



T.C.
KAHRAMANMARAŞ SÜTÇÜ İMAM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

2024 AL LEVHALARIN CAM-ELYAF KOMPOZİT YAMA İLE TAMİRİ

CAN CANBOLAT

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KAHRAMANMARAŞ 2018

T.C.
KAHRAMANMARAŞ SÜTÇÜ İMAM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**2024 AL LEVHALARIN CAM ELYAF
KOMPOZİT YAMA İLE TAMİRİ**

CAN CANBOLAT

Bu tez,
Makine Mühendisliği Anabilim Dalında
YÜKSEK LİSANS
derecesi için hazırlanmıştır.

KAHRAMANMARAŞ 2018

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü öğrencisi Can CANBOLAT tarafından hazırlanan "2024 Al Levhaların Cam-Elyaf Kompozit Yama ile Tamiri" adlı bu tez, jürimiz tarafından 19/06/2018 tarihinde oy birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi Abdullah ŞİŞMAN (DANIŞMAN)
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi

Doç. Dr. Muharrem İMAL
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi

Doç. Dr. M. Yavuz SOLMAZ
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Fırat Üniversitesi

Yukarıdaki imzaların adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylım.

Doç. Dr. Mustafa ŞEKKELİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orjinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

.....
Can CANBOLAT

Bu çalışma Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir.

Proje No:2015/2-16 YLS

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

2024 AL LEVHALARIN CAM-ELYAF KOMPOZİT YAMA İLE TAMİRİ

Can CANBOLAT
(YÜKSEK LİSANS TEZİ)

ÖZET

Bu çalışmada, özellikle havacılık ve otomotiv sektöründe çok kullanılan Al 2024 T3 levhaların hasar durumunda kompozit yamalar vasıtasıyla tamiri incelenmiştir. Bu amaçla Al 2024 T3 levhalara eliptik hasarlar açılmış ve bu hasarlı levhalar ile cam epoksi kompozit yamalardan, 3M DP460 epoksi yapıştırıcı malzemesi kullanılarak, tek taraflı ve çift taraflı bindirme bağlantıları oluşturulmuştur. Eğilme yükü altında hasar yükleri ve gerilme davranışları deneysel ve nümerik olarak incelenerek hasarlı Al 2024 T3 levhaların kompozit yama ile tamirinin başarısı değerlendirilmiştir.

Yapılan çalışmada, eliptik hasar boyutları ve yama bindirme sayısı değişiminin eğilme hasar yükleri ve gerilme davranışlarına etkisi incelenmiştir. Nümerik analizlerde ANSYS 19.0 programı kullanılarak hasar yükleri bulunup, kritik hatlar belirlenerek, bu hatlar boyunca numuneler üzerindeki σ_x , σ_y , τ_{xy} ve σ_{vm} gerilme dağılımları incelenmiş ve deneysel analizler sonucunda elde edilen hasar yükleri ve hasar mekanizmaları ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, ortalama %95 yakınsama sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kompozit Yama, Al 2024 T3, Hasar Yükleri, Tek Taraflı Bindirme Bağlantıları, Çift Taraflı Bindirme Bağlantıları, Gerilme Dağılımları

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Haziran / 2018

Danışman: Dr. Öğretim Üyesi Abdullah ŞİŞMAN

Eş Danışman: Prof. Dr. Metin KÖSE

Sayfa Sayısı: 86

REPAIRMENT OF AL 2024 T3 PLATES BY MEANS OF FIBERGLASS COMPOSITE PATCHES

Can CANBOLAT
(M.Sc. THESIS)

ABSTRACT

In this study, repairment of damaged Al 2024 T3 plates which are mostly used in aerospace and automobile industry by using composite patches have been investigated. For this purpose elliptical damages are made on Al 2024 T3 plates. Then by using this damaged plates and fiberglass epoxy composite patches, single lap and double lap joints have been composed by means of 3M DP460 epoxy adhesive. By examining the failure loads and stress behaviours under the bending forces experimentally and numerically, the success of repairment of damaged Al 2024 T3 plates by means of composite patches have been evaluated.

In this work, the effect of change on the dimensions of the elliptical damages and lap numbers on bending failure loads and stress behaviours are investigated. In numerical analyses by using ANSYS 19.0 software, failure loads have been found, critical lines have been determined and on these lines σ_x , σ_y , τ_{xy} and σ_{vm} stress distributions have been examined and those have been compared with experimental failure loads and failure mechanisms.

Keywords : Composite patch, Al 2024 T3, Failure loads, Single Lap Joints, Double Lap Joints, Stress Distributions

University of Kahramanmaraş Sutcu İmam
Graduate School of Natural and Applied Science
Department of Mechanical Engineering, June/2018

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Abdullah ŞİŞMAN

Co-Supervisor: Prof. Dr. Metin KÖSE

Number of Pages: 86

TEŞEKKÜR

Danışman Hocalarım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Abdullah ŞİŞMAN ve Prof. Dr. Mehmet Metin KÖSE'ye, her konuda yardımını ve desteğini esirgemeyen KÇS K.Maraş Çimento Beton ve Mad.İşl.A.Ş. Genel Müdürümüz Sn. Mustafa ERBALTACI'ya, her konuda destek sağlayan Doç. Dr. M. Yavuz SOLMAZ'a, ANSYS çalışmalarında verdiği destekten ötürü Mak. Müh. Osman AHLATLI'ya, Nümerik çalışmalarda yardımlarını esirgemeyen Mak. Müh. Mustafa ASLANTÜRK ve Mak. Müh. Mehmet RAMAZANOĞLU'na, maddi, manevi desteklerini benden esirgemeyen AİLEME teşekkürlerimi sunuyorum.

Can CANBOLAT

İÇİNDEKİLER

ÖZET	I
ABSTRACT	II
TEŞEKKÜR	III
İÇİNDEKİLER	IV
ŞEKİLLER DİZİNİ	VII
ÇİZELGELER DİZİNİ	X
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	XI
1. GİRİŞ	1
1.1. Önceki Çalışmalar	2
2. GENEL BİLGİLER	7
2.1. Hafif Metaller	7
2.1.1. Alüminyum	7
2.1.1.1. Al 2024 T3	8
2.2. Kompozit Malzemeler	9
2.2.1. Cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler	12
2.3. Yapıştırma Bağlantıları	13
2.3.1. Yapıştırma bağlantılarının avantajları ve dezavantajları	14
2.3.2. Yapıştırıcı Çeşitleri	15
2.3.2.1. Kimyasal tipleri açısından yapıştırıcılar	15
2.3.2.1.1. Fiziksel değişim ile sertleşen yapıştırıcılar	15
2.3.2.1.2. Kimyasal reaksiyon ile sertleşen yapıştırıcılar	16
2.3.2.2. Formları Açısından Yapıştırıcılar:	17
2.3.2.3. Epoksi yapıştırıcılar	18
2.3.3. Yapıştırma birleştirmeleri	18
2.3.3.1. Yapıştırma birleştirmelerinin dayanımını etkileyen faktörler	18
2.3.3.1.1. Yüzey hazırlığı	18
2.3.3.1.2. Yapıştırıcının termal özellikleri	19
2.3.3.1.3. Camsı geçiş sıcaklığı	20
2.3.3.1.4. Çalışma ortam koşulları	21
2.4. Eğme Deneyi	21
2.4.1. Üç Nokta Eğme Deneyi	22
2.5. Sonlu Elemanlar Metodu	24
2.5.1. Ansys	25
3. MATERYAL ve YÖNTEM	27
3.1. Tamir Edilecek Malzeme	27
3.2. Yama Malzemesi	28
3.3. Yapıştırıcı Malzeme	29
3.4. Deney Numunelerinin Hazırlanması	30

3.5. Deneysel Hasar Yüklerinin Belirlenmesi	34
3.6. Nümerik Analiz.....	34
4. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	39
4.1. Deneysel Bulgular.....	39
4.1.1. Hasarsız yamasız numunelerin hasar yükleri.....	41
4.1.2. Hasarlı numunelerde eliptik hasar boyutları değişiminin deneysel hasar yüklerine etkisi.....	42
4.1.2.1. Hasarlı yamasız numunelerde eliptik hasar boyutlarının hasar yüklerine etkisi.....	42
4.1.2.1.1. Hasarlı yamasız numunelerde eliptik hasar büyük çapının hasar yüklerine etkisi.....	42
4.1.2.1.2. Hasarlı yamasız numunelerde eliptik hasar küçük çapının hasar yüklerine etkisi.....	43
4.1.2.2. Tek bindirmeli yamalı numunelerde eliptik hasar boyutlarının hasar yüklerine etkisi.....	44
4.1.2.2.1. Tek bindirmeli yamalı numunelerde eliptik hasar büyük çapın hasar yüklerine etkisi.....	44
4.1.2.2.2. Tek bindirmeli numunelerde eliptik hasar küçük çapın hasar yüklerine etkisi.....	46
4.1.2.3. Çift bindirmeli yamalı numunelerde eliptik hasar boyutlarının hasar yüklerine etkisi.....	47
4.1.2.3.1. Çift bindirmeli yamalı numunelerde eliptik hasar büyük çapının hasar yüklerine etkisi.....	47
4.1.2.3.2. Çift bindirmeli yamalı numunelerde eliptik hasar küçük çapının hasar yüklerine etkisi.....	48
4.1.3. Bindirme sayısının deneysel hasar yüklerine etkisi	49
4.2. Nümerik Bulgular	51
4.2.1. Eliptik hasar boyutları değişiminin nümerik gerilme dağılımlarına etkisi.....	53
4.2.1.1. Yamasız numunelerde eliptik hasar boyutlarının nümerik gerilme dağılımlarına etkisi.....	53
4.2.1.1.1. Yamasız numunelerde elips büyük çapının nümerik gerilme dağılımlarına etkisi	53
4.2.1.1.2. Yamasız numunelerde elips küçük çapının nümerik gerilmelere etkisi.....	56
4.2.1.2. Tek Bindirmeli Numunelerde Eliptik Hasar Boyutunun Hasar Yüklerine Etkisi	58
4.2.1.2.1. Tek Bindirmeli Numunelerde Elips Büyük Çapın Değişime Etkisi.....	58
4.2.1.2.2. Tek Bindirmeli Numunelerde Elips Küçük Çapın Değişime Etkisi.....	61
4.2.1.3. Çift Bindirmeli Numunelerde Eliptik Hasar Boyutunun Hasar Yüklerine Etkisi	64
4.2.1.3.1. Çift Bindirmeli Numunelerde Elips Büyük Çapın Değişime Etkisi.....	64
4.2.1.3.2. Çift Bindirmeli Numunelerde Elips Küçük Çapın Değişime Etkisi.....	66
4.2.2. Bindirme sayısının nümerik hasar yüklerine etkisi	69
4.3. Yüklerin ve Gerilmelerin Karşılaştırılması	71

4.3.1. Deneysel hasar yüklerinin karşılaştırılması	71
4.3.1.1. Büyük ve küçük çap değişimlerinde bindirme sayısının deneysel hasar yüklerine etkisi	71
4.3.2. Nümerik gerilmelerin karşılaştırılması.....	73
4.3.2.1. Büyük çap değişimlerinde bindirme sayısının gerilmelere etkisi	73
4.3.2.2. Küçük çap değişimlerinde bindirme sayısının gerilmelere etkisi	75
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	78
5.1. Deneysel Sonuçlar.....	78
5.2. Nümerik Sonuçlar	80
KAYNAKLAR.....	82
ÖZGEÇMİŞ.....	86



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Cam Elyaf Üretimi	12
Şekil 2-2. Yapıştırıcıların değişik sıcaklıklarda kayma gerilmelerine etkisi(Mata ve Ark.2008)	20
Şekil 2.3. Üç nokta eğme deneyinin şematik gösterimi (a) ve Formüller (b)	23
Şekil 3.1. (a) Al 2024 T3 Levhalar, (b) Malzemenin Gerilme- Şekil Değiştirme Grafiği[43]	28
Şekil 3.2. 60x40 mm, 4 tabakalı, 0-90° Fiber Yönlü Kompozit Yama Malzemesi.....	28
Şekil 3.3. (a) DP460 malzeme, (b) $\sigma - \epsilon$ grafiği [43],.....	30
(c) kurluşma zamanı (dk) – kurluşma sıcaklığı (°C) grafiği.....	30
Şekil 3.4. (a) Eliptik Delik Açılan Al 2024 T3 levha	31
Şekil 3.5. Kompozit yamalar, DP460 yapıştırıcı, yapıştırıcının tabancası üzerinde nozüle takılmış hali ve hasarsız ve eliptik hasarlı Al 2024 T3 malzemeler	32
Şekil 3.6. Hasarlı yamasız ve yama ile tamir edilmiş numuneler.....	33
Şekil 3.7. (a) Hasarlı yamasız, (b) Tek bindirmeli ve (c) Çift bindirmeli numuneler	33
Şekil 3.8. (a)Tek Bindirmeli ve (b)Çift bindirmeli Numunelerin Şematik Gösterimi.....	33
Şekil 3.9. ZWICK Roell Z100 Statik Test Cihazı	34
Şekil 3.10. Mesh (Ağ) yapısı.....	36
Şekil 3.11. Mesh (Ağ) yapısı.....	37
Şekil 3.12. Uygulanan Sınır Şartları ve Kuvvetler ile Düzgün Ağ Yapısı.....	38
Şekil 3.13. Nümerik Analizde incelenen AB ve BC gerilme hatları	38
Şekil 4.1. Hasarlı yamasız bir numune eğme cihazı çeneleri arasında yüke maruzken, üzerindeki yük ve sehim kaydedilirken.....	39
Şekil 4.2. Hasarsız yamasız numunelerin hasar yüküne etkisi.....	41
Şekil 4.3. Hasarlı yamasız numunelerde eliptik hasar büyük çap değişiminin hasar yüküne etkisi	42
Şekil 4.4. Hasarlı yamasız numunelerde eliptik hasar küçük çap değişiminin hasar yüküne etkisi	43
Şekil 4.5. Tek bindirmeli numunelerde eliptik hasar büyük çap değişiminin hasar yüküne etkisi	44
Şekil 4.6. Tek bindirmeli numunelerde eliptik hasar küçük çap değişiminin hasar yüküne etkisi	46
Şekil 4.7. Çift bindirmeli numunelerde eliptik hasar büyük çapının hasar yüküne etkisi ...	47
Şekil 4.8. Çift bindirmeli numunelerde eliptik hasar küçük çap değişiminin hasar yüküne etkisi	48
Şekil 4.9. 24-11 Numunelerde hasarlı yamasız, tek taraflı ve çift taraflı bindirmelerin hasar yüklerine etkisi.....	49
Şekil 4.10. Hasarsız yamasız bir numunenin 3 nokta eğilme deneyi sonrası tek bölgeden eğilerek hasara uğramış hali	50
Şekil 4.11. Hasarlı yamasız bir numunenin 3 nokta eğilme deneyi sonrası tek bölgeden eğilerek hasara uğramış hali	50
Şekil 4.12. Hasarlı tek bindirmeli yamalı bir numunenin 3 nokta eğilme deneyi sonrası 2 bölgeden eğilerek hasara uğramış hali	51
Şekil 4.13. Hasarlı çift bindirmeli yamalı bir numunenin 3 nokta eğilme deneyi sonrası 2 bölgeden eğilerek hasara uğramış hali	51
Şekil 4.14. Nümerik Analizde incelenen AB ve BC gerilme hatları.....	52
Şekil 4.15. ANSYS programı ile yapılan nümerik analiz sonrasında, 24 – 11 eliptik çaplı hasarlı numune üzerindeki kritik gerilme bölgeleri.....	52

Şekil 4.16. Hasarlı yamasız numunelerde elips büyük çapının σ_x gerilme dağılımına etkisi	53
54	
Şekil 4.17. Hasarlı yamasız numunelerde elips büyük çapının σ_y gerilme dağılımına etkisi	54
Şekil 4.18. Hasarlı yamasız numunelerde elips büyük çapının τ_{xy} gerilme dağılımına etkisi	54
Şekil 4.19. Hasarlı yamasız numunelerde elips büyük çapının σ_{vm} gerilme dağılımına etkisi	55
Şekil 4.20. Hasarlı yamasız numunelerde elips küçük çapının σ_x gerilme dağılımına etkisi	56
Şekil 4.21. Hasarlı yamasız numunelerde elips küçük çapının σ_y gerilme dağılımına etkisi	56
Şekil 4.22. Hasarlı yamasız numunelerde eliptik hasar küçük çapının τ_{xy} gerilme dağılımına etkisi	57
Şekil 4.23. Hasarlı yamasız numunelerde eliptik hasar küçük çapının σ_{vm} gerilme dağılımına etkisi	57
59	
Şekil 4.25. Tek bindirmeli numunelerde eliptik hasar büyük çapının σ_y gerilme dağılımına etkisi	59
Şekil 4.27. Tek bindirmeli numunelerde eliptik hasar büyük çapının σ_{vm} gerilme dağılımına etkisi	60
Şekil 4.28. Tek bindirmeli numunelerde eliptik hasar küçük çapının σ_x gerilme dağılımına etkisi	61
Şekil 4.29. Tek bindirmeli numunelerde eliptik hasar küçük çapının σ_y gerilme dağılımına etkisi	61
Şekil 4.30. Tek bindirmeli numunelerde eliptik hasar küçük çapının τ_{xy} gerilme dağılımına etkisi	62
Şekil 4.31. Tek bindirmeli numunelerde eliptik hasar küçük çapının σ_{vm} gerilme dağılımına etkisi	62
Şekil 4.33. Çift bindirmeli numunelerde eliptik hasar büyük çapının σ_y gerilme dağılımına etkisi	64
Şekil 4.34. Çift bindirmeli numunelerde eliptik hasar büyük çapının τ_{xy} gerilme dağılımına etkisi	65
Şekil 4.35. Çift bindirmeli numunelerde eliptik hasar büyük çapının σ_{vm} gerilme dağılımına etkisi	65
Şekil 4.36. Çift bindirmeli numunelerde eliptik hasar küçük çapının σ_x gerilme dağılımına etkisi	66
67	
Şekil 4.37. Çift bindirmeli numunelerde eliptik hasar küçük çapının σ_y gerilme dağılımına etkisi	67
Şekil 4.38. Çift bindirmeli numunelerde eliptik hasar küçük çapının τ_{xy} gerilme dağılımına etkisi	67
Şekil 4.39. Çift bindirmeli numunelerde eliptik hasar küçük çapının σ_{vm} gerilme dağılımına etkisi	68
Şekil 4.40. 24-11 numunede hasarsız yamasız, tek ve çift bindirmenin σ_x gerilme dağılımına etkisi	69
Şekil 4.41. 24-11 numunede hasarsız yamasız, tek ve çift bindirmenin σ_y gerilme dağılımına etkisi	69

Şekil 4.42. 24-11 numunede hasarsız yamasız, tek ve çift bindirmenin τ_{xy} gerilme dağılımına etkisi.....	70
Şekil 4.43. 24-11 Numunede Hasarsız Yamasız, Tek ve Çift Bindirmenin σ_{vm} Gerilme Dağılımına Etkisi	70
Şekil 4.44. Büyük çap değişimlerinde bindirme sayısının hasar yüklerine etkisi.....	71
Şekil 4.45. Küçük çap değişimlerinde bindirme sayısının hasar yüklerine etkisi.....	72
Şekil 4.46. Büyük çap değişimlerinde bindirme sayısının σ_x gerilmelerine etkisi.....	73
Şekil 4.47. Büyük çap değişimlerinde bindirme sayısının σ_y gerilmelerine etkisi.....	74
Şekil 4.48. Büyük çap değişimlerinde bindirme sayısının σ_{vm} gerilmelerine etkisi.....	74
Şekil 4.49. Küçük çap değişimlerinde bindirme sayısının σ_x gerilmelerine etkisi.....	75
Şekil 4.50. Küçük çap değişimlerinde bindirme sayısının σ_y gerilmelerine etkisi.....	76
Şekil 4.51. Küçük çap değişimlerinde bindirme sayısının σ_{vm} gerilmelerine etkisi.....	76



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1. Alüminyumun özellikleri [28]	7
Çizelge 2. Başlıca elemanların alüminyum alaşımlarına etkisi[28]	8
Çizelge 3. Al 2024 Alaşımlarının farklı standartlardaki gösterimi[29]	9
Çizelge 4. Al 2024 malzemenin ısı işleme göre mekanik özelliklerindeki değişim [31]	9
Çizelge 5. Al 2024 T3 Malzemenin Kimyasal Bileşimi [42].....	27
Çizelge 6. Al 2024 T3 Malzeme Mekanik Özellikleri [42]	27
Çizelge 7. Cam Elyaf Kompozit Yama Mekaniksel Özellikleri	29
Çizelge 8. DP460 Kürleşme Sıcaklık ve Karakteristikleri [44]	30
Çizelge 9. Numune Değerleri ve Parametreleri.....	31
Çizelge 10. Hasarsız Yamasız, Hasarlı Yamasız, Tek Taraflı Bindirmeli ve Çift Taraflı Bindirme Bağlantılarının Mesh (Ağ) Yapısında kullanılan node (düğüm) ve eleman sayıları	35
Çizelge 11. Her bir oryantasyon için elde edilen deneysel ve nümerik hasar yükleri, kıyaslaması ve hasar tipleri	40

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

E_x	: X yönündeki elastisite modülü
E_y	: Y yönündeki elastisite modülü
E_z	: Z yönündeki elastisite modülü
G_{xy}	: XY düzlemindeki kayma modülü
G_{xz}	: XZ düzlemindeki kayma modülü
G_{yz}	: YZ düzlemindeki kayma modülü
ν_{xy}	: XY düzlemindeki poisson oranı
ν_{xz}	: XZ düzlemindeki poisson oranı
ν_{yz}	: YZ düzlemindeki poisson oranı
D	: Elips büyük çap
d	: Elips küçük çap
R	: Elips büyük yarıçap
r	: Elips küçük yarıçap
H	: Yama Numunesinin Yüksekliği
W	: Yama Numunesinin Genişliği
θ	: AB hattı boyunca açı
L	: BC hattı boyunca 1 birimlik mesafe
σ_x	: X eksenindeki gerilmeler
σ_y	: Y eksenindeki gerilmeler
σ_z	: Z eksenindeki gerilmeler
τ_{xy}	: XY düzlemindeki kayma gerilmeleri
τ_{xz}	: XZ düzlemindeki kayma gerilmeleri
σ_{vm}	: Eş değer gerilmeler
A	: Lama merkezine üstten etkiyen kuvvetin uygulama bölgesi boyunca merkezden eğilme
B	: Yama bitim sınırından simetrik çift taraflı eğilme

1. GİRİŞ

Hafif metallerin ve kompozit malzemelerin kullanımı günümüzde giderek artmaktadır. Özellikle havacılık ve otomotiv sektöründe gün geçtikçe; hafiflik, düşük yakıt tüketimi, yüksek mukavemet, yüksek yorulma dayanımı, yüksek aşınma dayanımı ve bazı yerlerde üstün yüksek sıcaklık özelliklerinin önem kazanmasıyla, hafif metallerle birlikte kompozit yapılar çelik malzemelerin yerini almaktadır.

Kullanılan malzemelerin değişmesine yol açan gereksinimler, bu malzemelerin birleştirme ve tamir tekniklerinde de yeni metodların eski civata ve perçin gibi mekanik bağlantı elemanlarının yerini almasına yol açmaktadır.

Kompozitler içerisinde yapısal elemanlarda çok tercih edilen Elyaf Takviyeli Polimer Matrisli Kompozitlerin matris malzemesi olan epoksi vb. yapıştırıcılarda son yıllardaki gelişmelerle üstün yapıştırıcılar piyasaya sürülmüştür. Bu yapıştırıcıların geliştirilmesiyle, hem daha üstün özellikli kompozit malzemeler elde edilmiş hem de bu malzemelerin hafif metallerle birlikte kullanımında, bu yapıştırıcıların aynı zamanda birleştirme işlemlerinde de kullanılmasına geçilmiştir.

Yapıştırma ile birleştirmenin hafiflik, düzgün gerilme dağılımı, çentik etkisinin olmaması, üstün yorulma özellikleri, aynı zamanda sızdırmazlık işlevi de görmesi gibi avantajlarından dolayı endüstrinin bütün dallarında kullanımını hızla artmaktadır.

Hafif metallerin ve kompozit malzemelerin sıklıkla kullanılmakta olduğu uçak gövdeleri, otomotiv parçaları vb. yerlerde kuş çarpması gibi çeşitli darbeler, yorulma ömrü, mekanik titreşimler, sıcaklık faktörleri gibi birçok nedenlerden ötürü zaman zaman birçok hasar ile karşılaşabilmektedir. İlk olarak hasarlı bir yapının değişimi akılcı gibi gözükse de yüksek maliyet ve diğer etmenler nedeni ile hasarlı yapıların tamiri yapılmaktadır.

Alüminyum 2024 T3 malzemesi de özellikle havacılıkta ve otomotiv sektöründe sıklıkla kullanılmaktadır. Bu çalışmada bu malzemenin hasar durumunda yapıştırma bağlantıları vasıtasıyla kompozit yamalarla tamirinin başarısı incelenmiştir.

Bu amaçla Al 2024 T3 levhalara büyük yarıçapı ve küçük yarıçapı değişen eliptik hasarlar açılmış ve bu hasarlı levhalar ile cam epoksi kompozit yamalardan, 3M DP460 epoksi yapıştırıcı malzemesi kullanılarak, tek taraflı ve çift taraflı bindirme bağlantıları oluşturulmuştur. 3 nokta eğilme testi vasıtasıyla eğilme yükü altında hasar yükleri ve gerilme davranışları deneysel ve nümerik olarak incelenerek hasarlı Al 2024 T3 levhaların kompozit yama ile tamirinin başarısı değerlendirilmiştir.

Yapılan çalışmada, eliptik hasar boyutları ve yama bindirme sayısı değişiminin eğilme hasar yükleri ve gerilme davranışlarına etkisi incelenmiştir. Nümerik analizlerde ANSYS 19.0 programı kullanılarak hasar yükleri bulunup, kritik hatlar belirlenerek, bu hatlar boyunca numuneler üzerindeki σ_x , σ_y , τ_{xy} , σ_{vm} gerilme dağılımları incelenmiş ve deneysel analizler sonucunda elde edilen hasar yükleri ve hasar mekanizmaları ile karşılaştırılmıştır.

1.1. Önceki Çalışmalar

Adams ve Comyn (2000) çalışmalarında, yapıştırıcı ile birleştirmenin verimli olması için etmenleri incelemişlerdir. Kullanılan yapıştırıcı olarak bakıldığında güçlü ve başarılı olduğunu, ancak yüzey pürüzlülüğünün etkisinin giderilmediği takdirde birleştirmenin iyi sonuç vermeyeceğini ortaya koymuşlardır. [1]

Sawa vd. (2000) çalışmasında, çekme yüküne maruz farklı yapıştırıcılar ile yapıştırma bağlantıları sağlanarak oluşturulan tek taraflı bindirme bağlantılarının elastisite teorisi baz alınarak analiz işlemini gerçekleştirmiştir. Lama ile yama malzemesi arasında oluşan gerilme dağılımları kontrol edilmiş ve yapıştırılan malzeme(yama) ile Kullanılan yapıştırıcı ve ana malzemenin elastisite modüllerindeki farklılıklar incelenmiştir. [2]

Seo ve Lee (2002) çalışmalarında, onarım görmüş plakaların çatlak yüzeylerinde lineer olmayan çatlak ilerlemesi, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak irdeleme yapılmıştır. Süregelen yük tesirindeki tek bindirmeli kompozit yama ile hasarı giderilmiş olan yapı çatlak yüzeyde bir eğrilik meydana getirdiği ortaya çıkarılmıştır. [3]

Xiao (2003) çalışmasında, tek ve çift katlı bindirmeler kullanarak yapmış olduğu kompozit yapıyı mekaniksel özelliklerini ele alarak deneysel açıdan incelemiştir. Gerilme testleri aşamasında kırılmadaki tepkimesini ortaya çıkarmak istemiş ve sonuçta çift bindirmeli birleştirmede tepkimenin lineer olmayan şekilde seyrettiği gözler önüne serilmiştir. [4]

Genç (2005), değişken yönlü tek taraflı bindirmeli olarak yapmış oldukları numuneye çekme ve eğilme (3 ve dört nokta) tabi tutmuş, yapılan deneylerde 3 nokta eğilme deneyinde düşük açılarda kopma plakada gerçekleşirken, 45°-90° aralığında açılarda yapıştırıcı ve yamadan koptuğunu gözlemlemiştir. Dört nokta eğilme testinde ise tam tersi bir durum yani düşük açılarda yapıştırıcı ve yamadan koptuğu, 45°-90° aralığındaki açı bandında ise plakadan koptuğunu gözlemlemiştir. Yapmış olduğu hasar analizinde, kullandığı malzemenin mekaniksel özelliklerinde yapmış olduğu durumsal

değişimden kaynaklı olması ve yapıştırıcının göstermiş olduğu özelliklerin lineer elastik olarak baz alınmasından kaynaklı kopma yükleri, deneysel verilerden daha düşük bir değer ortaya çıkarmıştır. [5]

Kweon (2006) çalışmasında, alüminyum ve kompozit malzeme ile yapılan çift bindirmeli yapılarda üç ayrı yapıştırma birleştirmeleri olarak hasar yükleri ve değişkenleri ortaya koyulmuştur. Alüminyum ve kompozit malzemenin birleştirilmesinde macun ve film tip iki ayrı yapıştırıcı kullanılarak, birleştirmenin mukavemetine olan etkileri hususunda inceleme yapılmıştır. [6]

Sabelkin, Avram ve Mall (2006) birlikte yapmış olduklarında çalışmalarında 3 adet Al 2024 - T3 ısıl işlem görmüş malzemelerin bir yüzeyinden kompozit yama ile yapıştırma şeklinde onarımı sağlanarak yapı içerisinde görülmüş olan yorulma çatlak ilerlemesinin tespiti ve davranışını izlemişlerdir. Yapıyırmada kullanılan boron elyaf epoksi malzemesi kullanımı sonucu azalan çatlak ilerleme hızıyla yapının ömründe iyileşme fark edilmiştir. [7]

Genç (2006), çalışmasında değişik üretim yöntemleri yoluyla elde edilen cam elyaf takviyeli plastiklere değinmiş ve üretim metodolojisi hakkında çeşitli bilgiler vermiştir. Numunelerde kalınlık sabit tutularak çekme, eğme gibi çeşitli deneylere maruz bırakılarak kırılma yüzeyleri irdelenmiştir. Üretimde elyaf oranının fazlalığı çekme mukavemetine sirayet etmekle birlikte darbe deneyi ve yüzey hassasiyetinde negatif etkilere sebep olduğu tespit edilmiştir. Bu da üretimdeki reçine elyaf oranında reçinenin nüfuzunun değişkenliğinin değişmesinden kaynaklanmaktadır. [8]

Yavuzyılmaz (2007), oda sıcaklığında ve onu takip eden sıcaklıklarda dairesel hasarlı olan fiber takviyeli kompozit malzemeye uygulanan elasto plastik analizi (Tsai Hill akma kriteri uygulanarak) ve deneysel olarak bunun sonuçlarını irdelenmiştir. Dayanımın sıcaklıkla orantılı artış gösterdiğini ortaya çıkarmıştır. [9]

Orhan (2007) çalışmasında, ıslak reçine sürme yöntemi ile üretilen cam ve elyaf kompozit malzemedен oluşan plakların dört tarafı ankastre mesnet ve basit mesnetli iki farklı sınır şartıyla birlikte yayılı yük altında maruz kaldığı gerilmeler araştırılmıştır. Plakların alt yüzeylerine strain gage konularak birim uzamalarını ölçmüşlerdir. İlk olarak plaklar için lineer statik analizler gözlemlenmiş ve birim uzamaların etkisi incelenmiştir. Daha sonra da uygulanan yükün artışının kullandıkları plakların alt ve üst yüzeylerindeki davranışları ve bu davranışların etkileri gözlemlenmiştir. [10]

Dinç (2007), farklı geometrik şekilli malzemelerden üretilen levhalar ve değişken boyutlardaki yapıştırıcı bağlantılarla elde edilen yapıya uygulanan gerilmeler sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir. [11]

Brown vd. (2010) çalışmasında, PP ve cam elyaf kumaştan mal edilen kompozit malzemenin çekme, basma ve darbe deneylerinde göstermiş olduğu gerilmeler konusunda incelemede bulunmuşlardır. [12]

Özdemir (2010) çalışmasında, otomotiv sektöründe önemli yer tutan hafif metaller (Alüminyum, Magnezyum ve Titanyum) malzemelerle yapılan üretim yöntemleri ve teknik yönleri ile ilgili araştırmalara yer vermiştir. [13]

Koçer (2010) çalışmasında, epoksi örgülü kompozit malzemenin mekanik özelliklerinin belirlenmesine çalışılmış ve farklı fiber yapısının gerilme dağılımlarına etkisi Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılarak araştırılmıştır. [14]

Razmi (2011) çalışmasında, civata, yapıştırıcı ve perçin gibi değişik bağlantı metotları kullanılarak birleştirmeler göz önüne alındığında yapıştırıcı ile birleştirme metodunun pratik ve uygulanabilirliği en kolay olduğu gözlemlenmiştir ve bu bağlantı metodunda gerilmelerin dağılımlara etkisi incelenmiştir. [15]

Gül (2011), çalışmasında dikdörtgen şeklindeki kompozit levhaya değişken sınır şartlarında, değişken yükler uygulanıp; levhanın plaka boyunca vermiş olduğu mekaniksel tepkiler sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. [16]

Türkmen (2012), farklı sayıdaki cam elyaf tabakasına sahip, iki farklı üretim yöntemi ile hazırlanmış cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler mekaniksel açıdan değerlendirmeye tabi tutulmuştur. Çalışmasında iki farklı üretim metodu (elle yatırma ve reçine transfer kalıplama) ile elde etmiş oldukları kompozit malzemelerin çekme ve eğilme testleri yapılarak mukavemet değerlerini tespit etmiştir. Reçine ve cam elyaf takviyeli kompozit malzemedeki hasar ve hasarın meydana getirmiş olduğu deformasyon test sonrası görüntüler vasıtasıyla incelenmiştir. Elyaf tabakasının farklılığı ve üretim metodolojisinin değişimine göre kompozit malzemenin mekanik özelliklerinin değişkenlik gösterdiği deneysel ve teorik sonuçlarda ortaya çıkmıştır. [17]

Ekşi (2013), çalışmasında T5 ısı görmüş haldeki Al 6063 malzemenin eğilme gerilme davranışı deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Farklı takviye elemanları kullanılarak tasarlanan kompozit kirişlerin 3 nokta eğme deneyi vasıtasıyla eğme yetkinlikleri incelenmiştir. [18]

Korkmaz (2013) çalışmasında, değişken boyutlardaki alüminyum levhanın sabit kalınlıktaki çift taraflı yapıştırıcı bant vasıtası ile yapıştırma bağlantısı oluşturularak levha kalınlığının, bant boyutunun ve uzunluğunun dinamik özelliklere etkisi araştırılmıştır. Aynı kalınlıkta yapıştırma uygulama alanı arttıkça sönüm oranının da arttığı gözlemlenmiştir. [19]

Köksal (2013), çalışmasında farklı sıcaklıklar ve farklı yükler etkisindeki kompozit levhaya uygulanan yükler ve gerilmeler sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Bu çalışmada öncelikle malzemenin sadece çekme kuvvetine göstermiş olduğu tepki, ardından sadece sıcaklık etkisinde göstermiş olduğu tepkiler son olarak da hem sıcaklık hem de uygulanan çekme yüküne tepkileri araştırılmıştır. [20]

Topal (2014) çalışmasında, katlı olarak elle yatırma yöntemi ile yapılan kompozit plakaların üzerine dairesel delik açılmak sureti ile plakaların burkulma davranışları incelenmiştir. Farklı delik çaplarında ve fiber dağılımında, farklı kritik yüklerde, farklı etkiler göstermektedir. [21]

Ergün (2014), DP460 epoksi yapıştırıcı vasıtasıyla değişken eliptik hasarlı Al 5083 levhanın cam elyaf kompozit vasıtasıyla hasar tamiri yapılarak çekme yüküne karşı gösterdiği hasar yükleri ve gerilme davranışları sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak deneysel ve nümerik olarak karşılaştırılmıştır. Çalışmasında alüminyum levha ve yapıştırıcı üzerindeki kritik hatlar belirlenerek, gerilme ve hasar yükleri incelenmiştir. [22]

Bilgi (2014) çalışmasında, Al 2024 iki farklı numune olmak üzere birine hiçbir yapıştırma kanalı uygulanmadan epoksi yapıştırıcı E şeklinde uygulamışken diğerine de I şeklinde yapıştırma kanalı açılıp epoksi yapıştırıcı tatbik edilerek ince film tabaka karakterizasyonuna tabi tutulmuş ve sonuçları gözlemlenmiştir. Yapışmayan bölgeler net olarak görülmüştür. Yüzeyden elde edilen sıcaklık motivasyonunun daha belirgin oluşması için daha fazla ısıtılması gerektiği öngörülmüştür. [23]

Özer (2015), otomotiv sektöründe kullanımını arttırmak ve araçların ağırlığında ciddi oranda azalma sağlamak amacıyla üretilmiş olan cam elyaf takviyeli malzemeler çekme, basma, kayma, eğme ve darbe deneylerine tabi tutulmuş ve mekanik özellikleri elde edilmiştir. Yapılan deneyler neticesinde poliamid matrisli TPC malzemelerde basmada deformasyonlar görülmekle birlikte, darbe deneyinde ve kaymada en yüksek mukavemet değerleri dikkat çekmiştir. [24]

Kahvecioğlu (2016) alışmasında, cam elyaf takviyeli kompozit malzeme cıvata bağlantısı kullanılarak birleştirilme yapılma sureti ile farklı yapıştırma ve farklı sıkma torklarında mevcut yapıya çekme yükü altında gösterdiği hasar davranışları deneysel olarak incelenmiştir. [25]

Saylık (2016), entik hasar boyu ve genişliği baz alınarak tek ve çift taraflı olarak epoksi yapıştırıcı ile yapıştırılmak sureti ile iki ayrı tamir işlemi görmüştür. Bu numuneler daha sonra çekme deneyine tabi tutulmuş olup; yamasız alüminyum levhanın çentik hasar genişliğinin azalması ile uygulanan maksimum yüke dayanımının arttığı gözlemlenmiştir. Tek taraflı bindirme yapılan numunelerde çentik genişliği az olan levhanın daha fazla yüke dayandığı ve en fazla uzama değerine sahip olduğu görülmüştür. Çift taraflı bindirmelerde ise çentik boyları sabit olmak üzere ve çentik genişlikleri sabit olmak üzere ayrı ayrı incelenmiştir. Bu bağlamda çentik boyları sabit iken çentik genişliği kkk olan numunenin maksimum yüke dayandığı ve maksimum uzama gösterdiği ortaya çıkmıştır. entik genişlikleri sabit iken ise çentik boyları azaldıkça maksimum yüke dayanım gösterdiği ortaya çıkmıştır. [26]

Puhurcuoğlu (2017) alışmasında, vakum infüzyon yöntemi ile üretilen sandviç kompozit malzemeleri yapıştırma ile birleştirme yaparak üç nokta eğme deneyi uygulayıp eğilme davranışlarını ve gerilmelerini incelemiş, maksimum kuvvete karşılık gelen deplasmanlarını belirlemiştir. [27]

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Hafif Metaller

Hafif Metallere baktığımızda;

- Alüminyum
- Magnezyum,
- Titanyum,
- Berilyum,

Bu gruba girmektedir. Bu çalışmada Alüminyum ve alaşımları üzerinde detaylı duracağız.

2.1.1. Alüminyum

Alüminyum, çeliğin özgül ağırlığının, yaklaşık olarak 1/3'ü değerinde özgül ağırlığı olan gümüşü beyaz renktedir ve havada yüzey koruyucu bir oksit tabakası ile kaplanır; elektrik iletkenliği iyi olmakla birlikte (Bakırın %65'i kadar) ve iyi bir ısı iletkenidir.

Çizelge 1. Alüminyumun özellikleri [28]

Formülü	Al
Yoğunluk	2,78 g/cm ³
Ergime Derecesi	658 °C
Çekme Mukavemeti	
-Yumuşak Tavlanmış	65 N/mm ²
-Sert Haddelenmiş	125-190 N/mm ²
Uzama	%35

Alüminyum haddelenebilir, çekilir, preslenir, dökülür, kaynaklanır, lehimlenir ve talaş kaldırma ile işlenebilir. Ayrıca ağır ve hafif metallerle alaşım yapabilir. Çok az Cu (Bakır), Mn (Mangan) ve Mg (magnezyum) katılmasıyla sertlik ve mukavemet değerleri çok yükselir. Saf Alüminyumun çekme dayanımı yaklaşık 49 MPa iken alaşımlandırıldığında bu değer 700 MPa'la kadar çıkabilmektedir.

Alüminyum genel manada; hafiflik esas alan araçların yapımında (uçak, otomobil, bisiklet, vs.) soğutucu yapımında, spot ışıklarda, mutfak gereçleri yapımında kullanılır. Kolay soğuyup ısıyı absorbe eden bir metal olması sebebi ile soğutma ve ısıtma sanayiinde geniş bir kullanım alanına sahiptir.

Bakırdan daha ucuz ve daha çok bulunması, işlenme kolaylığı ve yumuşak olması, bilhassa ağırlığının az olması, yüksek korozyon dayanımı gerektiren, iyi işlenebilir, ucuz malzeme olması nedeniyle birçok sektörde kullanılmaktadır.

Alaşım elemanları ile Alüminyumun mukavemet ve korozyon dayanımı gibi özellikleri büyük ölçüde değiştirilebilir. Başlıca elemanların etkileri Çizelge 2'deki şekilde özetlenebilir.

Çizelge 2. Başlıca elemanların alüminyum alaşımlarına etkisi[28]

	Mg	Cu	Si	Zn	Mn	Pb
Mukavemet	++	++	+	++	+	0
Korozyon Dayanımı	++	-	++	-	++	0
Dökülebilirlik	+	0	++	0	0	0
Talaş Kaldırma	+	0	+	+	-	++

(++ : Çok iyi, + : İyi, 0 : Etkisiz, - : Negatif Etki)

Dökümden sonra uygulanabilecek ısı işlemler vasıtasıyla parçalar sertleştirilerek daha mukavim hal alabilir. Bilhassa Cu, Zn, Mg+Si veya Mg+Zn katkısıyla yüksek mukavemetlere erişilebilir. [28]

2.1.1.1. Al 2024 T3

Bu malzemenin genel özelliği, hafifliğinin yanı sıra, üstün mekanik özellikleri, işlenebilirliği ve yüzey düzleme kabiliyetinin yüksek olmasıdır. Kullanım alanı olarak baktığımızda özellikle havacılık sektöründe uçak gövdelerinde ve kanatlarında (Mukavemet ve elastisite modülü gerektiren yerlerde), otomotiv sanayinde, makine parçaları imalatında yaygın olarak kullanılmaktadır. Çizelge 3'de de 2024 Alüminyum alaşımının farklı standartlardaki isimleri gösterilmektedir.

Çizelge 3. Al 2024 Alaşımlarının farklı standartlardaki gösterimi[29]

Malzeme	Türkiye	Etibank	ABD	Almanya	Fransa	İtalya	ISO	İngiltere
2024	TSE	ETİNORM	SAE/AISI	DIN	AFNOR			BS
	AlCuMg2	ETİAL24	AA2024	AlMgCu2	A-U4G1	P-AlCu4.5MgMn	AlCu4Mg1	L97

Duralümin olarak da bilinen Al 2024 Alaşımı, alüminyum alaşımları içerisinde en sert, elastisite modülü ve mukavemet değerleri en yüksek olanlarından biridir. 2024 Al alaşımına ısıtılma işlemi uygulama vasıtası ile mekanik özelliklerinde artış sağlanabilmektedir. [29] Bu alaşımın iyi olan fiziksel ve mekanik özelliklerine karşılık korozyona olan dayanımı zayıf kalmaktadır[30]. Çizelge 4’de Al 2024 malzemenin ısıtılma işlemi göre mekanik özelliklerindeki değişim gösterilmektedir.

Çizelge 4. Al 2024 malzemenin ısıtılma işlemi göre mekanik özelliklerindeki değişim [31]

Temper	Akma Mukavemeti (MPa) min-max	Çekme Mukavemeti (MPa) min-max	Uzama -50% min-max	Sertlik (brinel) min-max
0	75	185	20	55
T3	340	475	18	120
T6	230-300	310-395	10--12	110
T8	275-315	370-420	10--12	115

2.2. Kompozit Malzemeler

Kompozit malzeme, belirli bir amaca yönelik iki veya daha fazla malzemenin birbirleriyle karışım (çözelti) oluşturmadan birleşimi ile sinerjik etki oluşturarak, başlangıç malzemelerinden daha iyi özellikte amaca yönelik özellikler elde edilen malzeme grubudur. Üç boyutlu nitelikteki bu bir araya getirmedeki amaç bileşenlerin hiçbirinde tek başına mevcut olmayan özelliklerin elde edilmesidir. Diğer bir deyişle, amaçlanan doğrultuda bileşenlerden daha üstün özelliklere sahip bir malzeme üretilmesi hedeflenmektedir[32].

Çok yönlü ürün olması, verimliliği artırıcı olması ve sorunlara çözüm sunan çok amaçlı malzemeler olması sebebi ile birçok fayda sağlamaktadır. Bu nedenle tasarımından tutun da test-Ar-Ge aşaması ve üretimine kadar bütün proseslerinde hassasiyet gerektirmesi

de doğaldır. Zaten bu anlatılanlar da malzemenin seçimi, üretim metodları, kalite kontrol gibi safhalarda ne denli dikkat ve hassasiyet gerektirdiğini göstermektedir. Bu malzemeler, malzemedan malzemeye değişmekle birlikte genel olarak:

- Düşük yoğunluk,
- Kolayca şekillenebilirlik,
- Yüksek mukavemet,
- Yüksek elastik modül yani rijitlik,
- Yüksek tokluk,
- Yüksek yorulma dayanımı,
- Boyutsal ve termal stabilite,
- Yüksek yüzey kalitesi,
- Tamir edilebilirlik,
- Tasarım esnekliği,
- Aşınmaya karşı yüksek dayanım,
- Yüksek dielektrik özelliği,
- Şeffaflık,
- Yanmazlık özelliğine sahip olması,
- Korozyon dayanımının yüksek olması,

gibi başlıca avantajlara sahiptirler.

Kompozit malzemelerin günümüzde gittikçe artan şekilde tercih edilmesinin ana sebebi şüphesiz sağlamlıkları ve hafiflikleridir. Ayrıca metallere nazaran yüksek malzeme yorulma özellikleri, malzeme üzerindeki hasarların minimize edilmesi ve korozyona dayanıklılık bakımından avantaj sağlamaktadır. Buna rağmen metallerin yerine tam olarak geçememesinin 4 ana sebebi vardır [33];

1. Bazı uygulamalarda ihtiyaç duyulan kritik seviyede ısısal ve mekanik özellikleri Titanyum ve Çelik grubu malzemeler kadar günümüz kompozitleri henüz sağlayamamaktadır.
2. Elyaf ve matrislerin tüm karakteriksel bazı özellikleri henüz metaller kadar bilinmemektedir.
3. Bazı komplike yapılar düşük maliyetler kullanılarak üretilmemektedir.
4. Alüminyum ve metallere oranla birim ağırlığa düşen kompozit maliyeti daha yüksektir.

Kompozit malzemeler genel olarak Matris fazı ve Takviye fazı olmak üzere iki kısımdan oluşur. Matris, takviye fazını çevreler, malzeme bütünlüğünü sağlar, dış etkilerden korur ve gelen yükü takviye fazına paylaştırarak bindirir. Takviye fazı ise sistemin ana yük taşıyıcısıdır.

Kompozit malzemeler matrislerine göre:

1. Polimer Matrisli Kompozit Malzemeler
2. Metal Matrisli Kompozit Malzemeler
3. Seramik Matrisli Kompozit Malzemeler

olmak üzere sınıflanabilir.

Günümüzde en çok kullanılan Elyaf Takviyeli Polimer Matrisli Kompozitlerdir. Bu kompozitlerden yapısal kompozitlerde matris olarak en çok bir termoset polimer grubu olan epoksiler kullanılmaktadır.

Epoksi reçineler genellikle iki komponentlidir. Epoksi ile birlikte sertleştiricisi de verilir. Epoksi sertleştirici ile karıştırıldığında belirli bir çalışma aralığı vererek katılaşmaya başlar. Bu aralıkta içerisine elyaf takviyelerin yerleştirilmesi veya elyafların epoksi ile yeterince ıslatılması gerekmektedir. Daha sonra sistem katılaşmaya bırakılır. Buna kürleşme denir. Oda sıcaklığında veya belirli daha yüksek sıcaklıklarda ve gerektiğinde basınç altında kürleştirilirler.

Epoksilerin avantajlarına baktığımızda iyi mekanik özelliklere sahip olması, suya dayanıklılığı, sertleşme sırasında düşük oranda çekme, yüksek aşınma direncine sahip olmaları gösterilebilir. Dezavantajı ise polyesterlere oranla pahalı olmalarıdır.

Elyaf Takviyeli Polimer Matrisli Kompozitlerde kullanılan elyaflar, üretim yöntemlerine göre ya sürekli olarak bobin tarzında ya da uçları birleştirilmiş veya dokunmuş kumaş tarzındadır.

Kompozit malzemelerde kullanılmakta olan elyaf türlerini incelediğimizde [33];

- Cam Elyafı,
- Karbon Elyafı,
- Aramid Elyafı,
- Bor Elyafı,
- Bazalt Elyafı,
- Oksit Elyafı,
- Yüksek yoğunluğa sahip polietilen elyafı,

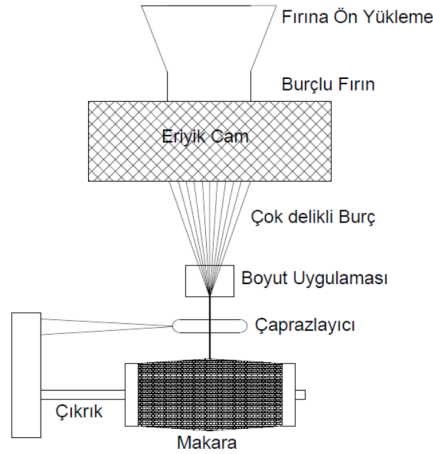
- Poliamid Elyafı,
 - Polyester Elyafı,
 - Doğal elyaflar,
- olarak sıralayabiliriz.

2.2.1. Cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler

Cam elyafı, silika, alüminyum oksit, soda, kolemanit gibi malzemelerden üretilir. Elyaf takviyeli kompozitler arasında en çok bilinmekle beraber en yaygın kullanımı barındırır.

Dibinde çok sayıda (100-1000 arası) küçük gözeneklerin olduğu, Şekil 2.1’de de gösterildiği üzere özel yapılmış ocak vasıtasıyla eritilmiş camın itilmesiyle meydana gelir. Meydana gelen ince liflerin yüksek hızda döndürülerek soğutulmasıyla makaralara sarılarak kompozit hammaddesine dönüştürülür. Cam elyaf ve matris arası birleşme gücünü ve film kaplama mukavemetini arttıran kimyasallardan sonra kullanım alanları artmıştır. Cam elyafının bazı türleri halen, aramid ve karbon elyaflarından daha yüksek bir dayanıklılığa sahiptir.

Bu işlemler sırasında farklı kimyasalların dahil edilmesi ve bazı özel yöntemler kullanılarak farklı cam elyafları meydana getirilebilmektedir[33];



Şekil 2.1. Cam Elyaf Üretimi

A Camı – Pencere ve Şişelerde,

C Camı – Depolama Tanklarında kullanılır. Yüksek kimyasal direnç gösterir.

E Camı – Takviye elyaflarında en yaygın üretime sahip olanıdır. Ucuz ve yüksek yalıtımlı olması, su emişinin az olması avantajlı kılar.

S+R Cam – Yüksek performanslı olmasına karşın pahalı bir malzemedir. Sadece uçak sanayiinde kullanılır.

Kullanım amaçlarına göre farklı elyaf sarma biçimleri olabilmektedir. Demetteki lif sayısı ve elyaf çapı değişkenlik gösterebilir. Cam elyafı biçimlendirilme aşamasından sonra dayanımı artırılma için kaplamaya tabi tutulur. Kaplama malzemesi olarak polimerler kullanılır. Elyaf ile reçinenin moleküler olarak yapışma gerçekleştirmesi son derece önem arz eder. Yapışmama dolaylı kayan matris ve takviye elemanı, kompozitin sertliğini ve dayanıklılık performansını tehlikeye sokar. Bu sebepten ötürü elyaf kimyasallar ile kaplanır. [33]

2.3. Yapıştırma Bağlantıları

Yapıştırma ile birleştirme, yapıştırıcı özelliklerinin iyileştirilmesi ile daha geleneksel birleştirme ve bağlantı özelliklerine farklı bir çözüm olarak yapısal bağlantılarda kullanılmaktadır. Bu sebepten ötürü yapıştırıcı özelliklerinin incelenmesi ve araştırılması birçok araştırmacı tarafından konu edilmiş, yapışma hakkında bu araştırmalardan değişik teoriler ortaya atılmıştır. Kısaca bu teorileri incelemek de fayda vardır.

Literatürde bahsi geçen belli başlı teorileri şu şekilde sıralayabiliriz [34]:

- Mekanik Teori: Yapıştırılan malzemeler ile yapıştırıcı fazının mekanik sel olarak birbirine temas etmesi ile yapışarak bileşenin meydana geleceğini ifade eder. Farklı aşındırma metodları ile yüzey pürürlülüğünü artırarak birleşme dayanımının maksimize hale getirilmesine rağmen bu tek bir mekanizma olarak görülmemektedir.
- Difüzyon Teorisi: İki faz arası molekül etkileşimini kabul eder. Bu olay benzer polimerler arasında gerçekleşmekle beraber, polimer ve metal arasında da sık da olmasa görülebilir.
- Adsorpsiyon Teorisi: Komşu yüzey molekülleri arasında oluşan Van der Waals bağlarının çekimiyle meydana geldiğini ortaya koyar. Bu kuvvetlerde iki mod ile ön plana çıkar. Bunlar şarj merkezlerin daimi olarak ayrılması ile oluşan dipoller ve

London Dispersive olarak nitelendirilen şarj merkezindeki moleküllerin ani yer değişiminden kaynaklı komşu molekülleri de etkileyen bir çekim alanı oluşturması sonucu ortaya çıkar.

- Elektrostatik Teori: Adsorpsiyon teorisi ile benzerliğe sahiptir. Elektriksel olarak yüklenmiş cisimleri ayrıştırmada kullanılır.
- Kimyasal Teori: Değişken şartlarda yapıştırıcı ile malzeme arasında daha fazla yüksek bağ dayanımının olabileceğini ifade eder.

Bu teoriler yapışma bağlantıları hakkında belli başlı bilgiler hakkında yol gösterir ama tümünü içinde barındıran bir teorinin olmadığı aşikârdır. Yapıştırıcının etkileşebilirliği bunlar arasında bağlantı ile veya diğer teoriler ile açıklanabilir.

Şimdiye kadar farklı çözüm teknikleri sunularak birçok sayıda çalışma ortaya çıkarılmıştır. Sınır şartları olması sebebi ile ortaya çıkan bazı zorluklar belli başlı kabuller baz alınarak yapılması sonucu sonlu elemanlar yöntemi ile problemlerin çözümü yapılmaktadır.

2.3.1. Yapıştırma bağlantılarının avantajları ve dezavantajları

Avantajları:

- Yapışma süreklidir. Düzgün bir dağılım oluşur.
- Yapıştırıcılar uygun sertleştiriciler ile karıştırıldığı takdirde hazırlık yapılan yüzeylere uygulandığında yüksek kayma gerilmelerine karşı mukavemet sağlayabilirler. Yapıştırıcı ile birleştirmelerde yapışmanın gerçek mukavemeti, yapılan yüzey pürüzlülüğü ve ön işlem uygulamalarına, yapışan parçanın geometrisine, çevresel faktörlere, kullanılan malzemelere ve özelliklerine bağlı olarak değişkenlik gösterebilir.
- Bağlantı elemanları ile yapılan birleştirmelerde en fazla çatlamanın ve gerilmenin en fazla olduğu yerler açılan deliklerdir. Yapıştırıcı ile birleştirmede bağlantı delikleri olmadığı için korozyon direnci de daha yüksektir.
- Bağlantı elemanları ile yapılan birleştirmelerde karşımıza çıkan düzensiz bağlantı hatları yapıştırma ile birleştirmede yerini düzenli hale almıştır.
- Birleştirme kabiliyeti olarak daha etkin bir yapıya sahiptir.
- Bağlantı elemanları ile yapılan birleştirmelerde ortaya çıkan gerilme yığılmalarının minimize olması ile yapıştırma yüzeyi boyunca daha homojen gerilme dağılımı ortaya çıkarılır.

- Darbelere karşı yüksek dayanıma sahiptir. Dolayısıyla yorulma direnci yüksektir. Titreşime karşı esneklik ve direnç kabiliyeti yüksektir.
- Yapıştırıcı ile birleştirmeler yüksek sıcaklığa ihtiyaç duymadığından malzeme mukavemetinde değişiklik meydana getirmez.
- Yapıştırıcı ile birleştirme aynı zamanda izolasyon ve sızdırmazlık görevi de üstlenir. Yüksek sönümlenme özelliğine sahiptir.
- Mukavemet/Ağırlık oranı uygundur.

Dezavantajları

- Soyulma gibi faktörlere bağlı oluşacak kopmadan ötürü farklı tasarım gerekliliği,
- Yüksek sıcaklık gibi ekstrem durumlarda yapıştırıcının göstermiş olduğu sınırlı direnç.

2.3.2. Yapıştırıcı Çeşitleri

Günümüzde kullanılmakta olan yapıştırıcıları iki ana başlık altında toplayabiliriz[34].

- ❖ Kimyasal Tipleri Açısından Yapıştırıcılar
- ❖ Formları Açısından Yapıştırıcılar

2.3.2.1. Kimyasal tipleri açısından yapıştırıcılar

Bu tip yapıştırıcıları iki ana başlıkta inceleyebiliriz.

- a) Fiziksel Değişim ile Sertleşen Yapıştırıcılar
- b) Kimyasal Reaksiyon ile Sertleşen Yapıştırıcılar

2.3.2.1.1. Fiziksel değişim ile sertleşen yapıştırıcılar

Diğer yapıştırıcılara oranla daha düşük yapışma mukavemetine sahip olan bu yapıştırıcılar, yapışal olmayan yapıştırıcılar olarak da bilinir.

Sanayide geniş kullanım alanı olmakla beraber çeşitlerini aşağıdaki şekilde sıralayabiliriz:

- Sıcak Eriyikler: Polimer esastır. Hafif yüklere maruz kalacak şekilde dizayn edilmiş yapıları çabuk birleştirmede kullanılırlar.
- Kauçuk Yapıştırıcılar: Eriyik esaslı olup; su ortamının ya da çözülmenin kaybolması ile sertleşirler. Yüke maruz kalan yapışmalar için uygun değildirler.

- Polivinil Asetatlar: Ağaç ve karbon gibi gözenekli malzemelerin yapışması için uygundur. Endüstride oldukça geniş kullanım ağına sahiptir.
- Başınç gerektirmeyen yapıştırıcılar: Teyp ve etiket için uygun olan yapıştırıcılar olup, kolaylıkla sertleşebilme özelliklerine rağmen çevre şartlarına bağlı olarak değişkenlik gösterebilirler.

2.3.2.1.2. Kimyasal reaksiyon ile sertleşen yapıştırıcılar

Bu sınıftaki yapıştırıcılar en güçlü olanlarıdır. Yapısal yapıştırıcılar olarak da bilinirler.

Bu sınıftaki yapıştırıcıları kısaca şu şekilde sıralayabiliriz:

1. Sertleştirilmiş Akrilikler

Akriliklerin modifikasyon görmüş hali diyebileceğimiz bu tip yapıştırıcılar, çok kısa sürede sertleşebilme özelliğine sahiptir. Yüksek mukavemet ve sertlik olması istenilen şartlarda en fazla kullanılırlar. Reçine ve katalizör olmak üzere iki parçalı olup; kullanım aşamasında iki malzeme de yapışma yüzeylerine ayrı ayrı tatbik edilir.

2. Anaerobikler

Tek bileşenli metalin varlığı havayla temasın ortadan kalkması ile kürleşen akrilik polyester reçine bazlı yapıştırıcı türüdür. En büyük özelliği, iki metal arasında kaldığında güçlü bir reaksiyon başlar ve güçlü bir yapıştırma ve sızdırmazlık gösterir. Kürleşme süresi, yoğunluğa, ortam sıcaklığına bağlı değişkenlik sergileyebilmektedir. Korozyon direnci yüksektir.

3. Cyanoacrylate'ler

Akrilik reçine esaslı olup; yüzey üzerindeki nem vasıtasıyla sertleşirler. Kuruma süresi çok kısa olup; plastik malzemelerin yapıştırılmasında kullanılmaktadır. Metal ile kullanımında ortamın sıcaklık ve nemi göz önünde bulundurulmalıdır.

4. Modifikasyon Yapılmış Fenolikler

Yüksek mukavemet gerektiren birleştirmelerde kullanılmakta olup; ısı ve basınç altında sertleşir. Yapışma kabiliyeti yüksektir.

5. Poliüretanlar

Poliüretan yapıştırıcılar, iki bileşene sahip olup; neme karşı duyarlı özellikli, epoksi yapıştırıcılar ile benzer özelliklere haiz, kısa sürede sertleşme yeteneğine sahip yapıştırıcılardır. Genellikle yapıştırma astarı ile kullanımı uygundur.

6. Epoksiler

2.3.2.2. Formları Açısından Yapıştırıcılar:

Modern yapıştırıcılar, değişik formlarda olabilmektedirler. Kullanım Alanları bakımından gruplandırılırlar. Bunlar:

- Köpükler: Kuruma zamanı boyunca sürekli olarak genişleyen yapıya sahip epoksi bazlı yapıştırıcılardır. Kullanıldığı alanda boşlukları doldurarak birleşmedeki bağlantıyı sağlarlar.
- Reçineler: İki parçalı, vizkozite olarak düşük, epoksi reçinelerdir. Optimum yapışma işlemi, sertleşme işlemi bittikten sonra gerçekleşir. (Örnek: EPICOTE 816)
- Düşük Yoğunluklu Yapıştırıcılar: Oda sıcaklığı altında sertleşebilen bu yapıştırıcılar düşük yoğunluğa sahiptir. Bu tip yapıştırıcılar ağırlıklı olarak kompozit kumaş yapıştırılması, iki parçanın mükemmel yapıştırılmasında kullanılır. Optimum yapışma, sertleşme bittikten sonra yapılabilir. (Örnek: BOSTIC E5260)
- Düşük Viskoziteli Yapıştırıcılar: İki parçalı epoksi reçine bazlı olup; yüksek sıcaklıklarda sertleşme özelliğine sahiptir. Bu tip yapıştırıcılar, bağlantı birleşmelerindeki süreksizliklere karşı yüksek kayma mukavemetine sahip olması sebebi ile bütünlüğü koruyabilme özelliğine sahiptir. Bu yüzden saklama şartları bu tip yapıştırıcılar için zorunluluk arz etmemektedir.
- Film Tipi Yapıştırıcılar: Kompozit ve metal tamiri için kullanılmakta olup yaygın bir kullanım ağına sahiptir. Kompozit tamiratında kalın filmler tercih edilmektedir. Örnek olarak vermek gerekirse FM300K, REDUX312.06 verilebilir.
- Macun Tipi Yapıştırıcılar: Metal veya kompozit malzemelerin birleşiminde iki parçalı olarak kullanılan oda sıcaklığında sertleşebilme özelliğine sahip, yüksek viskoziteye sahip olan yapıştırıcılardır. 80°C altında sertleşebilme özelliğine sahiptir. Yapışma için 0.1 – 0.2 mm kalınlığında yüzeye uygulanması kafidir. Yüksek ve düşük kayma mukavemetinin istenildiği yerlerde kullanılırlar. Birkaç örnek vermek gerekirse EA 9330, REDUX408 verilebilir.

2.3.2.3. Epoksi yapıştırıcılar

Epoksi yapıştırıcılar, termoset reçinelerdir. İki bileşenli (reçine ve sertleştirici) sistemler karıştırma sonrası sertleşir. Diğer yapıştırıcılar ile kıyaslandığında mükemmel sürtünme özelliği ve yüksek kesme dayanımlı birleştirmeler verir. Darbe dayanımları düşüktür. Farklı türden malzemeleri yapıştırmada kullanılmakla birlikte tek parça, iki parça ve film olmak üzere üç ayrı yapıdadır.[35]

2.3.3. Yapıştırma birleştirmeleri

Yapıştırma birleştirmelerinde istenen, yapıştırma işleminin düzgün olması ve her türlü şartta verimli şekilde birleştirilen bağlantının çalışma koşullarına ayak uydurmasıdır. Bu durumda dayanımı etkileyen durumlar çok önem arz etmektedir.

2.3.3.1. Yapıştırma birleştirmelerinin dayanımını etkileyen faktörler

Yapıştırma birleştirmelerini etkileyen faktörleri kısaca şu şekilde sıralayabiliriz:

- Yüzey Hazırlığı
- Yapıştırıcının Termal Özellikleri,
- Camsı Geçiş Sıcaklığı,
- Ortam Koşulları,

2.3.3.1.1. Yüzey hazırlığı

Yapıştırma birleştirmelerinde dikkat edilmesi gereken en önemli faktör, yüzey ile yapıştırıcı arasında temas durumunun sağlıklı bir şekilde sağlanmasıdır ki aksi takdirde olumsuz etkilenir. Başarılı bir yapıştırma için uygun bir yapıştırıcı ve uygun yüzey hazırlama yöntemi belirlenmesi gerekir.

Yüzey hazırlığı işlemi bu safhada çok önem teşkil etmekte olup amacı; sürekli ve yüksek dayanımlı yapıştırma bağlantısının meydana gelmesini sağlayacak yüzeylerin oluşumunu sağlamaktır. Yapıştırılacak malzemelerin zayıf sınır tabakaları olarak bilinen fosfor, boya, oksit gibi tabakaların araya girmeden yapıştırıcı malzeme ile direkt teması istenir.

Uygun yüzey hazırlığı yöntemi uygulanmadığı takdirde yapılan bağlantı, temas bölgesinden kopma gösterecektir. Doğru yüzey hazırlığı yapıldığı takdirde de, yapıştırıcı ve malzemenin beklenen kuvvet ortaya çıkacaktır. Burada bahsettiğimiz kopma

yapıştırıcının kohezyon kuvvetini aşması ve yapıştırıcı tabakanın ikiye ayrılması şeklinde olacaktır. [34]

Yapışma mekanizması iki etmene direkt bağlıdır:

1. Adhezyon
2. Kohezyon

Adhezyon, farklı iki madde arasında var olan ve bu iki maddenin birbirine yapışmasını sağlayan çekim kuvvetidir. Van Der Waals kuvvetleri olarak bilinen çekim ve yüzeye tutunma kuvvetleri en önemlileridir. Yapıştırıcı yüzeye yeterli oranda nüfuz etmezse moleküler arası bağlarda zayıflama olur. Bu sebepten yapıştırıcının tüm yüzeye nüfuziyeti ve yüzeyin ıslaklığı önem arz eder. Yüzeyin yapışma özellikleri ve yüzeyin ıslaklığı, yapıştırmanın kuvvetini etkiler. Yüzey gerilimi, yapıştırıcının sürüldüğü yüzeye ve yapıştırıcının viskozitesine bağlıdır. Yüzeyin kirliliği de ıslatma işlemini negatif açıdan etkilemektedir.

Kohezyon, moleküller arası çekim kuvveti olarak bilinmekle birlikte yapıştırıcıyı bir arada tutan kuvvettir. Kohezyonu, moleküller arası Van der Waals çekim kuvvetleri ve primer moleküllerin kendi aralarında yapmış oldukları etkileşimi ciddi oranda etkiler.

Yapıştırmada kohezyon ve adhezyon kuvvetleri yaklaşık olarak eşit olmalıdır. Adhezyon kuvvetleri şu şekilde artırılabilir:

- Aşındırma vs işlemler ile yüzey pürüzlülüğünü değiştirilmesi
- Primer tabaka ile aktif yüzey oluşumu,
- Yağ alma-Mekanik aşındırma ile istenmeyen tabakaların ortadan kaldırılması

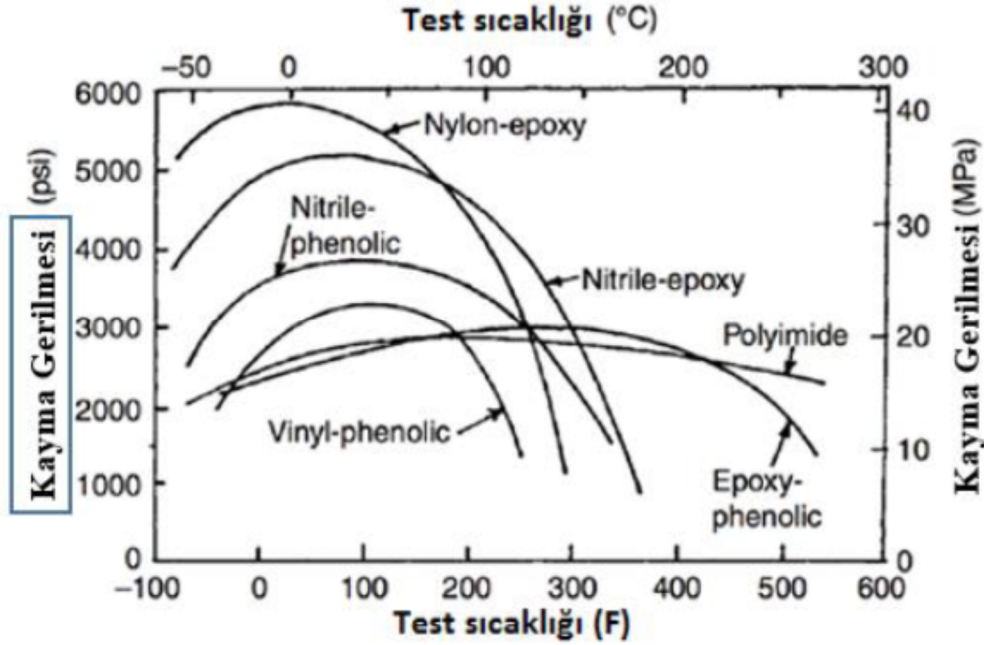
Malzemeler, ihtiyaca uygun temizleme yöntemleri ile temizlendiği takdirde uygun ve iyi bir yapışma ve uzun dönemli bazda ortam şartlarına dayanım sağlar. Zımparalama geniş yüzey temizliğinde önemli bir yere sahiptir. Kalın olmamak koşulu ile, bu yöntem ile istenilen yüzey pürüzlülüğü elde edilebilir. Yüzey pürüzlülüğü fazla olan yüzeyler, bağlantı esnasındaki boşluktan dolayı sorun teşkil edeceğinden dayanım olumsuz etkilenir.[36]

2.3.3.1.2. Yapıştırıcının termal özellikleri

Sıcaklığın yapıştırma bağlantılarındaki etkisi bilinmektedir. Genel olarak yapıştırıcılar, kurlenme aşamasında ve bu aşamadan sonra sıcaklığın etkisi elbette olmuştur. Bu sebepten kullanılan yapıştırıcının camsı geçiş sıcaklığını bilmek ve bu sınırlar içerisinde kalmakta yarar vardır.

Tüm yapıştırıcılar farklı sıcaklıkta kürlenmekte olup; yapıştırıcının özelliğine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Yapıştırıcı kürendikten sonra kullanım için hazır hale gelmiş denilebilir ki bu aşamada termal özellikler önem ihtiva etmektedir. Önceden de belirtilmiş olduğu üzere camsı geçiş sıcaklığı büyük önem taşır. Yapıştırıcıların çoğu düşük sıcaklıklarda cam halinde olup, kırılğan bir formda olamayabilirler. Fakat camsı geçiş sıcaklığına yaklaşıncaya kauçuk gibi esnek bir forma dönüşürler ve kullanılmaz hale gelebilirler. Ama bazı ekstrem durumlarda da bu durumdaki halleri de istenmektedir. [37]

Yapıştırıcıların değişik sıcaklıklarda kayma gerilmelerine etkisi Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2-2. Yapıştırıcıların değişik sıcaklıklarda kayma gerilmelerine etkisi(Mata ve Ark.2008)

2.3.3.1.3. Camsı geçiş sıcaklığı

Yapıştırıcıların davranışları sıcaklık ile bağlantılıdır. Bunu zincir örneğini anlatabiliriz.

Zincir, ısı etkisi ile artan enerjisini kinetik enerji olarak harcar, kendini daha az enerjili bir duruma getirir. Aslında bu durum tüm sıcaklıklarda söz konusu ancak öyle bir değere ulaşılır ki bu hareketlilik ve genişleme tüm zincirlere yayılır. Bu sıcaklığa “camsı

geçiş sıcaklığı” denilmektedir. Bir nevi maddenin camsı özelliklerini kaybedip viskoz özellikleri kazanmaya başladığı sıcaklık sınırıdır denilebilir.[38]

Biraz daha anlaşılır kılsak eğer; zincire ısı verilince genişleceğinden, sıcaklık arttıkça çekim kuvveti azalacaktır. Öyle bir sıcaklığa geldiğinde tüm zincirler harekete geçecektir. İşte bu sıcaklık camsı geçiş sıcaklığıdır.

Camsı geçiş sıcaklığında polimerler kauçuğumsu bir yapıdadır. Polimer ısıtılmaya devam ederse kauçuğumsu yapı yerini zamk benzeri bir sıvı halini alacaktır.

Camsı geçiş sıcaklığı polimerin saflığı, zincir yapısı ve bu zincirlerin birbiri üzerinde hareket kabiliyeti vb. özelliklerine bağlıdır. [38]

2.3.3.1.4. Çalışma ortam koşulları

Çalışma ortamındaki nemin kontrol altına almak kalıcı tamiratlara karşı irdelenmesi gereken önemli bir husustur. Hem yapıştırılacak ana malzeme hem de yapıştırıcı malzeme için mukavemet bakımından %20-25 oranında azalma olasılığı mevcuttur. Hasar tamirinin ortam koşulları yapıştırılacak olan (tamir edilecek olan) tabakanınkilerden daha fazla olmaması sağlanmalıdır. Sıcaklık, basınç, nem çalışma ortamını etkileyen diğer etmenler olarak sıralanabilir.

2.4. Eğme Deneyi

Eğme, İki desteğe üzerine serbest olarak oturtulan, genellikle daire veya dikdörtgen kesitli düz bir deney numunesinin, yön değiştirmeksizin ortasına bir eğme kuvveti uygulandığında oluşan biçim değişmesidir.

Eğme deneyi, malzemenin mukavemeti hakkında tasarım bilgilerini belirlemek ve malzemenin eğilmeye karşı mekanik özelliklerini tespit etmek amacı ile yapılır. Enine yük taşıyan kiriş gibi elemanlar eğilmeye maruz kalırlar. Kirişin her bir bölgesinde eğilme momentleri meydana gelir. Bu da eğilme gerilmesi ile alakalıdır.

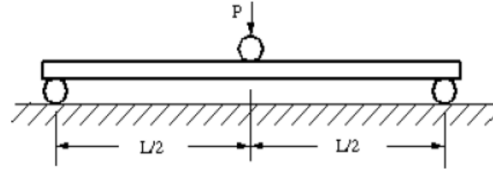
Klasik eğilme denklemlerinin geçerli olabilmesi için malzemenin homojen ve Hook Kanunlarına uyması gerekir. Eğme deneyi için TSE'nin TS 205 tanımlarına bakılacak olursa; iki desteğe serbest olarak oturtulan, genellikle daire veya dikdörtgen kesitli düz bir deney parçasının yön değiştirmeksizin ortasına bir eğme kuvveti uygulandığında oluşan biçim değiştirmesi olarak tanımlanır. Eğme deneyi ile kalitatif sonucun yanında, Eğme momenti (M_e), Eğilme dayanımı (σ_e), Elastisite modülü (E) ve eğilme miktarı (δ) gibi

kantitatif değerler de hesaplanır. Bu deney genellikle kırılğan ve gevrek malzemeler için yapılır.

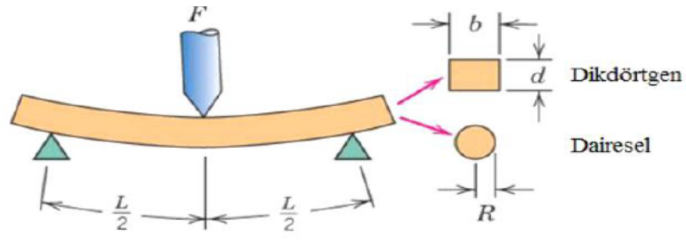
Prensip olarak, Deney numunesine bir kuvvet etkilediğinde, numune kesitinin bir kısmında basma gerilmesi, kesitin geri kalan kısmında çekme gerilmesi meydana geliyorsa numune eğilme halindedir. Eğilme halindeki numunelerin kesitinde, iç yüzeye yakın bölgede basma gerilmeleri, dış yüzeye yakın bölgede ise çekme gerilmeleri meydana gelmektedir. Aşağıdaki şekillerde şematik olarak gösterildiği gibi, çeşitli eğme deneyi yöntemleri vardır. Bunların içinde en çok uygulananı Şekil 2.3'de gösterilen silindirik mesnetler üzerinde numuneyi bir mandrel yardımıyla eğme yöntemidir. Bu yöntemlerde ana gaye, malzemeyi çatlatıncaya kadar tek yönde eğmektir. Kalitatif eğme deneylerinde (katlama deneyi), sünekliği iyi olan malzemeler 180° katlanmalarına rağmen çatlama göstermezler. Böyle malzemelerin deney sonucunda 180° katlamaya rağmen çatlamanın görülmediği belirtilir. Bu açıklamalardan da anlaşılacağı gibi, kalitatif eğme deneyinde kriter olarak eğme açısı (α) kullanılmaktadır.[39]

2.4.1. Üç Nokta Eğme Deneyi

Eğilme açısı; eğme tamamlandıktan sonra numunenin iki kolu arasındaki dış açı olarak tarif edilir. Bazen malzemenin eğme sonunda bükülmüş kısmının eğrilik yarıçapı (r) da kriter olarak kullanılabilir. Eğme deneyi sonucunda, numunenin öngörülen açıyla katlanması halinde çatlamanın olup olmadığı belirtilir. Eğer malzeme çatlama göstermişse, bazen ilk hasarın meydana geldiği açı belirtilmek istenir. Kantitatif eğme deneylerinde, eğme momenti veya eğilme dayanımının hesabı için, numunenin kırıldığı andaki maksimum yükü (F_{max}) ölçmek gerekmektedir. Bundan sonra gerekli formüller kullanılarak istenen değerler hesap edilir. Eğilme miktarı (δ) ise deney sırasında yükün uygulandığı noktada numunenin başlangıçtaki duruma göre düşey eksenindeki yer değiştirme miktarıdır.



(a)



$$\sigma = \text{gerilme} = \frac{Mc}{I}$$

burada M = maksimum eğme momenti
 c = numunenin en dış yüzeyinden uzaklık
 I = kesit alanın atalet momenti
 F = uygulanan yük

	$\frac{M}{4}$	$\frac{c}{2}$	$\frac{I}{12}$	$\frac{\sigma}{2bd^2}$
Dikdörtgen	$\frac{FL}{4}$	$\frac{d}{2}$	$\frac{bd^3}{12}$	$\frac{3FL}{2bd^2}$
Dairesel	$\frac{FL}{4}$	R	$\frac{\pi R^4}{4}$	$\frac{FL}{\pi R^3}$

(b)

Şekil 2.3. Üç nokta eğme deneyinin şematik gösterimi (a) ve Formüller (b)

Eğme deneyi sonucunda, malzemenin eğme momenti (M_e), eğilme dayanımı (σ_e), esneklik modülü (E_e) ve eğilme miktarı (δ) gibi değerlerin hesaplanabilmesi için Şekil 2.3.'deki formüllerden de anlaşılabilceği gibi deney esnasındaki F yükü ve δ eğilme miktarının duyarlılıkla ölçülmesi ve mesnet merkezleri arasındaki uzaklığın bilinmesi gerekmektedir. [39]

2.5. Sonlu Elemanlar Metodu

Sonlu Elemanlar Metodundaki temel mantık, komplike bir probleme, problemi basite indirgeyerek çözüm bulmaktır. Esas problemin daha basit bir probleme indirgenmiş olması nedeni ile kesin sonuç yerine yakınsanmış bir sonuç elde edilmekte, ancak bu sonucun daha fazla çaba harcayarak iyileştirilmesi ve kesin sonuca olabildiğince çok yaklaşılması, hatta ve hatta kesin sonuca ulaşılması da mümkün olmaktadır. [40]

Sonlu Elemanlar Metodunda, çözüm bölgesi, çok sayıda basit, küçük, birbirine bağlı "sonlu eleman" denilen alt bölgelere ayrılmaktadır. Yani kısacası birbirine çok sayıda düğüm noktalarıyla bağlanmış parçalara ayrılan problemin çözümü kolay şekilde yapılabilmektedir. Düğüm noktaları genellikle birbirlerine bağlandıkları yerler olan eleman sınırlarında bulunmaktadır. Kontinyumun içindeki deplasman, gerilme, sıcaklık, basınç, hız gibi değişkenlerin nasıl bir değişim sergilediği bilinmediğinden dolayı, bunlar basit çözümler kanalı ile yaklaşık olarak ifade edilebilmektedir. Bu yaklaşık olan fonksiyonlar, değişkenlerin düğüm noktalarındaki değerleri cinsinden belirtilmektedir. [40]

Genel bir kontinyum problemin sonlu elemanlar metodu ile çözümünde aşağıdaki basamaklar izlenir:

- Çözüm alanının elemanlara ayrılması
- Her bir elemanın formülize edilmesi, yük vektörleri ve matrislerinin hazırlanması
- Çözüm bölgesi sonlu eleman modeli oluşturulabilmesi için elemanların birleştirilmesi
- Yüklerin uygulanması,
- Yapının desteklerinin belirtilmesi,
- Bilinmeyen düğüm noktalarının deplasmanlarının belirlenmesi,
- Eleman gerilme ve birim uzamaların hesabı,

2.5.1. Ansys

Bilgisayar destekli olarak mühendislik çalışmalarında; mekanik, yapısal analiz, hesaplamalı akışkanlar dinamiği ve ısı transferi gibi farklı disiplinlerde etkili çalışmalara olanak sağlayan bilgisayar destekli mühendislik programıdır.

ANSYS programı, Sonlu elemanlar yöntemini kullanmaktadır. Sonlu Elemanlar yöntemi ile çok karmaşık, komplike ve karmaşık geometrideki bir yapı, küçük ve çok sayıda parçalara bölünmek sureti ile ayrı ayrı analizleri yapılabilen ve bu analizler birleştirilerek tek ve tutarlı analiz sonuçları elde edilir.

ANSYS programı veritabanında bulundurduğu birçok program ile değişik alanlarda her türlü analizi kolaylıkla yapabilmektedir. Bunları kısaca incelersek;

1. ANSYS Workbench: İleri Mühendislik Simülasyon Teknolojisi ile üstün bilgi birikiminin eseri data bankasından oluşan bir sistemdir. Bu program ile yapılan birkaç analizi incelersek eğer;

- Modal Analiz,
- Statik Analiz,
- Sürünme Analizi,
- Gerilme Ömrü ve Yorulma Analizi,
- Burkulma Analizi,
- Harmonik Analiz,
- Isı transferi Analizi, vs.

ve daha başka aklınıza gelebilecek her türlü analizi başarı ile yapmaktadır.

2. ANSYS Multiphysics: Gerçek hayattaki multi fizik şartlarında çalışan tasarımların değerlendirilmesinde önemli bir yer tutmaktadır. ANSYS bilim adamlarına ve mühendislere simülasyon ortamı ile yapısal, ısı transferi, elektromanyetik, akışkanlar mekaniği bilimlerin alanlarıyla birbirlerinin etkileşimlerini simule ederek olanak sağlar. Bu programla yapılanlar arasında, Tüm fizik analizleri, Multi fizik çözümlenmeleri, Multi çözümlerin iyileştirilmesini sağlayan parametrik analizler örnek verilebilir.

3. ANSYS Yapısal Mekanik: Kısa zaman içerisinde prototip hazırlanması, yenilikçi ve daha iyi ürün elde etmeyi hedef alan simülasyon araçlarını içinde barındırır. Denklem çözüm elemanları, kontak malzemeleri, değişken analiz tipleri gibi çeşitli parametreler bu komplike yapıyı kısa sürede çözmek için tasarlanmış ve

oluşturulmuştur. Bu program bünyesinde lineerden non-lineere, basitten geniş çaplı her türlü analizi yapabilecek kapasite mevcuttur. Bunlara örnek verdiğimizde, Structural Mechanics, Composite PrePost verilebilir.

4. ANSYS Akışkanlar Dinamiği: FLUENT, CFX, CFD POST gibi genel amaçlı hesaplamalı akışkanlar dinamiği çözücüleri ile son işlem araçları üstün fiziksel modelleme özelliğine ek olarak yüksek doğrulukla analiz eder. Post processing (Son İşlem) aracı dediğimiz CFD POST ile kantitatif analiz imkanı vardır.
5. ANSYS Eksplisit Dinamik: Kısa zaman aralığında, kırılma ve malzeme kopması içeren durumlar simüle edilmek istenildiğinde kullanılması önerilir. Yapılan simülasyon ile malzemenizin veya ürününüzün içerisinde oluşan temel olayları detaylı şekilde simüle edebilir, gerekli değişiklikleri üzerinde yapabilme imkanına sahip olunur.
6. ANSYS Electromagnetic: Hassas elektromanyetik alan simülasyonu sağlar. Elektromanyetik çözücüleri, elektrik ve elektromanyetik aletlerin davranışlarını simüle ederek ön inceleme sağlar. Kısaca özetleyecek olursak, ürün içinde ve dışındaki elektromanyetik alan görüntüsü alma, tahrik altındaki aletlerin performans çıktıları, Kuvvet dağılımı ve bunun sonucunda meydana gelenler verilebilir.

Kısaca ANSYS'i anlattıktan sonra analizlerimizde izlediğimiz yolu şu şekilde özetleyebiliriz:

- Çalışma ortamı,
- Malzemelerin mekaniksel özellikleri,
- Çalışma konusu olan malzemelerin geometrileri,
- Model tipleri,
- Ağ (Mesh) Yapısı,
- Kontakt yüzeyleri,
- Sınır şartları,
- Şehim Değerleri, girilerek çözümlene yoluna gidilir. Program vasıtasıyla analiz üzerinde istenilen her türlü detay çıkarılabilmektedir. Daha sonra istenilen her türlü veriye ait grafik ve eleman bilgilerinin bulunduğu rapor hazırlanmak sureti ile detaylı bilgi verilmektedir. [41]

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Tamir Edilecek Malzeme

Günümüzde birçok sektörde kullanılan ve tercih edilen Al 2024 T3, tamir edilecek malzeme olarak bu tezde kullanılmıştır.

Al 2024 T3 ısıtıl işlem uygulanabilirliği sayesinde, yorulma dayanımı yüksek, kaplama ile korozyon özelliği yükseltilmiş, uçak sanayi, askeri ekipmanlar, yüksek sertlik ve işlenebilirlik gerektiren parçalarda, savunma sanayiinde, otomotivde, yapısal uygulamalarda, perçinlerde vs. kullanımı yaygındır. Al 2024 T3 malzemesinin kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri Çizelge 5 ve Çizelge 6’da gösterilmektedir.

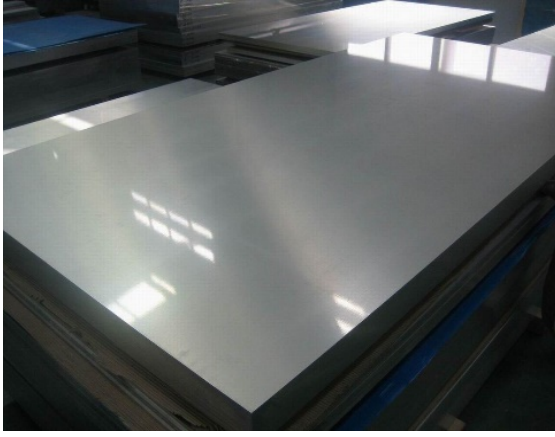
Çizelge 5. Al 2024 T3 Malzemenin Kimyasal Bileşimi [42]

Al	Fe	Si	Cu	Cr	Mn	Mg	Zn	Ti	Diğer	Diğer
90.7- 94.7	0.5	Max 0.5	3.8- 4.9	Max. 0.1	0.3- 0.9	1.2- 1.8	Max. 0.25	Max. 0.15	Max. 0.15	Max. 0.05

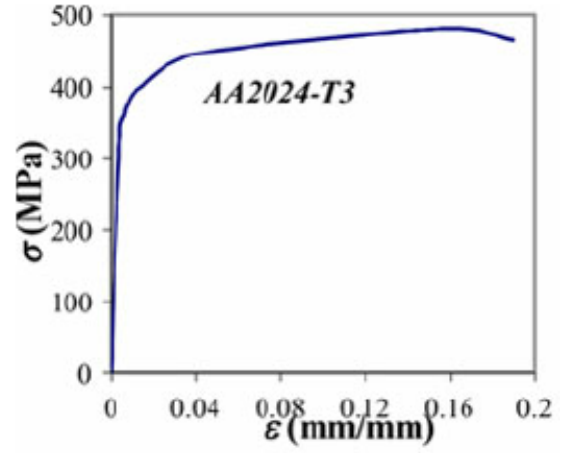
Çizelge 6. Al 2024 T3 Malzeme Mekanik Özellikleri [42]

Sertlik, Brinell	120
Sertlik, Knoop	150
Sertlik, Rockwell A	46.8
Sertlik, Rockwell B	75
Sertlik, Vickers	137
Max. Çekme Mukavemeti. (Mpa)	483
Gerilme Dayanım Mukavemeti(Mpa)	345
Kopma Uzaması (%)	18
Elastisite Modülü (Gpa)	73.1
Çentik Çekme Mukavemeti (Mpa)	379
Akma Dayanımı (Mpa)	855
Poisson Oranı	0.33
Yorulma Dayanımı (Mpa)	138
İşlenebilirlik (%)	70
Kayma Modülü (Gpa)	28
Kayma Dayanımı (Mpa)	283

Aşağıda Al 2024 T3 alüminyum alaşımlı levhalar ve malzemenin gerilme-şekil değiştirme davranışı birlikte Şekil 3.1’ de verilmiştir.



(a)

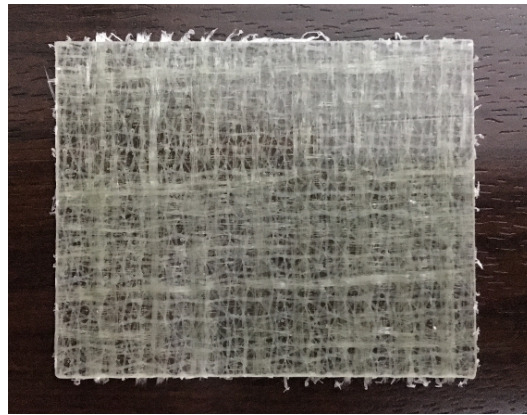


(b)

Şekil 3.1. (a) Al 2024 T3 Levhalar, (b) Malzemenin Gerilme- Şekil Değişirme Grafiği[43]

3.2. Yama Malzemesi

Bu tezde, tek taraflı ve çift taraflı bindirme bağlantılarını oluşturmak için yama malzemesi olarak; İzmir’de İZOREEL firması tarafından sıcak presleme yöntemiyle üretilen, G10 standardında, ağırlıkça 300 gr/m² ve %60 elyaf yoğunluğunda, 1 mm kalınlığında, 4 tabakalı ve 0-90° fiber yönlü 1m²’lik cam elyaf takviyeli kompozit levhalardan, 60x40 mm ebatında, Şekil 3.2.’de görüldüğü gibi CNC ile kesilerek yamalar hazırlanmıştır.



Şekil 3.2. 60x40 mm, 4 tabakalı, 0-90° Fiber Yönlü Kompozit Yama Malzemesi

Yine Standardın belirtmiş olduğu ebatlarda ve ölçülerde kestirilmiş olan kemik numunelere gerekli testler yapılarak, Kompozit Yama Malzemesinin mekaniksel özellikleri Çizelge 7’de verildiği şekilde ortaya çıkmıştır.

Çizelge 7. Cam Elyaf Kompozit Yama Mekaniksel Özellikleri

Young Modülü (X direction)	[MPa]	32000
Young Modülü (Y direction)	[MPa]	9780
Young Modülü (Z direction)	[MPa]	9780
Poisson Oranı (XY)	[MPa]	0,23
Poisson Oranı (YZ)	[MPa]	0,3
Poisson Oranı (XZ)	[MPa]	0,23
Kayma Modülü (XY)	[MPa]	8473
Kayma Modülü (YZ)	[MPa]	4900
Kayma Modülü (XZ)	[MPa]	8473
Çekme (X Yönü)	[MPa]	616
Çekme (Y Yönü)	[MPa]	56
Çekme (Z Yönü)	[MPa]	56
Basma (X Yönü)	[MPa]	-398
Basma (Y Yönü)	[MPa]	-113
Basma (Z Yönü)	[MPa]	-113
Kayma (XY)	[MPa]	66
Kayma (YZ)	[MPa]	56
Kayma (XZ)	[MPa]	66

3.3. Yapıştırıcı Malzeme

Bu tez çalışmasında yapıştırıcı malzeme olarak EGEANT firması aracılığıyla 3M firmasından temin edilen DP460 kullanılmıştır. Bu ürünün epoksi ve sertleştirici olmak üzere iki bileşeni mevcuttur. Hacimsel olarak epoksi/hızlandırıcı oranı 2/1 oranı olduğundan yapıştırıcının dayanımı yüksektir. Bu oranı yakalamak amaçlı özel helezonik uçları ile birlikte tez çalışmasında kullanılmıştır.

Metal, cam, seramik, plastik ve kompozit yüzeyleri yapıştırmada kullanılan DP460 yapıştırıcısına ait kürleşme zamanı ve kürleşme sıcaklığını gösteren tablo Çizelge 8'de, grafik de Şekil 3.3. (a)'da ve $\sigma - \epsilon$ davranışı da Şekil 3.3. (b)'de verilmiştir.

Çizelge 8. DP460 Kürleşme Sıcaklık ve Karakteristikleri [44]

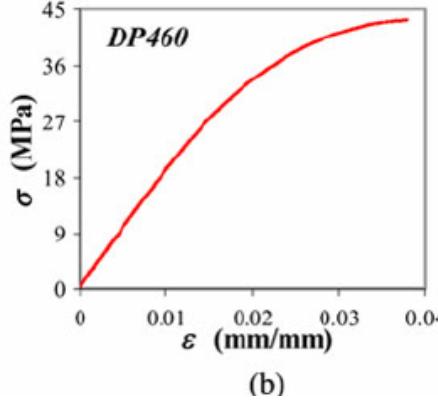
Typical Cured Thermal Properties

Note: The following technical information and data should be considered representative or typical only and should not be used for specification purposes.

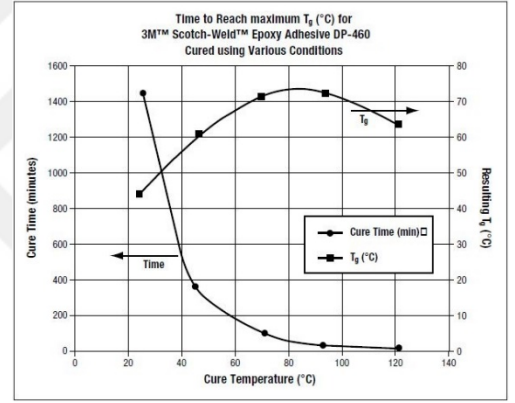
Product	3M™ Scotch-Weld™ Epoxy Adhesive DP460 Off-White	3M™ Scotch-Weld™ Epoxy Adhesive DP460 NS
Physical Color	Opaque, off-white	Off-white
Shore D Hardness	75-80	78-84
Thermal Coefficient of Thermal Expansion (in./in./°C)	Below Tg 59 x 10 ⁻⁶ Above Tg 159 x 10 ⁻⁶	74.44 x 10 ⁻⁶ 166 x 10 ⁻⁶
Thermal Conductivity (btu - ft./ft. ² - hr. - °F) @ 45°C	0.104	0.104
Electrical Dielectric Strength (ASTM D 149)	1100 volts/mil	727 volts/mil
Volume Resistivity (ASTM D 257)	2.4 x 10 ¹⁴ ohm-cm	3.25 x 10 ¹⁵ ohm-cm



(a)



(b)



(c)

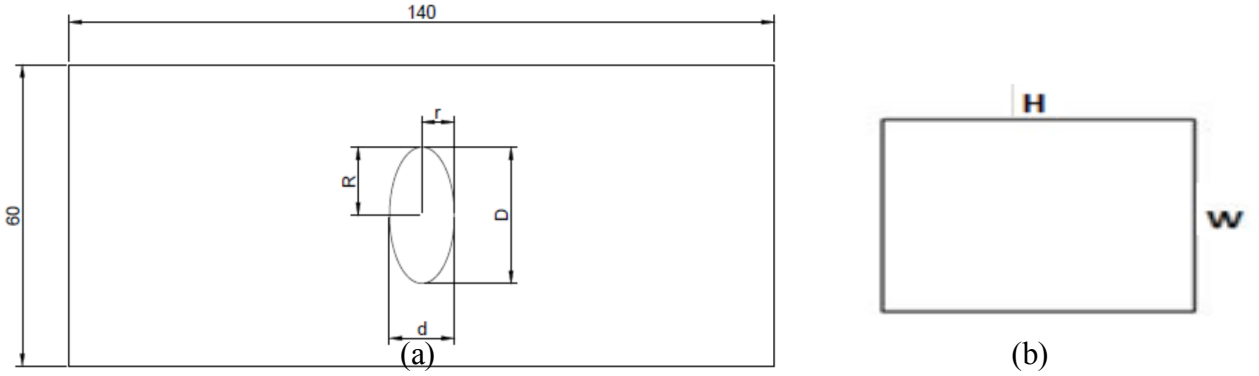
Şekil 3.3. (a) DP460 malzeme, (b) $\sigma - \epsilon$ grafiği [43],

(c) kürleşme zamanı (dk) – kürleşme sıcaklığı (°C) grafiği

3.4. Deney Numunelerinin Hazırlanması

Öncelikle 1 mm kalınlığındaki Al 2024 T3 işlem görmüş levhadan, 60x140 mm ebatlarında lamalar CNC ile kesilmiştir. Kesilen plakaların ortalarına Şekil 3.4'te de gösterildiği gibi, elips büyük çapı "D" ve elips küçük çapı "d" olmak üzere, "D-d" boyutları; 21-11, 24-9, 24-11, 24-13, 27-11 mm olan eliptik delikler açılmıştır. Daha sonra Şekil 3.2'de gösterilen 60x40 mm ebadındaki yamalar, 1 mm kalınlığında, 4 tabakalı ve 0-

90° fiber yönlü cam elyaf takviyeli kompozit levhalardan kesilmiştir. Çalışmaya konu olan deney için numune değerleri ve ona ait parametreler ise Çizelge 9’da gösterilmiştir.



Şekil 3.4. (a) Eliptik Delik Açılan Al 2024 T3 levha

(b) Kompozit yama

Çizelge 9. Numune Değerleri ve Parametreleri

Deney Numunesi Boyutları				
Alüminyum Al 2024 T3			Cam Epoksi Kompozit	
Levha Boyutu [mm]	Eliptik Delik Boyutları [mm]		Yama Boyutları [mm]	
	D	d	H	W
60x140	21	11	60	40
	24	9		
		11		
		13		
	27	11		

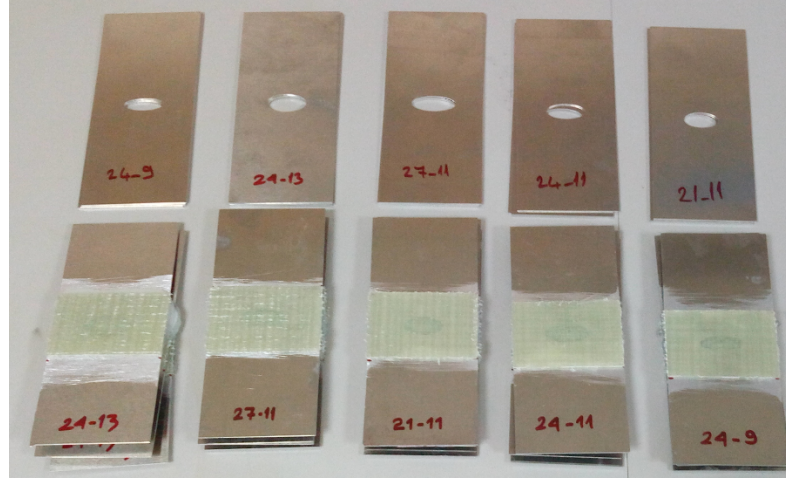
Deney için gerekli olan yapıştırma işlemine başlamadan önce yapıştırılacak malzemeler yüzey hazırlama işlemlerine tabi tutulmuştur. İlk önce Al 2024 T3 levhalar pürüzlenmiştir. Ardından her iki malzeme de (Al 2024 T3 alüminyum levhalar ve cam elyaf kompozit yamalar) saf aseton içerisinde 20 dak. bekletilerek üzerindeki yağ, pas ve kirlerin çözünmesi sağlanmıştır. Daha sonra el değmeden aseton içinden çıkarılarak su ile yıkanmış ve hava ile kurutulmuştur.



Şekil 3.5. Kompozit yamalar, DP460 yapıştırıcı, yapıştırıcının tabancası üzerinde nozüle takılmış hali ve hasarsız ve eliptik hasarlı Al 2024 T3 malzemeler

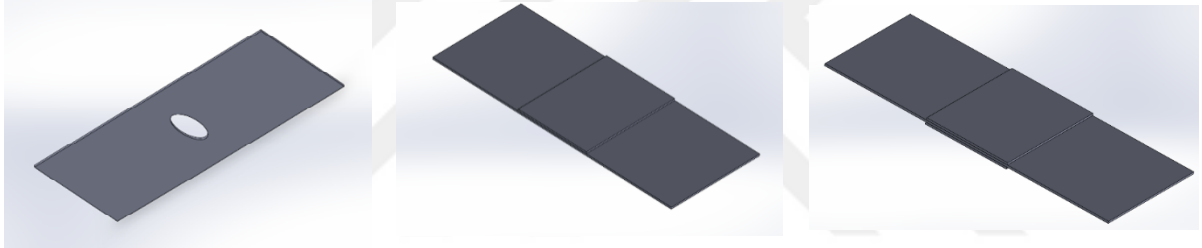
Yukarıda Şekil 3.5'teki fotoğrafta sol üst köşede üst üste konulmuş yama malzemeleri, yanında epoksi ve sertleştirici olmak üzere çift hazneli DP460 yapıştırıcı malzemesi, üst sağ tarafta da DP460 yapıştırıcı malzemenin uygulama tabancası üzerinde sertleştirici ile epoksinin karışımını sağlayan nozül takılmış kullanıma hazır hali ve altta da en sağda üzerine eliptik hasar açılmamış, solunda da 5 farklı büyük çap – küçük çap kombinasyonda eliptik hasar açılmış Al 2024 T3 lamalar görülmektedir.

İlk olarak cam elyaf kompozit yamaların üzerlerine 3M DP 460 yapıştırıcı, 0,15 mm'lik ince bir tabaka olacak şekilde tatbik edilmiştir. Daha sonra bir yüzleri yapıştırıcı ile tamamen ıslatılan yamalar, Al 2024 T3 lamalar üzerine açılmış eliptik hasarı kaplayacak ve ortalayacak şekilde, tek bindirmeli bağlantılar için tek yüze ve çift bindirmeli bağlantılar için her iki yüze de yapıştırılmıştır. Yapışan yüzeylerin birbiri üzerinde kaymasını engellemek için (yapıştırıcı az bir miktar kurluşene kadar) düz bir yüzeyde beklemeye alınmıştır. Daha sonra yapıştırılan numuneler yapıştırıcının kurluşme süresi olan 24 saat süre ile düşük bir basınç altında kurluşmeye bırakılmış ve böylece kaliteli ve sağlam, tek taraflı ve çift taraflı bindirme bağlantıları elde edilmiştir. Şekil 3.6'da yamasız ve yamaları yapıştırılmış bir grup numunenin fotoğrafı verilmiştir.



Şekil 3.6. Hasarlı yamasız ve yama ile tamir edilmiş numuneler

Şekil 3.7’de Hasarlı yamasız, tek bindirmeli ve çift bindirmeli bağlantıların katı modelleri verilmiştir.



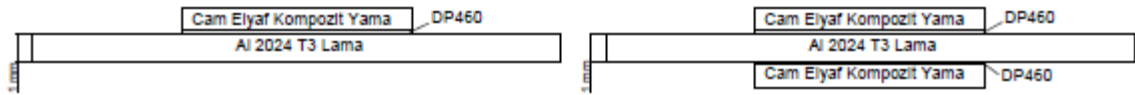
(a)

(b)

(c)

Şekil 3.7. (a) Hasarlı yamasız, (b) Tek bindirmeli ve (c) Çift bindirmeli numuneler

Tek bindirmeli ve çift bindirmeli deney numunelerinin şematik gösterimi Şekil 3.8’de verilmiştir.



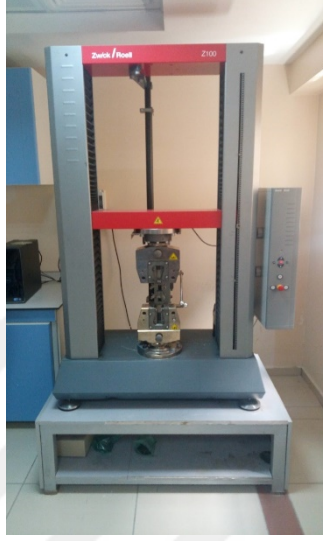
(a)

(b)

Şekil 3.8. (a)Tek Bindirmeli ve (b)Çift bindirmeli Numunelerin Şematik Gösterimi

3.5. Deneysel Hasar Yüklerinin Belirlenmesi

Tez çalışması için hazırlanan numuneler Şekil 3.9 'da gösterilen ZWICK Roell Statik Malzeme Test Cihazı ile 1 mm/dk sabit hızda 3 nokta eğme testine tabi tutulmuştur. İlk olarak hasarsız yamasız numuneler eğilme testine tabi tutulmuştur. Daha sonra da sırasıyla Hasarlı Yamasız, Tek Bindirmeli ve Çift Bindirmeli yamalı numunelere 3'er tekrarlı olmak üzere eğilme testi uygulanmıştır. Deneyle tamandıktan sonra numuneler incelenmiş ve numunelerin taşıdıkları yükler ve hasar tipleri kayıt altına alınmıştır.



Şekil 3.9. ZWICK Roell Z100 Statik Test Cihazı

3.6. Nümerik Analiz

Deneysel çalışmalar bittikten ve bulgular elde edildikten sonra SOLIDWORKS Paket programı vasıtası ile deneyde kullanılan Al 2024 T3 levhalar ve yamanın katı modeli hazırlanarak ANSYS paket programı için analize ön hazırlık yapılmıştır. Daha sonra ANSYS WORKBENCH 19.0 uygulaması vasıtası ile malzemelerin analizi için gerekli olan veriler (Model Tipleri) ve malzemelerin mekanik özellikleri girilmiştir. Cam Elyaf Kompozit malzemelerin mekanik özellikleri standart kemik numuneler vasıtası ile test edilerek bulunmuştur. Al 2024 T3 için ASM MATWEB verileri baz alınmıştır. "Engineering Data" menüsüne girilerek veritabanına malzeme tanımlaması yapılmıştır.

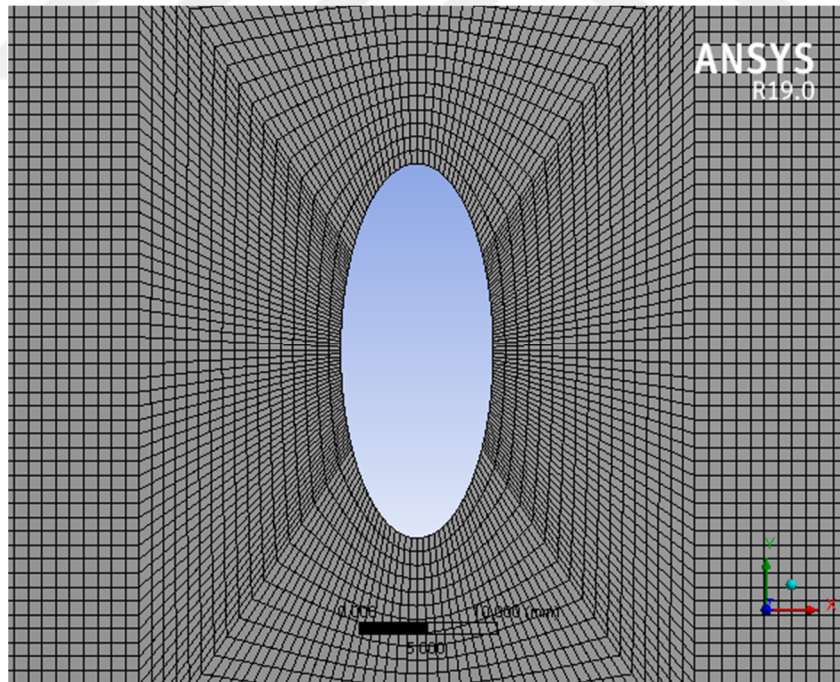
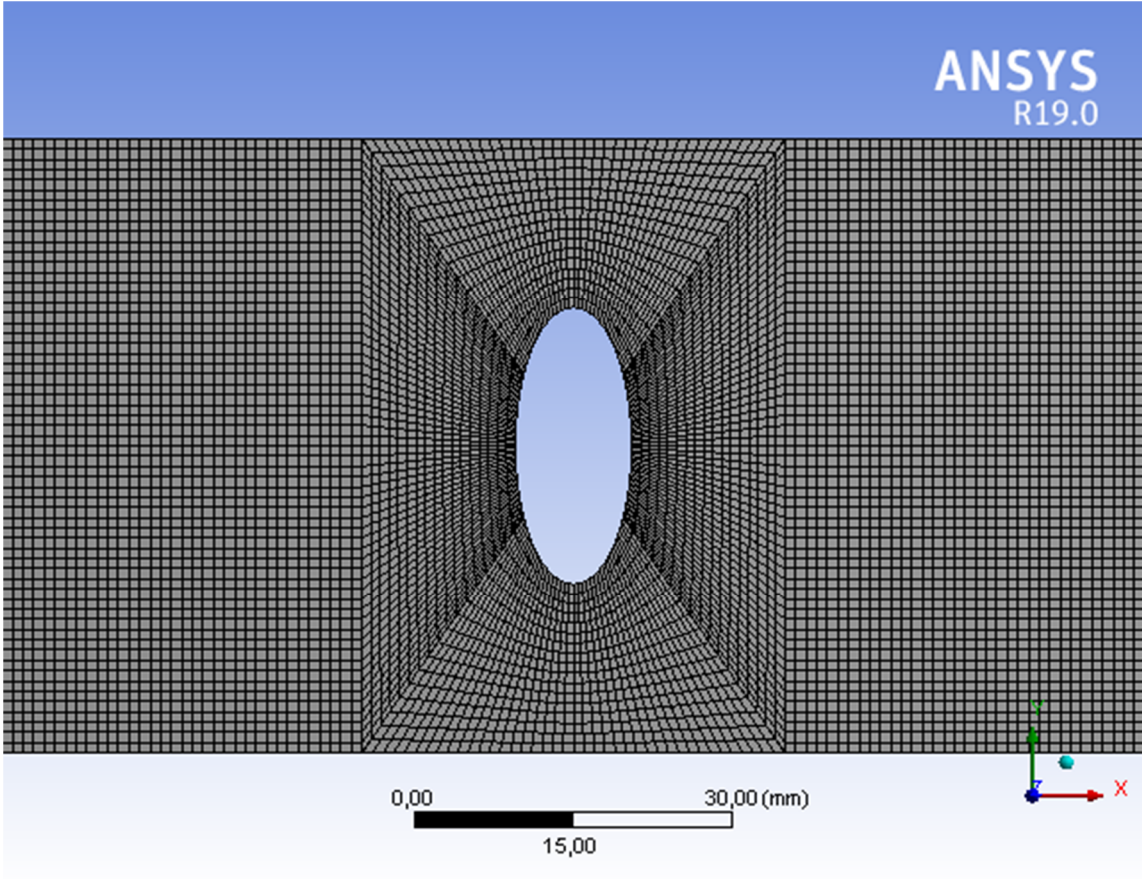
Bu bilgiler tanımlandıktan sonra numunenin geometrileri uygun mesh (ağ) yapısı oluşturularak her bir düğümün üst üste gelmesi amaçlanmıştır. Şekil 3.10 ve Şekil 3.11 'de ele alınan eliptik hasarlı levha için dörtgen (quadrilateral) - 4 düğümlü elemanlarla elde edilmiş belirli sıklıkla yapılmış mesh (ağ) yapısı oluşturulmuştur ve farklı eliptik hasarların

büyük ve küçük çaplarına göre oluşturulmuş node ve eleman sayısı Çizelge 10'da verilmiştir.

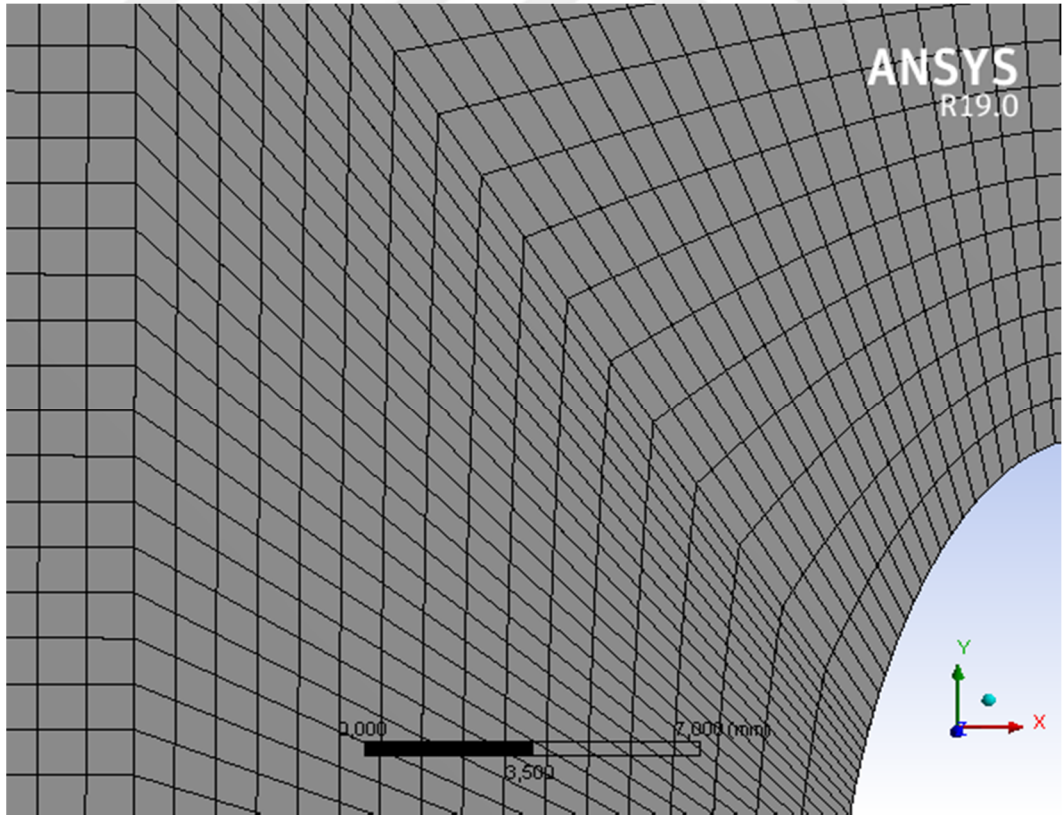
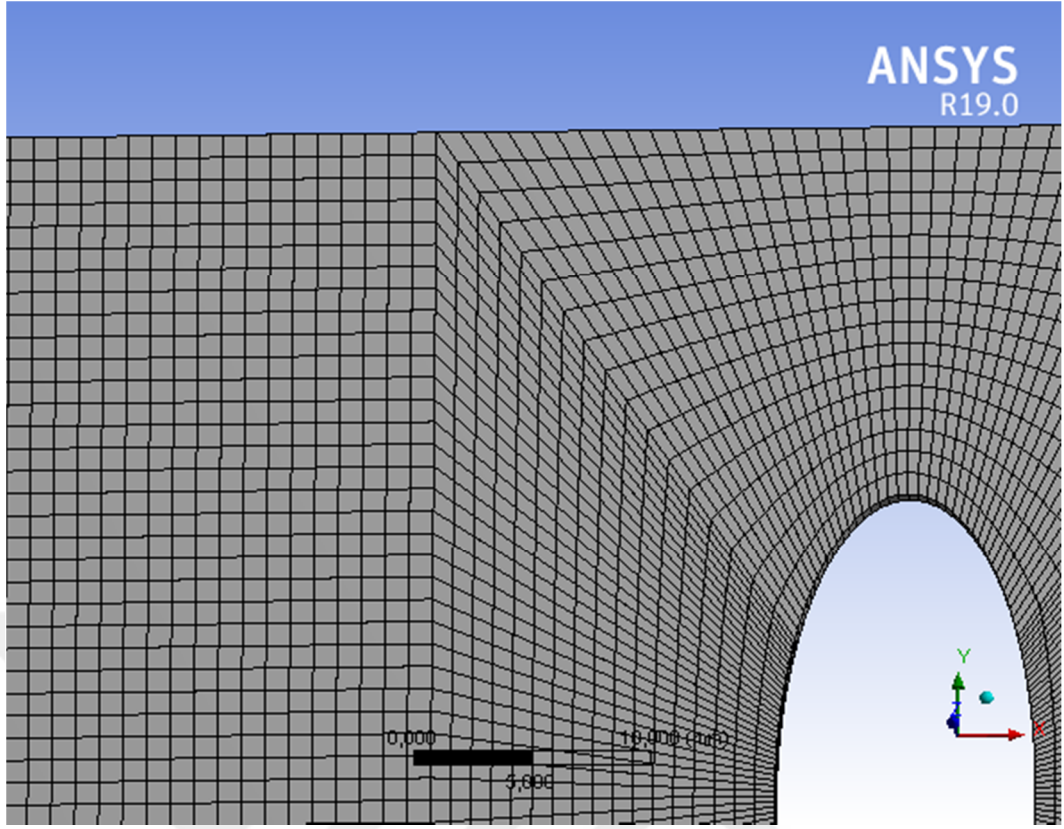
Çizelge 10. Hasarsız Yamasız, Hasarlı Yamasız, Tek Taraflı Bindirmeli ve Çift Taraflı Bindirme Bağlantılarının Mesh (Ağ) Yapısında kullanılan node (düğüm) ve eleman sayıları

Bindirme Tipi	D (mm)	d (mm)	Ağ Tipi	Node (Düğüm) sayısı	Element Sayısı
YAMASIZ	Deliksiz	Deliksiz	Quadrilateral	59803	8400
	21	11	Quadrilateral	84100	11800
	24	9	Quadrilateral	68700	9600
	24	11	Quadrilateral	82700	11600
	24	13	Quadrilateral	81300	11400
	27	11	Quadrilateral	67300	9400
TEK TARAFLI BİNDİRME	21	11	Quadrilateral	103904	16600
	24	9	Quadrilateral	103904	16600
	24	11	Quadrilateral	102504	16400
	24	13	Quadrilateral	101104	16200
	27	11	Quadrilateral	87104	14200
ÇİFT TARAFLI BİNDİRME	21	11	Quadrilateral	123708	21400
	24	9	Quadrilateral	108308	19800
	24	11	Quadrilateral	122308	21200
	24	13	Quadrilateral	120908	21000
	27	11	Quadrilateral	106908	19000

Kritik gerilme dağılımlarının oluşacağı hatlar belirlenerek, σ_x , σ_y , σ_{vm} , τ_{xy} gerilme dağılımları incelenmiştir. Sadece kritik bölgeler için değil numunenin tümü için düzgün ağ yapısı planlanmış ve oluşturulmuştur. Aşağıda Şekil 3.10 ve Şekil 3.11'de oluşturulan mesh (ağ) yapısı verilmiştir.

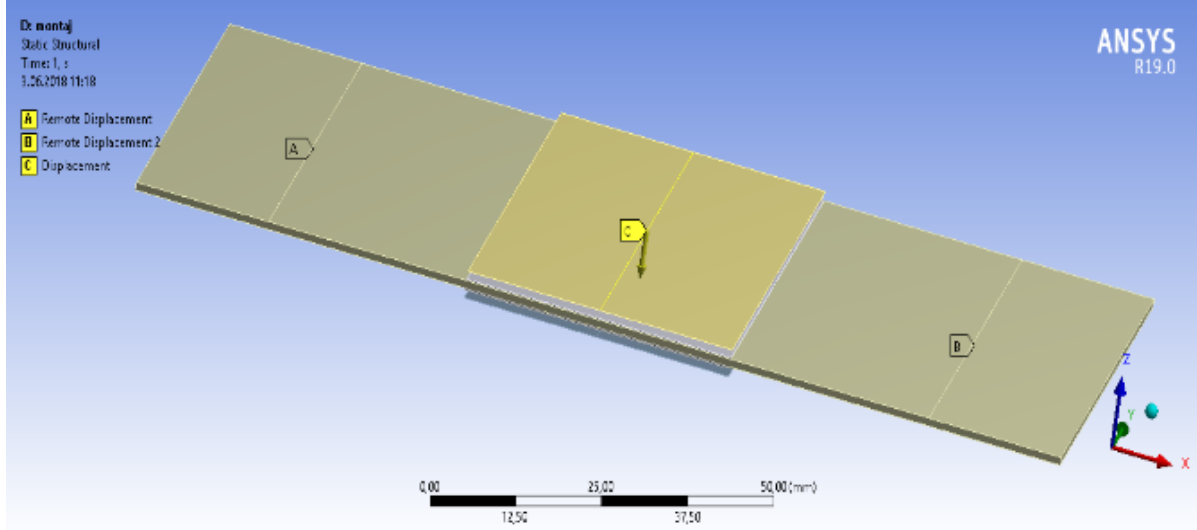


Şekil 3.10. Mesh (Ağ) yapısı



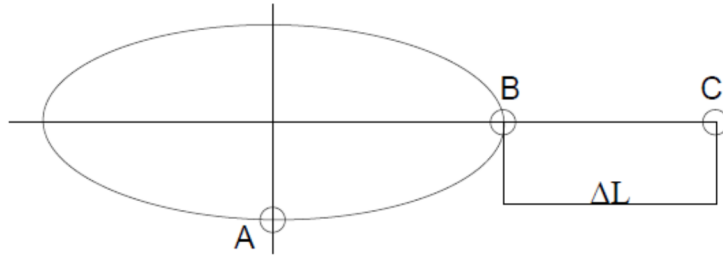
Şekil 3.11. Mesh (Ağ) yapısı

Uygulanan sınır şartları ve kuvvetler Şekil 3.12’deki gibidir. “A” ve “B” ile işaret edilen çizgiler alt sol ve sağ mesnetleri, “C” çizgisi ise üstten uygulanan kuvveti göstermektedir.



Şekil 3.12. Uygulanan Sınır Şartları ve Kuvvetler ile Düzgün Ağ Yapısı

Nümerik analizde, aşağıdaki Şekil 3.13’te gösterilen, eliptik hasarlı Al 2024 T3 alüminyum levhalar üzerindeki kritik BC hattı boyunca gerilme dağılımları incelenmiştir.



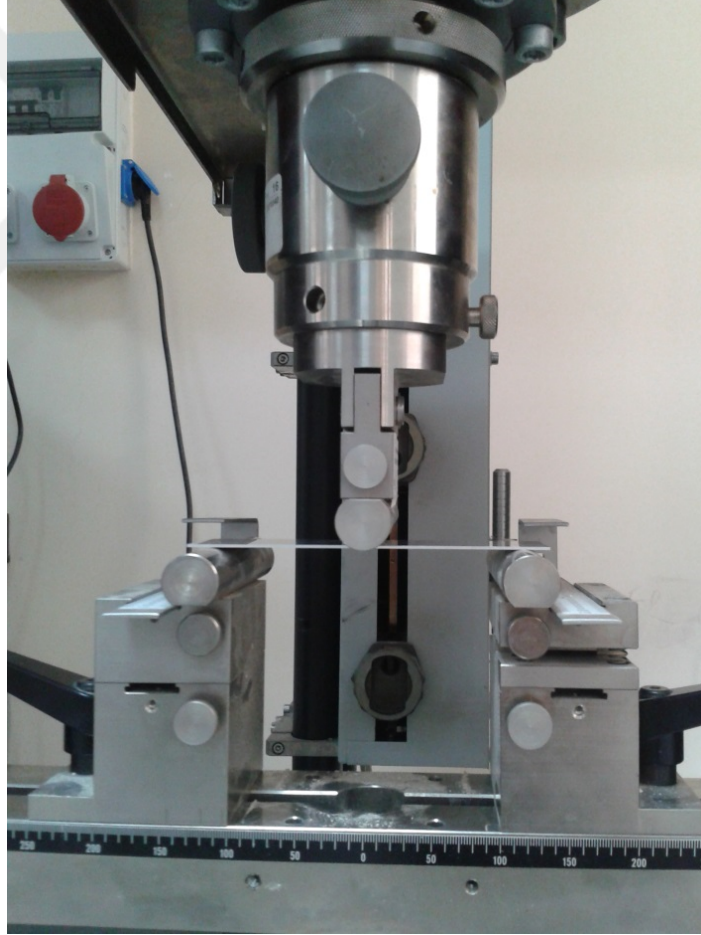
Şekil 3.13. Nümerik Analizde incelenen AB ve BC gerilme hatları

Nümerik analizde hasar yükleri belirlenirken, deneysel olarak bulunan hasar sehiminin %20 fazlasına kadar 0.5 mm aralıklarla sehim artırılarak, kullandığımız Al 2024 T3 sünek bir malzeme olması dolayısıyla von-Mises kırılma kriterine göre incelenmiştir. Sehimi 0.5 mm aralıklarla artırırken numune üzerindeki von-Mises gerilmelerinin Al 2024 T3’ün akma gerilmesine yaklaştığı veya ulaştığı bölge belirlenip bu bölge 0.1 mm aralıklarla tekrar incelenerek tam hasar sehimi ve gerilmesi bulunmuştur. Bu nümerik hasar gerilmeleri Çizelge 11’de belirtilerek deneysel hasar gerilmeleriyle kıyaslanmış ve %95 oranında yakınsama gözlenmiştir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Deneysel Bulgular

Hasarsız Yamasız, Hasarlı Yamasız, Hasarlı Tek Bindirmeli ve Çift Bindirmeli Yamalı olarak hazırlanan deney numuneleri, ZWICK Roell marka Statik Test Cihazı kullanılarak Üç Nokta Eğilme testine tabi tutulmuştur. Deney sonuçlarında hataları minimize edebilmek için, her bir farklı oryantasyon için 3'er tane numune hazırlanarak deneyler 3'er tekrarlı yapıp, sonuçların ortalaması alınmıştır. Şekil 4.1'de hasarlı yamasız örnek bir numune eğme cihazı çeneleri arasında yüke maruzken, üzerindeki yük ve sehimini kaydedilirken fotoğrafı verilmiştir. Çizelge 11'de her bir oryantasyon için elde edilen deneysel ve nümerik hasar yükleri, kıyaslaması ve hasar tipleri tablo halinde gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Hasarlı yamasız bir numune eğme cihazı çeneleri arasında yüke maruzken, üzerindeki yük ve sehimini kaydedilirken

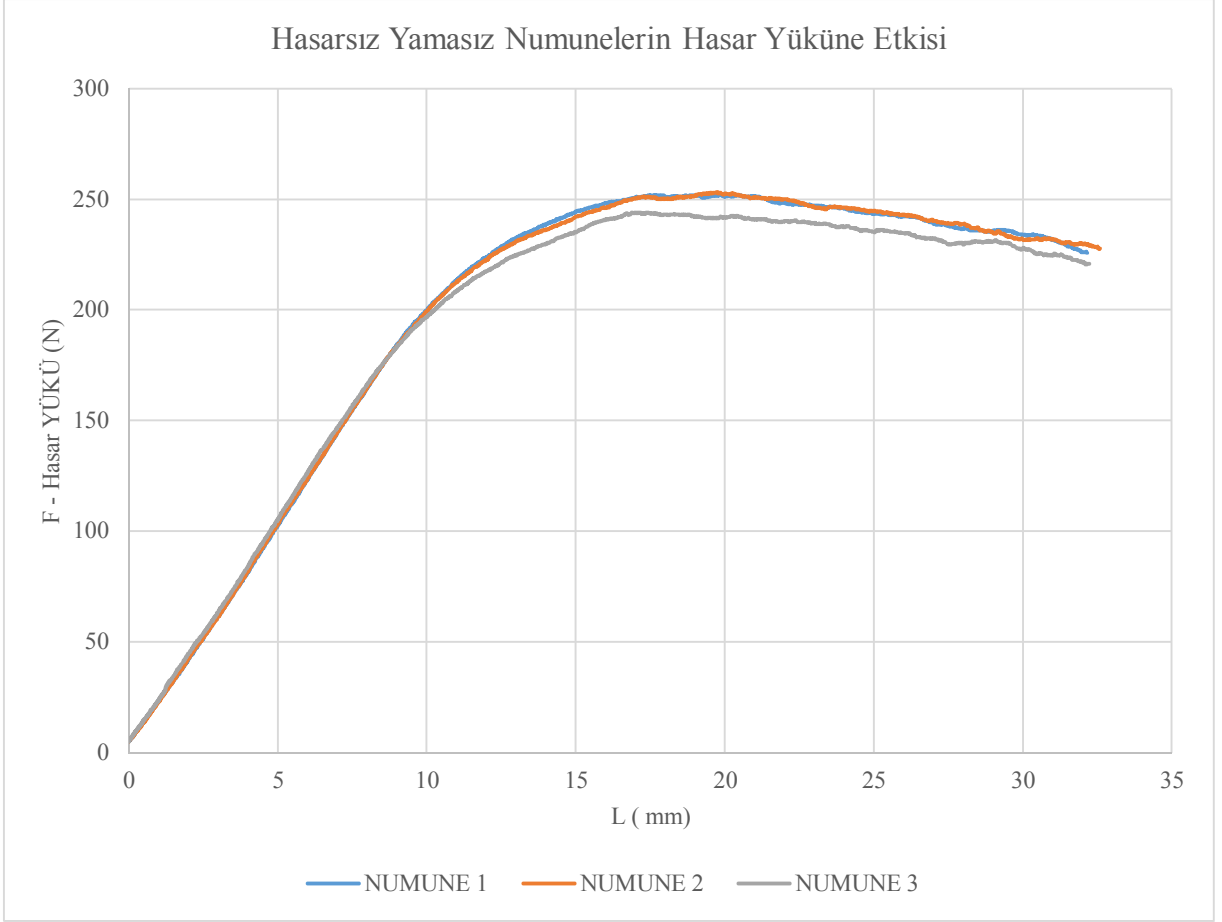
Çizelge 11. Her bir oryantasyon için elde edilen deneysel ve nümerik hasar yükleri, kıyaslaması ve hasar tipleri

<i>Yamalar</i>	<i>D (mm)</i>	<i>d (mm)</i>	<i>Yama Boyutu (mmxmm)</i>	<i>DHY (N)</i>	<i>NHY (N)</i>	<i>NHY/DHY</i>	<i>HASAR TİPİ</i>
<i>YAMASIZ</i>	Deliksiz	Deliksiz	-	249,91	240,6	0,963	A
	21	11		175,98	174,88	0,994	A
	24	9		176,87	166,91	0,944	A
	24	11		167,07	150,6	0,901	A
	24	13		162,64	156,09	0,960	A
	27	11		158,31	148,22	0,936	A
<i>TEK TARAFLI BİNDİRME</i>	21	11	60x40	482,61	475,28	0,985	B
	24	9		500,01	472,6	0,945	B
	24	11		491,97	454,84	0,925	B
	24	13		478,74	427,21	0,892	B
	27	11		520,75	519,77	0,998	B
<i>ÇİFT TARAFLI BİNDİRME</i>	21	11		504,38	480,31	0,952	B
	24	9		507,96	479,66	0,944	B
	24	11		520,01	465,96	0,896	B
	24	13		485,21	462,35	0,953	B
	27	11		545,93	541,41	0,992	B

A : Lama merkezine üstten etkiyen kuvvetin uygulama bölgesi boyunca merkezden eğilme

B : Yama bitim sınırından simetrik çift taraflı eğilme

4.1.1. Hasarsız yamasız numunelerin hasar yükleri



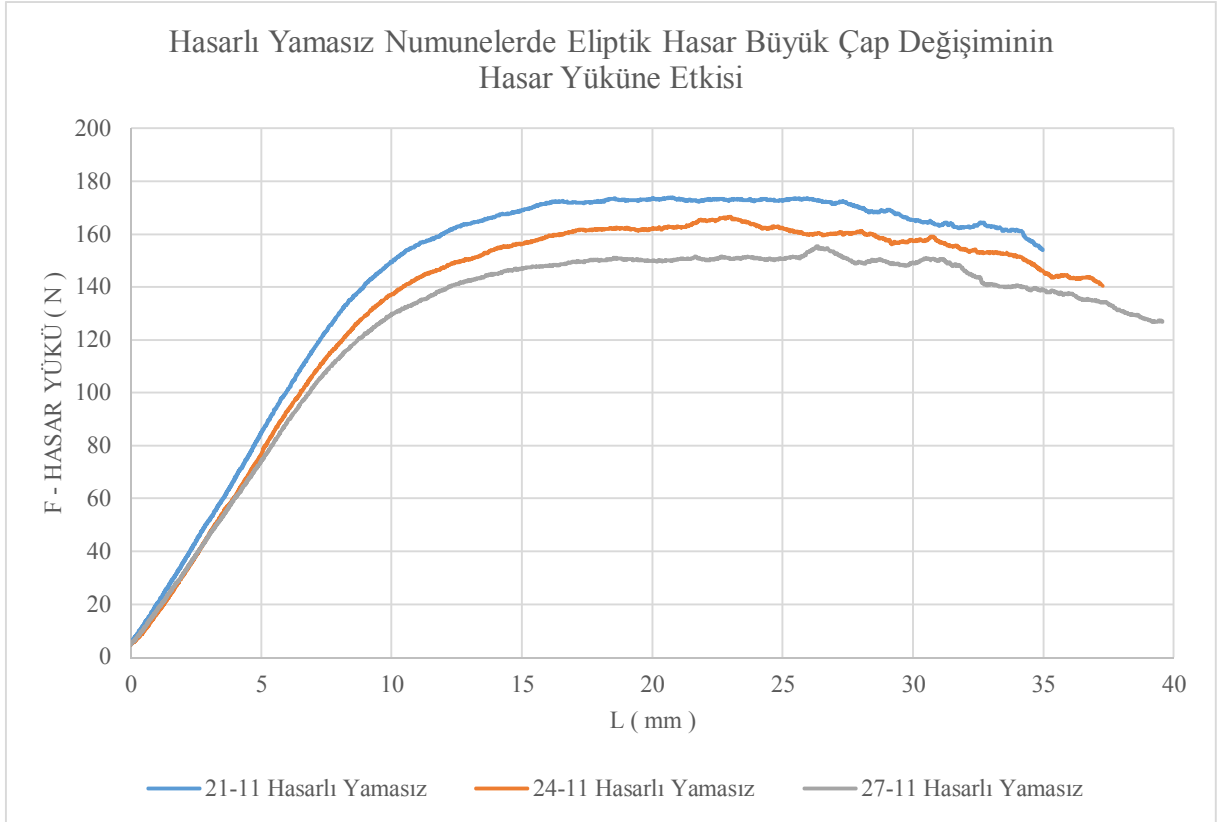
Şekil 4.2. Hasarsız yamasız numunelerin hasar yüküne etkisi

Şekil 4.2'de 3 tekrarlı hasarsız yamasız deney numune sonuçları incelendiğinde, Al 2024 T3 levhanın her üç numunesi de ortalama olarak 250 N maksimum yüke mukavemet göstermişlerdir.

4.1.2. Hasarlı numunelerde eliptik hasar boyutları değişiminin deneysel hasar yüklerine etkisi

4.1.2.1. Hasarlı yamasız numunelerde eliptik hasar boyutlarının hasar yüklerine etkisi

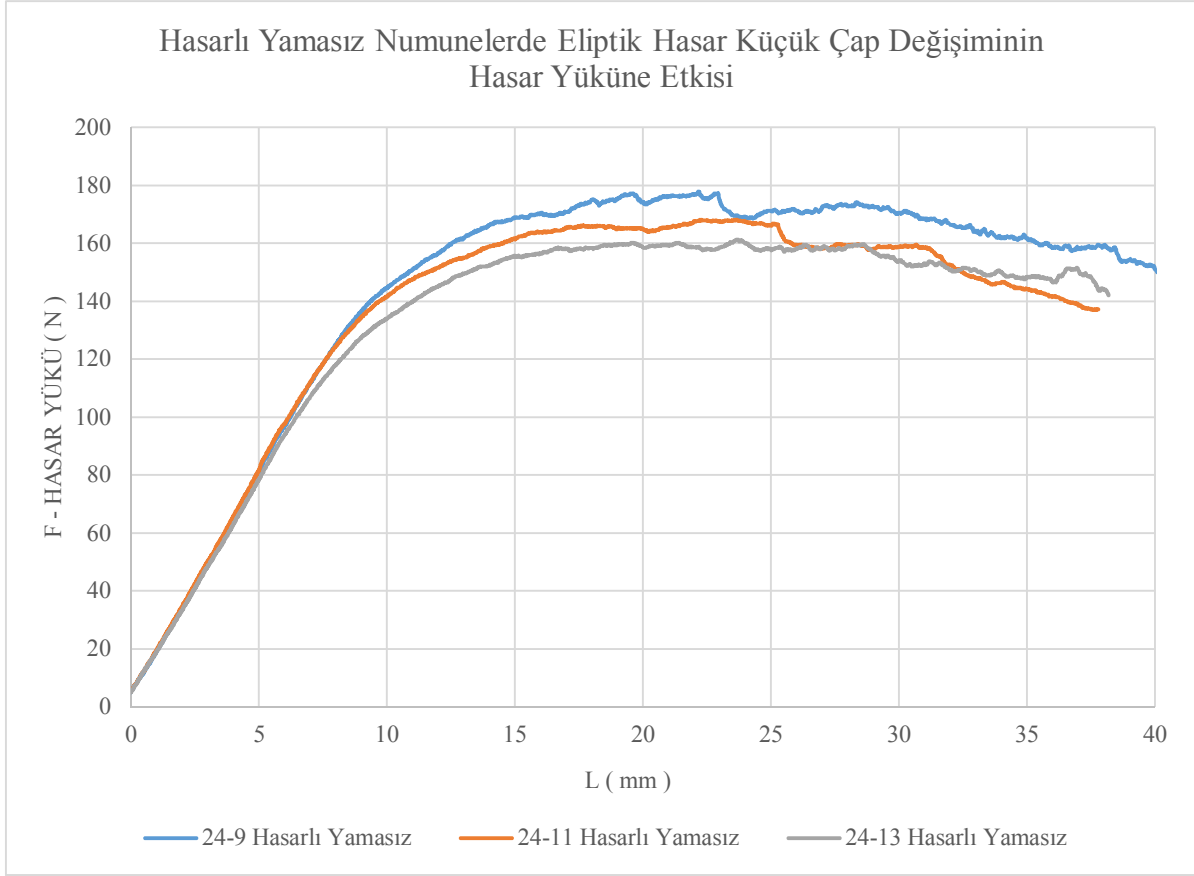
4.1.2.1.1. Hasarlı yamasız numunelerde eliptik hasar büyük çapının hasar yüklerine etkisi



Şekil 4.3. Hasarlı yamasız numunelerde eliptik hasar büyük çap değişiminin hasar yüküne etkisi

Şekil 4.3'te Hasarlı Yamasız Numune deney verileri grafik olarak gösterilmektedir. Bu veriler doğrultusunda yaptığımız incelemede, hasar açıldığında hasar yükleri 250 N'dan ortalama 165 N mertebelerine düşmektedir. Eliptik hasar büyük çapı arttıkça, uygulanabilen hasar yükünün azaldığı görülmektedir. Bunun sebebi iki şekilde açıklanabilir. İlk olarak eliptik hasarın büyük çapı arttıkça, yüke mukavemet eden kesit alanı azalır, daha az yük taşır. İkinci olarak ise eliptik hasarın en kritik bölgesi olan uzun köşegenin uç kısımlarında, eliptik hasar büyük çapı arttıkça, uç kısımlar keskinleşeceği ve gerilme yığılması artacağı için hasar başlama riski daha da artar ve daha az yük taşır.

4.1.2.1.2. Hasarlı yamasız numunelerde eliptik hasar küçük çapının hasar yüklerine etkisi

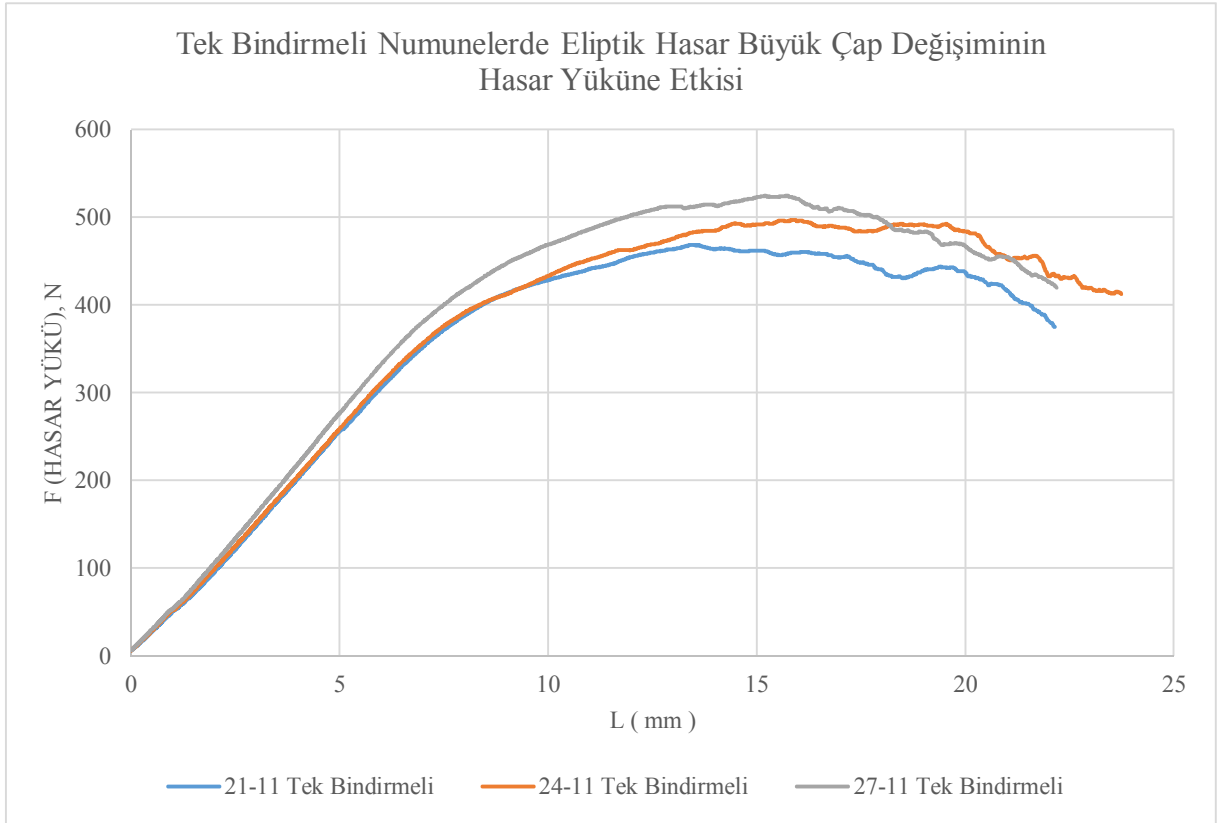


Şekil 4.4. Hasarlı yamasız numunelerde eliptik hasar küçük çap değişiminin hasar yüküne etkisi

Şekil 4.4'te Hasarlı Yamasız Numunelerde Eliptik Hasar Küçük Çap Değişiminin deney sonuçları görülmektedir. Grafikten de anlaşılacağı üzere, eliptik hasar küçük çapı arttıkça, eğmeye mukabil olan alan küçüldüğü için hasar yükleri düşmektedir.

4.1.2.2. Tek bindirmeli yamalı numunelerde eliptik hasar boyutlarının hasar yüklerine etkisi

4.1.2.2.1. Tek bindirmeli yamalı numunelerde eliptik hasar büyük çapın hasar yüklerine etkisi



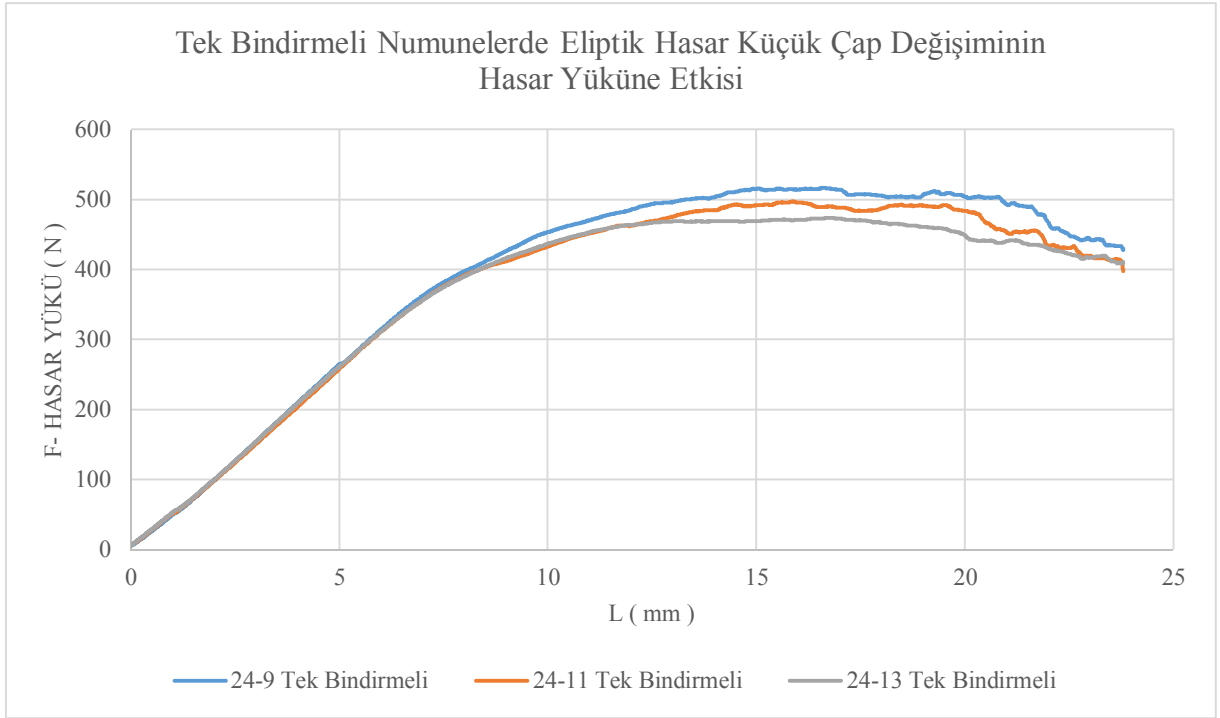
Şekil 4.5. Tek bindirmeli numunelerde eliptik hasar büyük çap değişiminin hasar yüküne etkisi

Şekil 4.5'te Hasarlı Tek Bindirmeli yamalı numunelerde eliptik hasar büyük çap değişiminin deney sonuçları görülmektedir. Grafiği incelediğimizde hasarlı yamasız numunelerin ortalama hasar yükü 165 N iken tek taraflı yamandığında ortalama 500 N'a çıkmaktadır. Bu değer hasarsız numunelerin (250 N) iki mislidir yani malzeme hasarsız halinin iki misli daha fazla eğilmeye karşı dirençli hale gelmiştir. Bu da demek oluyor ki, tek taraflı bindirmeler ile yapılan hasar tamirlerinin başarılı sonuç verdiği söylenebilir.

Malzeme yamaların bitiminden eğilerek hasar görmektedir. Yama boyunca plastik bir eğilme yoktur. Bu da yama malzemesinin plastik olarak sünek olmayan bir yapıda olduğunu gösterir. Dolayısıyla yama bölgesinde kalıcı bir deformasyon yoktur ve bu rijit yapı yükü yama sınırlarının dışına kendisi plastik deforme olmadan iletmektedir. Hasarlı yamalı numunelerin eğilmeye karşı hasarsızların bile iki misli mukavemet göstermesi

şundandır: Hasarsız numuneler numunenin tam ortasında kuvvetin uygulandığı yerden tek bir eğilme bölgesi göstermektedir ve Al 2024 T3 malzemenin tek bir bölgeden eğilmeye gösterdiği direnç 250 N'dur. Hasarlı yamasız numuneler ise yine tek bir bölgeden eğilmeye gösterdiği direnç, hasardan dolayı ortalama 165 N'a düşmektedir. Bu hasarlı malzemeye yama yapıldığında ise yamalı bölge plastik olarak blok halinde rijit bir bölge olarak davranmakta ve eğilme bölgelerini yamanın bittiği iki bölgeye taşıyarak yama dışından 2 bölgeden eğilmeye sebep olmaktadır. Al 2024 T3 malzemenin tek bir bölgeden eğilmeye gösterdiği direnç 250 N olduğuna göre 2 bölgeden eğilmeye $250 \times 2 = 500$ N direnç göstermesi normaldir. Burada eliptik hasar büyük çapı arttıkça, eğilmeye mukabele eden yamalı rijit bölge zayıflamakta ve rijitliği düştüğü için 3. bir eğilme bölgesi ama elastik bir eğilme bölgesi göstererek yükü elastik olarak bir miktar kendisi aldığı için daha fazla toplam yükü diğer iki plastik eğilme bölgesi plastik olarak hasar yüküne ulaşır. Bu yüzden eliptik hasar büyük çapı arttıkça rijit bölgenin zayıflaması artar ve elastik olarak eğilerek daha fazla yük emer, bu da diğer 2 bölgenin plastik hasar yükü sınırına ulaşması için gereken toplam yükü artırır. Sonuç olarak elips büyük çapı arttıkça sistemin toplam hasar yükü de artar.

4.1.2.2.2. Tek bindirmeli numunelerde eliptik hasar küçük çapın hasar yüklerine etkisi

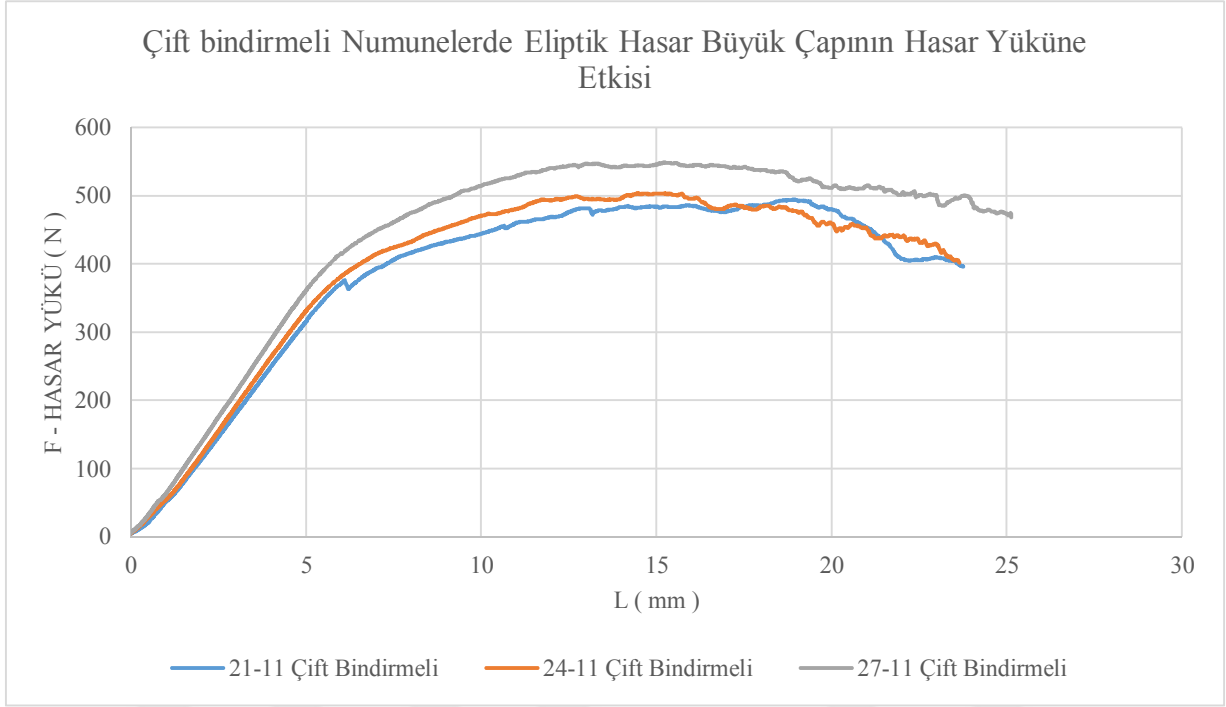


Şekil 4.6. Tek bindirmeli numunelerde eliptik hasar küçük çap değişiminin hasar yüküne etkisi

Şekil 4.6’da Tek Bindirmeli numunelerde Eliptik hasar küçük çap değişimi deney sonuçlarını göstermektedir. Grafiği incelediğimizde, eliptik hasar küçük çap arttıkça, eğmeye mukabil olan hasar yükünde düşüş gözlemlenmektedir. Bunun sebebi eliptik hasar küçük çapı arttıkça uzun köşegenin uçları yuvarlanmakta dolayısıyla çentik etkisi azalmakta ve mukavemet artmaktadır. Bu da blok olarak hareket eden rijit yama bölgesinin rijitliğini artırarak elastik eğilmesini azaltır bu da yükü elastik olarak daha az eğilerek üzerine daha az almasına ve rijit bir şekilde daha fazla yama uçlarına aktarmasına ve bu uçtaki 2 eğilme bölgesinin daha düşük bir toplam yükte hasar sınırına ulaşarak hasara uğramasına sebep olur.

4.1.2.3. Çift bindirmeli yamalı numunelerde eliptik hasar boyutlarının hasar yüklerine etkisi

4.1.2.3.1. Çift bindirmeli yamalı numunelerde eliptik hasar büyük çapının hasar yüklerine etkisi



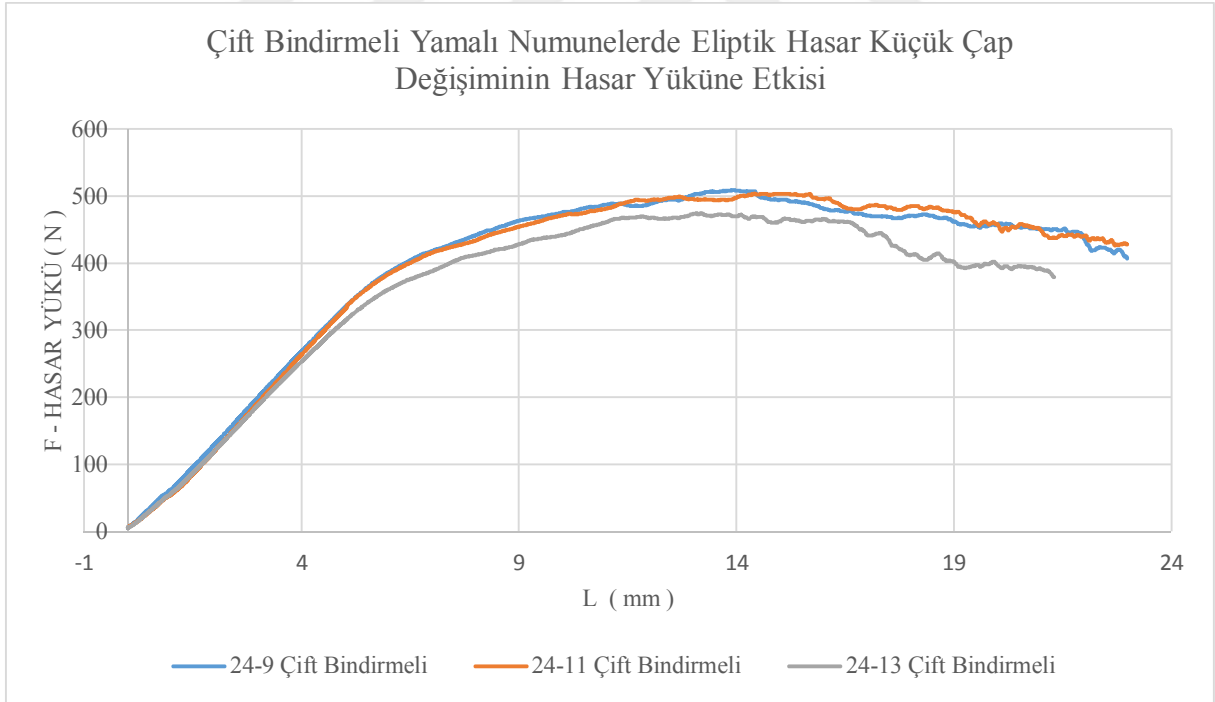
Şekil 4.7. Çift bindirmeli numunelerde eliptik hasar büyük çapının hasar yüküne etkisi

Şekil 4.7’de Hasarlı Çift Bindirmeli yamalı numunelerde eliptik hasar büyük çap değişiminin deney sonuçları görülmektedir. Grafiği incelediğimizde hasarlı yamasız numunelerin ortalama hasar yükü 165 N iken tek taraflı yamandığında ortalama 520 N’a çıkmaktadır. Bu değer hasarsız numunelerin (250 N) iki mislinden daha fazladır yani malzeme hasarsız halinin iki mislinden daha fazla eğilmeye karşı dirençli hale gelmiştir. Bu da demek oluyor ki, çift taraflı bindirmeler ile yapılan hasar tamirlerinin başarılı sonuç verdiği söylenebilir.

Malzeme yamaların bitiminden eğilerek hasar görmektedir. Yama boyunca plastik bir eğilme yoktur. Bu da yama malzemesinin plastik olarak sünek olmayan bir yapıda olduğunu gösterir. Dolayısıyla yama bölgesinde kalıcı bir deformasyon yoktur ve bu rijit yapı yükü yama sınırlarının dışına kendisi plastik deforme olmadan iletmektedir. Hasarlı yamalı numunelerin eğilmeye karşı hasarsızların bile iki misli mukavemet göstermesi şundandır: Hasarsız numuneler numunenin tam ortasında kuvvetin uygulandığı yerden tek bir eğilme bölgesi göstermektedir ve Al 2024 T3 malzemenin tek bir bölgeden eğilmeye

gösterdiği direnç 250 N'dur. Hasarlı yamasız numuneler ise yine tek bir bölgeden eğilmeye gösterdiği direnç, hasardan dolayı ortalama 165 N'a düşmektedir. Bu hasarlı malzemeye yama yapıldığında ise yamalı bölge plastik olarak blok halinde rijit bir bölge olarak davranmakta ve eğilme bölgelerini yamanın bittiği iki bölgeye taşıyarak yama dışından 2 bölgeden eğilmeye sebep olmaktadır. Al 2024 T3 malzemenin tek bir bölgeden eğilmeye gösterdiği direnç 250 N olduğuna göre 2 bölgeden eğilmeye $250 \times 2 = 500$ N direnç göstermesi normaldir. Burada eliptik hasar büyük çapı arttıkça, eğilmeye mukabele eden yamalı rijit bölge zayıflamakta ve rijitliği düştüğü için 3. bir elastik eğilme bölgesi göstererek yükü elastik olarak bir miktar kendisi aldığı için daha fazla toplam yükte diğer iki plastik eğilme bölgesi plastik olarak hasar yüküne ulaşır. Bu yüzden eliptik hasar büyük çapı arttıkça rijit bölgenin zayıflaması artar ve elastik olarak eğilerek daha fazla yük emer, bu da diğer 2 bölgenin plastik hasar yükü sınırına ulaşması için gereken toplam yükü artırır. Sonuç olarak elips büyük çapı arttıkça sistemin toplam hasar yükü de artar.

4.1.2.3.2. Çift bindirmeli yamalı numunelerde eliptik hasar küçük çapının hasar yüklerine etkisi

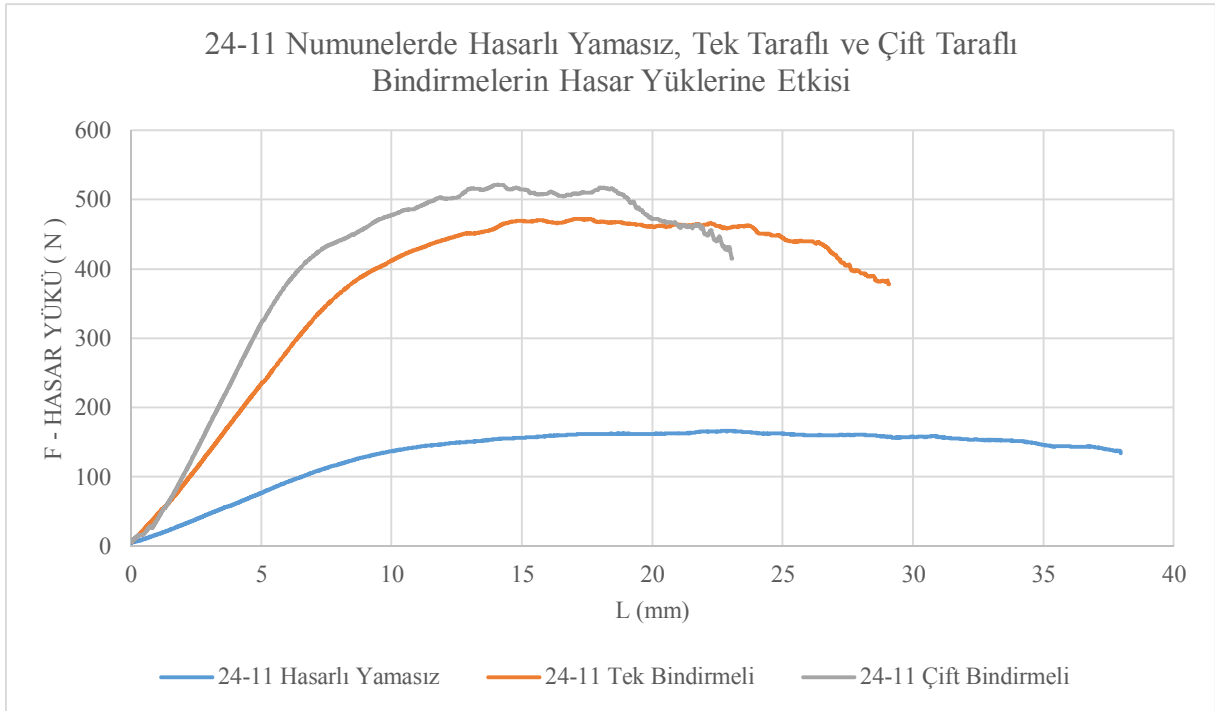


Şekil 4.8. Çift bindirmeli numunelerde eliptik hasar küçük çap değişiminin hasar yüküne etkisi

Şekil 4.8'de Çift Bindirmeli numunelerde Eliptik hasar küçük çap değişimi deney sonuçlarını göstermektedir. Grafiği incelediğimizde, eliptik hasar küçük çap arttıkça,

eğmeye mukabil olan hasar yükünde düşüş gözlemlenmektedir. Bunun sebebi eliptik hasar küçük çapı arttıkça uzun köşegenin uçları yuvarlanmakta dolayısıyla çentik etkisi azalmakta ve mukavemet artmaktadır. Bu da blok olarak hareket eden rijit yama bölgesinin rijitliğini artırarak elastik eğilmesini azaltır bu da elastik olarak eğilerek elastik olarak üzerine aldığı yükü azaltır ve rijit bir şekilde daha fazla yama uçlarına aktarmasına ve bu uçtaki 2 eğilme bölgesinin daha düşük bir toplam yükte hasar sınırına ulaşarak hasara uğramasına sebep olur.

4.1.3. Bindirme sayısının deneysel hasar yüklerine etkisi



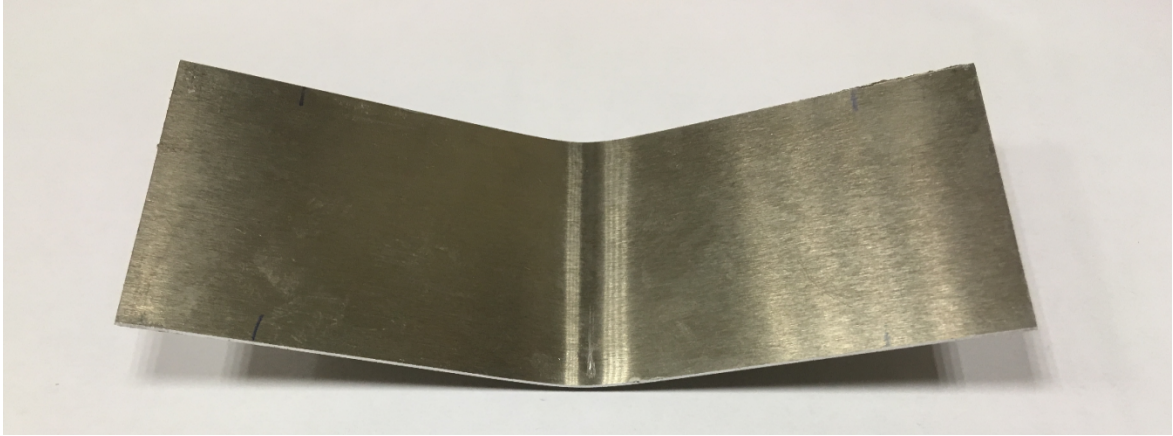
Şekil 4.9. 24-11 Numunelerde hasarlı yamasız, tek taraflı ve çift taraflı bindirmelerin hasar yüklerine etkisi

Şekil 4.9’da 24-11 eliptik çaplı hasar oluşturulan Al 2024 T3 levhanın hasarlı yamasız, tek bindirme ve çift bindirme hasar yüklerinin etkisinin sonucu görülmektedir. Grafiği incelediğimizde tek ve çift yamalı tamirlerde eğmeye mukabil olan hasar yükünde büyük bir artış görülmektedir. Bu da demek oluyor ki, tek ve çift taraflı bindirmeler ile yapılan hasar tamirlerinin çok başarılı sonuç verdiği söylenebilir.

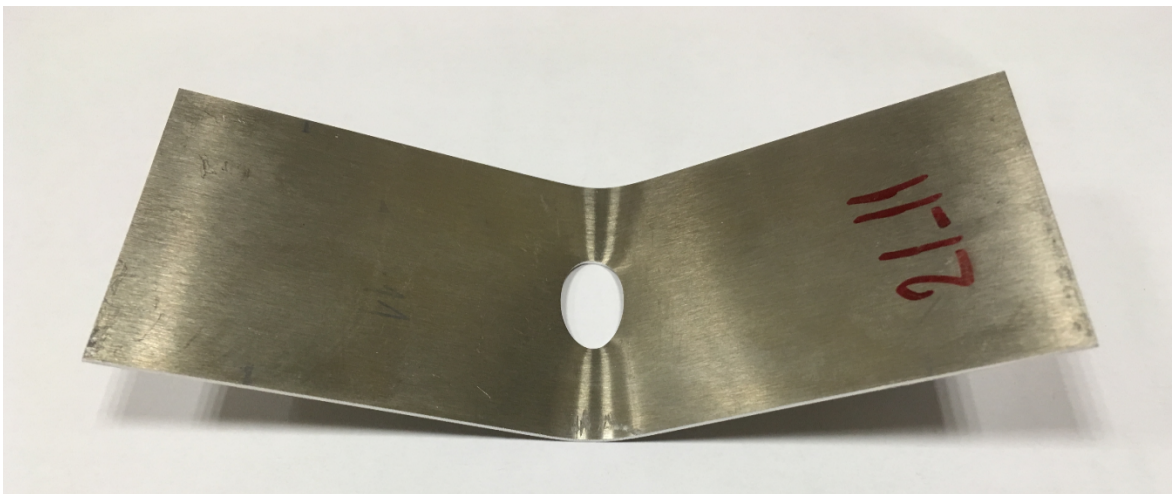
Çift bindirmeli sistemin tek bindirmeli sistemden ortalama olarak 20 N daha yüksek bir ortalama hasar yükü göstermesi iki yamanın elastik olarak deforme olarak üzerlerine aldıkları yükün tek yamadan biraz daha fazla olması ile toplam hasar yükünün artmasıdır.

Sonuç olarak, deneysel sonuçlar ile nümerik sonuçlar karşılaştırıldığında Tablo 12’de görüleceği üzere ortalama olarak %95 oranında yakınsama görülmüştür. Yapmış olduğumuz nümerik çözümleri yaklaşık çözümler olarak varsayarsak bu yakınsama oranının uygun olduğu ve nümerik sonuçların da kabul edilebilir olduğu söylenebilir.

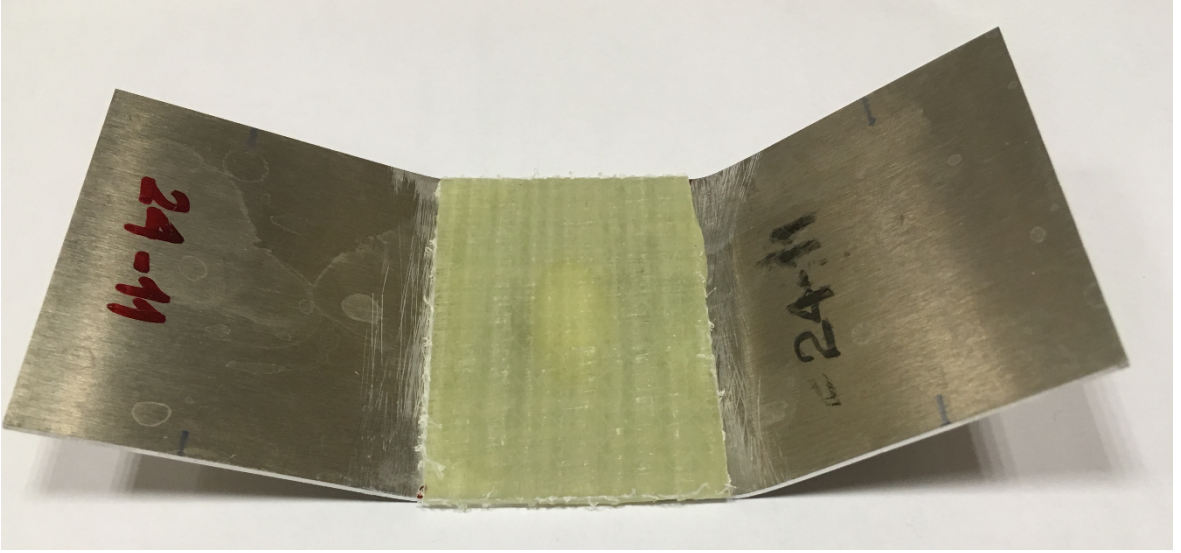
Aşağıdaki Şekil 4.10’da hasarsız yamasız numunenin 3 nokta eğilme deneyi sonrası tek bölgeden eğilerek hasara uğramış hali, Şekil 4.11’de hasarlı yamasız bir numunenin 3 nokta eğilme deneyi sonrası tek bölgeden eğilerek hasara uğramış hali, Şekil 4.12’de hasarlı tek bindirmeli yamalı bir numunenin 3 nokta eğilme deneyi sonrası 2 bölgeden eğilerek hasara uğramış hali, Şekil 4.13’te ise hasarlı çift bindirmeli yamalı bir numunenin 3 nokta eğilme deneyi sonrası 2 bölgeden eğilerek hasara uğramış hali verilmiştir.



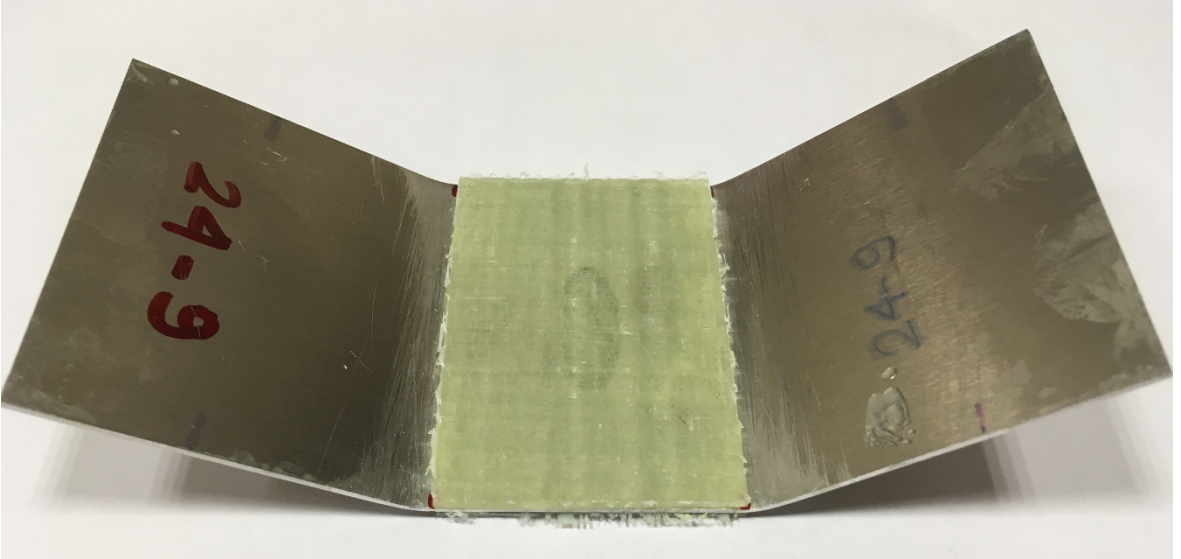
Şekil 4.10. Hasarsız yamasız bir numunenin 3 nokta eğilme deneyi sonrası tek bölgeden eğilerek hasara uğramış hali



Şekil 4.11. Hasarlı yamasız bir numunenin 3 nokta eğilme deneyi sonrası tek bölgeden eğilerek hasara uğramış hali



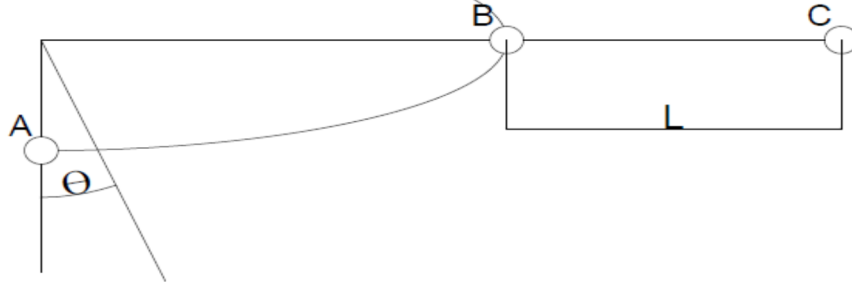
Şekil 4.12. Hasarlı tek bindirmeli yamalı bir numunenin 3 nokta eğilme deneyi sonrası 2 bölgeden eğilerek hasara uğramış hali



Şekil 4.13. Hasarlı çift bindirmeli yamalı bir numunenin 3 nokta eğilme deneyi sonrası 2 bölgeden eğilerek hasara uğramış hali

4.2. Nümerik Bulgular

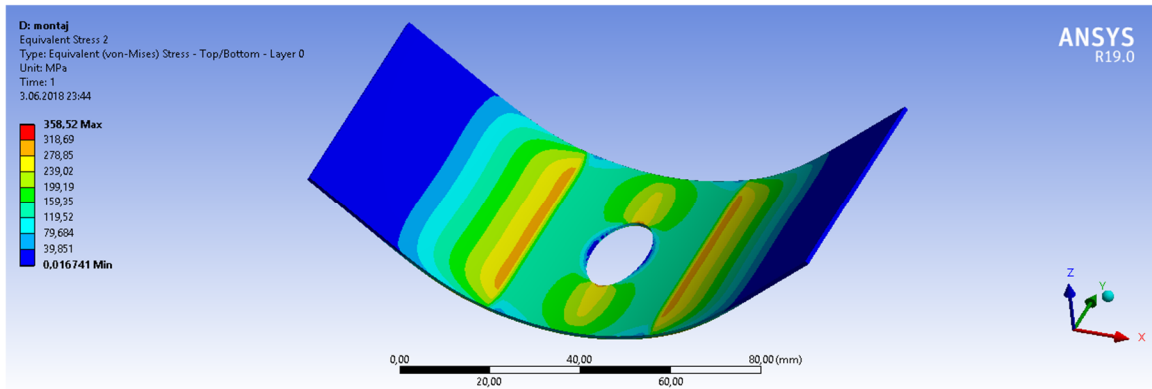
Al 2024 T3 levha malzemesi üzerindeki AB ve BC gerilme hatları Şekil 4.14'te verilmiştir.



Şekil 4.14. Nümerik Analizde incelenen AB ve BC gerilme hatları

AB Hattı Al 2024 T3 levha üzerine açılan eliptik hasarın $\frac{1}{4}$ kısmını gösterir. BC Hattı ise Eliptik hasarın uzun köşegeninin ucu ile levhanın kenarı arasında kalan mesafe olarak tanımlanmış olup; sayısal olarak grafiklendirilmiştir. Nümerik analizde en kritik bölge olan BC hattı üzerindeki gerilme dağılımları incelenmiştir.

ANSYS programı ile yapılan nümerik analiz sonrasında, 24-11 eliptik çaplı hasarlı numune üzerindeki kritik gerilme bölgeleri aşağıda Şekil 4.15'te verilmiştir. Kritik gerilme bölgeleri incelendiğinde, en kritik bölgelerin yama sınırları olduğu görülmektedir. Bu da deneysel hasar durumlarına uygundur. Çünkü numuneler tam bu bölgelerden plastik (kalıcı) olarak eğilmeye maruz kalmıştır. Diğer bir kritik bölge de elips uzun köşegenlerinin uçlarında görülmektedir. Bu da normaldir. Çünkü bu bölgelerde çentik etkisi artmaktadır. Aşağıdaki nümerik analizlerde maksimum gerilme görülen yama bitimleri değil de, bu çalışmada özellikle incelenen elips uzun köşegen uçları ile lama kenarı arasındaki kritik gerilme bölgesi yukarıdaki şekilde verilen BC hattında incelenmiştir. Zaten yama malzemesinin daha ince olması durumunda esas yük buraya binecektir.



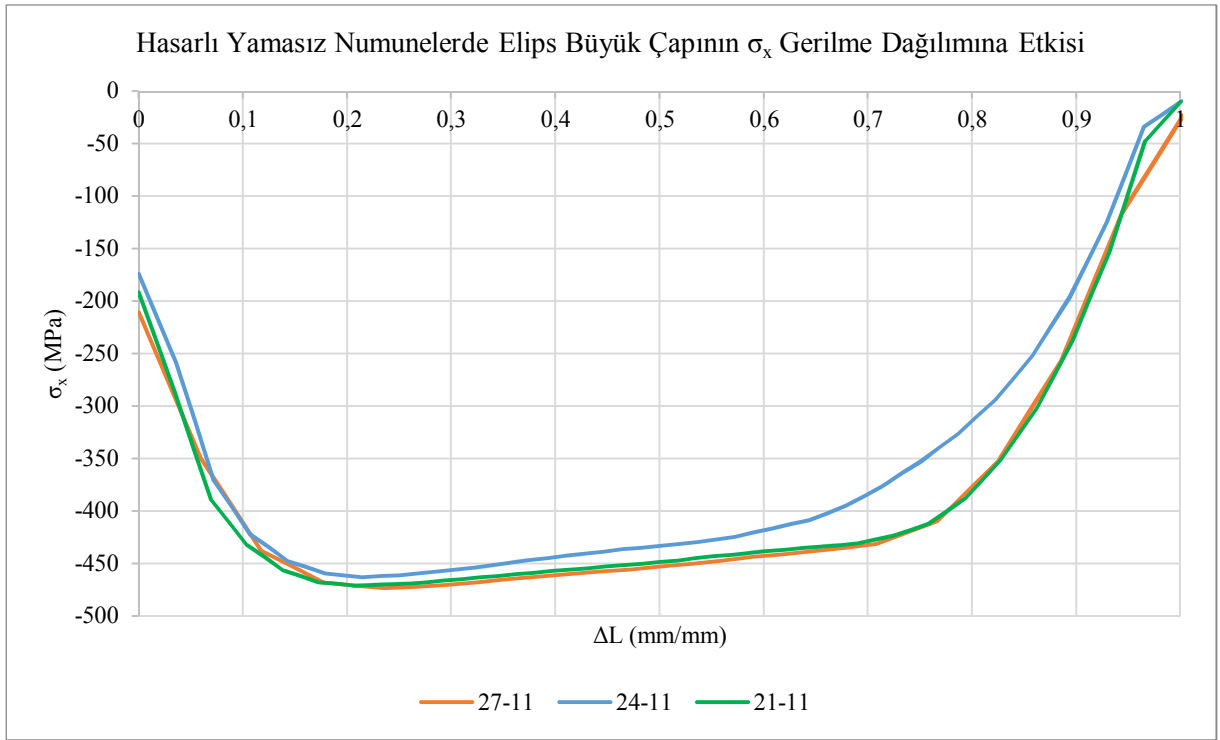
Şekil 4.15. ANSYS programı ile yapılan nümerik analiz sonrasında, 24 – 11 eliptik çaplı hasarlı numune üzerindeki kritik gerilme bölgeleri

4.2.1. Eliptik hasar boyutları değişiminin nümerik gerilme dağılımlarına etkisi

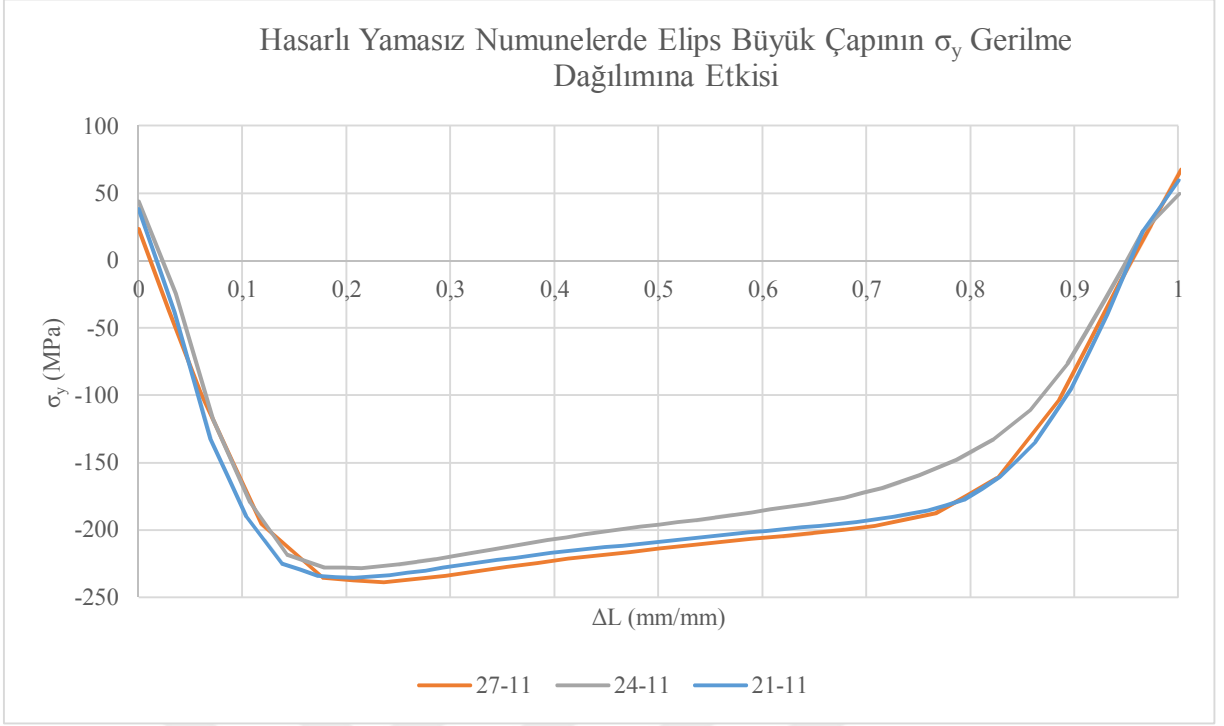
Al 2024 T3 levha üzerine açılan değişken boyutlardaki eliptik hasarın tamiri 60x40 mm sabit yama ile yapılmıştır. Bu değişken boyutlardaki eliptik hasarların etkisi grafiksel olarak incelenmiştir.

4.2.1.1. Yamasız numunelerde eliptik hasar boyutlarının nümerik gerilme dağılımlarına etkisi

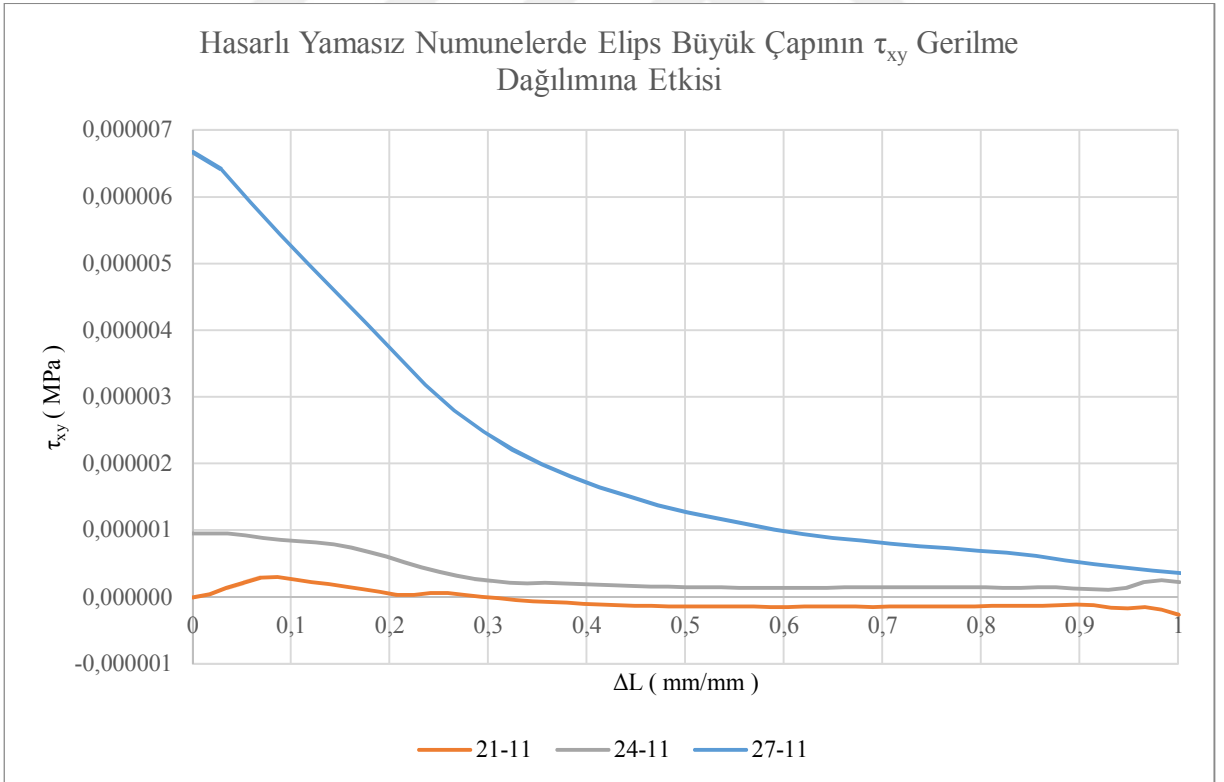
4.2.1.1.1. Yamasız numunelerde elips büyük çapının nümerik gerilme dağılımlarına etkisi



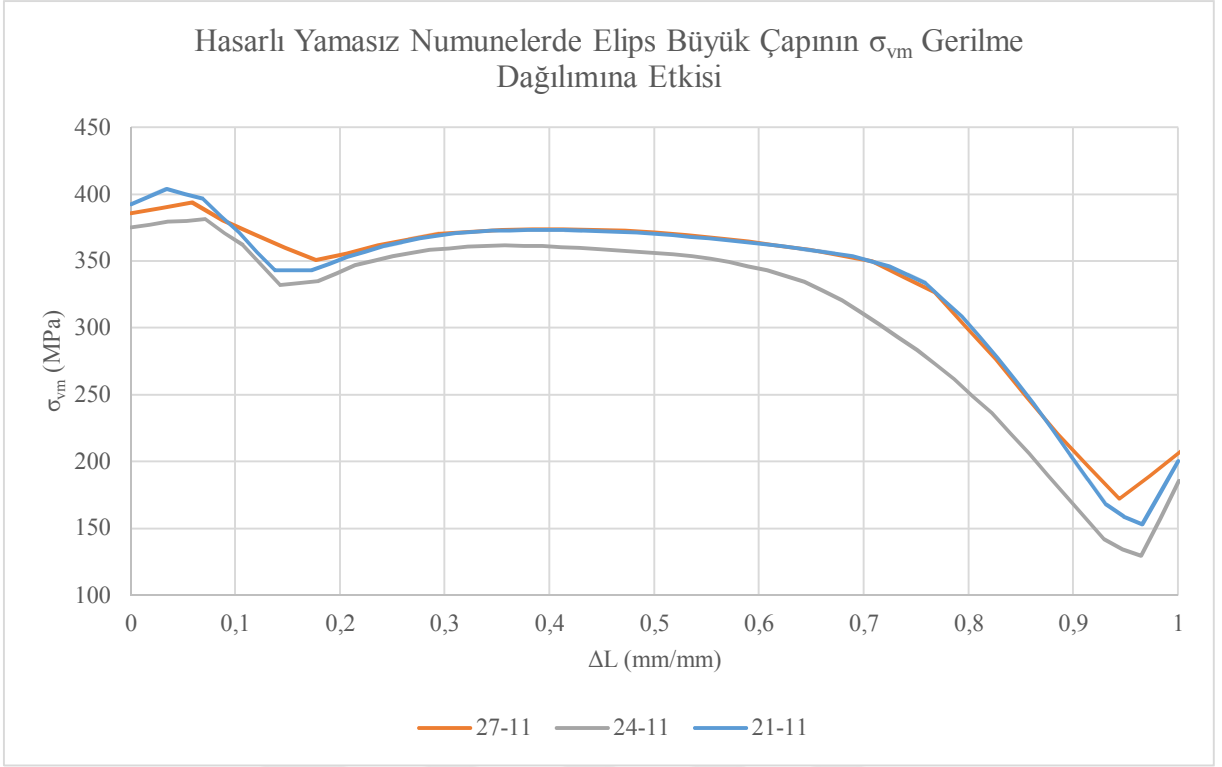
Şekil 4.16. Hasarlı yamasız numunelerde elips büyük çapının σ_x gerilme dağılımına etkisi



Şekil 4.17. Hasarlı yamasız numunelerde elips büyük çapının σ_y gerilme dağılımına etkisi



Şekil 4.18. Hasarlı yamasız numunelerde elips büyük çapının τ_{xy} gerilme dağılımına etkisi



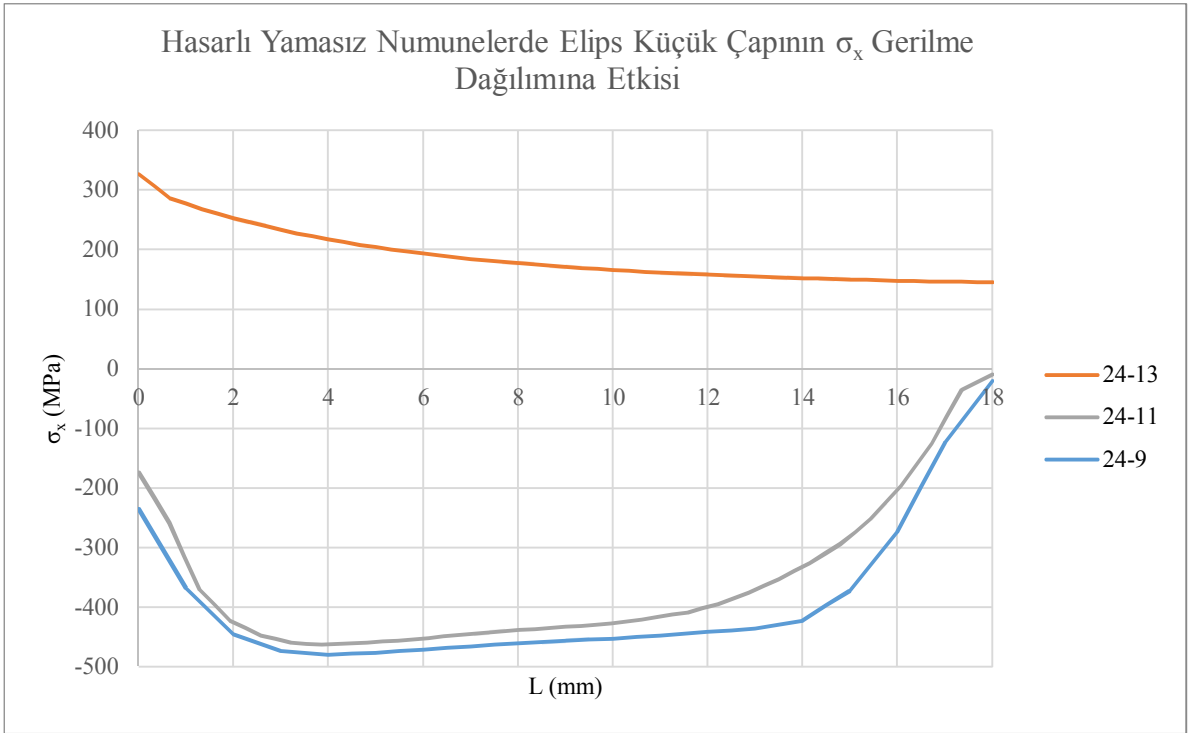
Şekil 4.19. Hasarlı yamasız numunelerde elips büyük çapının σ_{vm} gerilme dağılımına etkisi

Şekil 4.16 ve Şekil 4.17’de Hasarlı Yamasız numunelerde Eliptik Hasar Büyük Çap değişiminin BC Hattı boyunca σ_x ve σ_y gerilme dağılımlarına etkisi verilmiştir. σ_x ve σ_y gerilmeleri BC hattının başlangıç ve son bölgelerinde düşükken orta bölgelerde negatif olarak artmaktadır. σ_x gerilmesi negatif olarak maksimum 475 MPa mertebelerine yükselirken, σ_y gerilmesi negatif olarak maksimum 230 MPa mertebesinde kalmaktadır.

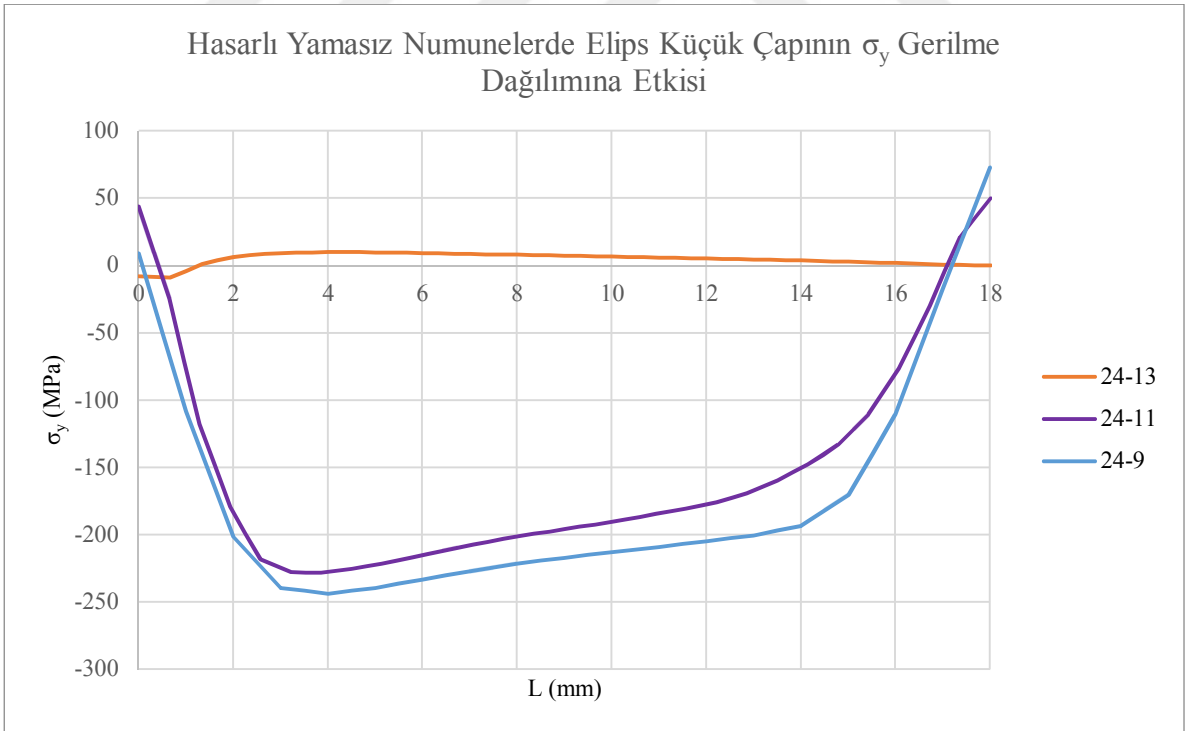
Şekil 4.18’de Hasarlı Yamasız numunelerde Eliptik Hasar Büyük Çap değişimi BC hattı boyunca τ_{xy} gerilme dağılımına etkisi verilmiştir. τ_{xy} gerilmesi başlangıçta yani B noktasında yüksek olup sonlara yani C noktasına doğru düşmektedir.

Şekil 4.19’da Hasarlı Yamasız numunelerde Eliptik Hasar Büyük Çapının BC hattı boyunca σ_{vm} von mises eşdeğer gerilme dağılımı verilmiştir. Görüldüğü üzere B noktası civarında maksimum değerde olup, C noktasına doğru düşmektedir.

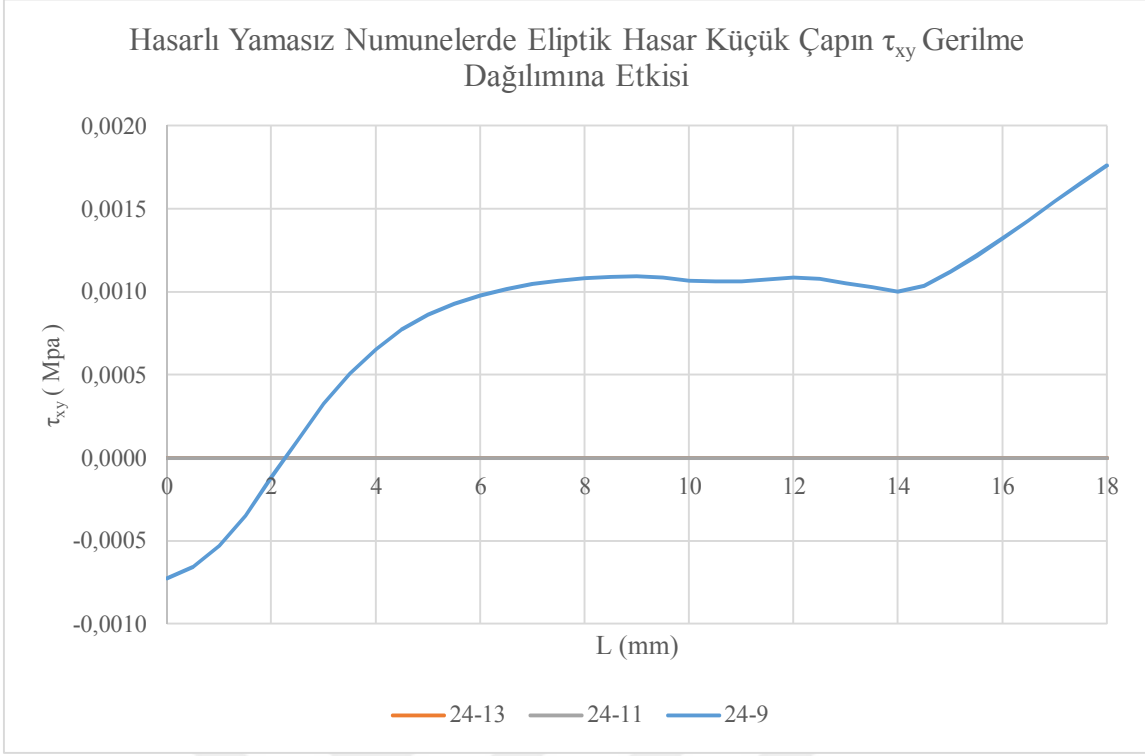
4.2.1.1.2. Yamasız numunelerde elips küçük çapının nümerik gerilmelere etkisi



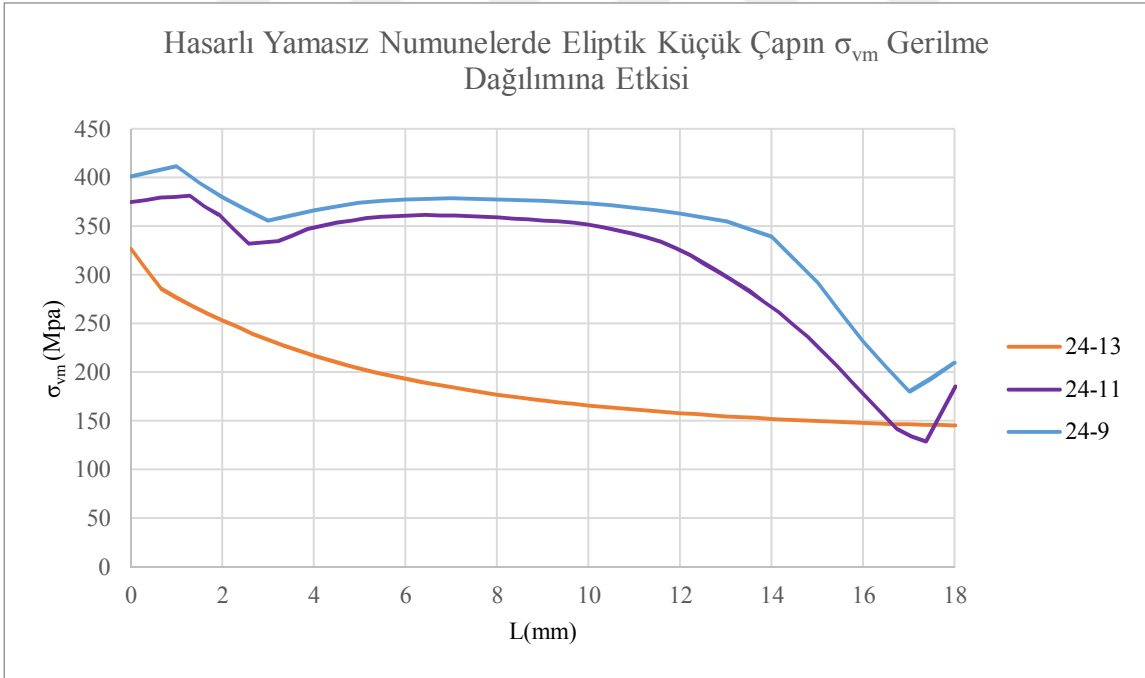
Şekil 4.20. Hasarlı yamasız numunelerde elips küçük çapının σ_x gerilme dağılımına etkisi



Şekil 4.21. Hasarlı yamasız numunelerde elips küçük çapının σ_y gerilme dağılımına etkisi



Şekil 4.22. Hasarlı yamasız numunelerde eliptik hasar küçük çapının τ_{xy} gerilme dağılımına etkisi



Şekil 4.23. Hasarlı yamasız numunelerde eliptik hasar küçük çapının σ_{vm} gerilme dağılımına etkisi

Şekil 4.20 ve Şekil 4.21’de Hasarlı Yamasız numunelerde Eliptik Hasar Küçük Çap değişiminin BC Hattı boyunca σ_x ve σ_y gerilme dağılımlarına etkisi verilmiştir. σ_x ve σ_y gerilmeleri BC hattının başlangıç ve son bölgelerinde düşükken orta bölgelerde negatif

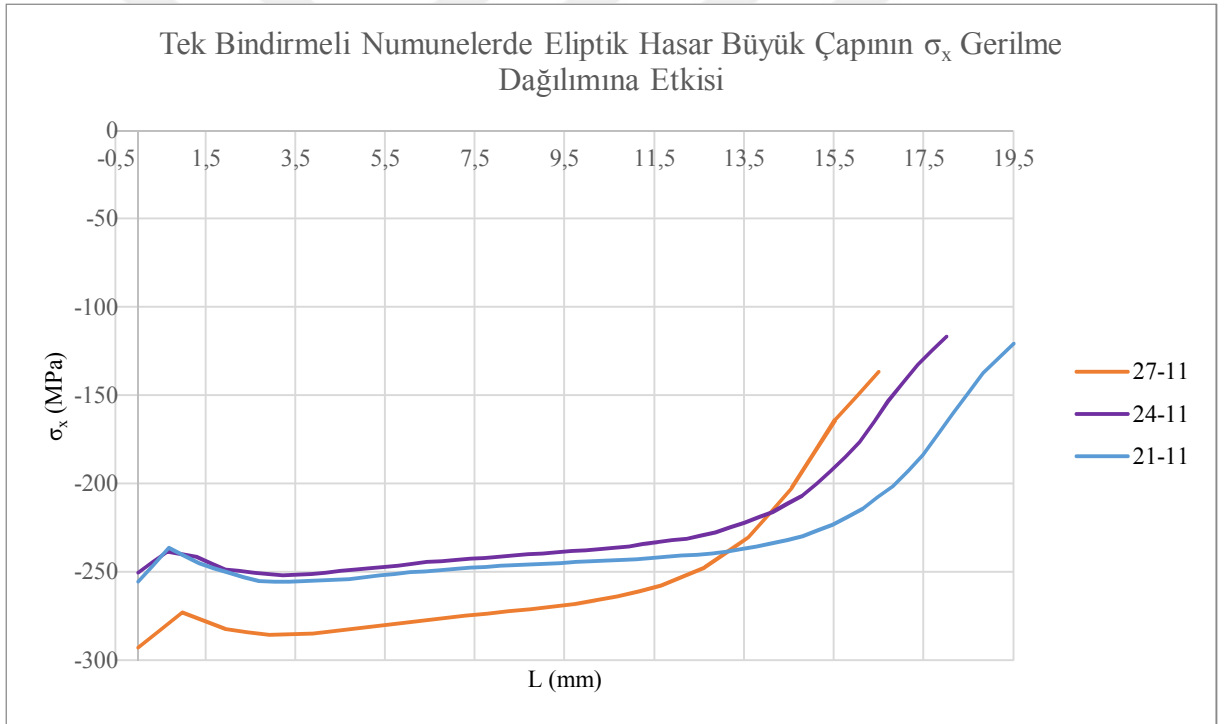
olarak artmaktadır. σ_x gerilmesi negatif olarak maksimum 480 MPa mertebelerine yükselirken, σ_y gerilmesi negatif olarak maksimum 240 MPa mertebesinde kalmaktadır.

Şekil 4.22’de Hasarlı Yamasız numunelerde Eliptik Hasar Küçük Çap değişimi BC hattı boyunca τ_{xy} gerilme dağılımına etkisi verilmiştir. τ_{xy} gerilmesi başlangıçta yani B noktasında düşük olup sonlara yani C noktasına doğru artmaktadır.

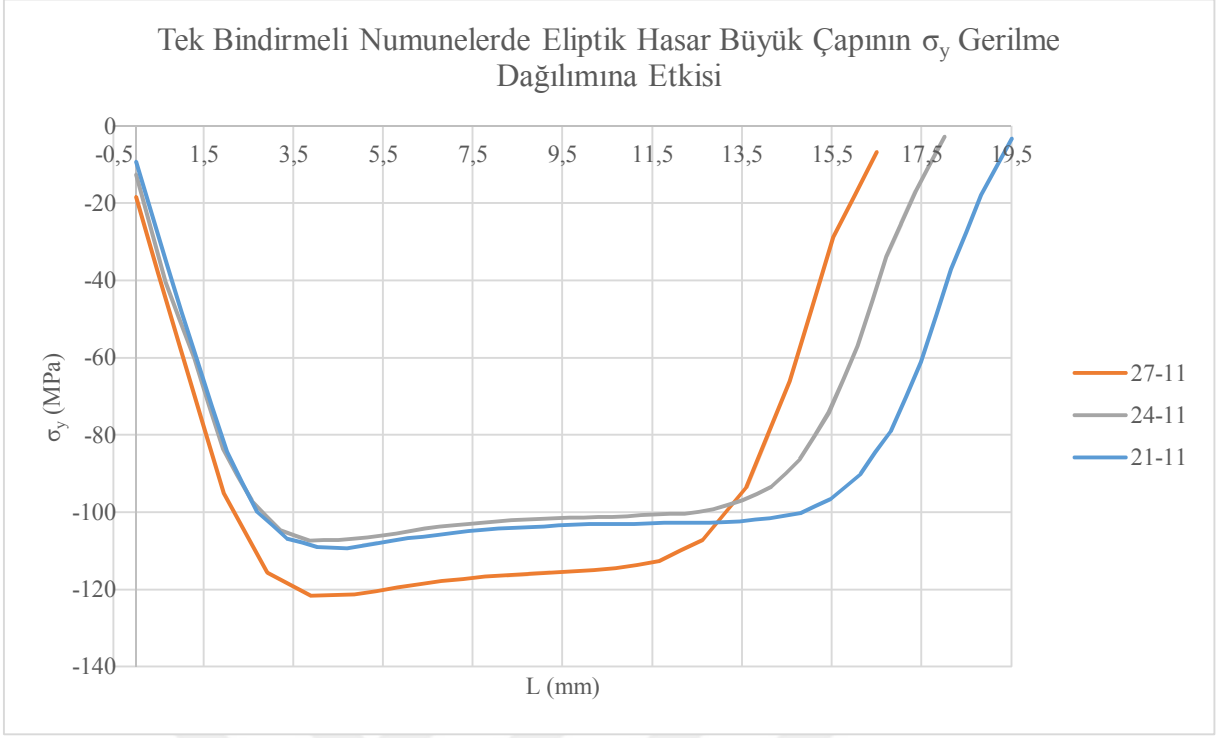
Şekil 4.23’de Hasarlı Yamasız numunelerde Eliptik Hasar Küçük Çapının BC hattı boyunca σ_{vm} von mises eşdeğer gerilme dağılımı verilmiştir. Görüldüğü üzere B noktası civarında 420 MPa’lık maksimum değerde olup, C noktasına doğru düşmektedir.

4.2.1.2. Tek Bindirmeli Numunelerde Eliptik Hasar Boyutunun Hasar Yüklerine Etkisi

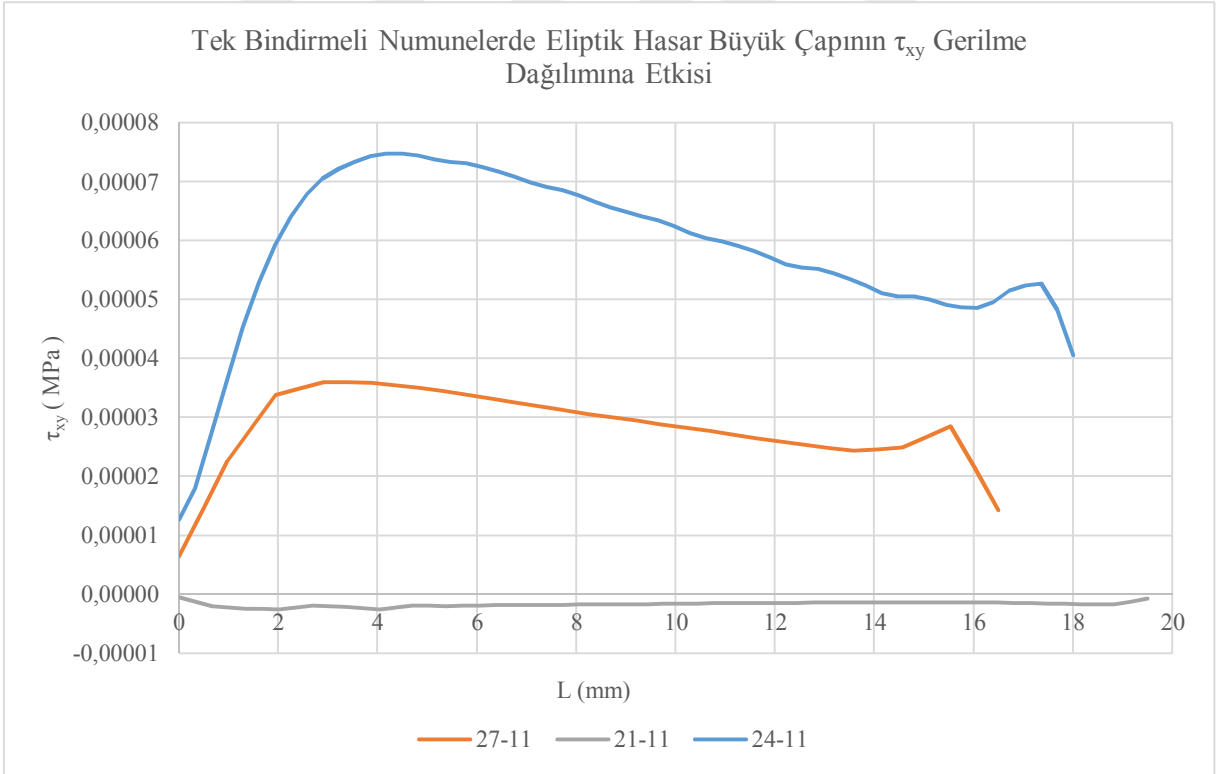
4.2.1.2.1. Tek Bindirmeli Numunelerde Elips Büyük Çapın Değişime Etkisi



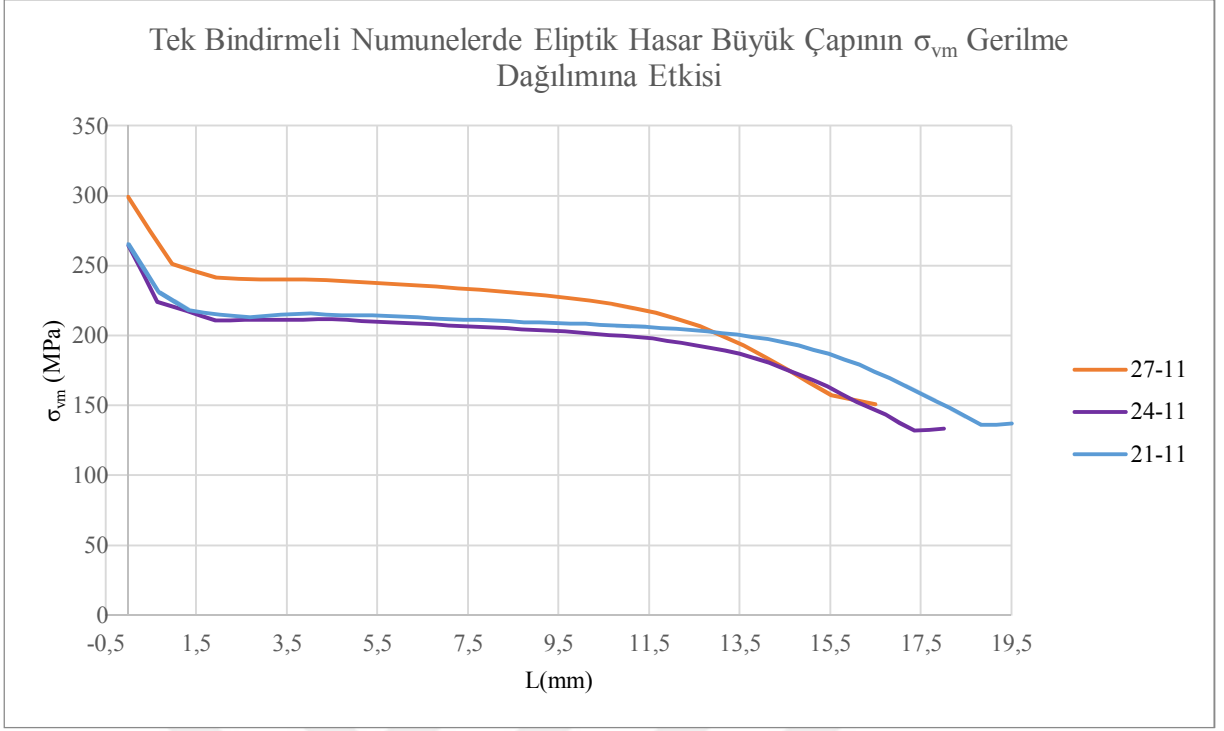
Şekil 4.24. Tek bindirmeli numunelerde eliptik hasar büyük çapının σ_x gerilme dağılımına etkisi



Şekil 4.25. Tek bindirmeli numunelerde eliptik hasar büyük çapının σ_y gerilme dağılımına etkisi



Şekil 4.26. Tek bindirmeli numunelerde eliptik hasar büyük çapının τ_{xy} gerilme dağılımına etkisi



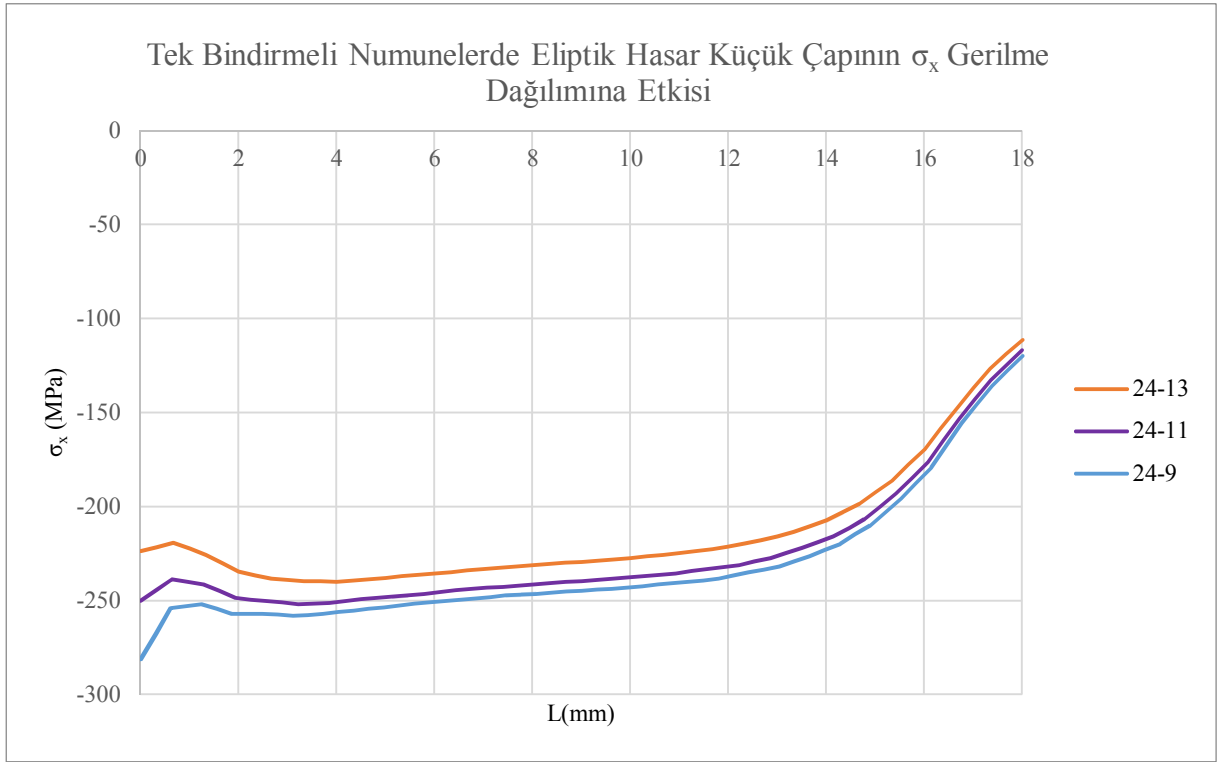
Şekil 4.27. Tek bindirmeli numunelerde eliptik hasar büyük çapının σ_{vm} gerilme dağılımına etkisi

Şekil 4.24 ve Şekil 4.25'te Tek Bindirmeli numunelerde Eliptik Hasar Büyük Çap değişiminin BC Hattı boyunca σ_x ve σ_y gerilme dağılımlarına etkisi verilmiştir. σ_x gerilmeleri başta B noktasında 280 MPa mertebesinde olmak üzere maksimum değerde, σ_y gerilmeleri BC hattının başlangıç ve son bölgelerinde düşükken orta bölgelerde negatif olarak artmaktadır negatif olarak maksimum 120 MPa mertebesinde kalmaktadır.

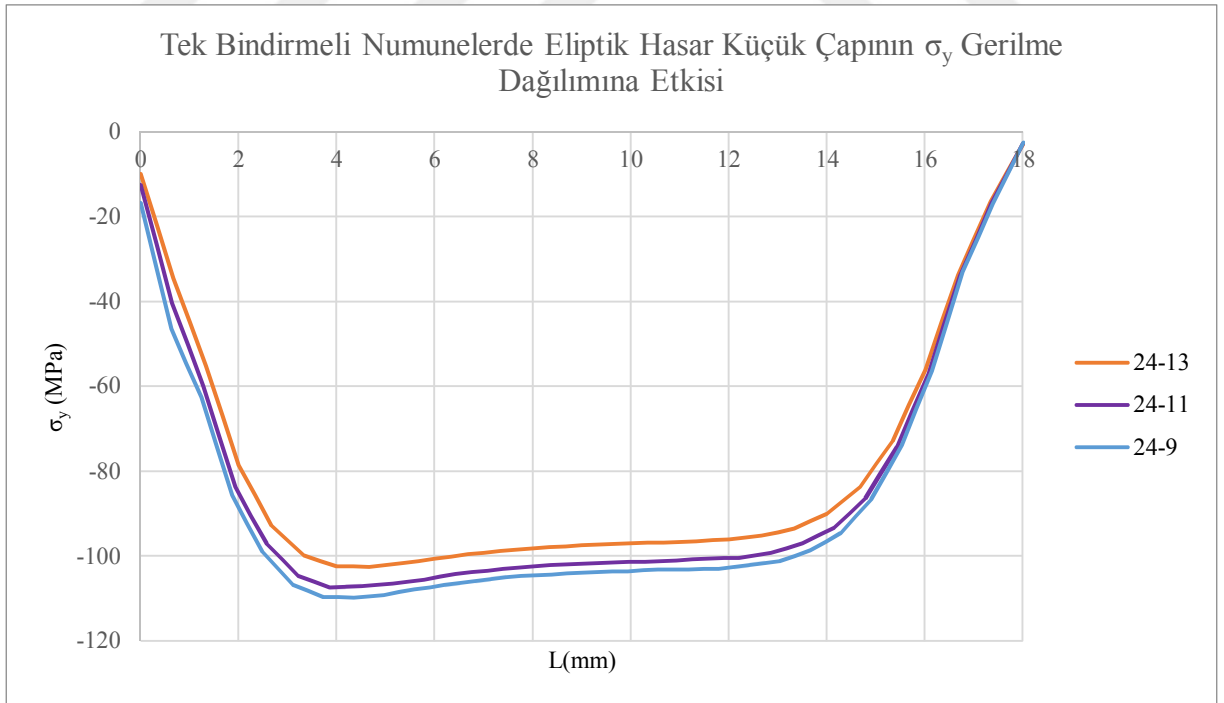
Şekil 4.26'da Tek Bindirmeli numunelerde Eliptik Hasar Büyük Çap değişimi BC hattı boyunca τ_{xy} gerilme dağılımına etkisi verilmiştir. τ_{xy} gerilmesi başlangıçta yani B noktasında düşük olup 4 mm C'ye yaklaşınca maksimum değere ulaşmaktadır.

Şekil 4.27'de Tek Bindirmeli numunelerde Eliptik Hasar Büyük Çapının BC hattı boyunca σ_{vm} von mises eşdeğer gerilme dağılımı verilmiştir. Görüldüğü üzere B noktası civarında 300 MPa'lık maksimum değerde olup, C noktasına doğru düşmektedir.

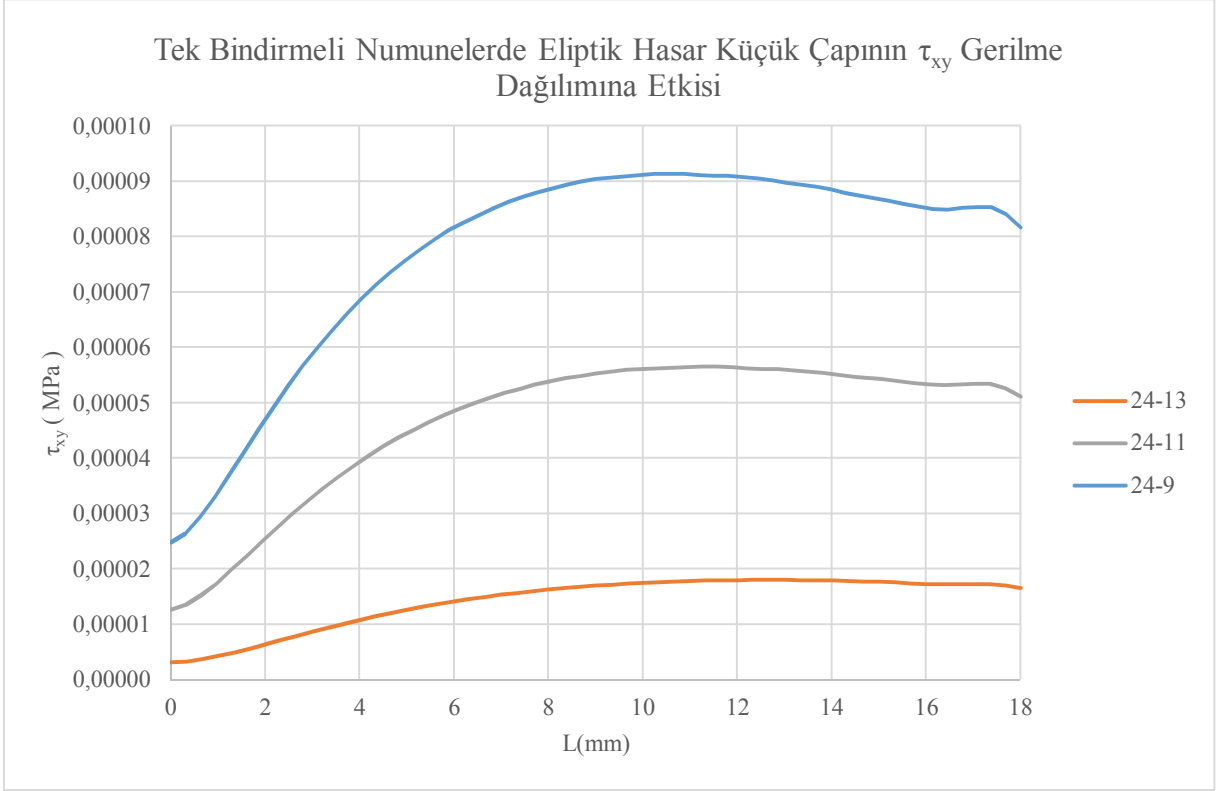
4.2.1.2.2. Tek Bindirmeli Numunelerde Elips Küçük Çapın Değişime Etkisi



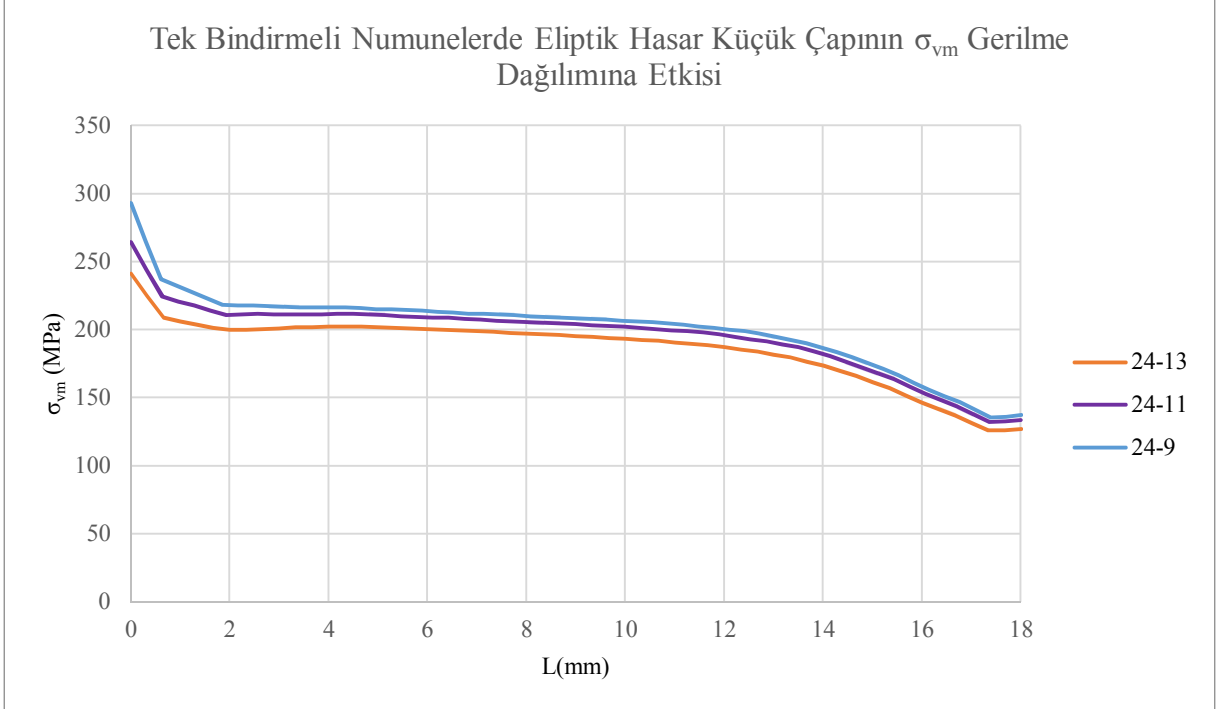
Şekil 4.28. Tek bindirmeli numunelerde eliptik hasar küçük çapının σ_x gerilme dağılımına etkisi



Şekil 4.29. Tek bindirmeli numunelerde eliptik hasar küçük çapının σ_y gerilme dağılımına etkisi



Şekil 4.30. Tek bindirmeli numunelerde eliptik hasar küçük çapının τ_{xy} gerilme dağılımına etkisi



Şekil 4.31. Tek bindirmeli numunelerde eliptik hasar küçük çapının σ_{vm} gerilme dağılımına etkisi

Şekil 4.28 ve Şekil 4.29’da Tek Bindirmeli numunelerde Eliptik Hasar Küçük Çap değişiminin BC Hattı boyunca σ_x ve σ_y gerilme dağılımlarına etkisi verilmiştir. σ_x gerilmeleri başta B noktasında 280 MPa mertebesinde olmak üzere maksimum değerde, σ_y gerilmeleri BC hattının başlangıç ve son bölgelerinde düşükken orta bölgelerde negatif olarak artmaktadır negatif olarak maksimum 110 MPa mertebesinde kalmaktadır.

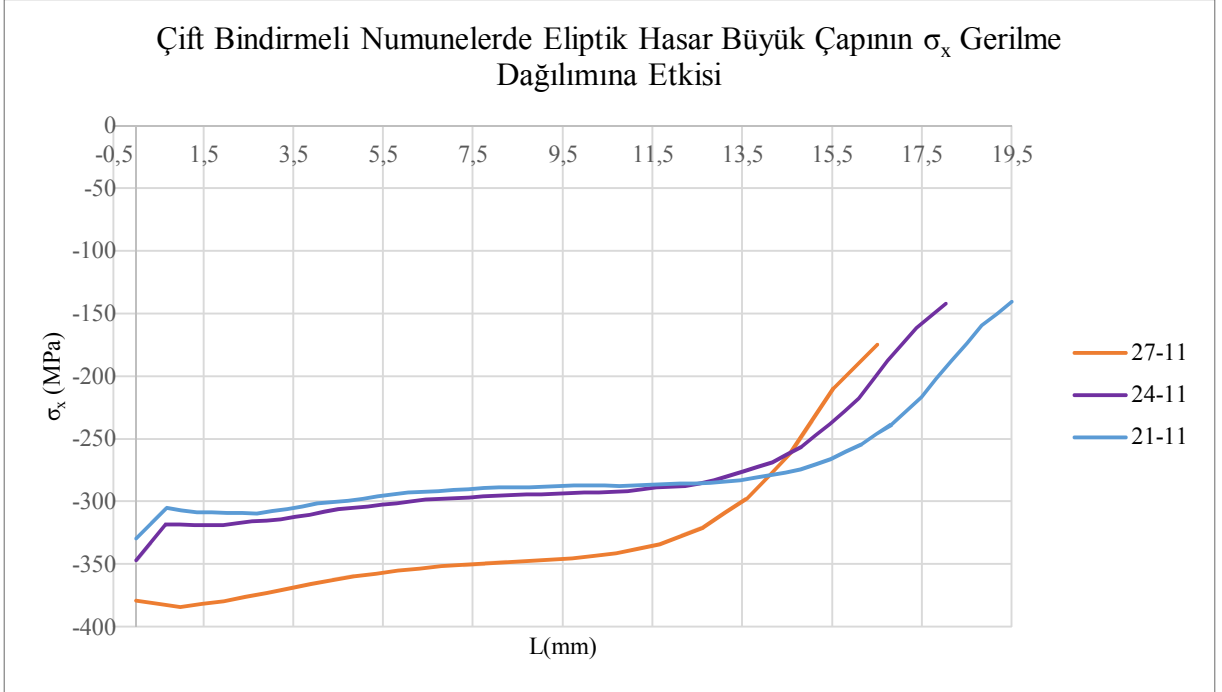
Şekil 4.30’da Tek Bindirmeli numunelerde Eliptik Hasar Küçük Çap değişimi BC hattı boyunca τ_{xy} gerilme dağılımına etkisi verilmiştir. τ_{xy} gerilmesi başlangıçta yani B noktasında düşük olup BC hattının ortasında maksimuma ulaşmaktadır.

Şekil 4.31’de Tek Bindirmeli numunelerde Eliptik Hasar Küçük Çapının BC hattı boyunca σ_{vm} von mises eşdeğer gerilme dağılımı verilmiştir. Görüldüğü üzere B noktası civarında 290 MPa’lık maksimum değerde olup, C noktasına doğru düşmektedir.

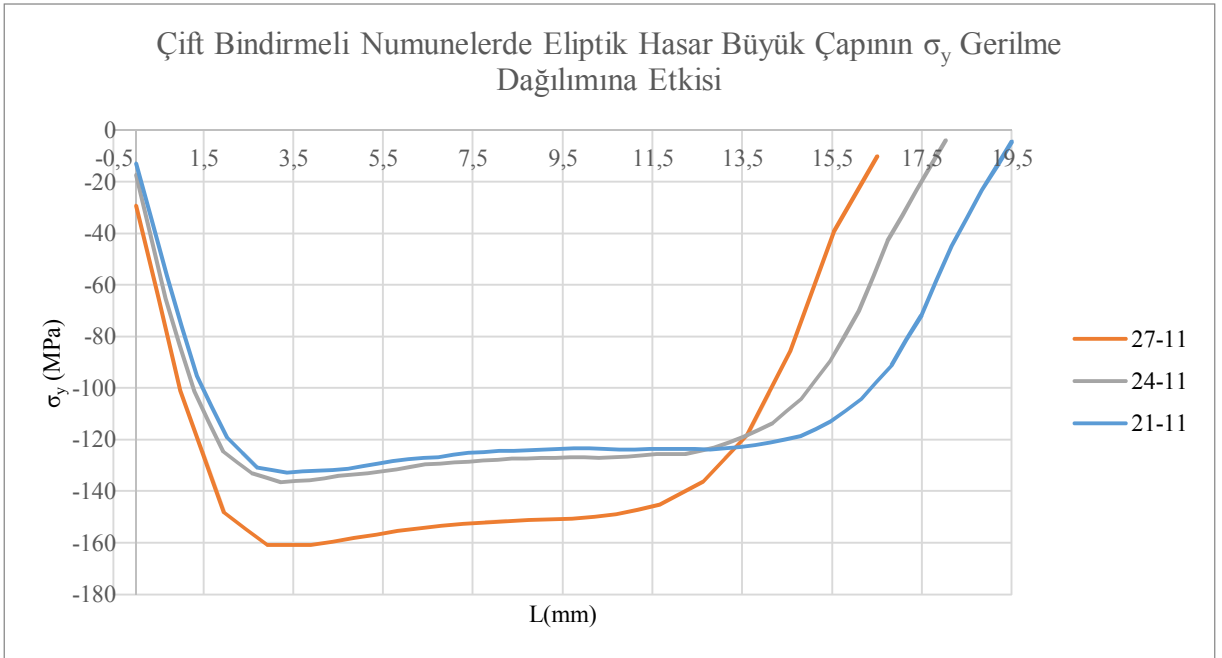


4.2.1.3. Çift Bindirmeli Numunelerde Eliptik Hasar Boyutunun Hasar Yüklerine Etkisi

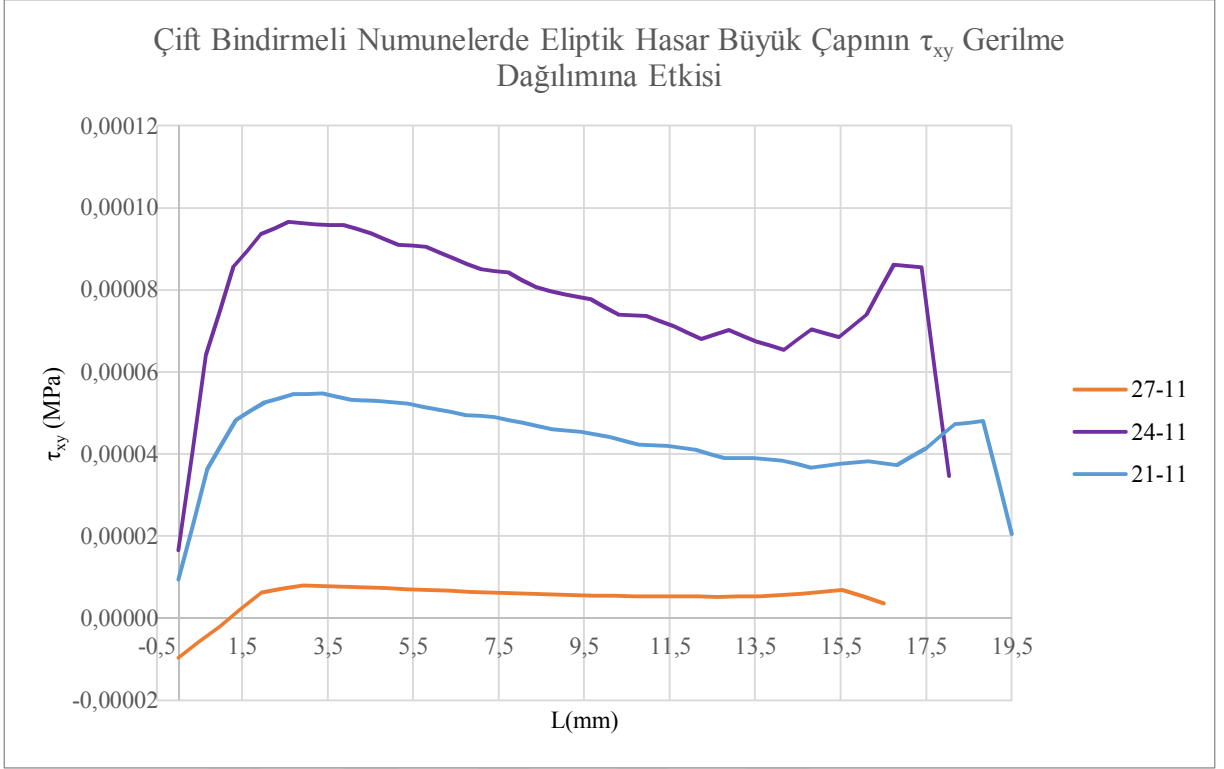
4.2.1.3.1. Çift Bindirmeli Numunelerde Elips Büyük Çapın Değişime Etkisi



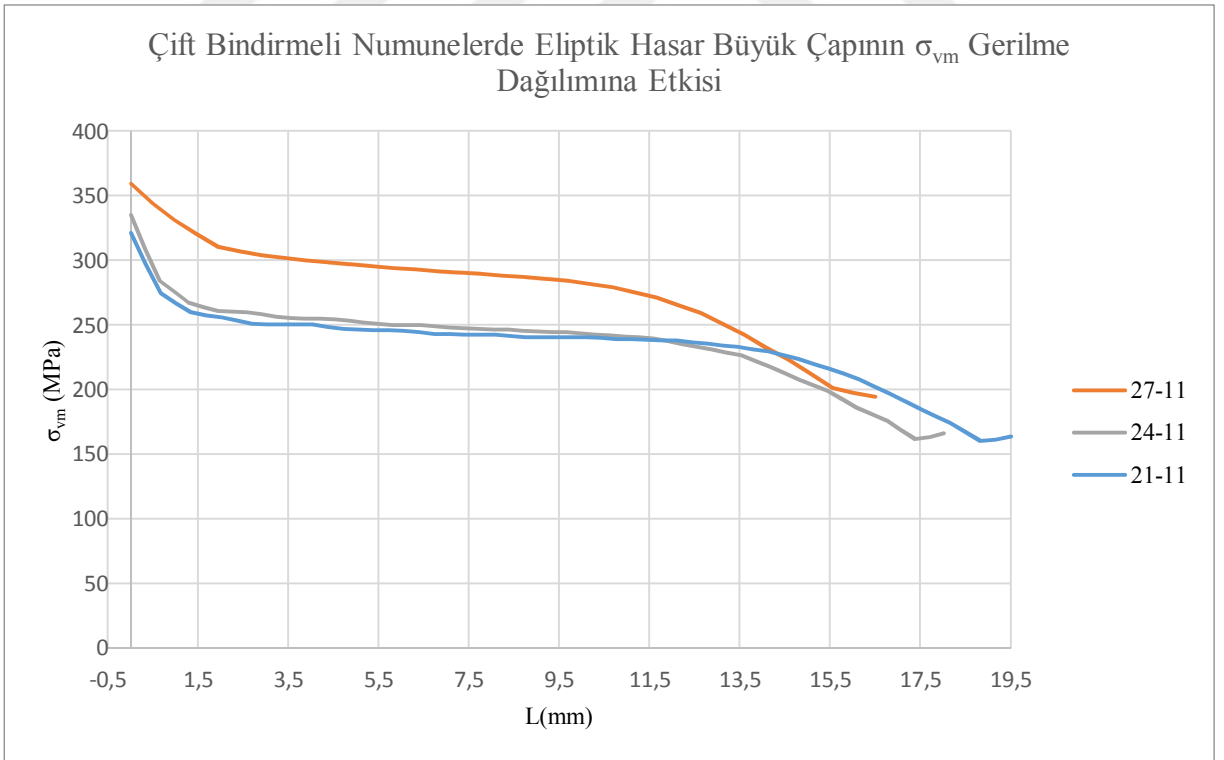
Şekil 4.32. Çift bindirmeli numunelerde eliptik hasar büyük çapının σ_x gerilme dağılımına etkisi



Şekil 4.33. Çift bindirmeli numunelerde eliptik hasar büyük çapının σ_y gerilme dağılımına etkisi



Şekil 4.34. Çift bindirmeli numunelerde eliptik hasar büyük çapının τ_{xy} gerilme dağılımına etkisi



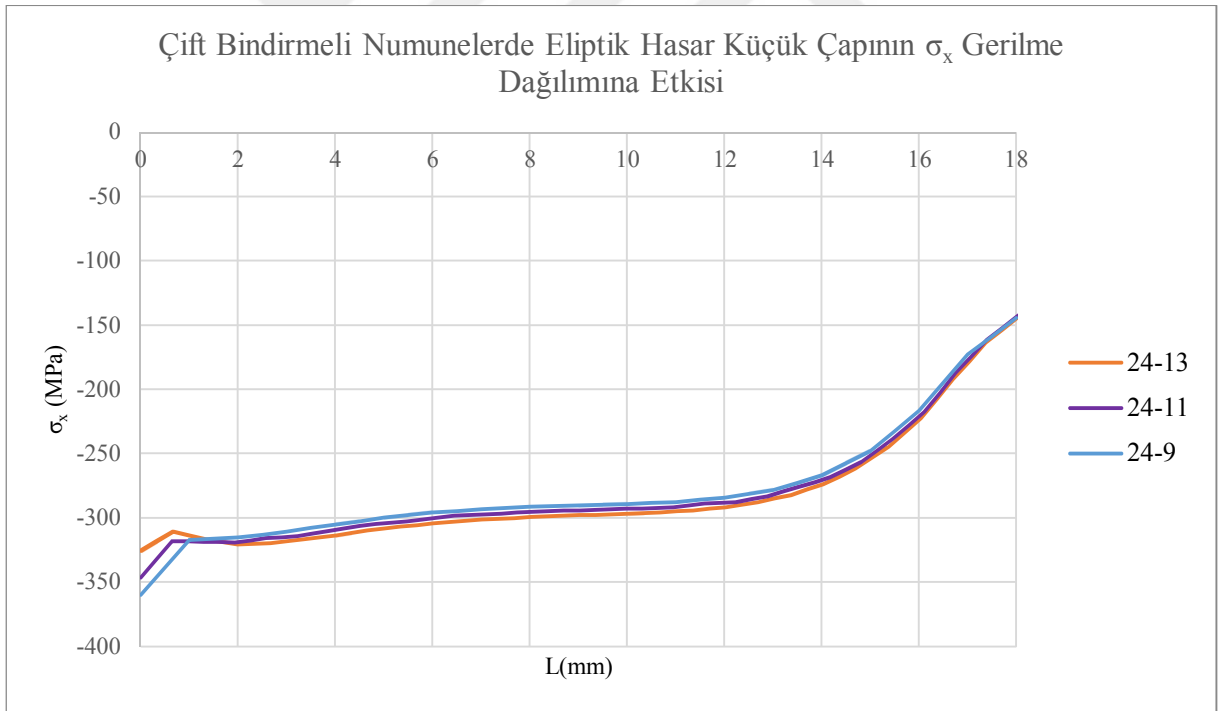
Şekil 4.35. Çift bindirmeli numunelerde eliptik hasar büyük çapının σ_{vm} gerilme dağılımına etkisi

Şekil 4.32 ve Şekil 4.33'te Çift Bindirmeli numunelerde Eliptik Hasar Büyük Çap değişiminin BC Hattı boyunca σ_x ve σ_y gerilme dağılımlarına etkisi verilmiştir. σ_x gerilmeleri başta B noktasında negatif olarak 380 MPa mertebesinde olmak üzere maksimum değerde olup sonra düşmekte ve daha sonra daha düşük bir pozitif değere yükselmektedir. σ_y gerilmeleri BC hattının başlangıç ve son bölgelerinde düşükken orta bölgelerde negatif olarak artmaktadır negatif olarak maksimum 160 MPa mertebesinde kalmaktadır.

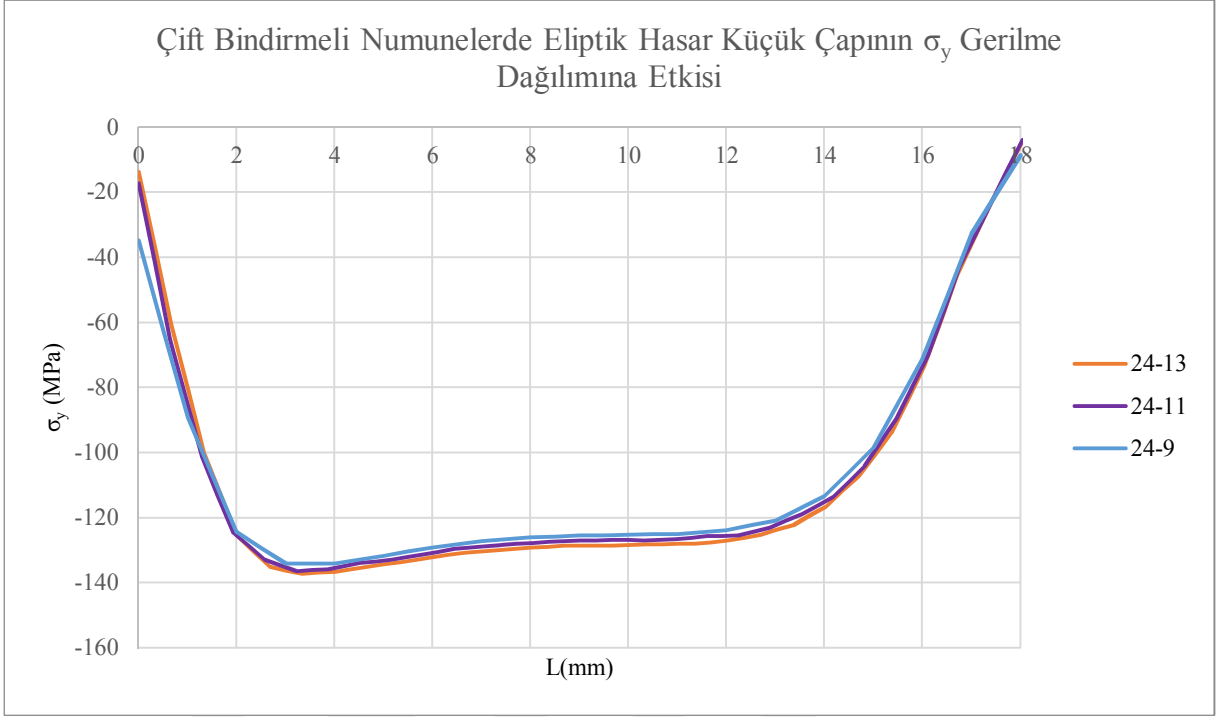
Şekil 4.34'te Çift Bindirmeli numunelerde Eliptik Hasar Büyük Çap değişimi BC hattı boyunca τ_{xy} gerilme dağılımına etkisi verilmiştir. τ_{xy} gerilmesi başlangıçta yani B noktasında düşük olup C noktasına doğru 2.5 mm ilerleyince maksimuma ulaşmaktadır.

Şekil 4.35'te Çift Bindirmeli numunelerde Eliptik Hasar Büyük Çapının BC hattı boyunca σ_{vm} von mises eşdeğer gerilme dağılımı verilmiştir. Görüldüğü üzere B noktası civarında 365 MPa'lık maksimum değerde olup, C noktasına doğru düşmektedir.

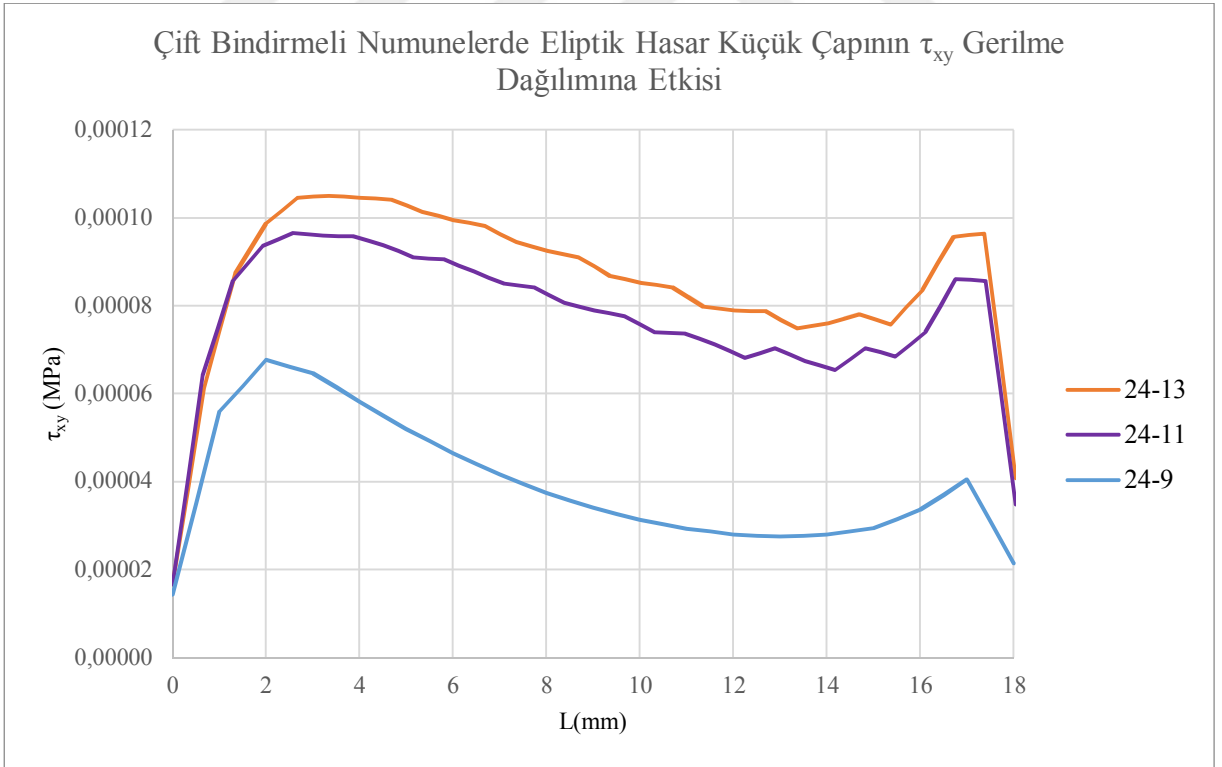
4.2.1.3.2. Çift Bindirmeli Numunelerde Elips Küçük Çapın Değişime Etkisi



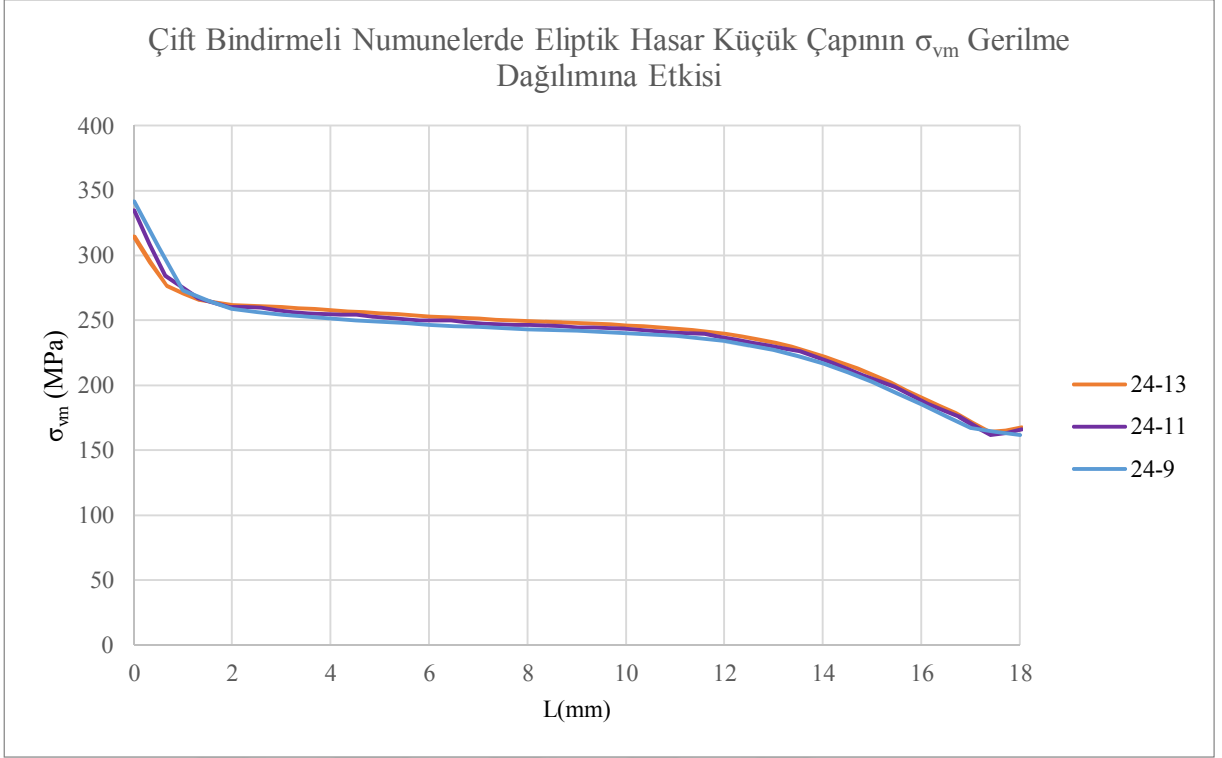
Şekil 4.36. Çift bindirmeli numunelerde eliptik hasar küçük çapının σ_x gerilme dağılımına etkisi



Şekil 4.37. Çift bindirmeli numunelerde eliptik hasar küçük çapının σ_y gerilme dağılımına etkisi



Şekil 4.38. Çift bindirmeli numunelerde eliptik hasar küçük çapının τ_{xy} gerilme dağılımına etkisi



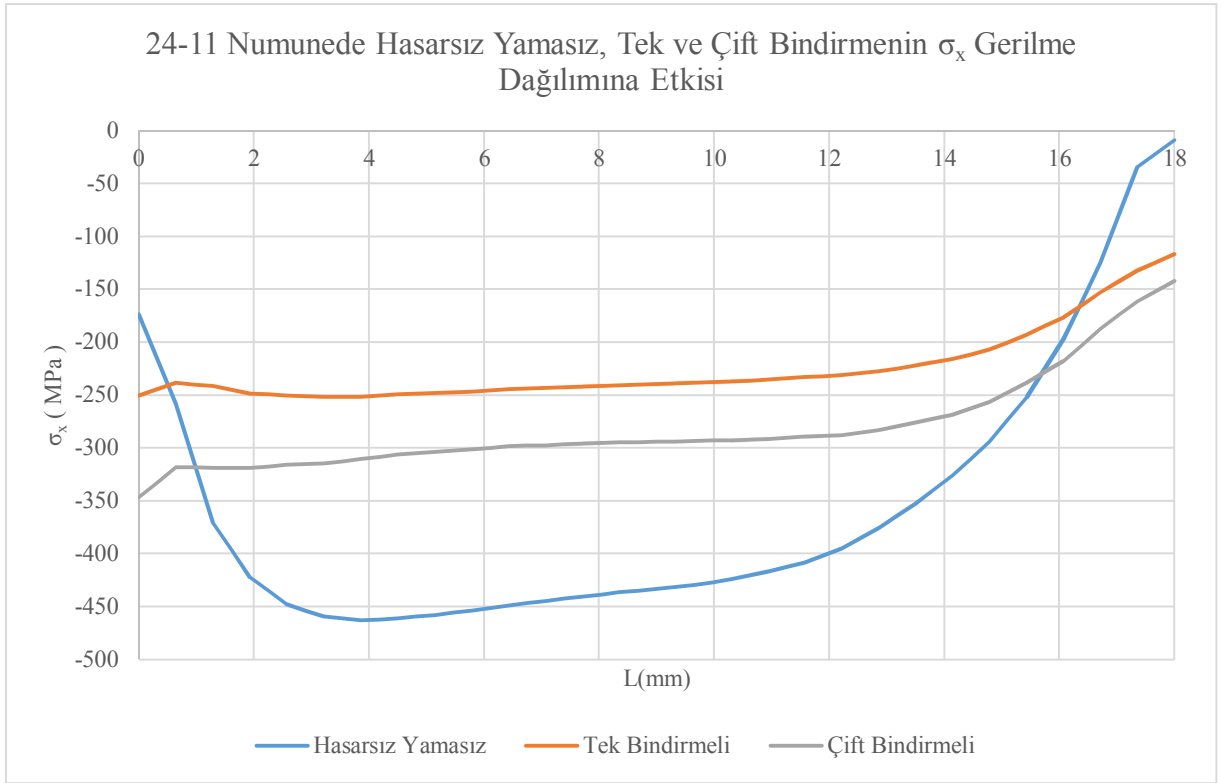
Şekil 4.39. Çift bindirmeli numunelerde eliptik hasar küçük çapının σ_{vm} gerilme dağılımına etkisi

Şekil 4.36 ve Şekil 4.37’de Çift Bindirmeli numunelerde Eliptik Hasar Küçük Çap değişiminin BC Hattı boyunca σ_x ve σ_y gerilme dağılımlarına etkisi verilmiştir. σ_x gerilmeleri başta B noktasında negatif olarak 360 MPa mertebesinde olmak üzere maksimum değerde olup sonra düşmektedir. σ_y gerilmeleri BC hattının başlangıç ve son bölgelerinde düşükken orta bölgelerde negatif olarak artmaktadır negatif olarak maksimum 135 MPa mertebesinde kalmaktadır.

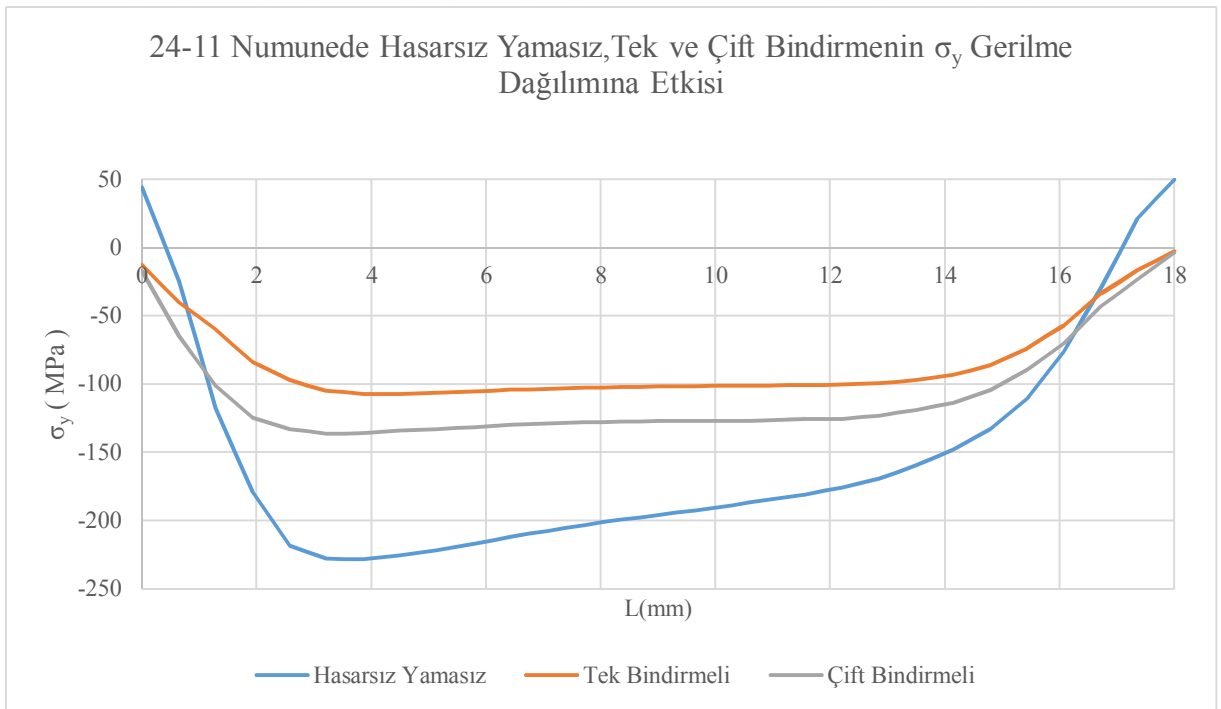
Şekil 4.38’de Çift Bindirmeli numunelerde Eliptik Hasar Küçük Çap değişimi BC hattı boyunca τ_{xy} gerilme dağılımına etkisi verilmiştir. τ_{xy} gerilmesi başlangıçta yani B noktasında düşük olup C noktasına doğru 2.5 mm ilerleyince maksimuma ulaşmaktadır.

Şekil 4.39’da Çift Bindirmeli numunelerde Eliptik Hasar Küçük Çapının BC hattı boyunca σ_{vm} von mises eşdeğer gerilme dağılımı verilmiştir. Görüldüğü üzere B noktası civarında 340 MPa’lık maksimum değerde olup, C noktasına doğru düşmektedir.

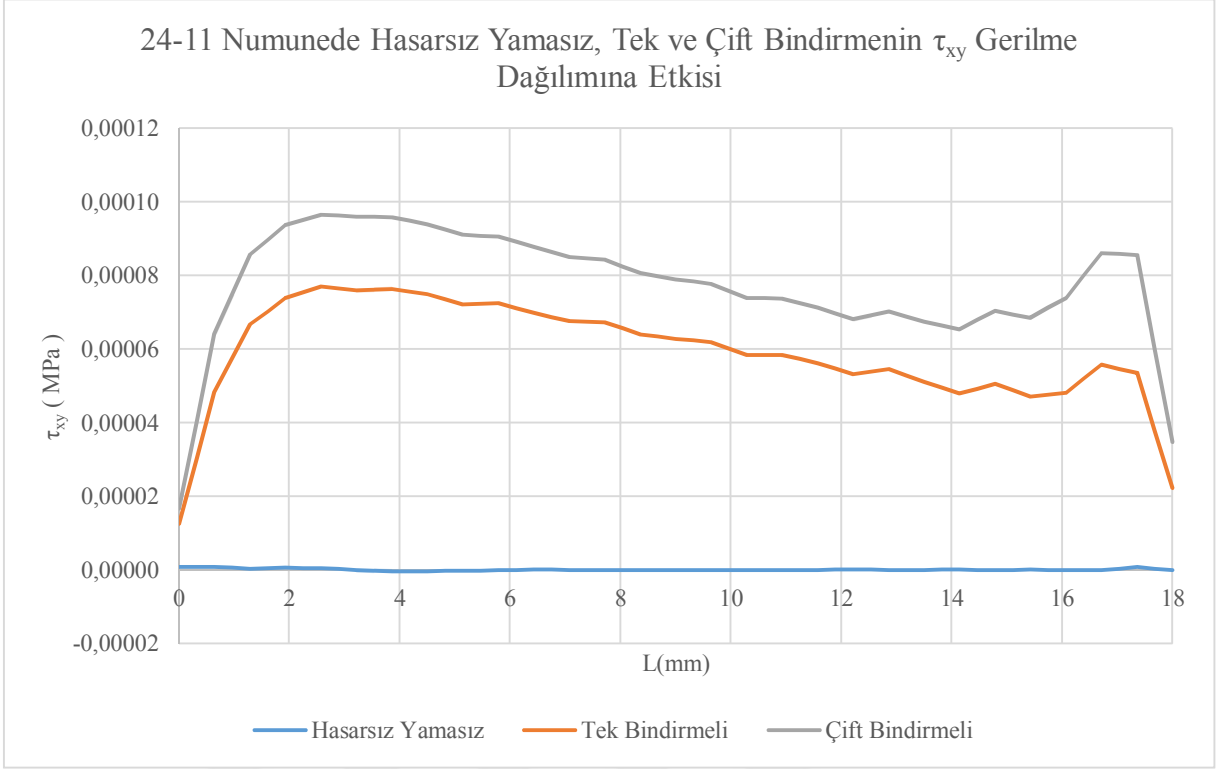
4.2.2. Bindirme sayısının nümerik hasar yüklerine etkisi



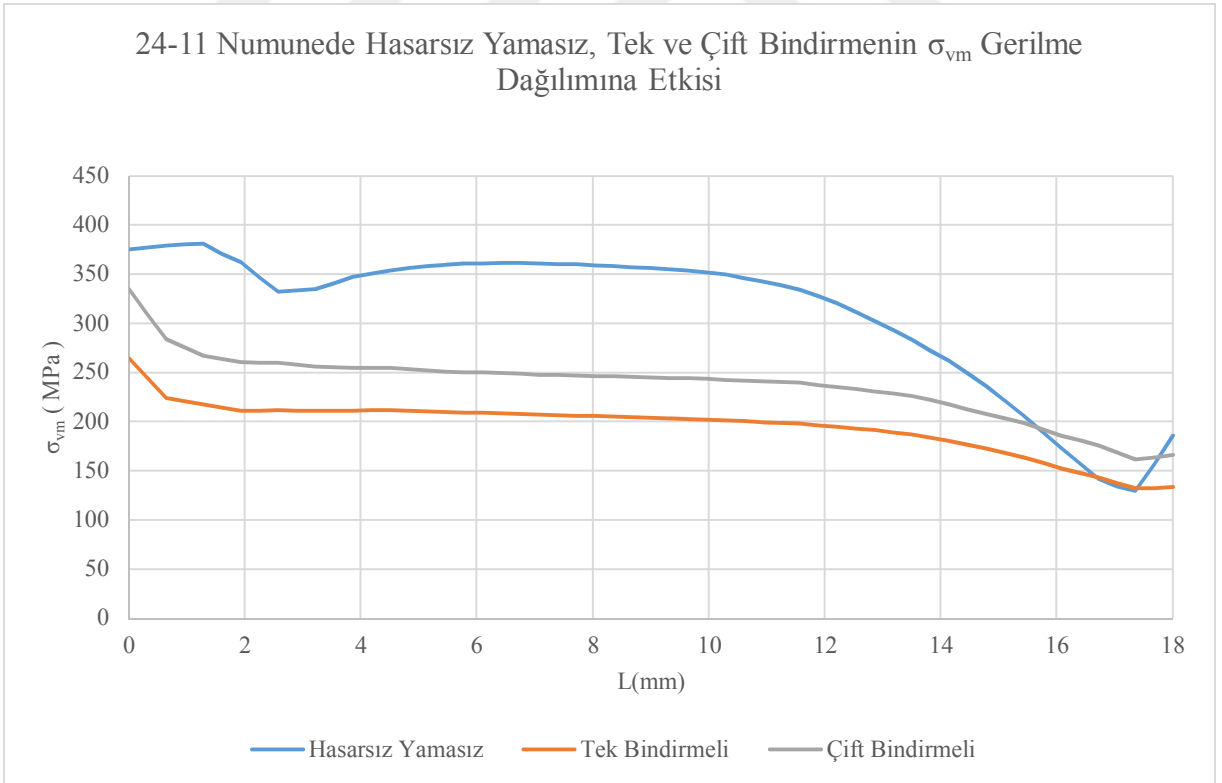
Şekil 4.40. 24-11 numunede hasarsız yamasız, tek ve çift bindirmenin σ_x gerilme dağılımına etkisi



Şekil 4.41. 24-11 numunede hasarsız yamasız, tek ve çift bindirmenin σ_y gerilme dağılımına etkisi



Şekil 4.42. 24-11 numunede hasarsız yamasız, tek ve çift bindirmenin τ_{xy} gerilme dağılımına etkisi



Şekil 4.43. 24-11 Numunede Hasarsız Yamasız, Tek ve Çift Bindirmenin σ_{vm} Gerilme Dağılımına Etkisi

Şekil 4.40 ve Şekil 4.41’de 24-11 numunelerde Bindirme Sayısı değişiminin BC Hattı boyunca σ_x ve σ_y gerilme dağılımlarına etkisi verilmiştir. σ_x ve σ_y gerilmeleri B ve C noktalarına yakın bölgelerde noktasında negatif olarak düşük değerlerde iken, orta bölgelerde σ_x 470 MPa mertebesinde, σ_y 230 MPa mertebesinde olmak üzere maksimum değer almaktadır.

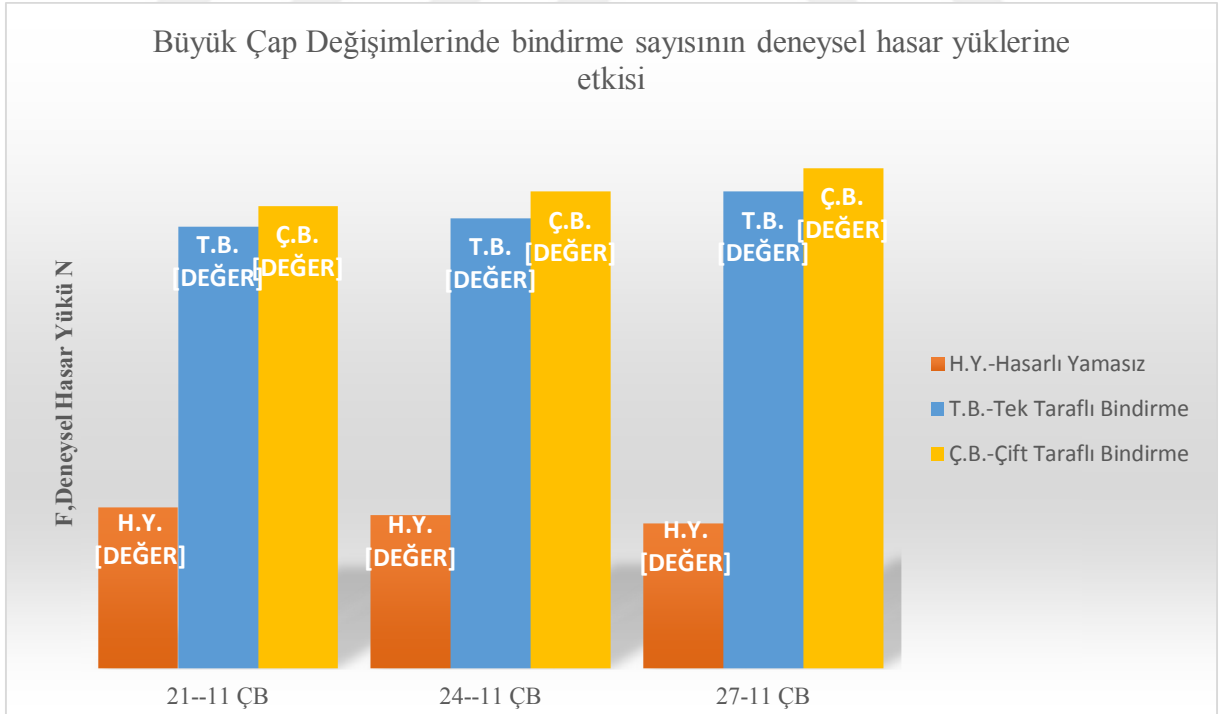
Şekil 4.42’de 24-11 numunelerde Bindirme Sayısı değişiminin BC hattı boyunca τ_{xy} gerilme dağılımına etkisi verilmiştir. τ_{xy} gerilmesi başlangıçta yani B noktasında düşük olup C noktasına doğru 2.5 mm ilerleyince maksimuma ulaşmaktadır.

Şekil 4.43’de 24-11 numunelerde Bindirme Sayısı değişiminin BC hattı boyunca σ_{vm} von mises eşdeğer gerilme dağılımı verilmiştir. Görüldüğü üzere B noktası civarında 380 MPa’lık maksimum değerde olup, C noktasına doğru düşmektedir.

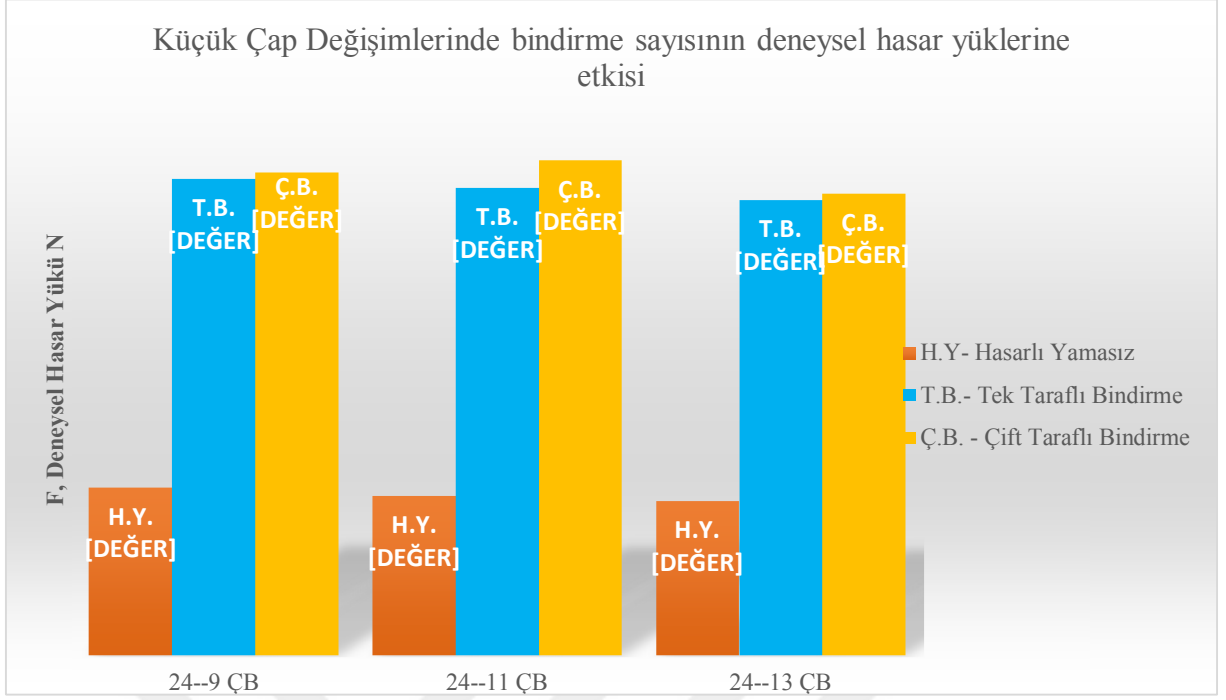
4.3. Yüklerin ve Gerilmelerin Karşılaştırılması

4.3.1. Deneysel hasar yüklerinin karşılaştırılması

4.3.1.1. Büyük ve küçük çap değişimlerinde bindirme sayısının deneysel hasar yüklerine etkisi



Şekil 4.44. Büyük çap değişimlerinde bindirme sayısının hasar yüklerine etkisi



Şekil 4.45. Küçük çap değişimlerinde bindirme sayısının hasar yüklerine etkisi

Hasarsız numunelerin hasar yükü 250 N mertebesinde iken hasarlı numunelerin hasar yükü 162-176 N mertebesine düşmektedir. Tek taraflı ve Çift taraflı bindirmeli tamirlerden sonra 500 N civarına çıkan hasar yükleri bu tamirlerin oldukça başarılı olduğunu göstermektedir.

Yamasız, tek taraflı bindirmeli ve çift taraflı bindirmeli tamirlerde, bütün büyük çap ve küçük çap değerlerinde, bindirme sayısı arttıkça hasar yükleri artmaktadır. Hasarsız numunelerin tek hattan eğilmesi durumunda hasar yükü 250 N olduğu için, tek ve çift taraflı bindirmeli tamirlerde, numune yamanın iki tarafındaki iki hattan eğilerek hasar oluşması sebebiyle hasar yükünün $250 \times 2 = 500$ N mertebesine çıkması normaldir.

Yama bölgesi hem tek taraflı hem de çift taraflı bindirmeli yamalı tamirlerde rijit bir bölge olarak davranarak yükü yama bölgesinin hemen dışına iletmediği için tek ve çift bindirmeli tamirler arasında hasar yükü değerleri çok değişmemektedir. Çift taraflı bindirmelerdeki hasar yüklerinin biraz daha büyük olması, çift taraftan yamanın yama bölgesinin rijitliğini artırarak biraz daha fazla elastik yük emerek hasar için gerekli toplam yükü az bir miktar artırmıştır.

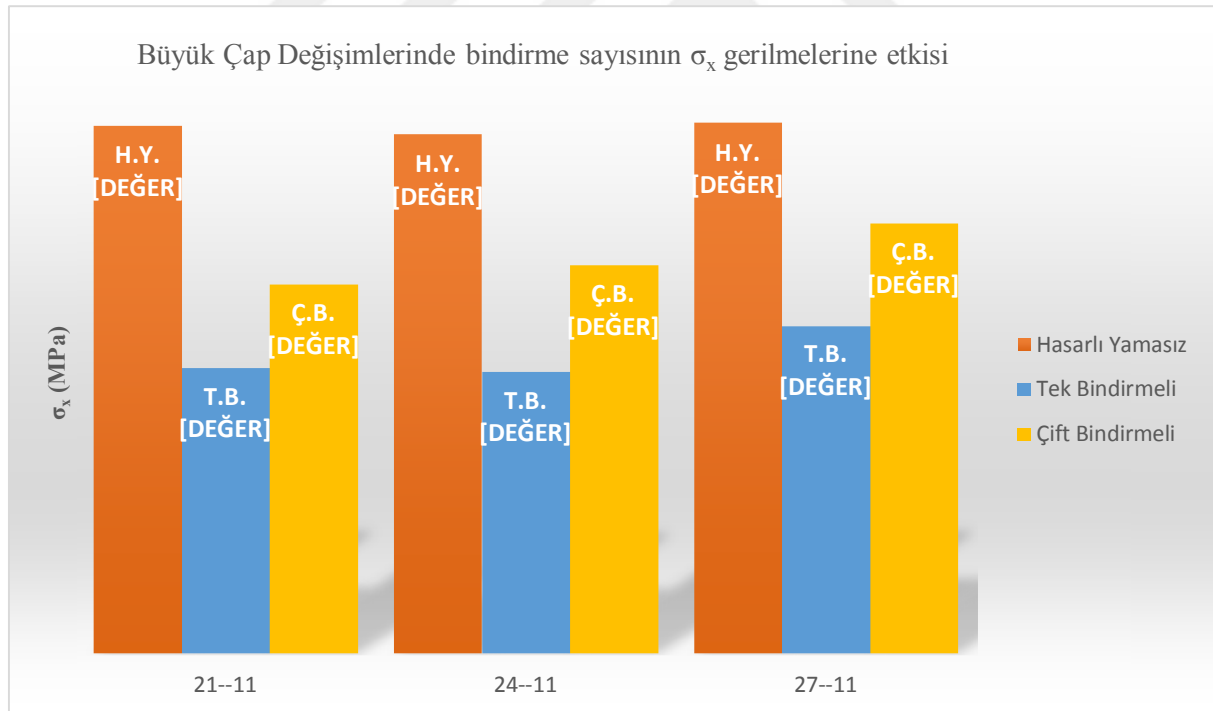
Hasarlı yamasız numunelerde, büyük elips çapı değerleri arttıkça, elips sivrilerek çentik etkisi arttığı ve yüke mukavemet eden kesit alanı düştüğü için, hasar gerilmeleri de düşmektedir. Bununla birlikte tek bindirmeli ve çift bindirmeli tamirlerde, büyük elips çapı

değerleri arttıkça, yamalı bölgenin blok halindeki rijitliği düşmekte ve üzerine daha fazla elastik yük alarak, gerekli toplam hasar yükünü bir miktar artırmaktadır.

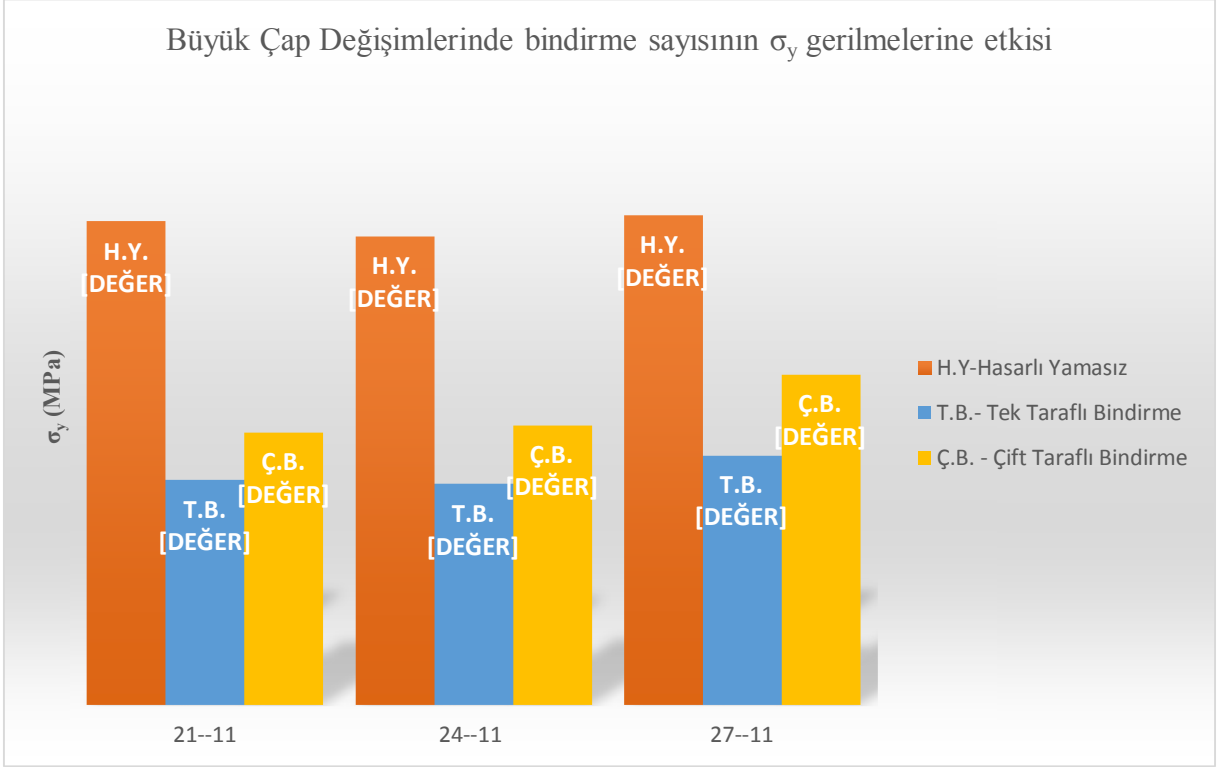
Hasarlı Yamasız Numunelerde Eliptik hasar küçük çapı arttıkça, eğmeye mukabil olan alan küçüldüğü için hasar yükleri düşmektedir. Tek ve Çift Bindirmeli numunelerde eliptik hasar küçük çap arttıkça, eğmeye mukabil olan hasar yükünde düşüş gözlemlenmektedir. Bunun sebebi eliptik hasar küçük çapı arttıkça uzun köşegenin uçları yuvarlanmakta dolayısıyla çentik etkisi azalmakta ve mukavemet artmaktadır. Bu da blok olarak hareket eden rijit yama bölgesinin rijitliğini artırarak elastik eğilmesini azaltır bu da yükü elastik olarak daha az eğilerek üzerine daha az almasına ve rijit bir şekilde daha fazla yama uçlarına aktarmasına ve bu uçtaki 2 eğilme bölgesinin daha düşük bir toplam yükte hasar sınırına ulaşarak hasara uğramasına sebep olur.

4.3.2. Nümerik gerilmelerin karşılaştırılması

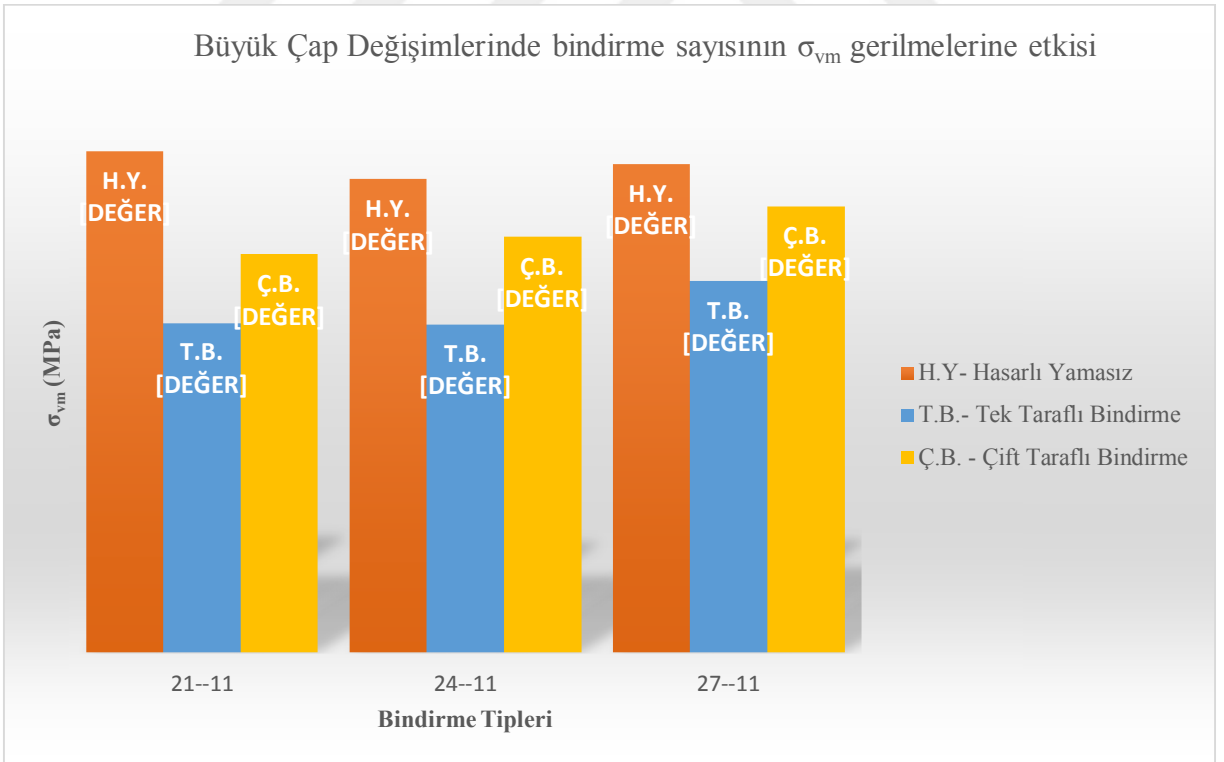
4.3.2.1. Büyük çap değişimlerinde bindirme sayısının gerilmelere etkisi



Şekil 4.46. Büyük çap değişimlerinde bindirme sayısının σ_x gerilmelerine etkisi



Şekil 4.47. Büyük çap değişimlerinde bindirme sayısının σ_y gerilmelerine etkisi

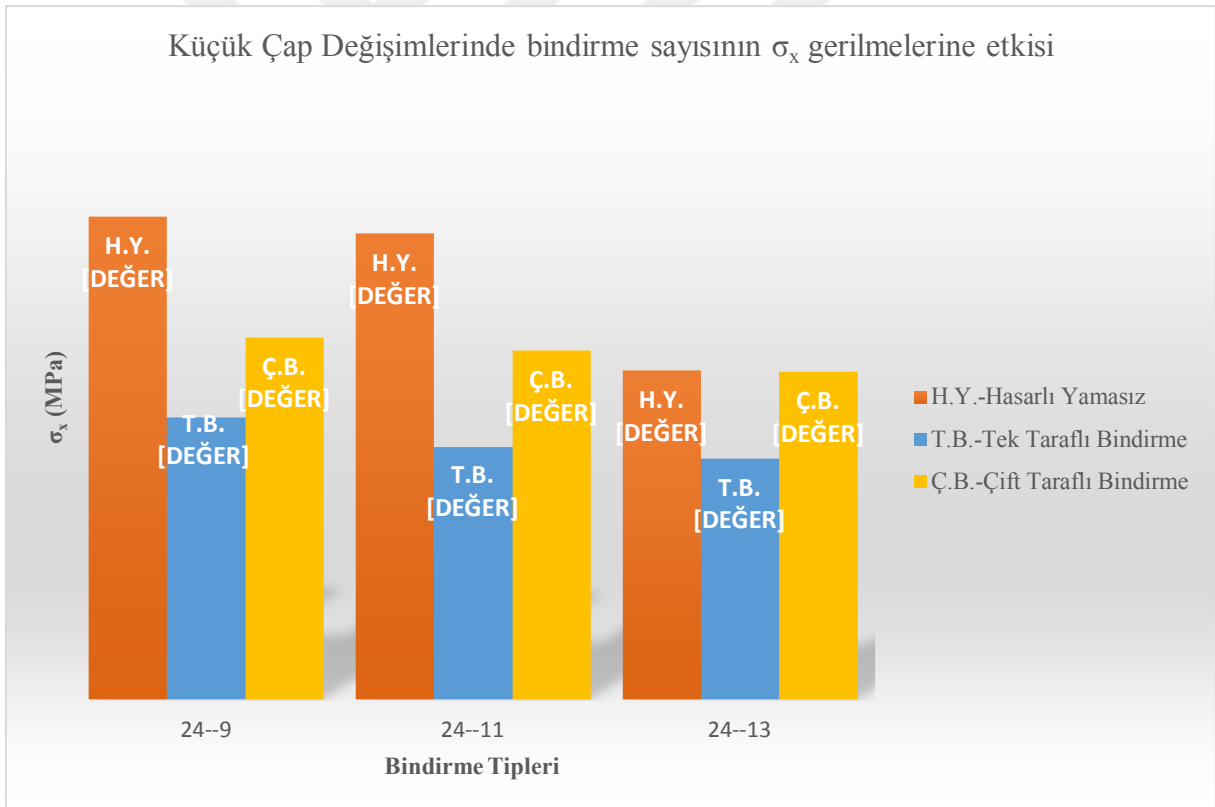


Şekil 4.48. Büyük çap değişimlerinde bindirme sayısının σ_{vm} gerilmelerine etkisi

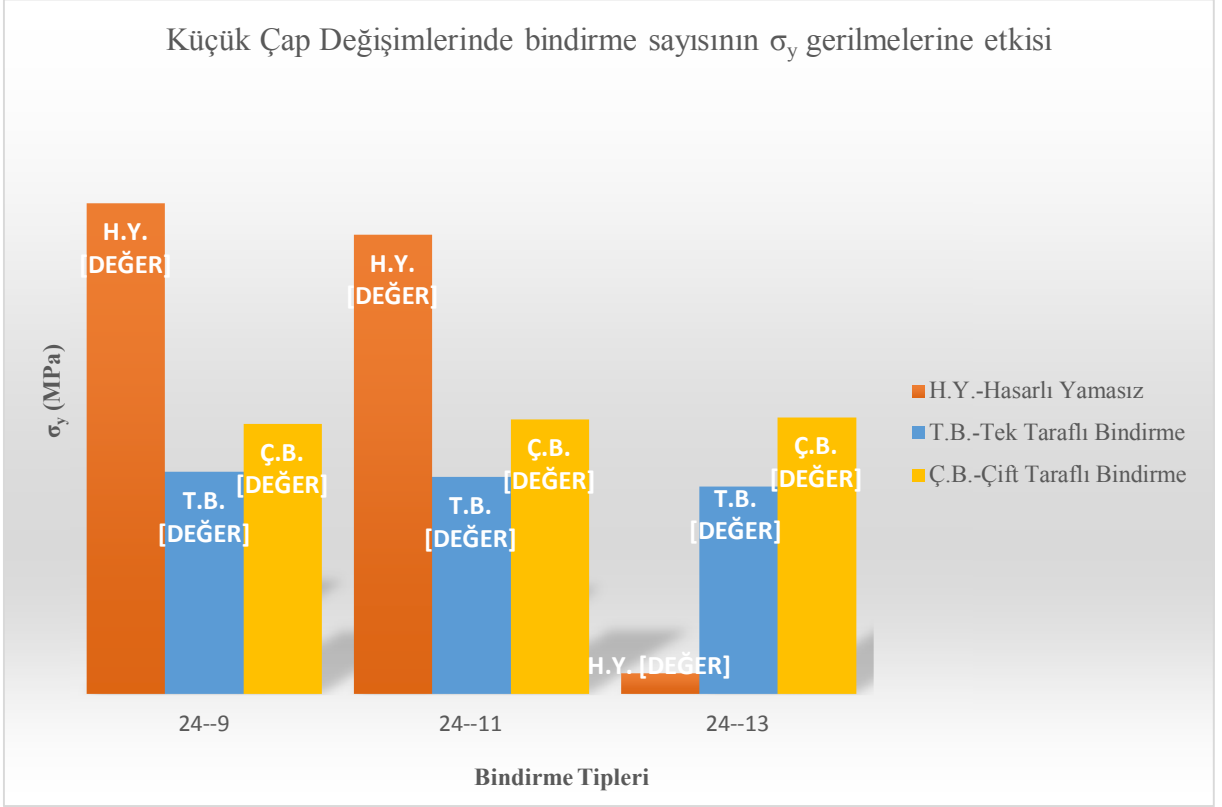
Nümerik gerilmelerin karşılaştırılması için oluşturulan sütun grafikler, o gerilmelerin BC hattı üzerinde aldıkları maksimum değerleri göstermektedir. Deneysel olarak daha düşük yüklerde hasara uğradıkları görülen numunelerin hasar bölgelerindeki gerilme yığılmaları daha fazla ve o yüzden daha düşük hasar yüklerinde hasara uğradıkları için, o bölgelerdeki nümerik olarak oluşan gerilmeler daha büyük çıkmaktadır. Yukarıdaki grafiklerde, o yüzden yamasız numunelerin üzerindeki σ_x , σ_y ve σ_{vm} gerilmeleri, tek ve çift taraflı bindirme ile yamalı numunelerden daha yüksektir ve deneysel sonuçlarla uyumludur.

Bütün büyük çap değerlerinde, çift yamalı numunelerin σ_x , σ_y ve σ_{vm} gerilmeleri, tek taraflı numunelerden daha büyüktür. Bu da yukarıda bahsedilen deneysel sonuçları teyit etmektedir.

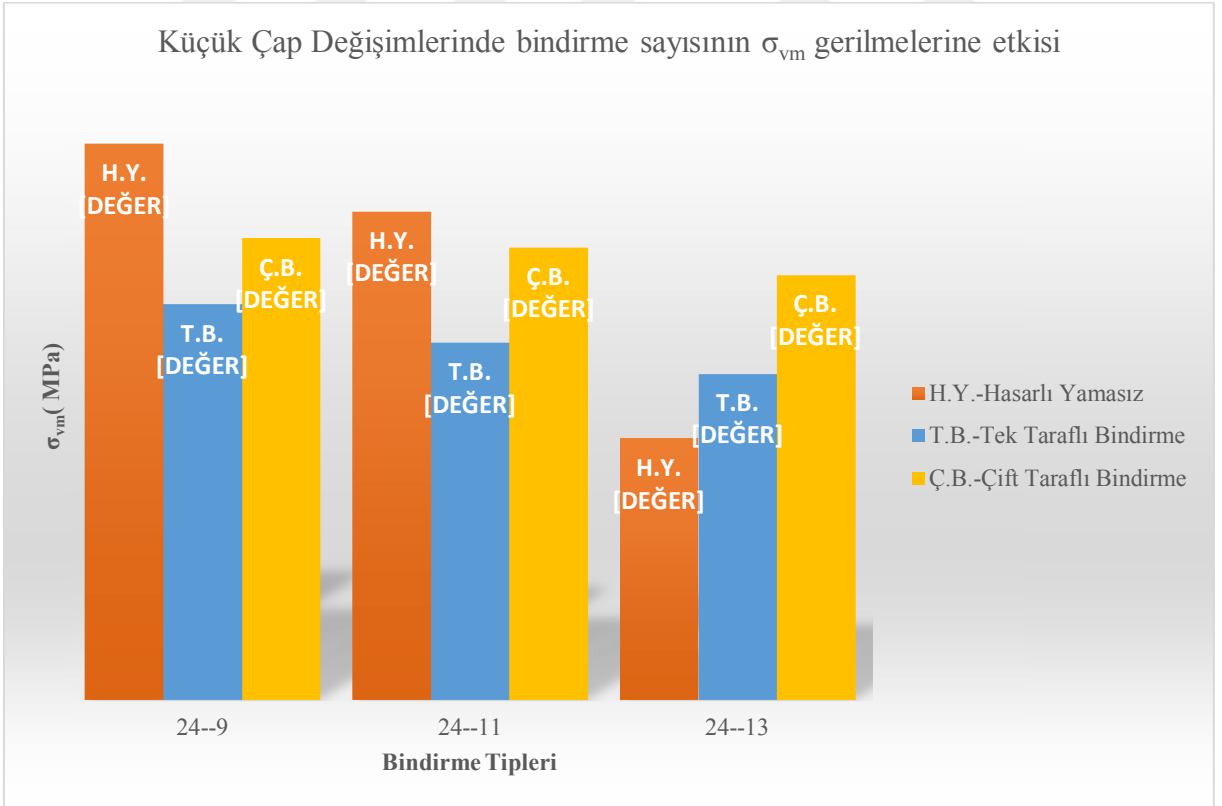
4.3.2.2. Küçük çap değişimlerinde bindirme sayısının gerilmelere etkisi



Şekil 4.49. Küçük çap değişimlerinde bindirme sayısının σ_x gerilmelerine etkisi



Şekil 4.50. Küçük çap değişimlerinde bindirme sayısının σ_y gerilmelerine etkisi



Şekil 4.51. Küçük çap değişimlerinde bindirme sayısının σ_{vm} gerilmelerine etkisi

Büyük çap değişimlerdeki gerilme dağılımları için bahsedilen durum, küçük çap değişimleri için de geçerlidir. Yukarıdaki grafiklerde, o yüzden yamasız numunelerin üzerindeki σ_x , σ_y ve σ_{vm} gerilmeleri, tek ve çift taraflı bindirme ile yamalı numunelerden daha yüksektir ve deneysel sonuçlarla uyumludur.

Bütün küçük çap değerlerinde, çift yamalı numunelerin σ_x , σ_y ve σ_{vm} gerilmeleri, tek taraflı numunelerden daha büyüktür. Bu da yukarıda bahsedilen deneysel sonuçları teyit etmektedir.



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Alüminyum 2024 T3 malzemesi özellikle havacılıkta ve otomotiv sektöründe sıklıkla kullanılmaktadır. Bu çalışmada bu malzemenin hasar durumunda yapıştırma bağlantıları vasıtasıyla kompozit yamalarla tamirinin başarısı incelenmiştir.

Bu amaçla Al 2024 T3 levhalara büyük yarıçapı ve küçük yarıçapı değişen eliptik hasarlar açılmış ve bu hasarlı levhalar ile cam epoksi kompozit yamalardan, 3M DP460 epoksi yapıştırıcı malzemesi kullanılarak, tek taraflı ve çift taraflı bindirme bağlantıları oluşturulmuştur. 3 nokta eğilme testi vasıtasıyla eğilme yükü altında hasar yükleri ve gerilme davranışları deneysel ve nümerik olarak incelenerek hasarlı Al 2024 T3 levhaların kompozit yama ile tamirinin başarısı değerlendirilmiştir.

Yapılan çalışmada, eliptik hasar boyutları ve yama bindirme sayısı değişiminin eğilme hasar yükleri ve gerilme davranışlarına etkisi incelenmiştir. Nümerik analizlerde ANSYS 19.0 programı kullanılarak hasar yükleri bulunup, kritik hatlar belirlenerek, bu hatlar boyunca numuneler üzerindeki σ_x , σ_y , τ_{xy} ve σ_{vm} gerilme dağılımları incelenmiş ve deneysel analizler sonucunda elde edilen hasar yükleri ve hasar mekanizmaları ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca deneysel hasar yükleri ve maksimum σ_x , σ_y ve σ_{vm} nümerik gerilmeleri için karşılaştırmalı sütun grafikler oluşturularak, elips büyük çap, elips küçük çap ve bindirme sayısı değişimindeki sonuçlar karşılaştırılmıştır.

5.1. Deneysel Sonuçlar

Hasarsız yamasız deney numune sonuçları incelendiğinde, Al 2024 T3 lamalar ortalama olarak 250 N maksimum yüke mukavemet göstermişlerdir.

Hasarlı Yamasız Numunelerde, hasar açıldığında hasar yükleri 250 N'dan ortalama 165 N mertebelerine düşmektedir. Eliptik hasar büyük çapı arttıkça, uygulanabilen hasar yükünün azaldığı görülmektedir. Bunun sebebi iki şekilde açıklanabilir. İlk olarak eliptik hasarın büyük çapı arttıkça, yüke mukavemet eden kesit alanı azalır, daha az yük taşır. İkinci olarak ise eliptik hasarın en kritik bölgesi olan uzun köşegenin uç kısımlarında, eliptik hasar büyük çapı arttıkça, uç kısımlar keskinleşeceği ve gerilme yığılması artacağı için hasar başlama riski daha da artar ve daha az yük taşır.

Hasarlı Yamasız Numunelerde Eliptik hasar küçük çapı arttıkça, eğmeye mukabil olan alan küçüldüğü için hasar yükleri düşmektedir.

Hasarlı yamasız numunelerin ortalama hasar yükü 165 N iken, Hasarlı Tek Bindirmeli yamalı numunelerde ortalama 500 N'a, Hasarlı Çift Bindirmeli yamalı numunelerde 520 N'a çıkmaktadır. Bu değerler hasarsız numunelerin (250 N) iki mislidir yani malzeme hasarsız halinin iki misli daha fazla eğilmeye karşı dirençli hale gelmiştir. Bu da demek oluyor ki, tek taraflı ve çift taraflı bindirmeler ile yapılan hasar tamirlerinin başarılı sonuç verdiği söylenebilir.

Malzeme yamaların bitiminden eğilerek hasar görmektedir. Yama boyunca plastik bir eğilme yoktur. Bu da yama malzemesinin plastik olarak sünek olmayan bir yapıda olduğunu gösterir. Dolayısıyla yama bölgesinde kalıcı bir deformasyon yoktur ve bu rijit yapı yükü yama sınırlarının dışına kendisi plastik deforme olmadan iletmektedir. Hasarlı yamalı numunelerin eğilmeye karşı hasarsızların bile iki misli mukavemet göstermesi şundandır: Hasarsız numuneler numunenin tam ortasında kuvvetin uygulandığı yerden tek bir eğilme bölgesi göstermektedir ve Al 2024 T3 malzemenin tek bir bölgeden eğilmeye gösterdiği direnç 250 N'dur. Hasarlı yamasız numuneler ise yine tek bir bölgeden eğilmeye gösterdiği direnç, hasardan dolayı ortalama 165 N'a düşmektedir. Bu hasarlı malzemeye yama yapıldığında ise yamalı bölge plastik olarak blok halinde rijit bir bölge olarak davranmakta ve eğilme bölgelerini yamanın bittiği iki bölgeye taşıyarak yama dışından 2 bölgeden eğilmeye sebep olmaktadır. Al 2024 T3 malzemenin tek bir bölgeden eğilmeye gösterdiği direnç 250 N olduğuna göre 2 bölgeden eğilmeye $250 \times 2 = 500$ N direnç göstermesi normaldir.

Tek ve Çift Bindirmeli numunelerde eliptik hasar büyük çapı arttıkça, eğilmeye mukabele eden yamalı rijit bölge zayıflamakta ve rijitliği düştüğü için 3. bir eğilme bölgesi ama elastik bir eğilme bölgesi göstererek yükü elastik olarak bir miktar kendisi aldığı için daha fazla toplam yükü diğer iki plastik eğilme bölgesi plastik olarak hasar yüküne ulaştır. Bu yüzden eliptik hasar büyük çapı arttıkça rijit bölgenin zayıflaması artar ve elastik olarak eğilerek daha fazla yük emer, bu da diğer 2 bölgenin plastik hasar yükü sınırına ulaşması için gereken toplam yükü artırır. Sonuç olarak elips büyük çapı arttıkça sistemin toplam hasar yükü de artar.

Tek ve Çift Bindirmeli numunelerde eliptik hasar küçük çap arttıkça, eğmeye mukabil olan hasar yükünde düşüş gözlemlenmektedir. Bunun sebebi eliptik hasar küçük çapı arttıkça uzun köşegenin uçları yuvarlanmakta dolayısıyla çentik etkisi azalmakta ve mukavemet artmaktadır. Bu da blok olarak hareket eden rijit yama bölgesinin rijitliğini artırarak elastik eğilmesini azaltır bu da yükü elastik olarak daha az eğilerek üzerine daha az almasına ve rijit bir şekilde daha fazla yama uçlarına aktarmasına ve bu uçtaki 2 eğilme

bölgesinin daha düşük bir toplam yükte hasar sınırına ulaşarak hasara uğramasına sebep olur.

Eliptik çaplı hasar oluşturulan Al 2024 T3 levhanın hasarlı yamasız, tek bindirme ve çift bindirme hasar yüklerinin etkisini incelediğimizde, tek ve çift yamalı tamirlerde eğmeye mukabil olan hasar yükünde büyük bir artış görülmektedir. Bu da demek oluyor ki, tek ve çift taraflı bindirmeler ile yapılan hasar tamirlerinin çok başarılı sonuç verdiği söylenebilir.

Çift bindirmeli sistemin tek bindirmeli sistemden ortalama olarak 20 N daha yüksek bir ortalama hasar yükü göstermesi iki yamanın elastik olarak deforme olarak üzerlerine aldıkları yükün tek yamadan biraz daha fazla olması ile toplam hasar yükünün artmasıdır.

5.2. Nümerik Sonuçlar

Nümerik analiz ile oluşturulan σ_x , σ_y , τ_{xy} ve σ_{vm} gerilme dağılımları grafikleri vasıtasıyla kritik hatların bütün noktalarındaki gerilme dağılımları gözlemlenebilmiştir.

Ayrıca nümerik gerilmelerin karşılaştırılması için oluşturulan sütun grafikler, σ_x , σ_y , ve σ_{vm} gerilmelerinin BC hattı üzerinde aldıkları maksimum değerleri göstermektedir.

Deneysel olarak daha düşük yüklerde hasara uğrayan numunelerin kritik bölgelerindeki gerilme yığılmaları daha fazladır ve o yüzden uygulanan daha düşük hasar yüklerinde o kritik bölgelerdeki gerilmeler akma gerilmelerini geçer ve numune hasara uğrar. Bu yüzden, daha düşük yüklerde hasara uğrayan yamasız numunelerin üzerindeki σ_x , σ_y ve σ_{vm} gerilmeleri, tek ve çift taraflı bindirme ile yamalı numunelerinkilerden daha yüksektir ve deneysel sonuçlarla uyumludur.

Bütün büyük çap değerlerinde, çift yamalı numunelerin σ_x , σ_y ve σ_{vm} gerilmeleri, tek taraflı numunelerden daha büyüktür. Bu da yukarıda bahsedilen deneysel sonuçları teyit etmektedir.

Sonuç olarak, deneysel sonuçlar ile nümerik sonuçlar karşılaştırıldığında Tablo 12'de görüleceği üzere ortalama olarak %95 oranında yakınsama görülmüştür. Yapmış olduğumuz nümerik çözümleri yaklaşık çözümler olarak varsayarsak bu yakınsama oranının uygun olduğu ve nümerik sonuçların da kabul edilebilir olduğu söylenebilir.

Çalışmada kullandığımız yama malzemesinin kalınlığı düşürüldükçe, yamalı bölge bir rijit blok halinde davranamayacak ve elips uzun köşegeninin ucundaki B noktasının çentik etkisinin fazlalığından dolayı kritikliği artacaktır. Bu yüzden başka bir çalışmada, yama kalınlığının etkisine bakılabilir.

Tek bindirmeli yamalı numuneler yamaları üste gelecek şekilde üç nokta eğme testine tabi tutulmuştur. Bu numuneler eğer yamaları alta gelecek şekilde test edilseydi, yama çekmeye maruz kalacağı için durum değişebilirdi. Başka bir çalışmada, bu yükleme durumunda testler yapılarak bu tezdekiler ile kıyaslanabilir.



KAYNAKLAR

1. ADAMS,R.D., COMYN,J., Joining using Adhesives,Assembly Automation,20:109-117,2000
2. SAWA,T.,LIU,J.,NAKANO,K.,TANAKA,J.,A Two Dimensional Stress Analysis of Single Lab Adhesive Joints of Dissimilar Adherents Subjected to Tensile Loads,J.of Adhesion Science and Technolog,14,43-66,2000
3. SEO,D.,LEE,J.,Fatigue Crack Growth Behaviour of Cracked Aluminium Plate Repaired with Composite Patch,Composite Structures, 57:323-330,2002
4. XIAO,Y., , Bearing Deformation Behaviour of Carbon/Bismaleimide Composites Containing One and Two Bolted Joints, Journal of Reinforced Plastics and Composites,22:169-182
5. GENÇ,S., Yapıştırıcı ile Birleştirilmiş Tek Yönlü Tabakalı Kompozit Tek Bindirme Bağlantılarında Hasar Oluşumu ve Gelişimi,Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniv.,Kayseri,2005
6. KWEON,J.H., JUNG,J.W., KIM,T.H.,CHOI,J.H.,KIM,D.H,Failure of CarbonComposite to Aluminium Joits with Combined Mechanical Fastening and Adhesive bonding,Composite Structures,75:192-198,2006
7. SABELKIN,V., MALL,S.,AVRAM,J.B.,Faique Crack Growth Analysis of Stiffened Cracked Panel REpaired with Bonded Composite Patch,Engineering Fracture Mechanics,73:1553-1567,2006
8. GENÇ,Ç., Cam Elyaf Takviyeli Plastiklerin Üretim Yöntemlerinin Deneysel Karşılaştırılması,Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniv.,Kocaeli,2006
9. YAVUZYILMAZ,Ö., Eksenel Yük Altındaki Ortasında Delik Bulunan Kompozit Levhada Değişik Sıcaklıklarda Oluşan Gerilmelerin Deneysel ve Sonlu Elemanlar Analizi İle İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi,Gazi Üniv., Ankara,2007
10. ORHAN,O., Statik Yayılı Yük Altındaki Katmanlı Kompozit Plakların Deneysel ve Sayısal İncelenmesi,Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, İstanbul,2007
11. DİNÇ,H., Tek Bindirmeli Yapıştırma Bağlantılarının Tasarım ve Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Afyonkarahisar Kocatepe Üniv.,Afyon,2007
12. BROWN A.B, BROOKS,R.WARRIOR,N.A, The Static and High Strain Rate Behaviour of a commingled E-Glass/Polyproplene woven Fabric Composite,Composite Science and Technology,70-272-283

13. ÖZDEMİR,U., Hafif Metallerin Otomotiv Sektöründeki Yeri ve Uygulamaları,Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İTÜ,İstanbul,2010
14. KOÇER,L., E-Cam/Epoksi Örgülü Kompozit Plakaların Analitik,Sayısal ve Deneysel Çözümlerinin Elde Edilmesi,Yüksek Lisans Tezi,Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak Karaelmas Üniv.,Zonguldak,2010
15. RAZMİ,A., Kompozit Parçaların Çeşitli Yapıştırılmalı Bağlantı Tasarımlarının Karşılaştırılması,Yüksek Lisans Tezi,Fen Bilimleri Enstitüsü, Dokuz Eylül Üniv. ,İzmir,2011
16. GÜL,M., Dikdörtgen Kompozit Plakların Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Statik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniv.,Ankara,2011
17. TÜRKMEN,İ., Cam Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerde Elyaf Tabaka Sayısına Bağlı Mekanik Özelliklerin ve Darbe Dayanımının İncelenmesi,Yüksek Lisans Tezi,Fen Bilimleri Enstitüsü, Celal Bayar Üniv., Manisa,2012
18. EKŞİ,S., Dairesel Kesitli Kompozit Tüp Kirişlerin Eğme ve Burkulma Davranışının Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi,Doktora Tezi,Fen Bilimleri Enstitüsü,Sakarya Üniv., Sakarya,2013
19. KORKMAZ,B., Yapıştırma Bağlantılarının Dinamik Özelliklerinin İncelenmesi,Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü,Atatürk Üniv.,Erzurum,2013
20. KÖKSAL,H., Yapıştırıcılı ve Çok Pimli Kompozit Plakaların Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray Üniv., Aksaray,2013
21. TOPAL,E., Kompozit Delikli Kare Levhalarda İki Yönlü Yükleme Altında Mekanik Burkulmalarının İncelenmesi,Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü,Hitit Üniv.,Çorum,2014
22. ERGÜN R.K., Eliptik Delikli Alüminyum Levhaların Kompozit Yama ile Tamir Edilmesinin Gerilme Davranışına Etkisinin Deneysel ve Sayısal Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi,Fen Bilimleri Enstitüsü,K.Maraş S.İmam Üniv.,K.Maraş,2014
23. BİLGİ,C., Uçaklarda Kullanılan Al 2024 Alaşımlarında ve Karbon Fiber Kompozitlerinde Termografi Yönteminin Uygulanabilirliğinin Deneysel İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü,Karabük Üniv.,Karabük,2014
24. ÖZER,H., Sürekli Cam Elyaf Takviyeli Termoplastik Kompozit Malzemelerin Geliştirilmesi ve Mekanik Özelliklerinin Deneysel Olarak Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi,Fen Bilimleri Enstitüsü, Uludağ Üniv.,Bursa,2015

25. KAHVECİOĞLU, Y.E., Yapıştırma Bağlantılı Ko-mpozit Malzemelerin Mekanik Performansı üzerine Mekanik Bağlamının Etkilerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Dokuz Eylül Üniv., İzmir, 2016
26. SAYLIK, A., Kompozit Yama ile Tamir Edilmiş Çentikli Alüminyum Levhalarda Gerilme Analizi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fırat Üniv., Elazığ, 2016
27. PUHURCUOĞLU, S.N., Sandviç Kompozitlerde Birleştirme Bölgesinin Eğilme Davranışı, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Dokuz Eylül Üniv., İzmir, 2017
28. ÇELİK, S. (2010), Demir Dışı Metaller Ders Notları, Balıkesir Üniv. Mak. Müh. Böl. 26-27.
29. AYDIN, H. , BAYRAM, A., Farklı Isıl İşlem Koşullarındaki 2024 Alüminyum Alaşımlarının Korozyonu Sonrası Mekanik Özelliklerindeki Kaybın Belirlenmesi, Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 15, Sayı 1, 2010
30. GÜLEÇ, Ş. ve ARAN, A. (1987) Malzeme Bilgisi (Çeviri), Cilt 2, Gebze MBEAE Matbaası. (Bargel, H.J. ve Schulze, G. (1980). Werkstoffkunde, VDI-Verlag GmbH Duesseldorf).
31. URL : <http://www.seykoc.com.tr/icerik/2024?dil=tr-> Al 2024 Alaşımları Mekanik Özellikleri, Seykoç Alüminyum Web Sitesi, Ziyaret Tarihi-Saati: 31.05.2018-23:45
32. URL : www.esa.com.tr/kompozit-hakkinda/ -Kompozit Malzemeler, Esa Kompozit Web Sitesi, Ziyaret Saati-Tarihi: 01.06.2018-00:30
33. ARICASOY, O., Kompozit Sektör Raporu, İstanbul Ticaret Odası, İstanbul, 2006
34. CANBOLAT, C., Yapıştırıcılar ve Birleştirme Dizaynları, Lisans Bitirme Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, 2007
35. URL : <http://artiendustri.com.tr/yazi/epoksi-yapistiricilar-ve-kullanim-alanlari>, Artı Endüstri Web Sitesi, Ziyaret Tarihi : 01.06.2018-02:43
36. İŞCAN, B., ADİN, H., TURGUT, A., Yapıştırıcı Malzeme ile Birleştirilmiş Z Tipi Bağlantılarda Bindirme Mesafesinin Etkisi, 5. Uluslararası İleri Teknoloji Sempozyumu (IATS'09), Karabük, 2009
37. YAGOUB, S., Taşıtlarda Kullanılan Yapıştırıcıların Mekanik Karakterizasyon Deneyleri ve Sonlu Elemanlar Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Uludağ Üniv., Bursa, 2015
38. URL 1 : <http://fforklift.blogspot.com/2016/12/polimerlerde-cams-gecis-scaklg-tg-ve.html>,

39. URL-2 :https://tr.wikipedia.org/wiki/Camsı_geçiş_sıcaklığı (Google), Ziyaret Tarihi-Saati : 01.06.2018-12:51)
40. Eğme Deneyi Deney Ders Notları ve Deney Föyü,Metalurji ve Malzeme Mühendisliği,Celal Bayar Üniversitesi,Manisa
41. ARIKAN,S., Sonlu Elemanlar Metodunun Mühendislikte Uygulamaları Notu, ODTÜ CAD/CAM Merkezi
42. URL : <http://www.figes.com.tr/ansys/urunler.php>, Figes Web Sitesi 30.05.2018,13:00
43. URL : <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=ma2024t>, ASM Matweb Web Sitesi, Ziyaret Tarihi-Saati: 01.06.2018-10:21
44. ÖNER,G.,AKPINAR, S.,GÜLTEKİN, K., ÖZEL, A, Effect of Carbon Nanotube added adhesive on the strength of Adhesively Bonded Joint,22nd Annual International Conference on Composite and Nanoengineerin,2014
45. URL: <https://www.alliedelec.com/m/d/c77190869d7cbeedde08a95b0574795b.pdf>, 30.05.2018 20:39

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı, soyadı : Can CANBOLAT
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 14.12.1982 Kahramanmaraş
Medeni hali : Bekar
Telefon : 0 (505)679 05 78
e-posta : canacst@gmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Fırat Üni. / Makine Mühendisliği Bölümü	2008
Lise	Kadriye Çalık Anadolu Lisesi	2001

İş Denevimi

Yıl	Yer	Görev
2012-...	KÇS K.Maraş Çimento San.A.Ş.	Koruyucu-Kestirimci Bakım Müh.
2008-2012	Canbolat Mühendislik Ltd.Şti.	Şirket Müdürü

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Formula 1, Tenis, Müzik