

**T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YAPIŞTIRICI İLE KONİK VE ELİPTİK BİRLEŞTİRİLEN BAĞLANTILARIN
MEKANİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS

Ünal KOCA

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Şemsettin TEMİZ

NİSAN 2022

**T.C
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YAPIŞTIRICI İLE KONİK VE ELİPTİK BİRLEŞTİRİLEN BAĞLANTILARIN
MEKANİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS

**Ünal KOCA
(36183618025)**

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Şemsettin TEMİZ

NİSAN 2022

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının her aşamasında yardım, öneri, bilgi, tecrübe ve desteklerini esirgemedi beni her konuda yönlendiren danışman hocam Sayın Prof. Dr. Şemsettin TEMİZ'e,

Tüm eğitim hayatım boyunca yanımda olan ve desteklerini esirgemeyen Sayın Doç.Dr. Tarkan KOCA 'ya,

Tüm hayatım boyunca olduğu gibi bu çalışmalarım süresince beni her türlü destekleyen aileme,

teşekkür ederim.



ONUR SÖZÜ

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum “Yapıştırıcı ile Konik ve Eliptik Birleştirilen Bağlantıların Mekanik Davranışlarının İncelenmesi” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığına ve yararlandığım bütün kaynakların hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Ünal KOCA



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ	i
ONUR SÖZÜ.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
SEMBOLLER VE KISALTMALAR	ix
ÖZET	x
ABSTRACT	xi
1. GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti.....	3
2. YAPIŞTIRICILAR.....	8
2.1 Yapışma	8
2.1.1 Adezyon kuvvet.....	9
2.1.2 Kohezyon.....	9
2.2 Yapışma Teorileri.....	9
2.2.1 Mekanik kilitlenme teorisi.....	10
2.2.2 Elektrostatik teorisi.....	10
2.2.3 Adsorpsiyon teorisi.....	11
2.2.4 Difüzyon teorisi	11
2.3 Yapıştırıcı Çeşitleri.....	11
2.3.1 Kimyasal tipleri açısından yapıştırıcılar	12
2.3.2 Formları açısından yapıştırıcılar	12
2.4 Yapıştırma Özelliklerine Etki Eden Faktörler	12
2.5 Yapıştırma Bağlantılarının Avantajları ve Dezavantajları	13
2.5.1 Avantajları	13
2.5.2 Dezavantajları.....	13
2.6 Yapıştırma Bağlantı Çeşitleri	14
2.7 Yapıştırma Bağlantılarına Etki Eden Kuvvetler	14
2.8 Yapıştırma Bağlantılarında Meydana Gelen Hasar Türleri.....	15
2.9 Yapıştırıcıların Kırılma Enerjilerinin Belirlenmesi	16
2.9.1 Çatlak açılma deformasyon tipi (Mod-I)	17
2.9.2 Çatlak kayma deformasyon tipi (Mod-II).....	17
2.9.3 Çatlak yırtılma deformasyon tipi (Mod-III)	17
2.10 Sonlu Elemanlar Yöntemi	18
2.11 Cohesive Zone Model.....	18
2.12 ANSYS™ paket programı	19
3. MATERYAL VE YÖNTEM	20
3.1 Materyal.....	20
3.1.1 Analiz numunelerinin detayları	20
3.1.2 Materyallere ait mekanik özellikler.....	21
3.2 Nümerik Çalışma	23
3.3 Cohesive Zone Model ile Nümerik Analiz.....	25
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	28
4.1.1 Alüminyum Alaşımı-DP810 bağlantılarının nümerik analizi	29
4.1.1.1 Eliptik geometrilerin metalleri üzerinde oluşturulan P1 hattı boyunca gerilme dağılımları	29
4.1.1.2 Eliptik geometrilerin yapıştırıcıları üzerinde oluşturulan P2 hattı boyunca gerilme dağılımları	32

4.1.1.3 Konik geometrilerin metalleri üzerinde oluşturulan P1 hattı boyunca gerilme dağılımları	34
4.1.1.4 Konik geometrilerin yapıştırıcıları üzerinde oluşturulan P2 hattı boyunca gerilme dağılımları	36
4.1.2 Yapı çeliği-DP810 bağlantılarının nümerik analizi	39
4.1.2.1 Eliptik geometrilerin metalleri üzerinde oluşturulan P1 hattı boyunca gerilme dağılımları	39
4.1.2.2 Eliptik geometrilerin yapıştırıcıları üzerinde oluşturulan P2 hattı boyunca gerilme dağılımları	41
4.1.2.3 Konik geometrilerin metalleri üzerinde oluşturulan P1 hattı boyunca gerilme dağılımları	43
4.1.2.4 Konik geometrilerin yapıştırıcıları üzerinde oluşturulan P2 hattı boyunca gerilme dağılımları	46
4.1.3 Cohesive zone model (CZM) analiz sonuçları	48
4.1.3.1 Metal geometriler üzerinde oluşturulan P1 hattı için von Mises-Czm beq eşdeğer gerilme dağılımları	48
4.1.3.2 Yapıştırıcı geometriler üzerinde oluşturulan P2 hattı için von Mises-Czm beq eşdeğer gerilme dağılımları	51
4.1.3.3 Eliptik15 bağlantısının metal üzerinde oluşturulan P1 ve yapıştırıcı üzerinde oluşturulan P2 hattı için von Mises-Czm gerilme dağılımları.....	54
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	58
KAYNAKLAR	60
ÖZGEÇMİŞ	67

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 : Adezyon kuvvet teorileri	10
Çizelge 3.1 : Eliptik yüzey geometrilili bağlantıya ait ölçüler.....	20
Çizelge 3.2 : Konik yüzey geometrilili bağlantıya ait ölçüler.....	21
Çizelge 3.3 : Yapısal çelik ve Alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri.....	22
Çizelge 3.4 : Yapıştırıcının mekanik özellikleri	22
Çizelge 4.1 : Alüminyum Alaşımı-DP810 ve Yapısal Çelik- DP810 için hasar yükü değerleri.....	29



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 : Adezyon kuvveti ve Kohezyon kuvveti	9
Şekil 2.2 : Mekanik kilitlenme teorisi	10
Şekil 2.3 : Polimer metal ara yüzeyinde elektriksel bölge oluşumu	11
Şekil 2.4 : Yapıştırıcı (a) ve Malzeme (b) moleküllerinin difüzyonu	11
Şekil 2.5 : Yapıştırma bağlantı tipleri	14
Şekil 2.6 : Gerilme tipleri.....	15
Şekil 2.7 : Temel hasar tipleri	15
Şekil 2.8 : Irwin tarafından kırılma mekaniğinin çatlak açma modları.....	17
Şekil 2.9 : Yüke maruz, yapıştırıcıli bağlantılarda soyulma gerilmesinin etkisi	19
Şekil 3.1 : Eliptik yüzey geometrili bağlantının teknik resmi.....	20
Şekil 3.2 : Konik yüzey geometrili bağlantının teknik resmi.....	21
Şekil 3.3 : Eliptik yüzey geometrili bağlantının katı modeli.	21
Şekil 3.4 : Konik yüzey geometrili bağlantının katı modeli.	21
Şekil 3.5 : DP810 için (a) çekme gerilimi-gerinim eğrisi ve (b) kayma gerilimi-gerinim eğrisi	22
Şekil 3.6 : Modelin meshlenmiş hali.....	23
Şekil 3.7 : Modele uygulanan sınır şartları.	23
Şekil 3.8 : Tam model yapıştırıcıda meydana gelen gerilme durumu.....	24
Şekil 3.9 : Çeyrek model yapıştırıcıda meydana gelen gerilme durumu.	24
Şekil 3.10 : Çeyrek modelin meshlenmiş hali.....	24
Şekil 3.11 : Cohesive bölge modeli üçgen, üstel ve yamuk şekilleri.....	25
Şekil 3.12 : Cohesive zone malzeme modeli tanımlanması.	26
Şekil 3.13 : Gerçekleştirilen malzeme tanımlanması.....	26
Şekil 3.14 : Gerçekleştirilen 1. kontak işlemi.	27
Şekil 3.15 : Gerçekleştirilen 2. kontak işlemi.	27
Şekil 4.1 : Nümerik analizlerde incelenen gerilme hatları.....	28
Şekil 4.2 : Eliptik geo. P1 hattında σ_{eq} (MPa) eşdeğer gerilme dağılımları.....	30
Şekil 4.3 : Eliptik geo. P1 hattında σ_X (MPa) normal gerilme dağılımları.	30
Şekil 4.4 : Eliptik geo. P1 hattında σ_Y (MPa) eşdeğer gerilme dağılımları.....	30
Şekil 4.5 : Eliptik geo. P1 hattında σ_Z (MPa) normal gerilme dağılımları.	30
Şekil 4.6 : Eliptik geo. P1 hattında τ_{XY} (MPa) kayma gerilme dağılımları.....	31
Şekil 4.7 : Eliptik geo. P1 hattında τ_{XZ} (MPa) kayma gerilme dağılımları.	31
Şekil 4.8 : Eliptik geo. P1 hattında τ_{YZ} (MPa) kayma gerilme dağılımları.	31
Şekil 4.9 : Eliptik geo. P2 hattında σ_{eq} (MPa) eşdeğer gerilme dağılımları.....	32
Şekil 4.10 : Eliptik geo. P2 hattında σ_X (MPa) normal gerilme dağılımları.	32
Şekil 4.11 : Eliptik geo. P2 hattında σ_Y (MPa) eşdeğer gerilme dağılımları.....	32
Şekil 4.12 : Eliptik geo. P2 hattında σ_Z (MPa) normal gerilme dağılımları.....	32
Şekil 4.13 : Eliptik geo. P2 hattında τ_{XY} (MPa) kayma gerilme dağılımları.....	33
Şekil 4.14 : Eliptik geo. P2 hattında τ_{XZ} (MPa) kayma gerilme dağılımları.	33
Şekil 4.15 : Eliptik geo. P2 hattında τ_{YZ} (MPa) kayma gerilme dağılımları.	33
Şekil 4.16 : Konik geo. P1 hattında σ_{eq} (MPa) eşdeğer gerilme dağılımları.....	35
Şekil 4.17 : Konik geo. P1 hattında σ_X (MPa) normal gerilme dağılımları.	35
Şekil 4.18 : Konik geo. P1 hattında σ_Y (MPa) eşdeğer gerilme dağılımları.	35
Şekil 4.19 : Konik geo. P1 hattında σ_Z (MPa) normal gerilme dağılımları.....	35
Şekil 4.20 : Konik geo. P1 hattında τ_{XY} (MPa) kayma gerilme dağılımları.....	36
Şekil 4.21 : Konik geo. P1 hattında τ_{XZ} (MPa) kayma gerilme dağılımları.....	36
Şekil 4.22 : Konik geo. P1 hattında τ_{YZ} (MPa) kayma gerilme dağılımları.....	36

Şekil 4.23 : Konik geo. P2 hattında σ_{eq} (MPa) eşdeğer gerilme dağılımları.....	37
Şekil 4.24 : Konik geo. P2 hattında σ_X (MPa) normal gerilme dağılımları.	37
Şekil 4.25 : Konik geo. P2 hattında σ_Y (MPa) eşdeğer gerilme dağılımları.	37
Şekil 4.26 : Konik geo. P2 hattında σ_Z (MPa) normal gerilme dağılımları.....	37
Şekil 4.27 : Konik geo. P2 hattında τ_{XY} (MPa) kayma gerilme dağılımları.....	38
Şekil 4.28 : Konik geo. P2 hattında τ_{XZ} (MPa) kayma gerilme dağılımları.....	38
Şekil 4.29 : Konik geo. P2 hattında τ_{YZ} (MPa) kayma gerilme dağılımları.	38
Şekil 4.30 : Eliptik geo. P1 hattında σ_{eq} (MPa) eşdeğer gerilme dağılımları.....	39
Şekil 4.31 : Eliptik geo. P1 hattında σ_X (MPa) normal gerilme dağılımları.	39
Şekil 4.32 : Eliptik geo. P1 hattında σ_Y (MPa) eşdeğer gerilme dağılımları.....	40
Şekil 4.33 : Eliptik geo. P1 hattında σ_Z (MPa) normal gerilme dağılımları.....	40
Şekil 4.34 : Eliptik geo. P1 hattında τ_{XY} (MPa) kayma gerilme dağılımları.....	41
Şekil 4.35 : Eliptik geo. P1 hattında τ_{XZ} (MPa) kayma gerilme dağılımları.....	41
Şekil 4.36 : Eliptik geo. P1 hattında τ_{YZ} (MPa) kayma gerilme dağılımları.	41
Şekil 4.37 : Eliptik geo. P2 hattında σ_{eq} (MPa) eşdeğer gerilme dağılımları.....	42
Şekil 4.38 : Eliptik geo. P2 hattında σ_X (MPa) normal gerilme dağılımları.	42
Şekil 4.39 : Eliptik geo. P2 hattında σ_Y (MPa) eşdeğer gerilme dağılımları.....	42
Şekil 4.40 : Eliptik geo. P2 hattında σ_Z (MPa) normal gerilme dağılımları.....	42
Şekil 4.41 : Eliptik geo. P2 hattında τ_{XY} (MPa) kayma gerilme dağılımları.....	43
Şekil 4.42 : Eliptik geo. P2 hattında τ_{XZ} (MPa) kayma gerilme dağılımları.....	43
Şekil 4.43 : Eliptik geo. P2 hattında τ_{YZ} (MPa) kayma gerilme dağılımları.	43
Şekil 4.44 : Konik geo. P1 hattında σ_{eq} (MPa) eşdeğer gerilme dağılımları.....	44
Şekil 4.45 : Konik geo. P1 hattında σ_X (MPa) normal gerilme dağılımları.	44
Şekil 4.46 : Konik geo. P1 hattında σ_Y (MPa) eşdeğer gerilme dağılımları.	44
Şekil 4.47 : Konik geo. P1 hattında σ_Z (MPa) normal gerilme dağılımları.....	44
Şekil 4.48 : Konik geo. P1 hattında τ_{XY} (MPa) kayma gerilme dağılımları.....	45
Şekil 4.49 : Konik geo. P1 hattında τ_{XZ} (MPa) kayma gerilme dağılımları.	45
Şekil 4.50 : Konik geo. P1 hattında τ_{YZ} (MPa) kayma gerilme dağılımları.....	46
Şekil 4.51 : Konik geo. P2 hattında σ_{eq} (MPa) eşdeğer gerilme dağılımları.....	47
Şekil 4.52 : Konik geo. P2 hattında σ_X (MPa) normal gerilme dağılımları.	47
Şekil 4.53 : Konik geo. P2 hattında σ_Y (MPa) eşdeğer gerilme dağılımları.	47
Şekil 4.54 : Konik geo. P2 hattında σ_Z (MPa) normal gerilme dağılımları.....	47
Şekil 4.55 : Konik geo. P2 hattında τ_{XY} (MPa) kayma gerilme dağılımları.....	48
Şekil 4.56 : Konik geo. P2 hattında τ_{XZ} (MPa) kayma gerilme dağılımları.....	48
Şekil 4.57 : Konik geo. P2 hattında τ_{YZ} (MPa) kayma gerilme dağılımları.....	48
Şekil 4.58 : Düz geo. P1 hattının Vms-Czm σ_{eq} (MPa) gerilme dağılımları.....	49
Şekil 4.59 : EL10 geo. P1 hattının Vms-Czm σ_{eq} (MPa) gerilme dağılımları.....	49
Şekil 4.60 : EL12,5 geo. P1 hattının Vms-Czm σ_{eq} (MPa) gerilme dağılımları.....	49
Şekil 4.61 : EL15 geo. P1 hattının Vms-Czm σ_{eq} (MPa) gerilme dağılımları.....	49
Şekil 4.62 : EL17,5 geo. P1 hattının Vms-Czm σ_{eq} (MPa) gerilme dağılımları.....	50
Şekil 4.63 : EL20 geo. P1 hattının Vms-Czm σ_{eq} (MPa) gerilme dağılımları.....	50
Şekil 4.64 : Düz geo. P1 hattının Vms-Czm σ_{eq} (MPa) gerilme dağılımları.	50
Şekil 4.65 : Knk20 geo. P1 hattının Vms-Czm σ_{eq} (MPa) gerilme dağılımları.....	50
Şekil 4.66 : Knk40 geo. P1 hattının Vms-Czm σ_{eq} (MPa) gerilme dağılımları.....	51
Şekil 4.67 : Knk69 geo. P1 hattının Vms-Czm σ_{eq} (MPa) gerilme dağılımları.....	51
Şekil 4.68 : Knk90 geo. P1 hattının Vms-Czm σ_{eq} (MPa) gerilme dağılımları.....	51
Şekil 4.69 : Knk165 geo. P1 hattının Vms-Czm σ_{eq} (MPa) gerilme dağılımları.....	51
Şekil 4.70 : Düz geo. P2 hattının Vms-Czm σ_{eq} (MPa) gerilme dağılımları.	52
Şekil 4.71 : EL10 geo. P2 hattının Vms-Czm σ_{eq} (MPa) gerilme dağılımları.....	52
Şekil 4.72 : EL12,5 geo. P2 hattının Vms-Czm σ_{eq} (MPa) gerilme dağılımları.....	52

Şekil 4.73 : EL15 geo. P2 hattının Vms-Czm σ_{eq} (MPa) gerilme dağılımları.....	52
Şekil 4.74 : EL17,5 geo. P2 hattının Vms-Czm σ_{eq} (MPa) gerilme dağılımları.....	52
Şekil 4.75 : EL20 geo. P2 hattının Vms-Czm σ_{eq} (MPa) gerilme dağılımları.....	52
Şekil 4.76 : Düz geo. P2 hattının Vms-Czm σ_{eq} (MPa) gerilme dağılımları.....	53
Şekil 4.77 : Knk20 geo. P2 hattının Vms-Czm σ_{eq} (MPa) gerilme dağılımları.....	53
Şekil 4.78 : Knk40 geo. P2 hattının Vms-Czm σ_{eq} (MPa) gerilme dağılımları.....	53
Şekil 4.79 : Knk69 geo. P2 hattının Vms-Czm σ_{eq} (MPa) gerilme dağılımları.....	53
Şekil 4.80 : Knk90 geo. P2 hattının Vms-Czm σ_{eq} (MPa) gerilme dağılımları.....	54
Şekil 4.81 : Knk165 geo. P2 hattının Vms-Czm σ_{eq} (MPa) gerilme dağılımları.....	54
Şekil 4.82 : Eliptik15 geo. P1 hattının Vms-Czm σ_X (MPa) gerilme dağılımları.....	54
Şekil 4.83 : Eliptik15 geo. P2 hattının Vms-Czm σ_X (MPa) gerilme dağılımları.....	54
Şekil 4.84 : Eliptik15 geo. P1 hattının Vms-Czm σ_Y (MPa) gerilme dağılımları.....	55
Şekil 4.85 : Eliptik15 geo. P2 hattının Vms-Czm σ_Y (MPa) gerilme dağılımları.....	55
Şekil 4.86 : Eliptik15 geo. P1 hattının Vms-Czm σ_Z (MPa) gerilme dağılımları.....	55
Şekil 4.87 : Eliptik15 geo. P2 hattının Vms-Czm σ_Z (MPa) gerilme dağılımları.....	55
Şekil 4.88 : Eliptik15 geo. P1 hattının Vms-Czm σ_{XY} (MPa) gerilme dağılımları.....	56
Şekil 4.89 : Eliptik15 geo. P1 hattının Vms-Czm σ_{XZ} (MPa) gerilme dağılımları.....	56
Şekil 4.90 : Eliptik15 geo. P1 hattının Vms-Czm σ_{YZ} (MPa) gerilme dağılımları.....	56
Şekil 4.91 : Eliptik15 geo. P2 hattının Vms-Czm σ_{XY} (MPa) gerilme dağılımları.....	57
Şekil 4.92 : Eliptik15 geo. P2 hattının Vms-Czm σ_{XZ} (MPa) gerilme dağılımları.....	57
Şekil 4.93 : Eliptik15 geo. P2 hattının Vms-Czm σ_{YZ} (MPa) gerilme dağılımları.....	57

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

$\Delta L, L, S$	: Uzunluk
D	: Çap
B	: Açı
Y	: Kalınlık
σ_x	: X eksenindeki gerilmeler
σ_y	: Y eksenindeki gerilmeler
σ_z	: Z eksenindeki gerilmeler
C_{xy}	: XY düzlemindeki kayma gerilmeleri
C_{xz}	: XZ düzlemindeki kayma gerilmeleri
C_{yz}	: YZ düzlemindeki kayma gerilmeleri
σ_{eq}	: Eş değer gerilmeler
MPa	: Megapascal
N	: Newton
mm	: Milimetre
A	: Alan
R	: Yarıçap
P	: Hat
ε	: Şekil değişimi
GPa	: Gigapascal
AA	: Alüminyum
CZM	: Cohesive Zone Model
VMS	: von Mises
Kg	: Kilogram
γ	: Kayma açısı

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

YAPIŞTIRICI İLE KONİK VE ELİPTİK BİRLEŞTİRİLEN BAĞLANTILARIN MEKANİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

ÜNAL KOCA

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

67+XI sayfa

2022

Danışman: Prof. Dr. Şemsettin TEMİZ

Bu çalışmada yapıştırma bağlantılarının mukavemeti üzerine normal ve kayma gerilmelerinin etkilerini daha iyi anlamak üzere koniklik açısının ve eliptiklik yarıçapının değişimi ile ara yüzeyde oluşacak normal ve kayma gerilmelerinin değiştiği uç uca konik ve eliptik iki yapıştırma bağlantı geometrisi incelendi. Alüminyum ve yapı çeliği olmak üzere yapıştırılan iki malzeme farklı açılarda konik ve farklı eğrilik yarıçaplarında eliptik yapıştırma yüzeyleri DP810 yapısal yapıştırıcı kullanılarak elde edilen uç uca bağlantının (butt joint) sayısal analizi yapıldı. Analizlerde hem von Mises akma ve kırılma kriteri hem de Koheziv zone model hasar kriteri kullanılarak bağlantıların aynı yapışma yüzeylerine karşılık farklı açı ve eğrilik yarıçapları için hasar yükleri belirlendi. Ayrıca aynı yüke karşılık bütün yapışma yüzeyleri için gerilme dağılım grafikleri elde edilerek mukayeseleri yapıldı. Çalışmanın sonucunda eşdeğer gerilmeler mukayese edildiğinde Koheziv zone model kullanılarak elde edilen eş değer gerilmelerin daha yüksek olduğu gözlemlendi. Konik bağlantı geometrisinde açı ve çap değeri arttıkça bağlantının hasar yükleri artmış, eliptik bağlantı geometrisinde ise eğrilik yarıçapının artması ile önce azalmış sonra da artmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yapıştırma bağlantıları, Hasar analizi, Akma ve kırılma kriteri, Koheziv zone model

ABSTRACT

Master Thesis

INVESTIGATION OF THE MECHANICAL BEHAVIOR OF CONICAL AND ELLIPTICAL OF CONNECTIONS COMBINED WITH ADHESIVE

Ünal KOCA

Inonu University
Graduate School of Nature and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

67+XI sayfa

2022

Supervisor: Prof. Dr. Şemsettin TEMİZ

In this study, in order to better understand the effects of normal and shear stresses on the strength of adhesive joints, two end-to-end conical and elliptical adhesive joint geometries, in which the normal and shear stresses that will occur at the interface, change with the change of the taper angle and elliptical radius. Numerical analysis of the butt joint, obtained by using DP810 structural adhesive, has been performed on two bonded materials, aluminum and structural steel, with conical bonding surfaces at different angles and elliptical bonding surfaces with different radii of curvature. In the analyzes, failure loads were determined for the same adhesion surfaces of the joints, for the different angles and radii of curvature, using both the von Mises yield and fracture criterion and the cohesive zone model damage criterion. In addition, stress distribution graphs were obtained for all adhesion surfaces and the same load, and their comparisons were made. As a result of the study, when the equivalent stresses were compared, it was observed that the equivalent stresses obtained using the Cohesive zone model were higher. As the angle and diameter value increased in the conical joint geometry, the joint damage loads increased, and in the elliptical joint geometry, it first decreased and then increased with the increase in the radius of curvature.

Keywords: Adhesive joints, Failure analysis, Yield criteria, Cohesive zone model

1. GİRİŞ

Malzemelerin birleştirilerek farklı özelliklerinden faydalanılması günlük yaşamda ve endüstride uzun yıllardan beri gerçekleşmektedir. Gelişen teknolojiyle birlikte, üretilen yeni nesil ve karmaşık malzemelerin gelişmesi, imalat ve birleştirme tekniklerinin de gelişmesini gerektirmiştir. İmalat sanayinde plastik teknolojisinin gelişmesiyle birlikte, mekanik ve termal birleştirmelerin (cıvata, lehim, kaynak ve perçin vs.) konvansiyonel bağlantı tiplerine ek olarak yapıştırıcıların kullanım miktarı artış göstermektedir. Geçmiş yıllarda, daha az kuvvete maruz kalan ve daha az emniyet gerektiren günlük kullanım malzemelerinin imalatında kullanılan yapıştırıcılar, günümüzde daha fazla dayanımın gerektiği ve güvenliğin yüksek önem arz ettiği mühendislik alanlarında da artış gösteren bir şekilde kullanılmaktadır. Bununla birlikte imalat malzemelerinin gelişmesi, çeşitlerinin artması ve birleştirilmesiyle birlikte, birleştirme çeşitleri arasında yapıştırıcılar, ağırlığa minimum etkileri, farklı malzemelerin birleştirilmesi, sızdırmazlık, birlikte çalışan parçaların sürtünmesiyle gerçekleşecek fretting korozyonu ve farklı tür metallerin birleştirilmesiyle oluşacak galvanik korozyonu engellemesi, sönümleyebilme kabiliyeti gibi avantajlar sağladığından tercih edilmektedir.

Yapıştırıcı ile birleştirme tekniği, karmaşık, hibrit ve kompozit malzemeler gibi farklı kombinasyonlar içeren malzemeler de dâhil olmak üzere, metaller, seramikler ve polimerler gibi malzemelerin birleştirmelerinde de kullanımı hızlı şekilde artmaktadır[1-4].

Yapıştırıcılar, birleştirilmek istenen en az iki malzemenin yapıştırılarak birleştirilmesinde kullanılan, polyamide, epoxy, phenolic, silicon ve polyimide gibi malzemelerin kimyasal birleşiminden meydana gelen ve tasarım özelliklerini istenilen biçimde veren karışımdır[5].

Yapıştırma; mekanik, termal gibi birleştirmeler gibi endüstride kullanılmaya başlandıktan sonra, yapıştırma işleminin özelliklerini iyileştirmek amacıyla birçok alanda çalışma yapılmıştır[6].

Sıvı, toz, film, macun gibi uygulama öncesi, yapıştırıcılar farklı tip form yapısında olabilirler. Yapısal yapıştırıcılar, kimyasal reaksiyonlar sonucu sertleşen, yük taşıyabilen, hareket kabiliyeti yüksek, farklı ısı şartlarına uyum sağlayabilen, yüksek kayma mukavemeti altında özelliklerini koruyan yapıştırıcılardır. Havacılık ve uzay sanayinde, otomotiv ve

inşaat sektörleri, deniz taşıtları vb. birçok alanda yaygın bir kullanım alanına sahiptir. Siyanoakrilatlar, Anaerobikler, Epoksiler, Akrilikler, Poliüretanlar, Fenolikler ve Silikonlar günümüzde tercih edilen yapısal yapıştırıcılardır[7].

Yaygın kullanım alanı bulan yapısal yapıştırıcılar, güvenilirlik, mekanik özelliklerin belirlenmesi ve tekrar zorluğu ile tekniğin kabullenilmesi bakımından engel oluşturmıştır. Bu durum tasarımda istenilen mekanik özelliklerin araştırılması ve tespiti üzerine araştırmaların artmasına sebep olmuştur. Malzeme seçimi, hasar koşullarının belirlenmesi, kalite durumu ve yüklü halde gerilme dağılımı gibi yapıştırma bağlantısının tasarımını etkileyen faktörlerin belirlenmesinde, mekanik özelliklerin doğru biçimde tespiti oldukça önemlidir[8,9].

Bu sebeple yapıştırıcıların ve yapıştırma bağlantılarının geliştirilmesi, araştırılması ve mekanik özelliklerinin tespiti büyük önem kazanmıştır[4].

Bir sistemin tasarımı esnasında önemli parametrelerden enerji tasarrufu göz önüne alındığında, farklı çözümler ve yöntemler vardır. Enerji tasarrufu konusunda ilk olarak sistem ağırlığının azaltılması yöntemi akla gelir.

Bu sebeple sistemde bağlantısı gerçekleştirilecek parçaların bağlantısı için kullanılan perçin, cıvata, kaynak gibi tekniklerin yerini yapıştırıcıların alması sistemdeki ağırlığın büyük bir oranda azalmasına sebep olmuştur[10].

Yapıştırma işlemi sağladığı avantajlar neticesinde birçok alanda geleneksel birleştirme yöntemlerinin yerine kullanılmaktadır. Birçok makine parçası çevrimsel ve dinamik yükler altında çalışmaktadır. Bu sebepten en iyi dinamik dayanımın sağlanması için gerilme dalgalarının yapıştırıcı ve birleştirilen parçalarda yayılımı ve zamanla statik dayanımlarından daha az gerilmeler neticesinde yorulması ve yapıştırıcıda meydana gelen hasarın tespiti emniyet açısından çok büyük önem arz etmektedir[11,12].

Sağladığı avantajların yanı sıra yapıştırma ile gerçekleştirilen birleştirme tekniğini etkileyen parametreler katalizör, nem, sıcaklık, zaman, basınç, ultraviyole ışınlar, çözücü, metal yüzeyler ve bağlantı geometrisidir. Fakat doğrudan etkileyen unsurlarından birisi bağlantı geometrisidir. Geometrilere belirleyen parametreler; çalışma koşulları, materyaller ve yapıştırıcı materyal belirlemektedir[13,14].

Bu çalışmada yapıştırma bağlantıların mukavemeti üzerine normal ve kayma gerilmelerinin etkilerini daha iyi anlamak üzere koniklik açısının ve eliptiklik yarıçapının değişimi ile ara yüzeyde oluşacak normal ve kayma gerilmelerinin değiştiği uç uca konik

ve eliptik iki yapıştırma bağlantı geometrisi incelendi. Nümerik analiz için sonlu elemanlar yöntemi ile analizlerin yapıldığı ANSYS paket programı kullanılmıştır. Yapıştırıcı ile birleştirme tekniğinin mekanik ve dinamik davranışları üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Aşağıda literatürde yapılan bazı çalışmalara yer verilmiştir.

1.1 Literatür Özeti

Jeandrau (1991), sonlu elemanlar yöntemiyle farklı yapıştırma bağlantılarının çekme ve burulma yükleri altında plastik, elastik ve elastik-plastik gerilme dağılımlarını araştırmıştır[8].

Crocombe ve diğ. (1995), yapıştırıcı katmanındaki soyulma ve kayma gerilmelerini ifade eden diferansiyel denklemleri çözmüş ve elde ettikleri sonuçları, sonlu elemanlar yöntemi kullanarak elde ettikleri sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Sonrasında yaptıkları çalışmalarında ise, sonlu farklar ve sonlu elemanlar çözüm yöntemleri yardımıyla yapıştırma bağlantıları üzerinde elasto-plastik gerilme analizi yapmışlardır[15,16].

Vu Nguyen ve Kedward (2001), yaptıkları araştırmada, silindirik eğik alınlı yapıştırma bağlantılarında bağlantı verimini incelemişler. Araştırmalarında sonlu elemanlar metodu ve analitik olarak analiz etmişlerdir. Yapılan çalışmaları sonucunda eğik alınlı bağlantıların, düz alınlı bağlantılara göre daha düzgün bir gerilme davranışı olduğunu göstermişlerdir[17].

Haraga ve diğ. (2003), çalışmalarında kontrol panelinin montajında kaynakla birleştirme yönetimine başka bir seçenek olarak akrilik yapıştırıcıyı perçinle destekleyerek oluşturdukları birleştirme yöntemini kullanmışlardır. Kaynak işleminin kaldırılması çalışma ortamının daha iyi hale gelmesini sağlamıştır. Bu birleştirme tekniğiyle üretim daha yalın hale gelmiştir ve maliyetin azalması sağlanmıştır. Ve dahası toplam enerji tüketiminde %78, ince galvanizli çeliklerde %64, ön kaplamalı çeliklerde %51 azalmalara olanak sağlamıştır[18].

Şekercioğlu ve diğ. (2003), yapıştırıcı kullanarak oluşturdukları silindirik yapıştırma bağlantılarında, birleştirilen malzemelerin yüzey pürüzlüğünün bağlantı mukavemetine etkisini deneysel olarak incelemişlerdir[19].

Pungo ve Carpinteri (2003), eksenel yüke maruz boru yapıştırma bağlantılarında yapıştırıcı katmanındaki gerilme dağılımını araştırmışlardır. Yaptıkları gerilme analizi sonucunda,

kayma gerilmelerinin en yüksek olduğu bölgelerin yapıştırma bölgeleri kenarlarında oluştuğunu tespit etmişleridir[20].

Aydın (2003), çekme yüküne maruz basit bindirmeli bağlantılarda farklı malzeme kalınlıkları ve bindirme uzunluğu şartlarında yapılan bağlantıların mekanik özelliklerini esnek ve yüksek dayanımlı yapıştırıcı kullanarak sayısal ve deneysel olarak araştırmışlardır. Sonuç olarak esnek yapıştırıcının da yüksek malzeme kalınlığı ve bindirme mesafesinde dayanımı yüksek olan yapıştırıcının kullanıldığı bağlantılar kadar yük taşıyabildiği tespit edilmiştir[21].

Özel ve diğ. (2004), iki boyutlu sonlu elamanlar yöntemini kullanarak mekanik özellikleri farklı olan yapıştırma bağlantısında farklı eğilme momentine maruz bir basit bindirme bağlantısının elasto-plastik gerilme analizini gerçekleştirmişlerdir. Bu analizle birlikte basit bindirme bağlantısının performansı sonucunda geometrik etmenlerin etkilerini tespit edebilmek için 4 farklı yapıştırıcı kalınlığı ve her bir yapıştırıcı kalınlığı için 4 bindirme mesafesi kullanmışlardır. Elde edilen analiz sonuçlarını doğrulamak için sonlu elamanlar analiz sonuçları ile deneysel sonuçları kıyaslamışlardır. Sonuç olarak yapıştırıcı malzeme kalınlığının ve bindirme mesafesinin bağlantı mukavemeti üzerine etkin rol oynadığını göstermişlerdir[22].

Temiz ve diğ. (2005), film türü yapıştırıcı ile gerçekleştirdikleri tek etkili yapıştırma bağlantılarında, malzeme kalınlığı ve bindirme uzunluğu değişiminin bağlantı mukavemetine etkisini deneysel ve nümerik olarak incelemişlerdir. Yapılan analizler sonucunda bindirme uçlarındaki soyulma gerilmelerinin hasar oluşturmada önemli etkilerinin olduğu sonucuna ulaşmışlardır[23].

Nemes ve diğ. (2006), çekme yükü altındaki silindirik yapıştırma bağlantılarında gerilme dağılımını incelemek için analitik bir model geliştirmişlerdir. Araştırmacılar oluşturdukları bu model ile bağlantıdaki geometrik ve malzemelere ait bazı parametrelerin etkilerini incelemişlerdir[24].

Temiz (2006), AA2024-T3 alüminyum tabakaları çift takviyeli birleştirme yöntemiyle yapıştırarak dört nokta eğme yüklemesine tabi sonlu eleman analizini yapmıştır. Bağlantının bindirme uçlarında oluşan gerilme yığılmalarını düşürmek için farklı yapıştırma biçimini denemiş ve bağlantının uçlarına şekil değiştirebilme kabiliyeti yüksek esnek yapıştırıcı ve bağlantı ortalarına da sert yapıştırıcı konularak elde edilen bağlantının

tek tip yapıştırıcı ile yapılan bağlantıya göre yaklaşık olarak %50 civarında daha fazla yük taşıdığını saptamıştır[25].

Zou ve Taheri (2006), burulma yüküne maruz silindirik yapıştırma bağlantılarında, malzeme, boru et kalınlığı, yapıştırıcı türü gibi etmenlerin etkilerini incelemek için analitik bir model oluşturmuşlardır. Geliştirilen modelde, yapışma bölgesi uç kısımlarındaki gerilme yığılması; bindirme mesafesi, malzeme kalınlığı, yapıştırıcı özelliği gibi etmenlerin fonksiyonu olarak hesaplanmıştır[26].

Fekirini ve diğ. (2007), yüzeyinde çatlak olan bir levhanın tamirini gerçekleştirmek için farklı kayma modüllerine (G) sahip olan iki yapıştırıcı ile sonlu elemanlar yöntemiyle analiz yapmışlardır. Birinci yapıştırıcının gerilme transferini gerçekleştirmesi hedeflenmiş ve bu yüzden çatlak olan bölgeye uygulanmış, ikinciyle ise birinci yapıştırıcının hasar alamaması için hasar olmayan bölgeye uygulanmıştır. Bu araştırma sonucunda çatlak oluşan uç ve çatlak yüzeyinde yorulma ömrünün yüksek düzeyde iyileştiği görülmüştür[27].

Sen ve diğ. (2008), çift örtü kullanılarak yapıştırılmış metal levhalarda sıcaklık sebebiyle oluşan ısıl gerilmeleri incelemiştir. Sonlu elemanlar çözüm yönteminden faydalanılmıştır[28].

Solmaz (2008), farklı bindirme boyları ve uç açıları, yüksek ve düşük mukavemetli iki farklı özellikteki yapıştırıcının çekme yüküne maruz tek etkili bindirme bağlantılarının mekanik özelliklerini deneysel ve nümerik olarak incelemiştir. Bulunan sonuçlar ışığında bindirme boyundaki artış ve uç açısında gerçekleştirilen değişim ile düşük dayanımlı yapıştırıcıyla oluşturulan bağlantılarında yüksek dayanımlı kullanılarak oluşturan bağlantılar kadar yük taşıyabildiği ortaya çıkmıştır[29].

Aldaş ve diğ. (2009), epoksi tipi yapıştırıcı yardımıyla yapıştırılmış ince metal tabakalara uygulanmış çift bindirme bağlantısında oluşan ısıl gerilmeleri araştırmışlardır. Analiz için, sonlu elemanlar çözüm yönteminden faydalanılmıştır[30].

Esmael ve Taheri (2009), yaptıkları çalışmada sonlu elemanlar yöntemi ile delaminasyon etkisini araştırmak için, kompozit ve alüminyum malzemeler ile silindirik yapıştırma bağlantısı oluşturmuşlardır. Bu çalışma ile tabaka içerisinde gerçekleşen ayrılmaların yapıştırıcı katmanında gerilme dağılımını etkilediği sonucuna ulaşmışlardır[31].

Nemes ve Lachaud (2010), çift bindirmeli yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların, mekanik özelliklerini incelemiştir. Bindirme uzunluğundaki artışın yapıştırıcıda

meydana gelen maksimum kayma gerilmesinin şiddetine etkisinin olmadığını, bu uzunluğun ortalarına doğru kayma gerilmesi değerinde azalma meydana geldiği ve kayma gerilmesinin en yüksek değerine bağlantının uç bölgelerinde ulaştığı sonucuna varmışlardır[32].

Lyon (2010), yapıştırma bağlantılarında iki boyutlu, simetrik, lineer elastik bölgede kullanılabilecek sonlu elemanlar modeli oluşturmuştur. Yaptığı analizler sonucunda bağlantı dayanımını yapıştırma bölgesi mesafesi, malzeme kalınlığı ve geometrik birçok etmenin etkilediğini göstermiştir[33].

Kumar ve Pandey (2010), çift yapıştırıcı kullanarak birleştirilen çekme yükü altında tek tesirli bindirme bağlantısını düzlem şekil değiştirme ve 3 boyutlu sonlu eleman yöntemiyle modelleyip gerilme davranışlarının sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Yapılan analizler sonucunda 2 boyutta gerilme analizinde ihmal edilen kayma gerilmelerin, ihmal edilemeyecek düzeyde oldukları sonucuna ulaşmışlardır[34].

Lee ve diğ. (2010), yapıştırıcının kullanılan bağlantıda uygun koşulların oluşması için yapıştırıcının mekanik özelliklerinin tek başına bilinmesinin yeterli olmadığına ve yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme arasındaki ara yüz davranışının bilinmesi gerektiğine inanmaktadırlar. Geniş bir uygulama yelpazesine sahip yapışkan bölge (cohesive zone) sayısal modelini kullanarak sayısal ve deneysel çalışmalar yapmışlardır[35].

Aydın ve diğ. (2011), epoksi ve akrilik bazlı yapıştırıcıların mekanik özelliklerini tespit etmek amacıyla, yapıştırıcıların gerilme-şekil değiştirme davranışlarını incelemişlerdir. Yapılan araştırmada, gerilme-şekil değiştirme durumları doğrusal özellik gösteren Akfix E300, Devcon A, ve Erde GTS isimli yapıştırıcıların yanı sıra, Erde GTR isimli yapıştırıcı türü doğrusal olmayan özellik gösterdiği gözlemlenmiştir. Gerilme-şekil değiştirme davranışı doğrusal özellik göstermeyen akrilik bazlı bu yapıştırıcı türü, diğer yapıştırıcı türlerinden şekil değiştirme oranı yaklaşık % 0.085 değerinden daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir[36].

Solmaz ve Turgut (2011), tek tesirli bindirme bağlantılarında bindirme uzunluğu ve bindirme uç açısı değişikliğinin bağlantı mukavemetine etkisini yaptıkları deneysel ve sayısal çalışmada araştırmışlardır. Sonuç olarak, bindirme mesafesinin artışı ve uç açısı artışının bağlantı dayanımını arttırdığını göstermişlerdir[37].

Xu ve Wei (2013), cohesive zone model kullanılarak, yapıştırıcı kalınlığının metal bağlantıların yapışması üzerindeki etkisi araştırmışlardır. Sonuçlar, hem bağlantı

mukavemetinin hem de yapışkan özelliklerinin büyük ölçüde yapışkanın kalınlığına bağlı olduğunu göstermektedir[38]

Kumar ve Khan (2016), çekme yüküne maruz bırakılmış silindirik geometrideki yapıştırma bölgesi bağlantılarda yapıştırma bölgesinde meydana gelen gerilme davranışını bir analitik model geliştirerek araştırmışlardır. Analitik model üzerinden alınacak sonuçları karşılaştırmak amacıyla sonlu elemanlar metodu ile analizler yapmışlardır. Sonuçta her iki çalışmanın uyumlu olduğunu tespit etmişlerdir[39].

Noda ve diğ. (2018), çekme yüküne maruz bırakılmış silindirik ve plaka şeklinde geliştirilen alın yapıştırma bağlantılarında hasar davranışlarını analitik ve nümerik olarak incelemişlerdir. Sonuç olarak, tekil gerilme yoğunluğu bölgesinin yapıştırma bağlantı mukavemetinde etkili olduğu ortaya çıkmıştır[40].

Hasheminia ve diğ. (2019), farklı özellikteki malzemeleri kullanarak geliştirdikleri tek tesirli yapıştırma bağlantılarında bağlantı dayanımını etkileyen faktörleri deneysel ve nümerik olarak araştırmışlardır[41].

Redya ve diğ. (2019), aynı ve farklı tür malzemeleri kullanarak, basit bindirme bağlantılarında deneysel ve nümerik hasar analizini araştırmışlardır. Yapılan deneylerde aynı tip malzemelerde hasarın yapıştırıcı tabakasında, farklı tip malzemelerde hasarın yapıştırıcı malzeme ara katmanında meydana geldiğini tespit etmişlerdir[42].

2. YAPIŞTIRICILAR

Genel olarak yapıştırma işlemi, aynı veya farklı iki tür materyalin birbirinden ayrılmayacak şekilde metalik olmayan başka bir materyal ile birleştirilmesi şeklinde tarif edilebilir. İki malzemenin birleşiminde kullanılan bu ara malzeme yapıştırıcı olarak ifade edilebilir.

Adams ve Wake, yapıştırıcıyı tanımlarken, uygulanan yüzeylerin ayrılmamasını sağlayan ve ayrılmaya karşı direnç gösteren polimerik birer malzeme olarak ifade etmişlerdir[43]. M.Ö. 4000 yıllarında kullanılan yapıştırıcılar, yapılan arkeolojik çalışmalar ışığında, insanların eski tarihlerde çömleklerini ağaç reçinesi ile birleştirdiklerini göstermiştir. Yapıştırıcılar, 1700’lü yıllarda daha yaygın kullanılmaya başlanmıştır. 1930’ları geride bırakan yıllarda ise doğal yapıştırıcılar yeterli gelmediğinden, sentetik reçinelerden yapılan yapıştırıcılar kullanılmaya başlanmıştır. İlk örneği, ağaçların birleştirilmesinde ve kontrplak üretiminde kullanılmış olan fenol formaldehidtir. Bu ürünler metallerin üzerinde kullanılmayacak kadar sert olduğundan bu alanda yeni çalışmaların başlamasına neden olmuştur. Sonuç olarak epoksi yapıştırıcılar kullanılmaya başlanmıştır. Epoksi yapıştırıcıların, 2.Dünya Savaşı sırasında uçak sanayinde kullanılmış olması örnek gösterilebilir[44].

2.1 Yapışma

Yapıştırılmak istenen parçaların yüzeylerine 0,1 ile 0,3mm arasında ince bir katman şeklinde sürülen yapıştırıcının kimyasal reaksiyonlar sonucunda makro moleküllerin oluşması ve sertleşme gerçekleşmektedir. Bu olay sonucunda parça-yapıştırıcı arasında bulunan yüzeyde adezyon kuvvetleri ve yapıştırıcı molekülleri arasında kohezyon kuvvetlerinin oluşması ile dış kuvvetlerin karşılanabilmesini sağlar. Bağlantının dayanımını arttırmak için adezyon kuvveti büyük değildir. Bu işlem yapıştırıcının uygulanacağı yüzeye iyice yayılması ile gerçekleşir. Bu sebeple yüzeyin yapıştırma öncesinde ön hazırlık görmesi gerekmektedir[45].

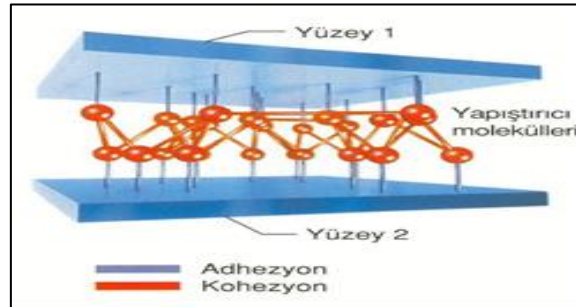
2.1.1 Adezyon kuvvet

İki maddenin temas ettikleri yüzeyde gerçekleşen yapışma kuvveti adezyon kuvvetidir. Yapışmada en önemli faktörler, Van der Waals kuvvetleri ismi verilen çekim ve yüzeye tutunma fiziksel kuvvetleridir. Yapıştırılacak malzemelerin mekanik üretim aşamalarından sonra yüzeylerindeki pürüzlü yapılarından dolayı yüzeylere temas düzeyi yetersiz olacaktır ve moleküller arası Van der Waals kuvvetleri düşük kalacaktır. Van der Waals kuvvetlerinin düşük kalmaması için, yapıştırıcının yüzeye tam olarak nüfuz etmesi ve bütün yüzeyi ıslatması gereklidir. Yapıştırmanın kuvveti yüzeydeki temas düzeyi, yanında yüzeyin yapışma yeteneğine bağlıdır. Yapıştırıcıdaki yüzey gerilmeleri, ıslatmaya, yapıştırılan malzemenin yüzey gerilimine ve yapıştırıcının viskozitesine bağlıdır. Yüzeyde kirlerin olması ıslatmayı olumsuz etkileyeceğinden yapışma işlemi olumsuz etkilenir[46].

2.1.2 Kohezyon

Kohezyon, yapıştırıcı molekülleri içerisinde mevcut olan ve yapıştırıcıyı bir arada tutmayı sağlayan kuvvettir[29]. Adezyon kuvveti ve kohezyon kuvveti Şekil 2.1’de şematik olarak verilmiştir. Kohezyona etki eden kuvvetler;

- Moleküller arası çekme kuvvetleri (Van der Waals kuvvetleri),
- Polimer moleküllerinin kendi aralarında sıkı şekilde bağlanması[47].



Şekil 2.1 : Adezyon kuvveti ve Kohezyon kuvveti[46].

2.2 Yapışma Teorileri

Günümüze kadar yapışma mekanizmasını açıklamak adına bilim insanları yaklaşık olarak kırk teori üzerinde durmuşlardır. Teoriler genel olarak, moleküler, mikroskobik ve makroskobik düzeydeki kavramları esas almışlardır. Bu bölümde teorilerden en kapsamlı dördü ele alınacaktır. Teorilerin hiçbirisi yapışma mekanizmasının bütün yönlerini tek başına açıklayamaz. Ama bağlantının bir özelliğini açıklamak için bir yâda birkaç teoriden

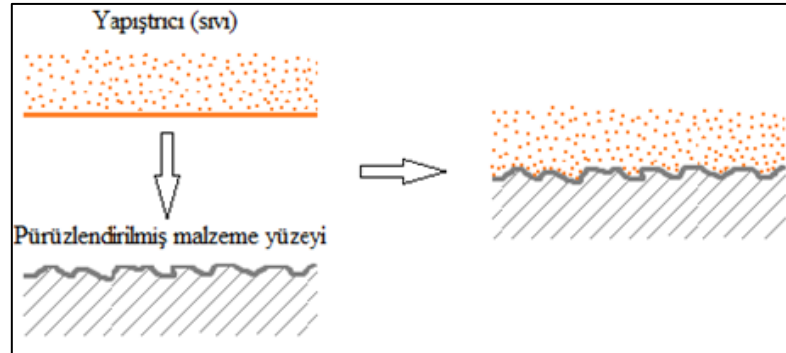
faýdalanılabılır[10]. Çizelge 2.1’de adezyon kuvvet teorileri ve hangi düzeyde gerçekleştikleri verilmiştir.

Çizelge 2.1 : Adezyon kuvvet teorileri [48].

Geleneksel teoriler	Geçerli teoriler	Eylem ölçeği
Mekanik kilitlenme	Mekanik kilitlenme	Mikroskobik
Elektrostatik	Elektrostatik	Makroskobik
Difüzyon	Difüzyon	Moleküler
Fiziksel adsorbsiyon	Islama bilirlilik	Moleküler
	Kimyasal bağlar	Atomik
	Zayıf sınır tabakası	Moleküler

2.2.1 Mekanik kilitlenme teorisi

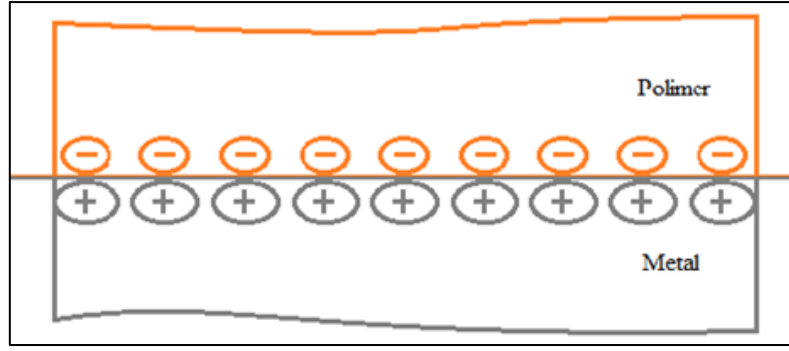
Mekanik kilitlenme, katı yüzey üzerine uygulanan yapıştırıcının, yüzey üzerinde bulunan boşluk ve gözeneklere nüfuz ederek gerçekleşir ve iyi bir yapışma meydana gelir[49]. Şekil 2.2’de yapıştırıcının katı üzerindeki gözenekleri doldurarak mekanik kilitlenmeyi meydana getirdiği görülmektedir. Yapıştırıcı uygulanacak yüzeyin pürüzlendirilmesi yağ, pas vb. kirlerden, oksitlerden temizlenmiş bir reaktif yüzey oluşturacağından ve pürüzler sayesinde genişleyen temas alanı sayesinde bağlantı dayanımının artacağı düşünülmektedir[50]. Fakat pürüzlülüğün gereğinden fazla artmasıyla, yapıştırıcı katman kalınlığı artmakta ve yapıştırıcının malzeme yüzeyine tam olarak yayılamaması bağlantı mukavemetinde azalmalar meydana getirmektedir[19,51,52].



Şekil 2.2 : Mekanik kilitlenme teorisi[53].

2.2.2 Elektrostatik teorisi

Yapıştırıcı ve yapıştırılan malzeme yüzeyleri arasındaki elektrostatik kuvvet etkileri sonucunda yapışmanın meydana geldiği savunulmaktadır[54]. Bu teori, metalik ve polimer malzemeler gibi birbiriyle uyumlu olmayan malzemeler için uygundur[53]. Şekil 2.3’de yapıştırıcı ile yapıştırıcı uygulanan yüzey arasındaki elektriksel bölge gösterilmiştir.



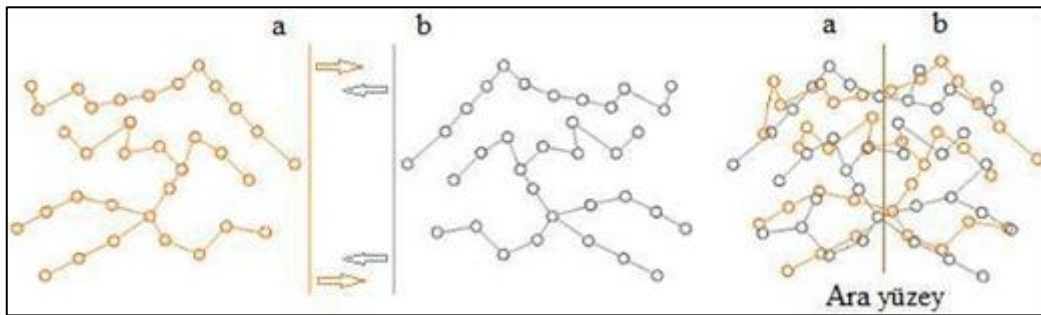
Şekil 2.3 : Polimer metal ara yüzeyinde elektriksel bölge oluşumu[55].

2.2.3 Adsorpsiyon teorisi

Yapıştırıcı uygulanan yüzeyin ile yapıştırıcı arasında uygun bir temas sağlanması koşuluyla ara yüzeyde atomlar ve moleküller arası kuvvetlerin meydana gelmesi sonucu yapışmanın oluştuğunu ileri sürer. Bu teori, halen en fazla kabul gören uygulanabilir bir teodir[56]. Bu teori, Sharpe ve Schornhorn tarafından geliştirilmiştir[57].

2.2.4 Difüzyon teorisi

Difüzyon teorisi, mekanik kilitlenme teorisine benzer ama difüzyon teorisi moleküler düzeydedir. Yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemenin moleküler düzeyde birbiri içerisinde difüze olmasıyla yapışma gerçekleşir[58]. Bu teori, uzun zincirli moleküler yapıda olan polimer malzemelerde geçerlidir. Malzeme moleküllerinin arasında kimyasal uyumluluk gerekir. Bu sebeplerden ötürü, sınırlı şekillerde geçerlidir[59]. Şekil 2.4’de difüzyon durumu görülmektedir.



Şekil 2.4 : Yapıştırıcı (a) ve Malzeme (b) moleküllerinin difüzyonu[55].

2.3 Yapıştırıcı Çeşitleri

Yapıştırıcılar özellikleri bakımından aşağıdaki gibi sınıflandırılabilirler[60].

- Kimyasal türleri bakımından yapıştırıcılar
- Fiziksel formları bakımından yapıştırıcılar

2.3.1 Kimyasal tipleri açısından yapıştırıcılar

Bu yapıştırıcılar iki gruba ayrılabilirler[61].

- Kimyasal reaksiyon ile sertleşen yapıştırıcılar
- Fiziksel değişim ile sertleşen yapıştırıcılar

Moleküller arasında gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar sonucunda katılaştıran yapıştırıcılara, yapısal yapıştırıcılar denilmektedir. Bu yapıştırıcılar, yük taşıyabilen, ısıya dirençli, esnek, kayma mukavemeti yüksek değerlere ulaşabilen yapıştırıcılardır. Bu yapıştırıcılar havacılık ve uzay endüstrisi, otomotiv endüstrisi, deniz taşıtları vb. çoğu alanda kullanılmaktadır[60].

Yapısal yapıştırıcıların en çok kullanılan çeşitleri aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir;

Akrilikler, Epoksiler, Anaerobikler, Poliüretanlar, Silikonlar, Fenolikler, Siyanoakrilikler

2.3.2 Formları açısından yapıştırıcılar

Yapıştırıcı formunu çevre koşulları, imalat ve malzeme gibi faktörler belirler. Formlarına göre yapıştırıcılar aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir;

1. Macun tipi yapıştırıcı
2. Film tipi yapıştırıcı
3. Düşük viskoziteye sahip yapıştırıcı
4. Düşük yoğunluğa sahip yapıştırıcı
5. Reçineler
6. Köpükler

2.4 Yapıştırma Özelliklerine Etki Eden Faktörler

Fiziksel ve kimyasal nedenlerden dolayı yapıştırıcı malzemenin içerisinde bulunan polimerik maddeler yapışmayı oluşturmaktadır[62]. Bu faktörler;

- Yüzey pürüzlülüğü,
- Yapıştırma kalınlığı,
- Zaman,
- Sıcaklık,

Bu faktörlerin tek başlarına yâda birleşik etkileri yapıştırma işleminin başarımında önemli rol almaktadır. Bu faktörler tüm yapıştırıcı türlerini etkiler ve farklılık gösterebilir[63].

2.5 Yapıştırma Bağlantılarının Avantajları ve Dezavantajları

2.5.1 Avantajları

Yapıştırma bağlantılarının avantaj ve dezavantajları üzerine yapılan çalışmalardan biri, yapıştırma bağlantılarının avantaj ve dezavantajları hakkında aşağıdaki ifadeleri belirtmiştir [64].

- Farklı malzeme türleri birleştirilebilir,
- Düzgün gerilme dağılımı elde edilir,
- Malzeme özellikleri bozulmaz,
- Sızdırmazlık elemanı olarak kullanılabilir,
- İnce metal parçalar iyi bir şekilde birleştirebilir,
- Bağlantılara çok iyi dinamik-yorulma direnci sağlar,
- Maliyet bakımından uygun bir tekniktir,
- Farklı ve karmaşık geometriye sahip parçaları birleştirebilir,
- Daha pürüzsüz yüzeyler elde edilir,
- Ağırlığı azaltır,
- Titreşimi sönümler.

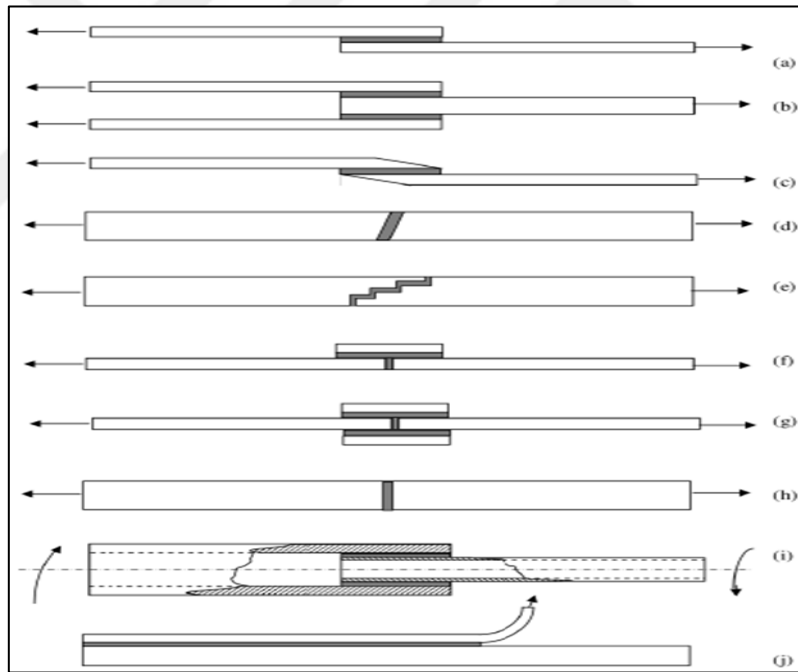
2.5.2 Dezavantajları

- Yapıştırma işlemi esnasında yapılan hatalar sonucunda optimum yapıştırma yüzeyi elde edilemez ve dolayısıyla yapıştırma bağlantısının mukavemetinde azalmalar meydana gelir.
- Yapıştırılacak yüzeylerin temizlenme ve pürüzlendirilme gibi ön hazırlıklar gerektirmesi,
- Yapıştırıcının mekanik özelliklerinin zaman ve sıcaklığa bağlı olması,
- Darbe mukavemeti ve soyulma direnci düşük olması,
- Çevresel faktörlerin yapıştırma bağlantısı ömrünü etkilemesi,

- Sertleşme süreleri sebebiyle ile elverişli birleşme dayanımının kolay ve pratik olmaması.

2.6 Yapıştırma Bağlantı Çeşitleri

Yapıştırma bağlantılarının kullanılacak bölgedeki yükleri taşıyabilmesi ve mekanik özelliklere sahip olması için bazı koşulların gerekliliği söz konusudur. Yapıştırıcı türü, yüzey kalitesi, yüzey hazırlama, yapıştırıcı kalınlığı gibi faktörler dikkate alınarak tasarım gerçekleştirilir. Yapıştırma bağlantılarını gerçekleştirecek yük ve gerilmeleri gözardı etmeden tasarlamak gerekir[61]. Şekil 2.5’de mühendislikte kullanılan başlıca yapıştırma bağlantı tipleri verilmiştir. Bunlar, (a) Tek taraflı bindirme bağlantısı, (b) Çift taraflı bindirme bağlantısı, (c) Pahlı bindirme bağlantısı, (d) Açılı bindirme bağlantısı, (e) Kademeli bağlantı, (f) Tek taraflı takviyeli alın bağlantısı, (g) Çift taraflı takviyeli alın bağlantısı, (h) Alın bağlantısı, (i) Silindirik bindirmeli bağlantı, (j) Soyulma

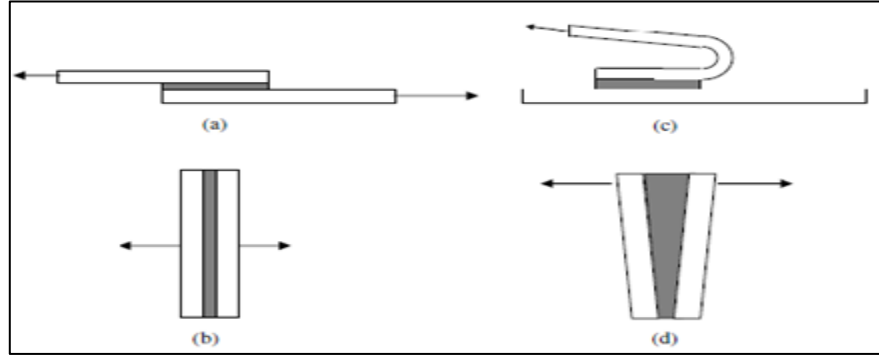


Şekil 2.5 : Yapıştırma bağlantı tipleri[65].

2.7 Yapıştırma Bağlantılarına Etki Eden Kuvvetler

Yapıştırma bağlantılarına etki eden dört önemli gerilme durumu söz konusudur. Bu gerilmeler, çekme, çekme-makaslama (cleavage), soyulma (peel), kesmedir. Bu gerilmeler göz önüne alınarak yapılacak tasarımlarla, yapıştırma bağlantı mukavemeti olabilecek en iyi düzeyde gerçekleştirilebilir. Bundan dolayı oldukça önemlidir. Şekil 2.6’da yapıştırma

bağlantılarında etkili olan (a) Kesme, (b) Çekme, (c) Soyulma, (d) Çekme-makaslama, dört önemli gerilme durumu verilmiştir[10].



Şekil 2.6 : Gerilme tipleri[10].

2.8 Yapıştırma Bağlantılarında Meydana Gelen Hasar Türleri

Yapıştırıcının farklı uygulama ve yük koşullarında mekanik özelliklerinin tam olarak anlaşılabilmesi ve hasar çeşitlerinin sınıflandırılabilmesi için temel hasar modellerinin belirlenmesi gereklidir. Yapıştırma bağlantılarında genel itibariyle iki tür hasar modeli ile (adezyon ve kohezyon hasarı) karşılaşılır[66]. Temel hasar türleri Şekil 2.7’de gösterilmiştir.

	Hasar Tipleri	Tanımlanma Şekli
Yapıştırılan malzemede meydana gelen hasarlar	 Yapıştırılan malzemelerin biri veya ikisinde de hasarın oluşması	YH
	 Kohesiv yapıştırılan malzeme hasarı	KYH
	 Kalkma (Deleminasyon) yoluyla hasar	DH
Yapıştırıcıda meydana gelen hasarlar	 Kohезyon hasarı	KH
	 Özel kohezyon hasarı	ÖKH
	 Adezyon hasarı	AH

Şekil 2.7 : Temel hasar tipleri[66].

2.9 Yapıştırıcıların Kırılma Enerjilerinin Belirlenmesi

Kırılma, gerilme altındaki bir malzemenin iki veya daha fazla parçaya ayrılmasıdır. Katı cisimlerin kırılması genellikle katı cisim içindeki belirli yer değişimi süreksizlik yüzeylerinin oluşmasından kaynaklanır.

Yer değiştirme, yer değişim yüzeyine dikey olarak oluşursa bir çekme çatlak veya çatlak olarak isimlendirilir. Eğer yer değişim yüzeyine teğetsel olarak oluşursa, çıkık, kayma çatlak veya kayma bandı olarak isimlendirilir[67].

Kırılma mekaniği, büyük ölçüde tam kırılmayla tespit edilen hasarları incelemektedir. Bu alandaki ilk başarılı çalışma 1921 yılında Griffith tarafından yapılmıştır. Griffith, camlardaki gevrek çatlakların ilerleyişini gözlemlemiştir. Griffith, oldukça basit bir enerji dengesi sunarak, halihazırda oluşmuş bir çatlak nasıl yayıldığını formüle etmeyi başarmıştır. Sistemdeki elastik şekil değiştirme enerjisi, çatlak ilerledikçe azalma eğilimindedir ve bu enerji, kırılma yüzeyinin ortaya çıkması için gereken enerjidir[67].

Griffith ve diğerleri (1921), metalik malzemelerin gevrek kırılmasına da uygulanmıştır. Griffith, kalıcı deformasyonun her malzemeye özgü sabit bir değer olarak bağıntıya dahil edilemeyeceğinden, bağıntı metallerde doğrudan kullanılamaz[68].

Irwin ve diğerleri, Griffith'in kriterlerinden hareketle (1950), metalik malzemelerin kırılma ilkesini geliştirmeyi başarmıştır. Lineer elastik kırılma mekaniğinin (LEKM) geliştirilmesine öncülük etmiştir. Buna ek olarak, gerilme şiddet faktörü yaklaşımı ile yürütülen çalışmalar, yorulma çatlakları ilerlemesi ve gerilmeli korozyon çatlama gibi kritik altı çatlaklara duyarlılığı bir dereceye kadar tahmin etmeyi mümkün kılmıştır[69].

Malzemenin yükleme koşullarına bağlı olarak malzemenin mevcut kırılma enerjisi üç şekilde belirlenir.

Bunlar;

Mod-I –Çekme Modu (Açılma modu)

Mod-II – Kesme Modu (Düzlem içi kayma modu)

Mod-III – Yırtma Modu (Düzlem dışı kayma modu)

2.9.1 Çatlak açılma deformasyon tipi (Mod-I)

Mod-I geriliminin normal bileşeni, çatlak yüzeyine dik olacak şekilde y eksenı yönünde etki göstermektedir. Bu noktada boyutsuz şekil düzeltme faktörü tespit edilir ve çatlakın şekline göre değişir[67].

2.9.2 Çatlak kayma deformasyon tipi (Mod-II)

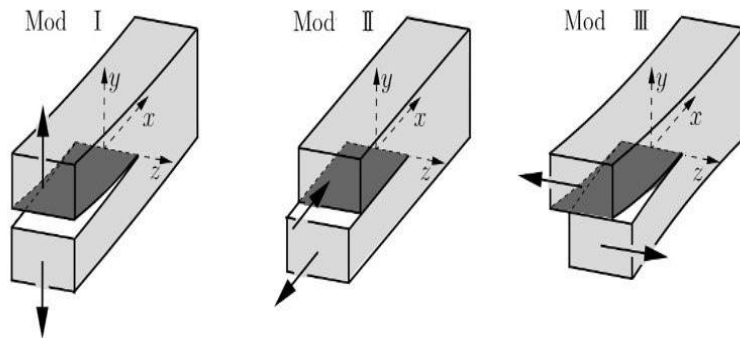
Mod-II geriliminin kayma bileşeni, x eksenı boyunca çatlaklara etki eder. Kuvvet çatlakla paralel olduğundan, bir kuvvet çatlakın üst yarısını geri iter ve diğer kuvvet çatlakın alt yarısını aynı hat boyunca ileri doğru çeker. Bu, doğal olarak kayan kesme çatlakları oluşturur[67].

2.9.3 Çatlak yırtılma deformasyon tipi (Mod-III)

Mod-III'de, geriliminin kayma bileşeni, çatlakın uç kenarına veya ön kısmına paralel olarak z eksenı yönünde hareket eder. (Çatlak ön-arka istikamettedir ve kuvvet sağdan ve soldan çekilir).

Bu, malzemeyi ayırır ve orijinal düzleminin dışına çıkmasına ve düzlemsel olmayan makaslama adı verilen olayın gerçekleşmesine neden olur. Kuvvetler aynı anda sola ve sağa itilebilir ve aynı etkiyi üretir. Ancak çatlakın büyümesi için kuvvetin ters yönde hareket etmesi gerekir[67].

Bu modların çoğu aynı anda meydana gelebilir ve bu da "karışık mod" çatlaklarına yol açabilir. Cohesive Zone Model için, Mod-I yükleri altında yapışkan kırılma davranışını kullanmalıdır. Bu kırıklar için, gerilme şiddeti faktörü mod-I için KI, mod-II için KII ve mod-III için KIII ile temsil edilir[67].



Şekil 2.8 : Irwin tarafından kırılma mekaniğinin çatlak açma modları[69].

2.10 Sonlu Elemanlar Yöntemi

Yük taşıyan bir malzemede oluşan gerilme kuvvetlerinin ve deformasyonların materyal üzerinde ki dağılımını bilmek oldukça önemlidir ve belirlenmesi açısından nümerik analiz yöntemleri kullanılmaktadır.

Genel olarak kullanılan nümerik analizler, sonlu elemanlar, sonlu farklar ve sınır integraldir. Günümüzde sıklıkla tercih edilen yöntemlerden biride sonlu elemanlar yöntemidir. Bu yöntem bilgisayarlar yardımı ile mühendislik yapılarının mekanik özelliklerini belirlemede kullanılan nümerik analiz yöntemidir.

Mühendisliğin statik, dinamik, mekanik gibi birçok dalında çözümleme ve tasarım amaçlı kullanılmaktadır. Bu yöntemle basit yada kompleks malzemeler üçgen, dikdörtgen, paralel kenar gibi geometrilere sahip şekillerde daha küçük parçalara bölünür.

Böylece bu küçük parçalar bağımsız bir parça olarak ele alınır ve tümüne oranla eşitliklerin basite indirgenmesiyle çözüm elde edilir.

Sonrasında elde edilen sonuçlar birleştirilir ve tüm yapının mekanik davranışı ortaya çıkar. Sonuç olarak yapının tümüne ait uzama ve gerilmeler elde edilmiş olur[14].

Sonlu elemanlar metodunun avantajları;

- Kompleks geometrili cisimlere kolayca uygulanabilir.
- Gelişen bilgisayar teknolojisi sayesinde çözüm hızlı gerçekleşir.
- Çözüm bölgelerinde farklı sonlu elemanlar ve alt bölümler oluşturabilir.
- Oluşturulan alt bölümlerde gerektiğinde daha hassas çözümler yapabilir.
- Farklı ve kompleks materyal özelliklerine (nonlinear, anizotropi, vb.) sahip olan sistemlerde basit şekilde uygulanabilir[70].

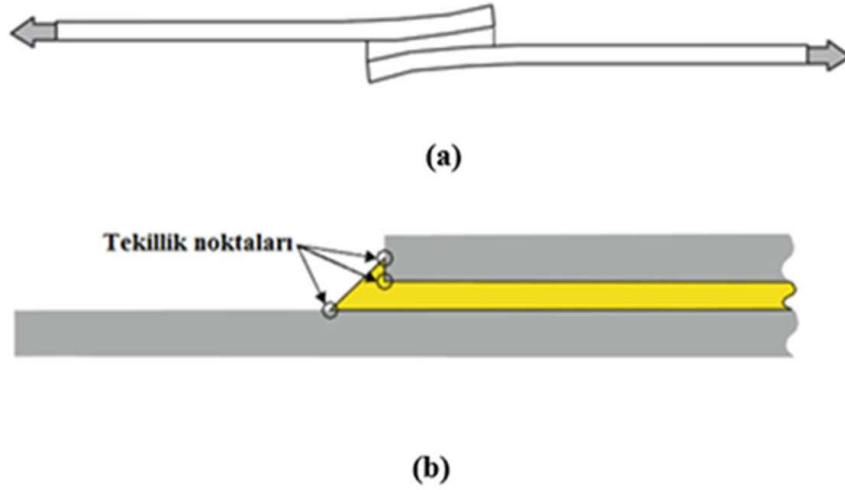
2.11 Cohesive Zone Model

Yapıştırılan malzemeler yük uygulanırken soyulma gerilimine maruz kaldığında uç bölgelerin dönmesi ile yani birleştirilmiş bağlantılara bir yük uygulandığında malzemenin plastik davranışı esnasında oluşan gerilmeleri doğru bir şekilde hesaplamak için geometrik olarak doğrusal olmayan analiz gereklidir (Şekil 2.8a).

Yakın zamana kadar, bu yaklaşım, birleştirilmiş bağlantıların doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizinde yaygın olarak kullanılıyordu.

Çekme testlerinden elde edilen bulk numunelerin gerilme-şekil değiştirme davranışı dikkate alınarak malzemenin elastik-plastik gerilme ve şekil değiştirme değerleri kullanılarak oluşturulur. Bununla birlikte, bu yaklaşım, bağlantının serbest ucundaki gerilme tekilliğinin ve gerilmelerin kullanılan mesh sayısına bağlı olması nedeniyle sorunludur (Şekil 2.8b).

Yapıştırma işleminin sayısal analizi sorunu nedeniyle, hem gerilme analizine hem de kırılma mekaniğine dayalı cohesive zone model dikkat çekmiş ve son yıllarda başarıyla kullanılmıştır. Bu model; bir çatlakın başlangıcını, yayılmasını ve hasar oluşumunu modelleyerek, hasarı değerlendirmek ve ayrıca hasarın gelişimini tahmin etmek için kullanılır[67].



Şekil 2.9 : Yüke maruz, yapıştırıcılı bağlantılarda soyulma gerilmesinin etkisi[67].

2.12 ANSYS™ paket programı

ANSYS yazılımı, ürünlerin henüz üretilmeden sanal ortamda simule edilerek çalışma şartlarının test ediliş, üç boyutlu modellemeler ile ürünlerin hasara uğrayabilecek zayıf bölümlerinin tespiti, oluşabilecek problemlerin tespiti ve iyileştirilmesine olanak tanır. Sonlu elemanlar programı ANSYS, genel amaçlı yazılmıştır ve mühendisliğin birçok alanında fiziğin tüm kurallarını ve birbiri ile olan ilişkilerini gerçeğe uygun bir biçimde kullanılabilen programıdır[71].

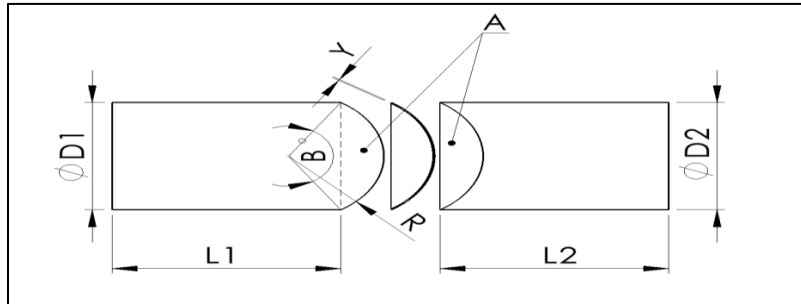
3. MATERİYAL VE YÖNTEM

3.1 Materyal

Bu tez çalışması kapsamında, nümerik analizler için sonlu elemanlar yöntemi ile analizlerin yapıldığı ANSYS paket programı kullanılmıştır. Çalışmada yapıştırıcı kullanılarak farklı yüzey geometrisine sahip metallerin birleştirilmesi ve meydana gelecek hasar yükünün, gerilmelerin, birleştirilen parçaların geometrilerinin ve yüzey alanlarının yapıştırma performansına etkileri nümerik olarak incelenmiştir. Program içerisinde tanımlı olan Structural Steel ve AA 2024 T3 kullanılmıştır ve DP810 endüstriyel yapıştırıcı materyal programa tanımlanmıştır. Bu materyaller üzerinde analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde modellenmiş olan üç boyutlu tasarımların çizim detayları ve yine materyallere ait çeşitli mekanik değerler alt başlıklarda verilmiştir.

3.1.1 Analiz numunelerinin detayları

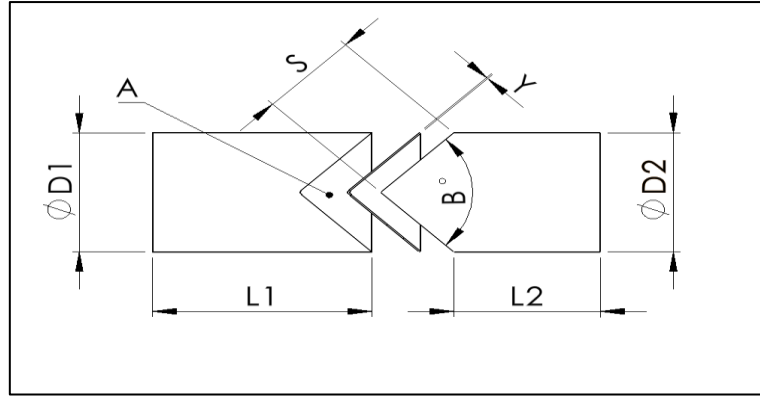
Şekil 3.1 ve 3.2’de yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantılarının teknik resmi, Çizelge 3.1 ve 3.2’de ise bu bağlantıların ölçüleri verilmiştir.



Şekil 3.1 : Eliptik yüzey geometrili bağlantının teknik resmi.

Çizelge 3.1 : Eliptik yüzey geometrili bağlantıya ait ölçüler.

R (mm)	D1 (mm)	D2 (mm)	L1 (mm)	L2 (mm)	Y (mm)	B (°)	A (mm ²)
0	23,78	23,78	30	30	0,2	180	444,29
10	18,48	18,48	30	30	0,2	148	444,17
12,5	20,92	20,92	30	30	0,2	113,6	444,18
15	17,1	17,1	29,67	30	0,2	106,2	444,16
17,5	22,37	22,37	30	30	0,2	79,4	444,16
20	22,71	22,71	30	30	0,2	69,1	444,18

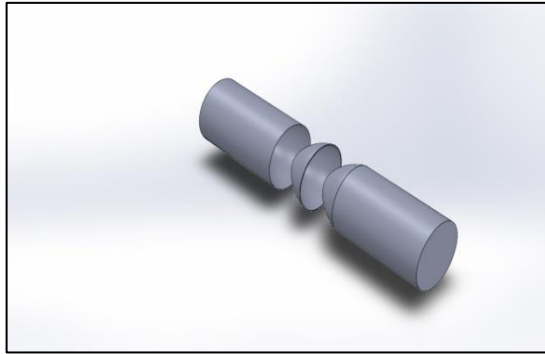


Şekil 3.2 : Konik yüzey geometrili bağlantının teknik resmi.

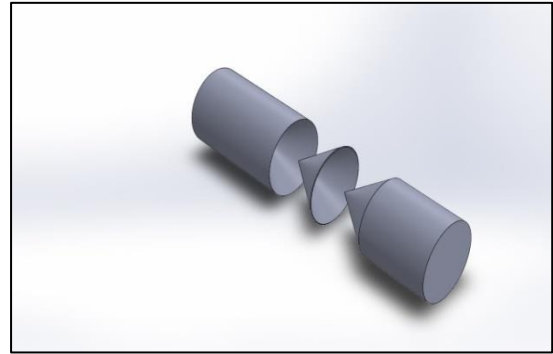
Çizelge 3.2 : Konik yüzey geometrili bağlantıya ait ölçüler.

B (°)	D1 (mm)	D2 (mm)	L1 (mm)	L2 (mm)	Y (mm)	S (mm)	A (mm ²)
20,36	10	10	47,83	20	0,2	28,28	444,22
40,56	14	14	38,94	20	0,2	20,2	444,13
69,9	18	18	30	20	0,2	15,71	444,21
90	20	20	30	20	0,2	14,14	444,29
165,2	23,68	23,68	30	20	0,2	11,94	444,15
180	23,78	23,78	30	30	0,2	0	444,29

SolidWorks paket programı kullanılarak oluşturulan eliptik ve konik yüzey geometrili bağlantıların katı modeli Şekil 3.3 ve 3.4’de gösterilmiştir.



Şekil 3.3 : Eliptik yüzey geometrili bağlantının katı modeli.



Şekil 3.4 : Konik yüzey geometrili bağlantının katı modeli.

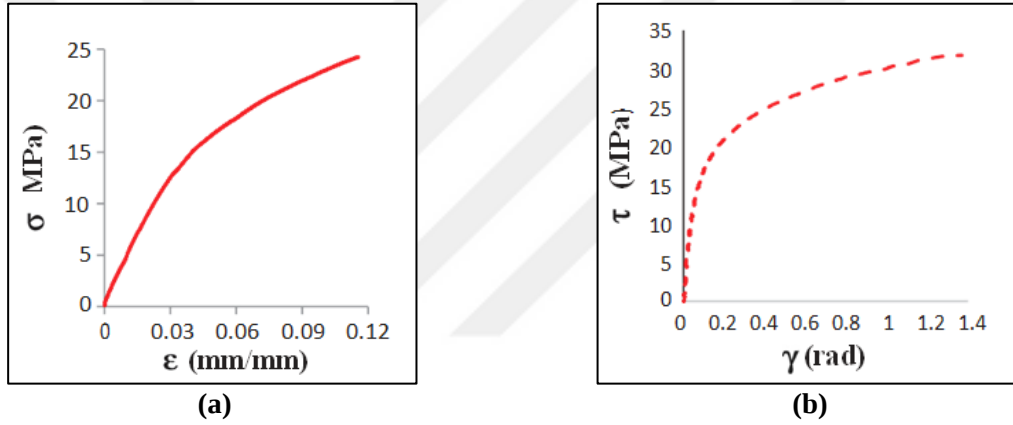
3.1.2 Materyallere ait mekanik özellikler

Çalışmada, bağlantı malzemesi olarak Yapısal çelik ve Alüminyum alaşımı 2024 T3 kullanılmıştır. Yapısal çelik ve Alüminyum alaşımı 2024 T3’ün mekanik özellikleri Çizelge 3.3’de verilmiştir.

Çizelge 3.3 : Yapısal çelik ve Alüminyum alaşımının mekanik özellikleri.

	Yapısal çelik	Alüminyum alaşımı
Young Modülü	200 GPa	73,1 GPa
Poisson Oranı	0,30	0,3
Yoğunluk	7,85e-06 kg/mm ³	2,768e-06 kg/mm ³
Kayma Modülü	76,923 GPa	28 GPa
Akma Mukavemeti	250 MPa	385 MPa
Çekme Mukavemeti	460 MPa	427,90 MPa

Yapıştırıcı olarak, pek çok alanda tamir ve birleştirme amacıyla kullanılan, nemli çevre şartlarına karşı dirençli ve nemden dolayı dayanımlarında azalma söz konusu olmayan, 3M Scotch-Weld firmasının ürettiği DP810 yapıştırıcı kullanılmıştır. Yapıştırıcının mekanik özellikleri Şekil 3.5 ve Çizelge 3.4 'de verilmiştir.



Şekil 3.5 : DP810 için (a) çekme gerilimi-gerinim eğrisi ve (b) kayma gerilimi-gerinim eğrisi [72].

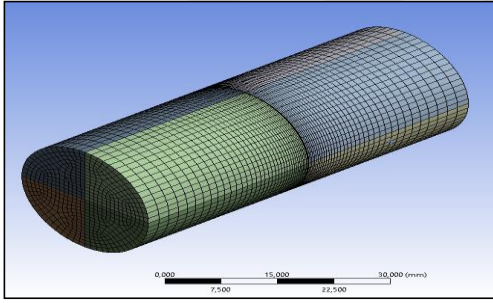
Çizelge 3.4 : Yapıştırıcının mekanik özellikleri [72].

Dp810 için mekanik özellikler	
Elastiklik Modülü, E [MPa]	497.76 ± 28.75
Poisson oranı, ν	0.35
Akma Mukavemeti (Normal) , $\bar{\sigma}_y$ [MPa]	15.38 ± 3.48
Kopma Mukavemeti , $\bar{\sigma}_f$ [MPa]	20.07 ± 2.61
Kopma uzaması (Normal), ϵ_f (%)	0.078 ± 0.02
Kayma Modülü, G [MPa]	184.35 ± 28.75
Akma Mukavemeti (Kayma), $\bar{C}_y$ [MPa]	15.28 ± 4.8
Kopma Mukavemeti (Kayma), $\bar{C}_f$ [MPa]	29.73 ± 2.02
Kopma uzaması (Kayma), γ_f (%)	0.12 ± 0.008
Tokluk (Normal doğrultuda), G_n^0 [N/mm]	0.78
Tokluk (Kayma doğrultusunda), G_s^0 [N/mm]	1.78

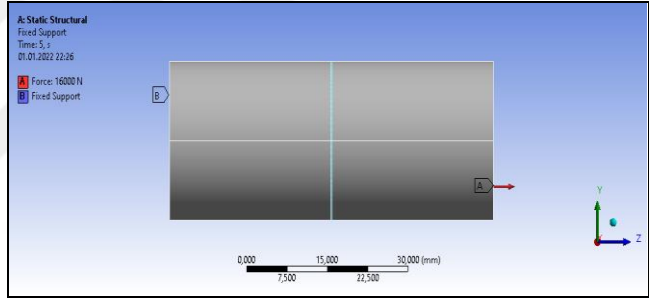
3.2 Nümerik Çalışma

Nümerik çalışma, tez içeriği kapsamında bilgisayar ortamında gerçekleştirilmiş çeşitli hasar verilerin elde edilmesi üzerine kuruludur. Bu başlık altında çalışmanın nasıl ilerlediği, elde edilen verilere, çeşitli görsel sunumlara ve elde edilen verilerin karşılaştırmalı grafiklerine yer verilmiştir.

Analizler için SolidWorks paket kullanılarak oluşturulan modeller, ANSYS içerisine aktarılıp, Şekil 3.5'te gerilme şekil değiştirme diyagramları verilen elasto-plastik malzeme tanımlanması gerçekleştirildikten sonra bağlantılar düzenlenmiştir. Ardından modeller sonlu elemanlara bölünmüştür ve sınır şartları uygulanmıştır. Tüm modeller; bir uçtan ankastre olup diğer uçtan çekme kuvveti ile zorlanmıştır ve non lineear analizler bu şekilde gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.6'da modelin meshlenmiş hali, Şekil 3.7'da uygulanan sınır şartları gösterilmektedir.

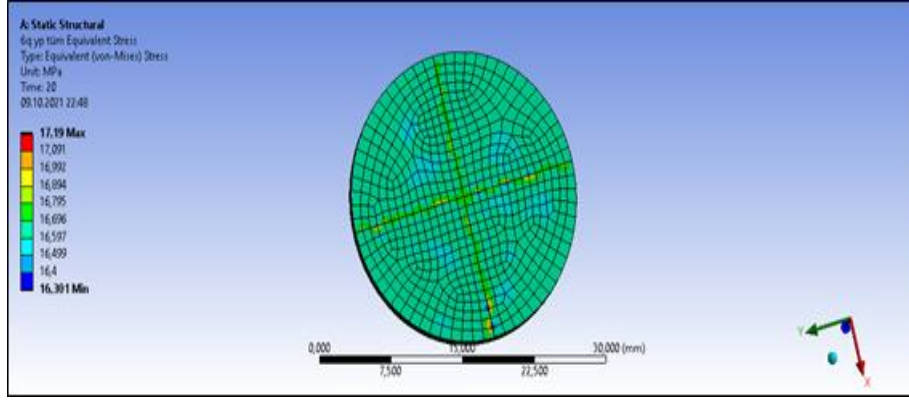


Şekil 3.6 : Modelin meshlenmiş hali.

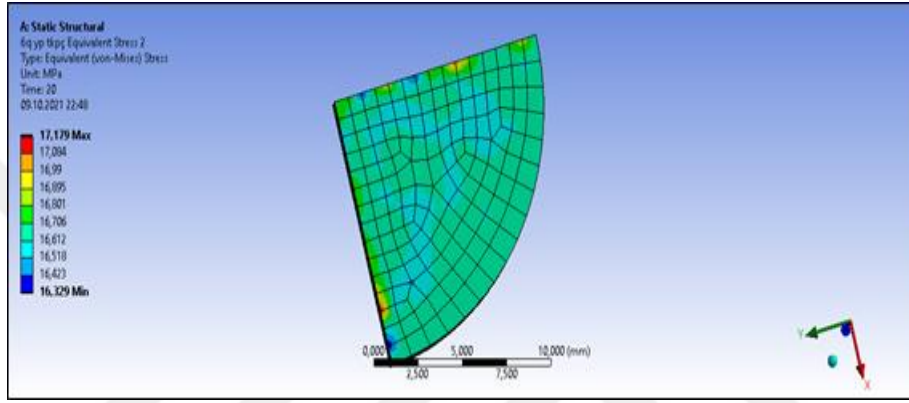


Şekil 3.7 : Modele uygulanan sınır şartları.

Analizler yapılırken oluşturulan üç boyutlu modeller silindirik yapıştırma bağlantısının simetrik yapısından dolayı tam model ve çeyrek model arasında alınan sonuçlarda fark olup olmadığını gözlemleyebilmek için analizler çeyrek modeller için tekrarlandı. Analizlerde uygulanan kuvvet, tam model ve çeyrek model arasında 4/1 oranında fark olacak şekilde uygulanmıştır. Analiz yapıldıktan sonra tam ve çeyrek modelin sonuçları üstüste çakıştığından analizlere çeyrek modellerle devam edilmiştir. Şekil 3.8 ve Şekil 3.9'da tam ve çeyrek modelde yapıştırıcıda oluşan von Mises akma ve kırılma kriterine göre alınan sonuçlar verilmiştir.

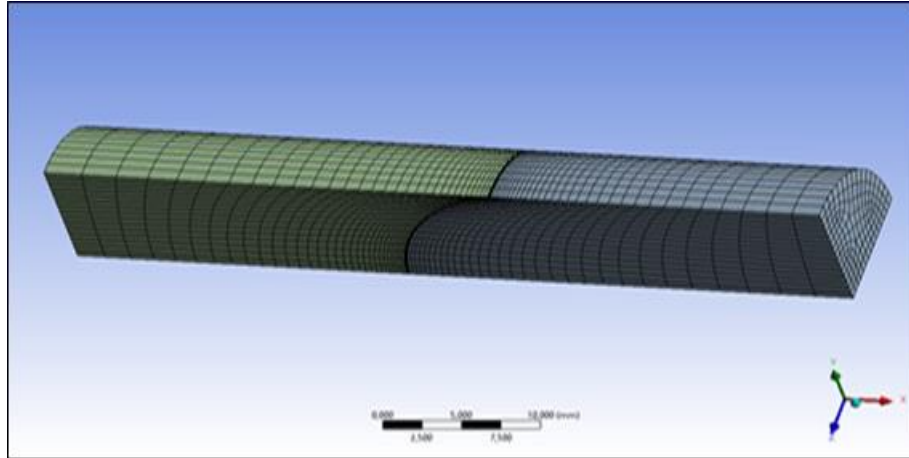


Şekil 3.8 : Tam model yapıştırıcıda meydana gelen gerilme durumu.



Şekil 3.9 : Çeyrek model yapıştırıcıda meydana gelen gerilme durumu.

Analizlerde kullanılan çeyrek modelin meshlenmiş hali Şekil 3.10’da verilmiştir. Meshlerdeki düğüm ve elaman sayısı kritik noktadaki gerilmelerin değişmediği gözlemlenene kadar artırılmıştır.

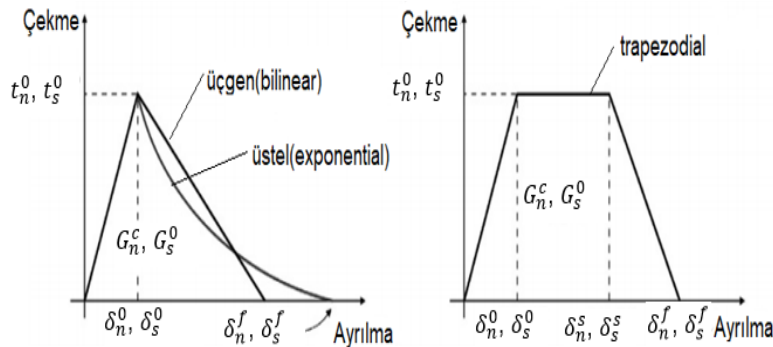


Şekil 3.10 : Çeyrek modelin meshlenmiş hali.

3.3 Cohesive Zone Model ile Nümerik Analiz

Arayüz boyunca kırılma veya delaminasyon olayı, kompozitler ve yapıştırıcılar gibi farklı özelliklere sahip malzemelerin bir araya getirilmesiyle oluşturulan yapılarda yaygın olarak görülür ve yapıların mukavemetini sınırlamada önem arz etmektedir. Bu olay, arayüz hasarı araştırmalarının önünü açmıştır. Ara yüzey ayrımı, geleneksel kırılma mekaniği teknikleri kullanılarak modellenilebilir. Ancak son zamanlarda, konvensiyonel kırılma mekaniği tekniklerine bir alternatif olarak, arayüzde ayrılma-çekme (traction-seperation) ilişki kabulü ile kırılma mekanizmasına doğrudan müdahale eden Cohesive zone model tekniği kullanılmaktadır[73].

Konvensiyonel sonlu elemanlar yöntemine kıyasla CZM yöntemi, malzeme ve arayüz özellikleri göz önünde bulundurularak geliştirilmiş çeşitli kohezyon kurallarını kullanarak daha doğru mukavemet tahminleri yapabilmektedir. Cohesive zone model, aynı malzeme içinde ve farklı malzemelerin arayüzünde hasarın büyümesini simüle edebilir. Bir malzeme arayüzü, temas (contact elements) veya arayüz (interface elements) elemanları ile temsil edilir ve arayüzün davranışını karakterize etmek için bir CZM modeli kullanır. Cohesive zone model arayüzdeki çekme kuvveti (Traction, T) ile arayüzün karşılık gelen ayrılması (Separation, δ) arasındaki yapıcı bir ilişkiden oluşur. Malzeme modeli yapısal malzeme analizinde yaygın olarak; üçgen(bilinear), üstel (exponential) ve trapezoidal cohezif zone model şekilleri kullanılır. Bu model şekilleri Şekil 3.11’de verilmiştir[74].

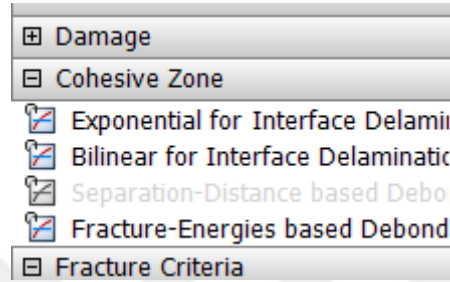


Şekil 3.11 : Cohesive bölge modeli üçgen, üstel ve yamuk şekilleri[75].

Cohesive zone model analizleri üç boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir. Arayüz modellemede kontak eleman seti kullanılmıştır. Temas elemanı ile arayüz ayrımının modellenmesine "debonding" denir. "Debonding" arayüz modellemesinde, kontak elemanları yapışmış (bonded) haldedir ve kontak alanında Cohesive bir malzeme tanımlanmalıdır.

Tek etkili yapıştırıcı bağlantıların mekanik mukavemetini etkileyen ana faktörlerden biri, bindirme alanının kenarlarında yoğunlaşan soyulma gerilimidir. Ayrıca kayma gerilmesi de hasar oluşumunu etkiler. Bu nedenle analiz, CZM uygulamasının Ansys program paketinden Mod I ve Mod II'ye dayalı bir "Mixed Mod" seçilerek gerçekleştirilmiştir.

Ansys sonlu elemanlar programında üçgen (bilinear) cohezif zone modellerinin çeşitli varyasyonları mevcuttur. Bu çalışmada, ayırma mesafesine dayalı Cohesive zone malzeme modeli (Separation-Distance based Debonding, CZM) kullanılmıştır. Gerçekleştirilen malzeme modeli Şekil 3.12'de ve malzeme tanımlanması Şekil 3.13'de verilmiştir.

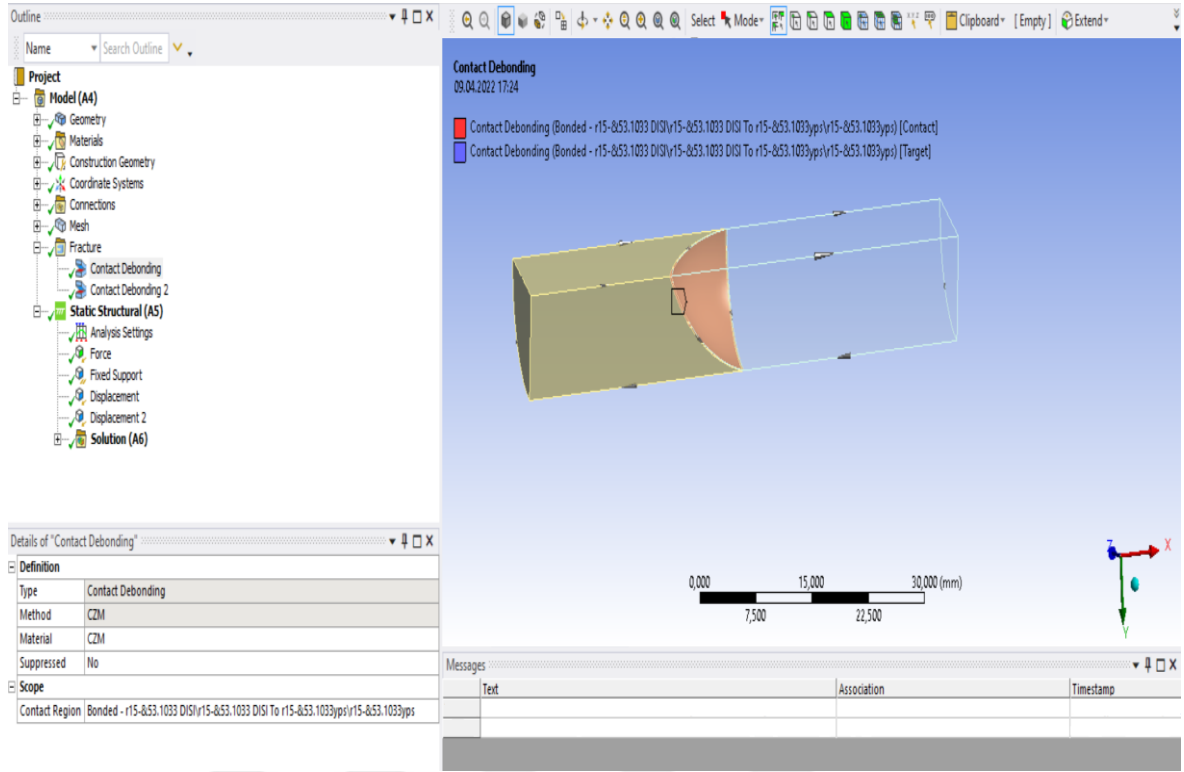


Şekil 3.12 : Cohesive zone malzeme modeli tanımlanması.

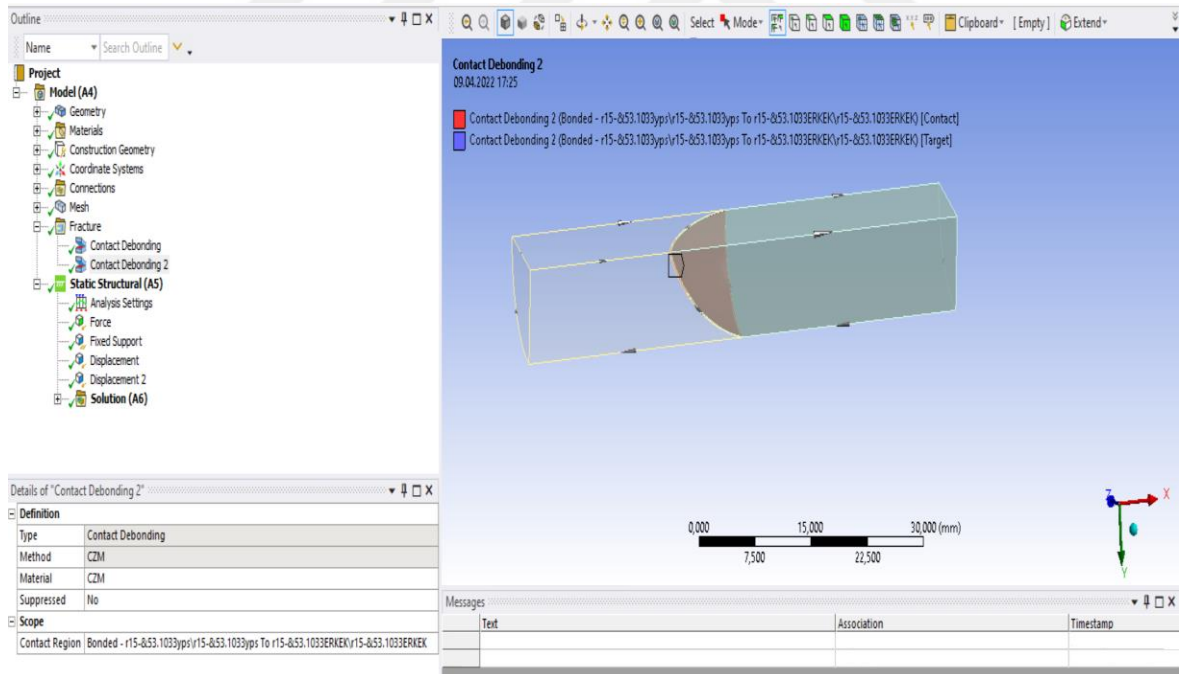
Properties of Outline Row 4: CZM				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Separation-Distance based Debonding			
3	Tangential Slip Under Normal Compression	No		
4	Debonding Interface Mode	Mixed		
5	Maximum Normal Contact Stress	2,007E+07	Pa	
6	Contact Gap at the Completion of Debonding	7,27E-05	m	
7	Maximum Equivalent Tangential Contact Stress	2,973E+07	Pa	
8	Tangential Slip at the Completion of Debonding	0,0001156	m	
9	Artificial Damping Coefficient	0,007	s	

Şekil 3.13 : Gerçekleştirilen malzeme tanımlanması.

"Debonding " yöntemini kullanarak arayüzey delaminasyonunu modellemenin birçok avantajı vardır. Kontak elemanları ile oluşturulan modeller kolaylıkla değiştirilebilir. Arayüz mesafesi, bir temas boşluğundan veya penetrasyondan ve teğetsel kayma mesafesi şeklinde tanımlanır. Gerçekleştirilen kontak işlemleri Şekil 3.14 ve 3.15'de verilmiştir.



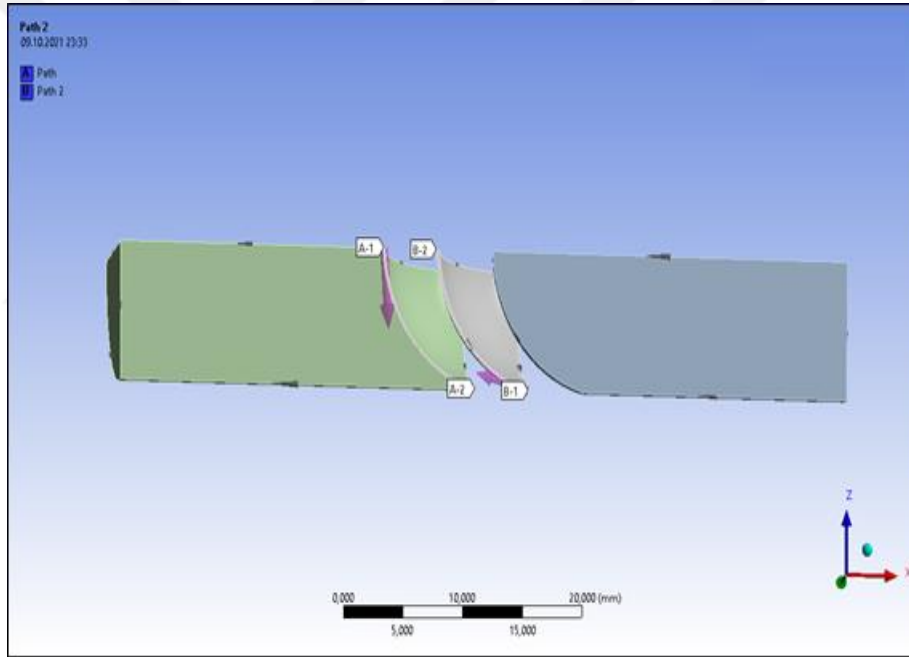
Şekil 3.14 : Gerçekleştirilen 1. kontak işlemi.



Şekil 3.15 : Gerçekleştirilen 2. kontak işlemi.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu bölümde, yapıştırma bağlantılarının sayısal çalışmalar neticesinde elde edilen sonuçları değerlendirilmiştir. Nümerik analizlerde incelemek üzere bütün modellerde 2 adet gerilme hattı oluşturulmuştur. Hasar yüklerinin belirlenmesinde von-Mises akma ve kırılma kriteri kullanılarak bağlantıda kullanılan malzemelerde oluşan en büyük eşdeğer gerilme o malzemenin hasar gerilmesine eşit olduğu yük hasar yükü olarak belirlenmiştir. Hatlar hasarın ilk olarak gerçekleştiği yerler referans alınarak oluşturulmuştur. Bu hatlar Şekil 4.1’da ki gibidir.



Şekil 4.1 : Nümerik analizlerde incelenen gerilme hatları.

Çeyrek modellerde analizler tekrar gerçekleştirilerek yapıştırıcıda meydana gelen hasar yükleri tespit edilmiştir. Hasar yüklerinin hangi kuvvette gerçekleştiğini görmek adına analiz eşit adımlarla gerçekleştirilmiş ve en düşük kuvvette elde edilen hasar yükü tespit edilmiştir. Çizelge 4.1’de hasar yükleri verilmiştir.

Bu hasar yüklerinden yola çıkarak geometrilerin mukayese edilebilmesi açısından en düşük hasar yükünün 1 adım öncesi olan yük (480 N) değerinde parçalar üzerinde oluşan gerilmelerin grafikleri çizilmiştir.

Alınan sonuçları kıyaslamak adına analiz ANSYS programı içerisinde bulunan CZM(cohesive zone model) modülünde tekrar gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.1 : Alüminyum Alaşımı-DP810 ve Yapısal Çelik- DP810 için hasar yükü değerleri.

GEOMETRİ	Alüminyum Alaşımı 2024-T3 - DP810 KUVVET (N)	Yapısal Çelik - DP810 KUVVET (N)
DÜZ 4/1	3760	4240
ELİPTİK10 4/1	1680	1200
ELİPTİK12,5 4/1	2320	2400
ELİPTİK15 4/1	1600	1120
ELİPTİK17,5 4/1	2880	3200
ELİPTİK20 4/1	3120	3600
KONİK20 4/1	720	560
KONİK40 4/1	720	880
KONİK69 4/1	1200	1360
KONİK90 4/1	2080	2080
KONİK165 4/1	3520	3920

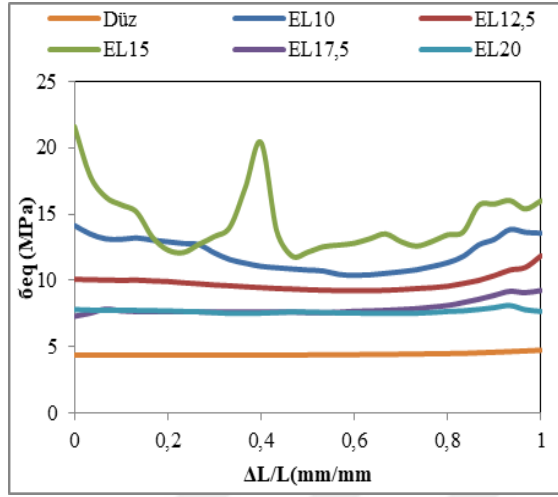
4.1.1 Alüminyum Alaşımı-DP810 bağlantılarının nümerik analizi

4.1.1.1 Eliptik geometrilerin metalleri üzerinde oluşturulan P1 hattı boyunca gerilme dağılımları

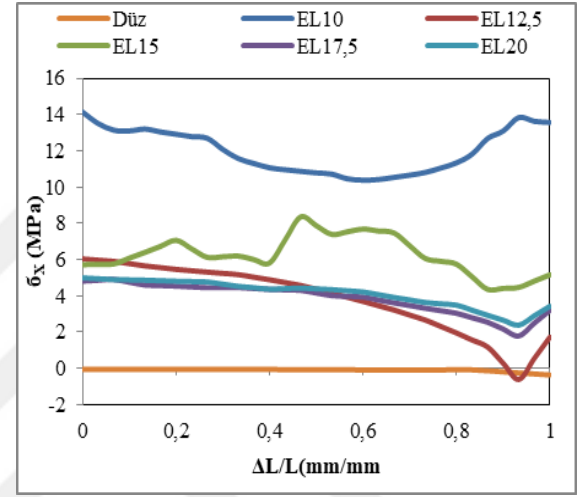
Şekil 4.2, 4.3, 4.4 ve 4.5'de Alüminyum alaşımı tanımlanan, düz ve eliptik geometriler üzerinde oluşturulan, P1 hattı boyunca σ_{eq} , σ_x , σ_y , σ_z gerilme dağılımları verilmiştir. Şekil 4.2 incelendiğinde σ_{eq} gerilmeleri hat boyunca sabit seyrederken geometrilerdeki eliptiklik yarıçapının artmasıyla gerilmelerin arttığı gözlemlenmektedir. Şekil 4.3 incelendiğinde σ_x gerilmeleri hattın sonuna doğru azalma eğilimindedir ve eliptik10'da en yüksek σ_x gerilme değeri gözlemleniyor.

Şekil 4.4 ve 4.5 incelendiğinde σ_y , σ_z gerilmeleri hat boyunca çok değişmemekle birlikte uç noktalarda farklılık göstermiştir. Normal gerilmeler incelendiğinde eliptiklik yarıçapının azalması ile σ_x değeri artmaktadır. Bunun nedeni düz bağlantıda teorik σ_x gerilmesi 1 (480 N /444,29 mm²=1.08) Mpa civarında olması gerekir. Şekil 4.3'de düz bağlantı için σ_x gerilmesi bu değerle uyumlu çıkmıştır. Fakat eliptikliğin artması ile bağlantı bölgesinde nispeten tek eksenli gerilme durumundan çok eksenli gerilme durumuna geçilmektedir ve bu durum normal gerilmelerin artmasına sebep olur. Yine Şekil 4.3'deki σ_x gerilmeleri incelendiğinde eliptikliğin artması ile σ_x gerilmesini buna paralel arttığı görülmektedir.

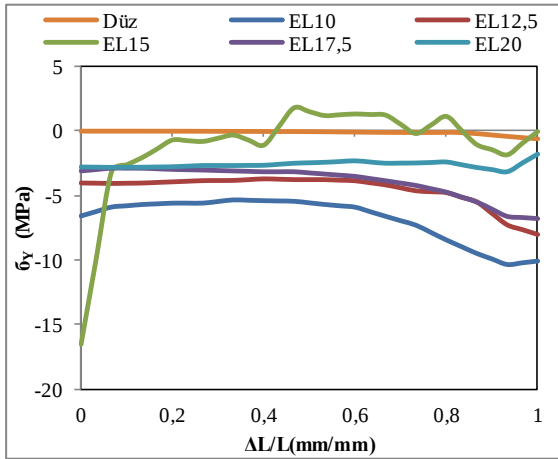
Şekil 4.4'deki σ_Y gerilmelerin bağlantı tipine göre değişimi de eliptikliğın artması ile tek eksenli gerilme durumundan çok eksenli gerilme durumuna geçişe uygun şekilde giderek artmıştır. Ayrıca x eksenı doğrultusunda çekmeye maruz bağlantıda σ_X gerilmelerin çeki karakterli olmasına karşın σ_Y ve σ_Z gerilmelerin bası karakterli olması bağlantı bölgesinin x doğrultusunda çekmeye karşılık diğer eksenlerdeki daralmadan kaynaklanmaktadır. Şekil 4.2'deki eşdeğer gerilmeler incelendiğinde eliptikliğın artması ile ara yüzeyde oluşan normal ve kayma gerilmelerin artmasına paralel olarak eş değer gerilmeler de artmıştır.



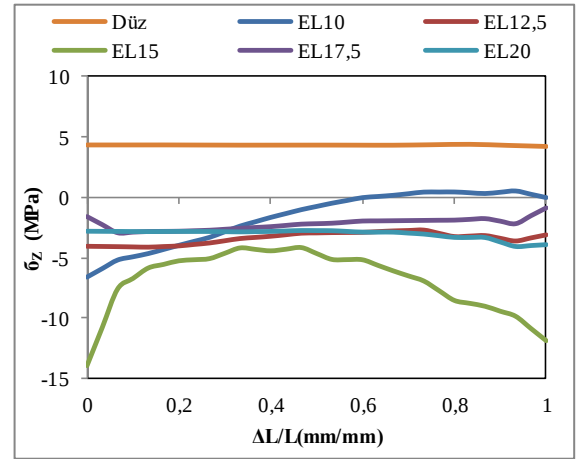
Şekil 4.2 : Eliptik geo. P1 hattında σ_{eq} (MPa) eşdeğer gerilme dağılımları.



Şekil 4.3 : Eliptik geo. P1 hattında σ_X (MPa) normal gerilme dağılımları.



Şekil 4.4 : Eliptik geo. P1 hattında σ_Y (MPa) eşdeğer gerilme dağılımları.

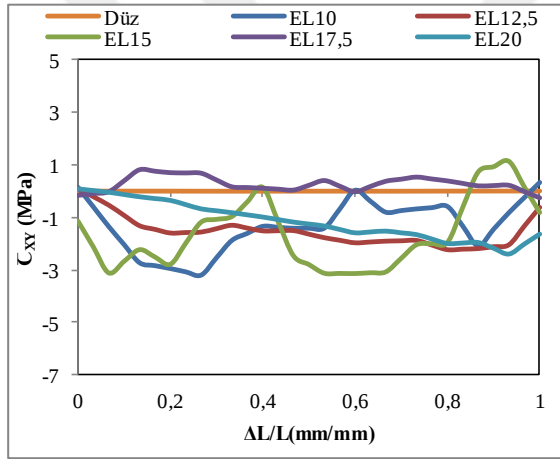


Şekil 4.5 : Eliptik geo. P1 hattında σ_Z (MPa) normal gerilme dağılımları.

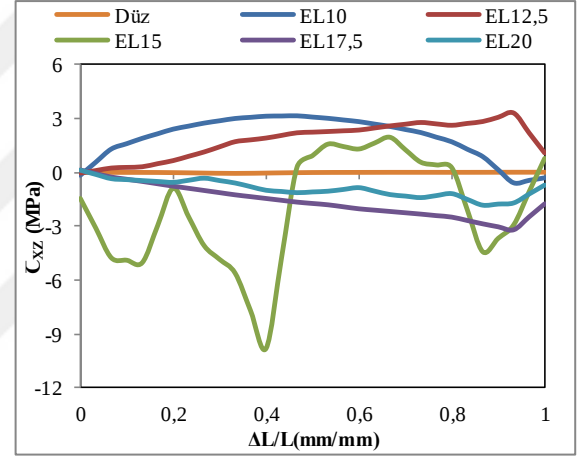
Şekil 4.6, 4.7 ve 4.8'de Alüminyum alaşımı tanımlanan, düz ve eliptik geometriler üzerinde oluşturulan, P1 hattı boyunca τ_{XY} , τ_{XZ} , τ_{YZ} gerilme dağılımları verilmiştir. Şekil 4.6

incelendiğinde C_{XY} kayma gerilmeleri hat boyunca küçük bir aralıkta sürekli değişken değerler almıştır.

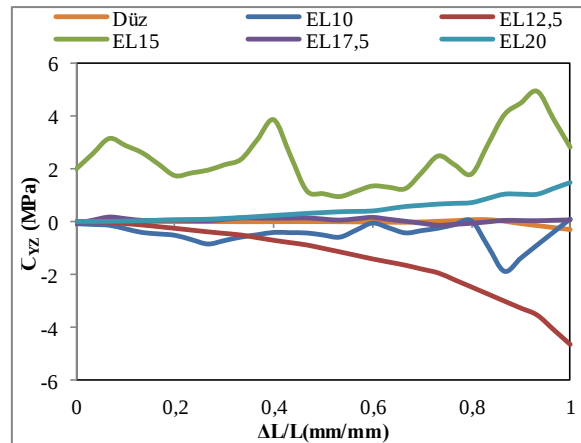
Şekil 4.7 incelendiğinde C_{XZ} kayma gerilmeleri hattın başlangıç ve bitiş noktalarında yakın değerler, hattın ortalarına doğru az bir değişkenlik göstermiştir. Şekil 4.8 incelendiğinde C_{YZ} kayma gerilmeleri hat boyunca birbirine yakın değerlerle devam ederken hattın sonuna doğru sapmaktadırlar. Eliptik 15'in bazı noktalarda tepe noktası oluşturduğu görülmektedir. Özellikle eliptikliğin artması ile kayma gerilmeleri giderek artmıştır. Bunun nedeni bağlantı bölgesinde eliptikliğin artması ile ara yüzeyler kesme kuvvetlerine ve dolayısıyla kayma gerilmelerine daha fazla maruz kalmaktadır. Ayrıca eksenlerdeki daralma kayma gerilmelerinin çeki ve bası karakterde olmasını sağlamıştır.



Şekil 4.6 : Eliptik geo. P1 hattında C_{XY} (MPa) kayma gerilme dağılımları.



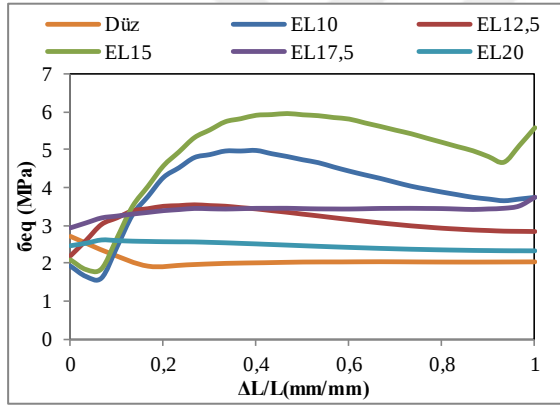
Şekil 4.7 : Eliptik geo. P1 hattında C_{XZ} (MPa) kayma gerilme dağılımları.



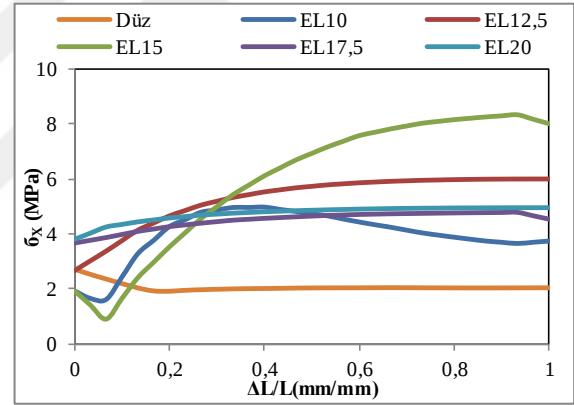
Şekil 4.8 : Eliptik geo. P1 hattında C_{YZ} (MPa) kayma gerilme dağılımları.

4.1.1.2 Eliptik geometrilerin yapıştırıcıları üzerinde oluşturulan P2 hattı boyunca gerilme dağılımları

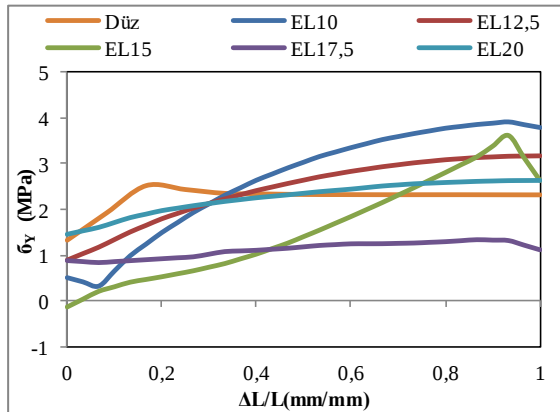
Şekil 4.9, 4.10, 4.11 ve 4.12'de Alüminyum alaşımı tanımlanan, düz ve eliptik geometriler üzerinde oluşturulan, P2 hattı boyunca σ_{eq} , σ_x , σ_y , σ_z gerilme dağılımları verilmiştir. Şekiller incelendiğinde gerilmeler geometrilerin çoğu için hat üzerindeki noktalarda birbirine yakın seyrederken, hattın başlangıç noktasından sonra gerilmelerde artış gözlenmektedir. Yapıştırıcı üzerinde oluşturulan P2 hattında, alüminyum parça üzerinde tanımlanan P1 hattına nazaran daha düşük gerilme değerleri vermiştir. Şekil 4.12 incelendiğinde düz parçadaki σ_z normal gerilmesi, diğerlerinden daha yüksek olarak görülmektedir. Daha önce de ifade edildiği gibi eliptikliğin artması ile çok eksenli gerilme durumu oluşmakta ve bu durum ara yüzeyde hem yapıştırılan malzemede hem de yapıştırıcı yüzeyinde oluşan normal ve kayma gerilmelerini arttırmaktadır. Artan normal ve kayma gerilmeleri de eşdeğer gerilmelerin artmasına neden olmaktadır.



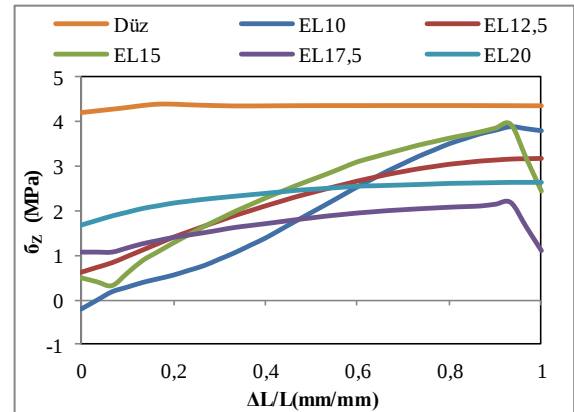
Şekil 4.9 : Eliptik geo. P2 hattında σ_{eq} (MPa) eşdeğer gerilme dağılımları.



Şekil 4.10 : Eliptik geo. P2 hattında σ_x (MPa) normal gerilme dağılımları.

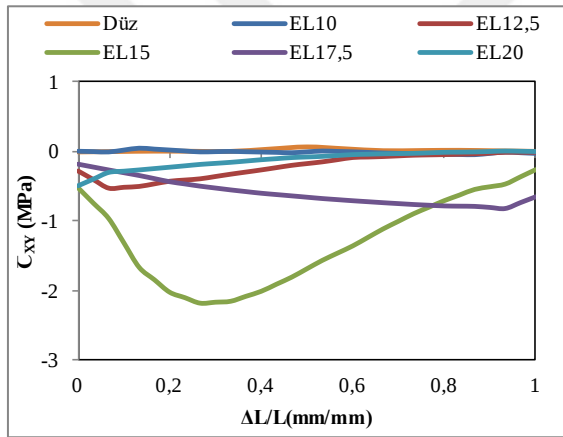


Şekil 4.11 : Eliptik geo. P2 hattında σ_y (MPa) eşdeğer gerilme dağılımları.

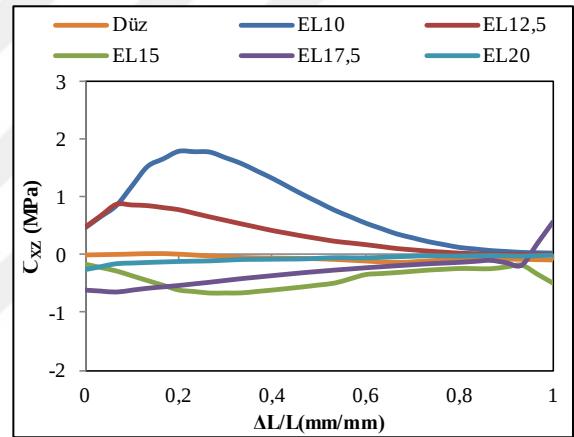


Şekil 4.12 : Eliptik geo. P2 hattında σ_z (MPa) normal gerilme dağılımları.

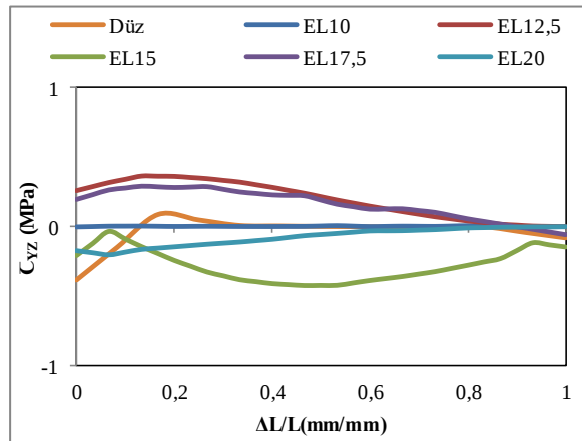
Şekil 4.13, 4.14 ve 4.15'de Alüminyum alaşımı tanımlanan, düz ve eliptik geometriler üzerinde oluşturulan, P2 hattı boyunca C_{XY} , C_{XZ} , C_{YZ} gerilme dağılımları verilmiştir. Şekil 4.13 incelendiğinde C_{XY} kayma gerilmesi genel olarak hat boyunca küçük farklarla seyretmektedir. Eliptik 15'e ait gerilme değerleri hattın ortalarına doğru negatif yönde artmaktadır ve hattın sonlarına doğru pozitif yönde değişmektedir. Şekil 4.14 ve 4.15 incelendiğinde C_{XZ} , C_{YZ} kayma gerilmeleri hat başlangıcında farklı değerler vermekten hattın sonuna doğru eşit değerler vermektedir. Gerilmeler incelendiğinde eliptik açısının azalması ile yani eliptikliğin artması ile kayma gerilmeleri giderek artmıştır. Bunun nedeni bağlantı bölgesinde eliptikliğin artması ile ara yüzeyler kesme kuvvetlerine ve dolayısıyla kayma gerilmelerine daha fazla maruz kalmaktadır. Ayrıca eksenlerdeki daralma kayma gerilmelerinin çeki ve bası karakterde olmasını sağlamıştır.



Şekil 4.13 : Eliptik geo. P2 hattında C_{XY} (MPa) kayma gerilme dağılımları.



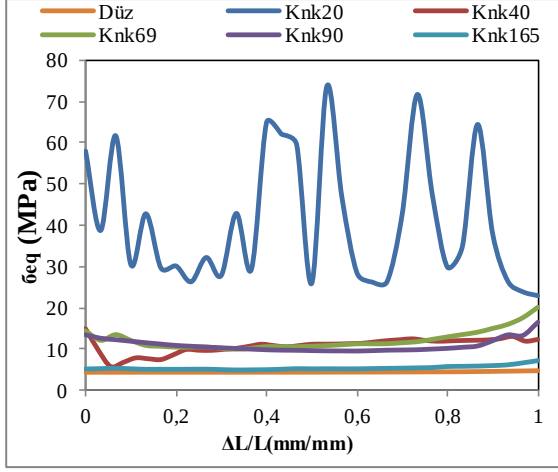
Şekil 4.14 : Eliptik geo. P2 hattında C_{XZ} (MPa) kayma gerilme dağılımları.



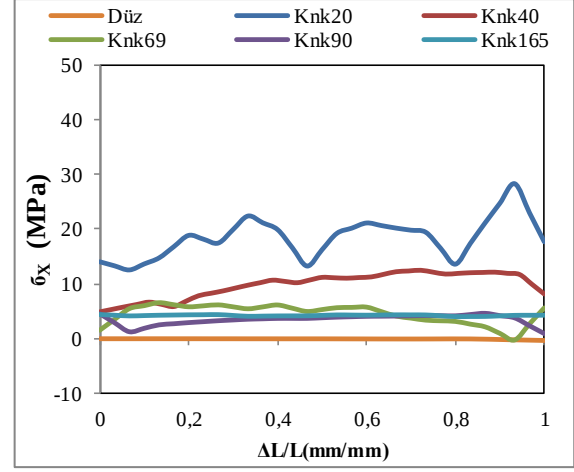
Şekil 4.15 : Eliptik geo. P2 hattında C_{YZ} (MPa) kayma gerilme dağılımları.

4.1.1.3 Konik geometrilerin metalleri üzerinde oluşturulan P1 hattı boyunca gerilme dağılımları

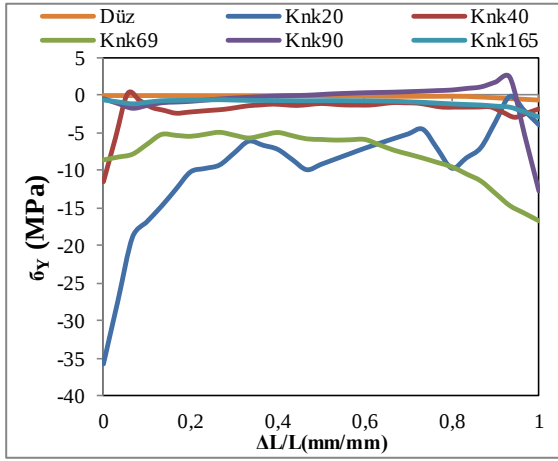
Şekil 4.16, 4.17, 4.18, 4.19'de Alüminyum alaşımı tanımlanan, düz ve konik geometriler üzerinde oluşturulan, P1 hattı boyunca σ_{eq} , σ_x , σ_y , σ_z gerilme dağılımları verilmiştir. Şekiller incelendiğinde gerilmeler geometrilerin çoğu için hat üzerindeki noktalarda birbirine yakın seyrederken, geometrilerdeki B açısının azalmasıyla konikliğin artması nedeniyle konik20 geometrisinde gerilmelerin hat üzerindeki her noktada birbirinden farklı ve diğer geometrilerden daha yüksek gerilmeye sebep olduğu görülmüştür. Hattın başlangıç ve bitiş noktalarında gerilme değerleri yükselmekte orta hatlarda ise düşük bir seyir izlemektedir. Normal gerilmeler incelendiğinde koniklik açısının azalması ile yani konikliğin artması ile σ_x değeri giderek artmaktadır. Bunun nedeni düz bağlantıda teorik σ_x gerilmesi 1 (480 N /444,29 mm²=1.08) Mpa civarında olması gerekir. Şekil 4.17'de düz bağlantı için σ_x gerilmesi bu değerle uyumlu çıkmıştır. Fakat konikliğin artması ile bağlantı bölgesinde nispeten tek eksenli gerilme durumundan çok eksenli gerilme durumuna geçilmektedir ve bu durum normal gerilmelerin artmasına sebep olur. Yine Şekil 4.17'deki σ_x gerilmeleri incelendiğinde konikliğin artması ile σ_x gerilmesini buna paralel arttığı görülmektedir. Şekil 4.18'deki σ_y gerilmelerin bağlantı tipine göre değişimi de konikliğin artması ile tek eksenli gerilme durumundan çok eksenli gerilme durumuna geçişe uygun şekilde giderek artmıştır. Ayrıca x eksenli doğrultusunda çekmeye maruz bağlantıda σ_x gerilmelerin çeki karakterli olmasına karşın σ_y ve σ_z gerilmelerin bası karakterli olması bağlantı bölgesinin x doğrultusunda çekmeye karşılık diğer eksenlerdeki daralmadan kaynaklanmaktadır. Şekil 4.16'daki eşdeğer gerilmeler incelendiğinde konikliğin artması ile ara yüzeyde oluşan normal ve kayma gerilmelerin artmasına paralel olarak eş değer gerilmeler de artmıştır.



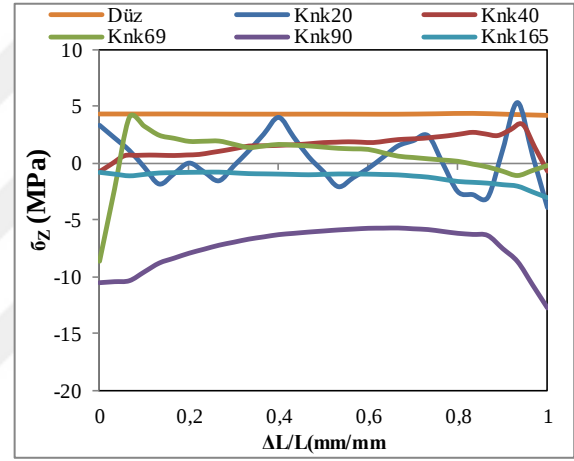
Şekil 4.16 : Konik geo. P1 hattında σ_{eq} (MPa) eşdeğer gerilme dağılımları.



Şekil 4.17 : Konik geo. P1 hattında σ_x (MPa) normal gerilme dağılımları.

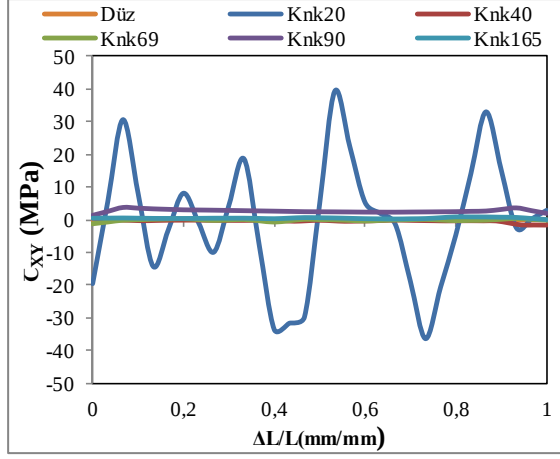


Şekil 4.18 : Konik geo. P1 hattında σ_y (MPa) eşdeğer gerilme dağılımları.

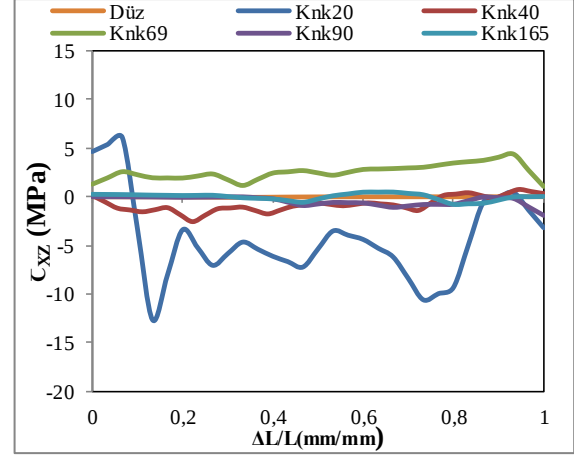


Şekil 4.19 : Konik geo. P1 hattında σ_z (MPa) normal gerilme dağılımları.

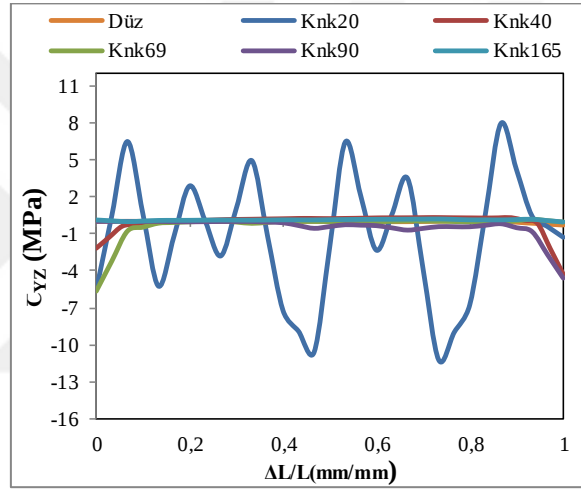
Şekil 4.20, 4.21, 4.22'de Alüminyum alaşımı tanımlanan, düz ve konik geometriler üzerinde oluşturulan, P1 hattı boyunca τ_{xy} , τ_{xz} , τ_{yz} gerilme dağılımları verilmiştir. Şekiller incelendiğinde τ_{xy} , τ_{xz} , τ_{yz} kayma gerilmeleri hat boyunca konik geometriler için benzer ve düşük değer almıştır ve bununla birlikte konik20 normal gerilmelerde olduğu gibi kayma gerilmelerinde de hattın her noktasında farklı ve diğer geometrilerden daha yüksek gerilmelere sahiptir. Özellikle konikliğin artması ile kayma gerilmeleri giderek artmıştır. Bunun nedeni bağlantı bölgesinde konikliğin artması ile ara yüzeyler kesme kuvvetlerine ve dolayısıyla kayma gerilmelerine daha fazla maruz kalmaktadır.



Şekil 4.20 : Konik geo. P1 hattında C_{XY} (MPa) kayma gerilme dağılımları.



Şekil 4.21 : Konik geo. P1 hattında C_{XZ} (MPa) kayma gerilme dağılımları.



Şekil 4.22 : Konik geo. P1 hattında C_{YZ} (MPa) kayma gerilme dağılımları.

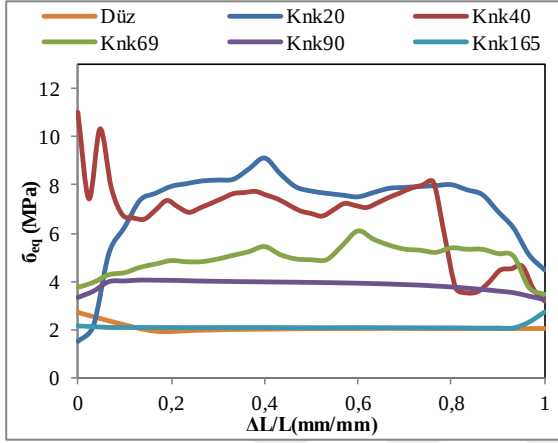
4.1.1.4 Konik geometrilerin yapıştırıcıları üzerinde oluşturulan P2 hattı boyunca gerilme dağılımları

Şekil 4.23, 4.24, 4.25, 4.26'da Alüminyum alaşımı tanımlanan, düz ve konik geometriler üzerinde oluşturulan, P2 hattı boyunca σ_{eq} , σ_x , σ_y , σ_z gerilme dağılımları verilmiştir. Şekiller incelendiğinde gerilmeler geometrilerin çoğu için hat üzerindeki noktalarda birbirine yakın ama farklı değerler almaktadır.

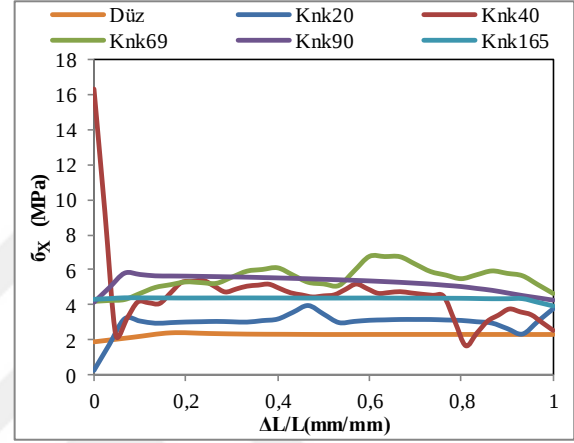
Konik40 için gerilme değerleri hattın başında diğer geometrilerden daha yüksek değerler almıştır ve hattın sonuna doğru azalarak devam etmiştir. Konik20 için gerilme değerleri hattın başlangıcında en düşük değerleri almasına karşın hattın sonlarında bir miktar artış göstermektedir ve en yüksek gerilme değerine σ_{eq} eşdeğer gerilme değerinde ulaşmıştır.

Eliptik geometrilerde olduğu gibi konik geometrilerde de elde edilen en yüksek σ_z normal gerilme değeri düz geometridedir.

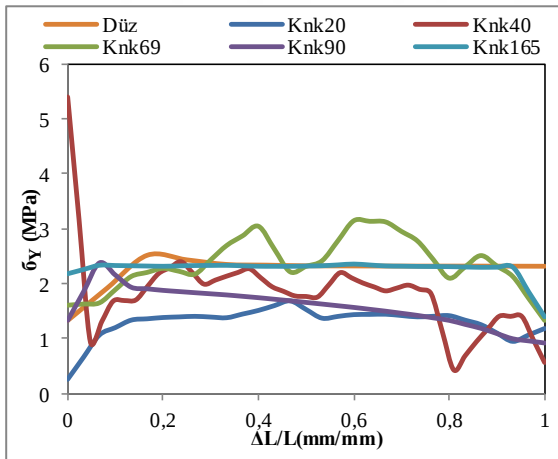
Daha önce de ifade edildiği gibi konikliğin artması ile çok eksenli gerilme durumu oluşmakta ve bu durum ara yüzeyde hem yapıştırılan malzemede hem de yapıştırıcı yüzeyinde oluşan normal ve kayma gerilmelerini arttırmaktadır. Artan normal ve kayma gerilmeleri de eşdeğer gerilmelerin artmasına neden olmaktadır.



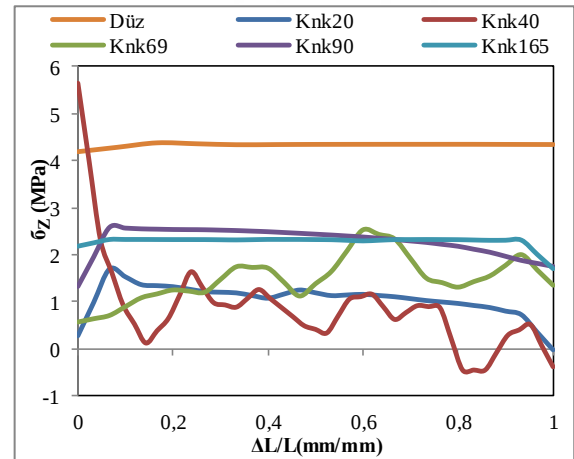
Şekil 4.23 : Konik geo. P2 hattında σ_{eq} (MPa) eşdeğer gerilme dağılımları.



Şekil 4.24 : Konik geo. P2 hattında σ_x (MPa) normal gerilme dağılımları.



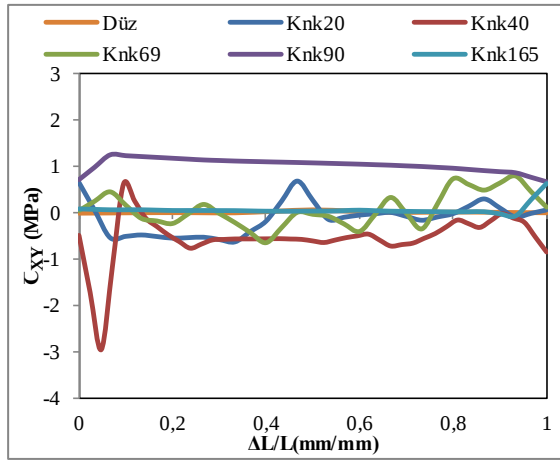
Şekil 4.25 : Konik geo. P2 hattında σ_y (MPa) eşdeğer gerilme dağılımları.



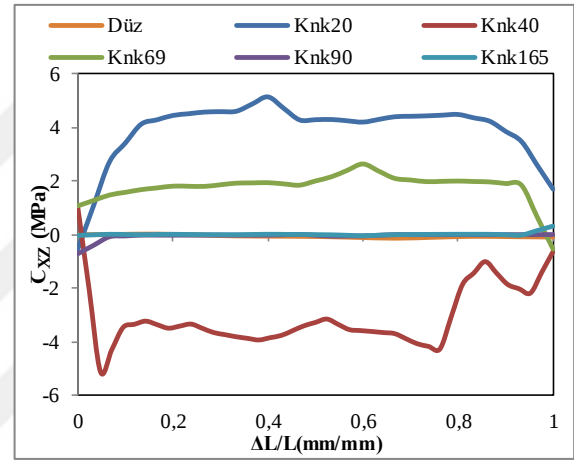
Şekil 4.26 : Konik geo. P2 hattında σ_z (MPa) normal gerilme dağılımları.

Şekil 4.27, 4.28 ve 4.29'da Alüminyum alaşımı tanımlanan, düz ve konik geometriler üzerinde oluşturulan, P2 hattı boyunca C_{XY} , C_{XZ} , C_{YZ} gerilme dağılımları verilmiştir. Şekil 4.27 incelendiğinde C_{XY} kayma gerilmesi genel olarak hat boyunca küçük farklarla seyretmektedir. Eliptik geometrilerin C_{XY} kayma gerilmesine göre hat üzerindeki

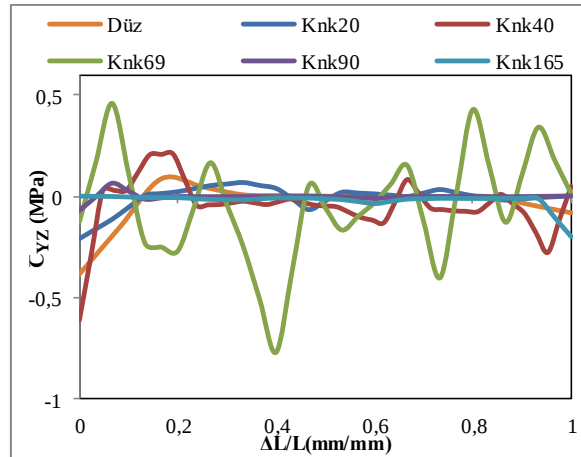
gerilmeler daha değişkendir. şekil 4.28 incelendiğinde τ_{xz} kayma gerilmeleri incelendiğinde hat üzerinde oluşan gerilmeler geometriler arasında farklı ama değişmeyen değerlerle seyretmektedir. şekil 4.29 incelendiğinde τ_{yz} kayma gerilmeleri hat başlangıcında farklı değerler vermekten hattın ortalarına doğru yakın değerler vermektedir. Konik69'un bazı noktalarda tepe ve çukur noktası oluşturduğu görülmektedir. Gerilmeler incelendiğinde koniklik açısının azalması ile yani konikliğin artması ile kayma gerilmeleri giderek artmıştır. Bunun nedeni bağlantı bölgesinde konikliğin artması ile ara yüzeyler kesme kuvvetlerine ve dolayısıyla kayma gerilmelerine daha fazla maruz kalmaktadır.



şekil 4.27 : Konik geo. P2 hattında τ_{xy} (MPa) kayma gerilme dağılımları.



şekil 4.28 : Konik geo. P2 hattında τ_{xz} (MPa) kayma gerilme dağılımları.

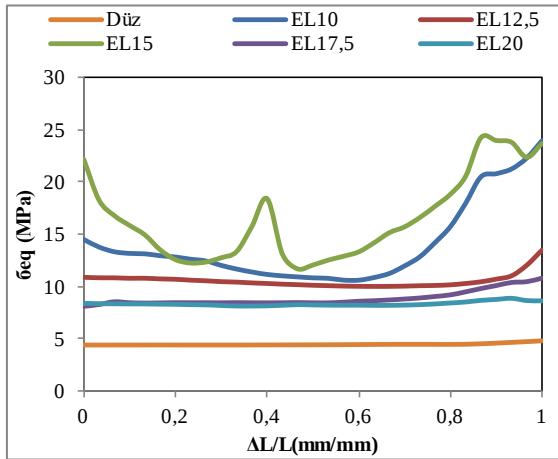


şekil 4.29 : Konik geo. P2 hattında τ_{yz} (MPa) kayma gerilme dağılımları.

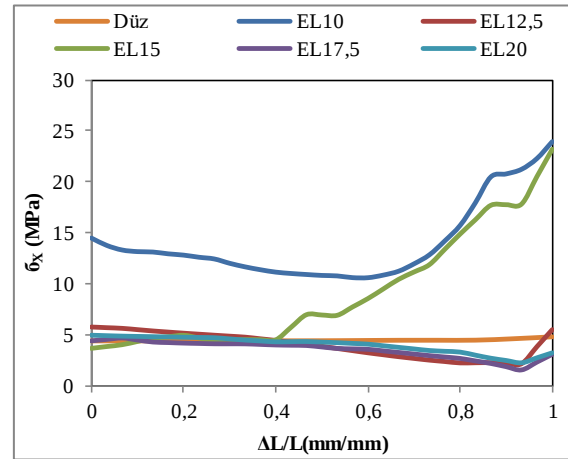
4.1.2 Yapı çeliği-DP810 bağlantılarının nümerik analizi

4.1.2.1 Eliptik geometrilerin metalleri üzerinde oluşturulan P1 hattı boyunca gerilme dağılımları

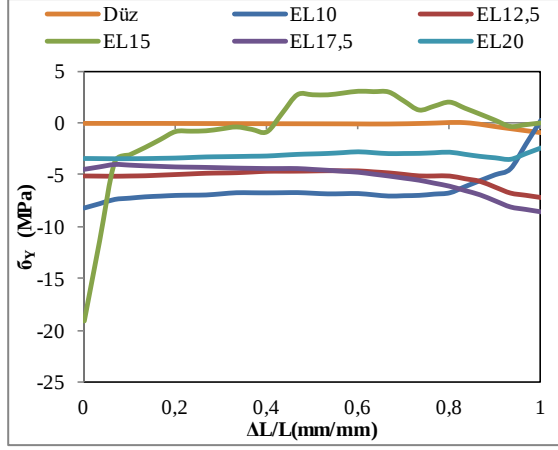
Şekil 4.30, 4.31, 4.32 ve 4.33'de Yapısal çelik tanımlanan, düz ve eliptik geometriler üzerinde oluşturulan, P1 hattı boyunca σ_{eq} , σ_x , σ_y , σ_z gerilme dağılımları verilmiştir. Şekil 4.30 incelendiğinde σ_{eq} gerilmeleri Alüminyum için yapılan analizindekine yakın değerler vermektedir. Eliptik10 hattın son noktalarında artan gerilme değerlerine sahiptir. Şekil 4.31 incelendiğinde Eliptik10 ve eliptik15'de hattın orta noktasından sonra artan gerilmeler ve diğer geometrilerde hat boyunca sabit değerli gerilmeler görülmektedir. Hattın sonuna doğru geometrilerde oluşan gerilmeler azalma eğilimindedir. Şekil 4.32 ve 4.33 incelendiğinde σ_y , σ_z gerilmeleri hat boyunca çok değişmemekle birlikte uç noktalarda farklılık göstermiştir. σ_y gerilmeleri çelik ve alüminyum için benzerdir. Yapısal çelik için σ_z gerilmeleri genel olarak alüminyuma benzemekle birlikte, yapısal çelikte eliptik15 için elde edilen gerilme değerleri hat sonunda pozitif yönde artış gerçekleştirmektedir. Bununla birlikte x eksenı doğrultusunda çekmeye maruz bağlantıda σ_x gerilmelerin çeki karakterli olduğu halde σ_y ve σ_z gerilmelerin bası karakterli olması bağlantı bölgesinin x doğrultusunda çekmeye karşılık diğer eksenlerdeki daralmadan kaynaklanmaktadır.



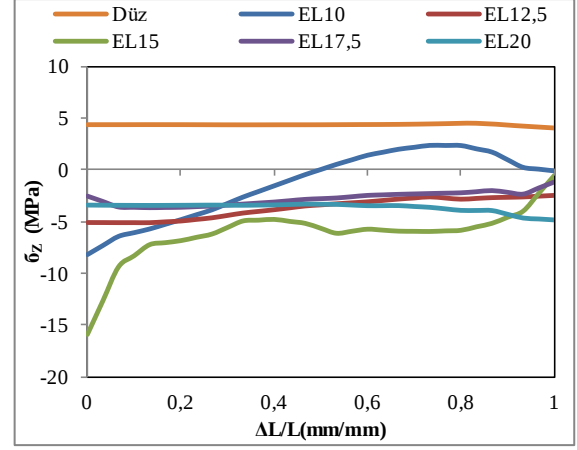
Şekil 4.30 : Eliptik geo. P1 hattında σ_{eq} (MPa) eşdeğer gerilme dağılımları.



Şekil 4.31 : Eliptik geo. P1 hattında σ_x (MPa) normal gerilme dağılımları.

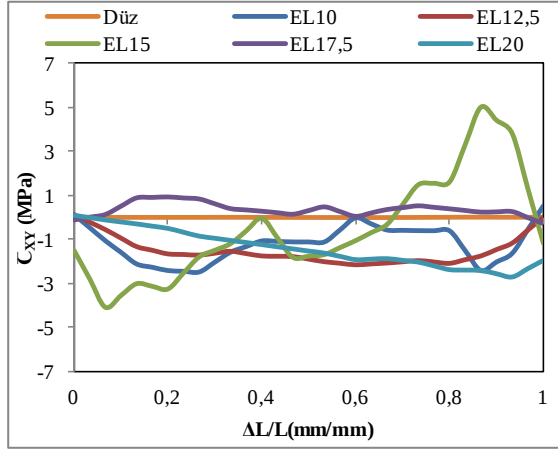


Şekil 4.32 : Eliptik geo. P1 hattında $\bar{\sigma}_y$ (MPa) eşdeğer gerilme dağılımları.

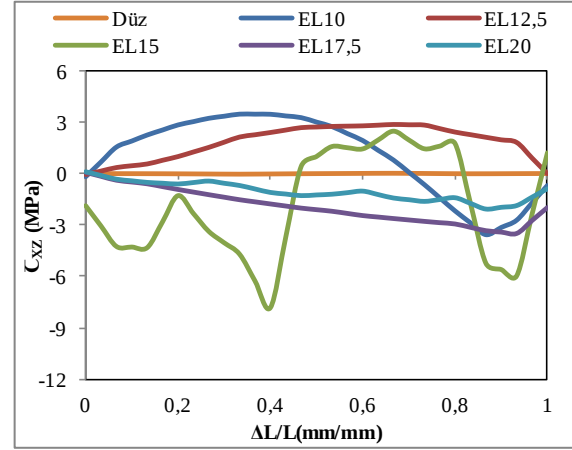


Şekil 4.33 : Eliptik geo. P1 hattında $\bar{\sigma}_z$ (MPa) normal gerilme dağılımları.

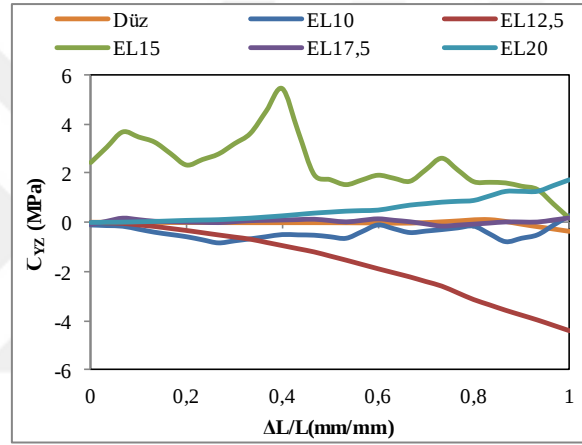
Şekil 4.34, 4.35 ve 4.36'da Yapısal çelik tanımlanan, düz ve eliptik geometriler üzerinde oluşturulan, P1 hattı boyunca τ_{xy} , τ_{xz} , τ_{yz} gerilme dağılımları verilmiştir. Şekiller incelendiğinde gerilme değerleri alüminyum gerilme değerlerine benzemektedir fakat alüminyuma göre hat üzerindeki bazı noktalarda biraz daha yüksektir. Hat üzerindeki bazı noktalarda ise alüminyuma nazaran sapma miktarı fazladır. Şekil 4.35 incelendiğinde τ_{xz} kayma gerilmeleri hattın başlangıç ve bitiş noktalarında yakın değerler, hattın ortalarına doğru az bir değişkenlik göstermiştir. Şekil 4.36 incelendiğinde τ_{yz} kayma gerilmeleri hat boyunca birbirine yakın değerlerle devam ederken hattın sonuna doğru sapmaktadırlar. Eliptik 15'in bazı noktalarda tepe noktası oluşturduğu görülmektedir. Daha önce de ifade edildiği gibi gerilmeler incelendiğinde eliptikliğin artması ile kayma gerilmeleri giderek artmıştır. Bunun nedeni artan eliptiklik sebebiyle ara yüzeyler kesme kuvvetlerine ve dolayısıyla kayma gerilmelerine daha fazla maruz kalmaktadır. Ayrıca eksenlerdeki daralma kayma gerilmelerinin çeki ve bası karakterde olmasını sağlamıştır.



Şekil 4.34 : Eliptik geo. P1 hattında C_{XY} (MPa) kayma gerilme dağılımları.



Şekil 4.35 : Eliptik geo. P1 hattında C_{XZ} (MPa) kayma gerilme dağılımları.

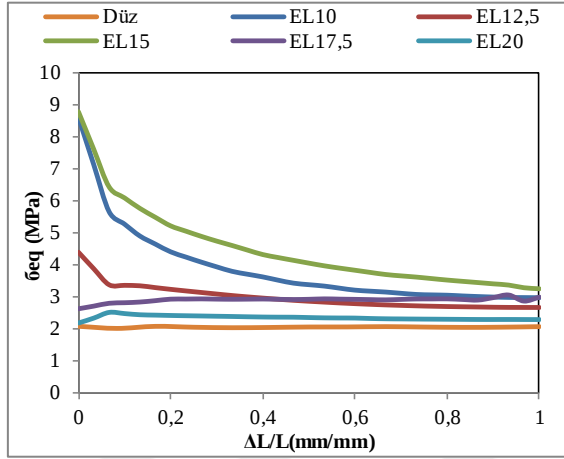


Şekil 4.36 : Eliptik geo. P1 hattında C_{YZ} (MPa) kayma gerilme dağılımları.

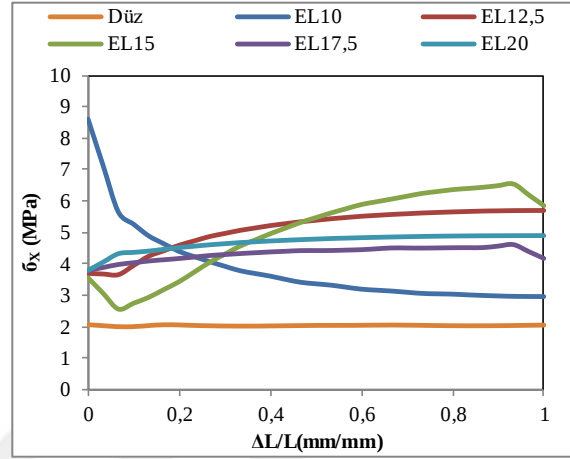
4.1.2.2 Eliptik geometrilerin yapıştırıcıları üzerinde oluşturulan P2 hattı boyunca gerilme dağılımları

Şekil 4.37, 4.38, 4.39 ve 4.40'de Yapısal çelik tanımlanan, düz ve eliptik geometriler üzerinde oluşturulan, P2 hattı boyunca σ_{eq} , σ_x , σ_y , σ_z gerilme dağılımları verilmiştir. Şekil 4.37 incelendiğinde σ_{eq} eşdeğer gerilmeler hattın başlangıcında bitişine oranla daha yüksek seviyededir. Şekil 4.38 incelendiğinde σ_x normal gerilmeler hatta artarak devam etmektedir. Eliptik10'a ait gerilmelerde ise hattın başında yüksekken giderek azalmıştır. Şekil 4.39 ve 4.40 incelendiğinde σ_y , σ_z normal gerilmeleri hat başlangıcından itibaren artmaktadır. Şekil 4.40 incelendiğinde σ_z normal gerilmesi düz parçanın yapıştırıcısında oluşan gerilme diğerlerinden daha yüksek olarak görülmektedir. Eliptiklik yarıçapının azalması eliptikliğin artmasına sebep olur bu durum tek eksenli gerilme durumundan çok eksenli gerilme durumuna geçişe sebep olmaktadır. Dolayısıyla durum ara yüzeyde

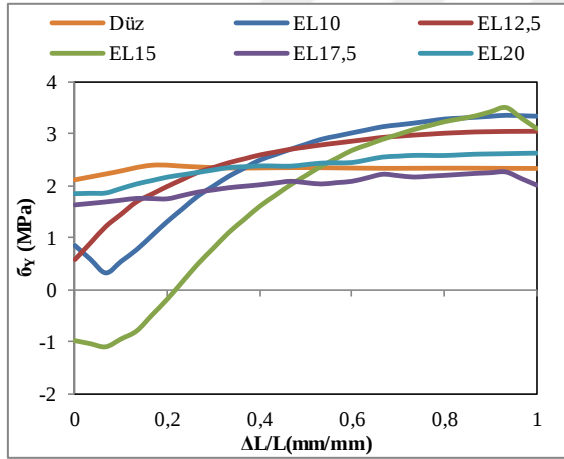
yapıştırılan malzeme ve yapıştırıcı yüzeyinde oluşan normal ve kayma gerilmelerini arttırmaktadır. Normal ve kayma gerilmelerindeki bu artış eşdeğer gerilmelerin artmasına neden olmaktadır.



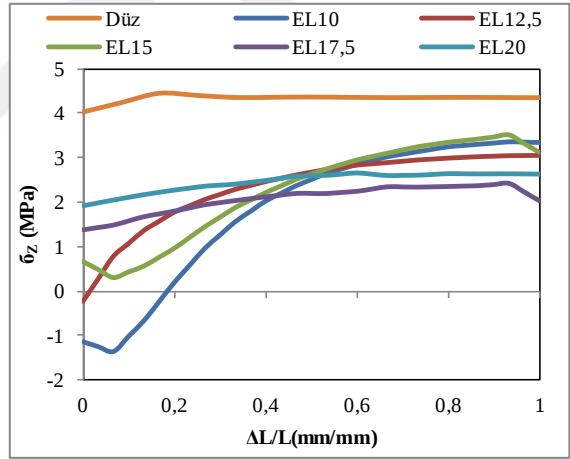
Şekil 4.37 : Eliptik geo. P2 hattında σ_{eq} (MPa) eşdeğer gerilme dağılımları.



Şekil 4.38 : Eliptik geo. P2 hattında σ_x (MPa) normal gerilme dağılımları.



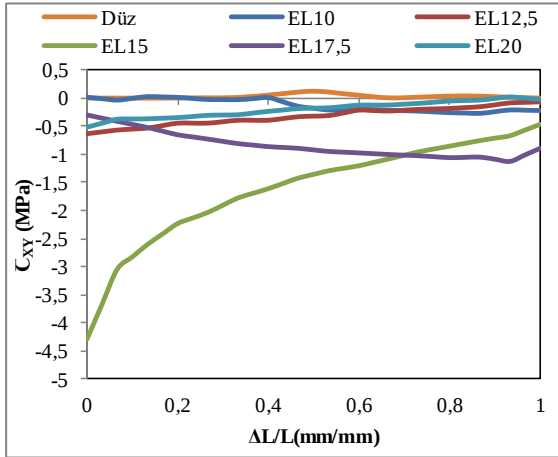
Şekil 4.39 : Eliptik geo. P2 hattında σ_y (MPa) eşdeğer gerilme dağılımları.



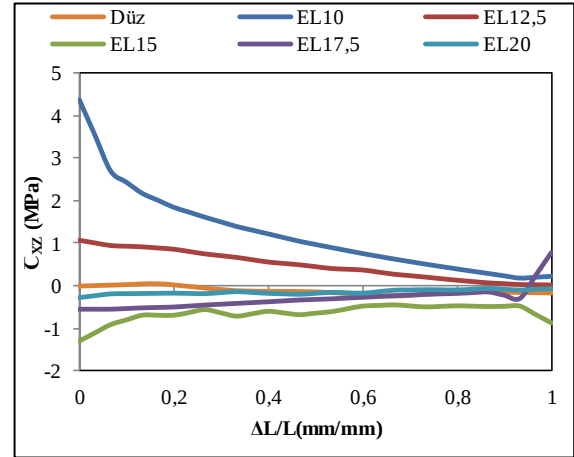
Şekil 4.40 : Eliptik geo. P2 hattında σ_z (MPa) normal gerilme dağılımları.

Şekil 4.41, 4.42 ve 4.43'de Yapısal çelik tanımlanan, düz ve eliptik geometriler üzerinde oluşturulan, P2 hattı boyunca C_{XY} , C_{XZ} , C_{YZ} gerilme dağılımları verilmiştir. Şekil 4.41 incelendiğinde C_{XY} kayma gerilmesi genel olarak hat boyunca küçük farklarla devam etmektedir. Eliptik 15'e ait gerilme değerleri hattı pozitif yönde artarak sonlandırmaktadır. Şekil 4.42 ve 4.43 incelendiğinde C_{XZ} , C_{YZ} kayma gerilmeleri hat başlangıcında farklı değerler vermekteyken hattın sonuna doğru eşit değerler vermektedir. Daha önce de ifade

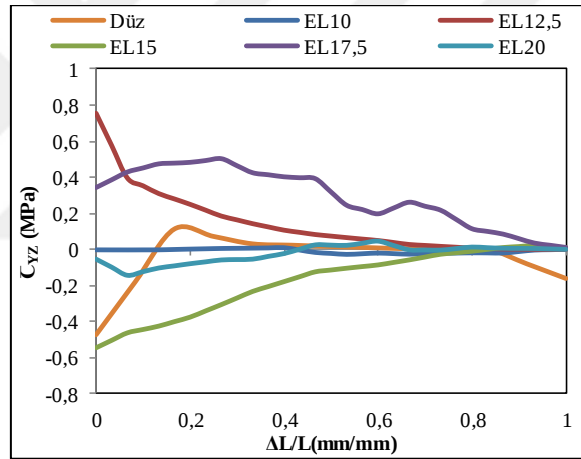
edildiği gibi ara yüzeylerin kesme kuvvetlerine daha fazla maruz kalmasına eliptikliğın artışı sebep olmuştur. Artan kesme kuvvetleri kayma gerilmelerini arttırmıştır.



Şekil 4.41 : Eliptik geo. P2 hattında C_{XY} (MPa) kayma gerilme dağılımları.



Şekil 4.42 : Eliptik geo. P2 hattında C_{XZ} (MPa) kayma gerilme dağılımları.

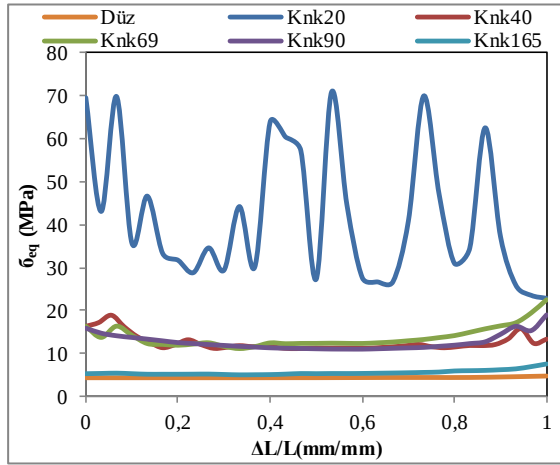


Şekil 4.43 : Eliptik geo. P2 hattında C_{YZ} (MPa) kayma gerilme dağılımları.

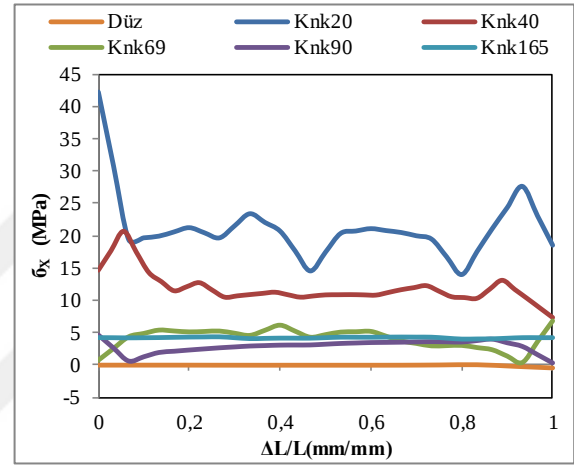
4.1.2.3 Konik geometrilerin metalleri üzerinde oluşturulan P1 hattı boyunca gerilme dağılımları

Şekil 4.44, 4.45, 4.46 ve 4.47'de Yapısal çelik tanımlanan, düz ve konik geometriler üzerinde oluşturulan, P1 hattı boyunca σ_{eq} , σ_x , σ_y , σ_z gerilme dağılımları verilmiştir. Şekiller incelendiğinde gerilmeler alüminyum gerilme grafiklerine görünüm bakımından benzemekle birlikte gerilme değerleri ve hat üzerinde oluşan gerilmelerdeki artma ve azalma miktarı çelikte daha fazladır. Şekil 4.44 incelendiğinde konik20'nin σ_{eq} normal gerilmeleri hat boyunca değişkendir. Bununla birlikte konik20 hat üzerinde çukur ve tepe

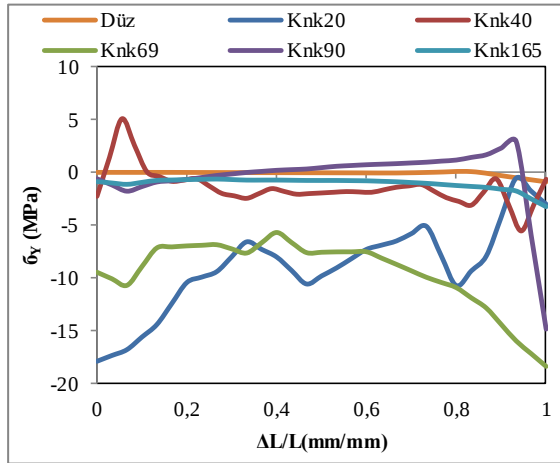
noktaları oluşturmıştır. Şekil 4.47 incelendiğinde konik90'nın σ_z gerilme değerleri negatif yönde diğer geometrilerden daha yüksek seviyededir. Konikliğin artması ile bağlantı bölgesinde tek eksenli gerilme durumundan çok eksenli gerilme durumuna geçilmektedir ve bu durum normal gerilmelerin artmasına sebep olur. Bununla birlikte x eksenini doğrultusunda çekmeye maruz bağlantıda σ_x gerilmelerin çeki karakterli olduğu halde σ_y ve σ_z gerilmelerin bası karakterli olması bağlantı bölgesinin x doğrultusunda çekmeye karşılık diğer eksenlerdeki daralmadan kaynaklanmaktadır.



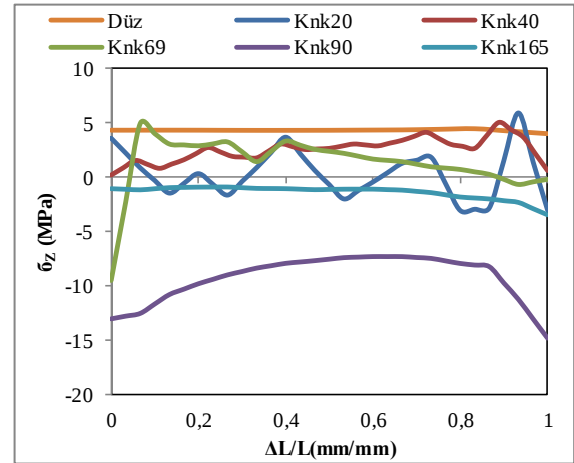
Şekil 4.44 : Konik geo. P1 hattında σ_{eq} (MPa) eşdeğer gerilme dağılımları.



Şekil 4.45 : Konik geo. P1 hattında σ_x (MPa) normal gerilme dağılımları.



Şekil 4.46 : Konik geo. P1 hattında σ_y (MPa) eşdeğer gerilme dağılımları.

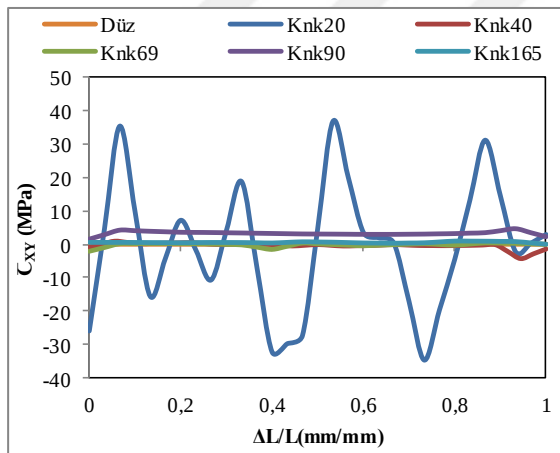


Şekil 4.47 : Konik geo. P1 hattında σ_z (MPa) normal gerilme dağılımları.

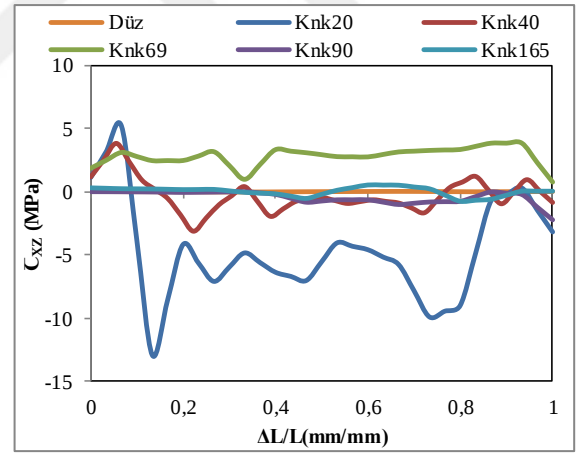
Şekil 4.48, 4.49, 4.50'da Yapısal çelik tanımlanan, düz ve konik geometriler üzerinde oluşturulan, P1 hattı boyunca τ_{xy} , τ_{xz} , τ_{yz} gerilme dağılımları verilmiştir. Şekiller incelendiğinde gerilme değerleri alüminyum gerilme değerlerine benzemektedir fakat alüminyuma göre hat üzerinde bazı noktalarda biraz daha yüksektir. Hat üzerindeki bazı

noktalarda ise alüminyuma nazaran sapma miktarı fazladır. Şekil 4.49 incelendiğinde konik40 için C_{xz} kayma gerilmeleri alüminyumdaki C_{xz} kayma gerilmelerinden farklı olduğu görülmektedir. Hattın başlangıç ve bitiş noktalarında yakın değerler, hattın ortalarına doğru az bir değişkenlik göstermiştir. Şekil 4.50 incelendiğinde C_{yz} kayma gerilmeleri hat boyunca birbirine yakın değerlerle devam ederken hattın sonuna doğru saptırmaktadırlar. Konik20'nin bazı noktalarda tepe ve çukur noktası oluşturduğu görülmektedir. Daha öncede ifade edildiği gibi gerilmeler incelendiğinde konikliğin artması ile kayma gerilmeleri giderek artmıştır. Bunun nedeni artan koniklik sebebiyle ara yüzeyler kesme kuvvetlerine ve dolayısıyla kayma gerilmelerine daha fazla maruz kalmaktadır.

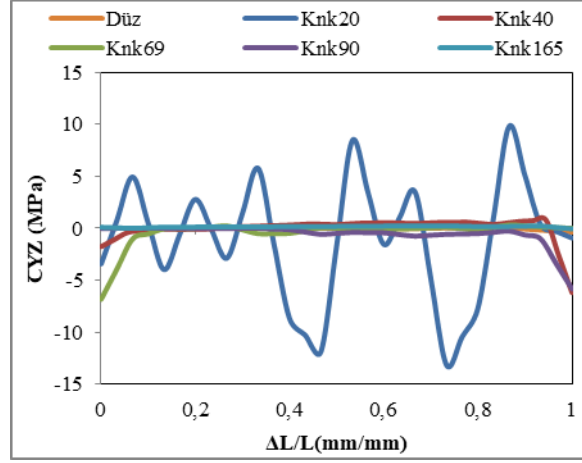
Ayrıca yapıştırılan malzemeler açısından bakıldığında, yapıştırıcı ile yapıştırılan çelik malzemelerde oluşan gerilmelerin, yapıştırıcı ile yapıştırılan alüminyum malzemelerde oluşan gerilmelerden daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun nedeni beraber hareket eden yapıştırıcı-çelik ara yüzeylerinde oluşan şekil değiştirmelerin, yapıştırıcı-alüminyum ara yüzeyinde oluşan şekil değiştirmelerine göre daha uyumsuz olmalarındandır.



Şekil 4.48 : Konik geo. P1 hattında C_{xy} (MPa) kayma gerilme dağılımları.



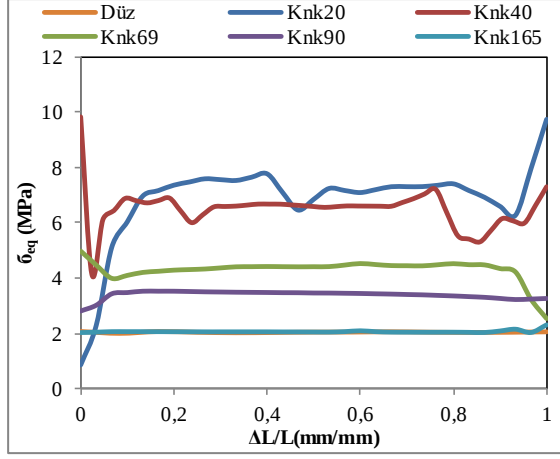
Şekil 4.49 : Konik geo. P1 hattında C_{xz} (MPa) kayma gerilme dağılımları.



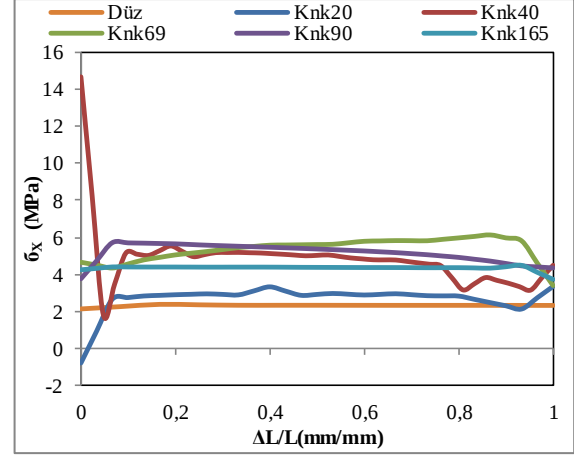
Şekil 4.50 : Konik geo. P1 hatında C_{YZ} (MPa) kayma gerilme dağılımları.

4.1.2.4 Konik geometrilerin yapıştırıcıları üzerinde oluşturulan P2 hattı boyunca gerilme dağılımları

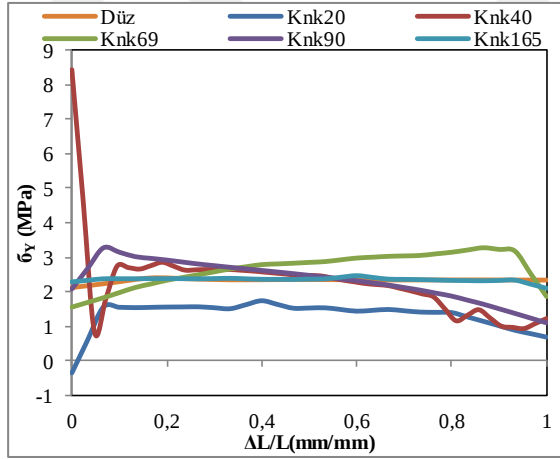
Şekil 4.51, 4.52, 4.53 ve 4.54'de Yapısal çelik tanımlanan, düz ve konik geometriler üzerinde oluşturulan, P2 hattı boyunca σ_{eq} , σ_x , σ_y , σ_z gerilme dağılımları verilmiştir. Şekiller incelendiğinde gerilmeler geometrilerin çoğu için hat üzerindeki noktalarda birbirine yakın ama farklı değerler almaktadır. Konik40 için gerilme değerleri hattın başında diğer geometrilerden daha yüksek değerler almıştır ve hattın sonuna doğru azalarak devam etmiştir. Şekil 4.51 incelendiğinde Konik20 için gerilme değerleri hattın başlangıcında en düşük değerleri almasına karşın hatta artarak devam etmiştir. σ_{eq} eşdeğer gerilme değerleri konik20 ve konik40 hariç diğer geometriler eşit değerlerle devam etmektedir. Koniklik açısının azalması konikliğin artmasına sebep olur bu durum tek eksenli gerilme durumundan çok eksenli gerilme durumuna geçişe sebep olmaktadır. Dolayısıyla durum ara yüzeyde yapıştırılan malzeme ve yapıştırıcı yüzeyinde oluşan normal ve kayma gerilmelerini arttırmaktadır. Normal ve kayma gerilmelerindeki bu artış eşdeğer gerilmelerin artmasına neden olmaktadır.



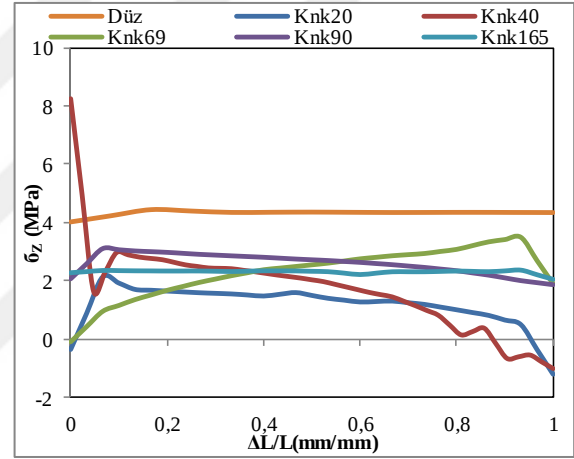
Şekil 4.51 : Konik geo. P2 hattında σ_{eq} (MPa) eşdeğer gerilme dağılımları.



Şekil 4.52 : Konik geo. P2 hattında σ_x (MPa) normal gerilme dağılımları.



Şekil 4.53 : Konik geo. P2 hattında σ_y (MPa) eşdeğer gerilme dağılımları.

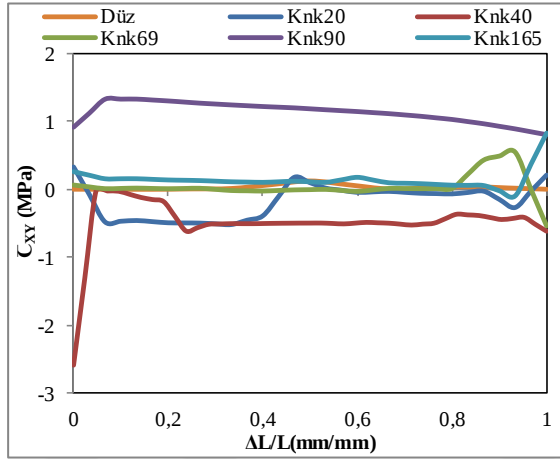


Şekil 4.54 : Konik geo. P2 hattında σ_z (MPa) normal gerilme dağılımları.

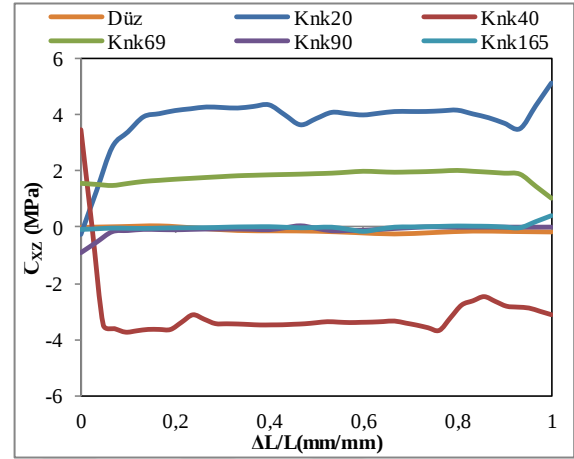
Şekil 4.55, 4.56 ve 4.57'de Yapısal çelik tanımlanan, düz ve konik geometriler üzerinde oluşturulan, P2 hattı boyunca C_{XY} , C_{XZ} , C_{YZ} gerilme dağılımları verilmiştir. Şekil 4.55 incelendiğinde C_{XY} kayma gerilmesi genel olarak hat boyunca küçük farklarla seyretmektedir. Şekil 4.56 incelendiğinde C_{XZ} kayma gerilmeleri hat üzerinde oluşan gerilmeler kararlı devam etmektedir. Şekil 4.57 incelendiğinde C_{YZ} kayma gerilmeleri hat başlangıcı haricinde belirgin bir aralıkta değer almaktadır. Daha önce de ifade edildiği gibi ara yüzeylerin kayma kuvvetlerine daha fazla maruz kalmasına konikliğin artışı sebep olmuştur. Artan kesme kuvvetleri kayma gerilmelerini artırmıştır.

Ayrıca yapıştırılan malzemeler açısından bakıldığında, yapıştırıcı ile yapıştırılan çelik malzemelerde oluşan gerilmelerin, yapıştırıcı ile yapıştırılan alüminyum malzemelerde oluşan gerilmelerden daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun nedeni beraber hareket

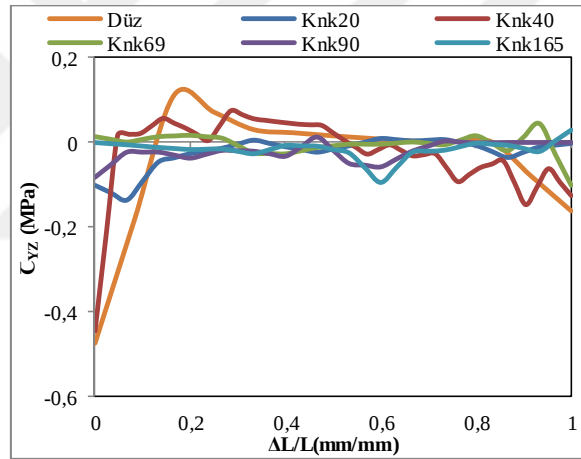
eden yapıştırıcı-çelik ara yüzlerinde oluşan şekil değiştirmelerin, yapıştırıcı-alüminyum ara yüzeyinde oluşan şekil değiştirmelerine göre daha uyumsuz olmalarındandır.



Şekil 4.55 : Konik geo. P2 hattında C_{xy} (MPa) kayma gerilme dağılımları.



Şekil 4.56 : Konik geo. P2 hattında C_{xz} (MPa) kayma gerilme dağılımları.



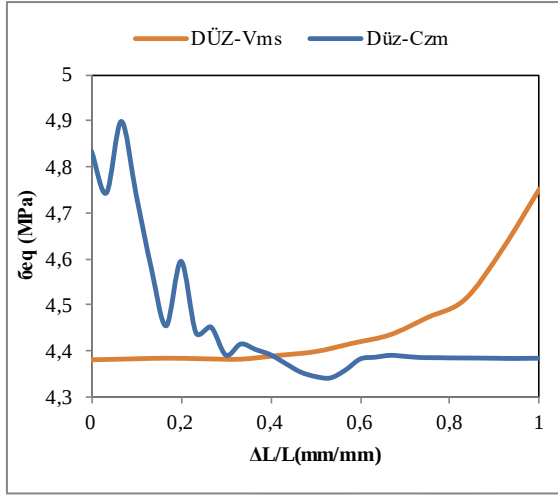
Şekil 4.57 : Konik geo. P2 hattında C_{yz} (MPa) kayma gerilme dağılımları.

4.1.3 Cohesive zone model (CZM) analiz sonuçları

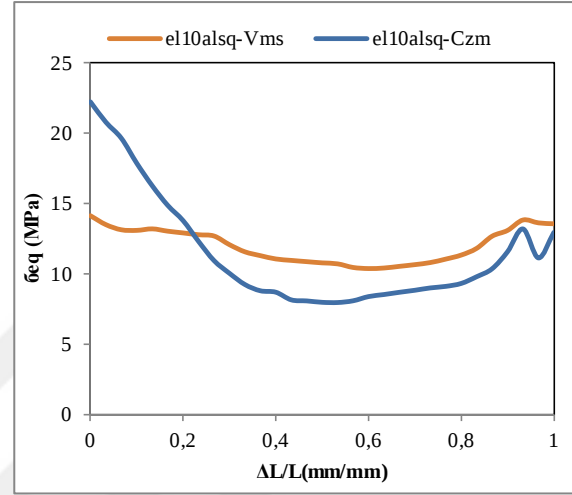
4.1.3.1 Metal geometriler üzerinde oluşturulan P1 hattı için von Mises-Czm σ_{eq} eşdeğer gerilme dağılımları

Şekil 4.58, 4.59, 4.60, 4.61, 4.62, 4.63’de Alüminyum alaşımı tanımlanan, düz ve eliptik geometriler üzerinde oluşturulan, P1 hattı boyunca σ_{eq} gerilme dağılımları hem von Mises hemde cohesive zone modele göre verilmiştir. Şekiller incelendiğinde gerilmeler geometrilerin çoğu için hat üzerindeki noktalarda birbirine yakın ama farklı değerler almaktadır. Düz parça için Czm başlangıçta V_{ms} ’den daha yüksek değerle başlayarak

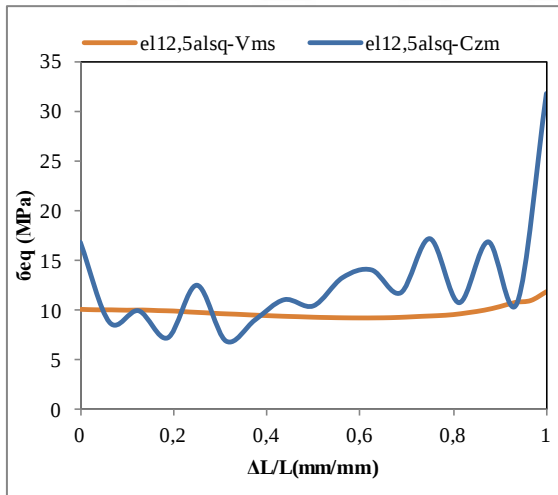
devamında değerlerinde azalma meydana gelirken, Vms başlangıçtan sona kadar kararlı ve artarak devam etmektedir. Eliptik 10-17,5-20 geometri için gerilmeler daha kararlı birbirine yakın değerlere sahiptir. Eliptik 12,5 için czm değerleri hat boyunca farklı değerlere sahiptir ve hattın sonuna artarak devam etmiştir. Eliptik 15 için czm ve von Mises arasında diğer parçalara oranla değerleri arasında yüksek bir fark çıkmıştır.



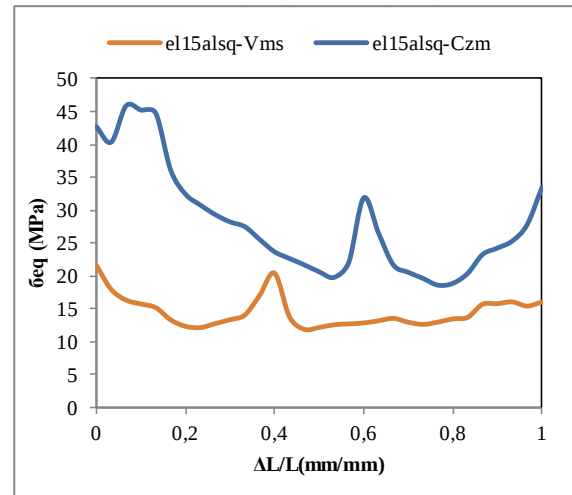
Şekil 4.58 : Düz geo. P1 hattının Vms-Czm ̑eq (MPa) gerilme dağılımları.



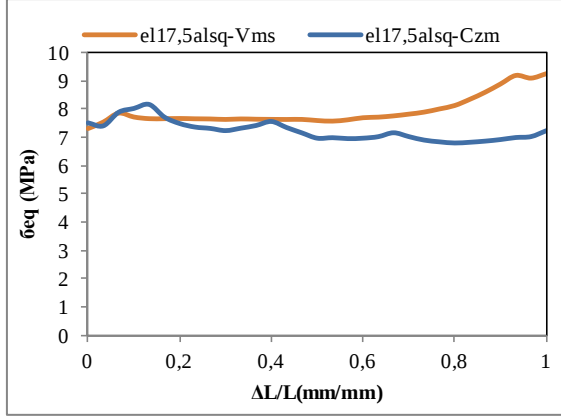
Şekil 4.59 : EL10 geo. P1 hattının Vms-Czm ̑eq (MPa) gerilme dağılımları.



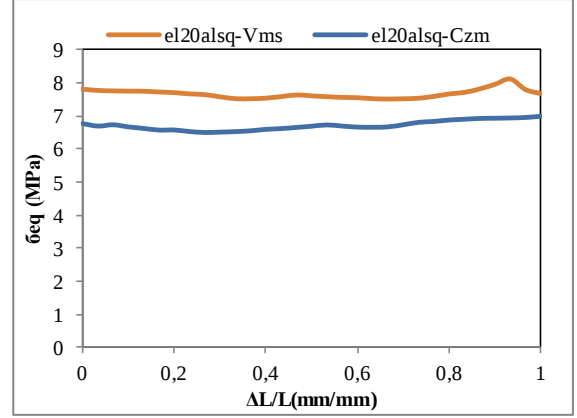
Şekil 4.60 : EL12,5 geo. P1 hattının Vms-Czm ̑eq (MPa) gerilme dağılımları.



Şekil 4.61 : EL15 geo. P1 hattının Vms-Czm ̑eq (MPa) gerilme dağılımları.

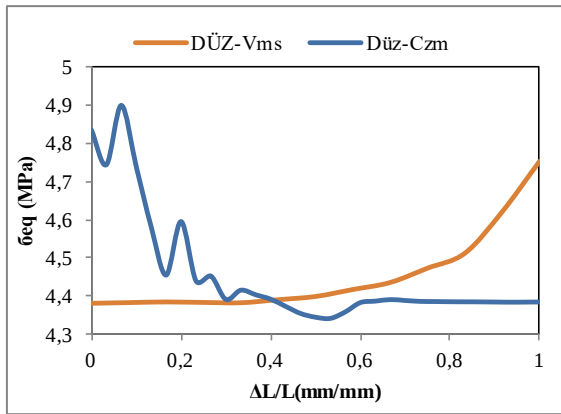


Şekil 4.62 : EL17,5 geo. P1 hattının Vms-Czm $\bar{\sigma}_{eq}$ (MPa) gerilme dağılımları.

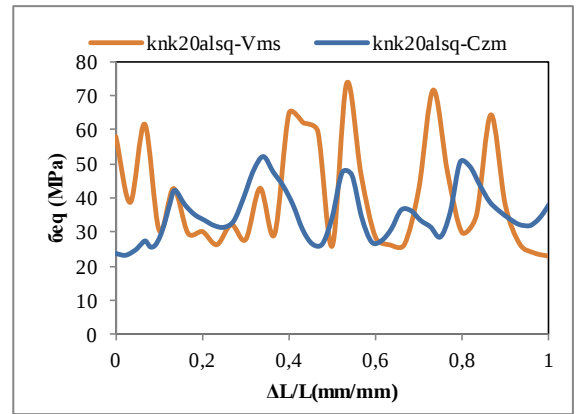


Şekil 4.63 : EL20 geo. P1 hattının Vms-Czm $\bar{\sigma}_{eq}$ (MPa) gerilme dağılımları.

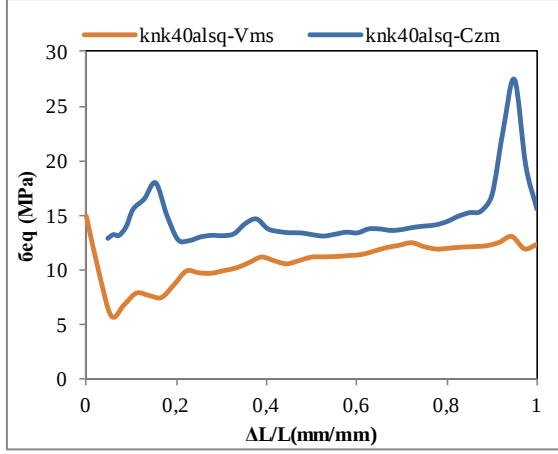
Şekil 4.64, 4.65, 4.66, 4.67, 4.68, 4.69'da Alüminyum alaşımı tanımlanan, düz ve konik geometriler üzerinde oluşturulan, P1 hattı boyunca $\bar{\sigma}_{eq}$ gerilme dağılımları hem von Mises hemde cohesive zone modele göre verilmiştir. Şekiller incelendiğinde gerilmeler geometrilerin çoğu için hat üzerindeki noktalarda genel olarak vms daha kararlı değerlere sahipken, czm daha değişken değerlere sahiptir. Konik20 için gerilme değerleri her iki kriter için sürekli artıp azalarak tepe ve çukur noktaları oluşturmuştur. Bununla birlikte vms daha yüksek değerlere sahiptir. Konik 40 2 noktada değer vermemiş olarak görülmektedir. Konik 69 ve 90 hat boyunca her iki kriter için çok yakın değerlere sahiptirler. Konik 165 ise hattın başlangıcında ve sonunda yakın değerde olmasına karşın orta noktalarda czm değerlerinde artış görülmektedir.



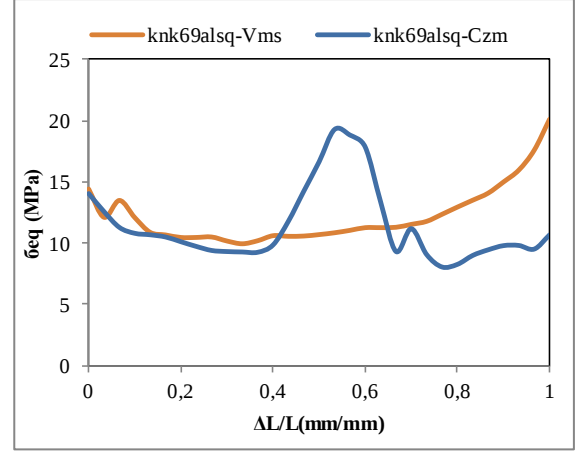
Şekil 4.64 : Düz geo. P1 hattının Vms-Czm $\bar{\sigma}_{eq}$ (MPa) gerilme dağılımları.



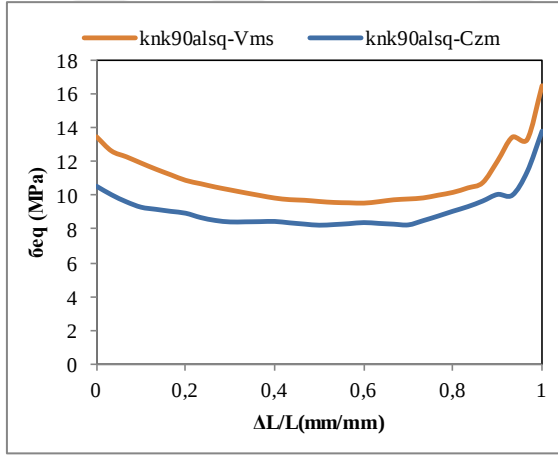
Şekil 4.65 : Knk20 geo. P1 hattının Vms-Czm $\bar{\sigma}_{eq}$ (MPa) gerilme dağılımları.



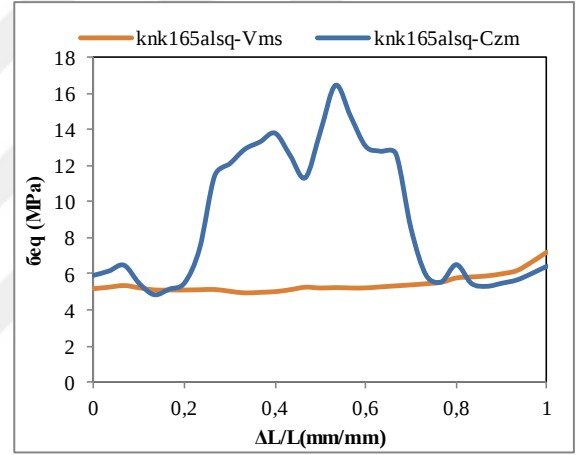
Şekil 4.66 : Knk40 geo. P1 hattının Vms-Czm $\bar{\sigma}_{eq}$ (MPa) gerilme dağılımları.



Şekil 4.67 : Knk69 geo. P1 hattının Vms-Czm $\bar{\sigma}_{eq}$ (MPa) gerilme dağılımları.



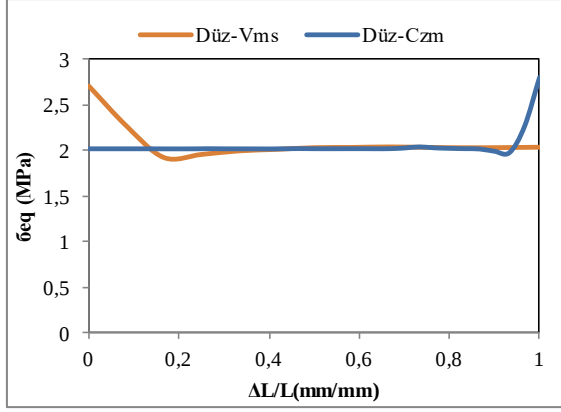
Şekil 4.68 : Knk90 geo. P1 hattının Vms-Czm $\bar{\sigma}_{eq}$ (MPa) gerilme dağılımları.



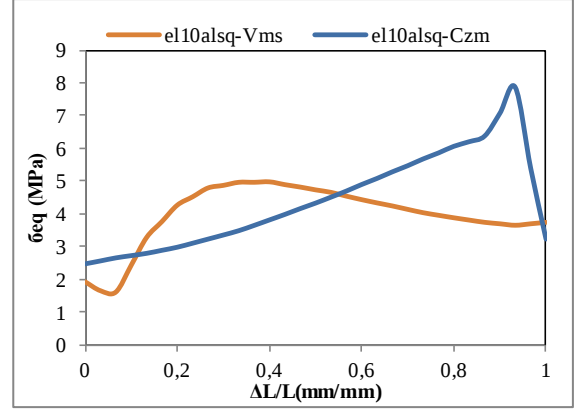
Şekil 4.69 : Knk165 geo. P1 hattının Vms-Czm $\bar{\sigma}_{eq}$ (MPa) gerilme dağılımları.

4.1.3.2 Yapıştırıcı geometriler üzerinde oluşturulan P2 hattı için von Mises-Czm $\bar{\sigma}_{eq}$ eşdeğer gerilme dağılımları

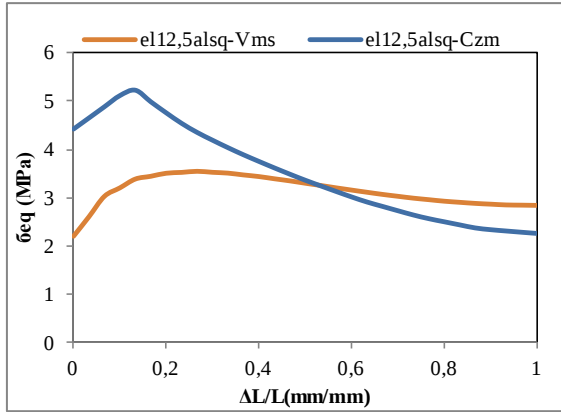
Şekil 4.70, 4.71, 4.72, 4.73, 4.74, 4.75’de Alüminyum alaşımı tanımlanan, düz ve eliptik geometriler üzerinde oluşturulan, P2 hattı boyunca $\bar{\sigma}_{eq}$ gerilme dağılımları hem von Mises hemde cohesive zone modele göre verilmiştir. Şekiller incelendiğinde gerilmeler geometrilerin çoğu için hat üzerindeki noktalarda birbirine yakın hatta bir çok noktada vms ve czm de alınan gerilme değerleri aynıdır. Yalnız başlangıç ve bitiş noktalarında farklı değerlere sahiptirler ve bu değerler arasında çok fark olmadığı görülmektedir.



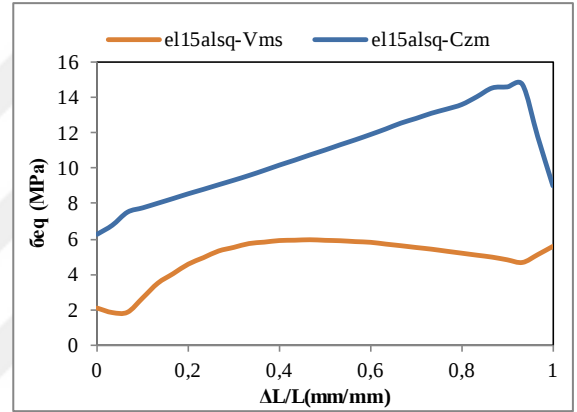
Şekil 4.70 : Düz geo. P2 hattının Vms-Czm $\bar{\sigma}_{eq}$ (MPa) gerilme dağılımları.



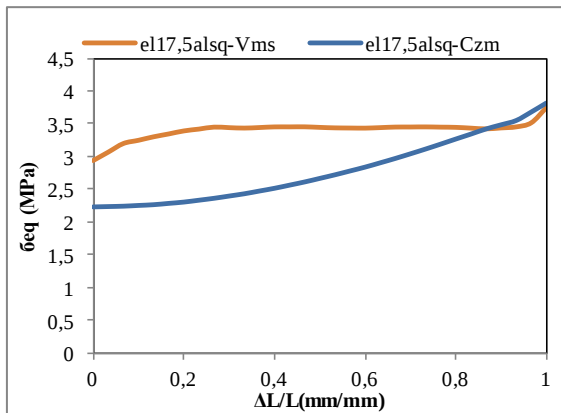
Şekil 4.71 : EL10 geo. P2 hattının Vms-Czm $\bar{\sigma}_{eq}$ (MPa) gerilme dağılımları.



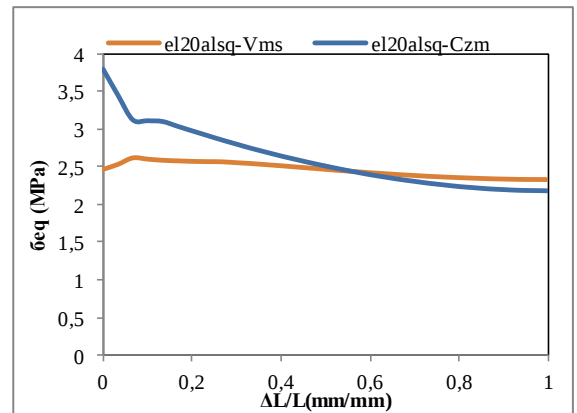
Şekil 4.72 : EL12,5 geo. P2 hattının Vms-Czm $\bar{\sigma}_{eq}$ (MPa) gerilme dağılımları.



Şekil 4.73 : EL15 geo. P2 hattının Vms-Czm $\bar{\sigma}_{eq}$ (MPa) gerilme dağılımları.



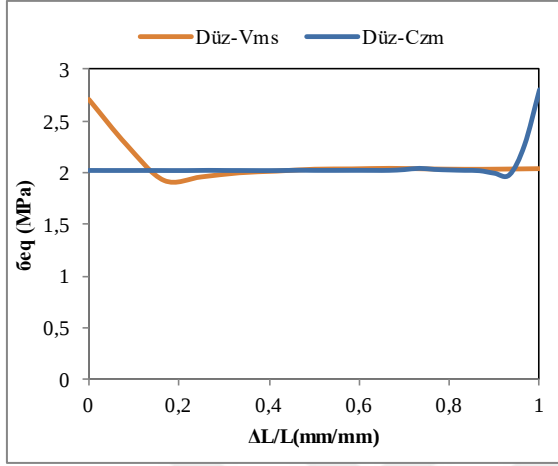
Şekil 4.74 : EL17,5 geo. P2 hattının Vms-Czm $\bar{\sigma}_{eq}$ (MPa) gerilme dağılımları.



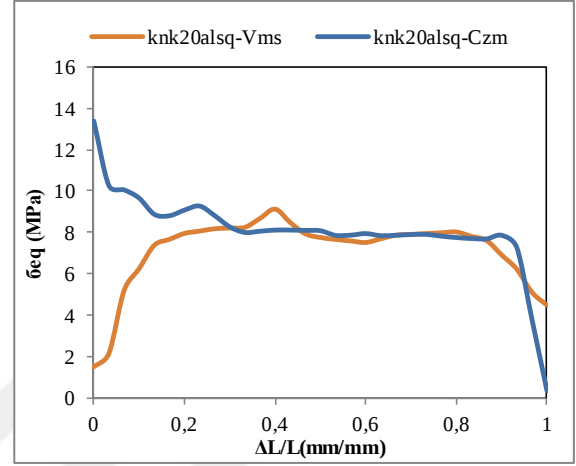
Şekil 4.75 : EL20 geo. P2 hattının Vms-Czm $\bar{\sigma}_{eq}$ (MPa) gerilme dağılımları.

Şekil 4.76, 4.77, 4.78, 4.79, 4.80, 4.81'de Alüminyum alaşımı tanımlanan, düz ve konik geometriler üzerinde oluşturulan, P2 hattı boyunca $\bar{\sigma}_{eq}$ gerilme dağılımları hem von Mises

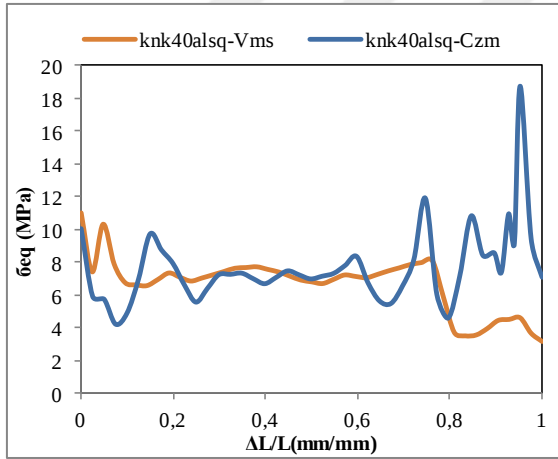
hemde cohesive zone modele göre verilmiştir. Şekiller incelendiğinde gerilmeler Konik 69, 90, 165 için yakın değerler almaktadır. Konik 20 için gerilmeler başlangıç noktasında farklıyken giderek yakınlaşmışlar ve hattı bu şekilde tamamlamış olarak görülmektedir. Konik40 için kararsız değerlerle değişen gerilmeler görülmektedir.



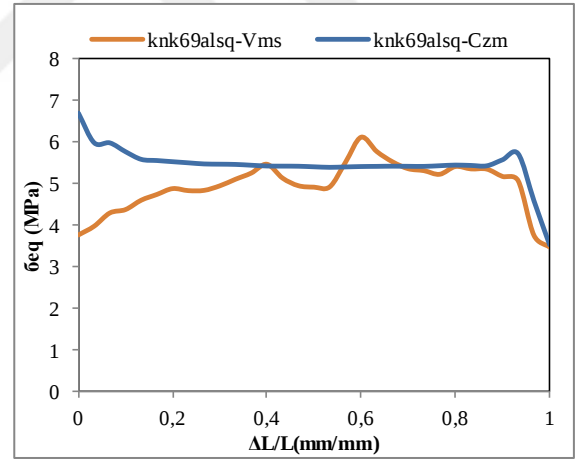
Şekil 4.76 : Düz geo. P2 hattının Vms-Czm $\bar{\sigma}_{eq}$ (MPa) gerilme dağılımları.



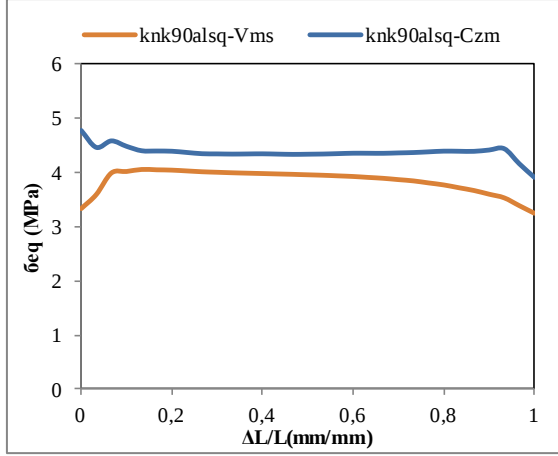
Şekil 4.77 : Knk20 geo. P2 hattının Vms-Czm $\bar{\sigma}_{eq}$ (MPa) gerilme dağılımları.



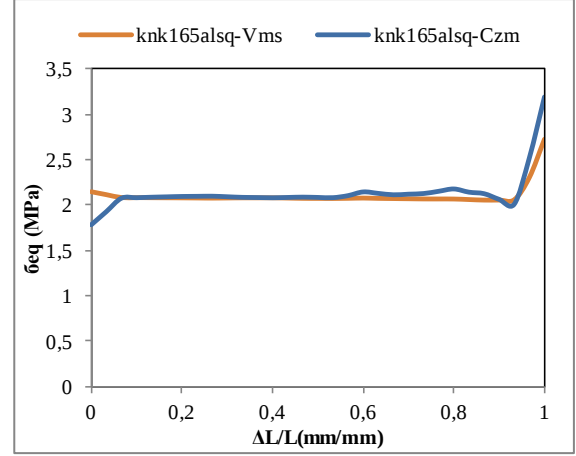
Şekil 4.78 : Knk40 geo. P2 hattının Vms-Czm $\bar{\sigma}_{eq}$ (MPa) gerilme dağılımları.



Şekil 4.79 : Knk69 geo. P2 hattının Vms-Czm $\bar{\sigma}_{eq}$ (MPa) gerilme dağılımları.



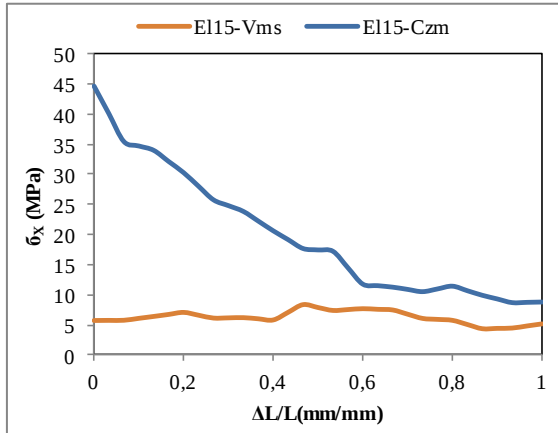
Şekil 4.80 : Knk90 geo. P2 hattının Vms-Czm $\bar{\sigma}_{eq}$ (MPa) gerilme dağılımları.



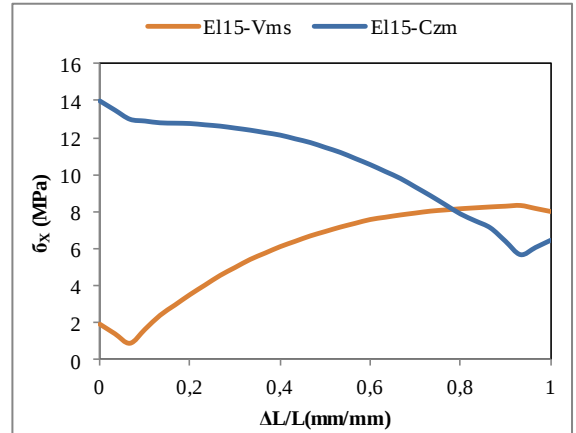
Şekil 4.81 : Knk165 geo. P2 hattının Vms-Czm $\bar{\sigma}_{eq}$ (MPa) gerilme dağılımları.

4.1.3.3 Eliptik15 bağlantısının metal üzerinde oluşturulan P1 ve yapıştırıcı üzerinde oluşturulan P2 hattı için von Mises-Czm gerilme dağılımları

Şekil 4.82 ve 4.83’de Alüminyum alaşımı tanımlanan, eliptik15 geometrisi üzerinde oluşturulan, P1 ve P2 hattı boyunca $\bar{\sigma}_x$ gerilme dağılımları hem von Mises hemde cohesive zone modele göre verilmiştir. P1 hattında başlangıçta czm ve vms arasında yüksek bir fark görülmektedir. Hattın diğer noktalarında birbirine daha yakın değerlerde oldukları görülmektedir. P2 hattında, başlangıçta P1 hattı kadar fark olmamakla birlikte hattın sonlarında değerler yakınlaşmıştır. Her iki hat içinde czm daha yüksek değerlere sahiptir.

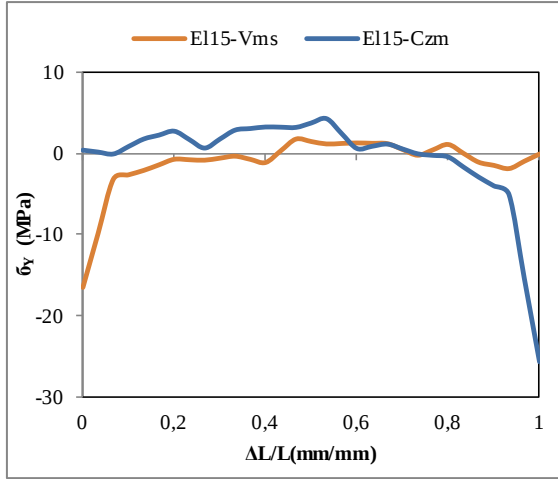


Şekil 4.82 : Eliptik15 geo. P1 hattının Vms-Czm $\bar{\sigma}_x$ (MPa) gerilme dağılımları.

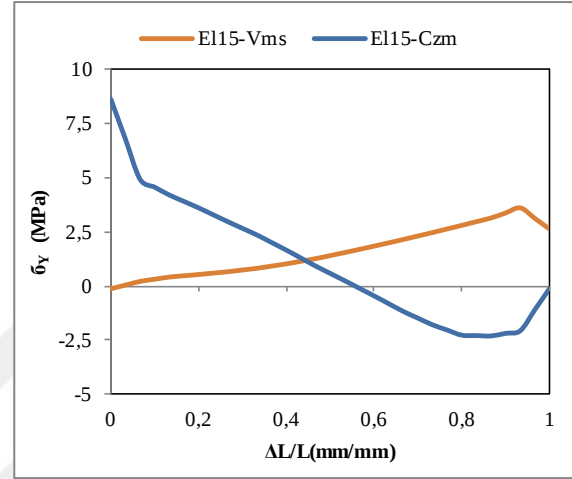


Şekil 4.83 : Eliptik15 geo. P2 hattının Vms-Czm $\bar{\sigma}_x$ (MPa) gerilme dağılımları.

Şekil 4.84 ve 4.85’de Alüminyum alaşımı tanımlanan, eliptik15 geometrisi üzerinde oluşturulan, P1 ve P2 hattı boyunca σ_Y gerilme dağılımları hem von Mises hemde cohesive zone modele göre verilmiştir. P1 ve P2 hattının hem başlangıç hemde bitiş noktalarında czm ve vms arasında fark görülmektedir. P1 hattında orta noktalarda birbirine daha yakın değerlerde oldukları görülmektedir.

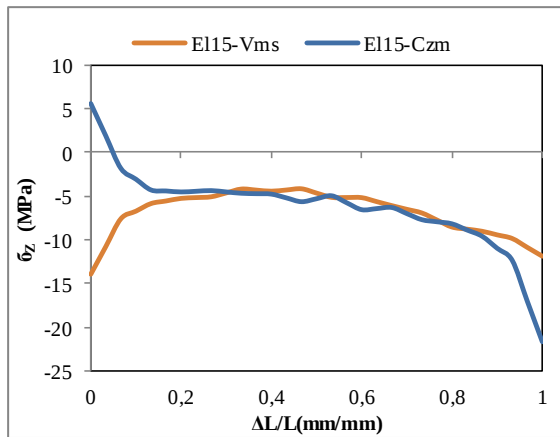


Şekil 4.84 : Eliptik15 geo. P1 hattının Vms-Czm σ_Y (MPa) gerilme dağılımları.

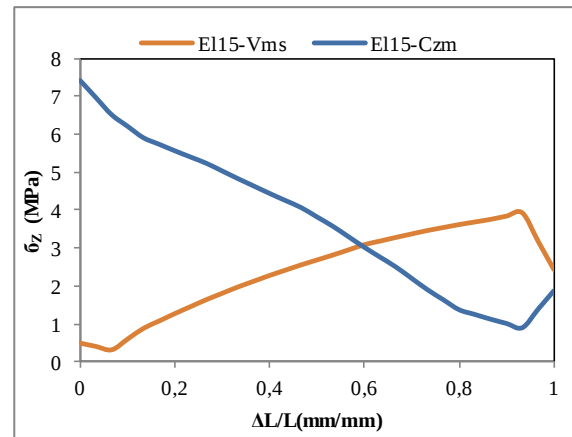


Şekil 4.85 : Eliptik15 geo. P2 hattının Vms-Czm σ_Y (MPa) gerilme dağılımları.

Şekil 4.86 ve 4.87’de Alüminyum alaşımı tanımlanan, eliptik15 geometrisi üzerinde oluşturulan, P1 ve P2 hattı boyunca σ_Z gerilme dağılımları hem von Mises hemde cohesive zone modele göre verilmiştir. P1 hattının gerilme değerlerinde, başlangıç ve bitiş noktası arasında fark olsada genel olarak birbirine daha yakın ve hat boyunca kararlıdır. P2 hattında alınan sonuçlar tüm eksenlerde benzer olarak görülmektedir.



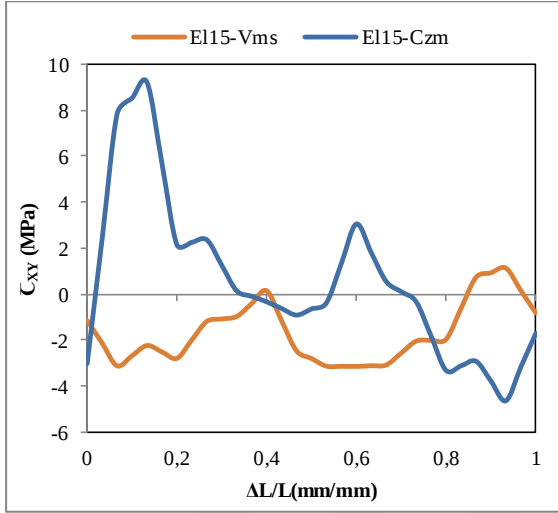
Şekil 4.86 : Eliptik15 geo. P1 hattının Vms-Czm σ_Z (MPa) gerilme dağılımları.



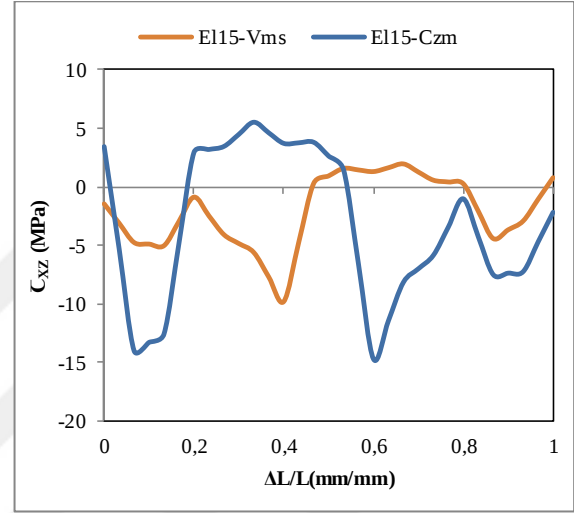
Şekil 4.87 : Eliptik15 geo. P2 hattının Vms-Czm σ_Z (MPa) gerilme dağılımları.

Şekil 4.88, 4.89, 4.90’da Alüminyum alaşımı tanımlanan, eliptik15 geometrisi üzerinde oluşturulan, P1 hattı boyunca C_{XY} , C_{XZ} , C_{YZ} gerilme dağılımları hem von Mises hemde cohesive zone modele göre verilmiştir.

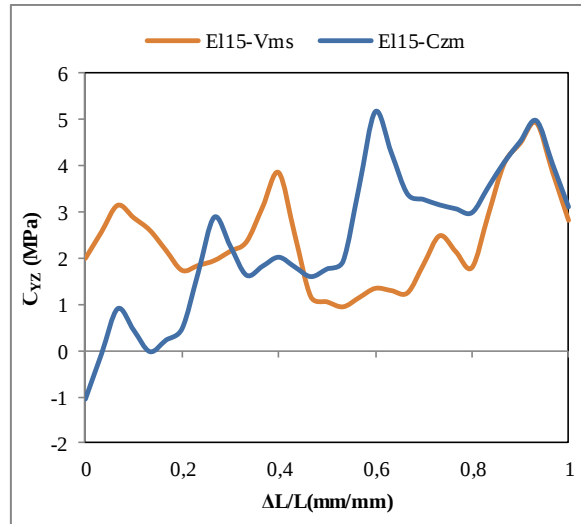
P1 hattının gerilme değerlerinde hat boyunca farklı değerler görülmektedir. Czm genel olarak daha yüksek değerlere sahiptir. Czm gibi vms de hat üzerinde tepe ve çukur noktaları oluşturmuştur.



Şekil 4.88 : Eliptik15 geo. P1 hattının Vms-Czm C_{XY} (MPa) gerilme dağılımları.



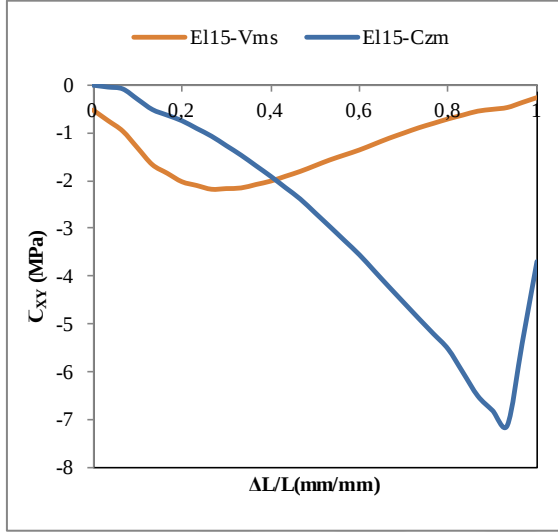
Şekil 4.89 : Eliptik15 geo. P1 hattının Vms-Czm C_{XZ} (MPa) gerilme dağılımları.



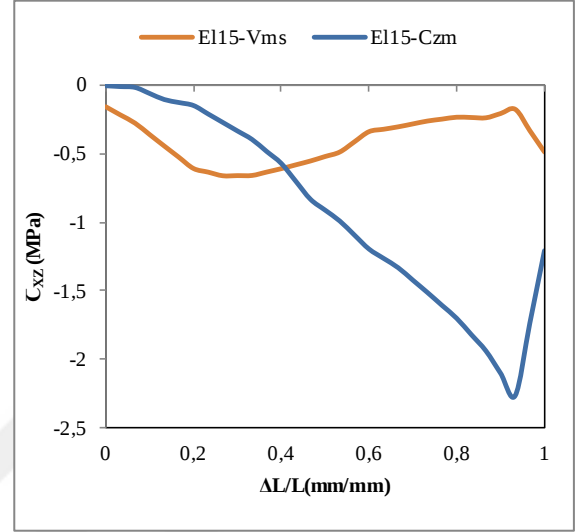
Şekil 4.90 : Eliptik15 geo. P1 hattının Vms-Czm C_{YZ} (MPa) gerilme dağılımları.

Şekil 4.91, 4.92, 4.93’de Alüminyum alaşımı tanımlanan, eliptik15 geometrisi üzerinde oluşturulan, P2 hattı boyunca C_{XY} , C_{XZ} , C_{YZ} gerilme dağılımları hem von Mises hemde cohesive zone modele göre verilmiştir.

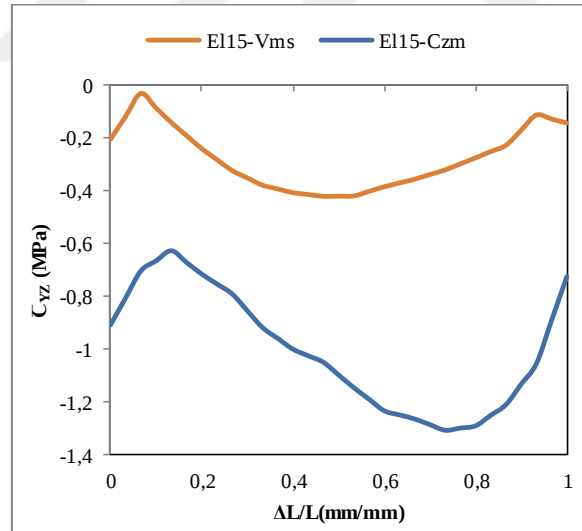
P2 hattının gerilme değerlerinde, hat boyunca farklı fakat çok küçük bir aralıkta değişen değerlere sahip olduğu görülmektedir. Czm genel olarak daha yüksek değerlere sahiptir. Kayma gerilmeleri negatif bölgede değişmektedir.



Şekil 4.91 : Eliptik15 geo. P2 hattının Vms-Czm C_{xy} (MPa) gerilme dağılımları.



Şekil 4.92 : Eliptik15 geo. P2 hattının Vms-Czm C_{xz} (MPa) gerilme dağılımları.



Şekil 4.93 : Eliptik15 geo. P2 hattının Vms-Czm C_{yz} (MPa) gerilme dağılımları.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında, yapıştırma bağlantıların mukavemeti üzerine normal ve kayma gerilmelerinin etkilerini daha iyi anlamak üzere koniklik açısının ve eliptiklik yarıçapının değişimi ile ara yüzeyde oluşacak normal ve kayma gerilmelerinin değiştiği uç uca konik ve eliptik iki yapıştırma bağlantı geometrisi incelendi. Alüminyum ve yapı çeliği olmak üzere yapıştırılan iki malzeme farklı açılarda konik ve farklı eğrilik yarıçaplarında eliptik yapıştırma yüzeyleri DP810 yapısal yapıştırıcı kullanılarak elde edilen uç uca bağlantının (butt joint) sayısal analizi yapıldı. Çekme kuvveti etkisinde yapıştırıcıda meydana gelecek hasar yükünün, gerilmelerin, birleştirilen parçaların geometrilerinin ve yüzey alanlarının yapıştırma performansına etkileri nümerik olarak araştırılmıştır ve sonuçları aşağıda özetlenmiştir.

- Eliptiklik yarıçapının azalması yani eliptikliğin artması ile yapışma alanları sabit kalmak şartıyla, tek eksenli gerilme durumundan çok eksenli gerilme durumuna geçilmekte ve bu durum da, gerilmelerin eliptikliğe bağlı olarak artmasına neden olmaktadır.
- Eliptikliğin artmasıyla ara yüzey normal kuvvetlerden daha ziyade kesme kuvvetlerine maruz kalmakta, buda kayma gerilmelerinin artmasına neden olmaktadır.
- Eliptik geometrilerde, eliptiklik yarıçapının artması ile hasar yükünün artmakta olduğu görülmüştür.
- Koniklik açısının azalması yani konikliğin artması ile yapışma alanları sabit kalmak şartıyla, tek eksenli gerilme durumundan çok eksenli gerilme durumuna geçilmekte ve bu durum da, gerilmelerin konikliğe bağlı olarak artmasına neden olmaktadır.
- Konikliğin artmasıyla ara yüzey normal kuvvetlerden daha ziyade kesme kuvvetlerine maruz kalmakta, buda kayma gerilmelerinin artmasına neden olmaktadır.
- Konik geometrilerde, koniklik açısının artması ile hasar yükünün artmakta olduğu görülmüştür.
- Yapıştırılan malzeme açısından; yapıştırıcı ile yapıştırılan çelik malzemelerde oluşan gerilmelerin, yapıştırıcı ile yapıştırılan alüminyum malzemelerde oluşan gerilmelerden

daha yüksek olduğu gör÷lmektedir. Bunun nedeni beraber hareket eden yapıştırıcı-çelik ara yüzeyinde oluşan şekil değıştirmelerin, yapıştırıcı-alüminyum ara yüzeyinde oluşan şekil değıştirmelerine göre daha uyumsuz olmalarındandır.

- Yapısal çelik bağlantısının, Alüminyum alaşımı bağlantısından daha fazla hasar yükü taşıdığı gör÷lmüştür.
- Birleştirmelerin çekme kuvvetleri altındaki davranışları incelendiğinde; Düz geometrinin daha fazla çekme yükü taşıdığı gör÷lmüştür.
- Cohesive zone model ile yapılan analizler sonucunda, von Mises gerilme değierlerinin czm değierlerine yakın ve uyumlu olduğu fakat czm ile geometrilerde oluşan gerilmelerin biraz daha fazla oluştuğu gör÷lmektedir.



KAYNAKLAR

- [1] **Baldan, A.**, (2012), Adhesion phenomena in bonded joints. International Journal of Adhesion and Adhesives, 38, p. 95–116.
- [2] **Gursel, A.**, (2019). Fundamentals in adhesive bonding design for complex structures and conditions. Journal of Advanced Technology Sciences, 8 (1) p. 1-10.
- [3] **Şekercioğlu, T.**, (2018), Makine Elemanları Hesap Şekillendirme, Birsen yayın evi, 96-97.
- [4] **Çalık, A.**, (2008), Yapıştırıcılar ve köşeleri yuvarlatılmış basamaklı bindirme yapıştırıcı bağlantılarda gerilme analizi, Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak.
- [5] **Morrissey, M.A., Johnson, W.R.**, (1985), Douglas Aircraft Company Design Handbook, Adhesive and Cements, California.
- [6] **Vinson, J.K.**, (1989), Adhesive Bonding of Polymer Composites. Polymer Engineering and Science, 29(19), 1325-1331.
- [7] **Ciba-Geigy.**, (1993), Ciba composites: Redux Bonding Technology, Duxford-Chambridge, Pub. No. RGU 201A.
- [8] **Jeandrau, J.P.**, (1991), Analysis and Design Data for Adhesively Bonded Joints. Int.J.Adhesion and Adhesives, 11(2), 71-79.
- [9] **Aydın, M.D.**, (2003), Yapıştırıcı ile Birleştirilmiş Tek Tesirli Bindirme Bağlantısının Mekanik Özelliklerinin Deneysel ve Teorik İncelenmesi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- [10] **Temiz, Ş.**, (2003), Yapışma Bağlantılarının Mekanik Özellikleri Üzerine Çevresel Faktörlerin Etkisinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 112.
- [11] **Yıldırım, M.**, (2011), Yapıştırıcı İle Birleştirilmiş Bağlantıların Düşük Hızlı Darbe Davranışları, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 15.

- [12] **Şahin, A.**, (2011), Kompozit Metal Köpük Malzemelerin Tek Bindirmeli Yapıştırma Bağlantılarının Kesme Mukavemetinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne, 55.
- [13] **Erkek, B.**, (2018), Yama ve Yapıştırıcı Kullanılarak Tamir Edilmiş Kompozit Levhaların Burkulma Davranışı Üzerine Termal Yaşlanma Etkilerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi.
- [14] **Yıldız, B.**, (2019), Yamalı ve Yamasız Alüminyum Boruların Yorulma Davranışının Nümerik Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Batman Üniversitesi
- [15] **Crocombe, A.D.**, (1995), Int. J. Adhes. Adhes. 15(1), 21-27.
- [16] **Zgoul, M., Crocombe, A.D.**, (2004), Int. J. Adhes. Adhes. 24(4), 355-366.
- [17] **Nguyen, V., Kedward, T.**, (2001), Non-linear modeling of tubular adhesive scarf joints loaded in tension, The Journal of Adhesion, 76(3), 265-295.
- [18] **Haraga, K., Taguchi, K., Yoda, K., Nakashima, Y.**, (2003), Assembly technique for control panel enclosures with the combined use of adhesive and rivets and the reduction of energy consumption. International Journal of Adhesives & Adhesives, Vol. 23, No. 5, pp. 371-376.
- [19] **Şekercioğlu, T., Rende, H., Gülsöz, A. ve Meran, C.**, (2003), The effects of surface roughness on the strength of adhesively bonded cylindrical components, Journal of Materials Processing Technology, 142, 82–86.
- [20] **Pungo, N., Carpinteri, A.**, (2003), Tubular adhesive joints under axial load, Journal of Applied Mechanics, 76(6), 832-839.
- [21] **Aydın, M.D.**, (2003), Yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek eksenli bindirme bağlantısının mekanik özelliklerinin deneysel ve teorik incelenmesi, Doktora Tezi, Erzurum.
- [22] **Özel, A., Aydın, M.D., Temiz, Ş.**, (2004), The effects of overlap length and adherent thickness on the strenght of adhesively bonded joints subjected to bending moment, J. Adhesion Sci. Technology, vol 18(3), 313-325.
- [23] **Temiz, Ş., Özel, A., Aydın, M.D.**, (2005), The effect of adherend thickness on the failure of adhesively bonded single lap joints, J Adhes Sci Technol, Cilt 19, Sayı 8, ss. 705-718.

- [24] **Nemes, O., Lachaud, F., Mojtabi, A.,** (2006), Contribution to the study of cylindrical adhesive joining, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 26, 474-480.
- [25] **Temiz, S.,** (2006), Application of bi-adhesive in double- strap joints subjected to bending moment. *J. Adhesion Sci. Technol.* 20, 1547–1560.
- [26] **Zou, G.P., Taheri, F.,** (2006), Stress analysis of adhesively bonded sandwich pipe joints subjected to torsional loading, *International Journal of Solids and Structures*, 43(20), 5953- 5968.
- [27] **Fekirini, H., Bachir, Bouiadjra, B., Belhouari, M., Boutabout, B., Serier B.,** (2007), Numerical analysis of the performances of bonded composite repair with two adhesive bands in aircraft structures. *Composite Structures* 82, 84–89.
- [28] **Şen, F., Aldaş, K., Palancıoğlu, H.,** (2008), Çift örtü kullanılarak yapıştırılmış metal levhalarda ısı gerilme analizi, *Fırat Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 20, 649-659, ().
- [29] **Solmaz, M.Y.,** (2008), Yapıştırıcı İle Birleştirilmiş Bağlantıların Mekanik Analiz ve Tasarımları, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [30] **Aldaş, K., Palancıoğlu, H., Sen, F.,** (2009), Thermal stresses in adhesively bonded double lap joints by FEM, *Technological Researches*, 6/4, 55-64.
- [31] **Esmael, R.A., Taheri, F.,** (2009), Stress analysis of tubular adhesive joints with delaminated adherend, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 23, 1827-1844.
- [32] **Nemes, O., Lachaud F.,** (2010), Double-lap adhesive bonded-joints assemblies modeling, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 30, pp. 288–297.
- [33] **Lyon, P.E.,** (2010), Axisymmetric finite element modeling for the design and analysis of cylindrical adhesive joints based on dimensional stability, Master of Science, Utah State University, Utah.
- [34] **Kumar, S., Pandey, P.C.,** (2010), Behavior of Bi-adhesive Joints. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 24- 1251–1281.

- [35] **Lee, M. J., Cho, T. M., Kim, W. S., Lee, B. C., & Lee, J. J.** (2010). Determination of cohesive parameters for a mixed-mode cohesive zone model. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 30(5), 322-328.
- [36] **Aydın, S., Solmaz, M.Y., Turgut, A.,** (2011). Epoksi ve akrilik bazlı yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin belirlenmesi, 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), 16-18 May 2011, Elazığ, Turkey.
- [37] **Solmaz M.Y., Turgut, A.,** (2011), An experimental and numerical study on the effects of taper angles and overlap length on the failure and stress distribution of adhesively bonded single lap joints, *Math Comput Appl*, 16, 159–70.
- [38] **Xu, W., & Wei, Y. (2013)**, Influence of adhesive thickness on local interface fracture and overall strength of metallic adhesive bonding structures. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 40, 158-167.
- [39] **Kumar, S., Khan, M.A.,** (2016), An elastic solution for adhesive stresses in multi-material cylindrical joints, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 64, 142-152.
- [40] **Noda, N.A., Ren, F., Takaki, R., Wang, Z., Oda, K., Miyazaki, T. & Sano, Y.,** (2018), Intensity of singular stress field over the entire bond line thickness range useful for evaluating the adhesive strength for plate and cylinder butt joints, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 85, 234-250.
- [41] **Hasheminia, S.M., Park, B.C., Chun, H.J., Park, J.C., Chang, H.S.,** (2019), Failure mechanism of bonded joints with similar and dissimilar material, *Composites Part B*, 161, 702–709.
- [42] **Redya, N.S., Jinaga, U.K., Charukua, B.R., Penumakala, P.K., Prasad, A.V.S.,** (2019), Failure analysis of AA8011-pultruded GFRP adhesively bonded similar and dissimilar joints, *International Journal of Adhesion and Adhesives* 90, 97–105.
- [43] **Adams, R.D., Comyn, J., Wake, W.C.,** (1997), *Structural adhesive joints in engineering*, Chapman&Hall, Second Edition, Londra, 8-16.
- [44] **Edwards, K.L.,** (1998), A brief insight into the selection and use of engineering adhesives for preliminary joint design, *Materials and Design*, 19, 121-123.
- [45] **Koç, E.,** (2013), *Makina Elemanları Kitabı*, Cilt-I, 5.Baskı, s169-172.

- [46] **Cowdrey, S., Ferguson, C., Lennox, A.F., Mauro, P., Neummayer, R., Orme, B., Müller, M.,** (1998) Loctite Worldwide Design Handbook, Germany.
- [47] **Akpınar, S.,** (2008), Kaymaya maruz yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- [48] **Ebnesajjad, S.,** (2008), Adhesives technology handbook. 2 Prerss
- [49] **Macbain, W., Hopkins D. G.,** (1925), J. Phys. Chem. 29, 88.
- [50] **Petrie, E.M.,** (2002), Plastics and adhesives as adhesives. Handbook of Plastics and Elastomers (C.A. Harper, ed.), 4th ed., McGraw-Hill, New York.
- [51] **Şekercioğlu, T.,** (2001), Yapıştırma bağlantılarının dinamik yükler altındaki davranışlarının incelenmesi. Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
- [52] **Özenç, M.,** (2007), Yapıştırma bağlantılarının darbe yükleri altındaki davranışlarının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
- [53] **Yang, S., Gu, L., Gibson, R. F.,** (2001), Nondestructive detection of weak joints in adhesively bonded composite structures. Composite Structures, Vol. 51, No. 1, pp. 63-71.
- [54] **Cross, J. A.,** (1979), Surface contamination: its genesis, Detection and Control (K.L. Mittal, ed.), Vol. 2, pp. 89, Plenum Press, New York.
- [55] **Sun, P. C. C.,** (2008), Hybrid joining of lightweight vehicle structures, Ph.D. Thesis Oakland University, Rochester, Michigan.
- [56] **Kinloch, A.J.,** (1980), Journal of Materials Science, 15, 2141-2151.
- [57] **Sharpe, L.H., Schonhorn, H.,** (1963), Chemical Engineering News, 15, 67.
- [58] **Voyutskii, S. S.,** (1963), Autohesion and adhesion of high polymers, Wiley-Interscience, New York.
- [59] **Petrie, E.M.,** (2000), Handbook of adhesives and sealants. McGraw-Hill, New York.
- [60] **İşcan, B.,** (2007), Yapıştırıcı malzeme ile birleştirilmiş Z tipi bağlantılarının mekanik analizi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

- [61] **Saraç,İ.**, (2018), Tek tesirli yapıştırma bağlantılarında epoksi yapıştırıcı içerisinde nanopartikül kullanılmasının bağlantının statik ve yorulma mukavemetine etkisinin araştırılması, Doktora Tezi, Batman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü ,Batman.
- [62] **Kaya, F.**, (2004), Ana Hatları ile Yapıştırıcılar, Birsan Yayınevi, İstanbul, 318s.
- [63] **Yılmaz, B.**, (2020), Epoksi bazlı yapıştırıcılarla birleştirilen metallerin mekanik özelliklerine etki eden faktörlerin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
- [64] **Edwards, K.L.**, (1998), A brief insight into the selection and use of engineering adhesives for preliminary joint design. *Materials and Design*, 19, 121-123.
- [65] **Adin, H.**, (2007), Yapıştırıcı ile birleştirilmiş ters Z tipi kompozit malzeme bağlantılarının mekanik analizi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [66] **ISO 10365**, (1992), Adhesives - Designation of main failure patterns.
- [67] **Kanar, B.** (2018). Nanoyapı katkılı yapıştırıcıların ortam sıcaklığı ve termal çevrim altında kırılma davranışının incelenmesi (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [68] **Griffith, A. A.** (1921). VI. The phenomena of rupture and flow in solids. *Philosophical transactions of the royal society of London. Series A, containing papers of a mathematical or physical character*, 221(582-593), 163-198.
- [69] **Tada, H., Paris, P. C., & Irwin, G. R.** (1973). The stress analysis of cracks. *Handbook*, Del Research Corporation, 34.
- [70] **TAŞ, B.**, (2016), Yapıştırıcı ile birleştirilmiş konik geçmeli bağlantıların burulma momenti altındaki performansları, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [71] **Pençe, E.**, (2007), Eğitim Amaçlı ANSYS Paket Programının Tanıtılması, ANSYS Öğretimi ve Uygulama Örnekleri ZKÜ, Karabük.

- [72] **Çitil, Ş., Bozkurt, İ., & Aydın, M. D.** (2019). Experimental and 3D non-linear stress analysis of adhesively bonded pipes with curved-surface lap joints. *The Journal of Adhesion*, 95(5-7), 515-528.
- [73] **Çitil, Ş.** (2019). Investigation of curved and scarf lap joints subjected to tensile loads using the cohesive zone model. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 233(17), 6149-6156.
- [74] **SARAÇ, İ.**(2021) Yapıştırma bağlantılarında kohezif bölge modeli uygulayarak ve uygulamadan modelleme yapılmasının gerilme dağılımına etkisinin araştırılması.. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(15), 457-468.
- [75] **Campilho, R. D., Banea, M. D., Neto, J. A. B. P., & da Silva, L. F.** (2013). Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer. *International journal of adhesion and adhesives*, 44, 48-56.

ÖZGEÇMİŞ

