4.3	Basamaklı Bindirme Bağlantıları	11
2.4.4	Eğimli Bindirme Bağlantıları	12
2.4.5	Alın Bindirme Bağlantıları	12
2.5	Hibrit Yapıştırmalı Bağlantıları	12
2.6	Mühendislik Açısından Yapıştırıcıların Kullanımı	13
2.6.1	Yapıştırma Bağlantılarının Avantajları	13
2.6.2	Yapıştırma Bağlantılarının Dezavantajları	14

BÖLÜM 3

KIRILMA MEKANİĞİ VE SONLU ELEMENLAR METODU	16
--	----

3.1	Kırılma Mekanikliği Temel Kavramları	16
3.2	Çatlak Ucunda Gerilme Dağılımı	18
3.3	Çatlak İlerleme Doğrultusu	20
3.4	Enerji Salıverme Oranı ve Gerilme Şiddeti Faktörü İlişkisi	21
3.5	Sonlu Elemanlar Metodu (SEM)	22
3.5.1	8 Düğümlü Dörtgen Eleman	22
3.5.1.1	8 Düğümlü Dörtgen İzoparametrik Elemanın Şekil Fonksiyonu..	23
3.5.1.2	Eleman Direngenlik Matrisi	27
3.5.2	Genel Gerilme Şekil Değiştirme Bağlantıları	29
3.5.2.1	Düzlem Gerilme Durumu	30
3.5.2.2	Düzlem Şekil Değiştirme Durumu	31
3.5.3	Eşdeğer Gerilmelerin Elde Edilmesi	31
3.6	J İntegral Metodu	32
3.7	Sonlu Elemanlar Programı (Franc2D/L)	33

BÖLÜM 4

KOMPOZİT YAMA VE HİBRİT YAPIŞTIRMA İLE TAMİR EDİLEN BAĞLANTININ SONLU ELEMENLAR MODELİ VE ANALİZİ	35
---	----

4.1	Giriş	35
4.2	Problemin Tanımı	36
4.3	Geometrik Modeli	37
4.4	Yapıştırma Çizgisi ve Hibrit Yapıştırmalı Model	39
4.4.1	Literatür Çalışması Birinci Yapıştırma Konfigürasyonu	40
4.4.2	Literatür Çalışması İkinci Yapıştırma Konfigürasyonu	40
4.5	Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması ve Sınır Şartları	41
4.6	Literatür Çalışmasının İncelenmesi ve Sonuçların Elde Edilmesi	42
4.7	Araldite 2015 - Araldite AV138M Hibrit Yapıştırma Modeli	51
4.7.1	Araldite 2015 - Araldite AV138M Hibrit Modelinde Yapıştırma Kalınlıklarının G_I Üzerindeki Etkisi	51

4.7.2	Araldite 2015 - Araldite AV138M Hibrit Modelinde Farklı λ Değerlerinin G_I Üzerindeki Etkisi	53
4.7.3	Araldite 2015 - Araldite AV138M Hibrit Modeli Yapıştırıcı Bölgesinde Meydana Gelen Kayma Gerilmeleri.....	55
4.8	DP 8005 - Araldite AV138M Hibrit Yapıştırma Modeli	61
4.8.1	DP 8005 - Araldite AV138M Hibrit Modelinde Yapıştırma Kalınlıklarının G_I Üzerindeki Etkisi.....	61
4.8.2	DP 8005 - Araldite AV138M Hibrit Modelinde Farklı λ Değerlerinin G_I Üzerindeki Etkisi	64
4.8.3	DP 8005 - Araldite AV138M Hibrit Modelin Yapıştırıcı Bölgesinde Meydana Gelen Kayma Gerilmeleri.....	65
4.9	Mono Yapıştırma Modelleri	71
4.9.1	Mono Modellerin Kırılma Enerjilerinin Karşılaştırılması	71
4.9.2	Araldite AV138M Mono Modelde Yapıştırıcı Kayma Gerilmeleri	72
4.9.3	Araldite 2015 Mono Modelde Yapıştırıcı Kayma Gerilmeleri	74
4.9.4	DP 8005 Mono Modelde Yapıştırıcı Kayma Gerilmeleri	75
4.9.5	Mono ve Hibrit Yapıştırmalı Modellerden Elde Edilen Sonuçların Birleştirilmesi.....	77
BÖLÜM 5		
SONUÇ VE ÖNERİLER		80
KAYNAKLAR		84
EK-A		
MONO YAPIŞTIRMALI MODELLERDE, ÇATLAKLI LEVHADA MEYDANA GELEN σ_x ve σ_y NORMAL GERİLMELERİ.....		87
A-1	Araldite AV138M Mono Modelde Çatlaklı Levha σ_x ve σ_y Normal Gerilmeleri	87
A-2	Araldite 2015 Mono Modelde Çatlaklı Levha σ_x ve σ_y Normal Gerilmeleri	88
A-3	DP 8005 Mono Modelde Çatlaklı Levha σ_x ve σ_y Normal Gerilmeleri	88
ÖZGEÇMİŞ.....		89

SİMGE LİSTESİ

a	Çatlak uzunluğu (mm)
E_a	Yapıştırıcı elastisite modülü (MPa)
E_p	Levha elastisite modülü (MPa)
E_r	Yama elastisite modülü (MPa)
G	Enerji serbest kalma oranı (Kırılma Enerjisi) (MPa mm)
G_I	Mod I enerji serbest kalma oranı (MPa mm)
G_a	Yapıştırıcı kayma modülü (MPa)
H_p	Levha yüksekliği (mm)
H_r	Yama yüksekliği (mm)
K	Gerilme şiddeti faktörü (MPa $\sqrt{\text{mm}}$)
K_I	Mod I gerilme şiddeti faktörü (MPa $\sqrt{\text{mm}}$)
K_{IC}	Mod I kırılma tokluğu (MPa $\sqrt{\text{mm}}$)
L_f	Katılık derecesi düşük (sünek veya tok) yapıştırıcının yapıştırma yüksekliği (mm)
L_s	Katılık derecesi yüksek (gevrek) yapıştırıcının yapıştırma yüksekliği (mm)
t_a	Yapıştırıcı kalınlığı (mm)
t_p	Levha kalınlığı (mm)
t_r	Yama kalınlığı (mm)
w_p	Levha genişliği (mm)
w_r	Yama genişliği (mm)
λ	Hibrit oranı (L_f/L_s)
ν	Poisson oranı
ϵ	Birim şekil değiştirme
γ_s	Yeni oluşan yüzey enerjisi
σ	Normal gerilme (MPa)
τ	Kayma gerilmesi (MPa)

KISALTMA LİSTESİ

LEKM	Lineer Elastik Kırılma Mekaniği (Lineer Elastic Fracture Mechanics)
SEM	Sonlu Elemanlar Metodu (Finite Element Method)
UV	Ultraviyole

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Tek bindirmeli yapıştırma bağlantısı (Single lap joint)	11
Şekil 2.2 Çift bindirmeli yapıştırma bağlantısı (Double lap joint)	11
Şekil 2.3 Basamaklı bindirme bağlantısı	12
Şekil 2.4 Eğimli bindirme bağlantısı.....	12
Şekil 2.5 Alın bindirme bağlantısı	12
Şekil 2.6 Hibrit yapıştırmalı bağlantı yapıştırıcı düzeni	12
Şekil 3.1 Lineer elastik kırılma mekaniğinde tanımlanan modlar	17
Şekil 3.2 İki modun birlikte etkimesi hali.....	18
Şekil 3.3 Çatlak ucu gerilmeleri	19
Şekil 3.4 Sekiz düğümlü dörtgen eleman	22
Şekil 3.5 J İntegral Eğrisi	33
Şekil 4.1 Bu çalışmada kullanılan iki farklı hibrit yapıştırmalı model.....	36
Şekil 4.2 Bu çalışmada kullanılan üç farklı mono yapıştırmalı model	36
Şekil 4.3 Geometrik model	38
Şekil 4.4 Yapıştırıcıların yama üzerinde dağılımı ve yapıştırma çizgisi.....	39
Şekil 4.5 Literatür çalışması birinci yapıştırma konfigürasyonu	40
Şekil 4.6 Literatür çalışması ikinci yapıştırma konfigürasyonu	40
Şekil 4.7 Levha, yama ve çatlak civarındaki ağ yapısı	41
Şekil 4.8 Geometrik model sınır şartları	42
Şekil 4.9 Farklı G_{a1} ve $G_{a2}=100$ MPa için kırılma enerjisi - çatlak uzunluğu diyagramı (Birinci tamir konfigürasyonu)	43
Şekil 4.10 Farklı G_{a1} ve $G_{a2}=400$ MPa için kırılma enerjisi - çatlak uzunluğu diyagramı (Birinci tamir konfigürasyonu)	44
Şekil 4.11 Farklı yapıştırma yükseklikleri için kırılma enerjisi - çatlak uzunluğu diyagramı (Birinci tamir konfigürasyonu)	45
Şekil 4.12 Farklı yapıştırıcı kalınlıkları için kırılma enerjisi - çatlak uzunluğu diyagramı (İkinci tamir konfigürasyonu)	46
Şekil 4.13 Farklı yapıştırma yükseklikleri için kırılma enerjisi - çatlak uzunluğu diyagramı (İkinci tamir konfigürasyonu)	47
Şekil 4.14 Kayma gerilmeleri incelemesi için sanal çizgi hattı	48
Şekil 4.15 Yapıştırıcı bölgesi τ_{zx} kayma gerilmeleri dağılımı (Birinci tamir konfigürasyonu)	48

Şekil 4.16	Yapıştırıcı bölgesi τ_{zy} kayma gerilmeleri dağılımı (Birinci tamir konfigürasyonu)	49
Şekil 4.17	Yapıştırıcı bölgesi τ_{zx} kayma gerilmeleri dağılımı (İkinci tamir konfigürasyonu)	49
Şekil 4.18	Yapıştırıcı bölgesi τ_{zy} kayma gerilmeleri dağılımı (İkinci tamir konfigürasyonu)	50
Şekil 4.19	Aynı yapıştırıcı kalınlıkları için kırılma enerjisi - çatlak uzunluğu diyagramı (Araldite 2015 ve Araldite AV138M)	52
Şekil 4.20	Farklı yapıştırıcı kalınlıkları için kırılma enerjisi - çatlak uzunluğu diyagramı (Araldite 2015 ve Araldite AV138M)	53
Şekil 4.21	Aynı kalınlıkta yapıştırıcıların farklı λ değerleri için kırılma enerjisi - çatlak uzunluğu diyagramı (Araldite 2015 ve Araldite AV138M)	54
Şekil 4.22	Farklı kalınlıkta yapıştırıcıların farklı λ değerleri için kırılma enerjisi - çatlak uzunluğu diyagramı (Araldite 2015 ve Araldite AV138M)	55
Şekil 4.23	Farklı kalınlıkta yapıştırıcı kullanıldığında $\lambda=1$ için yapıştırıcı bölgesi τ_{zx} kayma gerilmeleri dağılımı (Araldite 2015 ve Araldite AV138M)	56
Şekil 4.24	Farklı kalınlıkta yapıştırıcı kullanıldığında $\lambda=1$ için yapıştırıcı bölgesi τ_{zy} kayma gerilmeleri dağılımı (Araldite 2015 ve Araldite AV138M)	57
Şekil 4.25	Farklı kalınlıkta yapıştırıcı kullanıldığında $\lambda=3.25$ için yapıştırıcı bölgesi τ_{zx} kayma gerilmeleri dağılımı (Araldite 2015 ve Araldite AV138M)	58
Şekil 4.26	Farklı kalınlıkta yapıştırıcı kullanıldığında $\lambda=3.25$ için yapıştırıcı bölgesi τ_{zy} kayma gerilmeleri dağılımı (Araldite 2015 ve Araldite AV138M)	58
Şekil 4.27	Farklı kalınlıkta yapıştırıcı kullanıldığında $\lambda=0.33$ için yapıştırıcı bölgesi τ_{zx} kayma gerilmeleri dağılımı (Araldite 2015 ve Araldite AV138M)	59
Şekil 4.28	Farklı kalınlıkta yapıştırıcı kullanıldığında $\lambda=0.33$ için yapıştırıcı bölgesi τ_{zy} kayma gerilmeleri dağılımı (Araldite 2015 ve Araldite AV138M)	60
Şekil 4.29	Aynı yapıştırıcı kalınlıkları için kırılma enerjisi - çatlak uzunluğu diyagramı (DP 8005 ve Araldite AV138M)	61
Şekil 4.30	Farklı yapıştırıcı kalınlıkları için kırılma enerjisi - çatlak uzunluğu diyagramı (DP 8005 ve Araldite AV138M)	63
Şekil 4.31	Aynı kalınlıkta yapıştırıcıların farklı λ değerleri için kırılma enerjisi - çatlak uzunluğu diyagramı (DP 8005 ve Araldite AV138M)	64
Şekil 4.32	Farklı kalınlıkta yapıştırıcıların farklı λ değerleri için kırılma enerjisi - çatlak uzunluğu diyagramı (DP 8005 ve Araldite AV138M)	65
Şekil 4.33	Farklı kalınlıkta yapıştırıcı kullanıldığında $\lambda=1$ için yapıştırıcı bölgesi τ_{zx} kayma gerilmeleri dağılımı (DP 8005 ve Araldite AV138M)	66
Şekil 4.34	Farklı kalınlıkta yapıştırıcı kullanıldığında $\lambda=1$ için yapıştırıcı bölgesi τ_{zy} kayma gerilmeleri dağılımı (DP 8005 ve Araldite AV138M)	67
Şekil 4.35	Farklı kalınlıkta yapıştırıcı kullanıldığında $\lambda=3.25$ için yapıştırıcı bölgesi τ_{zx} kayma gerilmeleri dağılımı (DP 8005 ve Araldite AV138M)	68
Şekil 4.36	Farklı kalınlıkta yapıştırıcı kullanıldığında $\lambda=3.25$ için yapıştırıcı bölgesi τ_{zy} kayma gerilmeleri dağılımı (DP 8005 ve Araldite AV138M)	68
Şekil 4.37	Farklı kalınlıkta yapıştırıcı kullanıldığında $\lambda=0.33$ için yapıştırıcı bölgesi τ_{zx} kayma gerilmeleri dağılımı (DP 8005 ve Araldite AV138M)	69
Şekil 4.38	Farklı kalınlıkta yapıştırıcı kullanıldığında $\lambda=0.33$ için yapıştırıcı bölgesi τ_{zy} kayma gerilmeleri dağılımı (DP 8005 ve Araldite AV138M)	70

Şekil 4.39	Mono yapıştırılmalı modelleri kırılma enerjisi değişimi.....	71
Şekil 4.40	Araldite AV138M mono yapıştırılmalı model τ_{zx} kayma gerilmeleri dağılımı	73
Şekil 4.41	Araldite AV138M mono yapıştırılmalı model τ_{zy} kayma gerilmeleri dağılımı	73
Şekil 4.42	Araldite 2015 mono yapıştırılmalı model τ_{zx} kayma gerilmeleri dağılımı	74
Şekil 4.43	Araldite 2015 mono yapıştırılmalı model τ_{zy} kayma gerilmeleri dağılımı	75
Şekil 4.44	DP 8005 mono yapıştırılmalı model τ_{zx} kayma gerilmeleri dağılımı.....	76
Şekil 4.45	DP 8005 mono yapıştırılmalı model τ_{zy} kayma gerilmeleri dağılımı.....	76
Şekil 4.46a	Araldite AV138M ve Araldite 2015 mono ve hibrit yapıştırılmalı modeller için τ_{zx} kayma gerilmeleri dağılımı	77
Şekil 4.46b	Araldite AV138M ve Araldite 2015 mono ve hibrit yapıştırılmalı modeller için τ_{zy} kayma gerilmeleri dağılımı	78
Şekil 4.47a	Araldite AV138M ve DP 8005 mono ve hibrit yapıştırılmalı modeller için τ_{zx} kayma gerilmeleri dağılımı.....	79
Şekil 4.47b	Araldite AV138M ve DP 8005 mono ve hibrit yapıştırılmalı modeller için τ_{zy} kayma gerilmeleri dağılımı.....	79



ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 4.1 Yapıştırıcıların mekanik özellikleri	38
Çizelge 4.2 Boron-Epoksinin mekanik özellikleri	39

**BÜNYESİNDE ÇATLAK BULUNAN LEVHANIN BORON-EPOKSİ YAMA İLE
TAMİRİNDE İKİ FARKLI YAPIŞTIRICININ BİRLİKTE KULLANILMASININ
KAYMA GERİLMELERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Mustafa ÇAY

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Halil ÖZER

Bu çalışmada amaç, bünyesinde çatlak bulunan levhanın, kompozit yama ve yapıştırıcı ile tamirinde, tek tip yapıştırıcının kullanıldığı mono model ve mekanik özellikleri aynı olmayan iki farklı yapıştırıcının birlikte kullanıldığı hibrit modelin, tek bindirmeli yapıştırma bağlantısında kayma gerilmesi ve kırılma enerjisine etkisini incelemektir. Ayrıca; yapıştırıcı kalınlığının, tipinin, hibrit yapıştırırmalı modellerde sünek/gevrek bindirme uzunlukları oranının, kayma gerilmesi dağılımları ve kırılma enerjilerine etkileri incelenmiştir.

Tez çalışmasına geçmeden önce, literatürden örnek bir model seçilmiş, bu problem birebir modellenerek analiz edilmiş ve bu çalışmada elde edilen tüm sonuçlar tarafımızdan elde edilmiştir. Bu tez çalışmasında ise öncelikle, hibrit yapıştırırmalı modeller oluşturulmuştur. Hibrit modellerin birincisinde Araldite AV138M ve Araldite 2015 kullanılmış olup ikincisinde Araldite AV138M ve DP 8005 kullanılmıştır. Daha sonra Araldite AV138M, Araldite 2015 ve DP 8005 yapıştırıcılarının tek kullanıldığı mono yapıştırırmalı modeller oluşturulmuştur. Tüm modeller için kayma gerilmelerinin analizleri yapılmıştır. Yapıştırıcı kayma gerilmeleri τ_{zx} ve τ_{zy} , çatlak ucuna dik bir sanal çizgi boyunca incelenmiştir. Ayrıca oluşturulan modeller için enerji serbest kalma

oranlarının dağılımları elde edilmiştir. Gerilme ve kırılma enerjisi analizlerinde Franc2D/L programı kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Enerji salıverme oranı, kırılma enerjisi, hibrit yapıştırma, mono yapıştırma, epoksi yapıştırıcı, kırılma mekaniği, yapıştırıcı gerilmeleri, sonlu elemanlar metodu, çatlak ve çatlak boyu



ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF THE BI-ADHESIVE BONDLINE ON SHEAR STRESSES OF CRACKED PLATE REPAIRED WITH BORON-EPOXY PATCH

Mustafa ÇAY

Department of Mechanical Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Prof. Dr. Halil ÖZER

The aim of this study, to investigate the use of monotype adhesives called mono models and the use of two different types of adhesives together that have different mechanical properties called hybrid models, for the effects to the shear stress and fracture energy in a cracked plate which is repaired by composite patch and adhesive. The effects of adhesive thickness, adhesive type, flexible/brittle lap length ratio in hybrid models on the shear stress distributions and fracture energy have also studied.

Before the thesis, a sample literature study was selected, then analysed with the same model and all the results of that study was obtained. Firstly, the hybrid models were created in the thesis. In the first hybrid model, Araldite AV138M and Araldite 2015 was used and in the second one, Araldite AV138M and DP 8005. And then, we created the mono models with use of Araldite AV138M, Araldite 2015 and DP 8005 one by one. For all models the shear stress analysis were done. The adhesive shear stresses τ_{zx} and τ_{zy} were investigated along a virtual line which is perpendicular to the crack tip. The energy release rate distributions were also obtained for all models. Franc2D/L program was used for the analysis of the stress and energy release rate.

Keywords: Energy release rate, fracture energy, hybrid bonding, mono bonding, epoxy adhesive, fracture mechanics, adhesive stresses, finite element method, crack and crack length



GİRİŞ

Yapısal yapıştırıcılar, otomotiv, uçak, uzay ve gemi inşa endüstrisinde sıkça kullanılan ürünlerdir. Yapıştırıcılar düzlemsel yüzeyler vasıtasıyla montaj elemanlarının bağlantılarının kolayca yapılabilmesine olanak tanıdığı gibi, özellikle havacılık sanayinde çatlaklı yüzeyler üzerine yama yapılması suretiyle tamir aracı olarak kullanımına da sıklıkla rastlanılmaktadır. Genel olarak pratikte mono yapıştırırmalı uygulamalarla karşılaşılır. Yüksek gerilme konsantrasyonları ve yapıştırıcı bağlantısı uç kısımlarının gerilmelerini düşürebilmek için alternatif bir yöntem olarak hibrit yapıştırırmalı bağlantılar kullanılabilir. Hibrit yapıştırırmalı bağlantılar, yapıştırma çizgisi boyunca, ortada katılık derecesi yüksek (gevrek) ve uçlarda katılık derecesi düşük (esnek) yapıştırıcılar ile oluşturulan bağlantılardır.

1.1 Literatür Özeti

Hu vd. [1], bindirme yapıştırma bağlantısında kullanılan ECCOBOND45LV epoksi yapıştırıcının kırılma tokluk, kayma, soyulma gerilmeleri ve enerji serbest kalma oranını hesaplamışlardır.

Kafkalidis ve Thouless [2], tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarının detaylı analizini kohezif bölge yaklaşımını kullanarak yapmışlardır. İlk bölümde elastik bağlantı bölgesinin mukavemetini; geometrinin etkisi, yapıştırıcı mukavemeti ve karma mod etkileri altında incelemişlerdir. İkinci bölümde ise plastisitenin yapıştırıcı üzerinde ki etkileri araştırılmış ve elastik-plastik bölge davranışları arasında karşılaştırma yapmışlardır. Son olarak üzerinde çalışılan modeli nümerik ve deneysel olarak incelemişlerdir, modelde ticari amaçlı bir yapıştırıcı ve alüminyum alaşımı malzeme

kullanmışlardır. Çalışma sonucunda nümerik ve deneysel çalışma sonuçlarının birbirleriyle çok iyi örtüştüğü sonucuna ulaşmışlardır.

Bouiadjra vd. [3], kompozit yama malzemesi ve yapıştırıcı kullanılarak tamir edilmiş çatlaklı bir levhanın modelini kurup sonlu elemanlar metodu ile incelemişlerdir. Mod I ve karma mod etkisi altında çatlak ucunda gerilme şiddeti faktörünü hesaplamışlardır. Yama boyutları ve yapıştırıcı özelliklerinin gerilme şiddeti faktörü üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Mod I' de çatlak uzunluğu arttıkça gerilme şiddeti faktörü davranışının asimptotik olduğunu görmüşlerdir. Ayrıca karma mod incelemesini yaptıklarında, yama boyutlarının, Mod I durumunda gerilme şiddeti faktörünü Mod II' ye göre daha fazla etkilediğini göstermişlerdir.

Achour vd. [4], üzerinde dairesel çentik bulunan bir parçanın kompozit yama malzemesi ve yapıştırıcı kullanılarak tamir edilmesi ile gerilme konsantrasyonlarının değişimi üzerinde çalışmışlardır. Sonlu elemanlar metodu kullanılarak oluşturulan model üzerinde incelemeler yapmış ve yapıştırıcı özellikleri ile gerilme şiddeti faktörünün değişimini incelemişlerdir. Yama kullanılmadan ve yama kullanılarak gerilme konsantrasyonu değişimini ayrı ayrı incelemişler ve yama kullanılması durumunda gerilme konsantrasyonun da %30 düşüş olduğunu göstermişlerdir. Bu sayede sistemin yorulma ömrünün arttığı sonucuna ulaşmışlardır.

Bouiadjra vd. [5], hibrit yapıştırıcı modeli ile kompozit malzemeden yama yapılmış çatlak ihtiva eden alüminyum bir malzeme üzerinde yapıştırıcı özelliklerinin etkilerini incelemişlerdir. Sonlu elemanlar metodu ile analiz edilmek üzere iki farklı model kurmuşlardır. Birincisinde kullanılan yapıştırıcıların kayma modülleri birbirine eşit alınıp farklı kalınlıklarda yapıştırıcılar kullanılarak enerji salıverme oranı değişimleri ve yapıştırma bölgesindeki kayma gerilmelerini incelemişlerdir. İkinci modelde ise yapıştırıcıların kalınlıkları birbirine eşit kabul edilip farklı kayma modüllerine sahip yapıştırıcılar kullanılarak enerji salıverme oranları ve yapıştırıcı bölgesi kayma gerilmelerini incelemişlerdir. Her iki modelde de farklı yapıştırıcı kayma modülleri ve kalınlık varyasyonları için ayrı ayrı incelemeler yapıp, çatlak uzunluğu ile enerji salıverme oranı ve yapıştırıcı bölgesi kayma gerilmelerini incelemişlerdir. Ayrıca farklı yapıştırma genişliklerinin her bir modelde enerji salıverme oranı üzerindeki etkilerini

incelemişlerdir. Farklı kayma modüllerine sahip yapıştırıcılar kullanıldığında tamir konfigürasyonuna bağlı olarak kırılma enerjisinde %40' a yakın bir azalma olduğu ve bununda yorulma ömrüne etkidiği sonucuna ulaşmışlardır. Farklı kalınlıklar ve aynı kayma modülüne sahip yapıştırıcılar kullanılarak yapılan incelemelerde kırılma enerjisinin %25' e kadar düşürülebildiğini göstermişlerdir. Her iki konfigürasyonda da yapıştırıcı bant yüksekliğinin gerilme ve enerji salıverme oranları üzerinde ki etkilerinin önemsenmeyecek kadar az olduğu sonucuna varmışlardır. Yine farklı kayma modüllerine sahip yapıştırıcıların kullanıldığı konfigürasyonda kayma gerilmelerinin varyasyonlara bağlı olarak daha fazla değişim gösterdiği sonucuna varmışlardır.

Bezzerrouki vd. [6], hibrit yapıştırma ile tek ve çift yama yapılarak bünyesinde çatlak ihtiva eden bir levhanın tamir edilmesinde her iki durumu da sonlu elemanlar metodu ile incelemişlerdir. Çalışmada özellikle tek yama kullanarak yapılan tamir işleminin çift yama kullanılan duruma göre avantaj ve üstünlükleri üzerinde durmuşlardır. Her iki kombinasyonda da yapıştırıcı kalınlıkları ve kayma modüllerinin etkisini incelemişlerdir.

Ouinas vd. [7], çatlak ihtiva eden bir alüminyum levhanın üzerine yapıştırıcı kullanılarak boron-epoksi ve alüminyum bir malzemeden yama yapılarak tamir edilmesi üzerinde durmuşlardır. Ayrıca kullanılan yama malzemesini sekizgen olarak seçmiş, ölçüsel varyasyonlara göre gerilme şiddeti faktörünün değişimini sonlu elemanlar metodu ile analiz ederek irdelemişlerdir.

Ouinas vd. [8], ortasında dairesel bir delik olan ve çatlak ihtiva eden ince alüminyum levhanın çatlak bölgesine yine dairesel delik formunda bir kompozit yamayı yapıştırıcı ile bağlayıp sistemi modellemiş ve sonlu elemanlar metodu ile analiz edip sonuçları Mod I ve karma mod açısından incelemişlerdir. Tek ve çift yama kullanarak oluşturulan modellerde gerilme şiddeti faktörünü incelemişlerdir. Yama sayısı ve çentik çapı arttıkça gerilme şiddeti faktörünün azaldığını görmüşlerdir. Gerilme şiddeti faktöründeki maksimum düşüşün tek ve çift yama hallerinde sırasıyla %42 ve %54 olduğunu bulmuşlardır.

Ouinas vd. [9], ortasında dairesel bir delik olan ve olmayan birbirinden farklı malzemelerle tek bindirmeli yapıştırıcı bağlantılı modelleri sonlu elemanlar metodu ile incelemişlerdir. Malzeme cinsi ne olursa olsun maksimum kayma gerilmesinin bindirme

uzunluğunun yaklaşık %18' ine tekabül eden bir bölgede meydana geldiğini bulmuşlardır.

Albedah vd. [10], bünyesinde çatlak ihtiva eden alüminyum levhanın yuvarlak şekle sahip kompozit yama malzemesi ile tek bindirmeli ve çift bindirmeli olarak tamir edilmesini incelemiş ve bu kapsamda sonlu elemanlar metodu ile modelleri oluşturmuşlardır. Tek ve çift bindirme durumlarında malzeme tasarrufuna dair veriler elde etmişlerdir. Ayrıca çatlak uzunluğuna karşılık gerilme şiddeti faktörünü de her iki durum için incelemişler ve çift bindirmeli yama yapıldığında çatlak ucunda gerilme şiddeti faktörünün etkin biçimde düşürülebildiği sonucuna varmışlardır.

Bouiadjra vd. [11], içersinde çatlak ihtiva eden alüminyum levhanın üzerine yapıştırıcı ile yama yapılması durumu için yama malzemesi şeklinin tamir işlemi verimliliği üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Modelleri sonlu elemanlar metodu ile oluşturup, çatlak ucunda gerilme şiddeti faktörü ve yapıştırıcı kayma gerilmeleri ile ilgili kıyaslamalar yapmışlardır. Çatlak uzunluğunun 5-20 mm aralığında olduğu durumda, trapezoidal şekilli yamanın çatlak ucunda daha düşük gerilme şiddeti faktörüne ve yapıştırıcı bölgesinde daha düşük kayma gerilmelerine neden olduğunu ve bununda yorulma ömrünü arttırdığını görmüşlerdir. Çatlak uzunluğunun 40 mm üzerine çıktığı durumda bu avantajın ortadan kalktığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca trapezoidal yama yapıldığında malzemeden kazanç sağlanacağı sonucuna varmışlardır.

Bouiadjra vd. [12], içersinde çatlak ihtiva eden alüminyum levhalar üzerinde yapıştırıcı ile yama yapıldığında olası bir yapıştırıcı kopukluğu veya yapıştırıcının tam olarak bindirme bölgesine uygulanamamasının tamir etkinliği açısından etkilerini incelemişlerdir. Değerlendirmeleri gerilme şiddeti faktörüne göre yapmışlardır ve böyle bir durumda tamir verimliliğinin oldukça düştüğünü ve yama ile alüminyum levha arasında bir kopmanın meydana gelme olasılığının oldukça arttığını gözlemlemişlerdir.

Fekih vd. [13], içersinde çatlak ihtiva eden alüminyum levha üzerine yapıştırıcı ile yama yapılması durumunda yama boyutlarının tamirat işlemi üzerindeki etkinliğini araştırmışlardır. Bunun için sonlu elemanlar metodunu kullanmışlardır. Yama boyut parametrelerini değiştirerek, J integral değerleri ile karşılaştırma yapmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre yama genişliğinin çatlak uzunluğundan daha geniş olması

gerektiği sonucuna varmışlardır. Yama boyutlarındaki artışın J integralini düşürdüğünü gözlemlemişlerdir.

Hedayati ve Jahanbakhshi [14], içersinde çatlak ihtiva eden alüminyum bir levha üzerine yapıştırılmak üzere kompozit malzemeden yama yapmış ve çeşitli yükleme durumları için sonlu elemanlar metodu ile incelemeler yaparak sonuçlar elde etmişlerdir. Yükleme koşullarının, yük-yerdeğiştirme diyagramları üzerinde etkili olduğu sonucuna varmışlardır.

1.2 Tezin Amacı

Bu çalışmanın amacı, tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarında, farklı tipte iki yapıştırıcıyı birlikte kullanarak hibrit bir yapıştırma modeli oluşturup, bu tip bağlantının, çatlak ihtiva eden levhanın gerilme ve kırılma enerjisi dağılımına etkisini sonlu elemanlar metodu ile incelemektir. Ayrıca aynı analizleri, mono yapıştırmalı bağlantılar içinde tekrarlayıp, hibrit ve mono yapıştırmalı bağlantıların karşılaştırmasını yapmaktır. Bunun için ilk önce iki farklı hibrit yapıştırma modeli oluşturulmuştur. Birinci modelde yapıştırma çizgisi orta kısmında Araldite AV138M tipi yapıştırıcı ile uç kısımlarda Araldite 2015 yapıştırıcı kullanılmıştır. İkinci hibrit modelde yapıştırma çizgisi boyunca orta kısımda yine Araldite AV138M kullanılmış olup uç kısımlarda DP 8005 tipi yapıştırıcı uygulanmıştır. Daha sonra, Araldite AV138M, Araldite 2015 ve DP 8005 yapıştırıcılarının tek olarak uygulandığı mono yapıştırmalı modeller oluşturulmuştur. Gerilme ve sınır şartları girilerek enerji salıverme oranları(kırılma enerjileri) ve yapıştırıcı üzerindeki kayma gerilmeleri elde edilmiştir. Yapıştırıcıların uzunluk ve kalınlık gibi parametreleri değiştirilerek, kayma gerilmesi ve kırılma enerjisine etkileri incelenmiştir. Sonuç olarak bu çalışmada, lineer elastik kırılma mekaniği (LEKM) prensipleri ve sonlu elemanlar metodu ile elde edilen veriler karşılaştırılarak incelenmiştir.

Tek bindirmeli yapıştırıcı bağlantılarında, kullanılan yapıştırıcı tipine göre bağlantının dayanımı değişkenlik göstermektedir. Uçakların gövdelerinde, çatlak meydana gelmiş kısımlarında, üzerine yama malzemesinin yapıştırılması suretiyle yama yaparak tamir edilmesi oldukça sık rastlanan bir durumdur. Literatürde de bu tip tek bindirmeli yapıştırıcı bağlantılarının, bünyesinde çatlak ihtiva eden ve etmeyen olmak üzere

incelemelerin yapıldığı çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalarda yama bölgesinde kullanılan yapıştırıcı malzemelerinin özelliklerine bağlı olarak gerilme değişimlerine, enerji salıverme oranlarına, gerilme şiddeti faktörüne etkileri incelenmiştir. Bu çalışmalarda, yama yapılan bölgede tek tip yapıştırıcı kullanmak yerine (mono yapıştırmalı bağlantı), hibrit yapıştırıcı modelinin kullanılması önerilmektedir. Hibrit yapıştırmalı modelde, bindirme bölgesinde, tek tip yapıştırıcı yerine, iki farklı yapıştırıcı ile yapıştırılması yoluna gidilmektedir. Hibrit yapıştırmalı modelde, yapıştırma çizgisi orta kısmında gevrek tip yapıştırıcı kullanılırken yapıştırma çizgisi uç kısımlarında sünek veya tok yapıştırıcı kullanılmaktadır. Gevrek yapıştırıcının kayma modülü yüksektir. Ancak içersinde boşluk vb. hatalar olabildiğinden ani hasara uğrama ihtimalleri de yüksektir. Yapıştırma çizgisi uç kısımlarında kullanılan sünek veya tok yapıştırıcının kayma modülü gevrek yapıştırıcıya göre daha düşüktür. Bu yapıştırıcıların yapısal hatalara karşı duyarlılığı daha düşüktür ve ayrıca kayma modüllerinin de daha düşük olması sebebiyle daha tokurlar. Bu şekilde iki farklı yapıştırıcının birlikte kullanılmasıyla hibrit bir yapıştırma modeli elde edilmektedir. Bu çalışmada, piyasada ticari amaçla kullanımı yaygın olan Araldite AV138M, Araldite 2015 ve Scotch Weld DP 8005 tipi yapıştırıcıların kombinasyonlarından oluşan hibrit yapıştırma modelleri ile yama yapılmaktadır. Bu yapıştırıcıların bazı parametrik boyutsal değerlerinde değişiklikler yaparak enerji salıverme oranı ve yapıştırıcı kayma gerilmeleri incelenmiştir. Ayrıca aynı yapıştırıcılarla oluşturulan mono yapıştırmalı modeller içinde kayma gerilmesi ve kırılma enerjisi ile ilgili incelemeler yapıp hibrit modellerle karşılaştırılmıştır. Böylece, kompozit yama ve yukarıda belirtilen ticari amaçlı yapıştırıcılar ile tamirat yapılması işleminde, hibrit ve mono yapıştırıcılı modellerin, tamir verimliliği açısından nasıl davrandıkları literatüre sunulmuştur.

1.3 Orjinal Katkı

Yapıştırıcılar son yıllarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak genel olarak bindirme bölgesinde tek tip yapıştırıcı kullanılmaktadır. Bu çalışmada ise çatlaklı bir levhanın tamirinde iki farklı yapıştırıcı birlikte kullanılarak tamir işlemi gerçekleştirilmiştir. Yalnızca gerilme analizi ile yetinilmeyip ilave olarak kırılma analizleri yapılmıştır.

YAPIŞTIRICILAR ve YAPIŞTIRMA BAĞLANTILARI

2.1 Yapıştırma Bağlantıları

Genel olarak mühendisliği amacı, insanların günlük yaşamlarında ihtiyaç duydukları hemen her şeyi üretmek, karşılaştıkları her problem için etkin ve pratik çözümler bularak bunları belirli bir sistematik içerisinde analiz etmek ve çalışmalar yaparak ilgili teknolojileri üretmektir. Mühendisliğin hemen her dalında bir komponenti üretebilmek için bir çok parçanın bir araya getirilmesi ve aynı zamanda birçok etkenin aynı anda dikkate alınması gerekmektedir. Makine mühendisliği için de bu durum geçerlidir ve birleştirme işlemlerinde mekanik bağlama elemanlarının kullanımı ön plana çıkmaktadır. Aynı veya farklı tipte malzemeler civata, perçin vb. bağlantı elemanları ile güvenilir bir şekilde bağlanabilmektedir. Ancak gelişen teknoloji ve ihtiyaçlar neticesinde daha farklı kullanım alanlarında geleneksel yöntemlerden farklı bağlantı elemanları ve teknolojilerine ihtiyaç duyulmaktadır. İhtiyaç duyulan farklı bağlantı elemanlarından ve teknolojilerinden biri de yapıştırma bağlantılarıdır.

Yapıştırıcı kullanımının tespit edilebilen kullanım oranı 1970' li yıllarda yaklaşık % 2 iken bugün bu oran çok daha yüksektir [15]. Günümüzde birçok yapıştırıcının seri üretimi yapılabilmektedir ve temin edilebilmesi de oldukça kolay hale gelmiştir. Yapıştırıcılar metal ve metal olmayan veya bunların kompozisyonu malzemelerin birleştirilmesinde sıklıkla ve rahatlıkla kullanılabilen bağlantı elemanlarıdır. Günümüzde birçok yapıştırıcı madde çeşidi bulunmakta ve sürekli olarak bunların mekanik özelliklerinin araştırılması, geliştirilmesi ve yeni yapıştırıcı türlerinin üretilmesi için çalışmalar yapılmaktadır.

2.2 Yapıştırıcılar

Günümüzde yapıştırıcıların otomotivden uçak sektörüne, inşaattan mobilya sektörüne kadar birçok alanda oldukça geniş bir kullanım alanı mevcuttur. Bu bağlamda yapısal yapıştırıcıların kullanımı ön plana çıkmaktadır. Yapısal yapıştırıcıların en önemli özelliği yük taşıma özellikleri ve kayma mukavemet değerlerinin yüksek olmasıdır. Metallerin yapıştırılmasında kullanılan akrilik ve epoksi yapıştırıcılar birer yapısal yapıştırıcıdır.

2.2.1 Akrilik Yapıştırıcılar

"Genellikle akrilik bir polimerin ve uygun bir reçinenin sudaki dispersiyonu sonucu elde edilen bu tip yapıştırıcılar solventlere, kimyasal etkilere, UV ışığa ve yüksek sıcaklıklara dayanıklı olmaları nedeniyle tercih edilmektedirler. Ancak, bu tip yapıştırıcılar su içerdikleri için kuruma süreleri solvent bazlı yapıştırıcılara göre daha uzundur. Daha pahalı olmaları ve ilk yapışma mukavemetlerinin düşük olması dezavantajları olarak söylenebilir. Akrilik yapıştırıcıların ilk yapışma mukavemetini artırmak için modifiye akrilik polimerler kullanılabilir. Ancak, bu tip yapıştırıcıların sıcaklık mukavemeti, solventlere ve kimyasal etkilere karşı dayanımı ve UV ışığa karşı dayanımı azalmaktadır" [16].

2.2.2 Epoksi Yapıştırıcılar

"Epoksi yapıştırıcılar, epoksi reçine ile sertleştiriciden oluşur ve bu yapıştırıcılar ile yüksek mukavemetli bağlantılar elde edilir. Tek bileşenli, iki bileşenli ve film olmak üzere üç farklı formdadırlar. Her iki bileşen birleştirildiğinde kovalent bağlar oluşur ve termoset polimer halini alır. Katalizör ilavesi ya da ısı, sertleşme zamanını hızlandırabilir. Yüksek sıcaklıklarda sertleşen epoksiler daha yoğun çapraz bağlar oluşturduklarından dolayı yüksek mukavemetli bağlantılar elde edilir. Çok farklı tipteki malzemelerin yapıştırılmasında kullanılabilirler" [16].

"Epoksi reçineler, hemen hemen bütün uygulamalar için kullanılabilecek oldukça yüksek mukavemetli bir yapıştırıcıdır. Reçine ve katılaştırıcının kullanılmadan önce karıştırılması gerekir. Oda sıcaklığında kürleşme süresi, birkaç saatlik periyottan birkaç günlük periyoda kadar farklılık gösterebilmektedir. Tipik olarak minimum kürleşme

sıcaklığı 23 °C' dir. 140 °C' yi aşan sıcaklıklarda yapıştırıcının kimyasal yapısı bozulur" [16].

"Epoksinin metal ve plastik yüzeylere yapışması zayıftır ve bundan dolayı bağlantıda oluşan hasar, kohezif olmaktan çok adeziv, yani yapıştırıcı ile esas malzeme ara yüzeyinde oluşmaktadır. Bununla beraber, epoksi ile yapıştırılmış ahşap yapılarda hasar, bağlantı yerinden çok ahşap malzeme içerisinde meydana gelmektedir. Epoksiler avantajlarının çokluğu ve tüm elyaf malzemelerde kullanılabilmesi nedeniyle, havacılık sanayinde yaygın bir kullanım alanına sahiptirler. Genellikle karbon elyaflar ile birlikte kullanılırlar" [16].

2.2.3 Adezyon Kuvveti

Yapıştırmaya esas teşkil eden malzeme molekülleri ve yapıştırıcı molekülleri arasında meydana gelen çekim kuvvetine adezyon kuvveti denir.

2.2.4 Kohezyon Kuvveti

Yapıştırıcı molekülleri arasındaki çekim kuvvetine kohezyon kuvveti denir.

2.3 Formları Açısından Yapıştırıcılar

Yapıştırıcılar kimyasal bileşimlerine göre sınıflandırılabilirdiği gibi formları açısından da sınıflandırılabilirler. Formları açısından yapıştırıcılar aşağıdaki gibi sınıflandırılırlar:

1. Macun tip yapıştırıcılar
2. Film tip yapıştırıcılar
3. Düşük viskoziteli yapıştırıcılar
4. Reçineler
5. Düşük yoğunluklu yapıştırıcılar
6. Köpükler

2.3.1 Macun Tip Yapıştırıcılar

"Bu yapıştırıcıların yüksek viskoziteye sahip olanları çok iyi yapışma sağlarlar. Sabit ısıtma gerektiğinde ısı yorgani kullanmak yeterlidir çünkü bu yapıştırıcılar 80°C'nin

altında ki sıcaklıkta sertleşirler. Metal ya da kompozit malzemeleri birleştirmek için kullanılan iki parçalı, oda sıcaklığında sertleşen yapıştırıcılardır. Yapıştırıcı kalınlığının 0.1 ve 0.2 mm arasında olması, yapışma için yeterlidir. Karışım oranlarına dikkat edilmezse, uygulama süresi göreceli olarak düşer. Yüksek ve düşük kayma mukavemetlerinin gerektiği yerlerde kullanılırlar. Bu yapıştırıcılar düşey yüzeylerde ya da düşey yapışmalarda kullanılmazlar"[17].

2.3.2 Film Tip Yapıştırıcılar

"Metalik ya da kompozit malzemelerin yapıştırılması yada prepreglerin yapışmasına yardım etmesi için kullanılan epoksi esaslı malzemelerdir. Çok geniş yapışma alanlarına sahiptirler. Metal parçaların tamirleri için ince film, kompozit tamirleri için kalın film şeklinde kullanılırlar" [17].

2.3.3 Düşük Viskoziteli Yapıştırıcılar

"Oda sıcaklığında ya da yüksek (120-180 °C) sıcaklıklarda sertleşirler. Birleşmeler içindeki süreksizliklere karşı daha fazla kayma mukavemetine sahip olduklarından dolayı, yapısal bütünlüğü korurlar. Kuruma süresi içinde köpürmez ve genişlemezler" [17].

2.3.4 Reçineler

"Reçine, katı ya da yarı akışkan, billurlaştırılması güç, suda çözünmeyen, organik çözücülerde çözünen, ısıtılınca yumuşayan ve eriyen bir maddedir" [17].

"Optimum yapıştırma kuruma eğrisine göre sertleşme işlemi tamamen sona erdikten sonra elde edilebilir. Karışma oranı yanlış yapılırsa uygulama süresi düşer" [17].

2.3.5 Düşük Yoğunluklu Yapıştırıcılar

"Oda sıcaklığında sertleşebilen, iki parçalı yapıştırıcılardır. Bu yapıştırıcılar; mükemmel yapışma istenen tabakaların yapıştırılmasında, göçük ya da ayrılma tip dolgu tamiri veya kompozit kumaş tabakalarının yapıştırılmasında kullanılır" [17].

2.3.6 Köpükler

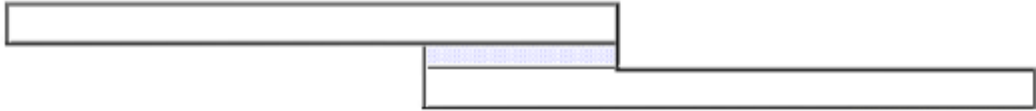
Köpükler epoksi esaslı yapıştırıcılardır. Kuruma süresinde genişlerler ve birleştirilecek parçaların arasını doldurarak birbirlerine sıkıca yapışmalarını sağlarlar.

2.4 Yapıştırma Bağlantı Çeşitleri

Yapıştırma bağlantıları kendi içersinde karmaşık ve stabil olmayan bir durum gibi gözüksede temel olarak birkaç çeşit yapıştırma bağlantısı mevcuttur. Toplamda beş tip yapıştırma bağlantı türü vardır. Yapıştırma bağlantı şekli ve tipinin tayini, yapıştırılacak malzeme, yapıştırıcı özellikleri ve çalışma koşulları gözönüne alınarak yapılmalıdır.

2.4.1 Tek Bindirmeli Yapıştırma Bağlantıları (Single Lap Joint)

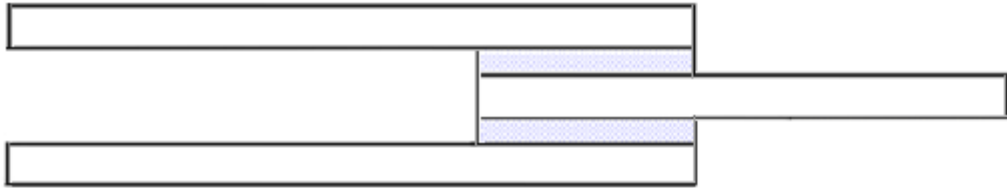
Bu bağlantı şeklinde bağlantı yapılacak elemanların, belirli bir kısmı üst üste gelecek şekilde, yapıştırma bağlantısının yapıldığı bağlantı şeklidir [18].



Şekil 2.1 Tek bindirmeli yapıştırma bağlantısı (Single lap joint)

2.4.2 Çift Bindirmeli Yapıştırma Bağlantıları (Double Lap Joint)

Bindirme bağlantısında, hem alt kısma hem de üst kısma gelecek şekilde yerleştirilmiş iki destek elemanı bulunan bindirmeli bağlantı şeklidir [18].



Şekil 2.2 Çift bindirmeli yapıştırma bağlantısı (Double lap joint)

2.4.3 Basamaklı Bindirme Bağlantıları

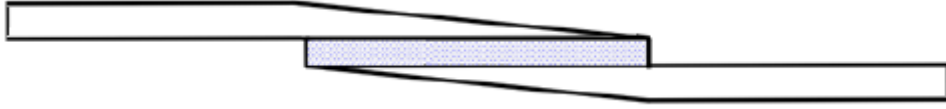
Bindirme işleminde yapıştırılacak elemanlar üzerine, birbirlerine tam oturması için basamak şeklinde boşlukların açılmış olduğu bağlantı şeklidir [18].



Şekil 2.3 Basamaklı bindirme bağlantısı

2.4.4 Eğimli Bindirme Bağlantıları

Bu bağlantı şeklinde, bağlantı yapılacak olan elemanların bindirme kısımlarının üst taraflarına eğim verilmiştir [18].



Şekil 2.4 Eğimli bindirme bağlantısı

2.4.5 Alın Bindirme Bağlantıları

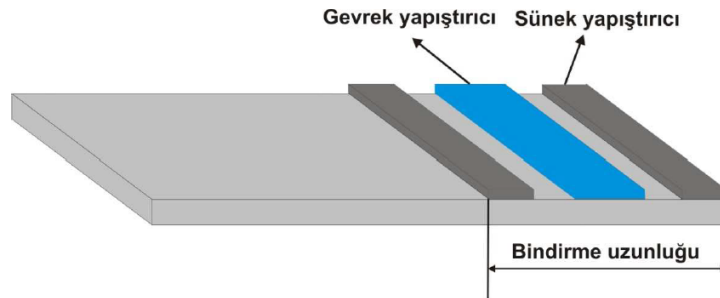
Bu bindirme bağlantısı, alın kaynak yöntemine benzerlik göstermektedir. Bu sistemde levhalar alın altına getirilip yapıştırıcı kullanılarak bindirme bağlantısı oluşturulmaktadır [19].



Şekil 2.5 Alın bindirme bağlantısı

2.5 Hibrit Yapıştırma Bağlantıları

Hibrit yapıştırmalı bağlantı, mono yapıştırmalı bağlantıdan farklı olarak, bindirme bölgesinde iki farklı yapıştırıcının bir arada kullanıldığı bağlantı çeşididir (Şekil 2.6). Bindirme bölgesinin ortasında kullanılan gevrek yapıştırıcının elastisite modülü, sünek veya tok yapıştırıcıya göre yüksek, ancak şekil değiştirebilme kabiliyeti düşüktür [20].



Şekil 2.6 Hibrit yapıştırmalı bağlantı yapıştırıcı düzeni [20]

"Hibrit yapıştırırmalı bağlantı, özellikle gevrek veya sünek yapıştırıcının tek olarak kullanıldığı mono yapıştırırmalı bağlantıya göre daha yüksek dayanıma sahiptir. Mono yapıştırırmalı bağlantılarda gerilme yoğunluklu bölgeler kenarlarda oluşurken, hibrit yapıştırırmalı bağlantı gerilme dağılımı mono yapıştırırmalı bağlantı gerilme dağılımına göre daha homojen davranış gösterir. Hibrit yapıştırma düzeni kullanılarak, bindirme yüzeylerinin orta kısımlarının yük taşımaya olan katkısının artırılması, yüksek elastisite modüllü gevrek yapıştırıcının tam kayma dayanımı kapasitesine yaklaşmasını sağlar. Hibrit yapıştırırmalı bağlantı, dayanım açısından önemli avantaj sağlamasına rağmen, mono yapıştırırmalı bağlantıya göre, hazırlık aşaması daha karmaşıktır. Hibrit yapıştırırmalı bağlantıların hazırlanmasındaki en önemli sorun, hibrit yapıştırma düzeni içerisinde kullanılan yapıştırıcıların, uygulanan basınç altında, birbirlerine karışma ihtimalinin olmasıdır" [20].

Yapıştırıcıların birbirlerine karışmasının engellenmesi amacıyla yapıştırıcılar arasında ayraç kullanılması önerilen bir yöntemdir [20].

2.6 Mühendislik Açısından Yapıştırıcıların Kullanımı

Civata, perçin vb. tüm mekanik bağlantı elemanlarında olduğu gibi yapıştırıcı bağlantılarının da avantaj ve dezavantajları vardır. Herhangi bir bağlantı elemanının seçimi yapılmadan önce fayda-zarar dengesi gözetildiği gibi, bir uygulamada yapıştırıcı kullanılacaksa bunda da yine fayda-zarar dengesi gözetilerek seçim yapılmalıdır ve uygun görülüyorsa yapıştırıcılar kullanılmalıdır. Yapıştırıcı bağlantılarının bazı avantaj ve dezavantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

2.6.1 Yapıştırma Bağlantılarının Avantajları

- Düzgün gerilme dağılımı olur [18].
- Yapılması kolaydır [18].
- Kaynak bağlantısındaki gibi yapısal değişim olmaz [18].
- Uygun olmayan kaynak izleri yoktur [18].
- Hemen hemen her malzeme birleştirilebilir [18].

- Sızdırmazlık sağlar [18].
- Benzer veya farklı özellikteki metaller birleştirilebilir [18].
- Korozyon sürtünmesi nedeniyle aşınma ortadan kalkar [18].
- Pim, civata, perçin, kelepçe vb. gereksiz hale gelir. Bu nedenle parça adedi azalır [18].
- Perçin veya kaynakta olduğu gibi bağlantının görünümünde istenmeyen görüntüler olmaz. Bu nedenle tasarımcılara ürün görünümünün iyileştirilmesi için bir çok olanak sağlar [18].
- Bağlantı zamanla, vida bağlantısında olduğu gibi, gevşeme olayına maruz kalmaz [18].
- Bağlantı için, malzeme delinmek zorunda kalmaz ve bu nedenle korozyon ihtimali de azalır [18].
- İşçiliği azdır [18].
- En az diğer bağlantılarda olduğu kadar mukavemetlidir [18].
- İnce bağlantıdaki boşluklar doldurulur [18].
- Yorulma dayanımı yüksektir [18].
- Farklı metaller arasında korozyonu önler [18].
- Elektriksel yalıtım sağlar [18].
- Bağlama elemanı üretiminde yüksek enerji girişine gerek yoktur [18].
- Sönümleyici özelliğinden titreşimleri absorbe eder [18].
- Maliyeti düşüktür [18].

2.6.2 Yapıştırma Bağlantılarının Dezavantajları

- Bağlantının sağlıklı yapılabilmesi için tecrübeli kişilere ihtiyaç vardır [18].
- Oldukça uzun bakımlar gerektirir [18].
- Yüksek ısıya karşı dayanımı düşüktür [18].

- Yüzey temizliği hassasiyet gerektirir [18].
- Duruma göre, bağlantının uygun olabilmesi için gerekli olan süre uzun olabilir [18].
- Bazı durumlarda uygun bağlantı için basınç ve ısı kullanılması gerekebilir [18].
- Tamir edilme güçlükleri yaşanabilir [18].
- Bağlantı ara birimleri veya aparatları gerekebilir [18].
- Bağlantının tahribatsız muayenesi zordur [18].
- Bağlantı yapılırken uygun çevre şartları gereklidir [18].
- Düşük sıcaklıklarda bazı ürünlerde kolay kırılabilirlik görülebilir [18].
- Bükülebilir ürünlerde sürünme dayanımı düşüktür [18].
- Zehirleyici ve alev alma problemlerini içermektedir [18].

KIRILMA MEKANİĞİ ve SONLU ELEMENLAR METODU

3.1 Kırılma Mekanikliği Temel Kavramları

"Malzemelerin kırılma davranışı, insanoğlunun var olduğu günden itibaren hayatın kalitesini etkilemiştir. İlk insanlar, taştan aletler yapmak üzere gevrek kırılmayı kullanmışlardır. Mısırlıların ve Romalıların yaptığı pekçok yapının hala ayakta kalabilmeleri, ilk mimarların ve mühendislerin başarılarının birer ölçüsüdür. Hala hayatta kalabilen tarihi yapılar hiç şüphesiz ki başarılı dizaynların birer örnekleridir. Romalılar yaptıkları her bir köprüyü, tasarımcıyı köprünün altında bırakıp üzerinden top arabalarını geçirerek test ederlerdi" [21].

"Makine parçaları; yanlış tasarımlar, malzeme hataları, beklenmeyen yükler, üretim hataları ve diğer karmaşık ve pek de anlaşılamayan nedenlerden dolayı kırılabilir. Aynı hatanın tekrarı istenmiyorsa hasarın nedeninin anlaşılması oldukça önemlidir"[21].

"Hemen hemen tüm mühendislik malzemeleri mikroskobik boyutlarda olsalar bile çatlak içerirler. Servis koşullarında bu çatlaklar ilerleyerek birbirleri ile birleşirler ve gözle görülür bir hal alırlar. Bu şartlar altında bu elemanın yapısal bütünlüğü için mühendis çatlağın nasıl oluştuğunu veya çatlakların nasıl ve ne zaman daha da büyüyeceğini, ilerleyebileceğini ve parçanın bu şekilde hasara uğrayacağını bilmelidir. Bu soruları cevaplamaya yardımcı olan bilim dalı Kırılma Mekanikliği' dir" [21].

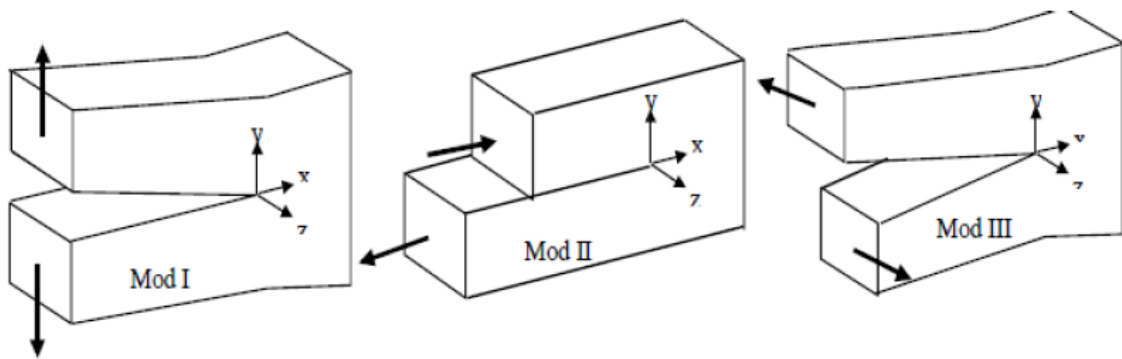
Kırılma mekanikliği, keskin bir çatlak ucundaki gerilme alanının **Gerilme Şiddet Faktörü (K)** olarak tanımlanan bir parametreyle karakterize edilir. Uygulanan gerilme ve çatlak

boyunun artmasıyla doğrudan ilişkilidir. Çatlak içermeyen malzemelerin belirli bir gerilme değerine kadar yüklenebildikleri gibi, çatlak içeren parçalarda belirli bir K değerine kadar yüklenebilirler. Gerilme şiddeti faktörü, **Kırılma Tokluğu** olarak da bilinmektedir.

Kırılma mekaniğinin bir diğer önemli parametresi de **Enerji Salıverme Oranı (G)** olarak tanımlanır. Bu kavram Irwin tarafından 1956' da ortaya atılmıştır. Bu kapsamda enerji yaklaşımıyla olaylara yaklaşan Irwin, toplamda Griffith modeline eşit olacak şekilde bir yaklaşım ile mühendislik problemlerinin çözümünde daha etkin şekilde kullanılabilecek bu kavramı ortaya çıkarmıştır. Enerji salıverme oranı bir çatlakın ilerlemesi için gerekli enerji olarak tanımlanabilir [22].

Kırılma mekaniği, lineer elastik ve elastik-plastik kırılma mekaniği şeklinde iki farklı yaklaşımla problemleri inceler. Lineer elastik kırılma mekaniği (LEKM), çatlak ucunda meydana gelen gerilmeleri, çatlak ilerlemesi esnasında ortaya çıkan enerji serbest kalma oranına veya kırılma tokluğuna dayandırarak bulmaya yarayan bir yöntemdir.

LEKM kırılma olayını açıklamak için çeşitli kırılma modları tanımlamıştır. Kuvvet altında oluşan bu modlar; Mod I (açılma modu), Mod II (kayma modu) ve Mod III (düzlem dışı kayma modu) olarak tarif edilmektedir (Şekil 3.1).

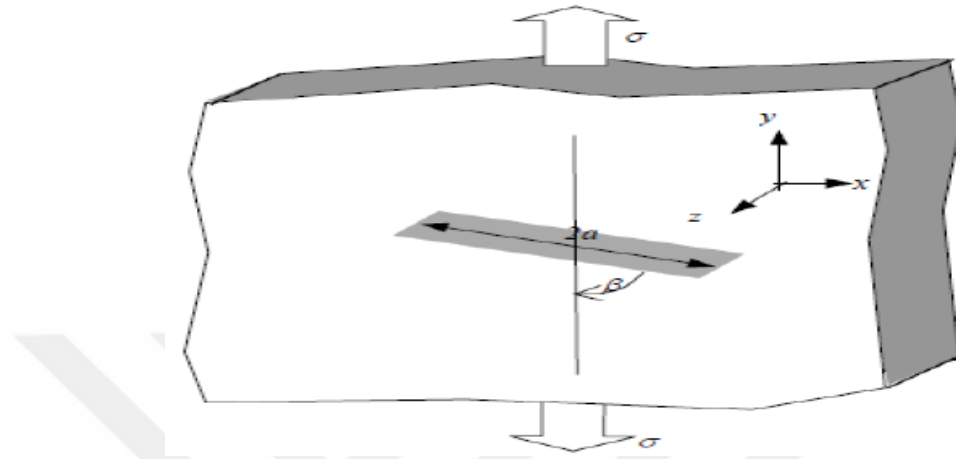


Şekil 3.1 Lineer elastik kırılma mekaniğinde tanımlanan modlar [22]

Mod I' de deplasmanlar x-y ve x-z düzlemlerine göre simetrik olup açılma modu olarak adlandırılır. Çatlakın karşılıklı yüzeyleri birbirine ters yönde hareket ederler. Kayma modu olarak adlandırılan Mod II' de ise deplasmanlar z-y düzlemine göre simetriktir. Yüzeyler ters yönde birbiri üzerinde kayarak hareket ederler. Mode III düzlem dışı kayma modu olup her iki düzleme göre simetriktir. Yüzeyler çatlak ucu çizgisine paralel

olarak hareket ederler. Her çatlak modu farklı bir gerilme alanına karşılık gelmektedir. Çatlak modları, tek tek ya da bu modların bir kombinasyonu şeklinde karşımıza çıkabilirler [23].

İki modun birlikte meydana geldiği durum Şekil 3.2' deki gibidir.



Şekil 3.2 İki modun birlikte etkimesi hali [23]

Şekil 3.2' de belirtilen iki modun birlikte olması durumunda hem açılma hem de kayma modu birlikte bulunmaktadır. Bu durumda gerilme şiddeti faktörleri;

$$K_I = \sigma \sin^2 \beta \sqrt{\pi a} \quad (3.1)$$

$$K_{II} = \sigma \sin \beta \cos \beta \sqrt{\pi a} \quad (3.2)$$

şeklinde verilmektedir. Eşitliklerdeki K_I açılma modu için gerilme şiddet faktörü, K_{II} kayma modu için gerilme şiddet faktörü, σ uygulanan gerilme ve a toplam çatlak uzunluğunun yarısıdır.

3.2 Çatlak Ucunda Gerilme Dağılımı

Çatlak ucu gerilmeleri Şekil 3.3' de gösterilmektedir. Kırılma mekaniği yaklaşımına göre Mod I için çatlak ucunda oluşan gerilmeler aşağıdaki gibi ifade edilmektedir;

$$\sigma_{xx} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \quad (3.3)$$

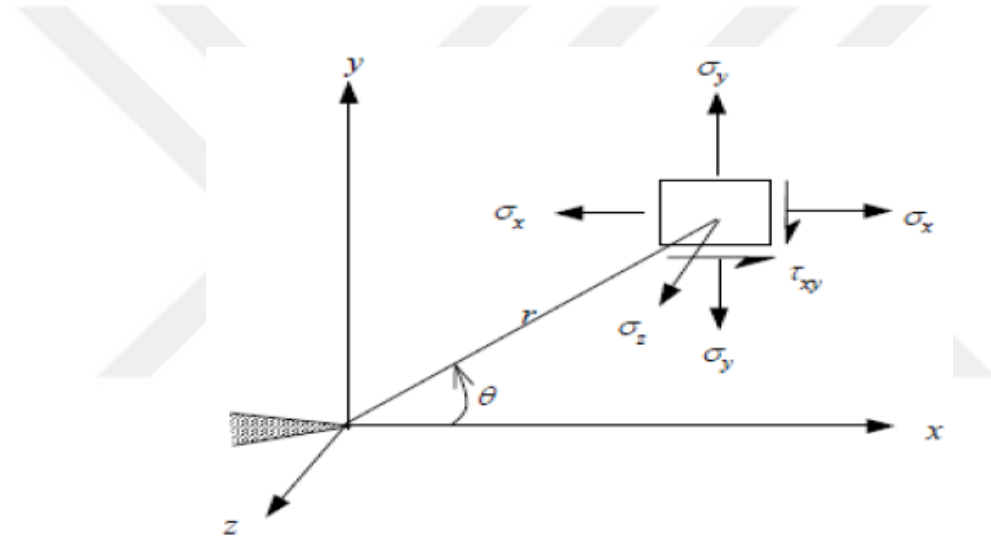
$$\sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \quad (3.4)$$

$$\tau_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \quad (3.5)$$

$$\sigma_{zz} = 0 \quad \text{Düzlem gerilme durumunda} \quad (3.6)$$

$$\sigma_{zz} = \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) \quad \text{Düzlem şekil değiştirme durumunda} \quad (3.7)$$

Eşitliklerdeki K değeri kırılma tokluğu, θ çatlak ucu açısını, r çatlak ucunun yarıçapını ifade etmektedir. z yönünde gerilme değeri düzlem gerilme ve düzlem şekil değiştirme durumları için farklılık göstermektedir.



Şekil 3.3 Çatlak ucu gerilmeleri [22]

Çatlak içeren bir malzeme ile ilgili çatlak ilerlemesi olayı ve yeni yüzeylerin oluşması ilk kez Griffith tarafından enerji yaklaşımı metodu ile çözümlenmiştir. Buna göre, LEKM uygulaması üzerinden enerji salıverme oranı (G) hesaplamaları üzerine yoğunlaşmıştır. Griffith teorisine göre çatlak ilerlemesi için depolanan enerji ile çatlak ilerlemesi sonucu ortaya çıkan yeni yüzeylerin enerjileri arasında bir eşitlik kurulabilir. Bu eşitlik Griffith tarafından şöyle tanımlanmıştır:

$$\gamma_s = \frac{\sigma^2 \pi a}{2E} \quad (3.8)$$

Eşitlikteki γ_s yeni oluşan yüzey enerjisi, σ parçaya uygulanan gerilme, a çatlak uzunluğunun yarısı ve E elastisite modülüdür.

Gerilme şiddeti yaklaşımı açısından çatlak ucunda oluşan gerilmeler (3.3), (3.4), (3.5), (3.6) ve (3.7) eşitlikleri ile bulunmaktadır. Griffith yaptığı araştırmalarda çatlak ucundaki gerilmelerin $\sqrt{\pi a}$ ile orantılı olarak değiştiğini gözlemlemiştir [20]. En genel haliyle Mod I gerilme şiddeti faktörünü şu şekilde hesaplamıştır:

$$K_I = Y\sigma\sqrt{\pi a} \quad (3.9)$$

Bu eşitlikte; Y parça geometrisine bağlı bir katsayı, σ parçaya uygulanan gerilme, a çatlak uzunluğunun yarısı ve K_I , Mod I gerilme şiddeti faktörüdür. Gerilme şiddeti faktörünün belli bir kritik değere ulaşması neticesinde bu değere **Kritik Gerilme Şiddeti Faktörü** veya **Kırılma Tokluğu (K_{IC})** denir. Kırılma tokluğu da bir malzeme parametresi olup K_I değeri K_{IC} değerine ulaştığında çatlak ilerlemesi gerçekleşmektedir.

3.3 Çatlak İlerleme Doğrultusu

Gerilme etkisi altında, bünyesinde çatlak ihtiva eden bir malzemenin, kırılma mekaniği açısından incelenmesinde diğer bir önemli husus, çatlağın ilerleme doğrultusudur. Doğrultuyu bulabilmek için bazı teoriler geliştirilmiştir. Gevrek malzemeler için daha doğru sonuçlar veren bu teorilerden birkaçı aşağıdaki gibidir [21];

- Maksimum asal gerilme metodu ($\sigma_{\theta, \max}$)
- Minimum zorlanma enerji yoğunluk faktörü metodu ($S_{\min}$)
- Maksimum enerji salıverme oranı metodu ($G_{\max}$)

"Çatlak yönlenmesi ve doğrultusunun belirlenmesinde birçok yaklaşım olmakla beraber yukarıda belirtilen teoriler bunlardan öne çıkan bazılarıdır. Bu teorilerin bazıları birbirleriyle aynı sonucu verirken bazıları da sayısal olarak birbirine yakın sonuçlar verirler" [21].

"Bu metotlardan maksimum enerji salıverme oranı yöntemini inceleyecek olursak, bu metoda göre çatlağın, enerji salıverme oranının maksimum olduğu doğrultuda ilerlediği

görülür. Kompleks potansiyel elastisite teorisi kullanılarak enerji salıverme oranı şu şekilde ifade edilmektedir" [21]:

$$G(\gamma) = \frac{4}{E} \left(\frac{1}{3 + \cos^2 \gamma} \right)^2 \left(\frac{1 - \frac{\gamma}{4}}{1 - \frac{\gamma}{4}} \right)^{\frac{\gamma}{\pi}} [(1 + 3\cos^2 \gamma)K_I + 8 \sin \gamma \cos \gamma K_{II} + (9 - 5\cos^2 \gamma)K_{III}] \quad (3.10)$$

Eşitlikte verilen enerji salıverme oranı maksimum olduğunda yani $G=G_{maks}$ durumu meydana geldiğinde, çatlak $\theta_m = - \gamma_m$ açısıyla ilerlemektedir [21].

3.4 Enerji Salıverme Oranı ve Gerilme Şiddeti Faktörü İlişkisi

Gerilme şiddeti yaklaşımı ile gerilme şiddeti faktörü aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (3.11)$$

Ayrıca Griffith' in enerji yaklaşımından yola çıkarak, kuvvet altında tutulan birim kalınlığındaki bir levhada a uzunluğuna kadar bir çatlak oluşması durumunda sistemde oluşan elastik enerji değişikliği şu şekilde ifade edilmektedir:

$$\frac{d(U_d)}{da} = G = \frac{\pi a \sigma^2}{E} \quad (3.12)$$

(3.11) ve (3.12) eşitliklerinden K ile G arasında aşağıdaki gibi bir eşitlik türetilir:

$$K^2 = EG \quad (\text{Düzlem Gerilme Durumu}) \quad (3.13)$$

$$K^2 = \frac{EG}{1 - \nu^2} \quad (\text{Düzlem Şekil Değiştirme Durumu}) \quad (3.14)$$

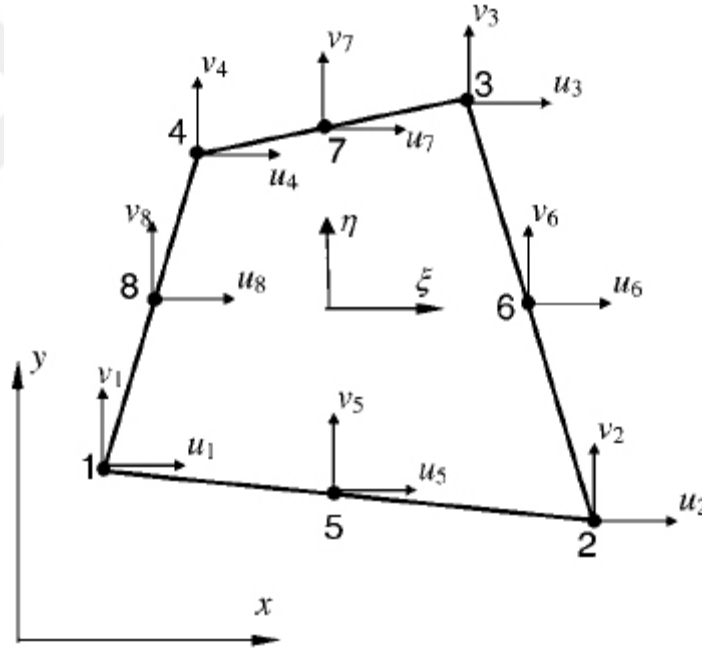
K ile G arasında böyle bir ilişki mevcut olduğundan bir kırılma mekaniği probleminde hem gerilme şiddeti faktörü yaklaşımı ile hem de enerji salıverme oranı yaklaşımı ile aynı sonuçlara ulaşılabilmektedir. "Bu ilişki Irwin tarafından ortaya çıkarılmıştır" [21]. Son olarak sünek ve gevrek malzemelerin kritik gerilme şiddeti faktörü (kırılma tokluğu) değerlerinden bahsedecek olursak, gevrek malzemelerde K_{IC} ' nin daha düşük, sünek malzemelerde ise daha yüksek olduğunu söyleyebiliriz. Bu nedenledir ki önemli hasarlar daha çok gevrek malzemelerde ortaya çıkmaktadır.

3.5 Sonlu Elemanlar Metodu (SEM)

Problemlerin, özellikle bilgisayar destekli çözümünde sonlu elemanlar metodu sıkça kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar metodu genel olarak analiz edilecek yapının element denilen çeşitli şekillere bölünmesi ve bu elementlerin birbirlerine düğüm noktaları ile bağlanması ve bu şekilde çözümlenmesi esasına dayanır. İki boyutlu sistem analizinde bu elemanlar düzlem gerilme veya düzlem şekil değiştirme elemanları olabilirler. Her eleman yük altında, düğüm noktasında yerdeğiştirme potansiyeline sahiptir.

"FEM içerisinde gerilme analizleri için en çok kullanılan yöntemlerden birisi katılık sonlu elemanlar metodudur" [22]. Bölüm içerisinde bu konuyla ilgili eşitlikler ve bağıntılar verilecektir.

3.5.1 8 Düğümlü Dörtgen Eleman



Şekil 3.4 Sekiz düğümlü dörtgen eleman

Şekil 3.4' de izoparametrik bir sekiz düğümlü dörtgen eleman görülmektedir. Bu eleman iki boyutlu düzlem gerilme veya iki boyutlu düzlem zorlanma probleminde kullanılabilir. Düğüm noktalarının koordinatlarını belirleyebilmek için eleman üzerinde bir (x,y) global koordinatı ile (ξ,η) lokal (parametrik) koordinatı tanımlanmıştır. Parametrik koordinatlar -1/+1 aralığında değişmektedir. Örneğin 1 numaralı düğüm noktasının lokal koordinatları (-1,-1) iken 3 numaralı düğüm noktasının koordinatları

(+1,+1) olmaktadır. Herhangi bir düğümün şekil fonksiyonuna karşılık global koordinatları aşağıdaki gibi verilmektedir.

$$x = \sum_{i=1}^n N_i(\xi, \eta) x_i \quad (3.15)$$

$$y = \sum_{i=1}^n N_i(\xi, \eta) y_i \quad (3.16)$$

Eşitliklerdeki n , düğüm sayısı olup N_i ise global koordinatları (x_i, y_i) ve lokal koordinatları (ξ_i, η_i) olan i . düğümün şekil fonksiyonunu belirtmektedir.

3.5.1.1 8 Düğümlü Dörtgen İzoparametrik Elemanın Şekil Fonksiyonu

Düğüm noktalarının şekil fonksiyonları şu şekildedir;

$$N_1 = -\frac{1}{4} [1 - \eta\xi - \xi^2 - \eta^2 + \xi^2\eta + \xi\eta^2] \quad (3.17)$$

$$N_2 = -\frac{1}{4} [1 + \eta\xi - \xi^2 - \eta^2 + \xi^2\eta - \xi\eta^2] \quad (3.18)$$

$$N_3 = -\frac{1}{4} [1 - \eta\xi - \xi^2 - \eta^2 - \xi^2\eta - \xi\eta^2] \quad (3.19)$$

$$N_4 = -\frac{1}{4} [1 + \eta\xi - \xi^2 + \eta^2 - \xi^2\eta + \xi\eta^2] \quad (3.20)$$

$$N_5 = \frac{1}{2} [1 - \eta - \xi^2 + \xi\eta^2] \quad (3.21)$$

$$N_6 = \frac{1}{2} [1 + \xi - \eta^2 - \xi\eta^2] \quad (3.22)$$

$$N_7 = \frac{1}{2} [1 + \eta - \xi^2 - \xi^2\eta] \quad (3.23)$$

$$N_8 = \frac{1}{2} [1 - \xi - \eta^2 + \xi\eta^2] \quad (3.24)$$

Şekil fonksiyonunu (1x8) boyutunda bir N vektörü şeklinde gösterirsek;

$$N=[N_1, N_2, N_3, N_4, N_5, N_6, N_7, N_8] \quad (3.25)$$

Ayrıca N vektörünün değişken ve sabitlerini ayıracak olursak;

$$N = LQ \quad (3.26)$$

Burada L vektörü;

$$L= [\xi^{m_i} . \eta^{n_i}] \quad (3.27)$$

L vektöründeki (m_i, n_i) sırasıyla $[(0,0), (1,0), (0,1), (2,0), (1,1), (0,2), (2,1), (1,2)]$ olup değişkenler vektörü olarak yazılacak olursa;

$$L = [1 \quad \xi \quad \eta \quad \xi^2 \quad \xi\eta \quad \eta^2 \quad \xi^2\eta \quad \xi\eta^2] \quad (3.28)$$

olarak yazılabilir. Sabitlerden oluşan (8×8) boyutundaki Q kare matris ise,

$$Q = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & -1 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & -2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -2 & 0 & 2 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & -2 & 0 & -2 & 0 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & -2 & 0 & -2 \\ -1 & -1 & 1 & 1 & 2 & 0 & -2 & 0 \\ -1 & 1 & 1 & -1 & 0 & -2 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

şeklinde oluşturulabilir.

Lokal koordinatlardaki yerdeğiştirme bileşenleri (u,v) şekil fonksiyonları yardımıyla şöyle ifade edilebilir:

$$u = \sum_{i=1}^8 N_i u_i = NU \quad (3.30)$$

$$v = \sum_{i=1}^8 N_i v_i = NV \quad (3.31)$$

Dolayısıyla vektörel olarak (U,V) ifadesi;

$$U = [u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6, u_7, u_8]^T \quad (3.32)$$

$$V = [v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, v_7, v_8]^T \quad (3.33)$$

olarak ifade edilebilir. Benzer olarak global koordinatlarda sonlu eleman formülasyonu yapıldığında ise,

$$x = \sum_{i=1}^8 N_i x_i = NX \quad (3.34)$$

$$y = \sum_{i=1}^8 N_i y_i = NY \quad (3.35)$$

şeklinde elde edilecektir. Dolayısıyla vektörel olarak (X,Y) ifadesi,

$$X = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8]^T \quad (3.36)$$

$$Y = [y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6, y_7, y_8]^T \quad (3.37)$$

Matematiksel olarak şekil fonksiyonlarının yerine (3.26) eşitliğinin yazılabileceği görülmektedir. Buna göre (3.30), (3.31), (3.34) ve (3.35) eşitlikleri ile belirtilen global ve lokal yerdeğiştirme fonksiyonları şu şekle gelecektir;

$$u = LQU \quad (3.38)$$

$$v = LQV \quad (3.39)$$

$$x = LQX \quad (3.40)$$

$$y = LQY \quad (3.41)$$

Herhangi bir fonksiyonun ξ ve η ya göre türevleri, $f=f(x,y)$, $x=x(\xi,\eta)$ ve $y=y(\xi,\eta)$ olacaktır. Buradan zincir kuralına göre türev ifadeleri,

$$\frac{\partial f}{\partial \xi} = \frac{\partial f}{\partial x} x \frac{\partial x}{\partial \xi} + \frac{\partial f}{\partial y} y \frac{\partial y}{\partial \xi} \quad (3.42)$$

$$\frac{\partial f}{\partial \eta} = \frac{\partial f}{\partial x} \times \frac{\partial x}{\partial \eta} + \frac{\partial f}{\partial y} \times \frac{\partial y}{\partial \eta} \quad (3.43)$$

şeklinde de yazılabilmektedir. (3.42) ve (3.43) eşitliklerini matris formunda yazacak olursak,

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial \xi} \\ \frac{\partial f}{\partial \eta} \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

(3.44) ifadesindeki J, Jakobiyen operatörüdür. Matris formunda J' yi ifade edersek,

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

Jakobiyen matrisindeki (x,y) elemanları yerine daha önce (3.40) ve (3.41) eşitliklerinde elde ettiğimiz ifadeleri yazarsak,

$$J_{11} = \frac{\partial L}{\partial \xi} QX \quad (3.46)$$

$$J_{12} = \frac{\partial L}{\partial \xi} QY \quad (3.47)$$

$$J_{21} = \frac{\partial L}{\partial \eta} QX \quad (3.48)$$

$$J_{22} = \frac{\partial L}{\partial \eta} QY \quad (3.49)$$

şeklinde elde edilir. Q matrisi ve X, Y vektörlerinin ξ ve η ' ya bağlı olmadığı görülmektedir. L vektörü ise ξ ve η değişkenlerinden oluşan bir vektör olduğundan ve Jakobiyen elemanlarda da L vektörünün bu elemanlara göre türevleri sözkonusu olduğundan L vektörünün ξ ve η ' ya göre türevleri alındığında,

$$\frac{\partial L}{\partial \xi} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 2\xi & \eta & 0 & 2\xi\eta & \eta^2 \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \eta} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & \xi & \eta & \xi^2 & 2\xi\eta \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

elde edilir. Jakobiyen operatörü elemanlarını bulmak için (3.50) ve (3.51) eşitlikleri (3.46), (3.47), (3.48) ve (3.49) eşitliklerinde yerine yazılır.

(3.45) ifadesinden,

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix} = J^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial \xi} \\ \frac{\partial f}{\partial \eta} \end{bmatrix} \quad (3.52)$$

elde edilebilmektedir. Jakobiyen matrisinin tersini hesaplırsak,

$$J^{-1} = \frac{1}{\det J} \begin{bmatrix} J_{22} & -J_{12} \\ -J_{21} & J_{11} \end{bmatrix} \quad (3.53)$$

elde edilir. (3.52) denkleminde Jakobiyen' in tersi yerine (3.53) ifadesi ve yerdeğiştirme bileşenleri yerine (u,v) koyulursa,

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial u}{\partial y} \end{bmatrix} = \frac{1}{\det J} \begin{bmatrix} J_{22} & -J_{12} \\ -J_{21} & J_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial \xi} \\ \frac{\partial u}{\partial \eta} \end{bmatrix} \quad (3.54)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial v}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \end{bmatrix} = \frac{1}{\det J} \begin{bmatrix} J_{22} & -J_{12} \\ -J_{21} & J_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial v}{\partial \xi} \\ \frac{\partial v}{\partial \eta} \end{bmatrix} \quad (3.55)$$

sonucuna ulaşılır.

3.5.1.2 Eleman Direngenlik Matrisi

Düzlem elemanı için zorlanma ifadesi şöyle ifade edilmektedir:

$$u = \int_v \frac{1}{2} \sigma^T \epsilon dV \quad (3.56)$$

veya

$$u = \sum_e t_e \int_e \frac{1}{2} \sigma^T \epsilon dV \quad (3.57)$$

Burada t_e elemanın kalınlığıdır. Şekil değiştirme-yer değiştirme bağıntısı ise şu şekildedir:

$$\epsilon = \frac{1}{\det J} \begin{bmatrix} J_{22} \frac{\partial u}{\partial \xi} - J_{12} \frac{\partial u}{\partial \eta} \\ -J_{21} \frac{\partial v}{\partial \xi} - J_{11} \frac{\partial u}{\partial \eta} \\ -J_{21} \frac{\partial u}{\partial \xi} + J_{11} \frac{\partial u}{\partial \eta} + J_{22} \frac{\partial v}{\partial \xi} - J_{12} \frac{\partial v}{\partial \eta} \end{bmatrix} \quad (3.58)$$

Dolayısıyla (3.38), (3.39), (3.40) ve (3.41) eşitliklerinden,

$$\frac{\partial u}{\partial \xi} = \frac{\partial L}{\partial \xi} (Q_u) \quad (3.59)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \eta} = \frac{\partial L}{\partial \eta} (Q_u) \quad (3.60)$$

$$\frac{\partial v}{\partial \xi} = \frac{\partial L}{\partial \xi} (Q_v) \quad (3.61)$$

$$\frac{\partial v}{\partial \eta} = \frac{\partial L}{\partial \eta} (Q_v) \quad (3.62)$$

elde edilebilir. Daha önceden L vektörünün ξ ve η ' ya göre türevleri bulunmuştu ve bunlar (3.50) ve (3.51) eşitliklerinde görülmektedir. (3.58) eşitliğinde (3.46), (3.47), (3.48), (3.49), (3.59), (3.60), (3.61) ve (3.62) ifadeleri yerlerine yazılırsa,

$$\epsilon = Bq \quad (3.63)$$

ϵ şekil değiştirme vektörünü bulmuş oluruz. Eşitlikteki B matrisi yerdeğiştirmeleri şekil değiştirmelere bağlayan bir vektördür. B matrisi (3x16) boyutundadır ve elemanları, doğal koordinatları ξ ve η değişkeni ile elemanın düğüm noktalarının global koordinatları olan (x_i, y_i) sabitlerinden oluşur. q ise düğüm yerdeğiştirme vektörüdür. Buna göre;

$$q=[u_1,v_1,u_2,v_2,u_3,v_3,...,u_g,v_g] \quad (3.64)$$

şeklinde elde edilir. q matrisi (1x16) boyutundadır. Artık buradan gerilme vektörüne geçilebilir. Hooke kanununa göre;

$$\sigma=D\varepsilon \quad (3.65)$$

veya (3.63) ifadesini (3.65) de yerine yazarsak;

$$\sigma=DBq \quad (3.66)$$

olarak bulunmaktadır. (3.66) eşitliğindeki D matrisi (3x3) boyutunda malzeme matrisidir. D matrisi problemin düzlem gerilme ve düzlem şekil değiştirme olması durumlarına göre değişmektedir. Şayet problem bir düzlem gerilme problemi ise D matrisi, düzlem gerilme için verilen bir elastisite matrisi olur. Eğer problem bir düzlem şekil değiştirme problemi ise D matrisi düzlem şekil değiştirme için verilen bir elastisite matrisi olacaktır. (3.57)' deki zorlanma enerjisi ifadesinde $Da=dx dy=dcJd\xi d\eta$ ve ayrıca (3.63) ve (3.65) ifadeleri yerlerine yazılırsa,

$$u=\sum_e \frac{1}{2} q^t \left[t_e \int_{-1}^{-1} \int_{-1}^{-1} B^t D B \det J d\xi d\eta \right] q = \sum_e \frac{1}{2} q^t k^e q \quad (3.67)$$

(3.67) eşitliğindeki k^e değeri;

$$k^e = t_e \int_{-1}^{-1} \int_{-1}^{-1} B^t D B \det J d\xi d\eta \quad (3.68)$$

olarak ifade edilir. Burada k^e eleman direngenlik matrisidir ve (16x16) boyutlu bir matristir. B ve detJ büyüklükleri de ξ ve η ' nin fonksiyonudur. İntegral değeri nümerik olarak hesaplanıp k^e direngenlik matrisi hesaplanabilir.

3.5.2 Genel Gerilme Şekil Değiştirme Bağlılıları

Global koordinat takımına göre belirli x, y ve z doğrultularında yerdeğiştirmelerin sırasıyla u, v ve w olduğu bir sistemde Hook kanununa göre şekil değiştirme bağıntıları;

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_y}{E} - \nu \frac{\sigma_z}{E} \quad (3.69)$$

$$\varepsilon_y = -\nu \frac{\sigma_x}{E} + \frac{\sigma_y}{E} - \nu \frac{\sigma_z}{E} \quad (3.70)$$

$$\varepsilon_z = -\nu \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_y}{E} + \frac{\sigma_z}{E} \quad (3.71)$$

şeklinde elde edilmektedir. Sistemin toplam şekil değiştirmesi,

$$\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = \frac{1-2\nu}{E} (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \quad (3.72)$$

olarak ifade edilebilir. Elastisite matrisi D olmak üzere gerilme eşitliği (3.65)' deki gibi yazılabilmektedir. (3.69), (3.70) ve (3.71) denklemlerindeki gerilme değerlerini şekil değiştirmeler cinsinden ifade edecek olursak, elastisite matrisi;

$$D = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5-\nu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5-\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5-\nu \end{bmatrix} \quad (3.73)$$

olarak elde edilir.

3.5.2.1 Düzlem Gerilme Durumu

Bilindiği üzere düzlem gerilme halinde $\sigma_z = \tau_{zx} = \tau_{zy} = 0$ olmaktadır. Dolayısıyla zorlanma bağıntıları şu şekildedir;

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_y}{E} \quad (3.74)$$

$$\varepsilon_y = -\nu \frac{\sigma_x}{E} + \frac{\sigma_y}{E} \quad (3.75)$$

$$\varepsilon_z = -\nu \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_y}{E} \quad (3.76)$$

Düzlem gerilme halinde bu ifadeleri matris formu haline getirirsek,

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \end{Bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \end{Bmatrix} \quad (3.77)$$

eşitliğini elde etmiş oluruz.

3.5.2.2 Düzlem Şekil Değiştirme Durumu

Düzlem şekil değiştirme halinde $\epsilon_z = \gamma_{xz} = \gamma_{yz} = 0$ olmaktadır. Dolayısıyla gerilme ve şekil değiştirme bağıntıları şu şekildedir;

$$\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y) \quad (3.78)$$

$$\epsilon_x = \frac{1}{E} \left(\sigma_x - \nu (\sigma_y + (\nu\sigma_x + \sigma_y)) \right) \quad (3.79)$$

$$\epsilon_y = \frac{1}{E} \left(\sigma_y - \nu (\sigma_x + (\nu\sigma_x + \sigma_y)) \right) \quad (3.80)$$

Düzlem şekil değiştirme halinde bu ifadeleri matris formu haline getirirsek,

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0.5-\nu \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \end{Bmatrix} \quad (3.81)$$

3.5.3 Eşdeğer Gerilmelerin Elde Edilmesi

"Eşdeğer gerilme, basit çekmede akma başlangıcındaki distorsiyon enerjisinin, ele alınan gerilme durumundaki distorsiyon enerjisine eşitlenmesiyle elde edilir. Basit çekme için distorsiyon enerjisi ifadesinde akma gerilmesi yerine σ_E yazılıp, göz önüne alınan gerilme durumuna ait distorsiyon enerjisine eşitlendikten sonra elde edilen σ_E ifadesi eşdeğer gerilme olarak adlandırılır. Distorsiyon enerjisi" [19];

$$U_{\text{dist}} = \frac{3}{4G} \tau_{\text{oct}}^2 \quad (3.82)$$

şeklinde ve buradaki τ_{oct} ;

$$\tau_{\text{oct}} = \frac{1}{3} \sqrt{[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + G(\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2)]} \quad (3.83)$$

eşitliğiyle ifade edilmektedir. "Basit çekme probleminde akma noktasında distorsiyon enerjisi (3.82) ve (3.83) eşitliklerinden";

$$U_{\text{dist}} = \frac{1}{6G} \sigma_V^2 = \frac{1}{6G} \sigma_E^2 \quad (3.84)$$

$$U_{\text{dist}} = \frac{1}{12G} \sqrt{[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6\tau_{xz}^2]} \quad (3.85)$$

Eşdeğer gerilmeyi elde etmek için son olarak (3.84) ve (3.85) denklemleri birbirine eşitlenmelidir. Bu eşitleme sonucunda;

$$\sigma_E = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6\tau_{xz}^2]} \quad (3.86)$$

olarak eşdeğer gerilme formülasyonu elde edilir.

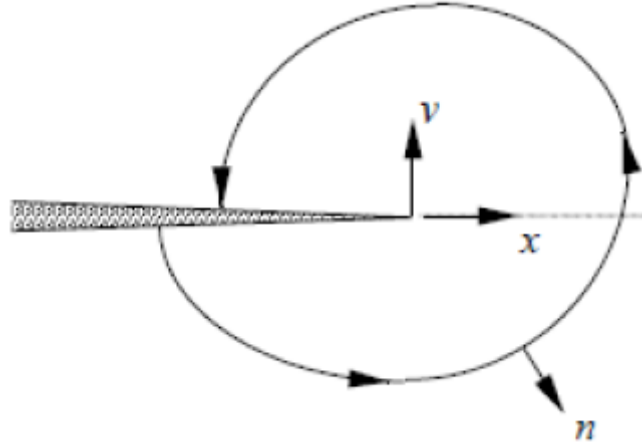
3.6 J İntegral Metodu

"Bu metod plastik şekil değişimi gösteren malzemelerde kırılma tokluğunu tespit etmek amacıyla geliştirilmiş alternatif bir metottur. Bu metodun esasında, iki boyutlu çatlak problemlerinde çatlak ucunu çeviren bölgede zorlanma enerji yoğunluğu ve iş terimleri, seçilecek çatlak yönünde bağımsız kabul edilir" [21].

Elastik ve elasto-plastik davranışlar için şekil (3.5)' deki düz çizgi integrali J şu şekilde verilmektedir;

$$J = \int_P w dy - T \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) ds \quad (3.87)$$

Eşitlikteki p, çatlağı saran herhangi bir yön w, zorlanma enerjisi yoğunluğu T, p boyunca n normali doğrultusunda oluşan çekme vektörü u, şekil değişim vektörü ve ds ark boyudur.



Şekil 3.5 J İntegral Eğrisi [21]

"W birim hacmin yaptığı iş olup elastik alandaki gerilme enerjisi yoğunluğu olarak da tarif edilir ve şu şekilde ifade edilir" [21];

$$W = \int_P \sigma d\varepsilon \quad (3.87)$$

Çatlağın en uç noktası söz konusu olduğunda J değeri [21]:

$$J = \int_P W dy \quad (3.88)$$

Farklı bir ifadeyle J integrali iki nokta arasındaki potansiyel enerji farkıdır ve matematiksel olarak da şöyle ifade edilebilir;

$$J = \frac{1}{B} \frac{\partial U}{\partial a} \quad (3.89)$$

(3.89) eşitliğinde U, yapılan iş veya zorlanma enerjisi olup B, malzeme genişliğidir.

3.7 Sonlu Elemanlar Programı (Franc2D/L)

Kırılma mekaniği problemlerinin çözümlemelerinin analitik yolla yapılabileceği gibi sonlu elemanlar metoduyla da yapılabilmektedir. Özellikle karmaşık problemlerin çözümünde sonlu elemanlar programının kullanılması gerekmektedir. Sonlu elemanlar

programı ile enerji serbest kalma oranı, gerilme şiddet faktörü, J integral değeri ve yapı üzerindeki gerilmeler kolayca hesaplanabilmektedir.

Bu çalışmada sonlu elemanlar programı olarak Cornell üniversitesi (USA) tarafından geliştirilen Franc2D/L programı kullanılmıştır. Franc2D/L programı, iki boyutlu düzlem problemlerinin çözümlemelerinin yapılabilirdiğı bir paket programdır. Program çatlaklı ve çatlaksız yapıların analizinin yapılabilmesine imkan tanıdığı gibi, aralarında yapıştırıcı bulunan katmanlar şeklinde sisteme tanımlanmış parçaların analizlerinin yapılabilmesine de imkan tanımaktadır. Bu tez çalışmasında, yapıştırıcı ile birleştirilmiş çatlaklı bir bağlantının, çatlağı dik olan bir çizgi boyunca, kayma gerilmeleri ve kırılma enerjileri değişimleri Franc2D/L programı ile incelenmiştir. Bu amaçla sonlu elemanlar modelinde, sekiz düğümlü dörtgen izoparametrik elemanlar kullanılmıştır.

KOMPOZİT YAMA VE HİBRİT YAPIŞTIRMA İLE TAMİR EDİLEN BAĞLANTININ SONLU ELEMANLAR MODELİ VE ANALİZİ

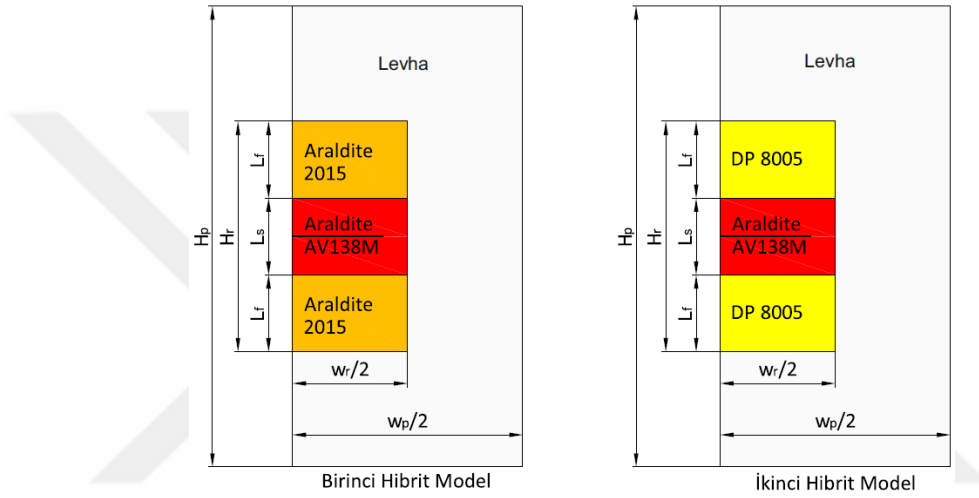
4.1 Giriş

Uzun süre kullanıma bağlı olarak yorulmaya maruz kalmış, yaşlanmış malzemelerin bünyelerinde çatlak meydana gelmesi sıkça rastlanan bir durumdur. Örneğin uçaklarda bu durum karşımıza çıkmaktadır. Uçaklarda, gövde yapısında çeşitli özelliklerde alüminyum malzeme kullanılmaktadır. Çatlakların tamirati için kompozit malzemelerden çatlak üzerine yama yapılarak, arada yapıştırıcı malzeme kullanıp tamir etme işlemi ihtiyaçlar doğrultusunda geliştirilen bir yöntem olmuştur. Bu sayede yapının veya makinanın servis ömrünün arttırılması ve olası tehlikelerin önlenmesi amaçlanmıştır. Yama malzemesi olarak kompozit malzeme seçilmesinde etkili olan ana neden, ihtiyaç duyulan yönde yüksek mukavemet değerlerini daha düşük ağırlıklarda malzemelerle karşılayabilmesidir. Ayrıca kompozit malzemelerin paslanmaması diğer önemli etkindir.

Bu çalışmada ticari amaçlı kullanım için üretilen Araldite AV138M, Araldite 2015 ve Scotch Weld DP 8005 tipi yapıştırıcılarla mono ve hibrit yapıştırırmalı modeller oluşturulmuştur. Çatlak uzunluğu ve yapıştırıcı kalınlığı gibi parametreler değiştirilerek enerji serbest kalma oranı (kırılma enerjisi) değişimleri ve yapıştırıcıda meydana gelen kayma gerilmeleri sonlu elemanlar metodu ile incelenmiştir.

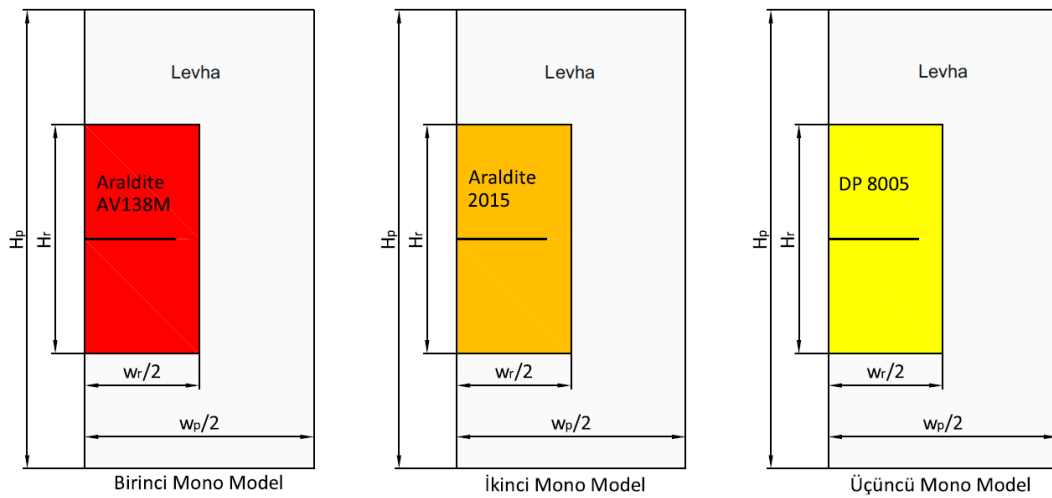
4.2 Problemin Tanımı

Bu çalışmada, yapıştırıcı ile tamir edilmiş çatlaklı bir levhanın, gerilme ve kırılma enerjisi davranışları incelenmiştir. Bunun için yapıştırıcı kayma gerilmeleri ve çatlak ucunda kırılma enerjisi değişimleri incelenmiştir. İncelemeler için hibrit ve mono yapıştırırmalı modeller oluşturulmuştur. Çalışma geneline referans olarak kabul edilen [5] literatür çalışması temel alınmıştır ve literatür çalışmasında kullanılan geometrik parametreler ve yapıştırılan malzemelerin özellikleri aynı kabul edilmiştir. Bu çalışmada incelenen hibrit yapıştırırmalı modeller şematik olarak Şekil 4.1' de gösterilmiştir.



Şekil 4.1 Bu çalışmada kullanılan iki farklı hibrit yapıştırırmalı model

Bu çalışmada hibrit yapıştırırmalı modellere ek olarak, çalışmaya esas teşkil eden üç tip yapıştırıcı ile oluşturulmuş mono yapıştırırmalı modeller de Şekil 4.2' de görülmektedir.



Şekil 4.2 Bu çalışmada kullanılan üç farklı mono yapıştırırmalı model

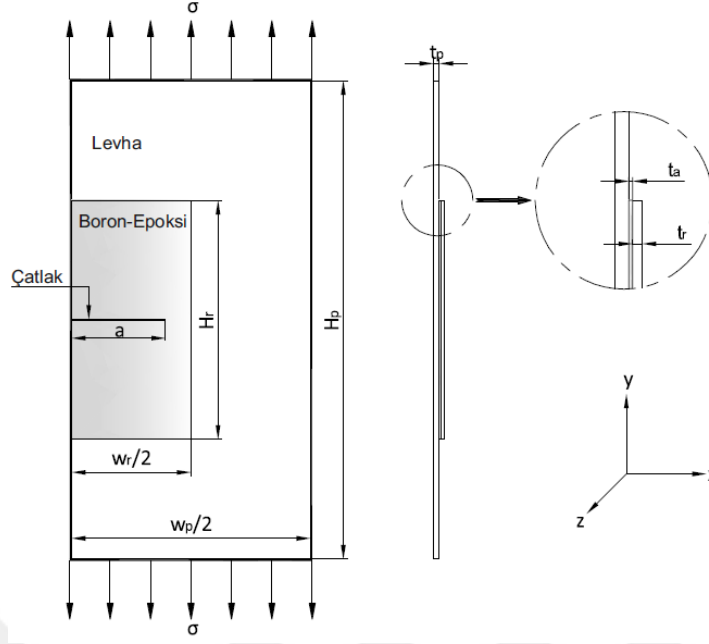
Böylece literatür çalışması [5] referans alınarak oluşturulan bu çalışmada, hem Şekil 4.1' deki hibrit yapıştırırmalı modellerden elde edilen sonuçlar hem de Şekil 4.2' deki mono yapıştırırmalı modellerden elde edilen sonuçlar birbirleri ile kıyaslanmıştır.

Bu çalışmada, bünyesinde 5 mm' lik bir çatlak ihtiva eden alüminyum levha üzerine, kompozit malzemeden bir yama, çatlak üzerine yapıştırılarak tamir edilmiş ve levha tek eksenli çekme gerilmesine maruz bırakılmıştır. Bu şekilde tamir edilmiş çatlaklı yapıda, 5 mm' lik başlangıç çatlağı, yine 5 milimetrelilik adımlarla 50 mm' ye kadar büyütülmüştür. Bu koşullar altında enerji serbest kalma oranları ve yapıştırıcı kayma gerilmeleri incelenmiştir. Bölüm 4.3' de geometri, malzeme ve yük parametreleri verilmiştir.

Bu bölümde hibrit yapıştırma modelleri için önemli bir parametre olan λ hibrit oranını tanımlamakta fayda vardır. Hibrit modeller için; sünek yapıştırıcı uzunluğunun gevrek yapıştırıcı uzunluğuna oranı olan λ parametresi, matematiksel olarak $\lambda=L_f/L_s$ olarak tanımlanmıştır (Şekil 4.1). Hibrit modeller oluşturulurken, yapıştırma çizgisi ortasında yani çatlak üzerine gelen kısımda gevrek yapıştırıcı kullanılır. Yapıştırma çizgisi uçlarında ise sünek veya tok yapıştırıcı kullanılmıştır. Hibrit yapıştırıcılarda, modeli oluşturan yapıştırıcıların kalınlıkları değiştirilebildiği gibi yapıştırıcı yükseklikleri de değiştirilerek optimum bir model elde edilebilmektedir. Böylece yapıştırıcı üzerindeki kayma gerilmeleri dağılımları değiştirilebilir ve sistemde optimum bir yapıştırıcı kombinasyonunun elde edilmesi mümkün olabilir.

4.3 Geometrik Model

Problemin geometrisi Şekil 4.3' de gösterilmektedir. Model y eksenine göre simetrik olduğu için yarım model olarak modellenmiş ve Şekil 4.3' de sağ yarısı gösterilmiştir.



Şekil 4.3 Geometrik model

Yama ve alüminyum levhanın ölçüleri ve mekanik özellikleri [5] nolu referansdan alınarak değiştirilmeden kullanılmıştır. Alüminyum levhanın genişlik ve yüksekliği birbirine eşittir ($H_p=w_p=254$ mm). Levha kalınlığı t_p ve yama kalınlığı t_r sırasıyla 3 mm ve 2 mm' dir. Yapıştırıcı kalınlığı t_a değişken olup incelemelerde 0.2, 0.4, 0.6 ve 0.8 mm olarak alınmıştır. Benzer şekilde boron-epoksi yamanın da yükseklik ve genişliği birbirine eşittir ($H_r=w_r=127$ mm). Alüminyum levhanın elastisite modülü ve poisson oranı sırasıyla $E_p=72$ GPa ve $\nu=0.33$ ' dür. Şekil 4.3' de gösterildiği üzere a çatlak uzunluğu olup başlangıç değeri 5 mm' dir. Tamir edildikten sonra çatlak uzunluğu 5' er mm lik adımlarla 50 mm' ye büyütülmüştür. Alüminyum levha, tek eksen $\sigma=70$ MPa çekme gerilmesine maruz kalmaktadır. Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2' de sırasıyla bu çalışmada kullanılan yapıştırıcıların ve boron-epoksi kompozit yamanın mekanik özellikleri verilmektedir.

Çizelge 4.1 Yapıştırıcıların mekanik özellikleri [24], [25], [26]

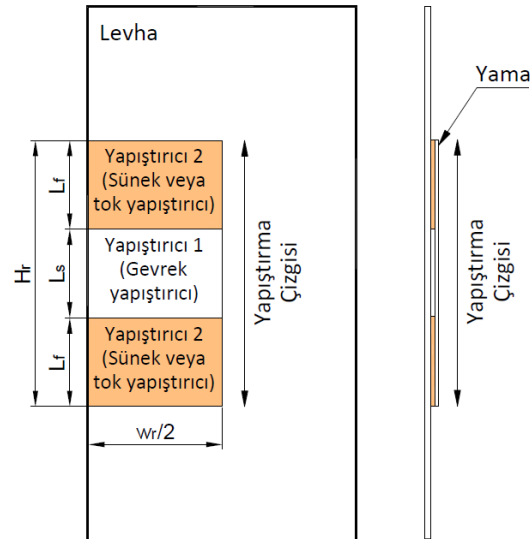
Yapıştırıcı	Elastisite Modülü (E)	Poisson Oranı (ν)	Kayma Modülü (G)
Araldite 2015	1850 MPa	0.33	695 MPa
Araldite AV138M	4590 MPa	0.35	1700 MPa
DP 8005	590 MPa	0.35	219 MPa

Çizelge 4.2 Boron-Epoksinin mekanik özellikleri [5]

E_{rL} (Uzunlamasına Elastisite Modülü)	E_{rT} (Enlemesine Elastisite Modülü)	ν_L (Uzunlamasına PoissonOranı)	ν_T (Enlemesine Poisson Oranı)	G_r (Kayma Modülü)
210 GPa	19.6 GPa	0.028	0.3	5.46 GPa

4.4 Yapıştırma Çizgisi ve Hibrit Yapıştırılmalı Model

Bu çalışma boyunca, yapıştırıcı ile birleştirme işleminin yapıldığı kısım, Şekil 4.4' den görüldüğü üzere yapıştırma çizgisi olarak anılacaktır. Hibrit modellerde, yapıştırma çizgisinin ortasında (çatlağın üzerine gelen kısımda) gevrek bir yapıştırıcı kullanılmakta olup, uç kısımlarında kullanılan yapıştırıcılar sünek veya toktur. Böylece yama malzemesi boron-epoksinin alt yüzeyi iki farklı yapıştırıcı ile tamamen çatlaklı levhaya yapıştırılmış olacaktır. Şekil 4.4' de yapıştırma çizgisi boyunca, yapıştırıcı dağılımı gösterilmiştir. Burada L_s ortadaki gevrek yapıştırıcının yapıştırma yüksekliği olup L_f ise uçlardaki sünek veya tok yapıştırıcının yapıştırma yüksekliğidir.

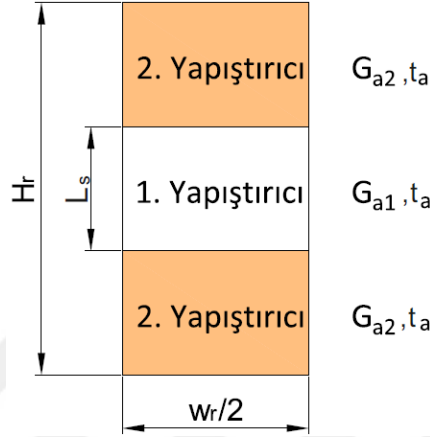


Şekil 4.4 Yapıştırıcıların yama üzerinde dağılımı ve yapıştırma çizgisi

Yapıştırıcıların dağılımları Şekil 4.4' deki gibi olmak kaydıyla, literatür çalışmasında iki farklı yapıştırma konfigürasyonu üzerinde durulmuştur.

4.4.1 Literatür Çalışması Birinci Yapıştırma Konfigürasyonu

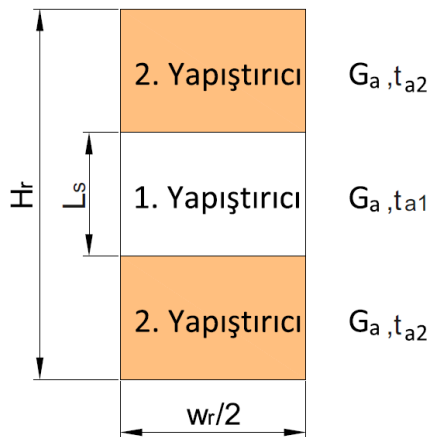
Literatür çalışması birinci yapıştırma konfigürasyonunda iki farklı yapıştırıcı mevcut olup bu yapıştırıcıların kalınlıkları aynı, fakat kayma modülleri farklı seçilerek bir hibrit model oluşturulmuştur. Bu şekilde farklı kayma modüllerine sahip yapıştırıcıların kombinasyonunun nasıl bir yapıştırma verimliliği sağladığı incelenmiştir. Şekil 4.5' de şematik olarak literatür çalışması birinci konfigürasyon modeli görülmektedir.



Şekil 4.5 Literatür çalışması birinci yapıştırma konfigürasyonu

4.4.2 Literatür Çalışması İkinci Yapıştırma Konfigürasyonu

Literatür çalışması ikinci yapıştırma konfigürasyonunda, yapıştırıcıların kayma modülleri aynı, ancak kalınlıkları farklı seçilmiştir. Bu şekilde bir konfigürasyon ile farklı yapıştırma kalınlıklarının yapıştırma verimliliği üzerinde etkileri incelenmiştir. Şekil 4.6' da şematik olarak ikinci yapıştırma konfigürasyonu gösterilmiştir.



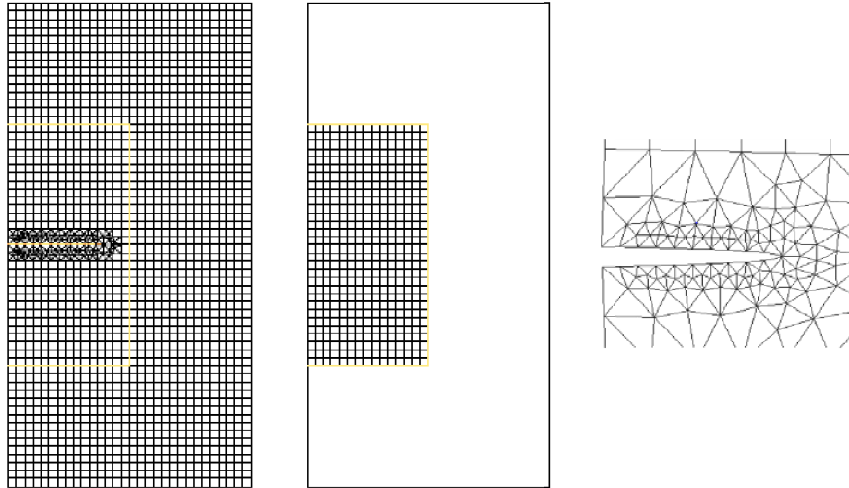
Şekil 4.6 Literatür çalışması ikinci yapıştırma konfigürasyonu

4.5 Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması ve Sınır Şartları

Analiz yapabilmek için, Cornell Üniversitesi tarafından geliştirilen Franc2D/L modülü kullanılarak geometrinin sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Sonuçları belli bir yaklaşım ve yaklaşıklıkla elde edebilmek için bazı varsayımlar yapılmıştır. Bu varsayımları sıralayacak olursak [5];

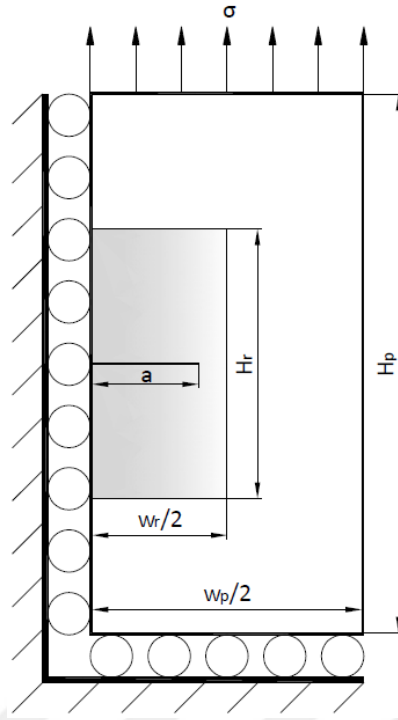
- Her katman kendi içersinde bağımsız olarak düzlem gerilmeye maruz bir yapıdır. Birbirinden bağımsız olan bu yapılar yapıştırıcı ile birbirlerine bağlanabileceklerdir [5].
- Yapıştırıcı katmanı homojen, lineer elastik ve izotropiktir [5].
- Yapıştırıcı sadece kayma gerilmesinden dolayı deformasyonuna uğrayacaktır ve deformasyon tüm yapıştırıcı kalınlığı boyunca aynı olacaktır [5].
- Yapıştırıcı yüzeyi boyunca meydana gelen kuvvetler, yüzey boyunca iletilmiş olacaktır [5].

Levha ve yama, kuadratik şekil fonksiyonlu sekiz düğümlü izoparametrik elemanlarla sonlu elemanlara ayrılmıştır. Bu tip elemanlar, elastik analizler için yeterli ve iyi sonuçlar vermektedir [5]. Levha, yama ve çatlak civarındaki ağ yapısı Şekil 4.7' de görüldüğü gibidir.



Şekil 4.7 Levha, yama ve çatlak civarındaki ağ yapısı [5]

Model simetrik olduğundan, simetrik durum sınır şartları kullanılarak Şekil 4.8' de gösterildiği gibi sınır şartları probleme uygulanmıştır.

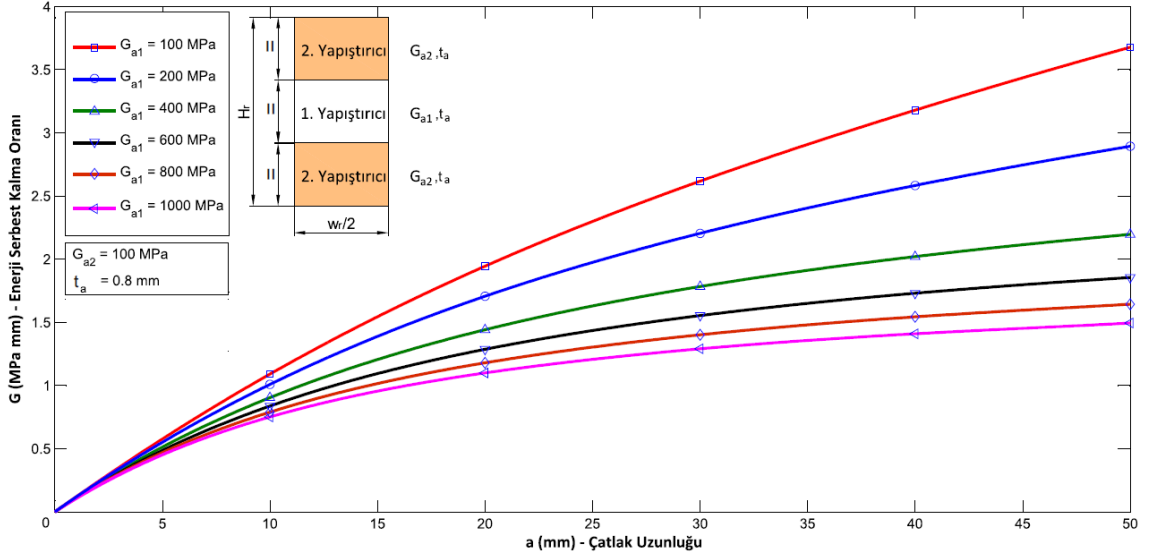


Şekil 4.8 Geometrik model sınır şartları

4.6 Literatür Çalışmasının İncelenmesi ve Sonuçların Elde Edilmesi

Bu çalışmada inceleyeceğimiz probleme geçmeden önce bu tez çalışmasına referans olarak seçilen [5]' de elde edilen sonuçların tümü tarafımızdan da elde edilmiş ve bu bölümde sonuçları gösterilmiştir. Literatür çalışması birinci ve ikinci yapıştırma konfigürasyonlarına göre sistemin enerji salıverme oranları ve yapıştırıcı kayma gerilmeleri elde edilmiştir. İlk olarak birinci tamir konfigürasyonun da enerji salıverme oranları incelenmiştir.

Şekil 4.9' da farklı çatlak uzunluklarına karşılık enerji salıverme oranı incelenmiştir. Yapıştırma çizgisi ortasında bulunan yapıştırıcının farklı varyasyonları için ayrı ayrı sonuçlar elde edilmiştir. Yapıştırma çizgisi uç kısımlarındaki yapıştırıcılar için $G_{a2}=100$ MPa seçilmiştir ve tüm yapıştırıcıların kalınlıkları birbirine eşit ve $t_{a1}=t_{a2}=t_a=0.8$ mm' dir.

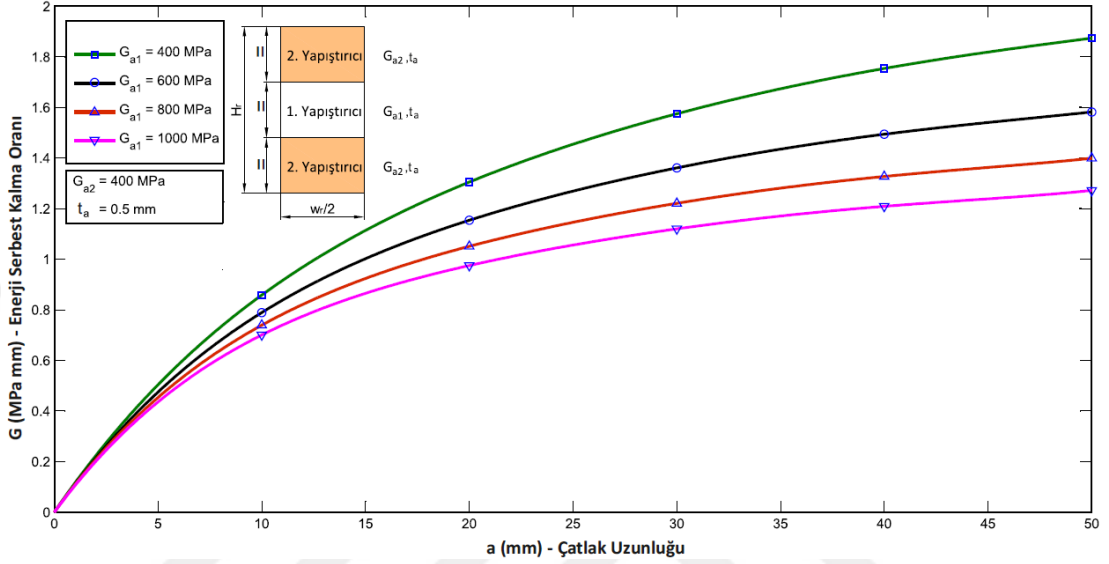


Şekil 4.9 Farklı G_{a1} ve $G_{a2}=100$ MPa için kırılma enerjisi - çatlak uzunluğu diyagramı (Birinci tamir konfigürasyonu)

Şekil 4.9' a göre, enerji serbest kalma oranının yapıştırma çizgisi ortasında, yani çatlak üzerinde kullanılan yapıştırıcı tipiyle doğrudan ilişkili olduğu ve bu kısımda kullanılan yapıştırıcının özelliklerinin enerji serbest kalma oranını etkilediğini söyleyebiliriz. Örneğin, $G_{a1}=100$ MPa ve $G_{a1}=1000$ MPa için 50 mm çatlak uzunluğuna karşılık enerji serbest kalma oranları sırasıyla $G=3.7$ MPa mm ve $G=1.5$ MPa mm' dir. Azalma %59.5' dir. Burada G_{a2} sabit ve $G_{a2}=100$ MPa alındığından, $G_{a1}=100$ MPa olan varyasyonda tüm yapıştırıcıların kayma modülleri aynı olmaktadır. Bu sebeple bu varyasyonu yama bölgesinde $G_a=100$ MPa olan tek tip mono yapıştırıcı kullanılmış gibi kabul edebiliriz. Yüksek kayma modüllü yapıştırıcıları kendi içersinde değerlendirirsek, örneğin $G_{a1}=800$ MPa ve $G_{a1}=1000$ MPa olan yapıştırıcılar için 50 mm çatlak uzunluğuna karşılık enerji serbest kalma oranları sırasıyla $G=1.6$ MPa mm ve $G=1.5$ MPa mm' dir. Azalma %6' dır. Sonuç olarak Şekil 4.9' a göre yapıştırma çizgisi ortasındaki, yani çatlak üzerindeki yapıştırıcının kayma modülünün arttırılması ile enerji serbest kalma oranının azaldığı sonucu çıkarılabilir. Yani yapıştırıcının gevrekliği arttıkça kırılma enerjisi azalmaktadır. Ancak yapıştırma çizgisi orta kısmında kullanılan yapıştırıcının kayma modülünün $G_{a1}=800$ MPa olması ve $G_{a1}=1000$ MPa olması durumunda enerji serbest kalma oranındaki azalma sadece %6' dır. Bu sebeple bu problem için 800 MPa' dan daha yüksek kayma modüllü bir yapıştırıcı seçilmesi sonucu fazla etkilememektedir. Bundan dolayı çatlak üzerinde kullanılacak yapıştırıcının kayma modülü optimize edilebilir. Şekil 4.9' dan çıkan bir diğer sonuç ise 10 mm' nin altında çatlak uzunluğuna sahip levhanın,

tamir edilmesinin önemsiz olduğudur. Çünkü kırılma enerjisi oldukça düşük mertebelerdedir.

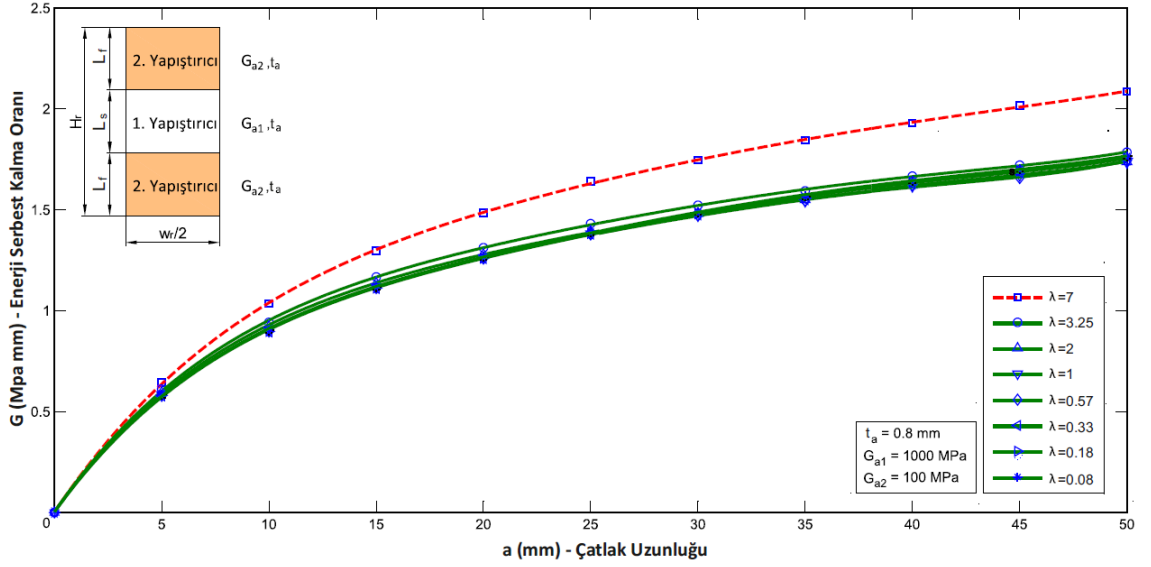
Şekil 4.10' da, bir öncekine benzer şekilde G_{a2} sabit ve 400 MPa' dır. Yapıştırıcı kalınlıkları $t_a=0.5$ mm' dir. Farklı G_{a1} yapıştırıcı kayma modülleri için oluşturulan hibrit modellerin enerji serbest kalma oranlarının çatlak uzunluğu ile değişimi incelenmiştir.



Şekil 4.10 Farklı G_{a1} ve $G_{a2}=400$ MPa için kırılma enerjisi - çatlak uzunluğu diyagramı (Birinci tamir konfigürasyonu)

Şekil 4.10' a göre 50 mm çatlak uzunluğuna karşılık $G_{a1}=400$ MPa olan hibrit modelinin enerji serbest kalma oranı $G=1.9$ MPa mm' dir. Şekil 4.9' daki grafiğe göre $t_a=0.8$ mm kalınlıklı ve $G_{a2}=100$ MPa ve $G_{a1}=400$ MPa olan hibrit modelinde enerji serbest kalma oranı $G=2.2$ MPa mm' dir. Azalma %13.5' dir. Burada yapıştırıcı kalınlıklarının ve yapıştırma çizgisi uç kısımlarındaki yapıştırıcıların farklı olması sebebiyle enerji serbest kalma oranlarında da farklılık meydana gelmektedir. Şekil 4.9 ve Şekil 4.10' a baktığımızda enerji serbest kalma oranı grafiklerinin birbirine benzer davranış gösterdiği görülmüştür.

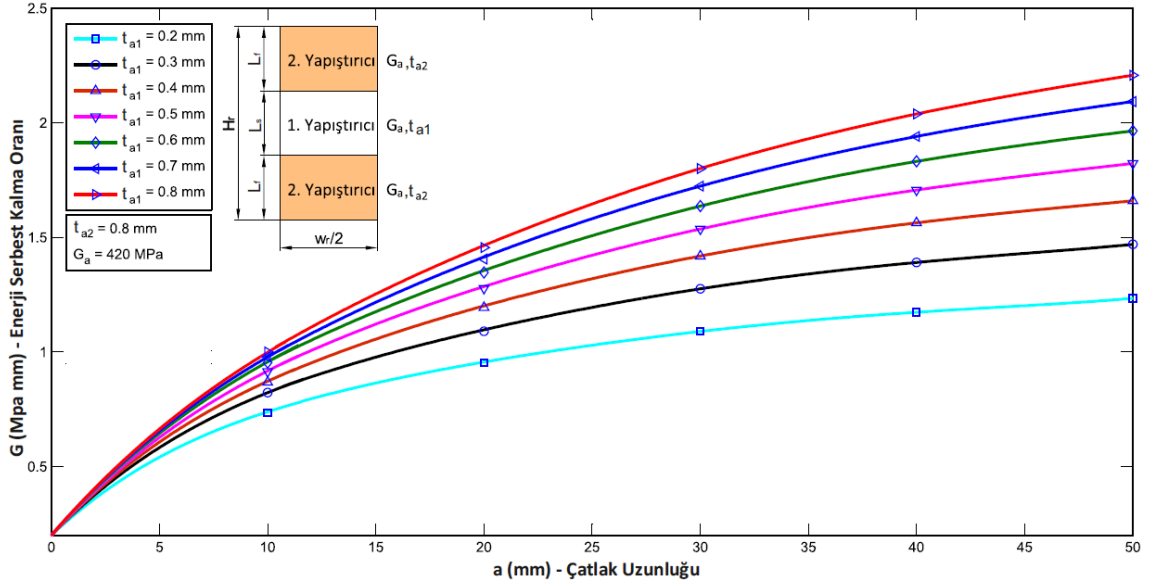
Diğer inceleme, Şekil 4.4' de görülen, yapıştırıcıların yapıştırma yükseklikleri L_s ve L_f parametrelerinin arttırılması veya azaltılmasının, yani λ oranının değiştirilmesinin, enerji serbest kalma oranı üzerindeki etkileridir. Şekil 4.11, $G_{a1}=1000$ MPa, $G_{a2}=100$ MPa ve $t_a=0.8$ mm örnek değerler alınarak oluşturulmuştur.



Şekil 4.11 Farklı yapıştırma yükseklikleri için kırılma enerjisi - çatlak uzunluğu diyagramı (Birinci tamir konfigürasyonu)

Şekil 4.11' den görüldüğü üzere λ hibrit oranı 0.08-3.25 aralığındayken enerji serbest kalma oranındaki azalma önemsizlenecek boyutlardadır. Yalnızca λ hibrit oranı $\lambda=7$ iken kısıtlı bir etki vardır. Sonuç olarak bu konfigürasyonda λ değişiminin tamir verimliliğini çok az etkilediği sonucuna ulaşılabılır.

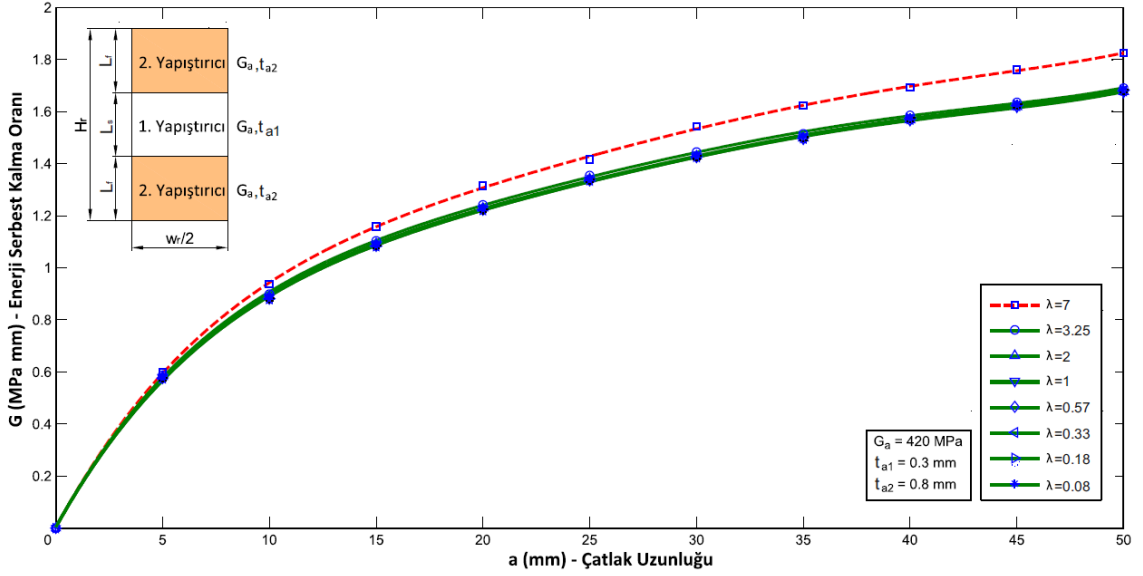
Bir sonraki aşama olarak Şekil 4.6' da şematik olarak görülen ikinci tamir konfigürasyonu incelenmiştir. Hibrit modelde tüm yapıştırıcıların kayma modülleri birbirine eşit olarak alınmış ve yapıştırıcıların kalınlıkları değiştirilerek kalınlık etkisi incelenmiştir. Şekil 4.12' de yapıştırma çizgisi uç kısımlarında yapıştırıcı kalınlığı $t_{a2}=0.8$ mm' dir ve yapıştırma çizgisi orta kısmındaki yapıştırıcının kalınlığı değiştirilerek sonuçlar incelenmiştir. Tüm yapıştırıcıların kayma modülleri $G_a=420$ MPa' dır.



Şekil 4.12 Farklı yapıştırıcı kalınlıkları için kırılma enerjisi - çatlak uzunluğu diyagramı (ikinci tamir konfigürasyonu)

Şekil 4.12' ye göre, t_{a1} kalınlığının 0.8 mm ve 0.2 mm olması durumunda, 50 mm çatlak uzunluğuna karşılık gelen enerji serbest kalma oranları sırasıyla, $G=2.2$ MPa mm ve $G=1.22$ MPa mm' dir. Enerji serbest kalma oranındaki azalma %44.5' dir. Buradan yola çıkarak kalınlık değişiminin sistemin yorulma ömrü üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu sonucu çıkarılabilir. $t_{a1}=0.2$ mm ve $t_{a2}=0.3$ mm gibi birbirine yakın kalınlıklarda, konfigürasyonun 50 mm çatlak uzunluğuna karşılık gelen enerji serbest kalma oranları da sırasıyla, $G=1.22$ MPa mm ve $G=1.45$ MPa mm' dir. Enerji serbest kalma oranındaki azalma %16' dır. Ayrıca 10 mm ve altındaki çatlak uzunlukları için ikinci konfigürasyon tamir metodunda, t_{a1} kalınlığının 0.5 mm ve üzerindeki değerler için aynı sonuçları verdiğini görülmektedir. t_{a1} kalınlığının küçük çatlaklarda ihtiyaçtan fazla büyütülmesinin gereksiz olduğunu söylemek mümkündür. 10 mm' nin altındaki çatlak uzunluklarında da birinci konfigürasyonda olduğu gibi tamir yapılmasının gerekli olmadığı sonucuna ulaşılabilir.

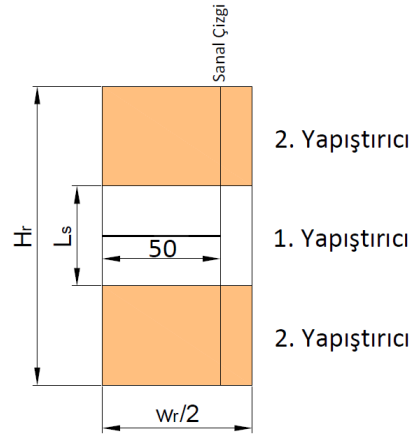
İkinci konfigürasyon için diğer inceleme ise, Şekil 4.13' de görülen farklı yapıştırıcı yüksekliklerine karşılık enerji serbest kalma oranlarının değişimidir. $t_{a1}=0.3$ mm, $t_{a2}=0.8$ mm ve $G_a=420$ MPa sabit olarak alınarak, çatlak üzerindeki yapıştırıcı uzunluğu L_s nin ve dolayısıyla λ oranının değiştirilmesi ile kırılma enerjisi değişimi görülmektedir.



Şekil 4.13 Farklı yapıştırma yükseklikleri için kırılma enerjisi - çatlak uzunluğu diyagramı (ikinci tamir konfigürasyonu)

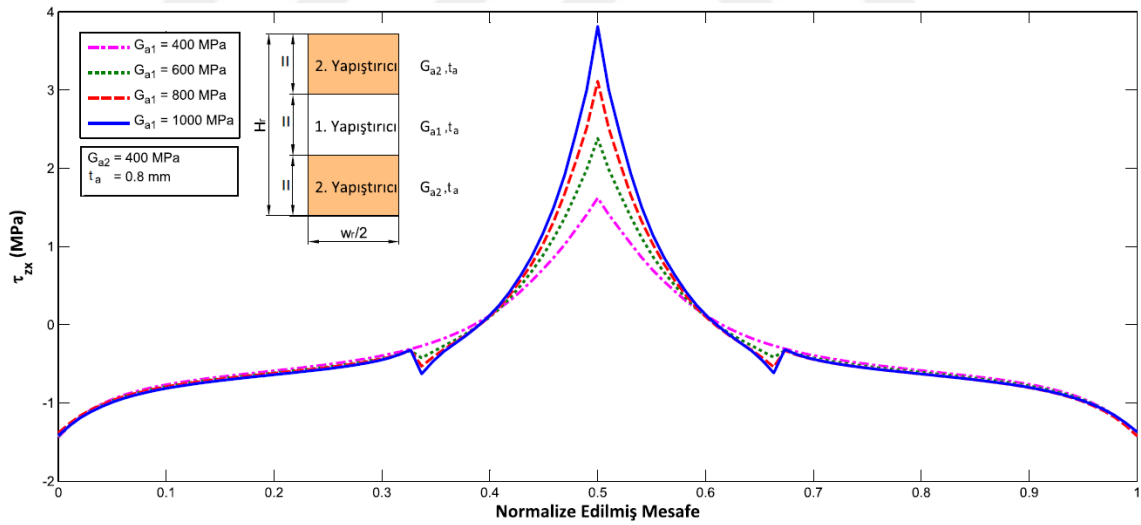
Şekil 4.13' de $\lambda=0.08$ ' den başlayarak $\lambda=7$ ' ye kadar kademeli olarak λ hibrit oranı değiştirilmiş ve λ oranının enerji serbest kalma oranına etkisi analiz edilmiştir. Şekil 4.13' den görüldüğü üzere λ hibrit oranının enerji serbest kalma oranı üzerinde çok sınırlı bir etkisi vardır. $\lambda=0.08$ ve $\lambda=3.25$ arasındaki λ hibrit oranlarında birbirine çok yakın enerji serbest kalma oranı değerleri elde edilmektedir. Sadece $\lambda=7$ iken hibrit oranının sınırlı bir etkisi vardır. Buna göre 50 mm çatlak uzunluğunda, $\lambda=7$ ve $\lambda=0.08$ hibrit oranlarına karşılık enerji serbest kalma oranları değerleri sırasıyla, $G=1.8$ MPa mm ve $G=1.7$ MPa mm' dir. Enerji serbest kalma oranındaki azalma %5.5' dir. Bu nedenle, birinci konfigürasyonda olduğu gibi ikinci konfigürasyonda da L_s yapıştırma yüksekliğinin ve dolayısıyla λ hibrit oranının değiştirilmesinin kırılma enerjisi üzerindeki etkisi çok azdır.

Son olarak yapıştırıcı bölgesindeki kayma gerilmelerinin dağılımı incelenmiştir. Kayma gerilmeleri dağılımı Şekil 4.14' de gösterildiği gibi, 50 mm mesafedeki çatlak ucundan geçen sanal bir çizgi boyunca incelenmiştir. Yapıştırıcı bölgesindeki kayma gerilmelerinin incelenmesi, yapıştırıcıda bir kopma meydana gelip gelmeyeceğinin anlaşılabilmesi açısından gereklidir.



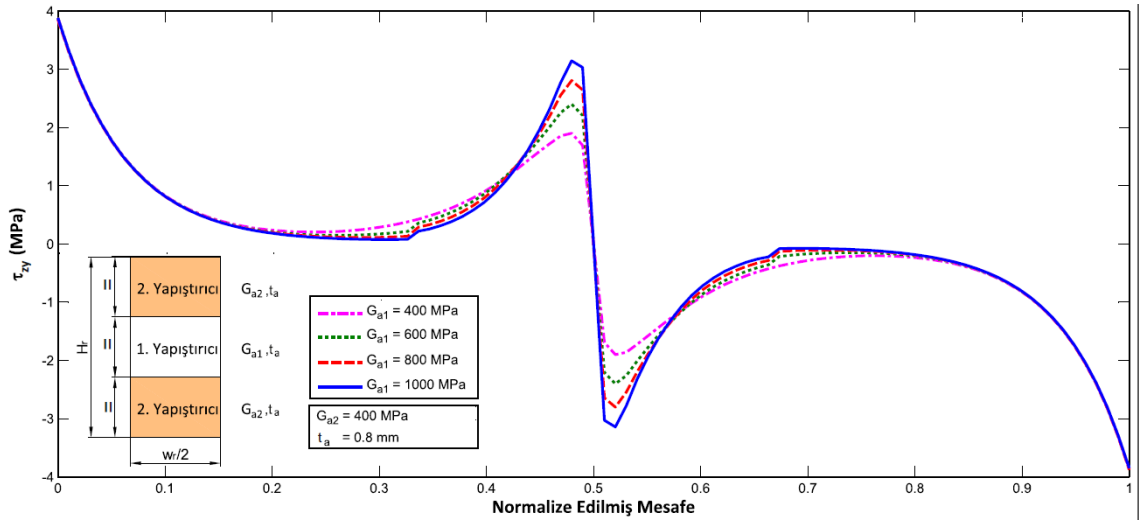
Şekil 4.14 Kayma gerilmeleri incelemesi için sanal çizgi hattı

Yapıştırıcı çizgisi boyunca yapıştırıcıda meydana gelen τ_{zx} ve τ_{zy} kayma gerilmeleri incelenecektir. İlk önce birinci konfigürasyon için τ_{zx} ve τ_{zy} kayma gerilmeleri incelenmiştir. Şekil 4.15' de birinci konfigürasyona göre τ_{zx} kayma gerilmeleri incelenmiştir. Tüm yapıştırıcıların kalınlıkları $t_a=0.8$ mm ve $G_{a2}=400$ MPa olarak alınmış olup, G_{a1} kayma modülünün farklı değerleri için τ_{zx} kayma gerilmeleri incelenmiştir. İnceleme, G_{a1} kayma modülünün 400 ,600, 800 ve 1000 MPa değerleri için yapılmıştır.



Şekil 4.15 Yapıştırıcı bölgesi τ_{zx} kayma gerilmeleri dağılımı (Birinci tamir konfigürasyonu)

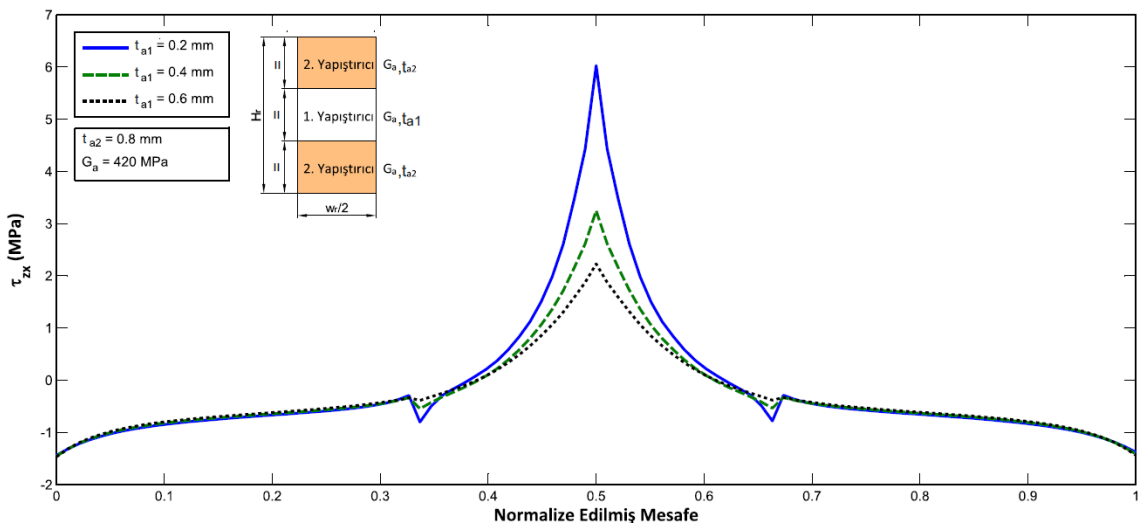
Şekil 4.15' den görüldüğü üzere τ_{zx} kayma gerilmesi, G_{a1} kayma modülünün farklı değerlerine göre değişiklik göstermektedir. $G_{a1}=400$ MPa olan yapıştırıcı için τ_{zx} kayma gerilmesi $\tau_{zx}=1.5$ MPa' dır. $G_{a1}=1000$ MPa olan yapıştırıcı içinde τ_{zx} kayma gerilmesi $\tau_{zx}=3.75$ MPa' dır. Bu gerilme değerleri arasında 2.5 kat fark vardır.



Şekil 4.16 Yapıştırıcı bölgesi τ_{zy} kayma gerilmeleri dağılımı (Birinci tamir konfigürasyonu)

Şekil 4.16' da τ_{zy} kayma gerilmeleri görülmektedir. Yapıştırma çizgisi ortasında $G_{a1}=400$ MPa için $\tau_{zy}=1.9$ MPa' dır. Diğer taraftan $G_{a1}=1000$ MPa için $\tau_{zy}=3.1$ MPa' dır. Bu durumda, birinci tamir konfigürasyonu için, yapıştırma çizgisi ortasında tam olarak çatlak üzerine gelen orta kısımda, τ_{zy} gerilmelerinin τ_{zx} gerilmelerine göre daha az olduğu sonucuna varılabilir.

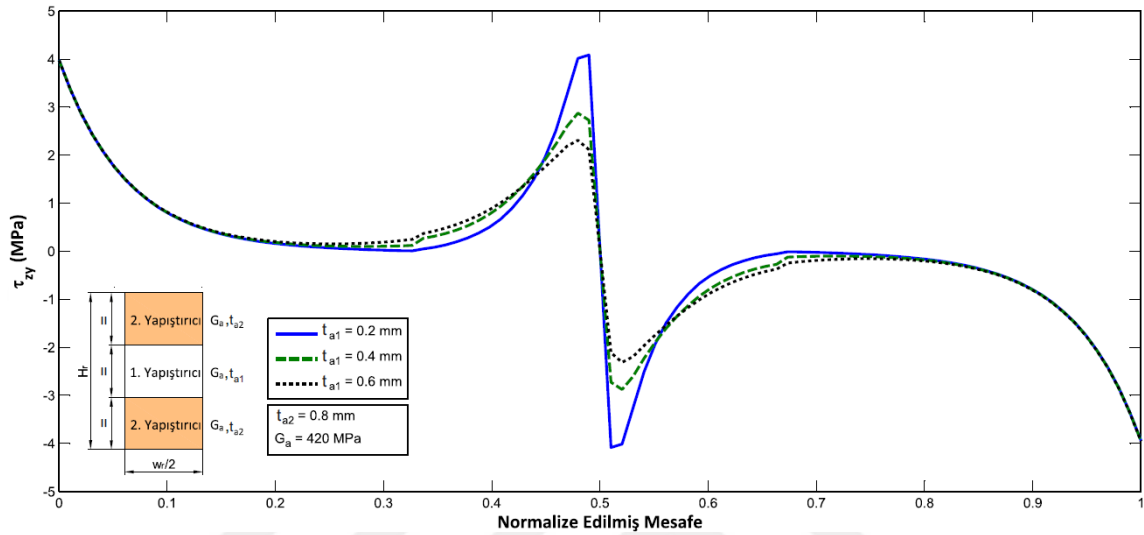
Bir sonraki aşama olarak ikinci tamir konfigürasyonu için benzer şekilde τ_{zx} ve τ_{zy} gerilmeleri incelenmiştir. İkinci konfigürasyon gerilme dağılımlarını incelemek için, problemde tüm yapıştırıcıların kayma modülleri $G_a=420$ MPa ve $t_{a2}=0.8$ mm olarak alınmış olup, t_{a1} kalınlığı değişkendir. İlk olarak τ_{zx} kayma gerilmesi incelenmiş ve sonuçlar Şekil 4.17' de gösterilmiştir.



Şekil 4.17 Yapıştırıcı bölgesi τ_{zx} kayma gerilmeleri dağılımı (İkinci tamir konfigürasyonu)

Buna göre $t_{a1}=0.2$ mm ve $t_{a1}=0.6$ mm kalınlıklarına karşılık τ_{zx} kayma gerilmeleri sırasıyla 6 MPa ve 2 MPa' dır. Yapıştırıcı kalınlığı üç kat azaltıldığında, gerilmede üç kat artış meydana gelmiştir.

Şekil 4.18' de ise ikinci konfigürasyon için τ_{zy} kayma gerilmelerinin dağılımları görülmektedir.



Şekil 4.18 Yapıştırıcı bölgesi τ_{zy} kayma gerilmeleri dağılımı (ikinci tamir konfigürasyonu)

Şekil 4.18' e göre, $t_{a1}=0.2$ mm ve $t_{a1}=0.6$ mm yapıştırıcı kalınlıklarına karşılık çatlak ucunda τ_{zy} kayma gerilmeleri sırasıyla 4 MPa ve 2.2 MPa' dır. Dolayısıyla, yapıştırma çizgisi orta kısmında bulunan yapıştırıcı kalınlığının 3 kat artırılması neticesinde τ_{zy} kayma gerilmesi 1.8 kat azaltılmıştır.

İncelenen literatür çalışmasından çıkarılan sonuçları şu şekilde özetleyebiliriz;

- Çatlak ucunda kırılma enerjisi, her iki konfigürasyonda da önemli seviyelerde değişmektedir. Birinci konfigürasyonda, kırılma enerjisinde %59.5' a varan değişimler tespit edilmiştir. İkinci konfigürasyonda ise tespit edilen değişim %53.5 mertebelerindedir. Kırılma enerjisindeki değişim yapının yorulma ömrü hakkında da fikir verebilir.
- Tüm konfigürasyonlar için, yapıştırıcı kalınlığı ve yapıştırıcı cinsinin tamir verimliliği açısından önemli olduğu görülmektedir. Yapıştırıcı kalınlığının optimize edilmesi faydalı olacaktır.

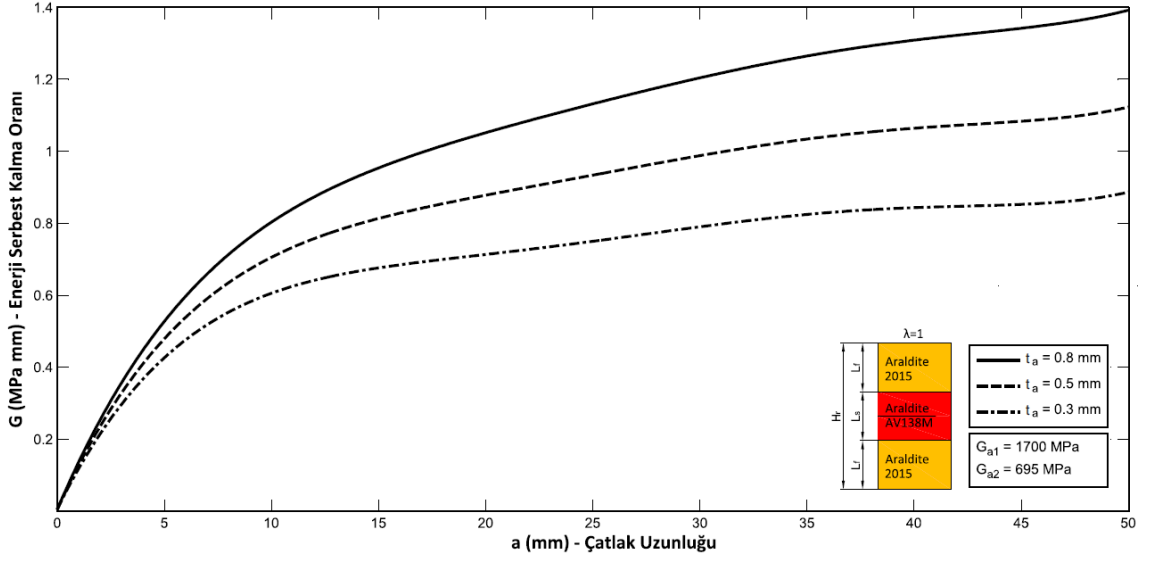
- λ hibrit oranının değiştirilmesinin, her iki konfigürasyonda da kırılma enerjisini çok az etkilediği görölmüştür.
- Kayma gerilmeleri dağılımlarına bakıldığında, farklı kayma modüllerine sahip yapıştırıcıların kullanıldığı birinci konfigürasyonun, daha etkin bir şekilde, kullanılabilir olduğu söylenebilir. Tamir verimliliği açısından incelersek, bu konfigürasyonda kayma gerilmeleri daha düşük mertebelerde olup gerilme dalgalanmaları daha azdır.
- Uygulama açısından birinci konfigürasyonun daha uygun olduğu sonucu çıkarılabilir. Çünkü pratikte, ikinci konfigürasyonda olduğu gibi, farklı kalınlıkta yapıştırıcıların uygun şekilde hibrit uygulamalarda kullanılması zor bir işlemdir.

4.7 Araldite 2015 - Araldite AV138M Hibrit Yapıştırma Modeli

Bu bölümde, seçtiğimiz ticari amaçlı yapıştırıcılar Araldite 2015 ve Araldite AV138M' nin birlikte kullanılarak oluşturulan hibrit yapıştırma modelinde enerji serbest kalma oranı ve yapıştırıcı kayma gerilmeleri incelenecektir. Şematik olarak Şekil 4.1 de gösterilen hibrit yapıştırma modellerinde, yapıştırma çizgisi üzerinde ortadaki yapıştırıcı (yapıştırıcı 1) gevrek Araldite AV138M' dir. Yapıştırma çizgisi uç kısımlarında kullanılan yapıştırıcı (yapıştırıcı 2) ise tok özellikli Araldite 2015 tipi yapıştırıcıdır. Yapıştırıcılara ait mekanik özellikler Çizelge 4.1' de verilmiştir.

4.7.1 Araldite 2015 - Araldite AV138M Hibrit Modelinde Yapıştırma Kalınlıklarının G_f Üzerindeki Etkisi

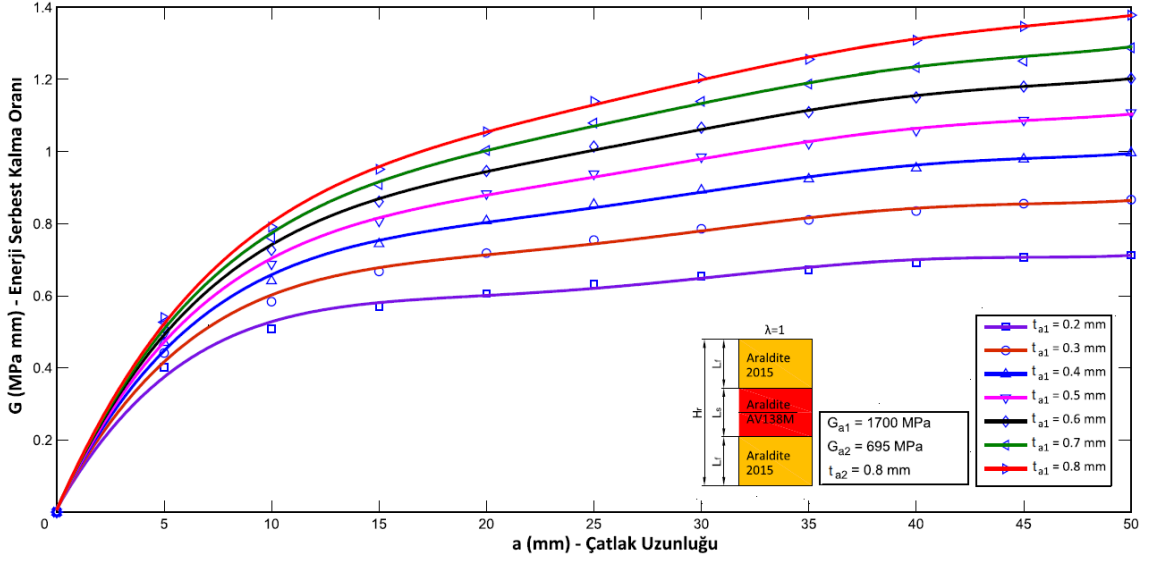
İlk aşamada Araldite 2015 ve Araldite AV138M hibrit modelinde, aynı kalınlıklarda yapıştırıcıların yama üzerine uygulanması ile ilgili sonuçlar incelenmiştir. Tüm yapıştırıcıların kalınlıkları $t_a=0.3, 0.5, 0.8$ mm olacak şekilde üç farklı inceleme yapılmış ve sonuçlar Şekil 4.19' da gösterilmiştir.



Şekil 4.19 Aynı yapıştırıcı kalınlıkları için kırılma enerjisi - çatlak uzunluğu diyagramı (Araldite 2015 ve Araldite AV138M)

Şekil 4.19' a göre 50 mm çatlak uzunluğunda, $t_a=0.3$ mm kalınlığa karşılık kırılma enerjisi $G=0.88$ MPa mm, $t_a=0.5$ mm kalınlığa karşılık kırılma enerjisi $G=1.12$ MPa mm ve $t_a=0.8$ mm kalınlık için $G=1.39$ MPa mm' dir. $t_a=0.3$ mm ve $t_a=0.8$ mm modelleri arasında kırılma enerjisindeki artış %55' dir. 10 mm çatlak uzunluğunda ise $t_a=0.3$ mm kalınlık için $G=0.6$ MPa mm, $t_a=0.5$ mm kalınlık için $G=0.70$ MPa mm olup $t_a=0.8$ mm kalınlık için $G=0.80$ MPa mm' dir. $t_a=0.3$ mm ve $t_a=0.8$ mm modelleri arasında kırılma enerjisindeki artış %33' dür. İncelediğimiz hibrit modelde bu sonuçlara göre, tüm yapıştırıcıların aynı kalınlıkta olması durumunda, kalınlık değişiminin kırılma enerjisini oldukça etkilediğini söyleyebiliriz. 5 mm' nin altındaki çatlak uzunluklarında, incelenen tüm yapıştırıcı kalınlıklarında kırılma enerjisi önemli miktarda azalmaktadır ve değerler birbirlerine oldukça yakındır. Dolayısıyla bu hibrit model için optimum bir yapıştırıcı kalınlığı belirlenebilir.

İkinci aşamada, farklı yapıştırma kalınlıklarının kırılma enerjisi üzerindeki etkileri incelenmiştir. t_{a1} kalınlığı değişken, t_{a2} kalınlığı sabit olarak kabul edilmiştir ve $t_{a2}=0.8$ mm' dir. Sonuçlar Şekil 4.20' de görülmektedir.



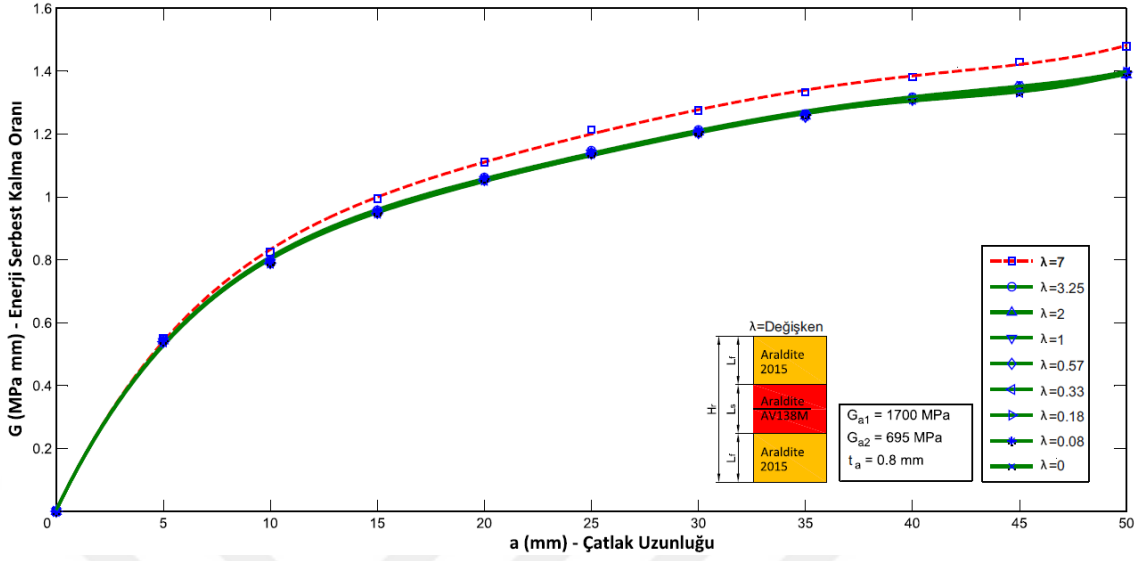
Şekil 4.20 Farklı yapıştırıcı kalınlıkları için kırılma enerjisi - çatlak uzunluğu diyagramı (Araldite 2015 ve Araldite AV138M)

Şekil 4.20' ye göre, 50 mm çatlak uzunluğunda $t_{a1}=0.8$ mm için $G=1.38$ MPa mm olup $t_{a1}=0.2$ mm için $G=0.71$ MPa mm' dir. Yapıştırma çizgisi ortasındaki yapıştırıcı kalınlığını dört kat arttırdığımızda, kırılma enerjisinde yaklaşık iki kat artış görülmektedir. 10 mm çatlak uzunluğunda enerji serbest kalma oranlarını incelersek, $t_{a1}=0.8$ mm ve $t_{a1}=0.2$ mm kalınlıklarına karşılık kırılma enerjileri sırasıyla $G=0.8$ MPa mm ve $G=0.52$ MPa mm' dir. Enerji serbest kalma oranındaki azalma %35' dir. 10 mm çatlak uzunluğunda, t_{a1} kalınlığının 0.5 mm ve üzeri değerleri için kırılma enerjileri birbirlerine oldukça yaklaşmaktadır ve bu nedenle aralarında belirleyici bir fark kalmamaktadır. Bu sebeple kalınlığın optimize edilerek uygun bir seçim yapılması makul görünmektedir. Ayrıca bu modelde, 5 mm ve altındaki çatlak uzunlukları için kalınlık varyasyonunun belirleyici bir özelliği yoktur ve enerji serbest kalma oranı oldukça azalmaktadır. 5 mm' nin altındaki çatlakların tamiri için hibrit modelde kullanılan yapıştırıcıların eşit kalınlıklı olması ya da tamir edilmemesi öngörülebilir.

4.7.2 Araldite 2015 - Araldite AV138M Hibrit Modelinde Farklı λ Değerlerinin G , Üzerindeki Etkisi

Bu bölümde Şekil 4.4' de şematik olarak görülen hibrit modelin, L_s ve L_f uzunluklarının değişimine bağlı olarak, yani λ ' nın farklı değerlerine karşılık enerji serbest kalma oranındaki değişim incelenecektir. İlk olarak, yapıştırıcıların aynı kalınlıkta olduğu

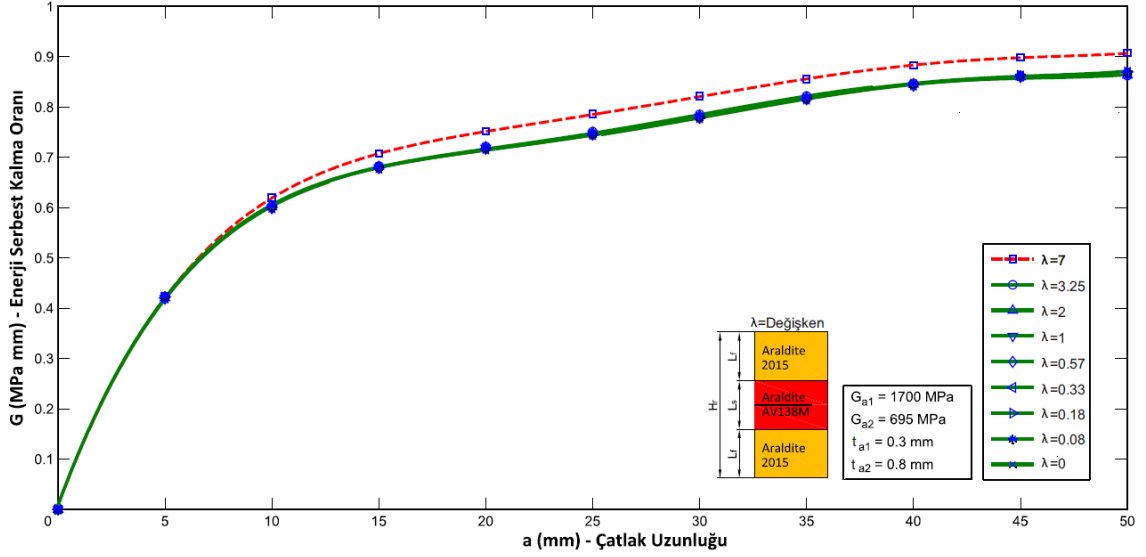
durum incelenmiş ve sonuçlar Şekil 4.21' de gösterilmiştir. Hibrit modelde kullanılan yapıştırıcılarının kalınlıkları $t_a=0.8$ mm' dir.



Şekil 4.21 Aynı kalınlıkta yapıştırıcıların farklı λ değerleri için kırılma enerjisi - çatlak uzunluğu diyagramı (Araldite 2015 ve Araldite AV138M)

Şekil 4.21' e göre λ hibrit oranının değiştirilmesi ile enerji serbest kalma oranında önemli bir değişiklik meydana gelmemektedir. Sadece $\lambda=7$ olduğunda enerji serbest kalma oranında küçük bir değişim gözlemlenmektedir. Şekil 4.21' deki diğer varyasyonlarla karşılaştırıldığında bu değişimin, 10 mm' den büyük çatlak uzunluklarında %6 mertebelerinde olduğu görülebilmektedir. Diğer λ oranları için, kendi aralarında enerji serbest kalma oranları arasındaki fark ihmal edilebilir düzeydedir. Bu nedenle seçtiğimiz hibrit yapıştırıcı modelinde λ oranının değiştirilmesinin enerji serbest kalma oranı üzerinde etkisi olmadığı görülmüştür.

Benzer şekilde, farklı kalınlıklarda yapıştırıcılar kullanılarak oluşturulan hibrit modelin, farklı hibrit oranları için enerji serbest kalma oranındaki değişimi Şekil 4.22' de gösterilmiştir. Yapıştırma çizgisi uçlarındaki yapıştırıcı Araldite 2015' in kalınlıkları $t_{a2}=0.8$ mm' dir.



Şekil 4.22 Farklı kalınlıkta yapıştırıcıların farklı λ değerleri için kırılma enerjisi - çatlak uzunluğu diyagramı (Araldite 2015 ve Araldite AV138M)

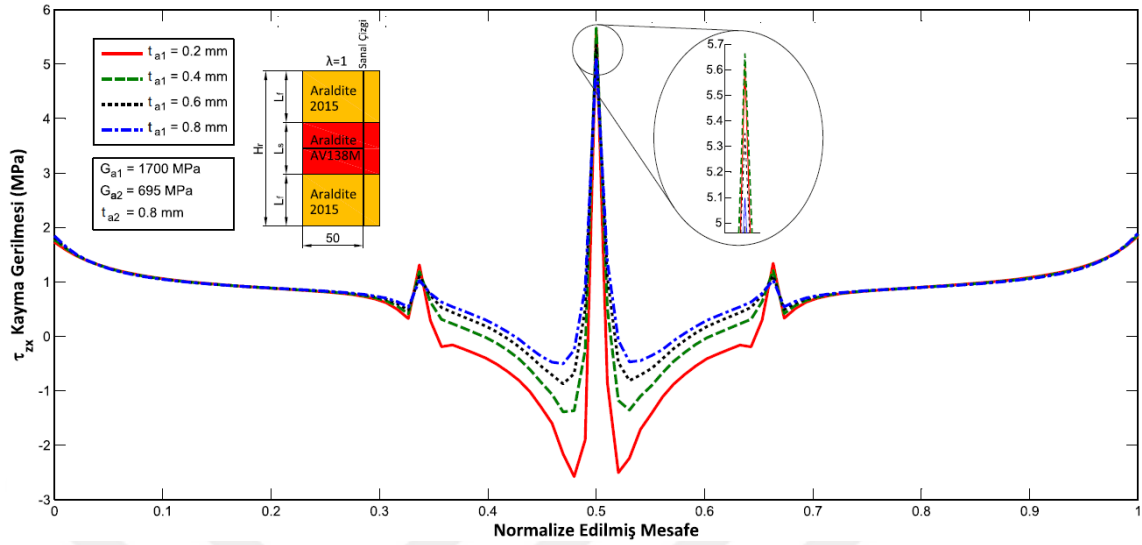
Şekil 4.22' den görüldüğü üzere, burada da $\lambda=7$ hibrit oranı haricinde diğer varyasyonlar kendi içersinde neredeyse aynı enerji serbest kalma oranı değerlerini vermektedir. Aradaki farklar ihmal edilebilir düzeydedir. Yine 10 mm üzerindeki çatlak uzunluklarında, $\lambda=7$ hibrit oranı varyasyonu ile diğer varyasyonlar arasında ki farkın bir önceki incelemede olduğu gibi %6 mertebelerinde olduğu görülmektedir.

Şekil 4.21 ve Şekil 4.22' deki sonuçları karşılaştırdığımızda, λ hibrit oranının, enerji serbest kalma oranına bir etkisi olmadığı görülmüştür. Literatür çalışmasında da benzer bir inceleme yapılmış ve sonuçları Şekil 4.11 ve Şekil 4.13' de gösterilmişti. Burada elde ettiğimiz sonuçlar ve literatür çalışmasında elde edilen sonuçlar benzerdir. Dolayısıyla burada bulduğumuz sonuçlar, λ hibrit oranındaki değişimin enerji serbest kalma oranını değiştirmedeği veya ihmal edilebilir düzeyde değiştirdiği sonucunu desteklemektedir.

4.7.3 Araldite 2015 - Araldite AV138M Hibrit Modeli Yapıştırıcı Bölgesinde Meydana Gelen Kayma Gerilmeleri

Bu bölümde yapıştırıcı kayma gerilmeleri incelenecektir. Bu inceleme, daha önce literatür çalışmalarında da kullanılan ve Şekil 4.14' de gösterilen, 50 mm uzunluğundaki çatlakın tanjantından geçen ve yapıştırma çizgisi boyunca uzanan sanal çizgi boyunca yapılmıştır. Ayrıca, gerilme dağılımlarının farklı λ hibrit oranları için nasıl bir davranış gösterdiği de incelenmiştir.

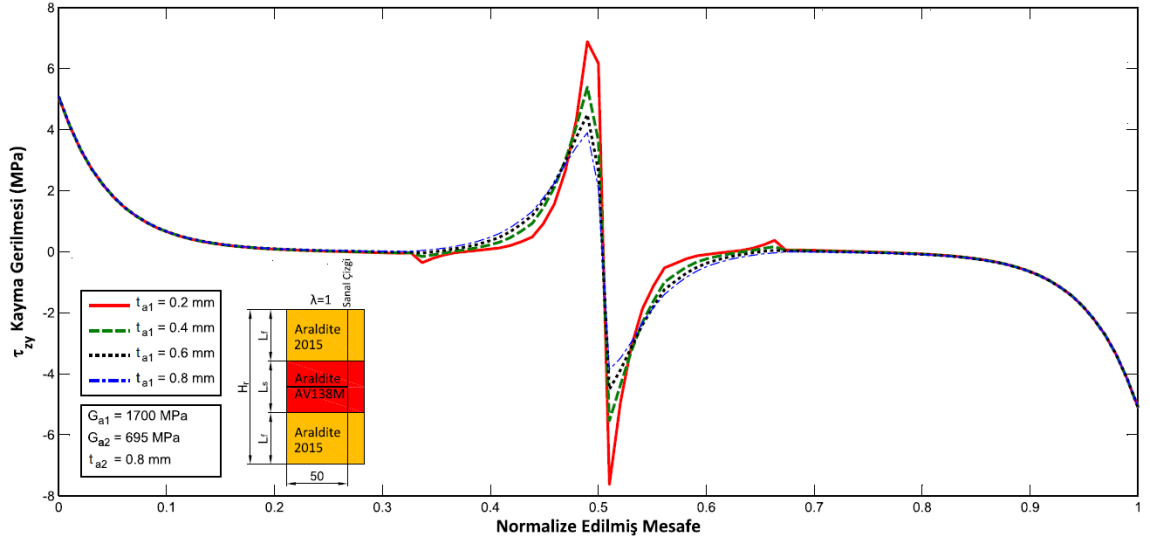
İlk olarak $\lambda=1$ hibrit oranı için τ_{zx} gerilmeleri incelenmiş olup Şekil 4.23' deki grafikten, farklı kalınlıkta yapıştırıcılar kullanılması neticesinde τ_{zx} gerilme dağılımı görülmektedir.



Şekil 4.23 Farklı kalınlıkta yapıştırıcı kullanıldığında $\lambda=1$ için yapıştırıcı bölgesi τ_{zx} kayma gerilmeleri dağılımı (Araldite 2015 ve Araldite AV138M)

Gerilme dağılımlarını incelemek için, $t_{a1}=0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ mm olarak seçilmiştir. $t_{a2}=0.8$ mm ve sabittir. Şekil 4.23' deki tüm kalınlık varyasyonları, $\lambda=1$ için geçerlidir. Maksimum τ_{zx} kayma gerilmeleri çatlak ucunda meydana gelmektedir. Örneğin, $t_{a1}=0.4$ mm iken $\tau_{zx}=5.66$ MPa' dır. $t_{a1}=0.8$ mm (bu değerde, yapıştırma çizgisi boyunca tüm yapıştırıcıların kalınlıkları birbirine eşit ve sabit) olduğunda maksimum kayma gerilmesi $\tau_{zx}=5.1$ MPa' dır. Kayma gerilmesindeki azalma %9.9' dur. Diğer kalınlık varyasyonlarında meydana gelen maksimum τ_{zx} kayma gerilmeleri 5.1 MPa ve 5.66 MPa arasındadır. Yani t_{a1} kalınlığının değişimine bağlı olarak çatlak ucunda meydana gelen τ_{zx} kayma gerilmesinde küçük değişimler meydana gelmektedir. Tüm yapıştırıcı kalınlık değerleri için, yapıştırma çizgisi uç kısımlarında kayma gerilmesi yaklaşık olarak $\tau_{zx}=1.8$ MPa' dır. Hibrit modelde kullanılan yapıştırıcıların birbirlerine geçiş bölgesi olan arayüzeylerinde gerilme dalgalanmaları meydana gelmektedir. Mesafenin 0.33 ve 0.67 olduğu kısımlarda bu dalgalanmalar görülmektedir. t_{a1} kalınlığı azaldıkça dalgalanma artmaktadır.

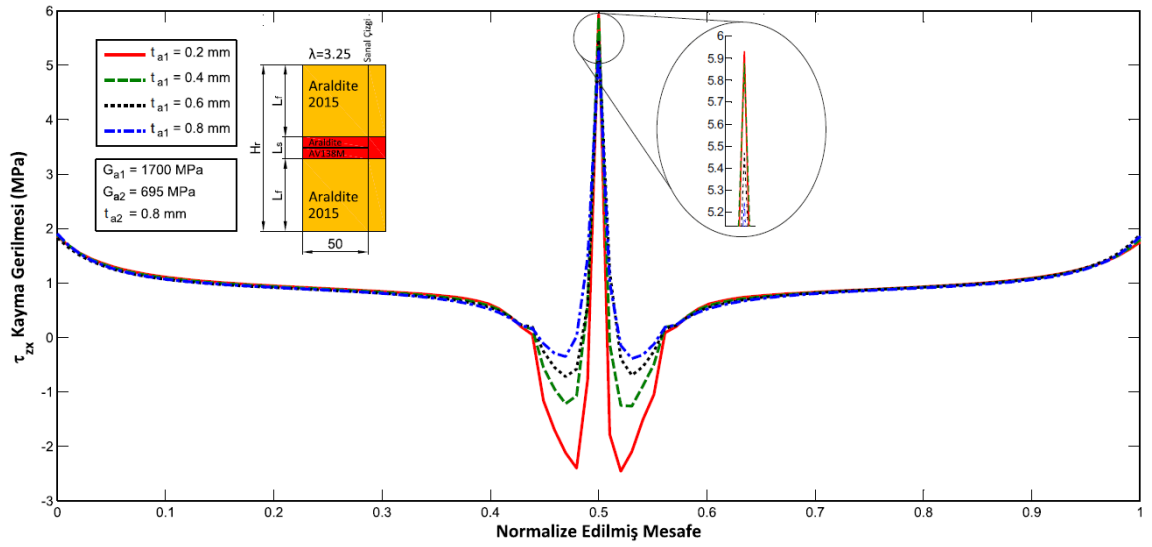
Şekil 4.24' de ise $\lambda=1$ için τ_{zy} kayma gerilmeleri dağılımları görülmektedir.



Şekil 4.24 Farklı kalınlıkta yapıştırıcı kullanıldığında $\lambda=1$ için yapıştırıcı bölgesi τ_{zy} kayma gerilmeleri dağılımı (Araldite 2015 ve Araldite AV138M)

Şekil 4.24' den görüldüğü gibi τ_{zy} kayma gerilmeleri, çatlak ucunda veya yapıştırma çizgisi uç kısımlarında maksimum olabilmektedir. Örneğin, $t_{a1}=0.2$ mm kalınlığı için, maksimum τ_{zy} kayma gerilmesi, $\tau_{zy}=7.63$ MPa olarak çatlak ucunda meydana gelmektedir. Buna karşılık $t_{a1}=0.8$ mm olduğunda (bu değerde, yapıştırma çizgisi boyunca tüm yapıştırıcıların kalınlıkları birbirine eşit ve sabit) çatlak ucunda meydana gelen τ_{zy} kayma gerilmesi, $\tau_{zy}=3.9$ MPa' dır. τ_{zy} kayma gerilmesindeki azalma %48.9' dur. Ayrıca t_{a1} kalınlığından bağımsız olarak, tüm kalınlık varyasyonları için yapıştırma çizgisi uç kısımlarında τ_{zy} kayma gerilmesi yaklaşık olarak $\tau_{zy}=5.1$ MPa' dır. Şekil 4.23 ve Şekil 4.24' ü karşılaştırdığımızda, "x" doğrultusunda meydana gelen yapıştırıcı arayüzey kayma gerilmesi dalgalanmalarının, "y" doğrultusunda meydana gelenlerden daha fazla olduğunu görmekteyiz.

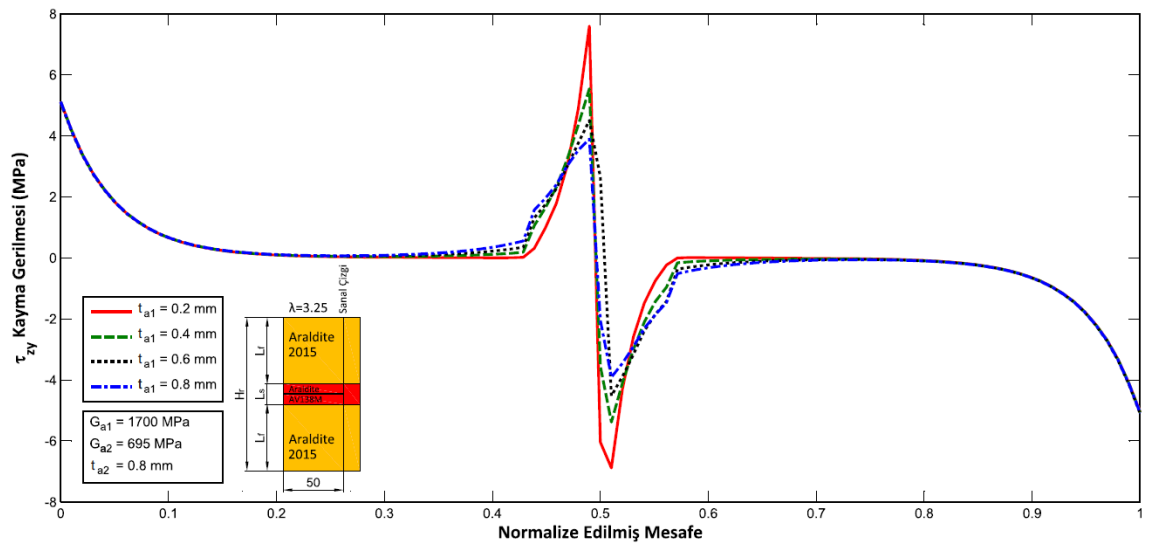
Bir sonraki aşamada, λ hibrit oranının artırılması ile τ_{zx} ve τ_{zy} kayma gerilmeleri dağılımları incelenmiştir. Şekil 4.25' de, $\lambda=3.25$ için τ_{zx} kayma gerilmeleri görülmektedir. λ ' nın birden büyük olması, yapıştırma çizgisi boyunca, esnek yapıştırıcı alanının gevrek yapıştırıcı alanına göre daha fazla olduğu anlamına gelmektedir. Şekil 4.25' de şematik olarak yapıştırıcıların kapladığı alanlar görülmektedir. Görüldüğü gibi $\lambda=3.25$ için, Araldite AV138M gevrek yapıştırıcı ince bir şerit şeklinde uygulanmıştır.



Şekil 4.25 Farklı kalınlıkta yapıştırıcı kullanıldığında $\lambda=3.25$ için yapıştırıcı bölgesi τ_{zx} kayma gerilmeleri dağılımı (Araldite 2015 ve Araldite AV138M)

Şekil 4.25' e göre, t_{a1} kalınlığının 0.2, 0.4, 0.6 ve 0.8 mm varyasyonlarında, çatlak ucunda meydana gelen τ_{zx} kayma gerilmeleri sırasıyla 5.93, 5.88, 5.47 ve 5.25 MPa' dır. Çatlak ucunda meydana gelen τ_{zx} kayma gerilmesinin maksimum ve minimum değerleri sırasıyla $t_{a1}=0.2$ mm kalınlık için $\tau_{zx}=5.93$ MPa ve $t_{a1}=0.8$ mm kalınlık için $\tau_{zx}=5.25$ MPa' dır. Gerilmedeki azalma %11.5' dir. Tüm yapıştırıcı kalınlıkları için, yapıştırma çizgisi uç kısımlarında kayma gerilmesi yaklaşık olarak $\tau_{zx}=1.8$ MPa' dır. λ' 'nin artırılması ile birlikte yapıştırıcıların birbirleriyle olan geçiş noktalarında meydana gelen gerilme dalgalanmaları azalmaktadır.

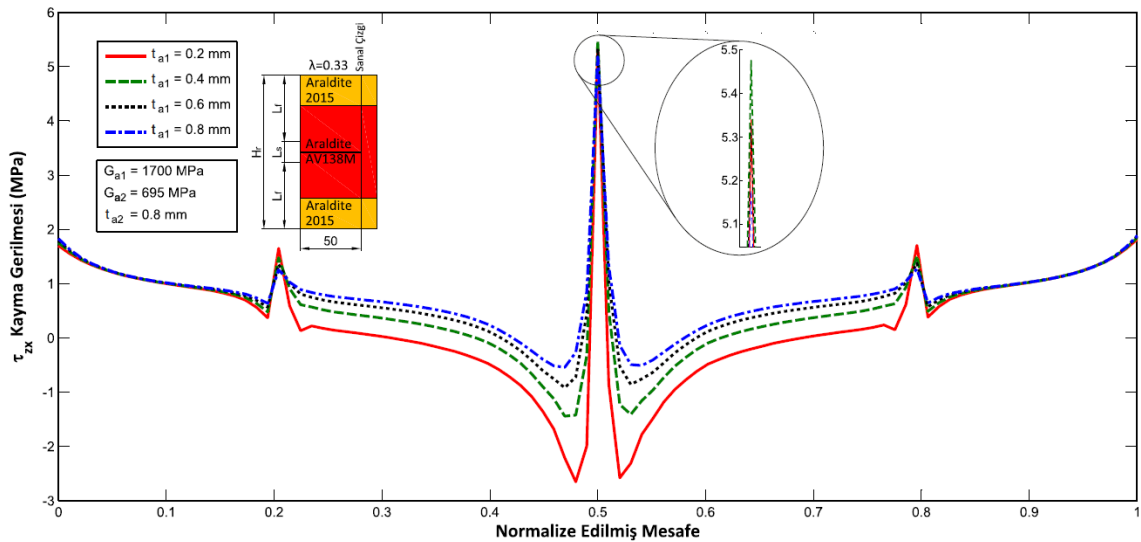
Şekil 4.26' de ise $\lambda=3.25$ için τ_{zy} kayma gerilmeleri dağılımları görülmektedir.



Şekil 4.26 Farklı kalınlıkta yapıştırıcı kullanıldığında $\lambda=3.25$ için yapıştırıcı bölgesi τ_{zy} kayma gerilmeleri dağılımı (Araldite 2015 ve Araldite AV138M)

Şekil 4.26' dan görüldüğü gibi τ_{zy} kayma gerilmeleri, çatlak ucunda veya yapıştırma çizgisi uç kısımlarında maksimum olabilmektedir. Örneğin, $t_{a1}=0.2$ mm kalınlığı için, maksimum τ_{zy} kayma gerilmesi, $\tau_{zy}=7.6$ MPa olarak çatlak ucunda meydana gelmektedir. Buna karşılık $t_{a1}=0.8$ mm olduğunda (bu değerde, yapıştırma çizgisi boyunca tüm yapıştırıcıların kalınlıkları birbirine eşit ve sabit) çatlak ucunda meydana gelen τ_{zy} kayma gerilmesi, $\tau_{zy}=3.9$ MPa' dır. τ_{zy} kayma gerilmesindeki azalma %48.7' dir. Ayrıca t_{a1} kalınlığından bağımsız olarak, tüm kalınlık varyasyonları için yapıştırma çizgisi uç kısımlarında τ_{zy} kayma gerilmesi yaklaşık olarak $\tau_{zy}=5.1$ MPa' dır. λ' nın artırılmasıyla, yapıştırıcı arayüzlerinde gerilme dalgalanmalarının azaldığı ve τ_{zy} kayma gerilmesi dağılımında etkisini kaybettiği görülmektedir.

Araldite 2015 ve Araldite AV138M hibrit yapıştırırmalı model için son olarak, λ' nın azaltılması neticesinde τ_{zx} ve τ_{zy} kayma gerilmeleri dağılımları incelenmiştir. Şekil 4.27' de $\lambda=0.33$ için τ_{zx} kayma gerilmeleri görülmektedir. λ' nın birden küçük olması, yapıştırma çizgisi boyunca, gevrek yapıştırıcı alanının esnek yapıştırıcı alanına göre daha fazla olduğu anlamına gelmektedir. Şekil 4.27' de şematik olarak yapıştırıcıların kapladığı alanlar görülmektedir. Görüldüğü gibi $\lambda=0.33$ için, Araldite 2015 esnek yapıştırıcılar yapıştırma çizgisi uç kısımlarında ince bir şerit şeklinde uygulanmıştır.

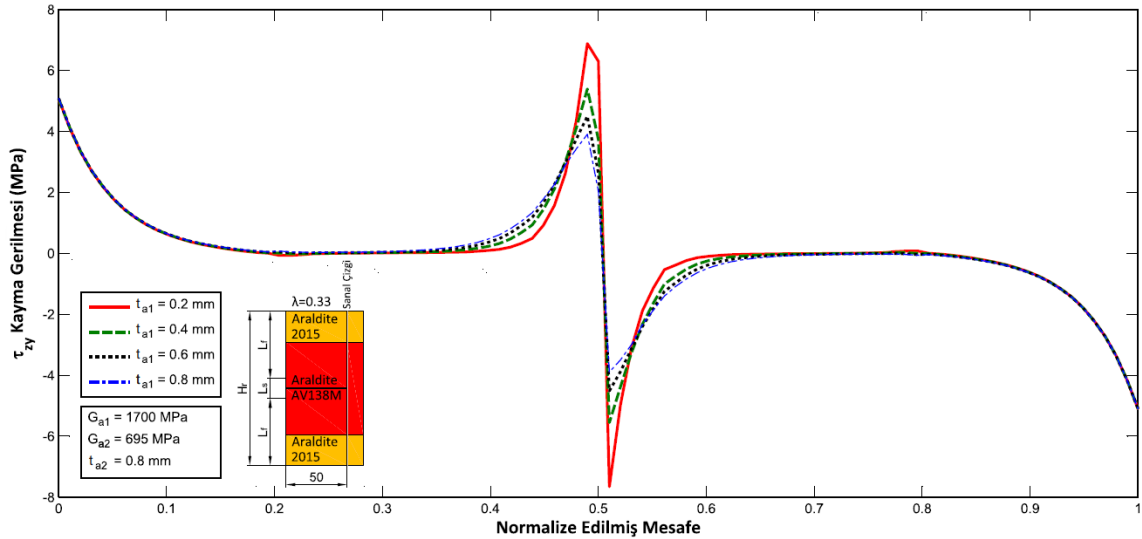


Şekil 4.27 Farklı kalınlıkta yapıştırıcı kullanıldığında $\lambda=0.33$ için yapıştırıcı bölgesi τ_{zx} kayma gerilmeleri dağılımı (Araldite 2015 ve Araldite AV138M)

Şekil 4.27' ye göre, t_{a1} kalınlığının 0.2, 0.4, 0.6 ve 0.8 mm varyasyonlarında, çatlak ucunda meydana gelen τ_{zx} kayma gerilmeleri sırasıyla 5.34, 5.48, 5.33 ve 5.18 MPa' dır. Çatlak ucunda meydana gelen τ_{zx} kayma gerilmesinin maksimum ve minimum değerleri

sırasıyla, $t_{a1}=0.4$ mm kalınlık için $\tau_{zx}=5.48$ MPa ve $t_{a1}=0.8$ mm kalınlık için $\tau_{zx}=5.18$ MPa' dir. Gerilmedeki azalma %5.5' dir. Tüm yapıştırıcı kalınlıkları için yapıştırma çizgisi uç kısımlarında kayma gerilmesi yaklaşık olarak $\tau_{zx}=1.8$ MPa' dir. λ' nın azaltılması ile birlikte, yapıştırıcıların birbirlerine geçiş arayüzlerinde meydana gelen gerilme dalgalanmaları artmıştır.

Şekil 4.28' de $\lambda=0.33$ için τ_{zy} kayma gerilmeleri dağılımları görülmektedir.



Şekil 4.28 Farklı kalınlıkta yapıştırıcı kullanıldığında $\lambda=0.33$ için yapıştırıcı bölgesi τ_{zy} kayma gerilmeleri dağılımı (Araldite 2015 ve Araldite AV138M)

Şekil 4.28' den görüldüğü gibi, τ_{zy} kayma gerilmeleri, çatlak ucunda veya yapıştırma çizgisi uç kısımlarında maksimum olabilmektedir. Örneğin, $t_{a1}=0.2$ mm kalınlığı için, maksimum τ_{zy} kayma gerilmesi, $\tau_{zy}=7.6$ MPa olarak çatlak ucunda meydana gelmektedir. Buna karşılık $t_{a1}=0.8$ mm olduğunda (bu değerde, yapıştırma çizgisi boyunca tüm yapıştırıcıların kalınlıkları birbirine eşit ve sabit) çatlak ucunda meydana gelen τ_{zy} kayma gerilmesi, $\tau_{zy}=3.9$ MPa' dır. τ_{zy} kayma gerilmesindeki azalma %48.7' dir. Ayrıca t_{a1} kalınlığından bağımsız olarak, tüm kalınlık varyasyonları için yapıştırma çizgisi uç kısımlarında τ_{zy} kayma gerilmesi yaklaşık olarak $\tau_{zy}=5.1$ MPa' dır.

Araldite 2015 ve Araldite AV138M hibrit yapıştırıcı modelin kısa bir analizini yapacak olursak, çatlak ucunda, bazı yapıştırıcı kalınlıklarında τ_{zx} kayma gerilmeleri bazılarında ise τ_{zy} kayma gerilmeleri maksimum olabilmektedir. Yapıştırma çizgisi uç kısımlarında ise gerilmeler sabittir ve τ_{zy} kayma gerilmeleri daha büyüktür. Hibrit yapıştırıcı model arayüz geçiş bölgelerinde gerilme dalgalanmaları, "x" doğrultusundaki τ_{zx} kayma

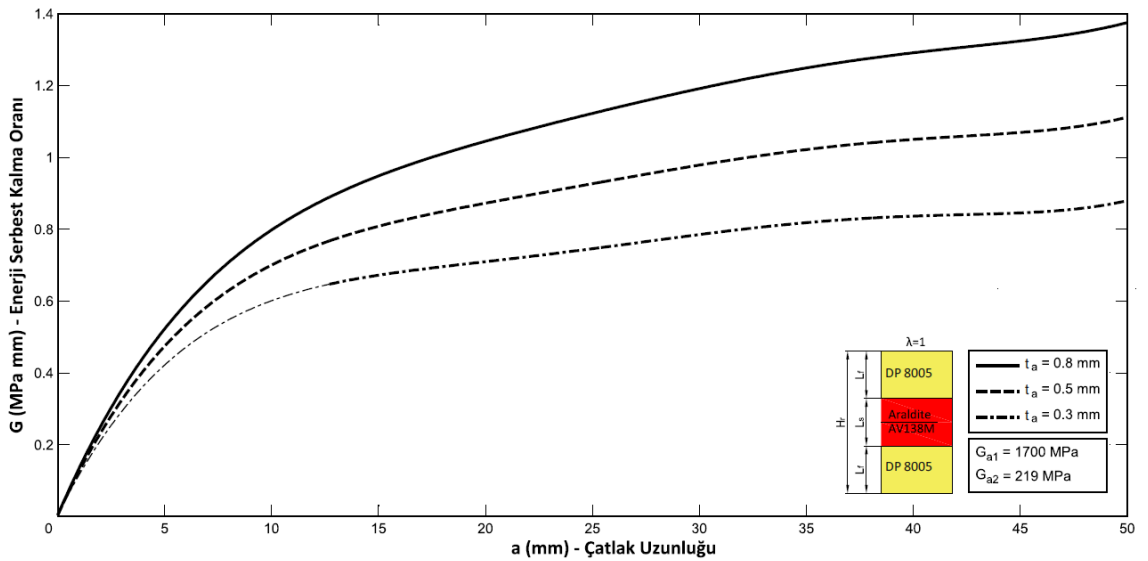
gerilmelerinde oldukça belirgin bir şekilde gözlemlenirken, "y" doğrultusundaki τ_{zy} kayma gerilmelerinde daha küçük mertebelerdedir. τ_{zy} kayma gerilmelerinin bu geçişten çok fazla etkilenmediği görülmüştür.

4.8 DP 8005 - Araldite AV138M Hibrit Yapıştırma Modeli

Bu bölümde, seçtiğimiz ticari amaçlı yapıştırıcılar DP 8005 ve Araldite AV138M' nin birlikte kullanılmasıyla oluşturulan hibrit yapıştırırmalı modelde, enerji serbest kalma oranı ve yapıştırıcı kayma gerilmeleri incelenecektir. Şematik olarak Şekil 4.1 de gösterilen ikinci hibrit yapıştırma modelinde, yapıştırma çizgisi üzerinde, ortadaki yapıştırıcı (yapıştırıcı 1) gevrek Araldite AV138M' dir. Yapıştırma çizgisi uç kısımlarında kullanılan yapıştırıcı (yapıştırıcı 2) ise sünek DP 8005' dir. Yapıştırıcılara ait mekanik özellikler Çizelge 4.1' de verilmiştir.

4.8.1 DP 8005 - Araldite AV138M Hibrit Modelinde Yapıştırma Kalınlıklarının G_I Üzerindeki Etkisi

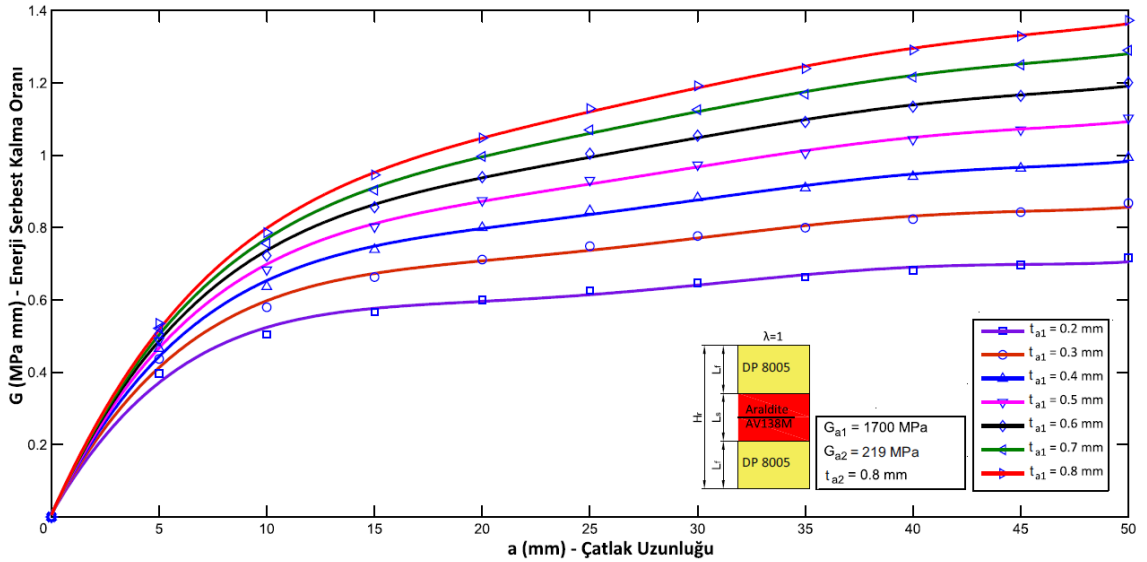
İlk olarak DP 8005 - Araldite AV138M hibrit modelinde, aynı kalınlıklarda yapıştırıcıların kullanılması ile enerji serbest kalma oranı incelenmiştir. Tüm yapıştırıcı kalınlıkları $t_a=0.3, 0.5, 0.8$ mm olacak şekilde üç farklı inceleme yapılmıştır. Sonuçlar Şekil 4.29' da görülmektedir.



Şekil 4.29 Aynı yapıştırıcı kalınlıkları için kırılma enerjisi - çatlak uzunluğu diyagramı (DP 8005 ve Araldite AV138M)

Şekil 4.29' a göre 50 mm çatlak uzunluğunda, $t_a=0.3$ mm kalınlığa karşılık kırılma enerjisi $G=0.88$ MPa mm, $t_a=0.5$ mm kalınlığa karşılık kırılma enerjisi $G=1.11$ MPa mm ve $t_a=0.8$ mm kalınlık için $G=1.38$ MPa mm' dir. $t_a=0.3$ mm ve $t_a=0.8$ mm modelleri arasında kırılma enerjisindeki artış %57' dir. 10 mm çatlak uzunluğunda ise $t_a=0.3$ mm kalınlık için $G=0.6$ MPa mm, $t_a=0.5$ mm kalınlık için $G=0.7$ MPa mm ve $t_a=0.8$ mm kalınlık için $G=0.8$ MPa mm' dir. $t_a=0.3$ mm ve $t_a=0.8$ mm modelleri arasında kırılma enerjisindeki artış %33' dür. 5 mm' nin altındaki çatlak uzunluklarında, incelenen tüm yapıştırıcı kalınlıklarında kırılma enerjisi önemli miktarda azalmaktadır ve değerler birbirlerine oldukça yakındır. Dolayısıyla incelediğimiz hibrit model için optimum bir yapıştırıcı kalınlığı belirlenebilir. Burada elde ettiğimiz sonuçlar, bir önceki hibrit model Araldite 2015 - Araldite AV138M için çizdirilen ve Şekil 4.19' da görülen enerji serbest kalma oranı - çatlak uzunluğu grafiği ile büyük oranda aynıdır. Bu durumun sebebi, yapıştırma çizgisi ortasında bulunan ve çatlak üzerinde kullanılan yapıştırıcının (Araldite AV138M), her iki hibrit modelde de aynı olmasıdır. Sonuç olarak incelediğimiz model hibrit yapıştırırmalı bir model olsa bile, enerji serbest kalma oranı, doğrudan yapıştırma çizgisi ortasındaki, çatlak üzerine gelen bölgede kullanılan yapıştırıcı tipi ile ilgilidir.

İkinci aşamada, ikinci hibrit model için farklı yapıştırma kalınlıklarının kırılma enerjisi üzerindeki etkileri incelenmiştir. t_{a1} kalınlığı değişken, t_{a2} kalınlığı sabit olarak kabul edilmiştir ve $t_{a2}=0.8$ mm' dir. Sonuçlar Şekil 4.30' da görülmektedir.

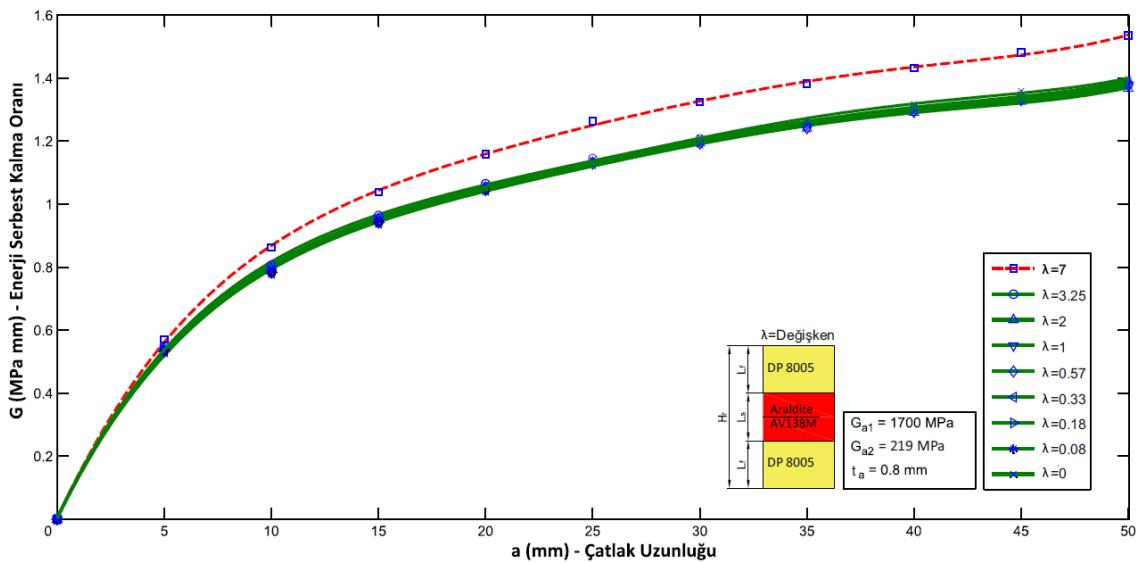


Şekil 4.30 Farklı yapıştırıcı kalınlıkları için kırılma enerjisi - çatlak uzunluğu diyagramı (DP 8005 ve Araldite AV138M)

Şekil 4.30' a göre, 50 mm çatlak uzunluğunda $t_{a1}=0.8$ mm için $G=1.38$ MPa mm ve $t_{a1}=0.2$ mm için $G=0.71$ MPa mm' dir. Yapıştırma çizgisi ortasındaki Araldite AV138M yapıştırıcı kalınlığını dört kat arttırdığımızda, kırılma enerjisinde iki kat artma görülmektedir. 10 mm çatlak uzunluğunda enerji serbest kalma oranlarını incelersek, $t_{a1}=0.8$ mm ve $t_{a1}=0.2$ mm kalınlıklarına karşılık kırılma enerjileri sırasıyla, $G=0.8$ MPa mm ve $G=0.53$ MPa mm' dir. Enerji serbest kalma oranındaki azalma %34' dür. 10 mm çatlak uzunluğunda, t_{a1} kalınlığının 0.5 mm ve üzeri değerleri için kırılma enerjisi değerleri birbirlerine oldukça yaklaşmaktadır ve bu nedenle aralarında belirleyici bir fark kalmamaktadır. Dolayısıyla kalınlığın optimize edilerek uygun bir seçim yapılması makul görünmektedir. Ayrıca bu modelde, 5 mm ve altındaki çatlak uzunlukları için kalınlık varyasyonunun fazla bir belirleyici özelliği yoktur ve enerji serbest kalma oranı azalmaktadır. 5 mm' nin altındaki çatlakların tamiri için hibrit modelde kullanılan yapıştırıcıların eşit kalınlıklı olması öngörülebilir. Şekil 4.30' da elde ettiğimiz sonuçlar, bir önceki hibrit model Araldite 2015 - Araldite AV138M için çizdirilen ve Şekil 4.20' de görülen enerji serbest kalma oranı - çatlak uzunluğu grafiğinde elde ettiğimiz davranışlar ile birbirlerine benzerlik göstermektedir.

4.8.2 DP 8005 - Araldite AV138M Hibrit Modelinde Farklı λ Değerlerinin G_c Üzerindeki Etkisi

Bu bölümde Şekil 4.4' de şematik olarak görülen hibrit modelin, L_s ve L_f uzunluklarının değişimine göre, yani λ ' nın farklı değerlerine karşılık enerji serbest kalma oranındaki değişim çatlak uzunluğuna bağlı olarak incelenmiştir. İlk olarak, yapıştırıcıların aynı kalınlıkta olduğu durum incelenmiş ve sonuçlar Şekil 4.31' de gösterilmiştir. Hibrit modelde kullanılan yapıştırıcılarının kalınlıkları $t_a=0.8$ mm' dir.

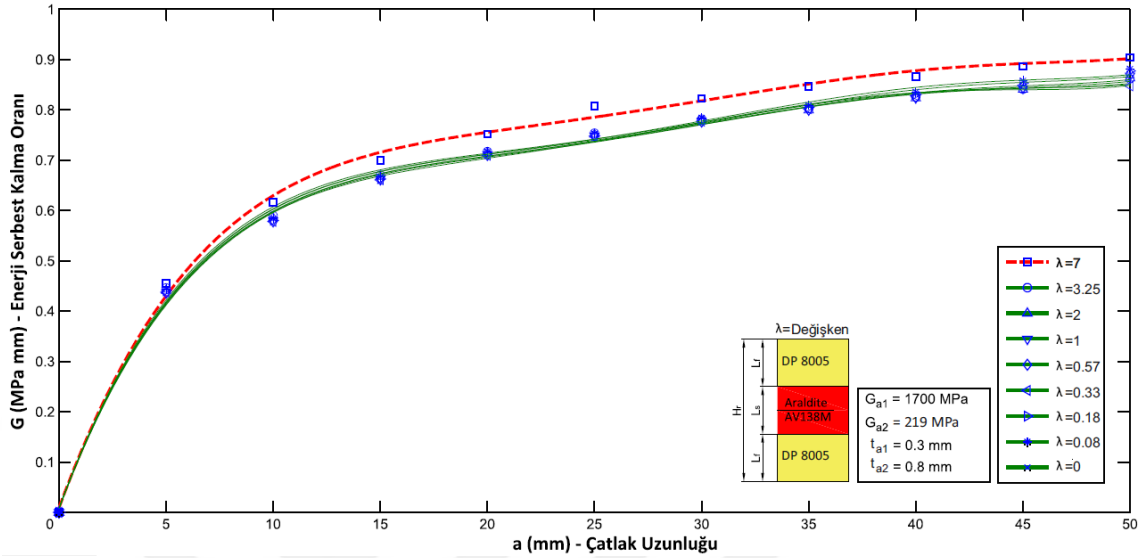


Şekil 4.31 Aynı kalınlıkta yapıştırıcıların farklı λ değerleri için kırılma enerjisi - çatlak uzunluğu diyagramı (Araldite 2015 ve Araldite AV138M)

Şekil 4.31' e göre λ hibrit oranının değiştirilmesi ile enerji serbest kalma oranında önemli bir değişiklik meydana gelmemektedir. Sadece $\lambda=7$ olduğunda, enerji serbest kalma oranında küçük bir değişim gözlemlenmektedir. Şekil 4.31' de, λ hibrit oranının $\lambda=7$ varyasyonu ile diğerleri karşılaştırıldığında, bu değişimin, 10 mm' den büyük çatlak uzunluklarında %6 mertebelerinde olduğu görülmektedir. Diğer λ hibrit oranları için, kendi aralarında enerji serbest kalma oranları arasındaki fark ihmal edilebilir düzeydedir. Bu nedenle, hibrit modeli oluşturan tüm yapıştırıcıların kalınlıklarını aynı kabul ettiğimizde, incelediğimiz hibrit model için λ hibrit oranının değiştirilmesinin enerji serbest kalma oranı üzerinde fazla etkisi olmadığını söyleyebiliriz.

Benzer şekilde, DP 8005 - Araldite AV138M hibrit modelinde, farklı yapıştırıcı kalınlıkları kullanılması durumunda, enerji serbest kalma oranlarındaki değişim Şekil 4.32' de

gösterilmiştir. Yapıştırma çizgisi ortasındaki Araldite AV138M' nin kalınlığı $t_{a1}=0.3$ mm' dir. Yapıştırma çizgisi uçlarındaki diğer yapıştırıcılar DP 8005' in kalınlıkları ise $t_{a2}=0.8$ mm' dir.



Şekil 4.32 Farklı kalınlıkta yapıştırıcıların farklı λ değerleri için kırılma enerjisi - çatlak uzunluğu diyagramı (DP 8005 ve Araldite AV138M)

Şekil 4.32' den görüldüğü üzere, burada da $\lambda=7$ hibrit oranı haricinde diğer varyasyonlar kendi içersinde neredeyse aynı enerji serbest kalma oranı değerlerini vermektedir. Aradaki farklar ihmal edilebilir düzeydedir. 10 mm üzerindeki çatlak uzunluklarında, $\lambda=7$ varyasyonu ile diğer varyasyonlar arasında ki fark, bir önceki incelemede olduğu gibi %6 mertebelerindedir.

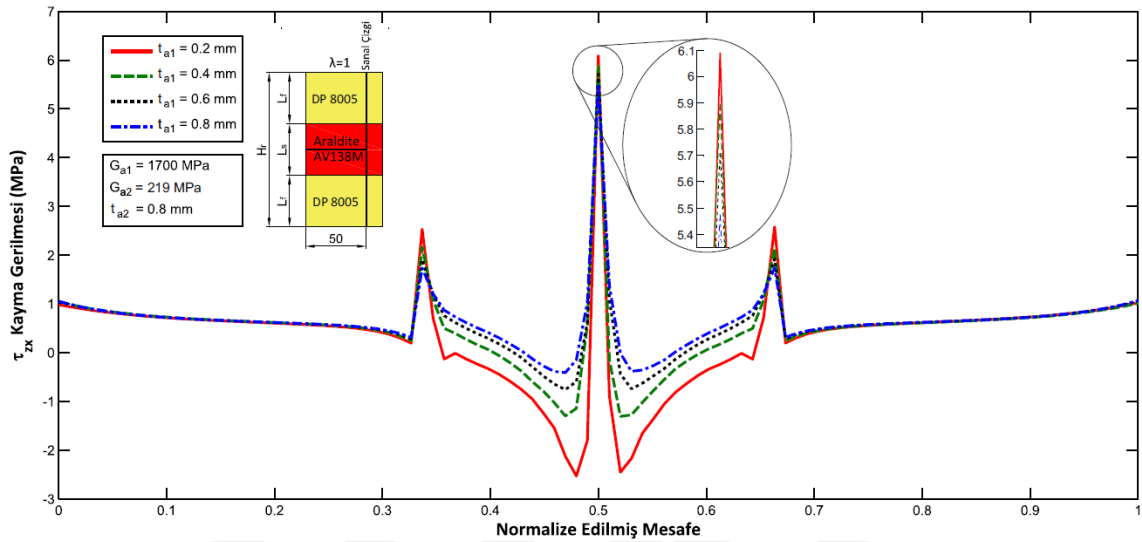
Şekil 4.31 ve Şekil 4.32' deki sonuçları karşılaştırdığımızda, λ değerinin, enerji serbest kalma oranına fazla etkisi olmadığı görülmüştür. Literatür çalışmasında da benzer bir inceleme yapılmış ve sonuçları Şekil 4.11 ve Şekil 4.13' de gösterilmiştir. Burada elde ettiğimiz sonuçlar ve literatür çalışmasında elde edilen sonuçlar benzerdir. Dolayısıyla burada bulduğumuz sonuçlar, λ değerindeki değişimin enerji serbest kalma oranını değiştirmedeği veya ihmal edilebilir düzeyde değiştirdiği sonucunu desteklemektedir.

4.8.3 DP 8005 - Araldite AV138M Hibrit Modeli Yapıştırıcı Bölgesinde Meydana Gelen Kayma Gerilmeleri

Bu bölümde DP 8005 - Araldite AV138M hibrit modeli için yapıştırıcı kayma gerilmeleri incelenmiştir. Bu inceleme, daha önce literatür çalışmalarında da kullanılan ve Şekil

4.14' de gösterilen, 50 mm uzunluğundaki çatlakın tanjantından geçen ve yapıştırma çizgisi boyunca uzanan sanal bir çizgi boyunca yapılmıştır. Ayrıca, gerilme dağılımlarının farklı λ değerleri için nasıl bir davranış gösterdiği de incelenmiştir.

İlk olarak $\lambda=1$ hibrit oranı için τ_{zx} gerilmeleri incelenmiştir. Şekil 4.33' deki grafikten, farklı kalınlıkta yapıştırıcılar kullanılması neticesinde τ_{zx} gerilme dağılımı görülmektedir.

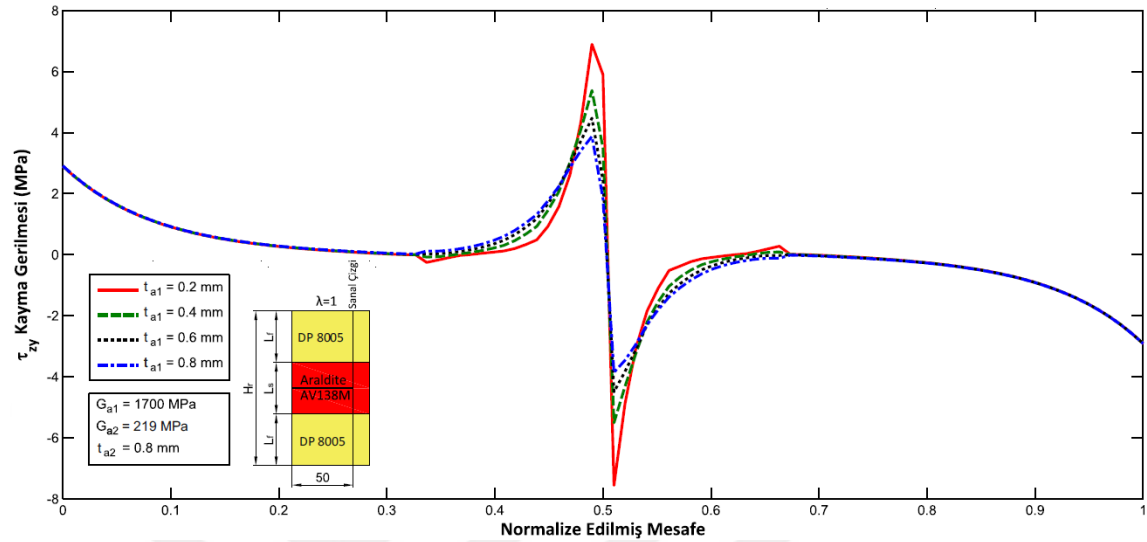


Şekil 4.33 Farklı kalınlıkta yapıştırıcı kullanıldığında $\lambda=1$ için yapıştırıcı bölgesi τ_{zx} kayma gerilmeleri dağılımı (DP 8005 ve Araldite AV138M)

Gerilme dağılımlarını incelemek için, $t_{a1}=0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ mm olarak seçilmiştir. $t_{a2}=0.8$ mm ve sabittir. Şekil 4.33' deki tüm kalınlık varyasyonları, $\lambda=1$ için geçerlidir. Maksimum τ_{zx} kayma gerilmeleri çatlak ucunda meydana gelmektedir. Örneğin, $t_{a1}=0.2$ mm iken $\tau_{zx}=6.08$ MPa' dır. $t_{a1}=0.8$ mm (bu değerde, yapıştırma çizgisi boyunca tüm yapıştırıcıların kalınlıkları birbirine eşit ve sabit) olduğunda maksimum kayma gerilmesi $\tau_{zx}=5.47$ MPa' dır. Kayma gerilmesindeki azalma %11.2' dir. Diğer kalınlık varyasyonlarında meydana gelen maksimum τ_{zx} kayma gerilmeleri 6.08 MPa ve 5.47 MPa arasındadır. Yani t_{a1} kalınlığının değişimine bağlı olarak çatlak ucunda meydana gelen τ_{zx} kayma gerilmesinde küçük değişimler meydana gelmektedir. Tüm yapıştırıcı kalınlık değerleri için, yapıştırma çizgisi uç kısımlarında kayma gerilmesi yaklaşık olarak $\tau_{zx}=1$ MPa' dır. Hibrit modelde kullanılan yapıştırıcıların birbirlerine geçiş bölgesi olan arayüzeylerinde gerilme dalgalanmaları meydana gelmektedir. Mesafenin 0.33 ve 0.67 olduğu kısımda bu dalgalanmalar görülmektedir. t_{a1} kalınlığı azaldıkça dalgalanma artmaktadır. Araldite 2015 - Araldite AV138M hibrit modeli ile karşılaştırdığımızda,

arayüzey gerilme dalgalanmaları, bu bölümde incelediğimiz DP 8005 - Araldite AV138M hibrit modelinde daha fazladır.

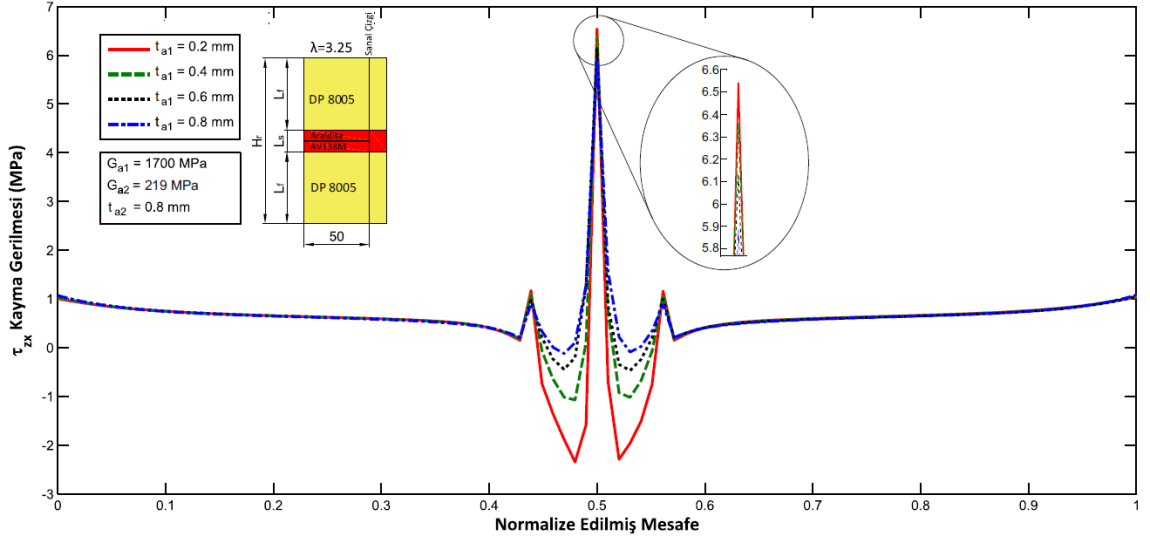
Şekil 4.34' de ise $\lambda=1$ için τ_{zy} kayma gerilmeleri dağılımları görülmektedir.



Şekil 4.34 Farklı kalınlıkta yapıştırıcı kullanıldığında $\lambda=1$ için yapıştırıcı bölgesi τ_{zy} kayma gerilmeleri dağılımı (DP 8005 ve Araldite AV138M)

Şekil 4.34' den görüldüğü gibi τ_{zy} kayma gerilmeleri, çatlak ucunda maksimum olmaktadır. Örneğin, $t_{a1}=0.2$ mm için, maksimum τ_{zy} kayma gerilmesi, $\tau_{zy}=7.56$ MPa olarak çatlak ucunda meydana gelmektedir. Buna karşılık $t_{a1}=0.8$ mm olduğunda (bu değerde, yapıştırma çizgisi boyunca tüm yapıştırıcıların kalınlıkları birbirine eşit ve sabit) çatlak ucunda meydana gelen τ_{zy} kayma gerilmesi, $\tau_{zy}=3.9$ MPa' dır. τ_{zy} kayma gerilmesindeki azalma %48.4' dür. Ayrıca t_{a1} kalınlığından bağımsız olarak, tüm kalınlık varyasyonları için yapıştırma çizgisi uç kısımlarında τ_{zy} kayma gerilmesi yaklaşık olarak $\tau_{zy}=2.9$ MPa' dır. Şekil 4.33 ve Şekil 4.34' ü karşılaştırdığımızda, "x" doğrultusunda meydana gelen yapıştırıcı arayüzey kayma gerilmesi dalgalanmalarının, "y" doğrultusunda meydana gelenlerden çok daha fazla olduğunu görmekteyiz.

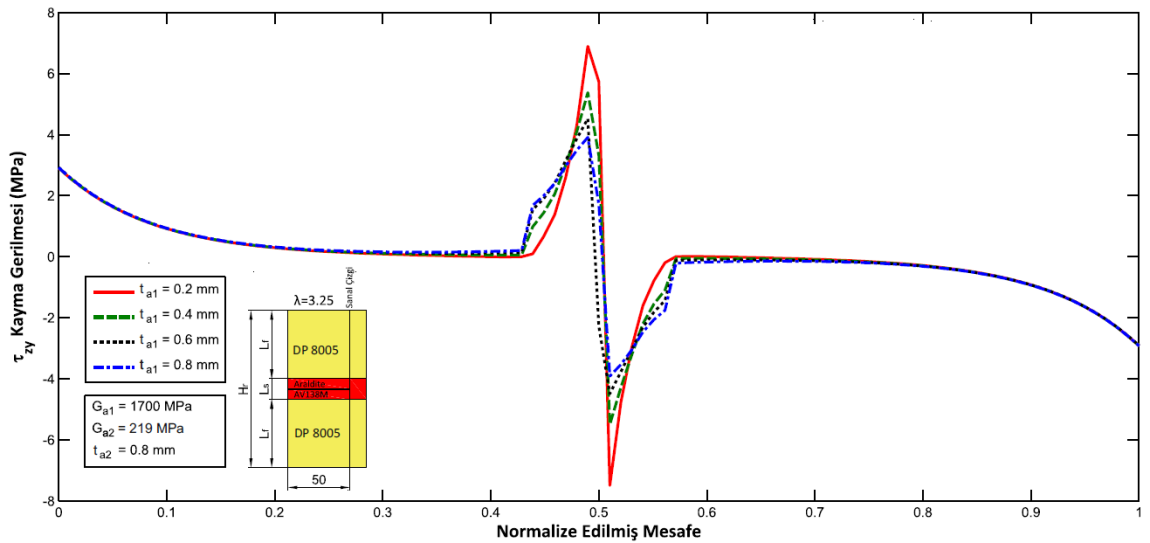
Bir sonraki aşama olarak λ değerinin artırılması ile τ_{zx} ve τ_{zy} kayma gerilmeleri dağılımları incelenmiştir. Şekil 4.35' de $\lambda=3.25$ için τ_{zx} kayma gerilmeleri görülmektedir. λ ' nın birden büyük olması, yapıştırma çizgisi boyunca, esnek yapıştırıcı alanının gevrek yapıştırıcı alanına göre daha fazla olduğu anlamına gelmektedir. Şekil 4.35' de, şematik olarak yapıştırıcıların kapladığı alanlar gösterilmiştir. Görüldüğü gibi $\lambda=3.25$ için, Araldite AV138M gevrek yapıştırıcı ince bir şerit şeklinde uygulanmıştır.



Şekil 4.35 Farklı kalınlıkta yapıştırıcı kullanıldığında $\lambda=3.25$ için yapıştırıcı bölgesi τ_{zx} kayma gerilmeleri dağılımı (DP 8005 ve Araldite AV138M)

Şekil 4.35' e göre, t_{a1} kalınlığının 0.2, 0.4, 0.6 ve 0.8 mm varyasyonlarında, çatlak ucunda meydana gelen τ_{zx} kayma gerilmeleri sırasıyla, 6.54, 6.35, 6.13 ve 5.88 MPa' dır. Çatlak ucunda meydana gelen τ_{zx} kayma gerilmesinin maksimum ve minimum değerleri sırasıyla $t_{a1}=0.2$ mm kalınlık için $\tau_{zx}=6.54$ MPa ve $t_{a1}=0.8$ mm kalınlık için $\tau_{zx}=5.88$ MPa' dır. Gerilmedeki azalma %10.1' dir. Tüm yapıştırıcı kalınlıkları için, yapıştırma çizgisi uç kısımlarında kayma gerilmesi yaklaşık olarak $\tau_{zx}=1$ MPa' dır. λ ' nın artırılması ile birlikte yapıştırıcıların birbirleriyle olan geçiş noktalarında meydana gelen gerilme dalgalanmaları azalmaktadır.

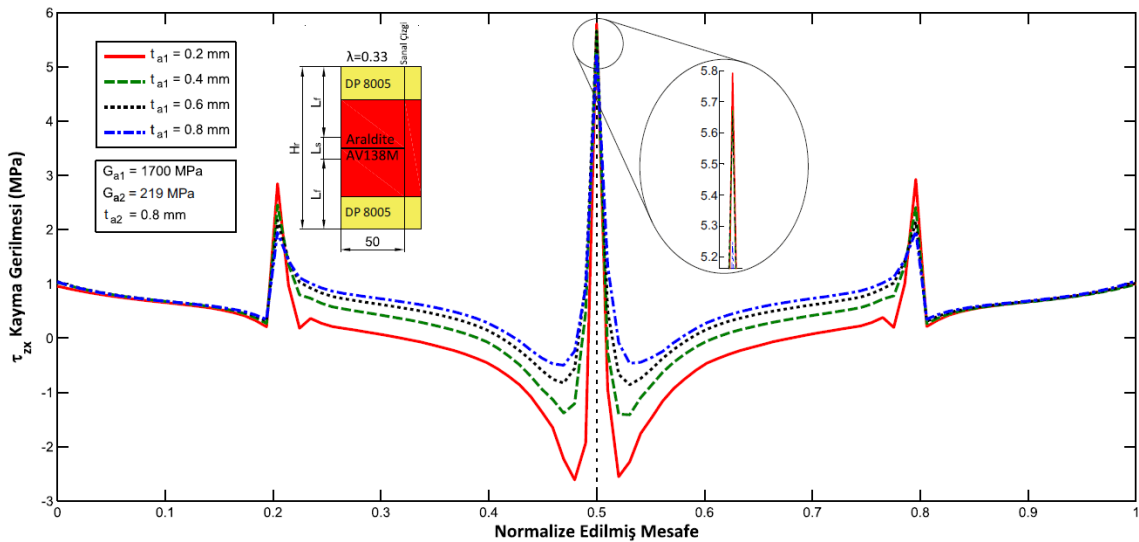
Şekil 4.36' de ise $\lambda=3.25$ için τ_{zy} kayma gerilmeleri dağılımları görülmektedir.



Şekil 4.36 Farklı kalınlıkta yapıştırıcı kullanıldığında $\lambda=3.25$ için yapıştırıcı bölgesi τ_{zy} kayma gerilmeleri dağılımı (DP 8005 ve Araldite AV138M)

Şekil 4.36' dan görüldüğü gibi τ_{zy} kayma gerilmeleri, çatlak ucunda maksimum olmaktadır. Örneğin, $t_{a1}=0.2$ mm kalınlığı için, maksimum τ_{zy} kayma gerilmesi, $\tau_{zy}=7.49$ MPa olarak çatlak ucunda meydana gelmektedir. Buna karşılık $t_{a1}=0.8$ mm olduğunda (bu değerde, yapıştırma çizgisi boyunca tüm yapıştırıcıların kalınlıkları birbirine eşit ve sabit) çatlak ucunda meydana gelen τ_{zy} kayma gerilmesi, $\tau_{zy}=3.9$ MPa' dır. τ_{zy} kayma gerilmesindeki azalma %47.9' dur. Ayrıca t_{a1} kalınlığından bağımsız olarak, tüm kalınlık varyasyonları için yapıştırma çizgisi uç kısımlarında τ_{zy} kayma gerilmesi yaklaşık olarak $\tau_{zy}=2.9$ MPa' dır. λ' nin artırılması neticesinde, yapıştırıcı arayüzeylerinde gerilme dalgalanmalarının azaldığı ve τ_{zy} kayma gerilmesi dağılımında etkisini kaybettiği görülmektedir.

DP 8005 ve Araldite AV138M hibrit yapıştırırmalı model için son olarak, λ' nin azaltılması neticesinde τ_{zx} ve τ_{zy} kayma gerilmeleri dağılımları incelenmiştir. Şekil 4.37' de $\lambda=0.33$ için τ_{zx} kayma gerilmeleri görülmektedir. λ' nin birden küçük olması, yapıştırma çizgisi boyunca, gevrek yapıştırıcı alanının esnek yapıştırıcı alanına göre daha fazla olduğu anlamına gelmektedir. Şekil 4.37' de şematik olarak yapıştırıcıların kapladığı alanlar gösterilmiştir. Görüldüğü gibi $\lambda=0.33$ için, DP 8005 tok yapıştırıcılar, yapıştırma çizgisi uç kısımlarında ince bir şerit şeklinde uygulanmıştır.

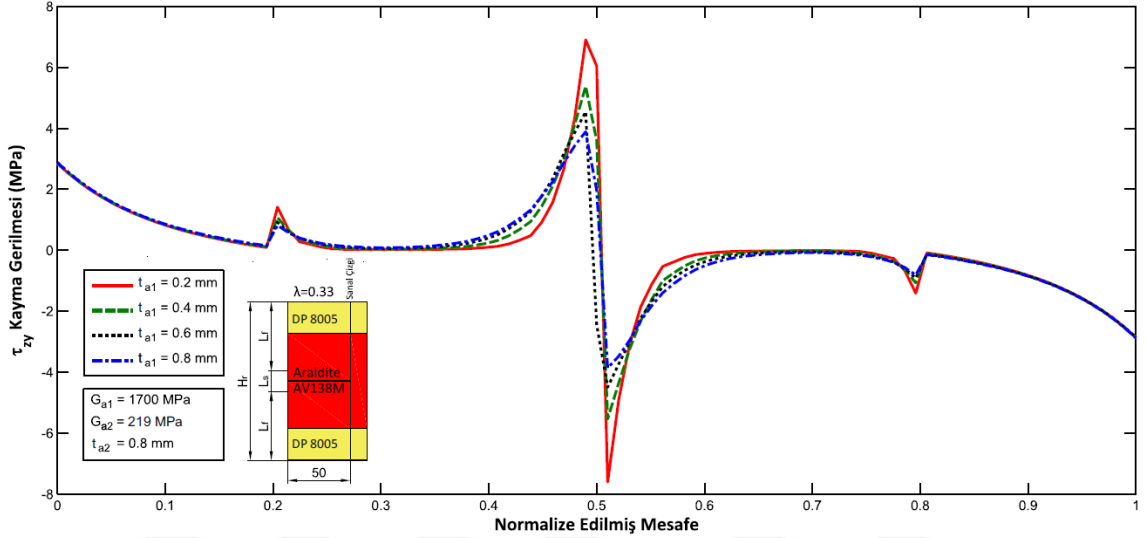


Şekil 4.37 Farklı kalınlıkta yapıştırıcı kullanıldığında $\lambda=0.33$ için yapıştırıcı bölgesi τ_{zx} kayma gerilmeleri dağılımı (DP 8005 ve Araldite AV138M)

Şekil 4.37' ye göre, t_{a1} kalınlığının 0.2, 0.4, 0.6 ve 0.8 mm varyasyonlarında, çatlak ucunda meydana gelen τ_{zx} kayma gerilmeleri sırasıyla, 5.79, 5.67, 5.65 ve 5.25 MPa' dır. Çatlak ucunda meydana gelen τ_{zx} kayma gerilmesinin maksimum ve minimum değerleri

sırasıyla, $t_{a1}=0.2$ mm kalınlık için $\tau_{zx}=5.79$ MPa ve $t_{a1}=0.8$ mm kalınlık için $\tau_{zx}=5.25$ MPa' dır. Gerilmedeki azalma %9.3' dür. Tüm yapıştırıcı kalınlıkları için, yapıştırma çizgisi uç kısımlarında kayma gerilmesi yaklaşık olarak $\tau_{zx}=1$ MPa' dır. λ' nın azaltılması ile birlikte, yapıştırıcıların birbirleriyle olan geçiş noktalarında meydana gelen gerilme dalgalanmaları artmıştır.

Şekil 4.38' de $\lambda=0.33$ için τ_{zy} kayma gerilmeleri dağılımları görülmektedir.



Şekil 4.38 Farklı kalınlıkta yapıştırıcı kullanıldığında $\lambda=0.33$ için yapıştırıcı bölgesi τ_{zy} kayma gerilmeleri dağılımı (DP 8005 ve Araldite AV138M)

Şekil 4.38' de görüldüğü gibi burada da τ_{zy} kayma gerilmeleri, çatlak ucunda maksimum olmaktadır. Örneğin, $t_{a1}=0.2$ mm kalınlığı için, maksimum τ_{zy} kayma gerilmesi, $\tau_{zy}=7.6$ MPa olarak çatlak ucunda meydana gelmektedir. $t_{a1}=0.8$ mm olduğunda (bu değerde, yapıştırma çizgisi boyunca tüm yapıştırıcıların kalınlıkları birbirine eşit ve sabit) çatlak ucunda meydana gelen τ_{zy} kayma gerilmesi, $\tau_{zy}=3.9$ MPa' dır. τ_{zy} kayma gerilmesindeki azalma %48.6' dır. Ayrıca t_{a1} kalınlığından bağımsız olarak, tüm kalınlık varyasyonları için yapıştırma çizgisi uç kısımlarında τ_{zy} kayma gerilmesi yaklaşık olarak $\tau_{zy}=2.85$ MPa' dır.

DP 8005 ve Araldite AV138M hibrit yapıştırırmalı modelin kısa bir analizini yapacak olursak, çatlak ucunda, bazı kalınlık değerlerinde τ_{zx} kayma gerilmeleri bazılarında ise τ_{zy} kayma gerilmeleri maksimum olabilmektedir. Yapıştırma çizgisi uç kısımlarında ise gerilmeler sabittir ve τ_{zy} kayma gerilmeleri daha büyüktür. Hibrit yapıştırırmalı model arayüzey geçiş bölgelerinde gerilme dalgalanmaları, "x" doğrultusundaki τ_{zx} kayma

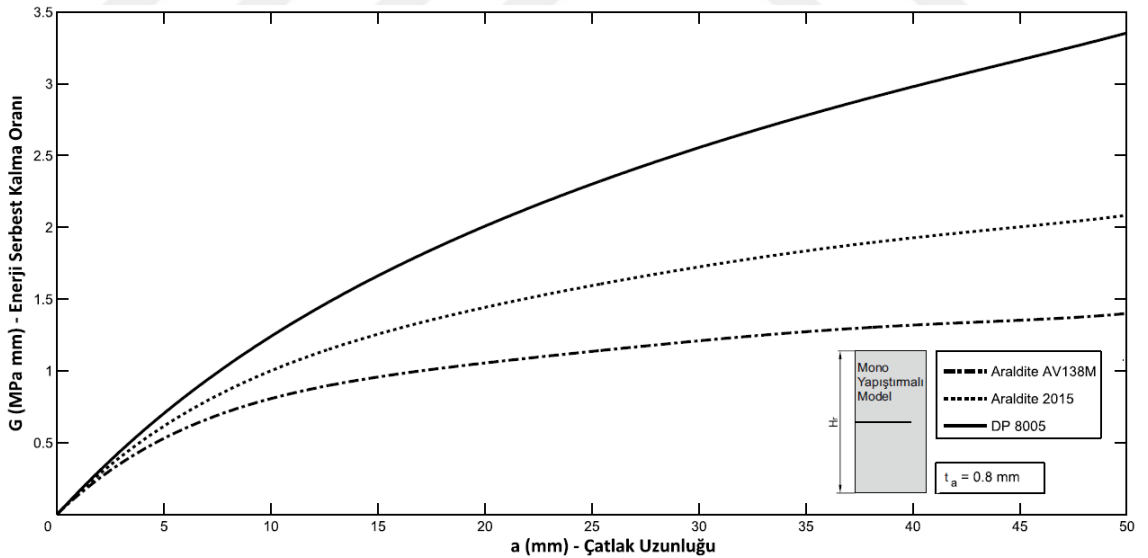
gerilmelerinde oldukça belirgin bir şekilde gözlemlenirken, "y" doğrultusundaki τ_{zy} kayma gerilmelerinde daha küçük mertebelerdedir. τ_{zy} kayma gerilmeleri arayüzey geçişlerinden fazla etkilenmemektedir.

4.9 Mono Yapıştırırmalı Modeller

Bu bölümde, Şekil 4.2' de gösterilen mono yapıştırırmalı modellerin, çatlak uzunluğuna bağlı olarak enerji serbest kalma oranları ve yapıştırıcı kayma gerilmeleri incelenmiştir. Mono ve hibrit yapıştırırmalı modellerin karşılaştırılması yapılırken, mono model olarak Araldite AV138M kullanılacaktır. Çünkü hibrit modellerde yapıştırma çizgisi üzerinde orta kısımda, yani çatlak üzerine gelen kısımda, Araldite AV138M gevrek yapıştırıcı kullanılmıştır.

4.9.1 Mono Modellerin Kırılma Enerjilerinin Karşılaştırılması

Her bir yapıştırıcının ayrı ayrı mono yapıştırırmalı olarak uygulanması ile oluşturulan mono yapıştırırmalı modellerin, çatlak uzunluğuna bağlı olarak kırılma enerjilerindeki değişim Şekil 4.39' da gösterilmiştir.



Şekil 4.39 Mono yapıştırırmalı modellerde kırılma enerjisi değişimi

Şekil 4.39' da kullanılan yapıştırıcıların kalınlığı $t_a=0.8\text{mm}$ ' dir. Daha önce belirtildiği gibi, incelenen yapıştırıcılardan katılık derecesi en yüksek olan gevrek Araldite AV138M' dir. En düşük olanı ise tok DP 8005 yapıştırıcıdır. Şekil 4.39' a göre, yapıştırıcının katılığı arttıkça, diğer bir deyişle esneklik azaldıkça, kırılma enerjisi

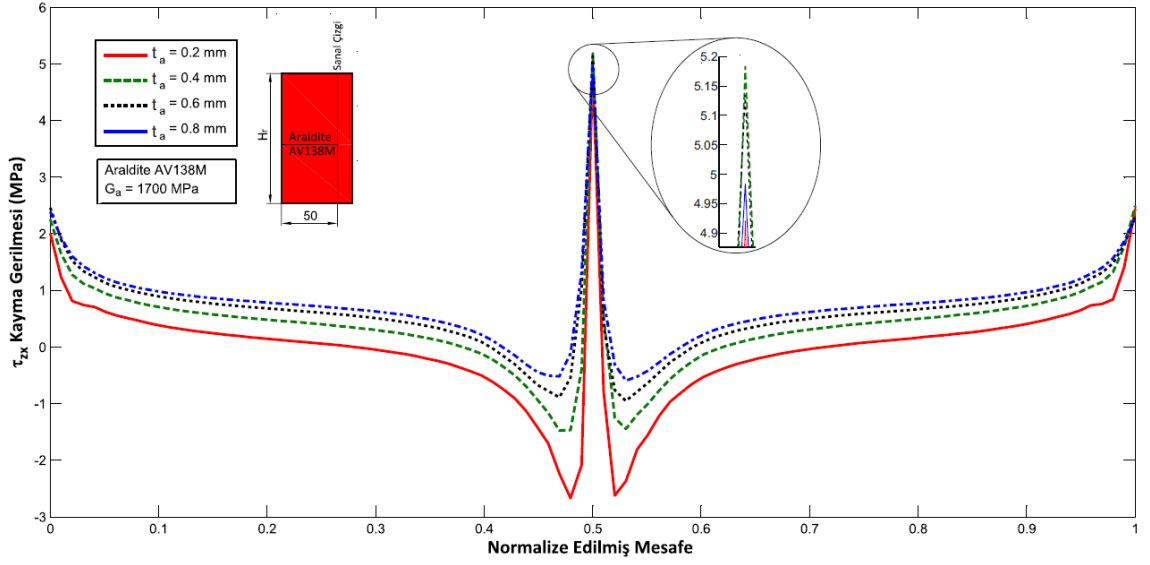
azalmaktadır. Örneğin 50 mm çatlak uzunluğuna karşılık, DP 8005 için $G=3.35 \text{ MPa.mm'}$ dir. Araldite AV138M için aynı koşullarda $G=1.4 \text{ MPa.mm'}$ dir. Kırılma enerjisindeki azalma %58.2' dir. Bu örnekte görüldüğü gibi, yapıştırıcının esnekliği arttıkça kırılma enerjisi de artmaktadır. Ancak, incelenen yapı bizim problemimizde olduğu gibi çatlaklı bir levhaysa, çatlak üzerinde gevrek yapıştırıcılar tercih edilir. Çünkü, levhaya uygulanan yük nedeniyle parça içersinde yüksek gerilmeler meydana gelmektedir. Levhanın akma sınırını da hesaba katarak, uygun bir gevrek yapıştırıcının seçilmesi gerekmektedir.

Örneğin, Araldite AV138M ve DP 8005 mono yapıştırırmalı modellerde, çatlaklı levha üzerinde σ_y gerilmelerinin dağılımları incelenmiştir. Araldite AV138M mono yapıştırırmalı modelde, yapıştırıcının gevrek olması ve çatlaklı yapıyı birarada tutabilme kabiliyetinin yüksek olması çatlak etrafında oluşan maksimum gerilmeyi azaltmaktadır. İncelenen problemde, levha üzerinde maksimum gerilmeler çatlak ucunda meydana gelmektedir. Yapılan analizlere göre, Araldite AV138M mono yapıştırırmalı model için çatlağın ilerleme doğrultusuna dik yöndeki normal gerilme σ_y , $\sigma_y=332.2 \text{ MPa'}$ dir. Daha esnek bir yapıştırıcı olan tok DP 8005 mono yapıştırırmalı model kullanıldığında $\sigma_y=517.2 \text{ MPa'}$ dir. Gerilmedeki artış %55.7' dir. EK A' da bu analizlere ait görseller verilmiştir.

Bu sonuçlara göre, levhanın tamir konfigurasyonuna ve yöntemine karar verirken, sadece kırılma enerjisinin temel alınarak tercih yapılmasının doğru sonuç vermeyeceği görülmüştür. Yapıştırıcı üzerinde meydana gelen gerilmelerle birlikte, levha üzerinde ki gerilmeleri de azaltmak, çatlağın ilerlemesini durdurmak ve bu sayede kırılmayı engellemek mümkün olabilir.

4.9.2 Araldite AV138M Mono Modelde Yapıştırıcı Kayma Gerilmeleri

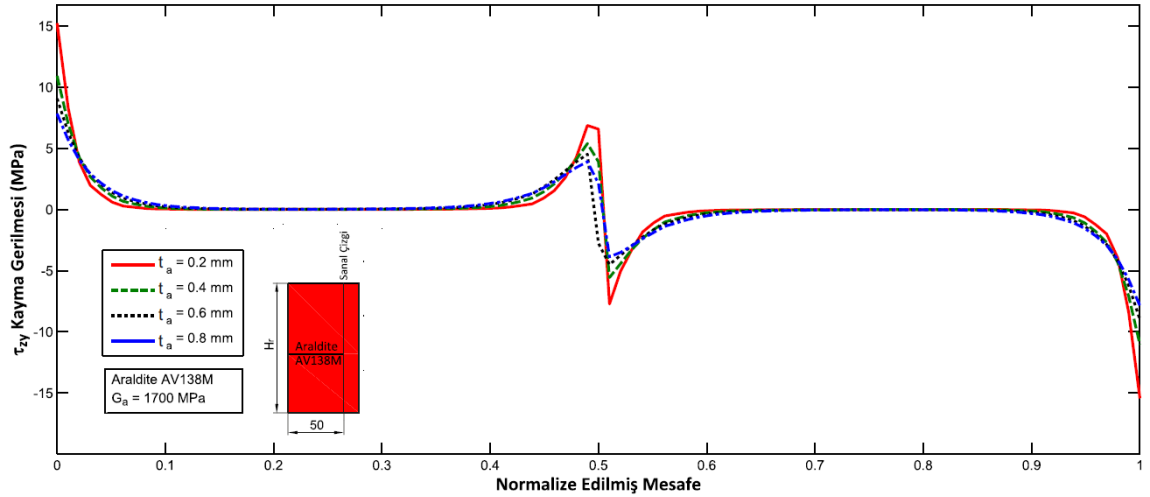
Bu bölümde Araldite AV138M yapıştırıcısı kullanılarak oluşturulan bir mono yapıştırırmalı model için, kayma gerilmeleri incelenmiştir. İlk olarak τ_{zx} kayma gerilmeleri dağılımları incelenmiş olup sonuçlar Şekil 4.40' da gösterilmiştir.



Şekil 4.40 Araldite AV138M mono yapıştırırmalı model τ_{zx} kayma gerilmeleri dağılımı

Şekil 4.40' a göre τ_{zx} kayma gerilmeleri, yapıştırıcı kalınlığı ne olursa olsun çatlak ucunda maksimum olmaktadır. Yapıştırıcı kalınlığına göre gerilmeler, çatlak ucu ve yapıştırma çizgisi uç kısımlarında birbirlerine yakın değerlerdedir. Örneğin, $t_a=0.2$ mm için, çatlak ucunda ve yapıştırma çizgisi uçlarında meydana gelen gerilmeler sırasıyla, $\tau_{zx}=4.92$ MPa ve $\tau_{zx}=2.42$ MPa' dır. $t_a=0.8$ mm için, çatlak ucunda ve yapıştırma çizgisi uçlarında meydana gelen gerilmeler sırasıyla, $\tau_{zx}=4.98$ MPa ve $\tau_{zx}=2.39$ MPa' dır. Şekil 4.40' a göre maksimum τ_{zx} kayma gerilmesi, çatlak ucunda $t_a=0.4$ mm için $\tau_{zx}=5.18$ MPa' dır.

Şekil 4.41' de Araldite AV138M mono yapıştırırmalı model için τ_{zy} gerilmeleri verilmiştir.



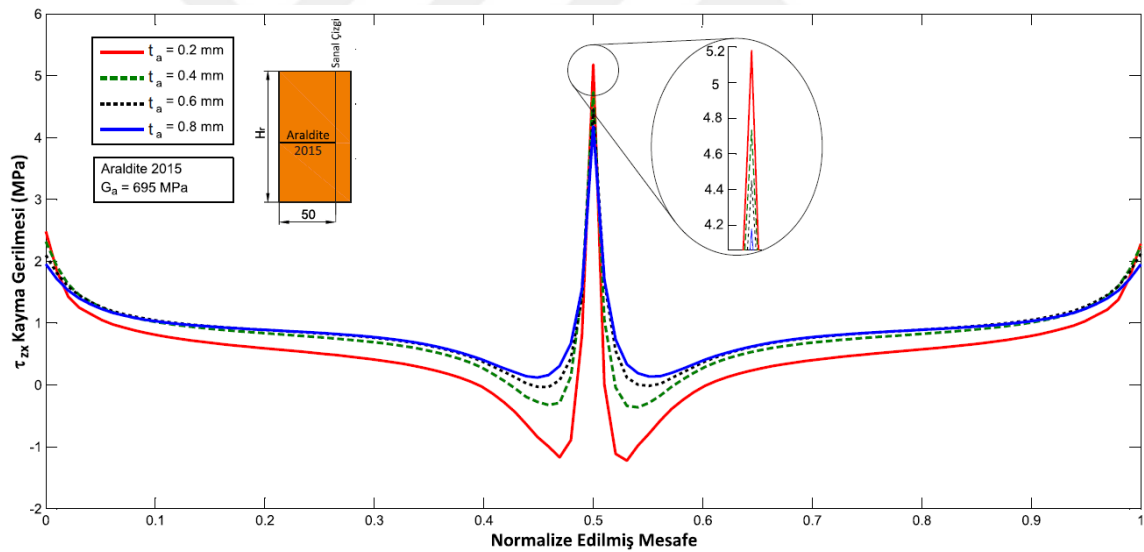
Şekil 4.41 Araldite AV138M mono yapıştırırmalı model τ_{zy} kayma gerilmeleri dağılımı

Şekil 4.41' e göre, yapıştırıcı kayma gerilmelerinin τ_{zy} bileşeni, yapıştırma çizgisi uç kısımlarında maksimum olmaktadır. Yapıştırıcı kalınlığı azaldıkça çatlak ucunda ve

yapıştırma çizgisi uç kısımlarında gerilmelerde artış görülmektedir. Örneğin, $t_a=0.2$ mm için, çatlak ucunda ve yapıştırma çizgisi uçlarında meydana gelen τ_{zy} kayma gerilmeleri sırasıyla, $\tau_{zy}=7.73$ MPa ve $\tau_{zy}=15.22$ MPa' dır. $t_a=0.8$ mm için, çatlak ucunda ve yapıştırma çizgisi uçlarında meydana gelen gerilmeler ise sırasıyla, $\tau_{zy}=3.9$ MPa ve $\tau_{zy}=7.82$ MPa' dır. Yapıştırıcı kalınlığının dört kat arttırılması ile çatlak ucunda ve yapıştırma çizgisi uç kısımlarında meydana gelen gerilmelerdeki azalma sırasıyla, %49.5 ve %48.6' dır.

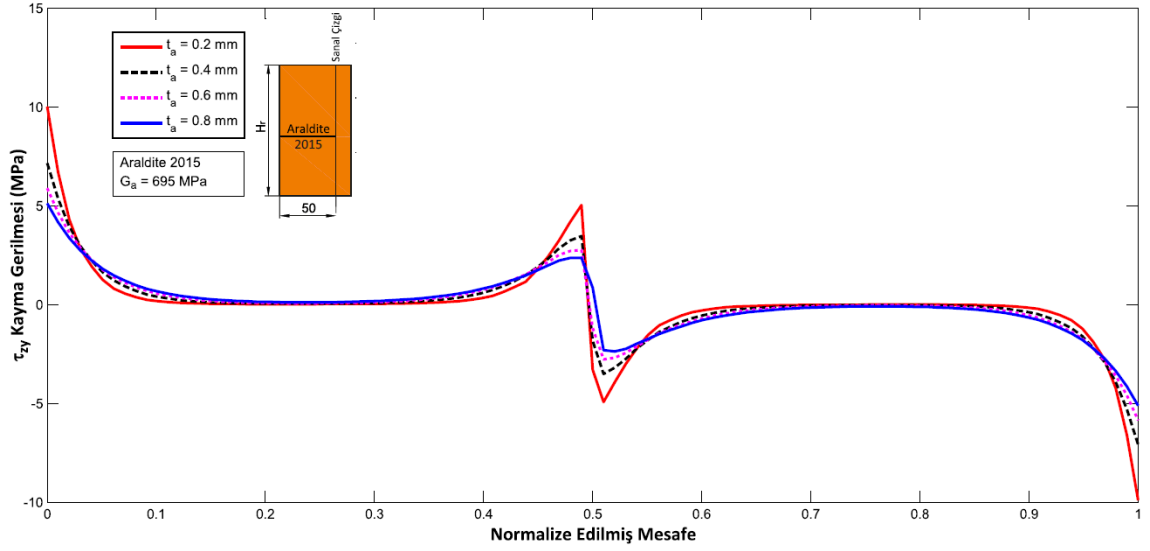
4.9.3 Araldite 2015 Mono Modelde Yapıştırıcı Kayma Gerilmeleri

Bu bölümde Araldite 2015 yapıştırıcısı kullanılarak oluşturulan bir mono yapıştırmalı model için, kayma gerilmeleri incelenmiştir. Şekil 4.42 ve Şekil 4.43' de, Araldite 2015 sünek yapıştırıcı kullanılarak oluşturulan mono yapıştırmalı model için sırasıyla τ_{zx} ve τ_{zy} kayma gerilmeleri dağılımları verilmiştir.



Şekil 4.42 Araldite 2015 mono yapıştırmalı model τ_{zx} kayma gerilmeleri dağılımı

Şekil 4.42' ye göre maksimum τ_{zx} kayma gerilmesi, çatlak ucunda ve $t_a=0.2$ mm için $\tau_{zx}=5.18$ MPa' dır. $t_a=0.2$ mm için, çatlak ucunda ve yapıştırma çizgisi uçlarında meydana gelen gerilmeler sırasıyla, $\tau_{zx}=5.18$ MPa ve $\tau_{zx}=2.48$ MPa' dır. $t_a=0.8$ mm için, çatlak ucunda ve yapıştırma çizgisi uçlarında meydana gelen gerilmeler sırasıyla, $\tau_{zx}=4.18$ MPa ve $\tau_{zx}=1.95$ MPa' dır. Yapıştırıcı kalınlığının dört kat arttırılması ile çatlak ucunda ve yapıştırma çizgisi uç kısımlarında meydana gelen gerilmelerdeki azalma, sırasıyla %19.3 ve %21.4' dür.

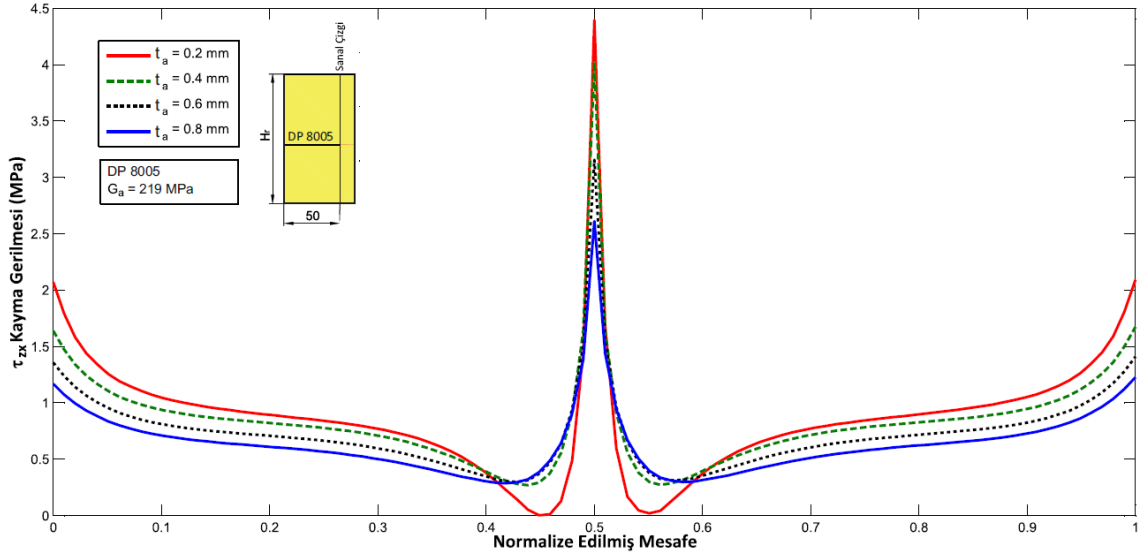


Şekil 4.43 Araldite 2015 mono yapıştırıcı model τ_{zy} kayma gerilmeleri dağılımı

Şekil 4.43' e göre, yapıştırıcı kayma gerilmelerinin τ_{zy} bileşeni, yapıştırma çizgisi uç kısımlarında maksimum olmaktadır. Örneğin, $t_a=0.2$ mm için, çatlak ucunda ve yapıştırma çizgisi uçlarında meydana gelen τ_{zy} kayma gerilmeleri sırasıyla, $\tau_{zy}=5$ MPa ve $\tau_{zy}=10$ MPa' dır. $t_a=0.8$ mm için, çatlak ucunda ve yapıştırma çizgisi uçlarında meydana gelen gerilmeler sırasıyla, $\tau_{zy}=2.35$ MPa ve $\tau_{zy}=5.1$ MPa' dır. Yapıştırıcı kalınlığının dört kat artırılması ile çatlak ucunda ve yapıştırma çizgisi uç kısımlarında meydana gelen gerilmelerdeki azalma sırasıyla, %53 ve %49' dur.

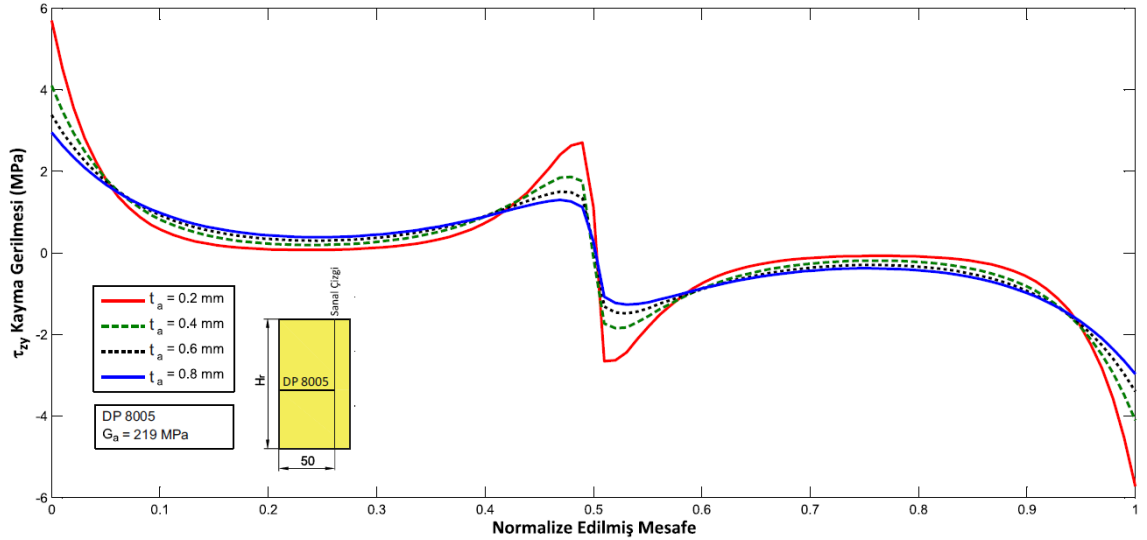
4.9.4 DP 8005 Mono Modelde Yapıştırıcı Kayma Gerilmeleri

Mono yapıştırıcı modellerle ilgili son olarak, Şekil 4.44 ve Şekil 4.45' de DP 8005 tok yapıştırıcı kullanılarak oluşturulan mono yapıştırıcı model için sırasıyla, τ_{zx} ve τ_{zy} kayma gerilmeleri dağılımları verilmiştir.



Şekil 4.44 DP 8005 mono yapıştırırmalı model τ_{zx} kayma gerilmeleri dağılımı

Şekil 4.44' e göre maksimum τ_{zx} kayma gerilmesi, çatlak ucunda ve $t_a=0.2$ mm için $\tau_{zx}=4.39$ MPa' dır. $t_a=0.2$ mm için, çatlak ucunda ve yapıştırma çizgisi uçlarında meydana gelen gerilmeler sırasıyla, $\tau_{zx}=4.39$ MPa ve $\tau_{zx}=2.07$ MPa' dır. $t_a=0.8$ mm için, çatlak ucunda ve yapıştırma çizgisi uçlarında meydana gelen gerilmeler sırasıyla, $\tau_{zx}=2.61$ MPa ve $\tau_{zx}=1.17$ MPa' dır. Yapıştırıcı kalınlığının dört kat artırılması ile çatlak ucunda ve yapıştırma çizgisi uç kısımlarında meydana gelen gerilmelerdeki azalma, sırasıyla %40.5 ve %43.5' dür.



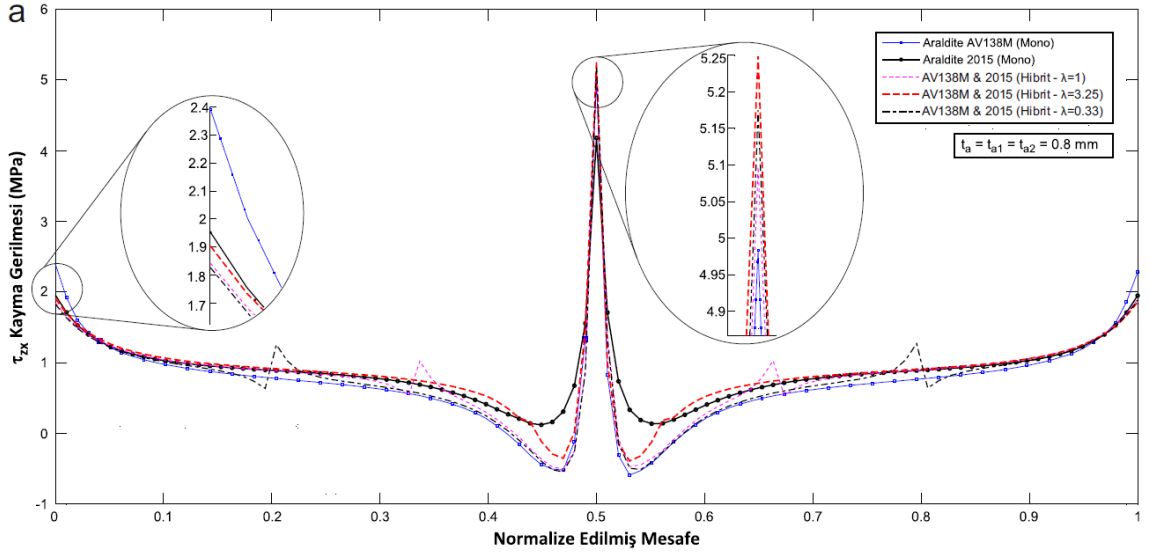
Şekil 4.45 DP 8005 mono yapıştırırmalı model τ_{zy} kayma gerilmeleri dağılımı

Şekil 4.45' e göre, yapıştırıcı kayma gerilmelerinin τ_{zy} bileşeni, yapıştırma çizgisi uç kısımlarında maksimum olmaktadır. Örneğin, $t_a=0.2$ mm için, çatlak ucunda ve yapıştırma çizgisi uçlarında meydana gelen τ_{zy} kayma gerilmeleri sırasıyla, $\tau_{zy}=2.7$ MPa

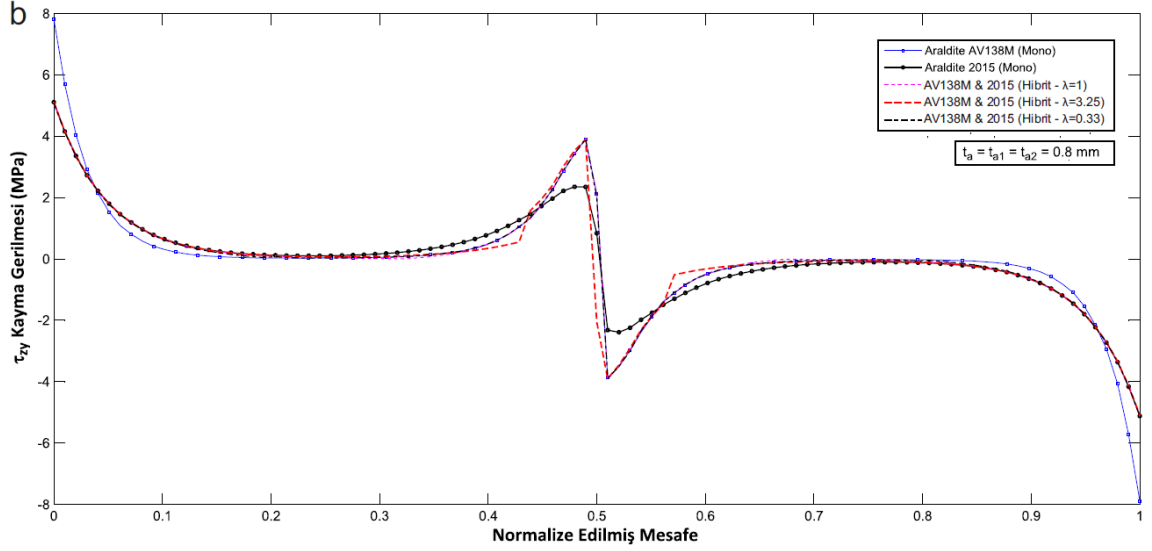
ve $\tau_{zy}=5.7$ MPa' dır. $t_a=0.8$ mm için, çatlak ucunda ve yapıştırma çizgisi uçlarında meydana gelen gerilmeler sırasıyla, $\tau_{zy}=1.3$ MPa ve $\tau_{zy}=2.95$ MPa' dır. Yapıştırıcı kalınlığının dört kat arttırılması ile çatlak ucunda ve yapıştırma çizgisi uç kısımlarında meydana gelen gerilmelerdeki azalma sırasıyla, %51.9 ve %48.2' dir.

4.9.5 Mono ve Hibrit Yapıştırırmalı Modellerden Elde Edilen Sonuçların Birleştirilmesi

Son bir ek inceleme yaparak, mono ve hibrit yapıştırırmalı bağlantılar için elde ettiğimiz kayma gerilmesi grafikleri üst üste çizdirilip, birlikte gösterilmiştir. Bu incelemede, tüm yapıştırıcıların kalınlıkları sabit ve $t_a=0.8$ mm' dir. Araldite AV138M ve Araldite 2015 yapıştırıcıları kullanılarak oluşturulan hibrit ve mono yapıştırırmalı modellere ait τ_{zx} ve τ_{zy} gerilmeleri sırasıyla Şekil 4.46(a) ve Şekil 4.46(b)' de gösterilmektedir.



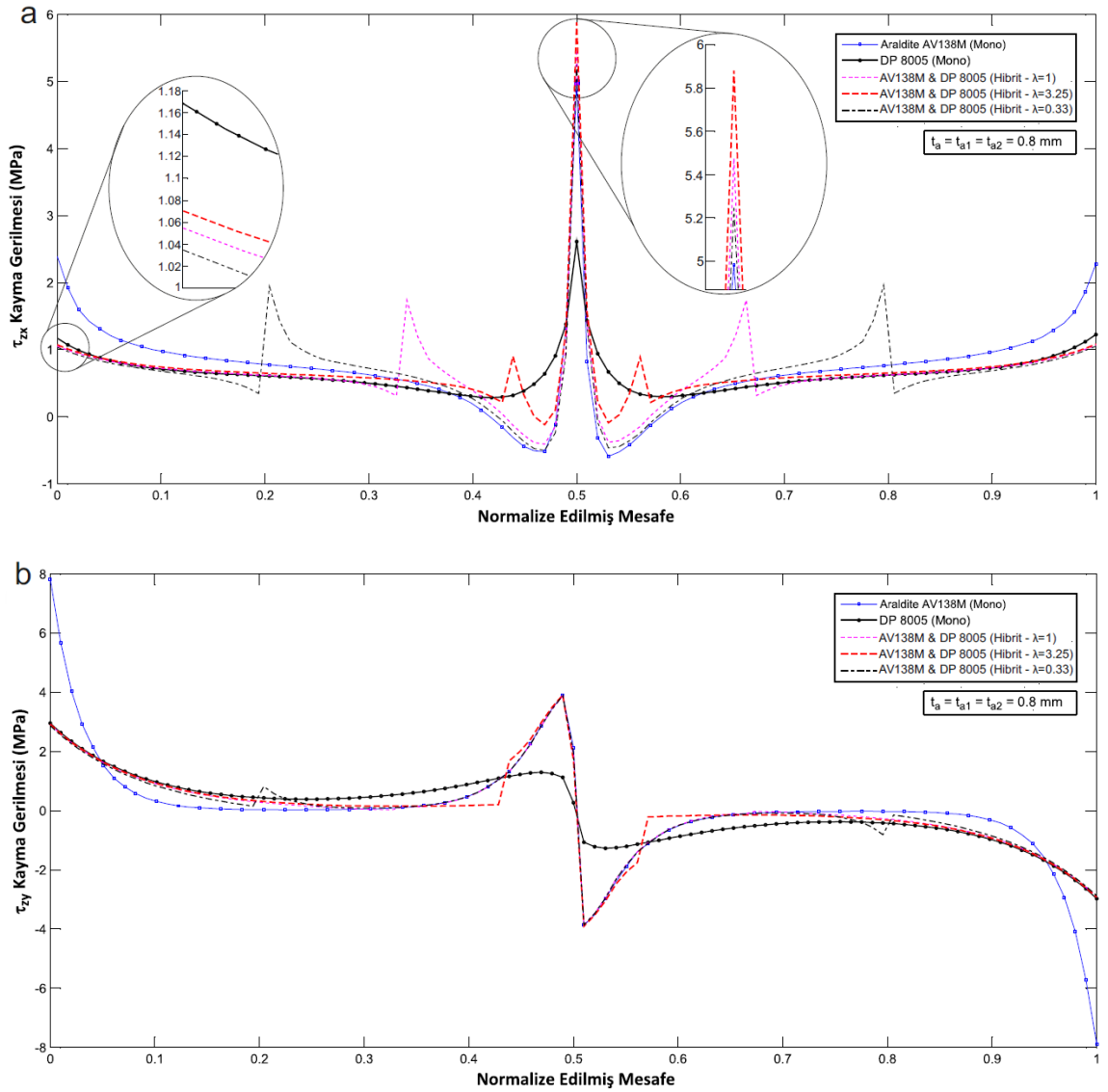
Şekil 4.46 (a) Araldite AV138M ve Araldite 2015 mono ve hibrit yapıştırırmalı modeller için τ_{zx} kayma gerilmeleri dağılımı (b) Araldite AV138M ve Araldite 2015 mono ve hibrit yapıştırırmalı modeller için τ_{zy} kayma gerilmeleri dağılımı



Şekil 4.46 (a) Araldite AV138M ve Araldite 2015 mono ve hibrit yapıştırıcı modeller için τ_{zx} kayma gerilmeleri dağılımı (b) Araldite AV138M ve Araldite 2015 mono ve hibrit yapıştırıcı modeller için τ_{zy} kayma gerilmeleri dağılımı (devamı)

Şekil 4.46(a) ve (b)' ye göre en düzgün gerilme dağılımı, Araldite 2015 mono yapıştırıcı modelde meydana gelmektedir. Bu model için çatlak ucunda meydana gelen τ_{zx} ve τ_{zy} gerilmeleri sırasıyla, $\tau_{zx}=4.17$ MPa ve $\tau_{zy}=2.35$ MPa' dır. Yapıştırma çizgisi uç kısımlarında ise $\tau_{zx}=1.95$ MPa ve $\tau_{zy}=5.11$ MPa' dır. Gevrek yapıştırıcı Araldite AV138M ile oluşturulan mono yapıştırıcı modelde, çatlak ucunda meydana gelen τ_{zx} ve τ_{zy} gerilmeleri sırasıyla, $\tau_{zx}=4.98$ MPa ve $\tau_{zy}=3.9$ MPa' dır. Yapıştırma çizgisi uç kısımlarında ise $\tau_{zx}=2.39$ MPa ve $\tau_{zy}=7.82$ MPa' dır. Hibrit modellerde, hibrit oranı $\lambda=1$, 3.25, 0.33 için çatlak ucunda meydana gelen τ_{zx} kayma gerilmeleri sırasıyla $\tau_{zx}=5.1$, 5.25, 5.17 MPa' dır. Tüm hibrit oranlarında çatlak ucunda meydana gelen τ_{zy} kayma gerilmesi ise $\tau_{zy}=3.9$ MPa' dır. Yapıştırma çizgisi uç kısımlarına baktığımızda ise $\lambda=1$, 3.25, 0.33 için meydana gelen τ_{zx} kayma gerilmeleri sırasıyla, $\tau_{zx}=1.85$, 1.9, 1.82 MPa' dır. τ_{zy} kayma gerilmesi ise, tüm hibrit modeller için $\tau_{zy}=5.1$ MPa' dır.

Araldite AV138M ve DP 8005 yapıştırıcıları kullanılarak oluşturulan hibrit ve mono yapıştırıcı modellere ait τ_{zx} ve τ_{zy} gerilmeleri sırasıyla Şekil 4.47(a) ve Şekil 4.47(b)' de gösterilmektedir.



Şekil 4.47 (a) Araldite AV138M - DP 8005 mono ve hibrit yapıştırırmalı modeller için τ_{zx} kayma gerilmeleri dağılımı (b) Araldite AV138M ve DP 8005 mono ve hibrit yapıştırırmalı modeller için τ_{zy} kayma gerilmeleri dağılımı

Şekil 4.47(a) ve (b)' ye göre en düzgün gerilme dağılımı, DP 8005 mono yapıştırırmalı modelde meydana gelmektedir. Bu model için çatlak ucunda meydana gelen τ_{zx} ve τ_{zy} gerilmeleri sırasıyla, $\tau_{zx}=2.61$ MPa ve $\tau_{zy}=1.3$ MPa' dır. Yapıştırma çizgisi uç kısımlarında ise $\tau_{zx}=1.17$ MPa ve $\tau_{zy}=2.95$ MPa' dır. Hibrit modellerde, hibrit oranı $\lambda=1, 3.25, 0.33$ için çatlak ucunda meydana gelen τ_{zx} kayma gerilmeleri sırasıyla $\tau_{zx}=5.48, 5.88, 5.24$ MPa' dır. Tüm hibrit oranlarında çatlak ucunda meydana gelen τ_{zy} kayma gerilmesi ise $\tau_{zy}=3.9$ MPa' dır. Yapıştırma çizgisi uç kısımlarına baktığımızda ise $\lambda=1, 3.25, 0.33$ için meydana gelen τ_{zx} kayma gerilmeleri sırasıyla $\tau_{zx}=1.05, 1.07, 1.03$ MPa' dır. τ_{zy} kayma gerilmesi ise, tüm hibrit modeller için $\tau_{zy}=2.9$ MPa' dır.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, bünyesinde çatlak bulunduran bir alüminyum levha, boron-epoksi yama kullanılarak mono ve hibrit yapıştırırmalı olarak tamir edilmiştir. Kompozit yama ile tamir işleminden sonra, çatlak Franc2D/L sonlu elemanlar programı kullanılarak ilerletilmiştir. Çatlak ilerlemesine bağlı olarak tüm modeller için, enerji serbest kalma oranı ve yapıştırıcı kayma gerilmeleri τ_{zx} ve τ_{zy} incelenmiştir. Yapıştırıcı kayma gerilmeleri, çatlağın tanjantından geçen bir sanal çizgi boyunca incelenmiştir (Şekil 4.14). Tez çalışmasında incelenen probleme geçmeden önce, bu çalışmaya temel teşkil eden [5] çalışması incelenmiş ve bu literatür çalışmasında bulunan tüm sonuçlar tarafımızdan da bulunup ayrı bir bölüm olarak bu tez çalışmasında gösterilmiştir.

Tez çalışmasında, ticari amaçlı üç farklı yapıştırıcı kullanılarak mono ve hibrit modeller oluşturulmuştur. Bu yapıştırıcılar, Huntsman firmasının ürettiği gevrek yapıştırıcı Araldite AV138M ve tok yapıştırıcı Araldite 2015, Scotch Weld firmasının ürettiği sünek DP 8005 yapıştırıcılarıdır. Bu yapıştırıcılar ile ilk önce Araldite AV138M ve Araldite 2015 ikilisinden oluşan hibrit yapıştırırmalı model oluşturulmuştur. Daha sonra Araldite AV138M ve DP 8005 ikilinden oluşan hibrit yapıştırırmalı model oluşturulmuştur. Ayrıca bu yapıştırıcıların herbirinin tek tek kullanıldığı üç farklı mono yapıştırırmalı model de oluşturulmuştur. Hibrit modellerde çatlak üzerinde Araldite AV138M gevrek yapıştırıcı kullanılmış olup yapıştırma çizgisi uçlarında sırasıyla Araldite 2015 ve DP 8005 kullanılmıştır. Hibrit yapıştırırmalı modeller için, esnek yapıştırıcı uzunluğunun gevrek yapıştırıcı uzunluğuna oranı olan λ hibrit oranı tanımlanmıştır. Matematiksel olarak hibrit oranı $\lambda = L_f/L_s$ ' dir. Bu çalışmada $\lambda = L_f/L_s = 0.33, 1, 3.25$ olacak şekilde üç farklı hibrit

oranına göre inceleme yapılmıştır. Yapıştırıcı kalınlığı değişken bir parametre olarak $t_a=0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ mm seçilmiştir. Mono ve hibrit yapıştırırmalı modellerin yapıştırıcı kayma gerilmeleri τ_{zx} ve τ_{zy} 'nin karşılaştırmasını yapabilmek için, tüm yapıştırıcı kalınlıklarının sabit ve $t_a=0.8$ mm olarak seçildiği bir inceleme daha yapılarak sonuçlar incelenmiştir.

Tezden elde ettiğimiz sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- 1) Enerji serbest kalma oranı, yapıştırıcı kalınlığına bağlı olarak önemli miktarda artmakta veya azalmaktadır. Hibrit modellerde enerji serbest kalma oranı, yapıştırma çizgisi ortasında yani çatlak üzerine gelen kısımda kullanılan yapıştırıcıya bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Hibrit modellerde yapıştırma çizgisi uçlarında, yani çatlak olmayan bölgede kullanılan yapıştırıcıların cinsi veya kalınlığının enerji serbest kalma oranı üzerinde bir etkisi olmadığı görülmüştür.
- 2) Hibrit modellerde λ hibrit oranının enerji serbest kalma oranı üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Yalnızca, çatlak uzunluğunun 10 mm' yi geçtiği durumlarda $L_s=8.47$ mm olan varyasyon ile diğer varyasyonlar arasında ki farkın %6 mertebelerinde olduğu görülmüştür (Şekil 4.21, 4.22, 4.31 ve 4.32).
- 3) Yapıştırıcı kayma gerilmeleri τ_{zx} ve τ_{zy} , yapıştırıcı tipi, kalınlığı ve kombinasyonundan önemli derecede etkilenmektedir. Mono ve hibrit modeller için τ_{zx} kayma gerilmeleri, çatlak ucunda maksimum olmaktadır. τ_{zy} kayma gerilmesi ise yapıştırma çizgisi uçlarında veya çatlak ucunda maksimum olabilmektedir. Yapıştırıcı kalınlığı arttıkça τ_{zx} ve τ_{zy} kayma gerilmeleri azalmaktadır.
- 4) Araldite 2015 ve Araldite AV138M hibrit modelinde, $t_{a1}=t_{a2}=t_a=0.8$ mm iken maksimum τ_{zx} gerilmesi, $\lambda=3.25$ hibrit oranında $\tau_{zx}=5.25$ MPa olarak meydana gelmektedir. $t_{a1}=t_{a2}=t_a=0.8$ mm iken minimum τ_{zx} gerilmesi, Araldite 2015 mono yapıştırırmalı modelde $\tau_{zx}=4.18$ MPa olarak meydana gelmektedir. Gerilmede meydana gelen artış %25.6 olarak hesaplanmıştır. Yapıştırma çizgisi uç kısımlarında ise maksimum τ_{zx} kayma gerilmesi, Araldite AV138M mono yapıştırırmalı modelde $\tau_{zx}=2.39$ MPa olarak meydana gelmektedir. Minimum τ_{zx}

gerilmesi ise hibrit modellerde $\tau_{zx}=1.8$ MPa olarak meydana gelmektedir. Gerilmede meydana gelen artış %32.7 olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.46a).

- 5) DP 8005 ve Araldite AV138M hibrit modelinde, $t_{a1}=t_{a2}=t_a=0.8$ mm iken maksimum τ_{zx} gerilmesi, $\lambda=3.25$ hibrit oranında $\tau_{zx}=5.88$ MPa olarak meydana gelmektedir. $t_{a1}=t_{a2}=t_a=0.8$ mm iken minimum τ_{zx} gerilmesi, DP 8005 mono yapıştırıcı modelde $\tau_{zx}=2.61$ MPa olarak meydana gelmektedir. Gerilmede meydana gelen artış %125.3 olarak hesaplanmıştır. Yapıştırma çizgisi uç kısımlarında ise maksimum τ_{zx} kayma gerilmesi, Araldite AV138M mono yapıştırıcı modelde $\tau_{zx}=2.39$ MPa olarak meydana gelmektedir. Minimum τ_{zx} gerilmesi ise hibrit modellerde $\tau_{zx}=1$ MPa olarak meydana gelmektedir. Gerilmede meydana gelen artış %139 olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.47a).
- 6) Araldite 2015 ve Araldite AV138M hibrit modelinde, $t_{a1}=t_{a2}=t_a=0.8$ mm iken çatlak ucunda meydana gelen τ_{zy} kayma gerilmesi, tüm hibrit modeller için $\tau_{zy}=3.9$ MPa' dır. Yapıştırma çizgisi uçlarında ise $\tau_{zy}=5.1$ MPa' dır. $t_a=0.8$ mm için Araldite 2015 mono yapıştırıcı modelde ise çatlak ucu ve yapıştırma çizgisi uç kısımlarında meydana gelen τ_{zy} kayma gerilmesi sırasıyla, $\tau_{zy}=2.35$ MPa ve $\tau_{zy}=5.1$ MPa' dır (Şekil 4.46b).
- 7) DP 8005 ve Araldite AV138M hibrit modelinde, $t_{a1}=t_{a2}=t_a=0.8$ mm iken çatlak ucunda meydana gelen τ_{zy} kayma gerilmesi, tüm hibrit modeller için $\tau_{zy}=3.9$ MPa' dır. Yapıştırma çizgisi uçlarında ise $\tau_{zy}=2.85$ MPa' dır. $t_a=0.8$ mm için DP 8005 mono yapıştırıcı modelde ise çatlak ucu ve yapıştırma çizgisi uç kısımlarında meydana gelen τ_{zy} kayma gerilmesi sırasıyla, $\tau_{zy}=1.3$ MPa ve $\tau_{zy}=2.95$ MPa' dır (Şekil 4.47b).
- 8) Hibrit ve mono yapıştırıcı modeller arasında, en düzgün gerilme dağılımları Araldite 2015 ve DP 8005 mono yapıştırıcı modellerde görülmüştür (Şekil 4.46 ve 4.47).
- 9) Hibrit modellerde yapıştırıcı geçiş yüzeylerinde gerilme dalgalanmaları meydana geldiği görülmüştür. Dalgalanmalar, Araldite AV138M - Araldite 2015 hibrit modelinde daha azdır. Hibrit oranının artmasıyla gerilme dalgalanmalarının

azaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Minimum dalgalanma, hibrit oranının $\lambda=3.25$ olduğu hibrit modellerde görülmüştür.

Mono ve hibrit modellerin karşılaştırılması neticesinde, hibrit yapıştırılmalı modellerin kullanılmasının, yapıştırma çizgisi uçlarında gerilmeleri azaltabilmek için etkili bir yöntem olduğu sonucuna ulaşılmıştır.



KAYNAKLAR

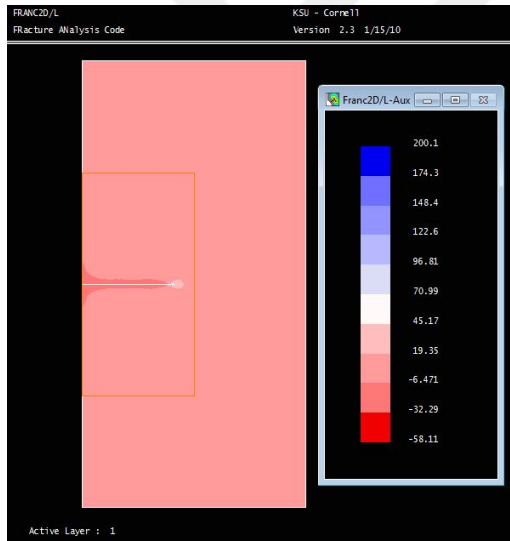
- [1] Hu, G.K., Schmit, F., François, D. ve Baptiste, D., (1992). "Fracture Mechanics Analysis of Adhesive Lap Joints", *Anales De Mecanica de la Fractura*, 9: 377-386.
- [2] Kafkalidis, M.S., ve Thouless, M.D., (2002). "The Effects of Geometry and Material Properties on the Fracture of Single Lap-Shear Joints", *International Journal of Solids and Structures*, 39: 4367-4383
- [3] Bouiadjra, B.B., Belhouari, M. ve Serier, B., (2002). "Computation of the Stress Intensity Factors for Repaired Cracks with Bonded Composite Patch in Mod I and Mixed Mode", *Composite Structures*, 56: 401-406
- [4] Achour, T., Bouiadjra, B.B. ve Serier, B., (2003). "Numerical Analysis of the Performances of the Bonded Composite Patch for Reducing Stress Concentration and Repairing Crack at Notch", *Computational Materials Science*, 28: 41-48
- [5] Bouiadjra, B.B., Fekirini, H., Belhouari, M., Boutabout, B. ve Serier, B., (2007). "Fracture Energy for Repaired Cracks with Bonded Composite Patch Having Two Adhesive Bands in Aircraft Structures", *Computational Materials Science*, 40: 20-26.
- [6] Bezzerrouki, M., Bouiadjra, B.B. ve Ouinas, D., (2008). "SIF for Cracks Repaired with Single Composite Patch Having Two Adhesive Bands and Double Symetric One in Aircraft Structures", *Computational Materials Science*, 44: 542-546
- [7] Ouinas, D., Bouiadjra, B.B., Achour, B. ve Benderdouche, N., (2009). "Modelling of a Cracked Aluminium Plate Repaired with Composite Octagonal Patch in Mode I and Mixed Mode", *Materials and Design*, 30: 590-595
- [8] Ouinas, D., Sahnoune, M., Benderdouche, N. ve Bouiadjra, B.B., (2009). "Stress Intensity Factor Analysis for Notched Crack Structure Repaired by Composite Patching", *Materials and Design*, 30: 2302-2308
- [9] Ouinas, D., Bouiadjra, B.B., Achour, T. ve Benderdouche, N., (2010). "Influence of Disbond on Notch Crack Behaviour in Single Bonded Lap Joints", *Materials and Design*, 31: 4356-4362.

- [10] Albedah, A., Bouiadjra, B.B., Mhamdia. R., Benyahia, F. ve Es-Saheb, M., (2011). "Comparison Between double and Single Sided Bonded Composite Repair with Circular Shape", *Materials and Design*, 32:996-1000
- [11] Bouiadjra, B.B, Bouanani, M.F., Albedah, A., Benyahia, F. ve Es-Saheb, M., (2011). "Comparison Between Rectangular and Trapezoidal Bonded Composite Repairs in Aircraft Structures: A Numerical Analysis", *Materials and Design*, 32: 3161-3166.
- [12] Bouiadjra, B.B., Oudad, W., Albedah, A., Benyahia, F. ve Belhouari, M., (2012). "Effects of Adhesive Disband on the Performances of Bonded Composite Repairs in Aircraft Structures", *Materials and Design*, 37: 89-95
- [13] Fekih, S.M., Albedah, A., Benyahia, F., Belhouari, M., Bouiadjra, B.B. ve Miloudi A., (2012). "Optimisation of the Sizes of Bonded Composite Repair in Aircraft Structures", *Materials and Design*, 41: 171-176
- [14] Hedayati, R. ve Jahanbakhshi, M., (2014). "Prediction of Static Crack Propagation in Adhesive Joints", *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 52: 937-946
- [15] Marancı, Ş., (2009). Metal Plastik Birleştirmelerde Ara Yüzey İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, Edirne.
- [16] Klebth, Yapıştırıcılar Hakkında, <http://www.klebth.com.tr/yapistirici-hakkinda.php>, 4 Temmuz 2015
- [17] Kodakoğlu, L., (1996). Yapıştırıcıların Genel Özellikleri ve Çekme Gerilmesine Maruz Yapışma Birleşmesinin Analitik ve Nümerik Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [18] Çalık, A., (2008). Yapıştırıcılar ve Köşeleri Yuvarlatılmış Basamaklı Bindirme Yapıştırıcı Bağlantılarda Gerilme Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak.
- [19] Erbayrak, E., (2012). Araldite 2015 Epoksi Yapıştırıcı Mod I Kırılma Tokluk Değerinin Deney ve Sonlu Elemanlar Metodu ile Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [20] Öz, Ö., (2015). Hibrit Yapıştırma Bağlantı Hasarının Nümerik ve Deneysel Olarak İncelenmesi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [21] Yayla, P., (2007). Kırılma Mekaniği, 1, Çağlayan Basımevi, İstanbul.
- [22] Anderson, T.L., (1995). *Fracture Mechanics*, 2, CRC Press LLC, USA
- [23] Özer, H., (1996). Düz Dişli Çarkların Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Gerilme Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [24] Araldite AV138M, Technical Data Sheet, <http://www.aralditeadhesives.com/index.php/adhesives/request-a-tds/78-araldite-av-138m-1-hardener-hv-998-eur-e/file.html>, 4 Temmuz 2015

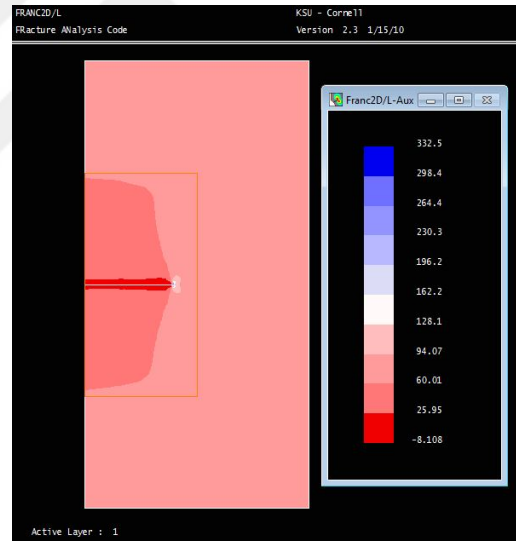
- [25] Araldite 2015, Technical Data Sheet, <http://www.intertronics.co.uk/data/ara2015.pdf>, 4 Temmuz 2015
- [26] DP8005, Technical Data, http://solutions.3m.com.au/3MContentRetrievalAPI/BlobServlet?lmd=1317022385000&locale=en_AU&assetType=MMM_Image&assetId=1273695674731&blobAttribute=ImageFile, 4 Temmuz 2015
- [27] Swenson, D. ve James, M., (1998). FRANC 2D/L: A Crack Propagation Simulator for Plane Layered Structures, Version 1.4 User's Guide.
- [28] Ricci, F., Franco, F. ve Montefusco, N., (2011). "Bonded Composite Patch Repairs on Cracked Aluminum Plates: Theory, Modeling and Experiments", *Advances in Composite Materials-Ecodesign and Analysis*, 20: 445-464
- [29] Mandai, J.T. ve Ferreira, J.L.A., (2007). "Analyses and Use of Software Ansys and Franc2d for Fracture Mechanics", 19th International Congress of Mechanical Engineering, 5-9 November 2007, Brasilia.
- [30] Sayar, B., (2012). Determination of Stress Intensity Factors in Cracked Panels Reinforced with Riveted Stiffeners, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- [31] Turan, K. ve Kaman, M.O., (2010). "Tek Tesirli Yapıştırma Bağlantılarında İlerlemeli Hasar Analizi", *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16(3): 315-323.
- [32] Sadowski, T., Marsavina, L., Peride, N. ve Craciun, M., (2009). "Cracks Propagation and Interaction in an Orthotropic Elastic Material: Analytical and Numerical Methods", *Computational Materials Science*, 46: 687-693.
- [33] S. Aydın, M.Y. Solmaz ve A. Turgut., (2011) "Epoksi ve Akrilik Bazlı Yapıştırıcıların Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi", 6 th International Advanced Technologies Symposium, 16-18 Mayıs 2011, Elazığ.
- [34] Uğuz, A., (1996). Kırılma Mekaniğine Giriş, 1, Vipaş Yayın, İstanbul.
- [35] Matlab, Technical Support, <http://www.mathworks.com>, 29 Şubat 2016

MONO YAPIŞTIRMALI MODELLERDE, ÇATLAKLI LEVHADA MEYDANA GELEN σ_x ve σ_y NORMAL GERİLMELERİ

A-1 Araldite AV138M Mono Modelde Çatlaklı Levha σ_x ve σ_y Normal Gerilmeleri

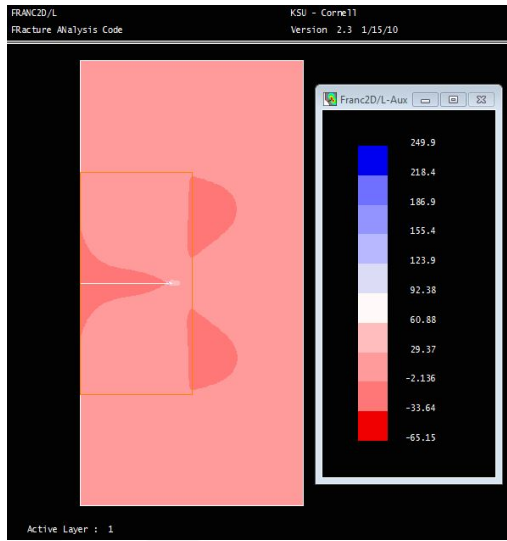


Araldite AV138M Mono Model Çatlaklı Levha σ_x Gerilmeleri



Araldite AV138M Mono Model Çatlaklı Levha σ_y Gerilmeleri

A-2 Araldite 2015 Mono Modelde Çatlaklı Levha σ_x ve σ_y Normal Gerilmeleri

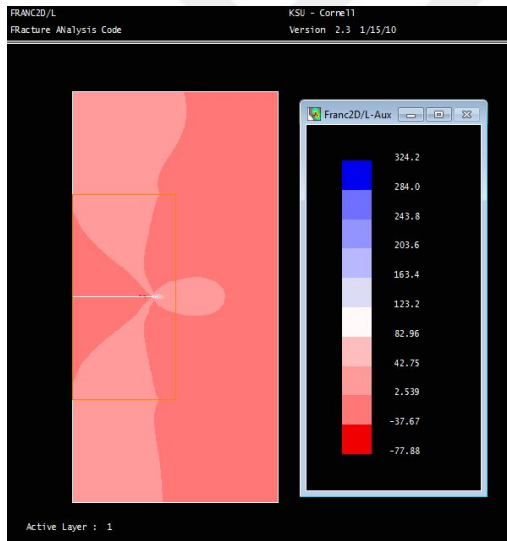


Araldite 2015 Mono Model Çatlaklı Levha σ_x Gerilmeleri

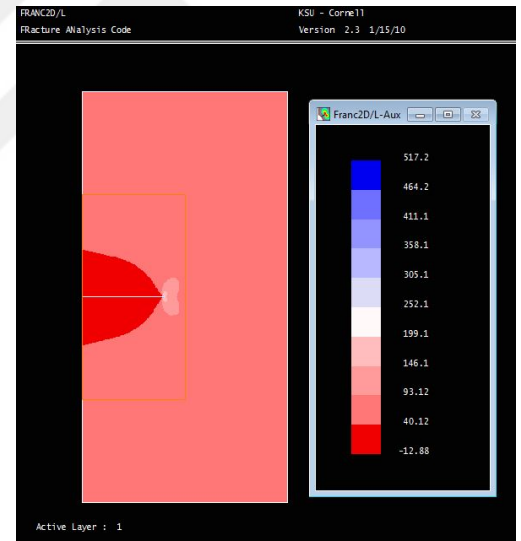


Araldite 2015 Mono Model Çatlaklı Levha σ_y Gerilmeleri

A-3 DP 8005 Mono Modelde Çatlaklı Levha σ_x ve σ_y Normal Gerilmeleri



DP 8005 Mono Model Çatlaklı Levha σ_x Gerilmeleri



DP 8005 Mono Model Çatlaklı Levha σ_y Gerilmeleri

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Mustafa ÇAY
Doğum Tarihi ve Yeri : 1984 - İstanbul
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : mucay67@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Makine Mühendisliği	Zonguldak Karaelmas Üniversitesi	2006
Lise	Fen Bilimleri	Nuri Cingilloğlu Süper Lisesi	2002

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2013-	Altınay Robot Teknolojileri A.Ş.	Mekanik Tasarım Mühendisi
2010-2013	Özarar Kaldırma Makinaları A.Ş.	Proje Mühendisi

YAYINLARI**Makale**

1. Özer,H. & Çay, M., (2015). "Effects of the Mono and Bi-Adhesive Bondlines on the Shear Stresses in a Cracked Plate Repaired by the Boron-Epoxy Patch", INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENERGY SYSTEMS ISTANBUL 2015 - ICES'15, 514-520.

ÖDÜLLERİ

1. Zonguldak Karaelmas Üni., Makine Müh. (II. Öğretim), Bölüm Birinciliği
2. Zonguldak Karaelmas Üni., Makine Müh. (II. Öğretim), Yüksek Onur Öğrencisi