

**ERZİNCAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**YAPIŞTIRMA BAĞLANTILARINDA
GERİLME YIĞILMALARININ
AZALTILMASI**

Salim ÇAM

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

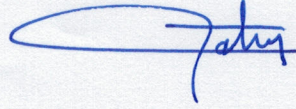
**ERZİNCAN
2016**

Her Hakkı Saklıdır

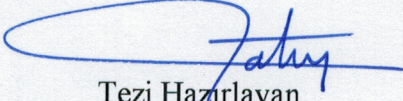
Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Adı-Soyadı: Salim AM

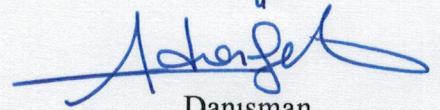
İmza :



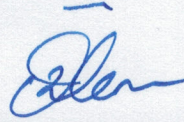
Yapıştırma Bağlantılarında Gerilme Yığılmalarının Azaltılması adlı Yüksek Lisans tezi, Erzincan Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi 'ne uygun olarak hazırlanmıştır.



Tezi Hazırlayan
Salim ÇAM



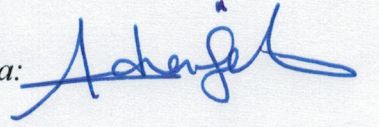
Danışman
Prof. Dr. Adnan ÖZEL



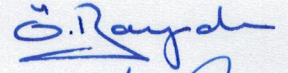
Makine Mühendisliği ABD Başkanı V.
Yrd. Doç. Dr. Özlem BARAN

Prof. Dr. Adnan ÖZEL danışmanlığında, Salim ÇAM tarafından hazırlanan bu çalışma 09/06/2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Makine Mühendisliği Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

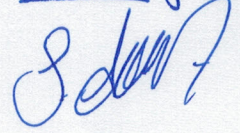
Başkan : Prof. Dr. Adnan ÖZEL

İmza: 

Üye : Yrd. Doç. Dr. Özgü BAYRAK

İmza: 

Üye : Yrd. Doç. Dr. Salih AKPINAR

İmza: 

Üye :

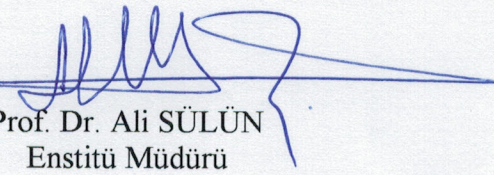
İmza:

Üye :

İmza:

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

17./06/2016


Prof. Dr. Ali SÜLÜN
Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

**YAPIŞTIRMA BAĞLANTILARINDA
GERİLME YIĞILMALARININ AZALTILMASI**

Salim ÇAM

Erzincan Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Adnan ÖZEL

Özellikle havacılık alanında ve otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılan yapıştırma bağlantıları sağladıkları yüksek mukavemet, farklı malzemeleri birleştirebilme ve iyi yorulma dayanımı gibi özellikleri sayesinde gün geçtikçe önem kazanmakta ve kullanım alanları artış göstermektedir. Bu çalışmada tek tesirli yapıştırma bağlantısında ana malzemede meydana getirilen karşı çentik etkisi yardımıyla bindirme bölgesindeki gerilme yığılmalarının yapıştırıcıdan uzaklaştırılması ve bağlantının dayanımının artırılması amaçlanmıştır. 11 farklı tipte bağlantı geometrisi oluşturulmuş ve her bir bağlantı geometrisinden 3 numune statik çekme yükü altında test edilmiştir. Yapılan deneysel ve nümerik çalışmalar sonucunda ana malzeme üzerinde değişiklik yapılmamış tek tesirli bindirme bağlantısına göre dayanımda %22 artış elde edilmiştir.

2016, 107 sayfa**Anahtar Kelimeler:** Karşı Çentik Etkisi, Tek Tesirli Bindirme Bağlantısı, Yapıştırma Bağlantıları

ABSTRACT

Master Thesis

**REDUCING STRESS CONCENTRATIONS
ON ADHESIVELY BONDED SINGLE-LAP JOINTS**

Salim ÇAM

Erzincan University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Adnan ÖZEL

Adhesive bondings; which are used widely especially in aerospace and automotive industry offers high strength, ability to join different materials and good fatigue strength are getting important day by day. In this present work counter notch effect created on adherends of adhesively bonded single-lap joints. In doing so, stress concentrations on adhesive layer were removed. 11 different joint type were created and 3 specimen were tested for each. As a result of experimental and numerical work %22 increase was achieved on the strength of the joint by unmodified adhesively bonded single-lap joint.

2016, 107 pages

Keywords: Adhesive Bonding, Adhesively Bonded Single-Lap Joint, Counter Notch Effect

TEŞEKKÜR

BaŐta alıŐmalarım esnasında her an yanımda olan ve yol gösteren Erzincan Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Ğretim yesi değerli hocam Prof. Dr. Adnan ÖZEL'e, yapıştırma bağlantılarının teorisi ve pratiğini anlamamda yardımcı olan Erzurum Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Ğretim yesi Yrd. Doç. Dr. Salih AKPINAR'a, malzeme seçimi ve temini süreçlerinde yardımcı olan Erzincan Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Ğretim yesi zĐ BAYRAK'a, deneysel çalıŐmalarımda yol gösterici olan Atatürk Üniversitesi Makine Mühendisliği Ğretim elemanı ArŐ. Gör. KürŐat GÜLTEKİN'e ve teŐekkürlerimi sunarım.

Salim AM

Haziran, 2016

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
TABLolar LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
SİMGELER ve KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Giriş	1
2. KURAMSAL TEMELLER	4
2.1. Kuramsal Çerçeve.....	4
2.1.1. Yapıştırıcıların işlevi.....	4
2.1.2. Yapıştırıcıların sınıflandırılması	5
2.1.3. Yapışma.....	6
2.1.3.1. Adezyon bölgesi	7
2.1.3.2. Geçiş bölgesi.....	7
2.1.4. Islatma	7
2.1.5. Yapışma teorileri.....	8
2.1.5.1. Mekanik teori.....	8
2.1.5.2. Difüzyon teorisi	9
2.1.5.3. Adsorpsiyon teorisi	9
2.1.5.4. Kimyasal teori.....	10
2.1.5.5. Elektrostatik teori.....	10
2.1.6. Yapıştırma bağlantısı çeşitleri	10
2.1.7. İyi bir bağlantının gereklilikleri	14
2.1.7.1. Uygun yapıştırıcının seçilmesi	14
2.1.7.2. İyi tasarım.....	14
2.1.7.3. Yüzeylerin temiz olması.....	14
2.1.7.4. Bağlanacak yüzeylerin ıslatılması.....	15
2.1.7.5. Prosesin düzgün olarak işletilmesi.....	15
2.1.8. Bağlantı öncesi uygulanan yüzey hazırlıkları.....	15

2.1.8.1. Yüzeylerin aşındırılması ve çözücü ile temizlenmesi.....	16
2.1.8.2. Asit kullanılarak yapılan yüzey işlemleri.....	16
2.1.9. Yapışmayı etkileyen faktörler.....	16
2.2. Literatür Taraması	18
3. MATERYAL ve YÖNTEM	28
3.1. Deneysel Çalışma	28
3.1.1. Malzeme seçimi	28
3.1.2. Mekanik özelliklerin belirlenmesi	28
3.1.3. Bağlantı yüzeylerinin hazırlanması.....	29
3.1.4. Bağlantı geometrilerinin hazırlanması	30
3.1.5. Bağlantı kalıbının üretilmesi	34
3.1.6. Bağlantı numunelerinin hazırlanması	35
3.1.7. Deneylerin yapılması	38
3.2. Üç Boyutlu Sonlu Elemanlar Analizi	39
3.2.1. Giriş.....	39
3.2.2. Taguchi metodunun uygulanması	40
3.2.3. Bağlantıların oluşturulması	42
3.2.4. Sınır şartları ve yükleme durumu.....	44
3.2.5. Üç boyutlu sonlu elemanlar analizi.....	45
3.2.6. Sonuçların okunması.....	57
4. BULGULAR ve TARTIŞMA	59
4.1. Deney Bulguları.....	59
4.2. Sonlu Elemanlar Analizi Bulguları.....	61
4.3. Sonlu Elemanlar Analizi Bulgularının Değerlendirilmesi	88
4.4. Karşı Çentik Uygulamasının Bağlantı Dayanımına Etkisi	97
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	99
5.1. Sonuçlar	99
5.2. Öneriler	101
KAYNAKLAR.....	102
ÖZGEÇMİŞ.....	107

TABLULAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1. Bazı yapıştırıcıların sınıflandırılması	5
Tablo 2.2. Çeşitli temas açıları davranışı	8
Tablo 3.1. Alüminyum ve yapıştırıcının mekanik özellikleri	29
Tablo 3.2. Tip III geometrik varyasyonlar	32
Tablo 3.3. Tip IV geometrik varyasyonlar	32
Tablo 4.1. Deney sonuçları	59



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Yapışma olayında etkili kuvvetler	6
Şekil 2.2. Temas açısı	8
Şekil 2.3. Tek tesirli bindirme bağlantısı	11
Şekil 2.4. Tek tesirli bindirme bağlantısı serbest cisim diyagramı.....	11
Şekil 2.5. Yükleme altındaki çift tesirli bindirme bağlantısı.....	12
Şekil 2.6. Çift tesirli bindirme bağlantısında kuvvetler dengesi	12
Şekil 2.7. Bağlantı geometrisi	13
Şekil 2.8. Yapıştırma bağlantısı şekilleri	13
Şekil 3.1. Alüminyum için bulk numune ölçüleri	28
Şekil 3.2. Tip I geometrisi.....	31
Şekil 3.3. Tip II geometrisi.....	31
Şekil 3.4. Tip III geometrisi	31
Şekil 3.5. Tip IV geometrisi	32
Şekil 3.6. Tip V geometrisi	32
Şekil 3.7. Tip VI geometrisi	33
Şekil 3.8. Tip VII geometrisi.....	33
Şekil 3.9. Tip VIII geometrisi.....	33
Şekil 3.10. Bağlantı kalıbı.....	34
Şekil 3.11. Tip I bağlantı ölçüleri	35
Şekil 3.12. Bağlantı numunelerinin hazırlanması.....	36
Şekil 3.13. Kalıptan çıkarılan bağlantı numuneleri	37
Şekil 3.14. Farklı tipte bağlantı numuneleri	37
Şekil 3.15. Instron yorulma cihazı	38
Şekil 3.16. Çekme testi ile koparılan bağlantı numuneleri	38
Şekil 3.17. Taguchi metodu grafiksel sonucu	41
Şekil 3.18. Sinyal – gürültü oranı sonucu	41
Şekil 3.19. Tip I bağlantı geometrisi.....	42
Şekil 3.20. Tip II bağlantı geometrisi	42
Şekil 3.21. Tip III ve Tip VIII bağlantı geometrisi.....	43
Şekil 3.22. Tip IV bağlantı geometrisi.....	43
Şekil 3.23. Tip V bağlantı geometrisi	43

Şekil 3.24. Tip VI bağlantı geometrisi.....	44
Şekil 3.25. Tip VII bağlantı geometrisi.....	44
Şekil 3.26. Bağlantı numuneleri için sınır şartları	45
Şekil 3.27. Parçaların çağırılması	46
Şekil 3.28. Alt ve üst parçanın bölünmesi.....	47
Şekil 3.29. Elastik özelliklerin girilmesi	47
Şekil 3.30. Plastik özelliklerin girilmesi	48
Şekil 3.31. Kesit oluşturma	48
Şekil 3.32. Kesit atama	49
Şekil 3.33. Eleman tipinin belirlenmesi	50
Şekil 3.34. Parçanın elemanlara bölünmesi	50
Şekil 3.35. Alt ve üst parça elemanlara bölme işlemi.....	51
Şekil 3.36. Yapıştırıcı için elemanlara bölme işlemi	51
Şekil 3.37. Eleman tipinin belirlenmesi	52
Şekil 3.38. Montaj sonrası bağlantı geometrisi	53
Şekil 3.39. Bağlantı tipinin belirlenmesi.....	53
Şekil 3.40. Bağlantı davranışının tayin edilmesi	54
Şekil 3.41. Analiz tipinin belirlenmesi	55
Şekil 3.42. Sabit uç için sınır şartlarının girilmesi.....	55
Şekil 3.43. Yükleme yapılması.....	56
Şekil 3.44. İş oluşturma.....	56
Şekil 3.45. Gerilmelerin alınacağı bölge.....	57
Şekil 3.46. A bölgesinin detay görünüşü	57
Şekil 4.1. Ortalama kopma yüküne göre artış gözlenen numuneler	60
Şekil 4.2. AB ve CD Çizgisinde meydana gelen von Mises gerilmeleri	61
Şekil 4.3. AB Çizgisinde meydana gelen gerilmeler, (a) σ_y , (b) τ_{xy}	61
Şekil 4.4. CD Çizgisinde meydana gelen gerilmeler, (a) σ_y , (b) τ_{xy}	62
Şekil 4.5. Yapıştırıcı tabakasında meydana gelen σ_y (MPa) gerilmeleri	62
Şekil 4.6. Yapıştırıcı tabakasında meydana gelen τ_{xy} (MPa) gerilmeleri	63
Şekil 4.7. AB ve CD Çizgisinde meydana gelen von Mises gerilmeleri	63
Şekil 4.8. AB Çizgisinde meydana gelen gerilmeler, (a) σ_y , (b) τ_{xy}	64
Şekil 4.9. CD Çizgisinde meydana gelen gerilmeler, (a) σ_y , (b) τ_{xy}	64
Şekil 4.10. Yapıştırıcı tabakasında meydana gelen σ_y (MPa) gerilmeleri	65

Şekil 4.11. Yapıştırıcı tabakasında meydana gelen τ_{xy} (MPa) gerilmeleri.....	65
Şekil 4.12. AB ve CD Çizgisinde meydana gelen von Mises gerilmeleri	66
Şekil 4.13. AB Çizgisinde meydana gelen gerilmeler, (a) σ_y , (b) τ_{xy}	66
Şekil 4.14. CD Çizgisinde meydana gelen gerilmeler, (a) σ_y , (b) τ_{xy}	67
Şekil 4.15. Yapıştırıcı tabakasında meydana gelen σ_y (MPa) gerilmeleri	67
Şekil 4.16. Yapıştırıcı tabakasında meydana gelen τ_{xy} (MPa) gerilmeleri.....	68
Şekil 4.17. AB ve CD Çizgisinde meydana gelen von Mises gerilmeleri	68
Şekil 4.18. AB Çizgisinde meydana gelen gerilmeler, (a) σ_y , (b) τ_{xy}	69
Şekil 4.19. CD Çizgisinde meydana gelen gerilmeler, (a) σ_y , (b) τ_{xy}	69
Şekil 4.20. Yapıştırıcı tabakasında meydana gelen σ_y (MPa) gerilmeleri	70
Şekil 4.21. Yapıştırıcı tabakasında meydana gelen τ_{xy} (MPa) gerilmeleri.....	70
Şekil 4.22. AB ve CD Çizgisinde meydana gelen von Mises gerilmeleri	71
Şekil 4.23. AB Çizgisinde meydana gelen gerilmeler, (a) σ_y , (b) τ_{xy}	71
Şekil 4.24. CD Çizgisinde meydana gelen gerilmeler, (a) σ_y , (b) τ_{xy}	72
Şekil 4.25. Yapıştırıcı tabakasında meydana gelen σ_y (MPa) gerilmeleri	72
Şekil 4.26. Yapıştırıcı tabakasında meydana gelen τ_{xy} (MPa) gerilmeleri.....	73
Şekil 4.27. AB ve CD Çizgisinde meydana gelen von Mises gerilmeleri	73
Şekil 4.28. AB Çizgisinde meydana gelen gerilmeler, (a) σ_y , (b) τ_{xy}	74
Şekil 4.29. CD Çizgisinde meydana gelen gerilmeler, (a) σ_y , (b) τ_{xy}	74
Şekil 4.30. Yapıştırıcı tabakasında meydana gelen σ_y gerilmeleri	75
Şekil 4.31. Yapıştırıcı tabakasında meydana gelen τ_{xy} gerilmeleri	75
Şekil 4.32. AB ve CD Çizgisinde meydana gelen von Mises gerilmeleri	76
Şekil 4.33. AB Çizgisinde meydana gelen gerilmeler, (a) σ_y , (b) τ_{xy}	76
Şekil 4.34. CD Çizgisinde meydana gelen gerilmeler, (a) σ_y , (b) τ_{xy}	77
Şekil 4.35. Yapıştırıcı tabakasında meydana gelen σ_y (MPa) gerilmeleri.....	77
Şekil 4.36. Yapıştırıcı tabakasında meydana gelen τ_{xy} (MPa) gerilmeleri.....	78
Şekil 4.37. AB ve CD Çizgisinde meydana gelen von Mises gerilmeleri	78
Şekil 4.38. AB Çizgisinde meydana gelen gerilmeler, (a) σ_y , (b) τ_{xy}	79
Şekil 4.39. CD Çizgisinde meydana gelen gerilmeler, (a) σ_y , (b) τ_{xy}	79
Şekil 4.40. Yapıştırıcı tabakasında meydana gelen σ_y (MPa) gerilmeleri.....	80
Şekil 4.41. Yapıştırıcı tabakasında meydana gelen τ_{xy} (MPa) gerilmeleri.....	80
Şekil 4.42. AB ve CD Çizgisinde meydana gelen von Mises gerilmeleri	81

Şekil 4.43. AB Çizgisinde meydana gelen gerilmeler, (a) σ_y , (b) τ_{xy}	81
Şekil 4.44. CD Çizgisinde meydana gelen gerilmeler, (a) σ_y , (b) τ_{xy}	82
Şekil 4.45. Yapıştırıcı tabakasında meydana gelen σ_y (MPa) gerilmeleri	82
Şekil 4.46. Yapıştırıcı tabakasında meydana gelen τ_{xy} (MPa) gerilmeleri.....	83
Şekil 4.47. AB ve CD Çizgisinde meydana gelen von Mises gerilmeleri	83
Şekil 4.48. AB Çizgisinde meydana gelen gerilmeler, (a) σ_y , (b) τ_{xy}	84
Şekil 4.49. CD Çizgisinde meydana gelen gerilmeler, (a) σ_y , (b) τ_{xy}	84
Şekil 4.50. Yapıştırıcı tabakasında meydana gelen σ_y (MPa) gerilmeleri	85
Şekil 4.51. Yapıştırıcı tabakasında meydana gelen τ_{xy} (MPa) gerilmeleri.....	85
Şekil 4.52. AB ve CD Çizgisinde meydana gelen von Mises gerilmeleri	86
Şekil 4.53. AB Çizgisinde meydana gelen gerilmeler, (a) σ_y , (b) τ_{xy}	86
Şekil 4.54. CD Çizgisinde meydana gelen gerilmeler, (a) σ_y , (b) τ_{xy}	87
Şekil 4.55. Yapıştırıcı tabakasında meydana gelen σ_y (MPa) gerilmeleri	87
Şekil 4.56. Yapıştırıcı tabakasında meydana gelen τ_{xy} (MPa) gerilmeleri.....	88
Şekil 4.57. AB Çizgisi için Tip I ve Tip II karşılaştırma grafiği	88
Şekil 4.58. CD Çizgisi için Tip I ve Tip II karşılaştırma grafiği	89
Şekil 4.59. AB Çizgisi için Tip I ve Tip III-a karşılaştırma grafiği.....	89
Şekil 4.60. CD Çizgisi için Tip I ve Tip III-a karşılaştırma grafiği.....	90
Şekil 4.61. AB Çizgisi için Tip I ve Tip III-b karşılaştırma grafiği	90
Şekil 4.62. CD Çizgisi için Tip I ve Tip III-b karşılaştırma grafiği	91
Şekil 4.63. AB Çizgisi için Tip I ve Tip III-c karşılaştırma grafiği.....	91
Şekil 4.64. CD Çizgisi için Tip I ve Tip III-c karşılaştırma grafiği.....	92
Şekil 4.65. AB Çizgisi için Tip I ve Tip IV karşılaştırma grafiği	92
Şekil 4.66. CD Çizgisi için Tip I ve Tip IV karşılaştırma grafiği	93
Şekil 4.67. AB Çizgisi için Tip I ve Tip V karşılaştırma grafiği.....	93
Şekil 4.68. CD Çizgisi için Tip I ve Tip V karşılaştırma grafiği.....	94
Şekil 4.69. AB Çizgisi için Tip I ve Tip VI karşılaştırma grafiği	94
Şekil 4.70. CD Çizgisi için Tip I ve Tip VI karşılaştırma grafiği	95
Şekil 4.71. AB Çizgisi için Tip I ve Tip VII karşılaştırma grafiği	95
Şekil 4.72. CD Çizgisi için Tip I ve Tip VII karşılaştırma grafiği	96
Şekil 4.73. AB Çizgisi için Tip I ve Tip VIII karşılaştırma grafiği.....	96
Şekil 4.74. CD Çizgisi için Tip I ve Tip VIII karşılaştırma grafiği.....	97

Şekil 4.75. Tip I bağlantısı için gerilme dağılımı	97
Şekil 4.76. Tip VIII bağlantısı için gerilme dağılımı.....	98



SİMGELER ve KISALTMALAR**Simgeler**

σ Normal gerilme

τ Kayma gerilmesi

E Young modülü

ε Şekil değişimi



1. GİRİŞ

1.1. Giriş

Son yıllarda ekonomik ve çevresel sebeplerle hafif konstrüksiyon stratejileri artarak önem kazanmıştır. Endüstriyel alanlarda hafif malzemelerin kullanılmaya başlamasıyla birlikte yapıların daha düşük ağırlıklı tasarlanması önem kazanmış ve bu ihtiyaç yapıştırma bağlantılarını ön plana çıkarmıştır. Özellikle havacılık endüstrisi gibi ağırlığın önemli bir parametre olduğu alanlarda birbirinden farklı, kaplanmış ya da kaynak uygulamasının zor olduğu ince malzemeler için birleştirme teknikleri son yıllarda hızla gelişim göstermiştir.

Geleneksel bir yöntem olarak yapıştırma bağlantıları yüzyıllardır kullanılmasına rağmen bilimsel ve teknolojik açıdan son yetmiş yılda gelişim göstermeye başlamıştır. Bu gecikmenin ana sebebi yüksek teknoloji gerektiren uygulamalarda kullanılan, sentetik polimerlerden imal edilmiş yapıştırıcıların geliştirilmesinin 1940'lı yılların ortalarını bulmasıdır. Yapıştırıcı, Kinloch tarafından yüzeylerine uygulandığı malzemeleri bir arada tutan ve ayrılmaya karşı dayanım gösteren bir malzeme olarak tanımlanmıştır (Kinloch, 1987). Yapıştırma bağlantıları gün geçtikçe geleneksel bağlantı elemanlarına alternatif olmaya başlamıştır ve yaygın kullanılan bağlantı elemanlarına kıyasla birçok avantaj sağlamaktadır (da Silva, 2011). Farklı endüstriyel alanlar için yapıştırma bağlantılarının önemli bir yeri vardır. Örneğin otomotiv endüstrisinde yapıştırıcı kullanımında 2009 yılına kadar hızlı bir artış gözlemlenmiş olup araç başına ortalama 20 kg yapıştırıcı kullanılmıştır. Sonraki 5 yıl boyunca otomotiv sektöründe yapısal yapıştırıcıların kullanımı yıllık ortalama %7'den daha fazla artış göstermiştir. Havacılık endüstrisinde ise çok daha fazla kullanılmaktadır. Boeing 787 ve Airbus A350'de bağlantıların %50'sinden fazlasında kullanılmaktadır (He, 2011).

Yapıştırıcı ile bağlama yönteminde birleştirilen yüzeylerdeki gerilmeler bindirme bölgesinin orta kısımlarında düzgün bir şekilde dağılır ve böylece diğer bağlantı çeşitlerine nazaran daha az maliyetle daha hafif, güçlü bağlantılar elde edilmiş olur

(Nemes vd., 2006). Alternatif bir birleştirme ve onarım metodu olan yapıştırıcıların diğer metotlara göre birtakım avantaj ve dezavantajları vardır.

Avantajları,

- Farklı malzemeler birleştirilebilir.
- Sızdırmazlık elemanı olarak kullanılabilir.
- İnce metal parçaları etkili bir şekilde birleştirebilir.
- Bağlantılara çok iyi dinamik yorulma direnci sağlar.
- Maliyet yönünden etkili ve uygun bir tekniktir.
- Farklı ve karmaşık geometrili parçaları birleştirebilir.
- Daha pürüzsüz aerodinamik yüzeyler sağlar.
- Ağırlığı azaltır.
- Titreşimi sönümler.

Yapıştırıcının mekanik özelliklerinin belirlenmesi, güvenilirliği ve tekrarlanabilirliğinde yaşanan zorluklar bu teknolojinin benimsenmesinde güçlüklerle karşılaşılmasına sebep olmaktadır. Bir yapıştırma bağlantısında karmaşık gerilmelerin analizi ve yapısal tasarımında yapıştırıcı tabakasının üç temel özelliğinden dolayı zorlukla karşılaşılır (Beylergil, 2010).

- Polimerik yapıştırıcının visko-elastoplastik davranışının bir yansıması olan gerilme şekil değiştirme davranışının doğrusal olmayışı.
- Yapıştırıcı tabakasındaki üç boyutlu gerilme durumu.
- Bindirme bölgesinin kenarlarında meydana gelen gerilme yığılmaları.

Yapıştırma bağlantılarının mekanik performansı temel olarak yapıştırıcı tabakasındaki gerilme dağılımına bağlıdır. Gerilme dağılımının oldukça karmaşık olması ise bağlantının hangi şartlar altında ayrılacağını öngörmeyi zorlaştırmaktadır. Ayrıca bindirme bölgesinin kenarlarında meydana gelen yüksek gerilme yığılmaları bağlantının dayanımını olumsuz yönde etkilemektedir.

Bu çalışmada farklı geometriler kullanılarak karşı çentik uygulamasıyla yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantılarında bindirme bölgesinin kenarlarında

meydana gelen gerilme yığılmaları uzaklaştırılarak bağlantı performansı arttırılmaya çalışılmıştır.



2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Kuramsal Çerçeve

Havacılık ve otomotiv endüstrisinde ağırlığın azaltılması ihtiyacı, uygulamalarda yaygın olarak kullanılan çeliğin yerini kompozit ve daha iyi metal alaşım malzemelere bırakmasına sebep olmuştur. Bu durum ise farklı malzemelerin birleştirilmesinde kaynak, cıvata ve perçin bağlantılarına göre daha iyi gerilme dağılımı ve yorulma dayanımı sağlayan, hızlı ve etkili bir yöntem olan yapıştırma bağlantılarını ön plana çıkartmıştır (Hu vd., 2013).

Bu bölümde yapıştırma bağlantılarının daha iyi anlaşılması amacıyla genel bilgiler verilecektir.

2.1.1 Yapıştırıcıların işlevi

Yapıştırıcıların öncelikli amacı parçaları bir arada tutmaktır. Yapıştırıcılar bunu gerilmeleri bir elemandan diğerine transfer ederek sağlar. Bu da bir şekilde gerilme dağılımının mekanik bağlama elemanlarına göre daha düzgün olmasına olanak verir. Yapıştırma bağlantıları genellikle klasik yöntemlere göre daha ucuz ve hafiftir. Mekanik bağlamada iş parçasının dayanımı bağlama elemanı ile parçaların temas ettiği bölgenin dayanımıyla sınırlıyken, yapıştırma bağlantılarında yapıştırıcının dayanımı yapıştırılan malzemelerden daha büyük olabilmektedir.

Düzgün yüzeyler elde edilişi yapıştırma bağlantılarının önemli bir özelliğidir. Bu özellik fonksiyonellik ve görünüm açısından önemlidir. Havacılıkta sürtünmeyi minimize etmek ve sıcaklığı mümkün olduğunca düşük tutabilmek için düzgün dış yüzeyler gereklidir. Yapıştırma bağlantıları gerilmelerin parçalar arasında transfer edilmesi için geniş bir alan sağlar. Bu da küçük bölgelerde oluşabilecek gerilme yığılmalarının önüne geçer. Bir diğer önemli fonksiyonu ise sızdırmazlıktır. Bağlamadaki süreklilik sıvı ya da gazın dışarı çıkmasına engel olur.

2.1.2 Yapıştırıcıların sınıflandırılması

Yapıştırıcılar birkaç farklı şekilde sınıflandırılabilir. Öncelikli olarak kökenlerine göre doğal ve sentetik yapıştırıcılar olarak ikiye ayrılabilir. Doğal yapıştırıcılar, bitki ve hayvanlar gibi doğal kaynaklar kullanılarak elde edilir. Sentetik yapıştırıcılar ise laboratuvarlarda üretilir. Endüstriyel kullanımda çoğu durumda üstün fiziksel ve kimyasal özellikleri nedeniyle sentetik yapıştırıcılar tercih edilmektedir. Bir diğer sınıflandırma yapıştırıcının katılaştırılması veya kürleştirilmesi için gereken bileşen sayısına göre yapılabilir. Bu durumda yapıştırıcılar tek bileşenli (poliüretan yapıştırıcılar, siyanoakrilatlar vb.) ve iki bileşenli (akrilat yapıştırıcılar, iki bileşenli epoksi yapıştırıcılar vb.) olarak ikiye ayrılır. Bunların yanı sıra yapıştırıcılar, mekanik özelliklerine göre, yapıştırma öncesi fiziksel durumlarına göre de sınıflandırılmaktadır.

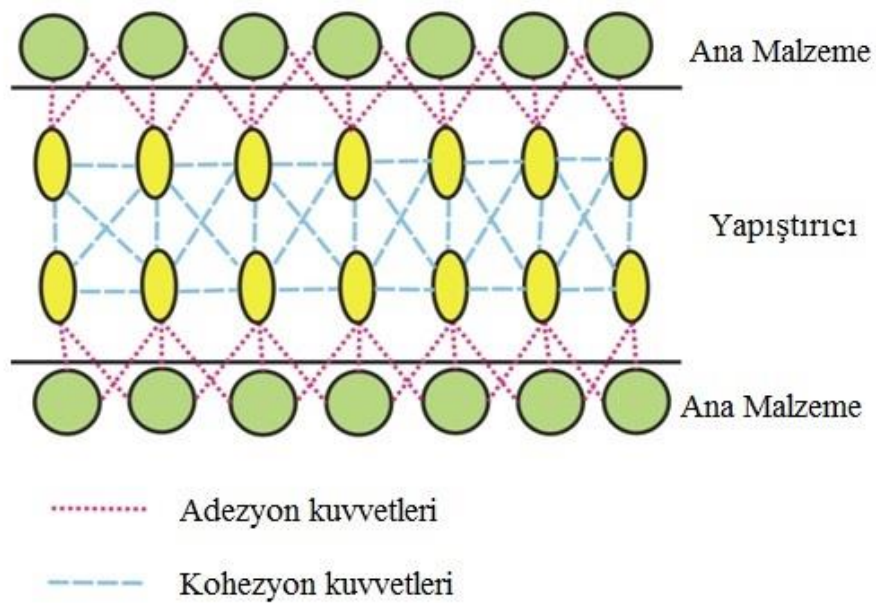
Tablo 2.1. Bazı yapıştırıcıların sınıflandırılması

Kimyasal Yapı	Ticari Adı	Sertleşme			Genel Özellikleri ve Kullanım Alanları
		Sıcaklık (°C)	Zaman (saat)	Baskı (N/cm ²)	
Epoksi Reçine	Epilox	150	3,5	50	İki bileşenli, sertleşme süresi uzun, metaller, plastikler.
	Araldite				
	Epoxy				
Poliester Reçinesi	Akemmi	150	0,33	100	İki bileşenli, sertleşme süresi uzun, metaller, plastikler.
	Mökodür				
	Vestopal				
Fenol Reçinesi	Redux	150	0,33	100	İki bileşenli, metaller.
	Plastaphenal				
Akril Reçinesi	Agomet	20	48	100	Metaller ve plastikler
Polisosiyyamat	DesmocolIW	20	168	100	İki bileşenli. Üç gün baskı uygulanır.
Siyonokrilat- Monomer	Eastman 910	20	168	100	Tek bileşenli, çabuk sertleşme, metaller ve plastikler.
	Tiox KI				

Epoksit+ Thiokol	Polisülfid Polimer				İki bileşenli, sızdırmazlık için.
Epoksit+ Pollamid	Versamid Leifa-met				İki bileşenli, metaller ve plastikler.
	Metallon 130	150	15	50	%30 sertleştirici, yapıştırmadan önce ısıtma.
	Metallon K	20	48	100	%50 sertleştirici, 1 gün baskı uygulanır.
	Bostik 476	165	4	100	Yüzeze iki kez uygulanır.
Keramik Karışımlar	Ceramic UJ 1067	Yüksek Sıcaklık			Metaller

2.1.3. Yapışma

Yapışma olayı adezyon ve kohezyon parametreleri ile izah edilir. Kohezyon, yapıştırıcının iç bağları sebebiyle meydana gelen kuvvetlerdir. Adezyon ise yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme arasında meydana gelir.



Şekil 2.1. Yapışma olayında etkili kuvvetler

2.1.3.1. Adezyon bölgesi

Ana malzeme yüzeyi ve yapıştırıcı arasında moleküler düzeyde meydana gelen etkileşimden dolayı yapıştırıcının moleküler yapısı değişime uğrar. Bu tip bağların uzun vadede kararlılığı, direkt olarak neme olan dayanımlarına bağlıdır. Yapıştırıcı pürüzlü yüzeylere efektif olarak bağlanabildiğinden bu tip mikro-mekanik etkiler birincil öneme sahip değildirler.

2.1.3.2. Geçiş bölgesi

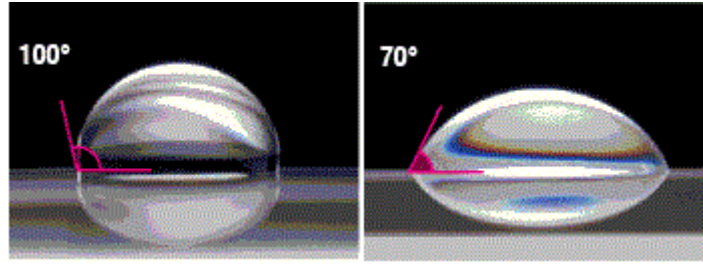
Yapıştırıcının kimyasal, mekanik ve optik özelliklerinin değişime uğradığı geçiş bölgesinde bu parametreler geçiş bölgesinin kalınlığına bağlı olarak değişir. Kalınlık, yapışan malzemenin yüzeyinin özelliklerine, yapıştırıcıya ve kürleştirme şartlarına bağlıdır. Kalın geçiş bölgelerinin mevcut olması durumunda ya da ince bağlantılarda tüm bir bağlantının özelliğini geçiş bölgesi belirleyecektir çünkü bu durumlarda kohezyon bölgesi bulunmayacaktır.

2.1.4. Islatma

Islatma, bir sıvının katı bir yüzeye temasını sürdürebilmesidir. Islatma derecesi yapıştırıcı ve kohezyon kuvvetleri arasındaki dengeden belirlenir. Islatma, malzemenin gaz, sıvı ve katı olmak üzere üç fazı ile alakalıdır.

Islatma iki malzemenin yapıştırılarak birleştirilmesi için oldukça önemlidir. Sıvı ve katı malzeme arasında meydana gelen yapıştırıcı kuvvetler bir sıvı damlasının yüzeye yayılmasını sağlamaya çalışırken sıvıdaki kohezyon kuvvetleri sıvının tekrar damla haline gelmesini ve yüzeye temasını engellemeye çalışır.

Temas açısı (θ), sıvı damlasının yüzeye temas ettiği köşenin açısıdır. Temas açısı adezyon ve kohezyon kuvvetleri ile belirlenir. Damla katı yüzeye yayılma eğiliminde olduğunda temas açısı azalmaktadır. Bundan dolayı temas açısı ıslanabilirlik hakkında önemli bilgiler vermektedir.



Şekil 2.2. Temas açısı

Tablo 2.2. Çeşitli temas açıları davranışı

Temas Açısı	İslatma Derecesi	Dayanım	
		Katı/Sıvı Etkileşim	Sıvı/Sıvı Etkileşim
$\theta = 0^\circ$	Mükemmel ıslatma	Güçlü	Zayıf
$0^\circ < \theta < 90^\circ$	Yüksek ıslanabilirlik	Zayıf	Zayıf
$90^\circ \leq \theta < 180^\circ$	Düşük ıslanabilirlik	Zayıf	Güçlü
$\theta = 180^\circ$	Mükemmel ıslatmama	Zayıf	Güçlü

2.1.5. Yapışma Teorileri

Yapışma olayı için birçok teori ortaya konmuştur. Yapıştırma bağlantılarının anlaşılmasında bu teoriler önem arz etmektedir.

2.1.5.1. Mekanik teori

Mekanik teori yapışma fenomenini temel malzemenin yüzeyinin pürüzlülüğüne ve gözenekli yapısına bağlı olarak izah etmektedir.

Mikroskopik düzeyde incelenecek olursa her malzemenin yüzeyinde girinti ve çıkıntılar olduğu görülecektir. Bu sayede yüzey topoğrafyası, yapıştırıcının bu girintilere nüfuz edip doldurarak yapıştırıcı ile temel malzemenin birbirlerine kenetlenmesine müsaade etmektedir. Yüzey pürüzlülüğü ve gözenekli yapıdan ayrı olarak iyi bir bağlantı için yapıştırıcının da iyi bir doldurucu olması gerekmektedir. Yapıştırıcının bu özelliği direkt olarak viskozitesiyle alakalıdır.

Mekanik teori yapıştırıcı ve yapışan yüzeyinin uyumsuz olabileceği ihtimalini hesaba katmaz. Sadece yapışan yüzeyinin topoğrafyasını ve yapıştırıcının doldurma kapasitesini hesaba katar. Bu teori yüzey pürüzlülüğü az yüzeylerin yapışmasını ve pürüzlü olduğu halde yapışmanın meydana gelmediği bağlantıları açıklamakta yetersiz kalmaktadır.

2.1.5.2. Difüzyon teorisi

Difüzyon teorisi yapışma fenomenini polimerlerin birbirleri ile uygunluğu ve polimer zincirlerinde meydana gelen hareketler ile izah etmektedir. İki polimer birbirleri için uygun olduğunda polimer zincirleri kısmi olarak birbirlerine karışırlar. Bu sayede yapışma noktaları meydana gelmiş olur.

Polimerlerin nüfuz derecesi moleküler ağırlıklarına bağlıdır. Kısa polimer zincirleri uzun polimer zincirlerine göre diğer malzemeye daha çabuk nüfuz ederler.

Bu teori polimer malzemeler arasında oluşturulan yapıştırma bağlantılarında meydana gelen yapışma olayını açıklamaya yardımcı olur.

2.1.5.3. Adsorpsiyon teorisi

Adsorpsiyon teorisi yapışma fenomenini temas açısı, ıslanabilirlik ve yüzey gerilmeleri parametreleriyle izah etmeye çalışır.

Ana malzemenin yüzey enerjisiyle kıyaslandığında daha düşük yüzey gerilimine sahip olan yapıştırıcı yüzeyi ıslatabilmektedir ve 90°'den düşük temas açısıyla birlikte yapışma olayı gerçekleşmektedir.

Mekanik teori ve difüzyon teorisinden farklı olarak, adsorpsiyon teorisi yapıştırıcının ana malzeme yüzeyine nüfuz etmemesi durumunda meydana gelen yapışma olayını ana malzeme ve yapıştırıcı arasında meydana gelen ilişki ile açıklamaktadır.

2.1.5.4. Kimyasal teori

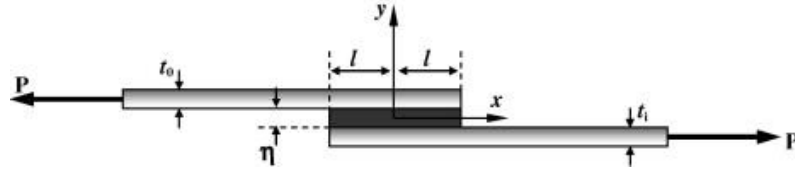
Kimyasal teori adsorpsiyon teorisinin genişletilmiş halidir. Yapıştırıcı ana malzeme yüzeyini uygun şekilde ıslattığında yapıştırıcı ve ana malzeme arasında meydana gelen Van der Waals bağları ve kimyasal bağlar yapışma olayını meydana getirir.

2.1.5.5. Elektrostatik teori

Elektrostatik teori, yapışma fenomenini kondansatöre benzetmektedir. Bu teoriye göre zıt yükler birbirini çekerek yapıştırıcı ve substrat arasında yapışma olayını meydana getirmektedir.

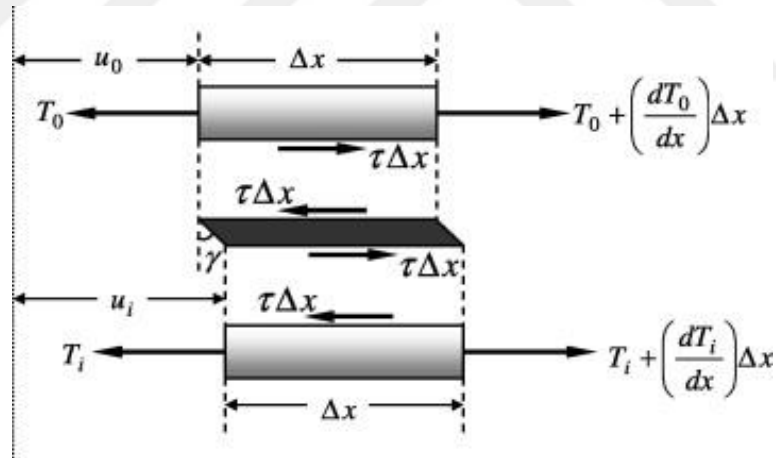
2.1.6. Yapıştırma bağlantısı çeşitleri

Literatürde yapıştırıcı ile birçok farklı bağlantı şekli bulunmaktadır. Bunlardan biri olan tek tesirli bindirme bağlantısı yapıştırma bağlantılarında yıllardır kullanılmaktadır ve birçok çalışmanın konusu olmuştur. Basit geometrisi ve etkinliği sebebiyle yapıştırma bağlantılarının ve yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin belirlenmesinde yoğun olarak kullanılmıştır (Her, 1999).



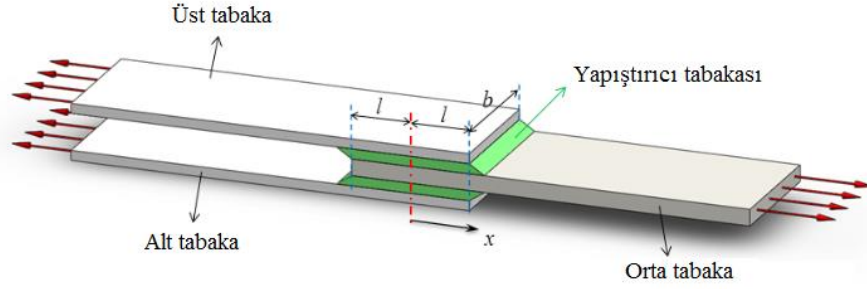
Şekil 2.3. Tek tesirli bindirme bağlantısı (Sayman, 2012).

Tek tesirli bindirme bağlantılarında gerilmeler bağlantı çizgisi boyunca düzgün olarak yayılmazlar. Yükleme yolunun düzgün olmayışı sonucu meydana gelen eğilme momenti bağlantının dönmesine sebebiyet verir. Bu durum yapıştırıcı tabakasında kayma ve soyulma gerilmelerini meydana getirir. Ana malzeme de benzer olarak gerilme ve eğilmeye maruzdur. Metalik malzemeler kullanılarak yapılan testlerde genel olarak bağlantı ayrılmadan önce malzemelerin akmaya uğradığı görülmüştür.



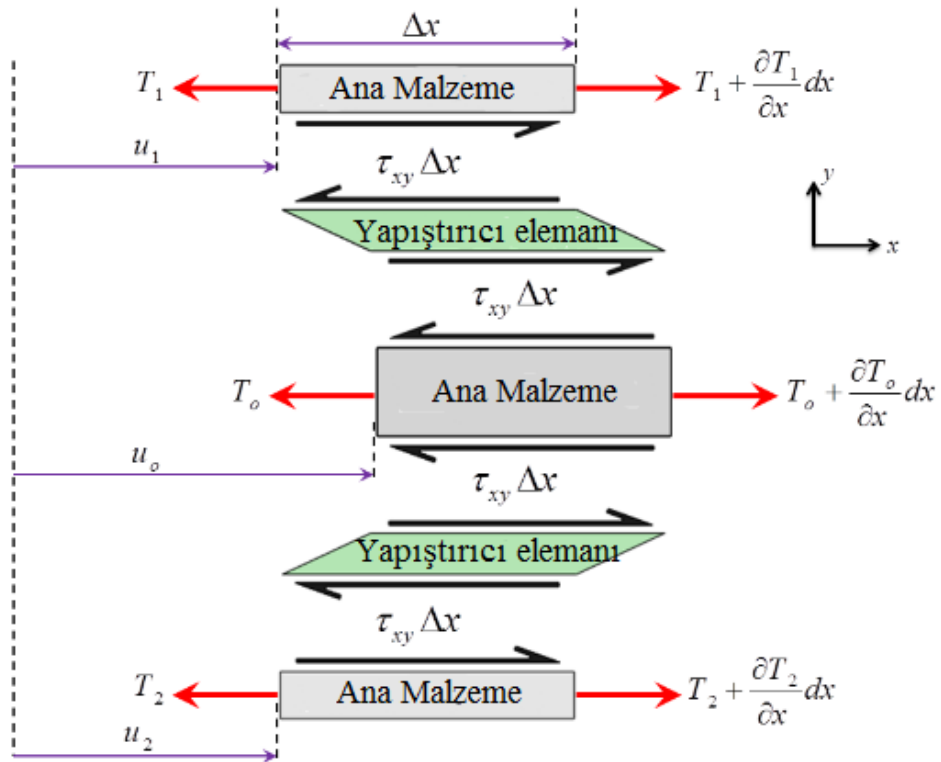
Şekil 2.4. Tek tesirli bindirme bağlantısı serbest cisim diyagramı (Sayman, 2012).

Sık kullanılan bir diğer bağlantı şekli de çift tesirli bindirme bağlantısıdır. Bu bağlantı şekli özellikle kompozitlerin birleştirilmesinde önemli bir yer tutmaktadır.



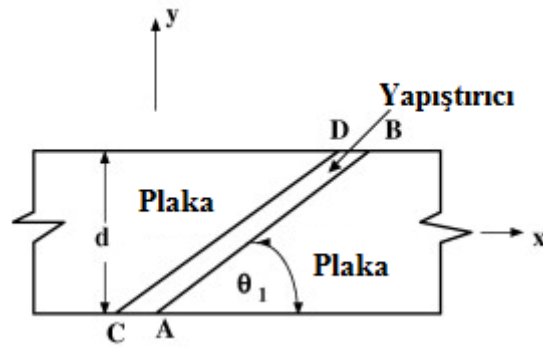
Şekil 2.5. Yükleme altındaki çift tesirli bindirme bağlantısı (Reza vd., 2014).

Çift tesirli bindirme bağlantısı, tek tesirli bindirme bağlantısı ile kıyaslandığında soyulma gerilmeleri daha azdır ve yapıştırıcıya sadece kayma etki eder. Simetrik bağlantıda tek tesirli bindirme bağlantısındaki gibi bağlantıya net bir eğilme momenti etki etmez ve bağlantı dönmeye maruz kalmaz. Soyulma gerilmeleri en yüksek değeri bindirme bölgesinin uç kısımlarında alır (Panigrahi ve Pradhan,2008).



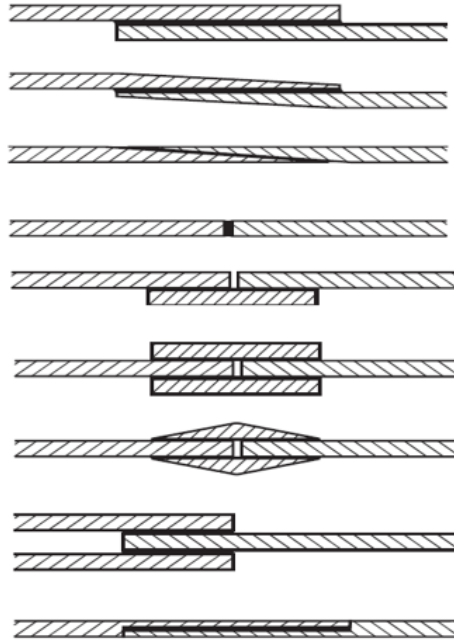
Şekil 2.6. Çift tesirli bindirme bağlantısında kuvvetler dengesi (Reza vd., 2014)

Aşağıda gösterilen bağlantı şekli de bağlantı tipleri arasında önemli bir yer tutmaktadır. Mevcut bağlantı şekilleri arasından yükleme yolunun eksantrik olmaması sebebiyle ayrılır. Bu durum daha düzgün bir gerilme dağılımı sağlamaktadır (Kumar vd., 2006). Bu şekilde optimum olarak tasarlanmış bir bağlantı, bindirme bağlantılarının aksine; ayrılma, bağlantı bölgesindeki kayma ve soyulma gerilmelerinden dolayı değil de ana malzemelerden kaynaklandığı için daha dayanıklıdır (Gunnion ve Herszberg,2006).



Şekil 2.7. Bağlantı geometrisi (Chiu ve Chaudri, 2011).

Yukarıda bahsedilen bağlantı şekilleri gibi daha birçok tasarım mevcuttur. Bağlantının karşılaması beklenen özelliklere göre bu tasarımlardan herhangi biri tercih edilebilir.



Şekil 2.8. Yapıştırma bağlantısı şekilleri

2.1.7 İyi bir bağlantının gereklilikleri

İyi bir yapıştırma bağlantısı için temel gereklilikler şunlardır:

- Uygun yapıştırıcının seçilmesi
- İyi tasarım
- Yüzeylerin temiz olması
- Bağlanacak yüzeylerin ıslatılması.
- Prosesin düzgün olarak işletilmesi.

2.1.7.1. Uygun yapıştırıcının seçilmesi

Malzemeleri birleştirmek için kullanılan birçok yapıştırıcı bulunmaktadır. Uygun yapıştırıcının seçilmesi yapıştırılacak malzemelerin doğası ve bağlantıdan istenilen performans gibi parametrelere bağlıdır.

2.1.7.2. İyi tasarım

Bağlantının dayanımı üzerinde tasarımın önemli bir rolü vardır. Üzerinde iyice düşünülmüş bir bağlantı tasarımı ve yapıştırma bağlantısının dayanımı bir araya geldiğinde daha yüksek mukavemete sahip bağlantılar elde edilebilir.

2.1.7.3. Yüzeylerin temiz olması

İyi bir yapıştırma bağlantısı elde etmek için önemli olan ilk adım yapıştırılacak temiz yüzeyler elde edilmesidir. Kir, yağ, nem, yüzey pürüzlülüğü vb. giderilmemesi yapıştırıcı katmanında süreksizliğe sebebiyet verip bağlantının gücünü önemli ölçüde azaltacaktır. Bu gibi durumları ortadan kaldırmak için uygulanan birçok yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemler genellikle içlerinde fiziksel veya kimyasal işlemler ya da her ikisini birden barındırırlar.

2.1.7.4. Bağlanacak yüzeylerin ıslatılması

Islatma işlemi yapıştırılacak yüzeylerdeki hava ya da diğer gazların bir sıvı yardımıyla yüzeylerden uzaklaştırılması işlemidir. Düzgün bir ıslatma işlemi yapıştırıcı ve yapıştırılan yüzeyler arasındaki adezyon kuvvetini önemli ölçüde iyileştirecektir.

2.1.7.5. Prosesin düzgün olarak işletilmesi

Başarılı bir yapıştırma bağlantısı prosesin düzgün bir şekilde işletilmesini gerektirir. Yapıştırıcının uygulanması sadece yüzeylerle sınırlı değildir ayrıca uygun sıcaklık, basınç ve zaman faktörleri de iyi bir yapıştırma bağlantısı için önemli parametrelerdir. Yapıştırıcı uygulandıktan sonra üç şekilde katılaştırılabilir. Bu yöntemler yapıştırıcı seçimine göre değişmektedir. Bunlar:

- Kür, sıcaklık ve basınç gibi faktörlerin bir arada kullanılmasıyla yapılan kimyasal uygulamalar,
- Soğuma,
- Kurutmadır.

Bu gibi etkenlere ilaveten yapıştırma bağlantısının kalite kontrolü de sağlıklı bağlantılar açısından önem arz etmektedir.

2.1.8. Bağlantı öncesi uygulanan yüzey hazırlıkları

Birleştirilecek yüzeylerin hazırlanması bağlantının kalitesi açısından en önemli parametrelerden biridir. Yapılacak yüzey işlemleri yapıştırıcının yüzeye tutunmasını etkileyerek yapıştırıcının ve bağlantının dayanıklılığını arttıracığından birleştirme öncesi yüzeylerin hazırlanması büyük önem arz etmektedir. Bu bölümde yapılan yüzey işlemlerinin önemli görülen iki türüne yer verilecektir.

2.1.8.1. Yüzeylerin aşındırılması ve çözücü ile temizlenmesi

Yüzeylerin oksit tabakasından temizlenmesi ve makro düzeydeki pürüzlülüklerin giderilmesi amacıyla ilk olarak mekanik yüzey işlemleri uygulanır.

Aşındırıcı yardımıyla yüzeydeki pürüzlülükler giderilir. Kumlama ele alınacak olursa temassız bir işlem olmasından dolayı daha efektif bir yöntemdir. Dikkat edilmesi gereken durum seçilen aşındırıcının yüzeyi dövmeden sadece kesmesidir. sonra çözücü yardımıyla yüzeyde kalan partiküller, yağ vb. istenmeyen kalıntılar temizlenir. Çözücü ile temizleme yapılırken istenmeyen partiküllerin tekrar bulaşmasını engellemek amacıyla ortam havası kontrol edilmelidir. Bu işlemlerin vakumlu ortamda yapılması faydalı olacaktır. Çözücü ile temizlenen yüzeyler daha sonra kurumaya bırakılır.

Mekanik yüzey işlemleri istenilen kalitede yüzeyler elde etmekte yeterli olmayabilir. Bu durumda diğer yüzey işlemlerine başvurmak gerekir.

2.1.8.2. Asit kullanılarak yapılan yüzey işlemleri

Mekanik yüzey işlemleri tek başına yetersiz kaldığında kimyasal yöntemlere başvurulabilir.

Yüzey işlemlerinde kullanılan bir kimyasal yöntem asitle aşındırma değildir. Bütün bağlantı tipleri için temiz ve kimyasal olarak aktif bir yüzey gereklidir. Bu işlem genel olarak bağlanacak malzemelerin içinde asit bulunan bir tanka daldırılması ile gerçekleştirilir. Asitle yapılan aşındırma mekanik yöntemlerle benzer sonuçlar vermektedir. Mekanik aşındırma yöntemlerinde görülen partikül kalıntılarının asitle aşındırma yönteminde mevcut olmaması bir avantajdır.

2.1.9. Yapışmayı Etkileyen Faktörler

İki yüzey arasında meydana gelen yapışma olayı aşağıdaki iki şarttan herhangi birisinin gerçekleşmesi durumunda oluşur (Davis, 1995):

- Bileşenlerin fiziksel olarak birbirlerine nüfuz ederek kenetlenmesiyle
- Kimyasal olarak benzer bağ kuvvetlerinin kohezyonu arttırmasıyla

Gelişmiş mekanik performans elde etmek için ara yüzeyin kontrol edilmesi ancak her malzeme için farklılık gösteren yapışma mekaniği ve ara yüzeydeki yük transferinin anlaşılmasıyla mümkündür.

Bağlantının ayrılması esnasında ölçülen enerji, yapışma enerjisinin ve malzemelerin yutucu özelliklerinin karmaşık bir fonksiyonudur (Guillemenet vd., 2002). Örnek olarak, bir polimere bir gerilme uygulandığında enerjinin bir kısmı zincirlerin hareketi tarafından yutulur. Bu viskoz kayıplar zaman ve sıcaklığa bağlıdır. Zaman ve sıcaklığın etkisi zaman/sıcaklık süperpozisyon prensibiyle alakalıdır. Yapışma enerjisi G ve bağlantının ayrılma hızı V ilk olarak Gent ve Shultz tarafından belirlenmiştir (Gent ve Schultz, 1972):

$$G = W_a \Phi(a_T V) \quad (1)$$

Burada W_a yapışmanın termodinamik enerjisini, Φ yutma fonksiyonunu ve a_T zaman-sıcaklık denkliği için William-Landel-Ferry kayma faktörünü ifade etmektedir.

Maguis ve Barquins tarafından türetilen denklemde ise G iki terim ile ifade edilmiştir:

$$G - W = W \Phi(a_T V) \quad (2)$$

Creton [58] moleküler ağırlığın soyulma dayanımı, kayma dayanımı vb. gibi yapışma özelliklerine olan etkisini araştırmıştır. Yüksek molekül ağırlığı zincirlerin çözülmesini geciktirerek bağlantı performansını arttırmıştır. Creton ayrıca yapıştırıcı-ana malzeme ara yüzeyindeki yapışma davranışını da incelemiştir. Yapıştırıcı için her ne kadar öncelikli olarak bulk viskoelastik özellikleri önemliyse de iyi bir yapışma için

ara yüzeyin bulk yapıştırıcıyı plastik deformasyona sokacak gerilmeyi taşıyacak kadar kuvvetli olması gerektiği sonucuna ulaşmıştır.

2.2. Literatür Taraması

Yapıştırıcı ile birleştirme bağlantılarının gerilme analizi ilk olarak Volkersen tarafından 1938 yılında yapılmıştır (Volkersen, 1938). Volkersen, kayma gerilmesi dağılımını “diferansiyel kayma konsepti” metodu ile analiz etmiş fakat yükleme sırasında eksantrikliği hesaba katmamıştır (Rodriguez vd., 2010). Çalışmada yapıştırıcının lineer elastik davranış gösterdiği varsayımından dolayı, sadece kayma deformasyonuna maruz kaldığı düşünülmüştür. Ayrıca kayma gerilmesinin bindirme bölgesinin uç kısımlarında maksimum değerlere ulaşırken orta noktalarda bu değerlerden oldukça az olduğu gösterilmiştir (da Silva vd., 2009).

Goland ve Reissner tarafından 1944 yılında yapılan çalışmada ise tek tesirli bindirme bağlantısı için yüklemenin süreksizliği ilk defa hesaba katılmıştır (Goland ve Reissner, 1944). Analiz iki kısım olarak ele alınmıştır. Birinci kısımda bağlantılar, yapıştırıcının esnekliğini göz ardı edebilmek için ince bir yapıştırıcı tabakası ile modellenmiştir. İkinci kısımda bağlantılar, yapıştırıcı tabakasının sağladığı esneklik hesaba katılarak modellenmiştir. Analizin ikinci kısmı metal bağlantıların analizi hakkında oldukça önemlidir. Diferansiyel eşitlikler kullanılarak yapıştırıcının kayma ve normal gerilmeleri hesaplanmıştır. Goland ve Reissner çalışmasında bağlantının simetrik olduğunu varsaymışlar ve aynı metal malzemelerin yapıştırılması gerektiğini söylemişlerdir. Ayrıca teoremin $\frac{tG_a}{Gd} < 0,1$ ve $\frac{tE_a}{Ed} < 0,1$ eşitliklerinin sağlanması durumunda geçerli olacağını belirtmişlerdir. Fakat tipik metal bağlantılarda bu değerler yaklaşık olarak 0,4 civarında olduğundan Goland ve Reissner’in teorisi uygulanabilir görünmemektedir (van Ingen ve Vlot, 1993).

Hart-Smith tarafından 1973 yılında yapılan çalışmada Goland ve Reissner’in yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantıları üzerine olan klasik yaklaşımı geliştirilmiş ve genişletilmiştir. Yapılan çalışmada kritik eğilme momenti ile alakalı eksiklik giderilmiştir. Ayrıca yapıştırıcının plastikliği, yapıştırılan

malzemeler arasındaki sertlik dengesizliği ve tabakalı filamanlı kompozitlerin etkisi gibi faktörler eklenmiştir (Hart-Smith, 1973).

Ojalvo ve Eidinoff yapıştırıcı katmanı için daha kapsamlı gerilme-şekil değiştirme denklemleri kullanarak Goland ve Reissner'in çalışmasını genişletmişlerdir. Çalışmada özellikle yapıştırıcı kalınlığının yapıştırıcıda meydana gelen gerilmelere etkisi üzerinde durulmuştur. Ayrıca bağlanan malzemelerin uzunlukları yönünde meydana gelen gerilmelerin içlerinde meydana gelen gerilmelerin yanında ihmal edilebilir olduğu, alt ve üst parçanın klasik ince malzemelerde olduğu gibi düzlem gerilme ya da şekil değiştirmeye maruz kaldığı ve bağlantı malzemelerindeki boyuna ve enine sapmaların yapıştırıcı kalınlığıyla doğrusal olarak değiştiği kabulleri yapılmıştır. Yapılan çalışmada maksimum kayma gerilmelerinin yapıştırıcı tabakanın uç kısımlarında meydana geldiği sonucuna ulaşılmıştır (Ojalvo ve Eidinoff, 1978).

Delale ve Erdoğan tarafından yapılan bir çalışmada iki farklı ortotropik malzeme kullanılarak yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların düzlem şekil değiştirme durumu incelenmiştir. Alt ve üst parçanın kalınlığının sabit olması ve bağlantı bölgesinin yanıl kısımlarıyla ilişkisinin az olması göz önünde bulundurularak, yapıştırılan malzemelerin iki boyutlu levha olarak davrandığı varsayılmıştır. Ayrıca yapıştırıcı kalınlığı ana malzemeye nazaran oldukça küçük olduğundan kalınlık yönündeki gerilmeler göz ardı edilmiştir. Fakat alt ve üst malzemedeki kayma etkisi ve yapıştırıcının normali yönündeki şekil değiştirme hesaba katılmıştır. Yapıştırıcının gerilme-şekil değiştirme ilişkisinin doğrusal varsayılmasıyla iki boyutlu çözümün oldukça isabetli sonuçlar verdiğini göstermişlerdir (Delale ve Erdoğan, 1981).

Bigwood ve Crocombe yapıştırıcı bağlantısını yapıştırıcı tabakası temel malzemelerin arasında kalacak şekilde sandviç olarak modellemişlerdir. Kullandıkları diferansiyel denklemler bağlantının simetrik olması durumunda doğru sonuçlar vermekle beraber farklı malzemelerin yapıştırılması durumunda hata meydana gelmektedir. Bağlantı tasarımına yardımcı olmak amacıyla bağlantının ucunda meydana gelen maksimum gerilmeyi veren iki parametrelili tasarım formülünü geliştirmişlerdir. Bigwood ve Crocombe'nin teorisinin en önemli avantajı genel bağlantı şekillerini modelleyebilme imkânı sunmasıdır (Bigwood ve Crocombe, 1989).

Oplinger 1994 yılında yaptığı çalışmada Goland ve Reissner'in çalışmasına bağlı olarak bindirme bölgesinin iç ve dış kısımlarında meydana gelen büyük yön değişimlerini, alt ve üst malzemenin deformasyonunu da göz önünde bulundurarak hesaba katmıştır (Oplinger, 1994). Oplinger, büyük ana malzeme-yapıştırıcı kalınlığı oranları için Goland ve Reissner'le benzer sonuçlar elde etmiştir. Fakat göreceli olarak daha ince malzemeler için önemli farklılıklar gözlemlemiştir (da Silva vd., 2008).

Tsai ve Morton, Goland ve Reissner'in klasik çalışması da dahil olmak üzere; aksenal yüklemeye maruz, yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantılarının teorik çözümlerini detaylı olarak ele almışlardır. Teorik analizlerin karşılaştırılmasında iki boyutlu lineer olmayan sonlu elemanlar analizi kullanılmıştır. Bindirme bağlantılarının pratik uygulamaları için birtakım düzeltmeler ve modifikasyonlar önerilmiştir. Temel olarak, kenarlarda meydana gelen momentlerin ve yapıştırıcı tabakasında meydana gelen gerilme dağılımlarının belirlenmesi problemi üzerinde durulmuştur. Yapılan analizler sonucunda Hart-Smith'in modelinin kısa tek tesirli bindirme bağlantıları için Oplinger ve Goland ve Reissner'in modellerinden daha uygulanabilir ve makul olduğu, Oplinger'in modelinin uzun tek tesirli bindirme bağlantıları için daha uygun olduğu ve Goland ve Reissner'in çalışmasının üçüncü kısmının yapıştırıcı tabakasındaki gerilmeleri tahmin etmede yeterince isabetli olduğu belirtilmiştir (Tsai ve Morton, 1994).

Tsai ve Morton bir başka çalışmalarında kompozit kullanılarak oluşturulmuş, bindirme bölgesinin uç kısımları yapıştırıcı ile dolgulu ve dolgusuz tek tesirli bindirme bağlantılarını deneysel ve nümerik olarak inceleyerek yapılan dolgunun yapıştırıcı tabakasında meydana gelen gerilme dağılımını nasıl etkilediğini araştırmışlardır. Kompozit tek tesirli bindirme bağlantısının mekanik davranışını analiz etmek için geometrik olarak doğrusal olan ve olmayan iki boyutlu sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Deneysel ve nümerik sonuçlar bindirme bölgesinin uç kısımlarına yapılan yapıştırıcı dolgusunun kayma ve soyulma gerilme yığılmalarını büyük ölçüde azalttığını göstermiştir. Ayrıca bu gerilme yığılmalarını tek tesirli bindirme bağlantısının geometrik olarak lineer olmayan deformasyonunun etkilediği belirtilmiştir (Tsai ve Morton, 1995).

Sawa ve arkadaşları yaptıkları bir çalışmada iki boyutlu elastik teori kullanarak tek tesirli bindirme bağlantısının ara yüzeyinde meydana gelen gerilme dağılımlarının ve bağlantının eksenel yükleme sonucu deformasyonunun analizini yapmışlardır. Yapılan çalışmada birleştirilen malzemelerin elastisite modülünün, yapıştırıcı kalınlığının ve bindirme uzunluğunun gerilme dağılımına olan etkisi incelenmiştir. Gerilme dağılımları sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiştir ve sonlu elemanlar sonuçları ile nümerik sonuçlar birbirine oldukça yakın olduğu saptanmıştır. Temel malzemelerin elastisite modülü ve kalınlığı azaldığında ara yüzeyin kenarlarında meydana gelen gerilmelerde artış olduğunu göstermişlerdir (Sawa vd., 1997).

Lang ve Mallick çalışmalarında yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantısının bindirme bölgesinin iç kısmından bir miktar yapıştırıcı çıkararak alternatif bir teknik geliştirmişlerdir. Bağlantı lineer, iki boyutlu, düzlem şekil değiştirme ve izotropik malzeme özellikleri kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiştir. Yapıştırıcı tabakasında meydana gelen gerilme yığılmaları klasik tek tesirli bindirme bağlantısında meydana gelen gerilme dağılımları ile karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda girintili bağlantı şeklinin maksimum gerilmelerde önemli bir artış meydana getirmediği ve bu uygulamanın maliyeti düşürmek ve ağırlığı azaltmak adına bir alternatif olabileceği sonucuna ulaşılmıştır (Lang ve Mallick, 1999).

Sawa ve arkadaşları farklı malzemeler birleştirilerek oluşturulan tek tesirli bindirme bağlantısının, iki boyutlu elastik teori kullanarak, analizini yapmışlardır. Nümerik hesaplamalarda farklı malzemelerin elastisite modülü oranlarının, kalınlıklarının oranlarının, uzunluklarının oranlarının ve yapıştırıcı kalınlığının ara yüzey gerilme dağılımına olan etkisi çalışılmıştır. Sonuç olarak gerilmelerin ara yüzeylerin kenarlarına yakın yerlerde yığıldığı ve düşük elastisite modülüne sahip malzemelerde artış gösterdiği, daha ince malzemeler kullanıldığında bu gerilmelerde artış meydana geldiği, üst yapışanın uzunluğunun alt yapışana oranı azaldığında bu gerilmelerin arttığı ve yapıştırıcı kalınlığı azaltıldığında bu gerilmelerde artış meydana geldiği açıklanmıştır (Sawa vd., 2000).

Kaye ve Heller bindirme bağlantılarında ve yapıştırıcı ile tamir işlemlerinde yapıştırıcı tabakasındaki gerilmeleri azaltmak amacıyla otomatik hassasiyet temelli optimizasyon

prosedürü kullanmışlardır. Çift ve tek taraflı oluşturulan konfigürasyonlarda yapıştırıcı tabakasında meydana gelen maksimum gerilmeler azaltılmıştır (Kaye ve Heller, 2002).

Gleich ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada 0,1-0,5 mm arasında yapıştırıcı kalınlığının artışının bağlantının dayanabildiği maksimum yüke olan etkisi incelenmiştir. Yaygın olarak kullanılan analitik metotlarla yapılan analizlerde bağlantının dayanımı yapıştırıcı kalınlığının artmasıyla birlikte artış göstermiştir. Ayrıca birçok hataya yapıştırıcı tabakasında kalınlık yönünde meydana gelen gerilmelerin sebebiyet verdiği belirtilmiştir. Yapılan analizler sonucunda belirtilen yapıştırıcı kalınlığı aralığında; yapıştırıcı tabakasının kalınlığı azaldıkça gerilmelerin arttığı, kalınlık arttıkça gerilmelerin azaldığı sonucuna ulaşılmıştır (Gleich vd., 2001).

Andruet ve arkadaşları yapıştırma bağlantılarının gerilme ve şekil değiştirmelerini ölçmek için iki ve üç boyutlu sonlu elemanlar analizini yapmışlardır. ADH3D kabuk eleman kullanılarak modellenen yapıştırıcı tabakasının yapıştırılan malzeme ve yapıştırıcı arasındaki yer değiştirmenin sürekliliği açısından tatmin edici sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir (Andruet vd., 2001).

Li ve Sullivan yaptıkları çalışmada dengeli tek tesirli bindirme bağlantısının sonlu elemanlar analizini yapmışlar ve sonuçları deneysel ve teorik olarak doğrulamışlardır. Bindirme bölgesinin uç kısımlarına yapılan yapıştırıcı dolgusunun yapıştırıcı tabakasındaki soyulma gerilmelerini azaltırken kayma gerilmelerini bir miktar arttırdığı sonucuna ulaşmışlardır (Li ve Sullivan, 2001).

Fu ve Mallick kompozit plakaları birleştirmek için yapıştırıcı ve civata kullanarak oluşturdukları hibrit bağlantının statik ve yorulma dayanımını araştırmışlardır. Hibrit bağlantının yapıştırma bağlantılarından daha fazla yük taşıma kapasitesine sahip olduğu ve yorulma ömrünün daha uzun olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca pulun dizaynının hibrit bağlantının performansını etkilediği ve meydana getirdiği yanal basıncın yapıştırıcı tabakasındaki maksimum soyulma gerilmelerini azalttığını belirtmişlerdir (Fu ve Mallick, 2001).

Mortensen ve Thomsen silindirik, eğilmeye maruz giriş veya geniş plakalar olarak modellemiş ve bunları ortotropik tabakalar olarak kabul etmişlerdir. Temel malzemeler asimetrik ve dengesiz kompozit tabakalar olarak imal edilmiştir.

Çalışmada yapıştırıcının lineer elastik ya da elastik olmayan davranışını hesaba katarak iki temel yaklaşım benimsenmiştir. Lineer elastik yaklaşımda yapıştırıcı kalınlığı yapıştırılan malzemelerle kıyaslandığında oldukça küçük kabul edilmiştir. Lineer çözüm modifiye edilmiş von Mises kriteri ile beraber kullanılmıştır. Lineer ve lineer olmayan sonuçların karşılaştırılması sonucunda lineer olmayan yapıştırıcı davranışının yapıştırıcı tabakasındaki gerilmeleri düşük yüklemelerde bile etkilediği ve bindirme bölgesinin uç kısmında meydana gelen gerilme yığılmalarını düzeltme eğiliminde olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Mortensen ve Thomsen, 2002).

Belingardi ve arkadaşları çelik ve lifli polimer kullanılarak oluşturulan yapıştırma bağlantısında yapıştırıcı ile dolgu yapılmasının ve ana malzemelere pah kırılmasının bağlantı üzerine etkisini araştırmışlardır. 45°'lik dolgu ve pah açısının maksimum gerilmeleri önemli ölçüde azalttığını göstermişlerdir (Belingardi vd., 2002).

Wang ve arkadaşları yapıştırıcı ile birleştirilmiş sandviç tipi bağlantı için bağlanan parçaların bilineer, yapıştırıcının nonlineer davranışını incelemişlerdir. Oluşturulan model alt ve üst parçanın eğilme deformasyonunu ve kayma deformasyonunu da hesaba katmaktadır. Yapıştırıcı tabakasındaki gerilme ve şekil değiştirme dağılımları altı diferansiyel denklemin nümerik olarak çözülmesiyle elde edilmiştir. Çalışmada deneysel veriler kullanılarak oluşturulan modelin yapıştırıcı dayanımını ölçmek için mevcut olan kriterlere uygunluğu araştırılmıştır (Wang vd., 2003).

Avila ve Bueno çalışmalarında yapıştırıcı ile birleştirilmiş dalgalı bindirme bağlantısının deneyini ve nümerik analizini yapmışlardır. Sonuçlar yük taşıma kapasitesinin %41 oranında arttığını göstermiştir (Avila ve Bueno, 2004).

Zou ve arkadaşları alüminyum ve kompozitler kullanılarak oluşturulan yapıştırıcı ile birleştirilmiş simetrik bağlantıların analitik analizini yapmış ve sonuçları sonlu elemanlar sonuçları ile kıyaslamışlardır. Yapıştırıcı tabakasındaki soyulma ve kayma gerilmeleri tabakanın merkez çizgisi referans kabul edilerek hesaplanmıştır. Sonlu elemanlar analizi iki boyutlu olarak ele alınmıştır. Analitik ve sonlu elemanlar analizinden elde edilen sonuçlar, neredeyse tüm analitik modellerde maksimum soyulma ve kayma gerilmelerinin abartılı değerlere ulaştığını göstermiştir (Zou vd., 2004).

Özel ve arkadaşları eğilme momentine maruz tek tesirli bindirme bağlantısının iki boyutlu doğrusal olmayan elasto-plastik sonlu elemanlar analizini yapmış ve deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Sert ve sünek olmak üzere iki farklı yapıştırıcı kullanılmıştır. Sonuçlar ana malzeme kalınlığının her iki yapıştırıcıyla oluşturulmuş bağlantıların üzerinde de önemli ölçüde etkili olduğunu fakat bindirme bölgesinin uzunluğunun artışının sadece sünek yapıştırıcı ile oluşturulan bağlantının yük taşıma kapasitesini arttırdığını göstermiştir (Özel vd., 2004).

da Silva ve arkadaşları, klasik elastik analizlerin yapıştırıcı kalınlığı arttıkça bağlantının dayanımının arttığını söylemesine rağmen deneysel sonuçların tam tersini gösterdiğini belirtmişlerdir. Çalışmada üç farklı yapıştırıcı için yapıştırıcı kalınlığının tek tesirli bindirme bağlantısının dayanımına yaptığı etki incelenmiştir. Sonuç olarak yapıştırıcı tabakasının kalınlığı düşürüldüğünde bindirme kayma dayanımının artış gösterdiği, bindirme kayma dayanımına yapıştırıcı kalınlığının etkisinin yapıştırıcı-ana malzeme ara yüzey gerilmeleri ile izah edilebileceği ve sonlu elemanlar metodu kullanılarak yapılacak analizlerde yapıştırıcı bulk numunesinin özelliklerinin kullanılmasının doğru sonuçlar elde etmek adına önemli olduğu belirtilmiştir (da Silva vd., 2006).

Oterkus ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada eksenel yüklemeye maruz, geometrik olarak lineer olmayan, uçları konikleştirilmiş kompozitlerin yapıştırıcı ile birleştirilmesi ile oluşturulan bağlantılar için yarı analitik çözüm metodu geliştirilmiştir. Çözüm metodu yapıştırıcının kalınlık yönündeki normal ve kayma gerilmelerini, düzlemsel gerilme bileşkesini ve yapışan malzemelerin eğilme momentlerini vermektedir. Ayrıca yapıştırıcı tabakasının bilineer elastik malzeme davranışını da hesaba katmaktadır. Yapılan çalışmalar sonucunda tek tesirli bindirme bağlantısında alt ve üst parçanın uç kısımlarının konikleştirilmesinin soyulma gerilmesini önemli ölçüde düşürdüğü, kayma gerilmesinde ise küçük miktarlarda azalmaya sebep olduğu görülmüştür. Ayrıca konikleştirme uzunluğunun arttırılması yapıştırıcı katmanının köşelerindeki bütün gerilme bileşenlerinin değerlerinin azalmasını sağlamıştır (Oterkus vd., 2006).

da Silva ve Adams bir çalışmalarında düşük ve yüksek sıcaklıklarda iyi performans gösteren iki yapıştırıcının birlikte kullanıldığı yeni bir yöntem geliştirerek iki tesirli bindirme bağlantısının yük taşıma kapasitesini arttırmışlardır. Dış malzeme olarak titanyum iç malzeme olarak karbon fiber takviyeli bismaleimit kullanılan bağlantının düşük sıcaklıklarda, kompozitten kaynaklanan kopmadan dolayı yapıştırıcının performansından faydalanılamamıştır. Bu çalışmalarında ise kompozitte meydana gelen kalınlık yönündeki gerilmeleri azaltarak özellikle düşük sıcaklıklarda bağlantının dayanımını arttırmaya çalışmışlardır. Deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi sonuçları termal gerilmeler göz önünde bulundurulmadığında içe doğru konikleştirme ve bindirme bölgesinin uç kısmının doldurulmasının bağlantının dayanımını arttırdığını göstermiştir. Fakat düşük sıcaklıklarda dış malzeme olarak kompozit kullanılması, kopmanın hala kompozitten kaynaklanmasına rağmen, bir önceki uygulamaya nazaran bağlantı dayanımını bir miktar arttırmıştır (da Silva ve Adams, 2007).

Grant ve arkadaşları otomotiv endüstrisinde arabaların gövde kabuğunda kullanılan hafif çelikler için yapısal yapıştırıcı kullanarak oluşturulan tek tesirli bindirme bağlantısını incelemiştir. Bağlantıya aksenal, üç nokta ve dört nokta yükleme yapılmıştır. Üç nokta eğme ile aksenal yüklemenin yapıştırıcıyı etkilemesi açısından benzediği fakat dört nokta eğme testinin bağlantı akmadan önce çelik aktığından farklılık gösterdiği belirtilmiştir (Grant vd., 2009).

da Silva ve arkadaşları yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantısında malzemenin, geometrinin, çevrenin ve yüzey işlemlerinin kayma dayanımı üzerine etkisini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda bindirme kayma dayanımının bindirme uzunluğuyla birlikte arttığı, yapıştırıcı kalınlığı arttıkça azaldığı, ana malzeme kalınlığı azaldıkça arttığı, ana malzemenin akma dayanımı arttıkça arttığı ve yüzey işlemlerinin ihmal edilebilecek kadar az önemi olduğu bulgularına ulaşılmıştır (da Silva vd., 2009).

Zhao ve arkadaşları, yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantısında alt ve üst parçanın köşelerini farklı açılarda yuvarlatarak bu değişikliğin gerilme dağılımına ve bağlantının dayanımına olan etkisini incelemiştir. Biri oldukça kırılğan diğeri büyük plastik deformasyonlara müsaade eden iki farklı yapıştırıcı

kullanılmıştır. Sonuç olarak birleştirilen malzemelerin köşelerinin yuvarlatılmasının gerilmelerin değerini azalttığı, büyük yuvarlatma değerlerinde maksimum gerilmelerin bindirme bölgesinin iç kısmına doğru hareket ettiği görülmüştür (Zhao vd., 2011).

Campilho ve arkadaşları bindirme bölgesi uçları ters yönde bükülmüş alüminyum plakalarla oluşturdukları tek tesirli bindirme bağlantısının sert ve yumuşak yapıştırıcı için bağlantı dayanımını nasıl etkilediğini araştırmışlardır. Sert yapıştırıcı için bu tekniğin büyük avantaj sağladığını fakat yumuşak yapıştırıcının bu teknikten etkilenmediği sonucuna ulaşmışlardır (Campilho vd., 2011).

Xu ve Wei, “Cohesive Zone Model” kullanarak metalik bağlantılarda yapıştırıcı kalınlığının yapışma üzerine olan etkisini araştırmışlardır. Sonuçlar gerek bağlantı dayanımının gerekse de yapışma özelliklerinin yapıştırıcı kalınlığına oldukça bağımlı olduğunu göstermiştir (Xu ve Wei, 2013).

Özel ve arkadaşları alüminyum ve 16 tabakalı karbon/epoksi kompozit kullanarak tek tesirli bindirme bağlantısını deneysel ve nümerik olarak incelemişlerdir. Deneysel sonuçlar ve nümerik analizler ana malzemelerin fiber yönelimi, farklı ana malzeme kalınlıkları ve bindirme bölgesi uzunluğunun bağlantının taşıma kapasitesini ve gerilme dağılımını etkilediğini göstermiştir (Özel vd., 2014).

Gültekin ve arkadaşları yaptıkları çalışmada yapıştırılan plakaların genişliğinin aksel yüklemeye maruz tek tesirli bindirme bağlantısı üzerine etkisini deneysel ve nümerik olarak araştırmışlardır. Sonuç olarak plaka genişliğini arttırmanın bindirme bölgesi uzunluğunu arttırmaya nazaran bağlantının yük taşıma kapasitesini daha fazla arttırdığı ve taşıma kapasitesinin bağlantı bölgesinin şeklinin dikdörtgenden kareye dönüştükçe arttığı bilgisine ulaşmışlardır (Gültekin vd., 2014).

Soykok, pim deliği açılarak içleri yapıştırıcı ile doldurulan, yapıştırıcı ile birleştirilmiş kompozitler üzerine doldurulan yapıştırıcının pim etkisini deneysel olarak incelemiştir. Delikler bindirme bölgesi üzerine merkezde ya da çapraz iki delik olarak açılmıştır. Kompozitler birleştirilirken sıvı yapıştırıcı iki yüzeydeki delikleri de doldurmuştur. Sertleşmeden sonra bu deliklerdeki yapıştırıcının pim görevi üstlenmesi

ve bağlantının dayanımını arttırması hedeflenmiştir. Fakat bağlantıların deneylerinde böyle bir etki gözlemlenmemiştir. Bu olgu deliklerin etrafında meydana gelen gerilme yığılmalarının bağlantının dayanımını düşürmesiyle açıklanmıştır (Soykok, 2015).

Sancaktar ve Simmons yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantısında ana malzemelerin üst ve alt kısmına bindirme bölgesinin hemen önünde olacak şekilde açılan çentiklerin bağlantı dayanımı ve deformasyonuna olan etkisini incelemişlerdir. Üç farklı yapıştırıcı kullanılarak hazırlanan üç farklı tek tesirli bindirme bağlantısı konfigürasyonu oluşturulmuştur. Metal katkılı ve jel yapıştırıcı için çentiğin büyüklüğü sebebiyle ana malzeme aşırı deforme olduğundan sadece üst çentik denenmiştir. Metal katkılı yapıştırıcının performansında %29 artış meydana gelirken jel yapıştırıcıda herhangi bir değişim gözlemlenmemiştir. Film tipi yapıştırıcı için ise ana malzemede alt ve üst çentik de denenmiştir. Gerilmelerde gayet iyi bir düşüş yakalanmasına rağmen bağlantı performanslarında sadece %7 ve %8'lik artış yakalanmıştır (Sancaktar ve Simmons, 2000).

3. MATERYAL ve YÖNTEM

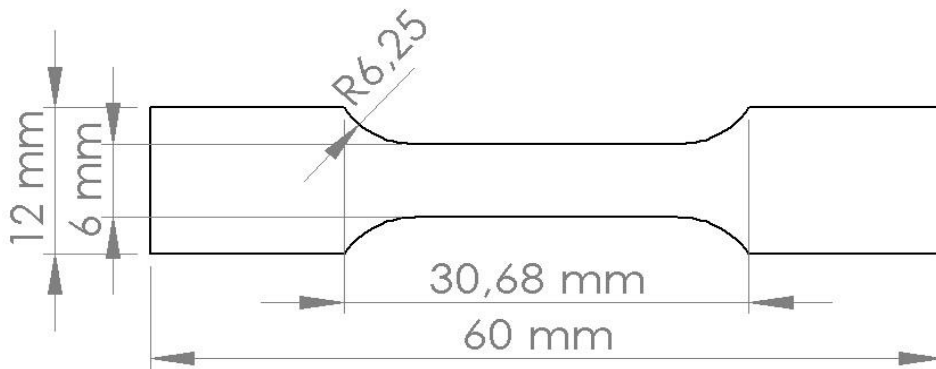
3.1. Deneysel Çalışma

3.1.1. Malzeme seçimi

Yapılan çalışmalarda ana malzeme olarak 7075-T7 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. T7 ifadesi malzemenin dayanımı iyileştirmek için çözümlü ısıtılma işlem uygulandığını ve ısıtılma yolu aşırı yaşlandırıldığını ifade eder. Oldukça yüksek mukavemete sahip olan bu malzeme, özellikle havacılık alanında, yüksek gerilmelerin meydana geldiği yerlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Alaşımında ağırlıkça %87.1-91.4 oranında alüminyum, %5.1-6.1 oranında çinko, %2.1-2.9 oranında magnezyum, %1.2-2 oranında bakır ve eser miktarda bazı diğer metaller bulunmaktadır. Yapıştırıcı olarak 3M firması tarafından üretilen iki bileşenli, yapısal DP 460 epoksi yapıştırıcı kullanılmıştır.

3.1.2. Mekanik özelliklerin belirlenmesi

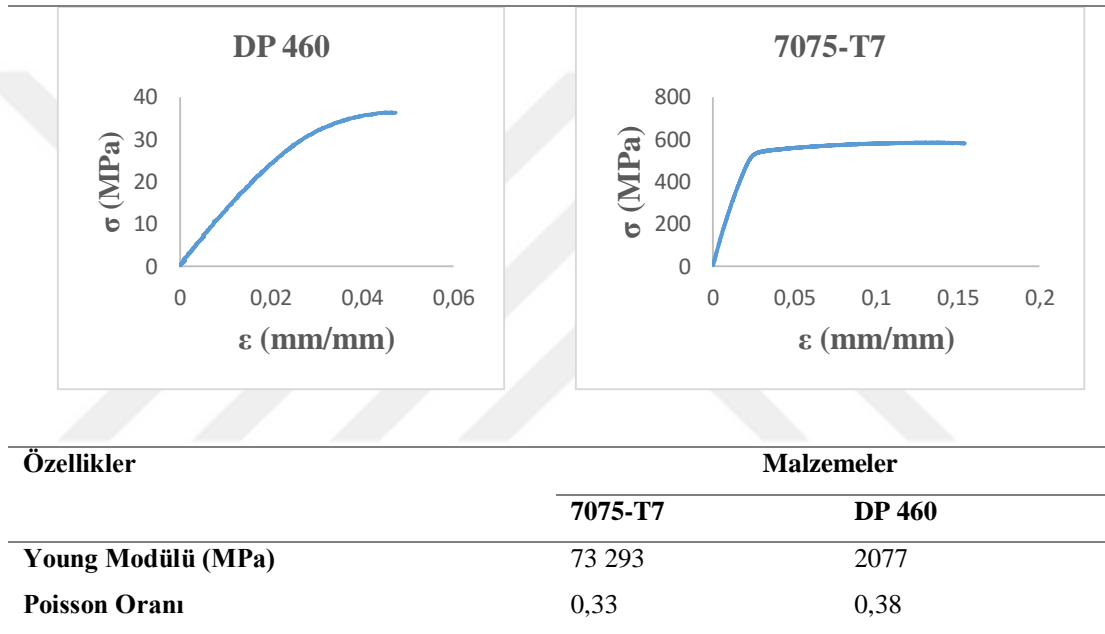
Sonlu elemanlar analizi için deneylerde kullanılan malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi önem arz etmektedir. Yapıştırıcının mekanik özellikleri Gültekin ve arkadaşlarının yapmış olduğu bir çalışmadan alınmıştır (Gültekin vd., 2014). Alüminyum malzemenin mekanik özelliklerini belirlemek için bulk formunda numuneler üretilmiştir.



Şekil 3.1. Alüminyum için bulk numune ölçüleri

Alüminyum için bulk numune kalınlığı 4 mm'dir. Alüminyum alaşımından bulk numune su jeti ile kesimle üretilmiştir. Hazırlanan bulk numuneler Erzincan Üniversitesi Temel Bilimler Araştırma Uygulama Laboratuvarı'nda bulunan Instron marka yorulma cihazıyla 1 mm/dk'luk çekme hızıyla test edilerek alüminyum için gerilme-şekil değiştirme eğrisi ve mekanik özellikleri elde edilmiştir.

Tablo 3.1. Alüminyum ve yapıştırıcının mekanik özellikleri



3.1.3. Bağlantı yüzeylerinin hazırlanması

Yapıştırılacak yüzeylerin hazırlanması yapıştırma bağlantısının dayanımı açısından oldukça büyük önem arz etmektedir. Doğru şekilde hazırlanmayan yüzeyler bağlantı kalitesini düşürdüğünden deney sonuçlarını doğrudan etkilemektedir. Yapılan çalışmalarda yüzeyler hazırlanırken aşağıdaki işlem sırası takip edilmiştir:

- Masaüstü freze yardımıyla bağlanacak numune geometrilerine son şekilleri verildi.
- Numunelerde kalan çapaklar temizledi.
- 800 Kumlu su zımparasıyla yapıştırılacak yüzeyler zımparalandı.
- Temiz suyla numuneler yıkandı.

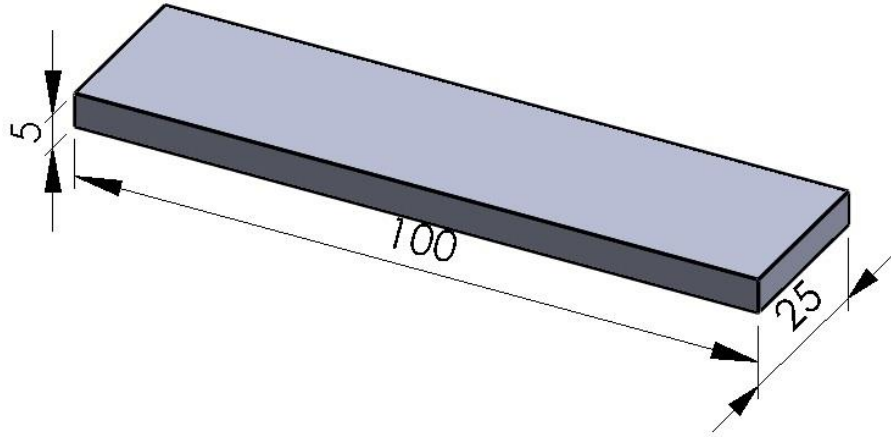
- Yıkanan numuneler aseton banyosunda bekletildi.
- Aseton banyosundan çıkarılan numuneler fırında kurutuldu.

3.1.4 Bağlantı geometrilerinin hazırlanması

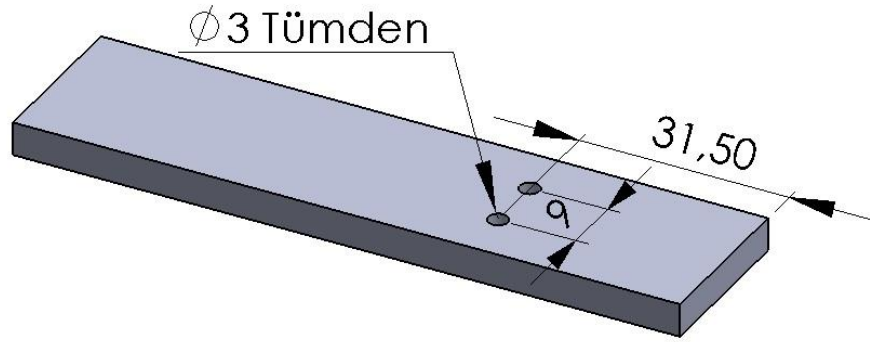
Hangi geometrik değişikliklerin bağlantı dayanımını iyileştirdiğini tespit etmek için öncelikle sonlu elemanlar yöntemi ile birtakım analizler yapılmıştır. Yapılan analizlerin sonuçları Taguchi Deney Tasarımı yöntemi (Taguchi, 1986) kullanılarak incelenmiştir. Taguchi metodu Genichi Taguchi tarafından ortaya konan istatistiksel bir yöntemdir. Ürünlerin kalitesini arttırmak için geliştirilen bu yöntem günümüzde mühendislik de dahil olmak üzere birçok alanda kullanılmaktadır. Bu çalışmada Taguchi yöntemi bağlantı dayanımını artırma açısından optimum sonucu veren geometrik değişikliklerin tespit edilmesinde kullanılmıştır.

Yapılan deneylerde yedi farklı geometri üzerinde durulmuştur. I. Tip, klasik tek tesirli bindirme bağlantısıdır. II. Tipte plakaların üzerine iki adet tümenden delik açılmıştır. III. Tipte plakaların üzerine kama kanalı açılmıştır, kendi içerisinde Tip III-a, Tip III-b, Tip III-c olmak üzere dört farklı geometriye ayrılmaktadır. III. Tip içerisindeki üç farklı geometrinin kanal uzunluğu, derinliği gibi parametreler farklılık göstermektedir. Tip IV'de plakaların üzerine tümenden kanal açılmıştır. V. Tipte IV'deki kanalın içerisine iki adet tümenden delik açılmıştır. VI. Tipte III. Tipteki plakaların üzerine açılan kama kanalının her iki yanına da iki adet tümenden delik açılmıştır. VII. Tipte plakaların üzerine üç adet kör delik açılmıştır. VIII. Tipte ise kanalın yapıştırma bölgesine olan uzaklığı artırılmıştır.

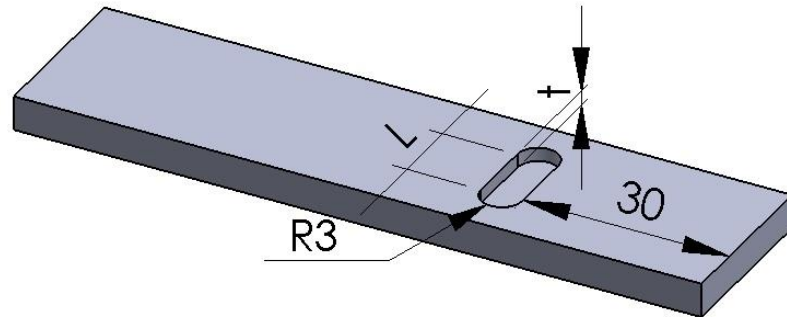
Tüm plakalar 25x100x5 mm boyutunda kesilmiştir, farklılıkları üzerlerine uygulanan talaşlı imalat işlemlerinden kaynaklanmaktadır. Aşağıdaki şekillerde kullanılan geometriler detaylı bir şekilde gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Tip I geometrisi



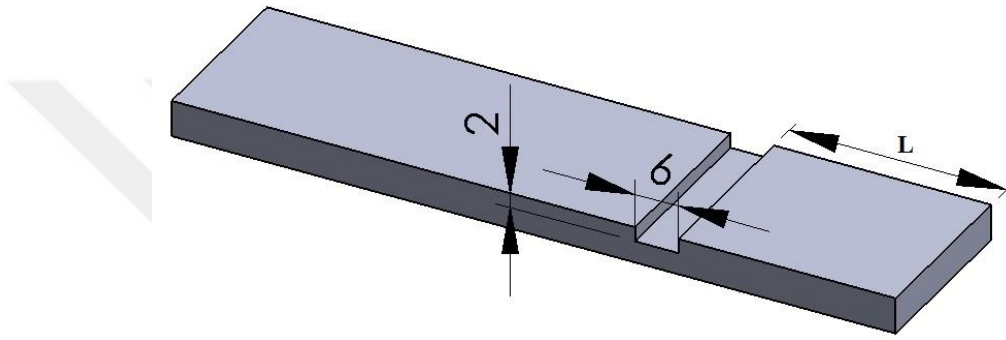
Şekil 3.3. Tip II geometrisi



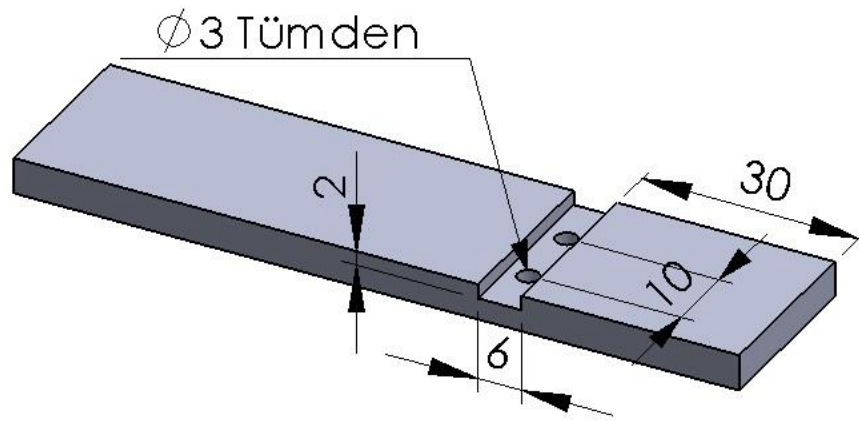
Şekil 3.4. Tip III geometrisi

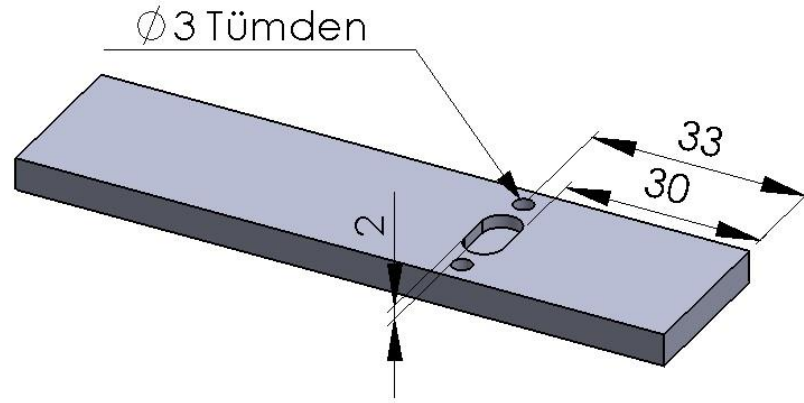
Tablo 3.2. Tip III Geometrik varyasyonlar

Varyasyonlar	L (Kanal Genişliği)	T (Kanal derinliği)
Type III-a	10	1
Type III-b	10	2
Type III-c	10	3

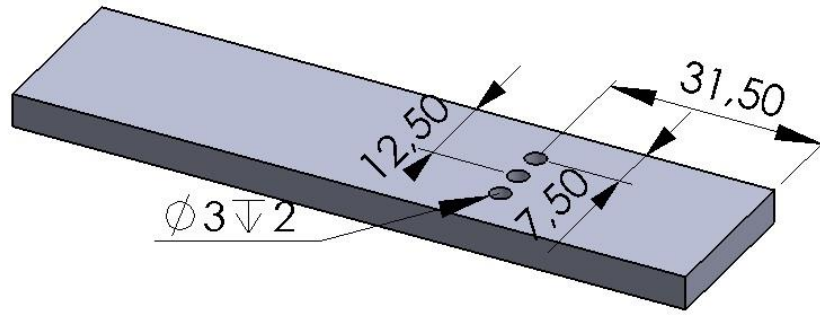
**Şekil 3.5.** Tip IV geometrisi**Tablo 3.3.** Tip IV Geometrik varyasyonlar

Varyasyonlar	L (Kanalın Uzaklığı)
Type IV-a	30
Type IV-b	25

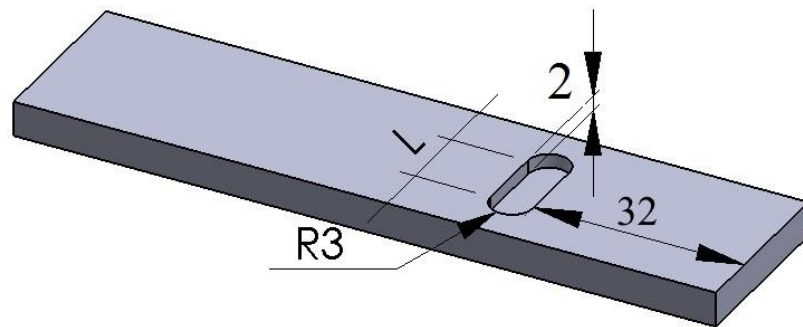
**Şekil 3.6.** Tip V geometrisi



Şekil 3.7. Tip VI geometrisi



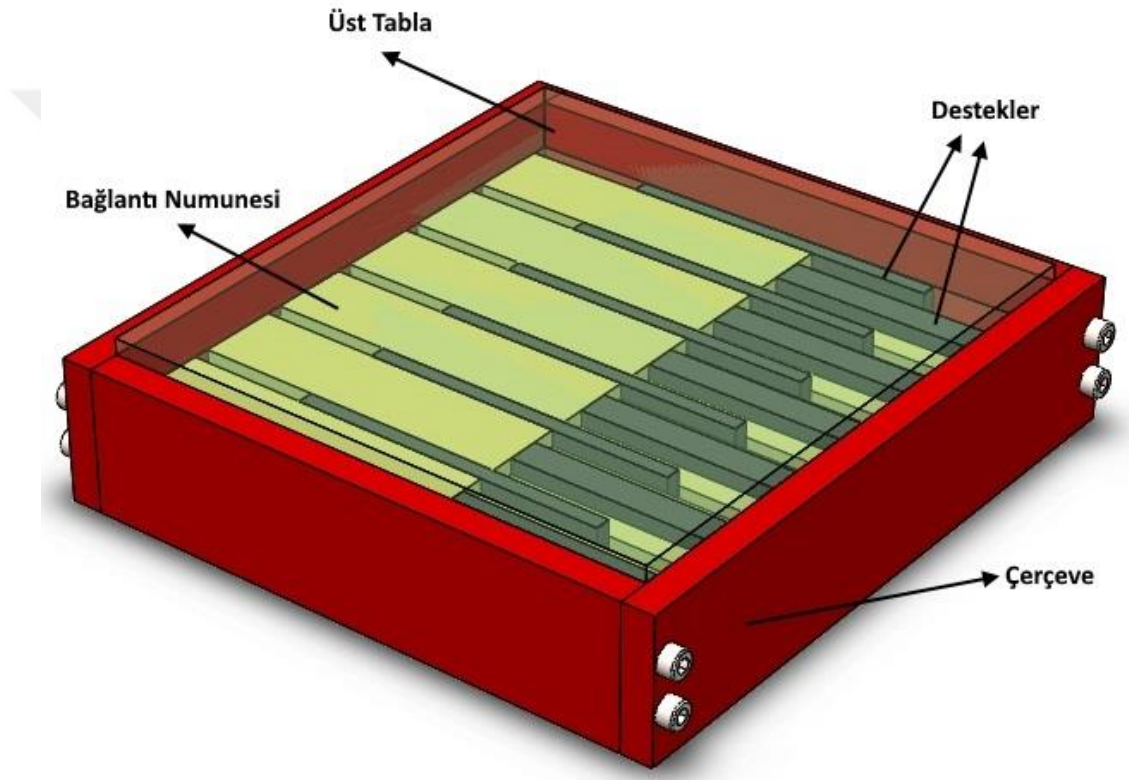
Şekil 3.8. Tip VII geometrisi



Şekil 3.9. Tip VIII geometrisi

3.1.5. Bağlantı kalıbının üretilmesi

Bağlantıların düzgün bir şekilde birleştirilmesi ve çeşitli yapıştırma problemlerinin önüne geçilmesi için Şekil 4.11'deki bağlantı kalıbı üretilmiştir.



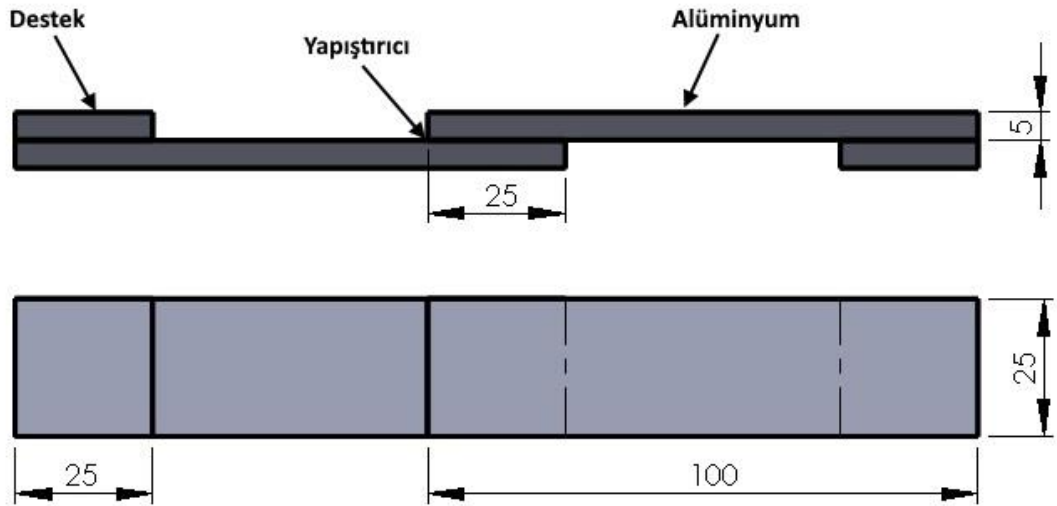
Şekil 3.10. Bağlantı kalıbı

AISI 4140 çelikten imal edilen bağlantı kalıbı alt tabla, çerçeve, destekler ve üst tabla olmak üzere dört farklı bileşenden oluşmaktadır. Numunelerin kurluşma işleminden sonra kalıptan rahat çıkarılabilmesi için bağlantı kalıbının çerçevesi sökülüp takılabilecek şekilde civata kullanılarak yapılmıştır. Üst tabla düzgün bir yapışma için bağlantı numunelerine gereken baskıyı yapacak şekilde üretilmiştir. Alt ve üst desteklerin uzunluklarına bağlı olarak bağlantı numunelerinin bindirme uzunlukları ayarlanabilmektedir. Ara destekler ise bir yandan numunelerin birbirine yapışmasını

engellerken diğ er yandan kalıpta farklı genişlikteki malzemelerin kullanılmasına da olanak sağlamaktadır. Bu çalışmada ara destekler numune genişliği 25 mm; alt ve üst destekler ise bindirme uzunluğu 25 mm olacak şekilde ayarlanmıştır.

3.1.6. Bağlantı numunelerinin hazırlanması

Bu çalışmada yedi farklı tip bağlantı numunesinin deneyleri yapılmıştır. Yapılan tüm deneylerde numunelerin üzerindeki değişiklikler hariç bağlantı ölçüleri sabit tutulmuştur. Şekil 3.11’de Tip I için bağlantı ölçüleri şematik olarak gösterilmiştir.

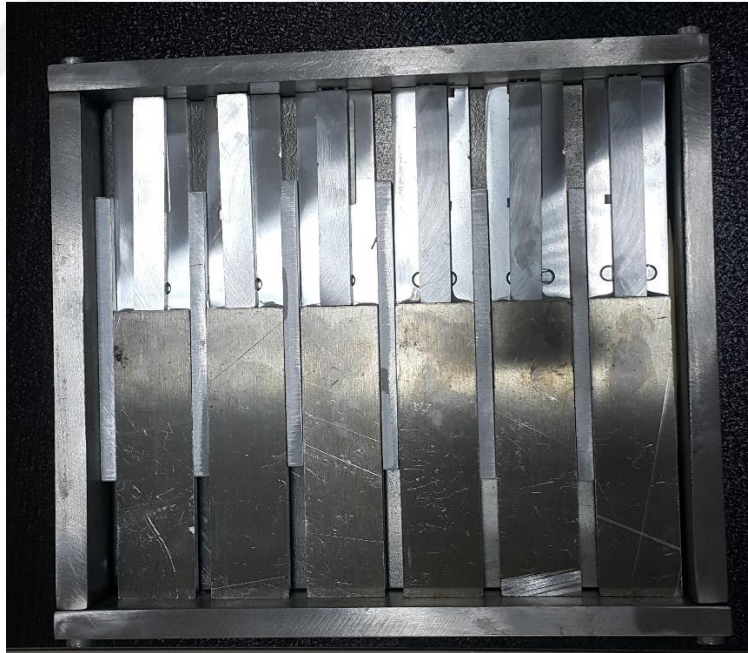


Şekil 3.11. Tip I bağlantı ölçüleri

Şekil 3.11’de görüldüğü üzere alüminyum plaka ölçüleri 25x100x5 mm’dir. Yapıştırıcı kalınlığı 0,1 mm ve bindirme uzunluğu 25 mm’dir. Bu ölçüler tüm bağlantı numuneleri için sabit tutulmuştur. Tek tesirli bindirme bağlantısı yapısı gereği geometrik olarak eksantrik olduğundan çekme deneyi esnasında bu eksantrikliğin etkisini ortadan kaldırmak için bağlantı numunesinin her iki ucuna 25x25x5 mm ölçülerinde iki adet destek yerleştirilmiştir.

Bağlantı numuneleri oluşturulurken her bir alüminyum plaka freze ile her tip için gerekli işlemler gerçekleştirildikten sonra daha önce bahsedilen yüzey işlemleri uygulanmıştır. Uygulanan yüzey işlemleri sonucunda fırında kurutulan alüminyum plakaların birleştirilmesi işlemine geçilmiştir.

DP 460 epoksi yapıştırıcı, yapıştırıcı tabancası ve 50 mm uzunluğundaki nozzle kullanılarak uygulanmıştır. Bağlantı numunesinin alt parçası kalıba yerleştirilmiş ve üst parçaya yapıştırıcı uygulandıktan sonra alt parçanın üzerine yerleştirilmiştir. Kalıbın alt ve üst destekleri bindirme uzunluğu 25 mm olacak şekilde ayarlandığından yapıştırıcı uygulanırken ölçüm yapılmasına gerek kalmamıştır. Yapıştırıcı kalınlığı alt destek ve üst destek ile ana malzeme arasına yerleştirilen ince film ile 0.1 mm olarak ayarlanmıştır.



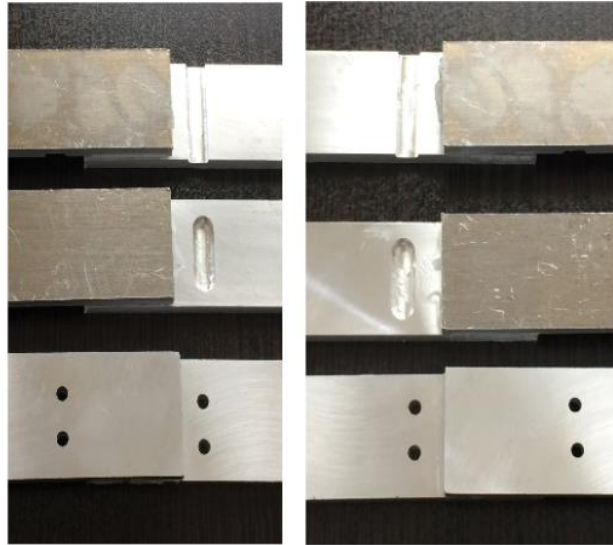
Şekil 3.12. Bağlantı numunelerinin hazırlanması

Bağlantı kalıbına belirlenen ölçülere göre bir seferde altı adet numune konulabilmektedir. Numuneler yapıştırıldıktan sonra bağlantı kalıbı üst tabla ile kapatılır.

Hazırlanan bağlantı numuneleri daha sonra yapıştırıcının k rleşmesi için 60°C'lik fırında 2 saat bekletilmiştir. Fırından çıkarıldıktan sonra kalıptan alınan numunelerin her biri deneylerden önce 24 saat oda sıcaklığında bekletilmiştir.



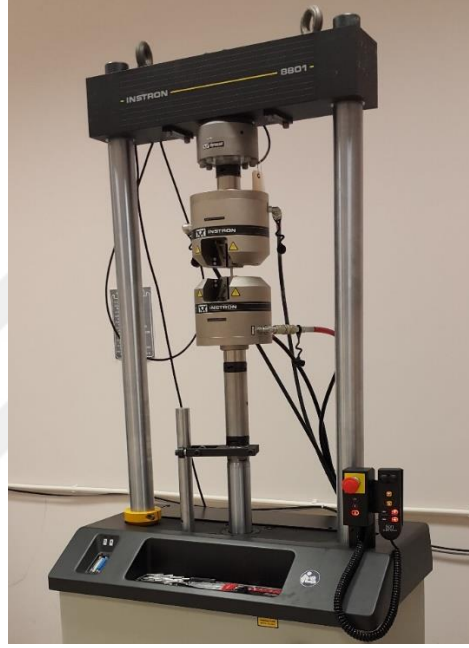
şekil 3.13. Kalıptan ıkarılan bağlantı numuneleri



şekil 3.14. Farklı tipte bağlantı numuneleri

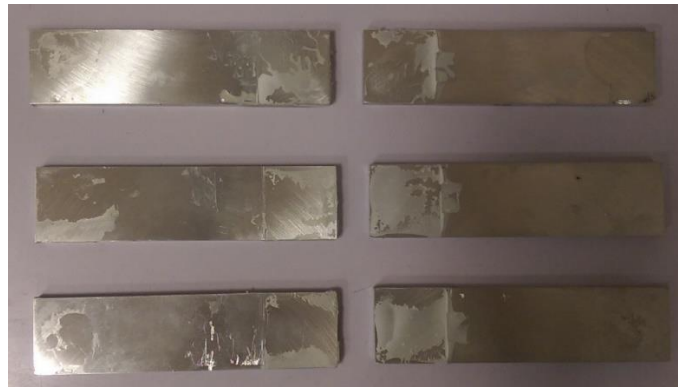
3.1.7. Deneylerin yapılması

Deneyler Erzincan Üniversitesi Temel Bilimler Araştırma Uygulama Laboratuvarı'nda bulunan Instron marka yorulma cihazında yapılmıştır. Bu cihazda üst çene sabit alt çene hareketlidir. Tüm deneyler oda sıcaklığında 1 mm/dk'lık çene hızıyla bağlantı kopana kadar gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.15. Instron yorulma cihazı

Numuneler cihazın çenelerine yerleştirirken çeneleri ortalayacak şekilde ve düz olarak yerleştirmeye dikkat edilmiştir. Deneyler sonucunda bağlantı numunelerinin kopma yükü ve uzaması kayıt edilmiştir.



Şekil 3.16. Çekme testi ile koparılan bağlantı numuneleri

3.2. Üç Boyutlu Sonlu Elemanlar Analizi

3.2.1. Giriş

Sonlu Elemanlar Yöntemi ya da Sonlu Elemanlar Metodu, kısmi diferansiyel denklemlerle ifade edilen veya fonksiyonel minimizasyonu olarak formüle edilebilen problemleri çözmek için kullanılan bir sayısal yöntemdir. İlgilenilen bölge sonlu elemanlar (Finite Element) topluluğu olarak gösterilmektedir. Sonlu elemanlardaki yaklaşık fonksiyonlar, araştırılan fiziksel alanın nodal değer terimlerinde belirlenmektedir. Sürekli fiziksel problem, bilinmeyen nodal değerli kesikli sonlu eleman problemine dönüştürülmektedir. Bu yöntemin uygulanması için basit yaklaşım fonksiyonları oluşturulmalıdır. Sonlu Elemanlar Yöntemiyle, katı mekaniği, sıvı mekaniği, akustik, elektromanyetizma, biyomekanik, ısı transferi gibi alanlardaki problemler çözülebilir ve

- Karmaşık sınır koşullarına sahip sistemlere,
- Düzgün olmayan geometriye sahip sistemlere,
- Kararlı hal, zamana bağlı ve özdeğer problemlerine,
- Lineer ve lineer olmayan problemlere,

uygulanabilir.

Bu bölümde ABAQUS CAE 6.14 Student Edition kullanılarak bağlantıların üç boyutlu sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Yapıştırma bağlantısı *continuum cohesive zone model* kullanılarak modellenmiştir. Yapıştırıcı ve ana malzemenin plastik davranışı göz önünde bulundurulmuş ve her iki malzeme için plastik özellik verileri bulk numunelerin deney sonuçlarından elde edilmiştir.

Üç boyutlu sonlu elemanlar analizi yapılırken öncelikli olarak yapıştırıcı tabakasında meydana gelen gerilmeleri düşüreceği tahmin edilen modeller denenmiştir. İyi sonuç veren modellere yapılan geometrik değişiklikler göz önünde bulundurularak Taguchi Deney Tasarımı metodu kullanılarak geometrik değişikliklerin hangi aralıkta optimum sonuç vereceği belirlenmiş ve bu modellerin sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Daha sonra ise sonlu elemanlar analizleri sonuçları deneyler ile doğrulanmaya çalışılmıştır.

3.2.2. Taguchi metodunun uygulanması

Taguchi metodu Genichi Taguchi tarafından ortaya konan istatistiksel bir yöntemdir. Ürünlerin kalitesini arttırmak için geliştirilen bu yöntem günümüzde mühendislik de dahil olmak üzere birçok alanda kullanılmaktadır.

Ürünlerin imalatında ürün kalitesini etkileyen birçok parametre bulunmaktadır. Özellikle büyük endüstrilerde bütün faktörlerin tek tek ürün kalitesine etkisini tespit etmek demek oldukça fazla sayıda deney yapmak demektir. Bu da işletmelerde para ve zaman kaybı anlamına gelmektedir.

Taguchi metodu ürün kalitesini etkileyen tüm faktörlerin kontrol edilemeyeceğini, bazılarının kontrolümüz dışında geliştiğini söyler ve bu faktörlere gürültü faktörü adını verir. Bu metotta gürültü faktörlerinin etkisini en aza indirecek olan kontrol edilebilir faktörler belirlenmeye çalışılır.

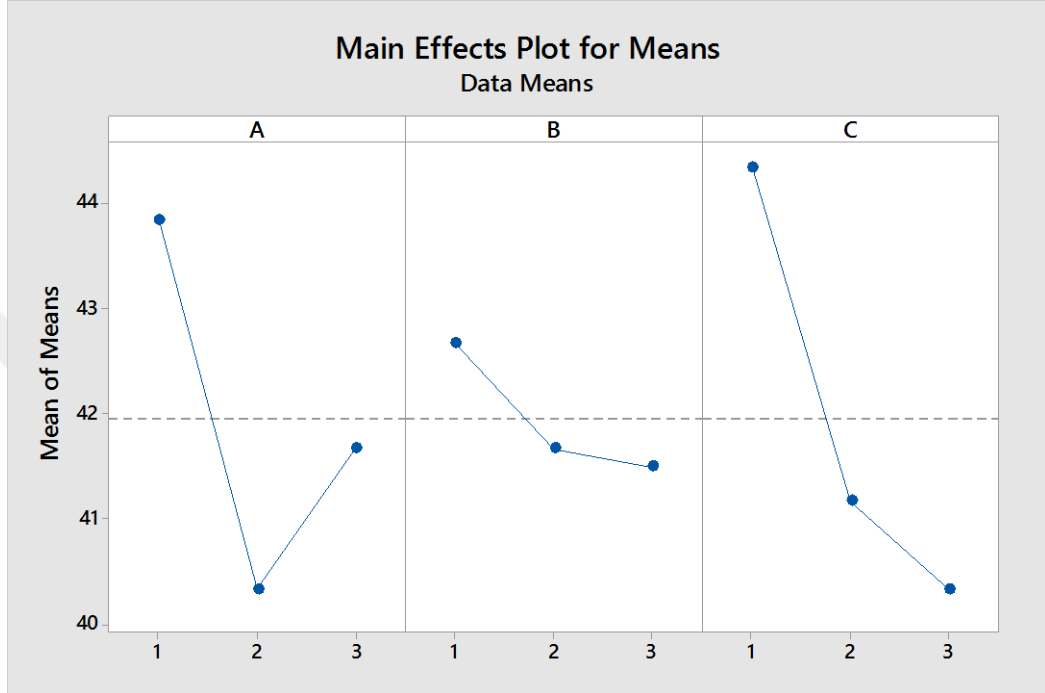
Taguchi metodu faktörlerin verilen yanıt ve varyasyona yapacağı etkiyi tahmin etmeye çalışan ortogonal dizi kullanır. Ortogonal dizi, tasarımın dengeli olduğunu ve faktörlerin aynı derecede etkili olduğunu ifade eder. Bundan dolayı göz önünde bulundurulacak faktörlerin birbirinden bağımsız olması, birinde yapılacak değişikliğin diğerini etkilememesi gerekmektedir.

Taguchi metodu kullanılırken aşağıdaki işlem basamakları takip edilebilir:

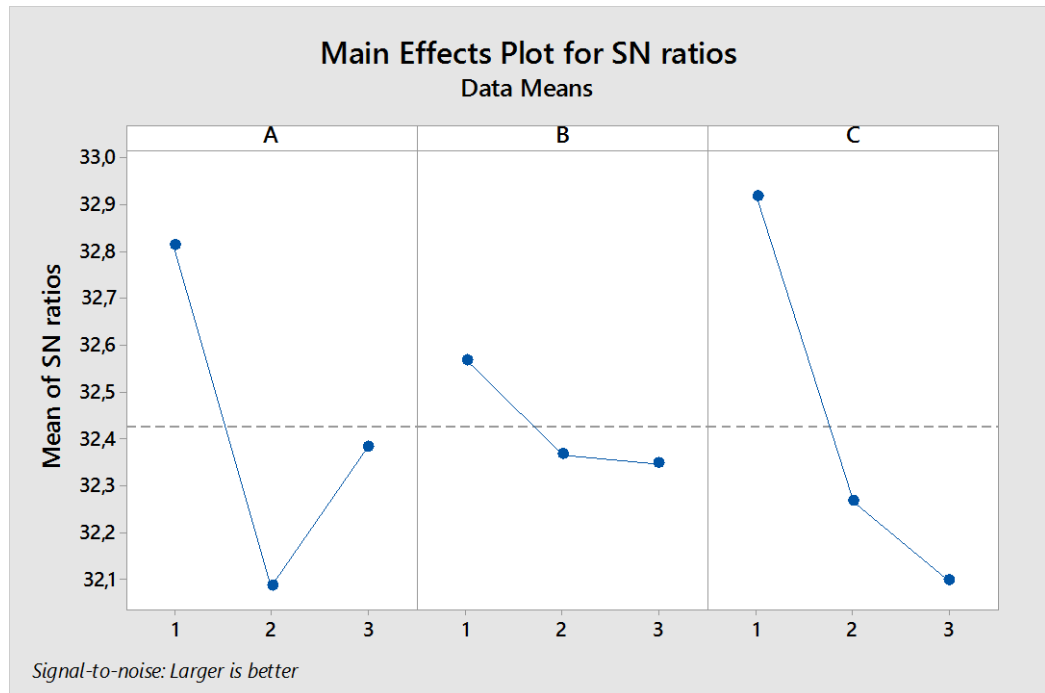
- Bağımsız değişkenlerin belirlenmesi
- Her bir bağımsız değişkenin kaç varyasyonu olacağını belirlenmesi
- Ortogonal dizinin seçilmesi
- Bağımsız değişkenlerin diziyeye yerleştirilmesi
- Metodun uygulanması
- Verilerin analiz edilmesi
- Sonuç

Bu çalışmada Taguchi metodu, kanal açılan numuneler için, Minitab 17 yazılımı kullanılarak uygulanmıştır. A, B, ve C olmak üzere üç faktör kullanılmıştır. A faktörü kanalın yapıştırma bölgesine olan uzaklığını, B faktörü kanalın derinliğini ve C faktörü

kanalın uzunluğunu ifade etmektedir. Her faktör üç varyasyona sahiptir. Kanalın yapıştırma bölgesine olan uzaklıkları 2, 5 ve 10 mm olarak, kanalın derinliği 1, 2 ve 3 mm olarak, kanalın uzunluğu 5, 7 ve 10 mm olarak çeşitlendirilmiştir.



Şekil 3.17. Taguchi metodu grafiksel sonucu



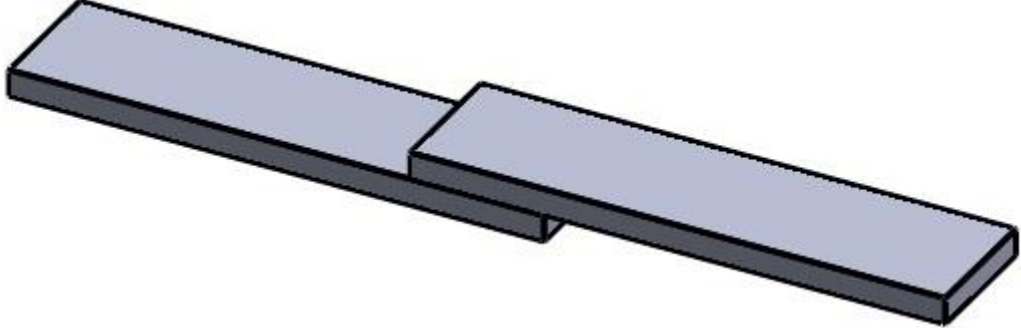
Şekil 3.18. Sinyal – gürültü oranı sonucu

Taguchi deney tasarımı yapılırken sinyal – gürültü oranı, en kötü ihtimale göre hesap yapmış olmak için maksimum belirlenmiştir.

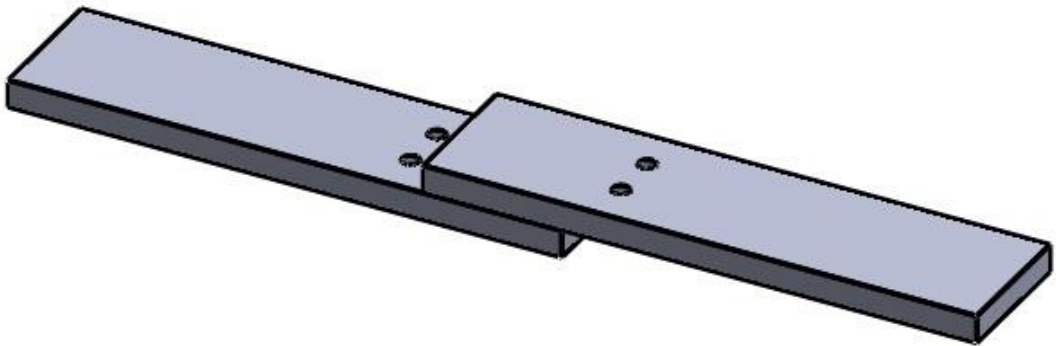
Sonuç olarak kanalın yapıştırıcı bölgesine olan uzaklığı 5-7 mm, kanalın derinliği 2-3 mm ve kanalın uzunluğu 10 mm iken en iyi bağlantı dayanımına ulaşılabacağı öngörülmüş ve sonlu elemanlar analizleri bu doğrultuda hazırlanmıştır.

3.2.3. Bağlantıların oluşturulması

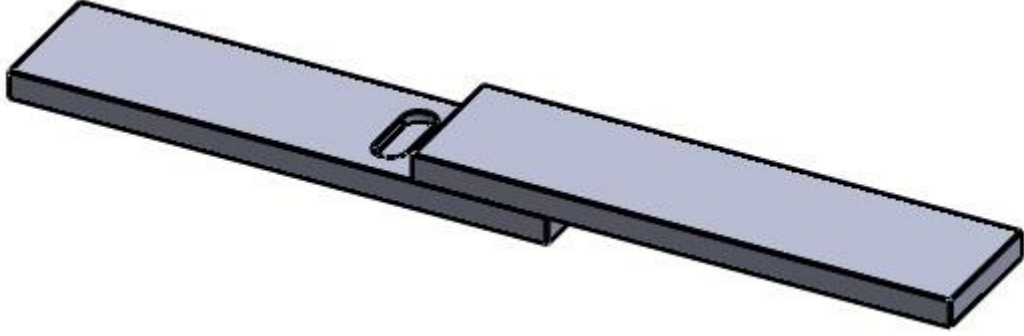
Sonlu elemanlar analizi yapılmadan önce bağlantı geometrileri oluşturulmuştur. Bağlantılar Autodesk Inventor Professional 2016 yazılımı kullanılarak üç boyutlu olarak oluşturulmuş daha sonra sonlu elemanlar analizine geçilmiştir. Alt parça ve üst parça birbiriyle aynı geometriye sahiptir ve arada yapıştırıcı tabakası bulunmaktadır. Aşağıdaki şekillerde bağlantı geometrileri detaylı olarak verilmiştir.



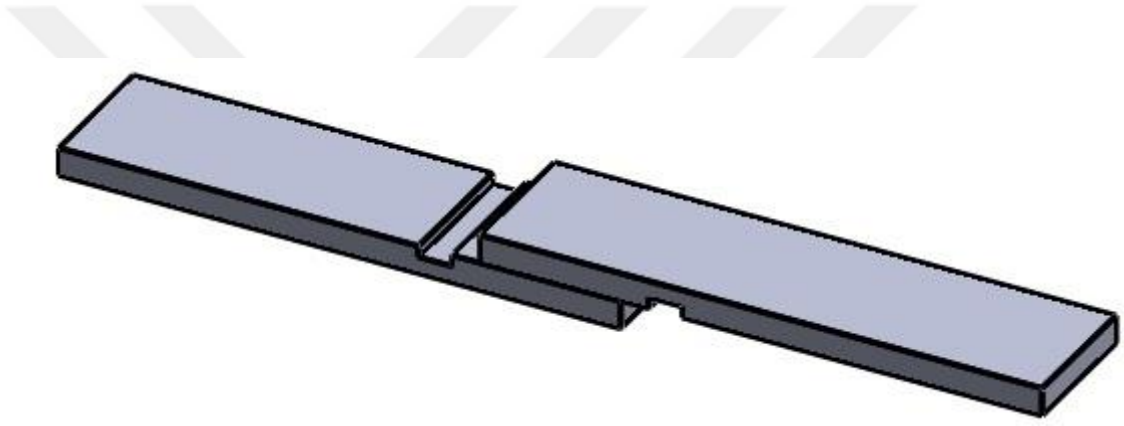
Şekil 3.19. Tip I Bağlantı Geometrisi



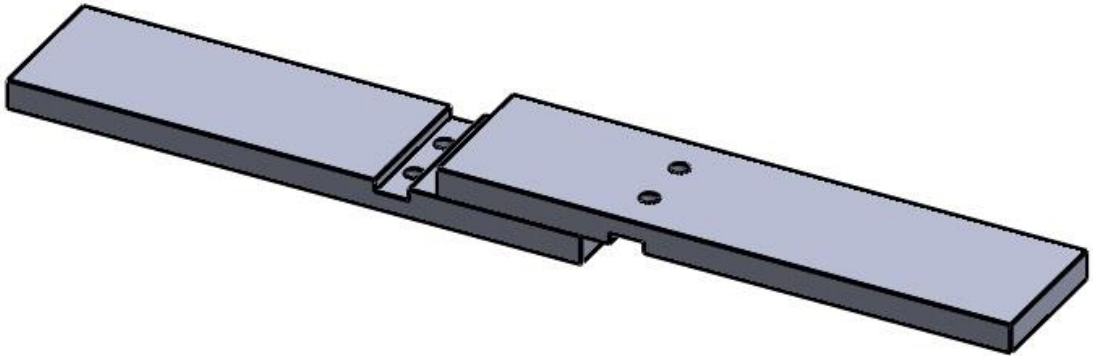
Şekil 3.20. Tip II Bağlantı Geometrisi



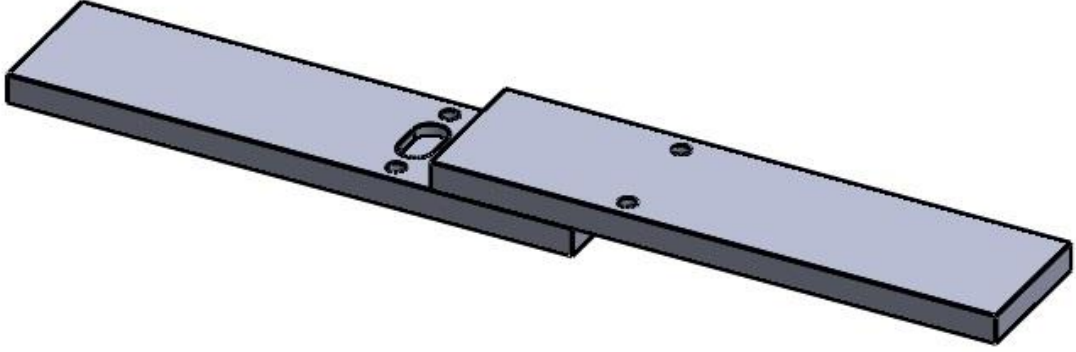
Şekil 3.21. Tip III ve Tip VIII Bağlantı Geometrisi



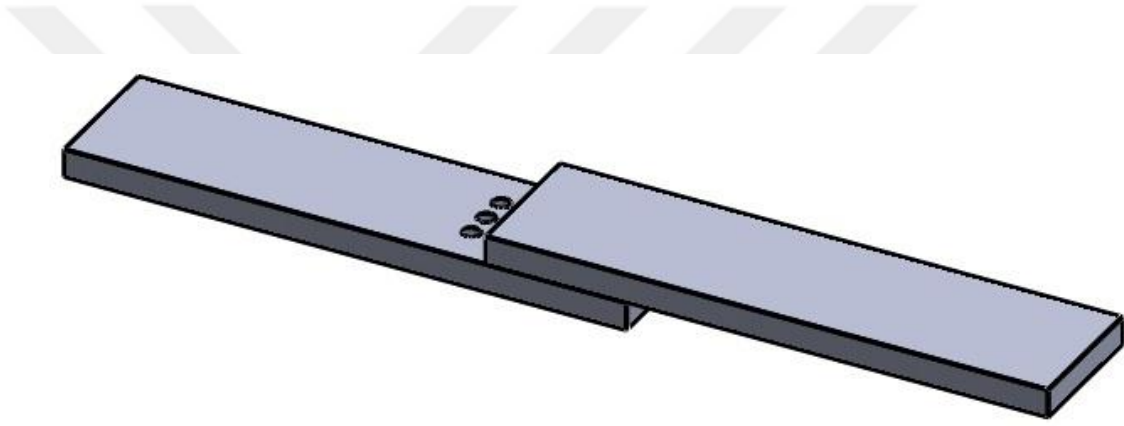
Şekil 3.22. Tip IV Bağlantı Geometrisi



Şekil 3.23. Tip V Bağlantı Geometrisi



Şekil 3.24. Tip VI Bağlantı Geometrisi

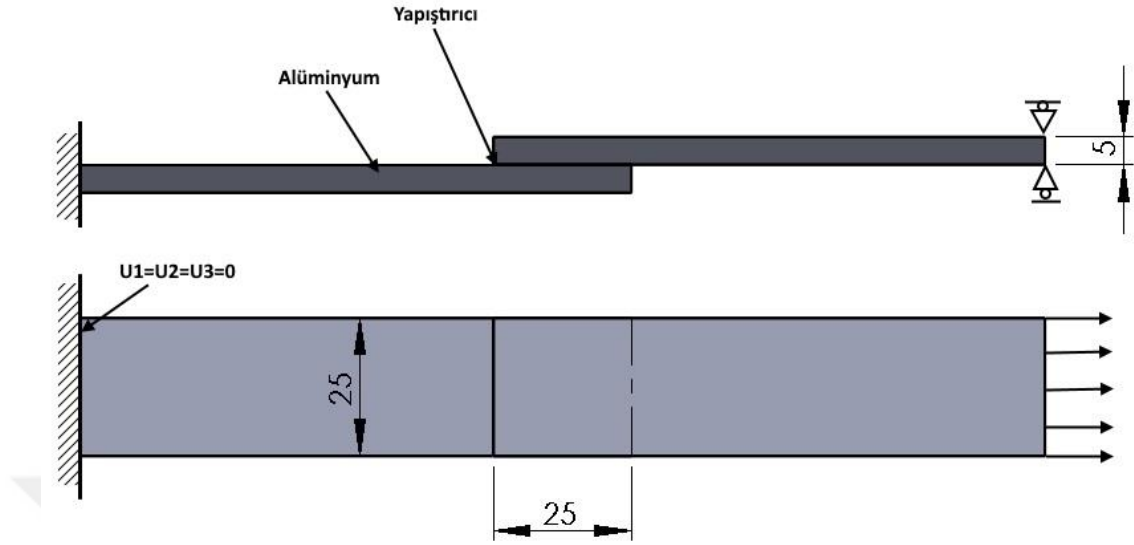


Şekil 3.25. Tip VII Bağlantı Geometrisi

3.2.4 Sınır şartları ve yükleme durumu

Her bir plakanın ölçüsü 25x100x5 mm'dir. Yapıştırıcı kalınlığı 0,1 mm olarak belirlenmiştir. Numunenin bir ucu sabittir. Diğer ucundan 6000 N'luk yüke karşılık gelecek +X yönünde 48 MPa'lık basınç uygulanmıştır.

Bağlantı *continuum cohesive zone model* kullanılarak modellenmiştir. Yapıştırıcı ve alüminyumun plastik davranışları bulk numunelerinden elde edilen veriler sayesinde göz önünde bulundurulmuştur. Ayrılma olayında etkili olan gerilmeler yapıştırıcı ve ana malzeme arasındaki bölgeden elde edilen gerilmelerdir. Her bir bağlantı numunesine aynı büyüklükte (6000 N) yükleme yapılmış olup gerilmelerin değişimine göre bağlantı dayanımına olan etkisi yorumlanmıştır. Şekil 4.27'de sınır şartları detaylı olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.26. Bağlantı numuneleri için sınır şartları

3.2.5. Üç boyutlu sonlu elemanlar analizi

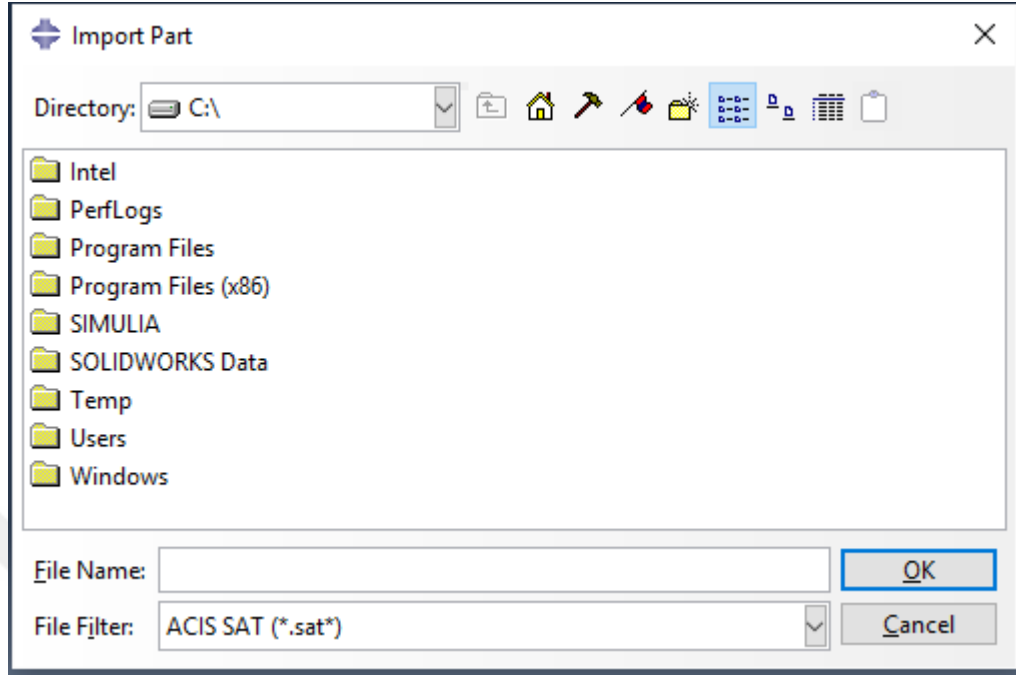
Tüm numuneler için aynı metodoloji izlendiğinden burada sadece Tip I için üç boyutlu sonlu elemanlar analizi üzerinden anlatılacaktır.

Analizin başlatılması

Tek tesirli bindirme bağlantısı problemi yapısal bir problemdir. Bu sebeple *Start Session > Create Model Database > With Standard/Explicit Model* seçilir.

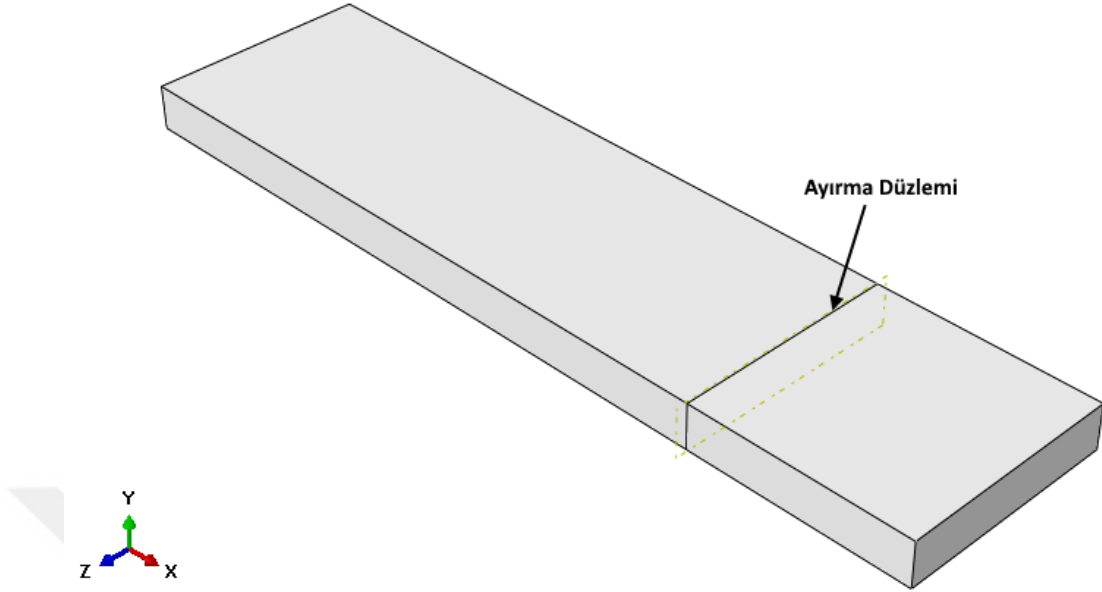
Geometrilerin içe aktarılması

Daha önce de belirtildiği gibi işlem sürecini hızlandırmak için geometriler farklı bir programla üç boyutlu olarak modellenip .STEP uzantılı olarak kaydedilerek Abaqus'e aktarılmıştır. Bunun için pencerenin solunda bulunan model ağacından *Parts > Import*'a tıklanarak önceden hazırlanmış olan üç boyutlu geometriler çağırılır.



Şekil 3.27. Parçaların çağırılması

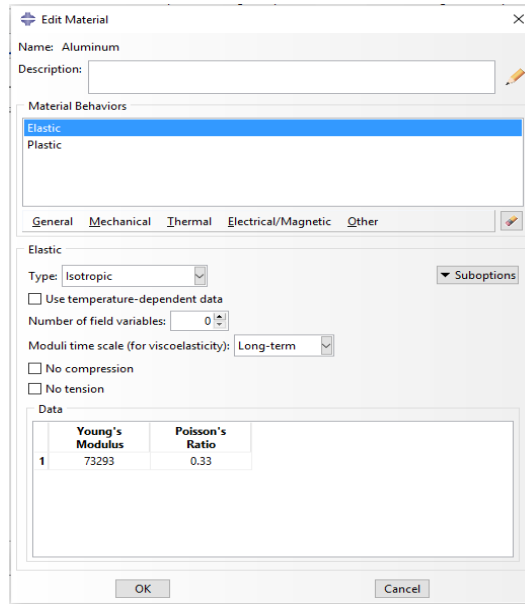
Tek tesirli bindirme bağlantılarında kritik bölge yapıştırıcının bulunduğu bölge olduğundan bu bölgeyi oldukça hassas bir şekilde meshlemek gerekmektedir. Fakat tüm bağlantı modelini yapıştırıcı tabakasıyla aynı sıklıkta meshlemek eleman sayısını gereksiz bir şekilde arttıracığından analiz zorlaşacak ve her bir analiz oldukça fazla zaman alacaktır. Bundan dolayı bu çalışmada bağlantının alt ve üst parçasına bindirme bölgesinin bitiş noktasına bir düzlem oluşturulmuş olup alt ve üst parça bu düzlem yardımıyla iki ayrı parçaya bölünmüştür. Bu sayede bindirme bölgesi hassas bir şekilde meshlenirken bağlantının geri kalan kısmının çözümü olumsuz yönde etkilemeyecek şekilde daha seyrek meshlenmesi sağlanmıştır. Bu işlem için *Parts> Create Datum Plane> Offset From Plane* ile bindirme bölgesinin bitiş noktasına bir düzlem oluşturulmuş ve *Parts> Partition Cell> Define Cutting Plane* komutuyla oluşturulan düzlem gösterilerek alt ve üst plaka iki parçaya ayrılmıştır.



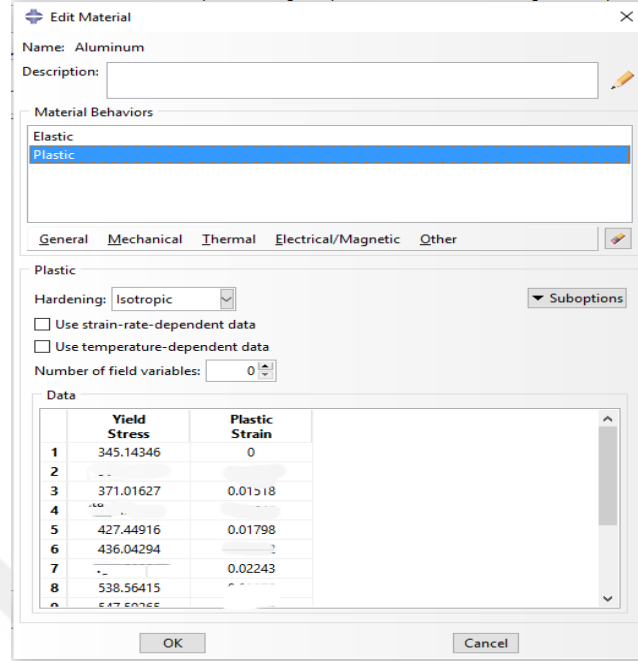
Şekil 3.28. Alt ve üst parçanın bölünmesi

Malzeme özelliklerinin girilmesi

Malzeme özellikleri *Materials* bölümünden girilmektedir. Elastik özellikler *Materials*> *Mechanical*> *Elasticity*> *Elastic*, plastik özellikler *Materials*> *Mechanical*> *Plasticity*> *Plastic* kullanılarak girilmektedir.



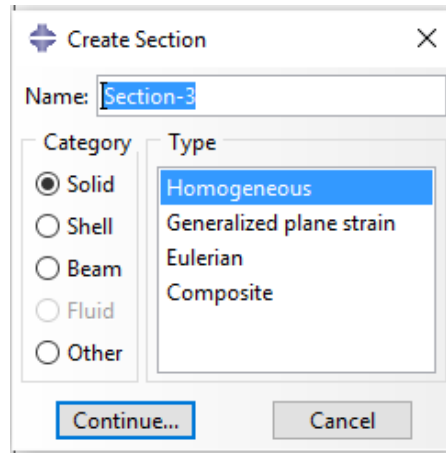
Şekil 3.29. Elastik özelliklerin girilmesi



Şekil 3.30. Plastik özelliklerin girilmesi

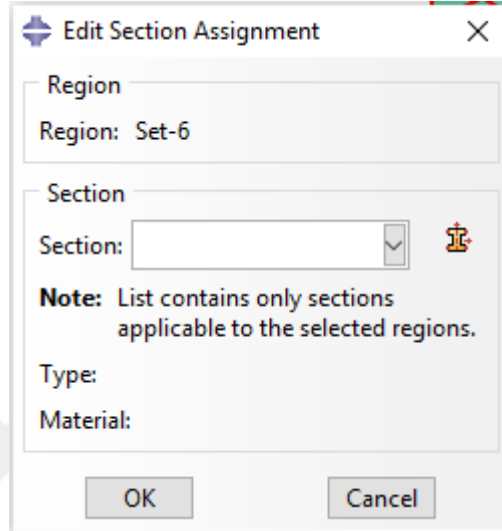
Kesit oluşturma ve malzemelerin atanması

Girilen malzeme özelliklerin parçalara atanabilmesi için öncelikle her bir parça için kesit oluşturmak ve parçaları bu kesite atamak gerekmektedir. Alüminyum için kesit oluşturma işlemi model ağacından *Sections > Solid > Homogeneous* seçilerek, yapıştırıcı için ise *Sections > Other > Cohesive* seçilerek oluşturulur. Sonrasında ise oluşturulan kesitlere ilgili malzeme atamaları yapılır.



Şekil 3.31. Kesit oluşturma

Bu işlemden sonra ise *Sections > Assign Section* kullanılarak oluşturulan malzeme atanmış olan kesitlerle parçalar eşleştirilir.

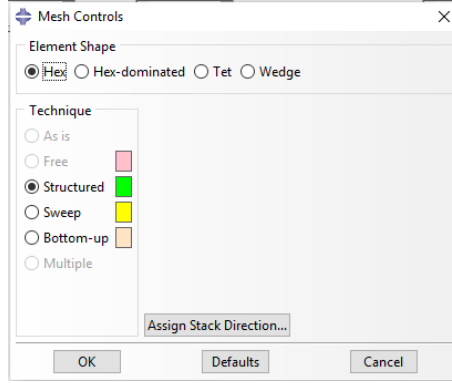


Şekil 3.32. Kesit atama

Elemanlara bölme işlemi

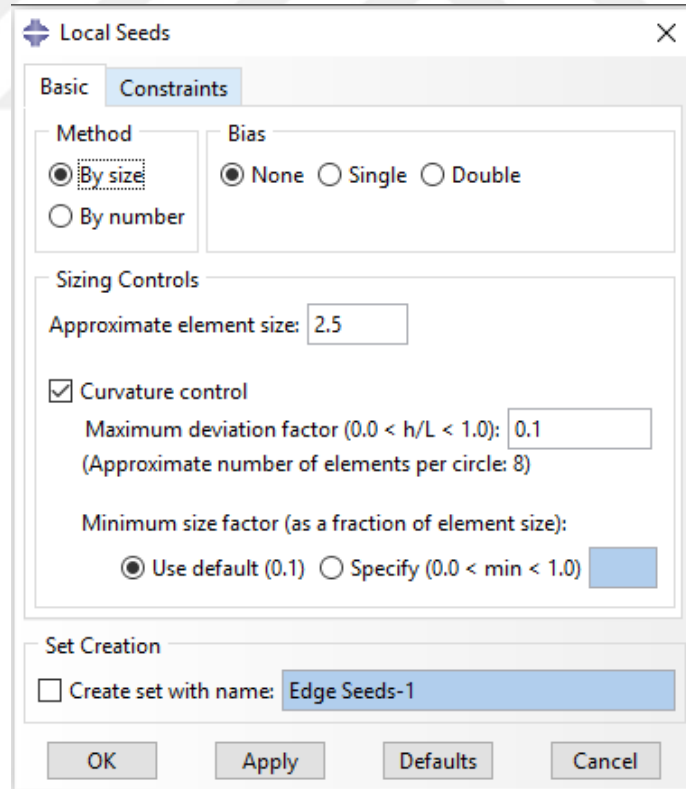
Sonlu elemanlar analizinin en önemli kısımlarından birisi sonucu doğrudan etkileyen elemanlara bölme işlemidir. Parçaları fazla büyük elemanlara bölmek sonuçların yanıltıcı olmasına sebebiyet verebilir fakat çok küçük elemanlara bölmek de analizi oldukça yavaşlatmakta hatta bazı durumlarda çözüm alınamamasına sebep vermektedir. Bu çalışmada her bir parça ayrı ayrı elemanlara ayrılarak daha sonra montaj oluşturulmuştur.

Elemanlara ayırmak için öncelikle model ağacından *Mesh* bölümüne gidilir. Öncelikle yapılması gereken eleman tipinin belirlenmesidir. Bu işlem *Mesh > Assign Mesh Controls* seçilerek yapılır.



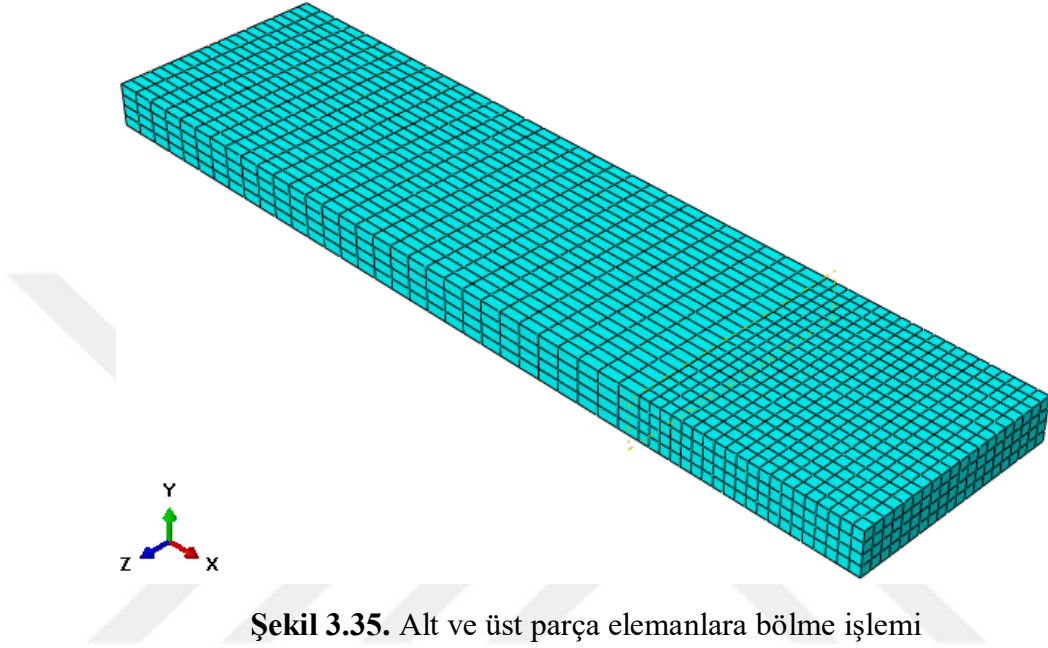
Şekil 3.33. Eleman tipinin belirlenmesi

Sonrasında yapılması gerek işlem parçaları istenilen eleman boyutlarına bölmektir. *Mesh > Seed Edges* kullanılarak parça istenilen eleman boyutlarına bölünür.

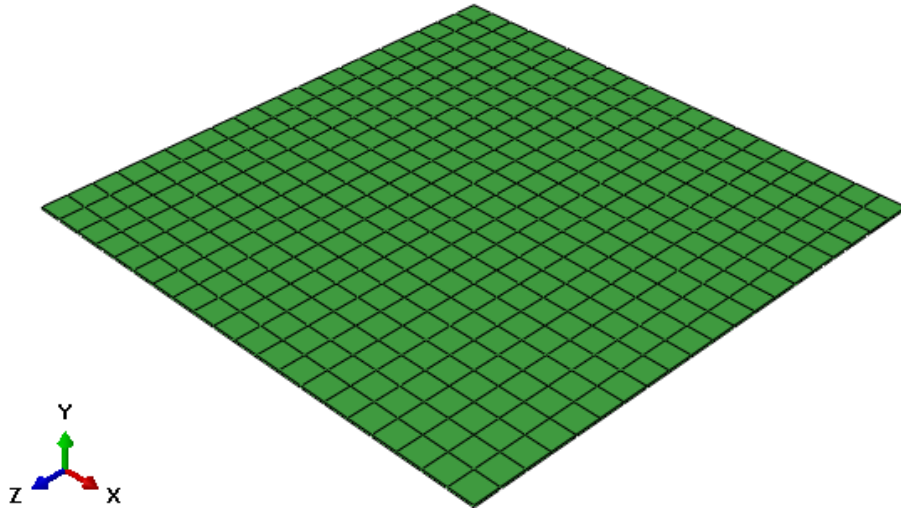


Şekil 3.34. Parçanın elemanlara bölünmesi

Daha sonra *Mesh > Mesh Part* komutu kullanılarak parça belirlenmiş olan eleman boyutlarına gore bolunur.

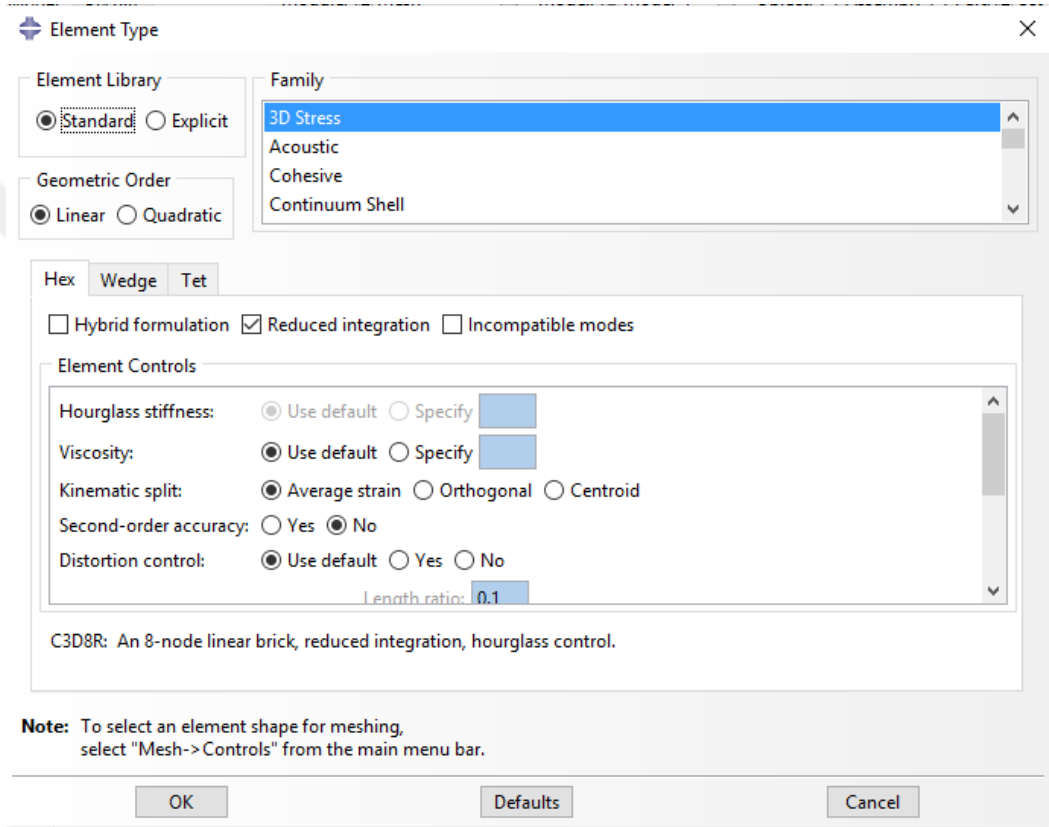


şekil 3.35. Alt ve üst parça elemanlara bolme işlemi



şekil 3.36. Yapıştırıcı için elemanlara bolme işlemi

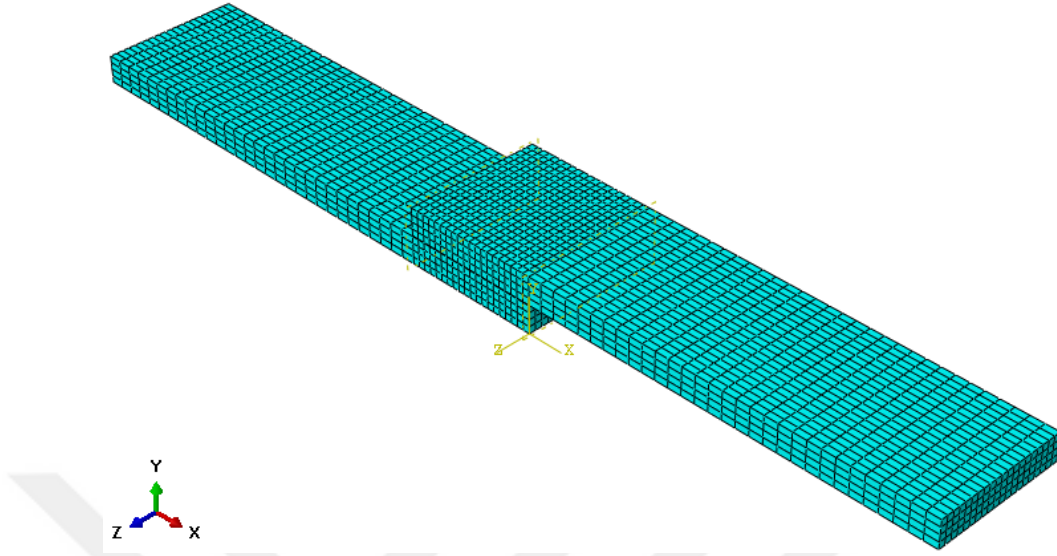
Elemanlara bölme işlemi tamamlandıktan sonra *Mesh> Assign Element Type* kullanılarak eleman tipi belirlenir. Bu çalışmada alüminyum parçalar için 8 nodlu üç boyutlu eleman tipi olan C3D8R, yapıştırıcı için 8 nodlu üç boyutlu eleman tipi olan COH3D8 kullanılmıştır.



Şekil 3.37. Eleman tipinin belirlenmesi

Montaj işlemi

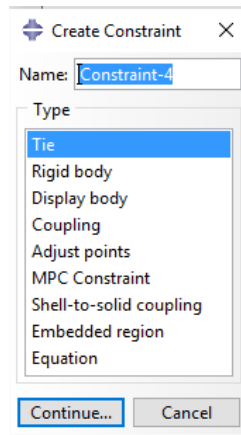
Mesh işlemi tamamlandıktan sonra parçalar birbirine bağlanmıştır. Bu işlem *Assembly> Create Instance* komutu kullanılarak yapılır. Parçalar tek tek çağırılarak gerekli geometrik ilişkiler yardımıyla montajı yapılır.



Şekil 3.38. Montaj sonrası bağlantı geometrisi

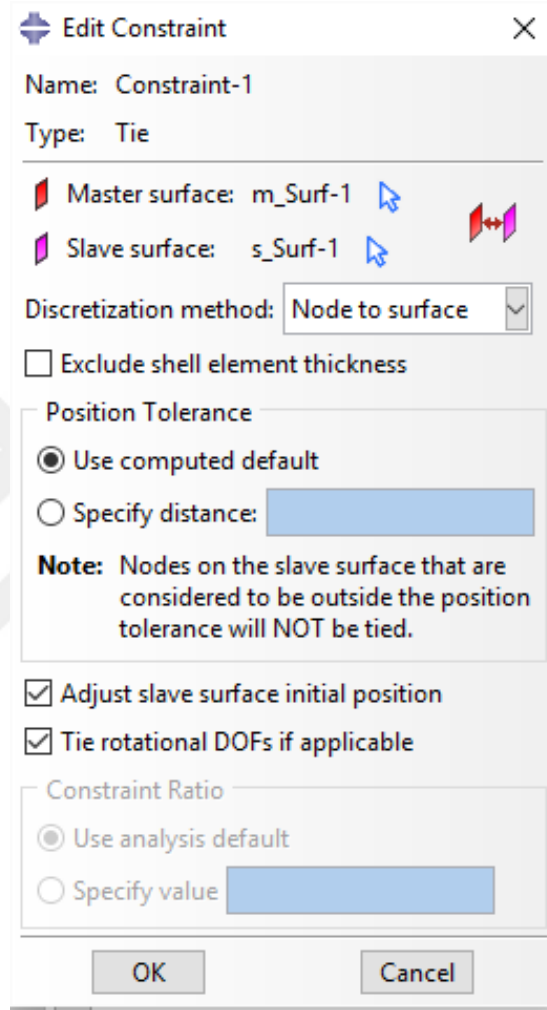
Parça ilişkilerinin belirlenmesi

Montaj yapıldıktan sonra sonlu elemanlar programının bağlantının davranışını tanıyabilmesi için parçalar arasındaki ilişkiyi belirlemek gerekmektedir. *Interactions*> *Create Constraint*> *Tie* kullanılarak yapıştırıcı ile plakalar arasındaki bağlantının tipi belirlenir.



Şekil 3.39. Bağlantı tipinin belirlenmesi

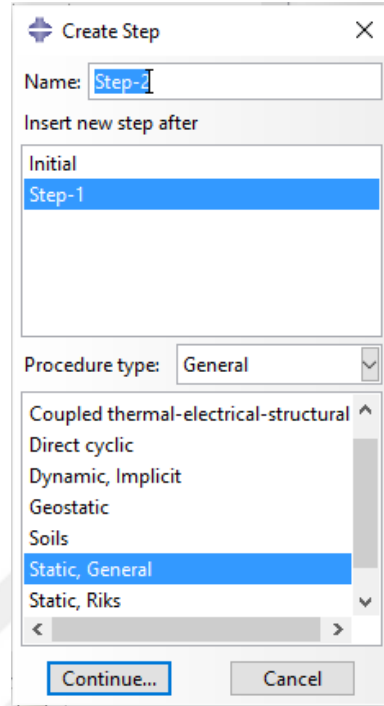
Bağlantı tipi belirlendikten sonra yüzeyler seçilerek aralarındaki ilişki belirlenir ve bağlantının nasıl davranacağı tayin edilir



Şekil 3.40. Bağlantı davranışının tayin edilmesi

Analiz tipinin belirlenmesi

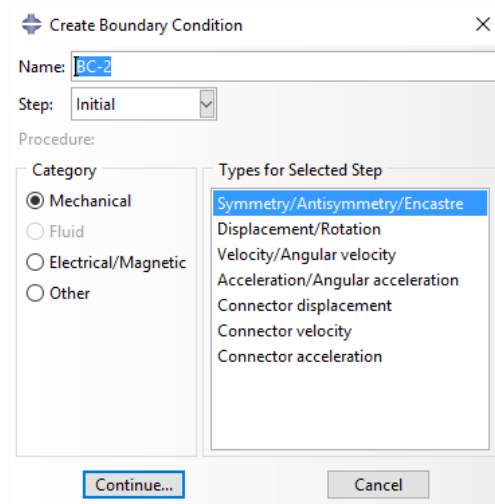
Step > Create Step > Static, General ile analiz tipi belirlenir. Bu çalışmanın analiz tipi statiktir.



Şekil 3.41. Analiz tipinin belirlenmesi

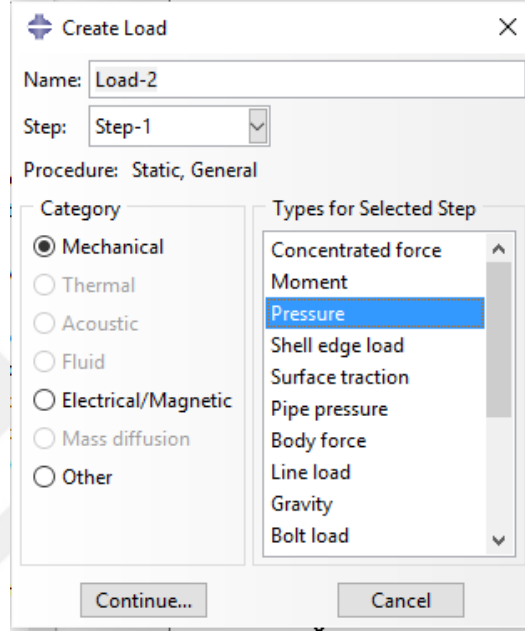
Sınır şartlarının girilmesi

Yapılan çalışmada bağlantı numunelerinin bir ucu sabittir ve diğer taraftan +X yönünde basınç uygulanmaktadır. Sabit uç için sınır şartı *Load* > *Create Boundary Condition* ile girilir.



Şekil 3.42. Sabit uç için sınır şartlarının girilmesi

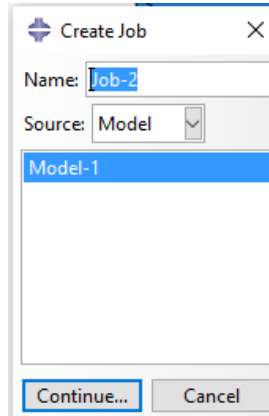
Yapılacak yükleme ise *Load > Create Load > Mechanical > Pressure* kullanılarak uygulanır. Yükleme ve sınır şartları uygulanırken dikkat edilmesi gereken nokta her ikisinin de oluşturulan analiz tipi için geçerli olmasıdır.



Şekil 3.43. Yükleme yapılması

İş oluşturma

Hazırlanan model için *Job > Create Job* kullanılarak bir iş oluşturulur.



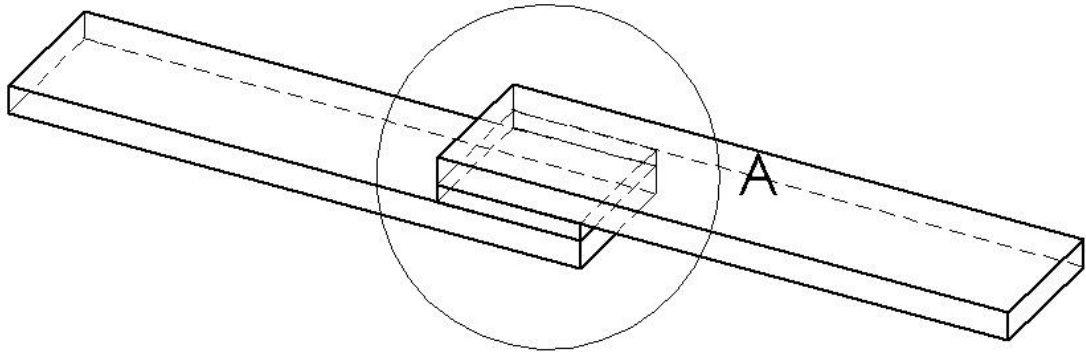
Şekil 3.44. İş oluşturma

Analizin başlatılması

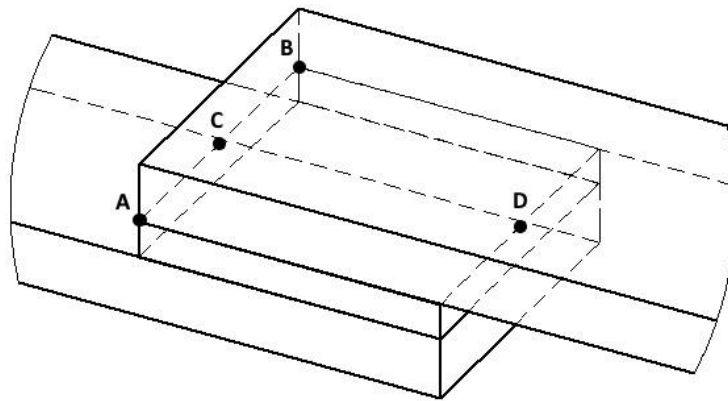
Bir önceki basamakta oluşturulan iş *submit* ile çalıştırılır.

3.2.6. Sonuçların okunması

Yapılan çalışmalar yapıştırıcıda kritik gerilmelerin üst plaka ile yapıştırıcı tabakası, alt plakanın yapıştırıcı tabakası ile ara yüzeyinde meydana geldiğini göstermiştir. Sonlu elemanlar analizleri üst plaka ile yapıştırıcı tabakası ara yüzeyinde meydana gelen gerilmelerin daha büyük geldiğini göstermiştir. Bundan dolayı bu çalışmada gerilme değerleri üst malzeme ile yapıştırıcı tabakası ara yüzeyinden alınmıştır.



Şekil 3.45. Gerilmelerin alınacağı bölge



Şekil 3.46. A Bölgesinin detay görünüşü

Tek tesirli yapıştırma bağlantısının dayanımı açısından AB ve CD çizgilerinde meydana gelen gerilmeler oldukça önem taşımaktadır. AB çizgisi bindirme bölgesinin başlangıcında yer alan çizgidir. Bindirme bölgesinin sonundaki çizginin alınmamış olmasının sebebi AB çizgisindeki gerilmelerin daha yüksek gelmesindedir. CD çizgisini oluşturan C ve D noktaları ise tam ortada yer almaktadır. Sonlu elemanlar analizi sonucunda belirlenen çizgilerdeki soyulma (σ_y) ve kayma gerilmeleri (τ_{xy}) elde edilerek bu gerilmelerin bağlantının dayanımına olan etkisi incelenecek ve farklı tiplerdeki bağlantı numuneleri kıyaslamalı olarak değerlendirilecektir.



4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. Deney Bulguları

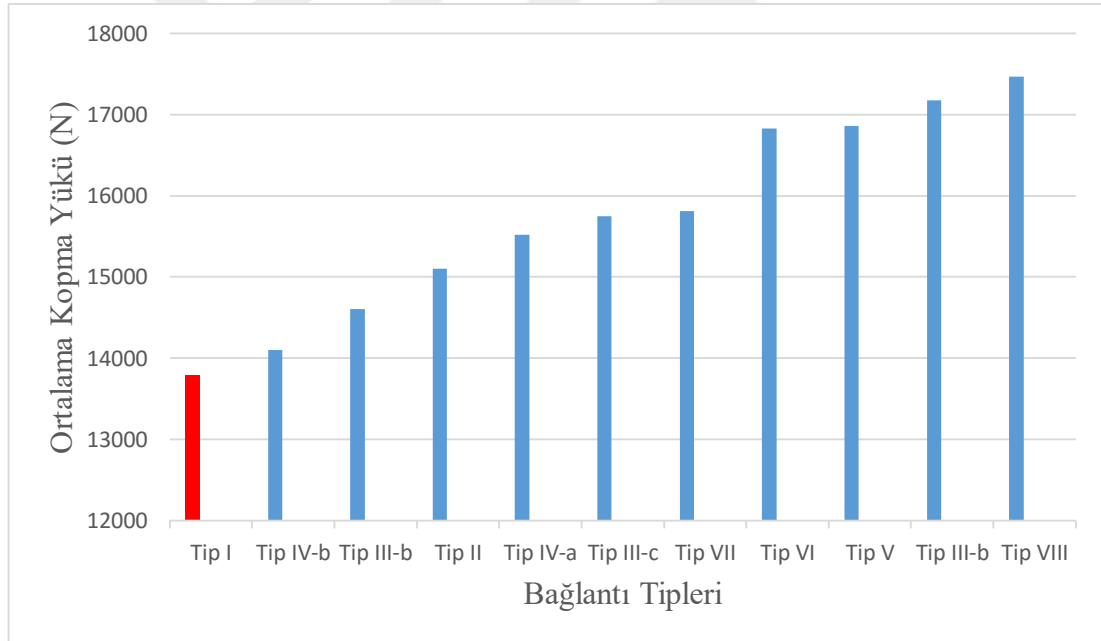
Her bir tip için 3 adet deney yapılmıştır. Tablo 4.1’de elde edilen sonuçlar verilmiştir.

Tablo 4.1. Deney Sonuçları

Tip	Numune	Yer Değişirme (mm)	Kopma Yüğü (N)	Ortalama (N)
Tip I	I	0,532	13420	13796
	II	0,515	13560	
	III	0,612	14410	
Tip II	I	1,15	15608	15103
	II	1,07	14378	
	III	1,13	15324	
Tip III-a	I	0,63	14617	14603
	II	0,58	14167	
	III	0,64	15026	
Tip III-b	I	0,85	16343	17177
	II	0,96	16856	
	III	1,06	18333	
Tip III-c	I	0,84	16110	15751
	II	0,74	15380	
	III	0,78	15763	
Tip IV-a	I	0,92	16662	15518
	II	0,86	15327	
	III	0,82	14565	
Tip IV-b	I	0,60	14723	14103
	II	0,56	14218	
	III	0,58	13368	
Tip V	I	1,24	18219	16859
	II	1,01	15599	
	III	1,16	16759	
Tip VI	I	0,85	17471	16831
	II	0,73	15436	
	III	0,84	17588	

Tip VII	I	0,66	15362	
	II	0,71	16605	15813
	III	0,68	15472	
Tip VIII	I	0,92	17572	
	II	0,89	16954	17465
	III	0,96	17869	

Tip I'in klasik tek tesirli bindirme bağlantısı olduğu göz önünde bulundurulursa bütün numunelerde bağlantı dayanımında artış meydana geldiği görülmüştür. Şekil 4.1'de bağlantı dayanımında artış gözlenen numunelerin birbirleriyle kıyaslanması görülmektedir.

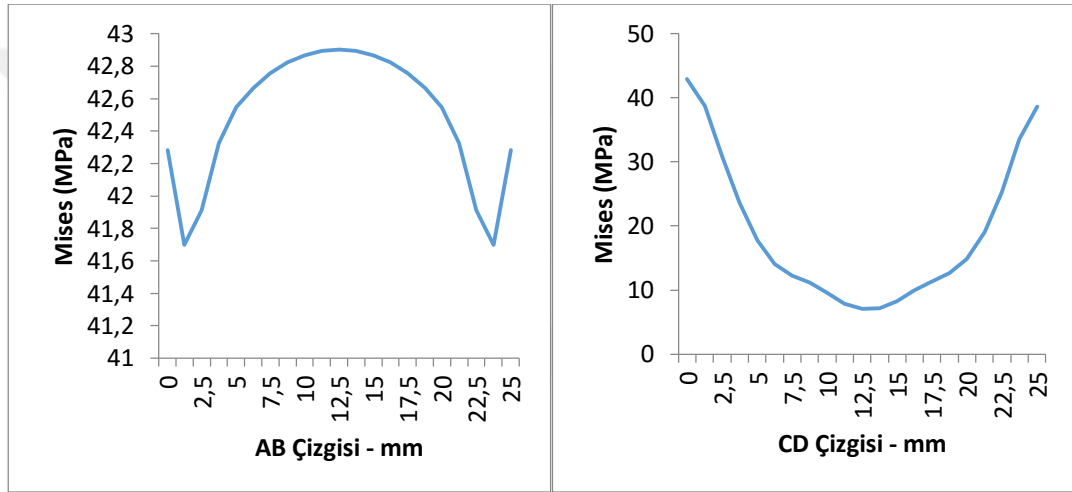


Şekil 4.1. Ortalama kopma yüküne göre artış gözlenen numuneler

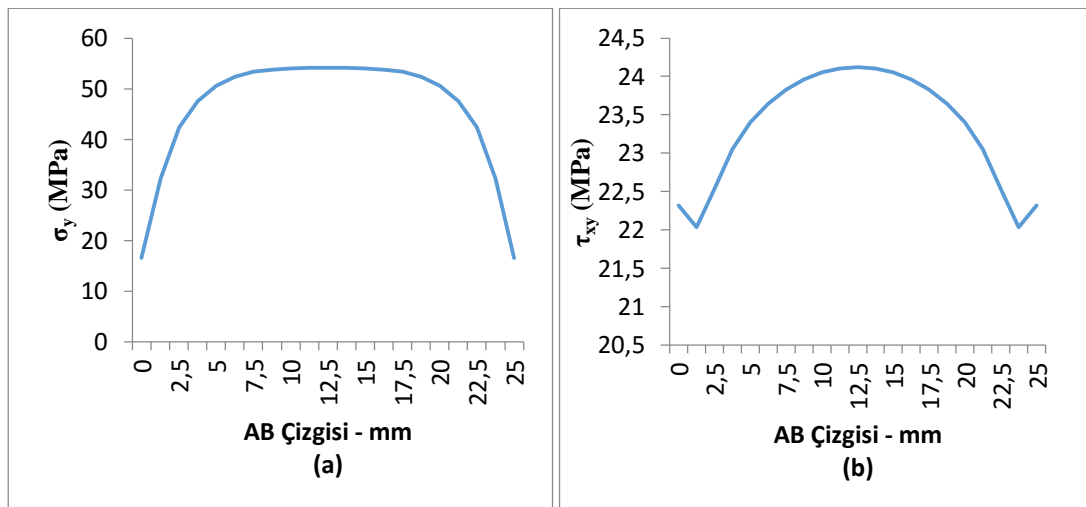
4.2. Sonlu Elemanlar Analizi Bulguları

Tek tesirli yapıştırma bağlantının dayanımında en etkili olan gerilmeler soyulma gerilmesi (σ_x) ve kayma gerilmesi (τ_{xy}) olduğundan sonlu elemanlar sonuçları alınırken bu iki gerilme göz önünde bulundurulmuştur.

Tip I için sonuçlar

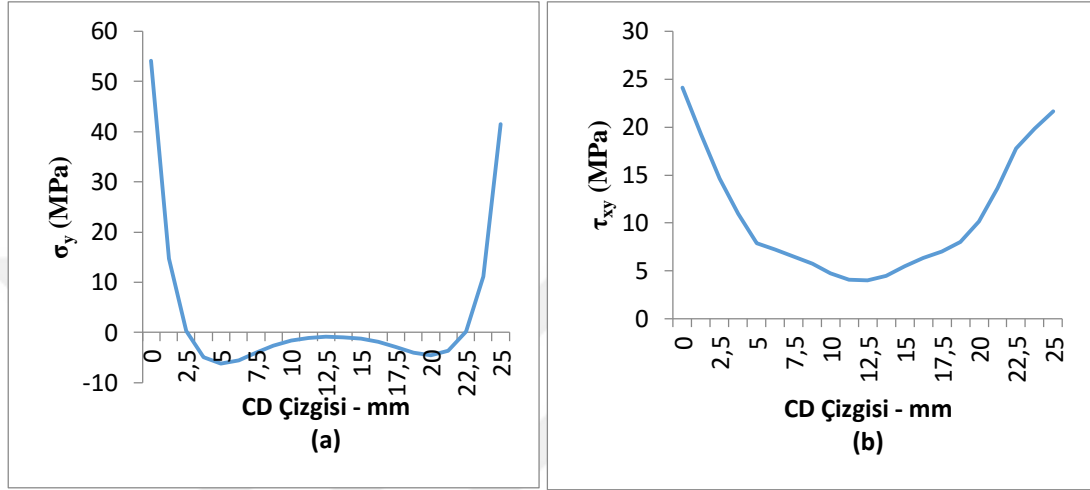


Şekil 4.2. AB ve CD Çizgisinde meydana gelen von Mises gerilmeleri



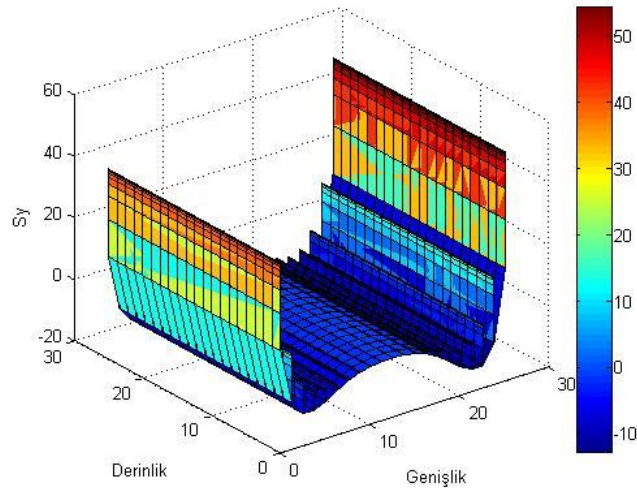
Şekil 4.3. AB Çizgisinde meydana gelen gerilmeler; (a) σ_y , (b) τ_{xy}

AB Çizgisi üzerindeki soyulma ve kayma gerilmeleri değerlerine bakıldığında her iki gerilmenin de maksimum değerine çizginin orta kısmında ulaşıldığı görülmektedir. Soyulma gerilmesinin maksimum değeri 50 MPa'yı aşarken kayma gerilmesinin maksimum değeri 24 MPa civarındadır.

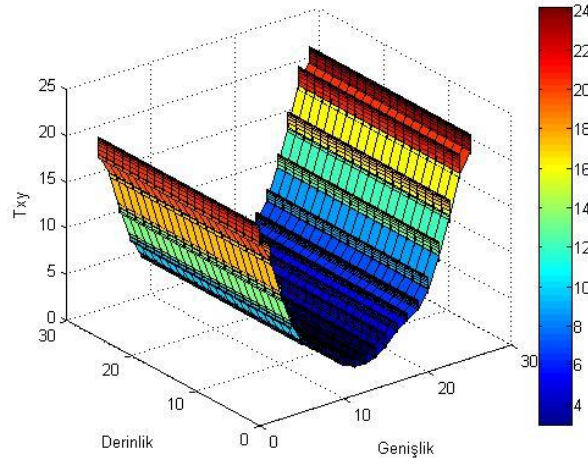


Şekil 4.4. CD Çizgisinde meydana gelen gerilmeler; (a) σ_y , (b) τ_{xy}

CD çizgisi üzerinde ise soyulma ve kayma gerilmeleri maksimum değerlerine çizginin uç noktalarında ulaşmaktadır. Soyulma gerilmeleri C noktasında yaklaşık 55 MPa ve D noktasında 42 MPa gelirken, kayma gerilmeleri her iki noktada 24 MPa civarında gelmektedir.

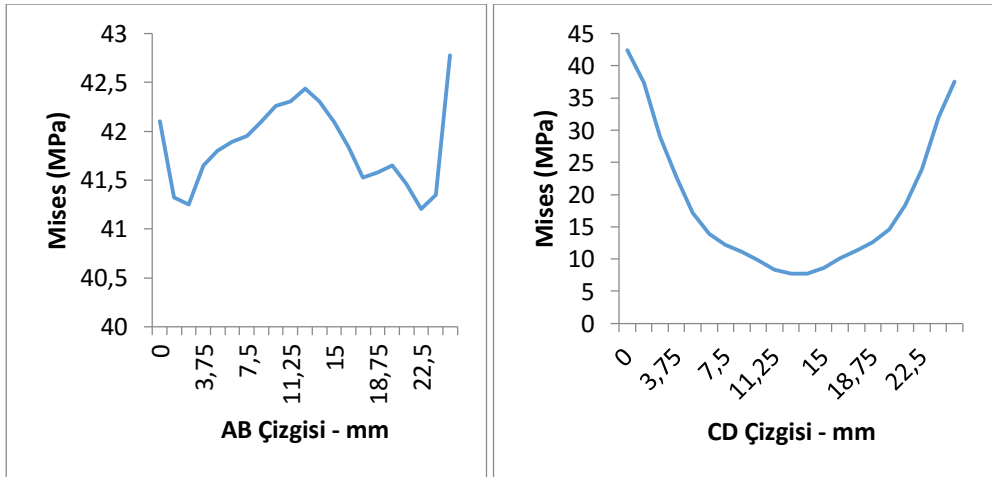


Şekil 4.5. Yapıştırıcı tabakasında meydana gelen σ_y (MPa) gerilmeleri

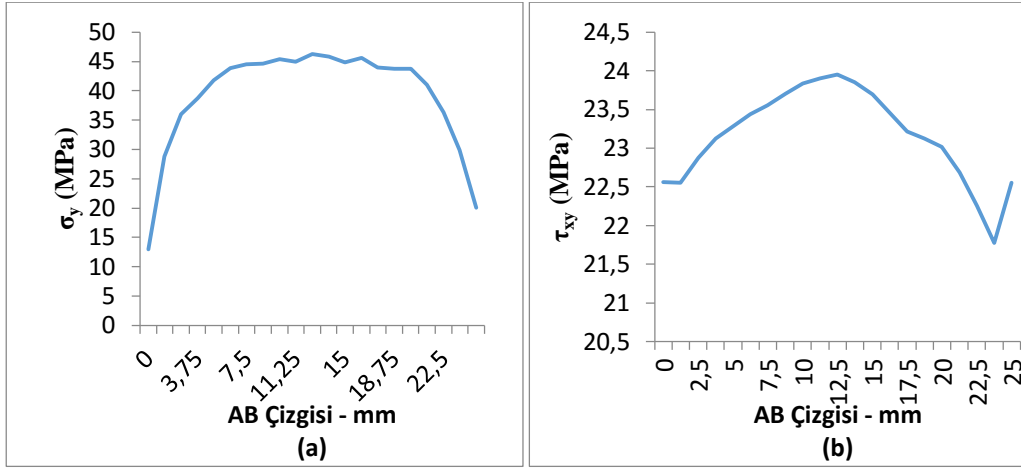


Şekil 4.6. Yapıştırıcı tabakasında meydana gelen τ_{xy} (MPa) gerilmeleri

Tip II için sonuçlar

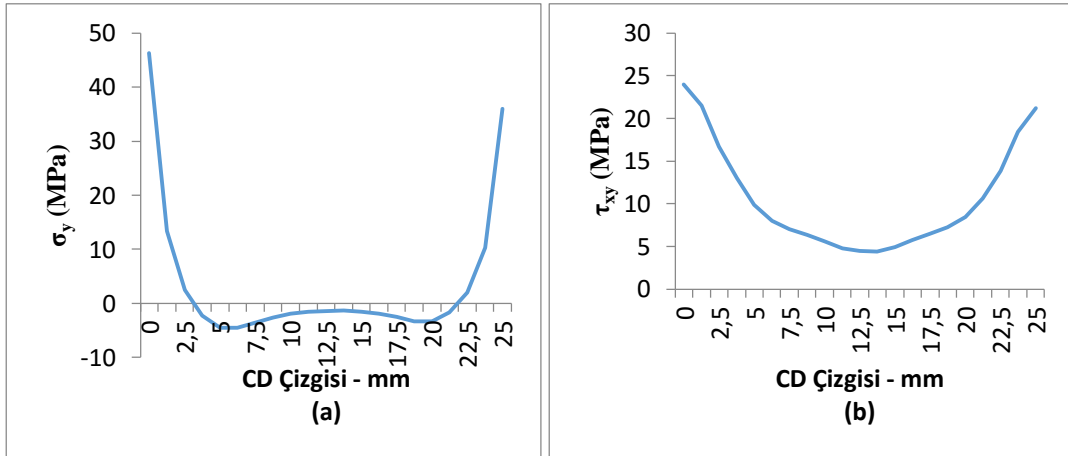


Şekil 4.7. AB ve CD Çizgisinde meydana gelen von Mises gerilmeleri



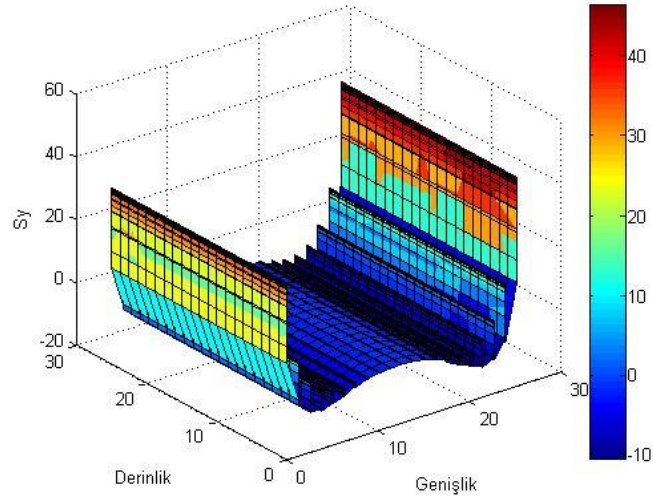
Şekil 4.8. AB Çizgisinde meydana gelen gerilmeler; (a) σ_y , (b) τ_{xy}

2 Adet tümden delik açılarak oluşturulan Tip II bağlantısında, AB çizgisi üzerindeki maksimum soyulma gerilmesi 45 MPa, maksimum kayma gerilmesi 24 MPa civarında gelmiştir.

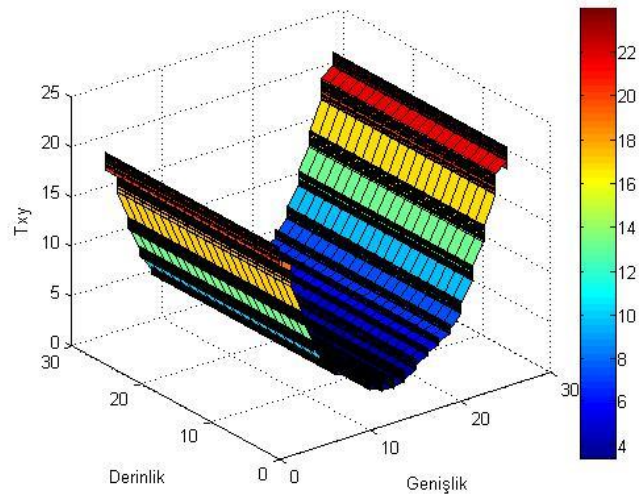


Şekil 4.9. CD Çizgisinde meydana gelen gerilmeler; (a) σ_y , (b) τ_{xy}

CD çizgisi üzerinde ise soyulma gerilmeleri C ve D noktalarında yaklaşık 47 ve 39 MPa'lık maksimum değerler ulaşırken kayma gerilmesinin maksimum değeri 23 MPa civarındadır.

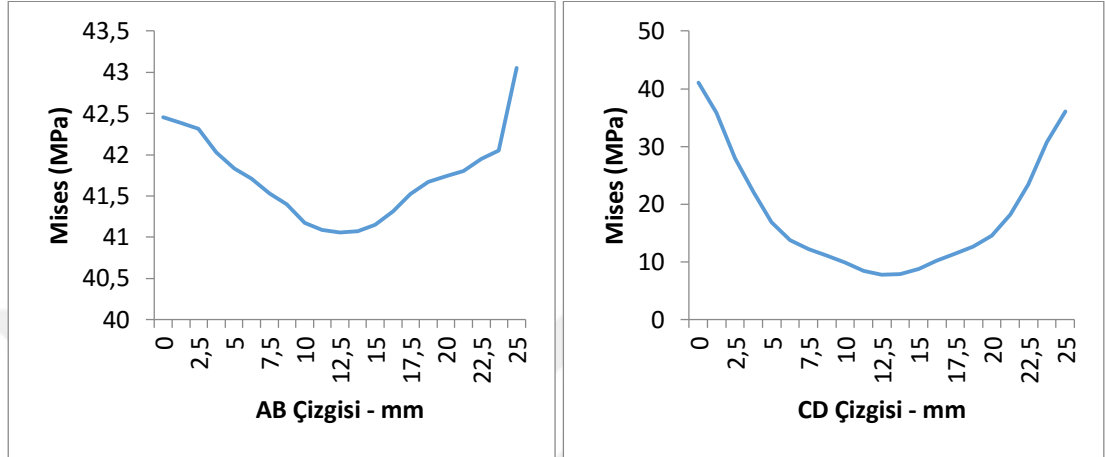


Şekil 4.10. Yapıştırıcı tabakasında meydana gelen σ_y (MPa) gerilmeleri

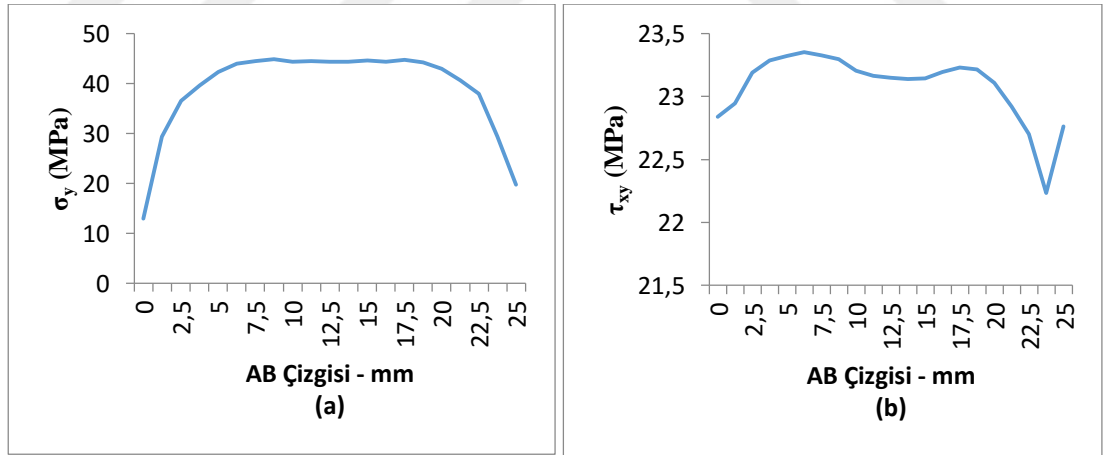


Şekil 4.11. Yapıştırıcı tabakasında meydana gelen τ_{xy} (MPa) gerilmeleri

Tip III-a için sonuçlar

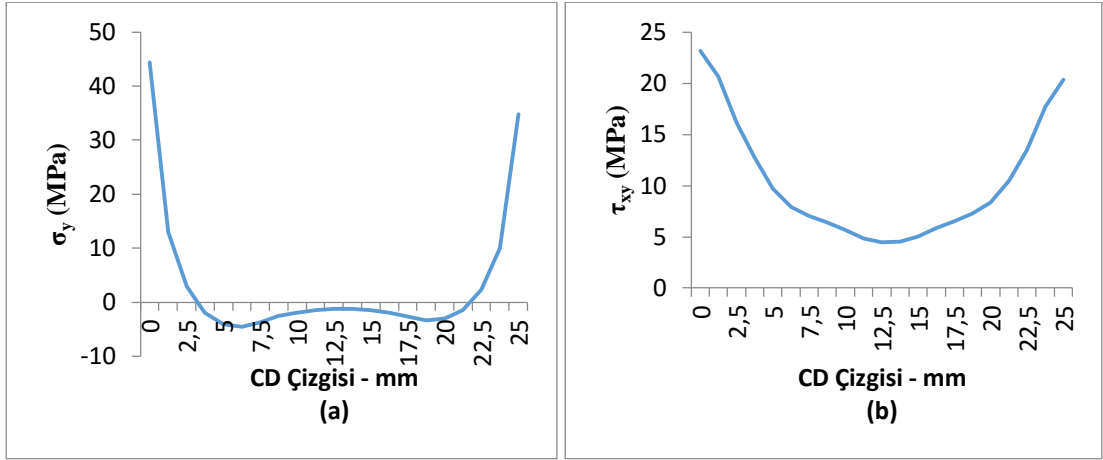


Şekil 4.12. AB ve CD Çizgisinde meydana gelen von Mises gerilmeleri



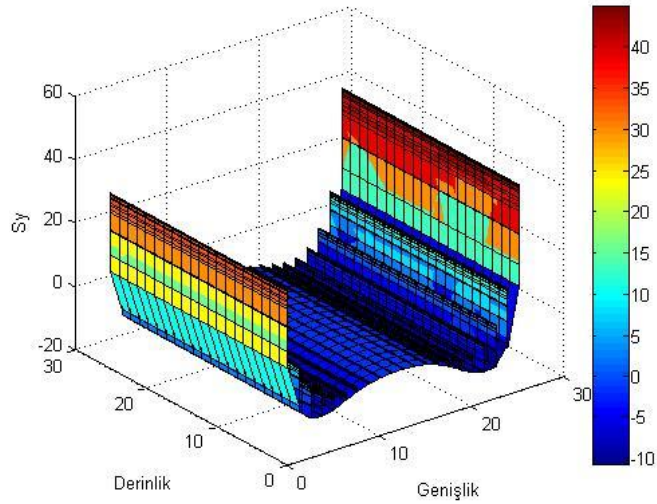
Şekil 4.13. AB Çizgisinde meydana gelen gerilmeler; (a) σ_y , (b) τ_{xy}

Bindirme bölgesine belirli bir uzaklıkta kanal açılarak oluşturulan Tip III bağlantısında AB çizgisi üzerinde meydana gelen maksimum soyulma gerilmesi yaklaşık olarak 42 MPa' yı bulurken kayma gerilmesinin maksimum değeri 23 MPa civarındadır.

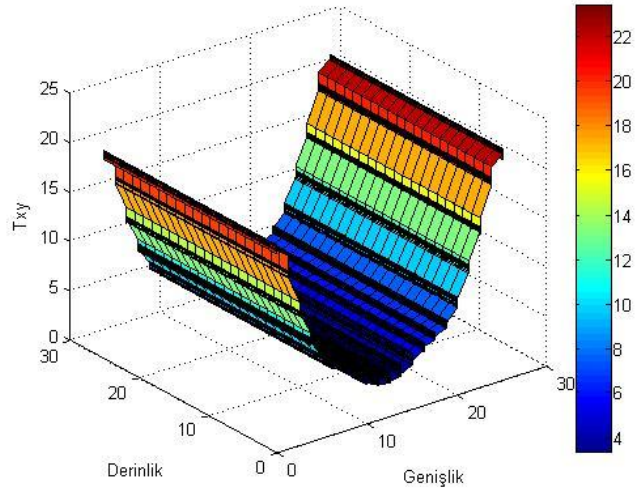


Şekil 4.14. CD Çizgisinde meydana gelen gerilmeler; (a) σ_y , (b) τ_{xy}

CD Çizgisi üzerinde ise maksimum soyulma gerilmesinin değeri 40 MPa civarındayken, maksimum kayma gerilmesinin değeri 23 MPa civarındadır.

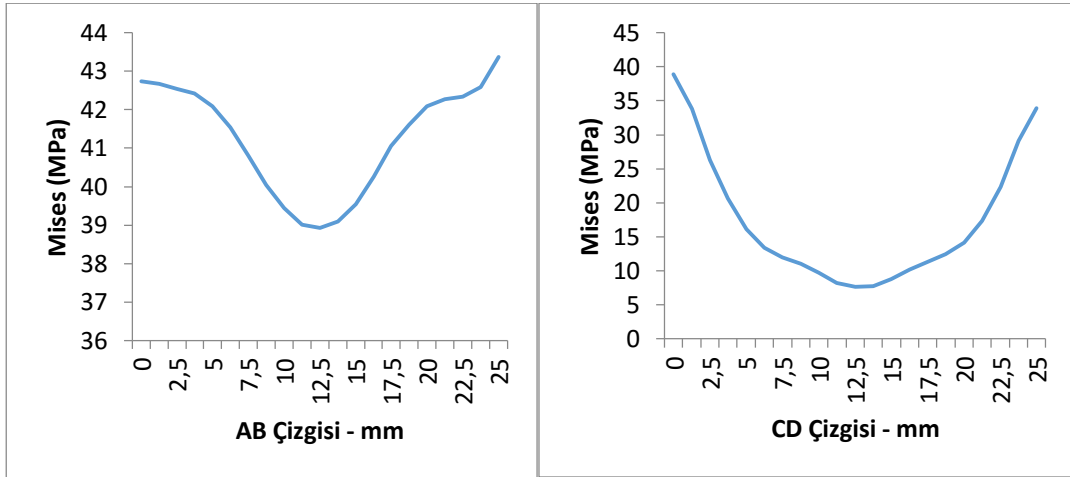


Şekil 4.15. Yapıştırıcı tabakasında meydana gelen σ_y (MPa) gerilmeleri

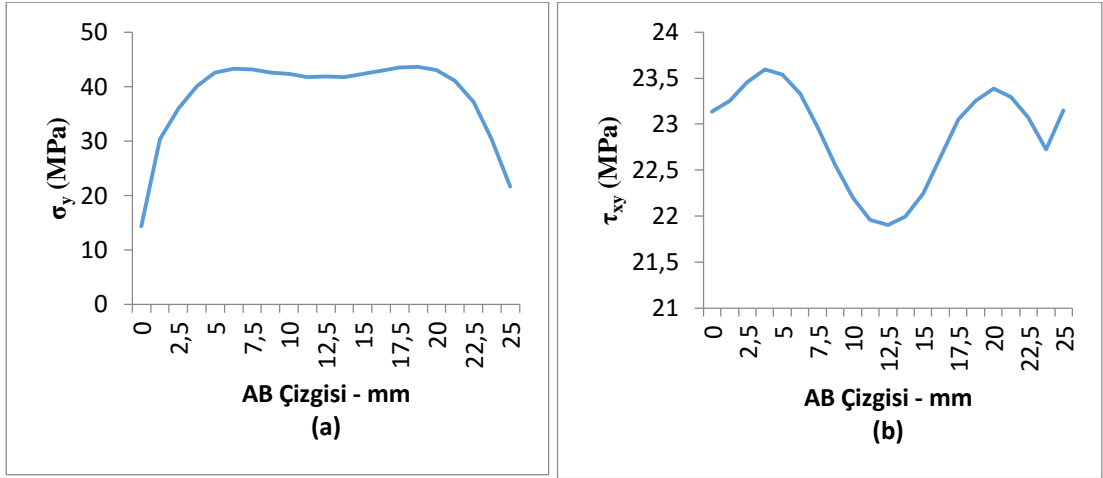


Şekil 4.16. Yapıştırıcı tabakasında meydana gelen τ_{xy} (MPa) gerilmeleri

Tip III-b için sonuçlar

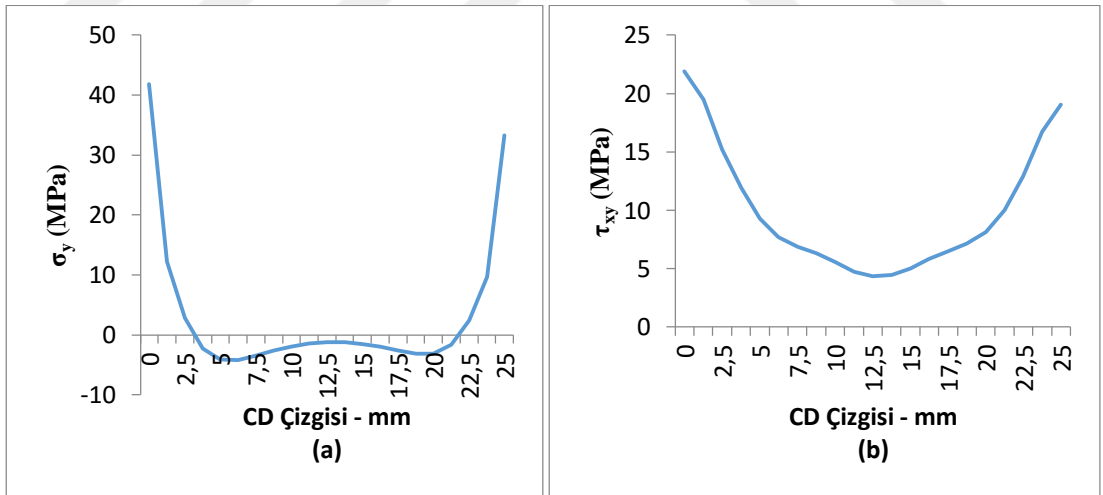


Şekil 4.17. AB ve CD Çizgisinde meydana gelen von Mises gerilmeleri



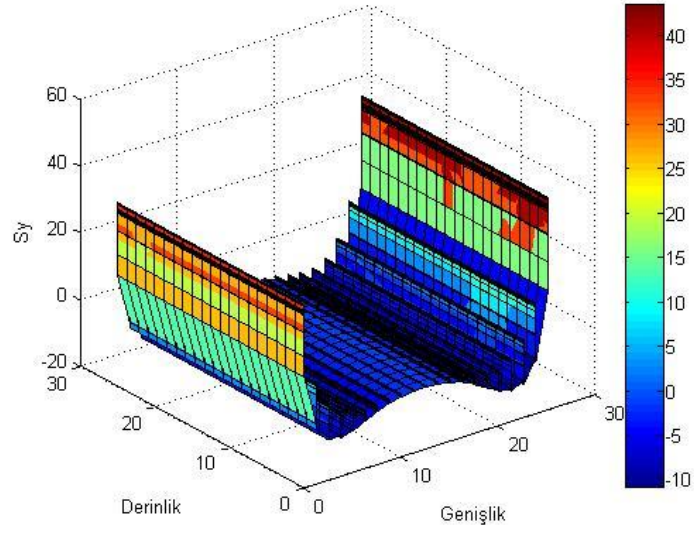
Şekil 4.18. AB Çizgisinde meydana gelen gerilmeler; (a) σ_y , (b) τ_{xy}

Tip III-b bağlantısı için AB Çizgisi üzerinde soyulma gerilmesinin maksimum değeri 41 MPa, kayma gerilmesinin maksimum değeri ise 23 MPa civarında okunmuştur.

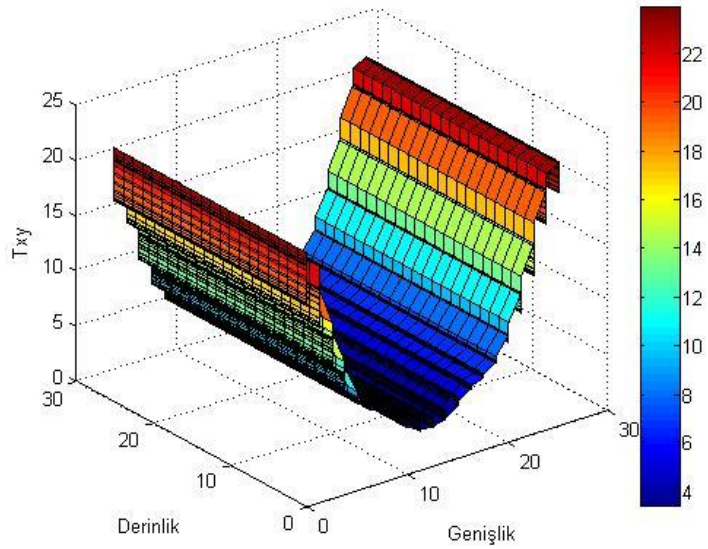


Şekil 4.19. CD Çizgisinde meydana gelen gerilmeler; (a) σ_y , (b) τ_{xy}

CD Çizgisi üzerinde ise soyulma gerilmeleri uç noktalarda 35 MPa ve 41 MPa civarındayken kayma gerilmeleri yaklaşık olarak 20 MPa okunmuştur.

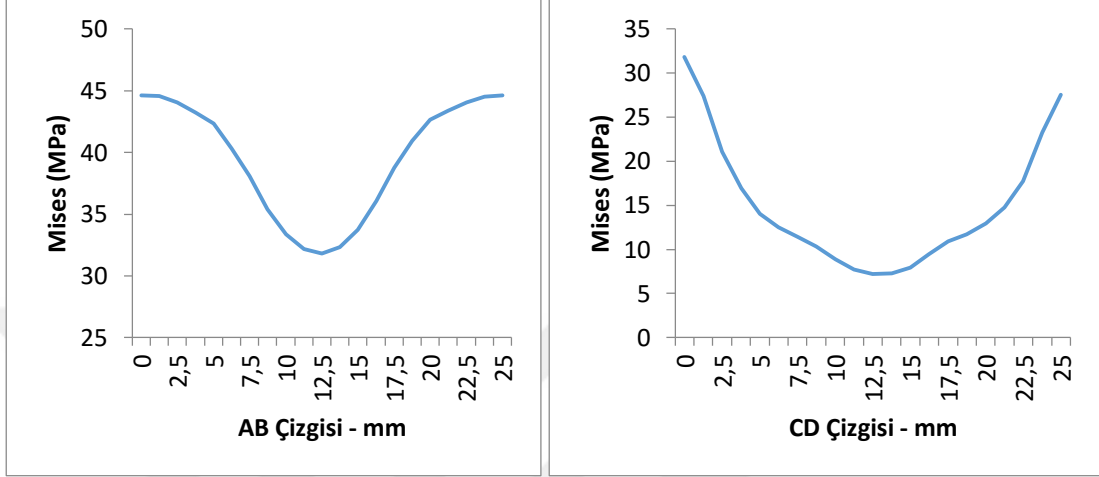


Şekil 4.20. Yapıştırıcı tabakasında meydana gelen σ_y (MPa) gerilmeleri

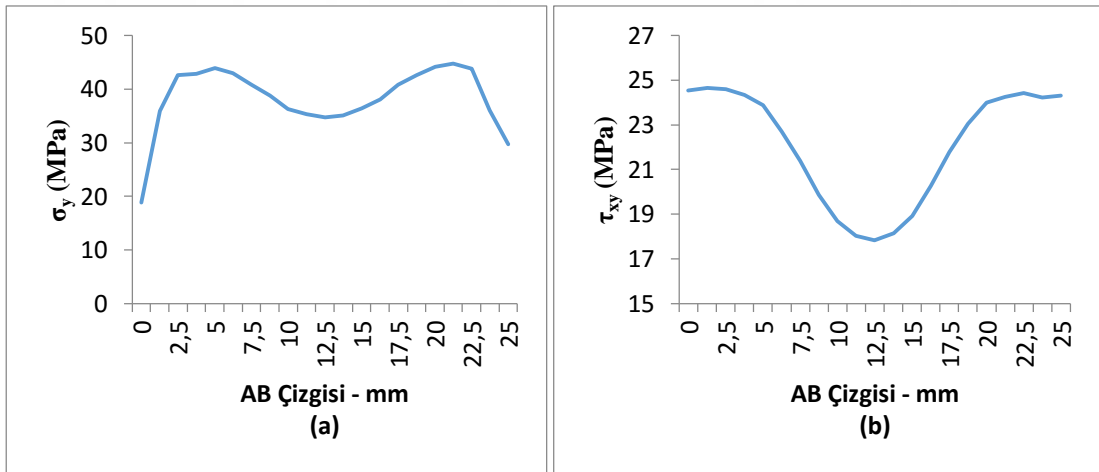


Şekil 4.21. Yapıştırıcı tabakasında meydana gelen τ_{xy} (MPa) gerilmeleri

Tip III-c için sonuçlar

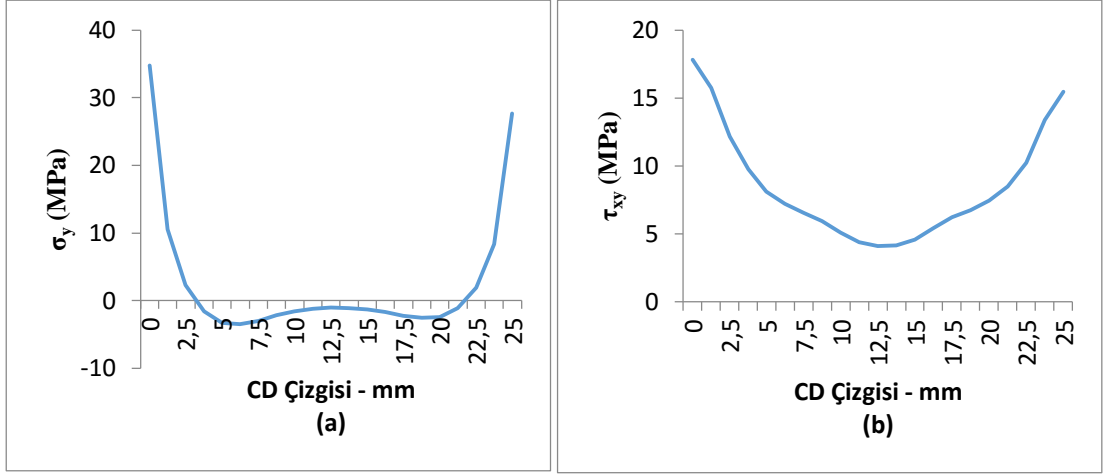


Şekil 4.22. AB ve CD Çizgisinde meydana gelen von Mises gerilmeleri



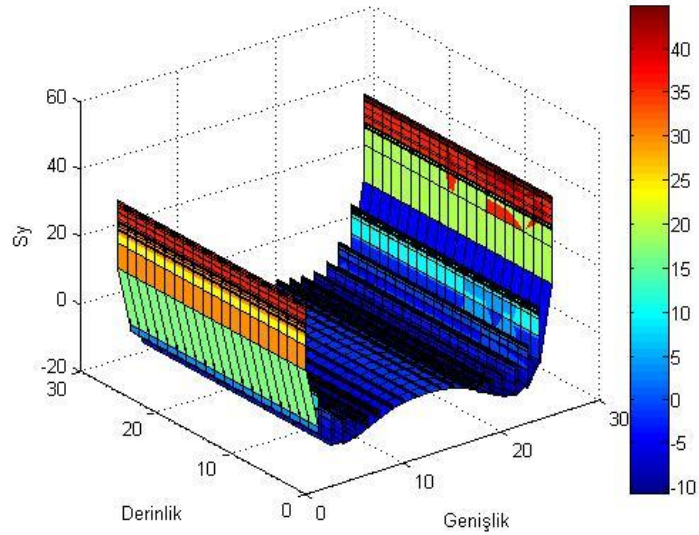
Şekil 4.23. AB Çizgisinde meydana gelen gerilmeler; (a) σ_y , (b) τ_{xy}

Tip III-c için AB çizgisi üzerindeki maksimum soyulma gerilmesi yaklaşık 42 MPa, kayma gerilmesi 24 MPa olarak elde edilmiştir.

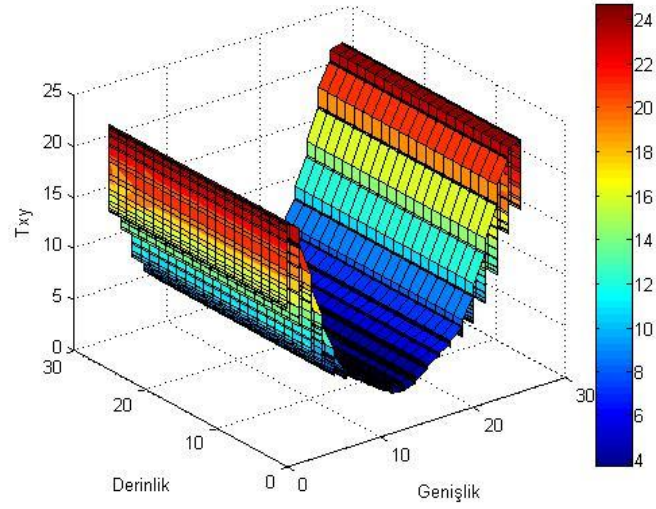


Şekil 4.24. CD Çizgisinde meydana gelen gerilmeler; (a) σ_y , (b) τ_{xy}

CD Çizgisi üzerinde C noktasında soyulma gerilmesi 35 MPa, kayma gerilmesi 29 MPa civarındadır. Kayma gerilmesi ise en yüksek değerine yaklaşık 17 MPa'da ulaşmaktadır.

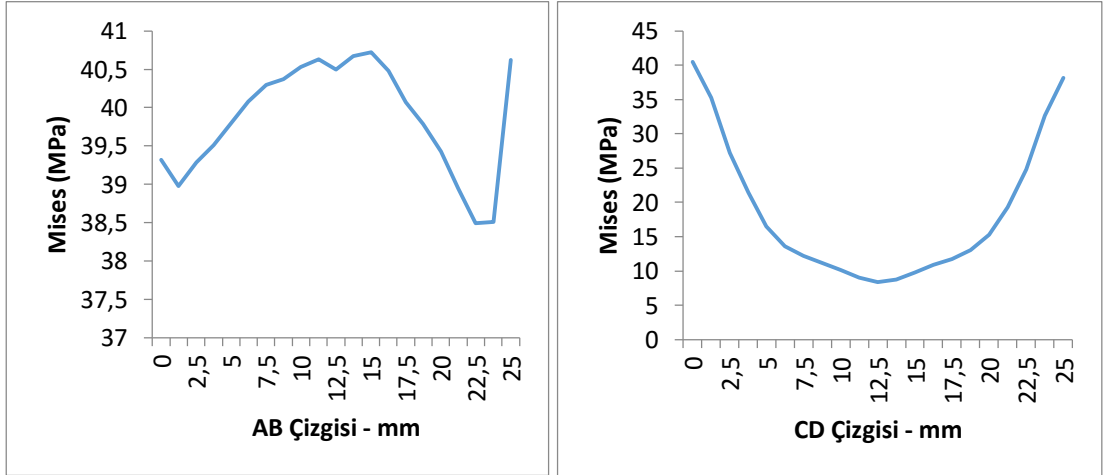


Şekil 4.25. Yapıştırıcı tabakasında meydana gelen σ_y (MPa) gerilmeleri

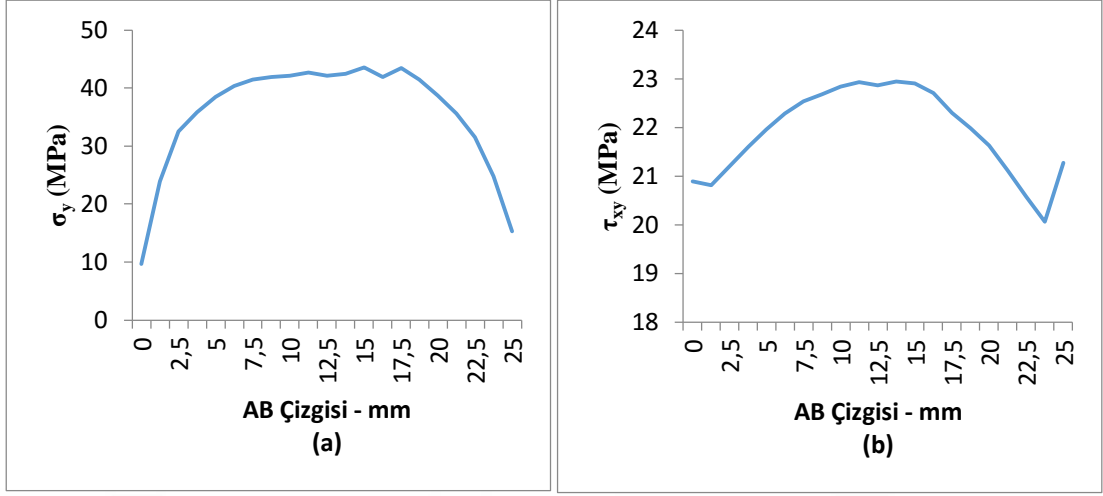


Şekil 4.26. Yapıştırıcı tabakasında meydana gelen τ_{xy} (MPa) gerilmeleri

Tip IV-a için sonuçlar

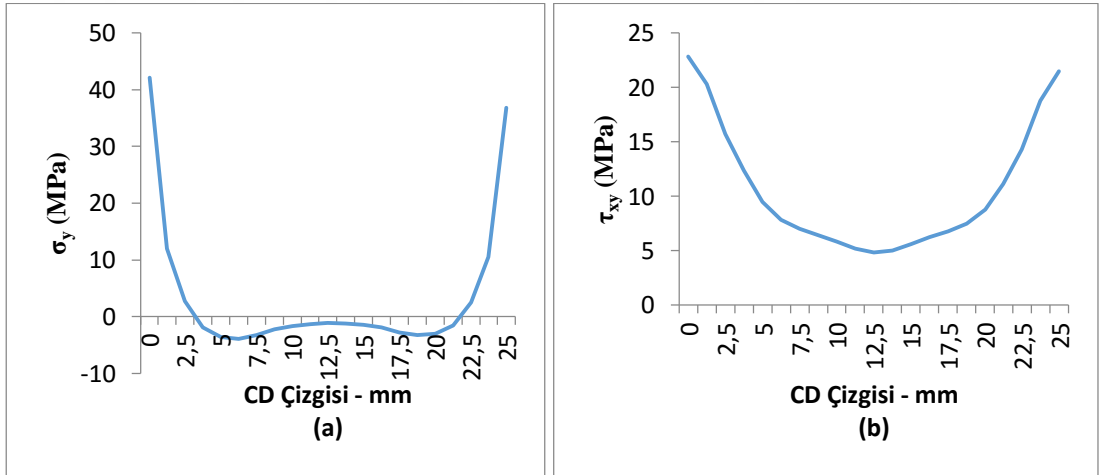


Şekil 4.27. AB ve CD Çizgisinde meydana gelen von Mises gerilmeleri



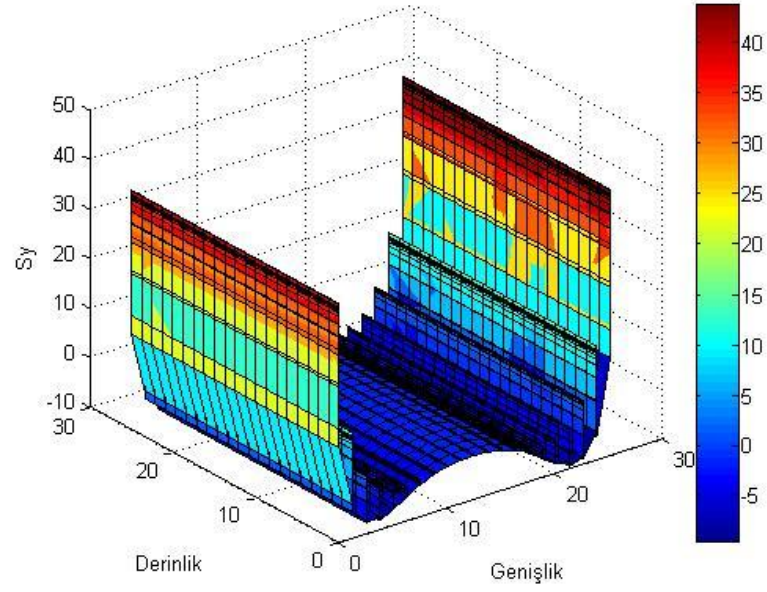
Şekil 4.28. AB Çizgisinde meydana gelen gerilmeler; (a) σ_y , (b) τ_{xy}

Tip IV-a'da AB çizgisi üzerindeki maksimum soyulma gerilmesinin değeri yaklaşık 42 MPa, kayma gerilmesinin ise 23 MPa'dır.

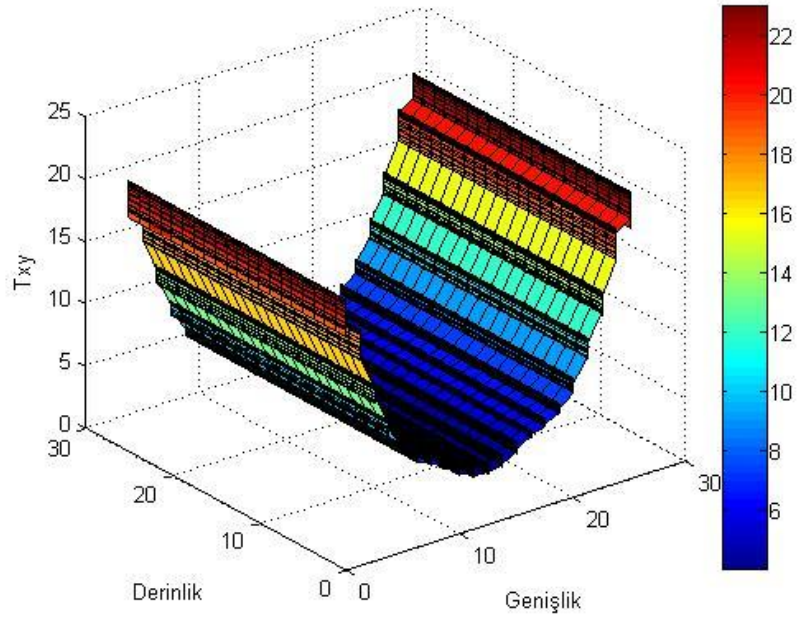


Şekil 4.29. CD Çizgisinde meydana gelen gerilmeler; (a) σ_y , (b) τ_{xy}

CD çizgisi üzerinde ise her iki noktada da soyulma gerilmeleri 40 MPa, kayma gerilmeleri 23 MPa civarında okunmuştur.

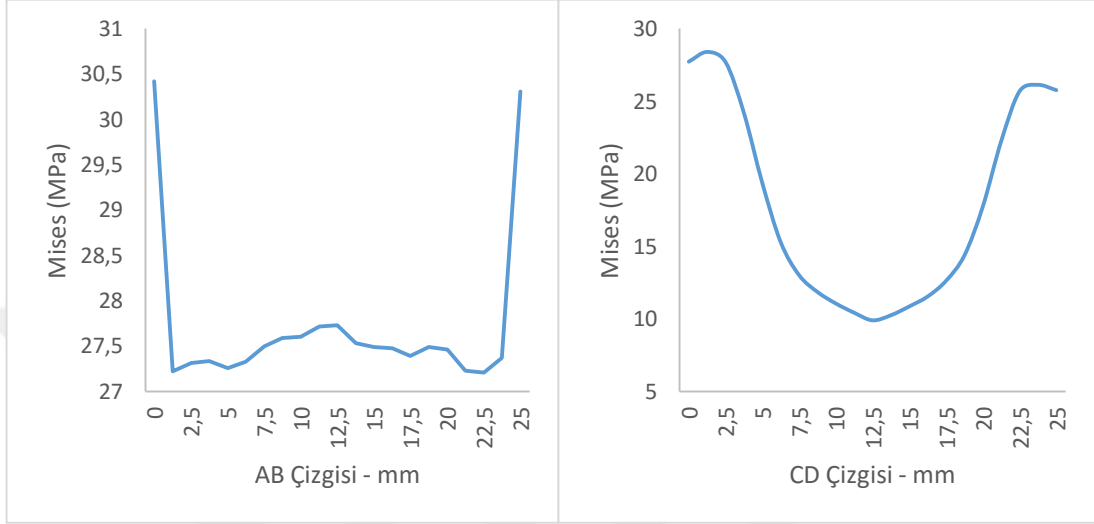


Şekil 4.30. Yapıştırıcı tabakasında meydana gelen σ_y (MPa) gerilmeleri

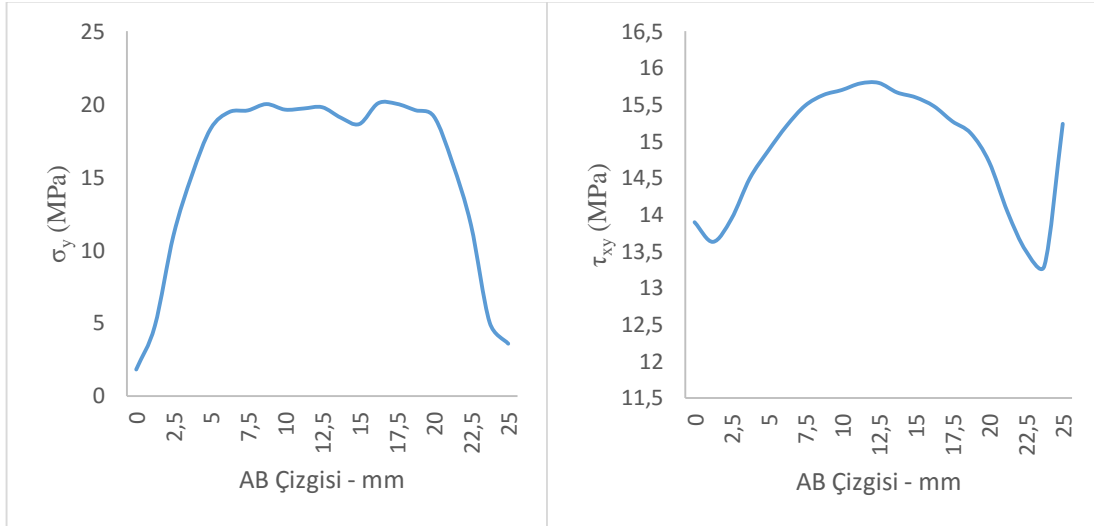


Şekil 4.31. Yapıştırıcı tabakasında meydana gelen τ_{xy} (MPa) gerilmeleri

Tip IV-b için sonuçlar

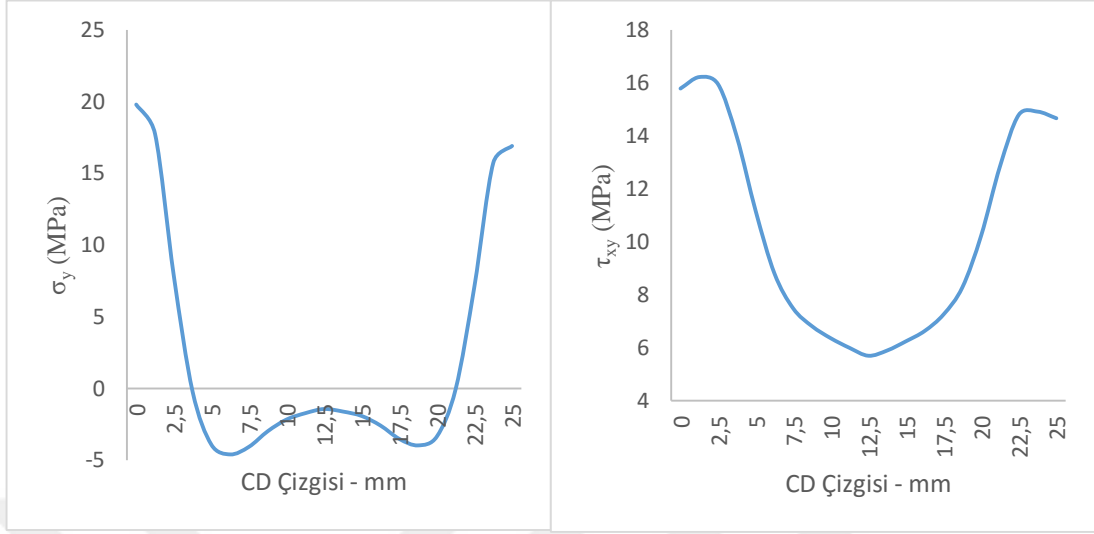


Şekil 4.32. AB ve CD Çizgisinde meydana gelen von Mises gerilmeleri



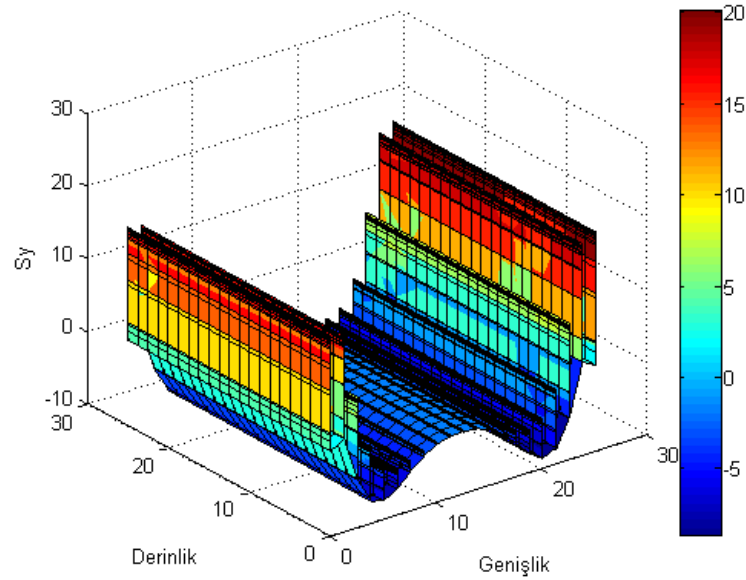
Şekil 4.33. AB Çizgisinde meydana gelen gerilmeler; (a) σ_y , (b) τ_{xy}

Tip IV-b için AB çizgisi üzerindeki maksimum soyulma gerilmesi 20 MPa, maksimum kayma gerilmesi 16 MPa olarak okunmuştur.

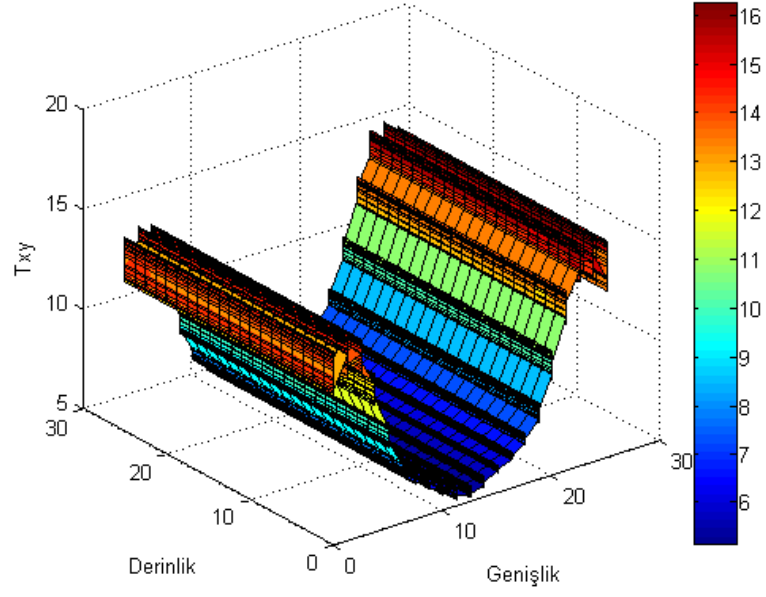


Şekil 4.34. CD Çizgisinde meydana gelen gerilmeler; (a) σ_y , (b) τ_{xy}

CD çizgisi üzerinde her iki uçta da soyulma gerilmelerinin maksimum değeri yaklaşık olarak 20 MPa iken kayma gerilmesinin maksimum değeri 15 MPa civarındadır.

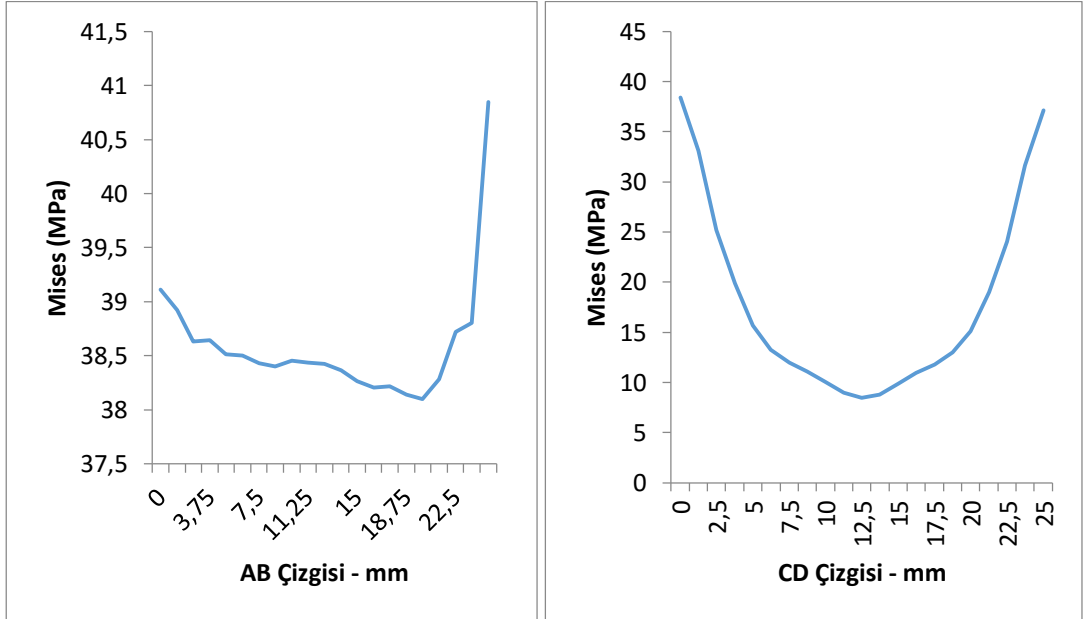


Şekil 4.35. Yapıştırıcı tabakasında meydana gelen σ_y (MPa) gerilmeleri

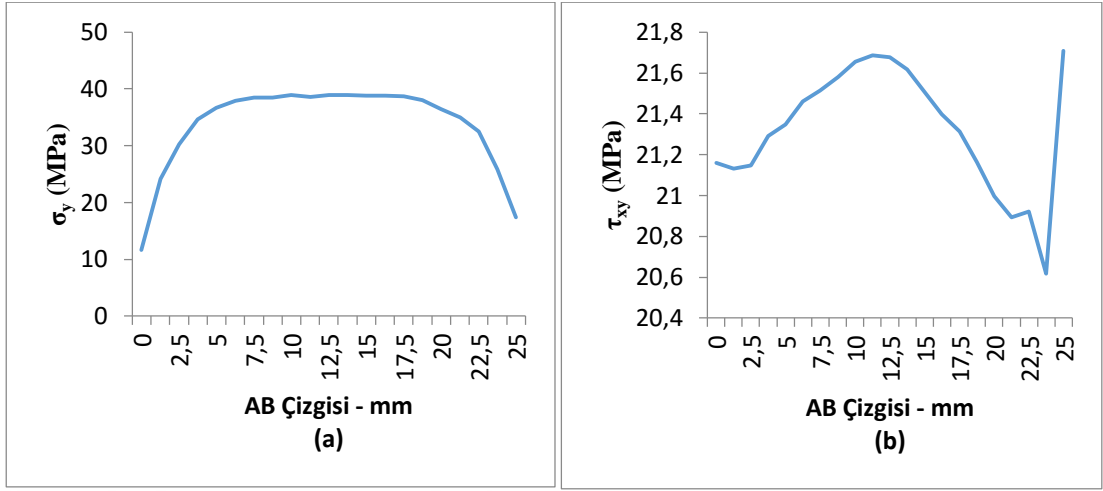


Şekil 4.36. Yapıştırıcı tabakasında meydana gelen τ_{xy} (MPa) gerilmeleri

Tip V için sonuçlar

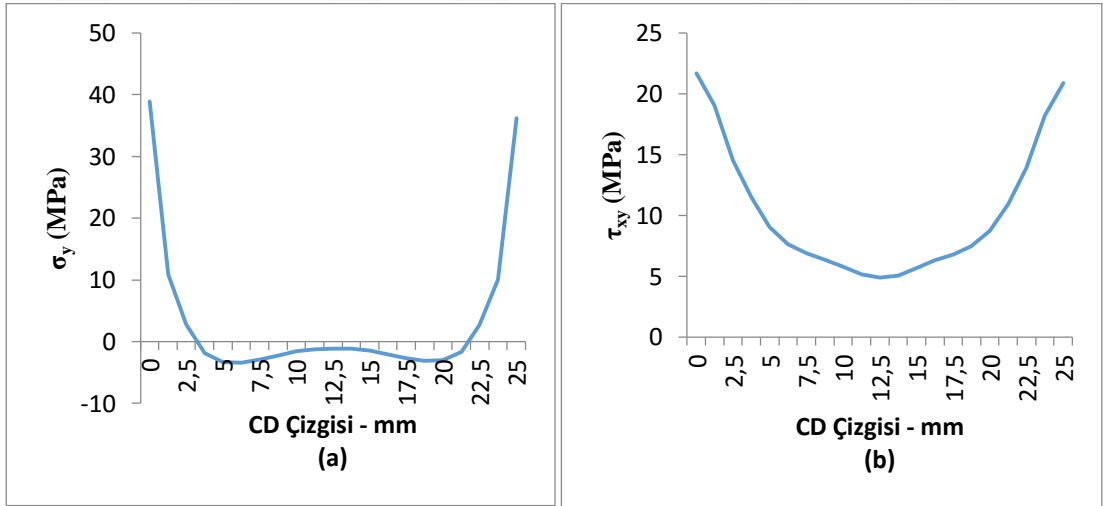


Şekil 4.37. AB ve CD Çizgisinde meydana gelen von Mises gerilmeleri



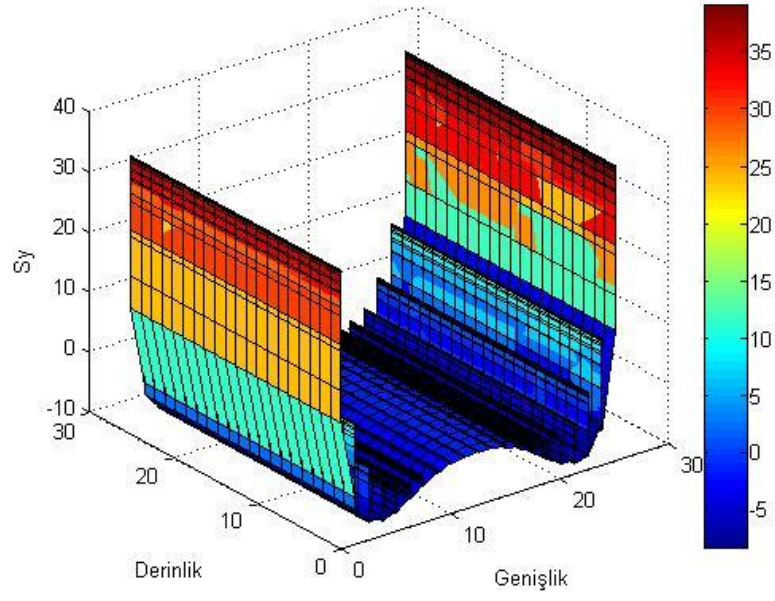
Şekil 4.38. AB Çizgisinde meydana gelen gerilmeler; (a) σ_y , (b) τ_{xy}

Tip V'de AB çizgisinde meydana gelen maksimum soyulma gerilmesinin değeri 40 MPa, maksimum kayma gerilmesinin değeri 21 MPa'dır.

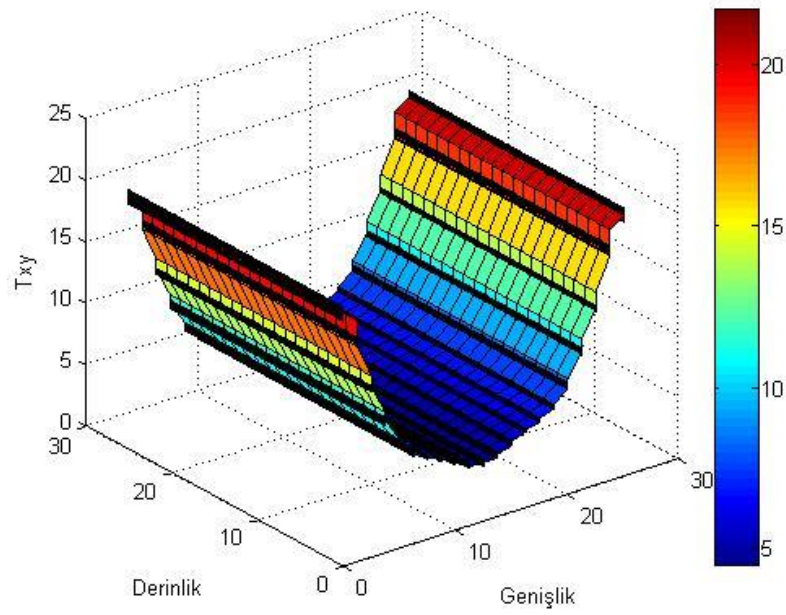


Şekil 4.39. CD Çizgisinde meydana gelen gerilmeler; (a) σ_y , (b) τ_{xy}

CD çizgisi üzerinde ise maksimum soyulma gerilmesinin değeri yaklaşık 39 MPa iken maksimum kayma gerilmesinin değeri 22 MPa civarındadır.

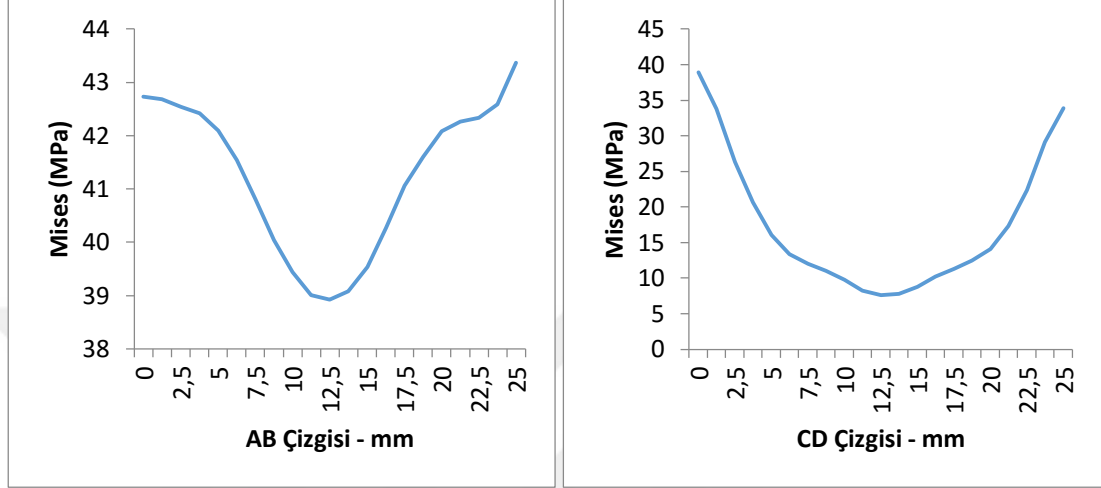


Şekil 4.40. Yapıştırıcı tabakasında meydana gelen σ_y (MPa) gerilmeleri

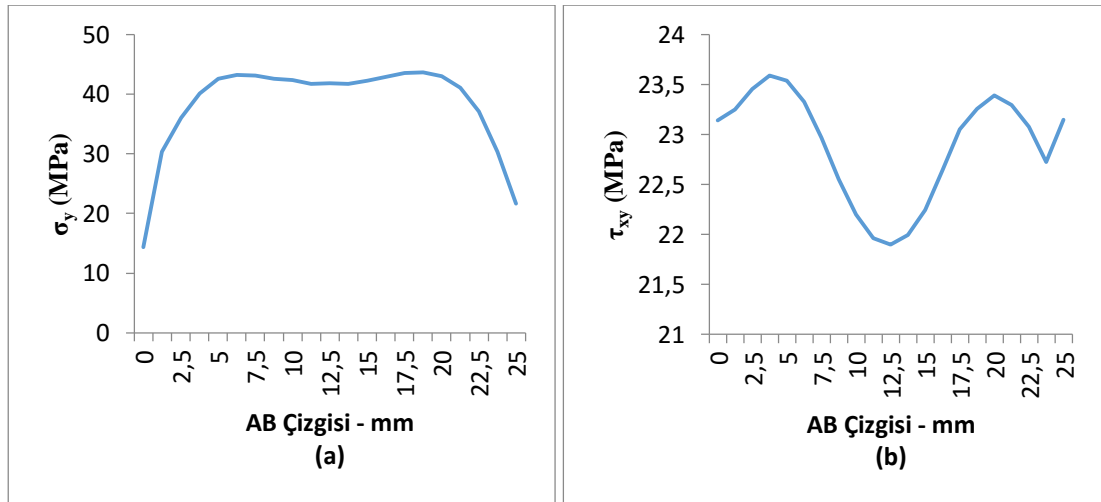


Şekil 4.41. Yapıştırıcı tabakasında meydana gelen τ_{xy} (MPa) gerilmeleri

Tip VI için sonuçlar

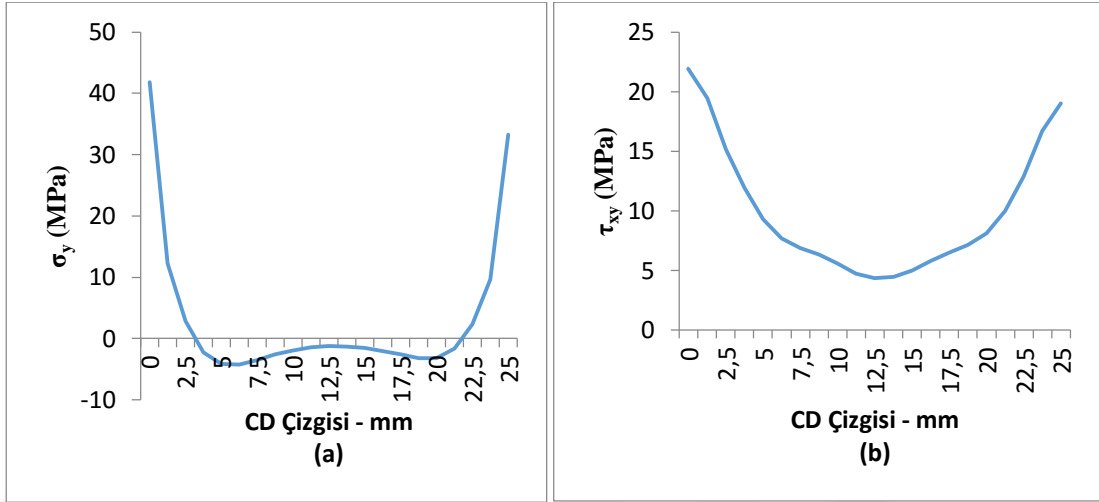


Şekil 4.42. AB ve CD Çizgisinde meydana gelen von Mises gerilmeler



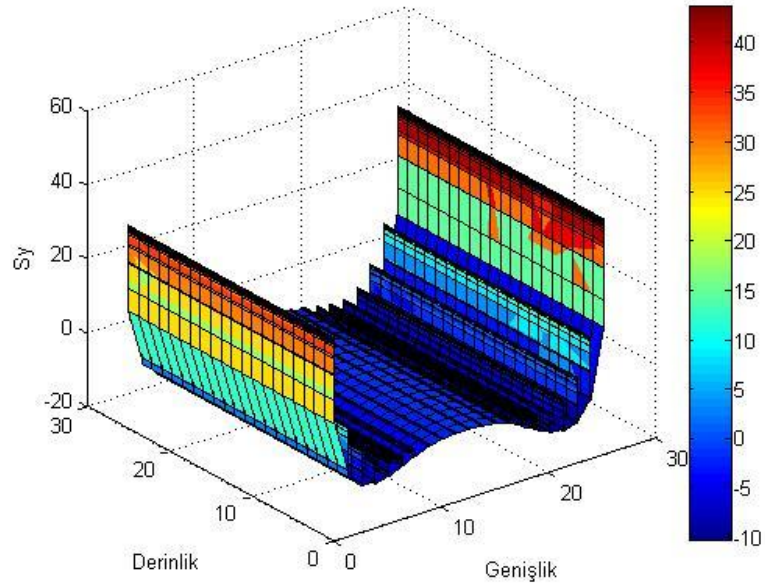
Şekil 4.43. AB Çizgisinde meydana gelen gerilmeler; (a) σ_y , (b) τ_{xy}

Tip VI'da AB çizgisi üzerinde meydana gelen maksimum soyulma gerilmesinin değeri 42 MPa, kayma gerilmesinin değeri ise 23 MPa civarındadır.

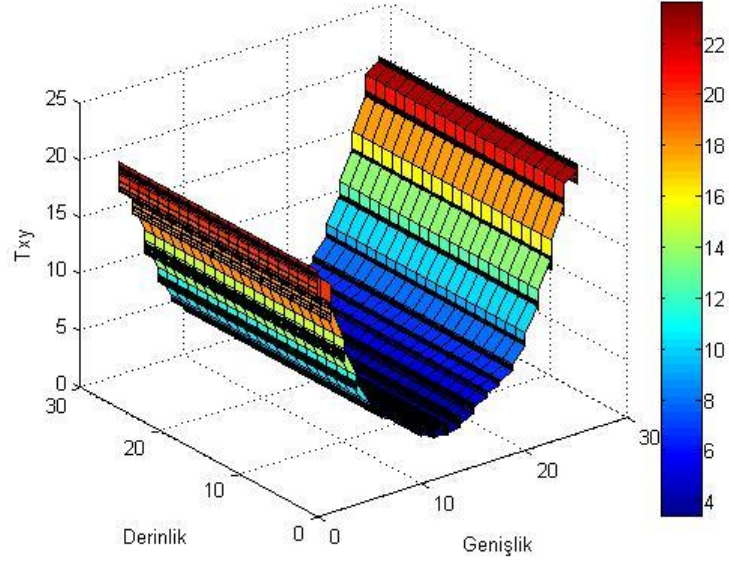


Şekil 4.44. CD Çizgisinde meydana gelen gerilmeler; (a) σ_y , (b) τ_{xy}

CD Çizgisi üzerinde soyulma gerilmesinin maksimum değeri yaklaşık olarak C noktasında 41 MPa, D noktasında 35 MPa'dır. Kayma gerilmesinin maksimum değeri ise 20 MPa civarındadır.

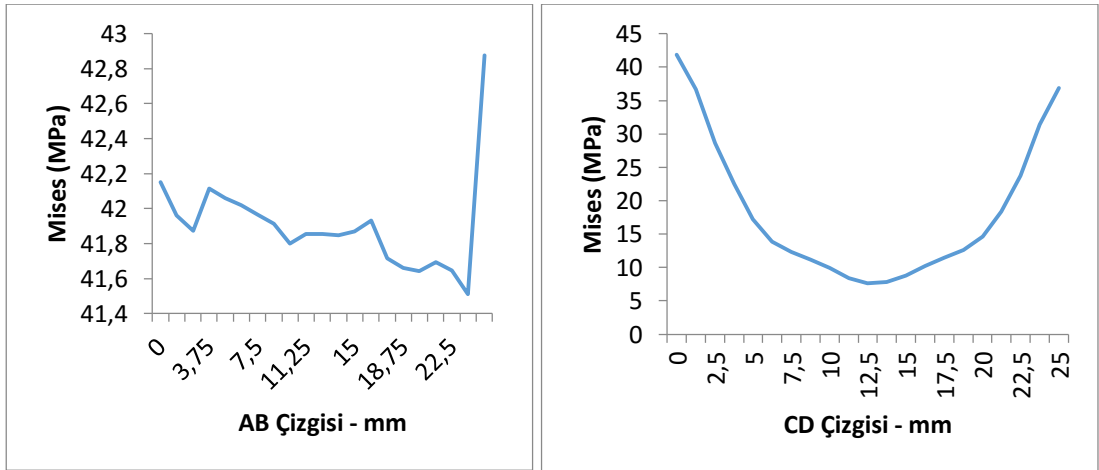


Şekil 4.45. Yapıştırıcı tabakasında meydana gelen σ_y (MPa) gerilmeleri

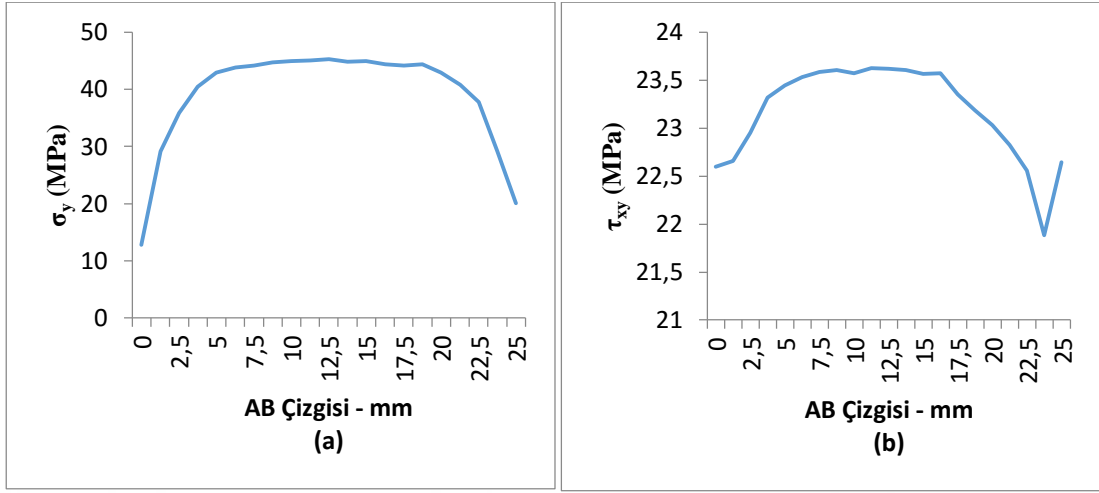


Şekil 4.46. Yapıştırıcı tabakasında meydana gelen τ_{xy} (MPa) gerilmeleri

Tip VII için sonuçlar

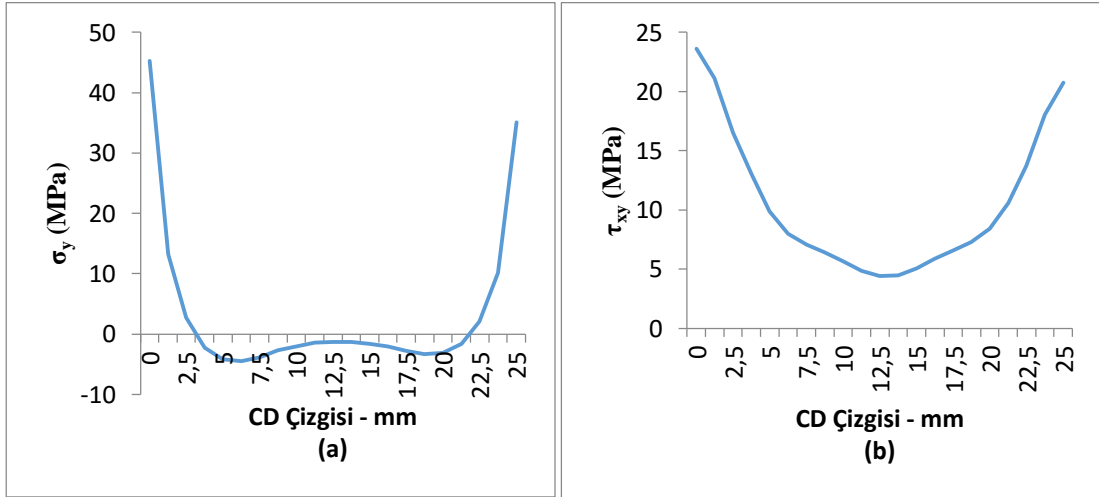


Şekil 4.47. AB ve CD Çizgisinde meydana gelen von Mises gerilmeleri



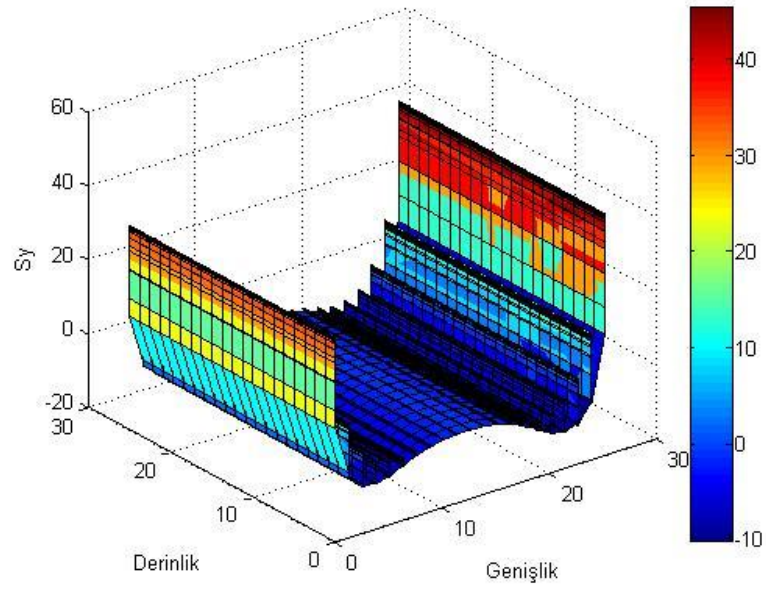
Şekil 4.48. AB Çizgisinde meydana gelen gerilmeler; (a) σ_y , (b) τ_{xy}

Tip VI'da AB çizgisi üzerinde meydana gelen maksimum soyulma gerilmesinin değeri yaklaşık olarak 42 MPa iken, kayma gerilmesinin maksimum değeri 23 MPa civarındadır.

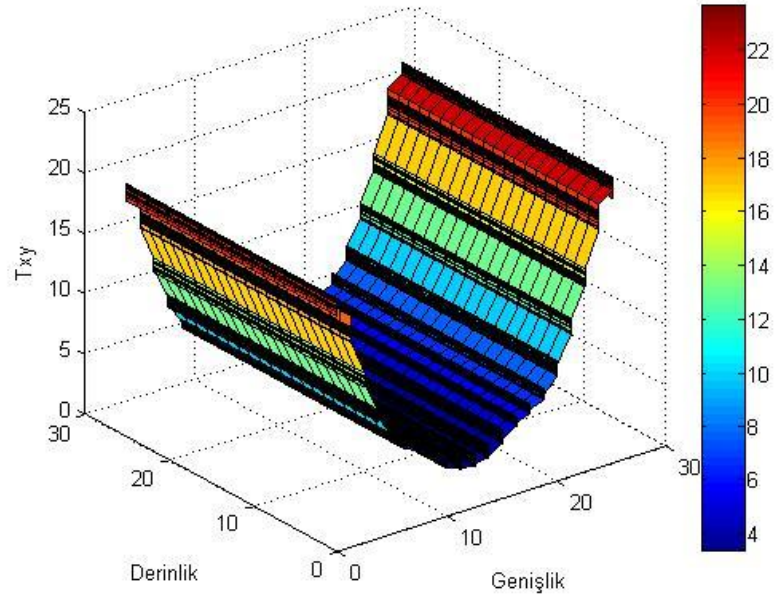


Şekil 4.49. CD Çizgisinde meydana gelen gerilmeler; (a) σ_y , (b) τ_{xy}

CD çizgisi üzerinde; maksimum soyulma gerilmesinin yaklaşık değeri C noktasında 45 MPa, D noktasında 35 MPa iken kayma gerilmesinin maksimum değeri yaklaşık olarak 24 MPa'dır.

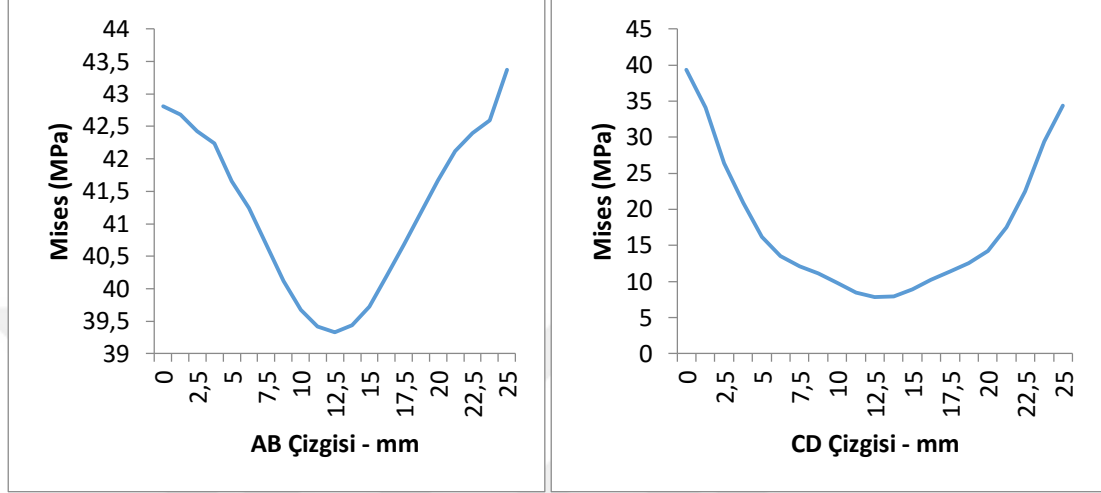


Şekil 4.50. Yapıştırıcı tabakasında meydana gelen σ_y (MPa) gerilmeleri

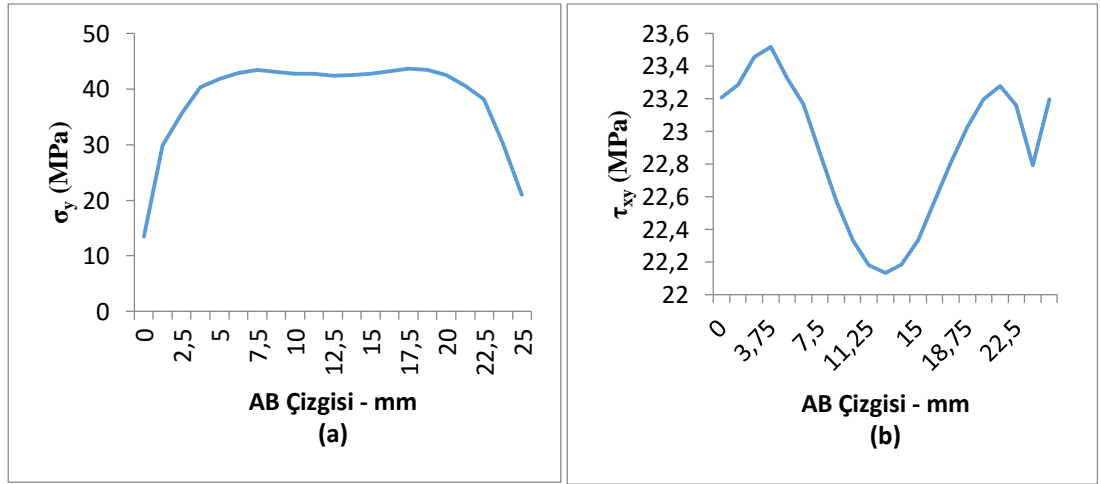


Şekil 4.51. Yapıştırıcı tabakasında meydana gelen τ_{xy} (MPa) gerilmeleri

Tip VIII için sonuçlar

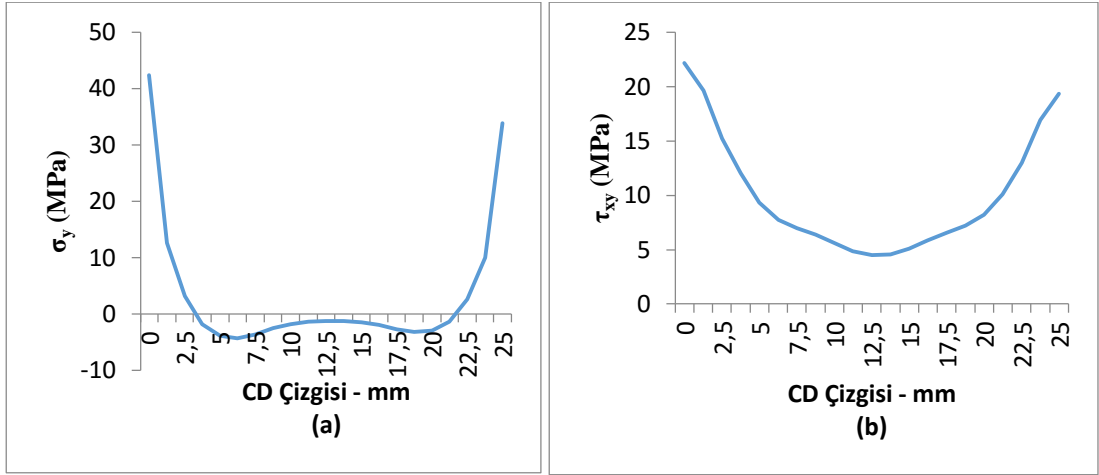


Şekil 4.52. AB ve CD Çizgisinde meydana gelen von Mises gerilmeleri



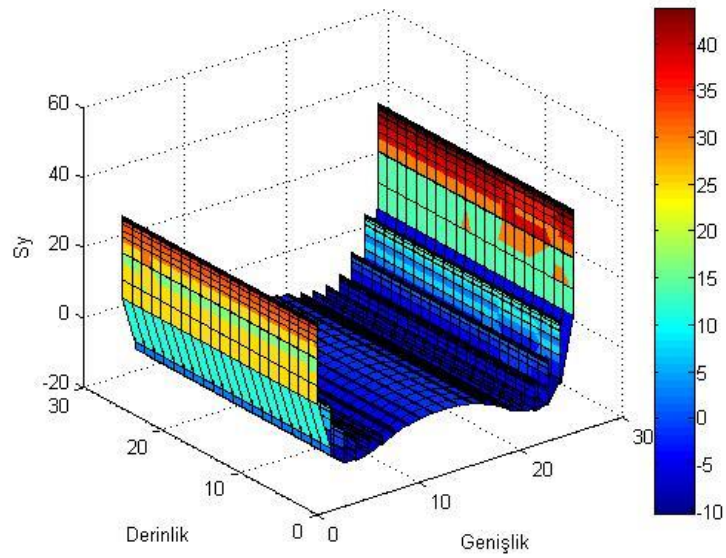
Şekil 4.53. AB Çizgisinde meydana gelen gerilmeler; (a) σ_y , (b) τ_{xy}

Tip VIII'da AB Çizgisi üzerinde meydana gelen maksimum soyulma gerilmesinin değeri 41 MPa, maksimum kayma gerilmesinin değeri 23 MPa civarındadır.

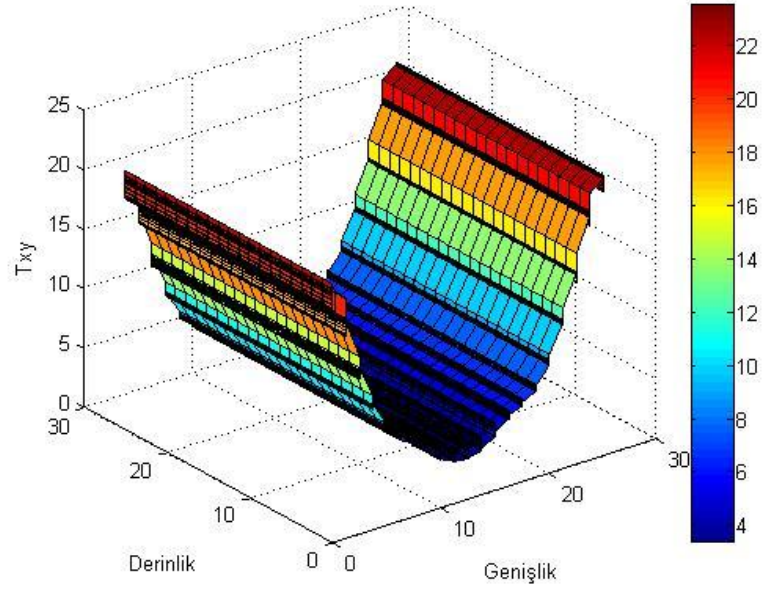


Şekil 4.54. CD Çizgisinde meydana gelen gerilmeler; (a) σ_y , (b) τ_x

CD çizgisi üzerinde maksimum soyulma gerilmesinin değeri C noktasında 41 MPa, D noktasında 35 MPa iken kayma gerilmesinin maksimum değeri 20 MPa civarındadır.

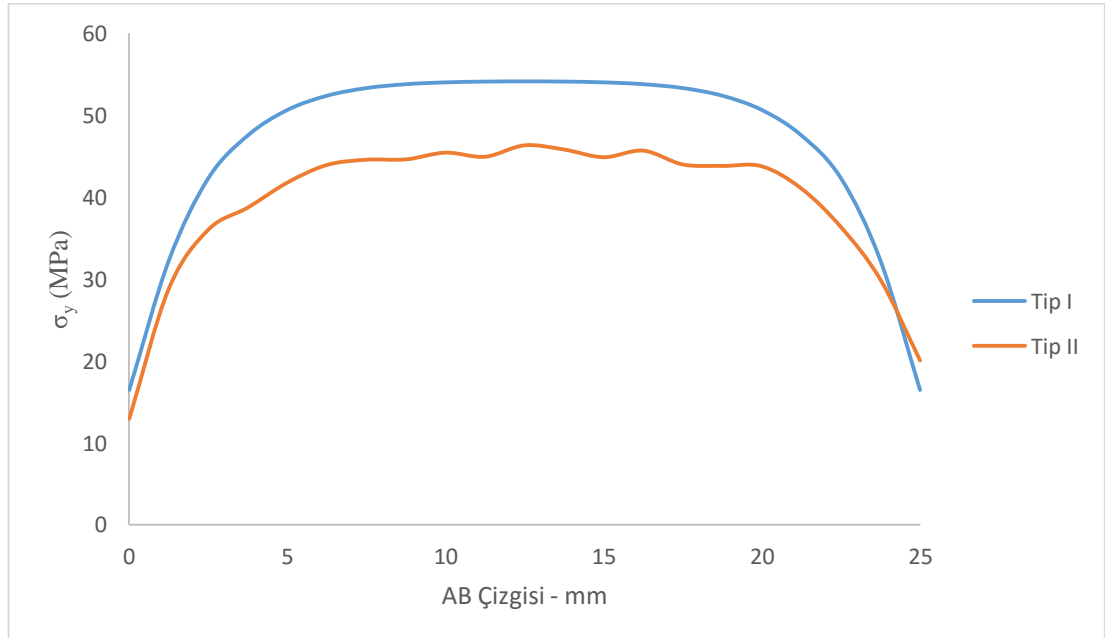


Şekil 4.55. Yapıştırıcı tabakasında meydana gelen σ_y (MPa) gerilmeleri

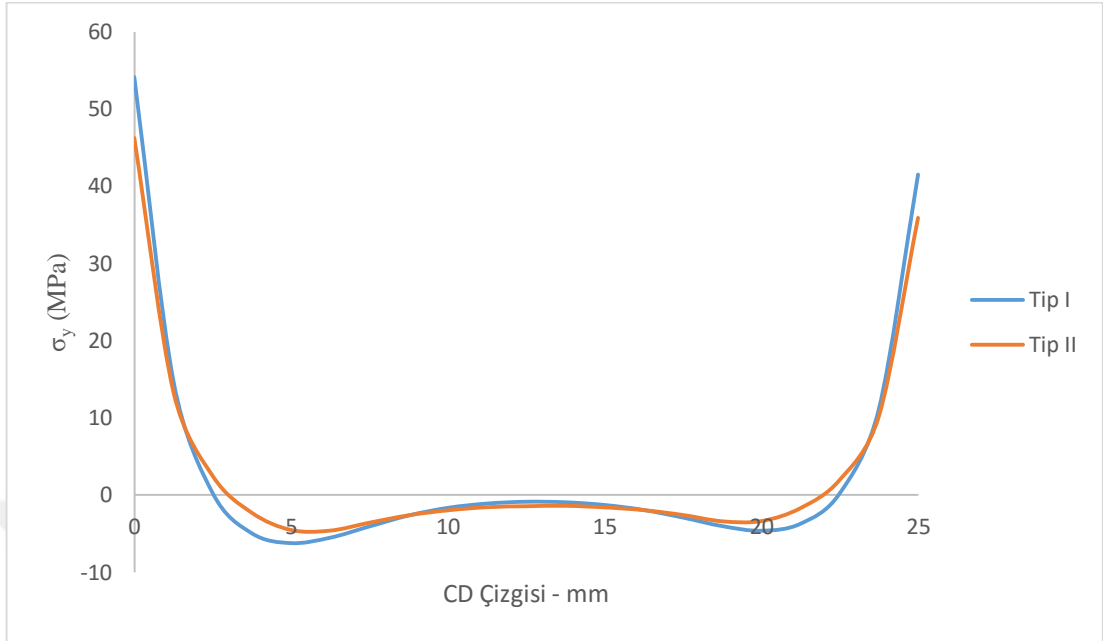


Şekil 4.56. Yapıştırıcı tabakasında meydana gelen τ_{xy} (MPa) gerilmeleri

4.3. Sonlu Elemanlar Analizi Bulgularının Değerlendirilmesi

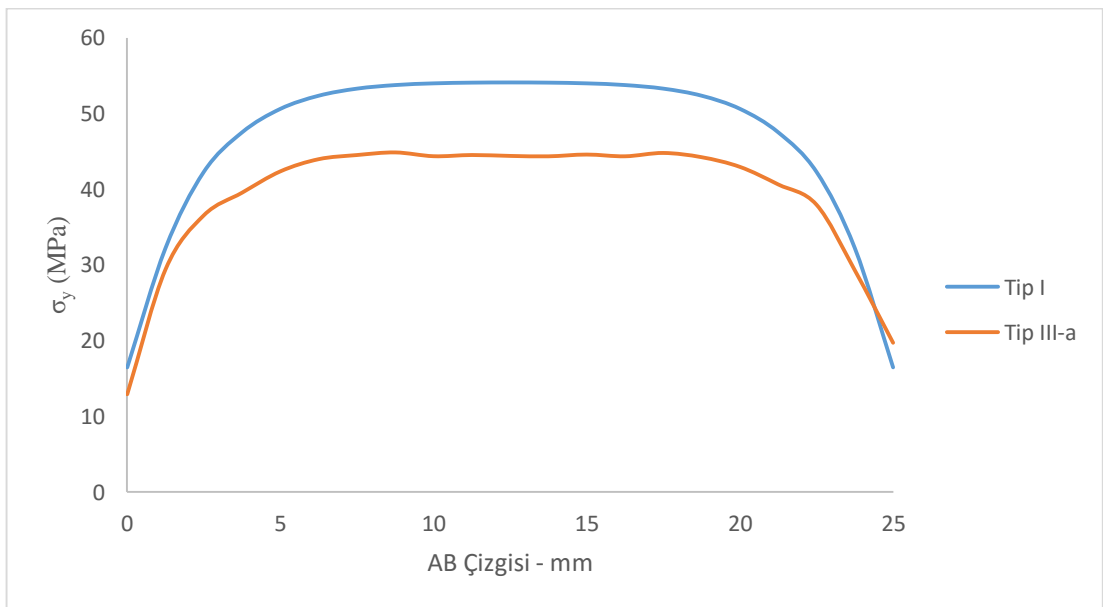


Şekil 4.57. AB Çizgisi için Tip I ve Tip II karşılaştırma grafiği

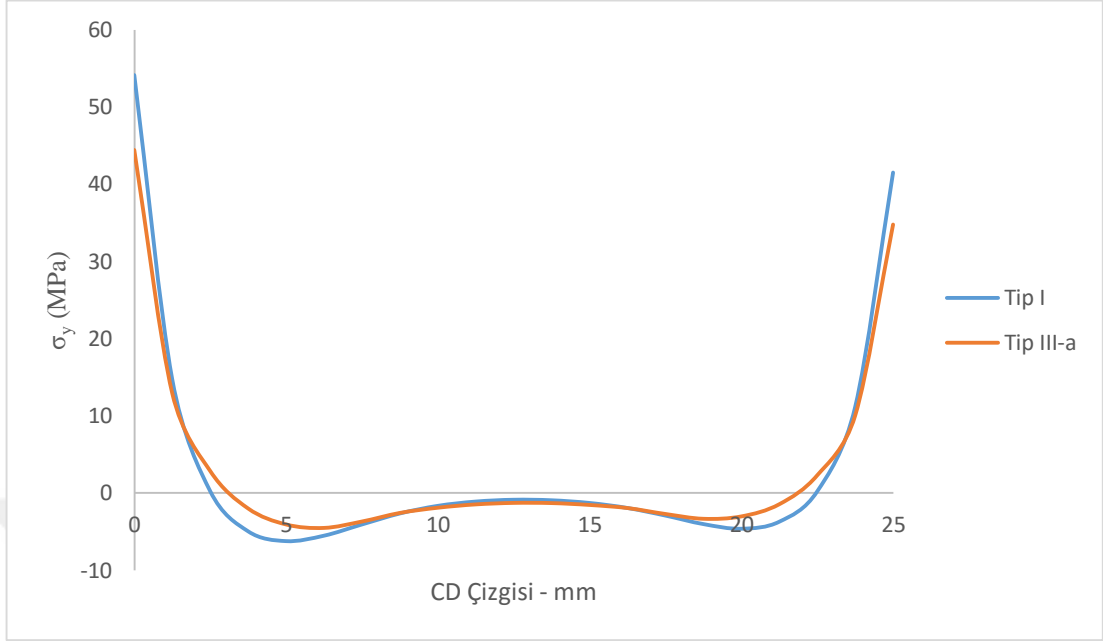


Şekil 4.58. CD Çizgisi için Tip I ve Tip II karşılaştırma grafiği

Tip I ve Tip II'ye ait AB ve CD çizgileri üzerinde meydana gelen σ_y gerilmelerine ait grafikler incelendiğinde kritik bölgeler olan yapıştırıcının uç noktalarında Tip II'de düşüş meydana gelmiştir. Ayrıca ana malzemenin üzerine açılan iki adet tünden delik çentik etkisi oluşturarak ilk grafikte görüleceği üzere yapıştırıcı boyunca gerilmelerin azalmasını sağlamıştır. Meydana gelen maksimum gerilme %10 azalırken bağlantının taşıma kapasitesinde %9'luk bir artış meydana gelmiştir.

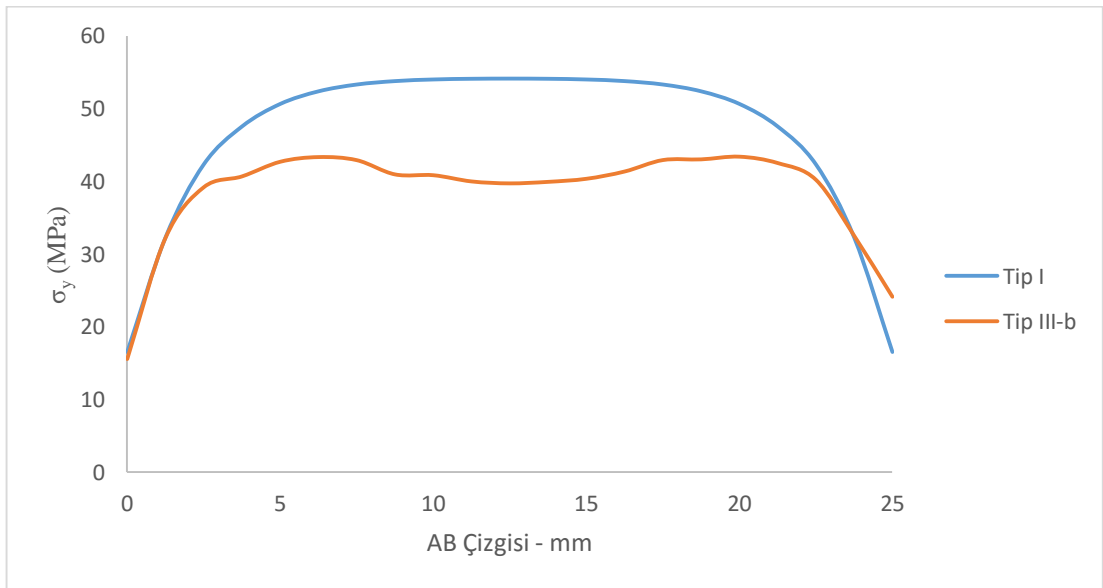


Şekil 4.59. AB Çizgisi için Tip I ve Tip III-a karşılaştırma grafiği

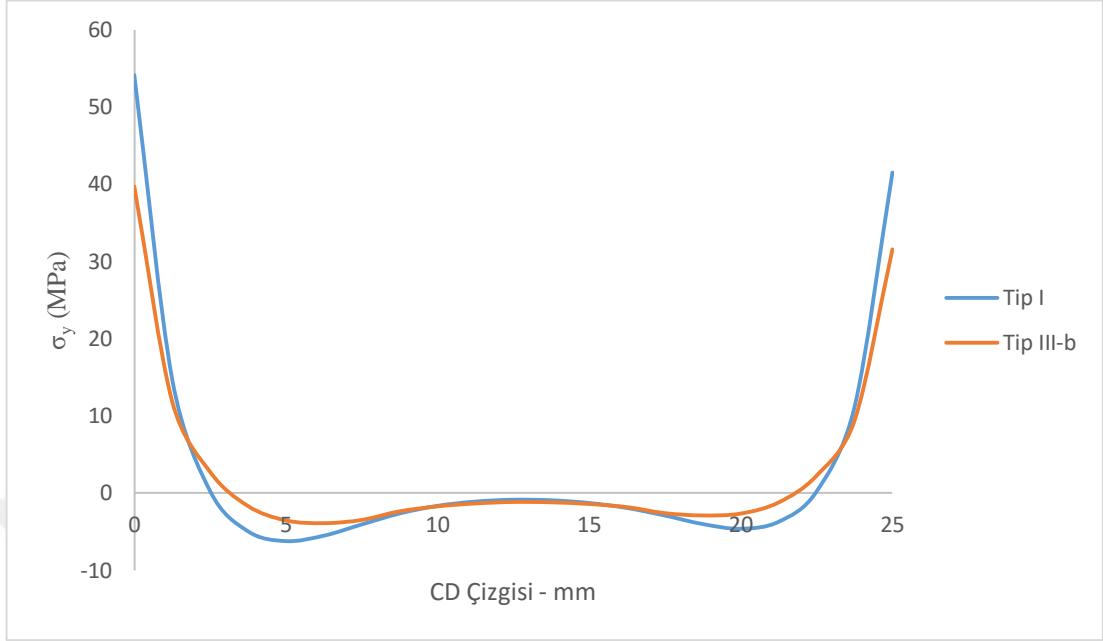


Şekil 4.60. CD Çizgisi için Tip I ve Tip III-a karşılaştırma grafiği

Tip III-a'da açılan kanalın derinliğinin azaltılması çentik etkisini olumsuz olarak etkilediğinden Tip I'e göre iyi bir performans göstermesine rağmen Tip III-b'den daha kötü sonuç vermiştir. %19 azalan maksimum gerilme sonucunda bağlantının dayanımı %6 oranında artmıştır.

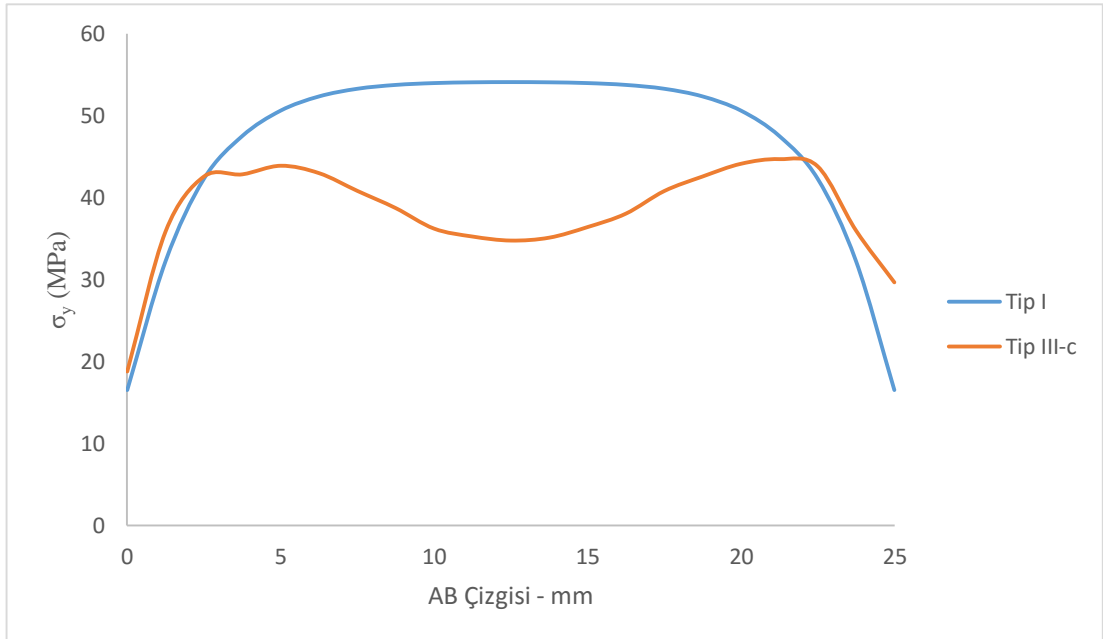


Şekil 4.61. AB Çizgisi için Tip I ve Tip III-b karşılaştırma grafiği

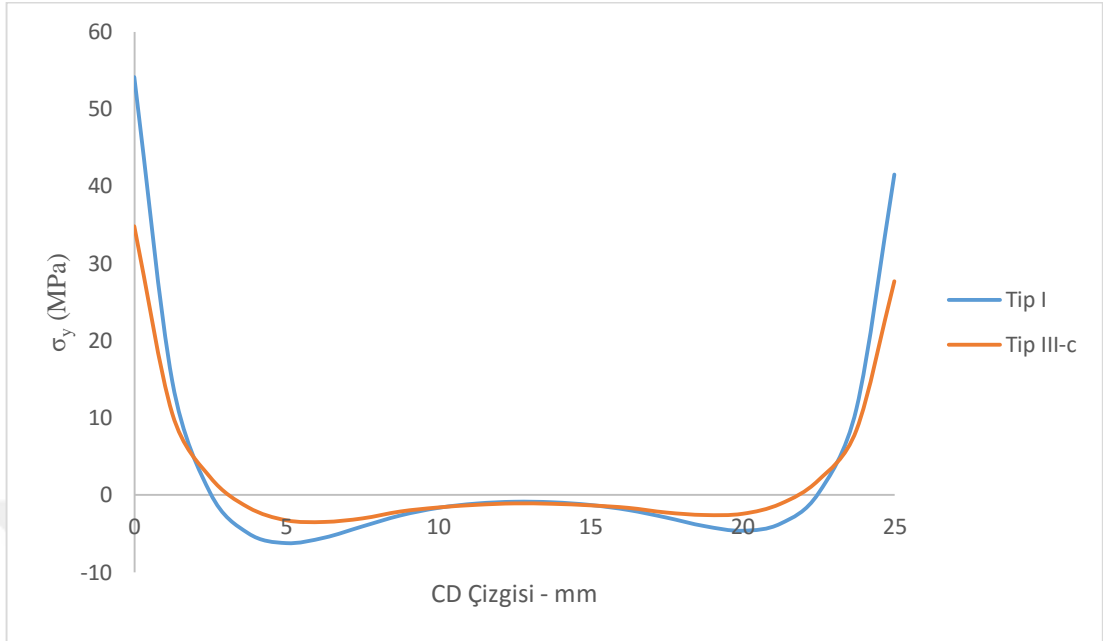


Şekil 4.62. CD Çizgisi için Tip I ve Tip III-b karşılaştırma grafiği

Tip I ve Tip III-b'ye ait grafikler incelendiğinde ise CD çizgisinde başlangıç gerilmelerinin daha da düştüğü görülmektedir. AB çizgisinde ise yapıştırma bölgesi boyunca gerilmelerde düşüş meydana gelmiştir. Maksimum gerilmelerde oluşan %27'lik düşüş bağlantının taşıma kapasitesini %20 oranında arttırmıştır.

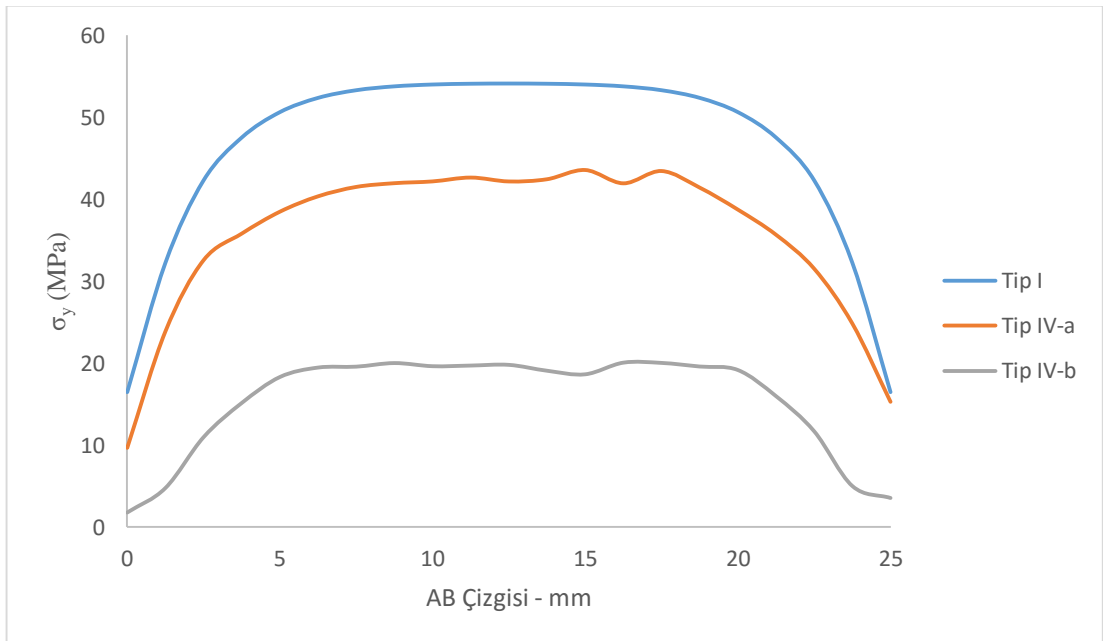


Şekil 4.63. AB Çizgisi için Tip I ve Tip III-c karşılaştırma grafiği

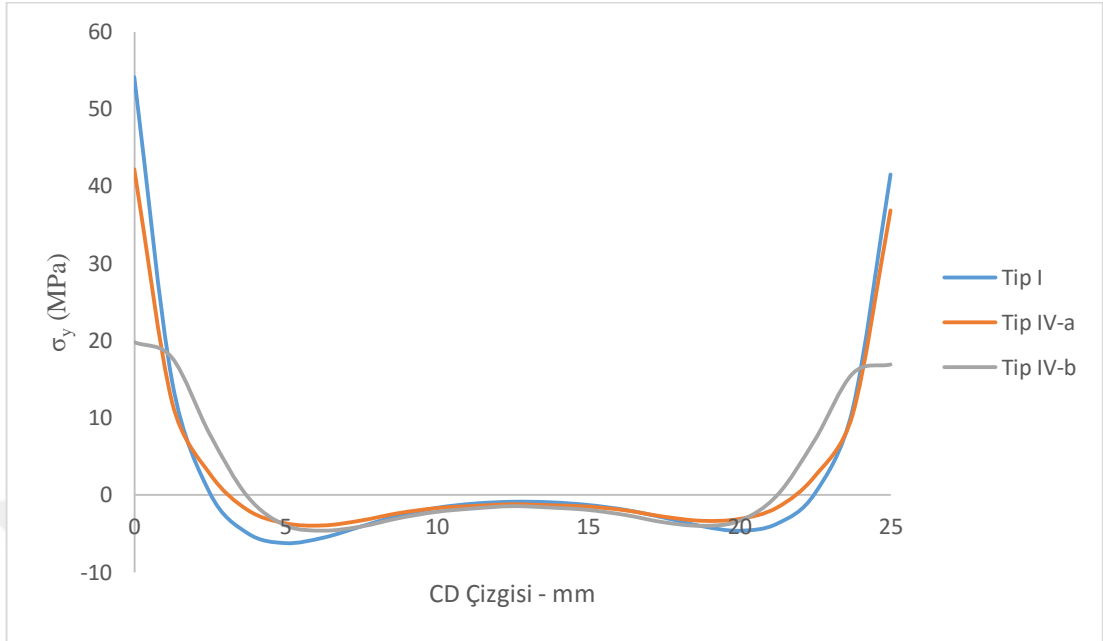


Şekil 4.64. CD Çizgisi için Tip I ve Tip III-c karşılaştırma grafiği

Tip III-c'de kanalın derinliğinin arttırılması gerilmeler üzerinde olumlu etki yapmıştır. Maksimum gerilmelerde %30 civarında artış sağlanmasına rağmen plakaların fazla deforme olması sonucu oluşan ekstra gerilmeler bağlantı dayanımının ancak %13 oranında artmasına müsaade etmiştir.

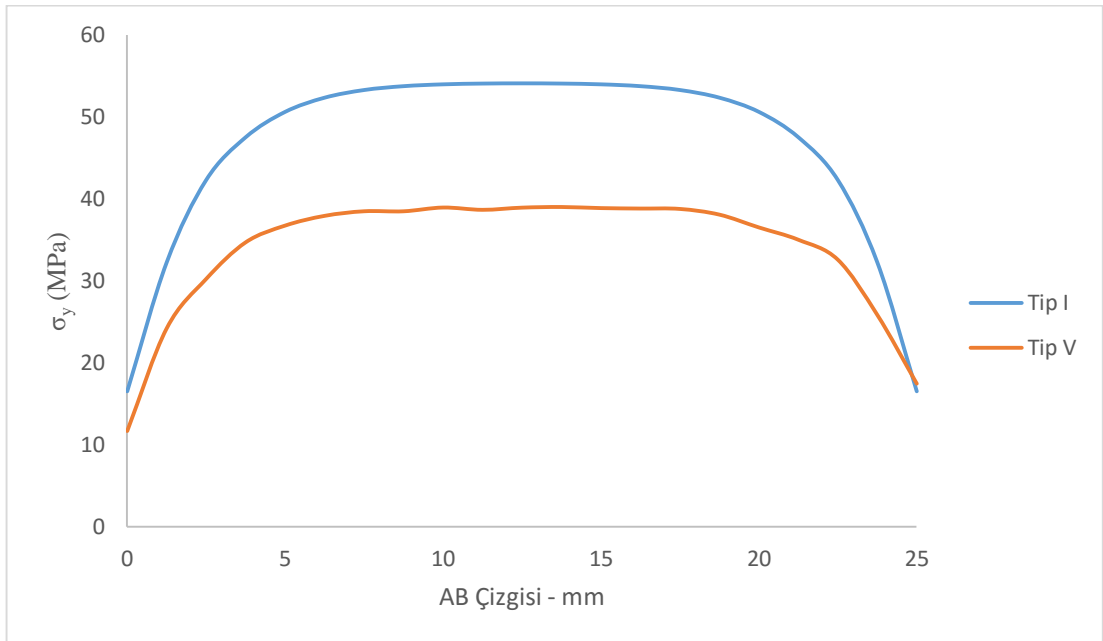


Şekil 4.65. AB Çizgisi için Tip I ve Tip IV karşılaştırma grafiği

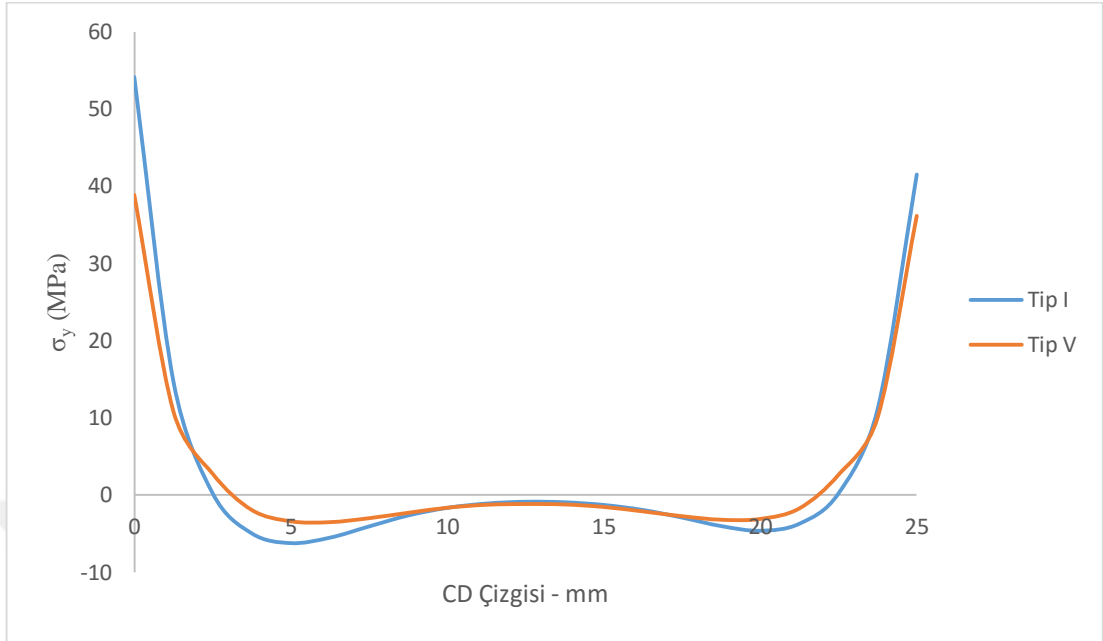


Şekil 4.66. CD Çizgisi için Tip I ve Tip IV karşılaştırma grafiği

Tip IV-a'da bindirme bölgesinin önüne açılan tümden kanal yapıştırıcıdan gerilmeleri uzaklaştırarak maksimum gerilmeyi yaklaşık %23 azaltmıştır. Bağlantının dayanımında ise %12'lik bir artış meydana gelmiştir. Tip IV-b de ise maksimum gerilme %60 oranında azalmasına rağmen bağlantının dayanımı sadece %3 2lük bir artış göstermiştir.

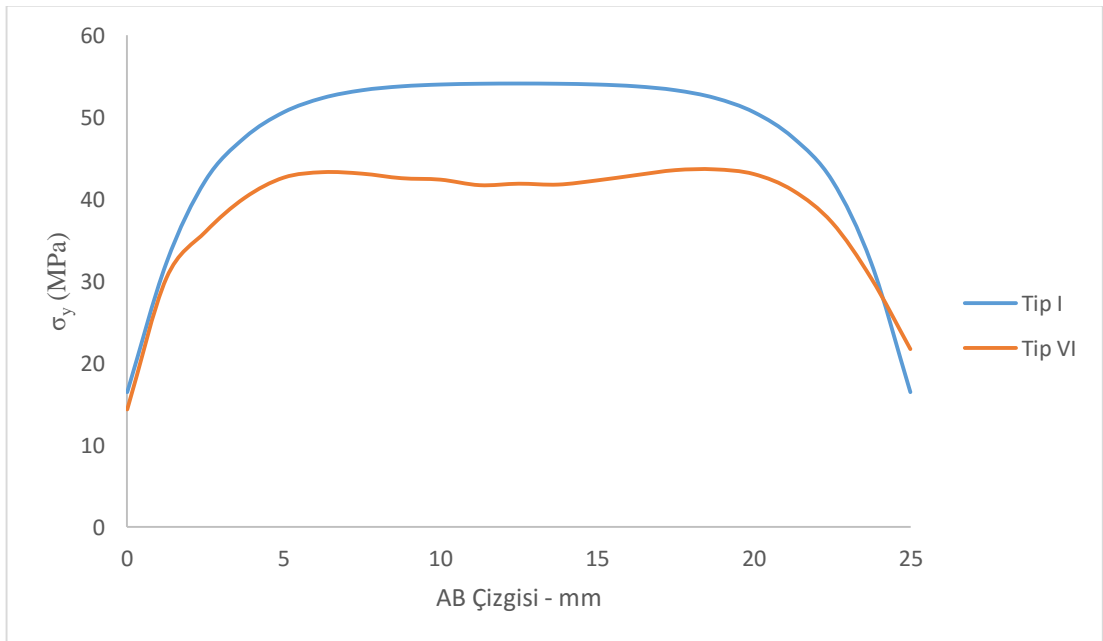


Şekil 4.67. AB Çizgisi için Tip I ve Tip V karşılaştırma grafiği

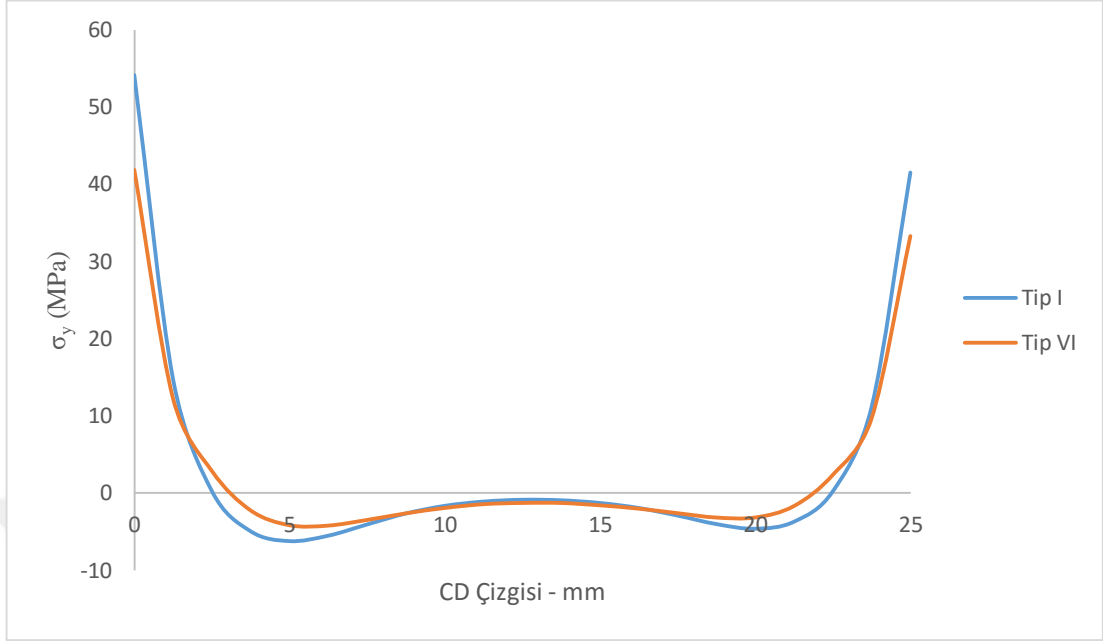


Şekil 4.68. CD Çizgisi için Tip I ve Tip V karşılaştırma grafiği

Tip V'de tümenden kanalın içine açılan iki adet delik çentik etkisini güçlendirerek meydana gelen maksimum gerilmeyi %30 oranında azaltmıştır fakat temel malzemelerde meydana gelen aşırı deformasyon sonucu etkili olan yeni gerilmeler bağlantı dayanımının %19 kadar artmasına izin vermiştir.

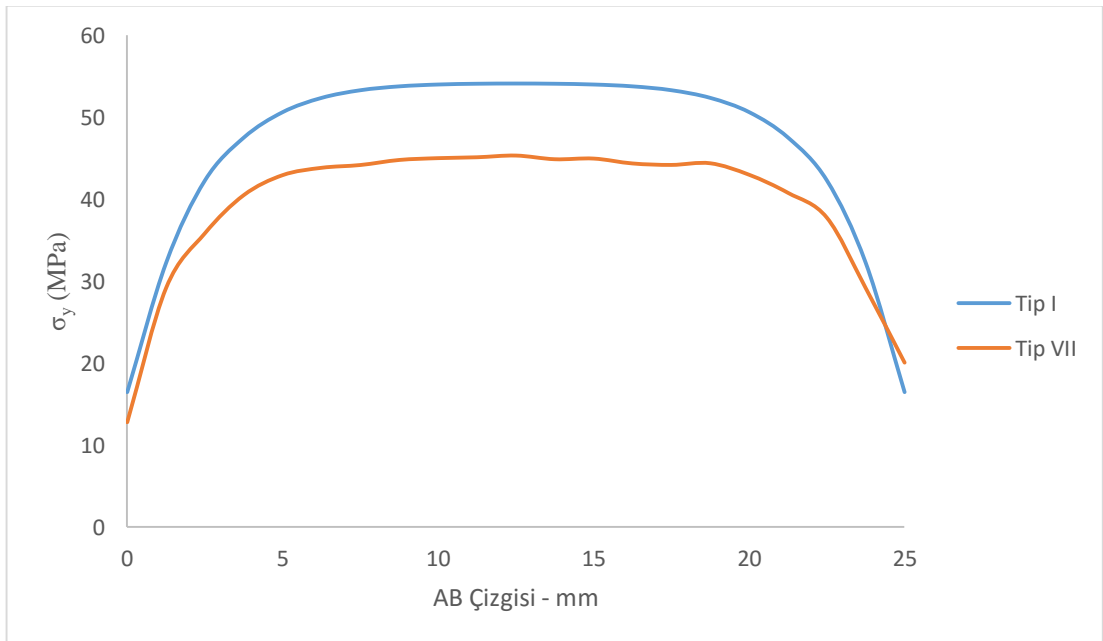


Şekil 4.69. AB Çizgisi için Tip I ve Tip VI karşılaştırma grafiği

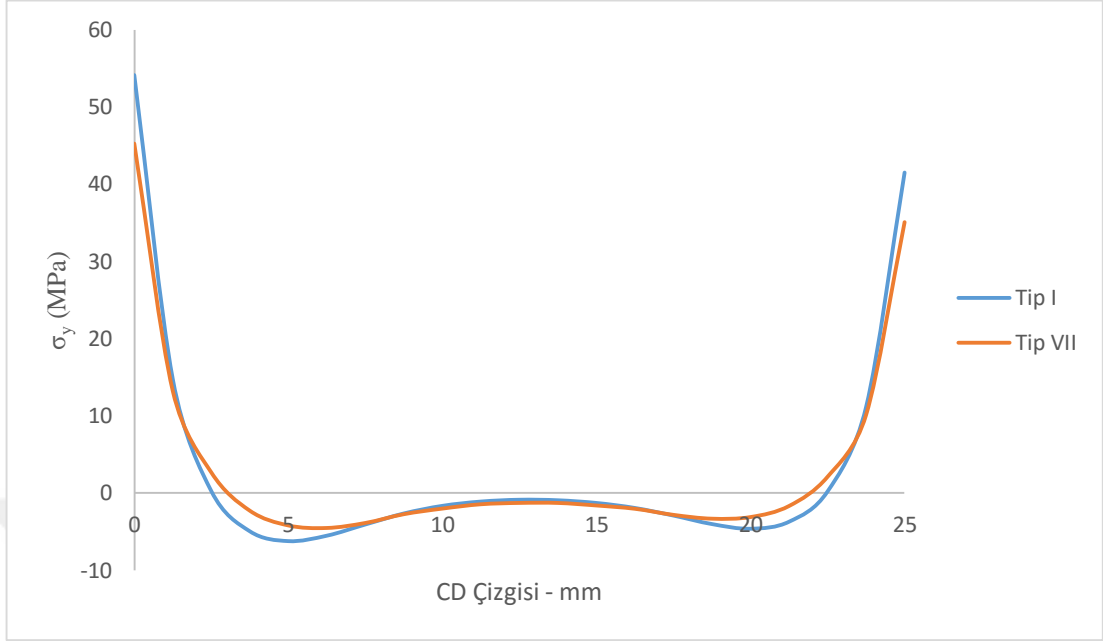


Şekil 4.70. CD Çizgisi için Tip I ve Tip VI karşılaştırma grafiği

Kanal uzunluğu azaltılarak kenarlarına iki adet tümden delik açılan Tip VI'da gerilmeler azalmıştır fakat kanal boyunun kısaltılmasıyla birlikte çentik etkisi Tip III-a'daki kadar etkili olmamıştır. %24 oranında düşen maksimum gerilme sonucunda bağlantının dayanımı %19 artış göstermiştir.

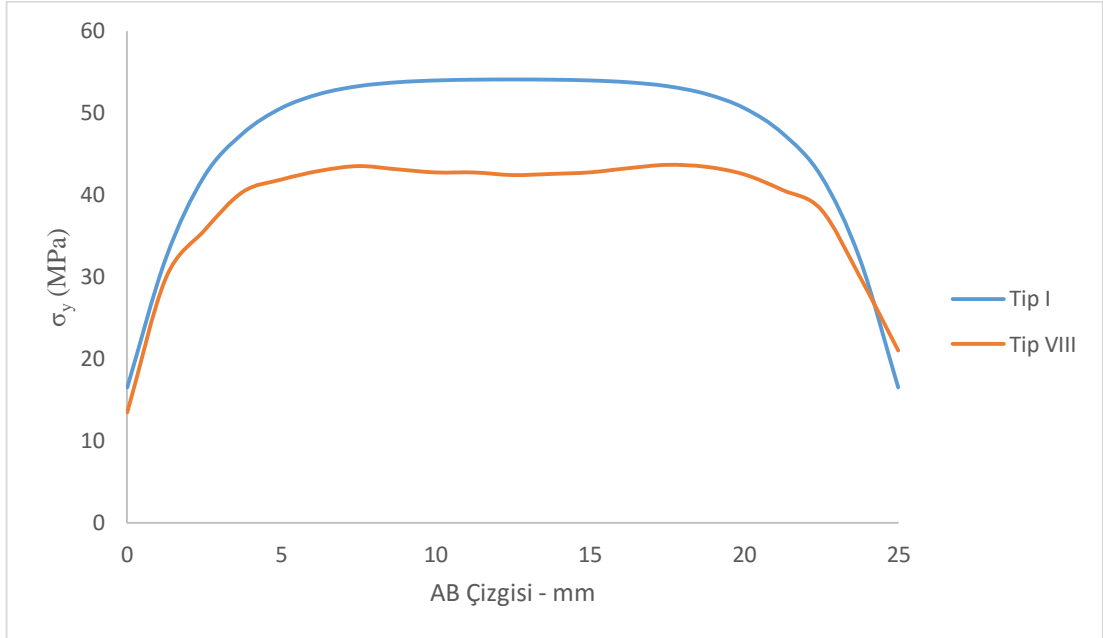


Şekil 4.71. AB Çizgisi için Tip I ve Tip VII karşılaştırma grafiği

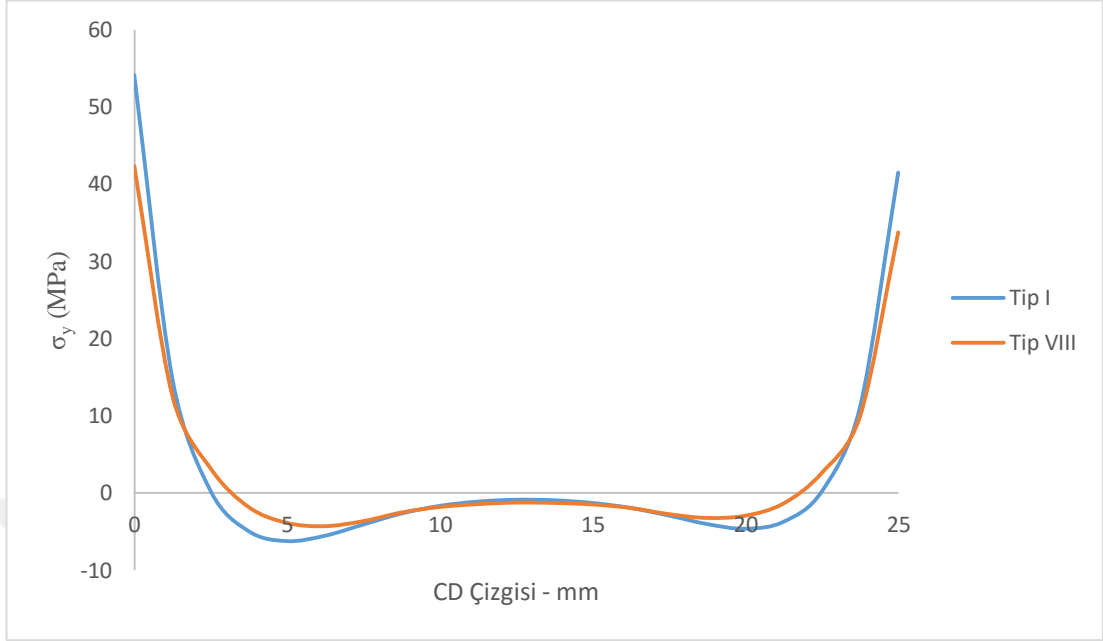


Şekil 4.72. CD Çizgisi için Tip I ve Tip VII karşılaştırma grafiği

Tip VII'da bindirme bölgesinin önüne açılan üç adet kör delik yapıstırıcı tabakasında meydana gelen maksimum gerilmeyi %17 azaltmış olup bağlantının dayanımını %13 arttırmıştır.



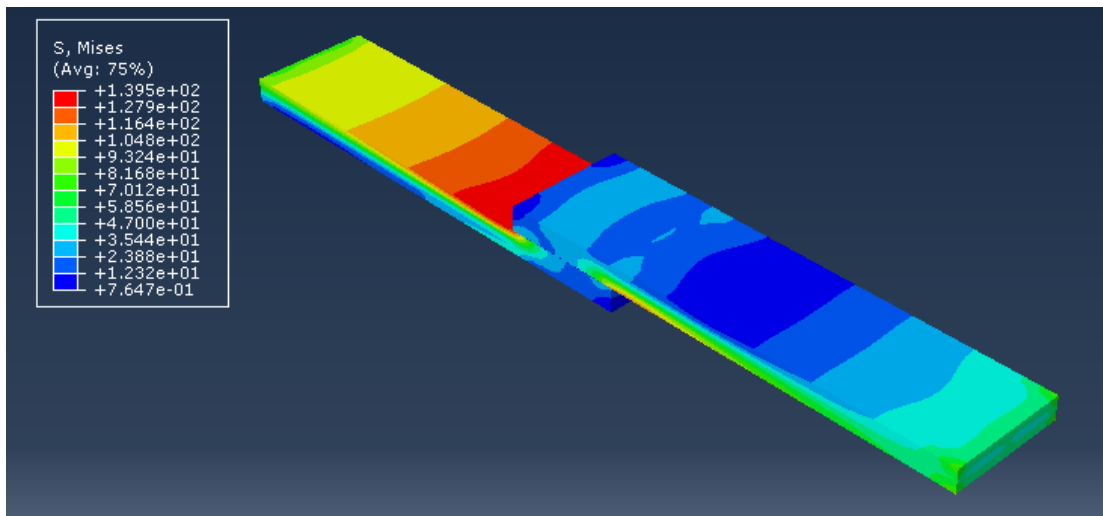
Şekil 4.73. AB Çizgisi için Tip I ve Tip VIII karşılaştırma grafiği



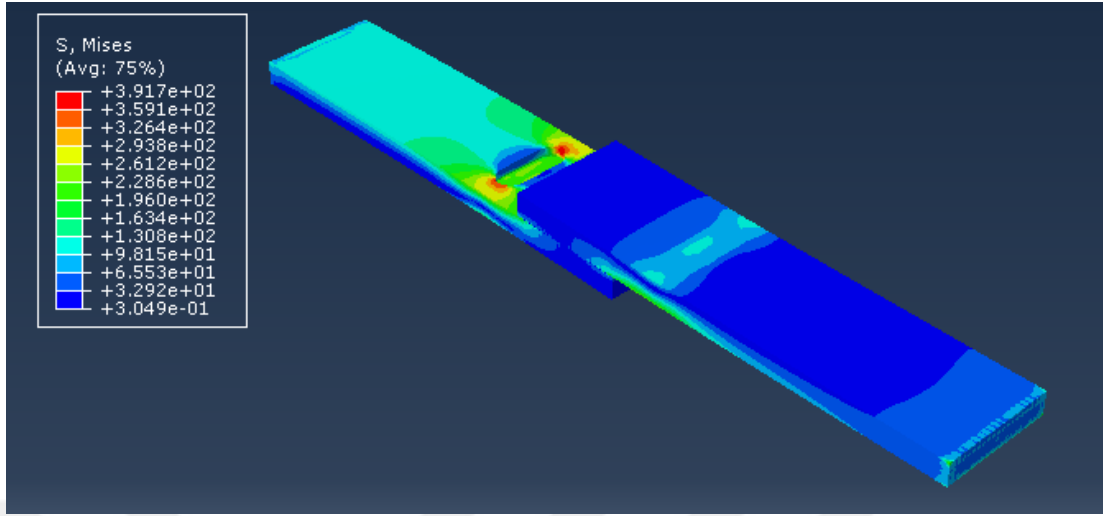
Şekil 4.74. CD Çizgisi için Tip I ve Tip VIII karşılaştırma grafiği

Tip VIII'da bindirme bölgesinden 2 mm daha uzaklaştırılan kanal yapıştırıcı tabakasında meydana gelen maksimum gerilmeyi %25 azaltarak bağlantı dayanımının %22 artmasını sağlamıştır.

4.4. Karşı Çentik Uygulamasının Bağlantı Dayanımına Etkisi



Şekil 4.75. Tip I bağlantısı için gerilme dağılımı



Şekil 4.76. Tip VIII bağlantısı için gerilme dağılımı

Şekil 4.75 ve Şekil 4.76’da görüleceği üzere kanalın bulunduğu bölgede gerilmeler yaklaşık üç katına yükselmektedir. Tip I için AB çizgisi üzerinde meydana gelen gerilmelerin içlere doğru artış gösterdiği önceki grafiklerde gösterilmiştir. Gerilmelerin yükseldiği bölgeye paralel, belirli bir uzaklıkta açılan kanal meydana getirdiği çentik etkisi sayesinde gerilmeleri etrafına toplayarak yapıştırıcı tabakasında meydana gelen yığılmaları azaltmaktadır ve bu sayede bağlantının dayanımında artış meydana gelmektedir.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Günümüzde özellikle havacılık ve otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılan yapıştırma bağlantılarının sağladığı avantajlar sebebiyle kullanımı günden güne artmaktadır. Mevcut çalışmada en yaygın kullanılan yapıştırma bağlantısı olan tek tesirli bindirme bağlantısının statik yük altında dayanımı arttırılmaya çalışılmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Alt ve üst parça üzerinde yapılan geometrik değişikliklerle 11 farklı tipte bağlantı geometrisi oluşturulmuş ve her bir bağlantıdan 3 numune test edilmiştir. Bindirme bölgesine belirli bir yakınlıkta oluşturulan kanal, delik, kör delik vs. gibi değişikliklerin ana malzeme üzerinde meydana getirdiği karşı çentik etkisi sayesinde gerilme yığılmaları yapıştırma bölgesinden uzaklaşmış ve her bir numunenin bağlantı dayanımında artış görülmüştür.
- Tip IV-b'den alınan sonuçlar Sancaktar ve Simmons'un çalışmasıyla uyum göstermektedir (Sancaktar ve Simmons, 2000). Sonlu elemanlar analizinde soyulma gerilmelerinde yaklaşık %60 düşüş gözlemlenmesine rağmen deneylerde bağlantının dayanımında az bir artış meydana gelmiştir. Bunun bir sebebi olarak açılan kanalın yapıştırma bölgesine olan yakınlığı gösterilebilir. Bir diğer sebep ise soyulma gerilmesinin bağlantı dayanımı üzerinde etkin bir rol üstlenmesine rağmen zaman zaman diğer gerilmelerin de etkili olmasıdır. Sancaktar ve Simmons kanalın yapıştırma bölgesine olan mesafenin bağlantı dayanımına olan etkisini incelememiştir. Kanal uzaklaştırıldığında bu durum ortadan kalkmakta ve bağlantının dayanımında artış meydana gelmektedir. Simmons ve Sancaktar'ın çalışmasında alt ve üst parçanın üstüne açılan 11,11 mm'lik kanal malzemeyi oldukça inceltmekte ve çok büyük çentik etkisinin oluşmasına sebep olmaktadır. Bu çalışmada alt ve üst parçanın altına yapıştırma bölgesinden belirli bir uzaklıkta açılan 2 mm'lik kanal hem bağlantı performansını arttırmakta hem de çentik etkisini belirli bir sınırdan tutmaktadır.

- Yapılan çalışmalar bağlantı dayanımında en iyi artışın Tip VIII ve Tip III-b'de sağlandığını göstermiştir. Bahsedilen iki tip geometride 10 mm uzunluğunda 2 mm derinliğinde kanal bulunmaktadır. İki arasındaki fark, kanalın bindirme bölgesine olan uzaklığının Tip III-a'da 5 mm iken Tip VIII'da 7 mm olmasıdır. Yapılan deneysel ve nümerik çalışmalar kanalın bindirme bölgesine olan uzaklığının optimum bir ölçüsü olduğunu göstermiştir. Bu mesafe 5-7 mm arasında tespit edilmiştir. Kanalın bindirme bölgesinin çok yakın veya çok uzağında olması gerilme yığılmalarını yapıştırıcı tabakasından uzaklaştırmamaktadır. Tip VIII ve Tip III-b de sırası ile bağlantının dayanımında %22 ve %20 artış sağlanmıştır.
- Kanal açılarak oluşturulan farklı tiplerdeki bağlantı geometrilerinde kanalın derinliği veya genişliği azaltıldığında (Tip III-b) bağlantının dayanımı yine artmış fakat Tip III-a ve Tip VIII'deki değerlere varan bir artış gözlemlenmemiştir. Yapılan nümerik ve deneysel çalışmalar kanalın derinliği 2-3 mm ve uzunluğu 10 mm iken bağlantı dayanımının maksimum artış gösterdiğini göstermiştir.
- Kanal ve deliğin kombine edilerek kullanıldığı bağlantı geometrilerinde de (Tip V ve Tip VI) bağlantının dayanımında iyi bir artış (%18 ve %17) gözlemlenmiştir.
- Plakaya delik delinerek oluşturulan geometrilerde (Tip II ve Tip VII) her ne kadar bağlantının dayanımında %10 ve %13 kadar artış görülse de kanal kadar çentik etkisi meydana gelmediğinden yapıştırıcıdan yeteri kadar gerilme yığılması uzaklaştırılmadığı için kanal açılan geometrilerdeki performansı gösterememişlerdir.
- Yapılan sonlu elemanlar çalışması, deneysel çalışma sonucunda bağlantı dayanımında artış gösteren her bir numunenin yapıştırıcı tabakasından meydana gelen gerilmelerde muazzam bir düşüş olduğunu (özellikle bağlantının dayanımında en etkili olan σ_y gerilmesinde) göstermiştir. Gerilmelerin azalması sonucu bağlantı dayanımında artış meydana gelmiştir. Bu da sonlu elemanlar analizi ile deneysel çalışmanın birbiri ile tutarlı olduğunu göstermektedir.

5.2. Öneriler

Mevcut çalışmada birleştirilen malzemeler üzerinde meydana getirilen çentik etkisiyle yapıştırıcı tabakasından gerilme yığılmaları çentik etrafına uzaklaştırılarak bağlantı dayanımında artış meydana getirilmiştir. Burada göz önünde bulundurulması gereken deneylerin statik yük altında yapılmış olmasıdır. Normalde neredeyse tüm sistemler dinamik yük altında çalışmaktadır. Dinamik yük altında alüminyum levhalara açılan çentiğin bağlantı üzerinde ne gibi bir etki yaratacağı bu yüzden önemli bir parametredir. Bir başka çalışmada plakalar üzerinde oluşturulan çentik etkisinin dinamik yük altında davranışı ve bağlantının dayanımına olan etkisi ayrı olarak incelenecektir.

KAYNAKLAR

ABAQUS. Finite element software (Version 6.14-Student Edition).

Andrue, R. H., Dillard, D. A. and Holzer, S. M., “Two-and three-dimensional geometrical nonlinear finite elements for analysis of adhesive joints”, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 21(1): 17-34 (2001).

Autodesk Inventor. 3D CAD Software. (Version 2016 Professional-Academic License)

Avila, A. F. and Bueno, P. D. O., “Stress analysis on a wavy-lap bonded joint for composites”, *International journal of adhesion and adhesives*, 24(5): 407-414 (2004).

Belingardi, G., Goglio, L. and Tarditi, A., “Investigating the effect of spew and chamfer size on the stresses in metal/plastics adhesive joints”, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 22(4): 273-282 (2002).

Beylergil, B., “Yapıştırılarak bağlantı sağlanan kompozit plakaların bağlantı performansının artırılması”, Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi, *Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Niğde, 2010.

Bigwood, D.A. and Crocombe, A.D., “Elastic analysis and engineering design formulae for bonded joints”, *Int. J. Adhes. & Adhes.*, 9(4): 229-242 (1989).

Campilho, R. D. S. G., Pinto, A. M. G., Banea, M. D., Silva, R. F. and da Silva, L. F., “Strength improvement of adhesively-bonded joints using a reverse-bent geometry”, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 25(18): 2351-2368 (2011).

Chiu, S. H. J. and Chaudhuri, R. A., “A three-dimensional eigenfunction expansion approach for singular stress field near an adhesively-bonded scarf joint interface in a rigidly-encased plate”, *Engineering Fracture Mechanics*, 78(10): 2220-2234 (2011).

Creton, C., “Materials Science of Pressure-Sensitive Adhesives”, *Materials Science and Technology*, (1997).

da Silva, L.F.M., “Handbook of Adhesion Technology”, *Springer*, Heidelberg, 2-3 (2011).

Da Silva, L. F. and Adams, R. D., “Techniques to reduce the peel stresses in adhesive joints with composites”, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 27(3): 227-235 (2007).

Da Silva, L. F., Carbas, R. J. C., Critchlow, G. W., Figueiredo, M. A. V. and Brown, K., “Effect of material, geometry, surface treatment and environment on the shear strength of single lap joints”, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 29(6): 621-632 (2009).

da Silva, L.F.M., Lima, R.F., Teixeira, R.M. and Puga, A., “Closed-form solutions for adhesively bonded joints”, *Report of Project, University of do Porto, Portugal*, (2008).

da Silva, L.F.M., das Neves, P.J.C., Adams, R.D. And Spelt, J.K., “Analytical models of adhesively bonded joints-Part I: Literature Survey”, *Int. J. Adhes. & Adhes.*, 29: 319-330 (2009).

da Silva, L. F., Rodrigues, T. N. S. S., Figueiredo, M. A. V., De Moura, M. F. S. F. and Chousal, J. A. G., “Effect of adhesive type and thickness on the lap shear strength”, *The journal of adhesion*, 82(11): 1091-1115 (2006).

Davis, M. J., “A call for minimum standards in design and application technology for bonded structural repairs”, *Proc. Symp. On Composite Repair of Aircraft Structures*, Vancouver, 4-15 (1995).

Delale, F. and Erdogan, F., “Stresses in adhesively bonded joints: A closed-form solution”, *J. of Comp. Mat.*, 15(3): 1981.

Fu, M. and Mallick, P. K., “Fatigue of hybrid (adhesive/bolted) joints in SRIM composites”, *International journal of adhesion and adhesives*, 21(2): 145-159 (2001).

Gent, A. N. and Schultz, J., “Effect of wetting liquids on the strength of adhesion of viscoelastic material”, *The Journal of Adhesion*, 3(4): 281-294 (1972).

Gleich, D. M., Van Tooren, M. J. L. and Beukers, A., “Analysis and evaluation of bondline thickness effects on failure load in adhesively bonded structures”, *Journal of adhesion science and technology*, 15(9): 1091-1101 (2001).

Goland, M. and Reissner, E. “Stresses in cemented joints”, *J. of Applied Mechanics*, 11: 45-59 (1944).

Grant, L. D. R., Adams, R. D. and da Silva, L. F., “Experimental and numerical analysis of single-lap joints for the automotive industry”, *International journal of adhesion and adhesives*, 29(4): 405-413 (2009).

Guillemenet, J., Bistac, S. and Schultz, J., “Relationship between polymer viscoelastic properties and adhesive behaviour”, *International journal of adhesion and adhesives*, 22(1): 1-5 (2002).

Gunnion, A. J. and Herszberg, I., “Parametric study of scarf joints in composite structures”, *Composite structures*, 75(1): 364-376 (2006).

Gültekin, K., Akpınar, S. and Özel, A., “The effect of the adherend width on the strength of adhesively bonded single-lap joint: Experimental and numerical analysis”, *Composites Part B: Engineering*, 60: 736-745 (2014).

Hart-Smith, L.J., “Adhesive-bonded single-lap joints”, *NASA Report, California*, 1-116 (1973).

He, X., “A review of finite element analysis of adhesively bonded joints”, *Int. J. Adhes. & Adhes.*, 31: 248-264 (2011).

Her, S. C., “Stress analysis of adhesively-bonded lap joints”, *Composite structures*, 47(1): 673-678 (1999).

- Hu, P., Han, X., Da Silva, L. F. M. and Li, W. D., "Strength prediction of adhesively bonded joints under cyclic thermal loading using a cohesive zone model", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 41: 6-15 (2013).
- Kaye, R. H. and Heller, M., "Through-thickness shape optimisation of bonded repairs and lap-joints", *International journal of adhesion and adhesives*, 22(1): 7-21 (2002)
- Kinloch, A.J., "Adhesion and Adhesives Science and Tecchnology", *Chapman & Hall*, London, (1987).
- Kumar, S. B., Sridhar, I., Sivashanker, S., Osiyemi, S. O. and Bag, A., "Tensile failure of adhesively bonded CFRP composite scarf joints", *Materials Science and Engineering: B*, 132(1): 113-120 (2006).
- Lang, T. P. and Mallick, P. K., "The effect of recessing on the stresses in adhesively bonded single-lap joints", *International journal of adhesion and adhesives*, 19(4): 257-271 (1999).
- Li, G. and Lee-Sullivan, P., "Finite element and experimental studies on single-lap balanced joints in tension", *International journal of adhesion and adhesives*, 21(3): 211-220 (2001).
- Maugis, D. and Barquins, M., "Fracture mechanics and adherence of viscoelastic solids. In Adhesion and adsorption of polymers", *Springer*, US, 203-277.
- Minitab. Statistical software. (Version 17-Trial)
- Mortensen, F. and Thomsen, O. T., "Analysis of adhesive bonded joints: a unified approach", *Composites Science and Technology*, 62(7): 1011-1031 (2002).
- Nemeş, O., Lachaud, F. and Mojtabi, A., "Contribution to study of cylindrical adhesive joining", *Int. J. Adhes & Adhes.*, 26(6): 474-480 (2006)
- Ojalvo, I.U. and Eidinoff, H.L., "Bond thickness effect upon stresses in single-lap adhesive joints", *AIAA Journal*, 16(3): 204-211 (1978).
- Oplinger, D.W., "Effects of adherend deflections in single lap joints", *Int. J. Solids and Struct.*, 31(18): 2565-2587 (1994).
- Oterkus, E., Barut, A., Madenci, E., Smeltzer, S. S. And Ambur, D. R., "Bonded lap joints of composite laminates with tapered edges", *International journal of solids and structures*, 43(6): 1459-1489 (2006).
- Özel, A., Aydin, M. and Temiz, Ş., "The effects of overlap length and adherend thickness on the strength of adhesively bonded joints subjected to bending moment", *Journal of adhesion science and technology*, 18(3): 313-325 (2004).
- Özel, A., Yazici, B., Akpınar, S., Aydin, M. D. and Temiz, Ş., "A study on the strength of adhesively bonded joints with different adherends", *Composites Part B: Engineering*, 62: 167-174 (2014).

Panigrahi, S. K. and Pradhan, B., "Onset and growth of adhesion failure and delamination induced damages in double lap joint of laminated FRP composites", *Composite Structures*, 85(4): 326-336 (2008).

Reza, A., Shishesaz, M. and Naderan-Tahan, K., "The effect of viscoelasticity on creep behavior of double-lap adhesively bonded joints", *Latin American Journal of Solids and Structures*, 11(1): 35-50 (2014).

Rodriguez, R.Q., Paiva, W.P., Sollero, P., Albuquerque E.L. And Rodrigues, M.B., "Analytical and numerical tools for bonded joint analysis", *Mecanica Computacional*, 29: 7557-7569 (2010).

Sancaktar, E. and Simmons, S. R., "Optimization of adhesively-bonded single lap joints by adherend notching", *Journal of adhesion science and technology*, 14(11): 1363-1404 (2000).

Sawa, T., Liu, J., Nakano, K. and Tanaka, J., "A two-dimensional stress analysis of single-lap adhesive joints of dissimilar adherends subjected to tensile loads", *Journal of Adhesion Science and Technology*, 14(1): 43-66 (2000).

Sawa, T., Nakano, K. and Toratani, H., "A two-dimensional stress analysis of single-lap adhesive joints subjected to tensile loads", *Journal of adhesion science and technology*, 11(8): 1039-1056 (1997).

Sayman, O., "Elasto-plastic stress analysis in an adhesively bonded single-lap joint", *Composites Part B: Engineering*, 43(2): 204-209 (2012).

Soykok, I. F., "End geometry and pin-hole effects on axially loaded adhesively bonded composite joints", *Composites Part B: Engineering*, 77: 129-138 (2015).

Taguchi, G., "Introduction to quality engineering: designing quality into products and processes", (1986).

Tsai, M.Y. and Morton, J., "An evaluation of analytical and numerical solutions to the single-lap joint", *Int. J. Solids Struct.*, 31(18): 2537-2563 (1994).

Tsai, M.Y. and Morton, J., "The effect of a spew fillet on adhesive stress distributions in laminated composite single-lap joints", *Composite Structures*, 32(1): 123-131 (1995).

van Ingen, J.W. and Vlot, A., "Stress analysis of adhesively bonded single lap joints", *LR-740, TUDelft*, 1-85 (1993).

Volkersen, O., "Die Nietkraftverteilung in zugbeanspruchten Nietverbindungen mit konstanten Laschenquerschnitten", *Luftfahrtforschung*, 15: 41-47 (1938).

Wang, R. X., Cui, J., Sinclair, A. N. and Spelt, J. K., "Strength of adhesive joints with adherend yielding: I. analytical model", *The Journal of Adhesion*, 79(1): 23-48 (2003).

Xu, W. and Wei, Y., "Influence of adhesive thickness on local interface fracture and overall strength of metallic adhesive bonding structures", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 40: 158-167 (2013).

Zhao, X., Adams, R. D. and Da Silva, L. F. M., “Single lap joints with rounded adherend corners: stress and strain analysis”, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 25(8): 819-836 (2011).

Zou, G. P., Shahin, K. and Taheri, F., “An analytical solution for the analysis of symmetric composite adhesively bonded joints”, *Composite Structures*, 65(3): 499-510 (2004).



ÖZGEÇMİŞ

14.04.1990 tarihinde Ankara'da doğdum. 2004 yılında Niksar İlköğretim okulunu, 2008 yılında Niksar Anadolu Lisesini bitirdim. Aynı yıl kazandığım Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünden 2013 yılında mezun oldum. 2014 yılında Erzincan Üniversitesi Makine Mühendisliği Mekanik Anabilim dalında araştırma görevlisi olarak çalışmaya başladım. Aynı yıl Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim dalında yüksek lisansa başladım. Halen aynı yerde yapılandırma bağlantıları üzerine çalışmalarına devam etmekteyim. Evli ve bir çocuk babasıyım.