

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

**HİBRİT YAPIŞTIRMA BAĞLANTI HASARININ NUMERİK VE DENEYSEL
OLARAK İNCELENMESİ**

ÖZKAN ÖZ

**DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MAKİNE TEORİSİ VE KONTROL PROGRAMI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. HALİL ÖZER**

İSTANBUL, 2015

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**HİBRİT YAPIŞTIRMA BAĞLANTI HASARININ NUMERİK VE DENEYSEL
OLARAK İNCELENMESİ**

Özkan ÖZ tarafından hazırlanan tez çalışması 09.02.2015 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Halil ÖZER
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Halil ÖZER
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Muhammet CERİT
Sakarya Üniversitesi

Doç. Dr. Semih SEZER
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Faruk ŞEN
Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. İbrahim EREN
Yıldız Teknik Üniversitesi

ÖNSÖZ

Bu çalışmayı seçmemde ve yürütmemde bilgi ve tecrübesiyle bana yol gösteren Tez Danışmanım Sayın Prof. Dr. Halil ÖZER'e teşekkür eder ve saygılarımı sunarım. Değerli görüş ve katkıları için hocalarım Sayın Doç. Dr. Muhammet CERİT ve Sayın Doç. Dr. Semih SEZER'e teşekkürü bir borç bilirim.

Doktora çalışmam boyunca desteklerini esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Süleyman GÜNDÜZ, Sayın Doç. Dr. Durmuş ÖZYÜREK, Arş. Grv. Engin ERBAYRAK ve Arş. Grv. Mehmet Akif ERDEN'e çok teşekkür ederim.

Her anımda desteği ve sabrı ile yanımda olan sevgili eşim Serpil ÖZ'e, çocuklarım Defne Öz ve Yusuf Çınar ÖZ'e sonsuz sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim ve öğrenim hayatım boyunca beni her zaman destekleyen anneme, babama ve kardeşlerime teşekkür ederim.

Şubat, 2015

Özkan ÖZ

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ.....	viii
KISALTMA LİSTESİ.....	x
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
ÖZET	xvi
ABSTRACT.....	xviii
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	7
1.3 Hipotez.....	8
BÖLÜM 2	
YAPIŞTIRICILARIN SINIFLANDIRILMASI.....	9
2.1 Kimyasal Kompozisyona Göre Sınıflandırma	10
2.1.1 Termoplastik Yapıştırıcılar	10
2.1.2 Termoset Yapıştırıcılar	10
2.1.3 Elastomerik Yapıştırıcılar	11
2.2 Fonksiyona Göre Sınıflandırma	12
2.3 Fiziksel Şekle Göre Sınıflandırma	12
2.4 Mühendislik Uygulamalarında Kullanım Sıklığına Göre Sınıflandırma	12
2.4.1 Anaerobik Yapıştırıcılar.....	13
2.4.2 Epoksi Yapıştırıcılar	13
2.4.3 Reaktif Akrilik Yapıştırıcılar	14
2.4.4 Poliüretan Yapıştırıcılar	15

BÖLÜM 3

YAPIŞTIRICILARIN ENDÜSTRİYEL KULLANIM ALANLARI ve AVANTAJLARI	16
3.1 Yapıştırıcıların Endüstriyel Kullanım Alanları	16
3.2 Yapıştırırmalı Bağlantıların Avantaj ve Dezavantajları	20

BÖLÜM 4

ADHEZYON TEORİLERİ.....	22
4.1 Mekanik Kilitlenme Teorisi	22
4.2 Difüzyon Teorisi	23
4.3 Zayıf Sınır Tabaka Teorisi	23
4.4 Kimyasal Birleşme Teorisi	24
4.5 Elektrostatik Teori.....	25
4.6 Yüzeğe Tutunma Teorisi (Termodinamik Teori)	26

BÖLÜM 5

YAPIŞTIRMALI BAĞLANTI GERİLME ÇEŞİTLERİ ve BAĞLANTI DAYANIMINI ETKİLEYEN FAKTÖRLER.....	27
5.1 Gerilme Çeşitleri	27
5.1.1 Kayma Gerilmesi	28
5.1.2 Çekme Gerilmesi.....	28
5.1.3 Yarıma Gerilmesi.....	29
5.1.4 Soyulma Gerilmesi	29
5.2 Bağlantı Dayanımını Yükseltmek için Kullanılan Metodlar	29
5.2.1 Yapıştırma Uzunluğunun Arttırılması	30
5.2.2 Yapıştırıcı Özelliklerinin Değiştirilmesi.....	30
5.2.3 Yapıştırıcı Kalınlığının Değiştirilmesi	31
5.2.4 Dolgu Kenar Yapıştırma Düzeninin Kullanılması.....	32
5.2.5 Yapıştırılan Malzeme Özelliklerinin ve Kalınlığının Değiştirilmesi	33
5.2.6 Hibrit Yapıştırırmalı Bağlantılar.....	34
5.3 Yapıştırırmalı Bağlantıların Hazırlanması	36
5.3.1 Yapıştırırmalı Bağlantı Hasar Çeşitleri.....	37
5.3.2 Yapıştırma Yüzeylerinin Hazırlanması	41
5.3.3 Yapıştırıcının Kürleşmesi.....	46

BÖLÜM 6

MONO ve HİBRİT YAPIŞTIRMALI BAĞLANTI MEKANİK DAVRANIŞLARI ve ANALİTİK ÇÖZÜMLERİ	48
6.1 Mono Yapıştırırmalı Bağlantı Analitik Çözümleri	49
6.1.1 Ortalama Kayma Gerilmesi Teorisi	49
6.1.2 Volkersen Teorisi	50
6.1.3 Goland ve Reissner Teorisi	51
6.2 Hibrit Yapıştırırmalı Bağlantı Analitik Modeli.....	55
6.2.1 Hibrit Yapıştırırmalı Bağlantı Analitik Model Sınır Şartları.....	65

6.3 Hibrit Yapıştırırmalı Bağlantı Analitik Modelin Doğrulanması	67
BÖLÜM 7	
DENEYSEL ÇALIŞMA	81
7.1 Malzemeler	81
7.1.1 Yapıştırıcılar	81
7.1.2 Yapıştırılan Malzemeler	83
7.2 Bağlantı Geometrisi	85
7.3 Bağlantıların Hazırlanması	88
7.4 Bindirmeli Bağlantı Çekme Testi	97
7.5 DeneySEL Sonuçlar ve Tartışma	98
7.6 Global Rijitlik	105
BÖLÜM 8	
MONO ve HİBRİT YAPIŞTIRMALI BAĞLANTI ANALİTİK ÇÖZÜMLERİ ve SONLU ELEMEN ANALİZLERİ	110
8.1 Malzeme Modelleri	111
8.1.1 Von Mises Kriteri	112
8.1.1.1 Von Mises Akma Kuralı	114
8.1.2 Drucker Prager Kriteri	114
8.1.3 Lineer Drucker Prager Kriteri	115
8.1.3.1 Lineer Drucker Prager Akma Kuralı: Bağımlı Plastik Akma	116
8.1.3.2 Lineer Drucker Prager Akma Kuralı: Bağımsız Plastik Akma	117
8.1.4 Ekspansiyel Drucker Prager Kriteri	118
8.1.4.1 Ekspansiyel Drucker Prager Akma Kuralı	119
8.2 Yapıştırırmalı Bağlantı Hasar Kriterleri	120
8.2.1 Maksimum Kayma Gerilmesi Kriteri	120
8.2.2 Maksimum Soyulma Gerilmesi Kriteri	120
8.2.3 Maksimum Asal Gerilme Kriteri	120
8.2.4 Maksimum von Mises Eşdeğer Gerilme Kriteri	121
8.2.5 Maksimum Kayma Şekil Değiştirme Kriteri	121
8.2.6 Maksimum Asal Şekil Değiştirme Kriteri	122
8.3 Sonlu Eleman Modelinin Tanımlanması	122
8.3.1 Malzeme Özellikleri	123
8.3.2 Sınır Şartları ve Sonlu Eleman Ağ Yapısı	125
8.3.3 Sonlu eleman Analiz Adımları	127
8.4 Analitik Model ve Lineer SEA Çözümleri	127
8.4.1 Mono Yapıştırırmalı Bağlantılar Analitik ve Lineer SEA Sonuçları	127
8.4.2 Hibrit Yapıştırırmalı Bağlantılar Analitik ve Lineer SEA Sonuçları	131
8.5 Lineer Olmayan SEA Çözümleri	137
8.5.1 Mono Yapıştırırmalı Bağlantılar Lineer Olmayan SEA Sonuçları	137
8.5.2 Hibrit Yapıştırırmalı Bağlantılar Lineer Olmayan SEA Sonuçları	142
BÖLÜM 9	
SONUÇ ve ÖNERİLER	152

KAYNAKLAR.....	157
ÖZGEÇMİŞ.....	166

SİMGE LİSTESİ

b	Bağlantı genişliği
d	Kohezyon
E	Yapıştırılan elastisite modülü
E_a	Yapıştırıcı elastisite modülü
E_{es}	Eşdeğer rijitlik
E_1, E_2	1 ve 2 nolu yapıştırılan elastisite modülü
E_3, E_4	Sünek ve gevrek yapıştırıcı elastisite modülü
ε_g	Gerçek şekil değiştirme
ε_p	Plastik şekil değiştirme
ε_{nom}	Nominal şekil değiştirme
F	Eksenel çekme yükü
$\overline{F}$	Birim genişliğe uygulanan çekme yükü
F_H	Hibrit yapıştırmalı bağlantı hasar yükü
F_{MG}	Mono-gevrek yapıştırıcılı bağlantı hasar yükü
F_{MS}	Mono-sünek yapıştırıcılı bağlantı hasar yükü
G	Yapıştırılan kayma modülü
G_a	Yapıştırıcı kayma modülü
G_1, G_2	1 ve 2 nolu yapıştırılan kayma modülü
G_3, G_4	Sünek ve gevrek yapıştırıcı kayma modülü
I_1, I_2	1 ve 2 nolu yapıştırılan ikinci alan momenti
j_1	Gerilme tensörünün birinci invaryantı
j_2	Gerilme tensörünün ikinci invaryantı
k	Eğilme moment faktörü
l	Bindirme yarı uzunluğu
l_s	Gevrek yapıştırıcı uzunluğu
l_f	Sünek yapıştırıcı uzunluğu
L	Bindirmeli bağlantı yapıştırılmayan kısım uzunluğu

M_o	Eğilme momenti
ξ	Yapıştırıcı-uzunluk oranı
ζ, a	Ekspansiyel Drucker Prager hidrostatik gerilme duyarlılık parametresi
ζ_l	Lineer Drucker Prager hidrostatik gerilme duyarlılık parametresi
p, σ_m	Hidrostatik gerilme
p_t	Pekleşme parametresi
q, σ_e	Eşdeğer gerilme
R_a	Ortalama pürüzlülük değeri
ρ	Partikül yoğunluğu
σ_{cy}	Basma akma gerilmesi
σ_{ty}	Çekme akma gerilmesi
σ_t	Çekme gerilmesi
σ_{ys}	Çekme akma dayanımı
σ_g	Gerçek gerilme
σ_o	Kritik gerilme
φ	Sürünme açısı
ψ	Dilatasyon açısı
Λ_s	Yapıştırma alanı
Λ_1, Λ_2	1 ve 2 nolu yapıştırılan malzeme alanı
τ	Kayma gerilmesi
τ_s	Kayma dayanımı
τ_y	Kayma akma gerilmesi
τ_{ys}	Kayma akma dayanımı
τ_{av}	Ortalama kayma gerilmesi
δ_a	Yapıştırıcı kalınlığı
δ_o	Yapıştırılan kalınlığı
δ_1, δ_2	1 ve 2 nolu yapıştırılan kalınlığı
δ_3	Sünek yapıştırıcı kalınlığı
δ_4	Gevrek yapıştırıcı kalınlığı
Ω	Partikül hızı
$\mathcal{O}$	Partikül yarıçapı
ν	Poisson oranı
ν^p	Plastik poisson oranı
V_o	Kesme kuvveti

KISALTMA LİSTESİ

2-B	İki boyutlu
3-B	Üç boyutlu
G-R	Goland ve Reissner
SEA	Sonlu eleman analizi
SEM	Sonlu eleman modeli
Y.D.	Yer değiştirme

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Yapıştırıcıların sınıflandırılması [19]	9
Şekil 2.2 Termoplastik ve termoset polimer molekül yapısı [21]	11
Şekil 2.3 Camsı geçiş sıcaklığının termoplastik ve termoset polimerlere etkisi [21]	11
Şekil 2.4 Epoksi reçine yapısı ve özellikleri [27]	13
Şekil 3.1 Otomobil gövde imalatında yapıştırıcının kullanılması [20]	17
Şekil 3.2 Otomobil gövdesinde yapıştırıcı kullanımının rijitlik değerlerine etkisi [20]....	17
Şekil 3.3 Yapıştırıcı türüne bağlı hasar oluşumu [20].....	18
Şekil 3.4 Uçaklarda yapısal yapıştırıcılar ile birleştirilen malzeme çeşitleri [25]	18
Şekil 3.5 Tren vagonu imalatında yapıştırıcının kullanılması [28].....	19
Şekil 3.6 Alüminyum üst güverte ile çelik gövde arasında yapıştırıcı kullanılması [29]..	19
Şekil 3.7 Yat güvertesi imalatında yapıştırıcının kullanılması: (a) model yat, (b) gövde detayı [30]	20
Şekil 3.8 Bindirmeli bağlantı gerilme dağılımı: (a) perçinli, (b) yapıştırmalı [21].....	21
Şekil 4.1 Mekanik kilitlenme	23
Şekil 4.2 Difüzyon mekanizması	23
Şekil 4.3 Polimer-metal elektriksel çift katmanı [35]	25
Şekil 4.4 Yüzeyin ıslatılması [21]	26
Şekil 5.1 Yapıştırmalı bağlantılarda meydana gelen gerilme çeşitleri	28
Şekil 5.2 Farklı bindirme uzunluklarının bağlantı hasar yükü ve dayanımına etkisi [44]	30
Şekil 5.3 Gevrek ve sünek yapıştırıcı kayma gerilmesi dağılımı	31
Şekil 5.4 Kare ve dolgu kenar yapıştırma düzeni [51]	32
Şekil 5.5 Kare ve dolgu kenar için yapıştırıcı kalınlığına bağlı hasar yükü değişimi [50].	33
Şekil 5.6 Dolgu kenar düzeni kalıp sistemi	33
Şekil 5.7 Hibrit yapıştırmalı bağlantı yapıştırıcı düzeni	34
Şekil 5.8 Test sonrası mono ve hibrit yapıştırmalı bağlantı görünüşleri [9].....	35
Şekil 5.9 Hibrit yapıştırmalı bağlantı hasar yüzeyi [12]	35
Şekil 5.10 Yapıştırma prosedürü temel aşamaları	36
Şekil 5.11 Yapıştırmalı bağlantı hasar çeşitleri [53]	38
Şekil 5.12 Görsel yapıştırma hataları [54]	40
Şekil 5.13 Yapıştırılan malzemenin yüzey pürüzlülüğünün yapıştırıcının yüzeyi ıslatma davranışına etkisi [19]	44
Şekil 5.14 Kumlama parametreleri	44
Şekil 5.15 Bağlantı dayanımını etkileyen faktörler [24]	47

Şekil 6.1 Ortalama kayma gerilmesi teorisi: Bindirme uzunluğu boyunca kayma gerilmesi dağılımı	49
Şekil 6.2 Volkersen teorisi: Bindirme uzunluğu boyunca kayma gerilmesi dağılımı [74]	51
Şekil 6.3 Goland ve Reissner teorisi: Bindirme uzunluğu boyunca kayma ve soyulma gerilmesi dağılımı [51].....	53
Şekil 6.4 Serbest yüzey kayma gerilmesi [74]	54
Şekil 6.5 Antiklastik şekil değişimi [79]	55
Şekil 6.6 Çekme yükü altında hibrit yapıştırmalı bağlantı: (a) geometri, (b) kuvvet eşitliği serbest cisim diyagramı	56
Şekil 6.7 Kuvvet eşitliği serbest cisim diyagramı.....	57
Şekil 6.8 Yapıştırılan malzeme kalınlığı boyunca kayma gerilmesi ve yer değiştirme dağılımı: (a) üst yapıştırılan, (b) alt yapıştırılan	58
Şekil 6.9 Hibrit yapıştırmalı bağlantı: (a) geometri ve ölçüler, (b) 2-B ve 3-B SEM sınır şartları (ön görünüş), (c) 3-B SEM sınır şartları (üst görünüş)	68
Şekil 6.10 Bağlantının sonlu eleman modeli: (a) iki boyutlu, (b) üç boyutlu	69
Şekil 6.11 Yüzey-yüzeye kontak çifti	70
Şekil 6.12 Hibrit yapıştırmalı bağlantı bindirme bölgesi	72
Şekil 6.13 2-B SEA normalize edilmiş kayma gerilmesi dağılımı	73
Şekil 6.14 3-B SEA normalize edilmiş kayma gerilmesi dağılımı	73
Şekil 6.15 Analitik model normalize edilmiş kayma gerilmesi dağılımı	73
Şekil 6.16 Bindirme kenarları normalize edilmiş pik kayma gerilmesi değerleri	74
Şekil 6.17 Yapıştırıcı ara yüzeyleri normalize edilmiş pik kayma gerilmesi değerleri	75
Şekil 6.18 2-B SEA normalize edilmiş soyulma gerilmesi dağılımı	77
Şekil 6.19 3-B SEA normalize edilmiş soyulma gerilmesi dağılımı	77
Şekil 6.20 Analitik model normalize edilmiş soyulma gerilmesi dağılımı	77
Şekil 6.21 Bindirme kenarları normalize edilmiş pik soyulma gerilmesi değerleri	78
Şekil 6.22 Yapıştırıcı ara yüzeyleri normalize edilmiş pik soyulma gerilmesi değerleri ..	78
Şekil 7.1 Mono ve hibrit yapıştırmalı bağlantılarda kullanılan yapıştırıcılar: (a) AV138, (b) DP-8005, (c) 2015, (d) Siyonakrilat	82
Şekil 7.2 DIN C75 sulu çelik çekme numunesi boyutları	84
Şekil 7.3 DIN C75 sulu çelik çekme numunesi.....	84
Şekil 7.4 DIN C75 sulu çelik gerilme-uzama eğrisi	85
Şekil 7.5 Hasar yükü-bindirme uzunluğu grafiği	87
Şekil 7.6 Hibrit ve mono yapıştırmalı bağlantı geometri ve ölçüleri.....	88
Şekil 7.7 Ultrasonik temizleme cihazı	88
Şekil 7.8 Siyah silisyum karbür kum yapısı	89
Şekil 7.9 Vakumlu kumlama cihazı.....	90
Şekil 7.10 Yapıştırma yüzeyleri: (a) kumlanmamış, (b) kumlanmış	91
Şekil 7.11 Kumlama işlemi tamamlanan numuneler	91
Şekil 7.12 Su damlatma testi.....	92
Şekil 7.13 Kumlama yüzeyi pürüzlülük ölçümü yüzey taraması	92
Şekil 7.14 Bindirmeli bağlantı hazırlama kalıbı	93
Şekil 7.15 Dijital kuyumcu tartısı.....	94
Şekil 7.16 Hibrit yapıştırmalı bağlantının hazırlanması.....	94
Şekil 7.17 AV138 kürleşme sıcaklık-zaman grafiği	95
Şekil 7.18 2015 kürleşme sıcaklık-zaman grafiği.....	96

Şekil 7.19 AV138+2015 hibrit yapıştırırmalı bağlantı kürleşme sıcaklık-zaman grafiği	96
Şekil 7.20 Bindirmeli bağlantı	96
Şekil 7.21 SHIMADZU AG-IS 50kN çekme test cihazı	97
Şekil 7.22 Bindirmeli bağlantı çekme test cihazı çene bağlantısı.....	97
Şekil 7.23 Hasar uğrayan hibrit yapıştırırmalı bağlantı	98
Şekil 7.24 Mono ve hibrit yapıştırırmalı bağlantı hasar yüzeyleri	99
Şekil 7.25 2015 yük-uzama eğrisi.....	101
Şekil 7.26 AV138 yük-uzama eğrisi	101
Şekil 7.27 AV138+2015 hibrit yapıştırırmalı bağlantı ($\xi = 0.3$) yük-uzama eğrisi	102
Şekil 7.28 AV138+2015 hibrit yapıştırırmalı bağlantı ($\xi = 0.5$) yük-uzama eğrisi	102
Şekil 7.29 AV138+2015 hibrit yapıştırırmalı bağlantı ($\xi = 0.7$) yük-uzama eğrisi	102
Şekil 7.30 DP-8005 yük-uzama eğrisi	103
Şekil 7.31 AV138+DP-8005 hibrit yapıştırırmalı bağlantı ($\xi = 0.5$) yük-uzama eğrisi	103
Şekil 7.32 Çekme yükü altında basit bindirmeli bağlantı yapıştırıcı ve yapıştırılan şekil değiştirmeleri	106
Şekil 8.1 Meridyonel düzlemde von Mises gerilmesi akma yüzeyi.....	113
Şekil 8.2 Asal gerilmelere bağlı von Mises akma yüzeyi	114
Şekil 8.3 Asal gerilmelere bağlı Drucker Prager akma yüzeyi	115
Şekil 8.4 Meridyonel düzlemde lineer Drucker Prager akma yüzeyi [106].....	117
Şekil 8.5 Meridyonel düzlemde eksponansiyel Drucker Prager akma yüzeyi [106]	119
Şekil 8.6 AV138 ve 2015 gerilme-şekil değiştirme eğrisi [102].....	123
Şekil 8.7 2015 gerçek gerilme-plastik şekil değiştirme eğrisi	124
Şekil 8.8 AV138 gerçek gerilme-plastik şekil değiştirme eğrisi	124
Şekil 8.9 Sonlu eleman modeli sınır şartları ve ağ yapısı	126
Şekil 8.10 Mono yapıştırırmalı bağlantı lineer analiz: AV138 yapıştırıcı orta düzlemi kayma gerilmesi dağılımı	128
Şekil 8.11 Mono yapıştırırmalı bağlantı lineer analiz: AV138 yapıştırıcı orta düzlemi soyulma gerilmesi dağılımı	128
Şekil 8.12 Mono yapıştırırmalı bağlantı lineer analiz: 2015 yapıştırıcı orta düzlemi kayma gerilmesi dağılımı	129
Şekil 8.13 Mono yapıştırırmalı bağlantı lineer analiz: 2015 yapıştırıcı orta düzlemi soyulma gerilmesi dağılımı	130
Şekil 8.14 Hibrit yapıştırırmalı bağlantı lineer analiz: 0.3 yapıştırıcı-uzunluk oranı için yapıştırıcı orta düzlemi kayma gerilmesi dağılımı.....	131
Şekil 8.15 Hibrit yapıştırırmalı bağlantı lineer analiz: 0.3 yapıştırıcı-uzunluk oranı için yapıştırıcı orta düzlemi soyulma gerilmesi dağılımı.....	132
Şekil 8.16 Hibrit yapıştırırmalı bağlantı lineer analiz: 0.5 yapıştırıcı-uzunluk oranı için yapıştırıcı orta düzlemi kayma gerilmesi dağılımı.....	132
Şekil 8.17 Hibrit yapıştırırmalı bağlantı lineer analiz: 0.5 yapıştırıcı-uzunluk oranı için yapıştırıcı orta düzlemi soyulma gerilmesi dağılımı.....	133
Şekil 8.18 Hibrit yapıştırırmalı bağlantı lineer analiz: 0.7 yapıştırıcı-uzunluk oranı için yapıştırıcı orta düzlemi kayma gerilmesi dağılımı.....	133
Şekil 8.19 Hibrit yapıştırırmalı bağlantı lineer analiz: 0.7 yapıştırıcı-uzunluk oranı için yapıştırıcı orta düzlemi soyulma gerilmesi dağılımı.....	134
Şekil 8.20 Mono yapıştırırmalı bağlantı lineer olmayan analiz: AV138 yapıştırıcı orta düzlemi yüke bağlı asal gerilme dağılımı	138

Şekil 8.21 Mono yapıştırırmalı bağlantı lineer olmayan analiz: AV138 yapıştırıcı orta düzlemi yüke bağlı eşdeğer gerilme dağılımı.....	138
Şekil 8.22 Mono yapıştırırmalı bağlantı lineer olmayan analiz: AV138 yapıştırıcı orta düzlemi yüke bağlı kayma gerilmesi dağılımı	139
Şekil 8.23 Mono yapıştırırmalı bağlantı lineer olmayan analiz: AV138 yapıştırıcı orta düzlemi yüke bağlı soyulma gerilmesi dağılımı	139
Şekil 8.24 Mono yapıştırırmalı bağlantı lineer olmayan analiz: 2015 yapıştırıcı orta düzlemi yüke bağlı asal gerilme dağılımı	140
Şekil 8.25 Mono yapıştırırmalı bağlantı lineer olmayan analiz: 2015 yapıştırıcı orta düzlemi yüke bağlı eşdeğer gerilme dağılımı.....	141
Şekil 8.26 Mono yapıştırırmalı bağlantı lineer olmayan analiz: 2015 yapıştırıcı orta düzlemi yüke bağlı kayma gerilmesi dağılımı	141
Şekil 8.27 Mono yapıştırırmalı bağlantı lineer olmayan analiz: 2015 yapıştırıcı orta düzlemi yüke bağlı soyulma gerilmesi dağılımı	142
Şekil 8.28 Hibrit yapıştırırmalı bağlantı lineer olmayan analiz: 0.3 yapıştırıcı-uzunluk oranı için yapıştırıcı orta düzlemi yüke bağlı asal gerilme dağılımı.....	143
Şekil 8.29 Hibrit yapıştırırmalı bağlantı lineer olmayan analiz: 0.3 yapıştırıcı-uzunluk oranı için yapıştırıcı orta düzlemi yüke bağlı eşdeğer gerilme dağılımı	143
Şekil 8.30 Hibrit yapıştırırmalı bağlantı lineer olmayan analiz: 0.3 yapıştırıcı-uzunluk oranı için yapıştırıcı orta düzlemi yüke bağlı kayma gerilmesi dağılımı	144
Şekil 8.31 Hibrit yapıştırırmalı bağlantı lineer olmayan analiz: 0.3 yapıştırıcı-uzunluk oranı için yapıştırıcı orta düzlemi yüke bağlı soyulma gerilmesi dağılımı	144
Şekil 8.32 Hibrit yapıştırırmalı bağlantı lineer olmayan analiz: 0.5 yapıştırıcı-uzunluk oranı için yapıştırıcı orta düzlemi yüke bağlı asal gerilme dağılımı.....	145
Şekil 8.33 Hibrit yapıştırırmalı bağlantı lineer olmayan analiz: 0.5 yapıştırıcı-uzunluk oranı için yapıştırıcı orta düzlemi yüke bağlı eşdeğer gerilme dağılımı	146
Şekil 8.34 Hibrit yapıştırırmalı bağlantı lineer olmayan analiz: 0.5 yapıştırıcı-uzunluk oranı için yapıştırıcı orta düzlemi yüke bağlı kayma gerilmesi dağılımı	146
Şekil 8.35 Hibrit yapıştırırmalı bağlantı lineer olmayan analiz: 0.5 yapıştırıcı-uzunluk oranı için yapıştırıcı orta düzlemi yüke bağlı soyulma gerilmesi dağılımı	147
Şekil 8.36 Hibrit yapıştırırmalı bağlantı lineer olmayan analiz: 0.7 yapıştırıcı-uzunluk oranı için yapıştırıcı orta düzlemi yüke bağlı asal gerilme dağılımı.....	147
Şekil 8.37 Hibrit yapıştırırmalı bağlantı lineer olmayan analiz: 0.7 yapıştırıcı-uzunluk oranı için yapıştırıcı orta düzlemi yüke bağlı eşdeğer gerilme dağılımı	148
Şekil 8.38 Hibrit yapıştırırmalı bağlantı lineer olmayan analiz: 0.7 yapıştırıcı-uzunluk oranı için yapıştırıcı orta düzlemi yüke bağlı kayma gerilmesi dağılımı	148
Şekil 8.39 Hibrit yapıştırırmalı bağlantı lineer olmayan analiz: 0.7 yapıştırıcı-uzunluk oranı için yapıştırıcı orta düzlemi yüke bağlı soyulma gerilmesi dağılımı	149

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 3.1 Yapıştırılmalı bağlantı avantaj ve dezavantajları [21], [24], [31].....	21
Çizelge 4.1 Kimyasal bağların dayanımı ve van der Waals etkileşimleri [20]	24
Çizelge 5.1 Hasar çeşitleri ve nedenleri [24].....	39
Çizelge 5.2 Görsel olarak belirlenebilen hata çeşitleri, nedenleri ve çözümleri [24]	40
Çizelge 5.3 Farklı malzemeler için kullanılan yüzey hazırlama yöntemleri [31]	42
Çizelge 6.1 Yapıştırılan ve yapıştırıcıların malzeme özellikleri [18]	69
Çizelge 6.2 Analitik ve nümerik çözüm pik kayma gerilmesi değerleri yüzde hata karşılaştırılması	76
Çizelge 6.3 Analitik ve nümerik çözüm pik soyulma gerilmesi değerleri yüzde hata karşılaştırılması	79
Çizelge 7.1 Yapıştırıcıların mekanik ve fiziksel özellikleri [12], [46], [81-85]	83
Çizelge 7.2 DIN C75 sulu çelik kimyasal analizi	84
Çizelge 7.3 Siyah silisyum karbür mekanik ve fiziksel özellikleri [88]	89
Çizelge 7.4 Yapıştırıcı kürleşme sıcaklıkları ve süreleri [12], [81-83]	95
Çizelge 7.5 Mono ve hibrit yapıştırılmalı bağlantı deneysel ve tahmini hasar yükleri ...	105
Çizelge 7.6 Mono ve hibrit yapıştırılmalı bağlantı global rijitlik değerleri	109
Çizelge 8.1 2015 yapıştırıcı için eksponansiyel Drucker Prager modelinde kullanılan malzeme özellikleri [102].....	124
Çizelge 8.2 AV138 yapıştırıcı için eksponansiyel Drucker Prager modelinde kullanılan malzeme özellikleri [102].....	125
Çizelge 8.3 DIN C75 sulu çelik malzeme özellikleri [12], [121]	125
Çizelge 8.4 Mono yapıştırılmalı bağlantı analitik ve lineer SEA maksimum kayma ve soyulma gerilmesi değerleri yüzde hata karşılaştırılması	131
Çizelge 8.5 Hibrit yapıştırılmalı bağlantı analitik ve lineer SEA maksimum kayma ve soyulma gerilmesi değerleri yüzde hata karşılaştırılması	134
Çizelge 8.6 Tahmini kayma kapasiteleri, ortalama kayma gerilmesi ve lineer SEA kayma gerilmesi değerleri	135
Çizelge 8.7 Mono ve hibrit yapıştırılmalı bağlantı deneysel ve lineer olmayan SEA hasar yüklerinin karşılaştırılması	151

HİBRİT YAPIŞTIRMA BAĞLANTI HASARININ NUMERİK VE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Özkan ÖZ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Halil ÖZER

Bu doktora tezinde temel olarak, hibrit yapıştırma düzeninin, basit bindirmeli bağlantı yapıştırma çizgisi boyunca, gerilme dağılımı ve bağlantı hasar yükü üzerine etkisi incelenmiştir. Hibrit yapıştırmalı bağlantı, mono yapıştırmalı bağlantıdan farklı olarak, bindirme bölgesinde iki farklı yapıştırıcının bir arada kullanıldığı bağlantı çeşididir. Doktora tezinde öncelikle, hibrit yapıştırmalı bağlantı analitik modeli oluşturulmuştur. Analitik model, toplam 24 sınır şartına bağlı çözüm içeren, üç farklı denklem setinden meydana gelmektedir. Hazırlanan analitik model aynı zamanda, mono yapıştırmalı bağlantı gerilme dağılımlarının belirlenmesi amacıyla da kullanılmıştır. Bu aşamadan sonra, hibrit yapıştırma düzeni içerisinde yapıştırıcı-uzunluk oranları değiştirilerek, analitik model, iki ve üç boyutlu lineer sonlu eleman analiz sonuçları ile karşılaştırılarak, doğrulanmıştır. Doktora tezinin deneysel kısmında, mono ve hibrit yapıştırmalı bağlantı hasar yükleri ve davranışı belirlenerek, karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmalarda, her iki bağlantı tipinde kullanılmak üzere, analitik modelin doğrulanması amacıyla kullanılan yapıştırıcılardan farklı olarak, farklı mekanik özelliklere sahip üç yapıştırıcı seçilmiştir. Kullanılan yapıştırıcılar, sahip oldukları mekanik özelliklere göre, gevrek, tok ve sünek yapıştırıcı olarak tanımlanmaktadır. Bindirme uzunluğunun ortasında gevrek yapıştırıcı, kenarlarda ise sırasıyla, sünek ve tok yapıştırıcı kullanılmıştır. Daha sonra, deneysel çalışmalarda hasar yükleri belirlenen mono ve hibrit yapıştırmalı bağlantılar için, Global rijitlik değerlerini veren analitik çözüm elde edilerek, hibrit yapıştırma düzeninin, bağlantı rijitliği üzerine etkisi belirlenmiştir. Mono ve hibrit yapıştırmalı bağlantılar için

gerilme dağılımını veren analitik çözümler, deneysel çalışmalardan elde edilen hasar yükleri kullanılarak, tekrarlanmış ve lineer sonlu eleman analizleri ile karşılaştırılmalı olarak, yapıştırma çizgisi boyunca, gerilme dağılımları sunulmuştur. Tezin son aşamasında, eksponansiyel Drucker Prager malzeme modeli kullanılarak, mono ve hibrit yapıştırmalı bağlantılar için, lineer olmayan sonlu eleman analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçlarına göre elde edilen hasar yükleri, deneysel hasar yükleri ile karşılaştırılmış ve yapıştırma çizgisi boyunca gerilme dağılımları sunulmuştur. Sonuç olarak, bindirme uzunluğu kenarlarında uygun yapıştırıcı kullanılması ve yapıştırıcı uzunluk oranlarının doğru seçilmesi durumunda, hibrit yapıştırma düzeninin, mono yapıştırmalı bağlantı ile karşılaştırıldığında, bağlantı dayanımını önemli oranda arttırdığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hibrit yapıştırmalı bağlantı, Gerilme analizi, Hasar analizi, Drucker Prager

**NUMERICAL and EXPERIMENTAL INVESTIGATION of HYBRID ADHESIVE
JOINT FAILURE**

Özkan ÖZ

Department of Mechanical Engineering

Phd. Thesis

Adviser: Prof. Dr. Halil ÖZER

In this dissertation, the effect of hybrid bonding pattern on failure load and stress distribution along single lap joint bondline was mainly investigated. Unlike mono adhesive joint, hybrid adhesive joint is a kind of joint in which two different adhesives are used. In the present dissertation, primarily, the analytic model of hybrid adhesive joint was formed. Analytic model consists of three different equation sets which include solutions based on total 24 boundary conditions. The analytic model was also used in determining the stress distributions of mono adhesive joint. After this stage, the analytic model was validated by comparing the two and three-dimension linear finite element analysis as a result of modifying the length rates of adhesives in hybrid bonding pattern. In the experimental part of the dissertation, mono and hybrid adhesive joints were compared by determining failure loads and behavior. In the experiments, apart from the adhesives used to validate the analytic model, three adhesives with different characteristics were selected in order to be used in both joint types. The adhesives used were identified as stiff, tough, and flexible adhesives based on their characteristics. In the middle of the bondline length, stiff adhesive was used and at the edges flexible and tough adhesives were used respectively. Subsequently, for mono and hybrid adhesive joints, the effect of hybrid bonding pattern on bonding rigidity was determined by obtaining the analytic solution that presents rigidity values. For mono and hybrid adhesive joints, the analytic solutions that include stress distribution were repeated by using failure loads obtained from experimental studies, and stress distributions were presented in comparison to linear finite element analyses

along adhesive bondline. In the final stage of the dissertation, non-linear finite element analyses were carried out for mono and hybrid adhesive joints by implementing exponential Drucker Prager material model. Depending on the results of the analysis, failure loads were compared with experimental failure loads and stress distributions were presented along with the adhesive bondline. As a result, when length ratios are selected properly and appropriate adhesives are used along the overlap length edge, the strength of hybrid adhesive joint, when compared to mono adhesive joint, was found to increase considerably.

Keywords: Hybrid adhesive joint, Stress analysis, Failure analysis, Drucker Prager

1.1 Literatür Özeti

Yapısal yapıştırıcılar, otomotiv, havacılık ve gemi inşa endüstrilerinde parçaların montaj aşamasında geniş şekilde kullanılmaktadır. Belirtilen bu endüstri alanlarında kullanılan levha veya panel montaj parçalarının düzlemsel yüzeylere sahip olması, bağlantıların yapıştırıcı kullanılarak, basit veya çift bindirmeli olarak birleştirilmesine ve modellenmesine imkân vermektedir.

Endüstride, düzlemsel yüzeylerin montajlanmasında yapıştırıcıların kullanılması önemli avantajlar sağlayabilir. Geleneksel birleştirme yöntemlerin yerine yapıştırıcıların tercih edilmesi, üretilen araçlarda önemli oranlarda ağırlık düşümü sağlayabilir ve yakıt sarfiyatını düşürür. Örneğin, havacılık endüstrisinde ağırlıkça düşük bağlantıların tercih edilmesi ile sağlanacak 0.453 kg'lık ağırlık düşümü, yıllık 1360 kg yakıt tasarrufu anlamına gelmektedir [1].

Yapısal yapıştırıcıların montaj parçalarında kullanılması ağırlık düşümü açısından önemli avantajlar getirmesine rağmen, tasarım parametrelerinin uygun şekilde belirlenmesi diğer geleneksel birleştirme yöntemlerine göre kritik öneme sahiptir. Bazı durumlarda, uygun şekilde tasarlanmayan yapıştırırmalı bağlantı, yapılabilecek en kötü tercih şeklini alabilmektedir. Özellikle, basit bindirmeli bağlantılarda, sahip oldukları geometriye bağlı olarak oluşan dönmeye bağlı moment etkisi, bindirme uzunluğu boyunca, kenarlarda yüksek gerilme yoğunluklu bölgeler oluşmasına neden olur.

Yapıştırılmalı bağlantılarda, ani hasar oluşumları, gerilme yoğunluğunun yüksek olduğu bölgelerde meydana gelir.

Yapıştırılmalı bağlantıların etkin olarak kullanılması, erken hasar oluşumuna neden olan soyulma gerilmesi yoğunluğunun düşürülmesi ve kayma gerilmesinin bindirme yüzeyi boyunca daha homojen dağılımının sağlanması ile mümkündür. Gerilme bileşenlerinin, bindirme yüzeyi kenarlarında yoğunluğunun azaltılması amacıyla basit bindirmeli bağlantılar için alternatif levha geometriler literatürde [2-4] çalışılmasına rağmen, yapıştırılan levhaların geometrisinde yapılacak değişiklikler fazladan imalat işlem basamağı ve maliyet anlamına gelmektedir. Levha geometrileri değiştirilmeden basit bindirmeli bağlantılarda dayanımının artırılması hibrit yapıştırma düzeni tercih edilerek sağlanabilir. Bu birleştirme yöntemi, bindirme uzunluğu boyunca, ortada yüksek elastisite modüllü yapıştırıcının, kenarlarda ise düşük elastisite modüllü yapıştırıcının kullanıldığı, ikili yapıştırma bağlantısıdır. Hibrit yapıştırma düzeninin, mukavemet değerleri açısından belirgin bir artışa neden olduğu literatürde belirtilmektedir. Bu tez kapsamında öncelikli olarak, aşağıda açıklanan, hibrit yapıştırılmalı bağlantılar üzerine yapılan deneysel ve teorik çalışmalar incelenecektir.

Bindirme uzunluğu boyunca yapıştırıcı özelliklerinin değiştiği hibrit yapıştırılmalı bağlantı yaklaşımı üzerine ilk çalışma Raphael [5] tarafından yapılmıştır. Çalışmasında, hibrit yapıştırılmalı bağlantıyı analitik olarak modellemiştir. Oluşturulan analitik modelde, yapıştırılmalı bağlantı hasarına neden olabilecek soyulma gerilmesinin etkisi ihmal edilmiştir.

Das Neves v.d [6], [7], hibrit yapıştırılmalı basit ve çift bindirmeli bağlantılar için analitik model oluşturmuş ve sonlu eleman analiz sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Oluşturulan analitik model, Frostig v.d [8] tarafından çalışmalarında önerdikleri mono yapıştırılmalı bağlantı analitik modelin, hibrit yapıştırılmalı bağlantılar için geliştirilmesi şeklindedir. Frostig v.d. çalışmalarında, mono yapıştırılmalı bağlantı analitik modelinde, yapıştırıcı kalınlığı boyunca soyulma gerilmesi değişiminin belirlenmesine olanak veren ve kendileri tarafından önerilen kapalı çözüm yüksek derece teorisini (closed-form high order (CFHO) theory) kullanmışlardır. Yazarlar tarafından önerilen kapalı çözüm yüksek

derece teorisi ile bindirme kenarları serbest yüzey kayma gerilmesi koşulu modellenebilmektedir.

Pires v.d. [9], alüminyum malzemelerin hibrit yapıştırma bağlantısını deneysel ve nümerik (sonlu eleman analizi) olarak incelemişlerdir. Lineer ve lineer olmayan sonlu eleman analizlerinden elde edilen sonuçları kullanarak, hibrit yapıştırmalı bağlantı için dayanımın maksimum değere ulaştığı yapıştırıcı oranını belirlemişlerdir. Çalışmalarında, lineer olmayan sonlu eleman analiz çözümlerinde, kayma gerilmesi ile beraber, bağlantı hasarına neden olabilecek normal ve von Mises eşdeğer gerilme bileşenlerinin bindirme bölgesi boyunca dağılımları da dikkate alınmıştır. Bindirme kenarlarında kullandıkları düşük elastisite modüllü, sünek yapıştırıcı hasar davranışının, von Mises eşdeğer gerilme ve şekil değiştirme hasar kriterine uygun olduğunu belirtmişlerdir. Bindirme bölgesi ortasında kullanılan gevrek yapıştırıcı için, soyulma gerilmesi davranışının maksimum asal gerilme ve şekil değiştirme ile benzer davranış gösterdiği açıklanmıştır. Hibrit yapıştırma durumunda, gevrek yapıştırıcıda meydana gelen gerilme değerleri düşerek, hasar oluşumuna neden olan soyulma gerilmelerinde düşüş gözlemlenmiştir. Mono yapıştırmalı bağlantı ile karşılaştırıldığında, hibrit yapıştırmalı bağlantı von Mises eşdeğer gerilme ve şekil değiştirme değerlerinde meydana gelen düşüşün, bağlantı dayanımını arttırdığını belirtmişlerdir. Deneysel çalışmalarında, bindirme bölgesinde yapıştırıcıların birbirine karışmasını engelleyecek herhangi bir ayırıcı kullanmamışlardır. Bağlantının hazırlanmasında, öncelikle, gevrek yapıştırıcı orta kısma yapıştırılmış sonrasında, bindirme kenarları sünek yapıştırıcı ile doldurulmuştur. Yapıştırıcı uzunluk oranları, sonlu eleman analiz sonuçlarına göre belirlenen hibrit yapıştırmalı bağlantı deney numunelerinin dayanımı, mono yapıştırmalı bağlantı dayanımına göre %20 daha yüksek bulunmuştur.

Fitton ve Broughton [10] çalışmalarında, hibrit yapıştırma düzeninin, fiber takviyeli kompozit malzemeli bindirmeli bağlantıların hasar yükü ve hasar davranışları üzerine etkisini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmanın sonuçlarına göre, mono yapıştırmalı bağlantı durumunda, yapıştırılan kompozit malzemenin sahip olduğu düşük yüzey dayanımına bağlı olarak, bağlantı hasar yükü düşmüştür. Hibrit yapıştırmalı bağlantı durumunda, hasar yükü mono yapıştırmalı bağlantıya göre iki kat fazla artış göstermiş ve yapıştırıcıda koheziv hasar meydana gelmiştir. Bununla birlikte, yapıştırma çizgisi

ortalama kayma gerilmesi değeri artarak, bağlantının tam kayma kapasitesine yaklaşması sağlanmıştır.

Kong v.d. [11], ayırma ve çekme yüküne maruz hibrit yapıştırma bağlantılarını 3-B sonlu eleman metodu kullanarak analiz etmişlerdir. Yapıştırma çizgisi boyunca, maksimum gerilme değerlerinin, uygun yapıştırıcı-uzunluk oranları kullanılarak azaltılabileceğini belirtmişlerdir. Bununla birlikte, ideal hibrit yapıştırma bağlantısının elde edilmesinde, yükleme şekillerinde meydana gelen değişimin göz önünde bulundurulmasının gerekli olduğunu vurgulamışlardır.

Da Silva ve Lopes [12] çalışmalarında, ideal yapıştırma bağlantısını, bindirme uzunluğu boyunca değişken elastik özellik ve dayanım değerlerine sahip olma durumu olarak tanımlamışlardır. Çalışmalarında, hibrit yapıştırmalı bağlantı hasar yüklerini deneysel olarak belirlemişlerdir. Bindirme uzunluğunun orta kısmında oldukça gevrek ve yüksek elastisite modüllü epoksi yapıştırıcı, kenarlarda ise, sırasıyla akrilik, epoksi ve metakrilat yapıştırıcılar kullanmışlardır. Kenarlarda kullanılan epoksi ve metakrilat yapıştırıcılar, akrilik yapıştırıcı ile kıyaslandığında daha gevrek, yüksek elastisite modüllü oldukça gevrek yapıştırıcı ile kıyaslandığında ise daha sünek yapıya sahiptirler. Hibrit yapıştırmalı bağlantı bindirme uzunluğu boyunca, yapıştırıcıların karışmasını engellemek amacıyla, yapıştırıcıların arasında silikon şerit kullanmışlardır. Deneysel çalışma sonuçları, Hibrit yapıştırmalı bağlantıların tamamında, gevrek yapıştırıcı kullanılan mono yapıştırmalı bağlantıya göre hasar yükünün arttığını göstermiştir. Ancak, kenarlarda kullanılan epoksi ve metakrilat yapıştırıcıların mono yapıştırmalı bağlantı hasar yükleri, kenarlarda kullanıldıkları hibrit yapıştırmalı bağlantı hasar yüklerine göre daha yüksektir. Yazarlar, bu durumda, orta seviye gevrek yapıdaki bu iki yapıştırıcının tekil kullanımının, hibrit yapıştırmalı bağlantıda kullanılmasına göre daha avantajlı olduğunu belirtmiş ancak, sünek yapıştırıcıların tamamı için bu genellemenin yapılamayacağını açıklamışlardır.

Da Silva ve Adams [13] yaptıkları çalışmada, titanyum/titanyum ve titanyum/kompozit çift bindirmeli bağlantıların hibrit yapıştırma düzenine sahip olması durumunu incelemişlerdir. Hibrit yapıştırma çizgisi boyunca kullanılan iki farklı yapıştırıcının, uygun kombinasyonda kullanılması durumunda geniş sıcaklık aralıklarında (55 °C- 200

°C) yüksek sıcaklık dayanımına sahip yapıştırıcının tekil kullanımına göre daha yüksek dayanımın elde edilebileceğini belirtmişlerdir.

Temiz [14], dış eğilme momenti uygulanan çift bindirmeli bağlantıda, hibrit yapıştırma çizgisinin, bağlantı dayanımına olan etkisini çalışmıştır. Bindirme bölgesinin kenarlarında sünek yapıştırıcı kullanılması durumunda, gerilme yoğunluklarının düştüğünü belirtmiştir. Hibrit yapıştırmalı bağlantıda sünek yapıştırıcı kullanılması durumunda, bağlantının tahmin edilen hasar yükündeki artış ile kıyaslandığında, meydana gelen şekil değişimlerinin önemli ölçüde artmadığını belirtmiştir. Bu duruma neden olarak, gevrek yapıştırıcının sünek yapıştırıcıdaki şekil değişimlerini kısıtlamasını göstermiştir.

Kumar ve Pandey [15], hibrit yapıştırmalı bağlantı gerilme-şekil değiştirme davranışını incelemek amacıyla, 2-B ve 3-B lineer olmayan analizler yapmış ve analiz sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Çalışmalarında, yapıştırıcı hasarının, koheziv hasar (mükemmel yapışma) olduğu belirtilmiştir. Sünek yapıştırıcının, von Mises eşdeğer gerilme ve şekil değiştirme kriterine bağlı hasara uğradığı kabulü yapılmıştır. Bağlantıda, muhtemel gevrek hasar oluşumunu belirlemek amacıyla, gevrek yapıştırıcı soyulma gerilmesi ve şekil değiştirmesi incelenmiştir. Analiz sonuçlarından elde edilen gerilme bileşenlerinin yapıştırma çizgisi boyunca dağılımı incelendiğinde, 2-B ve 3-B analiz sonuçlarına bağlı gerilme değerlerinde farklılıklar olduğu gözlemlenmiştir. Düzlem şekil değiştirme kabulü yapılan 2-B analiz gerilme dağılımları, 3-B analiz gerilme dağılımları ile karşılaştırıldığında, gerilme değerlerinin düşük olduğu, dolayısıyla 2-B analize bağlı bağlantı dayanımının yüksek olduğu belirtilmiştir.

Pires v.d [16] çalışmalarında, hibrit yapıştırmalı bağlantı için, lineer olmayan gerilme analizlerinde, lineer Drucker Prager malzeme modelini kullanmışlardır. Hibrit yapıştırmalı bağlantı analizlerinde kullandıkları yapıştırıcılar için, akma gecikmesi davranışını etkileyen hidrostatik gerilme etkisini içeren, lineer Drucker Prager kriterinin uygun olduğunu belirtmişlerdir. Bindirmeli bağlantılarda kullandıkları yapıştırıcıların, bulk numunelerinde meydana gelen hasar başlangıçlarında elde edilen eşdeğer kayma gerilmesi ve şekil değiştirme değerleri ile Drucker Prager kriterine bağlı elde edilen

eşdeğer kayma gerilmesi ve şekil değiştirme değerlerinin benzer olduğunu ve bu değerlerin bağlantı hasar başlangıcının tahmininde kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Carbas v.d [17], bindirmeli bağlantıda, hibrit yapıştırma düzeninden farklı olarak, iki farklı yapıştırıcı yerine tek bir yapıştırıcı kullanmışlardır. Yapıştırıcının bindirme uzunluğu boyunca özelliklerini değiştirmek amacıyla, indüksiyonla ısıtma yöntemi uygulanmıştır. İndüksiyonla ısıtma yöntemi ile yapıştırıcı dereceli olarak kürleştirilmiştir. Kürleşmenin derecelendirilmesi, bindirme kenarlarının ısıtılması ve orta kısımların aynı şekilde indüksiyon ile soğutulması ile sağlanmıştır. Yazarlar, indüksiyon ile ısıtma işleminin yapılabilmesi için yapıştırılan malzemelerin metal olması veya yapıştırıcı içerisinde ferromanyetik parçacıkların bulunması gerektiğini belirtmişlerdir. Yaptıkları deneysel çalışma sonuçlarına göre, indüksiyonla kürleşme uygulanan bağlantılar, izotermal kürleşme ile hazırlanan bağlantılara göre, benzer yer değiştirme değerlerinde daha yüksek hasar yüklerine ulaşmıştır.

Bavi v.d [1], basit ve çift bindirmeli hibrit bağlantı için ideal bindirme yüzeyi geometrisini, modifiye edilmiş Bees ve Genetik algoritmalarını kullanarak belirlemişlerdir. İki ve üç yapıştırıcılı, hibrit yapıştırma düzeni için sırasıyla, dört ve beş optimizasyon parametresi kullanmışlardır. Modifiye edilmiş Bees ve Genetik algoritmalarla bağlı sonuçları karşılaştırarak, etkinliklerini belirlemişlerdir. Uzun yapıştırma çizgisi ve yapıştırılan malzemenin kalınlığının arttırılması, optimize edilmiş en uygun bağlantı geometrisi olarak tanımlanmıştır. Ayrıca, modifiye edilmiş Bees algoritmasının hibrit bağlantılar için uygun çözüm yöntemi olduğunu belirtmişlerdir.

Özer ve Öz [18], hibrit yapıştırma düzenin, çift bindirmeli bağlantı soyulma ve kayma gerilmesi dağılımı üzerine etkisini, 3-B lineer sonlu eleman metodu kullanarak incelemişlerdir. Çalışmalarında, yapıştırıcı ve yapıştırılan arasında kontak çiftleri tanımlamışlardır. Hibrit yapıştırmalı bağlantı kullanılması durumunda, mono yapıştırmalı bağlantılarda kenarlarda oluşan maksimum kayma gerilmesi değerinin bindirme yüzeyi iç kısımlarına doğru yer değiştirdiğini belirtmişlerdir. Ayrıca, bağlantıda gevrek yapıştırıcının tekil olarak kullanılması durumu ile hibrit yapıştırma bağlantısı karşılaştırıldığında, bindirme kenarlarında soyulma gerilmesi değerlerinin önemli ölçüde düştüğünü belirtmişlerdir.

Genel olarak, literatürde hibrit yapıştırırmalı bağlantılar üzerine kısıtlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Deneysel çalışmalar, sabit yapıştırıcı uzunluk oranları ile sınırlı ve az sayıdadır. Benzer şekilde, analitik çözüm içeren çalışmalar yeterli sayıda değildir. Ayrıca, lineer olmayan sonlu eleman analizlerinde, bindirmeli bağlantılar için yapıştırıcı hasarını tanımlamada en uygun malzeme modeli olan eksponansiyel Drucker Prager kriterinin hibrit yapıştırırmalı basit bindirmeli bağlantılar için kullanıldığı her hangi bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Bu doktora tezi ile temel olarak, yukarıda belirtilen boşlukların doldurulması hedeflenmiştir. Ayrıca, bindirme kenarlarında sünek yapıştırıcı yerine tok yapıştırıcı kullanılması durumunda hibrit yapıştırırmalı bağlantının, literatürden farklı olarak, tok yapıştırıcının tekil kullanımı durumuna göre daha yüksek dayanıma ulaşabileceği ortaya konulmuştur.

1.2 Tezin Amacı

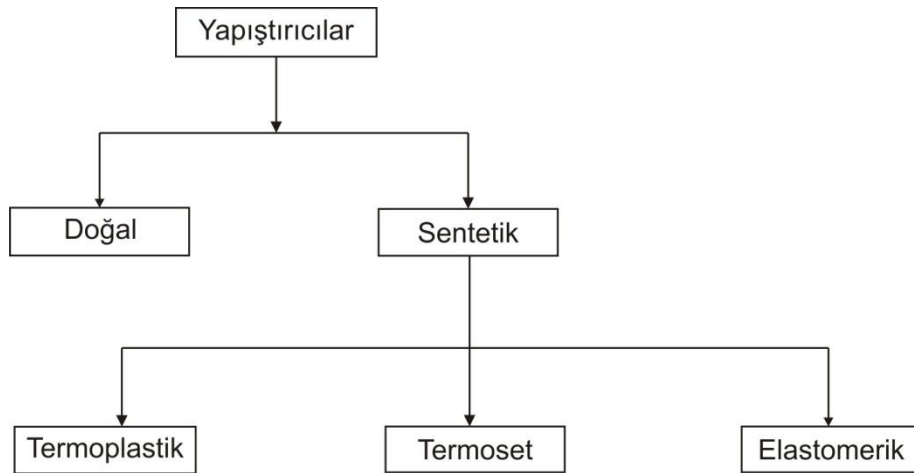
Önerilen tez çalışmasının birinci aşamasında, eksenel çekme yükü uygulanan hibrit yapıştırırmalı bağlantı için, gerilme dağılımının belirlenmesi amacıyla, analitik model oluşturulacak ve lineer sonlu eleman analizleri ile karşılaştırılarak, doğrulanacaktır. İkinci aşamada, deneysel çalışmalar yapılarak, hibrit ve mono yapıştırırmalı bağlantı hasar yükleri belirlenecektir. Deneysel çalışmalarda, hasar yükleri belirlenen mono ve hibrit yapıştırırmalı bağlantılar için, global rijitlik değerleri hesaplanarak, hibrit yapıştırma düzeninin, bağlantının rijitliği üzerine etkisi belirlenecektir. Analitik model kullanılarak, deneysel çalışmalarda kullanılan yapıştırıcılara bağlı olarak çözümler, mono ve hibrit yapıştırırmalı bağlantı hasar yükleri kullanılarak, tekrarlanacak ve lineer sonlu eleman analizleri ile karşılaştırılmalı olarak, gerilme dağılımları belirlenecektir. Tezin son aşamasında, eksponansiyel Drucker Prager malzeme modeli kullanılarak hibrit yapıştırırmalı bağlantı hasar yükleri ve gerilme dağılımları lineer olmayan sonlu eleman analizi kullanılarak belirlenecektir. Deneysel ve lineer olmayan sonlu eleman analizlerinden elde edilen hibrit ve mono yapıştırırmalı bağlantı hasar yükü değerleri karşılaştırılacak ve hibrit yapıştırırmalı bağlantı için ideal yapıştırıcı uzunluk oranı belirlenecektir.

1.3 Hipotez

Basit bindirmeli bağlantılarda, bağlantı dayanımı, kullanılan yapıştırıcının özelliklerine bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Özellikle, yüksek elastisite modülüne sahip, gevrek yapıştırıcıların dayanımı, bindirme uzunluğu boyunca kenarlarda, dönme etkisine bağlı olarak oluşan yüksek yoğunluklu gerilme bölgelerinden dolayı düşer. Gevrek yapıştırıcı, sahip olduğu yüksek kayma dayanımı kapasitesine ulaşmadan, bağlantıda ani hasar oluşumu meydana gelir. Bu durum, gevrek yapıştırıcıların şekil değiştirme kabiliyetinin düşük olması ve içerisinde mevcut yapısal hatalara (boşluk, çatlak v.b) duyarlı olması ile açıklanabilir. Bağlantıda gevrek yapıştırıcı kullanımına bağlı oluşan bu olumsuzluğu azaltmak ve bağlantı dayanımını arttırmak amacıyla, bindirme kenarlarında yüksek şekil değiştirme kapasitesine sahip, yapısal hatalara karşı duyarlılığı düşük olan tok veya sünek yapıştırıcılar kullanılarak hibrit yapıştırma düzeni oluşturulabilir. Literatürde, hibrit yapıştırma düzeni kullanılarak yapılan çalışmalar olmasına rağmen, yapıştırıcı uzunluk oranları sabit alınarak, uzunluk oranı değişiminin hasar yükü üzerine etkisi deneysel olarak belirlenmemiştir. Ayrıca, lineer olmayan analiz kullanılarak, hibrit yapıştırmalı bağlantı hasar yükünün belirlenmesi üzerine literatürde önemli eksiklikler mevcuttur. Bu eksikliklerin en önemlileri, kullanılacak hasar kriterinin ve malzeme modelinin seçimi olarak sıralanabilir. Bu tez çalışmasında, literatürden farklı olarak, yapıştırıcı uzunluk oranları değiştirilerek, hibrit yapıştırmalı bağlantı hasar yükleri deneysel olarak belirlenmiştir. Lineer olmayan analizler, hibrit yapıştırmalı bağlantı için uygun yapıştırıcı hasar kriteri ve malzeme modelinin belirlenmesini kapsamaktadır. Deneysel ve lineer olmayan analiz sonuçları karşılaştırıldığında, kullanılan hasar kriterleri ile malzeme modelinin hibrit yapıştırmalı bağlantı için deneysel hasar yüklerine yakın sonuçlara ulaşıldığını göstermiştir. Böylece hibrit yapıştırmalı bağlantı hasar yükü tespitinde kullanılan malzeme modeli ile elde edilen gerilme dağılımı ve hasar kriterine bağlı olarak etkin bir yöntem sunulmuştur.

YAPIŞTIRICILARIN SINIFLANDIRILMASI

Temel ve en basit haliyle, yapıştırıcılar, kimyasal kompozisyonuna bağlı olarak, doğal ve sentetik olmak üzere iki sınıfa ayrılabilir (Şekil 2.1). Sentetik yapıştırıcılar kendi arasında termoset, termoplastik ve elastomerik olmak üzere üç farklı şekilde sınıflandırılabilir. En temel şekli ile yapılan bu sınıflandırma, endüstriyel uygulamalarda uygun yapıştırıcı seçimi için yeterli değildir. Endüstriyel uygulamalar için sınıflandırmanın, son kullanıcının seçimini kolaylaştıracak şekilde, detaylı olarak yapılması gerekir. Yapıştırıcıların detaylı şekilde sınıflandırılması amacıyla, fonksiyonlarına, fiziksel şekillerine ve uygulama alanlarına göre ayrıntılı tanımlamaların yapılması seçimin kolaylaştırılması açısından önemlidir. Ayrıca, belirtilen bu sınıflandırma türlerine ek olarak, mühendislik uygulamalarında önemli kullanım alanına sahip yapıştırıcılarda ayrı bir başlık halinde sınıflandırmaya eklenebilir.



Şekil 2.1 Yapıştırıcıların sınıflandırılması [19]

2.1 Kimyasal Kompozisyona Göre Sınıflandırma

Yapıştırıcının sahip olduğu kimyasal kompozisyon, elastisite modülü, dayanım, kristalleşme sıcaklığı gibi özellikler ile kürleşme şeklini belirlemesi açısından önemlidir. Ayrıca, yapıştırıcının içerisinde çözücü gibi uçucuların bulunması kimyasal kompozisyona bağlıdır [20].

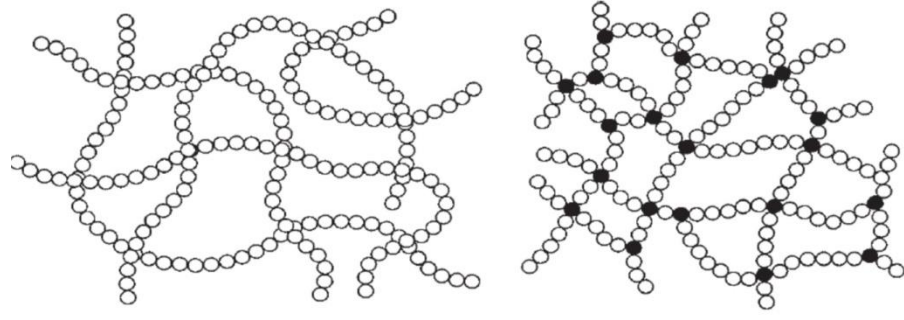
Kimyasal kompozisyona göre sınıflandırmada yapıştırıcılar, termoset, termoplastik ve elastomerik olarak üç farklı gruba ayrılabilir.

2.1.1 Termoplastik Yapıştırıcılar

Termoplastik yapıştırıcılar, ısıtıldıkları zaman yumuşar ve akışkan hale geçerler. Soğutulunca sertleşir ve katılaşır. İpliksi moleküler yapıya sahip termoplastikler için bu durum tekrar edilebilir bir özelliktir (Şekil 2.2) [21]. Sahip oldukları bu özellikten dolayı şekillendirme esnasında hiçbir kimyasal değişime uğramazlar. Camı geçiş sıcaklığı üzerinde sıvı duruma geçerler (Şekil 2.3). Eksi sıcaklıklarda yapıları kırılıp ve 65 °C üzerinde kullanılamazlar [22]. Başlıca termoplastik yapıştırıcılar, akrilikler, siyanoakrilatlar, polietilenler, poliesterler, poliamidler şeklinde sıralanabilir [23].

2.1.2 Termoset Yapıştırıcılar

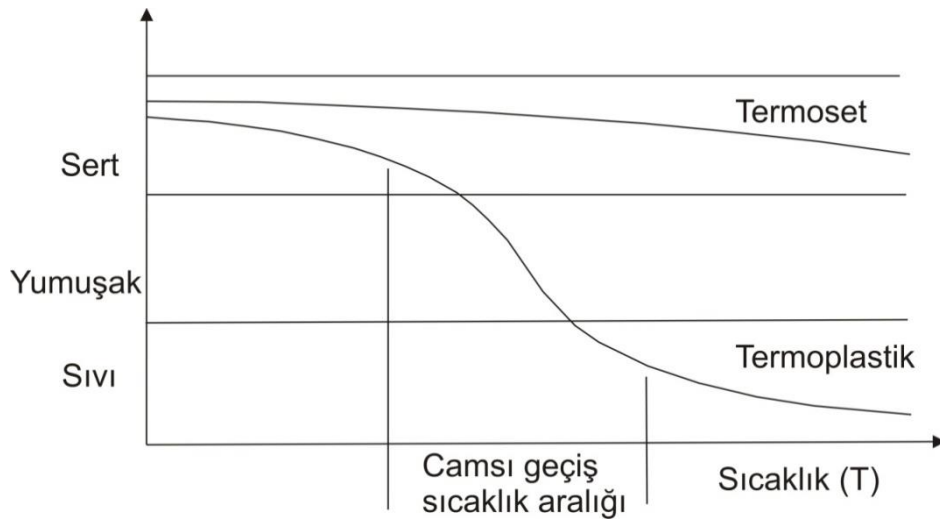
Termoset yapıştırıcılar temel olarak termoset polimerlerdir. Kürleşmenin gerçekleşmesi için kimyasal reaksiyona ihtiyaç duyarlar. Çapraz bağ yapısına sahiptirler (Şekil 2.2). Kürleşme gerçekleştikten sonra ısıtılmaları durumunda yumuşarlar ancak uygulama esnasındaki akışkan formuna geri döndürülemezler (Şekil 2.3) [21]. Termoset yapıştırıcılar çift veya tek komponentlidir. Çift komponentli termoset yapıştırıcıların birçoğunun kürleşmesi oda sıcaklığında sertleştirici kullanılarak gerçekleşir. Tek komponentli termoset yapıştırıcılarda kürleşme ısı ve/veya basınç ile gerçekleşir. Bu gruptan olan yapıştırıcılar yüksek dayanım özelliklerine sahiptir [22]. Termoset yapıştırıcılara örnek olarak, sırasıyla, üre formaldehidler, epoksiler, furan reçineleri, poliüretanlar, fenol formaldehitler gösterilebilir [23].



Termoplastik
İpliksi moleküller

Termoset
Çapraz bağlı moleküller

Şekil 2.2 Termoplastik ve termoset polimer molekül yapısı [21]



Şekil 2.3 Camsı geçiş sıcaklığının termoplastik ve termoset polimerlere etkisi [21]

2.1.3 Elastomerik Yapıştırıcılar

Makro moleküler yapıya sahip elastomerik yapıştırıcılar, uygulanan yük kaldırıldığı zaman eski ölçü ve şekillerine geri dönerler. Yüksek enerji absorbe etme yeteneğine sahiptirler. Yüksek uzama, düşük elastisite modülü ve yüksek tokluğa sahiptirler. Elastomerik yapıştırıcılar, termoset veya termoplastik olabilirler. Termoset olan tipleri yapısal uygulamalarda kullanılabilir [24]. Silikonlu kauçuklar, doğal kauçuklar, rejenere kauçuklar, sentetik kauçuklar ve polikloroprenler elastomerik yapıştırıcı sınıfına örnek gösterilebilir [23].

2.2 Fonksiyona Göre Sınıflandırma

Fonksiyona göre sınıflandırmada, yapıştırıcılar “yapısal” ve “yapısal olmayan” şeklinde iki gruba ayrılabilir. Yapısal yapıştırıcılar, yüksek dayanım ve performansa sahiptirler. Bu gruptaki yapıştırıcıların en önemli fonksiyonu, yapıştırılan malzemeleri bir arada tutarak, yüksek yükler altında malzemelerin ayrılmasının engellenmesidir. Bu tip yapıştırıcılar ile oluşturulan bağlantılarda hasar, yapıştırıcının şekil değiştirme davranışına, tipine ve koşullara bağlı olarak plastik akma ve çatlak ilerlemesi şeklinde gerçekleşir. Yapısal yapıştırıcılara örnek olarak, epoksi, modifiye edilmiş akrilik, modifiye edilmiş veya alaşımlanmış fenolik, siyanoakrilat, poliüretan, yapay kauçuk, nitril, poliestere, poliaromatik ve anaerobik verilebilir. Yapısal olmayan yapıştırıcılar, düşük kayma dayanımı, yüksek uzama ve sıcaklık ile değişken çevre koşullarına karşı yapısal yapıştırıcılara göre daha düşük dirence sahiptir. Bununla birlikte, yapısal olmayan yapıştırıcılar elektrik ve termal izolasyon gerektiren yerlerde kullanıldığı gibi titreşimin sönümlenmesi amacıyla da uygulamalarda tercih edilebilmektedir. Ayrıca, mekanik birleştirme elemanları ile beraber ikincil birleştirme elemanı olarak kullanılabilirler [24], [25].

2.3 Fiziksel Şekle Göre Sınıflandırma

Sahip oldukları fiziksel şekle göre yapıştırıcılar, sıvı, pasta, film ve toz olarak dört gruba ayrılabilir. Sıvı yapıştırıcıların viskozite değeri düşüktür ve yüzeylere fırça yardımıyla veya püskürtme yoluyla kolaylıkla uygulanabilir. Pasta tipi yapıştırıcıların viskozite değeri yüksektir ve düşey yüzeylere uygulanması, sıvı yapıştırıcılara oranla daha kolaydır. Film tipi yapıştırıcıların yüzeye uygulanması, sıvı veya pasta tipi yapıştırıcılara göre daha kolaydır ve yapıştırıcı kalınlığı kontrolüne gerek yoktur. Toz yapıştırıcıların katı halde uygulanma imkânı yoktur. Bu tip yapıştırıcılar ısıtılarak veya çözelti içerisinde karıştırılarak sıvı şekle dönüştürüldükten sonra uygulanabilir [19].

2.4 Mühendislik Uygulamalarında Kullanım Sıklığına Göre Sınıflandırma

Mühendislik yapıştırıcılarını diğer yapıştırıcılardan ayıran en önemli özellikleri yüksek dayanıma ve yük taşıma kabiliyetine sahip olmalarıdır. Bu sınıf içinde tanımlanan yapıştırıcılar, düşük ve yüksek sıcaklık çevrimleri ile değişken çevre koşullarına karşı

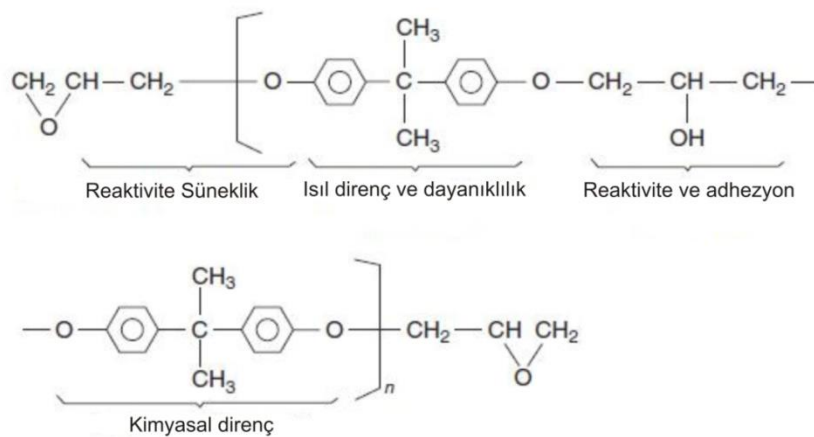
yüksek dirence sahiptirler. Genel olarak, rijit bağlantı elemanı olarak kullanılırlar ve belli oranda süneklik ve tokluğa sahip olmaları titreşim ve darbe yükü altında kullanılabilmelerine olanak sağlar. Mühendislik yapıştırıcılarının kullanıldığı malzeme çeşitleri, metaller, cam, seramikler, plastikler ve kompozitler şeklinde sıralanabilir [26].

2.4.1 Anaerobik Yapıştırıcılar

Anaerobik yapıştırıcılar, tek komponentli, sıvı forma sahip, çok fonksiyonlu metakrilat monomer yapıdadır. Uygulandıkları yüzeyler arasında hızlı kürleşme özelliği gösterirler. Kürleşme, hava ile temasın kesilmesi ile gerçekleşir ve hızı, sıcaklık ile beraber arttırılabilir. Metal, seramik, cam ve termoset plastiklerin yapıştırılması için uygundur. Anaerobik yapıştırıcıların en önemli uygulama alanı, bağlama elemanlarında (somun, cıvata v.b) sökölme önleyecek şekilde, sabitleyici olarak kullanımıdır [19], [26].

2.4.2 Epoksi Yapıştırıcılar

Epoksi yapıştırıcılar, birçok yapıştırıcı ile karşılaştırıldığında, yüksek dayanımlı yapıştırma sağlayan en önemli yapıştırıcı grubudur. Otomobil ve havacılık endüstrisinde kompozit ve metallerin yapıştırılması amacıyla, önemli oranlarda kullanılmaktadır. Kimyasallara, farklı çevre koşullarına ve sıcaklık değişimlerine karşı dirençleri yüksektir. Birçok uygulama alanında kullanılmak üzere geliştirilmiş binlerce farklı kimyasal formülasyona sahiptir. Şekil 2.4’de epoksi reçinenin yapısı ve özellikleri gösterilmektedir.



Şekil 2.4 Epoksi reçine yapısı ve özellikleri [27]

Epoksi yapıştırıcıların, sıcaklıkla kürleşen tek komponentli veya çift komponentli olmak üzere iki farklı türü mevcuttur. Tek komponentli epoksiler, çözücü içermeyen sıvı reçineler, sıvı reçine macunlar, eriyebilen tozlar olarak sıralanabilir. Çift komponentli epoksi yapıştırıcılar, uygulamadan hemen önce karıştırılan, reçine ve kürleşme ajanından (sertleştirici) oluşur. Yapıştırıcıyı oluşturan komponentler sıvı veya pasta şeklinde olabilir. Reçine ve sertleştiricinin karıştırılması hacimsel veya ağırlık olarak belli oranlar içerisinde yapılır. Uygun karıştırma oranlarının ölçülerek hatasız şekilde yapılması zorunludur ve bu durum çift komponentli epoksi yapıştırıcıların en büyük dezavantajıdır. Belirtilen bu dezavantaja rağmen epoksi yapıştırıcılar sahip oldukları farklı üstünlüklerden dolayı diğer yapıştırıcı türlerine göre önemli avantajlara sahiptir. Sahip olduğu en büyük avantaj, özelliklerinin değiştirilmesi amacıyla karışımına eklenen ve siyonakrilat ve anaerobikler ile beraber kullanılamayan, farklı yapıların (katkılar, düzenleyiciler, dolgular, kauçuk toklaştırmacılar, plastikleştiriciler ve diğer polimerler) epoksi yapıştırıcılar ile beraber kullanılabilmesidir. Sahip olduğu bir diğer önemli avantaj ise reaktif akrilikler ve siyanoakrilatlara alternatif olabilecek çok geniş boşlukları doldurabilme özelliğidir [26].

Genel olarak çift komponentli epoksi yapıştırıcılarda, reçine ve sertleştiricinin karıştırılmasından itibaren, hazırlanan karışımın pota süresi (birkaç dakikadan birkaç saat'e kadar) içerisinde yapıştırılan yüzeylere uygulanması gerekir. Kürleşme, oda sıcaklığında veya yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilebilir. Oda sıcaklığında kürleşme süresi 24 saate kadar ulaşabilir, ancak sıcaklık yükseltirirse kürleşme süresi önemli ölçüde düşürülebilir. Farklı sıcaklıklarda farklı kürleşme süreleri elde edilir. Örnek olarak, 60 °C sıcaklıkta 3 saat süre sonunda kürleşme tamamlanırken, bu süre 100 °C sıcaklıkta 20 dakikaya kadar düşebilir [19], [26].

2.4.3 Reaktif Akrilik Yapıştırıcılar

Reaktif akrilikler, metakrilat ve akrilat monomer esaslı çift komponentli yapıştırıcılardır. Reaktif yapıştırıcıları, çift komponentli epoksi ve üretan yapıştırıcı çeşitlerinden ayıran en önemli fark, katalitik kürleşme özelliğidir. Kullanılan katalizör miktarına duyarlılığı düşüktür ve katalizörün yapıştırıcı ile karıştırılması için kesin bir oran gerekmez.

Bu tip yapıştırıcılar, birkaç dakika gibi çok kısa süreler içerisinde etkin bağlantının yapılması istenen, yüksek dayanım ve darbe direnci gerektiren plastik ve metallerin yapıştırma uygulamalarında önemli avantajlar sağlar. Reaktif akrilik yapıştırıcılar kullanılarak yapılan uygulamalar, yüzey hazırlama işlemlerinin yapılması tercih edilmeyen, hızlı kürleşmenin istendiği cam fiber ve çelik levhaların yapıştırılması, çeşitli metal ve plastiklerin yapıştırılması, mıknatıslar, spor aletleri şeklinde sıralanabilir. Ayrıca, reaktif akrilik yapıştırıcılar, otomobil tamponlarında ve tekne imalatında da başarılı bir şekilde kullanılmaktadır [26].

2.4.4 Poliüretan Yapıştırıcılar

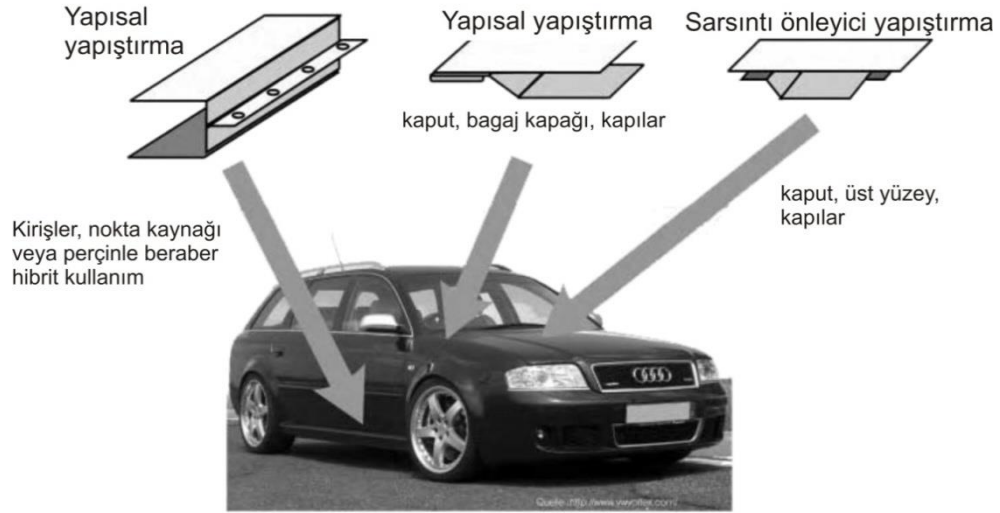
Poliüretan yapıştırıcılar, poliol ve izosiyanat'ın reaksiyona girmesi ile oluşan tok yapıştırıcılardır. Poliüretan mühendislik yapıştırıcıları, tek veya çift komponentli olabilen, oldukça tok ve sünek yapıya sahip yapıştırıcılardır. Tek komponentli poliüretan yapıştırıcılar, sıcaklık veya nem ile kürleşir. Çift komponentli poliüretan yapıştırıcıların kullanılmadan önce karıştırılması gerekir. Çift komponentli poliüretan yapıştırıcılar, tek komponentli poliüretan yapıştırıcılara göre daha hızlı kürleşir ve yapısal yapıştırılmalarda yaygın olarak kullanılır. Poliüretan yapıştırıcılar, yüksek çapraz bağ yapısına sahip epoksiler, anaerobikler veya siyanakrilatlar kadar yüksek dayanıma sahip değildir. Ancak, oldukça sünek yapıya sahip olabilecek şekilde formülüle edilebilmesi, soyulmaya karşı dayanımı artırır. Poliüretan yapıştırıcılar, yapıştırma ile ilgili birçok alanda reaktif akrilik yapıştırıcılara karşı önemli bir alternatiftir. Poliüretan yapıştırıcıların en yaygın kullanıldığı alan otomobil ön camlarının montajıdır. Ayrıca, büyük metal ve kompozit panellerin yapıştırılması etkin şekilde yapılabilir [26].

YAPIŞTIRICILARIN ENDÜSTRİYEL KULLANIM ALANLARI ve AVANTAJLARI

Endüstriyel pazarda satışı yapılan birçok ürün, birden fazla parçanın, uygun birleştirme yöntemleri kullanılarak bir araya getirilmesi ile elde edilir. Parçaların birleştirilmesi amacıyla birçok yöntem, beraber veya tekil olarak kullanılmaktadır. Bu amaçla, tercih edilen yöntemlerin, ürün güvenliğini ve ömrünü artırıcı etkiye sahip olması önemlidir. Gerilmelerin düzgün olarak dağıtılabilmesi ve yorulma dayanımını artırması nedeniyle malzemelerin birleştirilmesinde yapıştırıcıların tercih edilmesi, güvenlik ve uzun ömürlü yapıların oluşturulması için önemli bir avantaj sağlayabilir. Bununla birlikte, farklı malzemeler arasında birleştirmenin sağlanması, korozyon etkisinin azaltılması ve ağırlığın düşürülmesi yapıştırırmalı bağlantıların önemli üstünlüklerindendir.

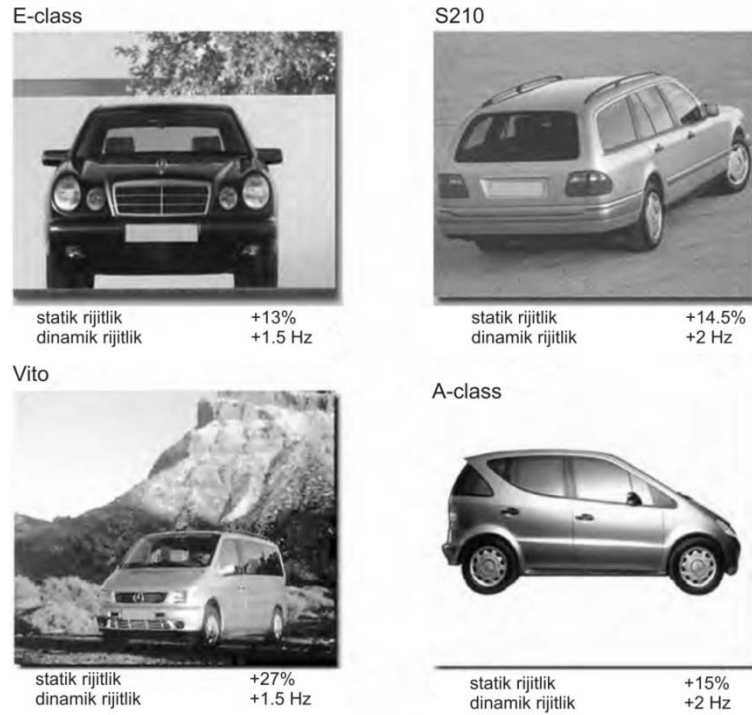
3.1 Yapıştırıcıların Endüstriyel Kullanım Alanları

Günümüzde, özellikle, taşımacılıkta kullanılan otomobil, uçak, gemi ve trenlerde yapısal yapıştırıcıların kullanımı önemli artış göstermiştir. Kullanılan yapıştırıcıların oranındaki artış, sağladığı ağırlık düşüşüyle beraber yakıt sarfiyatını da azaltmaktadır. Şekil 3.1’ de, otomobil gövde imalatında yapıştırıcıların kullanıldığı parçalara bazı örnekler verilmektedir. Otomobil gövde imalatında yapıştırıcının kullanılması ile korozyon direnci ve rijitlik artarak, yorulmaya sebep olan yüklere ve kazalara karşı direnç artmaktadır.



Şekil 3.1 Otomobil gövde imalatında yapıştırıcının kullanılması [20]

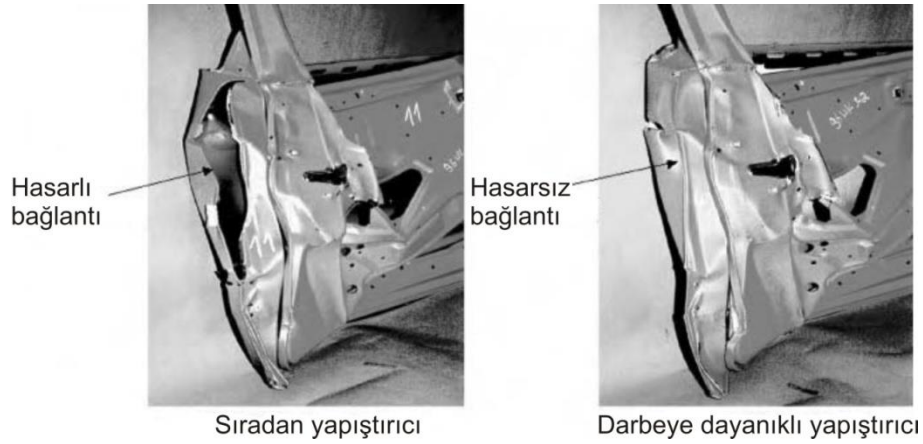
Otomobil gövdesi yapısal rijitliğinde, imalatta yapıştırıcı kullanılması ile gövde yapısına bağlı olarak, %15 ile %30 arasında artış sağlanmaktadır. Şekil 3.2’de, otomobil gövdesinde sadece nokta kaynağı kullanılması durumuna göre, yapıştırıcının kullanılmasının rijitlik değerlerinde meydana getirdiği artış gösterilmektedir.



Şekil 3.2 Otomobil gövdesinde yapıştırıcı kullanımının rijitlik değerlerine etkisi [20]

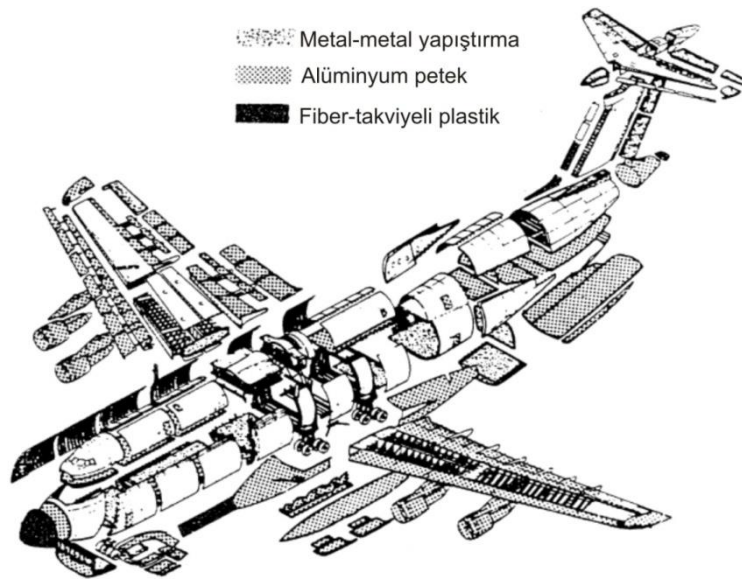
Gövde yapısında, rijitlik artışı ile beraber kaza sonrası oluşan hasar yapılarında da önemli farklılıklar meydana gelmektedir. Kapılarda, darbeye dayanıklı tok yapıştırıcı kullanılması durumunda, bağlantı bütünlüğü korunmakta ve oluşan şekil değişimine

rağmen, yapıştırılan bölgelerde, uygulanan hasar yüküne bağlı, ayrılma meydana gelmemektedir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3 Yapıştırıcı türüne bağlı hasar oluşumu [20]

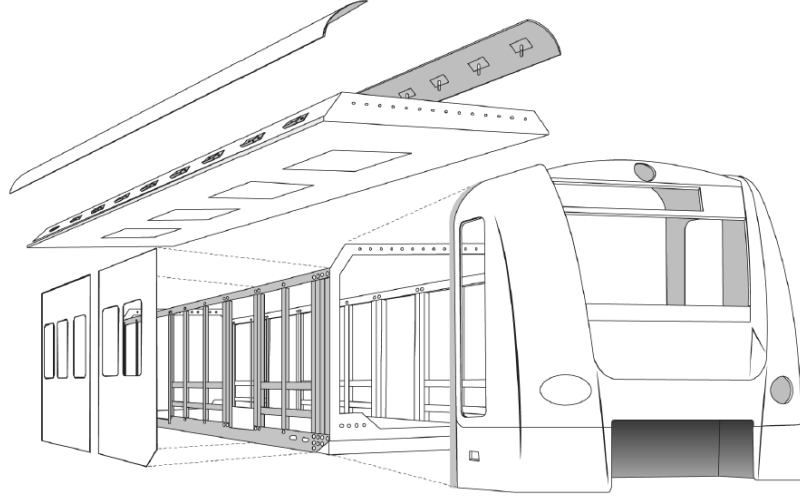
Yapısal yapıştırıcılar yüksek güvenliğe sahip olması beklenen uçak gövdelerinde de önemli oranlarda kullanılmaktadır. Şekil 3.4’de, uçaklarda kullanılan yapısal yapıştırıcıların yeri ve birleştirdikleri malzeme çeşitleri gösterilmektedir. Yapıştırılarak birleştirilen bu malzemeler birincil öneme sahip kritik uçuş parçalarıdır.



Şekil 3.4 Uçaklarda yapısal yapıştırıcılar ile birleştirilen malzeme çeşitleri [25]

Uçaklar ve otomobiller de olduğu gibi, yapısal yapıştırıcılar, raylı sistemlerde ve deniz taşıtlarında da özellikle farklı özellikte malzemelerin birleştirilmesinde kullanım alanı bulmaya başlamıştır. Ön kısmında tamamen cam fiber kompozit malzemelerin kullanıldığı tren vagonunda, kompozit malzemeler metalden yapılan gövde iskeletine

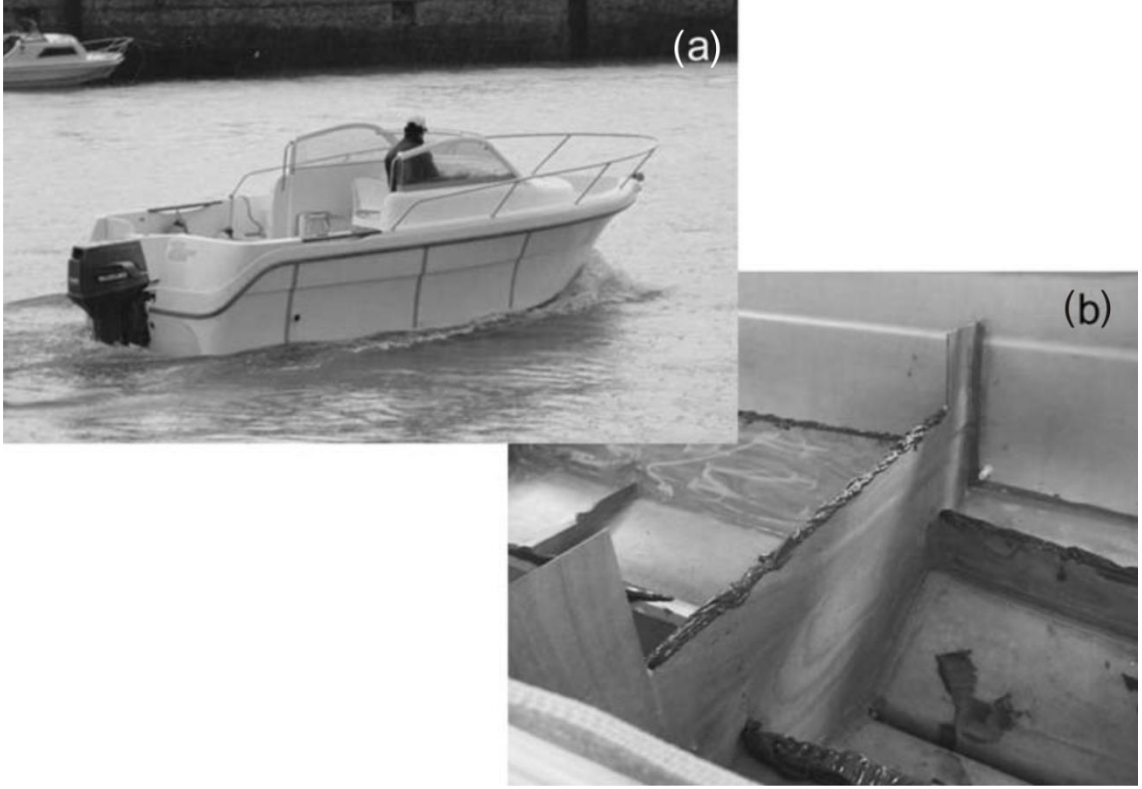
yapıştırıcı kullanılarak birleştirilmiştir (Şekil 3.5). Deniz taşıtlarında, alüminyum malzemeden imal edilen üst güvertenin çelik gövde ile birleştirilmesi yapıştırıcıların kullanılması ile yapılabilmektedir (Şekil 3.6). Güverte montajında, geleneksel yöntem olan kaynak ve beraberinde bi-metalik malzemelerin kullanılması yerine yapıştırıcıların tercih edilmesi maliyeti önemli oranda düşürmektedir. Şekil 3.7’de, model yat imalatında yapıştırıcının kullanıldığı tekne gövdesi gösterilmektedir.



Şekil 3.5 Tren vagonu imalatında yapıştırıcının kullanılması [28]



Şekil 3.6 Alüminyum üst güverte ile çelik gövde arasında yapıştırıcı kullanılması [29]



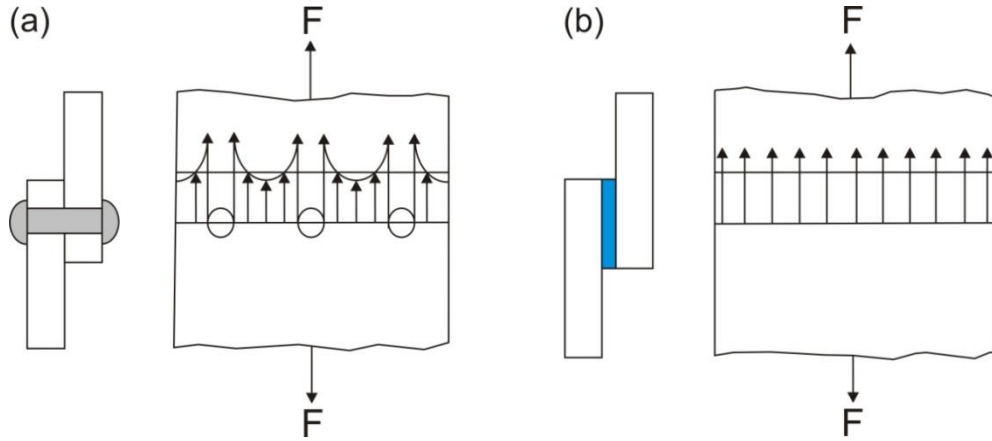
Şekil 3.7 Yat güvertesi imalatında yapıştırıcının kullanılması: (a) model yat, (b) gövde detayı [30]

3.2 Yapıştırırmalı Bağlantıların Avantaj ve Dezavantajları

Endüstride imalatı yapılan birçok malzeme, onu oluşturan parçaların birleştirilmesi ile ortaya çıkar. Üreticilerin bu amaçla, yapıştırıcı hariç kullanabileceği vida, perçin, nokta kaynağı gibi değişik alternatifleri mevcuttur. Alternatif birleştirme elemanlarının seçiminde önemli olan yapılacak uygulamanın ihtiyaca cevap verip veremeyeceğidir. Bazı durumlarda, birleştirme elemanı için yapıştırıcıyı tercih etmek en kötü seçim olurken, bazı durumlarda da yapıştırıcılar en iyi ve tek seçenek olabilirler. Bu durumda, uygulanacak yöntemin avantaj ve dezavantajlarının en iyi şekilde tespit edilmesi gerekmektedir [23]. Çizelde 3.1’de yapıştırırmalı bağlantının avantaj ve dezavantajları, detaylı şekilde, liste halinde verilmiştir.

Çizelge 3.1 Yapıştırırmalı bağlantı avantaj ve dezavantajları [21], [24], [31]

Avantajları	Dezavantajları
(1) Yapıştırılan yüzeylerin perçin veya vida bağlama elemanları ile delinmemesinden dolayı, gerilme yoğunluklu bölgeler oluşmaz ve homojen gerilme dağılımı elde edilir (Şekil 3.8). (2) Yorulma ve çevrimsel yük dayanımını artırıcı yönde etki yapar. (3) Yapılarda ağırlık düşümü sağlar. (4) Bağlama ve sızdırmazlık aynı anda sağlanabilir. (5) Metaller arasında korozif etki en aza indirilir veya ortadan kaldırılabilir. (6) Mekanik birleştirme elemanlarına göre daha ucuz ve uygulama süresi kısa olabilir. (7) Karmaşık şekilli ince veya kalın malzemelerin birleştirilmesi mümkündür. (8) Rijitliği artırır ve ses yalıtımı sağlar. (9) Farklı özellikteki malzemelerin yapıştırılmasına olanak sağlar. (10) Isı transferi ve elektrik iletimine karşı yalıtıcı görevi görür. (11) Bağlantıda, yapıştırıcının uygulanması esnasında yüksek sıcaklıklara gerek olmadığından, yapıştırılan metal parçaların dayanımına olumsuz etkisi olmaz. (12) Titreşimi düşürür ve şokları sönmüleyebilir. (13) Dayanım/ağırlık oranı açısından oldukça avantajlıdır.	(1) Dayanım, yapıştırılan yüzeylerin durumuna bağlıdır. (2) Dayanımın devamlılığı, yüzey koşullarına bağlı olarak çevresel şartlardan etkilenir. (3) Tahribatsız muayene ile kalite kontrolü yapılmasında yetersizlikler vardır. (4) Yapıştırırmalı bağlantıyı tanımlayan mühendislik eğitimleri eksiktir. (5) Mekanik birleştirme elemanlarına göre daha pahalı olabilir. (6) Sökülemez bağlantı çeşididir. (7) Yavaş kürleşme ihtimali işlem süresini uzatır. (8) Bazı yapıştırıcılar toksin bileşenlere sahiptir. (9) Bazı yapıştırıcılar düşük raf ömrüne sahiptir. (10) Bazı yapıştırıcıların çatlak ilerlemesine karşı direnci düşüktür. (11) Sabitleme aparatları, presler ve fırınların kullanılması zorunlu olabilir. (12) Üst çalışma sıcaklığı bazı özel yapıştırıcılar hariç düşüktür. (13) Yüzey temizleme işlemi birçok yapıştırıcı için zorunludur. (14) Yapıştırma sonrası, ideal yapışma dayanımına kısa sürede ulaşılması zordur. (15) Soyulma ve ayrılma gerilmenin en aza indirilmesi için, bağlantı tasarımına dikkat edilmesi gerekir.



Şekil 3.8 Bindirmeli bağlantı gerilme dağılımı: (a) perçinli, (b) yapıştırırmalı [21]

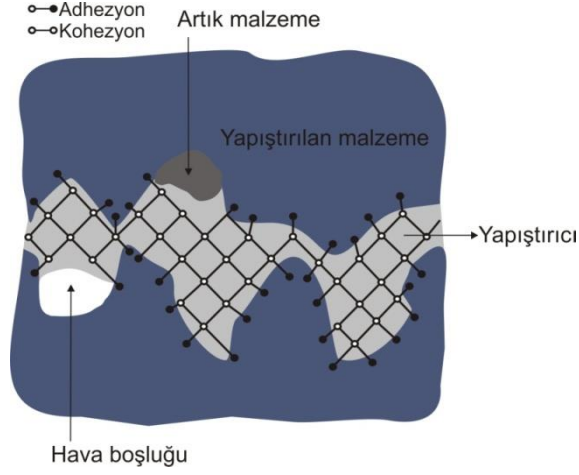
ADHEZYON TEORİLERİ

Adhezyon, yapıştırıcı ve yapıştırılan ara yüzeyinde meydana gelen etkileşim kuvvetidir. Bu şekilde bir ara yüzey temasın oluşması, sağlam ve stabil yapıştırırmalı bağlantının temelidir. Adhezyon kuvvetlerinin ara yüzey boyunca oluşturulması temasın sağlanmasından sonraki en önemli adımdır. Adhezyon kuvvetlerinin, bağlantı imal edildikten sonra, yeteri kadar kuvvetli ve servis koşullarına dirençli olması gerekir. Adhezyon kuvvetlerinin oluşmasını sağlayan adhezyon mekanizmasının açıklanmasında birden fazla teori kullanılır. Adhezyon mekanizması ile ilgili ana teoriler; mekanik kilitlenme teorisi (mechanical interlocking theory), difüzyon teorisi, zayıf sınır tabaka teorisi (weak boundary layer theory), kimyasal birleşme teorisi (chemical bonding theory), elektrostatik teori, ve yüzeye tutunma teorisi (Adsorption theory) olmak üzere altı gruba ayrılabilir.

4.1 Mekanik Kilitlenme Teorisi

Mekanik kilitlenme teorisi, moleküler düzeyde bir adhezyon mekanizmasını tanımlamaz. Mekanik kilitlenme teorisine göre, adhezyonun meydana gelmesi için, yapıştırıcının pürüzlü ve düzensiz yüzey yapısına sahip malzeme üzerinde akarak, mikro boşlukları doldurması gerekir. Yapıştırıcının bu yüzeyler üzerinde kürleşerek donması ile yapıştırılan malzemeler mekanik olarak birbirine bağlanır. Mekanik kilitlenme teorisi için, yapıştırılan malzemenin yüzey topografisi büyük öneme sahiptir (Şekil 4.1). Yüzey üzerindeki pürüzlü yapıya bağlı çukur ve tepeler yapıştırma yüzeyini ve kimyasal bağ sayısını arttırarak, mekanik kilitlenmeyi sağlar. Bununla birlikte, pürüzlü yüzey üzerinde

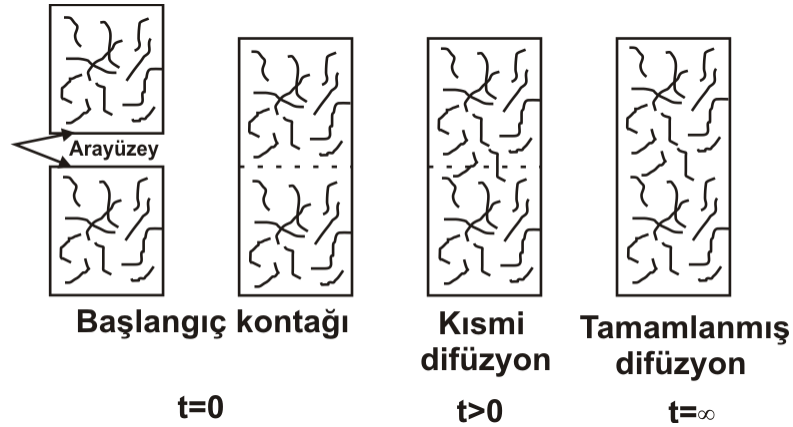
oluşan tepelerin aşırı yüksek olması veya çukurlukların fazla derin olması, yapıştırma sırasında havanın ara yüzeyde sıkışmasına neden olarak, gerilme yoğunluğu oluşturur ve adhezyonu düşürücü yönde etki yapabilir [23], [24], [32], [33].



Şekil 4.1 Mekanik kilitlenme

4.2 Difüzyon Teorisi

Adhezyon, yapıştırıcı ve yapıştırılan içerisindeki moleküllerin yayılımının meydana geldiği difüzyon mekanizması ile oluşur (Şekil 4.2). Difüzyon teorisi, yapıştırıcı ve yapıştırılanın her ikisinde polimerik yapıda olması durumunda geçerlidir [34].



Şekil 4.2 Difüzyon mekanizması

4.3 Zayıf Sınır Tabaka Teorisi

Temiz malzeme yüzeyleri daha yüksek yapışma dayanımı sağlar. Yapıştırılan malzeme üzerindeki toz, yağ, gres gibi yabancı maddeler koheziv olarak zayıf sınır tabaka oluştururlar. Zayıf sınır tabaka teorisine göre, yapıştırılmalı bağlantıdan beklenen

dayanımın elde edilmesi, zayıf sınır tabakasının yapıştırma yüzeyi üzerinden uzaklaştırılması ile sağlanabilir. Polietilen ve metal oksitler de zayıf sınır tabaka oluşturan yapılardır. Metal oksitler ana metalle zayıf bağ oluşturdıkları durumlarda, oksit tabaka içerisinde koheziv hasar oluşumu meydana gelir. Bununla birlikte, alüminyum oksit temel metal ile güçlü bir bağ oluşturduğundan bağlantı dayanımı üzerinde olumsuz bir etkisi olmaz. Zayıf sınır tabakanın yüzey üzerinden kaldırılması amacıyla yapıştırılan yüzeye uygun yüzey hazırlama işlemlerinin kullanılması gerekir [34], [35].

4.4 Kimyasal Birleşme Teorisi

Adhezyon, ara yüzeyde meydana gelen kimyasal reaksiyonlar ile tanımlanır. Ara yüzeyde kimyasal reaksiyonlar, kovalent, iyonik veya hidrojen bağları veya Lewis asit-baz etkileşimleri ile meydana gelir [20]. Bağların sahip olduğu enerji miktarları Çizelge 4.1’de verilmiştir. Çizelge 4.1 incelendiğinde, yüzeye tutunma enerjisinin kaynağı olan van der Waals kuvvetlerine oranla, kovalent, iyonik, hidrojen bağları ve Lewis asit-baz etkileşimlerinin daha yüksek enerji miktarına sahip olduğu görülmektedir [35].

Çizelge 4.1 Kimyasal bağların dayanımı ve van der Waals etkileşimleri [20]

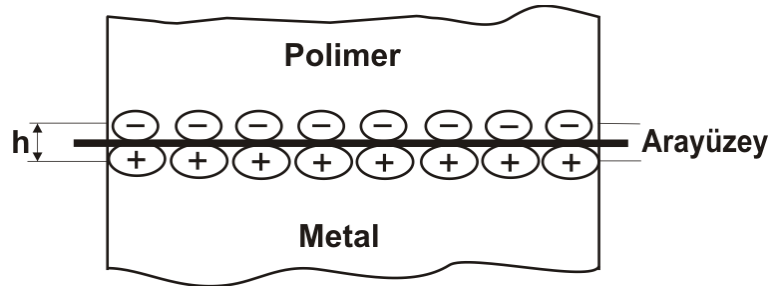
Etkileşim şekli	Enerji (kJmol ⁻¹)
iyonik	
Na ⁺ Cl ⁻	503
Al ³⁺ O ²⁻	4290
Tl ⁴⁺ O ²⁻	5340
Kovalent	
C-C	368
C-O	377
Si-O	368
C-N	291
Hidrojen bağı	
-OH-----O=C- (asetik asit)	30 ± 2
-OH-----OH (methanol)	32 ± 6

Çizelge 4.1 Kimyasal bağların dayanımı ve van der Waals etkileşimleri (devamı)

Etkileşim şekli	Enerji (kJmol ⁻¹)
-OH-----N (phenol-trimethylamine)	35 ± 2
F-----HF	163 ± 4
F-----HOH	96 ± 4
Lewis asit-baz	
BF ₃ + C ₂ H ₅ OC ₂ H ₅	64
C ₆ H ₅ OH + NH ₃	33
SO ₂ + N(C ₂ H ₅) ₃	43
SO ₂ + C ₆ H ₆	4.2
van der Waals kuvvetleri	
dipol-dipol	≥2
dipole-induced dipole	0.05
dispersiyon	≥2

4.5 Elektrostatik Teori

Elektrostatik teori, yapıştırıcı-yapıştırılan adhezyonunu, farklı özellikteki malzemelerin bir araya gelmesi durumunda, elektriksel çift katmanı oluşturan levhalı kondensatör olarak tanımlar [35]. Şekil 4.3’de, farklı özellikte polimer ve metal malzemeler arasında oluşan elektriksel çift katmanı gösterilmektedir. Elektriksel çift katmanı ile elektronlar ortak şekilde paylaşılır.

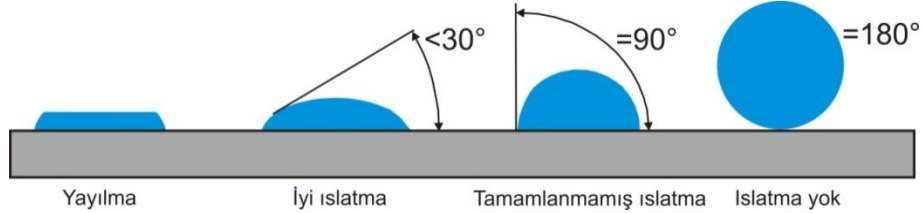


Şekil 4.3 Polimer-metal elektriksel çift katmanı [35]

4.6 Yüzeye Tutunma Teorisi (Termodinamik Teori)

Yüzeye tutunma teorisine göre adhezyon, iki malzemenin moleküler teması ve oluşan yüzey kuvvetlerine bağlı olarak meydana gelir. Adhezyon kuvveti, yapıştırıcı moleküllerinin yapıştırılan malzeme yüzeyine tutunarak çekim kuvveti oluşturması ile tamamlanır. Genel olarak, ikincil kuvvetler olan van der Waals kuvvetleri meydana gelir. Van der Waals kuvvetlerinin oluşması için mesafenin beş angström'den fazla olmaması gerekir [24].

Bu kuvvetlerin büyüklüğü yapıştırılan ve yapıştırıcının serbest yüzey enerjisi olan termodinamik özelliklerle değişir. Genel olarak, birleşmenin meydana gelmesi sıvı-katı temas adımının geçilmesi ile olur. İyi bir kohezyonun olması, iyi bir ıslatmayı gerektirir (Şekil 4.4). Bununla birlikte, bu yeter koşul değildir.



Şekil 4.4 Yüzeyin ıslatılması [21]

Adhezyon mekanizması tek bir teori ile açıklanamaz. Adhezyonun tanımlanması için kullanılan altı teori birbirini tamamlayan niteliktedir. Yukarıda açıklanan teorilerin tümü geçerlidir ve yapışmanın oluşma koşulları ile temas halindeki katıların yapısına bağlıdır.

YAPIŞTIRMALI BAĞLANTI GERİLME ÇEŞİTLERİ ve BAĞLANTI DAYANIMINI ETKİLEYEN FAKTÖRLER

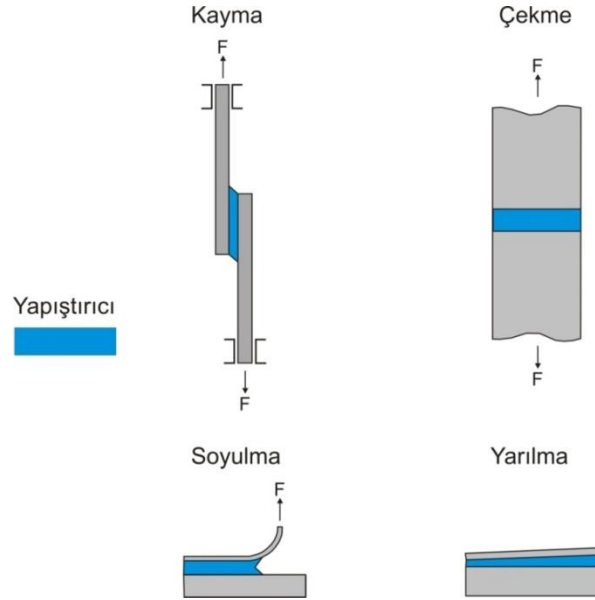
Yapıştırırmalı bağlantıların tasarımında temel amaç, yapıştırılanlar arasında yükün emniyetli bir şekilde iletilmesinin sağlanmasıdır. Emniyetli ve yüksek performanslı bir bağlantının tasarlanması, yapıştırıcı uzunluğu boyunca, gerilme bileşenlerinin çeşit ve davranışı ile bağlantı hazırlama yöntemlerinin detaylı şekilde bilinmesini gerektirir. Gerilme çeşit ve davranışlarının bilinmesi durumunda, bağlantı dayanımını yükseltmek amacıyla kullanılacak yöntemlerin tespit edilmesi önemli ölçüde kolaylaşır. Bununla birlikte, bağlantı dayanımını yükseltmek için kullanılan yöntemlerin etkinliği, bağlantı hasar çeşitlerinin nedenlerinin bilinmesi ve bağlantı hazırlanırken izlenen yöntemlerin doğru olarak seçilmesi ile arttırılabilir.

Bu bölümde, başlangıç olarak, bindirmeli bağlantılarda, gerilme davranışının anlaşılabilmesi amacıyla, yapıştırıcılarda meydana gelen gerilme çeşitleri açıklanacaktır. İkinci olarak, bindirmeli bağlantılarda dayanımı arttırmak amacıyla kullanılan metotlar tanıtılacaktır. Son olarak, bağlantı hasar çeşitleri ile nedenleri belirtilerek, ideal yapıştırırmalı bağlantı için hazırlık aşamaları detaylı olarak açıklanacaktır.

5.1 Gerilme Çeşitleri

Yapıştırırmalı bağlantıların dayanımı, çevresel faktörlerin ihmal edildiği durumlarda, bağlantıyı meydana getiren malzemelerin mekanik özellikleri kullanılarak bulunur. Yapıştırırmalı bağlantılarda, yapıştırıcıların mekanik özellikleri ile beraber, bağlantıda meydana gelen gerilme çeşitlerinin bilinmesi, bağlantı tasarımı açısından önemlidir.

Yapıştırırmalı bağlantılarda temel olarak, kayma, soyulma, çekme ve yarıma gerilmeleri meydana gelir (Şekil 5.1). Özellikle, basit bindirmeli bağlantılarda, yapıştırma çizgisi boyunca soyulma ve kayma gerilmeleri beraber meydana gelir.



Şekil 5.1 Yapıştırırmalı bağlantılarda meydana gelen gerilme çeşitleri

5.1.1 Kayma Gerilmesi

Kayma gerilmesi, bağlantı düzlemine paralel yükleme durumunda oluşur ve yapıştırılan malzemelerin birbiri üzerinde kayarak ayrılmasına neden olur. Yapıştırırmalı bağlantıların kaymada dayanımı yüksektir [36]. Yapıştırırmalı bağlantı tasarımında, hasarın kayma gerilmesine bağlı oluşması istenir. Kayma gerilmeleri, birim yapıştırma alanına etkiyen kuvvet olarak tanımlanır. Yapıştırırmalı metal malzemelerin kayma yükü altında dayanımı ASTM D1002-10 standardına göre belirlenir [37]. Kayma dayanımlarının belirlenmesi amacıyla kullanılan test numunelerinin eğilme etkisini azaltacak şekilde, yeterince kalın ve rijit olması gerekir. Numunelerde meydana gelen eğilme, soyulma etkisini artırarak dayanımda düşüşe sebep olur [38].

5.1.2 Çekme Gerilmesi

Çekme gerilmesi, bağlantı düzlemine dik yükleme durumunda oluşur. Bağlantı yüksek dayanımlı çelik ve yapıştırıcıdan oluşan dayanım zinciri (strength chain) şeklinde tanımlandığında, yapıştırıcının dayanım zincirinin en zayıf halkası olduğu söylenebilir

[21]. Özellikle, yapıştırma alanının büyük olmadığı durumlarda, bağlantı tasarımının çekme yükünü taşıyacak şekilde yapılması dikkat edilmesi gereken bir kuraldır [39].

5.1.3 Yarılma Gerilmesi

Yarılma gerilmesi, temel olarak, yapıştırma çizgisine dik olarak uygulanan, yoğunlaştırılmış çekme gerilmeleridir. Yapıştırmalı bağlantıların yarılma gerilmelerine karşı direnci düşüktür [40]. Yarılma gerilmelerinin etkin olduğu bağlantı tasarımında, yapıştırma alanının büyütülmesi ile dayanım arttırılabilir, ancak bağlantı maliyeti olumsuz yönde etkilenir [34]. Yarılma gerilmesi, her ikisi de rijit olan parçaların yapıştırıldığı bağlantılar için ASTM D1062-08 standardı kullanılarak belirlenir [41].

5.1.4 Soyulma Gerilmesi

Soyulma ve yarılma gerilmeleri, yükün uygulama noktası açısından benzerlik gösterirler. Yarılma gerilmesi rijit olan parçaların yapıştırıldığı bağlantılarda oluşurken, soyulma gerilmeleri esnek ve rijit iki parçadan oluşan bağlantılarda meydana gelir. Soyulma gerilmeleri ASTM D903–98 standardına göre belirlenir [42].

Birçok yapısal yapıştırıcının kayma dayanımları yüksek, soyulma dayanımları düşüktür. Yapıştırmalı bağlantıların tasarımında, soyulma gerilmelerine neden olan yüklerin ortadan kaldırılması veya en aza indirilmesi amaçlanır. Soyulma gerilmelerine neden olan dış eksenli yükleme durumuna örnek olarak basit bindirmeli bağlantı çekme yükü verilebilir. Basit bindirmeli bağlantılarda, dış eksenli yüklemeye bağlı oluşan eğilme momenti, bindirme uzunluğu kenarlarında yüksek gerilme yoğunluğu meydana getirir ve bağlantıyı ayırma yönünde etkisi olan soyulma gerilmeleri oluşur.

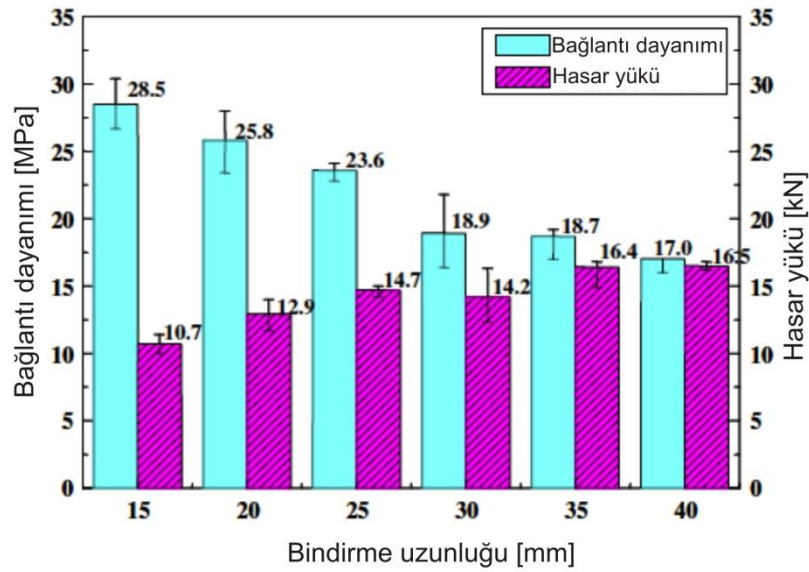
5.2 Bağlantı Dayanımını Yükseltmek için Kullanılan Metodlar

Bağlantı dayanımı ile beraber hasar yükünün arttırılması, yapıştırılanlar arasında yükün emniyetli bir şekilde iletilmesinin sağlanması açısından önemlidir. Literatürde, bağlantı dayanımı ve hasar yükünün arttırılması amacıyla önerilen çeşitli yöntemler mevcuttur. Önerilen yöntemler genel olarak, bindirme uzunluğu kenarlarında oluşan pik gerilme değerlerinin düşürülerek, homojen gerilme dağılımının elde edilmesini amaçlamaktadır. Önerilen yöntemlerden en sık kullanılanları aşağıda belirtilmiştir.

5.2.1 Yapıştırma Uzunluğunun Arttırılması

Bağlantı dayanımı, birim yapıştırma alanına gelen maksimum yük olarak tanımlanır. Yapıştırma uzunluğunun artması ile bağlantının hasar yükü ve dolayısıyla yük taşıma kapasitesi artarken, bağlantı dayanımı düşüş gösterebilir (Şekil 5.2). Bağlantı dayanımındaki düşüş, taşınan yükün bindirme uzunluğunun artışıyla orantılı olarak artmadığı şeklinde açıklanabilir. Hasar yükü ve bindirme alanına bağlı bağlantı dayanımı denklem (5.1) kullanılarak belirlenebilir [43]. Bağlantı dayanımındaki düşüşe sebep olarak, kayma gecikmesi etkisine (shear lag effect) bağlı olarak, yapıştırma çizgisi boyunca, yük taşımaya katkısı düşük olan orta kısımlarda daha fazla düşük gerilmeli alanların oluşması gösterilebilir. Bağlantı dayanımında düşüşe rağmen, hasar yükünde meydana gelen değişim, belirli bir bindirme uzunluğu sınır değerinden sonra ihmal edilebilir seviyelere gelmekte ve maksimum değerine ulaşmaktadır [44].

$$\text{Bağlantı dayanımı} = \frac{\text{Maksimum yük}}{\text{Bindirme alanı}} \quad (5.1)$$

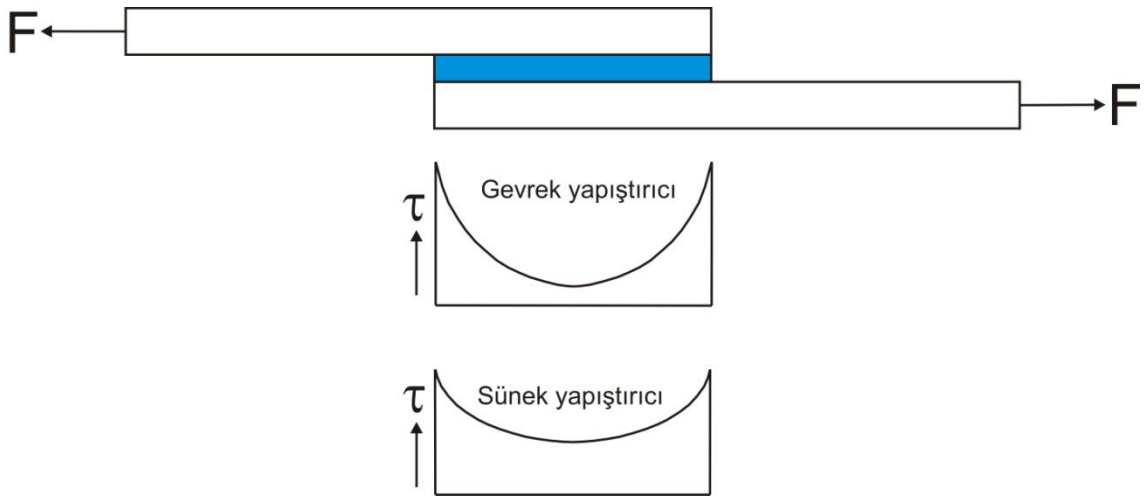


Şekil 5.2 Farklı bindirme uzunluklarının bağlantı hasar yükü ve dayanımına etkisi [44]

5.2.2 Yapıştırıcı Özelliklerinin Değiştirilmesi

Bağlantı dayanımının arttırılması için, kullanılan yapıştırıcıların özellikleri ve bağlantıda kullanılması durumunda, yük altında gösterdikleri davranışın iyi bilinmesi gerekir. Bağlantı ve yapıştırıcı dayanımları arasında önemli farklılıklar vardır. Özellikle, kayma ve

soyulma gerilmelerinin beraber meydana geldiği basit bindirmeli bağlantılarda, kullanılan yapıştırıcının yüksek dayanıma sahip olması, bağlantı dayanımının artacağı anlamına gelmemektedir. Bağlantı dayanımını belirleyen en önemli etken, yapıştırıcının yük altında gösterdiği gerilme dağılımı davranışdır. Yüksek dayanımlı, gevrek yapıştırıcı gerilme dağılımında, bindirme uzunluğu ortalarında yapıştırıcının yük taşımaya olan katkısı düşüktür ve buna bağlı olarak, kenarlarda yüksek gerilme yoğunlukları meydana gelir. Yüksek gerilme yoğunluğu, ani hasar oluşumuna neden olan ve bağlantı dayanımını önemli oranda düşüren istenmeyen bir durumdur. Bu durumda, yapıştırıcının dayanımı yüksek dahi olsa, sahip olduğu tam kayma dayanımı kapasitesine (full shear strength capacity) ulaşmadan hasar meydana gelir. Bağlantıda, gevrek yapıştırıcıya göre düşük dayanıma sahip, plastik şekil değişimine uğrayan sünek veya tok yapıştırıcıların kullanılması durumunda, yüksek dayanımlı gevrek yapıştırıcılı bağlantı ile kıyaslandığında, bindirme uzunluğu boyunca daha uniform gerilme dağılımı elde edilir (Şekil 5.3). Uniform gerilme dağılımı ile bindirme uzunluğunun orta kısımlarının yük taşımaya olan katkısı önemli oranda artar, yapıştırıcı kenarlarında oluşan pik gerilme değerleri düşer ve yapıştırıcı tam kayma dayanımı kapasitesine yaklaşarak, bağlantı dayanımında artış sağlanabilir.



Şekil 5.3 Gevrek ve sünek yapıştırıcı kayma gerilmesi dağılımı

5.2.3 Yapıştırıcı Kalınlığının Değiştirilmesi

Yapıştırıcı kalınlığının basit bindirmeli bağlantıların dayanımı üzerine etkisi literatürde üzerinde en fazla çalışma yapılan konular arasındadır. Yapılan çalışmaların büyük kısmında, yapıştırıcı kalınlığındaki artışın bağlantı dayanımını düşürdüğü

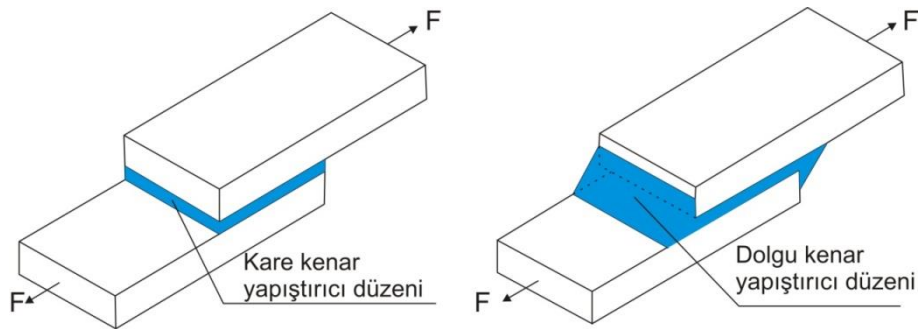
belirtilmektedir [33], [45-47]. Bununla birlikte, yapıştırıcı kalınlığının gevrek ve sünek yapıştırıcılı bağlantıların dayanımı üzerine etkisi önemli farklılıklar gösterir. Bağlantıda, gevrek yapıştırıcı kullanılması durumunda, kalınlık artışının dayanımı düşürme yönündeki etkisi, bağlantıda sünek yapıştırıcı kullanılması durumuna göre oldukça fazladır. Kalınlık artışının bağlantı dayanımı üzerine etkisinin fazla olduğu gevrek yapıştırıcılarda, ideal yapıştırma kalınlığının uygun olarak belirlenmemesi, bağlantı dayanımında %50 den daha fazla düşüşe neden olabilmektedir [48].

Yapıştırıcı kalınlığındaki artışın bağlantı dayanımında meydana getirdiği düşüş aşağıda belirtilen farklı yaklaşımlar kullanılarak açıklanmaktadır:

- Yapıştırıcı içerisinde boşlukların artması ve mikro-çatlakların sayısal olarak fazlalaşması [49].
- Eğilme momentine bağlı meydana gelen gerilmelerin artması [50].

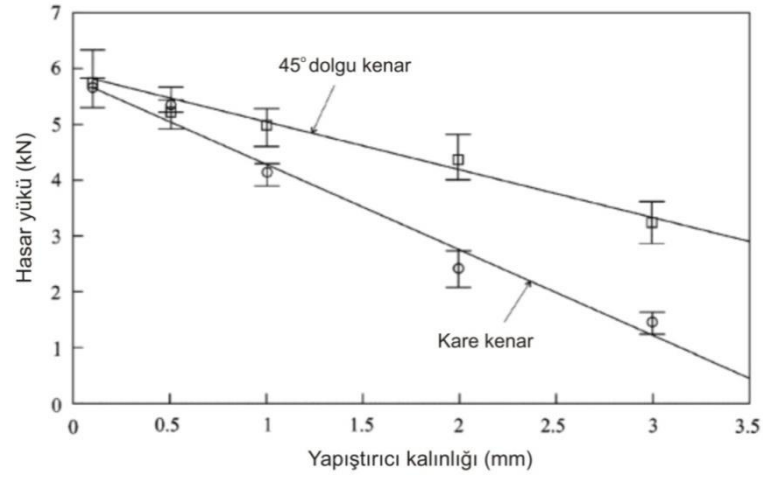
5.2.4 Dolgu Kenar Yapıştırma Düzeninin Kullanılması

Bindirme uzunluğu kenarlarında oluşan gerilme yoğunluğu, kenar yapıştırma düzeni değiştirilerek düşürülebilir ve bağlantı hasar yükü arttırılabilir (Şekil 5.4).



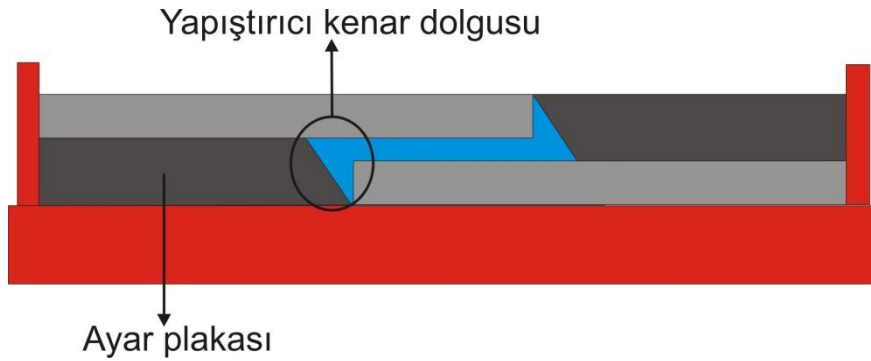
Şekil 5.4 Kare ve dolgu kenar yapıştırma düzeni [51]

Basit bindirmeli bağlantı kayma dayanımı, kare kenar yapıştırma düzeni yerine dolgu kenar yapıştırma düzeni kullanılması durumunda, yapıştırıcı kalınlığındaki düşüş ile beraber, önemli oranda arttırılabilir (Şekil 5.5) [50].



Şekil 5.5 Kare ve dolgu kenar için yapıştırıcı kalınlığına bağlı hasar yükü değişimi [50]

Ancak, bağlantıda dolgu kenar düzeninin oluşturulması zor ve karmaşıktır. Kenar düzenin değiştirilmesi ve istenen özelliklerde dolgu kenar yapısının elde edilmesi amacıyla, özel kalıp sistemlerinin kullanılması zorunludur (Şekil 5.6). Ayrıca, yüksek viskozite değerine sahip yapıştırıcıların akma özelliği düşük olduğundan, kürleşme süresince her zaman dolgu kenar yapısının elde edilmesi mümkün olmayabilir [52].



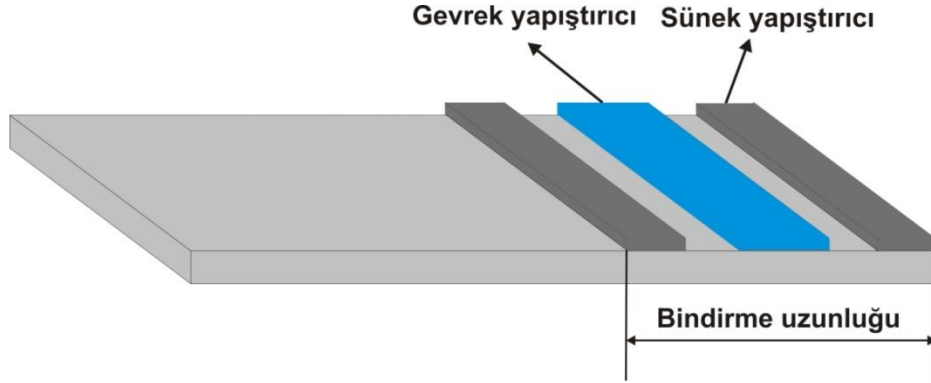
Şekil 5.6 Dolgu kenar düzeni kalıp sistemi

5.2.5 Yapıştırılan Malzeme Özelliklerinin ve Kalınlığının Değiştirilmesi

Yapıştırılan malzemenin kalınlığı ve özellikleri bağlantı dayanımı açısından önemlidir. Düşük dayanımlı malzemelerde kalınlık artışı, uygulanan yüke karşı direnci artırarak meydana gelen plastik şekil değiştirme miktarını düşürür. Ancak, yüksek dayanıma sahip malzemelerde, kalınlığın arttırılması, dış eksenli yüklemeye bağlı meydana gelen eğilme momenti etkisinin artmasına neden olarak bağlantı dayanımını düşürücü yönde etki yapar [45].

5.2.6 Hibrit Yapıştırırmalı Bağlantılar

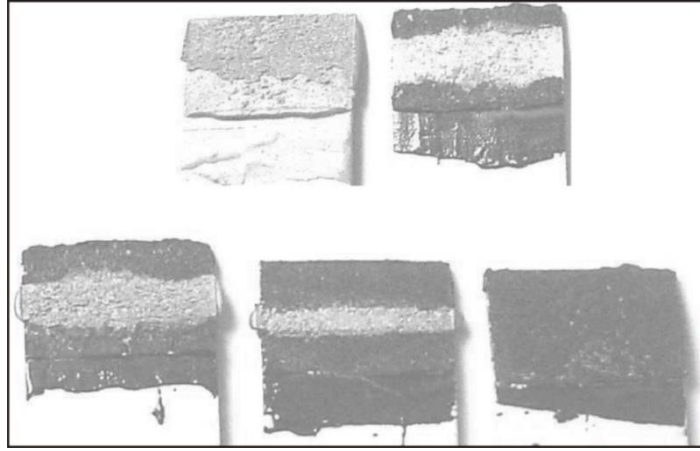
Hibrit yapıştırırmalı bağlantı, mono yapıştırırmalı bağlantıdan farklı olarak, bindirme bölgesinde iki farklı yapıştırıcının bir arada kullanıldığı bağlantı çeşididir (Şekil 5.7). Bindirme bölgesinin ortasında kullanılan gevrek yapıştırıcının elastisite modülü, sünek yapıştırıcıya göre yüksek, ancak şekil değiştirme kabiliyeti düşüktür.



Şekil 5.7 Hibrit yapıştırırmalı bağlantı yapıştırıcı düzeni

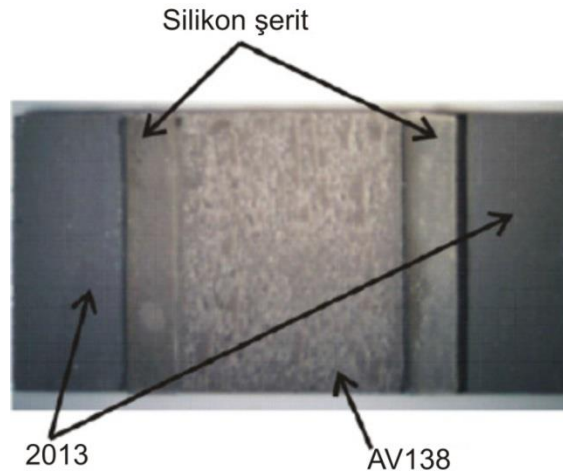
Bölüm 5.3.1 ve 5.3.5 arasında belirtilen ve mono yapıştırırmalı bağlantı dayanımının artırılması için kullanılan metotlar, hibrit yapıştırma bağlantısı içinde kullanılabilir. Hibrit yapıştırırmalı bağlantı, özellikle gevrek yapıştırıcının tekil olarak kullanıldığı mono yapıştırırmalı bağlantıya göre daha yüksek dayanıma sahiptir. Mono yapıştırırmalı bağlantılarda gerilme yoğunluklu bölgeler kenarlarda oluşurken, hibrit yapıştırırmalı bağlantı gerilme dağılımı mono yapıştırırmalı bağlantı gerilme dağılımına göre daha homojen davranış gösterir. Hibrit yapıştırma düzeni kullanılarak, bindirme yüzeylerinin orta kısımlarının yük taşımaya olan katkısının artırılması, yüksek elastisite modüllü gevrek yapıştırıcının tam kayma dayanımı kapasitesine yaklaşmasını sağlar. Hibrit yapıştırırmalı bağlantı, dayanım açısından önemli avantaj sağlamasına rağmen, mono yapıştırırmalı bağlantıya göre, hazırlık aşaması daha karmaşıktır. Hibrit yapıştırırmalı bağlantıların hazırlanmasındaki en önemli sorun, hibrit yapıştırma düzeni içerisinde kullanılan yapıştırıcıların, uygulanan basınç altında, birbirine karışma ihtimalinin olmasıdır. Pires v.d [9] çalışmalarında, bindirme bölgesinde yapıştırıcıların birbirine karışmasını engelleyecek ayırıcı kullanmamışlardır. Bağlantının hazırlanmasında, öncelikle gevrek yapıştırıcı orta kısma yapıştırılmış sonrasında bindirme kenarları sünek yapıştırıcı ile doldurulmuştur. Ayırıcı kullanılmadan hazırlanan hibrit yapıştırırmalı

bağlantı hasar yüzeyleri incelendiğinde, yapıştırıcıların birbirine karıştığı belirtilmiştir (Şekil 5.8).



Şekil 5.8 Test sonrası mono ve hibrit yapıştırırmalı bağlantı görünümüleri [9]

Da Silva v.d [12] çalışmalarında, yapıştırıcıların karışmasını engellemek amacıyla, sünek ve gevrek yapıştırıcılar arasında silikon şerit kullanmışlardır (Şekil 5.9). Yapıştırıcıların arasında kullandıkları silikon şerit genişliği (5 mm) ve kalınlığı (1 mm) oldukça fazladır. Silikon şerit genişliğinin düşürülmesi durumunda, hibrit yapıştırırmalı bağlantı dayanımının daha da arttırılabileceğini belirtmişlerdir.



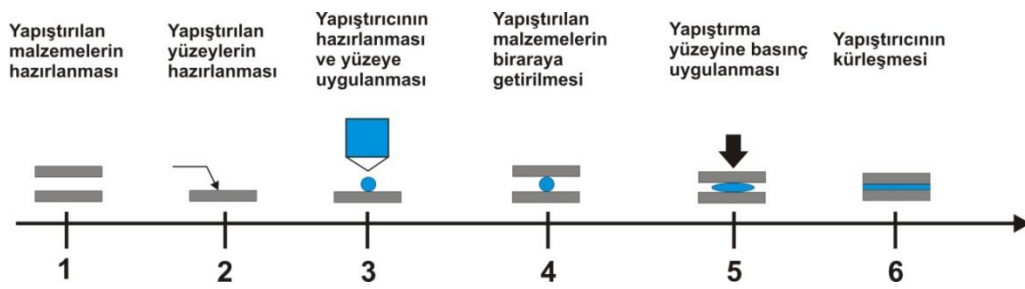
Şekil 5.9 Hibrit yapıştırırmalı bağlantı hasar yüzeyi [12]

Hibrit yapıştırırmalı bağlantıların hazırlanmasında, Da Silva v.d [12] tarafından önerilen, yapıştırıcılar arasında ayırıcı kullanılması metodu, yapıştırıcı uzunluk oranlarının daha kolay ayarlanabilmesi ve yapıştırıcıların birbirine karışmasının engellenmesi nedeniyle avantaj sağlamaktadır. Bununla birlikte, silikon şerit genişliği ve kalınlığının düşürülmesi

ile daha fazla alanın, düşük yapıştırıcı kalınlığında birleştirilmesi, hibrit yapıştırırmalı bağlantı dayanımını arttırması açısından önemlidir.

5.3 Yapıştırırmalı Bağlantıların Hazırlanması

Yapıştırırmalı bağlantıların dayanımı, sahip olduklar geometri, yükleme çeşidi ve yapıştırıcı özelliklerine bağlı olmasına rağmen, yapıştırırmalı bağlantıların hazırlanmasında, yapıştırıcının kürleşmesine kadar olan yapıştırma prosedürünün eksiksiz ve hatasız uygulanması önemlidir. Şekil 5.10’da gösterilen altı adım, yapıştırma prosedürünün temel aşamalarıdır.



Şekil 5.10 Yapıştırma prosedürü temel aşamaları

Şekil 5.10’da belirtilen her aşama aşağıdaki gibi açıklanabilir:

- 1) Deneysel ve endüstriyel yapıştırma uygulamalarında kullanılacak malzemelerin (çelik, alüminyum, kompozit, plastik v.b.) seçilmesi ve yapıştırma yüzeylerinde herhangi bir geometrik düzensizlik oluşturmayacak şekilde, belirlenen ölçülerde işlenmesidir. Malzeme işlenirken yapıştırma yüzeyinde oluşabilecek şekil değişimi, yapıştırma çizgisi kalınlığında farklılıklara neden olabilir.
- 2) Yapıştırılacak yüzeylerin temizlenmesi ve yapışma yüzeylerinde istenen pürüzlülük değerlerinin elde edilmesi amacıyla uygulanan mekanik ve kimyasal işlemleri içerir.
- 3) Uygun yapıştırıcının seçilmesi, kimyasal özelliklerine bağlı olarak hazırlanması ile yapıştırma yüzeyine uygulanma şeklini içerir.
- 4) Yapıştırılacak malzemelerin uygun kalıplama sistemleri kullanılarak bir araya getirilmesini içerir.

- 5) Yapıştırma yüzeyine basınç uygulanarak yapıştırıcının bindirme yüzeyini tamamen ıslatması sağlanır. Bununla birlikte, film tipi yapıştırıcılar basınç altında kürleştiğinden dolayı, basınç değerlerinin kürleşme süresince istenen değerlerde olması önemlidir.
- 6) Kullanılan yapıştırıcının kürleşme özellikleri ile uyumlu uygun katılma ortamının hazırlanması ve kürleşme sıcaklıkları ile zamanının doğru olarak belirlenmesidir.

Yukarıda belirtilen, yapıştırma prosedürü temel aşamalarının eksiksiz ve hatasız şekilde uygulanması, yapıştırmalı bağlantıdan beklenen maksimum dayanımın elde edilebilmesi açısından önemlidir. Ancak, pratik uygulamalarda, yapıştırma aşamalarında yapılan eksik veya hatalı uygulamalar, bağlantıda beklenmeyen hasar oluşumlarına neden olabilir ve hasar nedeninin bilinmesi önem kazanır. Bağlantı hasarına neden olan sebeplerin belirlenmesi ve ortadan kaldırılması, hasar çeşitlerinin tanımlanması ve hasarın çeşidine göre çözüm yöntemlerinin geliştirilmesi ile sağlanabilir. Bu amaçla, ilerleyen bölümlerde, bağlantı hasar çeşitleri, yapıştırma hatalarının nedenleri ve çözümleri üzerine açıklamalar, detaylı şekilde verilmiştir.

5.3.1 Yapıştırmalı Bağlantı Hasar Çeşitleri

Yapıştırmalı bağlantılarda hasar, yapıştırıcı veya yapıştırılan malzemede meydana gelir ve oluşma şekline göre farklı isimlerle tanımlanır. Şekil 5.11’de UNE EN ISO 10365 standartlarına göre yapıştırmalı bağlantı hasar çeşitleri gösterilmektedir [53]. Yapıştırıcıda, koheziv ve yapıştırıcı hasarı olmak üzere iki farklı hasar çeşidi meydana gelir. Yapıştırıcı hasarı, yapıştırılan ve yapıştırıcı arasında meydana gelen ara yüzey hasarıdır. Yapıştırıcı koheziv hasarı durumunda, yapıştırılan yüzeylerin her ikisinde yapıştırıcı bulunur ve hasar oluşumu yapıştırıcı katmanının da meydana gelir. Yapıştırılanın yapıştırıcıdan önce hasara uğraması ile oluşan hasar çeşitleri, hasarın durumuna göre, yapıştırılan hasarı, yapıştırılan koheziv hasarı ve delaminasyon hasarı şeklinde üç farklı şekilde adlandırılır. Yapıştırılan malzeme ile yapıştırıcıda meydana gelen koheziv hasar çeşidi yapıştırılan veya yapıştırıcının, uygulanan yük altında, maksimum dayanıma ulaştığını gösterir.

	Hasar Tipleri	Kısaltma
Yapıştırılan	 Yapıştırılan hasarı	YH
	 Yapıştırılan koheziv hasarı	YKH
	 Delaminasyon hasarı	DH
Yapıştırıcı	Koheziv Hasar Tipleri	
	 Koheziv hasarı	KH
	 Özel koheziv hasar	ÖKH
	 Yapıştırıcı hasarı	YH
	 Soyulma etkisinde yapıştırıcıve koheziv hasarı	SYKH

Şekil 5.11 Yapıştırırmalı bağlantı hasar çeşitleri [53]

Hasarın şekline bağlı olarak değerlendirme yapılırken, koheziv ve yapıştırıcı hasarı yüzde oranları ile tanımlanır. Yapıştırıcıda oluşan koheziv hasarı, olması istenen hasar çeşididir ve ideal bir bağlantıda hasar oluşumunun %100 koheziv olması beklenir. Ancak, hasar çeşidi, etkin bir bağlantıyı tanımlamada kullanılabilecek tek kriter değildir. Bağlantılarda kullanılan bazı yapıştırıcılar, yapıştırıcı hasarına uğramasına rağmen, aynı bağlantı çeşidinde, daha zayıf ancak koheziv hasara uğrayan bir yapıştırıcı kullanılması durumuna göre, bağlantı dayanımı daha yüksek olabilir. Bağlantıda elde edilen üst dayanım limiti, oluşan hasar çeşidine göre daha önemlidir. Bununla birlikte, bağlantı hasarının, uygun olmayan yüzey işlemlerine veya zayıf sınır tabakaya bağlı olarak meydana gelip gelmediğinin anlaşılması açısından oluşan hasar çeşitlerinin incelenmesi önemlidir [31]. Çizelge 5.1’de karşılaşılan hasar çeşitleri ve nedenleri verilmiştir.

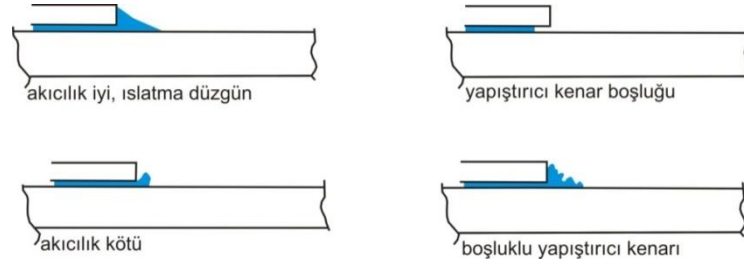
Çizelge 5.1 Hasar çeşitleri ve nedenleri [24]

Hasar çeşitleri	Nedenleri
Yapıştırıcı hasarı (Ara yüzey)	Koheziv dayanım > Ara yüzey dayanımı
Koheziv hasar (bulk)	Ara yüzey dayanımı > Koheziv dayanım
Yapıştırıcı/Koheziv hasarı (Karma)	Ara yüzey dayanımı $\approx$ Koheziv dayanım

Yapıştırıcı hasarı, ara yüzeyde meydana gelirse, yapıştırıcı ve yapıştırılan ara yüzey molekülleri arası adhezyon dayanımının, yapıştırıcı kohezyon dayanımından daha düşük olduğu söylenebilir. Ancak, bağlantının tümü göz önüne alındığında, dayanım beklenenden oldukça düşük ise, uygulanan yüzey işlemlerinin yeterli olup olmadığının araştırılması önem kazanır. Yüzey işlemlerinin yeterli olmadığı tespit edilen bağlantıda, yapıştırıcının koheziv dayanımının artırılması, bağlantı dayanımını yükseltici yönde olumlu bir etkiye neden olmaz [24].

Yapıştırıcı veya yapıştırılarda koheziv hasar meydana gelmesi durumunda, yapışma dayanımının, yapıştırıcı veya yapıştırılanı kendi içinde bir arada tutan kuvvetlerden daha büyük olduğu söylenebilir. Özellikle, yapıştırıcıda meydana gelen koheziv hasar, uygulanan yüzey işlemlerinin yeterli olduğunu göstermesi açısından önemlidir.

Yapıştırılmalı bağlantılarda, diğer bağlantı türlerine (kaynaklı, pimli, perçinli bağlantılar vb.) göre, hasara neden olarak, dayanımı olumsuz yönde etkileyen hata parametreleri oldukça fazladır. Yapıştırılmalı bağlantıda uygulanan işlem süreci oldukça karmaşıktır ve her işlem basamağı için hata değerlendirmesinin ayrı olarak ele alınması zorunludur. Yapıştırıcı veya yüzey hatalarının belirlenmesi amacıyla, mekanik testler sonucu veya kullanım sonucu ayrılan bağlantıda, yapıştırma hasar yüzeylerinin incelenmesi gerekir. Bununla birlikte, bağlantı hasara uğramadan önce, yapıştırma yüzeylerinin görülmesi mümkün olmasa da, yapıştırma bölgesinin çevresinin görsel olarak, detaylı bir şekilde incelenmesi, olası birçok hatanın belirlenmesinde yardımcı olabilir. Örneğin, Yapıştırma çizgisi boyunca yapıştırıcının olmadığı boşluklar yeterli yapıştırıcı veya basınç uygulanmadığını gösterirken, aşırı kürleşme sıcaklığı yapıştırıcıda boşluklar oluşmasına neden olur. Şekil 5.12’de, bağlantıda yapıştırıcının gözlemlenmesi ile belirlenebilecek hata çeşitlerinden bazıları için örnek gösterimler verilmiştir.



Şekil 5.12 Görsel yapıştırma hataları [54]

Genel olarak, bağlantının görsel olarak incelenmesi ile belirlenebilen hata çeşitleri Çizelge 5.2’de, detaylı olarak, liste halinde verilmiş ve hatanın nedeni ve çözüm önerileri açıklanmıştır.

Çizelge 5.2 Görsel olarak belirlenebilen hata çeşitleri, nedenleri ve çözümleri [24]

Yapıştırma hatası	Hatanın nedeni	Hatanın çözümü
Bağlantı kenarlarında yapıştırıcı bulunmaması veya yapıştırma çizgisi kalınlığının fazla olması	Sıkıştırma basıncının düşük olması	Sıkıştırma basıncı artırılır.
	Yeterli miktarda yapıştırıcı kullanılmaması	Yapıştırıcı miktarı artırılır.
	Kürleşme sıcaklığının çok düşük olması	Kürleşme sıcaklığı artırılır. Kürleşme sıcaklığından daha yüksek sıcaklıklar uygulanır.
	Raf ömrü geçen yapıştırıcılarda viskozite değerinin yükselmesi	Yeni tarihli yapıştırıcı kullanılır.
Yapıştırma çizgisi kalınlığının çok ince olması	Sıkıştırma basıncının yüksek olması	Sıkıştırma basıncı düşürülür.
	Yeterli miktarda yapıştırıcı kullanılmaması	Yapıştırıcı miktarı artırılır.
	Kürleşme sıcaklığının çok yüksek olması	Düşük kürleşme sıcaklığı kullanılır.
Yapıştırıcı çapağının (adhesive flash) yapıştırılan malzemeden kolay ve hızlı bir şekilde ayrılması, yapıştırma yüzeyinde boşlukların olması	Yetersiz veya uygun olmayan yüzey işlemi	Yüzey işlemi kontrol edilir.
	Reçinenin kirlenmesi	Temizleme malzemelerinin ve çözücülerin temiz olması sağlanır. Temizlenen malzemelere el ile dokunulması engellenir.
		Reçinenin bulunduğu kap temiz olmalı ve içerisine kirlетici maddelerin girmesi engellenmelidir.

Çizelge 5.2 Görsel olarak belirlenebilen hata çeşitleri, nedenleri ve çözümleri (devamı)

Yapıştırma hatası	Hatanın nedeni	Hatanın çözümü
Yapıştırıcı çapağının aşırı derecede boşluklu olması	Karıştırılan yapıştırıcı içerisine fazla miktarda hava girmesi	Vakumda bekletme yapılır.
	Yapıştırma öncesi kullanılan temizleyici çözeltilerin tam olarak kurutulmaması	Kurutma zamanı ve sıcaklık artırılır.
	Yapıştırıcı içerisinde buharlaşabilen uçucuların bulunması	Üretici firma önerileri takip edilir.
	Yapıştırıcı içerisinde düşük kaynama noktasına sahip bileşenlerin bulunması	Kürleşme sıcaklığı çok yüksek, düşürülmesi gerekir.
Yapıştırıcı çapağı ısıtıldığı zaman Yumuşaması veya çözücü ile silinebilmesi	Yapıştırıcının uygun şekilde kürleşmemesi	Kürleşme sıcaklığı veya zamanı artırılır. Yapıştırıcı karışım oranları kontrol edilir. Büyük parçalar ısıyı düşürücü yönde etki yapacağından kürleşme zamanı artırılır.

Çizelge 5.2’de belirtilen, yapıştırma yüzeyi hazırlama işlemleri ile yapıştırıcının kürleşme mekanizmasına bağlı hatalar, yapıştırmalı bağlantılarda en sık karşılaşılan hata çeşitleridir. Yüzey hazırlama işlemleri, yapıştırılan malzemeye göre değişiklik gösteren ve bağlantı dayanımını belirleyen en önemli aşamalardandır. Bağlantı hasar yüzeylerinin incelenmesinde, yüzey hazırlama yöntemlerinin etkinliğinin belirlenmesi, bağlantı hasarı üzerine yapılan ilk değerlendirmeyi içerir. Yapıştırıcının dayanımını belirleyen kürleşme mekanizması, en az yüzey hazırlama işlemi kadar önemlidir. Kürleşme mekanizması, kullanılan yapıştırıcıların kimyasal kompozisyonuna bağlı olarak farklılık gösterir ve yapılan uygulamalarda uygun kürleşme koşullarının belirlenmesi önem kazanır.

5.3.2 Yapıştırma Yüzeylerinin Hazırlanması

Yapıştırmalı bağlantıların hazırlanmasında, yapıştırma yüzeylerinin uygun yöntemler kullanılarak hazırlanması en önemli adımlardan biridir. Yüzey hazırlamanın temel amacı, yapıştırıcı ile temas halindeki yüzeylerin uygun yüzey hazırlama teknikleri kullanılarak uzun ömürlü ve dayanımı yüksek bağlantı elde etmektir.

Yapıştırma yüzeyleri, yapıştırılmadan önce bazı çözücüler kullanılarak basit olarak hazırlanabilir. Çözücülerin yeterli olmadığı durumlarda, ileri yüzey hazırlama yöntemleri olan, mekanik aşındırma, kimyasal temizleme veya asitle dağlama ayrı ayrı veya beraber yapıştırma yüzeylerinin hazırlanmasında uygulanabilir. Yüzey hazırlama işlemlerinin seçiminde, aşağıdaki maddelerin dikkate alınması gerekir:

- Bağlantı için gerekli olan maksimum yapışma dayanımı
- Servis koşulları (sıcaklık, su ile temas, nem vb.)
- Yapıştırılan malzeme yüzeyinin kirlilik derecesi ve çeşidi
- Yapıştırılan malzemenin çeşidi

Çizelge 5.3’de farklı malzemeler için kullanılan yüzey hazırlama yöntemleri verilmiştir. Uygulanan yöntemlerin etkinliği, herhangi bir yüzey işlemi uygulanmamış numuneler temel alınarak belirlenmiştir. Bütün malzeme çeşitlerinde, işlem görmemiş yüzeyler en düşük dayanıma sahiptir. Alüminyum ve paslanmaz çeliklerde en yüksek dayanım, kimyasal yüzey hazırlama yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Soğuk hadde çeliklerinde her iki yöntem ile hazırlanan numuneler arasındaki dayanım farkı ihmal edilebilir seviyededir. Bakır ve titanyum malzemeler için mekanik yüzey hazırlama işlemi belirtilmemiştir.

Çizelge 5.3 Farklı malzemeler için kullanılan yüzey hazırlama yöntemleri [31]

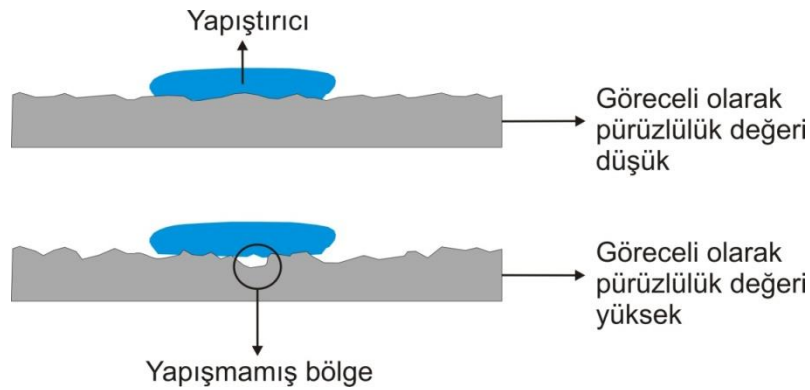
Yapıştırılan malzeme	Uygulanan yöntem	Yapıştırıcı	Kayma dayanımı (MPa)
Alüminyum	İşlem görmemiş	Epoksi	3.06
Alüminyum	Buharla temizleme	Epoksi	5.77
Alüminyum	Kumlama	Epoksi	12.1
Alüminyum	Asitle dağlama	Epoksi	19.0
Alüminyum	İşlem görmemiş	Vinil felonik	16.8
Alüminyum	Temizleme	Vinil felonik	19.9
Alüminyum	Asitle dağlama	Vinil felonik	35.7
Paslanmaz çelik	İşlem görmemiş	Vinil felonik	36
Paslanmaz çelik	Temizleme	Vinil felonik	43.5

Çizelge 5.3 Farklı malzemeler için kullanılan yüzey hazırlama yöntemleri (devamı)

Yapıştırılan malzeme	Uygulanan yöntem	Yapıştırıcı	Kayma dayanımı (MPa)
Paslanmaz çelik	Asitle dağlama	Vinil felonik	49.7
Soğuk hadde çeliği	İşlem görmemiş	Epoksi	20
Soğuk hadde çeliği	Buharla temizleme	Epoksi	19.9
Soğuk hadde çeliği	Kumlama	Epoksi	29.6
Soğuk hadde çeliği	Asitle dağlama	Epoksi	30.8
Bakır	Buharla temizleme	Epoksi	12.3
Bakır	Asitle dağlama	Epoksi	16.1
Titanyum	İşlem görmemiş	Vinil felonik	9.35
Titanyum	Temizleme	Vinil felonik	21.4
Titanyum	Asitle dağlama	Vinil felonik	46.5
Titanyum	Asitle dağlama	Epoksi	21.8
Titanyum	Asitle temizleme	Epoksi	22.9
Titanyum	Asitle temizleme	Epoksi	26.9
Titanyum	Hidrofluosilik asit	Epoksi	27.6

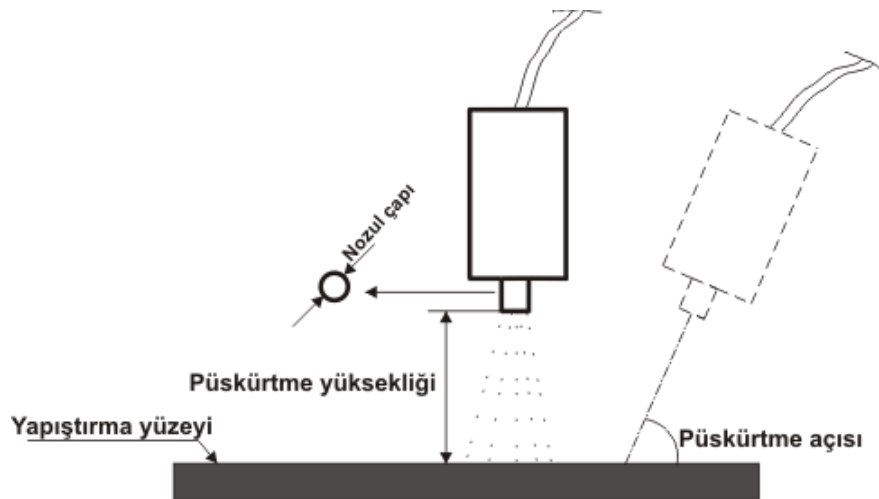
Kullanım alanlarının fazlalığı göz önünde bulundurulduğunda, alüminyum ve çelik malzemelerin yapıştırma öncesi yüzey hazırlama yöntemleri diğer metallere göre önem kazanmaktadır. Bu konu ile ilgili çalışmalarda, alüminyum malzemeler üzerine çok sayıda yayın olmasına karşın [55-59], çeliklerin yüzey işlemleri üzerine yeteri kadar çalışma mevcut değildir. Yüksek sıcaklık değerlerine çıkılan ortamlarda ve rijitliğin önemli olduğu durumlarda genellikle çelik malzemeler kullanılmaktadır. Belirtilen bu durum, çelik malzemelerin yapıştırılmasında, yüzey hazırlama işlemini diğer metallere göre daha kritik hale getirmektedir. Alüminyum ve paslanmaz çelik türlerinde asitle dağlama tercih edilirken, çelik alaşımlarında tercih edilen yüzey hazırlama yöntemi mekanik aşındırma metotlarıdır [31]. Çelikler için kullanılan mekanik aşındırma metotlarından olan kumlama yöntemi, ucuz ve etkili olması sebebiyle, tercih edilmektedir. Çelik alaşımlarında, zayıf sınır tabakası olarak adlandırılan oksit tabakasının diğer metallere oranla daha hızlı oluşması, kumlama sonrası yapıştırma işleminin kısa süre içerisinde yapılmasını zorunlu kılmaktadır.

Yapıştırılan yüzeylerin hazırlanmasında en önemli adım, mekanik kilitlenme teorisine göre, yüzey pürüzlülük değerini aşındırıcılar yardımıyla yükselterek, yapıştırıcının temas yüzeyini arttırmaktır. Ancak, yüzey pürüzlülüğünün belli değerlerin üzerinde arttırılması, yapıştırıcının ıslatma davranışını olumsuz etkiler, boşluk oluşumunu artırır ve yapışmayan bölgelerin oluşmasına neden olur Şekil (5.13). Yapıştırma yüzeyi üzerinde, lokal gerilmelere sebep olan yapışmamış bölgeler, bağlantı dayanımını düşürücü yönde etki yapar [58].



Şekil 5.13 Yapıştırılan malzemenin yüzey pürüzlülüğünün yapıştırıcının yüzeyi ıslatma davranışına etkisi [19]

Mekanik temizleme ve pürüzlendirme yöntemlerinden olan kuşlama işlemi için kuşlama basıncı, kullanılan kumun çeşidi ve ölçüsü, nozul çapı, nozulun yüzeye olan mesafesi ve açısı ve çalışma süresi, belirlenmesi gereken ve yapıştırma yüzeyinin yapısını etkileyen önemli parametrelerdir (Şekil 5.14).



Şekil 5.14 Kuşlama parametreleri

Kumlama parametrelerinin yapıştırma yüzeylerine etkisini inceleyen çalışmalar literatürde mevcuttur. Yapılan çalışmalarda genel olarak, püskürtme yüksekliği ve kum partikül boyutlarının etkisinin belirlenmesi önem kazanmaktadır.

Avcu v.d [60], özel olarak tasarladıkları kumlama cihazı ile kompozit malzemelerin aşınma davranışına, kumlama parametrelerinin etkisini belirlemişlerdir. Çalışmalarında, aşındırıcı kum olarak 150-212 μm partikül boyutlarına sahip alüminyum oksit kullanmışlardır. Kumlama parametreleri sırasıyla, partikül hızı ($55\text{-}80\text{-}95\text{ ms}^{-1}$), uygulama süresi (2-4-6-8-10 sn) ve partikül çarpma açısı (30-45-60-75-90) şeklindedir. Malzemedeki maksimum aşınma $30\text{-}45^\circ$ partikül açısında gerçekleşmiştir. Uygulama süresi ve partikül hızının artırılması da aşınma miktarını arttırmıştır.

Teng v.d [61], kumlama işleminin, çelik malzeme yapışma dayanımına etkisini incelemişlerdir. Kumlama işlemi için 0.125, 0.25 ve 0.5 mm partikül ölçülerine sahip üç farklı alüminyum oksit kum kullanmışlardır. Üç farklı ölçüde partikül kullanılarak mekanik olarak pürüzlendirilen yüzeylerin, pürüzlülük değerleri açısından karşılaştırıldığında, yakın değerlere sahip olduklarını belirtmişlerdir. Bununla birlikte, 0.125 mm ölçüye sahip partiküller kullanılarak daha pürüzlü yüzey elde etmişlerdir. Uygun yapıştırıcı ile beraber, uygun kumlama işleminin yapıştırıcı hasarını engelleyebileceğini belirtmişlerdir.

Bresson v.d [58], partikül boyutları ve nozul mesafesinin alüminyum 7075 malzemenin yüzey pürüzlülüğüne olan etkisini incelemişlerdir. Aşındırıcı olarak, F80 (150-212 μm) ve F60 (150-212 μm) partikül ölçülerine sahip alüminyum oksit kum kullanmışlardır. Nozul yüksekliğini sırasıyla, 10 cm ve 35 cm olarak seçmişlerdir. Partikül boyutları ve nozul yüksekliğinin etkisini belirlemek amacıyla, kumlanan yüzeyler üzerinde, aritmetik ortalama pürüzlülük değerlerini ölçmüşlerdir. Kullanılan nozul yüksekliklerinin, ortalama pürüzlülük değerleri arasında önemli bir farklılığa neden olmadığını, ancak 35 cm nozul yüksekliği kullanılması durumunda, daha geniş alanın pürüzlendirildiğini belirtmişlerdir.

Arenas v.d [62], epoksi matrise sahip karbon fiber kompozit ile 6061 serisi alüminyum alaşım malzeme kullanılarak oluşturulan basit bindirmeli bağlantı yapışma dayanımına, kumlama ve zımparalama yüzey hazırlama işlemlerinin etkisini araştırmışlardır.

Kumlama malzemesi olarak 120 µm partikül ölçüsünde yapay korundum kullanmışlardır. Kumlama işlemi, malzeme ve nozul arasında 10 cm mesafe olacak şekilde yapılmıştır. Alüminyum alaşım malzeme yüzeylerinin, kumlama yöntemiyle hazırlanması durumunda, bağlantı, maksimum kayma ve çekme dayanımına ulaşmıştır. Karbon fiber kompozit malzeme için zımparalama yönteminin, kumlama işlemine göre daha uygun olduğunu belirtmişlerdir.

Yapılan çalışmalar incelendiğinde, yapıştırma yüzeylerinin kumlanmasında, püskürtme yüksekliği ve partikül boyutlarının temel değişken olmasına rağmen, değişken sayısının bunlarla sınırlı olmadığı görülmektedir. Yapılan kumlama işleminin başarılı olabilmesi yukarıda belirtilen değişkenlere bağlı olduğu kadar, uygulamayı yapan kişinin konu ile ilgili tecrübeye sahip olmasını gerektirmektedir.

5.3.3 Yapıştırıcının Kürleşmesi

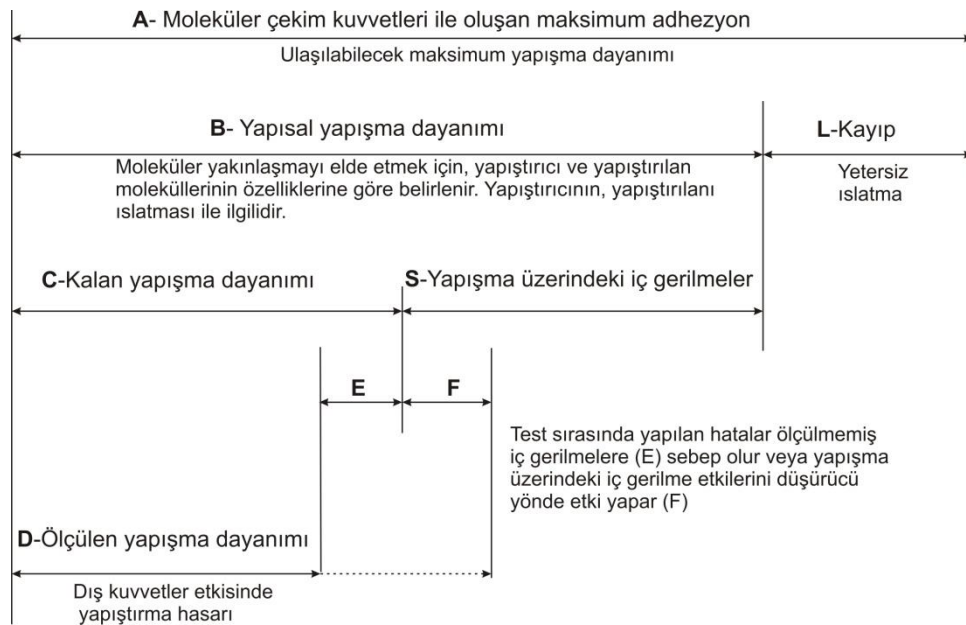
Yapıştırılmalı bağlantılar, oda sıcaklığında veya yüksek sıcaklık altında kürleştirilir. Yüksek sıcaklıklarda kürleşme işlemi için, yapıştırılmalı bağlantılar fırın veya otoklav içerisinde belirlenen süre boyunca bekletilir. Yapıştırıcının kürleşmesi esnasında, sırasıyla kürleşme sıcaklığının, zamanının ve basıncın kontrol edilmesi gerekir. Yapıştırıcının özellik ve dayanımını belirleyen en önemli parametrelerden biri kürleşme sıcaklığıdır. Yapıştırıcı, akmanın başladığı sıcaklığa ulaşamazsa, yapıştırma yüzeyi üzerinde ıslatma beklendiği şekilde gerçekleşmez ve bu durumda, yapıştırıcı ve yapıştırılan arasında adhezyon önemli ölçüde azalarak, bağlantı dayanımı düşer. Gerekli kürleşme sıcaklığına ulaşıldığı durumda, hem yapıştırıcının ıslatma özelliği artar, hem de yapıştırıcı ve yapışma yüzeyleri arasında adhezyon kuvvetlerini meydana getiren kimyasal reaksiyonlar başlar [63].

Kürleşmenin etkin bir şekilde gerçekleşmesini etkileyen diğer önemli parametre kürleşme süresidir. Kürleşme sıcaklığı ile başlayan kimyasal reaksiyonların tamamlanması zamana bağlıdır. Kürleşme için yeterli zamanın verilmesi ile yapıştırıcının uygun dayanım değerlerine ulaşmasına imkân sağlanır. Kürleşme süresi, sıcaklığın arttırılması ile kısaltılabilir, ancak farklı termal genleşme katsayılarına sahip malzemelerin yapıştırılması durumunda, minimum kürleşme sıcaklığının kullanılması daha uygun olur [63]. Kürleşme süresi, yapıştırıcı kürleşme sıcaklığına ulaştığı anda

başlar ve kürleşme süresi sonunda yapıştırıcının soğuması, oda sıcaklığına düşünceye kadar devam eder [64].

Kürleşmeyi etkileyen son parametre sıcaklık artış oranıdır. Yapıştırıcının hızlı bir şekilde ısıtılması, yapı içerisindeki mevcut katkıların uzaklaşmasını engelleyerek mikro boşlukların oluşmasına neden olabilir. Yapıştırıcının kürleşme sıcaklığına çok yavaş çıkarılması durumunda, akma, dolayısıyla ıslatma gerçekleşmeden, çapraz bağ oluşumu başlayarak jelleşme durumuna geçen yapıştırıcı dayanımı olumsuz yönde etkiler. Benzer durum raf ömrünü tamamlamış yapıştırıcılar içinde geçerlidir [63].

Şekil 5.15’de, bağlantı dayanımını etkileyen faktörler, özet şeklinde, şematik olarak sunulmuştur. Şekil 5.15 incelendiğinde, bağlantı dayanımında kesin düşüşe sebep olan etkenlerin, yetersiz ıslatma ve iç gerilmeler olduğu görülmektedir. Yetersiz ıslatmaya sebep olarak, yapıştırmalı bağlantının hazırlanmasında en önemli adımlardan olan, yüzey hazırlama işlemlerinin uygun olmaması ve/veya yapıştırıcının kürleşme parametrelerinin doğru seçilmemesi gösterilebilir. Yapıştırıcıda oluşan iç gerilmeler, farklı termal genleşme katsayılarına sahip malzemelerin yapıştırılmasında, kürleşme sıcaklığının minimum kürleşme sıcaklığından oldukça yüksek olması ile açıklanabilir. Bağlantı test amaçlı hazırlanmış ise, test esnasında yapılan hatalar, dayanımı azaltan veya arttıran, iki farklı etkiye sebep olabilir.



Şekil 5.15 Bağlantı dayanımını etkileyen faktörler [24]

MONO ve HİBRİT YAPIŞTIRMALI BAĞLANTI MEKANİK DAVRANIŞLARI ve ANALİTİK ÇÖZÜMLERİ

Yapıştırımlı bağlantılarda, dayanımın tahmin edilebilmesi için, uygun hasar kriteri ile beraber, bağlantıda yük altında meydana gelen gerilme dağılımlarının bilinmesi gerekir. Basit bindirmeli bağlantılar için, literatürde, analitik model kullanılarak, gerilme bileşenlerinin dağılımının belirlenmesi üzerine yapılan çalışma sayısı oldukça fazladır [49], [65-73]. Yapılan çalışmaların büyük kısmında, basit bindirmeli bağlantı analitik modelleri iki boyutludur. Bağlantı genişliği boyunca gerilme değerlerindeki değişimlerin oldukça düşük olduğu basit bindirmeli bağlantılar için, iki boyutlu analitik model, gerilme dağılımlarının belirlenmesinde yeterli olmaktadır. Bununla birlikte, 2-B analitik modele bağlı çözümlerde, yapıştırılan ve yapıştırıcıların lineer elastik davranış gösterdiği kabulü yapılmaktadır. Lineer elastik davranış kabulü ile malzemenin lineer olmayan özellikleri ihmal edilerek, analitik model çözümleri basitleştirilmektedir. Lineer olmayan malzeme özelliklerinin analitik modele dahil edilmesi durumunda, nümerik yöntemler kullanılarak çözümün bulunması zorunlu hale gelmektedir [74].

Yapılan tez çalışmasının bu aşamasında, literatürde yapılan birçok çalışma için referans olarak kabul edilen analitik modeller detaylı olarak açıklanarak, eksik yönleri belirtilmiştir. Son olarak, hibrit yapıştırımlı bağlantı analitik modeli oluşturulmuş ve 2-B ve 3-B lineer SEA sonuçları ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır.

6.1 Mono Yapıştırırmalı Bağlantı Analitik Çözümleri

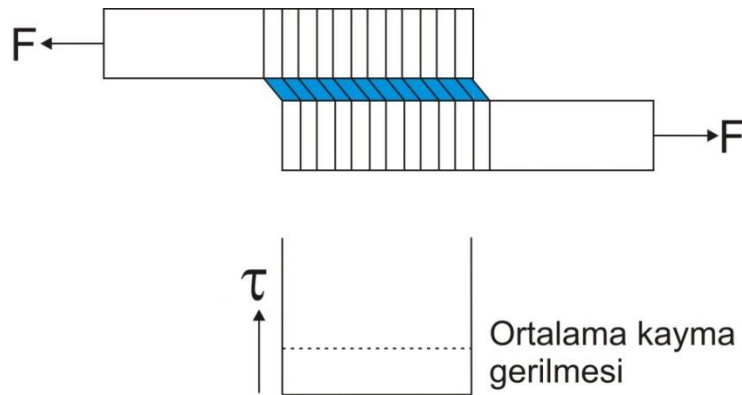
Yapıştırırmalı bağlantılar içerisinde, sahip olduğu geometri göz önüne alındığında en kolay birleştirme yöntemi basit bindirmeli bağlantılardır. Basit bindirmeli bağlantılar, yapıştırıcı özelliklerinin test edilmesi amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır [64]. Ayrıca, yapıştırırmalı bağlantıların temel karakteristikleri ile dayanıma etki eden parametrelerin anlaşılması açısından önemli bir bağlantı şeklidir. Bindirmeli bağlantılarda meydana gelen gerilme değişimlerinin belirlenmesinde klasik olarak adlandırılan birden fazla temel özellikte teori vardır. Tasarım ve karşılaştırma amaçlı kullanılan temel teoriler bindirme uzunluğu boyunca gerilme dağılımlarının belirlenmesinde sıkça kullanılan basit ve etkili analitik çözümleri içermektedir.

6.1.1 Ortalama Kayma Gerilmesi Teorisi

Ortalama kayma gerilmesi teorisinde, yapıştırılan malzeme yük altında şekil değiştirmeyen rijit çubuk olarak kabul edilir. Bağlantıda, şekil değişimi, yapıştırıcıda meydana gelir ve yapıştırıcıda oluşan kayma gerilmesi değeri bindirme uzunluğu, bindirme genişliği ve yapıştırıcı kalınlığı boyunca sabittir [54] (Şekil 6.1). Yapıştırıcıda meydana gelen kayma gerilmesi değeri aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanır:

$$\tau = \frac{\bar{F}}{2l} \quad (6.1)$$

Burada $\bar{F}$, birim genişliğe uygulanan çekme yükünü, $2l$, bindirme uzunluğunu belirtmektedir.



Şekil 6.1 Ortalama kayma gerilmesi teorisi: Bindirme uzunluğu boyunca kayma gerilmesi dağılımı

6.1.2 Volkersen Teorisi

Volkersen teorisine [75] bağılı kapalı çözüm, bindirmeli bağlantılarda meydana gelen gerilme dağılımının anlaşılması açısından yaygın olarak kullanılmaktadır [76], [77]. Volkersen teorisine göre, yapıştırıcı sadece kayma etkisi altında şekil değiştirir. Bindirmeli bağlantılarda meydana gelen eğilme momenti ihmal edildiğinden dolayı, yapıştırılan malzemede oluşan şekil değişimi tamamen çekme etkisine bağlı olarak meydana gelir. Şekil 6.2’de, Volkersen teorisine göre, bindirme uzunluğu boyunca kayma gerilmesi dağılımı görülmektedir. Volkersen teorisine göre kayma gerilmesi dağılımı,

$$\tau = \frac{F\Psi \cosh(\Psi x)}{2b \sinh(\Psi 2l / 2)} + \left(\frac{\delta_1 - \delta_2}{\delta_1 + \delta_2} \right) \left(\frac{\Psi 2l}{2} \right) \frac{\sinh(\Psi x)}{\cosh\left(\frac{\Psi 2l}{2}\right)} \quad (6.2)$$

şeklinde tanımlıdır.

Burada,

$$\Psi = \sqrt{\frac{G_a}{E\delta_1\delta_2} \left[1 + \frac{\delta_1}{\delta_2} \right]} \quad (6.3)$$

şeklinde ifade edilir. Denklem (6.2) ve (6.3)’de;

F : Bağlantıya uygulanan çekme yükünü

b : Bindirme genişliğini

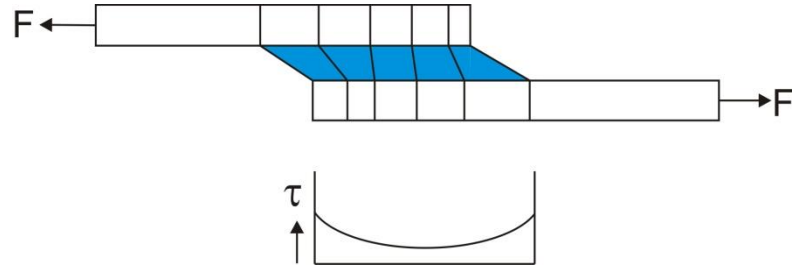
l : Bindirme yarı uzunluğunu

G_a : Yapıştırıcı kayma modülünü

δ_a : Yapıştırıcı kalınlığını

E : Yapıştırılan malzemelerin elastisite modülünü

δ_1, δ_2 : Yapıştırılan malzeme kalınlıklarını göstermektedir.



Şekil 6.2 Volkersen teorisi: Bindirme uzunluğu boyunca kayma gerilmesi dağılımı [74]

Volkersen teorisinde, dış merkezli yükleme durumunda bağlantıda meydana gelen eğilme momenti etkisi ihmal edilmiştir. Bağlantıda meydana gelen eğilme momentinin ihmal edilmesinin sonucu olarak, bindirme uzunluğu kenarlarında, kayma gerilmeleri ile beraber hasar şekli ve yükü üzerinde önemli etkiye sahip olan soyulma gerilmelerinin bindirme uzunluğu boyunca dağılımı, Volkersen teorisi kullanılarak belirlenememektedir.

6.1.3 Goland ve Reissner Teorisi

Goland ve Reissner (G-R) [78], Volkersen tarafından ihmal edilen, dış merkezli yüklemeyle ilgili olarak meydana gelen eğilme etkisini çözümlerine dahil etmişlerdir [76], [77]. Eğilme etkisinin çözüme dahil edilmesi, yapıştırıcının modellenmesi ve hasar tahmini açısından önemli bir adımdır. Bununla birlikte, bu modelde bazı sınırlamalar içermektedir. Birinci olarak, yapıştırıcı kalınlığı boyunca gerilme dağılımı göz önüne alınmamıştır. İkinci olarak, bindirme uzunluğu kenarlarında, serbest yüzeylerde, kayma gerilmesinin sıfıra eşit olma şartı sağlanmamaktadır. Goland ve Reissner, düzlem içi yüklemeyle ilgili eğilme etkisini çözüme dahil etmek amacıyla, eğilme moment faktörünü (k) kullanmışlardır:

$$M_0 = kF \frac{\delta_o}{2} \quad (6.4)$$

Burada, yapıştırılan malzeme kalınlıkları birbirine eşit ($\delta_o = \delta_1 = \delta_2$) ve yapıştırıcı kalınlığı ihmal edilmiştir. Eğilme moment faktörü, küçük yükler ve sonsuz rijitlikte yapıştırılan malzemeler için 1 kabul edilir, ancak, yük artışı ile beraber k değeri 1'den küçük değerler alır ve yapıştırılan malzemelerde eğilme etkisi meydana gelir [74].

G-R teorisine göre kayma gerilmesi dağılımı aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\tau = -\frac{1}{8} \frac{\bar{F}}{l} \left[\frac{\kappa l}{\delta_o} (1+3k) \frac{\cosh((\kappa l / \delta_o)(x/l))}{\sinh(\kappa l / \delta_o)} + 3(1-k) \right] \quad (6.5)$$

Burada;

$\bar{F}$: Birim genişliğe uygulanan çekme yükünü göstermektedir.

Denklem (6.5)'de eğilme moment faktörü (k),

$$k = k_{G-R} = \frac{\cosh(\Phi l)}{\cosh(\Phi l) + 2\sqrt{2} \sinh(\Phi l)} = \frac{1}{1 + 2\sqrt{2} \tanh(\Phi l)} \quad (6.6)$$

olarak tanımlıdır. Denklem (6.5) ve (6.6) içerisindeki değişkenler aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$\kappa^2 = 8 \frac{G_a}{E} \frac{\delta_o}{\delta_a} \quad (6.7)$$

$$\Phi = \sqrt{\frac{3(1-\nu^2)}{2}} \frac{1}{\delta_o} \sqrt{\frac{\bar{F}}{\delta_o E}} \quad (6.8)$$

Burada kullanılan, l , G_a , δ_a , E değişkenleri Volkersen teorisinde kullanılan değişkenler ile aynıdır ve ν değişkeni yapıştırılan malzemenin poisson oranını ifade etmektedir.

G-R teorisine göre soyulma gerilmesi dağılımı aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\sigma = \frac{1}{\Delta} \frac{\bar{F} \delta_o}{l^2} (K_1 + K_2) \quad (6.9)$$

Denklem (6.9) içerisindeki K_1 ve K_2 değişkenleri,

$$K_1 = \left(R_2 \mu^2 \frac{k}{2} - \mu k' \cos \mu \cosh \mu \right) \cosh \frac{\mu x}{l} \cos \frac{\mu x}{l} \quad (6.10)$$

$$K_2 = \left(R_1 \mu^2 \frac{k}{2} - \mu k' \sin \mu \sinh \mu \right) \sinh \frac{\mu x}{l} \sin \frac{\mu x}{l} \quad (6.11)$$

ile ifade edilir. Burada,

$$R_1 = \cosh(\mu) \sin(\mu) + \sinh(\mu) \cos(\mu) \quad (6.12)$$

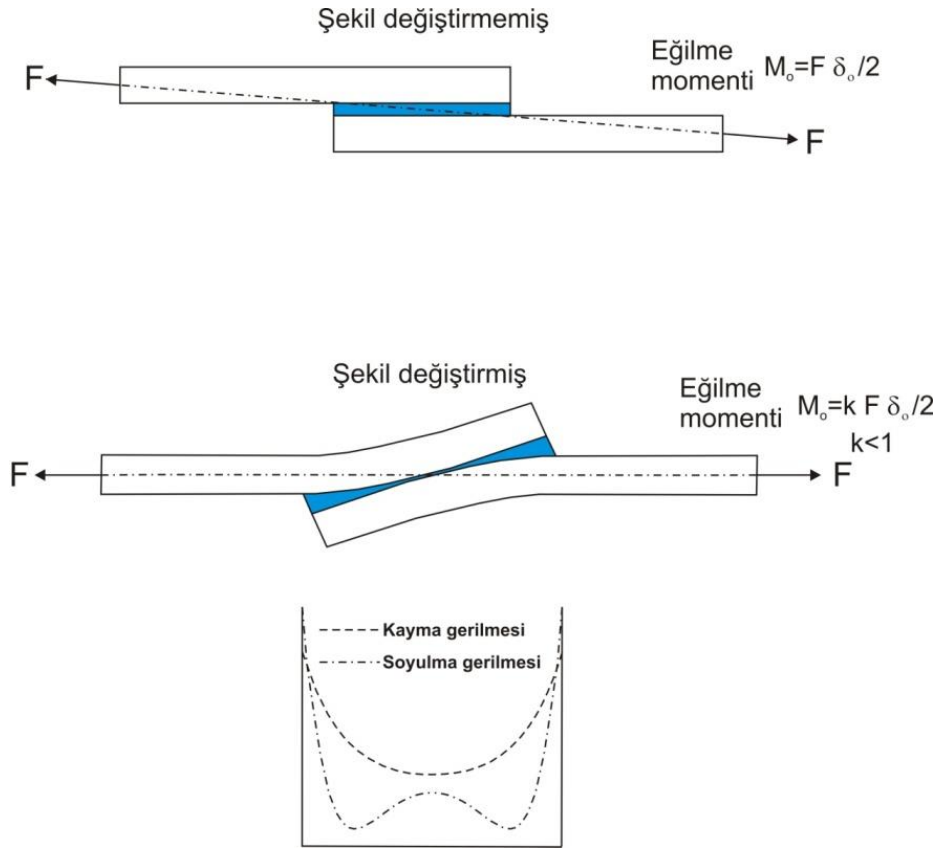
$$R_2 = \sinh(\mu)\cos(\mu) - \cosh(\mu)\sin(\mu) \quad (6.13)$$

şeklindedir. Denklem (6.9), (6.10), (6.11), (6.12) ve (6.13) içerisindeki değişkenler aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanabilir:

$$\mu = \gamma \frac{l}{\delta_o}, \quad \gamma^4 = 6 \frac{E_a}{E} \frac{\delta_o}{\delta_a} \quad (6.14)$$

$$\Delta = \frac{1}{2}(\sin(2\mu) + \sinh(2\mu)) \quad (6.15)$$

Şekil 6.3’de eğilme etkisinin çözüme dahil edildiği G-R çözümü için, bindirme uzunluğu boyunca kayma ve soyulma gerilmesi dağılımı gösterilmektedir.

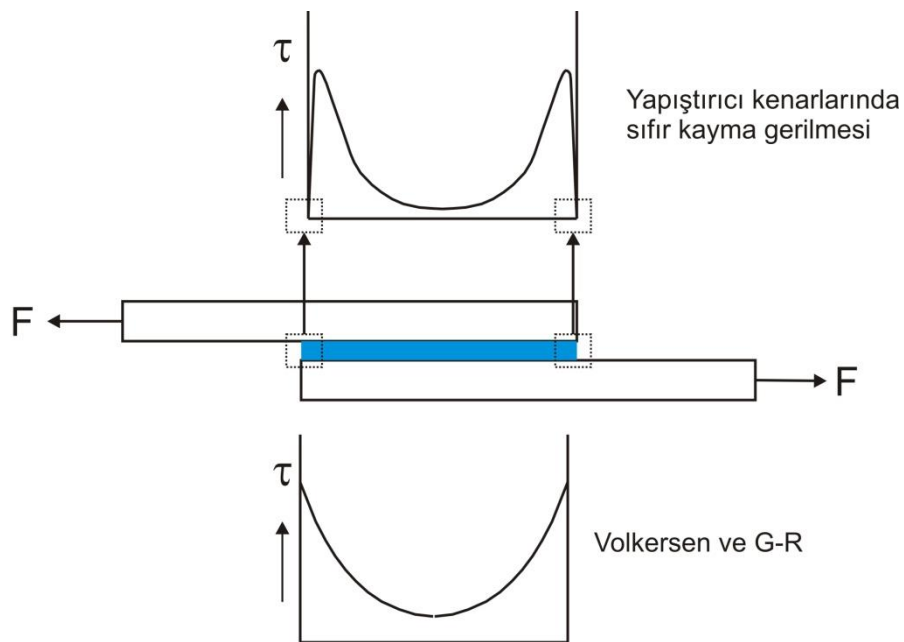


Şekil 6.3 Goland ve Reissner teorisi: Bindirme uzunluğu boyunca kayma ve soyulma gerilmesi dağılımı [51]

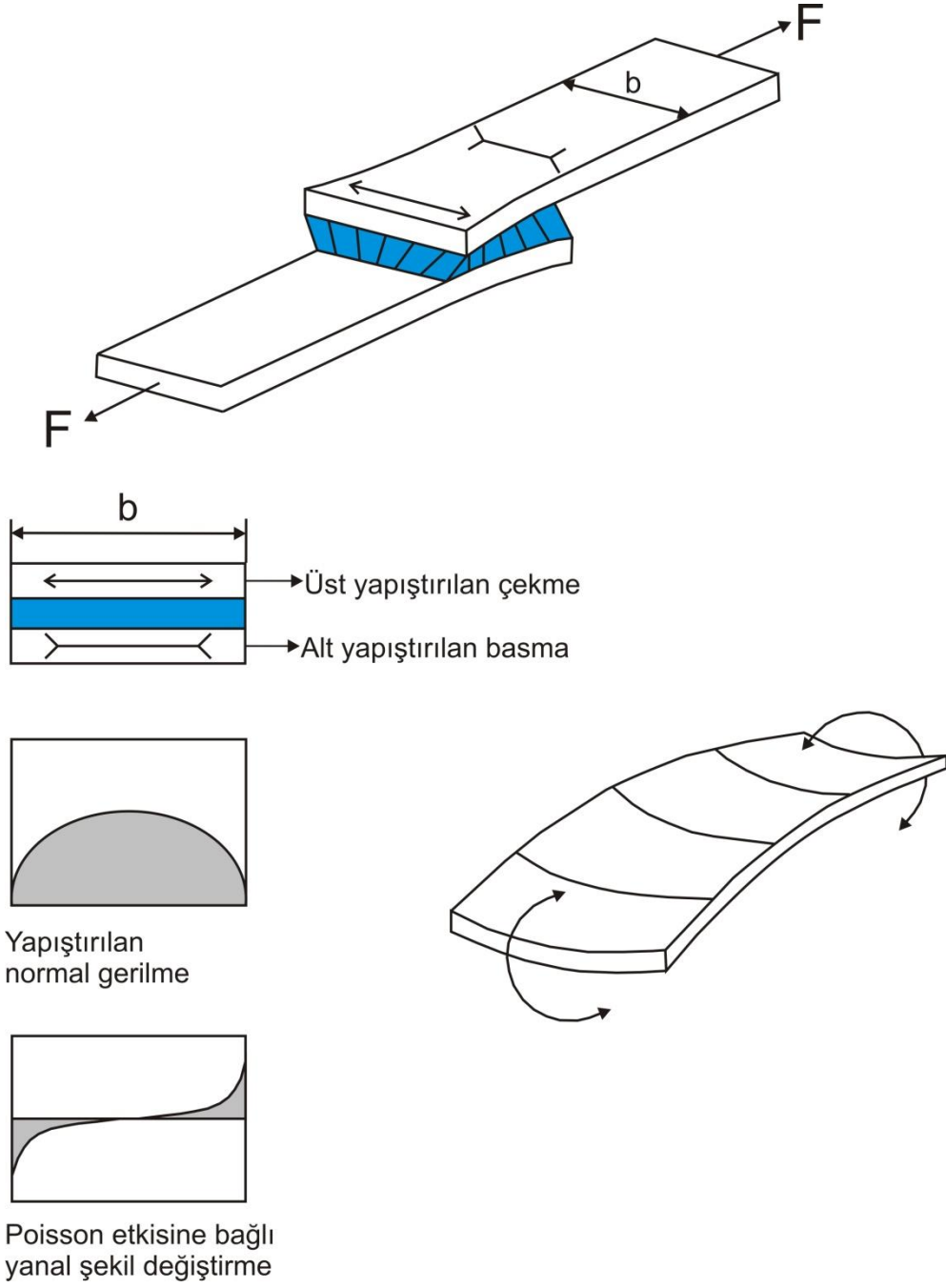
Volkersen ve G-R teorileri bindirmeli bağlantılarda gerilme davranışını tanımlayan temel çalışmalardır. Ancak, yapılan kabuller ve sınırlamalar nedeni ile bindirmeli bağlantıların davranışı tam olarak tanımlanamamaktadır. Volkersen ve G-R teorileri

kullanılarak tespit edilemeyen bağlantı davranışları aşağıda belirtildiği şekilde özetlenebilir [74]:

- Serbest yüzeylerde sıfır kayma gerilmesi değeri (her iki teoride de maksimum kayma gerilmesi değeri serbest yüzeylerde meydana gelmektedir) (Şekil 6.4)
- Yanal daralmalara bağlı oluşan antiklastik şekil değişimleri (Şekil 6.5)
- Yapıştırılan malzemelerin ince kiriş olarak kabul edilmesine bağlı olarak, yapıştırılan kalınlığı boyunca normal ve kayma şekil değişimleri
- Bindirme genişliği boyunca meydana gelen gerilme değişimi



Şekil 6.4 Serbest yüzey kayma gerilmesi [74]



Şekil 6.5 Antiklastik şekil değişimi [79]

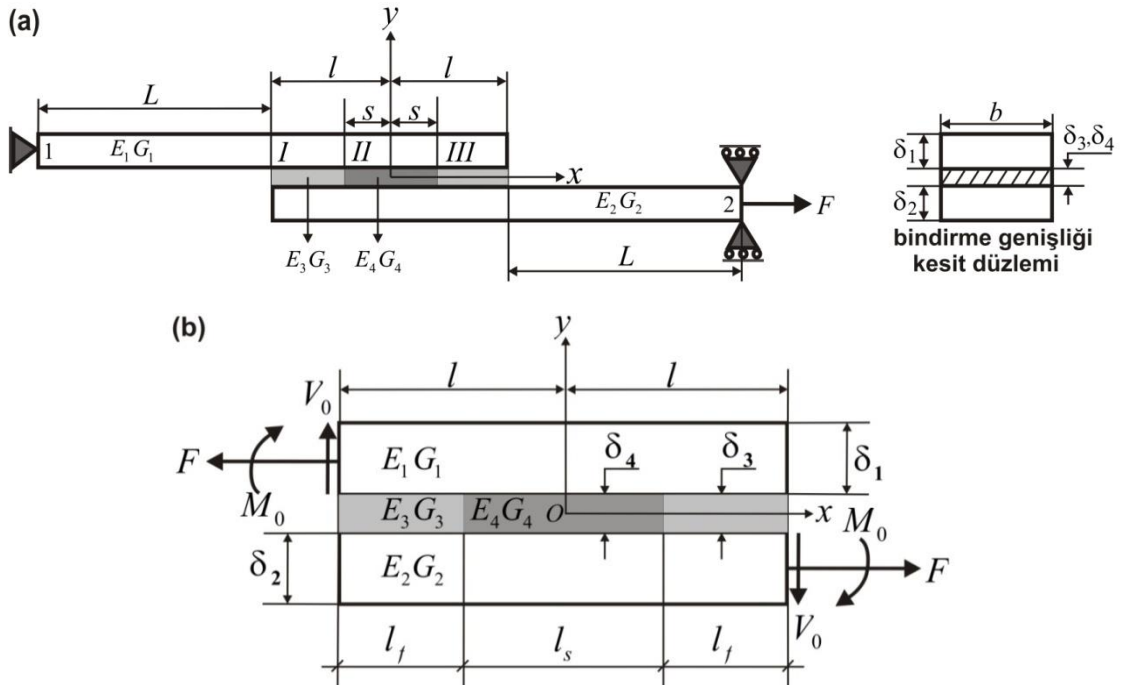
6.2 Hibrit Yapıştırırmalı Bağlantı Analitik Modeli

Hibrit yapıştırırmalı bağlantı analitik modelin oluşturulmasında, konu ile ilgili çalışmalar incelenmiş ve gerilme bileşenlerini veren bazı ifadelerin çıkarılmasında, Zhao'nun [80] hibrit yapıştırırmalı bağlantı analitik model çözüm adımları takip edilmiştir.

Hibrit yapıştırma çizgisi, kayma modülü bileşenlerine göre üç farklı bölgeye ayrılarak modellenmiştir (Şekil 6.6). Bindirme uzunluğunun orta kısmına gevrek yapıştırıcı,

bindirme uzunluğu kenarlarına sünek yapıştırıcı yerleştirilmiştir. Yapıştırılan malzemelerin kalınlıkları sırasıyla, δ_1 ve δ_2 olarak belirtilmiştir. Yapıştırıcı kalınlığı δ_3 ile belirtilmiş ve kullanılan yapıştırıcıların kalınlıkları bindirme uzunluğu boyunca eşit olduğundan, δ_4 yapıştırıcı kalınlığı, δ_3 yapıştırıcı kalınlığına eşit alınmıştır.

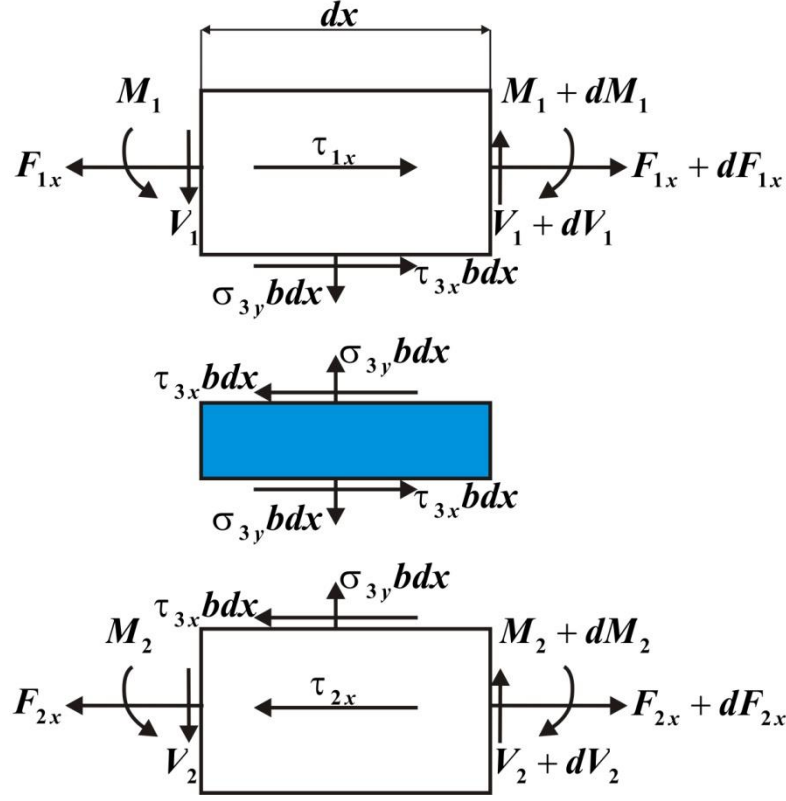
Bindirme uzunluğunun sol ve sağ kenarlarında bulunan I ve III nolu bölgeler de sünek yapıştırıcı kullanılmıştır. Bindirme uzunluğunun ortasında, II nolu bölgede, gevrek yapıştırıcı kullanılmıştır. Yapıştırılan malzemelerin uç kısımları basit mesnetlidir. Eksenel F yükü, alttaki yapıştırılan malzemenin sağ ucuna uygulanmıştır. (Şekil 6.6'da x-ekseninin yapıştırıcı kalınlığının orta düzleminde geçtiği görülmektedir.)



Şekil 6.6 Çekme yükü altında hibrit yapıştırmalı bağlantı: (a) geometri, (b) kuvvet eşitliği serbest cisim diyagramı

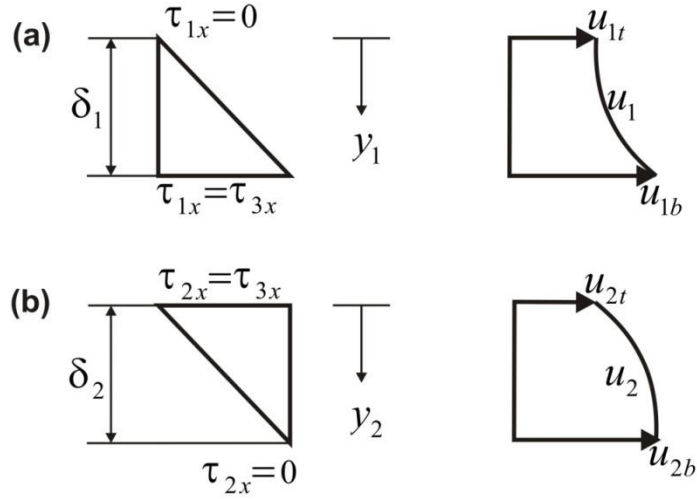
Şekil 6.6'da, l_f ve l_s sırasıyla sünek ve gevrek yapıştırıcı uzunluklarını göstermektedir. Üst ve alt yapıştırılan malzemeler sırasıyla, 1 ve 2 alt indisleri ile belirtilmiştir. Şekilde, Sünek ve gevrek yapıştırıcılar sırasıyla, 3 ve 4 alt indisleri ile tanımlıdır. E_i ve G_i ($i=1,2,3,4$) bağlantıyı oluşturan yapıştırılan ve yapıştırıcıların elastisite ve kayma modüllerini belirtmektedir. Bağlantıda toplam bindirme uzunluğu, $2l$ 'dir. Bağlantı genişliği x-y düzlemine dik şekildedir ve " b " değişkeni ile ifade edilmiştir. Üst ve alt

yapıştırılan malzemelerin uç noktasına etki eden kayma kuvveti ve eğilme momentleri sırasıyla, V_0 ve M_0 ile ifade edilmektedir (Şekil 6.6). Şekil 6.7’de hibrit yapıştırma bağlantısının bindirme bölgesinden çıkartılan diferansiyel bölge " dx " ile gösterilmektedir.



Şekil 6.7 Kuvvet eşitliği serbest cisim diyagramı

Şekilde 6.7’de, yapıştırıcıların üst ve alt ara yüzeylerinde meydana gelen soyulma gerilmeleri, σ_{3y} ile belirtilmektedir. Ayrıca, F_{ix} , V_i ve M_i ($i=1,2$) sırasıyla, üst ve alt yapıştırılan malzemelere etkiyen çekme ve kayma kuvvetleri ile eğilme momentleridir. Şekil 6.8’de, 1 ve 2 nolu yapıştırılan malzemelerdeki boyuna kayma gerilmelerinin dağılımı ve yer değiştirmeler gösterilmektedir. Yapıştırılan malzemelerin kalınlığı boyunca lineer kayma gerilmesi ve şekil değişimi kabulü yapılmıştır. İki farklı lokal koordinat sistemi (y_1 ve y_2) kullanılmıştır. Lokal koordinat sistemlerinin başlangıç noktaları üst ve alt yapıştırılan malzemelerin üst yüzeyleridir. Serbest yüzey gerilme şartları göz önünde bulundurulmuştur.



Şekil 6.8 Yapıştırılan malzeme kalınlığı boyunca kayma gerilmesi ve yer değiştirme dağılımı: (a) üst yapıştırılan, (b) alt yapıştırılan

Hibrit bağlantı ifadelerinin elde edilmesinde öncelikli olarak, Şekil 6.7’de gösterilen sünek yapıştırıcı katmanının serbest cisim diyagramı kullanılmıştır. Serbest cisim diyagramına göre denge denklemlerinin diferansiyel eşitlikleri,

$$\frac{dF_{1x}}{dx} + \tau_{3x}b = 0 \quad , \quad \frac{dF_{2x}}{dx} - \tau_{3x}b = 0 \quad (6.16)$$

$$\frac{dV_1}{dx} - \sigma_{3y}b = 0 \quad , \quad \frac{dV_2}{dx} + \sigma_{3y}b = 0 \quad (6.17)$$

$$\frac{dM_1}{dx} - V_1 - \tau_{3x}b \frac{\delta_1}{2} = 0 \quad , \quad \frac{dM_2}{dx} - V_2 - \tau_{3x}b \frac{\delta_2}{2} = 0 \quad (6.18)$$

şeklinde elde edilir.

Yapılan temel kabullere göre (Şekil 6.8), aşağıdaki gerilme-şekil değiştirme bağıntıları yazılabilir:

$$\sigma_{1x} = E_1 \epsilon_{1x} = E_1 \frac{du_1}{dx} \quad , \quad \sigma_{2x} = E_2 \epsilon_{2x} = E_2 \frac{du_2}{dx} \quad , \quad \sigma_{3y} = E_3 \epsilon_{3y} \quad (6.19)$$

$$\gamma_{1x} = \frac{\tau_{1x}}{G_1} \quad , \quad \gamma_{2x} = \frac{\tau_{2x}}{G_2} \quad , \quad \gamma_{3x} = \frac{\tau_{3x}}{G_3} \quad (6.20)$$

Şekil 6.7’de x yönündeki kuvvetlerin eşitliğinden,

$$F = F_{1x} + F_{2x} \quad (6.21)$$

yazılabilir.

Yapıştırılan malzemelerin kalınlığı boyunca gerilme dağılımının lineer olarak değiştiği belirtilmiştir (Şekil 6.8). Lineer değişime göre, üst ve alt yapıştırılan malzemelere etki eden kayma gerilmeleri,

$$\tau_{1x} = \tau_{3x} \frac{y_1}{\delta_1}, \quad 0 \leq y_1 \leq \delta_1 \quad (6.22)$$

$$\tau_{2x} = \tau_{3x} \left(1 - \frac{y_2}{\delta_2} \right), \quad 0 \leq y_2 \leq \delta_2 \quad (6.23)$$

şeklinde tanımlanabilir.

Burada, y_1 ve y_2 , üst ve alt yapıştırılan malzemelerin üst yüzeyinden itibaren tanımlıdır. Denklem (6.22) ve (6.23), denklem (6.20)'de yerine yazıldığında, yapıştırılan malzemelerin kayma şekil değişimleri,

$$\gamma_{1x} = \frac{\tau_{3x}}{\delta_1} \frac{y_1}{G_1}, \quad \gamma_{2x} = \frac{\tau_{3x}}{G_1} \left(1 - \frac{y_2}{\delta_2} \right) \quad (6.24)$$

ile ifade edilebilir.

1 ve 2 nolu yapıştırılan malzemelerde boyuna kuvvetler altında yer değiştirme,

$$u_1^T(x, y_1) = u_{1t}^T + \int_0^{y_1} \gamma_{1x} dy_1 = u_{1t}^T + \frac{\tau_{3x} y_1^2}{2G_1 \delta_1} \quad (6.25)$$

$$u_2^T(x, y_2) = u_{2t}^T + \int_0^{y_2} \gamma_{2x} dy_2 = u_{2t}^T + \frac{\tau_{3x}}{G_2} \left(y_2 - \frac{y_2^2}{2\delta_2} \right) \quad (6.26)$$

denklemleri ile ifade edilir.

Denklem (6.25) ve (6.26)'da, $1t$ ve $2t$ alt indisleri sırasıyla, 1 ve 2 nolu yapıştırılan malzemelerin üst yüzeylerini ifade etmektedir. Üst indis T , boyuna kuvvetin etkisini belirtmek ve moment etkisinden ayırmak amacıyla kullanılmıştır. Moment etkisi, formülasyonun ileri adımlarında belirtilmiştir. Örnek olarak, denklem (6.25) kullanılarak 1 nolu yapıştırılan malzeme ve yapıştırıcı ara yüzeyindeki yer değiştirme ifadesi,

$$u_{1b}^T = u_1^T (y_1 = \delta_1) = u_{1t}^T + \frac{\tau_{3x}\delta_1}{2G_1} \quad (6.27)$$

şeklinde yazılabilir.

Burada, alt indis $1b$, 1 nolu yapıştırılan malzemenin üst yüzeyini belirtmektedir. Denklem (6.27) kullanılarak, denklem (6.25) tekrar düzenlenirse,

$$u_1^T (x, y_1) = u_{1b}^T - \frac{\tau_{3x}\delta_1}{2G_1} + \frac{\tau_{3x}y_1^2}{2G_1\delta_1} \quad (6.28)$$

şeklinde elde edilir.

Denklem (6.25) ve (6.26) kullanılarak boyuna kuvvet bileşenleri tekrar yazılırsa,

$$F_{1x} = \int_0^{\delta_1} \sigma_{1x}^T (y_1) b dy_1 = E_1 \int_0^{\delta_1} \frac{du_1^T}{dx} (y_1) b dy_1 = E_1 b \delta_1 \left[\frac{du_{1b}^T}{dx} - \frac{\delta_1}{3G_1} \frac{d\tau_{3x}}{dx} \right] \quad (6.29)$$

$$F_{2x} = \int_0^{\delta_2} \sigma_{2x}^T (y_2) b dy_2 = E_2 \int_0^{\delta_2} \frac{du_2^T}{dx} (y_2) b dy_2 = E_2 b \delta_2 \left[\frac{du_{2t}^T}{dx} + \frac{\delta_2}{3G_2} \frac{d\tau_{3x}}{dx} \right] \quad (6.30)$$

elde edilir.

Şekil 6.8 göz önüne alındığında, sünek yapıştırıcı kayma şekil değişimi,

$$\gamma_{3x} = \frac{u_{2t} - u_{1b}}{\delta_3} \quad (6.31)$$

şeklinde yazılabilir.

Denklem (6.31), denklem (6.20)'de yerine yazılır ve x 'e göre türevi alınırsa,

$$\frac{\delta_3}{G_3} \frac{d\tau_{3x}}{dx} = \left[\frac{du_{2t}}{dx} - \frac{du_{1b}}{dx} \right] \quad (6.32)$$

elde edilir.

Eğilme momentine bağlı yer değiştirmenin elde edilmesi için, u_{1b} and u_{2t} yer değiştirmeleri tekrar düzenlenirse, çekme ve moment etkisine bağlı olarak,

$$u_{1b} = u_{1b}^T - u_{1b}^M, \quad u_{2t} = u_{2t}^T + u_{2t}^M \quad (6.33)$$

şeklinde yazılabilir.

Boyuna şekil değişimleri, klasik kiriş teorisi kullanılarak, eğilme momenti cinsinden, aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\frac{du_1^M}{dx} = \frac{M_1 \delta_1}{E_1 I_1 2} = \frac{6M_1}{E_1 b \delta_1^2}, \quad \frac{du_2^M}{dx} = \frac{M_2 \delta_2}{E_2 I_2 2} = \frac{6M_2}{E_2 b \delta_2^2} \quad (6.34)$$

Denklem (6.33) x'e göre türevlenir ve denklemler (6.34) ve (6.32) kullanılırsa,

$$\frac{\delta_3}{G_3} \frac{\tau_{3x}}{dx} = \frac{du_{2t}^T}{dx} - \frac{du_{1b}^T}{dx} + \frac{6M_1}{E_1 b \delta_1^2} + \frac{6M_2}{E_2 b \delta_2^2} \quad (6.35)$$

elde edilir.

Denklem (6.34), denklem (6.29) ve (6.30)'da yerine yazılır ve ifade de gerekli sadeleştirmeler yapılırsa,

$$\left[\frac{\delta_3}{G_3} + \frac{\delta_1}{3G_1} + \frac{\delta_2}{3G_2} \right] \frac{d\tau_{3x}}{dx} = \frac{F_{2x}}{E_2 \delta_2 b} - \frac{F_{1x}}{E_1 b \delta_1} + \frac{6M_1}{E_1 b \delta_1^2} + \frac{6M_2}{E_2 b \delta_2^2} \quad (6.36)$$

elde edilir.

Denk (6.36) x'e göre türevlenir ve denklem (6.16) ve (6.18) ifadeleri kullanılırsa,

$$\left[\frac{\delta_3}{G_3} + \frac{\delta_1}{3G_1} + \frac{\delta_2}{3G_2} \right] \frac{d^2 \tau_{3x}}{dx^2} - 4 \left(\frac{1}{E_2 \delta_2} + \frac{1}{E_1 \delta_1} \right) \tau_{3x} = \frac{6V_1}{E_1 b \delta_1^2} + \frac{6V_2}{E_2 b \delta_2^2} \quad (6.37)$$

olarak yazılabilir.

Denklem (6.37), denklem (6.16), (6.21) ve (6.36) kullanılarak tekrar düzenlenirse,

$$\left[\frac{\delta_3}{G_3} + \frac{\delta_1}{3G_1} + \frac{\delta_2}{3G_2} \right] \frac{d^2 F_{1x}}{dx^2} - \left(\frac{1}{E_2 \delta_2} + \frac{1}{E_1 \delta_1} \right) F_{1x} + \frac{6M_1}{E_1 \delta_1^2} + \frac{6M_2}{E_2 \delta_2^2} + \frac{F}{E_2 \delta_2} = 0 \quad (6.38)$$

şeklini alır.

Denklem (6.38) x'e göre iki kere türevlenir ve denklem (6.16), (6.17) ve (6.18) ifadelerindeki eşitlikler kullanılarak tekrar düzenlenirse,

$$\left[\frac{\delta_3}{G_3} + \frac{\delta_1}{3G_1} + \frac{\delta_2}{3G_2} \right] \frac{d^4 F_{1x}}{dx^2} - 4 \left(\frac{1}{E_1 \delta_1} + \frac{1}{E_2 \delta_2} \right) \frac{d^2 F_{1x}}{dx^2} + 6b \left(\frac{1}{E_1 \delta_1^2} - \frac{1}{E_2 \delta_2^2} \right) \sigma_{3y} = 0 \quad (6.39)$$

olarak yazılabilir.

1 ve 2 nolu yapıştırılan malzemelerin eğriliği aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\frac{d^2 v_1}{dx^2} = -\frac{M_1}{E_1 I_1} \quad , \quad \frac{d^2 v_2}{dx^2} = -\frac{M_2}{E_2 I_2} \quad (6.40)$$

Burada, v_1 ve v_2 yapıştırılan malzemelerin enine yer değiştirmeleridir. I_1 ve I_2 ,1 ve 2 nolu yapıştırılan malzemelerin ikinci alan momentleridir. İkinci alan momentleri, $I_1 = b\delta_1^3/12$ ve $I_2 = b\delta_2^3/12$, şeklinde tanımlanmıştır. Ara yüzey soyulma gerilmesi-şekil değişimi ilişkisi, yapıştırılan malzemelerin enine yer değiştirmesine göre aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\frac{\sigma_{3y}}{E_3} = \varepsilon_{3y} = \frac{v_1 - v_2}{\delta_3} \Rightarrow \frac{\delta_3}{E_3} \sigma_{3y} = v_1 - v_2 \quad (6.41)$$

Denklem (6.41) içerisinde ikinci ifade x 'e göre türevlenirse,

$$\frac{\delta_3}{E_3} \frac{d\sigma_{3y}}{dx} = \frac{dv_1}{dx} - \frac{dv_2}{dx} = \theta_1 - \theta_2 \quad (6.42)$$

elde edilir. Burada, θ_1 ve θ_2 , sırasıyla yapıştırılan malzemelerin eğimlerini belirtmektedir. Denklem (6.42) x 'e göre türevlenir ve denklem (6.40)'da yerine yazılırsa,

$$\frac{\delta_3}{E_3} \frac{d^2 \sigma_{3y}}{dx^2} = \frac{12M_2}{E_2 b \delta_2^3} - \frac{12M_1}{E_1 b \delta_1^3} \quad (6.43)$$

elde edilir.

Denklem (6.43) x 'e göre türevlenir ve tekrar düzenlenirse,

$$\frac{\delta_3}{E_3} \frac{d^3 \sigma_{3y}}{dx^3} = \frac{dM_2}{dx} \frac{12}{E_2 b \delta_2^3} - \frac{dM_1}{dx} \frac{12}{E_1 b \delta_1^3} \quad (6.44)$$

şeklinde yazılabilir.

Denklem (6.18), denklem (6.44)'de yerine yazıldığında,

$$\frac{\delta_3}{E_3} \frac{d^3 \sigma_{3y}}{dx^3} = \frac{12V_2}{E_2 b \delta_2^3} - \frac{12V_1}{E_1 b \delta_1^3} + 6\tau_{3x} \left(\frac{1}{E_2 \delta_2^2} - \frac{1}{E_1 \delta_1^2} \right) \quad (6.45)$$

elde edilir.

Denklem (6.45) x 'e göre türevlenir ve denklem (6.16) ve (6.17) kullanılırsa,

$$\frac{\delta_3}{E_3} \frac{d^4 \sigma_{3y}}{dx^4} = \frac{dV_2}{dx} \frac{12}{E_2 b \delta_2^3} - \frac{dV_1}{dx} \frac{12}{E_1 b \delta_1^3} + 6 \frac{d\tau_{3x}}{dx} \left(\frac{1}{E_2 \delta_2^2} - \frac{1}{E_1 \delta_1^2} \right) \quad (6.46)$$

elde edilir.

Denklem (6.46)'da, denklem (6.16) ve (6.17) yerine yazılırsa,

$$\frac{\delta_3}{E_3} \frac{d^4 \sigma_{3y}}{dx^4} + \left(\frac{12}{E_2 \delta_2^3} + \frac{12}{E_1 \delta_1^3} \right) \sigma_{3y} - \frac{6}{b} \left(\frac{1}{E_1 \delta_1^2} - \frac{1}{E_2 \delta_2^2} \right) \frac{d^2 F_{1x}}{dx^2} = 0 \quad (6.47)$$

elde edilir.

Yapıştırılan malzemelerin geometrik ve malzeme özelliklerinin aynı olması durumunda, hibrit yapıştırırmalı bağlantılar için gerilme ifadeleri basitleştirilebilir;

$$G_1 = G_2 = G, \quad E_1 = E_2 = E, \quad \delta_1 = \delta_2 = \delta_0 \quad (6.48)$$

Denklem (6.39) tekrar düzenlenirse aşağıdaki diferansiyel eşitlik elde edilir:

$$\left[\frac{\delta_3}{G_3} + \frac{2\delta_0}{3G} \right] \frac{d^4 F_{1x}}{dx^4} - \frac{8}{E\delta_0} \frac{d^2 F_{1x}}{dx^2} = 0 \quad (6.49)$$

Denklem (6.49) tekrar düzenlenirse,

$$\frac{d^4 F_{1x}}{dx^4} - \lambda_1^2 \frac{d^2 F_{1x}}{dx^2} = 0 \quad (6.50)$$

elde edilir.

Denklem (6.50)'de, λ_1^2 ifadesi aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:

$$\lambda_1^2 = \frac{4\alpha}{\eta + \beta/3} \quad (6.51)$$

Burada, $\alpha = 2/E\delta_0$, $\eta = \delta_3/G_3$ ve $\beta = 2\delta_0/G$ şeklinde yazılabilir.

Sünek yapıştırıcı için tanımlanan λ_1^2 , benzer şekilde gevrek yapıştırıcı için tekrar tanımlanırsa, λ_2^2 aşağıdaki şekli ile tekrar yazılabilir:

$$\lambda_2^2 = \frac{4\alpha}{\eta' + \beta/3} \quad (6.52)$$

Burada, $\alpha = 2/E\delta_0$, $\eta' = \delta_3/G_4$ ve $\beta = 2\delta_0/G$ şeklinde yazılabilir.

Denklem (6.47) tekrar düzenlenir ve denklem (6.48) kullanılırsa, diferansiyel denklem aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\frac{d^4 \sigma_{3y}}{dx^4} + 4\omega_1^4 \sigma_{3y} = 0 \quad (6.53)$$

Burada, $\omega_1^4 = 3\phi/\chi$, $\phi = 2/E\delta_0^3$ ve $\chi = \delta_3/E_3$ şeklinde yazılabilir.

Sünek yapıştırıcı için tanımlanan ω_1^4 , benzer şekilde gevrek yapıştırıcı için tekrar tanımlanırsa, ω_2^4 , $\omega_2^4 = 3\phi/\chi$ şeklinde yazılabilir.

Burada, $\phi = 2/E\delta_0^3$ ve $\chi = \delta_3/E_4$ şeklinde yazılabilir.

Temel denklemler (6.50) ve (6.53), sabit katsayılı dördüncü dereceden adi diferansiyel denklemlerdir. Denklem (6.50) için genel çözüm:

$$F_{1x} = A' \sinh(\lambda_1 x) + B' \cosh(\lambda_1 x) + C' x + D' \quad (6.54)$$

Burada, A' , B' , C' ve D' integral sabitleridir.

Bu durumda, boyuna normal gerilme:

$$\sigma_{1x} = \frac{F_{1x}}{b\delta_0} = A'' \sinh(\lambda_1 x) + B'' \cosh(\lambda_1 x) + C'' x + D'' \quad (6.55)$$

Burada, A'' , B'' , C'' ve D'' benzer şekilde integrasyon sabitleridir.

Denklem (6.53)'ün genel çözümü:

$$\begin{aligned} \sigma_{3y} = & A \sinh(\omega_1 x) \sin(\omega_1 x) + B \cosh(\omega_1 x) \sin(\omega_1 x) \\ & + C \sinh(\omega_1 x) \cos(\omega_1 x) + D \cosh(\omega_1 x) \cos(\omega_1 x) \end{aligned} \quad (6.56)$$

Denklem (6.16)'da birinci ifade kullanılır ve denklem (6.54) x 'e göre türevlenirse, ara yüzeylerdeki kayma gerilmesi:

$$\tau_{3x} = -\delta_1 (A'' \lambda_1 \cosh(x) + B'' \lambda_1 \sinh(x) + C'') \quad (6.57)$$

Denklem (6.55), (6.56) ve (6.57), Şekil 6,6'da gösterilen üç bölge için (I, II ve III) tekrar düzenlenirse, aşağıdaki denklem setleri elde edilir.

I. Bölge ($-l \leq x \leq -s$)

$$\begin{aligned}\sigma'_{1x} &= A_1 \sinh(\lambda_1 x) + A_2 \cosh(\lambda_1 x) + A_3 x + A_4 \\ \tau'_{3x} &= -\delta_0 (A_1 \lambda_1 \cosh(\lambda_1 x) + A_2 \lambda_1 \sinh(\lambda_1 x) + A_3)\end{aligned}\quad (6.58)$$

$$\begin{aligned}\sigma'_{3y} &= B_1 \sinh(\omega_1 x) \sin(\omega_1 x) + B_2 \sinh(\omega_1 x) \cos(\omega_1 x) \\ &+ B_3 \cosh(\omega_1 x) \sin(\omega_1 x) + B_4 \cosh(\omega_1 x) \cos(\omega_1 x)\end{aligned}$$

II. Bölge ($-s \leq x \leq s$)

$$\begin{aligned}\sigma''_{1x} &= A_5 \sinh(\lambda_2 x) + A_6 \cosh(\lambda_2 x) + A_7 x + A_8 \\ \tau''_{4x} &= -\delta_0 (A_5 \lambda_2 \cosh(\lambda_2 x) + A_6 \lambda_2 \sinh(\lambda_2 x) + A_7)\end{aligned}\quad (6.59)$$

$$\begin{aligned}\sigma''_{4y} &= B_5 \sinh(\omega_2 x) \sin(\omega_2 x) + B_6 \sinh(\omega_2 x) \cos(\omega_2 x) \\ &+ B_7 \cosh(\omega_2 x) \sin(\omega_2 x) + B_8 \cosh(\omega_2 x) \cos(\omega_2 x)\end{aligned}$$

III. Bölge ($s \leq x \leq l$)

$$\begin{aligned}\sigma'''_{1x} &= A_9 \sinh(\lambda_1 x) + A_{10} \cosh(\lambda_1 x) + A_{11} x + A_{12} \\ \tau'''_{3x} &= -\delta_0 (A_9 \lambda_1 \cosh(\lambda_1 x) + A_{10} \lambda_1 \sinh(\lambda_1 x) + A_{11})\end{aligned}\quad (6.60)$$

$$\begin{aligned}\sigma'''_{3y} &= B_9 \sinh(\omega_1 x) \sin(\omega_1 x) + B_{10} \sinh(\omega_1 x) \cos(\omega_1 x) \\ &+ B_{11} \cosh(\omega_1 x) \sin(\omega_1 x) + B_{12} \cosh(\omega_1 x) \cos(\omega_1 x)\end{aligned}$$

Denklem setleri (6.58) ve (6.60), bindirme uzunluğu sol ve sağ kenarlarındaki sünek yapıştırıcı ile ilgilidir. Denklem seti (6.59), bindirme uzunluğu ortasındaki gevrek yapıştırıcı ile ilgilidir. Normal, kayma ve soyulma gerilmeleri her bölge için belirli olan uygun ifadeler kullanılarak belirlenebilir.

6.2.1 Hibrit Yapıştırırmalı Bağlantı Analitik Model Sınır Şartları

I ve II. bölgeler için, yapıştırıcı ara yüzeylerinde, kayma şekil değiştirmesi normal şekil değiştirme ve eğim için süreklilik koşulları kullanılarak aşağıdaki sınır şartları yazılabilir:

$$\left. \frac{\tau'_{3x}}{G_3} \right|_{x=-s} = \left. \frac{\tau''_{4x}}{G_4} \right|_{x=-s} \quad (6.61)$$

$$\left. \frac{\sigma'_{3y}}{E_3} \right|_{x=-s} = \left. \frac{\sigma''_{4y}}{E_4} \right|_{x=-s} \quad (6.62)$$

$$\left. \frac{\delta_3}{E_3} \frac{d\sigma'_{3y}}{dx} \right|_{x=-s} = \left. \frac{\delta_3}{E_4} \frac{d\sigma''_{4y}}{dx} \right|_{x=-s} \quad (6.63)$$

Yapıştırıcı ara yüzeylerinde normal gerilme sınır şartları:

$$\sigma''_{1x}|_{x=s} = \sigma'''_{1x}|_{x=s} \quad (6.64)$$

$$\sigma'_{1x}|_{x=-s} = \sigma''_{1x}|_{x=-s} \quad (6.65)$$

Denklem (6.36), (6.43) ve (6.45) kullanılarak, I ve II nolu bölgeler arasındaki ara yüzey sınır şartları aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\left(\frac{\delta_3}{G_3} + \frac{2\delta_0}{3G} \right) \frac{d\tau'_{3x}}{dx} \Big|_{x=-s} = \left(\frac{\delta_3}{G_4} + \frac{2\delta_0}{3G} \right) \frac{d\tau''_{4x}}{dx} \Big|_{x=-s} \quad (6.66)$$

$$\left. \frac{\delta_3}{E_3} \frac{d^2\sigma'_{3y}}{dx^2} \right|_{x=-s} = \left. \frac{\delta_3}{E_4} \frac{d^2\sigma''_{4y}}{dx^2} \right|_{x=-s} \quad (6.67)$$

$$\left. \frac{\delta_3}{E_3} \frac{d^3\sigma'_{3y}}{dx^3} \right|_{x=-s} = \left. \frac{\delta_3}{E_4} \frac{d^3\sigma''_{4y}}{dx^3} \right|_{x=-s} \quad (6.68)$$

Momentler, kayma ve boyuna kuvvetler için, $x = \pm l$ deki sınır şartları:

$$\left\{ \begin{array}{l} M_1|_{x=-l} = -M_0 \\ V_1|_{x=-l} = -V_0 \\ F_{1x}|_{x=-l} = F \end{array} \right\}, \left\{ \begin{array}{l} M_2|_{x=-l} = 0 \\ V_2|_{x=-l} = 0 \\ F_{2x}|_{x=-l} = 0 \end{array} \right\}, \left\{ \begin{array}{l} M_1|_{x=l} = 0 \\ V_1|_{x=l} = 0 \\ F_{1x}|_{x=l} = 0 \end{array} \right\}, \left\{ \begin{array}{l} M_2|_{x=l} = M_0 \\ V_2|_{x=l} = -V_0 \\ F_{1x}|_{x=l} = F \end{array} \right\} \quad (6.69)$$

Şekil 6.6 göz önünde bulundurularak ve denklem (6.69) kullanılarak, $x = -l$ deki sınır şartları, denklem (6.36), (6.37), (6.43) ve (6.44) kullanılarak,

$$\left(\frac{\delta_3}{G_3} + \frac{2\delta_0}{3G} \right) \frac{d\tau_{3x}}{dx} \Big|_{x=-l} = - \left(\frac{F}{Eb\delta_0} + \frac{6M_0}{Eb\delta_0^2} \right) \quad (6.70)$$

$$\left(\frac{\delta_3}{G_3} + \frac{2\delta_0}{3G} \right) \frac{d^2\tau_{3x}}{dx^2} \Big|_{x=-l} - \frac{8}{E\delta_0} \tau_{3x} \Big|_{x=-l} = - \frac{6V_0}{Eb\delta_0^2} \quad (6.71)$$

$$\left. \frac{\delta_3}{E_3} \frac{d^2\sigma_{3y}}{dx^2} \right|_{x=-l} = \frac{12M_0}{Eb\delta_0^3} \quad (6.72)$$

$$\frac{\delta_3}{E_3} \frac{d^3 \sigma_{3y}}{dx^3} \bigg|_{x=-l} = \frac{12V_0}{Eb\delta_0^3} \quad (6.73)$$

şeklinde elde edilir.

Diğer iki sınır koşulu,

$$\sigma_{1x}^{III} \big|_{x=l} = \frac{F_{1x} \big|_{x=l}}{b\delta_0} = 0 \quad (6.74)$$

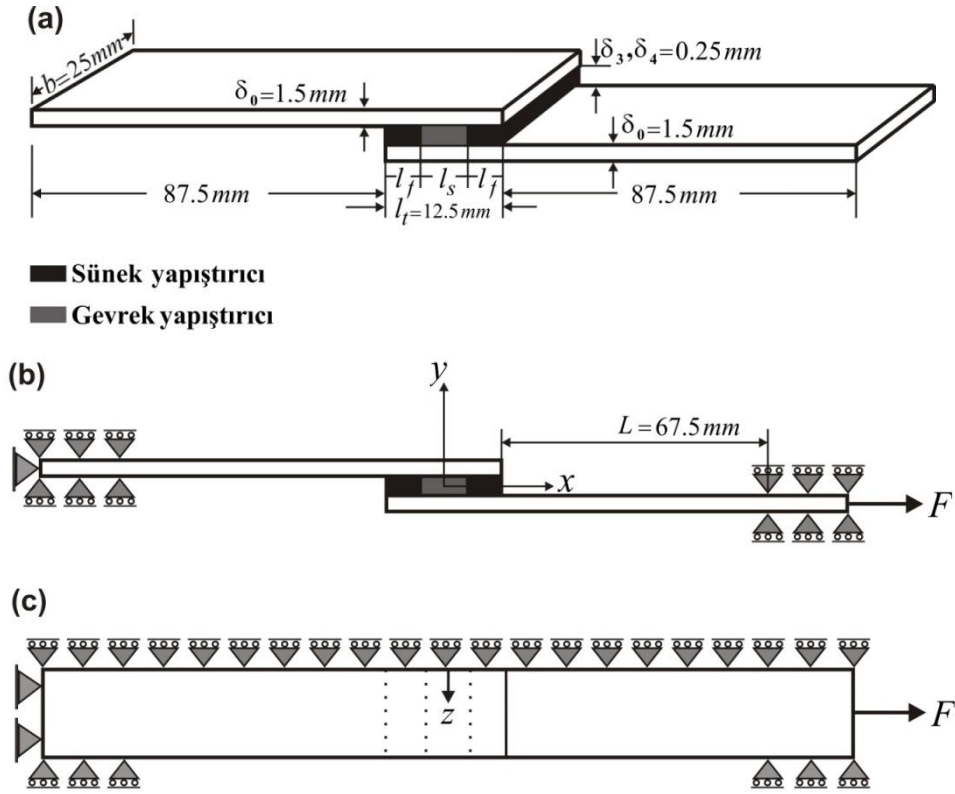
$$\sigma_{1x}^I \big|_{x=-l} = \frac{F_{1x} \big|_{x=-l}}{b\delta_1} = \frac{F}{b\delta_0} \quad (6.75)$$

şeklindedir.

Denklem (6.58), (6.59) ve (6.60)'da üç bölge düşünüldüğünde toplam 24 adet bilinmeyen katsayı vardır. Bununla birlikte, yukarıda sadece 14 sınır şartı vardır. Toplamda 24 adet bilinmeyen katsayı bulunduğundan, problemin çözülebilmesi için 10 sınır şartına daha ihtiyaç vardır. Yukarıdaki denklemler incelendiğinde, I ve II nolu bölgeler için sınır şartlarının elde edildiği görülebilir. Bindirme bölgesi, y eksenine göre simetrik olduğundan, geriye kalan 10 sınır şartı I ve II nolu bölgelere benzer şekilde II ve III nolu bölgeler içinde yazılabilir. Bu durum da, toplam 24 adet sınır şartı elde edilmiş olur.

6.3 Hibrit Yapıştırırmalı Bağlantı Analitik Modelin Doğrulanması

Hibrit yapıştırırmalı bağlantı analitik modelin doğrulanması amacıyla, Şekil 6.9'da verilen basit bindirmeli bağlantı geometrisi kullanılmıştır. Yapıştırılan ve yapıştırıcıların kalınlıkları sırasıyla, 1.5 mm ve 0.25 mm olarak seçilmiştir. Bindirme uzunluğu ortasında gevrek yapıştırıcı, kenarlarda ise sünek yapıştırıcı kullanılmıştır. Bağlantıda sünek yapıştırıcı uzunluğu l_f , gevrek yapıştırıcı uzunluğu l_s ile belirtilmiştir. Bağlantının toplam bindirme uzunluğu $(2l_f + l_s)$ 12.5 mm'dir. Bağlantının mono yapıştırırmalı bağlantı olması durumunda, bindirme uzunluğu boyunca sünek veya gevrek yapıştırıcı tekil olarak kullanılmıştır.



Şekil 6.9 Hibrit yapıştırırmalı bağlantı: (a) geometri ve ölçüler, (b) 2-B ve 3-B SEM sınır şartları (ön görünüş), (c) 3-B SEM sınır şartları (üst görünüş)

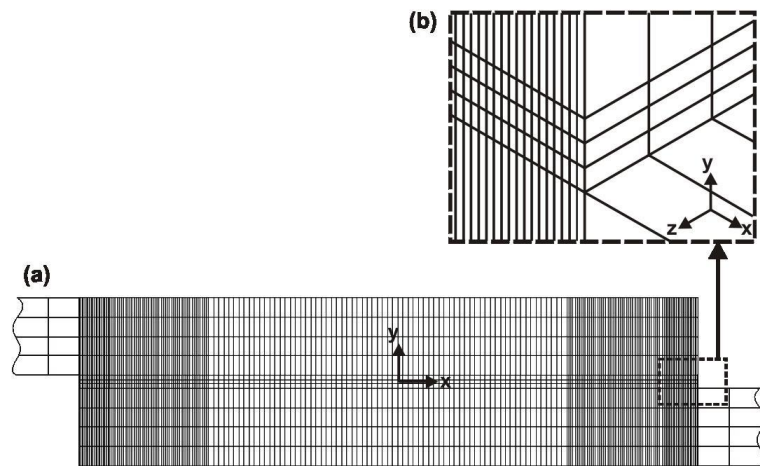
Sonlu eleman analizleri, ANSYS sonlu eleman yazılım programında yüzey-yüzeye kontak (surface to surface contact) modeli kullanılarak yapılmıştır. Bağlantının yük altında aşırı şekilde dönmesini engellemek ve çekme test cihazı çenelerinin bağlantıyı tutma koşullarını sağlayabilmek amacıyla, yapıştırılan malzemelerin uç kısımlarının hareketi “y” eksenine doğrultusunda kısıtlanmıştır. Tutma uzunluğunun gerilme bileşenlerine etkisini belirlemek amacıyla, 10, 20 ve 30 mm olmak üzere üç farklı tutma uzunluğu için analizler tekrarlanmıştır. Elde edilen gerilme değerleri, tutma uzunluğunun gerilme bileşenlerinin değerleri üzerine önemli bir etkisini olmadığını göstermiştir. Sonuç olarak, bağlantının aşırı dönmesini engelleyerek, serbest bir biçimde dönmesine izin veren, 20 mm tutma uzunluğunun kullanılmasına karar verilmiştir. Bağlantı, boyuna simetriktir ve modelleme aşamasında yarı-simetri sınır şartı kullanılmıştır. Bağlantının yarı-simetri sınır şartı kullanılarak modellenmesi, özellikle 3-B analizlerde çözüm süresini önemli oranda düşürmektedir (Şekil 6.9)

Yapıştırılan malzeme olarak alüminyum alaşımı 7075 kullanılmıştır. Hibrit ve mono yapıştırmalı bağlantılarda, Henkel firması tarafından üretilen Hysol EA 9313 ve Terokal 5045 epoksi yapıştırıcılar kullanılmıştır. Çalışmada, Hysol EA 9313 ve Terokal 5045 sırasıyla, gevrek ve sünek yapıştırıcı olarak tanımlanmıştır. Yapıştırılan ve yapıştırıcıların malzeme özellikleri Çizelge 6.1’de verilmiştir.

Çizelge 6.1 Yapıştırılan ve yapıştırıcıların malzeme özellikleri [18]

	Yapıştırılan (Aluminium alaşım 7075)	Sünek yapıştırıcı (Terokal 5045)	Gevrek yapıştırıcı (Hysol EA 9313)
Elastisite modülü (GPa)	$E_1=E_2=71.700$	$E_3=0.437$	$E_4=2.274$
Kayma modülü (GPa)	$G_1=G_2=26.955$	$G_3=0.158$	$G_4=0.836$
Poisson’s oranı	0.33	0.38	0.36
Kayma dayanımı (MPa)	152	20	27.6
Kırılmada uzama (%)	10	11.3	8

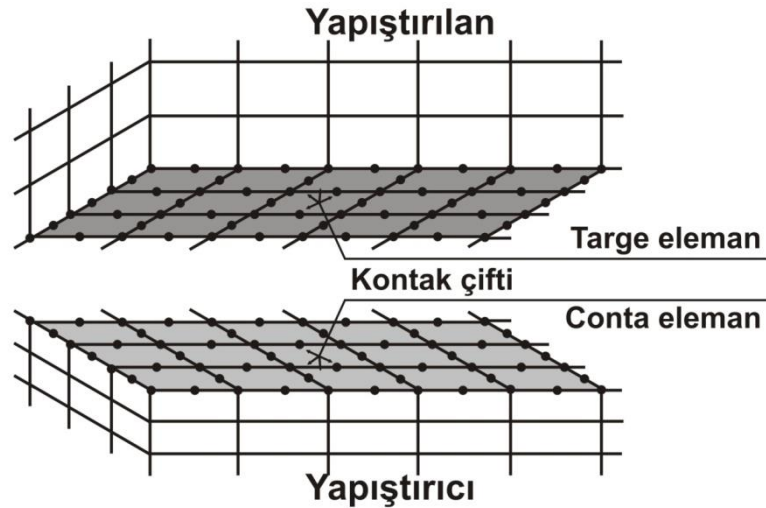
Hibrit yapıştırmalı bağlantı için dört farklı yapıştırıcı-uzunluk oranı ($\xi = l_f / l_s = 0.2, 0.4, 0.7, 1.3$) incelenmiştir. Bağlantıda, alt yapıştırılan sağ kenarına 3.6 kN statik yük uygulanmıştır (Yükleme değeri olarak, Özer ve Öz’ün [18] çalışmalarında kullandıkları yük değeri seçilmiştir). Şekil 6.10’da, bağlantının 2-B ve 3-B sonlu eleman modelleri gösterilmektedir.



Şekil 6.10 Bağlantının sonlu eleman modeli: (a) iki boyutlu, (b) üç boyutlu

2-B ve 3-B sonlu eleman analizlerinde, yapıştırıcı ve yapıştırılan bindirme yüzeyleri, yüzey-yüzeye kontak kullanılarak modellenmiştir. Yüzey-yüzeye kontak modelinde gauss integrasyon noktaları (gauss integration points) kullanılır.

2-B SEA modelinde, yapıştırıcı ve yapıştırılan bindirme yüzeyleri arasındaki kontak çiftleri, kontak eleman “CONTA172” ve hedef eleman “TARGE169” kullanılarak tanımlanmıştır (Şekil 6.11). “CONTA172” kontak elemanları, yapıştırıcı alt ve üst yüzeylerini tanımlamak için kullanılmıştır. “CONTA172” kontak elemanı 2 boyutlu, 3 düğüm sayısına sahip, yüksek dereceli, parabolik elamandır. “CONTA172” kontak elemanları ile uyumlu “TARGE169” hedef elemanları, yapıştırılan bindirme yüzeyleri üzerinde tanımlıdır. 2-B sonlu eleman modeli ağ yapısının oluşturulmasında, 8-düğümlü düzlem gerilme elemanları kullanılmıştır.



Şekil 6.11 Yüzey-yüzeye kontak çifti

3-B SEA modelinde, yapıştırıcı ve yapıştırılan bindirme yüzeyleri arasındaki kontak çiftleri, kontak eleman “CONTA174” ve hedef eleman “TARGE170” kullanılarak tanımlanmıştır (Şekil 6.11). “CONTA174” kontak elemanları, yapıştırıcı alt ve üst yüzeylerini tanımlamak için kullanılmıştır. “CONTA174” kontak elemanı 3 boyutlu, 8 düğüm sayısına sahip, yüksek dereceli, dörtkenar elamandır. “CONTA174” kontak elemanları ile uyumlu “TARGE170” hedef elemanları, yapıştırılan bindirme yüzeyleri üzerinde tanımlanmıştır. 3-B sonlu eleman modeli ağ yapısının oluşturulmasında, her düğümde 3 serbestlik derecesine sahip, 20-düğümlü, altı yüzlü, katı elemanlar kullanılmıştır (Solid95). Yapıştırıcı kalınlığı boyunca üç eleman kullanılmıştır (Şekil 6.10).

2-B ve 3-B sonlu eleman analizlerinde, yapıştırma çizgisi boyunca kullanılan ağ yapısının yoğunluğu, ağ yapısını oluşturan eleman ölçüleri azaltılarak, gerilme değerlerindeki değişim ihmal edilebilir düzeye ulaşana kadar arttırılmıştır. Beş farklı sonlu eleman ağ yapısı incelenerek, yapıştırma bölgesi için uygun eleman ölçüleri ve sayısı belirlenmiştir. Sonuç olarak, gerilme yoğunluğunun fazla olduğu bindirme uzunluğu kenarlarında ve yapıştırıcı ara yüzeylerinde eleman ölçüleri sırasıyla, 0.03 mm ve 0.04 mm olarak belirlenmiştir. Sonlu elemen analizlerinin birbirleri ile doğru şekilde karşılaştırılması amacıyla, mono ve hibrit yapıştırmalı bağlantı sonlu eleman ağ ölçüleri sabit tutulmuştur.

Yapıştırma çizgisi orta düzlemi kayma ve soyulma gerilmesi dağılımları, analitik ve nümerik olarak elde edilmiştir. Analitik ve nümerik çözümlerden elde edilen gerilme dağılımları ve değerleri karşılaştırılmıştır. Gerilme bileşenlerinin dağılımı ortalama kayma gerilmesi (τ_{av}) değeri kullanılarak normalize edilmiş ve aynı gerilme bileşenleri aynı şekil üzerinde gösterilmiştir. Ortalama kayma gerilmesi değeri, uygulanan çekme yükünün bindirme alanına bölünmesi ile belirlenmiştir.

Analitik ve nümerik analizler sonucu elde edilen gerilme değerlerinin görsel olarak karşılaştırılması amacıyla, bar grafikleri kullanılmıştır.

İki farklı yöntemle elde edilen pik gerilme değerlerinin karşılaştırılması ve analitik modelin etkinliğinin belirlenmesi amacıyla, aşağıda verilen yüzde hata formülü kullanılarak, mono ve hibrit yapıştırmalı bağlantılar için elde edilen sonuçlar çizelgeler halinde verilmiştir.

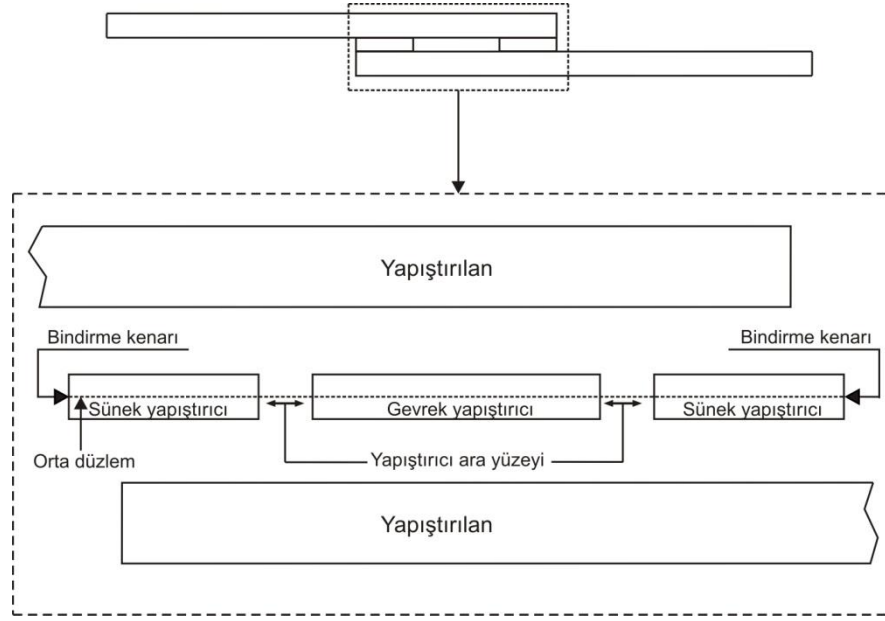
$$Hata \% = \frac{Nümerik - Analitik}{Nümerik} \times 100 \quad (6.76)$$

Burada, “Nümerik” tanımlaması, 2-B ve 3-B SEA sonuçlarını belirtmektedir.

Bar grafikleri ve çizelgelerde, analitik çözümden elde edilen pik gerilme değerleri 2-B ve 3-B sonlu eleman analizlerinden elde edilen pik gerilme değerleri ile karşılaştırılmıştır. Bununla birlikte, mono yapıştırmalı bağlantılarda sadece kenarlarda gerilme değerleri pik değerlere ulaşırken, hibrit yapıştırmalı bağlantılarda kenarlarda ve yapıştırıcı ara yüzeylerinde olmak üzere iki farklı yerde pik gerilme değerleri oluşmaktadır. Bu sebepten, hibrit yapıştırmalı bağlantılar için pik gerilme değerleri karşılaştırılırken,

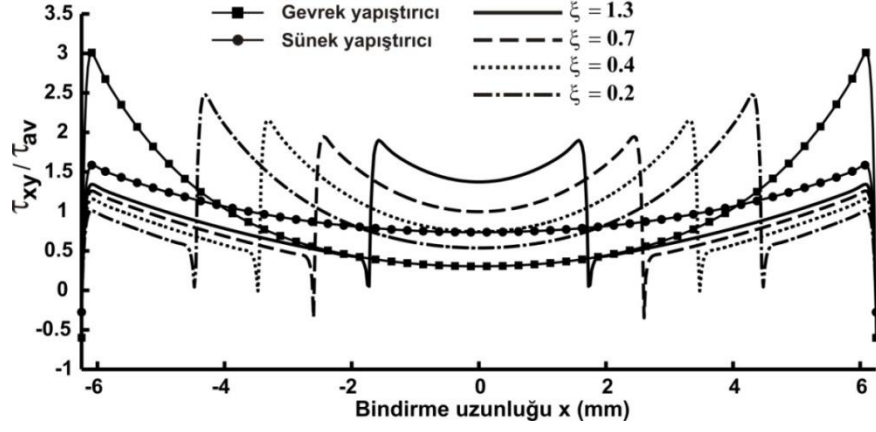
sünek ve gevrek yapıştırıcısının temas yüzeyleri olan yapıştırıcı ara yüzeyleri pik gerilme değerleri de göz önüne alınmıştır (Şekil 6.12).

3-B sonlu eleman analizlerinde, kayma ve soyulma gerilmesi pik değerleri, mono ve hibrit yapıştırırmalı bağlantılar için, bindirme genişliği ortasında oluşmaktadır. Karşılaştırmalarda pik gerilme değerleri kullanıldığından dolayı, 3-B analizlerde gerilme dağılımlarını veren grafikler, bindirme genişliğinin ortasında, yapıştırıcı orta düzlemi boyunca çizdirilmiştir.

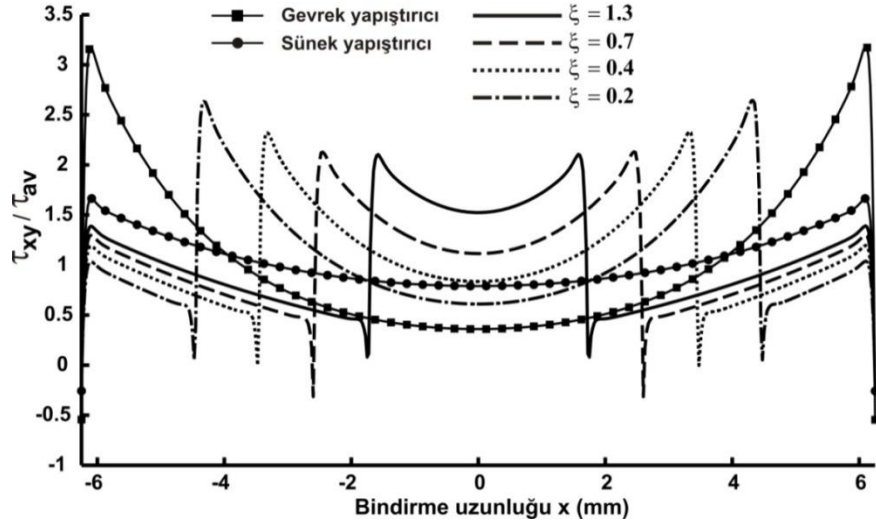


Şekil 6.12 Hibrit yapıştırırmalı bağlantı bindirme bölgesi

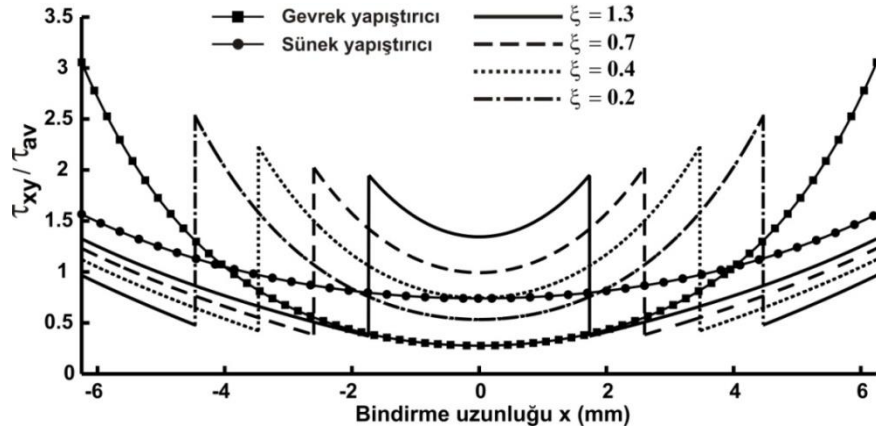
Şekil 6.13, 6.14 ve 6.15, analitik ve nümerik sonuçlardan elde edilen mono ve hibrit yapıştırırmalı bağlantılar için kayma gerilmesi dağılımlarını göstermektedir. Şekil 6.13, 6.14 ve 6.15 incelendiğinde, mono yapıştırıcılar için kayma gerilmesi dağılımının uniform olmadığı görülmektedir. Bu duruma sebep olarak, yük etkisi altında oluşan eğilme momentlerinin, özellikle bindirme yüzeyi kenarlarında, soyulma gerilmelerine neden olarak, gerilme yoğunluklu bölgeler meydana getirmesi gösterilebilir. Mono-gevrek yapıştırıcı kullanılması durumunda, soyulma gerilmelerinin gerilme yoğunluklu bölgeler üzerine etkisi mono-sünek yapıştırıcı kullanılması durumuna göre daha fazladır. Mono-sünek yapıştırıcı gerilme dağılımı, bağlantıda gevrek yapıştırıcı kullanılması durumuna göre daha uniform davranış göstermektedir ve kenarlarda oluşan gerilme yoğunluğu önemli oranda düşmektedir.



Şekil 6.13 2-B SEA normalize edilmiş kayma gerilmesi dağılımı



Şekil 6.14 3-B SEA normalize edilmiş kayma gerilmesi dağılımı



Şekil 6.15 Analitik model normalize edilmiş kayma gerilmesi dağılımı

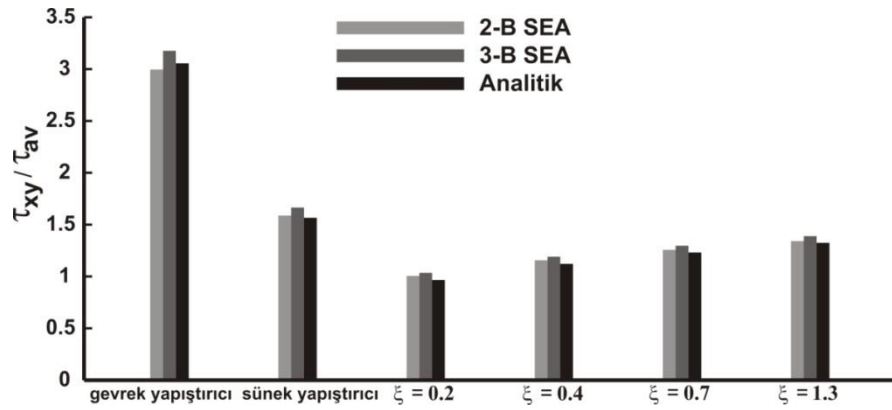
Şekil 6.13, 6.14 ve 6.15 incelendiğinde, Hibrit yapıştırırmalı bağlantılarda, bindirme yüzeyi boyunca maksimum kayma gerilmesi değeri yapıştırıcı ara yüzeylerinde, minimum kayma gerilmesi değerinin kenarlarda oluştuğu görülmektedir. Yapıştırıcı-uzunluk oranının artması ile beraber, bindirme kenarları kayma gerilmesi değerleri

artmasına rağmen, yapıştırıcı ara yüzeyleri kayma gerilmesi değerleri düşmektedir. Ancak, 0.7 Yapıştırıcı-uzunluk oranının artırılarak 1.3'e çıkarılması durumunda, pik kayma gerilmesi değerlerinde önemli bir farklılık meydana gelmemektedir.

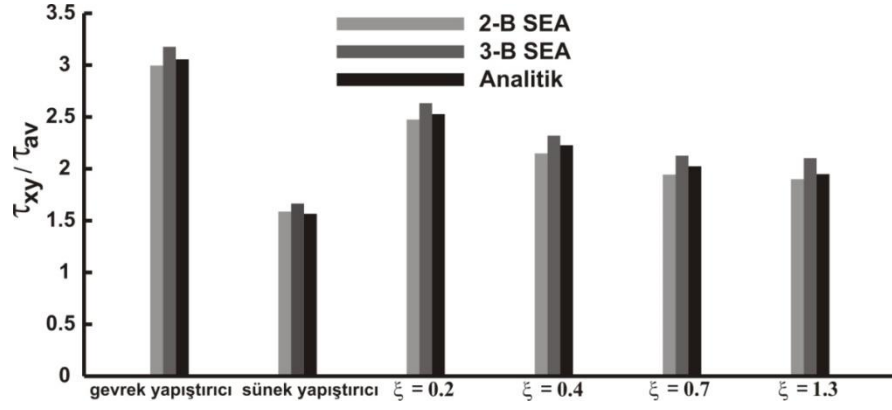
Şekil 6.15'de analitik çözümden elde edilen kayma gerilmesi dağılımı görülmektedir. Analitik çözüm kayma gerilmesi dağılımı, nümerik çözümlerden elde edilen kayma gerilmesi dağılımları ile uyumluluk göstermesine rağmen, kenarlara yakın kısımlarda farklılık vardır. Nümerik çözüm pik kayma gerilmeleri, kenarlara yakın kısımda oluşurken, analitik çözüm kayma gerilmesi değerleri, kenarlarda pik değerine ulaşmaktadır.

Pik gerilme değerlerinin meydana geldiği yerlerdeki farklılığa sebep olarak, nümerik modelin serbest yüzeylerde sıfır gerilme şartını sağlaması gösterilebilir. Ancak, pratikte, yapıştırırmalı bağlantılarda, kenarlarda daima dolgu kenar yapısı mevcut olduğundan, kayma gerilmesi değerinin sıfıra yaklaşma şartı tam olarak sağlanamaz.

Şekil 6.16 ve 6.17'de nümerik ve analitik çözümlerden elde edilen yapıştırıcı ara yüzeyleri ile kenar pik gerilme değerleri karşılaştırılmalı olarak bar grafikleri şeklinde verilmektedir.



Şekil 6.16 Bindirme kenarları normalize edilmiş pik kayma gerilmesi değerleri



Şekil 6.17 Yapıştırıcı ara yüzeyleri normalize edilmiş pik kayma gerilmesi değerleri

Şekil 6.16 ve 6.17’de bar grafikleri incelendiğinde, mono ve hibrit yapıştırırmalı bağlantılar için, analitik ve nümerik çözüm kayma gerilmelerinin bir birine yakın değerlere sahip olduğu görülmektedir. Mono yapıştırma durumunda, maksimum kayma gerilmesi kenarlarda oluşurken, hibrit yapıştırırmalı bağlantılarda yapıştırıcı ara yüzeylerinde kayma gerilmeleri maksimum değere ulaşmaktadır. Kenar pik kayma gerilmesi değerleri, yapıştırıcı-uzunluk oranı arttıkça artmaktadır. Bununla birlikte, yapıştırıcı ara yüzeylerinde, kenarlarda meydana gelen artışa paralel olarak pik kayma gerilmesi değerlerinde düşüş görülmektedir (Şekil 6.17).

Mono ve hibrit yapıştırırmalı bağlantılar için en yüksek pik kayma gerilmesi değerleri, 3-B analiz sonuçlarından elde edilmiştir. Analitik ve 2-B analiz sonuçları, birbirine daha yakın pik gerilme değerlerine sahiptir.

Analitik ve nümerik çözümlerden elde edilen kayma gerilmesi değerleri kullanılarak, analitik modelden elde edilen kayma gerilmesi değerlerinin, nümerik çözümler ile karşılaştırılması yapılmış ve yüzde hata miktarları belirlenmiştir. Mono-gevrek yapıştırırmalı bağlantılar için, analitik model, pik kayma gerilmesi değerlerini 3-B SEA çözümlerine göre düşük, 2-B SEA çözümlerine göre ise yüksek tahmin etmiştir. Analitik çözüm, 2-B ve 3-B SEA ile karşılaştırıldığında hata yüzdeleri sırasıyla, %2.0 ve %3.80 olarak hesaplanmıştır. Bununla birlikte, mono-sünek yapıştırırmalı bağlantı için, analitik model, pik kayma gerilmesi değerlerini 2-B ve 3-B SEA çözümlerine göre daha düşük tahmin etmiş ve 2-B ve 3-B SEA ile karşılaştırıldığında hata yüzdeleri sırasıyla, %1.40 ve %5.94 olarak hesaplanmıştır. hibrit yapıştırırmalı bağlantılar için, analitik çözüm hata

yüzdeleri, denklem (6.76) kullanılarak hesaplanmış ve Çizelge 6.2’de, detaylı olarak, nümerik çözüm sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

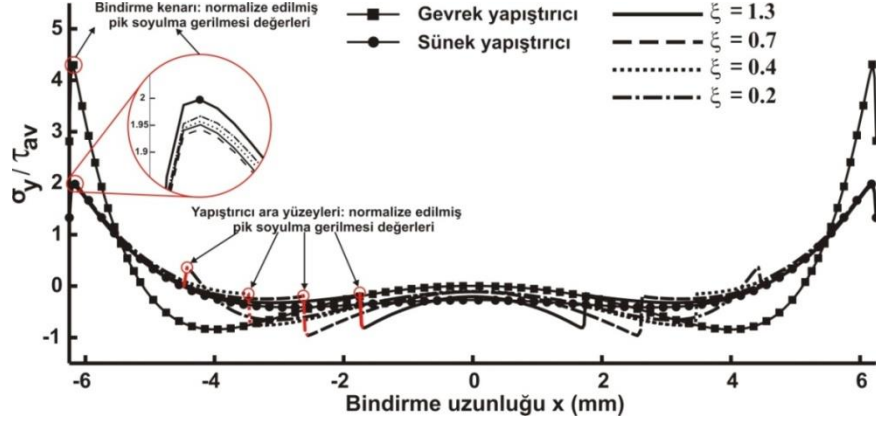
Çizelge 6.2 Analitik ve nümerik çözüm pik kayma gerilmesi değerleri yüzde hata karşılaştırılması

	Yüzde hata (%)	
	Yapıştırıcı ara yüzeylerinde	Kenarlarda
2-B SEA		
$\xi = 0.2$	-2.14	3.93
$\xi = 0.4$	-3.62	3.02
$\xi = 0.7$	-4.11	2.06
$\xi = 1.3$	-2.57	1.19
3-B SEA		
$\xi = 0.2$	3.98	6.62
$\xi = 0.4$	4	5.79
$\xi = 0.7$	4.84	5.08
$\xi = 1.3$	7.32	4.60

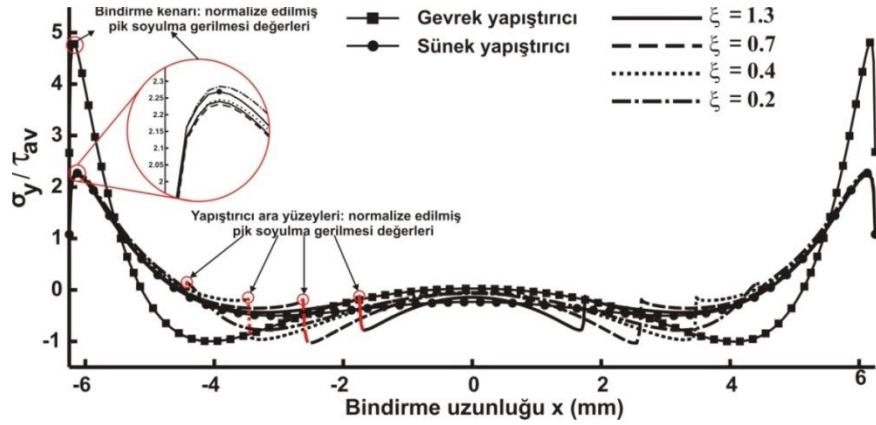
Dört farklı yapıştırıcı-uzunluk oranı için, hibrit yapıştırırmalı bağlantı kenar ve yapıştırıcı ara yüzeylerinde oluşan pik kayma gerilmesi değerleri Çizelge 6,2’de verilmiştir. Analitik ve SEA çözümleri birbiri ile uyumlu ve yakın sonuçlar vermiştir. Analitik model çözümleri ile 2-B SEA sonuçları karşılaştırıldığında, kenar ve yapıştırıcı ara yüzeyi pik kayma gerilmesi değerleri arasında sırasıyla, maksimum %3.93 ve %-4.11 hata miktarları oluşmaktadır. Benzer şekilde, analitik model, 3-B SEA çözümleri karşılaştırıldığında yüzde hata miktarı artmakta ve kenar ve yapıştırıcı ara yüzeyi pik kayma gerilmesi değerleri arasında sırasıyla, %6.62 ve %7.32 hata miktarı oluşmaktadır.

Şekil 6.18, 6.19 ve 6.20, analitik ve nümerik çözümlerden elde edilen mono ve hibrit yapıştırırmalı bağlantılar için soyulma gerilmesi dağılımını göstermektedir. Şekil 6.18, 6.19 ve 6.20’den açıkça görüldüğü gibi, mono ve hibrit yapıştırırmalı bağlantılar için

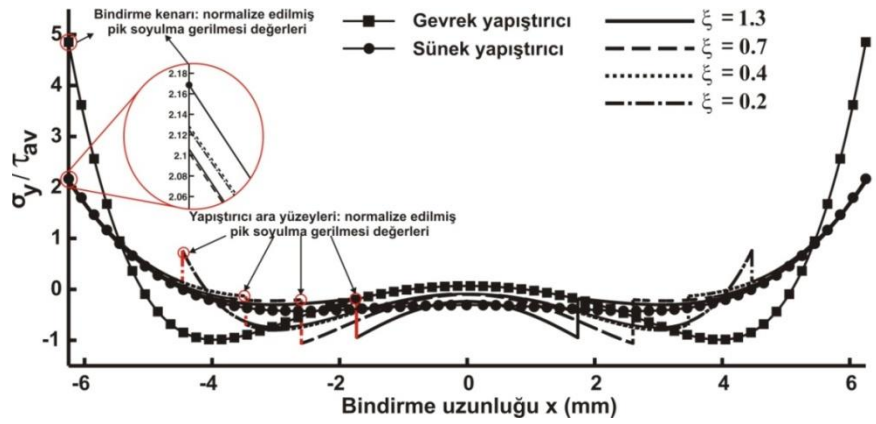
soyulma gerilmeleri, kenarlarda pik değerlerine ulaşmaktadır. Hibrit yapıştırma çizgisi bindirme kenarlarında düşük pik soyulma gerilmeleri meydana gelmektedir. Bununla birlikte, hibrit yapıştırmalı bağlantının, kenarlarda, sünek yapıştırıcı kısmında oluşan pik gerilme değeri ile mono-sünek yapıştırıcı pik gerilme değeri arasında değer olarak önemli bir farklılık yoktur.



Şekil 6.18 2-B SEA normalize edilmiş soyulma gerilmesi dağılımı



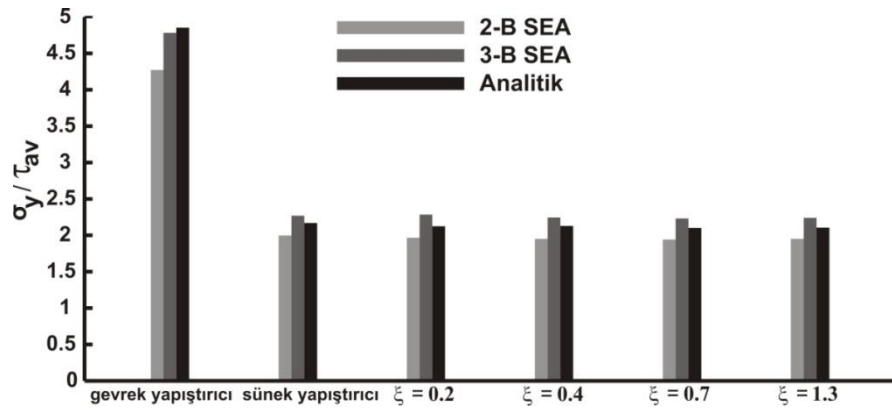
Şekil 6.19 3-B SEA normalize edilmiş soyulma gerilmesi dağılımı



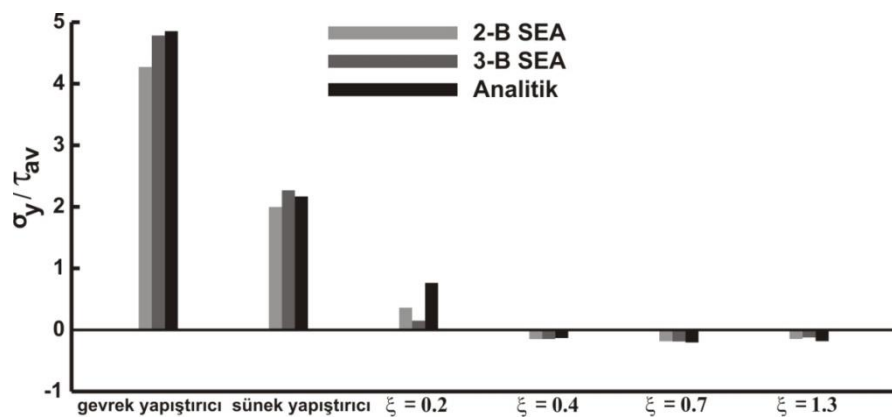
Şekil 6.20 Analitik model normalize edilmiş soyulma gerilmesi dağılımı

Şekil 6.18, 6.19 ve 6.20 incelendiğinde, yapıştırıcı-uzunluk oranının kenar pik soyulma gerilmesi değerleri üzerine önemli bir etkisinin olmadığı görülmektedir. Hibrit yapıştırırmalı bağlantı kullanılması durumunda, kenarlarda oluşan pik soyulma gerilmesi değerleri, mono-gevrek yapıştırıcılı bağlantı kullanımına göre önemli oranda düşmektedir. Yapıştırıcı ara yüzeylerinde, yapıştırıcı-uzunluk oranının düşmesine bağlı olarak, çok az miktarda sünek yapıştırıcı kullanılması durumunda, soyulma gerilmesi dağılımı içerisinde ikincil pik soyulma gerilmesi meydana gelmektedir. İkincil pik soyulma gerilmesi, hibrit yapıştırırmalı bağlantılarda istenmeyen bir durumdur ve bağlantıyı ayırma yönünde etkiye sahiptir.

Şekil 6.21 ve 6.22, nümerik ve analitik çözümlerden elde edilen yapıştırıcı ara yüzeyleri ile kenar pik gerilme değerleri karşılaştırılmalı olarak, bar grafik şeklinde verilmektedir.



Şekil 6.21 Bindirme kenarları normalize edilmiş pik soyulma gerilmesi değerleri



Şekil 6.22 Yapıştırıcı ara yüzeyleri normalize edilmiş pik soyulma gerilmesi değerleri

Şekil 6.21 ve 6.22 incelendiğinde, hibrit ve mono yapıştırırmalı bağlantılar için, analitik ve nümerik pik soyulma gerilme değerlerinin, özellikle kenarlarda, birbirine yakın ve uyumlu olduğu görülmektedir.

Mono-gevrek yapıştırırmalı bağlantılar için, analitik model, pik soyulma gerilmesi değerlerini 2-B ve 3-B SEA çözümlerine göre yüksek tahmin etmiş ve 2-B ve 3-B SEA ile karşılaştırıldığında hata yüzdeleri sırasıyla, %-13.62 ve %-1.48 olarak hesaplanmıştır. Bununla birlikte, Mono-sünek yapıştırırmalı bağlantılar için, analitik model, pik soyulma gerilmesi değerlerini 2-B SEA çözümlerine göre yüksek, 3-B SEA çözümlerine göre ise düşük tahmin etmiş ve 2-B ve 3-B SEA ile karşılaştırıldığında hata yüzdeleri sırasıyla, %-8.55 ve %4.40 olarak hesaplanmıştır. Analitik model ile nümerik çözümler arasındaki en büyük fark, yapıştırıcı ara yüzeylerinde 0.2 yapıştırıcı-uzunluk oranında oluşmaktadır. Oluşan bu fark, yapıştırırmalı bağlantıların tasarımında, maksimum gerilme değerleri göz önüne alındığından çok fazla öneme sahip değildir [70]. Hibrit yapıştırırmalı bağlantılar için, analitik çözüm hata yüzdeleri, detaylı olarak, denklem (6.76)'ya göre hesaplanmış ve Çizelge 6.3' de nümerik çözüm sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Çizelge 6.3 Analitik ve nümerik çözüm pik soyulma gerilmesi değerleri yüzde hata karşılaştırılması

	Yüzde hata (%)	
	Yapıştırıcı ara yüzeylerinde	Kenarlarda
2-B SEA		
$\xi = 0.2$	-111.46	-8.03
$\xi = 0.4$	11.41	-9.12
$\xi = 0.7$	-10.57	-8.18
$\xi = 1.3$	-24.57	-7.94
3-B SEA		
$\xi = 0.2$	-408.86	7
$\xi = 0.4$	10.87	5.16
$\xi = 0.7$	-8.28	5.78
$\xi = 1.3$	-48.85	5.98

Dört farklı yapıştırıcı-uzunluk oranı için, hibrit yapıştırırmalı bağlantı kenar ve yapıştırıcı ara yüzeylerinde oluşan pik soyulma gerilmesi değerleri Çizelge 6,3'de verilmiştir. Analitik ve SEA çözümleri, özellikle gerilmenin maksimum olduğu kenarlarda, birbiri ile uyumlu ve yakın sonuçlar vermiştir. Analitik model çözümleri ile 2-B SEA sonuçları karşılaştırıldığında, kenar pik soyulma gerilmesi değerleri arasında %-9.12 hata miktarı oluşmaktadır. Benzer şekilde, analitik model ve 3-B SEA çözümleri karşılaştırıldığında yüzde hata oranı düşmekte ve kenar pik soyulma gerilmesi değerleri arasında %7 hata miktarı oluşmaktadır. Analitik model ile nümerik çözümler arasındaki en büyük fark 0.2 yapıştırıcı-uzunluk oranında oluşmaktadır. Bu oran için, analitik model, pik soyulma gerilmesi hata yüzdeleri, 2-B ve 3-B SEA ile karşılaştırıldığında sırasıyla, %-111.46 ve % -408.86 olarak hesaplanmıştır.

BÖLÜM 7

DENEYSEL ÇALIŞMA

Doktora tezinin bu aşamasında, farklı mekanik özelliklere sahip yapıştırıcılar kullanılarak oluşturulan mono ve hibrit yapıştırmalı bağlantı hasar yükleri, deneysel olarak belirlenmiştir. Bağlantıların hazırlanmasında kullanılan yöntemler, detaylı olarak açıklanmış ve bağlantı hasarı sonrası, kullanılan yöntemlerin etkinliği, yapıştırılan ve yapıştırma yüzeyleri incelenerek belirlenmiştir. Bu bölümün son aşamasında, deneysel hasar yükleri, tahmini hasar yükleri ile karşılaştırılmış ve sonuçlar tartışılmıştır.

7.1 Malzemeler

Mono ve hibrit yapıştırmalar için, analitik modelin doğrulanması amacıyla kullanılan yapıştırıcılardan farklı olarak, farklı mekanik özelliklere sahip üç yapıştırıcı seçilmiştir. Mono ve hibrit yapıştırmalı bağlantılarda, yapıştırılan malzeme olarak 2 mm kalınlığa sahip, yüksek dayanımlı, DIN C75 sulu çelik levhalar kullanılmıştır.

7.1.1 Yapıştırıcılar

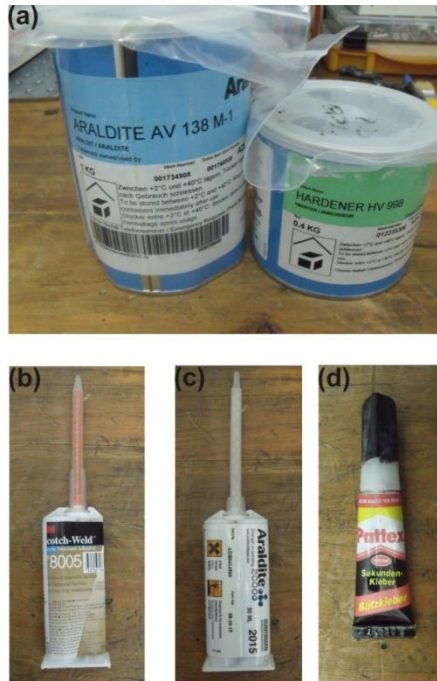
Deneysel çalışmalarda mono ve hibrit yapıştırmalı bağlantılarda kullanılan yapıştırıcılar, mekanik özellik ve hasar davranışlarına göre, gevrek (Huntsman AV138+HV998 sertleştirici), tok (Huntsman Araldite 2015) ve sünek (3M DP-8005) olmak olarak üç farklı grupta sınıflandırılabilir (Şekil 7.1). Siyonakrilat yapıştırıcı, hibrit yapıştırmalı bağlantılarda ayırıcı olarak kullanılan silikon şeritlerin yapıştırma yüzeylerine sabitlenmesi amacıyla kullanılmıştır.

AV138 ve 2015 çift komponentli ve sıcaklıkla kürleşen, yüksek dayanımlı, pasta tipi epoksi yapıştırıcılardır. DP-8005 çift komponentli ve akrilik bazlı yapıştırıcıdır.

Gevrek yapıştırıcı, AV138, çeşitli metallerin yapıştırılmasında ve yüksek sıcaklıklarda kullanılabilmesi nedeniyle, endüstriyel uygulamalarda tercih edilmektedir. Reçine ve sertleştirici 100/40 hacim veya ağırlık oranlarında homojen bir karışım elde edilinceye kadar karıştırılarak hazırlanmaktadır [81].

Tok yapıştırıcı, 2015, yüksek kayma ve soyulma dayanımına sahiptir. Tikotropik yapıdaki 2015, 10 mm'ye kadar yapıştırma kalınlıklarında kullanılabilir. Reçine ve sertleştirici 100/100 hacim veya ağırlık oranlarında statik mikser kullanılarak karıştırılır [82].

Sünek yapıştırıcı, DP-8005, düşük yüzey enerjili plastik malzemelerin yapıştırılmasında tercih edildiği gibi çeşitli metallerin yapıştırılması içinde uygundur. Yüksek uzama değerlerine sahiptir. Reçine ve sertleştirici 100/10 hacim veya ağırlık oranlarında statik mikser kullanılarak karıştırılır [83].



Şekil 7.1 Mono ve hibrit yapıştırırmalı bağlantılarda kullanılan yapıştırıcılar: (a) AV138, (b) DP-8005, (c) 2015, (d) Siyonakrilat

Çizelge 7.1'de deneysel çalışmalarda kullanılan yapıştırıcıların mekanik ve fiziksel özellikleri verilmektedir.

Çizelge 7.1 Yapıştırıcıların mekanik ve fiziksel özellikleri [12], [46], [81-85]

Yapıştırıcı	Çift komponentli Epoksi		Çift komponentli akrilik
Üretici firma	Huntsman	Huntsman	3M
Ticari ismi	Araldite 2015	Araldite AV138 M HV 998 sertleştirici	Scotch-Weld DP-8005
Reçine A	2015/A	Araldite AV138 M	DP-8005/A
Sertleştirici B	2015/B	HV 998	DP-8005/B
Karışım oranı A/B	100/100	100/40	100/10
Karıştırma işlemi	Statik mikser uc	El ile karıştırma	Statik mikser uc
Çalışma süresi (dak.)	30-40	35	2.5-3
Maksimum kürleşme sıcaklığı (°C)/Süresi (dak.)	100/7	100/18	80/30
Camsı geçiş sıcaklığı (°C)	67	100	
Elastisite modülü (MPa)	1850±0.21	4590±0.81	590
Poisson oranı	0.33	0.35	0.35
Çekmede akma dayanımı (MPa)	12.63±0.61	36.49±2.47	
Çekmede hasar dayanımı (MPa)	21.63±1.61	41.01±7.28	
Çekmede hasar uzaması (%)	4.77±0.15	1.3±0.44	
Kayma modülü (MPa)	560±0.21	1560±0.01	178.6±8
Kayma akma dayanımı (MPa)	14.6±1.3	25.1±0.33	5.3±0.6
Kaymada dayanımı (MPa)	17.9±1.8	30.2±0.4	8.4±1.9
Kaymada hasar uzaması (%)	43.9±3.4	7.8±0.7	180±22

7.1.2 Yapıştırılan Malzemeler

Mono ve hibrit yapıştırırmalı bağlantılarda, yapıştırılan malzeme olarak, yüksek dayanımlı DIN C75 sulu çelik levhalar kullanılmıştır. Levhaların mekaniksel özelliklerinin belirlenmesi amacıyla, sırasıyla sertlik ölçümü ve çekme testi yapılmıştır. Ayrıca spektral analiz yapılarak kimyasal kompozisyonu belirlenmiştir.

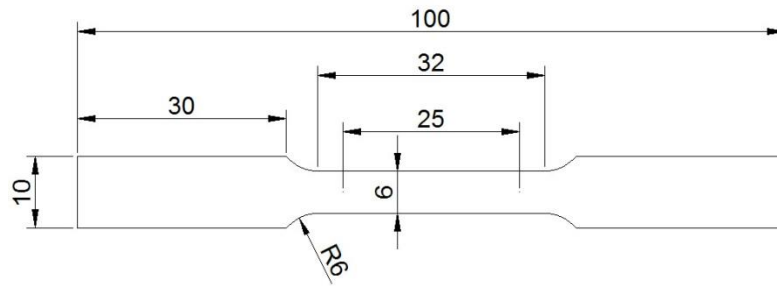
Levhaların sertlik değerlerinin belirlenmesinde, AFFRI SYSTEM sertlik ölçüm cihazı kullanılmıştır. Levhalar için ortalama sertlik değeri 45.37 HRC olarak ölçülmüştür.

DIN C75 sulu çelik kimyasal analizi, tarafımızdan, KARDEMİR A.Ş.' ye yaptırılmıştır. Spektral analiz, adı geçen firmanın malzeme laboratuvarında WAS (FOUNDRY MASTER) cihazı kullanılarak yapılmış ve sonuçlar Çizelge 7.2'de gösterilmiştir.

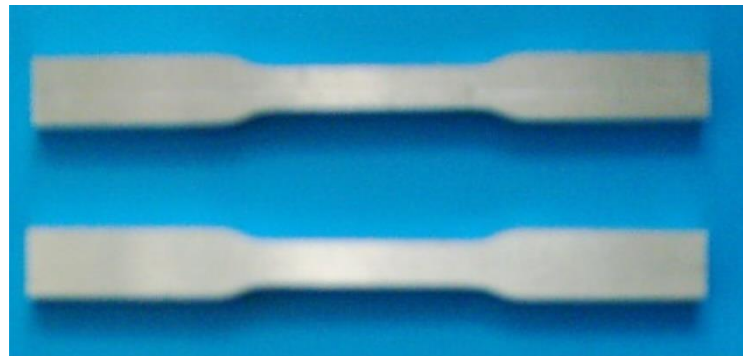
Çizelge 7.2 DIN C75 sulu çelik kimyasal analizi

C	Si	Mn	P	S	Mg	Cr	Ni	Mo	Cu	Al
0.718	0.337	0.783	0.011	0.002	0.0005	0.316	0.037	0.022	0.026	0.007
Ti	V	Nb	W	Co	B	Sn	Pb			
0.003	<0.001	0.007	0.009	0.005	<0.0001	0.002	0.005			

2 mm kalınlığında DIN C75 sulu çelik malzemenin dayanımının belirlenmesi amacıyla, ASTM E8/E8M standardına [86] uygun, çekme numuneleri hazırlanmıştır (Şekil 7.2, 7.3).

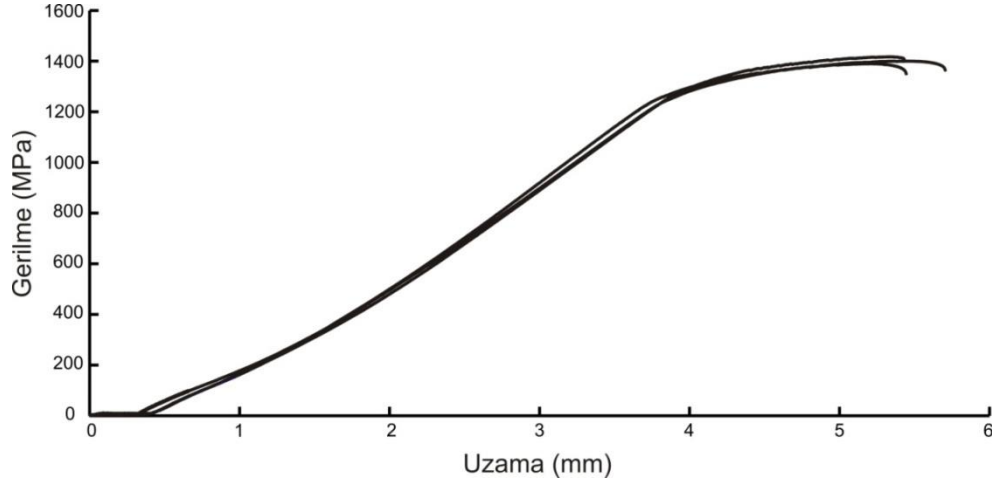


Şekil 7.2 DIN C75 sulu çelik çekme numunesi boyutları



Şekil 7.3 DIN C75 sulu çelik çekme numunesi

Çekme deneyleri, ASTM E8/E8M standardına uygun olarak yapılmıştır. Çekme numunelerine SHIMADZU AG-IS (50kN kapasiteli) test cihazında 1mm/dak çekme hızında kopma hasarı gerçekleşinceye kadar aksel yük uygulanmıştır. Şekil 7.4'de DIN C75 sulu çelik çekme deneyi gerilme-uzama eğrisi görülmektedir.



Şekil 7.4 DIN C75 sulu çelik gerilme-uzama eğrisi

7.2 Bağlantı Geometrisi

Yapıştırılan malzemelerin seçiminde önemli olan, seçilen malzemenin bağlantı hasarından önce akma göstermemesidir. Yapıştırılan malzemelerde akmanın meydana gelmesi, yapıştırıcının üst dayanım sınırına ulaşılmasını engeller. Bindirme uzunluğuna bağlı olarak, yapıştırılan malzemede akmaya sebep olan hasar yükü, basit bir yöntem kullanılarak teorik olarak hesaplanabilir [46], [87]. Belirtilen bu yöntemin uygulanabilmesi için, yapıştırılan malzemenin çekmedeki akma dayanımı ile yapıştırıcının kaymadaki akma dayanımlarının bilinmesi yeterlidir [12].

Deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere, mono ve hibrit yapıştırmalı bağlantı bindirme uzunluğunun belirlenmesinde, Da Silva vd. [46] tarafından çalışmalarında kullanılan çözüm adımları takip edilmiştir.

Yapıştırıcı da meydana gelen toplam plastik şekil değişimine bağlı yük aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanır:

$$F_{GY} = \tau_{ys} b 2l \quad (7.1)$$

Burada, F_{GY} yapıştırıcının hasar yükünü, τ_{ys} yapıştırıcının kayma akma dayanımını, b bağlantı genişliğini ve l bindirme yarı uzunluğunu belirtmektedir.

Yapıştırılan malzemeye etkiyen çekme gerilmesi, uygulanan yüke bağlı olarak aşağıdaki denklem ile belirtilir:

$$\sigma_t = \frac{F}{b\delta_o} \quad (7.2)$$

denklemden, δ_o yapıştırılan malzemenin kalınlığıdır.

Yapıştırılan malzemenin eğilme momentine bağlı olarak iç yüzeyinde meydana gelen gerilme aşağıdaki formül ile bulunur:

$$\sigma_{is} = \frac{6M_o}{b\delta_o^2} \quad (7.3)$$

Burada eğilme momenti;

$$M_o = \frac{kF\delta_o}{2} \quad (7.4)$$

denklemleri ile belirtilir.

Denklemler (7.4)'de k değişkeni eğilme moment faktörü olarak adlandırılır ve bağlantı yük altında dönmeye başladıkça birim değerden (1) azalmaya başlar. Yapıştırılan malzemeye etki eden gerilme değeri çekme ve eğilme gerilmelerini toplamı şeklinde ifade edilir. Bu durumda yapıştırılan malzemelerin taşıyabileceği maksimum yük, aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanır:

$$F_{SY} = \frac{\sigma_{ys}b\delta_o}{1+3k} \quad (7.5)$$

Burada σ_{ys} , yapıştırılan malzemenin akma dayanımıdır. Düşük yükler ve kısa bindirme uzunlukları için k katsayısı yaklaşık 1 alınabilir. Bu durumda denklem (7.5),

$$F_{SY} = \frac{\sigma_{ys}b\delta_o}{4} \quad (7.6)$$

şeklinde yazılabilir.

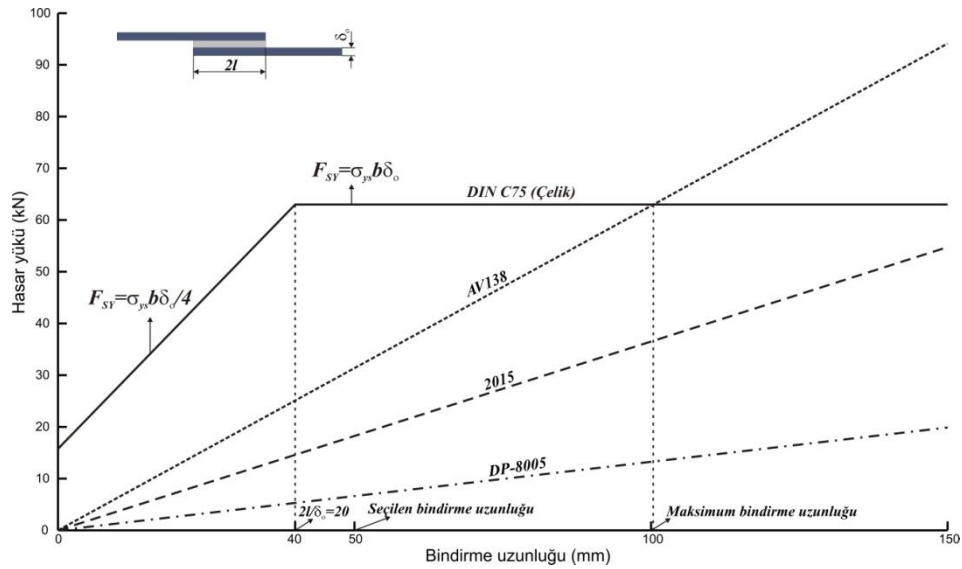
Bindirme uzunluğu kalınlık oranı $20 \leq 2l / \delta_o$ olması durumunda, k değeri sıfır kabul edilebilir, bu durumda denklem (7.5),

$$F_{SY} = \sigma_{ys}b\delta_o \quad (7.7)$$

şeklinde tekrar düzenlenebilir.

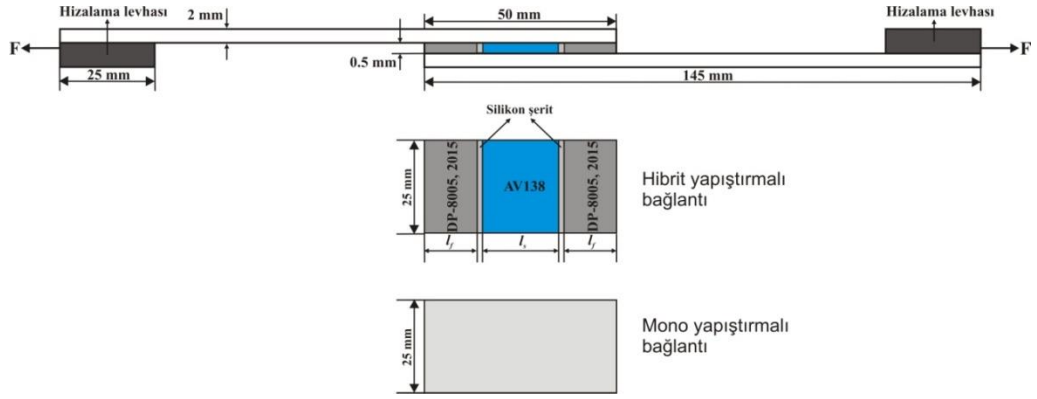
$F_{SY} > F_{GY}$ olması durumunda yapıştırılan malzemede akma hasarı meydana gelmez.

Global akma kriteri denklemleri kullanılarak, deneysel çalışmalarda kullanılan üç farklı yapıştırıcı ve yapıştırılan malzeme için hasar yükü-bindirme uzunluğu grafiği hazırlanmıştır (Şekil 7.5). Şekil 7.5 incelendiğinde, yapıştırılan malzemenin akma hasarına uğramadan yaklaşık 100 mm bindirme uzunluğunun kullanılabileceği görülmektedir. Yapılan çalışmada, mono ve hibrit yapıştırmalı bağlantıların bindirme uzunluğu 50 mm olarak seçilmiştir. Seçilen bindirme uzunluğu özellikle, hibrit yapıştırmalı bağlantıların fiziksel olarak hazırlanabilmesi için yeterli ve güvenlidir. Ayrıca, kullanılan bindirme uzunluğu birçok endüstriyel uygulamada tercih edilebilen gerçekçi bir değerdir [10].



Şekil 7.5 Hasar yükü-bindirme uzunluğu grafiği

Şekil 7.6'da, deneysel çalışmalarda kullanılan mono ve hibrit yapıştırmalı bağlantı geometri ve ölçüleri gösterilmektedir. Hibrit yapıştırmalı bağlantı için üç farklı yapıştırıcı-uzunluk oranı ($\xi = l_f / l_s = 0.3, 0.5, 0.7$) incelenmiştir. Hibrit yapıştırma düzeninde, bindirme uzunluğunun ortasında AV138 yapıştırıcı, kenarlarda ise sırasıyla DP-8005 ve 2015 yapıştırıcılar kullanılmıştır. Mono yapıştırmalı bağlantılarda, hibrit yapıştırmalı bağlantılarda kullanılan AV138, 2015 ve DP-8005 yapıştırıcılar tekil olarak kullanılmıştır.



Şekil 7.6 Hibrit ve mono yapıştırırmalı bağlantı geometri ve ölçüleri

7.3 Bağlantıların Hazırlanması

Yapıştırılan malzemelerin belirlenen ölçülerde hazırlanması amacıyla, CNC lazer-kesme makinesi kullanılmıştır. Lazer-kesim, yapıştırılan malzemenin uzunluğu hadde yönünde olacak şekilde ve 145x25 mm ölçülerinde hazırlanmıştır. Lazer kesim yönteminin tercih edilmesi ile ölçüsel hatalar ortadan kaldırılarak, eşdeğer numunelerin elde edilmesi sağlanmıştır.

Yapıştırırmalı bağlantılarda, istenen dayanım değerlerine ulaşılması ve yapıştırıcıda koheziv hasar çeşidinin elde edilmesi, yapıştırılan yüzeylere uygulanacak ön hazırlık işlemlerine bağlıdır. Yapıştırılan malzeme yüzeylerinde, üretim ve kesim esnasında oluşan ve yapıştırıcı ile yapıştırılan yüzeyler arasında zayıf sınır tabaka meydana getiren yağ v.b katmanların temizlenmesi amacıyla, ultrasonik temizleme cihazı kullanılmıştır (Şekil 7.7). Belirlenen ölçülerde hazırlanan numuneler, ultrasonik temizleme cihazında saf aseton (%99.5) içerisinde, 8 dakika süreyle bekletilmiştir.



Şekil 7.7 Ultrasonik temizleme cihazı

Ön temizleme işlemi yapılan, yüksek yüzey sertlik değerine (ortalama 45.3 HRC) sahip malzemelerin yapıştırma yüzeylerinde yeterli pürüzlülük değerlerine ulaşılabilmesi amacıyla, kumlama işleminde F36 (425-600 μm) ölçülerinde siyah silisyum karbür aşındırıcı kum kullanılmıştır (Şekil 7.8). Silisyum karbür, sert metal yüzeylerin kumlanması amacıyla kullanılan, oldukça sert ve keskin köşeli yapıya sahip aşındırıcı kum çeşididir [31].



Şekil 7.8 Siyah silisyum karbür kum yapısı

Silisyum karbür aşındırıcı kum için mekanik ve fiziksel özellikler Çizelge 7,3’de gösterilmektedir.

Çizelge 7.3 Siyah silisyum karbür mekanik ve fiziksel özellikleri [88]

Sertlik	Kristal şekli	Özgül Ağırlık	Ort. dökme yoğunluğu
>9,5 Mohs	Köşeli	3,20 gr/cm ³	1,30 gr/cm ³

Kumlama işleminin etkinliği, kullanılan kumun yapısı ile beraber kumlama parametreleri tarafından belirlenir. Kullanılan kum partiküllerinin ölçüleri, şekli ve kumlama işlemi esnasında sahip olduğu kinetik enerji, yapıştırma yüzeyleri üzerindeki oksit tabakasının kaldırılarak saf metale ulaşılması açısından önemlidir. Kumlama işleminde, partiküllerin yüzeye çarpması, hava basıncı ile sağlanan itme etkisi ile gerçekleşir. Uygulanan hava basıncı, partiküllerin ulaşabileceği kinetik enerji değerini belirler. Kinetik enerji, denklem (7.8) ile açıklanan partikül yoğunluğu, hacmi ve çarpma hızının karesi ile doğru orantılıdır [89].

$$Kinetik\ enerji = \rho \left(\frac{2}{3} \right) \pi \Theta^3 \Omega^2 \quad (7.8)$$

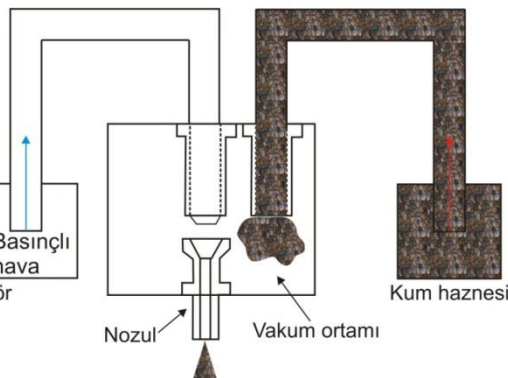
Denklem (7.8)'de;

ρ : Partikül yoğunluğunu

Ω : Partikül hızını

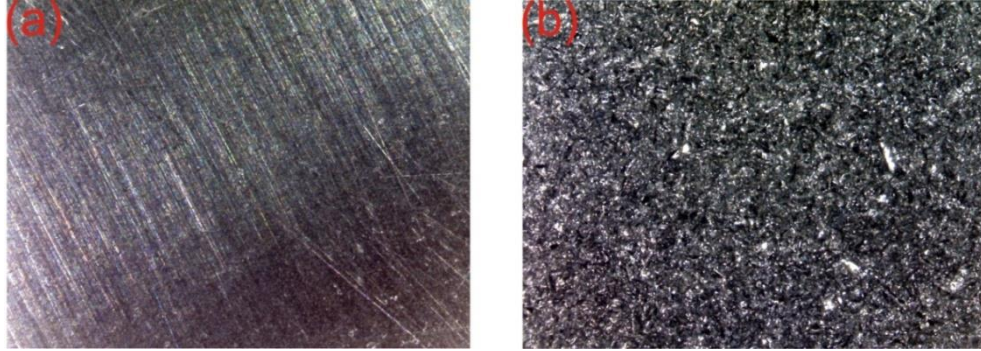
Θ : Partikül yarıçapını göstermektedir.

Yapıştırma yüzeyleri, vakumlu kumlama cihazı kullanılarak kumlanmıştır (Şekil 7.9). Kumlama basıncı cihazın çıkabileceği maksimum değer olan 9 bar basınç değerine, cihaz üzerindeki şartlandırıcı kullanılarak, ayarlanmıştır. Basınç değerinin yüksek seçilmesi ile, kinetik enerji, partikül hızına bağlı olarak arttırılmıştır. Yüksek hızlara ve kinetik enerji değerlerine ulaşan partiküllerin yüzeye saplanmasını engellemek amacıyla, kumlama nozulu ile yapıştırma yüzeyleri arasındaki açı 45° olacak şekilde kumlama işlemi yapılmıştır. Yapıştırma yüzeylerinde mat bir görünüm elde edilene kadar kumlama işlemine devam edilmiştir.



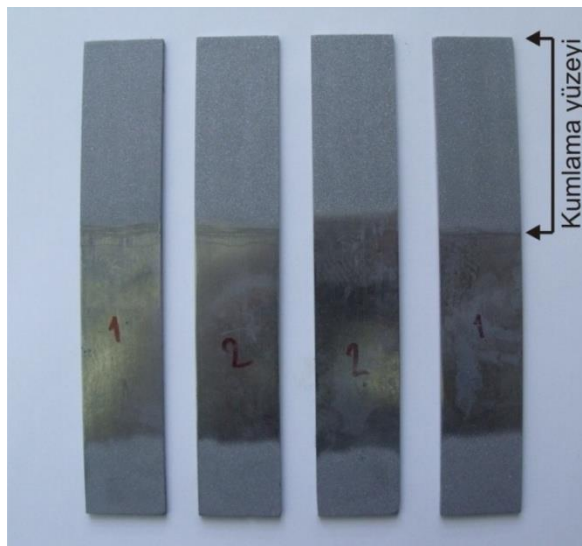
Şekil 7.9 Vakumlu kumlama cihazı

Şekil 7.10'da kumlama öncesi ve sonrası yapıştırma yüzeylerinde meydana gelen değişim görülmektedir. Kumlama sonrası, pürüzlendirilen yapıştırma yüzeyleri homojen bir yapıya sahiptir.



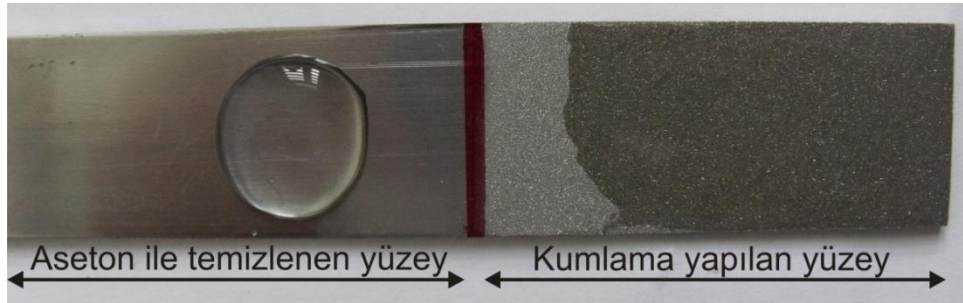
Şekil 7.10 Yapıştırma yüzeyleri: (a) kumlanmamış, (b) kumlanmış

Şekil 7.11'de gösterilen, kumlama işlemi tamamlanan numunelerin yüzeyleri ultrasonik temizleme cihazında 8 dakika süreyle tekrar temizlenmiştir. Temizlenen parçaların kurutulması ve asetonun yüzeylerden tamamen uzaklaştırılması amacıyla, malzemeler, 40 °C sıcaklıktaki fırın içerisinde 20 dk. süreyle bekletilmiştir. Uygulanan yüzey işlemlerinin sonucu olarak, yapıştırma öncesi temiz ve pürüzlü bir yüzey yapısı elde edilmiştir. Yüzey hazırlama işlemleri yapılan numunelerin hızlı bir şekilde yapıştırılması önemlidir. Özellikle çelik malzemelerde, zayıf sınır tabaka olarak adlandırılan oksit tabaka, kumlanan yüzeyler üzerinde hızlı bir şekilde tekrar oluşur. Bu sebepten, deneysel çalışmalar süresince, numunelerin kumlanmasından yapıştırılmasına kadar geçen zaman aralığında bir saatlik sürenin aşılmasına dikkat edilmiştir [90].



Şekil 7.11 Kumlama işlemi tamamlanan numuneler

Yüzey hazırlama işlemlerinin, yapıştırılan bölgedeki ıslanabilirliğe olan etkisini belirlemek amacıyla, basit ve etkili bir yöntem olan su damlatma testi yapılmıştır [58]. Belirtilen bu yöntem, yüzey özelliklerinde değişime karşı oldukça hassas olan saf suyun damlalar halinde test edilecek bölgeye damlatılması ile yapılır. Kullanılan yüzey hazırlama yönteminin etkinliğini belirlemek amacıyla, yapıştırılan malzemenin yüzeyi, yüzey işlemi yapılmış ve yapılmamış olarak iki kısma ayrılmıştır (Şekil 7.12). Yüzey işlemi uygulanmamış kısımda saf su temas açısı büyük ve ıslatma yetersizdir. Yüzey işlemi uygulanmış kısımda temas açısı düşerek ıslatma özelliği artmıştır. Islatma özelliğindeki artış, uygulanan yüzey işleminin yeterliliği hakkında bilgi verse de herhangi bir sayısal ölçüm yapılmamıştır.



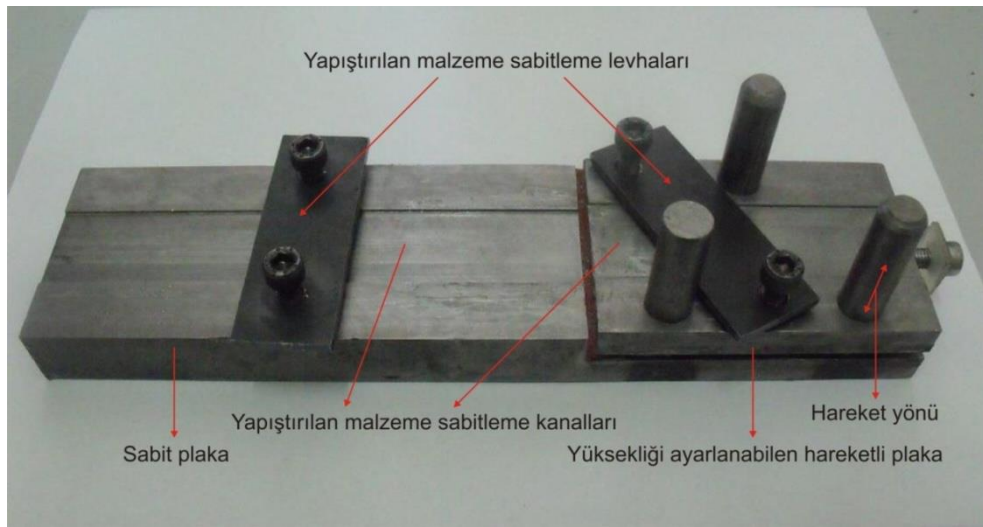
Şekil 7.12 Su damlatma testi

Kumlanmış yüzeylerin pürüzlülük ölçümü Marsurf PS1 portatif yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı kullanılarak yapılmıştır. Kumlama yüzeyi aritmetik ortalama pürüzlülük değeri, R_a , pürüzlülük ölçüm cihazı yardımıyla belirlenmiştir. Aritmetik ortalama pürüzlülük değerinin belirlenmesi amacıyla, kumlanan yüzey üzerinde en az üç farklı bölge taranmıştır (Şekil 7.13). Yapılan üç farklı ölçümün ortalama değeri hesaplanmış ve R_a değeri $3.63 \mu m$ olarak bulunmuştur.



Şekil 7.13 Kumlama yüzeyi pürüzlülük ölçümü yüzey taraması

Bindirmeli bağlantıların hazırlanması amacıyla, Şekil 7.14’de gösterilen bindirmeli bağlantı hazırlama kalıbı tasarlanarak, imal edilmiştir. Tasarlanan kalıp, malzeme sabitleme levhaları ve kanalları ile hareketli ve sabit iki plakadan oluşmaktadır. Yapıştırılan malzemeler, hareketli ve sabit plakalara yerleştirilerek yapıştırma işlemi yapılmaktadır. Yapıştırıcı kalınlığının ayarlanması, hareketli plaka yardımıyla sağlanmaktadır. Kalıp yüzeylerine, numunelerin yapışmasını önlemek amacıyla kalıp ayırıcı (Renlease QZ 5111) fırça yardımıyla uygulanmıştır. Kalıp ayırıcı, yüzeylere üç kat halinde uygulanmıştır. Uygulanan her kat sonrası 15 dakika beklenerek kalıp ayırıcının yüzey üzerinde kürleşerek film tabakası oluşturmaya izin verilmiştir.



Şekil 7.14 Bindirmeli bağlantı hazırlama kalıbı

Yüzey temizliği ve kumlama işlemleri yapılan malzeme yüzeylerine yapıştırıcıların uygulanması, yapıştırılan malzemelerin basınç altında bir araya getirilmesi ve kürleşme öncesi uygulanan son aşamadır. Kartuş içerisindeki 2015 ve DP-8005 yapıştırıcılar tabanca yardımı ile yapıştırma yüzeylerine uygulanmıştır. Kartuş içerisinde bulunmayan AV138 reçine ve sertleştirici, üretici firmanın belirlediği ağırlık oranlarında karıştırılarak hazırlanmıştır. Karıştırma işleminde, uygun ağırlık veya hacim oranları kullanılmadığı durumda epoksi reçineli yapıştırıcılarda reçine ve sertleştiricinin reaksiyona girmeyen kısmı yapıştırma çizgisi dayanımında düşüşe ve daha fazla gaz çıkışına neden olur. Oluşan fazla gaz çıkışı yapıştırıcı içerisinde hataya neden olan boşluklar meydana getirir. AV138 yapıştırıcının hazırlanmasında, reçine ve sertleştiricinin uygun ağırlık oranlarında karıştırılması amacıyla, Şekil 7.15’de gösterilen 0.01 gr. hassasiyetli dijital kuyumcu tartısı kullanılmıştır. Komponentlerin karıştırılmasına, homojen renk elde

edinceye kadar devam edilmiştir. Hazırlanan karışım şırınga yardımıyla yüzeylere uygulanmıştır (Şekil 7.16).



Şekil 7.15 Dijital kuyumcu tartısı

Hibrit yapıştırırmalı bağlantıların hazırlanmasında, yapıştırıcıların birbirine karışmasını önlemek ve yapıştırıcı kalınlığını ayarlamak amacıyla 0.5 mm kalınlığında, 1 mm genişliğinde silikon şerit kullanılmıştır (Şekil 7.16). Silikon şerit, yapıştırılan yüzeylere Şekil 7.1’de gösterilen siyanoakrilat yapıştırıcı kullanılarak sabitlenmiştir.



Şekil 7.16 Hibrit yapıştırırmalı bağlantının hazırlanması

Yapıştırma öncesi, yapıştırılan malzemeler kalıp içerisinde 40 °C sıcaklıktaki fırında bekletilerek ısıtılmıştır. Isıtma işlemi, yüzeylere uygulanan yapıştırıcıların viskozite

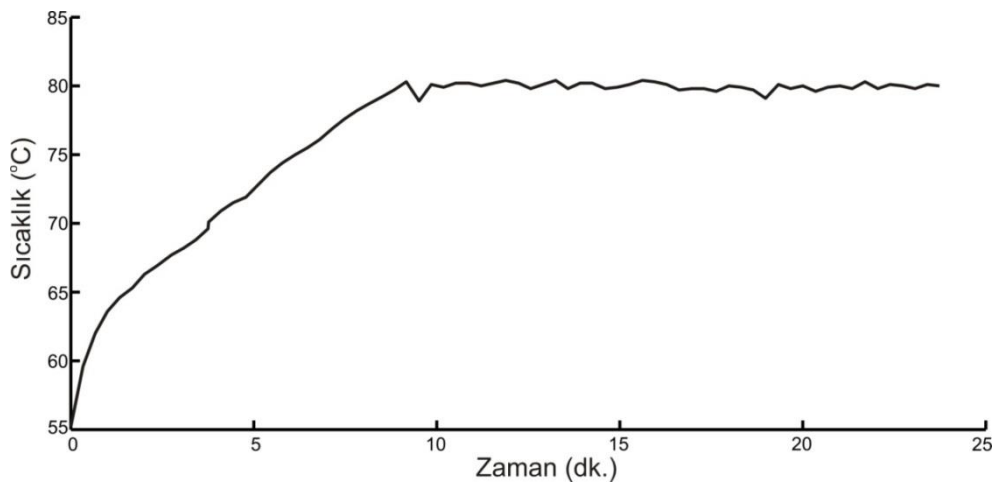
değerini düşürerek, akıcılıklarını ve ıslatma özellikleri arttırmaktadır. Yüzeylere uygulanan yapıştırıcılarda gözle görülen hava kabarcıkları iğne yardımı ile patlatılarak, yüzeylerde yapışmamış bölgelerin oluşması engellenmeye çalışılmıştır.

Yapıştırıcıların kürleşmesi sıcaklık kontrollü fırın içerisinde yapılmıştır. Mono ve hibrit yapıştırırmalı bağlantılarda kullanılan yapıştırıcılar için, Çizelge 7.4’de verilen kürleşme sıcaklıkları ve süreleri kullanılmıştır.

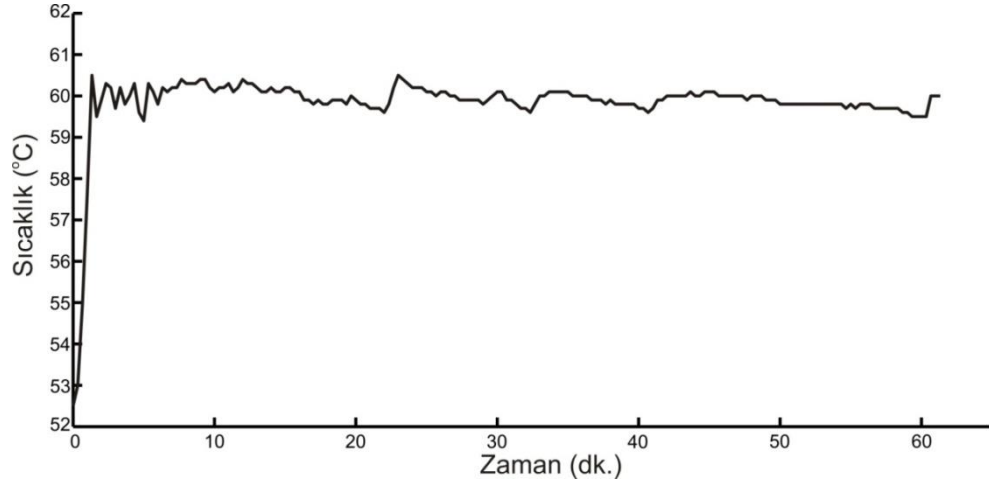
Çizelge 7.4 Yapıştırıcı kürleşme sıcaklıkları ve süreleri [12], [81-83]

	Yapıştırıcı	Sıcaklık (°C)	Zaman (dak.)
Mono	AV138	80	15
	DP-8005	80	60
	2015	60	60
Hibrit	AV138+DP-8005	80	60
	AV138+2015	60	60

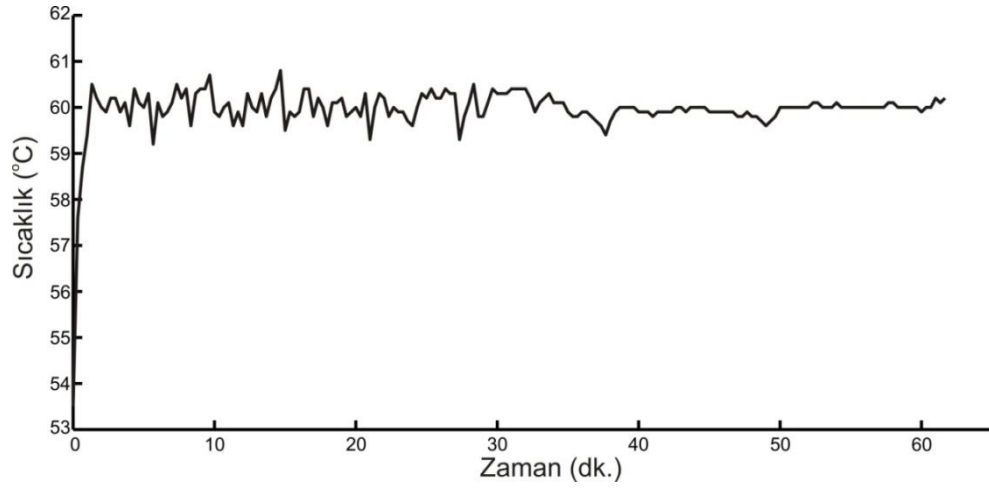
Sıcaklık değişim oranı ve kürleşme süresi, yapıştırma bölgesine yerleştirilen termokupl yardımıyla takip edilmiştir. Kürleşme süresi boyunca, sıcaklık değerleri grafiksel olarak bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Şekil 7.17, 7.18 ve 7.19’da, mono ve hibrit yapıştırırmalı bağlantılar için kaydedilen sıcaklık-zaman grafiklerine ait örnekler verilmektedir. Kürleşme süresi, yapıştırıcı kürleşme sıcaklığına ulaştığı anda başlatılmış ve belirlenen kürleşme süreleri sonunda bağlantılar fırın içerisinden çıkarılarak oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır.



Şekil 7.17 AV138 kürleşme sıcaklık-zaman grafiği



Şekil 7.18 2015 kürleşme sıcaklık-zaman grafiği



Şekil 7.19 AV138+2015 hibrit yapıştırırmalı bağlantı kürleşme sıcaklık-zaman grafiği

Oda sıcaklığındaki numuneler kalıp içerisinden çıkartılmış ve bindirme uzunluğu kenarlarındaki fazla yapıştırıcılar jilet yardımıyla temizlenmiştir. Çekme testi öncesi bağlantılar, Şekil 7.20’de gösterilen son haline getirilmiştir.



Şekil 7.20 Bindirmeli bağlantı

7.4 Bindirmeli Bağlantı Çekme Testi

Hazırlanan mono ve hibrit yapıştırırmalı bağlantılara, Şekil 7.21’de gösterilen SHIMADZU AG-IS (50kN kapasiteli) test cihazında, 1mm/dak. çekme hızında kopma hasarı meydana gelene kadar eksenel çekme yükü uygulanmıştır. Numuneler, cihazın çenelerine 25 mm’lik hizalayıcı kısmını tutacak şekilde bağlanmıştır (Şekil 7.22). Bağlama esnasında yük değerlerinde farklılık meydana getirebilecek eksenel kaçıklıklar oluşmamasına dikkat edilmiştir. Mono ve hibrit yapıştırırmalı bağlantılar için en az üç numune hazırlanmıştır.



Şekil 7.21 SHIMADZU AG-IS 50kN çekme test cihazı



Şekil 7.22 Bindirmeli bağlantı çekme test cihazı çene bağlantısı

Çekme testi başlatılmadan önce, bindirme bölgesi kalınlığı dijital kumpas yardımı ile ölçülerek yapıştırıcı kalınlıkları mono ve hibrit bağlantılar için kontrol edilmiştir. Testler tamamlandıktan sonra, her numune için ulaşılan maksimum yük değeri kaydedilmiştir. Numunelerde meydana gelen hasar tipleri, UNE EN ISO 10365 standardı kullanılarak tanımlanmıştır.

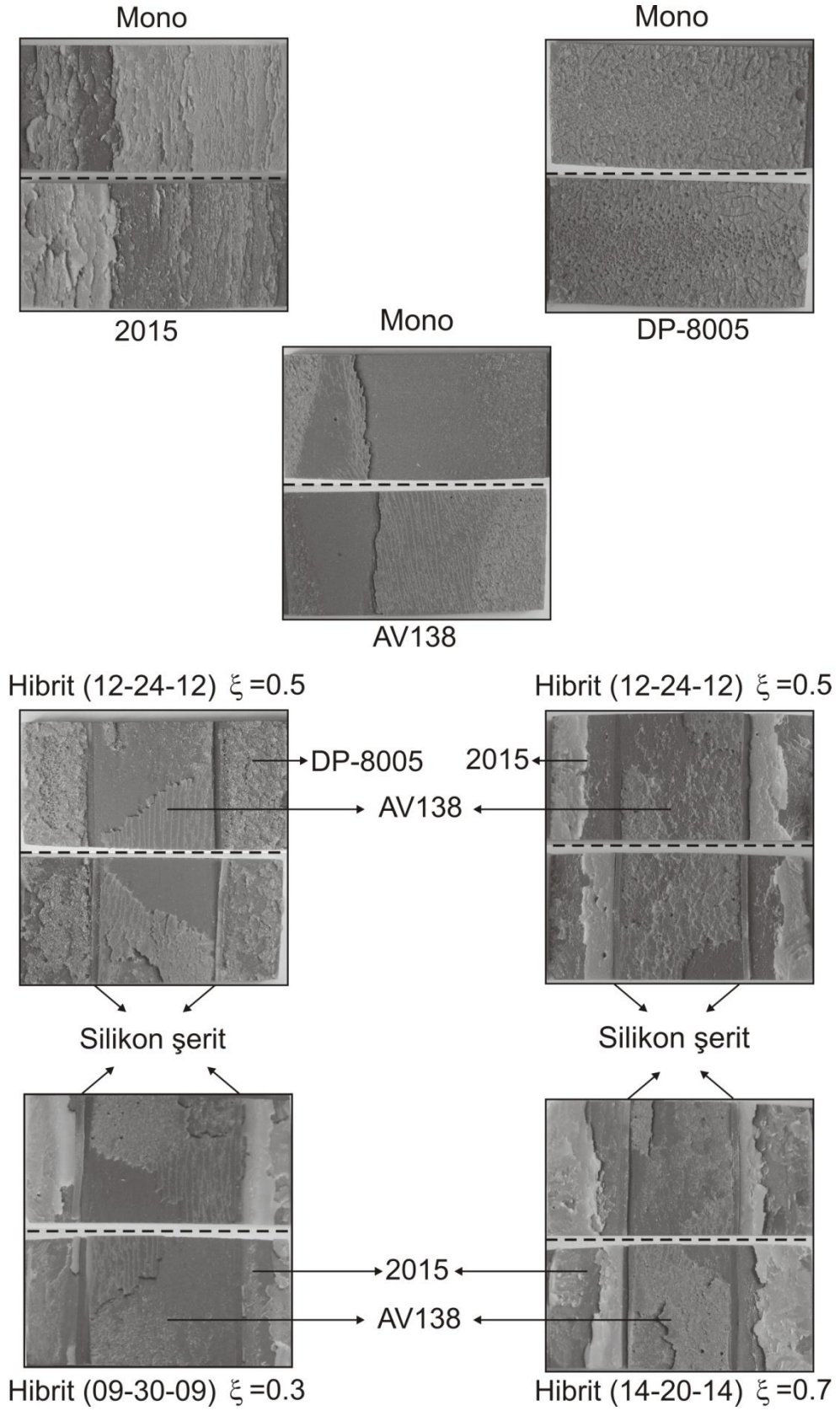
7.5 Deneysel Sonuçlar ve Tartışma

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, özellikle, yüksek hasar yüküne sahip hibrit yapıştırmalı bağlantılar görsel olarak incelendiğinde, yapıştırılan malzemede eğilmeye ve çekmeye bağlı şekil değişiminin meydana gelmediği görülmüştür (Şekil 7.23). Bağlantıların tamamında, hasar yükü değerleri, yapıştırılan malzemenin plastik şekil değişimine neden olabilecek yük değerinin oldukça altındadır. Elde edilen bu sonuç, teorik olarak da tahmin edilen, bindirme uzunluğuna bağlı, yapıştırılan malzeme akma sınırının geçilmediğini deneysel olarak doğrulamıştır.



Şekil 7.23 Hasar uğrayan hibrit yapıştırmalı bağlantı

Hibrit ve mono yapıştırmalı bağlantı hasar yüzeyleri incelendiğinde, yapıştırma yüzey çiftlerinin her ikisinde yapıştırıcının bulunduğu ve koheziv hasar tipi meydana geldiği görülmüştür (Şekil 7.24). Koheziv hasar tipi, kullanılan yapıştırıcıların içyapı dayanımlarının, ara yüzey dayanımlarından düşük olduğunu ve yapıştırma yüzeylerine uygulanan yüzey hazırlama işleminin yeterli olduğunu göstermektedir. Ayrıca, bağlantılarda koheziv hasarın oluşması, her iki bağlantı tipinde yapıştırıcılar için belirlenen kürleşme sıcaklık ve zamanları ile sıcaklık artış oranlarının uygun olduğunu deneysel olarak doğrulamıştır.



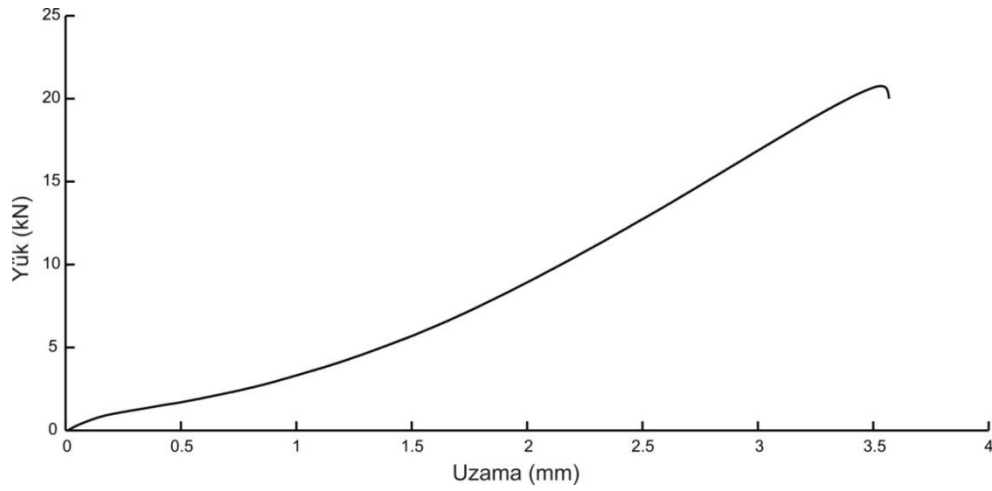
Şekil 7.24 Mono ve hibrit yapıştırırmalı bağlantı hasar yüzeyleri

Şekil 7.24 incelendiğinde, bağlantı hasarının meydana geldiği mono yapıştırıcı bağlantılarda, gevrek ve yüksek dayanıma sahip AV138 yapıştırıcıda, çatlak oluşumu ve ilerlemesinin yön değiştirerek, her iki yapıştırma yüzeyinde ara yüzeye yakın kısımda meydana geldiği görülmektedir. Tok ancak, göreceli olarak gevrek ve yüksek dayanımlı 2015 epoksi yapıştırıcıda çatlak oluşumu ve ilerlemesi AV138 yapıştırıcı ile benzer davranış göstermektedir. Akrilik yapıştırıcı DP-8005 ile hazırlanan bağlantı incelendiğinde, çatlak oluşumu ve ilerlemesi, diğer iki epoksi yapıştırıcıdan farklı olarak, yapıştırıcı orta düzlemi boyunca gerçekleşmiştir. Akrilik yapıştırıcıda meydana gelen hasar davranışı, literatürde yüksek tokluğa sahip sünek yapıştırıcılarda görülen genel davranış şekli ile uyumludur [62]. Hibrit yapıştırıcı bağlantı durumunda, bindirme uzunluğu kenarlarındaki 2015 ve DP-8005, tekil olarak kullanıldıkları mono yapıştırıcı bağlantılar ile benzer hasar davranışını göstermektedir. Hibrit yapıştırıcı bağlantı bindirme uzunluğunun orta kısmında kullanılan AV138 hasar yüzeyleri incelendiğinde, yapıştırıcının tekil olarak kullanıldığı bağlantı durumundan farklı olarak, çatlak oluşumu ve ilerlemesinin yapıştırıcı uzunluğu boyunca yön değiştirmedeği görülmektedir.

Mono ve hibrit yapıştırıcı bağlantılar için, yük-yer değiştirme eğrileri Şekil 7.25-31’de verilmektedir. Mono yapıştırıcı bağlantı hasar yükleri incelendiğinde, çekme yükü altında en yüksek hasar yükünün 2015 yapıştırıcıda meydana geldiği görülmektedir. 2015 için elde edilen hasar yükü değeri AV138 yapıştırıcı hasar yükünün yaklaşık 1.4 katıdır. AV138 hasar yükünün 2015’e göre düşük olması, yük altında düşük plastik şekil değiştirmeye uğraması ve eğilme momentine bağlı oluşan soyulma gerilmelerine ve yapısal hatalara karşı duyarlı olması ile açıklanabilir.

DP-8005 akrilik yapıştırıcının yük altındaki davranışı, 2015 ve AV138 yapıştırıcılara göre daha farklıdır. Şekil 7.30 incelendiğinde, DP-8005 yapıştırıcının en düşük hasar yüküne sahip olmasına rağmen 2015 ve AV138 ile kıyaslandığında daha sünek ve tok yapıya sahip olduğu görülmektedir. DP-8005 için elde edilen hasar yükü değeri ile hasar davranışı, Banea ve Da Silva [91] tarafından çalışmalarında belirtilen, bağlantı dayanımının sadece yapıştırıcının tokluk değerine bağlı olmadığını, aynı zamanda kayma dayanımının da yüksek olması gerektiğini göstermesi açısından önemlidir.

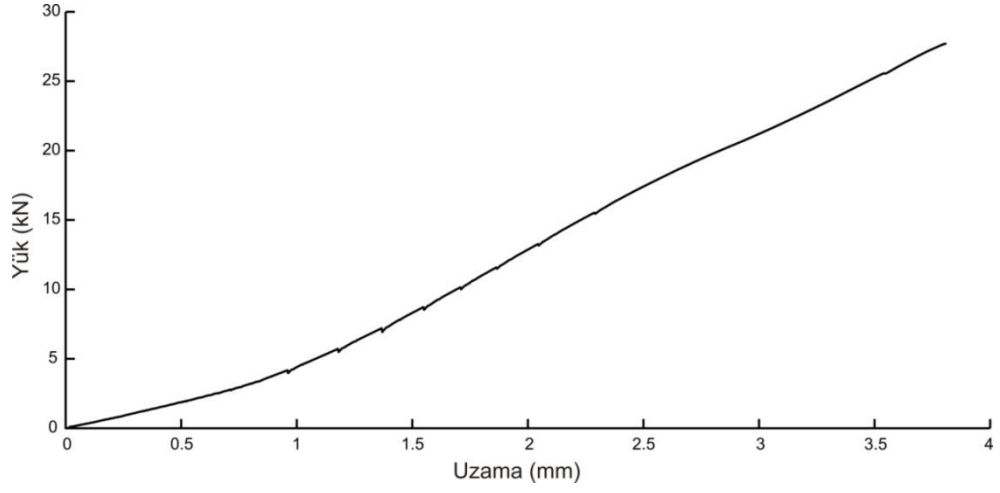
Hibrit yapıştırırmalı bağlantılar için elde edilen en önemli sonuç, hibrit yapıştırırmalı bağlantı dayanımının, bağlantıyı oluşturan yapıştırıcıların tekil kullanılması durumuna göre daha yüksek olmasıdır. AV138 yapıştırıcının, bindirme uzunluğunun ortasında, 2015 ve DP-8005 yapıştırıcılarının kenarlarda kullanıldığı hibrit yapıştırma bağlantıları incelendiğinde, ulaşılan hasar yüklerinin üç yapıştırıcının tekil kullanımına göre daha yüksek olduğu görülmüştür (Şekil 7.27-7.29, Şekil 7.31). AV138 ve 2015 yapıştırıcılar ile oluşturulan, 0.5 uzunluk oranına sahip hibrit yapıştırırmalı bağlantı, mono yapıştırırmalı ve hibrit bağlantılar içerisinde en yüksek hasar yükü değerine ulaşmıştır (Şekil 7.28).



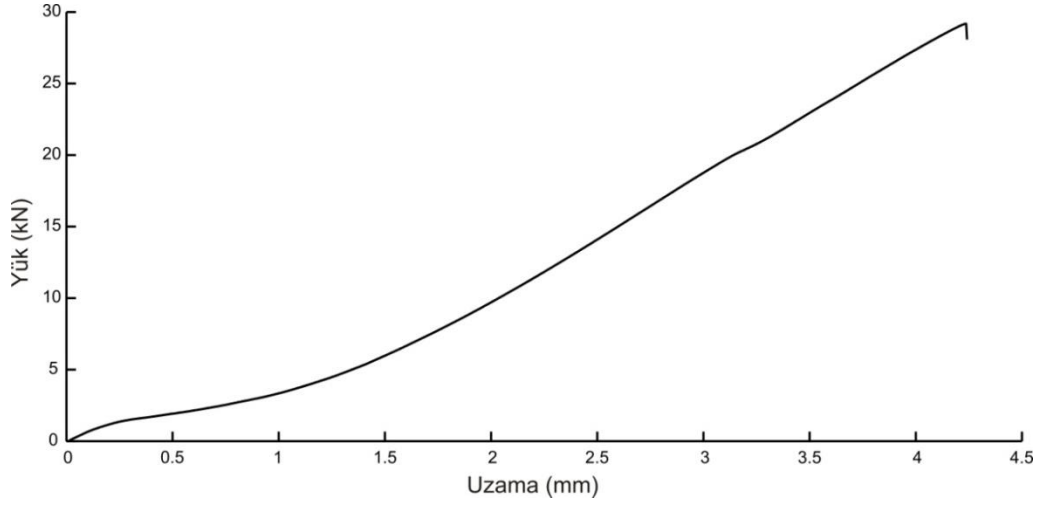
Şekil 7.25 2015 yük-uzama eğrisi



Şekil 7.26 AV138 yük-uzama eğrisi



Şekil 7.27 AV138+2015 hibrit yapıştırırmalı bağlantı ($\xi = 0.3$) yük-uzama eğrisi



Şekil 7.28 AV138+2015 hibrit yapıştırırmalı bağlantı ($\xi = 0.5$) yük-uzama eğrisi



Şekil 7.29 AV138+2015 hibrit yapıştırırmalı bağlantı ($\xi = 0.7$) yük-uzama eğrisi



Şekil 7.30 DP-8005 yük-uzama eğrisi



Şekil 7.31 AV138+DP-8005 hibrit yapıştırırmalı bağlantı ($\xi = 0.5$) yük-uzama eğrisi

Mono ve hibrit yapıştırırmalı bağlantılar için belirlenen deneysel hasar yükleri, Global akma kriteri ve Volkersen teorisi kullanılarak tahmin edilen hasar yükleri ile karşılaştırılmıştır. Tok yapıştırıcının kullanıldığı mono yapıştırırmalı bağlantılarda, tahmini hasar yükünün belirlenmesinde, Global akma kriterinin kullanılması, Volkersen teorisinin kullanımına göre daha uygundur [92]. Ancak, bağlantıda gevrek yapıştırıcı kullanılması durumunda, bu kriter gereğince hasar yükünün hesaplanması uygun değildir. Gevrek yapıştırıcılar için hasar yükünün tahmin edilmesi amacıyla Volkersen modelinin kullanılması daha doğru sonuç vermektedir [87]. Volkersen modelinde, bağlantıda hasar oluşumu, bindirme bölgesinin kenarlarında yapıştırıcının kayma dayanımı aşıldığı durumlarda meydana gelir. Hibrit bağlantı durumunda, Global akma kriterini ve Volkersen modelini birlikte kullanılarak hasar yükü tahmin edilebilir. Global akma

kriteri ve Volkersen modeli beraber kullanılarak oluşturulan hibrit bağlantı analitik hasar yükü tahmininde, her iki yapıştırıcının da maksimum dayanım değerlerine ulaştığı anda hasarın meydana geldiği kabul edilir.

Mono-gevrek yapıştırıcılı bağlantı hasar yükü [12]:

$$F_{MG} = \tau_s \frac{2bl \sinh(\Psi 2l)}{\Psi l (1 + \cosh(\Psi 2l))} \quad (7.9)$$

burada, Ψ değişkeni, $\delta_o = \delta_1 = \delta_2$ kabulü yapılarak, denklem (6.3)'ün tekrar düzenlenmesi ile,

$$\Psi = \sqrt{\frac{G_a}{\delta_a} \left(\frac{2}{E\delta_o} \right)} \quad (7.10)$$

şeklinde elde edilir.

Mono-sünek yapıştırıcılı bağlantı hasar yükü:

$$F_{MS} = \tau_{ys} b 2l \quad (7.11)$$

Hibrit yapıştırırmalı bağlantı hasar yükü Volkersen ve Global akma kriterinin beraber kullanılması ile [12] :

$$F_H = (\tau_{ys} b 2l_f)_{sünek} + \left[\tau_s \frac{2bl_s \sinh(\Psi l_s)}{\Psi l_s (1 + \cosh(\Psi l_s))} \right]_{gevrek} \quad (7.12)$$

şeklinde elde edilir.

Denklem (7.9) ve(7.11)'de τ_s ve τ_{ys} sırasıyla, yapıştırıcının kayma dayanımı ve kayma akma dayanımını belirtmektedir.

Çizelge 7.5'de mono ve hibrit yapıştırırmalı bağlantılar için deneysel hasar yükleri ile analitik çözümlerden elde edilen tahmini hasar yükleri verilmektedir. Mono yapıştırırmalı bağlantı hasar yüklerinin belirlenmesinde Global akma ve Volkersen kriterleri kullanılmıştır. Gevrek yapıştırıcı AV138 için Volkersen kriteri, Global akma kiterine göre, bağlantı hasar yükünü deneysel hasar yüküne daha yakın tahmin etmiştir. Tok yapıştırıcı 2015 için, Global akma kriteri, bağlantı hasar yükünü, Volkersen akma kriterine göre yüksek ve deneysel hasar yüküne yakın tahmin etmiştir. Sünek

yapıştırıcı DP-8005 hasar yükü tahmininde Volkersen ve Global akma kriterleri birbirine yakın sonuçlara sahiptir. Her iki kriterin beraber kullanıldığı hibrit yapıştırırmalı bağlantı hasar yükü tahmininde, yapıştırıcı uzunluk oranının artması ile bulunan sonuçlar, deneysel hasar yükü değerlerine yaklaşmaktadır.

Çizelge 7.5 Mono ve hibrit yapıştırırmalı bağlantı deneysel ve tahmini hasar yükleri

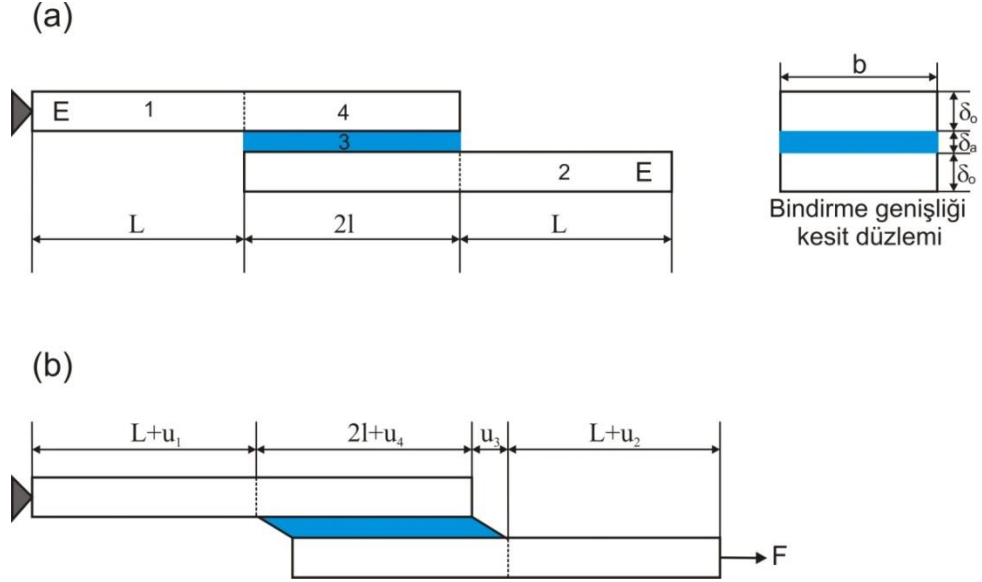
Oran (ξ)	Yapıştırıcılar	Uzunluk (mm)	Hasar yükü (N)		
			Deneysel	Tahmini	
				Volkersen	Global akma Volker+Global akma
Mono	AV138	50	14510	11993	31375
	2015	50	20760	11366	18250
	DP-8005	50	10700	7779	6625
0.5	AV138+DP-8005	12-24-12	20650		14088
0.3	AV138+2015	09-30-09	27690		18062
0.5	AV138+2015	12-24-12	29170		19668
0.7	AV138+2015	14-20-14	25300		20446

7.6 Global Rijitlik

Birçok uygulamada, bağlantının dayanımı kadar, bağlantının rijitliğide önem kazanmaktadır [15]. Beevers v.d [93] çalışmalarında, otomobillerde yapıştırırmalı bağlantıların kullanılması durumunda, gövde rijitliğinin önemli oranda arttırılabileceğini belirtmişlerdir. Owens ve Lee-Sullivan [94], basit bindirmeli bağlantı global rijitlik değerinin belirlenmesi amacıyla, yapıştırılan ve yapıştırıcılardaki şekil değiştirmelerine göre analitik model önermişlerdir. Yazarlar, ayrıca, kompozit-alüminyum yapıştırırmalı bağlantılarda, çatlak ilerlemesine göre, rijitlik kaybını deneysel olarak çalışmışlardır [95]. Önerdikleri analitik model kullanılarak, bağlantının maksimum rijitliğini ve çatlak ilerlemesine bağlı rijitlik kaybının tahmin edilebileceğini belirtmişlerdir.

Bu bölümde, eksenel çekme yükü uygulanan mono ve hibrit yapıştırırmalı bağlantılar için global rijitlik değerlerinin belirlenmesi amacıyla, analitik model oluşturulmuştur. Çekme yükü uygulanan basit bindirmeli bağlantıda, yapıştırılan malzemeler ve

yapıştırıcıda sırasıyla, aksenal yer değıştirmeler ve kayma şekil değışimleri meydana gelmektedir (Şekil 7.32). Bağlantı, bindirme bölgesi (4), yapıştırıcı (3) ve yapıştırılmayan kısımlar (1,2) olmak üzere dört bölgeye ayrılmıştır [94].



Şekil 7.32 Çekme yükü altında basit bindirmeli bağlantı yapıştırıcı ve yapıştırılan şekil değıştirmeleri

Bağlantının tamamı için, Hook kanunu kullanılarak, çekme yükü altında, yapıştırıcı ve yapıştırılanlardaki toplam şekil değışimine bağı global rijitlik denklemi [94],

$$\Gamma_G = \frac{F}{u_T} \quad (7.13)$$

şeklinde yazılabilir.

Bağlantıda meydana gelen toplam şekil değışimi, dört bölge için belirlenen şekil değışimlerinin toplanması ile bulunabilir:

$$u_T = u_1 + u_2 + u_3 + u_4 \quad (7.14)$$

Denklem (7.14)'de, dört bölge için belirtilen şekil değışimleri ayrı ayrı belirlenir. Birinci bölgede meydana gelen şekil değışimi ve rijitlik,

$$u_1 = \frac{FL}{\Lambda_1 E_1} \quad (7.15)$$

$$\Gamma_1 = \frac{F}{u_1} = \frac{\Lambda_1 E_1}{L} \quad (7.16)$$

denklemleri ile belirlenir. Benzer şekilde, ikinci ve dördüncü bölgeler için, yapıştırılan malzemede meydana gelen şekil değişimleri ve rijitlik denklemleri belirlenebilir. Yapıştırıcı için şekil değişimi Hook kanununa göre,

$$\gamma = \frac{u_3}{\delta_a} = \frac{\tau}{G_a} \quad (7.17)$$

şeklinde yazılabilir. Denklem (7.17)'de verilen yapıştırıcı kayma gerilmesi ve kayma modülü aşağıdaki denklemler kullanılarak,

$$\tau = \frac{F}{\Lambda_s} \quad (7.18)$$

$$G_a = \frac{E_a}{2(1+\nu_a)} \quad (7.19)$$

şeklinde yazılabilir. Denklem (7.18) ve (7.19), denklem (7.17)'de yerine konulursa, yapıştırıcı şekil değişimi aşağıdaki gibi elde edilir:

$$u_3 = \frac{2(1+\nu_a)\delta_a F}{E_a \Lambda_s} \quad (7.20)$$

Yapıştırılmayan kısımlar, bindirme bölgesi ve yapıştırıcıdan oluşan dört bölge için şekil değiştirme:

$$u_T = \frac{FL}{\Lambda_1 E_1} + \frac{F 2l}{\Lambda_2 E_1} + \frac{2(1+\nu_a)\delta_a F}{E_a \Lambda_s} + \frac{FL}{\Lambda_4 E_2} \quad (7.21)$$

Burada, $\Lambda_1 = \Lambda_2 = \Lambda_4 = \Lambda$ ve $E_1 = E_2 = E_4 = E$ kabulü yapılarak denklem (7.21) tekrar düzenlenirse,

$$u_T = F \left[\frac{2(L+l)}{\Lambda E} + \frac{2(1+\nu_a)\delta_a}{E_a \Lambda_s} \right] \quad (7.22)$$

elde edilir.

Denklem (7.22)'de, yapıştırılan ve yapıştırıcı alanları için sırasıyla $\Lambda = b\delta_o$ ve $\Lambda_s = 2bl$ ifadeleri yazılarak, denklem (7.22) tekrar düzenlenirse mono yapıştırırmalı bağlantı için toplam şekil değiştirme ifadesi,

$$u_T = \frac{F}{b} \left[\frac{2(L+l)}{\delta_o E} + \frac{(1+\nu_a)\delta_a}{lE_a} \right] \quad (7.23)$$

şeklinde yazılabilir.

Mono yapıştırırmalı bağlantı için global rijitlik,

$$\Gamma_{mono} = \frac{F}{u_T} = \frac{b}{\left[\frac{2(L+l)}{\delta_o E} + \frac{(1+\nu_a)\delta_a}{lE_a} \right]} \quad (7.24)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Hibrit yapıştırırmalı bağlantı durumunda, global rijitlik değerinin hesaplanması amacıyla bindirme bölgesinde iki farklı yapıştırıcı için eşdeğer rijitliğin ($E_{eş}$) belirlenmesi gerekir.

Kumar ve Pandey [15] çalışmalarında, eşdeğer rijitliği,

$$E_{eş} = \frac{2E_3 l_f + E_4 l_s}{2l} \quad (7.25)$$

şeklinde tanımlamaktadır.

Böylece, hibrit yapıştırırmalı bağlantı için global rijitlik değeri, mono yapıştırırmalı bağlantı rijitlik denkleminde, E_a yerine $E_{eş}$ konularak hesaplanabilir:

$$\Gamma_{hibrit} = \frac{F}{u_T} = \frac{b}{\left[\frac{2(L+l)}{\delta_o E} + \frac{(1+\nu_a)\delta_a}{lE_{eş}} \right]} \quad (7.26)$$

Çizelge 7.6'da mono ve hibrit yapıştırırmalı bağlantılar için hesaplanan global rijitlik değerleri verilmektedir. Mono yapıştırırmalı bağlantılar için en yüksek ve en düşük rijitlik değerleri sırasıyla, AV138 ve DP-8005 yapıştırıcıların kullanıldığı bağlantılarda meydana gelmiştir. Hibrit yapıştırırmalı bağlantı rijitlik değerleri, DP-8005 ve 2015 yapıştırıcıların tekil olarak kullanıldığı mono yapıştırırmalı bağlantı rijitlik değerlerinden daha yüksektir ve bindirme uzunluğu boyunca AV138 gevrek yapıştırıcısının en fazla yapıştırma uzunluğuna sahip olduğu 0.3 yapıştırıcı-uzunluk oranında, en yüksek değerine ulaşarak aynı yapıştırıcısının mono bağlantı rijitlik değerine yaklaşmaktadır. Sonuç olarak, hibrit yapıştırırmalı bağlantılarda, rijitlik ve statik dayanım sağlayan AV138 gevrek yapıştırıcısının tekil kullanımına göre yapıştırma uzunluğunun azaltılması, global rijitlik değerinde

önemli bir düşüşe sebep olmamıştır. Hibrit yapıştırırmalı bağlantı global rijitlik değerlerinde, AV138 gevrek yapıştırıcının tekil olarak kullanıldığı mono yapıştırırmalı bağlantı durumuna göre düşüşün az olması ile ideal yapıştırırmalı bağlantı olarak tanımlanan, bindirme uzunluğu boyunca değişken elastik özellik ve dayanım değerlerine sahip olma durumunda da bağlantının yapısal rijitliği önemli ölçüde korunmuştur.

Çizelge 7.6 Mono ve hibrit yapıştırırmalı bağlantı global rijitlik değerleri

Oran (ξ)		Uzunluk (mm)	Global rijitlik (N/mm)	
			Mono	Hibrit
Mono	AV138	50	51551	
	2015	50	50664	
	DP-8005	50	47634	
0.5	AV138+DP-8005	12-24-12		51028
0.3	AV138+2015	09-30-09		51344
0.5	AV138+2015	12-24-12		51257
0.7	AV138+2015	14-20-14		51187

MONO ve HİBRİT YAPIŞTIRMALI BAĞLANTI ANALİTİK ÇÖZÜMLERİ ve SONLU ELEMAN ANALİZLERİ

Sonlu eleman analizleri, yük veya yer değiştirme altında, yapıştırırmalı bağlantılarda meydana gelen gerilme dağılımları ve şekil değişimlerinin belirlenmesi amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Sonlu eleman analizleri kullanılarak, yapıştırırmalı bağlantılar için hasar başlangıcının meydana geldiği yüksek gerilme yoğunluğuna sahip bölgelerin tespit edilmesi mümkündür. Sonlu eleman analizlerinden elde edilen sonuçların doğruluğu birbirinden farklı birçok parametrenin uygun olarak seçilmesine bağlıdır. Kullanılan malzeme modeli, hasar kriteri, eleman tipi ve yoğunluğu, çözüm yöntemi ve model üzerine uygulanan sınır şartları, sonlu eleman analizlerinden elde edilen sonuçların doğruluğu açısından önemlidir.

Bu bölümde, mono ve hibrit yapıştırırmalı bağlantıların lineer ve lineer olmayan sonlu eleman analizleri ile analitik çözümleri yapılmıştır. Sonlu eleman analizleri, ABAQUS sonlu eleman programı kullanılarak yapılmıştır. Deneysel hasar yükleri uygulanan lineer sonlu eleman model ve analitik model çözümlerinden elde edilen gerilme dağılımları karşılaştırılmıştır. Lineer olmayan analizlerde, yapıştırıcının yük altındaki davranışını tanımlamada en uygun model olan eksponansiyel Drucker Prager malzeme modeli kullanılmıştır [96]. Eksponansiyel Drucker Prager malzeme modelinin, mono ve hibrit yapıştırırmalı bağlantı gerilme davranışı üzerine etkisi incelenmiş ve uygun hasar kriterleri kullanılarak bağlantı hasar yükleri belirlenmiştir. Bu bölümün son aşamasında, lineer olmayan analiz hasar yükü değerleri ile deneysel hasar yükleri karşılaştırılmıştır.

8.1 Malzeme Modelleri

Yapıştırılmalı bağlantılarda, sonlu eleman analizlerinde seçilen malzeme modelinin, elde edilen gerilme, şekil değiştirme ve rijitlik değerleri üzerine etkisi fazladır. Yapıştırılmalı bağlantılarda, yapıştırılan malzeme birçok durumda lineer elastik olarak kabul edilmektedir. Bununla birlikte, yapıştırılan malzemede plastik şekil değişimi meydana gelmesi durumunda elasto-plastik malzeme modellerini kullanılması sonuçların doğruluğu açısından önemlidir.

Bağlantıda kullanılan yapıştırıcıların modellenmesinde elasto-plastik malzeme modellerinin kullanılması, yapıştırıcının yük altında davranışının tam olarak tanımlanması açısından lineer elastik modele göre daha uygundur. Sonlu eleman programları içerisinde mevcut von Mises ve Drucker Prager malzeme modelleri, yapıştırıcının yük altında davranışını tanımlamak amacıyla literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır [16], [46], [97-102]. Belirtilen her iki malzeme modeli için, yapıştırıcının akma sınırı üzerinde lineer olmayan gerilme-şekil değiştirme davranışının bilinmesi gerekir. Lineer olmayan gerilme-şekil değiştirme davranışı, çekme, basma veya kayma testleri yapılarak belirlenir. Yapılan çalışmada, yapıştırıcı gerilme-şekil değiştirme değerlerinin belirlenmesi amacıyla tek eksenli çekme testi eğrisi kullanılmıştır. ABAQUS sonlu eleman programında, malzemenin lineer olmayan davranışı, gerçek gerilme ve plastik şekil değiştirme değerleri kullanılarak tanımlanmaktadır. Tek eksenli çekme gerilme-şekil değiştirme değerleri aşağıdaki denklemler kullanılarak gerçek gerilme ve plastik şekil değiştirme değerlerine dönüştürülmüştür;

Gerçek gerilme:

$$\sigma_g = \sigma_{nom} (1 + \varepsilon_{nom}) \quad (8.1)$$

Gerçek şekil değiştirme:

$$\varepsilon_g = \ln(1 + \varepsilon_{nom}) \quad (8.2)$$

Plastik şekil değiştirme:

$$\varepsilon_p = \varepsilon_g - \frac{\sigma_g}{E_a} \quad (8.3)$$

Denklem (8.1), (8.2) ve (8.3)'de;

σ_g : Gerçek gerilme

σ_{nom} : Nominal gerilme

ε_g : Gerçek şekil değiştirme

ε_{nom} : Nominal şekil değiştirme

ε_p : Plastik şekil değiştirmeyi göstermektedir.

8.1.1 Von Mises Kriteri

Von Mises kriterine göre, malzemede akma, kayma şekil değiştirmesi ile oluşur. Eşdeğer gerilme (σ_e), kritik gerilme değerine (σ_o) ulaştığı anda veya deviatorik gerilme tensörünün ikinci invariantı ($\sqrt{3j_2}$) kritik değere ulaştığı zaman, malzemede akma meydana gelir [103].

Von Mises eşdeğer gerilmesi, altı gerilme bileşeni kullanılarak aşağıdaki şekilde belirtilir:

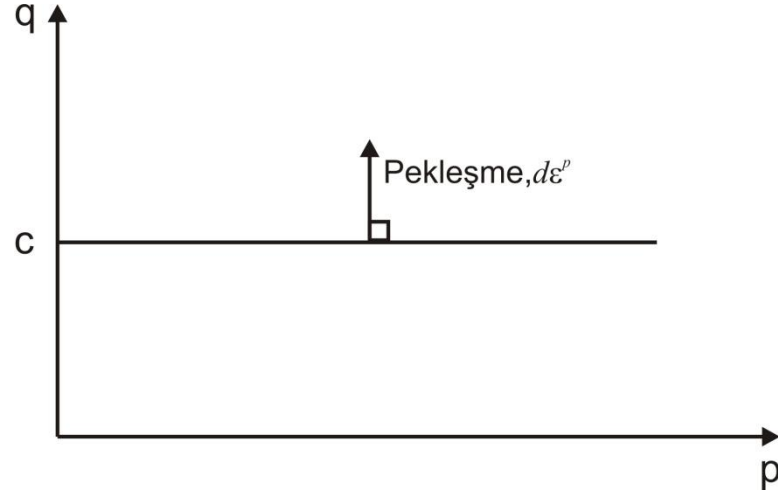
$$\sigma_o = \left\{ \frac{1}{2} \left[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_x)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2) \right] \right\}^{1/2} = \sqrt{3j_2} \quad (8.4)$$

Denklem (8.4), asal gerilme bileşenleri kullanılarak tekrar düzenlenirse:

$$\sigma_o = \left\{ \frac{1}{2} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right] \right\}^{1/2} = \sqrt{3j_2} \quad (8.5)$$

elde edilir.

Şekil 8.1'de meridyonel düzlemde von Mises akma yüzeyi gösterilmiştir.



Şekil 8.1 Meridyonel düzlemde von Mises gerilmesi akma yüzeyi

ABAQUS sonlu eleman programında “p” ve “q” sırasıyla, ortalama hidrostatik ve Mises eşdeğer gerilmelerini belirtmekte ve aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır:

$$q = \sigma_e \quad (8.6)$$

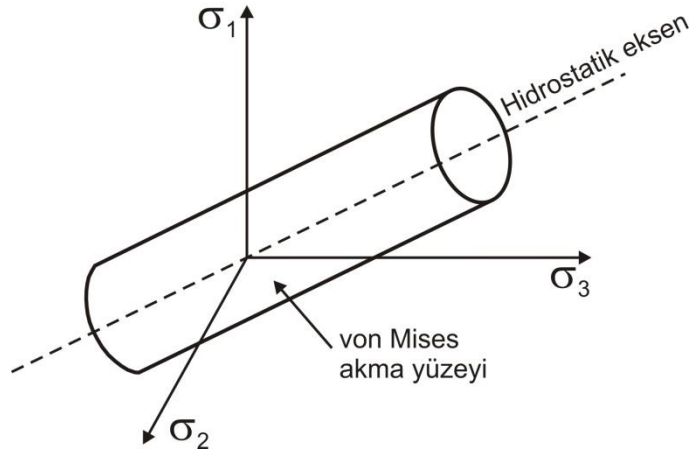
$$p = -\frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = -\frac{1}{3}j_1 \quad (8.7)$$

Burada j_1 , gerilme tensörünün birinci invariantını göstermektedir. Akma yüzeyinin eşitliği

$$q = c \quad (8.8)$$

ile tanımlanır ve c değeri kritik gerilme değeri, σ_o ’a eşittir.

Şekil 8.2’de asal gerilmelere bağlı von Mises akma yüzeyi incelendiğinde, von Mises akma kriterinin hidrostatik gerilmeden bağımsız olduğu görülmektedir. Hidrostatik gerilmeden bağımsız olma, çekme ve basma akma gerilmelerinin aynı olduğu durumlar için geçerlidir.



Şekil 8.2 Asal gerilmelere bağlı von Mises akma yüzeyi

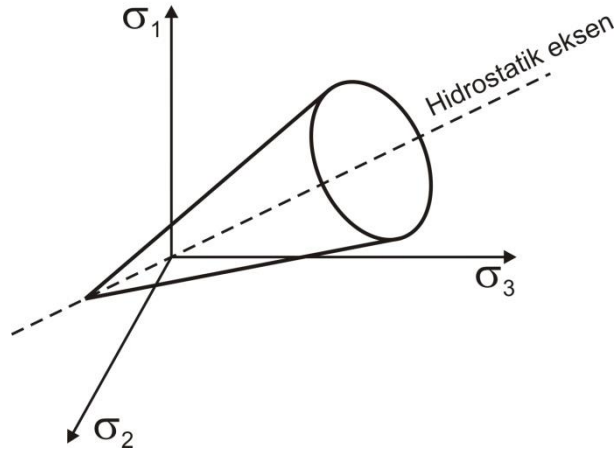
8.1.1.1 Von Mises Akma Kuralı

ABAQUS sonlu eleman programı, von Mises kriteri için sadece bağımlı akma kuralını kullanır ve malzemede hacimsel plastik şekil değişimleri meydana gelmez. Elastik olmayan şekil değiştirme, akma yüzeyinin normali doğrultusundadır (Şekil 8.1). ABAQUS sonlu eleman programı içerisinde, von Mises akma yüzeyi için plastik şekil değiştirme pekleşmesi, akma gerilmesi ve etkin plastik şekil değiştirmeye bağlı pekleşme eğrisi ile tanımlanır [101]. Pekleşme eğrisi çekme akma gerilmesi, σ_{ty} , malzeme parametresidir ve sahip olduğu minimum değer plastik şekil değişiminin başladığı elastik sınırı belirler ve plastik şekil değişimine, ϵ_t^p , bağlı olarak artar. $\sigma_{ty}(\epsilon_t^p)$ pekleşme fonksiyonu olarak adlandırılır.

8.1.2 Drucker Prager Kriteri

Yapıştırıcıların mekanik davranışı, plastik ve visko-plastik teoriler yardımıyla ifade edebilir. Bunlardan, yapıştırıcılar için, en çok kullanılanı Drucker Prager malzeme modelidir. Yapıştırıcıların birçoğu, gerilme durumlarında akma davranışını etkileyen hidrostatik gerilme bileşenleri etkisindedir. Özellikle, bindirmeli bağlantılarda, yapıştırma çizgisi gerilme yoğunluğunun yüksek olduğu kenarlarda, hidrostatik gerilme değerleri yüksek değerlere ulaşır. Von Mises kriteri, hidrostatik gerilmelere bağlı gecikmeli-akma “post-yield” durumunu tanımlayamaz [16]. Ayrıca, von Mises kriterinde, plastik şekil değişimlerinin sabit hacimde meydana geldiği kabul edilir [104]. Drucker Prager akma kriteri, von Mises kriterinin genelleştirilmiş şeklidir [99]. Drucker

Prager malzeme modelinde akma kriteri, von Mises kriterine hidrostatik gerilme etkisi dahil edilerek elde edilir. Şekil 8.3’de, hidrostatik gerilme etkisi altında, asal gerilmelere bağlı Drucker Prager akma yüzeyi gösterilmektedir.



Şekil 8.3 Asal gerilmelere bağlı Drucker Prager akma yüzeyi

8.1.3 Lineer Drucker Prager Kriteri

Lineer Drucker Prager kriteri, von-Mises kriterine hidrostatik gerilme etkisi dahil edilerek,

$$\sigma_e = \sigma_o - \zeta_l \sigma_m \quad (8.9)$$

şeklinde elde edilir [100].

Burada, $\zeta_l = 0$ olması durumunda, Drucker Prager kriteri, von-Mises kriteri ile aynı olacaktır.

Denklem (8.9)’da, σ_o malzeme özelliğidir ve kayma akma gerilmesine τ_y bağlı olarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\sigma_o = \sqrt{3}\tau_y \quad (8.10)$$

σ_m asal gerilmeler cinsinden verilen hidrostatik gerilmedir:

$$\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (8.11)$$

Denklem (8.9), aşağıda belirtilen, ABAQUS sonlu eleman programı içinde mevcut lineer Drucker Prager kriteri tanımı ile uygunluk gösterir;

$$q = d + p \tan \varphi \quad (8.12)$$

Denklem (8.12)'de;

p : Hidrostatik gerilme ($-\sigma_m$)

q : Mises eşdeğer gerilmesini

d : Malzemenin kohezyonunu ($d = \sigma_o$)

φ : Lineer akma yüzeyinin eğimini ve malzemenin sürünme açısını göstermektedir.

Malzemenin sürünme açısı, basma ve çekme akma gerilmesi değerlerine bağlı olarak belirlenebilir [105]. Malzeme özelliği olan sürünme açısı aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\tan \varphi = 3 \left(\frac{\left[\frac{\sigma_{cy}}{\sigma_{ty}} \right] - 1}{\left[\frac{\sigma_{cy}}{\sigma_{ty}} \right] + 1} \right) \quad (8.13)$$

Denklem (8.13)'de, $\left[\frac{\sigma_{cy}}{\sigma_{ty}} \right]$ yerine, basma akma gerilmesinin, çekme akma gerilmesine oranını belirten ζ ifadesi yerleştirilir ve tekrar düzenlenirse;

$$\tan \varphi = 3 \left(\frac{\zeta - 1}{\zeta + 1} \right) = \zeta_l \quad (8.14)$$

şeklini alır.

Burada, ζ_l parametresi, yapıştırıcıya bağlı olarak değişir ve akmanın hidrostatik gerilmeye olan duyarlılığını tanımlar.

8.1.3.1 Lineer Drucker Prager Akma Kuralı: Bağımlı Plastik Akma

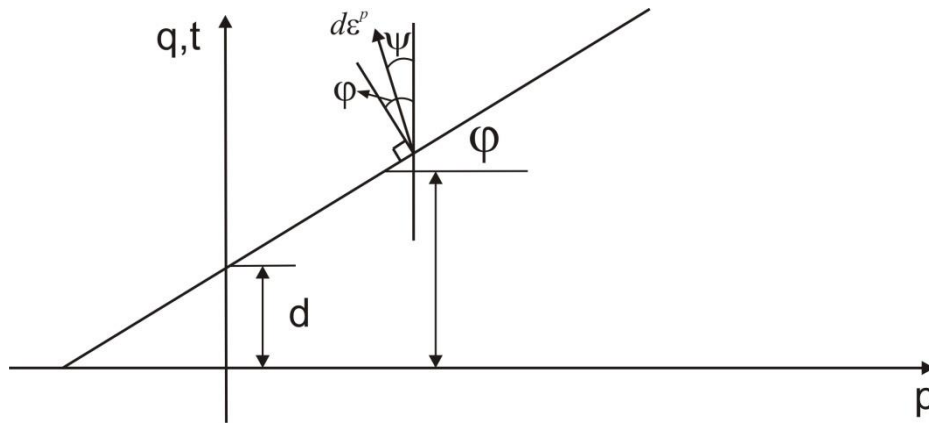
Plastisite teorisine bağlı olarak plastik şekli değiştirme bileşenleri akma kuralına bağlı olarak hesaplanır. Plastik şekil değişimindeki artış, plastik akma potansiyeli f ile aşağıdaki şekilde tanımlanır [99];

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}^p} \quad (8.15)$$

Bazı malzemeler için, akma potansiyeli, f , akma fonksiyonu ile tanımlanır ve akma “bağımlı plastik akma” adını alır. Bu durumda, denklem (8.12) göz önüne alınarak “bağımlı plastik akma” için akma potansiyeli aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$f = q - d - p \tan \varphi = 0 \quad (8.16)$$

Şekil 8.4’de meridyonel düzlemde lineer Drucker Prager akma yüzeyi gösterilmektedir. Akma potansiyeli ile akma fonksiyonunun aynı olması durumunda lineer Drucker Prager modeli için dilatasyon ve sürünme açıları eşit ($\psi = \varphi$) olur ve plastik akma tamamıyla bağımlıdır. Dilatasyon açısının sıfıra eşit olması ($\psi = 0$) durumunda ise malzemede hacimsel genleşme davranışı meydana gelmez [105].



Şekil 8.4 Meridyonel düzlemde lineer Drucker Prager akma yüzeyi [106]

8.1.3.2 Lineer Drucker Prager Akma Kuralı: Bağımsız Plastik Akma

Bağımsız akma için genel f fonksiyonu aşağıdaki şekli ile tanımlıdır:

$$f = q - p \tan(\psi) - d = 0 \quad (8.17)$$

Bağımsız akmada sürünme açısı dilatasyon açısına eşit değildir. Denklem (8.12)’de sürünme açısı yerine dilatasyon açısı yerleştirilir. Dilatasyon açısı, deneysel olarak tespit edilmesi gereken malzeme özelliğidir ve genellikle sürünme açısından küçüktür ($\psi < \varphi$). Dilatasyon açısının belirlenmesinde, Poisson oranının plastik bileşenleri kullanılır [107]:

$$\tan \psi = \frac{3(1 - 2\nu^p)}{2(1 + \nu^p)} \quad (8.18)$$

Burada ν^p , poisson oranının plastik bileşenidir ve tek eksenli çekme durumunda aşağıdaki şekli ile belirlenir [99]:

$$\nu^p = \frac{-\varepsilon_t^p}{\varepsilon_T^p} \quad (8.19)$$

8.1.4 Ekspansiyel Drucker Prager Kriteri

Lineer Drucker Prager kriteri, hidrostatik gerilmenin akmaya olan etkisini içersede, tok yapıştırıcıların önemli bir kısmının ve toklaştırılmış malzemelerin lineer olmayan davranışını tanımlada yetersizdir. Ayrıca, bindirmeli bağlantılarda, yüksek hidrostatik çekme durumunda meydana gelen gerilme durumlarını tanımlamak için de yetersizdir [99], [108]. Lineer Drucker Prager kriterinin, malzeme davranışını tanımlamada yetersiz olduğu durumlarda, ekspansiyel Drucker Prager kriterinin kullanılması, sonuçların doğruluğu açısından önemlidir. Literatürde [46], [97], Raghava kriteri olarak da bilinen ekspansiyel Drucker Prager kriteri aşağıdaki şekli ile verilebilir:

$$\sigma_e^2 = \zeta \sigma_{ty}^2 - 3(\zeta - 1) \sigma_{ty} \sigma_m \quad (8.20)$$

Burada ζ , hidrostatik gerilme duyarlılık parametresidir ve aşağıdaki şekilde hesaplanabilir;

$$\zeta = \frac{\sigma_{cy}}{\sigma_{ty}}, \quad \zeta = \frac{\sigma_{cy}^2}{3\tau_y^2}, \quad \zeta = \frac{\tau_y^2}{3\sigma_{ty}^2} \quad (8.21)$$

Ekspansiyel Drucker prager kriteri ABAQUS sonlu eleman programı içerisinde aşağıdaki şekli ile tanımlanır:

$$aq^n = p + p_t \quad (8.22)$$

Burada, n parametresi, akma yüzeyinin şeklini belirler. Denklem (8.22)'de, $n = 2$ özel durumunda, Raghava ve ekspansiyel Drucker Prager kriterleri birbirine eşit olur.

Denklem (8.22) içerisindeki değişkenler aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$a = \frac{1}{3\sigma_{ty}(\zeta - 1)} \quad (8.23)$$

$$p_t = a\zeta\sigma_{ty}^2 \quad (8.24)$$

8.2 Yapıştırırmalı Bağlantı Hasar Kriterleri

Yapıştırırmalı bağlantılarda, bağlantı hasar yükünün belirlenmesi amacıyla en uygun hasar kriterinin seçilmesi, elde edilen sonuçların doğruluğu açısından önemlidir. Hasar kriterinin seçiminde, bağlantı geometrisi ve kullanılan yapıştırıcıların mekanik özellikleri göz önüne alınmalıdır. Kritik gerilme ve şekil değiştirme değerlerini temel alan maksimum gerilme ve şekil değiştirme, literatürde ve endüstriyel uygulamalarda kullanılan yaygın hasar kriteri yaklaşımlarıdır [109]. Maksimum gerilme ve şekil değiştirme hasar kriterlerine göre, bağlantı içerisinde herhangi bir noktada kritik gerilme veya şekil değiştirme değerine ulaşıldığı anda bağlantı hasarının olduğu kabul edilir [110].

8.2.1 Maksimum Kayma Gerilmesi Kriteri

Greenwood vd. [111], maksimum kayma gerilmesi hasar kriterini, farklı yükleme koşulları altında, basit bindirmeli bağlantı dayanımını belirlemek amacıyla kullanmıştır. Çalışmalarında, G-R kapalı çözümünü kullanarak, yapıştırıcı içerisinde 45 derecelik kesit boyunca maksimum kayma gerilmesi değerine ulaşıldığını belirlemişlerdir. Bulk yapıştırıcı çekme testinden elde ettikleri maksimum kayma gerilmesi değerine bağlı belirledikleri bağlantı dayanımını yaklaşık %14 daha düşük bulmuşlardır.

8.2.2 Maksimum Soyulma Gerilmesi Kriteri

Maksimum soyulma gerilmesi kriterinin kullanımı, sınırlı sayıda bağlantı çeşidi için uygundur ve yapıştırılan malzemede akma meydana gelmesi durumunda, bu kritere göre yapılan tahminlerde hata oranı önemli ölçüde artmaktadır [112].

8.2.3 Maksimum Asal Gerilme Kriteri

Gevrek yapıştırırmalı bağlantılarda hasara neden olan en önemli gerilme bileşeni maksimum asal gerilmedir. Bağlantıda çatlak başlangıcı ve ilerlemesi maksimum asal gerilmelerin normal doğrultusundadır [113], [114].

Harris ve Adams [115], elasto-plastik sonlu eleman analizi kullanılarak yaptıkları çalışmada, gevrek hasar davranışına sahip tok olmayan yapıştırıcı kullanılan basit

bindirmeli bağlantı dayanımının, maksimum asal gerilme kriteri kullanılarak belirlenebileceğini belirtmişlerdir. Maksimum asal gerilme kriteri kullanarak belirledikleri basit bindirmeli bağlantı dayanımını yaklaşık %10 hata ile tahmin etmişlerdir.

8.2.4 Maksimum von Mises Eşdeğer Gerilme Kriteri

Maksimum von Mises eşdeğer gerilme kriteri Ikegami vd. [116] tarafından, elastik sonlu eleman analizi kullanılarak, kompozit-metal eğik bindirmeli bağlantıların (scarf joints) dayanımını belirlemek için kullanılmıştır. Pires vd. [16], basit bindirmeli bağlantı gerilme dağılımlarını, lineer olmayan sonlu eleman analizi kullanarak elde etmişlerdir. Bağlantıda gevrek olmayan sünek yapıştırıcı kullanılması durumunda, bağlantı hasarının belirlenmesinde, von Mises eşdeğer gerilme değerinin kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Sayman [117], yapmış olduğu elasto-plastik analizlerde, bindirmeli bağlantıda kullandığı yapıştırıcıyı tok malzeme olarak tanımlamış ve yapıştırıcının akma koşulu kontrolünde von Mises kriterini kullanmıştır. Campilho vd. [118] çalışmalarında, tok yapıştırıcı kullanılarak hazırladıkları bağlantılarda, yapıştırıcı hasarının global akmaya bağlı meydana geldiğini belirtmiş ve global davranışı büyük kayma bileşenleri içeren tok yapıştırıcısının modellenmesinde von Mises kriterini kullanmışlardır.

Ancak, hidrostatik gerilme bileşenlerinin ihmal edildiği von Mises kriteri, özellikle kenarlarda gerilme yoğunluklu bölgelerin meydana geldiği, basit bindirmeli bağlantı hasar yükünün tahmin edilmesinde yetersiz kalmaktadır. Eşdeğer gerilme değerine bağlı hasar tahmininde, hidrostatik gerilme etkisini çözüme dahil edildiği Drucker Prager kriterinin elasto-plastik sonlu eleman analizi ile beraber kullanılması geçerli hasar yükünün belirlenmesinde daha doğru bir yaklaşım olabilir.

8.2.5 Maksimum Kayma Şekil Değiştirme Kriteri

Hart-Smith [119] tarafından önerilen maksimum şekil değiştirme teorisi hava-uzay endüstrisinde, kompozit ve metal bağlantıların dayanımını belirlemek amacıyla geniş şekilde kullanılmaktadır [109]. Hart-Smith [119], kısa bindirme uzunlukları için, bağlantı hasarının, bindirme kenarlarında yapıştırıcıda meydana gelen kayma şekil değişimlerine bağlı olarak meydana geldiğini belirtmiştir. De Morais vd. [98], sonlu eleman

analizlerinde, elastik-mükemmel plastik (elastic-perfectly plastic) malzeme davranışının kullanılması durumunda, şekil değiştirme esaslı bağlantı hasar tahmininin kullanılmasının daha uygun olduğunu belirtmişlerdir. Yazarlar, yapmış oldukları çalışmada, TAS testi (Thick adherend shear test) ile belirlenen en yüksek kayma şekil değiştirme değerini kullanılarak, basit bindirmeli bağlantı dayanımını, %-19.0 ve %12.4 aralığında değişen hata oranlarında tahmin etmişlerdir. Ayrıca, basit bindirmeli bağlantıda tok yapıştırıcı kullanılması durumunda, maksimum kayma şekil değiştirme kriteri kullanılarak oldukça doğru sonuçlar elde edilebilmektedir [120].

8.2.6 Maksimum Asal Şekil Değiştirme Kriteri

Harris ve Adams [115] çalışmalarında, akma gerçekleşikten sonra önemli oranda yük taşıyabilen tok yapıştırıcılar için, maksimum asal şekil değiştirmenin, maksimum asal gerilme kriterine göre daha uygun olduğunu belirtmişlerdir. Elasto-plastik sonlu eleman analizi kullanarak yaptıkları çalışmada, basit bindirmeli bağlantı dayanımı, kabul edilebilir doğrulukta belirlenmiştir.

8.3 Sonlu Eleman Modelinin Tanımlanması

Lineer ve lineer olmayan sonlu eleman analizlerinin doğru olarak yapılabilmesi, deneysel olarak belirlenen yapıştırıcı ve yapıştırılan malzeme özelliklerinin sonlu eleman programı içerisinde kullanılan malzeme modeline uygun şekilde tanımlanması ile olur. Çalışmanın deneysel kısmında kullanılan yapıştırıcılar ve yapıştırılan malzemenin tanımlanmasında literatürde konu ile ilgili yapılan çalışmalardan yararlanılmış ve malzeme özellikleri kısmında detaylı olarak verilmiştir.

Mono ve hibrit yapıştırmalı bağlantı sonlu eleman modellerine, lineer sonlu eleman analizlerinde deneysel hasar yükü, lineer olmayan sonlu eleman analizlerinde ise yer değiştirme uygulanmıştır. Lineer olmayan analizlerde bağlantıda yapıştırma çizgisi boyunca gerilme dağılımının belirlenmesinde eksponansiyel Drucker Prager malzeme modeli kullanılmıştır. Analizlerde, mono-gevrek ve mono-tok yapıştırmalı bağlantılar ile deneysel çalışmalarda en yüksek hasar yüküne ulaşılan gevrek ve tok yapıştırıcının beraber kullanıldığı hibrit yapıştırmalı bağlantılar incelenmiştir. Tok yapıştırıcı hasar yükü, yapıştırıcı içerisinde herhangi bir noktada meydana gelen maksimum eşdeğer

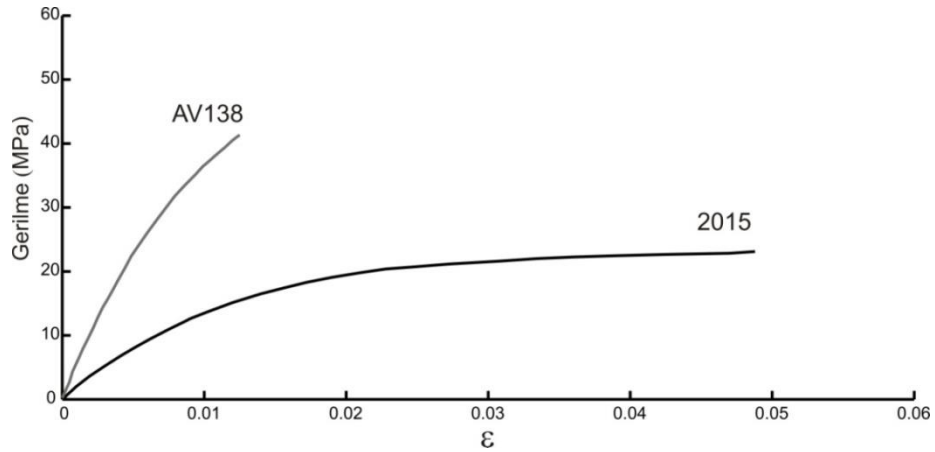
gerilme değerine göre belirlenmiştir. Gevrek ve hibrit yapıştırıcı bağlantı hasar yükünün belirlenmesinde, yapıştırıcı çizgisi boyunca herhangi bir noktada meydana gelen maksimum asal gerilme değeri kullanılmıştır.

Sonlu eleman analizlerinin tamamında yapıştırıcı içerisinde hata olmadığı ve deneysel çalışmalar sonucunda da elde edilen koheziv hasar tipinin meydana geldiği kabul edilmiştir. Yapıştırıcı gerilme bileşenlerini bindirme uzunluğu boyunca dağılımı, yapıştırıcı orta düzlemi boyunca incelenmiştir.

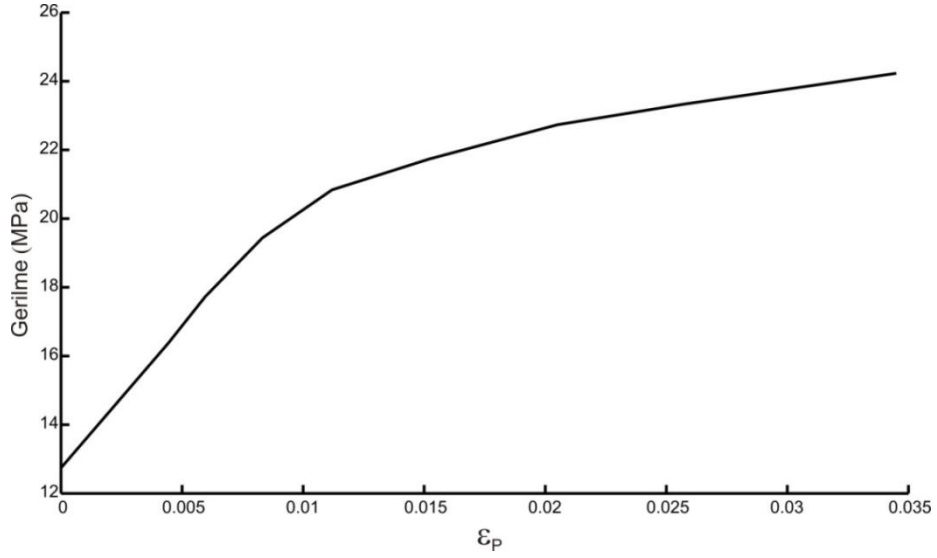
Yapıştırıcı bağlantı modelinin oluşturulmasında ABAQUS/CAE sonlu eleman programı kullanılmıştır. Modelin hazırlanma aşamaları sırasıyla, malzeme özelliklerinin belirlenmesi ve girilmesi, geometrinin oluşturulması, sınır şartlarının belirlenmesi, yükleme ve çözüm adımlarının uygulanması ile ağ yapısının oluşturulmasından meydana gelmektedir.

8.3.1 Malzeme zellikleri

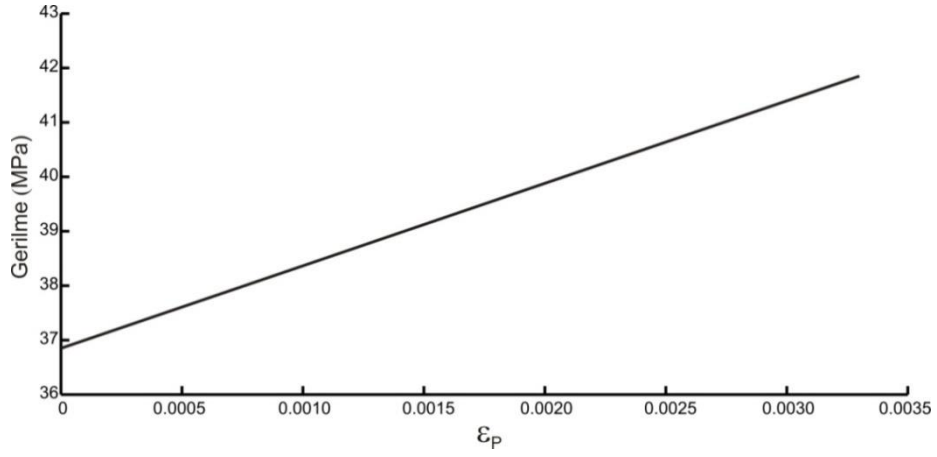
Lineer olmayan sonlu eleman analizlerinde, yapıştırıcı bulk numunelerinin tek eksenli çekme deneyi gerilme-şekil değiştirme davranışları dikkate alınmıştır (şekil 8.6). Çekme testi gerçek gerilme-plastik şekil değiştirme grafik değerleri denklem (8.1), (8.2) ve (8.3) kullanılarak belirlenmiştir. şekil 8.7 ve 8.8 sırasıyla, 2015 ve AV138 yapıştırıcılar için gerçek gerilme-plastik şekil değiştirme eğrilerini göstermektedir.



şekil 8.6 AV138 ve 2015 gerilme-şekil değiştirme eğrisi [102]



Şekil 8.7 2015 gerçek gerilme-plastik şekil değiştirme eğrisi



Şekil 8.8 AV138 gerçek gerilme-plastik şekil değiştirme eğrisi

Çizelge 8.1 ve 8.2, 2015 ve AV138 yapıştırıcıların sonlu eleman analizlerinin çözümünde kullanılan, elastik ve plastik özellikleri ile beraber eksponansiyel Drucker Prager parametrelerini göstermektedir.

Çizelge 8.1 2015 yapıştırıcı için eksponansiyel Drucker Prager modelinde kullanılan malzeme özellikleri [102]

Elastik		Elastisite modülü (MPa)	Poisson oranı	
		1850	0.33	
Eksponansiyel Drucker Prager	ζ	a	n	
	1.4	0.041	2	
Pekleşme eğrisi		Şekil 8.7		

Çizelge 8.2 AV138 yapıştırıcı için eksponansiyel Drucker Prager modelinde kullanılan malzeme özellikleri [102]

Elastik	Elastisite modülü (MPa)	Poisson oranı
	4590	0.35
Eksponansiyel Drucker Prager	ζ	a
	1.3	0.03045
Pekleşme eğrisi	Şekil 8.8	n
		2

Çizelge 8.3, DIN C75 sulu çelik malzeme özelliklerini göstermektedir.

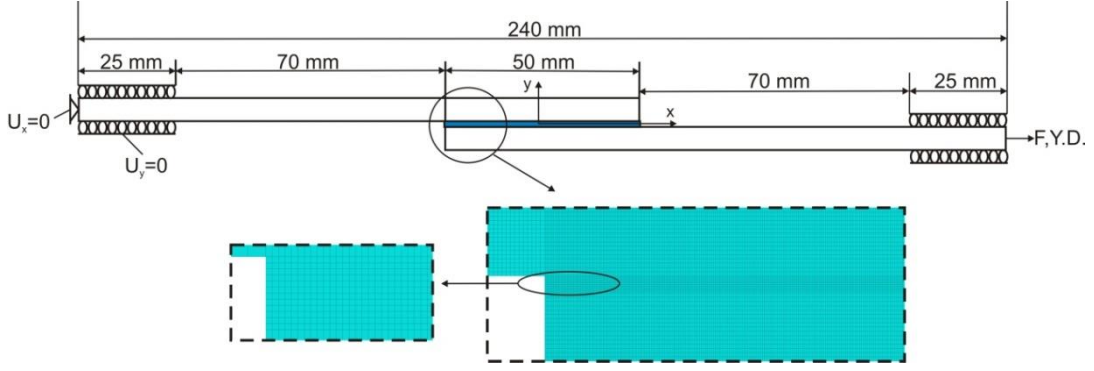
Çizelge 8.3 DIN C75 sulu çelik malzeme özellikleri [12], [121]

Elastisite modülü (MPa)	Poisson oranı	Çekme akma dayanımı (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)
198300	0.29	1260	1413

8.3.2 Sınır Şartları ve Sonlu Eleman Ağ Yapısı

Şekil 8.9’da sonlu eleman modeli sınır şartları ve ağ yapısı gösterilmektedir. Bağlantının sabit ve yük uygulanan kenarlarına, deneysel çalışmalarda, eksenelliği sağlamak amacıyla yapıştırılan hizalama levhaları, sonlu eleman analizlerinde kullanılmamıştır. Bağlantının, çekme test cihazı tarafından tutulan, sabit ve yük uygulanan kenarlarının hareketi düşey yönde kısıtlanmıştır ($U_2=0$). Ayrıca sabit kenarın hareketi yatay yönde kısıtlanarak ($U_1=0$) yük altında yer değiştirmesi engellenmiştir. Sonlu eleman analizlerinde, deneysel çalışmalarda kullanılan hibrit yapıştırma bağlantısı yapıştırıcı-uzunluk oranları kullanılmıştır.

Lineer sonlu eleman analizlerinde, modele, deneysel hasar yükleri uygulanmıştır. Lineer olmayan sonlu eleman analizlerinde, sonuçların yakınsamasını (convergence) kolaylaştırmak amacıyla bağlantıya deneysel hasar yükü yerine yer değiştirme sınır koşulu uygulanmıştır. Lineer olmayan sonlu eleman analiz hasar yükleri, sabit veya yer değiştirme sınır şartı uygulanan kenarlara bağlı düğümlerde oluşan reaksiyon kuvvetleri toplanarak belirlenmiştir.



Şekil 8.9 Sonlu eleman modeli sınır şartları ve ağ yapısı

Yapıştırırmalı bağlantı, çözüm süresinin kısaltılması amacıyla 2-B olarak modellenmiştir. Modelin çözümünde, düzlem zorlanma kabulü yapılmıştır. Düzlem zorlanma; genişliği, kalınlığına oranla oldukça fazla olan basit bindirmeli bağlantılar için geçerli bir yaklaşımdır [122]. Düzlem şekil değiştirme kabulüne bağlı olarak, bağlantı genişliği boyunca şekil değiştirme değerlerinin sıfır olduğu kabul edilmiştir.

Yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemelerin ağ yapısı, çözüm süresini önemli oranda düşüren, iki boyutlu, dört düğümlü, düzlem şekil değiştirme elemanları (CPE4R) kullanılarak oluşturulmuştur.

Sonlu eleman analizlerinde kullanılan ağ yapısı, çözümün doğruluğunu etkileyen en önemli parametrelerdendir. Yapıştırırmalı bağlantılarda, özellikle gerilme yoğunluğunun yüksek olduğu yapıştırıcı kenarlarında, gerilme ve şekil değiştirme değerlerinin doğru olarak belirlenmesi, belirtilen bu bölgelerde eleman sayısı arttırılarak sağlanabilir. Şekil 8.9'da mono yapıştırırmalı bağlantı ağ yapısı görülmektedir. Çalışmada yapıştırıcı kenarlarındaki eleman yoğunluğunu arttırmak amacıyla, ABAQUS sonlu eleman ağ modülü içerisinde mevcut otomatik yönlendirme (automatic bias) seçeneğinden faydalanılmıştır. Hibrit ve mono yapıştırırmalı bağlantı sonlu eleman modelleri, ağ yapısını oluşturan sonlu elemanlar, aynı geometrik ölçülere sahip olacak şekilde ayrıştırılmıştır. Yapıştırıcı ve yapıştırılanlar sırasıyla, 12 ve 16 elemana bölünmüştür. Sonlu eleman ağı oluşturulan mono ve hibrit yapıştırırmalı bağlantı modelleri toplam 42175 düğüm noktası ve 40896 elemandan oluşmaktadır.

8.3.3 Sonlu eleman Analiz Adımları

Lineer ve lineer olmayan analizlerin tamamında statik çözüm kullanılmıştır. Lineer olmayan analizlerin çözümde, bağlantının yer değiştirmesine bağlı olarak oluşan lineer olmayan etkiler çözüme dahil edilmiştir. Çözüm yöntemi olarak “Newton” metodu kullanılmıştır. Lineer olmayan analizlerde, uygulanan yer değiştirme artışı olarak yüz adımda uygulanmıştır.

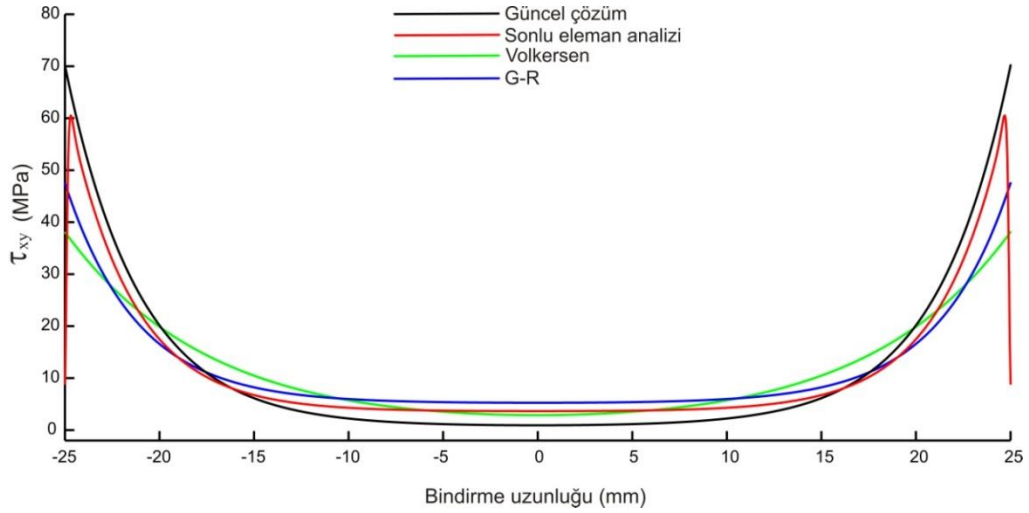
8.4 Analitik Model ve Lineer SEA Çözümleri

Mono ve hibrit yapıştırırmalı bağlantı lineer sonlu eleman analizlerinde, deneysel çalışmalardan elde edilen hasar yükleri kullanılmıştır. Mono yapıştırırmalı bağlantılar için, güncel, Volkersen ve G-R analitik modelleri ile 2-B sonlu eleman analiz çözümlerden elde edilen kayma ve soyulma gerilmesi dağılımları karşılaştırılmıştır. Güncel analitik model ifadesi, hibrit yapıştırırmalı bağlantılar için Bölüm 6.2’de elde edilen analitik modeli belirtmek amacıyla kullanılmıştır. Hibrit yapıştırırmalı bağlantılar için, güncel analitik model çözümü ile 2-B sonlu eleman analiz çözümleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca, analitik modellerden elde edilen kayma ve soyulma gerilmesi değerleri, sonlu eleman çözümlerinden elde edilen ve aynı gerilme bileşenleri için belirlenen değerler ile karşılaştırılarak, yüzde hata miktarları belirlenmiştir. Son olarak, mono ve hibrit yapıştırırmalı bağlantı tam kayma dayanımı kapasiteleri, ortalama kayma gerilmesi ve sonlu eleman kayma gerilmesi değerleri karşılaştırılmıştır.

8.4.1 Mono Yapıştırırmalı Bağlantılar Analitik ve Lineer SEA Sonuçları

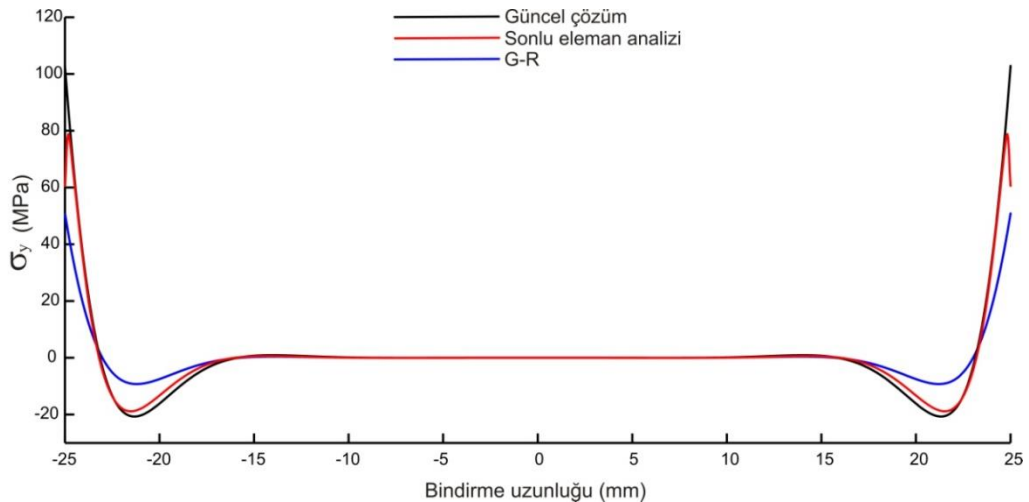
Şekil 8.10 ve 8.11’de sırasıyla, AV138 mono yapıştırırmalı bağlantı için kayma ve soyulma gerilme bileşenlerinin, yapıştırma çizgisi orta düzlemi boyunca dağılımı gösterilmektedir. Kayma gerilmesi dağılımı için üç farklı analitik çözüm ve 2-B lineer sonlu eleman analiz çözümleri karşılaştırılmıştır (Şekil 8.10). Güncel çözüm ve lineer sonlu eleman analiz sonuçları arasında maksimum gerilme bileşeni değerleri karşılaştırıldığında önemli bir fark olmadığı görülmektedir. Eğilme etkisinin ihmal edildiği Volkersen çözümü en düşük kayma gerilmesi değerini vermektedir. Ayrıca, Volkersen çözümünden elde edilen gerilme dağılımı, diğer çözümler ile karşılaştırıldığında daha homojen davranış göstermektedir.

Eğilme etkisinin dahil edildiği G-R çözümü, Volkersen çözümü ile karşılaştırıldığında, daha yüksek kayma gerilmesi değerlerine ulaşmaktadır. Dört farklı çözümün sonucu, bağlantı emniyeti açısından kıyaslandığında, güncel çözümün daha emniyetli olduğu söylenebilir.



Şekil 8.10 Mono yapıştırırmalı bağlantı lineer analiz: AV138 yapıştırıcı orta düzlemi kayma gerilmesi dağılımı

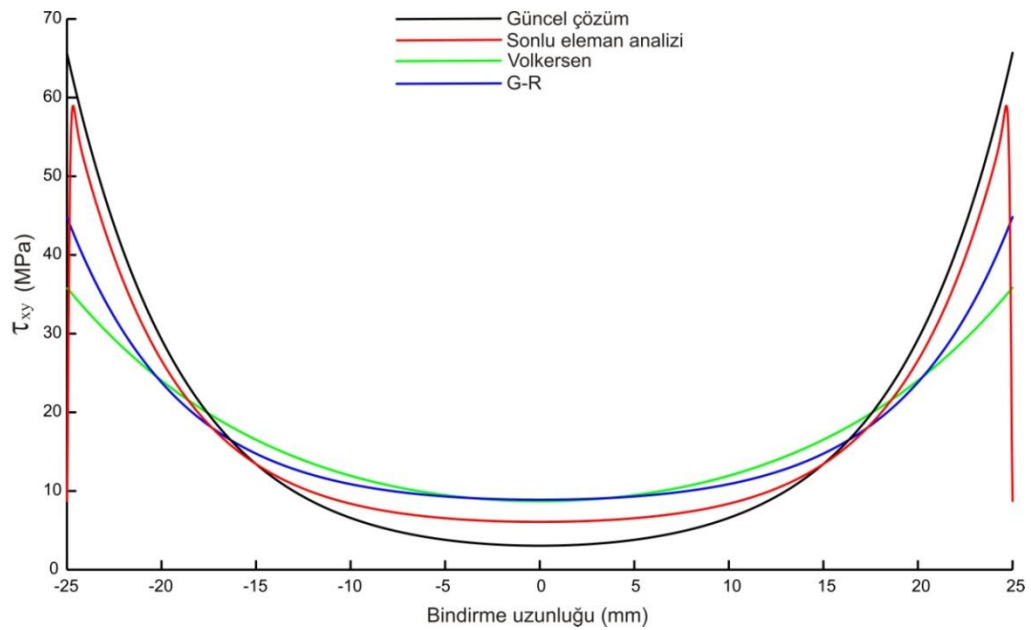
Soyulma gerilmesi dağılımı için, iki farklı analitik çözüm ve lineer sonlu eleman analiz çözümleri karşılaştırılmıştır (Şekil 8.11). Güncel çözüm ve lineer sonlu eleman analiz sonuçları arasında maksimum gerilme bileşeni değerleri karşılaştırıldığında önemli bir fark olmadığı görülmektedir. Güncel çözüm ve lineer sonlu eleman çözümünden elde edilen gerilme dağılımı davranışı birbirine oldukça yakındır. G-R çözümü, en düşük soyulma gerilmesi değerini vermektedir.



Şekil 8.11 Mono yapıştırırmalı bağlantı lineer analiz: AV138 yapıştırıcı orta düzlemi soyulma gerilmesi dağılımı

Şekil 8.12 ve 8.13’de sırasıyla, 2015 mono yapıştırırmalı bağlantı için, kayma ve soyulma gerilmesi bileşenlerinin, yapıştırma çizgisi orta düzlemi boyunca dağılımı gösterilmektedir. Kayma gerilmesi dağılımı için üç farklı analitik çözüm ve lineer sonlu eleman analiz çözümleri karşılaştırılmıştır (Şekil 8.12). 2015 kayma gerilmesi dağılımı, AV138 kayma gerilmesi dağılımı ile karşılaştırıldığında, bindirme uzunluğu boyunca kayma gerilmesi dağılımının daha homojen davranışa sahip olduğu görülmektedir. Güncel çözüm ve lineer sonlu eleman analiz sonuçları arasında maksimum gerilme bileşeni değerleri karşılaştırıldığında önemli bir fark olmadığı görülmektedir. Eğilme etkisinin ihmal edildiği Volkersen çözümü en düşük kayma gerilmesi değerine vermektedir.

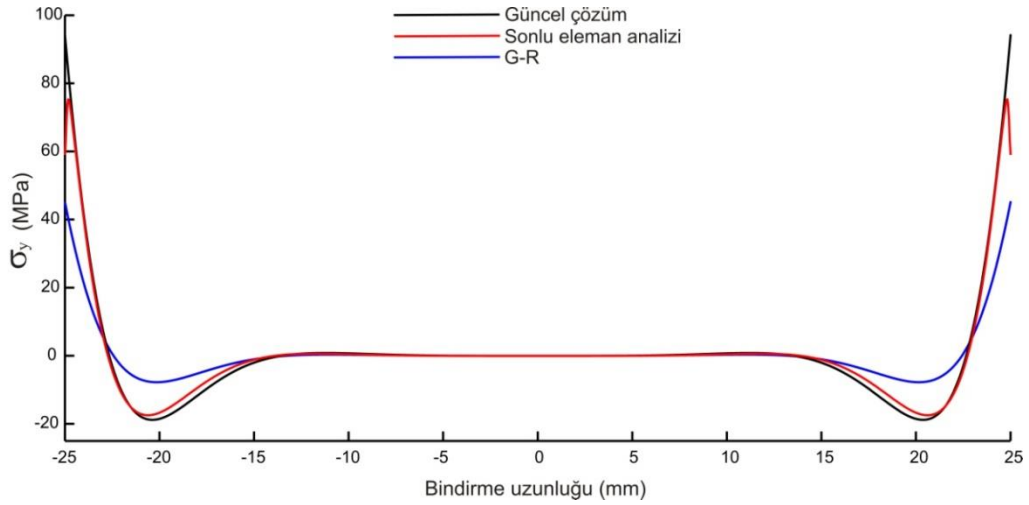
Eğilme etkisinin dahil edildiği G-R çözümü, Volkersen çözümü ile karşılaştırıldığında daha yüksek kayma gerilmesi değerlerine ulaşmaktadır. Dört farklı çözüm sonucu, bağlantı emniyeti açısından kıyaslandığında, güncel çözümün daha emniyetli olduğu söylenebilir.



Şekil 8.12 Mono yapıştırırmalı bağlantı lineer analiz: 2015 yapıştırıcı orta düzlemi kayma gerilmesi dağılımı

Şekil 8.13’de soyulma gerilmesi dağılımı için iki farklı analitik çözüm ve lineer sonlu eleman analiz çözümleri karşılaştırılmıştır. Güncel çözüm ve lineer sonlu eleman analiz sonuçları arasında maksimum gerilme bileşeni değerleri karşılaştırıldığında önemli bir fark olmadığı görülmektedir. Güncel çözüm ve lineer sonlu eleman çözümünden elde

edilen gerilme dağılımı davranışı birbirine oldukça yakındır. G-R çözümü, en düşük soyulma gerilmesi değerini vermektedir.



Şekil 8.13 Mono yapıştırırmalı bağlantı lineer analiz: 2015 yapıştırıcı orta düzlemi soyulma gerilmesi dağılımı

Analitik modeller kullanılarak elde edilen, mono yapıştırırmalı bağlantı maksimum kayma ve soyulma gerilmesi değerlerinin, 2-B SEA sonuçları ile karşılaştırılması amacıyla, denklem (6.76)'da verilen yüzde hata formülü kullanılmıştır. Mono yapıştırırmalı bağlantılar için elde edilen sonuçlar Çizelge 8.4'de liste halinde verilmiştir.

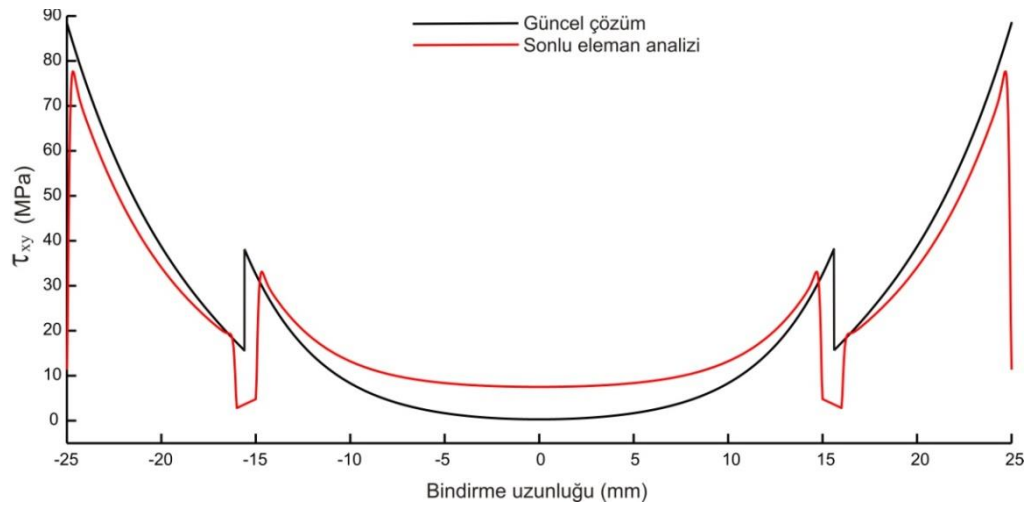
Çizelge 8.4 incelendiğinde, gevrek ve tok yapıştırırmalı bağlantılar için, güncel analitik model, maksimum kayma ve soyulma gerilmesi değerlerini, 2-B SEA çözümlerine göre yüksek tahmin etmiş ve 2-B SEA ile karşılaştırıldığında, maksimum hata yüzdeleri sırasıyla, %-15.95 ve %-30.57 olarak hesaplanmıştır. G-R analitik çözümü, kayma ve soyulma gerilmesi değerlerini, güncel analitik model ve 2-B SEA çözümlerine göre düşük tahmin etmiş ve kayma ve soyulma gerilmesi değerleri için maksimum hata yüzdeleri sırasıyla, %23.96 ve %40.03 olarak hesaplanmıştır. Sadece kayma gerilmesi değerlerinin hesaplanabildiği Volkersen çözümü, diğer iki analitik model ile karşılaştırıldığında, maksimum %39.17 ile en yüksek hata oranına sahiptir. Kayma ve soyulma gerilmesi değerleri için hesaplanan yüzde hata oranları gözönüne alındığında, güncel analitik çözümün, 2-B SEA çözümlerine en yakın değerleri verdiği görülmektedir.

Çizelge 8.4 Mono yapıştırırmalı bağlantı analitik ve lineer SEA maksimum kayma ve soyulma gerilmesi değerleri yüzde hata karşılaştırılması

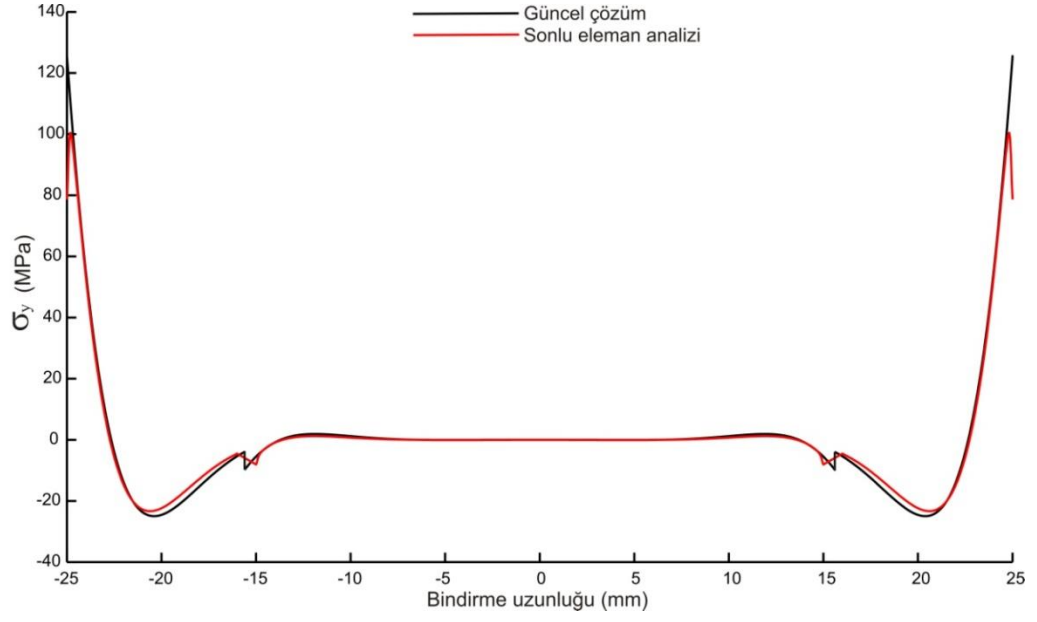
Mono		Yüzde hata (%)		
		Güncel	G-R	Volkersen
Kayma gerilmesi	2015	-11.44	23.96	39.17
	AV138	-15.95	21.48	37.03
Soyulma gerilmesi	2015	-25.17	40.03	-
	AV138	-30.57	35.44	-

8.4.2 Hibrit Yapıştırırmalı Bağlantılar Analitik ve Lineer SEA Sonuçları

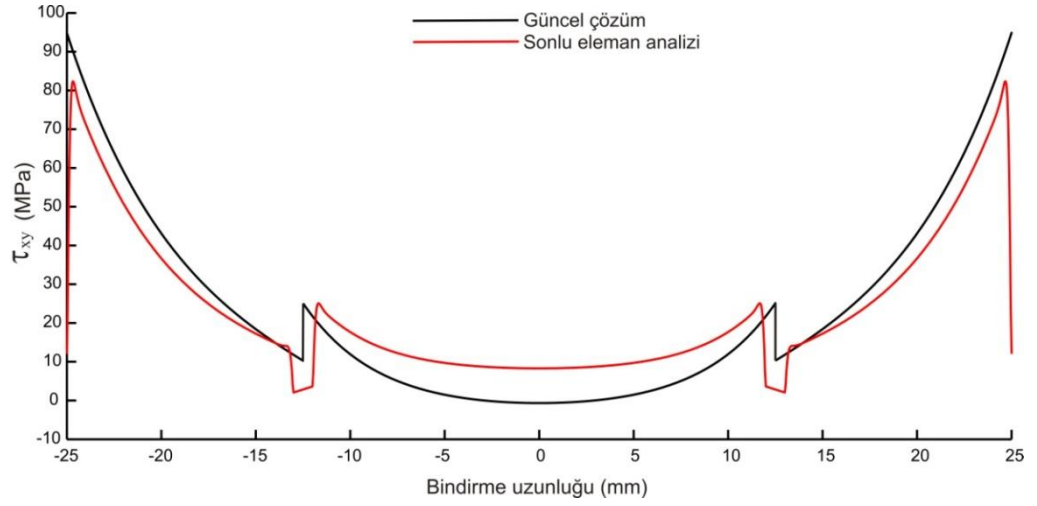
Şekil 8.14-19’da sırasıyla, 0.3, 0.5 ve 0.7 yapıştırıcı-uzunluk oranları için deneysel hasar yükü uygulanan, hibrit yapıştırırmalı bağlantı kayma ve soyulma gerilmesi dağılımları görülmektedir. Güncel çözüm ve lineer sonlu eleman analiz sonuçları arasında maksimum gerilme bileşeni değerleri karşılaştırıldığında önemli bir fark olmadığı görülmektedir. Kullanılan üç farklı uzunluk oranı için soyulma ve kayma gerilmesi birbirine oldukça yakın değerler almaktadır.



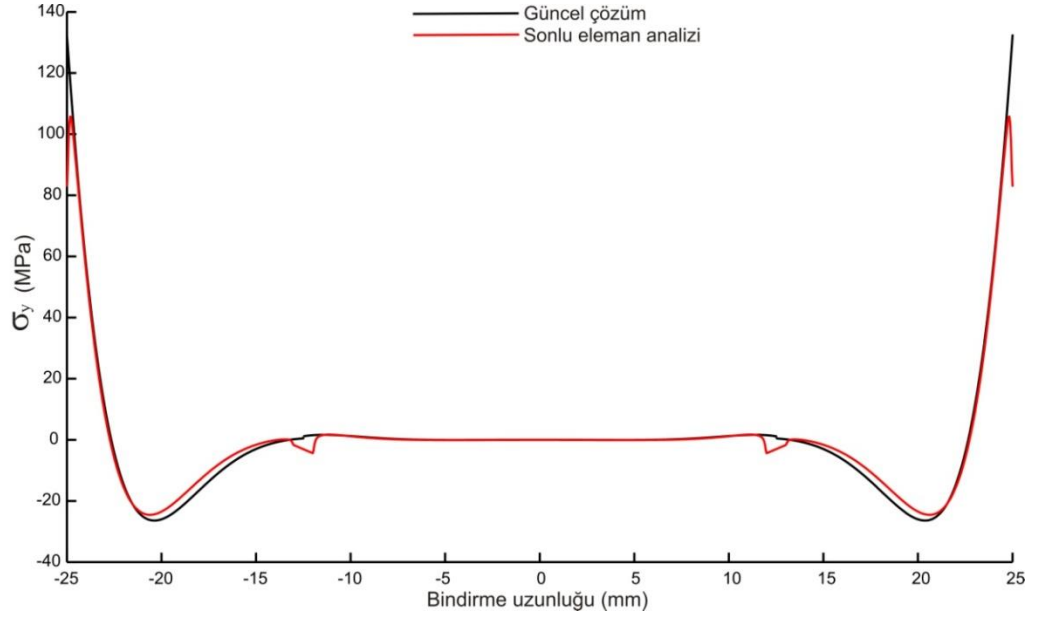
Şekil 8.14 Hibrit yapıştırırmalı bağlantı lineer analiz: 0.3 yapıştırıcı-uzunluk oranı için yapıştırıcı orta düzlemi kayma gerilmesi dağılımı



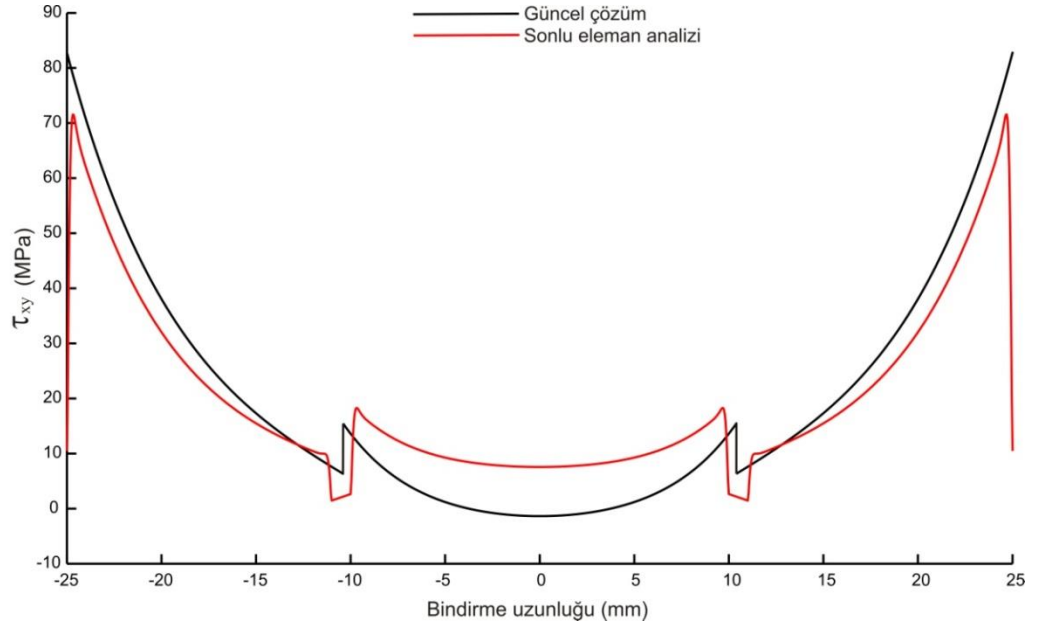
Şekil 8.15 Hibrit yapıştırırmalı bağlantı lineer analiz: 0.3 yapıştırıcı-uzunluk oranı için yapıştırıcı orta düzlemi soyulma gerilmesi dağılımı



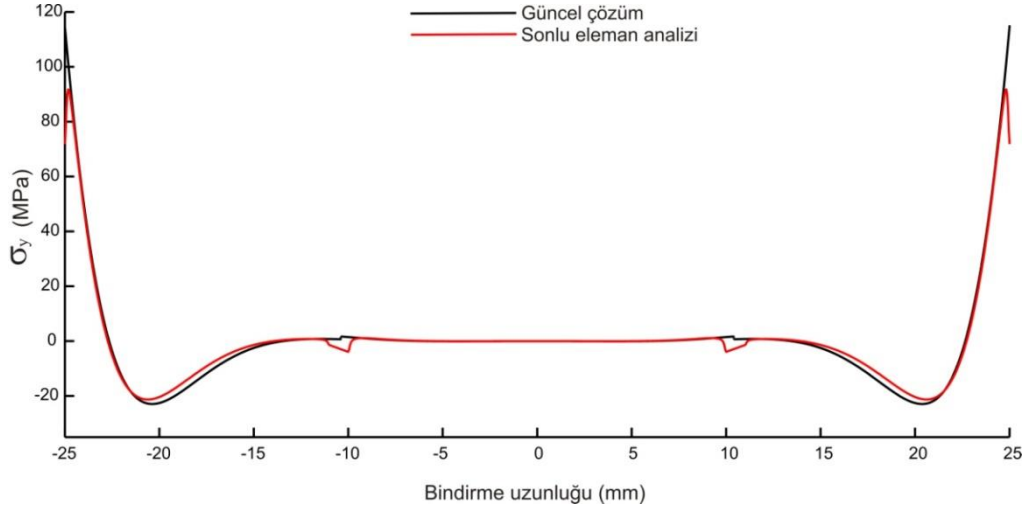
Şekil 8.16 Hibrit yapıştırırmalı bağlantı lineer analiz: 0.5 yapıştırıcı-uzunluk oranı için yapıştırıcı orta düzlemi kayma gerilmesi dağılımı



Şekil 8.17 Hibrit yapıştırırmalı bağlantı lineer analiz: 0.5 yapıştırıcı-uzunluk oranı için yapıştırıcı orta düzlemi soyulma gerilmesi dağılımı



Şekil 8.18 Hibrit yapıştırırmalı bağlantı lineer analiz: 0.7 yapıştırıcı-uzunluk oranı için yapıştırıcı orta düzlemi kayma gerilmesi dağılımı



Şekil 8.19 Hibrit yapıştırırmalı bağlantı lineer analiz: 0.7 yapıştırıcı-uzunluk oranı için yapıştırıcı orta düzlemi soyulma gerilmesi dağılımı

Güncel analitik model kullanılarak elde edilen maksimum kayma ve soyulma gerilmesi değerlerinin, 2-B sonlu eleman analiz sonuçları ile karşılaştırılması amacıyla, denklem (6.76)'da verilen yüzde hata formülü kullanılmıştır. Hibrit yapıştırırmalı yapıştırırmalı bağlantılar için elde edilen sonuçlar Çizelge 8.5'de liste halinde verilmiştir.

Çizelge 8.5 Hibrit yapıştırırmalı bağlantı analitik ve lineer SEA maksimum kayma ve soyulma gerilmesi değerleri yüzde hata karşılaştırılması

Oran (ξ)	Yüzde hata (%)	
	Kayma Gerilmesi	Soyulma Gerilmesi
$\xi = 0.3$	-13.89	-25.10
$\xi = 0.5$	-15.22	-25.14
$\xi = 0.7$	-15.68	-25.14

Çizelge 8.5 incelendiğinde, hibrit yapıştırırmalı bağlantılar için, analitik model, maksimum kayma ve soyulma gerilmesi değerlerini, 2-B SEA çözümlerine göre yüksek tahmin etmiştir. Analitik model ile nümerik çözümler arasındaki en büyük fark 0.7 yapıştırıcı-uzunluk oranında oluşmaktadır. Analitik model ve 2-B SEA sonuçları karşılaştırıldığında, maksimum hata yüzdeleri, sırasıyla, %-15.68 ve %-25.14 olarak hesaplanmıştır.

Deneyssel hasar yükü uygulanan mono ve hibrit yapıştırırmalı bağlantı analiz sonuçlarına göre, maksimum soyulma ve kayma gerilmesi değerleri bindirme uzunluğu kenarlarında meydana gelmektedir. Hibrit yapıştırırmalı bağlantılarda, gevrek yapıştırıcı uzunluğu boyunca, gerilme dağılımları incelendiğinde, etkin gerilme bileşeninin kayma gerilmesi olduğu görülmektedir.

Fitton ve Broughton [123] çalışmalarında, hibrit yapıştırırmalı bağlantı, ortalama kayma gerilmesi değerinin, gevrek yapıştırıcı kayma dayanımına yaklaşması durumunda, bağlantının tam kayma kapasitesine ulaşacağını belirtmişlerdir. Yazarlar, hibrit yapıştırırmalı bağlantılar için tahmini üst kayma dayanımı kapasitesinin belirlenmesinde,

$$\tau_H = \frac{(\tau_s \Lambda)_s + (\tau_s \Lambda)_f}{\Lambda_s + \Lambda_f} \quad (8.26)$$

denklemini kullanılmıştır.

Burada, τ_s , kullanılan yapıştırıcıların kayma dayanımlarını belirtmektedir. Gevrek ve sünek yapıştırıcı alanları sırasıyla, Λ_s ve Λ_f ile ifade edilmiştir.

Çizelge 8.6'da, mono ve hibrit yapıştırırmalı bağlantılar için, ortalama kayma gerilmesi değerleri ve bağlantıların kayma dayanımı kapasiteleri verilmektedir. Ayrıca, Çizelge 8.6'da, lineer SEA sonuçlarından elde edilen mono yapıştırırmalı bağlantı maksimum kayma gerilmesi değerleri ile gevrek yapıştırıcı uzunluğu boyunca, hibrit yapıştırırmalı bağlantı maksimum kayma gerilmesi değerleri karşılaştırılmıştır.

Çizelge 8.6 Tahmini kayma kapasiteleri, ortalama kayma gerilmesi ve lineer SEA kayma gerilmesi değerleri

	Hasar yükü (N)	Bağlantı düzeni	Ortalama kayma gerilmesi (MPa)	Kayma dayanımı kapasitesi (MPa)	Kayma gerilmesi (MPa) [2-B SEA]
Hibrit	27690	$\xi = 0.3$ (09-30-09)	23.08	25.59	33.13
	29170	$\xi = 0.5$ (12-24-12)	24.31	24.05	25.08
	25300	$\xi = 0.7$ (14-20-14)	21.10	23.03	18.27
Mono	14510	AV138	11.61	30.20	60.52
	20760	2015	16.61	17.9	58.93

Çizelge 8.6 incelendiğinde, 0.5 yapıştırıcı-uzunluk oranına sahip hibrit yapıştırırmalı bağlantı hariç, mono ve hibrit yapıştırırmalı bağlantılarda, ortalama kayma gerilmesi değerinin, tahmini kayma dayanımı kapasitesine ulaşmadığı görülmektedir.

Mono yapıştırırmalı bağlantı analiz sonuçlarına göre, yapıştırıcılarda meydana gelen kayma gerilmesi değerleri, yapıştırıcıların kayma dayanımlarının üzerindedir. Lineer SEA kayma gerilmesi değerleri göz önüne alındığında, bindirme uzunluğu kenarlarında, her iki yapıştırıcı için kayma dayanımı kapasitesinin aşıldığı ve kaymaya bağlı hasar oluşumunun meydana geldiği söylenebilir.

Hibrit yapıştırırmalı bağlantılarda, 0.3 yapıştırıcı-uzunluk oranı için, gevrek yapıştırıcı kayma gerilmesi değeri, yapıştırıcının kayma dayanımının üzerindedir. Lineer SEA ve analitik çözüm kayma gerilmesi değerleri göz önüne alındığında, 0.3 yapıştırıcı-uzunluk oranı için, gevrek yapıştırıcı kayma dayanımı kapasitesinin aşıldığı ve tahmini kayma kapasitesine ulaşmadan hasar oluşumunun meydana geldiği belirtilebilir.

Hibrit yapıştırırmalı bağlantılarda, 0.5 ve 0.7 yapıştırıcı-uzunluk oranları için, gevrek yapıştırıcı kayma gerilmesi değerleri, yapıştırıcının kayma dayanımından düşüktür. 0.5 yapıştırıcı-uzunluk oranı için, hibrit yapıştırırmalı bağlantı kayma kapasitesine ulaşmaktadır. Kayma gerilmesi değerleri ve kayma dayanım kapasiteleri beraber göz önüne alındığında, 0.7 yapıştırıcı-uzunluk oranı için, daha yüksek hasar yüküne ulaşılacağı öngörülebilir.

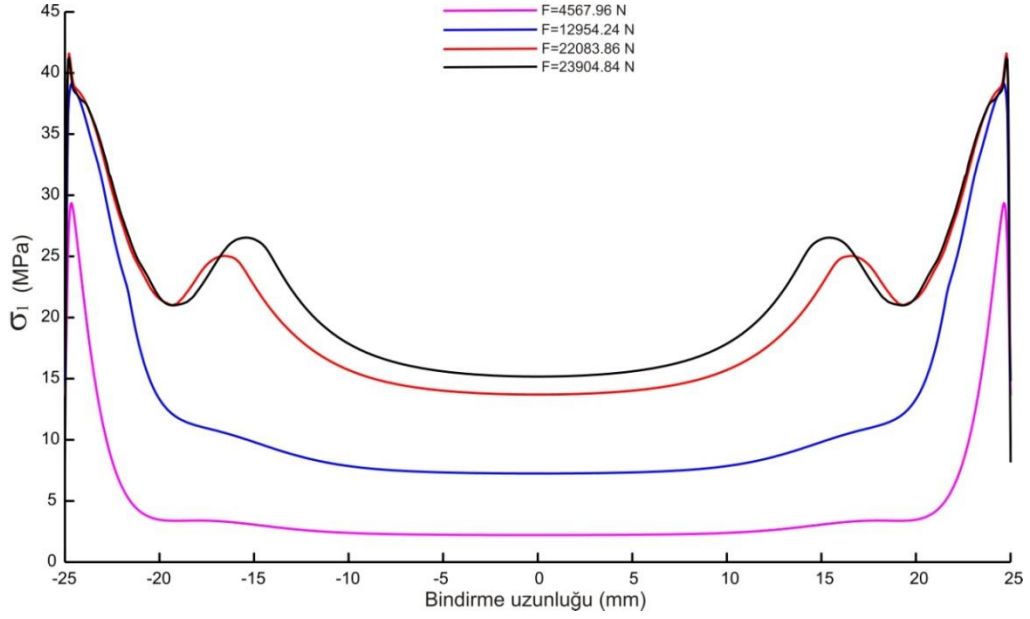
Lineer SEA ve analitik çözüm sonuçları, hibrit yapıştırma düzeninin gerilme dağılımı üzerine etkisinin belirlenmesinde ve bağlantı hasarının tahmininde, hızlı ve etkin bir çözüm yöntemi olmasına karşın, yapıştırıcıların davranışlarını tanımlamada önemli eksikliklere sahiptir. Yapıştırırmalı bağlantılarda, kullanılan yapıştırıcılara bağlı hasar oluşumunun belirlenmesi, uygun hasar kriteri ve malzeme modeli ile beraber, yapıştırıcının yük altında plastik şekil değişimine bağlı gerilme davranışının bilinmesini gerektirir. Bu amaçla, lineer olmayan malzeme ve geometrik özellikler için analizler yapılmış ve sonuçlar bölüm 8.5’de detaylı olarak tartışılmıştır.

8.5 Lineer Olmayan SEA Çözümleri

Hasar yükünün, sonlu eleman analizi kullanılarak belirlenmesi gerilme dağılımlarının doğru şekilde elde edilmesi ile mümkündür. Mono ve hibrit yapıştırırmalı bağlantılar için, lineer olmayan SEA sonuçlarına bağlı hasar yükünün belirlenmesi amacıyla, bindirme uzunluğu boyunca, yük değişimine bağlı gerilme bileşenlerinin dağılımları çizdirilmiştir. Mono ve hibrit yapıştırırmalı bağlantı hasar yüklerinin belirlenmesinde yapıştırma çizgisi boyunca meydana gelen maksimum gerilme değerleri kullanılmıştır. Tok yapıştırırmalı bağlantı durumunda, yapıştırıcının bulk numune şekil değiştirme değerlerinin kullanılması daha uygun bir yaklaşım olmasına rağmen, gerçekçi bir yaklaşım değildir. Buna neden olarak, bağlantıda meydana gelen yüksek hidrostatik gerilmelerin, bulk numunede oluşmaması gösterilebilir. Bu durum, bulk numune ve bağlantı için aynı kriterin kullanılmasının uygun olmadığını göstermektedir [124]. Lineer olmayan SEA çalışması boyunca, tok yapıştırıcı hasar yükü, yapıştırıcı içerisinde herhangi bir noktada meydana gelen maksimum eşdeğer gerilme değerine göre belirlenmiştir. Gevrek ve hibrit yapıştırırmalı bağlantı hasar yükünün belirlenmesinde, hibrit yapıştırma çizgisi boyunca herhangi bir noktada meydana gelen maksimum asal gerilme değeri kullanılmıştır.

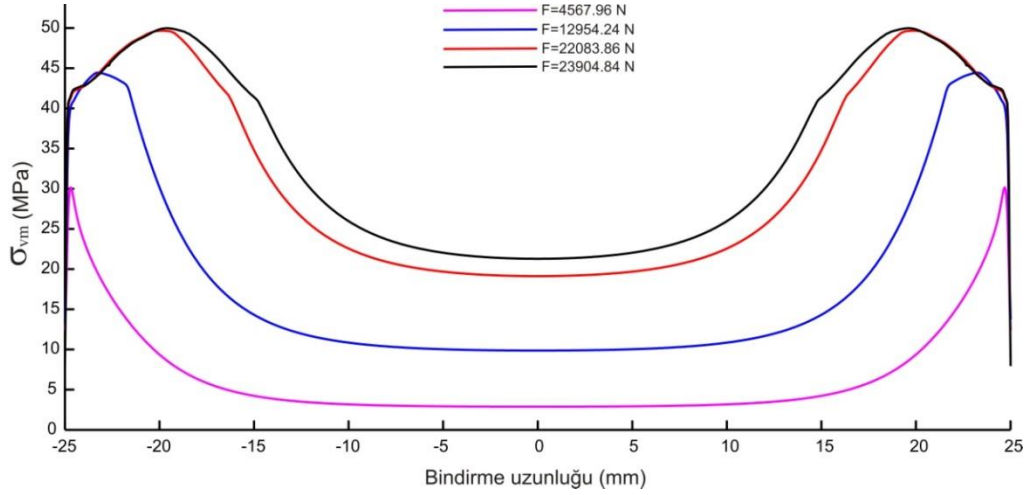
8.5.1 Mono Yapıştırırmalı Bağlantılar Lineer Olmayan SEA Sonuçları

Şekil 8.20-23'de, AV138 gevrek yapıştırıcı kullanılarak hazırlanan mono yapıştırırmalı bağlantı için gerilme bileşenlerinin yüke bağlı değişimi görülmektedir. Uygulanan yük değerlerinin tamamında, asal gerilme bileşeni, maksimum değerine yapıştırıcı kenarlarında ulaşmaktadır (Şekil 8.20). Bağlantıda, yapıştırıcı içerisindeki maksimum asal gerilme değerine, 22083.86 N yük altında ulaşılmaktadır. Maksimum asal gerilme değerine bağlı elde edilen 22083.86 N yük değeri, bağlantı hasar yükü olarak kabul edilmiştir. Şekil 8.20'de bağlantıya uygulanan yük değerinin belirlenen hasar yükünün üzerinde olması durumunda, asal gerilme değerinin düşmeye başladığı görülmektedir.

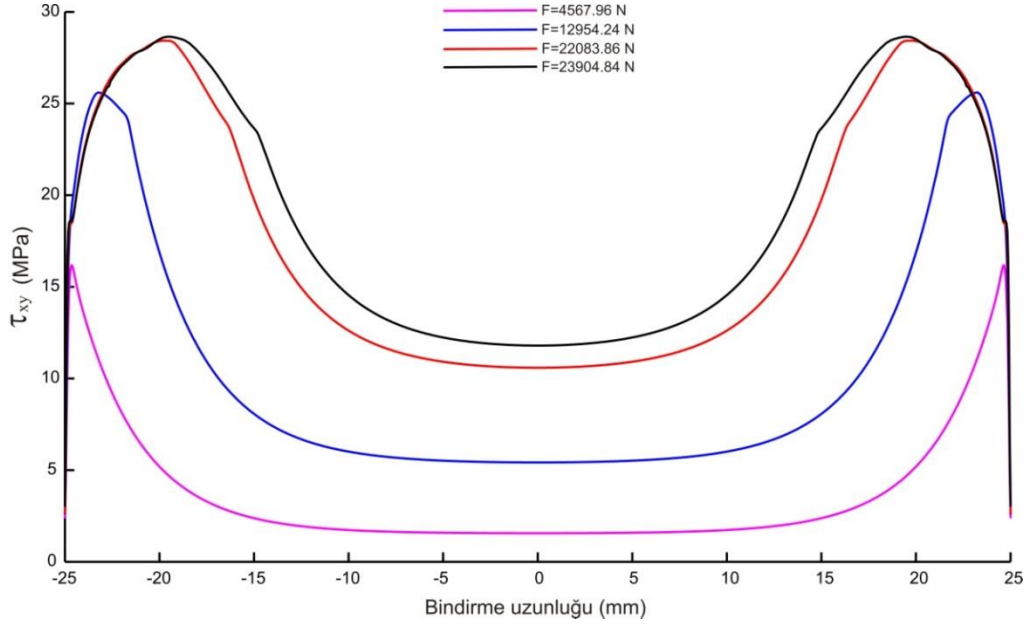


Şekil 8.20 Mono yapıştırırmalı bağlantı lineer olmayan analiz: AV138 yapıştırıcı orta düzlemi yüke bağlı asal gerilme dağılımı

Şekil 8.21 ve 8.22’de eşdeğer ve kayma gerilmesi dağılımları görülmektedir. Her iki gerilme dağılımı benzer davranış göstermektedir. Yük artışı ile beraber, eşdeğer ve kayma gerilmesi bileşenlerinin maksimum değerleri artmaya devam etmektedir. Aynı zamanda, her iki gerilme bileşeninin maksimum değeri, yapıştırıcı içerisinde yer değiştirerek, kenarlardan uzaklaşarak içi kısımlara ilerlemektedir.

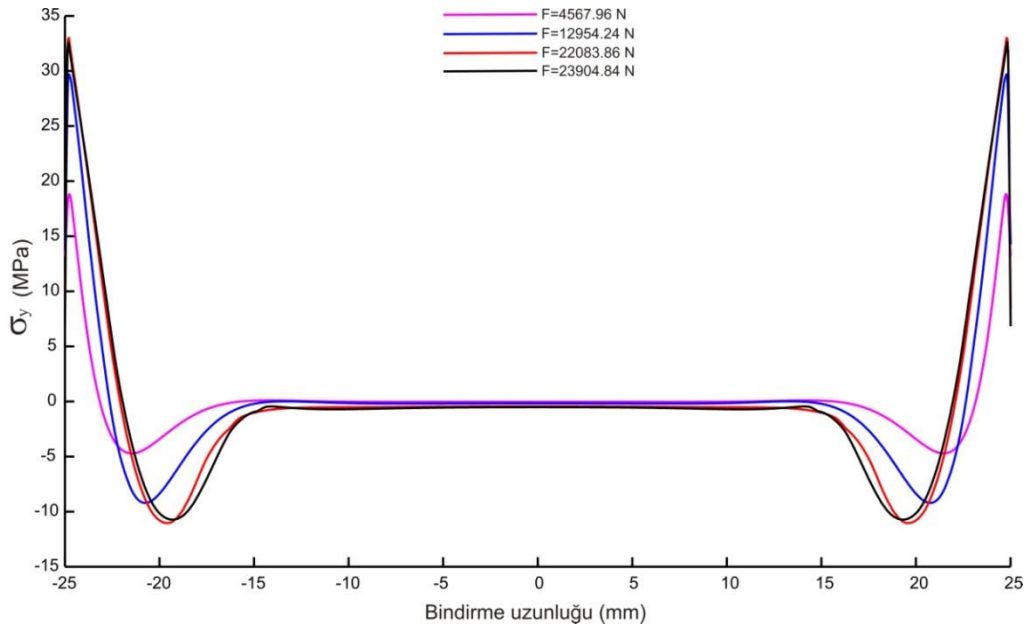


Şekil 8.21 Mono yapıştırırmalı bağlantı lineer olmayan analiz: AV138 yapıştırıcı orta düzlemi yüke bağlı eşdeğer gerilme dağılımı



Şekil 8.22 Mono yapıştırırmalı bağlantı lineer olmayan analiz: AV138 yapıştırıcı orta düzlemi yüke bağlı kayma gerilmesi dağılımı

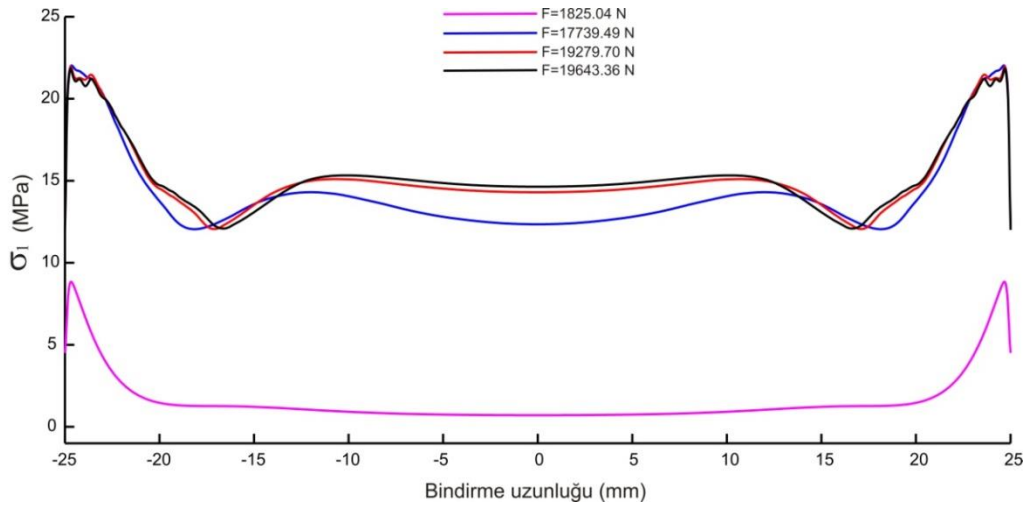
Şekil 8.23’de soyulma gerilmesi dağılımı görülmektedir. Soyulma gerilmesi dağılımı asal gerilme dağılımı ile benzer davranış göstermektedir. Uygulanan yük değerlerinin tamamında, soyulma gerilmesi, maksimum değerine yapıştırıcı kenarlarında ulaşmaktadır. Şekil 8.23’de bağlantıya uygulanan yük değerinin belirlenen hasar yükünün üzerinde olması durumunda, soyulma gerilmesi değerinin düşmeye başladığı görülmektedir.



Şekil 8.23 Mono yapıştırırmalı bağlantı lineer olmayan analiz: AV138 yapıştırıcı orta düzlemi yüke bağlı soyulma gerilmesi dağılımı

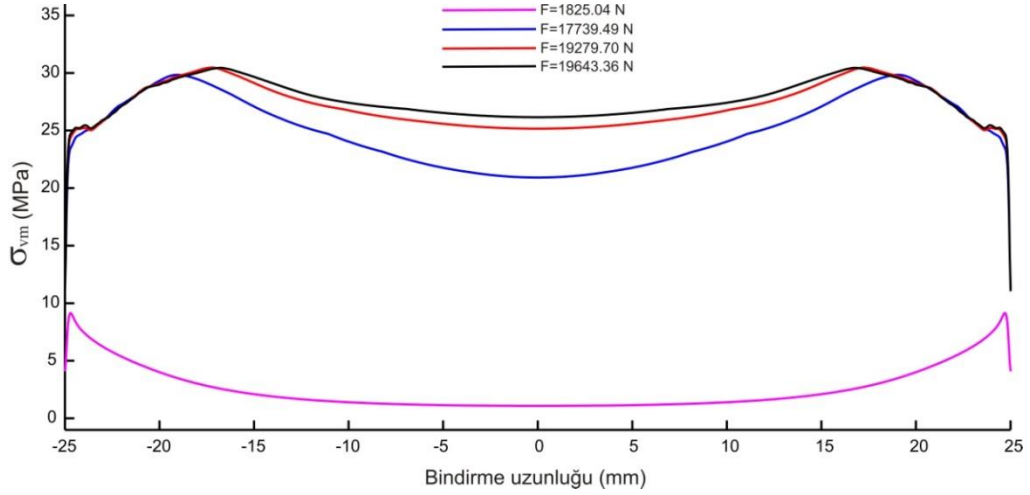
Şekil 8.22 ve 8.23 karşılaştırıldığında, bağlantı hasar yükü anında soyulma gerilmesi değerinin kayma gerilmesi değerine göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Belirtilen bu duruma bağlı olarak, AV138 gevrek yapıştırıcı hasar oluşumunda, etkin gerilme bileşenin, kenarlarda maksimum değerine ulaşan soyulma gerilmesi olduğu söylenebilir.

Şekil 8.24-27’de 2015 tok yapıştırıcı kullanılarak hazırlanan mono yapıştırmalı bağlantı için gerilme bileşenlerinin yüke bağlı değişimi görülmektedir. Uygulanan yük değerlerinin tamamında, asal gerilme bileşeni maksimum değerine yapıştırıcı kenarlarında ulaşmaktadır (Şekil 8.24). Bağlantıda, yapıştırıcı içerisindeki maksimum asal gerilme değerine, 17739.49 N yük altında ulaşılmaktadır. Yük artışı ile beraber, asal gerilme değerlerinde düşüş meydana gelmektedir.

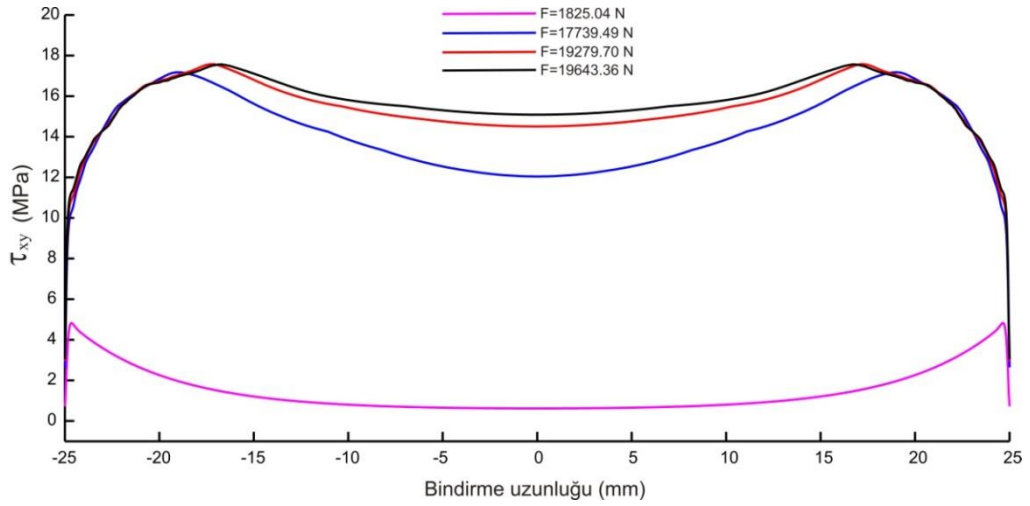


Şekil 8.24 Mono yapıştırmalı bağlantı lineer olmayan analiz: 2015 yapıştırıcı orta düzlemi yüke bağlı asal gerilme dağılımı

Şekil 8.25 ve 8.26’da eşdeğer ve kayma gerilmesi dağılımları görülmektedir. Her iki gerilme bileşeni için yapıştırıcı içerisinde elde edilen gerilme dağılımları benzer davranış göstermektedir. Her iki gerilme bileşeninin maksimum değeri, yapıştırıcı içerisinde yer değiştirerek, kenarlardan uzaklaşarak içi kısımlara ilerlemektedir. Bağlantıda, yapıştırıcı içerisindeki maksimum eşdeğer gerilme değerine, 19279.70 N yük altında ulaşılmaktadır. Maksimum eşdeğer gerilme değerine bağlı elde edilen 19279.70 N yük değeri, bağlantı hasar yükü olarak kabul edilmiştir. Şekil 8.25 ve 8.26’da bağlantıya uygulanan yük değerinin belirlenen hasar yükünün üzerinde olması durumunda, eşdeğer ve kayma gerilmesi değerlerinin düşmeye başladığı görülmektedir.

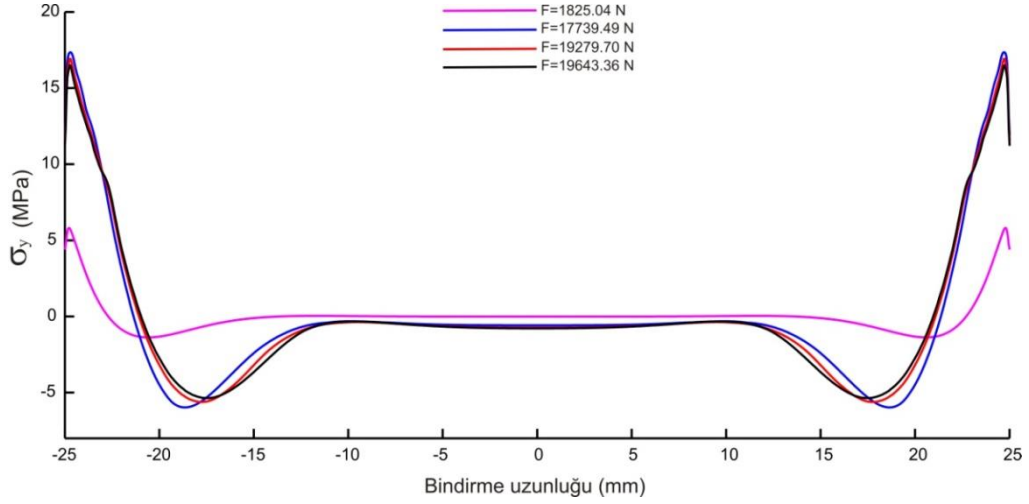


Şekil 8.25 Mono yapıştırırmalı bağlantı lineer olmayan analiz: 2015 yapıştırıcı orta düzlemi yüke bağlı eşdeğer gerilme dağılımı



Şekil 8.26 Mono yapıştırırmalı bağlantı lineer olmayan analiz: 2015 yapıştırıcı orta düzlemi yüke bağlı kayma gerilmesi dağılımı

Şekil 8.27’de soyulma gerilmesi dağılımı görülmektedir. Soyulma gerilmesi dağılımı asal gerilme dağılımı ile benzer davranış göstermektedir. Uygulanan yük değerlerinin tamamında, soyulma gerilmesi, maksimum değerine yapıştırıcı kenarlarında ulaşmaktadır. Şekil 8.27’de bağlantıya uygulanan yük değerinin belirlenen 17739.49 N yükünün üzerinde olması durumunda, soyulma gerilmesi değerinin düşmeye başladığı görülmektedir.

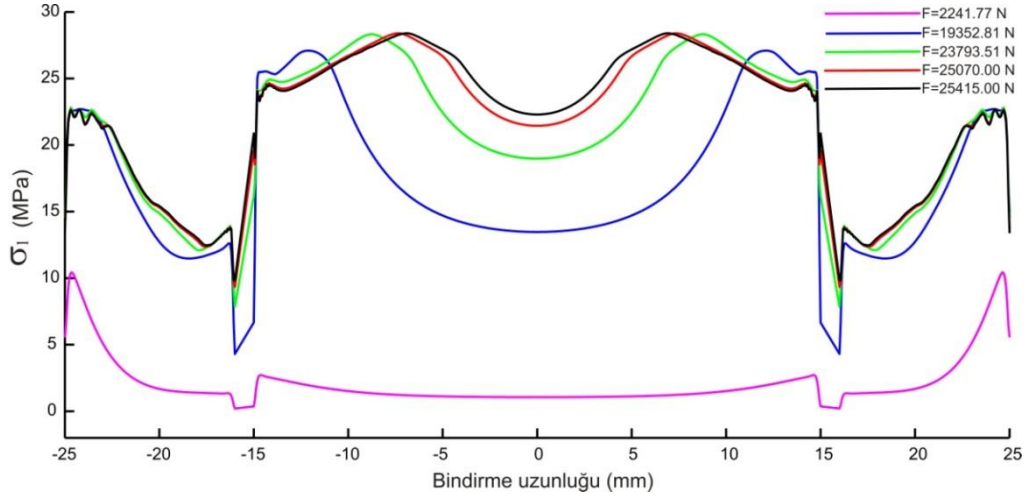


Şekil 8.27 Mono yapıştırırmalı bağlantı lineer olmayan analiz: 2015 yapıştırıcı orta düzlemi yüke bağlı soyulma gerilmesi dağılımı

Şekil 8.26 ve 8.27 karşılaştırıldığında, bağlantı hasar yükü anında kayma gerilmesi değerinin soyulma gerilmesi değerine göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Belirtilen bu duruma bağlı olarak, 2015 tok yapıştırıcı hasar oluşumunda, etkin gerilme bileşenin, kayma gerilmesi olduğu söylenebilir.

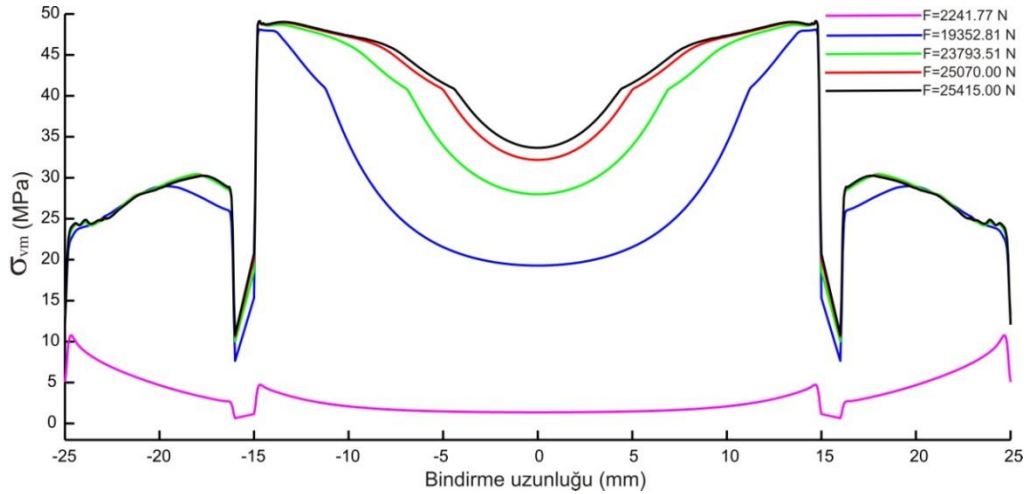
8.5.2 Hibrit Yapıştırırmalı Bağlantılar Lineer Olmayan SEA Sonuçları

Şekil 8.28-31'de 0.3 yapıştırıcı-uzunluk oranı için hibrit yapıştırırmalı bağlantı gerilme bileşenlerinin yüke bağlı değişimi görülmektedir. Uygulanan yük değerlerinin artması ile beraber, bindirme uzunluğu ortasında bulunan gevrek yapıştırıcı maksimum asal gerilme değeri, yapıştırıcı içerisinde yer değiştirerek, kenarlardan uzaklaşarak iç kısımlara ilerlemektedir. Bağlantıda, gevrek yapıştırıcı içerisindeki maksimum asal gerilme değerine, 25070 N yük altında ulaşılmaktadır. Maksimum asal gerilme değerine bağlı elde edilen 25070 N yük değeri, bağlantı hasar yükü olarak kabul edilmiştir. Şekil 8.28'de bağlantıya uygulanan yük değerinin belirlenen hasar yükünün üzerinde olması durumunda, asal gerilme değerinin düşmeye başladığı görülmektedir.

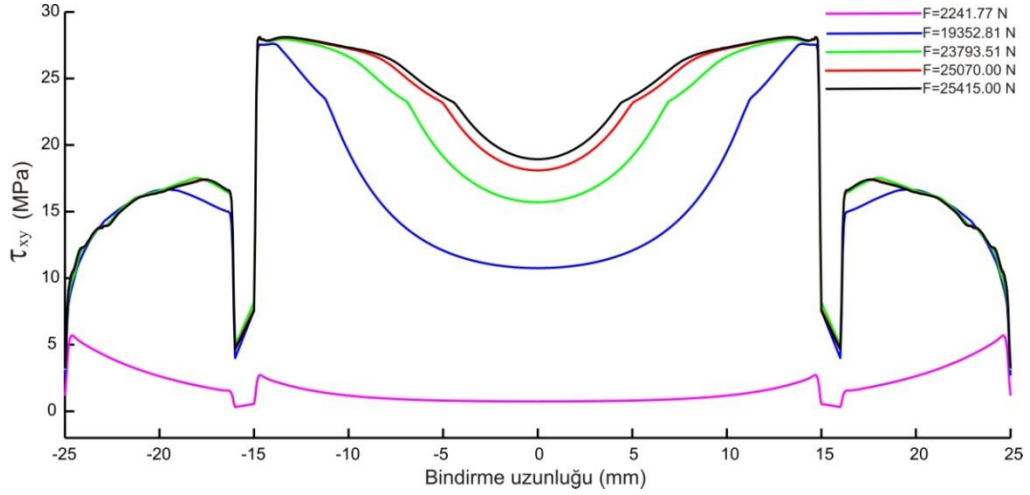


Şekil 8.28 Hibrit yapıştırırmalı bağlantı lineer olmayan analiz: 0.3 yapıştırıcı-uzunluk oranı için yapıştırıcı orta düzlemi yüke bağlı asal gerilme dağılımı

Şekil 8.29 ve 8.30'da eşdeğer ve kayma gerilmesi dağılımları görülmektedir. Her iki gerilme bileşeni için yapıştırıcı içerisinde elde edilen gerilme dağılımları benzerlik göstermektedir. Her iki gerilme bileşeninin maksimum değeri, gevrek yapıştırıcı içerisinde kenarlara yakın kısımlarda oluşmaktadır. Yük artışı ile beraber, plastik şekil değişimlerine bağlı olarak, gerilme değerleri daha homojen dağılım göstermekte ve gevrek yapıştırıcı tam kayma dayanımı kapasitesine yaklaşmaktadır. Yük artışı ile beraber, tok yapıştırıcı eşdeğer ve kayma gerilmesi maksimum değerleri yer değiştirerek gevrek yapıştırıcı kenar kısımlarına yaklaşmaktadır.

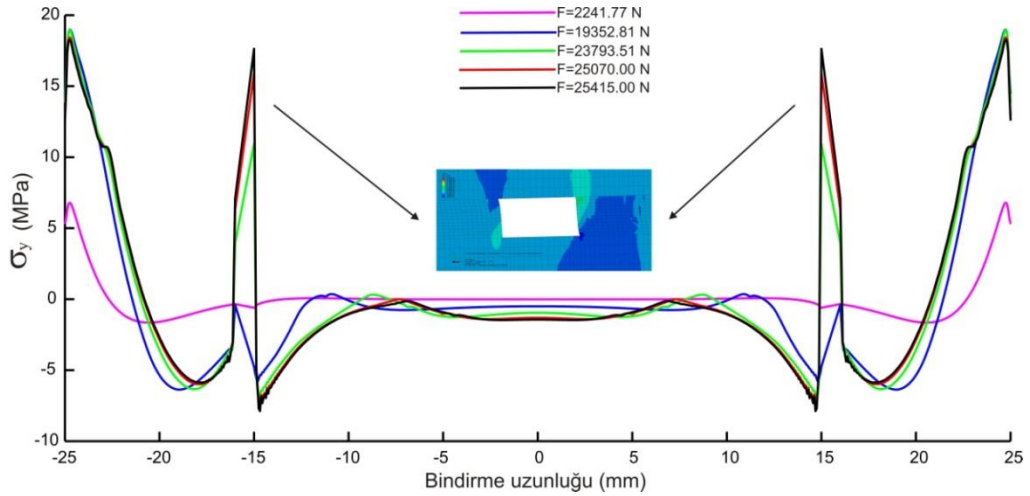


Şekil 8.29 Hibrit yapıştırırmalı bağlantı lineer olmayan analiz: 0.3 yapıştırıcı-uzunluk oranı için yapıştırıcı orta düzlemi yüke bağlı eşdeğer gerilme dağılımı



Şekil 8.30 Hibrit yapıştırırmalı bağlantı lineer olmayan analiz: 0.3 yapıştırıcı-uzunluk oranı için yapıştırıcı orta düzlemi yüke bağlı kayma gerilmesi dağılımı

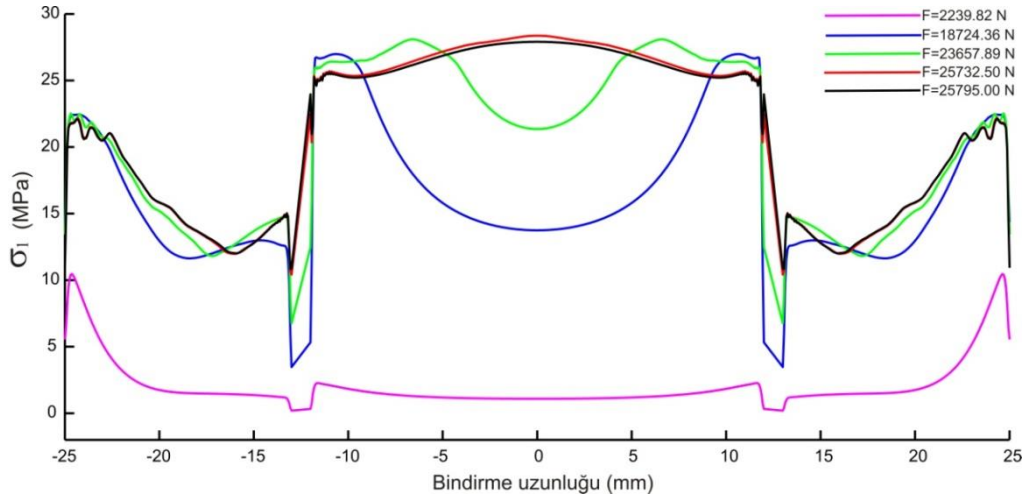
Şekil 8.31’de soyulma gerilmesi dağılımı görülmektedir. Uygulanan yük değerlerinin tamamında, soyulma gerilmesi, maksimum değerine yapıştırıcı kenarlarında ulaşmaktadır. Yük artışı ile beraber dönme etkisinin artması tok ve gevrek yapıştırıcıların birbirine yakın ara yüzlerinde pozitif soyulma gerilmesi oluşmasına neden olmaktadır.



Şekil 8.31 Hibrit yapıştırırmalı bağlantı lineer olmayan analiz: 0.3 yapıştırıcı-uzunluk oranı için yapıştırıcı orta düzlemi yüke bağlı soyulma gerilmesi dağılımı

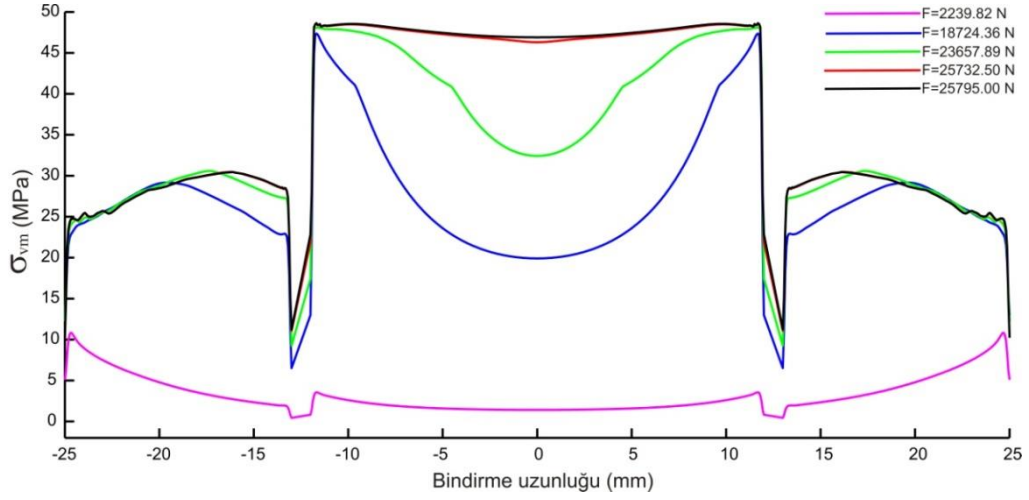
Şekil 8.32-35’de 0.5 yapıştırıcı-uzunluk oranı için hibrit yapıştırırmalı bağlantı gerilme bileşenlerinin yüke bağlı değişimi görülmektedir. Uygulanan yük değerlerinin artması ile beraber, gevrek yapıştırıcı maksimum asal gerilme değeri, gevrek yapıştırıcı içerisinde yer değiştirerek, yapıştırıcı orta noktasına ulaşmaktadır. Bağlantıda, gevrek yapıştırıcı içerisindeki maksimum asal gerilme değerine, 25732.50 N yük altında

ulaşılmaktadır. Maksimum asal gerilme değerine bağlı elde edilen 25732.50 N yük değeri, bağlantı hasar yükü olarak kabul edilmiştir. Şekil 8.32’de bağlantıya uygulanan yük değerinin belirlenen hasar yükünün üzerinde olması durumunda, asal gerilme değerinin düşmeye başladığı görülmektedir.

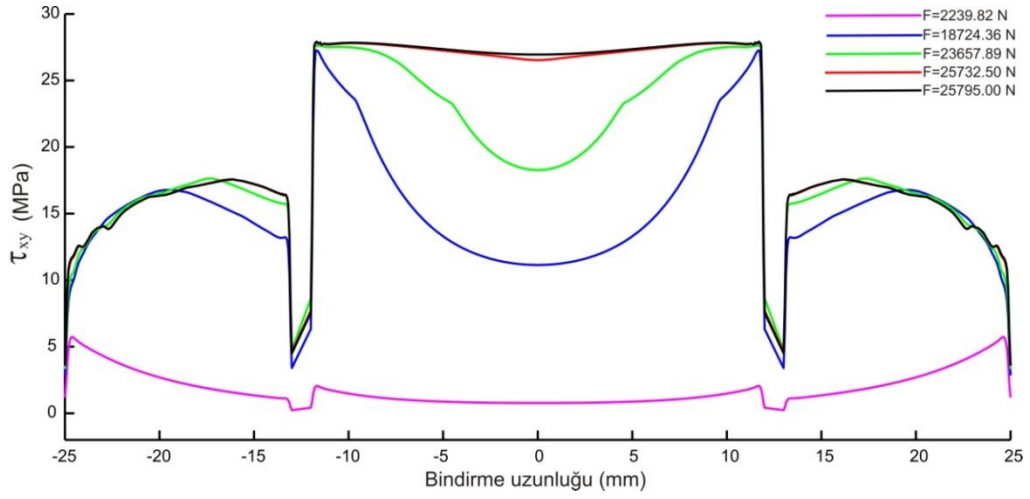


Şekil 8.32 Hibrit yapıştırırmalı bağlantı lineer olmayan analiz: 0.5 yapıştırıcı-uzunluk oranı için yapıştırıcı orta düzlemi yüke bağlı asal gerilme dağılımı

Şekil 8.33 ve 8.34’de eşdeğer ve kayma gerilmesi dağılımları görülmektedir. Her iki gerilme bileşeni için yapıştırıcı içerisinde elde edilen gerilme dağılımları benzerlik göstermektedir. Her iki gerilme bileşeninin maksimum değeri, gevrek yapıştırıcı içerisinde kenarlara yakın kısımlarda oluşmaktadır. Yük artışı ile beraber, plastik şekil değişimlerine bağlı olarak, gevrek yapıştırıcı gerilme değerleri daha homojen dağılım göstermekte ve kenar ile orta kısımlar arasındaki gerilme değerleri arasındaki fark önemli oranda azalmaktadır. Gevrek yapıştırıcı, tam kayma dayanımı kapasitesine 0.3 yapıştırıcı-uzunluk oranı ile karşılaştırıldığında daha çok yaklaşmaktadır. Yük artışı ile beraber, tok yapıştırıcı içerisindeki eşdeğer ve kayma gerilmesi maksimum değerleri yer değiştirerek gevrek yapıştırıcı kenar kısımlarına yaklaşmaktadır.

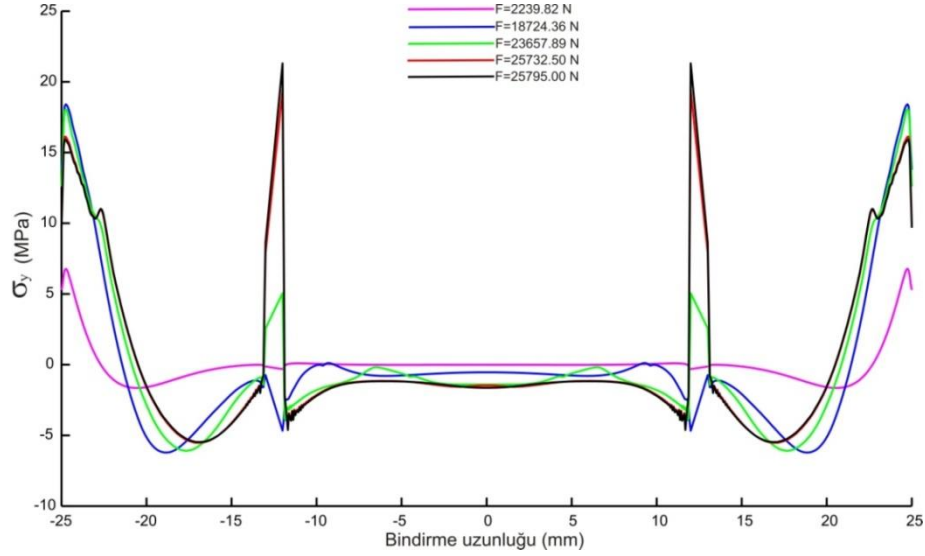


Şekil 8.33 Hibrit yapıştırırmalı bağlantı lineer olmayan analiz: 0.5 yapıştırıcı-uzunluk oranı için yapıştırıcı orta düzlemi yüke bağlı eşdeğer gerilme dağılımı



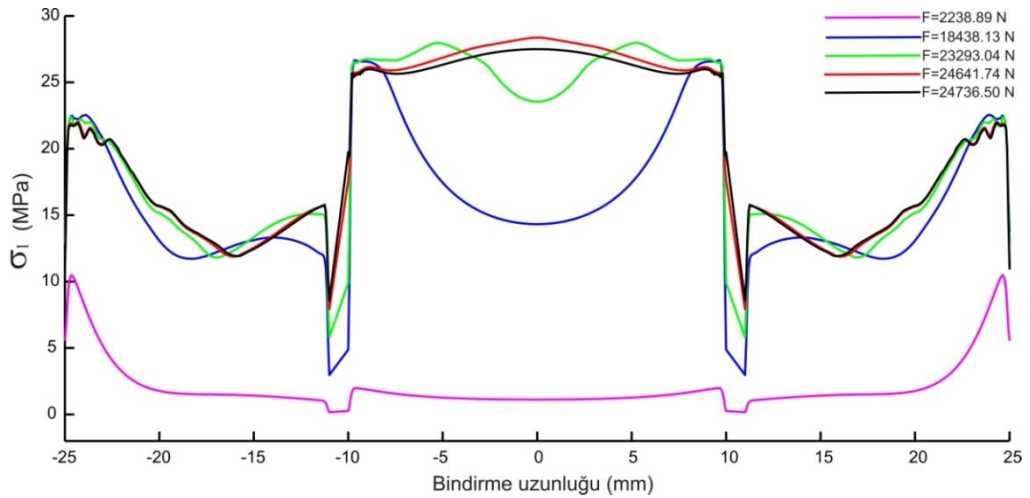
Şekil 8.34 Hibrit yapıştırırmalı bağlantı lineer olmayan analiz: 0.5 yapıştırıcı-uzunluk oranı için yapıştırıcı orta düzlemi yüke bağlı kayma gerilmesi dağılımı

Şekil 8.35’de soyulma gerilmesi dağılımı görülmektedir. Uygulanan yük değerlerinin tamamında, soyulma gerilmesi, maksimum değerine yapıştırıcı kenarlarında ulaşmaktadır. Yük artışı ile beraber, 0.3 yapıştırıcı-uzunluk oranına benzer şekilde, dönme etkisinin artması tok ve gevrek yapıştırıcıların birbirine yakın ara yüzeylerinde pozitif soyulma gerilmesi oluşmasına neden olmaktadır.



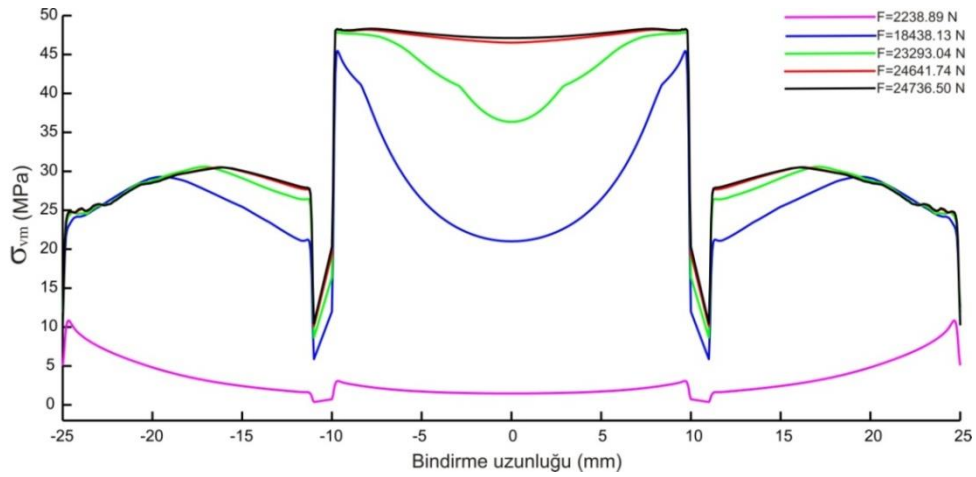
Şekil 8.35 Hibrit yapıştırırmalı bağlantı lineer olmayan analiz: 0.5 yapıştırıcı-uzunluk oranı için yapıştırıcı orta düzlemi yüke bağlı soyulma gerilmesi dağılımı

Şekil 8.36-39'da 0.7 yapıştırıcı-uzunluk oranı için hibrit yapıştırırmalı bağlantı gerilme bileşenlerinin yüke bağlı değişimi görülmektedir. Uygulanan yük değerlerinin artması ile beraber, gevrek yapıştırıcı maksimum asal gerilme değeri, yapıştırıcı içerisinde yer değiştirerek, 0.5 yapıştırıcı-uzunluk oranına benzer olarak, gevrek yapıştırıcı orta noktasında meydana gelmektedir. Bağlantıda, gevrek yapıştırıcı içerisindeki maksimum asal gerilme değerine, 24641.74 N yük altında ulaşılmaktadır. Maksimum asal gerilme değerine bağlı elde edilen 24641.74 N yük değeri, bağlantı hasar yükü olarak kabul edilmiştir. Şekil 8.36'da bağlantıya uygulanan yük değerinin belirlenen hasar yükünün üzerinde olması durumunda, asal gerilme değerinin düşmeye başladığı görülmektedir.

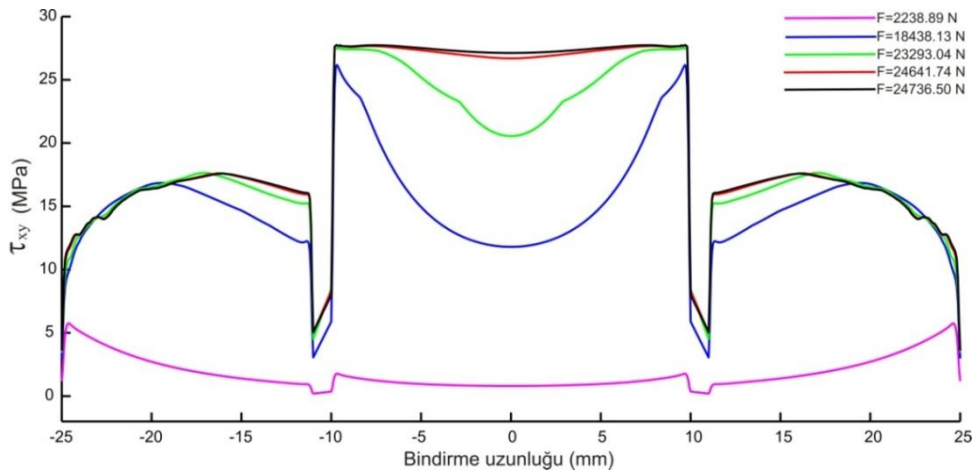


Şekil 8.36 Hibrit yapıştırırmalı bağlantı lineer olmayan analiz: 0.7 yapıştırıcı-uzunluk oranı için yapıştırıcı orta düzlemi yüke bağlı asal gerilme dağılımı

Şekil 8.37 ve 8.38’de eşdeğer ve kayma gerilmesi dağılımları görülmektedir. Her iki gerilme bileşeni için yapıştırıcı içerisinde elde edilen gerilme dağılımları benzerlik göstermektedir. Her iki gerilme bileşeninin maksimum değeri, gevrek yapıştırıcı içerisinde kenarlara yakın kısımlarda oluşmaktadır. Yük artışı ile beraber, plastik şekil değişimlerine bağlı olarak, gevrek yapıştırıcı gerilme değerleri daha homojen dağılım göstermekte ve kenar ile orta kısımlar arasındaki gerilme değerleri arasındaki fark önemli oranda azalmaktadır. Gevrek yapıştırıcı, kayma dayanımı tam kapasitesine 0.5 yapıştırıcı-uzunluk oranına benzer şekilde yaklaşmaktadır. Tok yapıştırıcı içerisindeki eşdeğer ve kayma gerilmesi maksimum değerleri yer değiştirerek gevrek yapıştırıcı kenar kısımlarına yaklaşmaktadır.

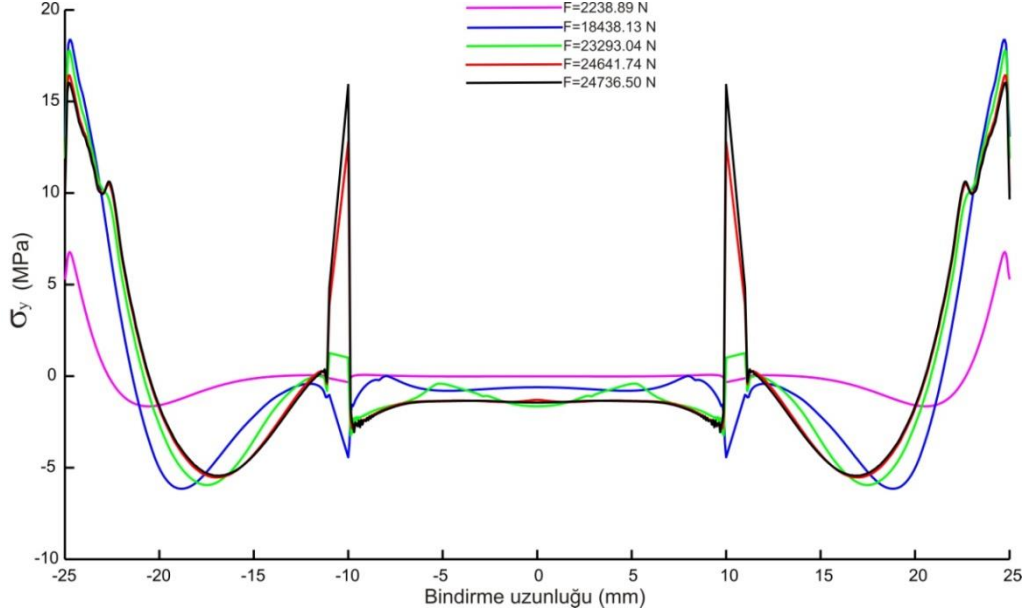


Şekil 8.37 Hibrit yapıştırmalı bağlantı lineer olmayan analiz: 0.7 yapıştırıcı-uzunluk oranı için yapıştırıcı orta düzlemi yüke bağlı eşdeğer gerilme dağılımı



Şekil 8.38 Hibrit yapıştırmalı bağlantı lineer olmayan analiz: 0.7 yapıştırıcı-uzunluk oranı için yapıştırıcı orta düzlemi yüke bağlı kayma gerilmesi dağılımı

Şekil 8.39’da soyulma gerilmesi dağılımı görülmektedir. Uygulanan yük değerlerinin tamamında, soyulma gerilmesi, maksimum değerine yapıştırıcı kenarlarında ulaşmaktadır. Yük artışı ile beraber, 0.3 ve 0.5 yapıştırıcı-uzunluk oranlarına benzer şekilde, dönme etkisinin artması tok ve gevrek yapıştırıcıların birbirine yakın ara yüzeylerinde pozitif soyulma gerilmesi oluşmasına neden olmaktadır.



Şekil 8.39 Hibrit yapıştırırmalı bağlantı lineer olmayan analiz: 0.7 yapıştırıcı-uzunluk oranı için yapıştırıcı orta düzlemi yüke bağlı soyulma gerilmesi dağılımı

Mono ve hibrit yapıştırırmalı bağlantılar için, gerilme dağılımları incelendiğinde, dikkat çeken en önemli sonuçlardan biri, eşdeğer gerilme değerlerinin, yapıştırıcıların bulk numune çekme testinden elde edilen sınır gerilme değerleri (dayanımı) olan çekme gerilmesinden yüksek değerlere sahip olmasıdır. Eşdeğer gerilmenin, bulk numune çekme gerilmesinden yüksek olması, Drucker Prager kriterinin hasar yüzeyinde plastik akma oluşumu süresince, artan hidrostatik basınç ile dayanımdaki artışın devam etmesine izin vermesi şeklinde açıklanabilir [125]. Drucker prager kriterinde, plastik akma, von Mises kriterinden farklı olarak, dilatasyon açısı ile kontrol edilir. Dilatasyon açısı, akma kuralını ve hacimsel şekil değişim miktarını belirler. Da Silva ve Adams [126], Drucker Prager kriterine bağlı kritik gerilme değerlerindeki değişimi, von Mises ve Drucker Prager kriterlerinden elde ettikleri kayma gerilmesi değerini karşılaştırarak açıklamışlardır. Çalışmalarında, Drucker Prager kayma gerilmesi değerinin, von Mises kayma gerilmesi değerinden %13 daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Da Silva ve

Adams tarafından yapılan bu çalışma, kayma şekil değişimi etkisindeki eşdeğer gerilme değerinin, malzemenin çekme gerilmesi dayanımından yüksek olabileceğini göstermektedir.

SEA sonuçlarından elde edilen gerilme dağılımlarına göre belirlenen hasar yükü değerleri karşılaştırıldığında, elde edilen diğer önemli bir sonuç ise, yapıştırıcı-uzunluk oranları değiştirilerek, ideal hibrit yapıştırma düzeninin elde edilebileceğidir. Yapılan çalışmada, seçilen 0.5 yapıştırıcı-uzunluk oranının ideal hibrit yapıştırma düzeni olduğu belirlenmiştir. Üç farklı yapıştırıcı-uzunluk oranına sahip hibrit yapıştırmalı bağlantı hasar yükleri karşılaştırıldığında, 0.5 yapıştırıcı-uzunluk oranına sahip hibrit yapıştırmalı bağlantı, en yüksek hasar yükü değerine ulaşmaktadır. Gevrek yapıştırıcı uzunluğu boyunca, 0.5 uzunluk oranı için, kayma gerilmesi değerleri arasındaki fark, yük artışı ile azalarak homojen dağılım göstermekte ve tam kayma dayanımı kapasitesine yaklaşmaktadır. Gevrek yapıştırıcı kayma gerilmesi dağılımı, 0.7 yapıştırıcı-uzunluk oranı için, 0.5 yapıştırıcı-uzunluk oranına benzer davranış göstermektedir. Ancak, 0.7 yapıştırıcı-uzunluk oranında, yük taşıma kapasitesi, tok yapıştırıcıya göre daha yüksek olan gevrek yapıştırıcı uzunluğunun azaltılması, bağlantı hasar yükü ile beraber dayanımı düşürmektedir. Gevrek yapıştırıcının, tok yapıştırıcıya göre fazla kullanıldığı 0.3 yapıştırıcı-uzunluk oranında, kayma gerilmesi dağılımı, 0.5 ve 0.7 yapıştırıcı-uzunluk oranlarından farklı davranış göstermektedir. Gevrek yapıştırıcının fazla olduğu, 0.3 yapıştırıcı-uzunluk oranı için, gevrek yapıştırıcının orta kısımları ile kenar kısımları arasındaki kayma gerilmesi değerleri arasındaki fark, 0.5 ve 0.7 yapıştırıcı-uzunluk oranları ile karşılaştırıldığında daha fazladır. Bununla birlikte, 0.3 yapıştırıcı-uzunluk oranına sahip hibrit yapıştırmalı bağlantı hasar yükü değeri, gevrek yapıştırıcı uzunluğunun fazla olması ve gevrek yapıştırıcı orta kısımlarında, yük taşımaya önemli oranda katkı sağlamasından dolayı, 0.7 yapıştırıcı-uzunluk oranına sahip hibrit yapıştırmalı bağlantı hasar yükü ile karşılaştırıldığında, daha yüksek değere sahiptir.

Bölüm 7’de elde edilen mono ve hibrit yapıştırmalı bağlantı deneysel hasar yüklerinin karşılaştırılması amacıyla, deneysel ve lineer olmayan SEA hasar yükleri, Çizelge 8.7’ de karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Deneysel hasar yükü değerlerine göre, lineer olmayan analiz hasar yükleri arasındaki yüzde fark miktarı aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmıştır:

$$\%Fark = \frac{Deneysel - Nümerik}{Deneysel} \times 100 \quad (8.27)$$

Çizelge 8.7 incelendiğinde, tok yapıştırıcı 2015 için, deneysel ve SEA sonuçlarından elde edilen hasar yüklerinin birbirlerine yakın değerlere sahip olduğu görülmektedir. Deneysel ve SEA hasar yükleri arasındaki en büyük fark, mono yapıştırmalı bağlantıda, gevrek yapıştırıcı AV138 kullanılması durumunda meydana gelmiştir. Gevrek yapıştırıcı AV138 için, deneysel ve SEA hasar yükleri arasında fark yaklaşık %52'dir. Bu duruma sebep olarak, gevrek yapıştırıcının, tok yapıştırıcıya göre, yapısı içerisinde mevcut hatalara (boşluk, çatlak v.b) karşı duyarlılığının fazla olması ve bindirme uzunluğu kenarlarında bağlantıyı ayırma yönünde etkiye sahip yüksek soyulma gerilmelerinin oluşması şeklinde gösterilebilir [102], [127]. Hibrit yapıştırmalı bağlantılar için elde edilen deneysel ve SEA hasar yükleri arasındaki yüzde farkı oldukça düşüktür. Bu durum, hibrit yapıştırmalı bağlantılarda, yüksek soyulma gerilmesi yoğunluğunun azaltılması ile gevrek yapıştırıcı içerisinde yapısal hataların neden olduğu ani hasar oluşumunun engellendiği şeklinde açıklanabilir. Soyulma gerilmelerine karşı direnci düşük olan gevrek yapıştırıcının hibrit yapıştırmalı bağlantının ortasında kullanılması, gevrek yapıştırıcının, yapısı içerisinde mevcut yapısal hatalara hassasiyetine rağmen, soyulma gerilmelerinde meydana gelen düşüşe bağlı olarak, tam kayma dayanımı kapasitesine yaklaşmasını sağlamıştır.

Çizelge 8.7 Mono ve hibrit yapıştırmalı bağlantı deneysel ve lineer olmayan SEA hasar yüklerinin karşılaştırılması

Oran (ξ)	Yapıştırıcılar	Uzunluk (mm)	Hasar Yüğü (N)		% Fark
			Deneysel	SEA	
Mono	AV138	50	14510	22083.86	52.2
	2015	50	20760	19279.70	7.13
0.3	AV138+2015	09-30-09	27690	25070.00	9.46
0.5	AV138+2015	12-24-12	29170	25732.50	11.78
0.7	AV138+2015	14-20-14	25300	24641.74	2.6

SONUÇ ve ÖNERİLER

Doktora tezinde, hibrit yapıştırırmalı bağlantı, analitik ve sonlu eleman modelleri kullanılarak incelenmiş ve deneysel çalışma yapılmıştır. Temel olarak, hibrit yapıştırırmalı bağlantı yapıştırıcı-uzunluk oranları değiştirilerek, yapıştırma çizgisi boyunca gerilme dağılımları ve bağlantı hasar yükleri belirlenmiştir. Analitik model, toplam 24 sınır şartına bağlı çözüm içeren, üç farklı denklem setinden meydana gelmektedir. Denklem setlerinin sınır şartlarına bağlı olarak çözümünde MAPLE yazılımı kullanılmıştır. Hazırlanan analitik model, hibrit yapıştırırmalı bağlantı ile beraber mono yapıştırırmalı bağlantı gerilme dağılımlarının belirlenmesi amacıyla da kullanılmıştır. Analitik model, 2-B ve 3-B lineer sonlu eleman analiz sonuçları ile karşılaştırılarak, doğrulanmıştır. Elde edilen karşılaştırma sonuçları, analitik modelin, 2-B ve 3-B analiz gerilme davranışını sağladığını ve gerilme değerlerinin SEA gerilme değerlerine yakın olduğunu göstermiştir. Doktora tezinin deneysel kısmında, mono ve hibrit yapıştırırmalı bağlantılarda kullanılmak üzere, analitik modelin doğrulanması amacıyla kullanılan yapıştırıcılardan farklı olarak, farklı mekanik özelliklere sahip üç yapıştırıcı seçilmiştir. Mono ve hibrit yapıştırırmalı bağlantı deneysel hasar yükleri belirlenmiştir. Hibrit yapıştırırmalı bağlantılar için hasar yükleri, bağlantıyı oluşturan yapıştırıcıların, tekil kullanılması durumuna göre daha yüksek elde edilmiştir. Mono ve hibrit yapıştırırmalı bağlantılar için hasar yüzeyleri incelenmiş ve numunelerin tamamında yapıştırıcı koheziv hasarı meydana geldiği belirlenmiştir. Yapıştırıcı koheziv hasarı, bağlantıların hazırlanmasında izlenen yüzey hazırlama yöntemlerinin yeterli ve uygun olduğunu

göstermiştir. Ayrıca, deneysel çalışmalarda kullanılan hibrit yapıştırma düzenin, bağlantı rijitliği üzerine etkisi, oluşturulan global rijitlik analitik modeli kullanılarak tespit edilmiştir. Hibrit yapıştırmalı bağlantıların, global rijitlik değerini olumsuz yönde etkilemediği belirlenmiştir. Doktora tezinin son aşamasında, eksponansiyel Drucker Prager modeli kullanılarak mono ve hibrit yapıştırmalı bağlantı hasar yükleri belirlenmiştir. Elde edilen hasar yükleri, deneysel hasar yükleri ile karşılaştırıldığında, mono gevrek yapıştırıcı hariç, oldukça yakın değerler elde edilmiştir. Deneysel ve lineer olmayan SEA hasar yüklerinin yakın değerlere sahip olması, SEA çözümlerinde kullanılan eksponansiyel Drucker Prager kriteri ile hasar kriterlerinin uygunluğunu göstermiştir.

Doktora tezi, hibrit yapıştırmalı bağlantı üzerine, oluşturulan analitik model, detaylı deneysel aşamalar, uygun malzeme modeli ve mono ve hibrit yapıştırmalı bağlantılar için kullanılan hasar kriterlerinin uygunluğunu göstermesi açısından önemlidir.

Tezde elde edilen çıktılar aşağıdaki gibi detaylı şekilde sıralanabilir:

- Analitik modelin doğrulanması aşamasında, mono ve hibrit yapıştırmalı bağlantılar için, analitik ve nümerik çözüm kayma gerilmelerinin bir birine yakın değerlere sahip olduğu görülmüştür. Mono yapıştırma durumunda maksimum kayma gerilmesi kenarlarda oluşurken, hibrit yapıştırmalı bağlantılarda yapıştırıcı ara yüzeylerinde kayma gerilmeleri maksimum değere ulaşmaktadır. Kenar pik kayma gerilmesi değerleri, yapıştırıcı-uzunluk oranı arttıkça artmaktadır. Bununla birlikte, yapıştırıcı ara yüzeylerinde, kenarlarda meydana gelen artışa paralel olarak pik kayma gerilmesi değerlerinde düşüş görülmüştür.
- Mono-gevrek yapıştırmalı bağlantılar için, analitik model, pik kayma gerilmesi değerlerini 3-B SEA çözümlerine göre düşük, 2-B SEA çözümlerine göre ise yüksek tahmin etmiştir. Analitik çözüm, 2-B ve 3-B SEA ile karşılaştırıldığında hata yüzdeleri sırasıyla, %2.0 ve %3.80 olarak hesaplanmıştır. Bununla birlikte, mono-sünek yapıştırmalı bağlantı için, analitik model, pik kayma gerilmesi değerlerini 2-B ve 3-B SEA çözümlerine göre daha düşük tahmin etmiş ve 2-B ve 3-B SEA ile karşılaştırıldığında hata yüzdeleri sırasıyla, %1.40 ve %5.94 olarak hesaplanmıştır.

- Dört farklı yapıştırıcı-uzunluk oranı için, analitik ve SEA çözümlerinden elde edilen, hibrit yapıştırırmalı bağlantı kenar ve yapıştırıcı ara yüzeyleri pik kayma gerilmesi değerleri birbiri ile uyumlu ve yakın sonuçlar vermiştir. Analitik model çözümleri ile 2-B SEA sonuçları karşılaştırıldığında, kenar ve yapıştırıcı ara yüzeyi pik kayma gerilmesi değerleri arasında sırasıyla, maksimum %3.93 ve %-4.11 hata miktarları oluşmuştur. Benzer şekilde, analitik model, 3-B SEA çözümleri karşılaştırıldığında yüzde hata miktarı artmış ve kenar ile yapıştırıcı ara yüzeyi pik kayma gerilmesi değerleri arasında sırasıyla, %6.62 ve %7.32 hata miktarı oluşmuştur.
- Yapıştırıcı-uzunluk oranının kenar pik soyulma gerilmesi değerleri üzerine önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Hibrit yapıştırırmalı bağlantı kullanılması durumunda, kenarlarda oluşan pik soyulma gerilmesi değerleri, mono-gevrek yapıştırıcılı bağlantı kullanımına göre önemli oranda düşmüştür. Yapıştırıcı ara yüzeylerinde, yapıştırıcı-uzunluk oranının düşmesine bağlı olarak, çok az miktarda sünek yapıştırıcı kullanılması durumunda, soyulma gerilmesi dağılımı içerisinde ikincil pik soyulma gerilmesi meydana gelmektedir. İkincil pik soyulma gerilmesi, hibrit yapıştırırmalı bağlantılarda istenmeyen bir durumdur ve bağlantıyı ayırma yönünde etkiye sahiptir.
- Mono-gevrek yapıştırırmalı bağlantılar için, analitik model, pik soyulma gerilmesi değerlerini 2-B ve 3-B SEA çözümlerine göre yüksek tahmin etmiş ve 2-B ve 3-B SEA ile karşılaştırıldığında hata yüzdeleri sırasıyla, %-13.62 ve %-1.48 olarak hesaplanmıştır. Bununla birlikte, mono-sünek yapıştırırmalı bağlantılar için, analitik model, pik soyulma gerilmesi değerlerini 2-B SEA çözümlerine göre yüksek, 3-B SEA çözümlerine göre ise düşük tahmin etmiş ve 2-B ve 3-B SEA ile karşılaştırıldığında hata yüzdeleri sırasıyla, %-8.55 ve %4.40 olarak hesaplanmıştır. Analitik model ile nümerik çözümler arasındaki en büyük fark, yapıştırıcı ara yüzeylerinde 0.2 yapıştırıcı-uzunluk oranında oluşmuştur. Oluşan bu fark, yapıştırırmalı bağlantıların tasarımında, maksimum gerilme değerleri göz önüne alındığından çok fazla öneme sahip değildir [70].

- Dört farklı yapıştırıcı-uzunluk oranı için, hibrit yapıştırılmalı bağlantı kenar ve yapıştırıcı ara yüzeylerinde oluşan pik soyulma gerilmesi değerleri için analitik ve SEA çözümleri, özellikle gerilmenin maksimum olduğu kenarlarda, birbiri ile uyumlu ve yakın sonuçlar vermiştir. Analitik model çözümleri ile 2-B SEA sonuçları karşılaştırıldığında, kenar pik soyulma gerilmesi değerleri arasında %9.12 hata miktarı oluşmuştur. Benzer şekilde, analitik model ve 3-B SEA çözümleri karşılaştırıldığında yüzde hata oranı düşmüş ve kenar pik soyulma gerilmesi değerleri arasında %7 hata miktarı oluşmuştur. Analitik model ile nümerik çözümler arasındaki en büyük fark 0.2 yapıştırıcı-uzunluk oranında oluşmuştur. Bu oran için, analitik model, pik soyulma gerilmesi hata yüzdeleri, 2-B ve 3-B SEA ile karşılaştırıldığında sırasıyla, %-111.46 ve %-408.86 olarak hesaplanmıştır.
- Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda görsel olarak yapılan incelemeler, yapıştırılan levhalar da yapıştırıcı hasarı sonrasında herhangi bir kalıcı şekil değişiminin meydana gelmediğini göstermiştir.
- Hasar yüzeyleri UNE EN ISO 10365 standardına göre incelendiğinde, yapıştırma yüzey çiftlerinin her ikisinde yapıştırıcının bulunduğu ve koheziv hasar tipi meydana geldiği görülmüştür. Bu sonuç, yüzey hazırlama işlemlerinin yeterliliğini göstermesi açısından önemlidir.
- Deneysel çalışmalarda, hibrit yapıştırılmalı bağlantılar için elde edilen en önemli sonuç, hibrit yapıştırılmalı bağlantı dayanımının, bağlantıyı oluşturan yapıştırıcıların tekil kullanılması durumuna göre daha yüksek olmasıdır. AV138 gevrek yapıştırıcının bindirme bölgesinin merkezinde, 2015 ve DP-8005 yapıştırıcılarının kenarlarda kullanıldığı hibrit yapıştırma bağlantıları incelendiğinde, ulaşılan hasar yüklerinin üç yapıştırıcının tekil kullanımına göre daha yüksek olduğu görülmüştür. AV138 ve 2015 yapıştırıcılar ile oluşturulan 0.5 yapıştırıcı-uzunluk oranına sahip hibrit yapıştırılmalı bağlantı, mono ve hibrit yapıştırılmalı bağlantılar içerisinde en yüksek hasar yükü değerine ulaşmıştır.
- Mono yapıştırılmalı bağlantılar için en yüksek ve en düşük rijitlik değerleri sırasıyla, AV138 ve DP-8005 yapıştırıcıların kullanıldığı bağlantılarda meydana

gelmiştir. Hibrit yapıştırırmalı bağlantı rijitlik değerleri DP-8005 ve 2015 yapıştırıcıların kullanıldığı mono yapıştırırmalı bağlantı rijitlik değerlerinden daha yüksektir ve bindirme uzunluğu boyunca AV138 gevrek yapıştırıcının en fazla yer kapladığı 0.3 yapıştırıcı-uzunluk oranında en yüksek değerine ulaşarak aynı yapıştırıcının tekil olarak kullanıldığı mono yapıştırırmalı bağlantı rijitlik değerine yaklaşmıştır.

- Tok yapıştırıcı 2015 deneysel ve lineer olmayan SEA sonuçlarından elde edilen hasar yüklerinin birbirlerine yakın değerlere sahip olduğu görülmüştür. Deneysel ve SEA hasar yükleri arasındaki en büyük fark, mono yapıştırırmalı bağlantıda gevrek yapıştırıcı AV138 kullanılması durumunda meydana gelmiştir. Gevrek yapıştırıcı AV138 için, deneysel ve SEA hasar yükleri arasında fark yaklaşık %52'dir. Bu duruma sebep olarak, gevrek yapıştırıcının, tok yapıştırıcıya göre, yapısı içerisinde mevcut hatalara (boşluk, çatlak v.b) karşı duyarlılığının fazla olması ve bindirme uzunluğu kenarlarında bağlantıyı ayırma yönünde etkiye sahip yüksek soyulma gerilmelerinin oluşması şeklinde gösterilebilir [102], [127]. Hibrit yapıştırırmalı bağlantılar için elde edilen deneysel ve SEA hasar yükleri arasındaki yüzde farkı oldukça düşüktür. Bu durum, hibrit yapıştırırmalı bağlantılarda, yüksek soyulma gerilmesi yoğunluğunun azaltılması ile gevrek yapıştırıcı içerisinde yapısal hataların neden olduğu ani hasar oluşumunun engellendiği şeklinde açıklanabilir. Soyulma gerilmelerine karşı direnci düşük olan gevrek yapıştırıcının hibrit yapıştırırmalı bağlantı içerisinde kullanılması, gevrek yapıştırıcının, yapısı içerisinde mevcut yapısal hatalara hassasiyetine rağmen, soyulma gerilmelerinde meydana gelen düşüşe bağlı olarak, tam kayma dayanımı kapasitesine yaklaşmasını sağlamıştır.

Doktora tezinde, hibrit yapıştırırmalı bağlantılar için oluşturulan analitik model, yapıştırıcı kalınlığı boyunca gerilme dağılımını vermemektedir. Yapıştırıcı kalınlığı boyunca gerilme dağılımının analitik olarak belirlenmesi amacıyla mevcut model geliştirilebilir. Deneysel çalışmalarda, film tipi, basınç ile kürleşen yapıştırıcılar kullanılarak, hibrit bağlantının hazırlanması önemli ölçüde basitleştirilebilir. Lineer olmayan analizler, von Mises ve lineer Drucker Prager modelleri ile tekrarlanarak, kullanılan malzeme modelinin bağlantı hasar yükü üzerine etkisi araştırılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Bavi, O., Bavi, N. ve Shishesaz, M., (2013). "Geometrical Optimization of the Overlap in Mixed Adhesive Lap Joints", *The Journal of Adhesion*, 89: 948–972.
- [2] Katnam, K.B., Crocombe, A.D., Khoramishad, H. ve Ashcroft, I. A.,(2010). "Load Ratio Effect on the Fatigue Behaviour of Adhesively Bonded Joints: An Enhanced Damage Model", *The Journal of Adhesion*, 86:257–272.
- [3] Fessel, G., Broughton, J.G., Fellows, N.A., Durodola, J.F. ve Hutchinson, A.R. ,(2007). "Evaluation of different lap-shear joint geometries for automotive applications", *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 27: 574–583.
- [4] Campilho, R.D.S.G., De Moura M.F.S.F. ve Domingues, J.J.M.S., (2009). "Numerical prediction on the tensile residual strength of repaired CFRP under different geometric changes", *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 29: 195–205.
- [5] Raphael, C. (1966). "Variable-adhesive bonded joints", *Applied Polymer Symposia*, 3: 99-108.
- [6] Das Neves, P.J.C., Da Silva, L.F.M. ve Adams, R.D., (2009). "Analysis of mixed adhesive bonded Joints Part I: theoretical formulation", *Journal of Adhesion Science and Technology*, 23: 1-34.
- [7] Das Neves, P.J.C., Da Silva, L.F.M. ve Adams, R.D., (2009). "Analysis of Mixed Adhesive Bonded Joints Part II: Parametric Study", *Journal of Adhesion Science and Technology*, 23: 35-61.
- [8] Frostig, Y., Thomsen, O., ve Mortensen, F. (1999). "Analysis of Adhesive-Bonded Joints, Square-End, and Spew-Fillet—High-Order Theory Approach", *J. Eng. Mech.*, 125(11): 1298–1307.
- [9] Pires, I., Quintino, L., Durodola, J.F., ve Beevers, A., (2003). "Performance of bi-adhesive bonded aluminium lap joints", *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 25: 215–223.
- [10] Fitton, M.D. ve Broughton, J.G., (2005). "Variable modulus adhesives: an approach to optimized joint performance", *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 25: 329–336.

- [11] Kong, F., You, M. ve Zheng, X., (2008). "Three-dimensional finite element analysis of the stress distribution in bi-adhesive bonded joints", *The Journal of Adhesion*, 84: 105–124.
- [12] Da Silva, L.F.M. ve Lopes, M.C.Q., (2009). "Joint strength optimization by the mixed-adhesive technique", *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 29: 509–514.
- [13] Da Silva, L.F.M. ve Adams, R.D., (2007). "Adhesive joints at high and low temperatures using similar and dissimilar adherends and dual adhesives", *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 27: 216–226.
- [14] Temiz, S., (2006). "Application of bi-adhesive in double-strap joints subjected to bending moment", *Journal of Adhesion Science and Technology*, 20: 1547-1560.
- [15] Kumar, S. ve Pandey, P.C., (2010). "Behaviour of bi-adhesive joints", *Journal of Adhesion Science and Technology*, 24: 1251-1281.
- [16] Pires, I., Quintino, L. ve Miranda, R.M., (2006). "Numerical simulation of mono- and bi-adhesive aluminium lap joints", *Journal of Adhesion Science and Technology*, 20(1): pp. 19-36.
- [17] Carbas, R.J.C., DaSilva, L.F.M., Critchlow, G.W., (2014). "Adhesively bonded functionally graded joints by induction heating", *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 48: 110–118.
- [18] Özer, H. ve Öz Ö., (2012). "Three dimensional finite element analysis of bi-adhesively bonded double lap joint", *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 37: 50–55.
- [19] Ebnesajjad, S. (2008). *Adhesives Technology Handbook*, Second Edition, William Andrew Inc., New York.
- [20] Adams, R.D., (2005). *Adhesive bonding: Science, technology and applications*, Woodhead Publishing Limited, Cambridge.
- [21] Habenicht, G., (2009). *Applied Adhesive Bonding A Practical Guide for Flawless Results*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
- [22] Brady, G.S., Clauser, H.R. ve Vaccari, J.A., (2002). *Materials Handbook*, fifteenth edition, McGRAW-HILL, New York.
- [23] Packham, D.E., (2005). *Handbook of Adhesion*, Second Edition, John Wiley & Sons Ltd., West Sussex.
- [24] Petrie, E.M., (1999). *Handbook of Adhesives & Sealants*, Mc Graw-Hill Book Co., New York.
- [25] Messler Jr., R.W., (2004). *Joining of Materials and Structures*, Elsevier, New York.
- [26] Dunn, D.J., (2004)., "Engineering and structural adhesives", *Rapra review report*, 15(1):1–28.
- [27] Petrie, E.M., (2006). *Epoxy Adhesive Formulations*, Mc GRAW-HILL, New York.

- [28] Dillard, D.A. (2010). *Advances in structural adhesive bonding*, Woodhead Publishing Limited, Cambridge.
- [29] Roland, F., Manzon, L., Kujala, P., Brede, M. ve Weitzenböck, J., (2004). "Advanced Joining Techniques in European Shipbuilding", *Journal of Ship Production*, 20(3): 200–210.
- [30] Baur, P., Roy, A., Casari, P., Choqueuse, D. ve Davies, P. (2004). "Structural mechanical testing of a full-size adhesively bonded motorboat", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 218: 259-265.
- [31] Ebnesajjad, S., (2011). *Handbook of Adhesives and Surface Preparation: Technology, Applications and Manufacturing*, Elsevier, UK.
- [32] Gude, M.R., Prolongo, S.G., Gomez-del Rio, T. ve Urena, A., (2011). "Mode-I adhesive fracture energy of carbon fibre composite joints with nanoreinforced epoxy adhesives", *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 31: 695-703.
- [33] Kahraman, R., Sunar, M. ve Yilbas, B., (2008). "Influence of adhesive thickness and filler content on the mechanical performance of aluminum single-lap joints bonded with aluminum powder filled epoxy adhesive", *Journal of materials processing technology*, 205: 183-189.
- [34] MIL-HDBK-691B,(1987). *Military Standardization Handbook: Adhesive Bonding*, Department of Defense, Washington, D.C.
- [35] Baldan, A., (2012). "Adhesion phenomena in bonded joints", *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 38: 95-116.
- [36] Barnes, T.A., Pashby, I.R., (2000). "Joining techniques for aluminium space frames used in automobiles Part II-adhesive bonding and mechanical fasteners", *Journal of Materials Processing Technology*, 99: 72-79.
- [37] ASTM D1002–10, (2010). *Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to- Metal)*, ASTM, Pennsylvania.
- [38] Cognard P., (2005). *Adhesives and Sealants: Basic Concepts and High Tech Bonding*, Elsevier, Oxford.
- [39] Kuczmazewski, J., (2006). *Fundamentals of metal-metal adhesive joint design*, WSCHÓD Agencja Usługowa, lublin.
- [40] Weitzenböck, J. R., (2012). *Adhesives in marine engineering*, Woodhead Publishing Limited, Cambridge CB22 3HJ, UK.
- [41] ASTM D1062-08, (2008). *Standard Test Method for Cleavage Strength of Metal-to-Metal Adhesive Bonds*, ASTM, Pennsylvania.
- [42] ASTM D903–98 (Reapproved 2010). *Standard Test Method for Peel or Stripping Strength of Adhesive Bonds*, ASTM, Pennsylvania.

- [43] Song, M.-G., Kweon, J.-H., Choi, J.-H., Byun, J.-H., Song, M.-H. Shin, S.-J. ve Lee, Tae-J. (2010). "Effect of manufacturing methods on the shear strength of composite single-lap bonded joints", *Composite Structures*, 92: 2194–2202.
- [44] Seong, M.-S., Kim, T.-H. Nguyen, K.-H., Kweon, J.-H. ve Choi, J.-H., (2008). "A parametric study on the failure of bonded single-lap joints of carbon composite and aluminum", *Composite Structures*: 135–145.
- [45] Da Silva, L.F.M., Critchlow, G.W. ve Figueiredo, M.A.V., (2008). "Parametric Study of Adhesively Bonded Single Lap Joints by the Taguchi Method" *Journal of Adhesion Science and Technology*, 22: 1477–1494.
- [46] Da Silva, L.F.M., Rodrigues, T.N.S.S., Figueiredo, M.A.V., De Moura, M.F.S.F. ve Chousal, J.A.G. (2006). "Effect of Adhesive Type and Thickness on the Lap Shear Strength", *The Journal of Adhesion*, 82: 1091–1115.
- [47] Xu, W. ve Wei, Y., (2013). "Influence of adhesive thickness on local interface fracture and overall strength of metallic adhesive bonding structures", *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 40: 158–167.
- [48] Cognard P., (2006). *Adhesives and Sealants: General Knowledge, Application Techniques, New Curing Techniques*, Elsevier, Amsterdam.
- [49] Adams, R.D. ve Peppiatt, N.A., (1974). "Stress analysis of adhesive-bonded lap joints", *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 9(3): 185-196.
- [50] Grant, L.D.R., Adams, R.D. ve Da Silva, L.F.M., (2009). "Experimental and numerical analysis of single-lap joints for the automotive industry", *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 29: 405–413.
- [51] Van Ingen, J.W. ve Vlot, A. (1993). *Stress Analysis of Adhesively Bonded Single Lap Joints*, Report LR-740, TU Delft.
- [52] Broughton, B. ve Gower, M. (2001). *Preparation and Testing of Adhesive Joints*, Technical Report No. 47, NPL Materials Centre, National Physical Laboratory, Teddington, Middlesex.
- [53] De Tejada, G.H.-R.M., (2012). *Technical Project of Designing, Manufacturing and Testing Components Using Hybrid Joints*, Madrid.
- [54] Da Silva, L.F.M., Öchsner, A. ve Adams, R.D., (2011). *Handbook of Adhesion Technology*, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg.
- [55] Gacoin, A., Objois A., Assih J. ve Delmas, Y., (2008). "Experimental and Numerical Analysis on Adhesively Bonded Scarf Joints: Effects of the Substrate's Material and Adhesively Bonded Joint Geometry on the Damage Evolution", *The Journal of Adhesion*, 84: 37–59.
- [56] Rider, A. ve Chalkley, P., (2004). "Durability of an off-optimum cured aluminium joint", *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 24: 95–106.
- [57] Critchlow, G.W. ve Brewis, D.M., (1996). "Review of surface pretreatments for aluminium alloys", *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 16: 255–275.

- [58] Bresson G., Jumel J., Shanahan, M.E.R., Serin, P., (2012). "Strength of adhesively bonded joints under mixed axial and shear loading", *International Journal of Adhesion&Adhesives*,35: 27–35.
- [59] Zhang, J., Zhao, X., Zuo, Y., Xiong, J. ve Zhang, X., (2008). "Effect of Surface Pretreatment on Adhesive Properties of Aluminum Alloys", *J. Mater. Sci. Technol.*, 24(2): 236-240.
- [60] Avcu, E., Şahin, A., Fidan, S., Sınmazçelik, T., Taşkıran,İ., Bora, M.Ö. ve Çoban, O., (2011). "Cam Keçe Takviyeli Polifenilen Sülfid Matrisli Kompozitlerin Katı Partikül Erozyon Davranışları: Partikül Çarpma Açısının ve Hızının Etkileri", *1. Ulusal Ege Kompozit Malzemeler Sempozyumu*, 17–19 Kasım, 2011, Ege üniversitesi, İzmir.
- [61] Teng, J.G., Fernando, D., Yu, T. ve Zhao, X.L., (2010). "Treatment of Steel Surfaces for Effective Adhesive Bonding", *The 5th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, CICE 2010*, September 27-29, 2010, Beijing, China.
- [62] Arenas, J.M., Alía, C., Narbón, J.J., Ocaña, R., González, C., (2013). "Considerations for the industrial application of structural adhesive joints in the aluminium–composite material bonding", *Composites: Part B* 44: 417–423.
- [63] Davis, M. ve Tomblin, J., (2007). *Best Practice in Adhesive-Bonded Structures and Repairs*, Technical report no DOT/FAA/AR-TN06/57, National Technical Information Service (NTIS) Springfield, Virginia.
- [64] Da Silva L.F.M., Dillard D.A., Blackman B. ve Adams, R.D., (2012). *Testing Adhesive Joints*, Wiley-VCH, Weinheim.
- [65] Allman, D.J. (1977). "A theory for elastic stresses in adhesive bonded lap joints", *Quarterly Journal of Mechanics & Applied Mathematics*, 30(4): 415–436.
- [66] Bigwood, D.A. ve Crocombe, A.D., (1989). "Elastic analysis and engineering design formulae for bonded joints", *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 9(4): 229–242.
- [67] Tsai, M.Y., Oplinger, D.W. ve Morton, J., (1998). "Improved theoretical solutions for adhesive lap joints", *International Journal of Solids and Structures*, 35(12): 1163–1185.
- [68] Zhao, B. ve Lu, Z-H., (2009). "A two-dimensional approach of single-lap adhesive bonded joints", *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 16(2): 130-159.
- [69] Zhao, B., Lu, Z-H. ve Lu, Y-N., (2011). "Closed-form solutions for elastic stress–strain analysis in unbalanced adhesive single-lap joints considering adherend deformations and bond thickness", *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 31: 434–445.

- [70] Zou, G. P., Shahin, K. ve Taheri, F., (2004). "An analytical solution for the analysis of symmetric composite adhesively bonded joints", *Composite Structures*, 65: 499-510.
- [71] Kalamkarov, A.L., (1997). "Stress Analysis in Elastic Joint Structures", *Int. J. Mech. Sci.*, 39(7): 873-883.
- [72] Chang, D.J. ve Muki, R., (1974). "Stress Distribution in a lap joint under tension-shear", *Int. J. Solids Structures*, 10: 503-917.
- [73] Her, S.C., (1999). "Stress analysis of adhesively-bonded lap joints", *Composite Structures*, 47: 673-678.
- [74] Da Silva, L.F.M., Das Neves, P.J.C., Adams, R.D. ve Spelt, J.K., (2009). "Analytical models of adhesively bonded joints—Part I: Literature survey", *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 29:319–330.
- [75] Volkersen, O. (1938). "Die Niekraftverteilung in Zugbeanspruchten mit Konstanten Laschenquerschritten", *Luftfahrtforschung*, 15: 41-47.
- [76] Hua, Y., Gu, L. ve Trogon, M., (2012). "Three-dimensional modeling of carbon/epoxy to titanium single-lap joints with variable adhesive recess length", *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 38: 25–30.
- [77] Rodriguez, R.Q., De Paiva, W.P., Sollero, P., Rodrigues, M.R.B. ve De Albuquerque, E.L. (2012). "Failure criteria for adhesively bonded joints", *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 37: 26-36.
- [78] Goland, M. ve Reissner, E. (1944). "The stresses in cemented joints.", *J Appl Mech*, 66: A17–27.
- [79] Da Silva, L.F.M. ve Öchsner, A., (2008). *Modeling of Adhesively Bonded Joints*, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg .
- [80] Zhao, B. (2008). "Theoretical stress model of mixed-modulus single-lap adhesive bonded joints considering the bending effect", *Chinese Journal of mechanical engineering*, 44(10): 129-137.
- [81] Araldite AV138 M HV 998: Technical Data Sheet, <http://adhesive.leaderseal.com/download/TDSAV138M-HV998.pdf>, 1 Ocak 2014.
- [82] Araldite 2015: Technical Data Sheet, <http://www.intertronics.co.uk/data/ara2015.pdf>, 1 Ocak 2014.
- [83] Scotch-Weld DP-8005: Technical Data Sheet, <http://multimedia.3m.com/mws/media/797490/3m-scotch-weld-structural-plastic-adhesive-dp-8005.pdf>, 1 Ocak 2014.
- [84] Pinto, A.M.G., Campilho, R.D.S.G., Mendes, I.R. ve Baptista, A.P.M., (2014). "Numerical and Experimental Analysis of Balanced and Unbalanced Adhesive Single-Lap Joints between Aluminium Adherends", *The Journal of Adhesion*, 90: 89–103.

- [85] Pinto, A.M.G., Magalhães, A.G., Campilho, R.D.S.G., De Moura, M.F.S.F. ve Baptista, A.P.M. (2009). "Single-Lap Joints of Similar and Dissimilar Adherends Bonded with an Acrylic Adhesive", *The Journal of Adhesion*, 85: 351–376.
- [86] ASTM E8/E8M–09, (2009). *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*, ASTM, Pennsylvania.
- [87] Da Silva, L.F.M., Carbas, R.J.C., Critchlow, G.W., Figueiredo, M.A.V. ve Brown, K., (2009). "Effect of material, geometry, surface treatment and environment on the shear strength of single lap joints", *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 29: 621–632.
- [88] Saykar kumlama: silisyum karbür özellikleri, www.saykar.net/silisyum+karbur.html, 01 ocak 2014.
- [89] Balza, J.C., Zujur, D., Gil, L., Subero, R., Dominguez, E., Delvasto, P. ve Alvarez, J. (2013). "Sandblasting as a surface modification technique on titanium alloys for biomedical applications: abrasive particle behavior", *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 45: 1-5.
- [90] Gower, M.R.L. ve Broughton, W.R. (1999). *Fractographic Analysis of Adhesive Joints*, Report No 11, Centre for Materials Measurement & Technology, National Physical Laboratory, Teddington, Middlesex.
- [91] Banea, M.D. ve Da Silva L.F.M., (2010). "The effect of temperature on the mechanical properties of adhesives for the automotive industry", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials Design and Applications*, 224: 51-62.
- [92] Da Silva, L.F.M., Ferreira, N.M.A.J., Richter-Trummer, V. ve Marques, E.A.S., (2010). "Effect of grooves on the strength of adhesively bonded joints", *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 30: 735–743.
- [93] Beevers, A., Steidler, S.M., Durodola, J. ve Coackley, M., (2001). "Analysis of stiffness of adhesive joints in car bodies", *J. Mater. Process. Technol.*, 118(1): 95–100.
- [94] Owens, J.F.P. ve Lee-Sullivan, P., (2000). "Stiffness behaviour due to fracture in adhesively bonded composite-to-aluminum joints I. Theoretical model", *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 20: 39-45.
- [95] Owens, J.F.P. ve Lee-Sullivan, P., (2000). "Stiffness behaviour due to fracture in adhesively bonded composite-to-aluminum joints II. Experimental", *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 20: 47-58.
- [96] Dean, G. ve Crocker, L., (2000). *Comparison of the Measured and Predicted Deformation of an Adhesively Bonded Lap-Joint Specimen*, Technical Report No 2, Adhesives Materials Centre, National Physical Laboratory, Teddington, Middlesex.
- [97] Aydın, M.D., Temiz, S., Ozel, A., (2007). "Effect of Curing Pressure on the Strength of Adhesively Bonded Joints", *The Journal of Adhesion*, 83: 553–571.

- [98] De Morais, A.B., Pereira, A.B., Teixeira, J.P. ve Cavaleiro, N.C., (2007). "Strength of epoxy adhesive-bonded stainless-steel joints", *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 27: 679–686.
- [99] Dean, G. ve Crocker, L., (2001). The use of finite element methods for design with adhesives, Technical Report No 48, Adhesives Materials Centre, National Physical Laboratory, Teddington, Middlesex.
- [100] Dean, G., Crocker, L., Read, B. ve Wright, L., (2004). "Prediction of deformation and failure of rubber-toughened adhesive joints", *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 24: 295–306.
- [101] Malvade, I, Deb ,A., Biswas, P. ve Kumar, A., (2009). "Numerical prediction of load–displacement behaviors of adhesively bonded joints at different extension rates and temperatures", *Computational Materials Science*, 44: 1208–1217.
- [102] Marques, E.A.S. ve Da Silva, L.F.M., (2008). "Joint Strength Optimization of Adhesively Bonded Patches", *The Journal of Adhesion*, 84: 915–934.
- [103] Ottosen, N.S. ve Ristinmaa M., (2005). *The Mechanics of Constitutive Modeling*, Elsevier, Oxford.
- [104] Guild, F.J., Potter, K.D., Heinrich, J., Adams, R.D. ve Wisnom, M.R., (2001). "Understanding and control of adhesive crack propagation in bonded joints between carbon fibre composite adherends II. Finite element analysis", *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 21: 445–453.
- [105] Charalambides, M.N. ve Olusanya, A. (1997). *The Constitutive Models Suitable for Adhesives in some Finite Element Codes and Suggested Methods of Generating the Appropriate Materials Data*, Technical Report No. 3, NPL Materials Centre, National Physical Laboratory, Teddington, Middlesex.
- [106] ABAQUS, (2003). *Analysis of Geotechnical Problems with ABAQUS*, U.S.A.
- [107] Aydın, M.D., (2008). "3-D Nonlinear Stress Analysis on Adhesively Bonded Single Lap Composite Joints with Different Ply Stacking Sequences", *The Journal of Adhesion*, 84: 15–36.
- [108] Crocker, L.E. ve Dean, G.D. (2005). "Predicting the Deformation Behaviour of Cavitating Materials", *Abaqus Users' Conference*, 18-20 May 2005, Stockholm, Sweden.
- [109] Broughton, W.R., Crocker, L.E. ve Urquhart, J.M., (2001). *Strength of Adhesive Joints: A Parametric Study*, NPL Report MATC(A)27, Adhesives Materials Centre, National Physical Laboratory, Teddington, Middlesex.
- [110] Crocombe, A.D. ve Kinloch, A.J., (1994). *Review of adhesive bond failure criteria*, MTS Adhesives Project 2, Report No. 1, U.K.
- [111] Greenwood, L., Boag, T., McLaren, A., (1969). *Stress distribution in lap joints*. In: *Adhesion: fundamentals and practice*, McLaren and Sons Ltd., London.
- [112] Dillard, D.A. ve Pocius, A.V., (2002). *Adhesion Science and Engineering-1; The Mechanics of Adhesion*, Elsevier, New York.

- [113] Chen, Z., Adams, R.D. ve Da Silva, L.F.M., (2011). "Prediction of crack initiation and propagation of adhesive lap joints using an energy failure criterion", *Engineering Fracture Mechanics*, 78: 990–1007.
- [114] Da Silva, L.F.M., De Magalhaes, F.A.C.R.G., Chaves, F.J.P., ve De Moura, M.F.S.F., (2010). "Mode II Fracture Toughness of a Brittle and a Ductile Adhesive as a Function of the Adhesive Thickness", *The Journal of Adhesion*, 86: 891–905.
- [115] Harris, A. ve Adams, R.D., (1984). "Strength prediction of bonded single lap joints by non-linear finite element methods", *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 4(2): 65-78.
- [116] Ikegami, K., Takeshita, T., Matsuo, K. ve Sugibayashi, T., (1990). "Strength of adhesively bonded scarf joints between glass fibre reinforced plastics and metals" *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 103: 199–206.
- [117] Sayman, O. (2012). "Elasto-plastic stress analysis in an adhesively bonded single-lap joint", *Composites: Part B*, 43: 204–209.
- [118] Campilho, R.D.S.G., Pinto, A.M.G., Banea, M.D., Silva, R. F ve Da Silva, L.F.M., (2011). "Strength Improvement of Adhesively-Bonded Joints Using a Reverse-Bent Geometry", *Journal of Adhesion Science and Technology*, 25: 2351–2368.
- [119] Hart-Smith, L.J., (1973). "Adhesive-bonded single-lap joints", Report NASA CR-112236, NASA Langley Research Center, Hampton, Virginia.
- [120] Da Silva, L.F.M. ve Campilho, R.D.S.G., (2011). *Advances in Numerical Modelling of Adhesive Joints*, Springer, Heidelberg.
- [121] Matweb: Material property data, www.matweb.com, 01 ocak 2014.
- [122] Lang, T.P. ve Mallick, P.K., (1999). "The effect of recessing on the stresses in adhesively bonded single-lap joints", *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 19: 257-271.
- [123] Da Silva, L.F.M., Pironi, A. ve Öchsner, A. (2011). *Hybrid Adhesive Joints*, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg.
- [124] NPL Manual (2007). *Manual for the Calculation of Elastic-Plastic Materials Models Parameters*, Queen's Printer, Scotland.
- [125] Hajsadeghi, M., Alaei, F.J. ve Shahmohammadi, A., (2011). "Investigation on Behaviour of Square/Rectangular Reinforced Concrete Columns Retrofitted with FRP Jacket", *Journal of Civil Engineering and Management*, 17(3): 400–408.
- [126] Da Silva, L.F.M. ve Adams, R.D., (2005). "Measurement of the mechanical properties of structural adhesives in tension and shear over a wide range of temperatures", *J. Adhesion Sci. Technol.*, 19(2): 109–141.
- [127] PDL Staff, (1997). *Handbook of Plastics Joining, A Practical Guide*, William Andrew, Inc., New York.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı	:Özkan ÖZ
Doğum Tarihi ve Yeri	:1980-Ankara
Yabancı Dili	:İngilizce
E-posta	:ooz@karabuk.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Makine Mühendisliği	Bülent Ecevit Üniversitesi	2007
Lisans	Makine Mühendisliği	Kırıkkale Üniversitesi	2004
Lise	Fen Bilimleri	Yenimahalle Mustafa Kemal Lisesi	1998

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2005-2007	Bülent Ecevit Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2007-Halen	Karabük Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

YAYINLARI

Makale

1. Ozer, H., ve Oz, O., (2014). "A Comparative Evaluation of Numerical and Analytical Solutions to the Biadhesive Single-Lap Joint", Mathematical Problems in Engineering, 2014, Article ID 852872:1-16.
2. Öz, Ö., ve Özer, H., (2014). "On the von Mises elastic stress evaluations in the bi-adhesive single-lap joint: a numerical and analytical study", Journal of Adhesion Science and Technology, 28(21): 2133-2153.
3. Özer, H., ve Öz, Ö., (2012). "Three dimensional finite element analysis of bi-adhesively bonded double lap joint", International Journal of Adhesion&Adhesives, 37: 50-55.
4. Ozer, H., ve Oz, O., (2012). "Joint Stress Optimization by the Hybrid Adhesive Lap Joint", Advanced Materials Research, 445: 1000-1004.
5. Oz, O., ve Ozer, H., (2009). "The Effects of the Aging Heat Treatment on Buckling Load of 7075 Aluminum Alloy Rectangular Plate", e-Journal of New World Sciences Academy, 4(3): 263-271.

Bildiri

1. Oz, O., ve Ozer, H., (2014). "Vakum Ortamında Karıştırma İşleminin Araldite 2015 Epoksi Yapıştırıcının Hasar Yüğü Üzerine Etkisi", 15th International Materials Symposium (IMSP'2014), Denizli, Turkey.
2. Ozer, H., ve Oz, O., (2011). "Three Dimensional Finite Element Analysis of Bi-Adhesively Bonded Double Lap Joint", International Conference on Structural on Adhesive Bonding (AB 2011), Porto, Portugal.
3. Ozer, H., ve Oz, O., (2011). "Joint Stress Optimization by the Hybrid Adhesive Lap Joint", 14th International Conference on Advances in Materials & Processing Technologies (AMPT 2011), 489, Istanbul.

ÖDÜLLERİ

1. Tübitak yayın teşvik ödülü (2014)
2. Tübitak yayın teşvik ödülü (2014)