



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

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ÇİFT PİMLİ VE YAPIŞTIRMALI KOMPOZİT PLAKALARDA
FARKLI YAPIŞTIRICI TÜRLERİYLE GERİLME ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İlker ERZİNCANLI

DANIŞMAN

Dr. Öğretim Üyesi Semih BENLİ

AKSARAY, 2021

Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 182304405 numaralı Yüksek Lisans öğrencisi İlker ERZİNCANLI tarafından hazırlanan “ÇİFT PİMLİ ve YAPIŞTIRMALI KOMPOZİT PLAKALARDA FARKLI YAPIŞTIRICI TÜRLERİYLE GERİLME ANALİZİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Dr. Öğretim Üyesi Semih BENLİ

Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Doç. Dr. Tolga TANER

Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Unvanı Dr. Öğretim Üyesi Harun SEPETÇİOĞLU

Selçuk Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 27/01/2021

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Doç. Dr. Mehmet Ali HİNİS

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

DOĞRULUK BEYANI

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışmayı, akademik kurallara ve bilimsel etik, ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yol ve yardıma başvurmaksızın yazdığımı, yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu, çalışmamda kullandığım verilerin orijinalliğini ve her türlü intihalden uzak olduğunu beyan ederim.

Enstitü tarafından belli bir zamana bağlı olmaksızın, tezimle ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara katlanacağımı bildiririm.

İlker ERZİNCANLI

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren bilgi ve yardımlarıyla katkı sağlayan danışman hocam Dr. Öğretim Üyesi Semih BENLİ 'ye, manevi desteğiyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan değerli eşim ve kızıma teşekkürü bir borç bilirim.

İlker ERZİNCANLI
AKSARAY, 2021



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ÖZET.....	iii
ABSTRACT	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	3
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	14
3.1 Yapıştırılmalı Bağlantılar	14
3.1.1 Yapıştırıcıların sınıflandırılması ve tarihsel gelişimi	18
3.1.2 Yapıştırılmalı bağlantı uygulamaları	21
3.1.2.1 Havacılık	21
3.1.2.2 Otomotiv	21
3.2 Kompozit Malzemeler	23
3.2.1 Kompozit malzemelerin kullanım alanları	25
3.2.2 Kompozit malzemelerin sınıflandırılması	26
3.2.2.1 Parçacık takviyeli kompozitler	27
3.2.2.2 Elyaf takviyeli kompozitler.....	28
3.2.2.3 Yapısal kompozitler	30
3.3 Kompozit Tabakanın Elastik Davranışı	32
3.3.1 Genel anizotropik malzeme	32
3.3.2 Özel ortotropik malzeme	34
3.3.3 Enine izotropik malzeme	35
3.4 Pim Bağlantıları.....	38
3.5 Sonlu Elemanlar Metodu	39
3.5.1 Ansys programında kullanılan üç boyutlu elemanlar	40
3.5.1.1 Termal (ısı) katı elemanlar.....	40
3.5.1.2 Yapısal katı elemanlar.....	41
3.5.1.3 Kontak elemanları	43
3.6 Problemin Tanımı	45
3.7 Malzeme ve Özellikleri	46
3.8 Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması	47
3.9 Kurulan Model Varyasyonları	50
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	52
4.1 Çekme Yüğü Sonucu Bağlantının Tamamı İçin Elde Edilen Bulgular	52
4.2 Çekme Yüğü Sonucu Yapıştırıcı Tabakasındaki Bulgular.....	60
4.3 Çekme Yüğü Sonucu Delik Bölgeleri İçin Elde Edilen Bulgular	70
4.4 Kompozit Plakalarda Tsai-Wu Hasar Kriteri	80
4.5 Tartışma.....	83
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	85
KAYNAKLAR	87
EKLER.....	92
EK A Kullanılan Malzeme Konfigürasyonları.....	93
ÖZGEÇMİŞ.....	95

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÇİFT PİMLİ VE YAPIŞTIRMALI KOMPOZİT PLAKALARDA FARKLI YAPIŞTIRICI TÜRLERİYLE GERİLME ANALİZİ

İlker ERZİNCANLI

**Aksaray Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Dr. Öğretim Üyesi Semih BENLİ

ÖZET

Bu çalışmada, çift pim bağlantısı uygulanmış farklı oryantasyon açılarında tabakalı kompozit plakada, farklı yapıştırıcı türlerinin gerilmelere etkisi incelenmiştir. Malzemeye çekme yükü uygulanması sonucu modelin tümü ve delik bölgelerinde modeller arasında meydana gelen gerilmelerin belirlenmesi ve karşılaştırılması amaçlanmıştır. Modelleme ve analiz için ANSYS (V19) sonlu elemanlar yazılımı kullanılmıştır. Modelleme üç boyutlu olarak yapılmıştır. Model üzerine gerekli sınır şartları ve yüklemeler uygulanmıştır. Mevcut çalışmalardan farklı olarak pim ve tabakalı kompozit plaka üzerindeki delik için kontak analiz uygulanmış ve analiz bu şekilde gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kompozit Malzemeler, Pim Bağlantısı, Yapıştırma Bağlantısı, Kontak Analizi, Gerilme Analizi.

Ocak, 2021; 95 sayfa

M.Sc. THESIS

**STRESS ANALYSIS OF DOUBLE PINNED AND ADHESIVELY BONDED
COMPOSITE PLATES WITH DIFFERENT ADHESIVE TYPES**

İlker ERZİNCANLI

**Aksaray University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering**

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Semih BENLİ

ABSTRACT

In this study, the effects of different adhesive types on stresses in a laminated composite plate with different orientation angles which double pin connection applied has been investigated. It is aimed to determine and compare the stresses occurring between the models in the whole model and hole regions as a result of the application of tensile load to the material. ANSYS (V19) finite element software was used for analysis, modeling and solution. Modeling was done in three dimensions. Necessary boundary conditions and loads have been applied on the model. Unlike the existing studies, contact analysis was performed for the hole and the pin on the layered composite plate and analysis was carried out in this way.

Keywords: Composite Materials, Pin Connection, Bonding Connection, Contact Analysis, Stress Analysis.

January, 2021; 95 pages

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Tipik bir yapıştırırmalı bağlantı.	14
Şekil 3.2. Metal malzeme, perçinli bağlantı ve yapıştırırmalı bağlantı için S-N eğrileri	17
Şekil 3.3. Tek türlü metal bağlantılar için birleşim verimlilik çizelgesi.....	17
Şekil 3.4. Isıya dayanıklı yapıştırıcıların tarihsel gelişimi.....	20
Şekil 3.5. Yapıştırıcıdaki tipik hasarlar; (a) yapıştırıcı hatası, (b) yapıştırılan malzeme hatası ve (c) yapıştırıcı / yapıştırılan malzeme hatası.....	23
Şekil 3.6. Geleneksel monolitik malzemeler ile kompozit malzemeler arasındaki karşılaştırma	24
Şekil 3.7. Kompozit malzeme fazları.....	24
Şekil 3.8. Karbon/epoksi kompozit malzeme kullanılarak üretilmiş ayak ve bacak protezi	26
Şekil 3.9. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması	27
Şekil 3.10. Çekme gerilmesine maruz bir elyafı saran matristeki şekil değişimi	28
Şekil 3.11. Sürekli ve çekme doğrultusunda yönlenmiş	29
Şekil 3.12. Süreksiz ve yönlenmiş elyaf kompozitler	29
Şekil 3.13. Süreksiz ve rastgele yönlenmiş elyaf kompozitler	30
Şekil 3.14. Bir tabakalı kompozitte yönlenmiş elyaf takviyeli tabakaların istiflenmesi	31
Şekil 3.15. Tek yönlü yerleşim ve yarı izotropik yerleşim	31
Şekil 3.16. Süreklilik noktasındaki gerilme durumu	32
Şekil 3.17. Enine izotropili ortotropik malzeme	36
Şekil 3.18. Enine izotropik malzemenin izotropi düzlemindeki gerilme dönüşümleri.....	36
Şekil 3.19. Pimli bağlantılarda tipik hata modları.	39
Şekil 3.20. ANSYS'te kullanılan SOLID70 elemanı	41
Şekil 3.21. ANSYS'te kullanılan SOLID90 elemanı	41
Şekil 3.22. ANSYS'te kullanılan SOLID185 elemanı	42
Şekil 3.23. ANSYS'te kullanılan SOLID 65 elemanı	42
Şekil 3.24. ANSYS'te kullanılan SOLID285 elemanı	42
Şekil 3.25. ANSYS'te kullanılan SOLID186 elemanı	43
Şekil 3.26. ANSYS'te kullanılan SOLID187 elemanı	43
Şekil 3.27. ANSYS'te kullanılan TARGE170 elemanı.....	44
Şekil 3.28. ANSYS'te kullanılan CONTA174 elemanı	44
Şekil 3.29. Modellerin şematik gösterimi	46
Şekil 3.30. Tabakalı kompozit plakaların sonlu elemanlar modeli.....	48
Şekil 3.31. Tabakalı kompozit plaka.	48
Şekil 3.32. Pim ve delik çevresi mesh yapısı.....	48
Şekil 3.33. TARGE 170 ve CONTA 174 eleman atanmış yüzeyler.....	49
Şekil 3.34. Modelin tamamının sonlu elemanlar ağ yapısı.	49
Şekil 4.1. Model 1 pimlerde X yönünde oluşan normal gerilmeler.....	52
Şekil 4.2. Model 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 7 - 8 - 9 - 10 - 11 - 12 X yönünde normal gerilmeler (Oryantasyon açısı $[45^{\circ}/-45^{\circ}]_8$).....	52
Şekil 4.3. Model 13 - 14 - 15 - 16 - 17 - 18 - 19 - 20 - 21 - 22 - 23 - 24 X yönündeki normal gerilmeler (Oryantasyon açısı $[0^{\circ}/0^{\circ}]_8$).....	53

Şekil 4.4. Model 25 - 26 - 27 - 28 - 29 - 30 - 31 - 32 - 33 - 34 - 35 - 36 X yönündeki normal gerilmeler (Oryantasyon açısı $[30^\circ/-30^\circ]_8$).....	53
Şekil 4.5. Elastisite modülü değerleri denemesi.	55
Şekil 4.6. Model 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 7 - 8 - 9 - 10 - 11 - 12 Y yönünde normal gerilmeler (Oryantasyon açısı $[45^\circ/-45^\circ]_8$).....	56
Şekil 4.7. Model 13 - 14 - 15 - 16 - 17 - 18 - 19 - 20 - 21 - 22 - 23 - 24 Y yönünde normal gerilmeler (Oryantasyon açısı $[0^\circ/0^\circ]_8$).....	56
Şekil 4.8. Model 25 - 26 - 27 - 28 - 29 - 30 - 31 - 32 - 33 - 34 - 35 - 36 Y yönünde normal gerilmeler (Oryantasyon açısı $[30^\circ/-30^\circ]_8$).....	57
Şekil 4.9. Model 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 7 - 8 - 9 - 10 - 11 - 12 Von Mises gerilmeleri (Oryantasyon açısı $[45^\circ/-45^\circ]_8$).....	58
Şekil 4.10. Model 13 - 14 - 15 - 16 - 17 - 18 - 19 - 20 - 21 - 22 - 23 - 24 Von Mises gerilmeleri (Oryantasyon açısı $[0^\circ/0^\circ]_8$).....	59
Şekil 4.11. Model 25 - 26 - 27 - 28 - 29 - 30 - 31 - 32 - 33 - 34 - 35 - 36 Von Mises gerilmeleri (Oryantasyon açısı $[30^\circ/-30^\circ]_8$).....	59
Şekil 4.12. Yapıştırıcıda XZ yönünde oluşan kayma gerilmeleri.....	61
Şekil 4.13. Model 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 7 - 8 - 9 - 10 - 11 - 12 yapıştırıcı XZ ekseninde kayma gerilmeleri (Oryantasyon açısı $[45^\circ/-45^\circ]_8$).....	63
Şekil 4.14. Model 12 - 13 - 14 - 15 - 16 - 17 - 18 - 19 - 20 - 21 - 22 - 23 - 24 yapıştırıcı XZ ekseninde kayma gerilmeleri (Oryantasyon açısı $[0^\circ/0^\circ]_8$).....	64
Şekil 4.15. Model 24 - 25 - 26 - 27 - 28 - 29 - 30 - 31 - 32 - 33 - 34 - 35 - 36 yapıştırıcı XZ ekseninde kayma gerilmeleri (Oryantasyon açısı $[30^\circ/-$ $30^\circ]_8$).....	64
Şekil 4.16. Yapıştırıcıda oluşan Von Mises gerilmeleri.	65
Şekil 4.17. Model 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 7 - 8 - 9 - 10 - 11 - 12 yapıştırıcı Von Mises gerilmeleri (Oryantasyon açısı $[45^\circ/-45^\circ]_8$).....	68
Şekil 4.18. Model 13 - 14 - 15 - 16 - 17 - 18 - 19 - 20 - 21 - 22 - 23 - 24 yapıştırıcı Von Mises gerilmeleri (Oryantasyon açısı $[45^\circ/-45^\circ]_8$).....	69
Şekil 4.19. Model 25 - 26 - 27 - 28 - 29 - 30 - 31 - 32 - 33 - 34 - 35 - 36 yapıştırıcı Von Mises gerilmeleri (Oryantasyon açısı $[45^\circ/-45^\circ]_8$).....	69
Şekil 4.20. Gerilmelerin tanımlandığı doğrultular.	70
Şekil 4.21. Deliklerde oluşan gerilmeler için deliklerin adlandırılması.	70
Şekil 4.22. Çekme yükü uygulanması sonucu deliklerde A-C ve D-F boyunca silindirik koordinatlarda oluşan gerilmelerin grafiksel gösterimi.	71
Şekil 4.23. Model 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 7 - 8 - 9 - 10 - 11 - 12 1 nolu delik silindirik koordinatlarda normal gerilmeler (Oryantasyon açısı $[45^\circ/-45^\circ]_8$).....	74
Şekil 4.24. Model 13 - 14 - 15 - 16 - 17 - 18 - 19 - 20 - 21 - 22 - 23 - 24 1 nolu delik silindirik koordinatlarda normal gerilmeler (Oryantasyon açısı $[0^\circ/0^\circ]_8$).....	74
Şekil 4.25. Model 25 - 26 - 27 - 28 - 29 - 30 - 31 - 32 - 33 - 34 - 35 - 36 X 1 nolu delik silindirik koordinatlarda normal gerilmeler (Oryantasyon açısı $[30^\circ/-30^\circ]_8$).....	75
Şekil 4.26. Model 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 7 - 8 - 9 - 10 - 11 - 12 2 nolu delik silindirik koordinatlarda normal gerilmeler (Oryantasyon açısı $[45^\circ/-45^\circ]_8$).....	75
Şekil 4.27. Model 13 - 14 - 15 - 16 - 17 - 18 - 19 - 20 - 21 - 22 - 23 - 24 2 nolu delik silindirik koordinatlarda normal gerilmeler (Oryantasyon açısı $[0^\circ/0^\circ]_8$).....	76

Şekil 4.28. Model 25 - 26 - 27 - 28 - 29 - 30 - 31 - 32 - 33 - 34 - 35 - 36 2 nolu delik silindirik koordinatlarda normal gerilmeler (Oryantasyon açısı $[30^\circ/-30^\circ]_8$).....	76
Şekil 4.29. Karbon/epoksi - karbon/epoksi plaka 1 nolu delik oryantasyon açısına göre gerilme değerleri.	78
Şekil 4.30. Cam/epoksi - cam/epoksi plaka 1 nolu delik oryantasyon açısına göre gerilme değerleri.	78
Şekil 4.31. Karbon/epoksi – cam/epoksi plaka 1 nolu delik oryantasyon açısına göre gerilme değerleri.	79
Şekil 4.32. Cam/epoksi - karbon/epoksi plaka 1 nolu delik oryantasyon açısına göre gerilme değerleri.	79
Şekil 4.33. Kompozit tabakalı plakalarda hesaplanan Tsai-Wu dayanım indeksi.....	81



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Perçinleme, kaynak ve yapıştırma teknikleri arasında karşılaştırma.....	16
Çizelge 3.2. Yapıştırıcıların sınıflandırılması.....	18
Çizelge 3.3. Yapıştırıcıların tarihsel gelişimi	19
Çizelge 3.4. Havacılık yapılarında yapıştırıcıların kullanımı	21
Çizelge 3.5. Otomotivde yapıştırıcıların kullanımı	22
Çizelge 3.6. ANSYS'de gerilme analizi için 3D katı elemanlar	44
Çizelge 3.7. Karbon/epoksi tabakalı kompozit plaka mekanik özellikleri	46
Çizelge 3.8. Cam/epoksi tabakalı kompozit plaka mekanik özellikleri.....	47
Çizelge 3.9. Yapıştırıcı 1 mekanik özellikleri	47
Çizelge 3.10. Yapıştırıcı 2 mekanik özellikleri	47
Çizelge 3.11. Yapıştırıcı 3 mekanik özellikleri	47
Çizelge 3.12. Kullanılacak malzeme ve yapıştırıcı kombinasyonları.....	50
Çizelge 4.1. X yönündeki $[45^{\circ}/-45^{\circ}]_8$ oryantasyon açısında minimum ve maksimum çekme ve basma gerilmeleri.	54
Çizelge 4.2. X yönündeki $[0^{\circ}/-0^{\circ}]_8$ oryantasyon açısında minimum ve maksimum çekme ve basma gerilmeleri.	54
Çizelge 4.3. X yönündeki $[30^{\circ}/-30^{\circ}]_8$ oryantasyon açısında minimum ve maksimum çekme ve basma gerilmeleri.	54
Çizelge 4.4. Y yönündeki $[45^{\circ}/-45^{\circ}]_8$ oryantasyon açısında minimum ve maksimum çekme ve basma gerilmeleri.	57
Çizelge 4.5. Y yönündeki $[0^{\circ}/-0^{\circ}]_8$ oryantasyon açısında minimum ve maksimum çekme ve basma gerilmeleri.	57
Çizelge 4.6. Y yönündeki $[30^{\circ}/-30^{\circ}]_8$ oryantasyon açısında minimum ve maksimum çekme ve basma gerilmeleri.	58
Çizelge 4.7. Minimum ve maksimum Von Mises gerilmeleri.....	60
Çizelge 4.8. Yapıştırıcı Elastisite modülüne göre maksimum XZ yönünde kayma gerilmeleri değişimi.....	63
Çizelge 4.9. Yapıştırıcıda XZ yönünde oluşan oryantasyon açısına göre minimum ve maksimum kayma gerilmeleri.	65
Çizelge 4.10. Yapıştırıcı Elastisite modülüne göre maksimum Von Mises gerilmeleri değişimi.....	68
Çizelge 4.11.Yapıştırıcıda oluşan oryantasyon açısına göre minimum ve maksimum Von Mises gerilmeleri.	70
Çizelge 4.12. 1 nolu delik etrafındaki silindirik koordinatlarda oluşan maksimum basma gerilmeleri.	77
Çizelge 4.13. Karbon/epoksi tabakalı kompozit plaka dayanım özellikleri	80
Çizelge 4.14. Cam/epoksi tabakalı kompozit plaka dayanım özellikleri.....	80

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

E	Elastisite Modülü
FEA	Sonlu Elemanlar Analizi
ρ	Yoğunluk
θ	Dönme açısı
ν	Poisson Oranı
σ_x	x eksenî yönündeki normal gerilme
σ_y	y eksenî yönündeki normal gerilme
σ_z	z eksenî yönündeki normal gerilme
ϵ_x	x eksenî yönündeki genleme
ϵ_y	y eksenî yönündeki genleme
ϵ_z	z eksenî yönündeki genleme
τ_{xy}	xy eksenleri yönündeki kayma gerilmesi
τ_{xz}	xz eksenleri yönündeki kayma gerilmesi
τ_{yz}	yz eksenleri yönündeki kayma gerilmesi
γ_{xy}	xy eksenleri yönündeki kayma genlemesi
γ_{xz}	xz eksenleri yönündeki kayma genlemesi
γ_{yz}	yz eksenleri yönündeki kayma genlemesi

1. GİRİŞ

Üretim endüstrisinde meydana gelen gelişmelerin sonucu olarak mevcut geliştirilmiş malzemeler gelişen teknolojinin ihtiyaçlarına cevap veremez hale gelmiştir. Buna bağlı olarak kompozit malzemelerin özelliklerini geliştirilmesi ve bunların üretiminin gerçekleştirilmesi faaliyetleri üzerine araştırma ve geliştirme faaliyetleri devam etmektedir. Havacılık, savunma sanayi, otomotiv ve denizcilikte hafif ve dayanıklı malzemelere duyulan ihtiyaç bu araştırmaların önemini bir kez daha ön plana çıkarmaktadır. Kompozit malzemelerin en önemli özelliklerinden olan yüksek sıcaklık dayanımı ve boyutsal kararlılığı bu malzemelerin geliştirilmesinde önemli birer etken olmaktadır.

Kompozit malzemelerin birleştirilmesinde çeşitli yöntemler kullanılır. Birleştirme yöntemlerinin başında kaynak, lehim ve bağlantı elemanları ile birleştirme gelmektedir. Yapıştırma yöntemi bazı avantajları nedeniyle diğer birleştirme yöntemlerine alternatif olarak önemli bir yere sahip olmaya başlamıştır. Bu nedenle gelişmelere bağlı olarak kullanımı zaman içinde artmış ve artmaya devam etmektedir. Günümüz teknolojisinde uygulanacağı malzeme türüne göre de farklı yapıştırıcı türleri geliştirilmekte ve kullanılmaktadır. Yapıştırıcı ile bağlantı teknolojisi özellikle ince metal ve kompozit plakalar için önemli bir birleştirme tekniğidir.

Savunma ve havacılık endüstrisinde kullanılan malzemelerde kullanılan çok sayıda bağlantı elemanı nedeniyle yorulma ve çatlaklar sonucu kırılma oluşumu riski bulunmaktadır. Bundan dolayı delik etrafındaki temas nedeniyle oluşan gerilmelerini düşürmek gerekliliği ortaya çıkmıştır. Pim bağlantısının yanında yapıştırıcı bağlantısının kullanılmasında bu riski azaltma ihtiyacı bulunmaktadır. Yapıştırıcı kullanımıyla gerilme yapıştırıcının uygulandığı tüm yüzeye yayılmakta ve delik etrafında oluşan gerilme yığılmalarının da bu şekilde önüne geçilmektedir. Buna ilave olarak yöne yapıştırıcının iki plaka arasındaki yüzeyi kaplayarak bu bölgeleri korozyondan koruma etkisi de kullanımda oluşacak avantajlardandır.

Yapılan çalışmada farklı özellikteki yapıştırıcılarla ve çift pimli bağlantı sonucu farklı oryantasyon açısına sahip tabakalı kompozit plakalara uygulanan çekme kuvveti sonucu oluşan gerilmeler bulunmuştur. Elde edilen sonuçlara göre farklı yapıştırıcı türleriyle oluşan gerilmeler karşılaştırılarak yorumlanmıştır. Farklı yapıştırıcı türlerinin delik etrafındaki gerilme yığılmalarına etkisi de bu şekilde incelenmiştir. Mevcut çalışmalardan farklı olarak tabakalı kompozit plaka her bir oryantasyon açısı için ayrı ayrı katı olarak modellenmiş ve bu modelde kontak analizi çalıştırılmıştır.



2. KAYNAK ÖZETLERİ

Özel vd. (2014) yaptıkları çalışmada, çekme yükü altında farklı alt ve üst tabaka konfigürasyonları ile birlikte yapıştırılan tek etkili bağlantı (SLJ) geometrisinin mekanik özelliklerini deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Yapıştırılan plakaların malzemeleri AA2024-T3 alüminyum ve 16 tabakalı karbon/epoksi kompozit iken, yapıştırıcı olarak ta iki bileşenli sıvı yapısal yapıştırıcı olan DP 460 kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda dört farklı tipte tek etkili bağlantı üretilmiş ve bunlar kullanılmıştır. Deneysel ve sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar, kompozitin farklı elyaf oryantasyon açıları, farklı yapıştırıcı kalınlıkları ve yapıştırma uzunluğuyla yapıştırılmasının tek etkili bağlantı yükünü ve gerilme dağılımını etkilediğini göstermiştir. Kompozit tabakaların diziliş sırası hasar yükünü etkilemiştir. Yapıştırma uzunluğundaki artış her iki bağlantı türünde de yük taşıma kapasitesini artırmıştır. Bununla birlikte, her iki bağlantı tipi karşılaştırıldığında, yapıştırma uzunluğunun etkisinin kompozit yapıştırma durumunda bağlantının yük taşıma kapasitesinde daha etkili olduğu görülmüştür.

Kishore vd. (2009) yaptıkları çalışmada sonlu elemanlar analizi ve deneysel çalışma ile sonuçları doğrulayarak, tek yönlü cam elyaf/epoksi kompozit plakalarda çok pimli bağlantılar için hasar modlarını ve hasar yüklerini elde etmeyi amaçlamışlardır. ANSYS yazılımı kullanılarak iki boyutlu sonlu elemanlar modeli geliştirilmiştir. Analizde, malzeme yükünün bozulmasına ilişkin Tsai-Wu hasar kriteri, hasar yükünü tahmin etmek ve hasar modlarını ayırt etmek için kullanılmıştır. Deneysel ve sonlu elemanlar analizinden elde edilen sonuçlar, E / D , S / D ve P / D oranlarının çoklu pimli bağlantılarının tasarımındaki etkisini göz önünde bulundurmanın çok önemli olduğunu göstermiştir.

Alyanak ve Şen (2015) yaptıkları çalışmada paralel çift pim uygulanmış ve aynı zamanda yapıştırılmış kompozit plakalarda çekme yükü altındaki gerilme analizlerini incelemişlerdir. Plaka malzemesi olarak metal matrisli kompozit malzeme kullanılmış ve iki plaka epoksi yapıştırıcı ve paralel çift pim ile birleştirilmiştir. Model üzerine 100, 200, 300, 400 ve 500 N değerindeki yükler uygulanmış ve bu yüklerin etkisiyle plaka ve yapıştırıcıdaki gerilmeler bulunmuştur. Bu çalışmanın sonucunda gerilmelerin pim deliği çevresinde oluşması nedeniyle oluşan gerilme

yığılmalarının ilk olarak pim delikleri çevresinde bir hasara yol açabileceği görülmüştür.

Çitil vd. (2012) yaptıkları çalışmada farklı kalınlıktaki alüminyum levhaları, farklı bindirme uzunluklarında ve çeşitli kalınlıklardaki çelikten imal edilmiş kapaklarla ve CYTEC FM 73 yapısal film yapıştırıcı ile yapıştırarak bağlantı numuneleri hazırlamışlardır. Hazırlanan numunelere çekme yükleri uygulamış ve elde edilen hasar sonuçlarını sonlu elemanlar yöntemiyle karşılaştırmışlardır. Çalışmanın sonucunda yapıştırılan alanın artmasıyla yapıştırıcı tarafından taşınan yük artmış ve kapak kalınlığının artmasıyla taşınan yükün azaldığı görülmüştür.

Özkan ve Aldaş (2017) yaptıkları çalışmada alüminyum, çelik ve titanyum malzemeler üzerinde seri çift pim ve yapıştırma bağlantısı kullanılarak karma bağlantı oluşturmuş ve bu bağlantıya çekme yükü ile birlikte 40, 50, 60, 70 °C sıcaklık uygulanması sonucu ortaya çıkan gerilmeler Sonlu Elemanlar yöntemiyle incelenmiştir. Çalışma sonucunda çekme yükü ile birlikte 50 °C ısı yük uygulanması sonucu x ve y eksenleri yönünde gerilmelerde bir artma görülmüş z eksen yönünde ise azalma olduğu görülmüştür. Çekme yükü ile birlikte -50 °C ısı yük uygulanması sonucu x, y ve z eksenlerindeki gerilmelerde artış meydana gelmiştir.

Karakuzu vd. (2008) yaptıkları çalışmada çift paralel pim tarafından çekme kuvvetine maruz kalan iki paralel dairesel delikli kompozit plakadaki hasar modunu, hasar yükünü ve yatak mukavemetini araştırmışlardır. Çeşitli boyutlarda pim yüklü kompozit plakaların davranışını deneysel ve nümerik olarak araştırılmıştır. Nümerik çalışmada LUSAS 13.6 yazılımı kullanılmıştır. Paralel çift delikli kompozit plakalara delik sınır koşulları uygulanıp çekme kuvveti uygulanmış ve uygulanan kuvvet ve delik eksenleri arasındaki mesafelere göre gerilmeler çıkarılmıştır. Çalışmanın sonucunda kesme hasar modlarının ve yatak mukavemet değerlerinin doğrudan E / D oranı ile ilişkili olduğu bulunmuştur. M / D ve K / D oranları sabitken, yatak mukavemeti artan E / D oranı ile artmıştır. İki sabitlenmiş mafsallı kompozit plakalar E / D = 2 değeri için kritik yatak mukavemeti değerlerine sahiptir. E / D = 4,5 için yatak mukavemetleri birbirine yakın olduğu görülmüştür.

He (2010) yaptığı çalışmada yapıştırma ile bağlantılı plakalarda kullanılan yapıştırıcıların Elastisite modülü ve Poisson oranının etkisini incelemek için farklı

değerleri nümerik olarak incelemiştir. Bu çalışmasında ABAQUS sonlu eleman yazılımını kullanmıştır. 9 farklı Elastisite modülü ve 8 farklı Poisson oranı için çalışma yapılmış ve sonucunda yapıştırılan plakalarını bir ucu sabitlenmiş diğer ucundan çekme yükü uygulanmıştır. Çalışma sonucunda yapıştırıcının elastisite modülü ve poisson oranının çekme yükü sonucu oluşan maksimum gerilmeyi etkilediği görülmüştür.

Naveenraj vd. (2020) yaptıkları çalışmada cam/epoksi malzemede seri bağlantı ile cıvata bağlantısı uygulamış ve çekme yükü uygulayarak deneysel olarak veri elde etmiştir. Bu çalışmada farklı sayıda cıvata kullanılmış ve cıvata arasındaki mesafeler değiştirilerek E / D ve K / D oranları incelenmiştir. Bu çalışma sonucunda cıvata sayısındaki artış ile kompozit plakanın dayanımının azaldığı görülmüştür. Ayrıca bu çalışmada maksimum hasarın E / D 13,75 için görüldüğü an az hasarın ise E / D 5,5 için görüldüğü belirlenmiştir.

Şen ve Alyanak (2014) yaptıkları çalışmada paralel çift pimli ve yapıştırırmalı kompozit levhalara ısı gerilme analizi uygulamışlardır. Bu bağlantıya 60, 70, 80, 90, 100 °C üniform sıcaklık uygulamış ve gerilmeleri nümerik olarak incelemişlerdir. Modelleme ve analizler için ANSYS sonlu elemanlar yazılımı kullanılmıştır. Çalışma sonucunda ısı gerilmelerin mutlak değerlerinin sıcaklık artışıyla arttığı görülmüştür. En yüksek gerilmeler x yönünde oluşurken y ve z yönünde oluşan gerilmelerin daha düşük olduğu görülmüştür.

Kiral (2010) yaptığı çalışmada Cam/epoksi fiber kompozit malzemede pim çapını değiştirerek pimin deliğe sıkı ve boşluklu geçmenin etkisini incelemiştir. Aynı zamanda deliğin pozisyonu değiştirerek deliğin kenara uzaklığı/çap (E / D) ve genişlik/çap (W / D) oranları için pim bağlantısının uğradığı hasarı nümerik ve deneysel olarak incelemiştir. Çalışma sonunda pim ve delik arasındaki boşluk ve girişimin, mekanik olarak tutturulmuş bağlantıların hasar yükü üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Pim ve delik arasındaki boşluğun azaltılmasıyla hasar yükünde ve yatak mukavemetinde iyileşme görülür. Bu tür bir hasardan kaçınmak için, W / D ve E / D oranlarının optimum değerlerinin seçilmesine ek olarak, sabitlenmiş bağlantıda boşluğun uyumu da kullanılabilir.

Okutan ve Karakuzu (2003) yaptıkları çalışmada pim bağlantılı yüklenmiş tabakalı kompozitlerin gerilmeleri incelemek için bir araştırma gerçekleştirmiştir. Gerilme testleri, cam/epoksi kompozitler üzerinde, $[0^\circ/45^\circ]$ ve $[90^\circ/45^\circ]$ gibi iki farklı oryantasyon için uygulanmıştır. Farklı E / D ve W / D oranları için yükleme koşulları uygulanmıştır. Numuneler üzerinde ilk hasar ve son hasar yükünü bulmak için deneysel çalışma yapılmıştır. Ayrıca, sonlu elemanlar kodu PDNLPIN kullanılarak statik bir aşamalı hasar analizi yapılmıştır. Çalışma sonunda $0^\circ / \pm 45^\circ$ oryantasyon açısındaki tabakalı kompozit plakanın dayanımı $90^\circ / \pm 45^\circ$ 'e göre daha yüksek bulunmuş ve maksimum delik gerilmesi E / D oranı 3 ve daha büyük değerler için bulunmuştur.

Şen vd. (2008) yaptıkları çalışmada deneysel olarak, cam elyaf takviyeli epoksi lamine kompozit plakalardaki mekanik olarak sabitlenmiş cıvatalı bağlantıların hasar modunu ve taşıma mukavemetini belirlemek için bir hasar araştırması yapmışlardır. Bu çalışmada kenar mesafesi / delik çapı oranı (E / D) ve plaka genişliği / delik çapı oranı (W / D) olan iki farklı geometrik parametre dikkate alınmıştır. Bu amaçla E / D oranı 1 'den 5 'e, W / D oranı 2 'den 5 'e kadar seçilmiştir. Malzeme parametrelerinin etkisinin belirlenmesi amacıyla lamine plakalar üç farklı oryantasyon açısında hazırlanmıştır. Ek olarak, ön yük momentleri 0, 3 ve 6 Nm olarak uygulanmıştır. Deneyler ayrıca boşlukla yapılması için cıvatanın çapları 5 mm ve dairesel cıvata deliği 6 mm olarak belirlenmiştir. Sonuçlar, hasar modlarının ve yatak kuvvetlerinin ön yüklerin artmasından önemli ölçüde etkilendiğini göstermiştir. Ayrıca, kompozit cıvatalı bağlantıların malzeme ve geometrik parametreleri değiştirildiğinde hasar davranışı ve yatak mukavemet değerleri bu değişiklikten etkilenmiştir.

Aldaş ve Şen (2011) yaptıkları çalışmada pim ve yapıştırma bağlantısı uygulanmış metal plakalarda meydana gelen gerilmeler incelenmiştir. Bağlantısı yapılan alt levhada tek bir malzeme olarak sabit tutulurken, üst levha çelik, bakır, titanyum ve alüminyum malzemeler olarak değiştirilerek sonlu elemanlar analizi uygulanmıştır. Yapıştırıcı malzemesi olarak epoksi seçilmiştir. Bağlantıya çekme yükünün yanı sıra sıcaklık yükü birlikte uygulanmıştır. Bağlantıda meydana gelen en düşük gerilmeler Alüminyum-alüminyum varyasyonunda meydana gelirken, en yüksek gerilmeler alüminyum-çelik bağlantı varyasyonunda meydana geldiği görülmüştür.

Pakdil vd. (2009) yaptıkları çalışmada, ön yük momentleri altında cıvata ve delik boşluğu bulunan cam-epoksi tabakalı kompozit cıvatalı bağlantılarda hasar ilerlemesi araştırılmıştır. Bağlantı geometrisi ve oryantasyon açısının yatak dayanımı ve hasar modu üzerindeki etkilerini gözlemlemek için, deneysel olarak parametrik çalışmalar yapılmıştır. Kenar mesafesi / delik çapı oranı (E / D) ve plaka genişliği / delik çapı oranı (W / D) olan iki farklı geometrik parametre üzerinde çalışılmıştır. E / D oranları 1 'den 5 'e ve W / D oranları 2 'den 5 'e kadar seçilmiştir. Numuneler üzerindeki ön yük momentleri de 0, 3 ve 6 Nm olarak uygulanmıştır. Deney sırasında delik ve cıvata arasındaki boşluğun etkisini incelemek için cıvatanın çapları 5 mm ve delik çapı 6 mm olarak hazırlanmıştır. Deneysel sonuçlar, hasar gelişimine bağlı olarak hasar modunun ve yatak dayanımının hem malzeme parametrelerinden hem de geometrik parametrelerden büyük oranda etkilendiğini göstermektedir. Ayrıca, ön yük momentleri cıvatalı bağlantılara uygulanırsa, hasar mekanizması artan değerlerinden tamamen etkilenir.

Kadam vd. (2015) yaptıkları çalışmada dikey yüklü alüminyum çerçeveler için tek etkili yapıştırırmalı bağlantı üzerinde araştırma yapmışlardır. Kullanılan malzeme aynı boyuta sahip alüminyum iken kullanılan yapıştırıcı Loctite E-30CL seçilmiştir. Yapıştırma uzunluğu sabit tutulmuştur. Yapıştırıcı tabaka kalınlığı 0,05 mm ila 0,6 mm aralığında değiştirilmiş ve toplam altı model oluşturulmuştur. Analiz sonlu elemanlar programı ANSYS kullanılarak yapılmıştır. Çalışma sonucunda doğal frekansın başlangıçta arttığı ve sonra azaldığı ikinci mod hariç tüm modlar için yapıştırıcı tabakanın kalınlığındaki artışla azaldığı gözlenmiştir. 0,05 mm ve 0,6 mm kalınlık için doğal frekansın neredeyse aynı olduğu görülmüştür. Maksimum yer değiştirme tüm modlar için yapıştırıcı tabakanın kalınlığındaki artışla azalmıştır. Ayrıca, aynı moddaki tüm kalınlıklar için maksimum yer değiştirme aynı noktada gerçekleşmiştir. Maksimum yer değiştirme başlangıçta mod sayısındaki artışla artar ve sonra tüm kalınlıklar için azalmaya başlar.

Sayman (2012) yaptığı çalışmada, yapıştırıcı ile bağlı tek etkili bir bağlantıdaki kayma gerilmesini belirlemek için analitik bir elasto-plastik gerilme analizi üzerine çalışmıştır. Bu çalışmada DP460 yapıştırıcısı kullanılmıştır. Yapıştırıcı malzemenin akma koşulunun kontrol edilmesi için Von-Mises kriteri kullanılmıştır. Çözümlerde kesme geriliminin yapıştırıcının kalınlığı boyunca sabit olduğu varsayılmış ve eğilme

momenti ihmal edilmiştir. Analitik sonuçlar sonlu elemanlar analizi ile kontrol edilmiştir. Sayısal analizde ANSYS 10 yazılımı kullanılmıştır. Analitik ve sayısal çözümlerin uyumlu olduğu görülmüştür.

Strozzi vd. (2011) yaptıkları çalışmada sabitlenmiş bir bağlantı pabucu içindeki pim çevresi ile pabuç deliği arasında boşluk olması durumunda temas gerilmelerinin hesap edilmesi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Çeşitli genişliklerde ve düz veya çeşitli konik saplı yuvarlak uçlu kulaklar bu çalışmada ele alınmıştır. Sonuçlar sonlu elemanlar yardımıyla çıkarılmıştır. Çalışma sonucunda sabitlenmiş bir bağlantıda pabuç içindeki tepe temas gerilmeleri çıkarılarak referans sonuçlar tanımlanmış ve grafikler oluşturulmuştur. Bu grafiklere bağlı olarak çaptaki boşluğun artmasıyla kulak gerilme yoğunluk faktörünün arttığı görülmüştür.

Şen ve Aldaş (2011) yaptıkları çalışmada, farklı metal malzeme kombinasyonları ile kompozit malzeme kullanılarak yapılan bağlantılarda malzemelerin gerilmeler üzerine etkisinin incelemişlerdir. Metal plaka olarak alüminyum, çelik, bakır ve titanyum malzemeleri seçilmiştir. Çekme yükü ve sıcaklık birlikte uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre gerilmeler özellikle pim deliği çevresinde yoğunlaşmıştır. Çelik kompozit bağlantılarda en büyük gerilmelerin olduğu gözlemlenirken, titanyum-kompozit bağlantılarda en düşük gerilmeler elde edilmiştir.

Vishwanath (2018) yaptığı çalışmada bağlantı yapılarında uygulanan yüksüz bir kulak bağlantısındaki Gerilme Konsantrasyon Faktörünün değişimini incelemiştir. Gerilme Konsantrasyon Faktörü, Yatak Stresi, Çember Stresi ve Deplasmanları için x yönünde sabit gerilme yüklemesi altında kulak bağlantısının bir sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Mevcut araştırmada, gerilmelerin x-bileşenine referansla maksimum 60° 'de ve minimum 90° 'de olduğu kulak ve pim temaslarındaki gerilim dağılım değerleri doğru bir şekilde tahmin edilirken, gerilmeler y- referansına göre maksimum 90° 'de ve minimum 0° 'de sabit eksenel yük altında olduğu görülmüştür.

Khechai vd. (2018) yaptıkları çalışmada çekme yüküne maruz kalan delikli ve tabakalı izotropik plakalarda gerilme konsantrasyonlarını incelemişlerdir. Gerilme konsantrasyonları, 32 DOF'lu dört düğümlü dörtgen sonlu elemanı kullanılarak elde edilmiştir. Stres üzerinde önemli bir etkisi olan kesme formu, boyutları ve kesme

yönleri gibi farklı geometrik parametreler değerleri incelenmiştir. Son olarak, liflerin oryantasyonu ve ortotropi derecesi gibi materyal parametrelerinin gerilme değerleri üzerindeki etkisini anlamak için, birçok şekil farklı elips majör - minör eksen oranı kullanılarak sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar, çentikli Cam / Epoksi ve Grafit / Epoksi plakalarda geliştirilen gerilme konsantrasyonunun, kesme şekli, kesme boyutları ve kesme yönünden önemli ölçüde etkilenebileceğini göstermektedir. Kompozit plakalar için, Cam / Epoksi plakalardaki gerilme konsantrasyonu değerleri, Grafit / Epoksi plakalarda geliştirilen gerilme konsantrasyonundan daha düşüktür. Ayrıca gerilme konsantrasyonu değerleri, fiber yönelimlerinin artmasıyla arttığı görülmüştür.

Zhou vd. (2016) yaptıkları çalışmada pim profillerinin çekme yüküne maruz kalan pim yüklü tek tesirli bağlantıların gerilim konsantrasyonu ve yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Dairesel olmayan pim profilleri, kompozit tek turlu bağlantıların hem net gerilme hem de yatak gerilmelerinde olası bir stres konsantrasyonu azalması sağlamak için sayısal olarak araştırılmıştır. Çalışmanın sonucunda kompozit tek etkili plakalar üzerinde farklı delik profillerinin incelenmesi sonucu oval şekilde olan pim profilinin gerilme yığılmaları açısından daha iyi olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Nerilli vd. (2015) yaptıkları çalışmada FRP (elyaf takviyeli polimerler) kompozit plakalardan yapılmış ve farklı elyaf malzemeleri farklı dizilişleri içeren yapısal elemanları birleştiren çok cıvatalı yapıştırıcıların aşamalı hasarını modellemeyi amaçlamışlardır. Hasar modundaki ve nihai yük değerlerindeki farklar sayısal olarak araştırılmıştır. Kendi oluşturdukları sonlu eleman modeli, mevcut deneysel verilerle karşılaştırılmış ve onaylanmıştır. Elde edilen sayısal sonuçlar, bazalt liflerinin kullanımının esas olarak taşınan yük yönü boyunca hizalanmış liflere sahip CFRP laminatları, tekli cıvatalı bağlantılarda en iyi performansı sergilemiştir. Bununla birlikte, yükleme pimi boyunca ve istifleme sekansı $[0]_{4s}$ ile karakterize edilen laminatlar için çift pim dikkate alındığında, bazalt lifleri, hem cam hem de karbon fiberlerden daha yüksek hasar yüklerine neden olmuştur.

Aydın vd. (2011) yaptıkları çalışmada epoksi ve akrilik bazlı yapıştırıcıların mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla 2 adet epoksi bazlı 2 adet akrilik bazlı olmak üzere

4 farklı yapıştırıcı ile yapıştırılmış numunelere çekme testi uygulamışlardır. Çalışmanın sonucunda akrilik bazlı olan Erde GTR adlı yapıştırıcının şekil değiştirme oranı diğer yapıştırıcılardan daha yüksek bulunmuştur. Buna ilave olarak yapıştırıcılar arasında maksimum çekme mukavemeti Erde GTS 'de olduğu görülmüştür.

Beylergil vd. (2011) yaptıkları çalışmada tek tesirli yapıştırırmalı plakada pim bağlantılarında pim malzemesi olarak cam fiber malzemesi kullanarak çekme kuvveti altında yapıştırıcıda meydana gelen gerilmeleri incelemişlerdir. Deneysel çalışmayı ANSYS sonlu elemanlar programı ile de analiz ederek nümerik çalışmayı da gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda fiberlerin varlığının bindirme yüzeyinde gerilme değerlerini düşürdüğü sonucuna varmışlardır.

Babu vd. (2013) yaptıkları çalışmada farklı dizilim açıları ve farklı boyutlara sahip polietilen lamine kompozitlerle takviye edilmiş cam elyafın pimli bağlantıyla davranışını deneysel olarak incelemiş ve ANSYS yazılımı kullanılarak gerilme analizi yapılmıştır. Çalışmanın amacı, malzeme doğrusal elastik davranış sergilediğinde pim yüklü bir delik içeren kompozit plakanın gerilmelerini, hasar dayanımını ve hasar modunu incelemektir. Çalışmanın sonucunda cam elyaf tabakalı kompozitlerde, farklı E / D oranlarında, taşıma yükü kademeli olarak artmaktadır. Aynı şekilde, maksimum gerilme ve kayma gerilmesi bazı geometriler dışında kademeli olarak artmaktadır. Sonuç olarak farklı E / D ve W / D oranlarını gözlemleyerek, $0^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}/90^{\circ}$ düzeninin tüm boyutlarda en iyi dizilim olduğu sonucuna varılmıştır.

Tang ve Sun (2011) yaptıkları çalışmada 3 boyutlu sabit bilyalı rulman, ANSYS sonlu elemanlar yazılımına gömülü APDL dili kullanılarak kontak analizi çalışmışlardır. Temas analizi ile değişiklikler, gerilme, genleme, penetrasyon, kayma mesafesi, iç bilezik, dış bilezik, yuvarlanma elemanları ve kafes arasındaki sürtünme gerilimlerini analiz etmişlerdir. Çalışma sonucunda simülasyon sonuçları hesaplama değerlerinin teorik değerlerle tutarlı olduğunu ortaya koymuştur. Bu çalışma ile model ve sınır koşullarının doğru ve rasyonel olduğunu ve karmaşık yükler altında rulmanların optimum tasarımı için bilimsel bir temel sağlayacağını göstermiştir.

Turan vd. (2010) yaptıkları çalışmada pim ile bağlantı yapılmış tabakalı kompozit plakalarda fiber takviye açısının hasar yükleri ve hasar tipleri üzerindeki etkilerini araştırılmışlardır. Analizlerinde tek yönlü karbon fiberle takviye edilmiş epoksi reçine matrisli kompozit levhalar kullanmışlardır. Deneysel çalışmanın yanında sayısal çalışmayı ANSYS programıyla gerçekleştirmişlerdir. Çalışmanın sonucunda deneysel olarak en büyük hasar yükü $[15^\circ]_4$ tabaka dizilimi için ve en düşük hasar yükü ise $[60^\circ]_4$ tabaka dizilimi için elde edilmiştir.

İşcan vd. (2012) yaptıkları çalışmada yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin belirlemek amacıyla çekme testi uygulamışlardır. Yapıştırıcıların mekanik değerleri ASTM çekme deney standardı uygulanarak bulunmuştur. Çalışma sonucunda kullandıkları üç tip yapıştırıcının da elastik şekil değiştirdikleri sonucuna varmışlardır. Her üç yapıştırıcıda da elastik şekil değişiminden dolayı şekil değişimi akma noktasına kadar elde edilmiş ve bu noktada kopma gerçekleşmiştir. Bunun yanında Welder yapıştırıcısının mekanik değerleri diğer yapıştırıcılarının değerlerinden daha büyük elde edilmiştir.

Solmaz vd. (2017) yaptıkları çalışmada günümüz mühendislik yapılarında sıklıkla kullanılan plastik esaslı kompozit malzemeleri yapıştırıcı mukavemeti ile birleştirmek için yapıştırıcı ile birlikte perçin kullanımının etkinliğini incelemişlerdir. Bu amaçla, çift etkili bağlantıları yapıştırıcı, pim ve hem yapıştırıcı hem de pim olmak üzere 3 farklı konfigürasyonda hazırlamışlar ve ayrıca 30, 45 ve 60 mm olarak 3 farklı üst üste binme uzunluğunda hazırlamışlardır. Çalışmanın sonucunda yapıştırıcı ve perçinli bağlantının mukavemeti, 30 mm yapıştırma uzunluğuna sahip bağlantı sistemine kıyasla % 377 artmıştır. Aynı zamanda tüm türler için perçinli bağlantı yapıştırıcılarla kullanıldığında özelliklerde iyileşme göstermektedir.

Aydın vd. (2004) yaptıkları çalışmada tasarım için gerekli yapısal yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan deneysel yöntemleri belirlemeyi hedeflemişlerdir. Bu çalışmada burulma deneyi, TAST ve Arcan bağlantı yöntemi incelenmiş ve karşılaştırma yapılmıştır. Çalışmanın sonucunda bir yapıştırıcının kayma verilerinin tespitinde seçilecek yöntem tespit edilirken o yapıştırıcının şekil değiştirme oranı, uygun numunelerin elde edilebilirliğine ve ölçümde kullanılan aparatların göz önünde bulundurulması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Liao vd. (2013) yaptıkları çalışmada boyutsal analizle ana kontrol parametreleri olarak belirlenen yapıştırıcı kalınlığı, yapıştırıcı tipi ve ek yeri açısının, tek eksenli çekme yüküne maruz kalan bir yapıştırma bağlantısında mekanik özelliklere etkilerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda yapıştırıcı kalınlığı azaldıkça kırılma enerjisi ile birleşme noktasının hasar enerjisinin arttığını göstermektedir. Bunun tersine olarak ta sünek yapıştırıcıyı kullanarak bağlantının hasar enerjisinin azalmaktadır. Ek yeri açısı azaldıkça yapıştırıcı kalınlığının etkisi daha da belirgin hale gelir. Ayrıca, esas olarak nihai gerilme yüklemesi, uygulanan maksimum yer değiştirme ve hasar enerjisini ek yeri açısı azaldıkça artar.

Raviraja ve Ahmed (2015) yaptıkları çalışmada yapıştırılmış, perçinlenmiş ve karma bağlantıların 3 boyutlu modellerindeki gerilme dağılımını analiz etmişlerdir. Yapıştırılmış, perçinlenmiş ve karma birleştirme gibi çeşitli bağlantılar, cam elyaf epoksi kompozit levha modelleri ile hazırlanmıştır. Çalışma ANSYS sonlu elemanlar yazılımıyla nümerik olarak yapılmıştır. Çalışma sonucunda bağlantılarda gerilme plaka boyunca dağıldığı ve yapıştırıcının yükün çoğunu aldığı görülmüştür. Maksimum gerilmelerde tek başına uygulanan yük bağlantı üzerinde etki etmesi nedeniyle düşük bulunmuştur.

Chaudhari ve Chaudhari (2018) yaptıkları çalışmada alüminyum, çelik ve karbon fiber kompozit malzemeleri yapıştırıcı, perçin ve her ikisini birlikte uygulayarak karma bağlantı oluşturmuşlar bu bağlantıların çekme yükü sonucunda oluşan gerilmeleri deneysel ve ANSYS sonlu elemanlar programıyla nümerik olarak incelemişlerdir. Bağlantıların serbest ucundan Üniversal test tezgâhında 2000 N çekme yükü uygulanmış ve aynı yükte sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda perçinli bağlantıların çok düşük yük koşullarında hasara uğradığı ve hibrit bağlantıların da çok yüksek yüklerde hasara uğramadığı gözlenmiştir. Bağlantılarda gerilme malzeme yüzeyi boyunca dağıtıldığı ve yapıştırıcının yükün çoğunu aldığı gözlenmiştir. Sadece yapıştırıcı ile bağlı bağlantılarda ise çok yüksek gerilme değerlerinin oluştuğu görülmüştür.

Karakılçık vd. (2016) yaptıkları çalışmada gerilmeye maruz ve aynı zamanda ortasında dairesel delik açılmış kompozit levhalarda delik kenarlarında oluşan gerilme yığılmalarını hesaplamışlardır. Hesaplamalarda dört tabakalı kompozit levha

kullanmışlardır. Gerilme yığılması hesaplamaları ANSYS Sonlu Elemanlar programı kullanılarak yapmışlardır. Çalışma sonucunda 45° fiber açısı gerilme yığılması açısından avantaj sağladığı görülmüştür. Takviye açısı ve aynı zamanda levha genişliğinin delik çapına oranının artmasının gerilme yığılmasını azaltma yönünde etkisi olduğu görülmüştür. Gerilme yığılması azalmasının yanında çekme eksenindeki Elastisite Modülü de düştüğünden malzemenin mukavemetinde azalma görülmüştür.

Saraç vd. (2016) yaptıkları çalışmada Al_2O_3 nano partikül (epoksi yapıştırıcı içinde % 2 oranında) içeren yapıştırıcı bağlantıların statik mukavemetleri, nano partikül içermeyen yapıştırıcı bağlantılarla karşılaştırılmıştır. Deneyler sırasıyla 20 mm, 25 mm ve 30 mm bindirmeme uzunluklarında gerçekleştirilmiştir. Tek türlü yapıştırırmalı bağlantı için DP460 epoksi yapıştırıcı, Al_2O_3 nano partikülleri ve St-37 plakaları kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, nano partikül takviyeli yapıştırıcı ile 20 mm ve 30 mm üst üste yapıştırılmış bağlantılarda ortalama çekme hasar yükünün azaldığını görülmüştür. Bununla birlikte, nano partikül takviyeli yapıştırıcı ile 25 mm üst üste yapıştırılmış bağlantılarda ortalama gerilme hasar yükü (% 5 oranlarda) artmıştır. Ayrıca, nano partikül takviyeli yapıştırırmalı bağlantılardaki uzama kapasitesi azalmıştır.

Turan ve Gür (2012) yaptıkları çalışmada pim ile bağlanmış kompozit plakaların hasar tiplerini deneysel ve bunun yanında sayısal yöntemler kullanılarak araştırmışlardır. Kompozit malzeme karbon fiber kullanılarak takviye edilmiş epoksi matriks reçineli plakalar kullanılmıştır. Delik eksenlerinin birbirlerine ve levha kenarlarına göre uzaklığına göre inceleme yapılmıştır. Pim deliği sabit tutulup eksen uzaklıkları değiştirilmek üzere analiz uygulanmıştır. Çalışma sonucunda hasar tipi ve yükleri üzerine kenar uzaklığının çapa oranının olduğu gözlemlenmiştir. Sayısal ve deneysel sonuçlar değerlendirildiğinde % 1 ile % 14 oranında değişen sonuçlar elde edilmiştir.

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1 Yapıştırırmalı Bağlantılar

Yapıştırma bağlantısı, genellikle sentetik esaslı yapıştırıcı bir malzeme ile iki parçanın çözülemeyecek şekilde bağlanmasıdır. Bağlanacak parçalar arasına sürülen yapıştırıcı madde, gerek kendi iç mukavemeti (kohezyon) gerekse yapıştırıcının molekülleriyle parça yüzeyi arasında meydana gelen yapışma (adhezyon) sonucu bağlantıyı sağlar.

Önceleri ahşap, kâğıt, kösele, deri, lastik gibi malzemelere uygulanan yapıştırıcılar günümüzde metal malzemelerin bağlanmasında kullanılan bir birleştirme tekniğidir. Hassas cihaz tekniği, elektronik ve optik sanayinde çok uygulanan yapıştırma bağlantıları son zamanlarda makine konstrüksiyonunda da uygulanmaya başlanmıştır (Cürgül, 1997).

Yapıştırıcı, iki yüzeyi bir arada tutarak kalıcı olarak tutan kuvvetli bir madde olarak tanımlanır. Yapıştırma, bir yapıştırıcı malzeme kullanarak yapıştırılan parçalar olarak bilinen iki malzemenin birleştirilmesidir. Yapıştırıcı malzeme alt ve üst tabakalara yapışır ve aralarındaki kuvvetleri aktarır. Genel olarak bağ tahrip edilmedikçe yapıştırılmış tabakalar kopmaz. Tipik bir yapışkan bağlanmış bağlantının bir örneği ve tanımlanan bölgeler Şekil 3.1 'de gösterilmiştir (Wahab, 2014).



Şekil 3.1. Tipik bir yapıştırırmalı bağlantı.

Ara faz, yapışkan ve yapıştırılan parça arasındaki temasın yakınında ince bir bölgedir ve yapıştırıcı ve yapıştırılan parça malzemelerinden farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahiptir. Bazı uygulamalarda görülebilen ikinci bir bölge, bir yapıştırıcı uygulanmadan önce yüzeye uygulanan astardır. Astar her zaman kullanılmamasına

rağmen, yapıştırıcının performansını artırır ve yapıştırıcı uygulanana kadar yüzeyi korur.

Yapıştırırmalı bağlantı teknolojisi, özellikle ince metal veya kompozit tabakalar için güçlü bir birleştirme tekniğidir. Yapıştırırmalı bağlantının üstünlüğü, yüksek yorulma direnci ve yüksek dayanım / ağırlık oranı gibi özelliklerde öne çıkmaktadır. Yapıştırıcı ile yapıştırılmış bağlantı farklı malzemelerden oluştuğundan, yapısal analizi karmaşıktır ve analizde birçok özel husus ve varsayım gerektirir. Örneğin, yapıştırıcılar ince tabakaları birleştirmek için kullanıldığında, termal ve mekanik yüklerde büyük deformasyon davranışı beklenir. Buna ilave olarak modern yapıştırıcılar analizi daha da karmaşık hale getiren önemli derecede plastiklik sergiler (Wahab, 2014).

Yapıştırırmalı bağlantıların avantajları şöyle özetlenebilir:

- Büyük yüzeyleri, farklı malzemeleri ve ince malzemeleri birleştirme imkânı sunar.
- Kenarları dışında düzgün yük dağılımı sağlar.
- Herhangi bir görünür yüzey işaretleme yapmaz.
- Mükemmel yorulma performansına sahiptir.
- İyi sönümleme ve titreşim özelliklerine sahiptir.
- Yapıştırılan malzemelerin etkilenmemesi için düşük ısı gerektirir.
- Ağırlık oranına göre yüksek dayanım sağlar.

Bununla birlikte, yapıştırma işleminin bazı dezavantajları vardır ki bunlar şöyle özetlenir:

- Temizleme ve yüzey ön temizleme işlemi yüksek kaliteli yapıştırmaya ulaşmak için gereklidir.
- Uzun kurlenme süresi gerekebilir.
- Basınç ve ilave fiktür gerekebilir.
- Birleşme sonrası derzlerin muayenesi zordur.
- Yüksek sıcaklık ve nem konsantrasyonuna duyarlıdır.
- Uygulama için özel eğitim gerekli olabilir.

Üç farklı birleştirme tekniği arasındaki karşılaştırma (perçinleme, kaynak ve yapıştırma) Çizelge 3.1 'de verilmektedir. Bu çizelge her tekniğin avantaj ve dezavantajları özetlemiş ve hangi birleştirme yönteminin hangi uygulama için uygun olduğunu belirlemek için kullanılabilir.

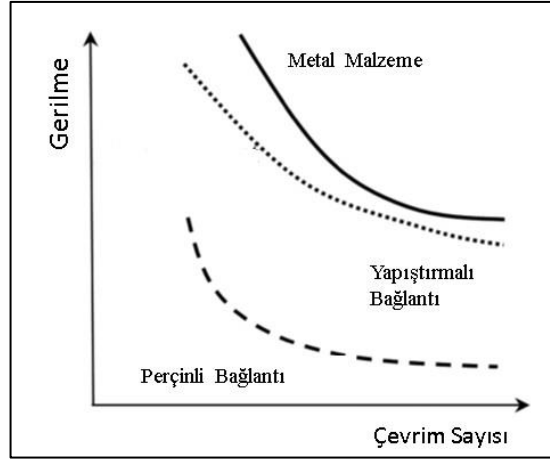
Havacılık ve otomotiv endüstrilerinde kullanılan ince metal yapılar için, gerilmelerin iletimi perçinleme veya kaynak birleştirme yöntemlerinden ziyade yapıştırmalı bağlantı ile daha etkilidir. Plastikler, fiberle güçlendirilmiş polimer (FRP) kompozitler ve elastomerler gibi malzemeler, diğer tekniklerden çok yapıştırıcılar ile birleştirilirler. Alüminyum, titanyum ve magnezyum gibi hafif metaller için yüksek ısı seviyesi nedeniyle kaynak yapmak zordur ve bu nedenle yapıştırma işlemi birleştirmek için iyi bir alternatif sağlar.

Çizelge 3.1. Perçinleme, kaynak ve yapıştırma teknikleri arasında karşılaştırma (Wahab, 2014).

Özellik	Perçinle Birleştirme	Kaynaklı Birleştirme	Yapışkanlı birleştirme
İnce malzemelerin birleştirilmesi	Kötü	Makul	Mükemmel
Malzeme kombinasyonundaki sınırlamalar	Makul	Kötü	Mükemmel
Yüzey hazırlığı gereksinimi	Mükemmel	İyi	Kötü
Takımla uygulama	Mükemmel	Makul	Makul
Isı gereksinimi	Mükemmel	Kötü	İyi/Makul
Gerilme dağılımı	Kötü	İyi/Makul	Mükemmel
Sızdırmazlık fonksiyonu	Kötü	Makul	İyi
Çarpılma	Makul	Kötü	Mükemmel
Solvent direnci	Mükemmel	Mükemmel	Makul
Sıcaklığın etkisi	Mükemmel	Mükemmel	Kötü
Onarım kolaylığı	İyi	Kötü	Makul
Uygulama Becerisi Gerekliliği	Mükemmel	İyi	Mükemmel

Yapıştırma bağlantılarının temel avantajlarından biri de diğer birleştirme tekniklerine kıyasla mükemmel yorulma performansıdır. Şekil 3.2 'de, bir metal malzeme, bir perçinli ek ve yapışkan bir ek için döngü sayısına karşı gerilme eğrisi (S-N eğrisi) gösterilmiştir. Yapıştırmalı bağlantıda yapıştırma bölgesinin yorulma direnci,

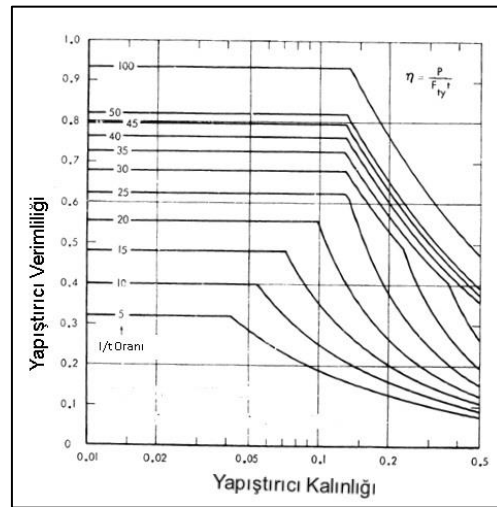
perçinli bağlantıdaki bağlantı noktasının yorulma direncinden çok daha iyidir ve metal tabakanın yorulma direncine yakındır.



Şekil 3.2. Metal malzeme, perçinli bağlantı ve yapıştırırmalı bağlantı için S-N eğrileri (Wahab, 2014).

Yapıştırma bağlantısının başarısı adhezyon kuvvetlerinin (moleküler kuvvetler) büyüklüğüne yani yapıştırıcının yüzeye bağlanmasına bağlıdır. Bu kuvvetler genellikle yapıştırıcının kendi mukavemetinden daha yüksektir. Bu nedenle kopma, yapıştırıcı ile yüzey arasında değil yapıştırıcının kendi içinde meydana gelmektedir. Yapıştırıcı madde birden çok bileşenli ise birbirine karıştırılarak hazırlanır. Yapıştırıcının kalınlığı $a = 0,1 \dots 0,3$ mm arasında olmalıdır (Cürgül, 1997).

Yapıştırıcı kalınlığı ile yapıştırıcı verimliliği arasındaki ilişkiyi gösteren grafik Şekil 3.3 'te verilmiştir.



Şekil 3.3. Tek türlü metal bağlantılar için birleşim verimlilik çizelgesi (Smith, 1973).

3.1.1 Yapıştırıcıların sınıflandırılması ve tarihsel gelişimi

Yapıştırıcılar birçok farklı şekilde sınıflandırılabilir. Yapıştırıcıların sınıflandırılması, bir uygulama için uygun bir yapıştırıcının seçimi için oldukça önemlidir. Günümüzde uygulamada çok sayıda yapıştırıcı türü mevcuttur. Bu uygun bir yapıştırıcı seçimini oldukça zorlaştırmaktadır. Endüstride kullanılan ortak sınıflandırmalar;

- Fonksiyon,
- Kimyasal bileşim,
- Reaksiyon yöntemi,
- Fiziksel form,
- Maliyet ve
- Nihai kullanımdır.

Çizelge 3.2' te yapıştırıcıları sınıflandırmanın farklı yolları gösterilmektedir.

Çizelge 3.2. Yapıştırıcıların sınıflandırılması (Wahab, 2014).

Sınıflandırma	
Fonksiyon	Yapısal Yapısal olmayan
Kimyasal bileşim	Isı ile sertleşen Termoplastik Elastomerik Karışım
Reaksiyon yöntemi	Kimyasal Reaksiyon Çözücü kaybı Su kaybı Erimeyen soğutma
Fiziksel Formu	Katı % 100 katı macun ve sıvı % 100 katı macun ve viskoziteyi azaltmak için çözücü sıvı
Maliyet	İşçilik, ekipman, sertleşme süresi, kusurlu derzlerden kaynaklanan kayıplar dahil
Kullanım Ömrü	Yapıştırılan malzeme tipi Ortam

Yapıştırıcı türlerinin tarihsel gelişimi Çizelge 3.3 'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. Yapıştırıcıların tarihsel gelişimi (Wahab, 2014).

Bulunma Yılı	Yapıştırıcı Tipi
1910	Fenol-formaldehit
1930	Üre-formaldehit
1940	Nitril-fenolik, vinil-fenolik, akrilik, poliüretan
1950	Epoksiler, siyanoakrilatlar, anaerobik
1960	Polimid, polibenzimidazol, polikinoksalin
1970	İkinci nesil akrilik

Yapıştırıcılar fonksiyonlara göre yapısal ve yapısal olmayan olarak sınıflandırılır. Yapısal yapıştırıcılar, kullanım ömrü boyunca ve tasarlanan çalışma ortamlarında yapıları bağlayan ve yüklere dayanan yüksek mukavemetli malzemelerdir. Yapısal olmayan yapıştırıcılar, hafif malzemeleri yerinde bağlar ve yüksek dış yüklere maruz kalmazlar. Geçici kısa süreli bağlantı için ve hibrit (örneğin bağlanmış / cıvatalı) bir bağlantıda ikincil bir bağlantı elemanı olarak kullanılırlar. Yapısal olmayan yapıştırıcı örnekleri arasında sıcak kaynak ve su emülsiyon yapıştırıcıları bulunur (Wahab, 2014).

Yapıştırıcılar kimyasal bileşime göre termoset, termoplastik, elastomerik veya bunların kombinasyonu olarak sınıflandırılır.

Termoset yapıştırıcılar, oda veya yükseltilmiş sıcaklıkta geri dönüşümsüz bir kimyasal reaksiyonla gerçekleşir. İlk kürlemeden sonra ısıtılamaz veya yumuşatılamaz. Termoset yapıştırıcıların örnekleri, epoksi ve üreterdir. Termoplastik yapıştırıcılar kürlenmeyen veya ısıtılmayan malzemelerdir. Bunlar ısıtıldığında eriyen katı polimerlerdir. Alt tabakaya uygulandıktan sonra, yapışkan soğuyarak sertleşir. Termoplastik yapışkanların örneği, ambalajlarda kullanılan sıcak eritmeli yapışkanlardır. Elastomerik yapıştırıcılar, yüksek derecede uzama ve sıkıştırmaya sahip polimerik reçinelerden yapılır. Uygulanan yükün çıkarılmasından sonra hızla ilk boyutlarına dönen hiper elastik malzemelerdir.

Yapıştırıcılar reaksiyon yöntemine göre kimyasal reaksiyona girenler, çözücü kaybedenler, su kaybedenler ve erime sonrası soğuyanlar olarak sınıflandırılır. Çözücü kaybederek ısı etkisiyle veya kimyasal reaksiyon nedeniyle sertleşerek katılaşabilirler.

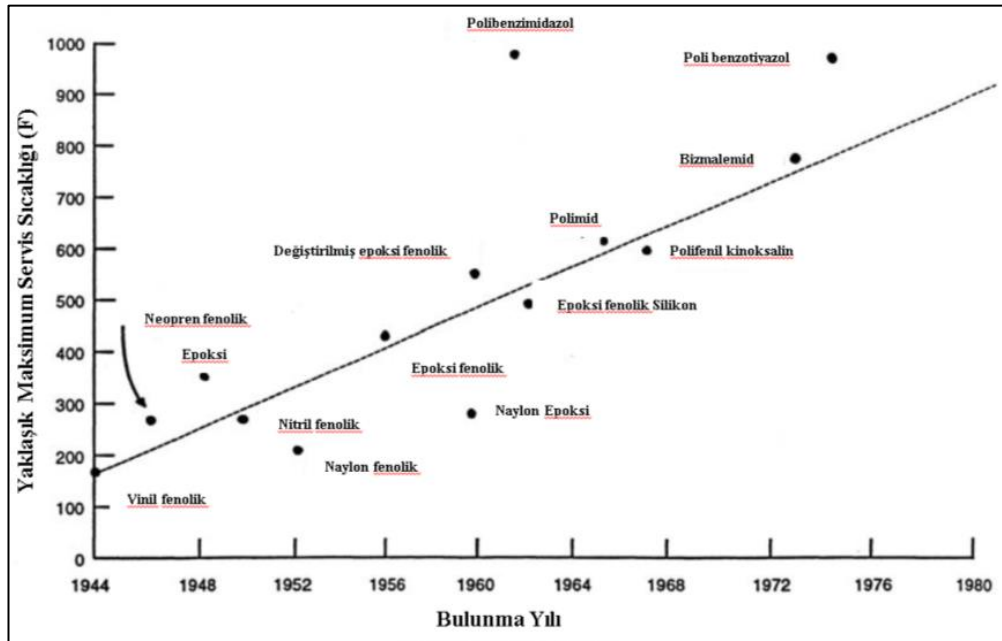
Yapıştırıcılar fiziksel formlarına göre çözücü içermeyen çok bileşenli sıvı veya macun, çözücü içermeyen tek bileşenli sıvı veya macun, sıvı tek parça çözelti ve toz içeren katı, bant, film vb. olarak sınıflandırılabilir. Epoksi gibi bazı yapıştırıcı türleri birçok formda mevcuttur. Yapıştırıcıların fiziksel bir formda en basit bir şekilde sınıflandırılması katı ve sıvı olacaktır.

Yapıştırıcı seçiminde maliyet önemli bir rol oynar; bu nedenle dolaylı bir şekilde bile bir sınıflandırma yöntemi olarak kullanılabilir. Yapıştırıcı kullanımının maliyeti sadece yapıştırıcı malzemelerin fiyatı değil aynı zamanda bir yapıştırıcı derzi üretmek için gereken diğer maliyetleri de içermektedir. Bu nedenle, işçilik maliyetleri, ekipman, sertleşme süresi, kusurlu bağlantılardan kaynaklanan kayıplar dikkate alınmalıdır.

Yapıştırıcılar, birleştirilecek olan alt tabaka tipi ve uygun oldukları ortamlar gibi son kullanım alanlarına göre sınıflandırılır. Yapıştırılan malzeme tipi metal, kompozit, ahşap vb. olabilir.

Çevre sınıflandırmasına göre aside dayanıklı, ısıya dayanıklı ve hava koşullarına dayanıklı yapıştırıcılar içerir (Wahab, 2014).

Isıya dayanıklı yapıştırıcıların tarihsel gelişimi Şekil 3.4 'te verilmiştir.



Şekil 3.4. Isıya dayanıklı yapıştırıcıların tarihsel gelişimi (Pizzi ve Mittal, 2003).

3.1.2 Yapıştırırmalı bağlantı uygulamaları

Yapıştırırmalı bağlantı teknolojisi birçok endüstriyel uygulamada başarıyla kullanılmaktadır. Bir uygulamada bir yapıştırıcı seçmek için birçok faktör göz önünde bulundurulmalıdır. Güç, yorulma direnci, dayanıklılık ve beklenen ömür bu gibi faktörlere örnek olarak verilebilir.

3.1.2.1 Havacılık

Genel olarak, uçak yapıları için kullanılan yapıştırıcı türleri ısı ile kürlenene bir bileşenli sıvılar ve pastalar, iki bileşenli sıvılar, macunlar ve filmlerdir.

Yapıştırıcılar sadece gövde ve yakıt tankları gibi kritik uçak bileşenlerinin yapıştırılmasında değil, aynı zamanda paneller, koltuklar, tepsi masaları, tepegöz kutuları, mutfaklar, tuvaletler vb. gibi iç bileşenlerin yapıştırılmasında ve sızdırmazlığında yüksek oranda kullanılmaktadır.

Farklı uçak bileşenlerini bağlamak için kullanılan yapıştırıcı tiplerinin bir özeti Çizelge 3.4 'te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Havacılık yapılarında yapıştırıcıların kullanımı (Wahab, 2014).

Yapıştırılan Yapılar	Yapıştırıcı Türü
Metal petek ve lastikler	Epoksi
Yüksek sıcaklığa maruz kalan metal petek ve lastikler	Nitril fenolik
İç aksamda kullanılan plastikler	Akrilik, basınca duyarlı yapıştırıcılar
İç plastiklerin sızdırmazlığı	Silikon
Plastik ve kompozitler	Poliüretan

3.1.2.2 Otomotiv

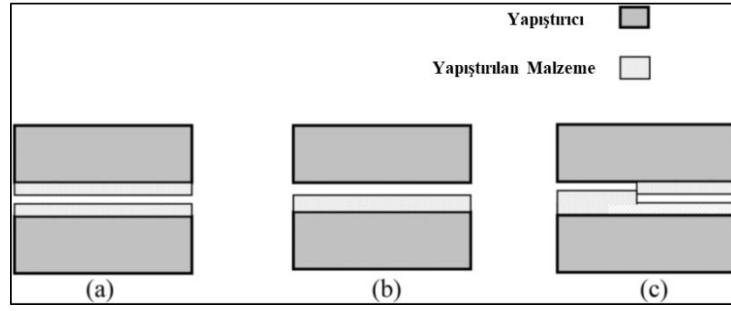
Son yıllarda, çelik, alüminyum ve magnezyum gibi ince metal panellerin kullanılması ve plastik kullanımının artması nedeniyle otomotiv endüstrisine yapıştırırmalı bağlantı uygulaması önemli ölçüde artmıştır. Yapıştırıcılar, aktarma organları, gövde, döşeme, elektrik sistemi ve frenler gibi bir aracın temel bileşenlerinin çoğunda kullanılır.

Her bir bileşen için kullanılan uygulamaların ve yapıştırıcı türlerinin bir özeti Çizelge 3.5 'te verilmiştir.

Çizelge 3.5. Otomotivde yapıştırıcıların kullanımı (Wahab, 2014).

Bileşen	Uygulama	Yapıştırıcı / Sızdırmazlık Elemanı Tipi
Güç Aktarım	Diş tutucu	Anaerobikler
	Yağ karteri contası, Külbütör contası	Silikonlar
	Yağ filtresi grubu	Plastizol, sianokrilatlar
	Debriyaj balataları	Fenolik
Gövde	Flanş yapıştırma	Plastizol, Epoksi, poliüretan
	Gövde sızdırmazlık	Plastizol, Plastik, polivinil klorür
	Çatı mafsalları	Kauçuk
	Titreşim önleyici takviyeler	SBR, polibütadien
	Plastik panel yapıştırma	Epoksi, poliüretan
	Tampon yapıştırma	Reaktif akrilik, poliüretan
	Boşluk dolgu macunları	Genişletilebilir poliüretan
Trim Parçaları	Etiketler	Basınca duyarlı akrilik
	Arka bagajlık	Sıcak eriyik, reaktif sıcak eriyik poliüretan
	Güneşlik, Zemin yalıtımı	Sıcak eriyik
	Aynalar	Silikonlar
	Döşenmiş koltuklar, Tavan döşemesi	Sıcak eriyik, reaktif sıcak eriyik poliüretan
	Gösterge Paneli	Poliüretan, sıcak eriyik
	Halı yapıştırma	Basınca duyarlı sıcak eriyik
	Ön cam yapıştırma	Poliüretan
Elektrik sistemleri	Far üniteleri	Epoksi, ultraviyole akrilik
	Arka Işık birimleri	Silikonlar, sıcak eriyik
	Buji contaları	Silikonlar
	Motor bağlama	Anaerobik, reaktif akrilik, ultraviyole akrilik
Fren Sistemi	Disk pedi yapıştırma	Fenolik

Yapıştırıcıda oluşan tipik hasarlar Şekil 3.5 'te verilmiştir.



Şekil 3.5. Yapıştırıcıdaki tipik hasarlar; (a) yapıştırıcı hatası, (b) yapıştırılan malzeme hatası ve (c) yapıştırıcı / yapıştırılan malzeme hatası (Wahab, 2014).

3.2 Kompozit Malzemeler

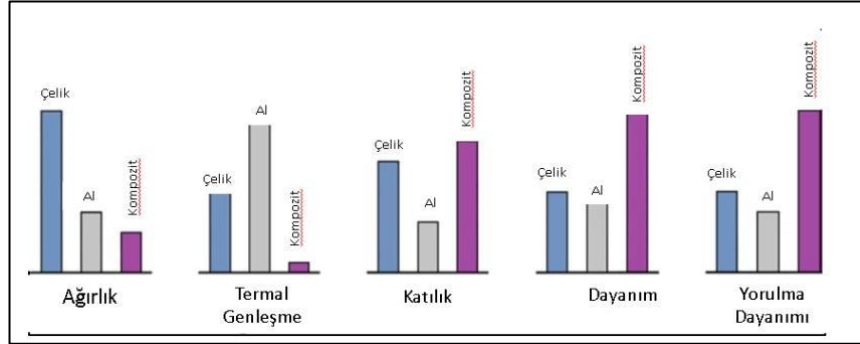
Kompozit malzemelerin yeni bir malzeme grubu olarak sayılmaya başlanması ahşap, saman takviyeli kilden yapılan kerpiç, deniz kabukları ve hatta çelik gibi alaşımlar binlerce yıldır bilinen çok fazlı malzemeler olmasına rağmen farklı malzemelerin üretim sırasında bir araya getirme kavramının herkesçe kabul edilmesinden sonra olmuştur (Callister ve Retwisch, 2015).

Kompozit malzeme teriminde kompozit kelimesi, iki veya daha fazla malzemenin faydalı bir üçüncü malzeme oluşturmak için birleştirilmesini ifade etmektedir. Kompozit malzemelerin avantajı, genellikle bileşenlerinin en iyi özelliklerini ve her iki bileşenin de sahip olmadığı bazı özellikleri sergilemeleridir. Kompozit malzeme oluşturarak geliştirilebilecek özelliklerden bazıları şunlardır.

1. Güç
2. Yorulma ömrü
3. Sertlik
4. Sıcaklığa bağlı davranış
5. Korozyon direnci
6. Isı yalıtımı
7. Aşınma direnci
8. Termal iletkenlik
9. Estetik
10. Akustik yalıtım

11. Ağırlık (Jones, 1999).

Şekil 3.6 ‘da geleneksel monolitik malzemeler ile kompozit malzemeler arasındaki karşılaştırma verilmiştir.

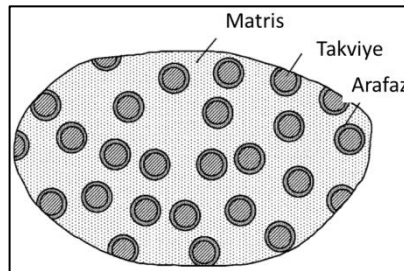


Şekil 3.6. Geleneksel monolitik malzemeler ile kompozit malzemeler arasındaki karşılaştırma (Chawla, 2013).

Doğal olarak, bu özelliklerin hepsi aynı anda geliştirilmez ve genellikle böyle bir gereklilikte yoktur. Aslına bakılacak olursa bazı özellikler birbiriyle çelişmektedir. Örneğin termal iletkenliğe karşı ısı yalıtımı birbirine zıt özelliklerdir. Amaç sadece tasarım görevini yerine getirmek için gereken özelliklere sahip bir malzeme yaratmaktır (Jones, 1999).

Yapısal bir kompozit malzeme mekanik performansı ve özellikleri bağımsız hareket eden, oluşan malzemelerin özelliklerinden üstün olacak şekilde tasarlanan, makroskopik ölçekte iki veya daha fazla fazdan oluşan bir malzeme sistemidir. Fazlardan biri genellikle süreksiz, daha sert ve daha güçlüdür ve takviye olarak adlandırılır. Diğer faz ise daha az sert ve zayıf faz sürekli ve matris olarak adlandırılır (Jones, 1999).

Şekil 3.7 ‘de kompozit malzeme fazları gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Kompozit malzeme fazları (Daniel ve Ishai, 2006).

Bazen kimyasal etkileşimler veya diğer işleme etkileri nedeniyle, takviye ile matris arasında ara faz adı verilen ayrı bir faz oluşmaktadır. Kompozit bir malzemenin özellikleri, bileşenlerin özelliklerine, geometrilerine ve fazların dağılımına bağlıdır. Matris dağılımı, malzeme sisteminin homojenliğini belirler. Takviye dağılımı ne kadar düzensiz ise malzeme o kadar heterojendir ve özelliklerde saçılma ve en zayıf alanlarda bozulma olasılığı artar. Takviyenin geometrisi ve yönlendirilmesi sistemin anizotropisini etkiler (Daniel ve Ishai, 2006).

3.2.1 Kompozit malzemelerin kullanım alanları

Kompozit malzemelerin geniş bir uygulama alanı vardır ve genişlemeye devam etmektedir. Bu alanlar havacılık, uçak, otomotiv, denizcilik, enerji, altyapı, zırh, biyomedikal ve hobi (spor) uygulamalarını içermektedir.

Uzay antenleri, aynalar ve optik enstrümantasyon gibi havacılık yapılarında hafif ve oldukça sert grafit kompozitler kullanır. Şiddetli çevresel koşullar altında çok yüksek bir boyutsal kararlılık elde edilebilir. Çünkü bu kompozitler neredeyse sıfır termal ve higrik genleşme katsayısına sahip olacak şekilde tasarlanabilir (Daniel ve Ishai, 2006).

Yüksek rijitlik, yüksek mukavemet ve düşük yoğunluklu özellikler, hem askeri hem de sivil uçakların birincil ve ikincil yapılarında kompozitlerin yüksek bir kullanım alanına sahip olmasına yol açmaktadır. Örneğin Boeing 777 'de kaplamalarda, zemin kirişlerinde, kanat arka kenar yüzeylerinde ve kuyruk kısımlarında kompozitler kullanır. Sivil havacılıkta kompozitlerin kabulünün en güçlü işareti, yeni Boeing 787 "Dreamliner" ve dünyanın en büyük uçağı Airbus A380'de kullanılmasıdır. Karbon / epoksi ve grafit / titanyum gibi kompozit malzemeler, gövde ve kanatların çoğu olmak üzere Boeing 787'nin ağırlığının yaklaşık % 50 'sini oluşturur (Daniel ve Ishai, 2006).

Aynı zamanda kompozitler, otomotiv parçaları ve otomobil, kamyon ve vagon çerçeveleri de dâhil olmak üzere ulaşım endüstrisinde çeşitli şekillerde kullanılır. Gemi yapıları çeşitli formlarda kompozitler, kalın kesitli cam ve karbon fiber kompozitler ve sandviç yapı içerir. Enerji üretim alanında, rüzgâr türbini jeneratörlerinin kanatlarında, güç çıkışını önemli ölçüde artıran ve maliyeti azaltan

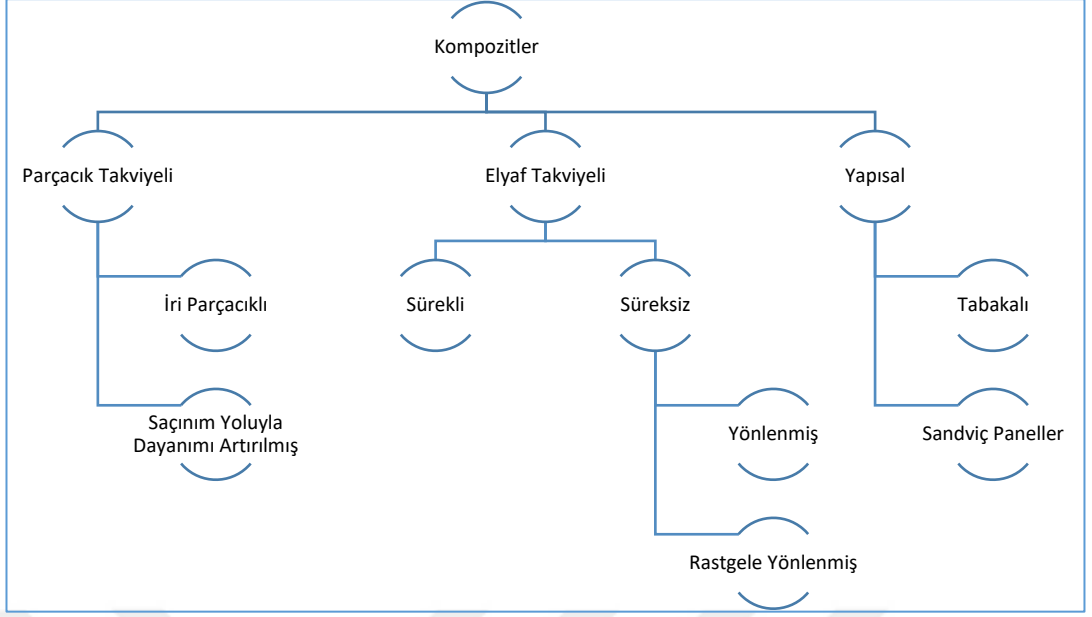
karbon fiber kompozitler kullanılmıştır. Biyomedikal uygulamalar arasında protez cihazlar ve yapay uzuv parçaları bulunur. Serbest zaman ürünleri arasında tenis raketleri, golf sopaları, balıkçılık direkleri, kayaklar ve bisikletler bulunmaktadır. Şekil 3.8 ‘de karbon/epoksi kompozit malzeme kullanılarak üretilmiş ayak ve bacak protezi görülmektedir.



Şekil 3.8. Karbon/epoksi kompozit malzeme kullanılarak üretilmiş ayak ve bacak protezi (Daniel ve Ishai, 2006).

3.2.2 Kompozit malzemelerin sınıflandırılması

Kompozit malzemelerin sınıflandırılmasını gösteren şema Şekil 3.9’ da gösterilmiştir. Kompozit malzemeler parçacık takviyeli, elyaf takviyeli ve yapısal kompozitler olmak üzere üç ana gruba ayrılır ve bunların da alt grupları vardır. Parçacık takviyeli kompozitlerde saçınmış fazın yani parçacık boyutları tüm yönlerde yaklaşık eşittir. Elyaf takviyeli kompozitlerde saçınmış faz çok büyük uzunluk/çap oranına sahiptir. Yapısal kompozitler, kompozitlerin ve homojen malzemelerin kombinasyonundan oluşur (Callister ve Retwisch, 2015).



Şekil 3.9. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması (Callister ve Retwisch, 2015).

3.2.2.1 Parçacık takviyeli kompozitler

Partikül takviyeli kompozit malzemeler, başka bir malzemenin bir matrisinde süspansiyon haline getirilmiş bir veya daha fazla malzemenin parçacıklarından oluşur. Parçacıklar matris gibi metalik veya metalik olmayabilir (Jones, 1999).

Parçacık takviyeli kompozitlerin çoğunda parçacık fazı matris fazından daha rijittir. Bu parçacıklar matrisin hareketini engellemektedir. Matris uygulanan yükü belirli oranda parçacıklara aktarır. Mekanik özelliklerin iyileştirilmesi matris ve parçacık ara yüzeyindeki bağın dayanımıyla bağlantılıdır (Callister ve Retwisch, 2015).

Kompozit malzemelerde kullanılan takviyelerin mutlaka uzun lifler şeklinde olması gerekmez. Bunları parçacıklar, pullar, ipliksi yapılar, kısa lifler, sürekli lifler veya tabakalar şeklinde olabilir (Chawla, 2013).

Parçacıklar genellikle tüm doğrultularda yaklaşık aynı boyuttur. Bağlantının kuvvetli olabilmesi için parçacıklar küçük boyutta olmalı ve matris içerisinde homojen bir şekilde dağılmalıdır. Bunun ilave olarak her iki bileşenin hacim oranları kompozit malzemenin davranışlarını etkiler.

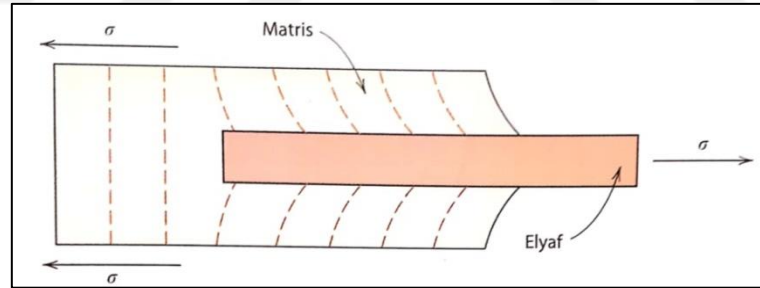
Malzemenin sertlik ve dayanımı sert malzemelerin, küçük boyuttaki parçacıklarının metal yâda metal alaşımları içinde homojen bir şekilde dağıtılması yolu ile

arttırılabilir. Burada saçınmış faz, metal malzeme veya metal dışı malzeme olabilir. Burada dayanım artırma mekanizması dislokasyonların etkileşimiyle ilgilidir (Callister ve Retwisch, 2015).

3.2.2.2 Elyaf takviyeli kompozitler

Takviye fazının elyaf şeklinde bulunduğu kompozitler, teknolojik olarak en önemli kompozit malzeme grubudur. Elyaf takviyeli kompozitlerin kullanım amacı düşük ağırlığa ilave olarak yüksek dayanım ve yüksek elastiklik modülüdür. Yüksek özgül ağırlığa sahip elyaf takviyeli kompozitler düşük yoğunluklu elyaf ve matris malzemeleri ile üretilebilirler. Elyaf uzunluğunun dayanıma etkisi büyüktür. Çok kısa elyaf dayanımda belirgin bir artış sağlamaz.

Elyaf takviyeli kompozitlerin mekanik özellikleri elyafın özelliklerinin yanında matris fazının uygulanan yükü elyafa aktarabilme oranına da bağlıdır. Burada elde edilen yükün aktarımı, matris ve elyaf fazlarının ara yüzey bağ kuvvetinin büyüklüğüne bağlıdır. Uygulanan yük altında elyaf ve matris uçlarında sona erer (Callister ve Retwisch, 2015).



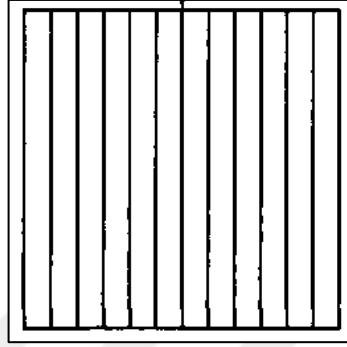
Şekil 3.10. Çekme gerilmesine maruz bir elyafı saran matristeki şekil değişimi (Callister ve Retwisch, 2015).

Şekil 3.10 ‘da matristeki şekil değişiminden anlaşılabacağı üzere, matristen elyaf uçlarına herhangi bir yük iletimi söz konusu değildir.

Sürekli elyaf kompozitler, uzun ve sürekli elyaflarla takviye edilmektedir (Şekil 3.11). En yüksek sertlik ve mukavemete sahip olan türdür. Sürekli fiberlerin hepsi paralel olabilir (tek yönlü sürekli fiber kompozit), birbirine dik açılarda yönlendirilebilir (çapraz veya dokuma kumaş sürekli fiber kompozit) veya çeşitli yönlerde (çok yönlü sürekli fiber kompozit) yönlendirilebilir. İkinci durumda, belirli

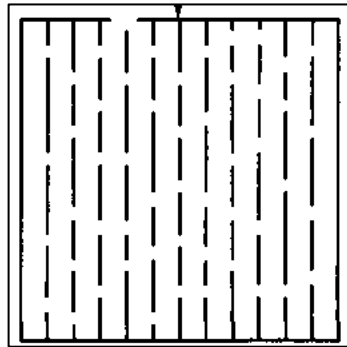
sayıda elyaf yönü ve elyaf dağılımı için kompozit yarı izotropik bir malzeme olarak karakterize edilebilir (Daniel ve Ishai, 2006).

Tek yönlü sürekli fiber kompozit malzemelerin davranışını etkileyen faktörler matris fazı ve elyaf fazının gerilme-genleme davranışı, fazların hacimsel oranları ve yükün uygulandığı doğrultu gibi faktörlere bağlıdır (Callister ve Retwisch, 2015).



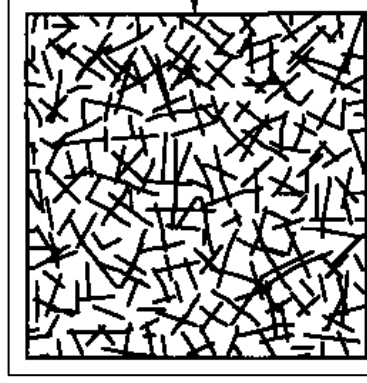
Şekil 3.11. Sürekli ve çekme doğrultusunda yönlenmiş (Daniel ve Ishai, 2006).

Süreksiz ve yönlenmiş elyaflı kompozitlerin dayanımı, sürekli elyaf takviyeli yapılara göre düşüktür. En yaygın olarak kullanılanı doğranmış (kırpıntı) cam elyafıdır. Bu durumdaki bir takviye uygulaması Şekil 3.12 ‘de gösterilmiştir. Ancak bunun dışında kırpıntı şeklindeki karbon ve aramid elyafta kullanılabilir. (Callister ve Retwisch, 2015).



Şekil 3.12. Süreksiz ve yönlenmiş elyaf kompozitler (Daniel ve Ishai, 2006).

Elyafın rastgele yönlendiği kompozitlerde kısa ve süreksiz elyaf kullanılır. Bu durumdaki bir takviye uygulaması Şekil 3.13 ‘te gösterilmiştir.



Şekil 3.13. Süreksiz ve rastgele yönlenmiş elyaf kompozitler (Daniel ve Ishai, 2006).

Yönlenmiş elyaf kompozitlerin dayanımı yöne bağımlı olduğundan en yüksek dayanım artışı elyaf doğrultusundaki kuvvet uygulanması durumunda elde edilir. Elyaf doğrultusuna dik yöndeki kuvvet uygulanmasında ise hasar düşük gerilme düşük değerlerinde gerçekleştiğinden dayanım artışı ihmal edilebilir. Belirli bir kompozit için yönlenme ve elyaf boyuna karar verilirken, uygulanan gerilmenin seviyesi ve türü ile üretim maliyetlerine dikkat edilmesi gerekir. Kısa elyafli kompozitlerin hem üretim hızı yüksek hem de sürekli elyafı üretilmeyecek karmaşık geometrilerin elde edilmesi mümkündür. Ayrıca üretim maliyetleri de tek yönlü ve sürekli elyaf takviyeli kompozitlere göre düşüktür.

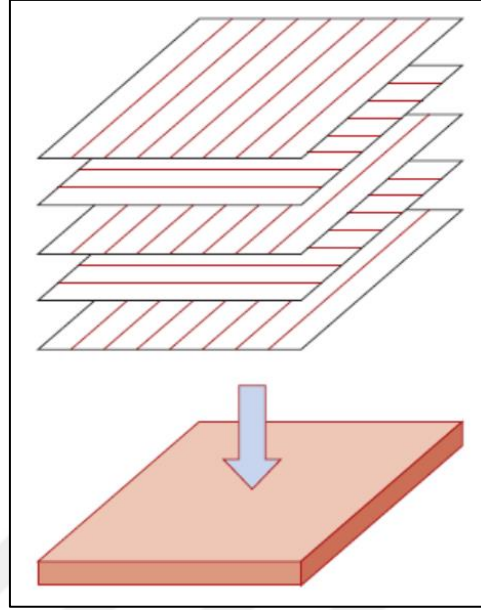
3.2.2.3 Yapısal kompozitler

Yapısal kompozitler özelliklerin sadece bileşenlere değil geometriye de bağlı olduğu homojen ve buna ilave olarak kompozit malzemelerin birleşiminden oluşmuştur. Tabakalı kompozit ve sandviç paneller en yaygın olan yapısal kompozitlerin ikisidir.

Tabakalı kompozit malzemeler, birbirine yapıştırılmış en az iki farklı malzemedan oluşan katmanlardan oluşur. Tabakalı kompozitler daha kullanışlı bir malzeme elde etmek için tabakaların ve bağlama malzemesinin en iyi yönlerini, oluşturulacak malzemede ortaya çıkarmak için kullanılır. Tabakalı kompozit plakalarla ortaya çıkarılabilecek özellikler mukavemet, sertlik, düşük ağırlık, korozyon direnci, aşınma direnci, ısı yalıtımı, ses yalıtımı olabilir (Jones, 1999).

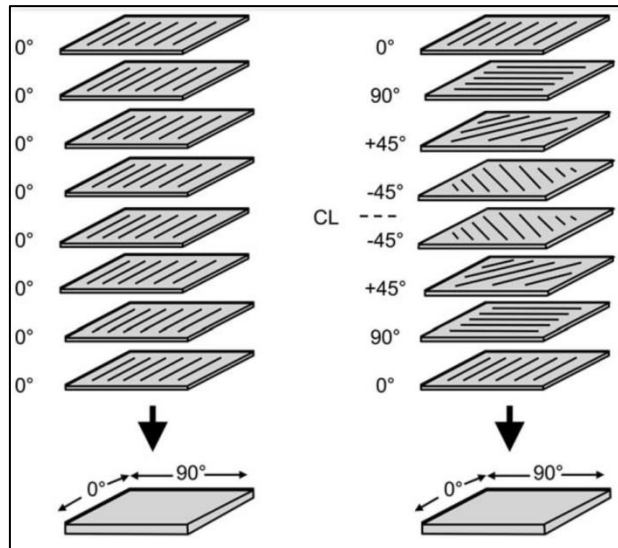
Tabakalı kompozit malzemeler ince plakalar yâda belirli yönde yüksek dayanıma sahip panellerin dizilimiyle oluşur. Bu tabakaların her biri belirli bir yöndeki dayanımı artıracak şekilde yerleştirilerek üst üste dizildikten sonra yapıştırılır (Şekil

3.14). Bunun sonucu olarak tabakalı kompozit malzeme iki boyutlu düzlemde birçok yönde yüksek dayanıma sahip olabilir.



Şekil 3.14. Bir tabakalı kompozitte yönlenmiş elyaf takviyeli tabakaların istiflenmesi (Callister ve Retwisch, 2015).

Tek bir kat veya tüm katmanların veya katların aynı yönde istiflendiği bir katman olduğunda katmana lamina adı verilir. Katlar çeşitli açılarda istiflendiğinde tabakaya laminat adı verilir. Şekil 3.15 ‘te her iki istifleme örneği verilmiştir.

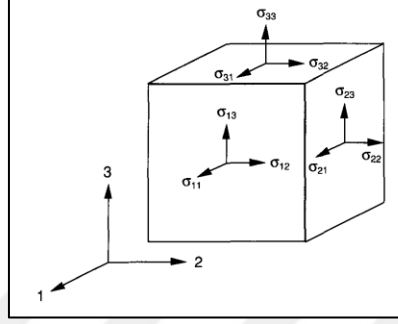


Şekil 3.15. Tek yönlü yerleşim ve yarı izotropik yerleşim (Callister ve Retwisch, 2015).

3.3 Kompozit Tabakanın Elastik Davranışı

3.3.1 Genel anizotropik malzeme

Genel bir süreklilikteki bir noktadaki gerilme durumu, bir element küpün referans koordinat sisteminin 3 eksenli 1-, 2- 3- nolu yüzeylerine paralel etki eden dokuz gerilme bileşeniyle ($i, j = 1, 2, 3$) temsil edilebilir. (Şekil 3.16)



Şekil 3.16. Süreklilik noktasındaki gerilme durumu (Daniel ve Ishai, 2006).

En genel durumda, gerilme ve gerilme bileşenleri, genelleştirilmiş Hooke kanunları ile aşağıdaki şekilde ilişkilidir:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{32} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{21} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{1111} & C_{1122} & C_{1133} & C_{1123} & C_{1131} & C_{1112} & C_{1132} & C_{1113} & C_{1121} \\ C_{2211} & C_{2222} & C_{2233} & C_{2223} & C_{2231} & C_{2212} & C_{2232} & C_{2213} & C_{2221} \\ C_{3311} & C_{3322} & C_{3333} & C_{3323} & C_{3331} & C_{3312} & C_{3332} & C_{3313} & C_{3321} \\ C_{2311} & C_{2322} & C_{2333} & C_{2323} & C_{2331} & C_{2312} & C_{2332} & C_{2313} & C_{2321} \\ C_{3111} & C_{3122} & C_{3133} & C_{3123} & C_{3131} & C_{3112} & C_{3132} & C_{3113} & C_{3121} \\ C_{1211} & C_{1222} & C_{1233} & C_{1223} & C_{1231} & C_{1212} & C_{1232} & C_{1213} & C_{1221} \\ C_{3211} & C_{3222} & C_{3233} & C_{3223} & C_{3231} & C_{3212} & C_{3232} & C_{3213} & C_{3221} \\ C_{1311} & C_{1322} & C_{1333} & C_{1323} & C_{1331} & C_{1312} & C_{1332} & C_{1313} & C_{1321} \\ C_{2111} & C_{2122} & C_{2133} & C_{2123} & C_{2131} & C_{2112} & C_{2132} & C_{2113} & C_{2121} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ \epsilon_{23} \\ \epsilon_{31} \\ \epsilon_{12} \\ \epsilon_{32} \\ \epsilon_{13} \\ \epsilon_{21} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

ve

$$\begin{bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ \epsilon_{23} \\ \epsilon_{31} \\ \epsilon_{12} \\ \epsilon_{32} \\ \epsilon_{13} \\ \epsilon_{21} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{1111} & S_{1122} & S_{1133} & S_{1123} & S_{1131} & S_{1112} & S_{1132} & S_{1113} & S_{1121} \\ S_{2211} & S_{2222} & S_{2233} & S_{2223} & S_{2231} & S_{2212} & S_{2232} & S_{2213} & S_{2221} \\ S_{3311} & S_{3322} & S_{3333} & S_{3323} & S_{3331} & S_{3312} & S_{3332} & S_{3313} & S_{3321} \\ S_{2311} & S_{2322} & S_{2333} & S_{2323} & S_{2331} & S_{2312} & S_{2332} & S_{2313} & S_{2321} \\ S_{3111} & S_{3122} & S_{3133} & S_{3123} & S_{3131} & S_{3112} & S_{3132} & S_{3113} & S_{3121} \\ S_{1211} & S_{1222} & S_{1233} & S_{1223} & S_{1231} & S_{1212} & S_{1232} & S_{1213} & S_{1221} \\ S_{3211} & S_{3222} & S_{3233} & S_{3223} & S_{3231} & S_{3212} & S_{3232} & S_{3213} & S_{3221} \\ S_{1311} & S_{1322} & S_{1333} & S_{1323} & S_{1331} & S_{1312} & S_{1332} & S_{1313} & S_{1321} \\ S_{2111} & S_{2122} & S_{2133} & S_{2123} & S_{2131} & S_{2112} & S_{2132} & S_{2113} & S_{2121} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{32} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{21} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

veya indis notasyonunda;

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \cdot \epsilon_{kl} \quad (3.3)$$

$$\epsilon_{ij} = S_{ijkl} \cdot \sigma_{kl} \quad (i, j, k, l = 1, 2, 3) \quad (3.4)$$

C_{ijkl} = Rijitlik Bileşenleri

S_{ijkl} = Esneklik Bileşenleri

Yukarıdaki ilişkilerde tekrarlanan indisler toplamı ifade eder. Bu bağlantıların tüm değerleri için uygunluk matrisi $[S_{ijkl}]$ rijitlik matrisinin $[C_{ijkl}]$ tersidir. Bu nedenle, genel olarak, bir malzemeyi tamamen karakterize etmek için 81 elastik sabit gerekir.

Ancak, gerilme ve şekil değiştirme tensörlerinin simetrisi;

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ji} \quad (3.5)$$

$$\epsilon_{ij} = \epsilon_{ji} \quad (3.6)$$

bağımsız elastik sabitlerin sayısını 36'ya düşürür.

Kompozitlerin mekanğinde, stres, gerinim, sertlik ve uyumluluk tensörleri için kısa gösterimi aşağıdaki gibidir;

$$\begin{aligned} \sigma_{11} &= \sigma_1 \\ \sigma_{22} &= \sigma_2 \\ \sigma_{33} &= \sigma_3 \end{aligned} \quad (3.7)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{23} &= \tau_{23} = \sigma_4 = \tau_4 \\ \sigma_{31} &= \tau_{31} = \sigma_5 = \tau_5 \\ \sigma_{12} &= \tau_{12} = \sigma_6 = \tau_6 \end{aligned} \quad (3.8)$$

$$\begin{aligned} \epsilon_{11} &= \epsilon_1 \\ \epsilon_{22} &= \epsilon_2 \\ \epsilon_{33} &= \epsilon_3 \end{aligned} \quad (3.9)$$

$$\begin{aligned} 2 \epsilon_{23} &= \gamma_{23} = \epsilon_4 = \gamma_4 \\ 2 \epsilon_{31} &= \gamma_{31} = \epsilon_5 = \gamma_5 \\ 2 \epsilon_{12} &= \gamma_{12} = \epsilon_6 = \gamma_6 \end{aligned} \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned}
C_{1111} &= C_{11}, C_{1122} = C_{12}, C_{1133} = C_{13}, C_{1123} = C_{14}, C_{1131} = C_{13}, C_{1112} = C_{16} \\
C_{2211} &= C_{21}, C_{2222} = C_{22}, C_{2233} = C_{23}, C_{2223} = C_{24}, C_{2231} = C_{25}, C_{2212} = C_{26} \\
C_{3311} &= C_{31}, C_{3322} = C_{32}, C_{3333} = C_{33}, C_{3323} = C_{34}, C_{3331} = C_{35}, C_{3312} = C_{36} \\
C_{2311} &= C_{41}, C_{2322} = C_{42}, C_{2333} = C_{43}, C_{2323} = C_{44}, C_{2331} = C_{45}, C_{2312} = C_{46} \\
C_{3111} &= C_{51}, C_{3122} = C_{52}, C_{3133} = C_{53}, C_{3123} = C_{54}, C_{3131} = C_{55}, C_{3112} = C_{56} \\
C_{1211} &= C_{61}, C_{1222} = C_{62}, C_{1233} = C_{63}, C_{1223} = C_{64}, C_{1231} = C_{65}, C_{1212} = C_{66}
\end{aligned} \tag{3.11}$$

Böylece anizotropik bir cismin gerilim-gerinim ilişkileri kısa gösterimi şöyle yazılabilir;

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_4 \\ \tau_5 \\ \tau_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \gamma_4 \\ \gamma_5 \\ \gamma_6 \end{bmatrix} \tag{3.12}$$

$$\begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \gamma_4 \\ \gamma_5 \\ \gamma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_4 \\ \tau_5 \\ \tau_6 \end{bmatrix} \tag{3.13}$$

veya indis notasyonunda;

$$\sigma_i = C_{ij} \cdot \epsilon_j \tag{3.14}$$

$$\epsilon_i = S_{ij} \cdot \sigma_j \quad (i, j = 1, 2, 3, \dots, 6) \tag{3.15}$$

3.3.2 Özel ortotropik malzeme

Ortotropik bir malzeme söz konusu olduğunda (karşılıklı olarak üç dik simetri düzlemi olan malzeme), gerilme-genleme ilişkileri genel olarak anizotropik malzeme denklemleriyle aynı forma sahiptir. Bununla birlikte, çeşitli sertlik ve uyum şartları birbiriyle ilişkili olduğu için, bağımsız elastik sabitlerin sayısı dokuz indirgenmiştir (Jones, 1999).

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_4 \\ \tau_5 \\ \tau_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \gamma_4 \\ \gamma_5 \\ \gamma_6 \end{bmatrix} \tag{3.16}$$

ve

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_4 \\ \gamma_5 \\ \gamma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_4 \\ \tau_5 \\ \tau_6 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Bir ortotropik malzemenin dokuz bağımsız elastik sabit ile karakterize edilebileceği açıkça gösterilmiştir. Rijitlik veya uyumluluk matrisi terimleri diğerinin ters çevrilmesiyle elde edilebilir. Böylece, C_{ij} ve S_{ij} arasında ilişkiler elde edilebilir.

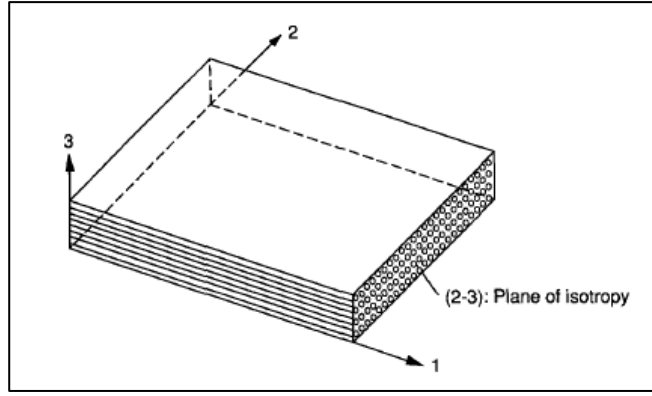
Burada elde edilen denklemlerle gerilim-gerinim ilişkilerine ilişkin üç önemli çıkarım yapılabilir.

- Normal gerilmeler $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ve kayma genlemeleri $\gamma_4, \gamma_5, \gamma_6$ arasında bir bağlantı yoktur, yani ana malzeme yönleri boyunca etki eden normal gerilmeler sadece normal gerilmeler oluşturur.
- Kayma gerilmeleri τ_1, τ_2, τ_3 ile normal genlemeler $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ arasında hiçbir bağlantı yoktur, yani ana malzeme düzlemlerine etki eden kayma gerilmeleri sadece kayma genlemeleri üretir.
- Bir düzlemde etkili olan bir kayma gerilmesi ile farklı bir düzlemde bir kayma genlemesi arasında bağlantı yoktur; yani bir düzlem üzerinde etkili olan bir kayma gerilmesi sadece bu düzlemde bir kesme gerilimi oluşturur (Daniel ve Ishai, 2006).

3.3.3 Enine izotropik malzeme

Bir ortotropik malzeme, ana düzlemlerinden biri bir izotropi düzlemi olduğunda, yani her noktada mekanik özelliklerin her yönde aynı olduğu bir düzlem olduğunda enine izotropik olarak adlandırılır (Şekil 3.17). Tek yönlü karbon / epoksi, aramid / epoksi ve nispeten yüksek lif hacmi oranlarına sahip cam / epoksi kompozitlerde durum böyledir (Daniel ve Ishai, 2006).

Enine bir izotropik malzeme için gerilme-genleme ilişkileri, malzeme sabitlerindeki 2 ve 3 alt indislerinin (2-3 izotropi düzlemi için) denklemlerde birbirinin yerine kullanılabileceği için sadeleştirilebilir.



Şekil 3.17. Enine izotropili ortotropik malzeme (Daniel ve Ishai, 2006).

$$C_{12} = C_{13} \quad (3.18)$$

$$C_{22} = C_{33} \quad (3.19)$$

ve

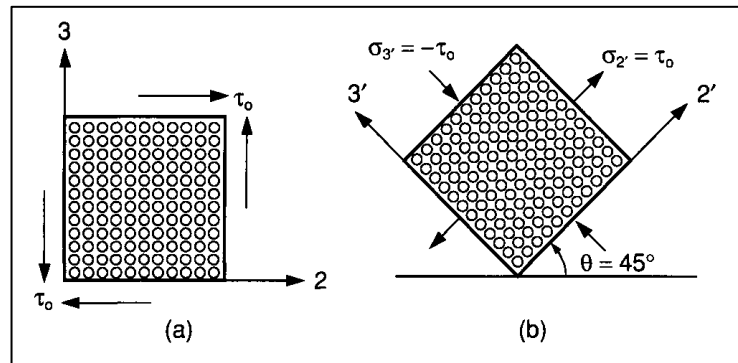
$$S_{12} = S_{13} \quad (3.20)$$

$$S_{22} = S_{33} \quad (3.21)$$

Ayrıca alt indisler 5 ve 6 değiştirilebilir. Böylece;

$$C_{55} = C_{66} \quad (3.22)$$

$$S_{55} = S_{66} \quad (3.23)$$



Şekil 3.18. Enine izotropik malzemenin izotropi düzlemindeki gerilme dönüşümleri (Daniel ve Ishai, 2006).

Ayrıca, Şekil 3.18 'de gösterilen basit gerilme dönüşümü, rijitlik C_{44} 'ün (veya S_{44} uyumunun) bağımsız olmadığını gösterir. Net kayma gerilmesi $\tau_0 = \tau_{23}$ ve sonuçta ortaya çıkan kayma genlemesi $\gamma_0 = \gamma_{23}$ altında 2 ve 3 eksenine (Şek. 1.18 a) paralel olan bir eleman göz önüne alındığında, aşağıdaki eşitlik elde edilir;

$$\tau_4 = \tau_{23} = C_{44} \gamma_{23} = C_{44} \gamma_4 = \tau_0 \quad (3.24)$$

Şekil 3.18 a 'da gösterilen gerilme durumu, 45° döndürülmüş ve eşit gerilme ve basma normal gerilmelerine maruz kalan bir elemanınkine eşdeğerdir.

$$\sigma_2^1 = \tau_0 \quad (3.25)$$

$$\sigma_3^1 = -\tau_0 \quad (3.26)$$

normal genleme ile sonuçlanır.

$$\epsilon_2^1 = -\epsilon_3^1 = \frac{\gamma_{23}}{2} \quad (3.27)$$

$$\epsilon_1 = 0 \quad (3.28)$$

Sonra denklem

$$\sigma_2^1 = C_{22}^1 \epsilon_2^1 + C_{23}^1 \epsilon_3^1 = C_{22} \epsilon_2^1 - C_{23} \epsilon_2^1 \quad (3.29)$$

ya da

$$\sigma_2^1 = \epsilon_2^1 (C_{22} - C_{23}) = \frac{\gamma_{23}}{2} (C_{22} - C_{23}) \quad (3.30)$$

olduğundan

$$C_{22}^1 = C_{22} \quad (3.31)$$

$$C_{23}^1 = C_{23} \quad (3.32)$$

enine izotropiye bağlı olarak bu şekilde bulunur.

$$C_{44} = \frac{C_{22} - C_{23}}{2} \quad (3.33)$$

Böylece enine bir izotropik malzeme için gerilme-genleme ilişkileri,

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_4 \\ \tau_5 \\ \tau_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{23} & C_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (C_{22} - C_{23})/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \gamma_4 \\ \gamma_5 \\ \gamma_6 \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

ve ters ilişkiler

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_4 \\ \gamma_5 \\ \gamma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{23} & S_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(S_{22} - S_{23}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_4 \\ \tau_5 \\ \tau_6 \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

Yukarıdaki ilişkiler, enine izotropili bir ortotropik malzemenin sadece beş bağımsız elastik sabit ile karakterize edilebileceğini göstermektedir.

3.4 Pim Bağlantıları

Mekanik bağlantılar, bileşenlerin veya yapıların yük aktarma elemanlarıdır. Bu yapıların veya bileşenlerin performansı içerdikleri herhangi bir mekanik bağlantının davranışına bağlıdır. Mekanik bağlantı elemanları ile birleştirme, yapıların montajında yaygın bir uygulamadır ve bağlantı hasarı yapının erken bozulmasına neden olabileceğinden bağlantı mukavemeti tasarımda önemli bir özelliktir. Mekanik birleştirme, deliklerde hasara neden olabilecek stres konsantrasyonlarına neden olabilecek perçin, pim veya cıvata kullanımıyla yapılan bağlantı türüdür (Whitworth vd., 2008).

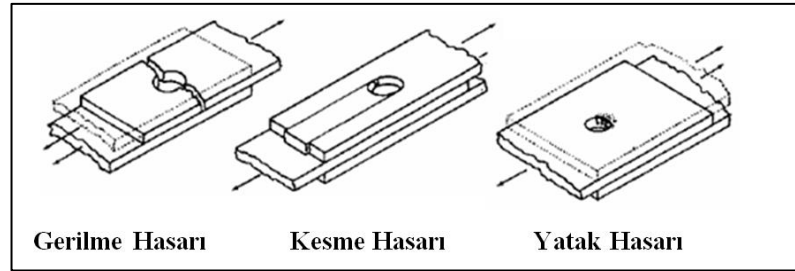
Mekanik bağlantı elemanları, uçak yapılarının yapımında bileşenler arasında yük aktarımı için kullanılan en önemli araçlardır. Bununla birlikte, kompozitlerde net kesit, yatak ve kayma hasar modlarına ve metallerde delik sınırında başlangıç kırılmasına neden olan yüksek stres konsantrasyonlarına neden olmaktadır. Bu nedenle, bağlantı deliklerinin etrafındaki gerilmelerin ve kenar çatlaklarıyla ilişkili gerilme şiddeti faktörlerinin değerlendirilmesi, hasara dayanıklı tasarımlar için çok önemlidir. Bilinmeyen temas gerilmelerinin ve bağlantı elemanı ile laminat arasındaki temas bölgesinin varlığı nedeniyle, pim yüklü bir deliğin analizi yüksüz bir deliğinkinden çok daha karmaşıktır (Madenci, 1998).

Mekanik bir bağlantıdaki gerilme durumu, öncelikle cıvatalı laminatların geometrisine, yükleme koşullarına, malzeme anizotropisine, bağlantı deliği açıklığına, bağlantı elemanı esnekliğine ve bağlantı elemanı ile laminat arasındaki sürtünmeye bağlıdır. Çapraz modele sahip birçok bağlantı elemanından oluşan

mekanik bağlantı elemanları, tek bağlantı elemanı bağlantı parçaları için hali hazırda karmaşık olan analizleri daha da karmaşık hale getirmektedir. Bağlantı elemanları arasındaki yük dağılımı, çoklu bağlantı elemanlarının hasar yükünü önemli ölçüde etkiler. Çoklu bağlantı elemanı bağlantılarında, genel olarak kabul edilen yaklaşım, lokal gerilme dağıtımı için bir sonraki bağlantı elemanı analizi için kritik (en fazla yüklü) bağlantı elemanını tespit etmek için önce bağlantı elemanları arasındaki yük dağılımını belirlemeye dayanır (Madenci, 1998).

Havacılık ve uzay mühendisliği gibi ileri mühendislik alanlarında, kompozitler, yüksek mukavemet / ağırlık oranları nedeniyle geniş bir uygulama alanı bulmuşlardır. Bu uygulamalar genellikle kompozitlerin kompozitlere veya metallere birleştirilmesini gerektirir. Mekanik olarak pim ile sabitleme düşük maliyeti, basitliği ve montajı ve sökülmesi kolaylığı gibi avantajlarından dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır (Karakuzu vd., 2008).

DeneySEL olarak, mekanik olarak tutturulmuş bağlantılarda net gerilme, kayma ve yatak hasarı olmak üzere üç temel hasar mekanizmasına maruz kaldığı gözlenmiştir. Her mekanizmanın neden olduğu tipik hasarlar Şekil 3.19 'da gösterilmiştir (Okutan, 2001).



Şekil 3.19. Pimli bağlantılarda tipik hata modları.

3.5 Sonlu Elemanlar Metodu

Sonlu elemanlar analizi sayısal bir tekniktir. Bu yöntemde, değişen şekil, sınır koşulları ve yükler gibi problemlerin karmaşıklıkları olduğu gibi korunur ve yaklaşık çözümler elde edilir. Bir analiz aracı olarak çeşitliliği ve esnekliği nedeniyle mühendislik alanında büyük ilgi görmektedir. Bilgisayar bu yöntemin uygulanması için temel ihtiyaç olması nedeniyle bilgisayar donanım teknolojisindeki hızlı gelişmeler ve bilgisayar maliyetinin düşmesi bu yöntemin kullanımını artırmıştır,

Çok sayıda popüler sonlu eleman analiz paketi markası piyasada bulunmaktadır. Yoğun olarak kullanılan paketlerden bazıları STAAD-PRO, GT-STRUDEL, NASTRAN, NISA ve ANSYS 'tir. Bu paketleri kullanarak birçok karmaşık yapı analiz edilebilir. Sonlu elemanlar analizi, uçak tasarımında bir gerilme analizi yöntemi olarak ortaya çıkmıştır. Yapısal analiz matris yönteminin bir uzantısı olarak başlamıştır. Bugün bu yöntem sadece katı mekaniğin analizi için değil aynı zamanda akışkan, ısı transferi, elektrik ve manyetik alanların analizinde de kullanılır. Hem statik hem de dinamik problemler sonlu elemanlar analizi ile ele alınabilir. Bu yöntem, gemilerin, uçakların, uzay gemilerinin, elektrik motorlarının ve ısı motorlarının analiz ve tasarımında yaygın olarak kullanılmaktadır (Bhavikatti, 2005).

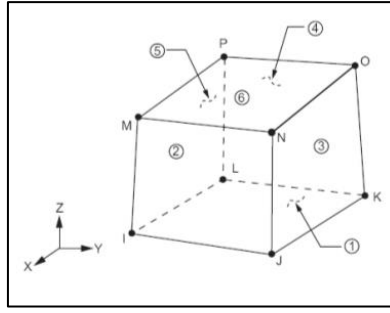
Sonlu Elemanlar Analizi (FEA) gibi sayısal teknikler yapıştırıcı ile sabitlenmiş bağlantılarda olduğu gibi, değişken yükleme koşullarında karmaşık yapıları analiz etmek için etkili ve güçlü bir çözümdür. FEA ayrıca, boyunca bağlanan bağlantıların yorulma ömrü davranışlarını ve tepkilerini incelemek için gerekli olan gerilme, termal ve difüzyon gibi diğer analiz türleri için de kullanılabilir. Son yıllarda, FEA teknolojisindeki hızlı gelişmeler ticari FEA paketlerinin geliştirilmesine yol açmıştır. Mühendisler tarafından en yaygın kullanılan paket programlardan biri ANSYS 'dir (Wahab, 2014).

3.5.1 Ansys programında kullanılan üç boyutlu elemanlar

ANSYS üç-boyutlu problemlerin analizlerinde kullanılmak üzere değişik türlerde elemanlar sunmaktadır. Bu eleman türlerinden bazı örnekler aşağıda verilmektedir.

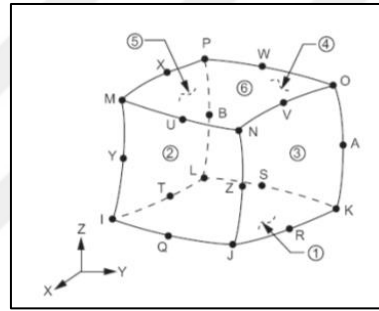
3.5.1.1 Termal (ısı) katı elemanlar

SOLID70, iletim ısı geçişi problemlerinin modellenmesinde kullanılan üç boyutlu bir elemandır. Sekiz düğüm noktası vardır ve Şekil 3.20 'te gösterildiği gibi her bir düğüm noktasında tek bir serbestlik derecesi (sıcaklık) vardır. SOLID70 elemanı yüzeylerine taşınım veya ısı akıları uygulanabilir. Çözüm çıktıları arasında düğüm noktası sıcaklıkları ve ortalama yüzey sıcaklığı, sıcaklık bileşenleri ve ısı akısı bileşenleri gibi sonuçlar elde edilebilir (Moaveni, 2015).



Şekil 3.20. ANSYS'te kullanılan SOLID70 elemanı (Ansys, 2013).

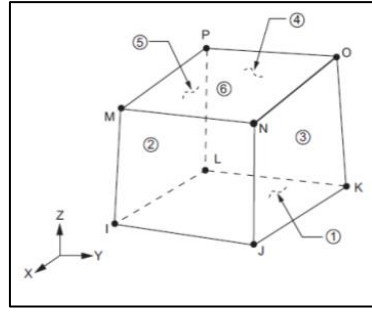
SOLID90, sürekli rejim veya zamana bağlı olan ısı geçişi problemlerinin modellenmesinde kullanılan yirmi düğüm noktalı ve altı yüzlü elemandır. Bu eleman SOLID70 elemanına göre çözüm süresi daha uzun ancak daha doğru sonuçlar veren bir elemandır. Şekil 3.21 'de gösterildiği gibi, her bir düğüm noktasında bir adet serbestlik derecesi (sıcaklık) bulunmaktadır (Moaveni, 2015).



Şekil 3.21. ANSYS'te kullanılan SOLID90 elemanı (Ansys, 2013).

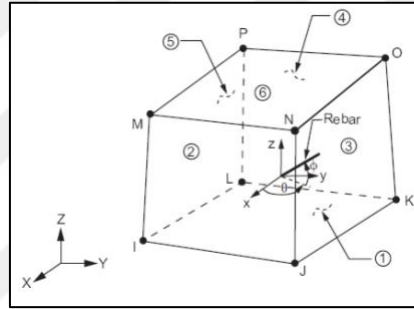
3.5.1.2 Yapısal katı elemanlar

SOLID185, izotrop katı cisimler mekaniği problemlerinin çözümünde kullanılan üç boyutlu bir altı yüzlü elemandır. Sekiz adet düğüm noktasına sahip olup Şekil 3.22 'den görülebileceği gibi her bir düğüm noktasında üç adet serbestlik derecesi bulunmaktadır. Eleman yüzeylerine yayılı yükler uygulamak mümkündür. Bu eleman büyük yer değişimi ve birim şekil değişimi, plastisite ve sürünme problemlerinin analizinde kullanılabilir. Çözüm çıktısı olarak düğüm noktası yer değişimleri bulunmaktadır (Moaveni, 2015).



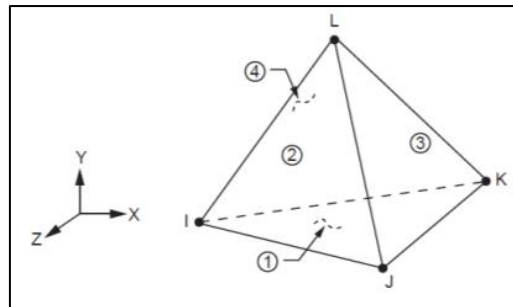
Şekil 3.22. ANSYS'te kullanılan SOLID185 elemanı (Ansys, 2013).

SOLID65, güçlendirilmiş beton problemleri veya cam elyafı gibi malzemeler ile güçlendirilmiş kompozit malzeme problemlerinin modellenmesinde kullanılmaktadır. Sekiz düğüm noktası vardır ve Şekil 3.23 'ten görülebileceği gibi her bir düğüm noktasında üç adet serbestlik derecesine sahiptir (Moaveni, 2015).



Şekil 3.23. ANSYS'te kullanılan SOLID 65 elemanı (Moaveni, 2015).

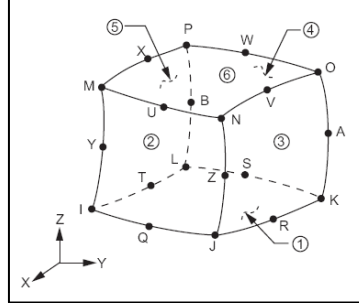
SOLID285, düğüm noktaları basınç elemanlarından oluşan dört düğüm noktalı, dört yüzlü elemandır. Şekil 3.24 'te gösterildiği gibi, her bir düğüm noktasının x, y ve z yönlerinde üç adet yer değişim serbestlik derecesi ve hidrostatik basınç bulunmaktadır (Moaveni, 2015).



Şekil 3.24. ANSYS'te kullanılan SOLID285 elemanı (Ansys, 2013).

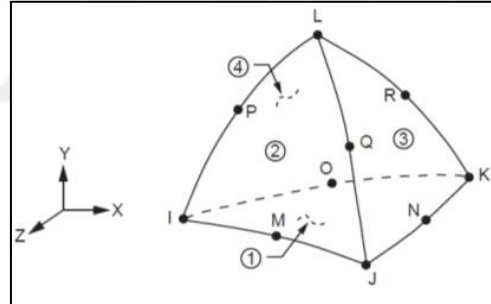
SOLID186, 20 düğüm noktalı yapısal bir eleman olup, Şekil 3.25 'te gösterildiği gibi her bir düğüm noktasında üç adet serbestlik derecesi bulunmaktadır. SOLID185

elemanı ile sonuçlar açısından benzer ancak daha yüksek bir mertebede olan bir elemandır. Eleman girdi ve çözüm çıktı verileri daha önce açıklanan elemanların verilerine benzerdir (Moaveni, 2015).



Şekil 3.25. ANSYS'te kullanılan SOLID186 elemanı (Ansys, 2013).

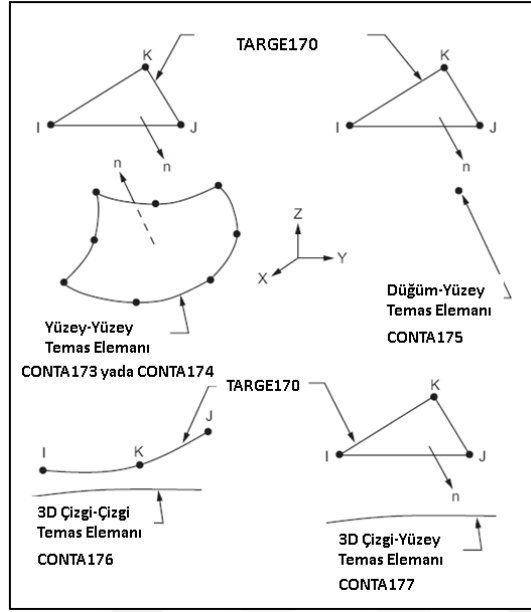
SOLID187, on düğüm noktalı dört yüzlü bir elemandır. Şekil 3.26 'da gösterildiği her düğüm noktası x, y ve z yönlerinde olmak üzere üç adet serbestlik derecesine sahiptir. Bu eleman büyük yer değişimi, büyük birim şekil değişimi, plastisite ve sürünme problemlerinin analizinde kullanılabilir (Moaveni, 2015).



Şekil 3.26. ANSYS'te kullanılan SOLID187 elemanı (Ansys, 2013).

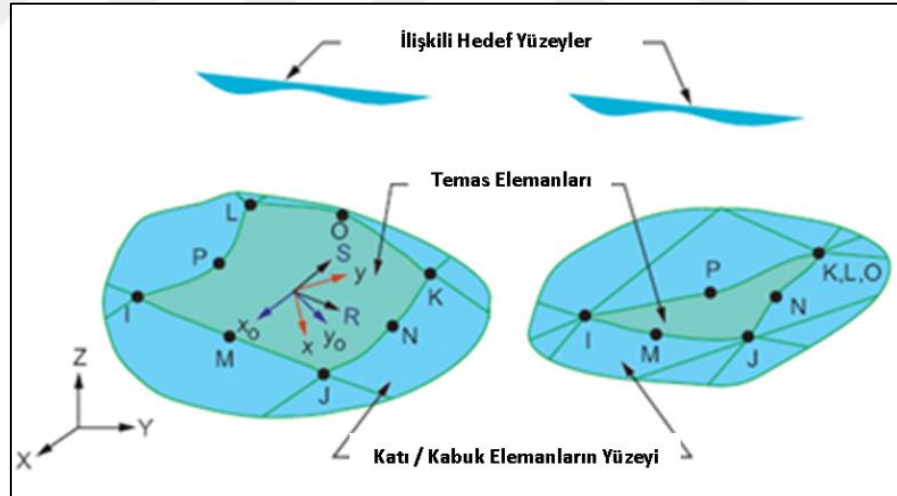
3.5.1.3 Kontak elemanları

TARGE170, ilişkili kontak elemanları (CONTA173, CONTA174, CONTA175, CONTA176 ve CONTA177) için çeşitli üç boyutlu hedef yüzeyleri temsil etmek için kullanılır. Kontak elemanlarının kendileri, deforme olabilen bir cismin sınırını tarif eden katı, kabuk veya çizgi elemanlarının yüzeyini kaplar. Potansiyel olarak TARGE170 tarafından tanımlanan hedef yüzeyle temas halindedir. Bu eleman tipi gösterimi Şekil 3.27 'de verilmiştir. Hedef segment elemanına yer değiştirme, dönme, sıcaklık, voltaj ve manyetik akım uygulanabilir. Ayrıca hedef elemanlara kuvvetler ve momentler de uygulanabilir (Ansys, 2013).



Şekil 3.27. ANSYS'te kullanılan TARGE170 elemanı (Ansys, 2013).

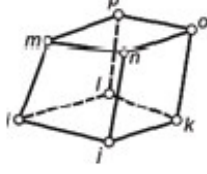
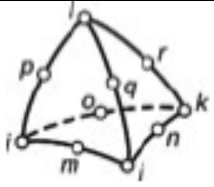
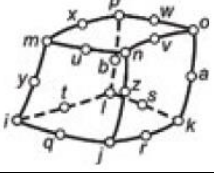
CONTA174: Üç boyutlu katı veya orta yan düğümlü yüzey elemanlarına yerleştirilebilen 8 düğümlü veya daha yüksek dereceli bir dörtgen elementtir. 3 ile 7 düğümlü dörtgen / üçgen şekillere dönüşebilir (Şekil 3.28).



Şekil 3.28. ANSYS'te kullanılan CONTA174 elemanı (Ansys, 2017).

ANSYS'de gerilme analizi için kullanılan 3 boyutlu katı elemanların özeti Çizelge 3.6 'da verilmiştir.

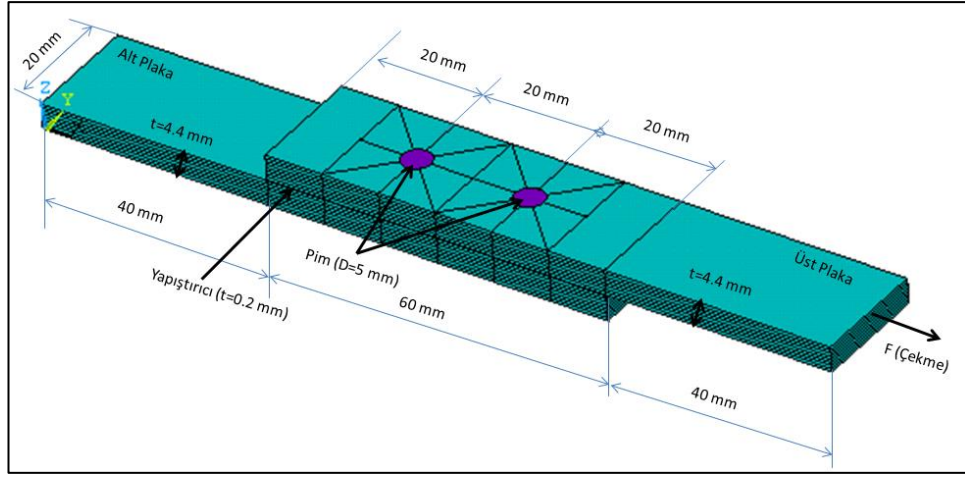
Çizelge 3.6. ANSYS'de gerilme analizi için 3D katı elemanlar (Pidaparti, 2017).

ANSYS Eleman Tipi	Eleman Şekli ve Düğüm Noktaları	Düğüm Noktaları Serbestlik Derecesi
SOLID185 , Yapısal Katı, Üç boyutlu, 8 Düğüm noktalı		UX, UY, UZ
SOLID285 , Yapısal Katı, Üç boyutlu, 4 Düğüm noktalı		UX, UY, UZ
SOLID187 , Yapısal Katı, Üç boyutlu, 10 Düğüm noktalı		UX, UY, UZ
SOLID186 , Yapısal Katı, Üç boyutlu, 20 Düğüm noktalı		UX, UY, UZ

3.6 Problemin Tanımı

Bu çalışmada, tabakalı kompozit plakaların farklı oryantasyon açısı varyasyonları üç farklı yapıştırıcı türü ile yapıştırılmış ve daha sonra yapıştırılan tabakalı kompozit plakalara çift pim bağlantısı uygulanmıştır. Çift pim ve yapıştırıcı kullanılarak delik kenarlarında oluşacak gerilmelerin azaltılması hedeflenmiştir. Bu bağlantı şekliyle yapıştırmalı ve pimli karma bir bağlantı elde edilmiştir. Bağlantısı yapılan plakalarda karbon/epoksi ve cam/epoksi kompozit malzemeler kullanılarak farklı bağlantı modelleri hazırlanmıştır. Modeller üzerine çekme yükü uygulanarak ortaya çıkan gerilmeler incelenmiş ve bunların karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir.

Sonlu Elemanlar model tasarımı Şekil 3.29 'da görülmektedir. Analiz ANSYS V19.1 sonlu elemanlar yazılımı ile gerçekleştirilmiş ve çözümleme malzeme ve yapıştırıcı varyasyonlarına göre yapılmıştır.



Şekil 3.29. Modellerin şematik gösterimi

3.7 Malzeme ve Özellikleri

Karbon/epoksi plaka 16 tabakadan oluşmuş ve $[45^\circ/-45^\circ]_8$, $[0^\circ/0^\circ]_8$, $[30^\circ/-30^\circ]_8$ oryantasyon açılarına sahiptir. Karbon/epoksi tabakalı kompozit plakanın mekanik özellikleri Çizelge 3.7 'de verilmiştir.

Çizelge 3.7. Karbon/epoksi tabakalı kompozit plaka mekanik özellikleri (Özel vd. 2014).

Karbon/Epoksi Mekanik Özellikleri	
E_{11}	141 600 MPa
E_{22}	10 700 MPa
E_{33}	10 700 MPa
ν_{12}	0,268
ν_{23}	0,495
ν_{13}	0,268
G_{12}	3 880 MPa
G_{23}	2 680 MPa
G_{13}	3 880 MPa

Cam/epoksi plaka 16 tabakadan oluşmuş ve $[45^\circ/-45^\circ]_8$, $[0^\circ/0^\circ]_8$, $[30^\circ/-30^\circ]_8$ oryantasyon açısına sahiptir. Cam/epoksi tabakalı kompozit plakanın mekanik özellikleri Çizelge 3.8 'de verilmiştir.

Çizelge 3.8. Cam/epoksi tabakalı kompozit plaka mekanik özellikleri (Kishore vd. 2009).

Cam/Epoksi Mekanik Özellikleri	
E_{11}	26 000 MPa
E_{22}	6 000 MPa
E_{33}	6 000 MPa
ν_{12}	0,3
ν_{23}	0,5
ν_{13}	0,3
G_{12}	3 120 MPa
G_{23}	2 000 MPa
G_{13}	3 120 MPa

Yapıştırıcı 1 mekanik özellikleri Çizelge 3.9 'te verilmiştir.

Çizelge 3.9. Yapıştırıcı 1 mekanik özellikleri (Liao vd. 2013).

Yapıştırıcı 1(Hysol EA 9361)	
E (MPa)	670
ν	0,4

Yapıştırıcı 2 mekanik özellikleri Çizelge 3.10 'da verilmiştir.

Çizelge 3.10. Yapıştırıcı 2 mekanik özellikleri (Apalak vd. 2003).

Yapıştırıcı 2(Epoksi)	
E (MPa)	3300
ν	0,3

Yapıştırıcı 3 mekanik özellikleri Çizelge 3.11 'de verilmiştir.

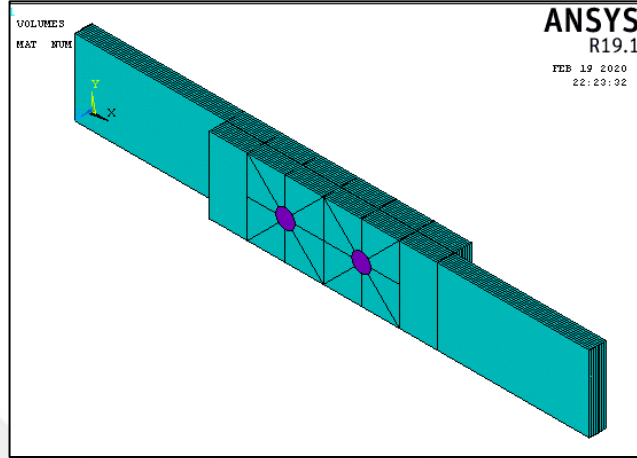
Çizelge 3.11. Yapıştırıcı 3 mekanik özellikleri (Sayman, 2012).

Yapıştırıcı 3(DP460)	
E (MPa)	5000
ν	0,35

3.8 Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması

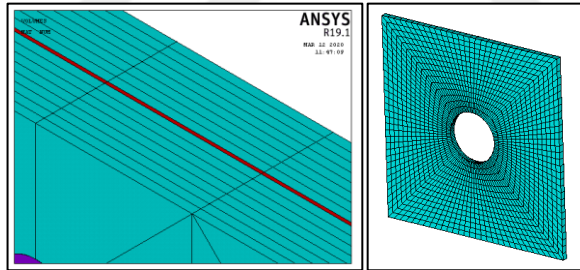
ANSYS sonlu elemanlar yazılımı daha önce yapılan akademik çalışmalarda birçok kez kullanılmış olması ve deneysel sonuçlarla tutarlı sonuçlar elde edilmiş olması sebebiyle tercih edilmiştir. Çalışma 3 boyutlu modelleme ile gerçekleştirilmiş olup

öncelikle problemin katı modeli oluşturulmuştur. Modelde kompozit tabakalar her bir oryantasyon açısı çiftleri için ayrı ayrı modellenip birleştirilmiştir. Oluşturulan katı model Şekil 3.30 'da görülmektedir. Tabakaların modellenmesi ile ilgili detay resimler Şekil 3.31 ve 3.32 de verilmiştir.

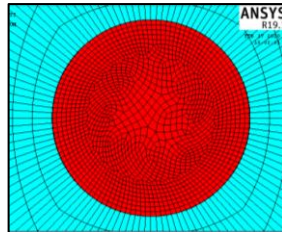


Şekil 3.30. Tabakalı kompozit plakaların sonlu elemanlar modeli.

Modelleme işlemi sonrasında yapılan çalışmalarla ilgili literatür taraması yapılmış ve programın kullanıcı kılavuzları incelenerek uygun eleman tipleri belirlenmiştir.



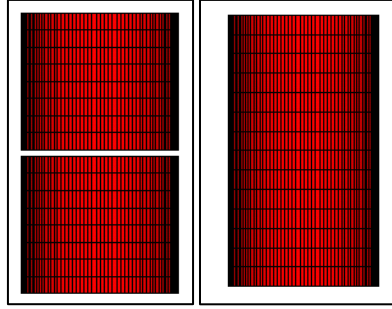
Şekil 3.31. Tabakalı kompozit plaka.



Şekil 3.32. Pim ve delik çevresi mesh yapısı.

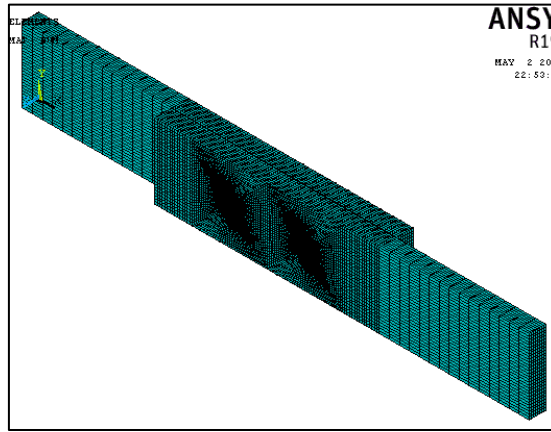
Kompozit malzeme yapıştırılmış ve iki adet pimle de sabitlenerek karma bağlantı oluşturulmuştur. Tabakalı kompozit malzeme için eleman tipi SOLID185, yapıştırıcı ve pim için SOLID186 eleman tipi seçilmiştir. Kontak elemanı olarak pim

yüzeylerine TARGE170 delik yüzeylerine ise CONTA174 eleman tipi kullanılmıştır (Şekil 3.33).



Şekil 3.33. TARGE 170 ve CONTA 174 eleman atanan yüzeyler.

Sonlu elemanlar ağ yapısının oluşturulması sırasında, yapıştırıcı, delik ve pim bölgeleri dahil olmak üzere modelin tamamında düzgün dörtgen elemanlardan oluşan bir ağ yapısı oluşturulması sağlanmıştır. Bu plakaların ayrı ayrı dörtgen elemanlara bölünmesi ile sağlanmıştır. Ağ yapısı oluşturulması işlemi sonucunda model üzerinde 358140 eleman ve 499037 düğüm noktası oluşmuştur (Şekil 3.34). Şekillerden de görüldüğü gibi delik çevrelerinde daha hassas bir çözümleme yapılabilmesi için o bölgelerde eleman sayısı artırılmıştır.



Şekil 3.34. Modelin tamamının sonlu elemanlar ağ yapısı.

Analizde alt plaka ucundan X Y ve Z yönlerinde sınır koşulu uygulanmıştır. Pim alt ve üst yüzeylerine Z yönünde sınır koşulu verilmiştir. Üst plakanın çekme kuvveti uygulanan yüzeyine Y ve Z yönünde sınır koşulu uygulanmıştır. Üst plakanın serbest ucundan tüm modellerde 2 kN ($\cong$ 200 kg) 'luk yük uygulanmış ve analiz çalıştırılmıştır.

3.9 Kurulan Model Varyasyonları

Analizler, Cam/Epoksi ve Karbon/Epoksi malzemelerden 3 farklı oryantasyon açısına sahip tabakalı kompozit plakaların alt ve üst plakaların farklı tiplerde kullanılmasıyla oluşturulmuştur. Aynı zamanda bağlantı için 3 farklı yapıştırıcı türü kullanılmıştır. Oluşturulan modeller ve kısa açıklamaları EK-A kısmında verilmiştir. Çizelge 3.12 'de kullanılan varyasyonlar özet tablo halinde verilmiştir.

Çizelge 3.12. Kullanılacak malzeme ve yapıştırıcı kombinasyonları.

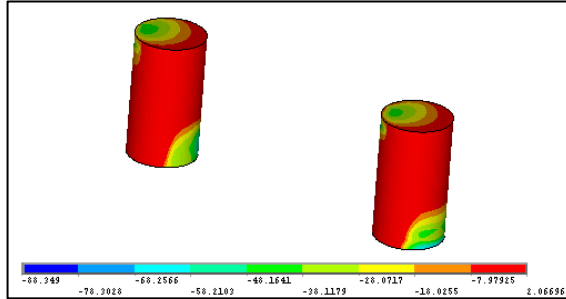
	Model adı	Yapıştırıcı Türü	Alt Plaka	Üst Plaka	Oryantasyon Açıları
1	Model 1	Yapıştırıcı 1	Karbon/Epoksi	Karbon/Epoksi	45°/-45°
2	Model 2	Yapıştırıcı 2			
3	Model 3	Yapıştırıcı 3			
4	Model 4	Yapıştırıcı 1	Cam/Epoksi	Cam/Epoksi	45°/-45°
5	Model 5	Yapıştırıcı 2			
6	Model 6	Yapıştırıcı 3			
7	Model 7	Yapıştırıcı 1	Karbon/Epoksi	Cam/Epoksi	45°/-45°
8	Model 8	Yapıştırıcı 2			
9	Model 9	Yapıştırıcı 3			
10	Model 10	Yapıştırıcı 1	Cam/Epoksi	Karbon/Epoksi	45°/-45°
11	Model 11	Yapıştırıcı 2			
12	Model 12	Yapıştırıcı 3			
13	Model 13	Yapıştırıcı 1	Karbon/Epoksi	Karbon/Epoksi	0°/0°
14	Model 14	Yapıştırıcı 2			
15	Model 15	Yapıştırıcı 3			
16	Model 16	Yapıştırıcı 1	Cam/Epoksi	Cam/Epoksi	0°/0°
17	Model 17	Yapıştırıcı 2			
18	Model 18	Yapıştırıcı 3			
19	Model 19	Yapıştırıcı 1	Karbon/Epoksi	Cam/Epoksi	0°/0°
20	Model 20	Yapıştırıcı 2			
21	Model 21	Yapıştırıcı 3			
22	Model 22	Yapıştırıcı 1	Cam/Epoksi	Karbon/Epoksi	0°/0°
23	Model 23	Yapıştırıcı 2			
24	Model 24	Yapıştırıcı 3			

Çizelge 3.12 (devam). Kullanılacak malzeme ve yapıştırıcı kombinasyonları.

25	Model 25	Yapıştırıcı 1	Karbon/Epoksi	Karbon/Epoksi	30°/-30°
26	Model 26	Yapıştırıcı 2			
27	Model 27	Yapıştırıcı 3			
28	Model 28	Yapıştırıcı 1	Cam/Epoksi	Cam/Epoksi	30°/-30°
29	Model 29	Yapıştırıcı 2			
30	Model 30	Yapıştırıcı 3			
31	Model 31	Yapıştırıcı 1	Karbon/Epoksi	Cam/Epoksi	30°/-30°
32	Model 32	Yapıştırıcı 2			
33	Model 33	Yapıştırıcı 3			
34	Model 34	Yapıştırıcı 1	Cam/Epoksi	Karbon/Epoksi	30°/-30°
35	Model 35	Yapıştırıcı 2			
36	Model 36	Yapıştırıcı 3			

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Analiz sonucunda kontak analizi çalıştırılmış ve pimde meydana gelen gerilmelerden kontak analizin çalıştığı doğrulanmıştır (Şekil 4.1).

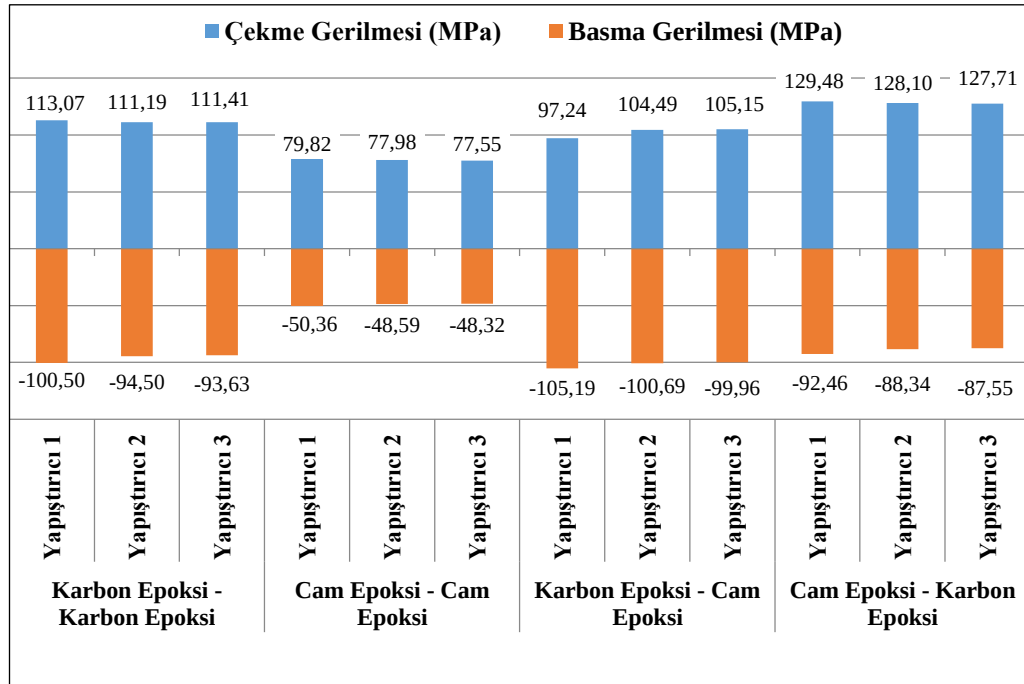


Şekil 4.1. Model 1 pimlerde X yönünde oluşan normal gerilmeler.

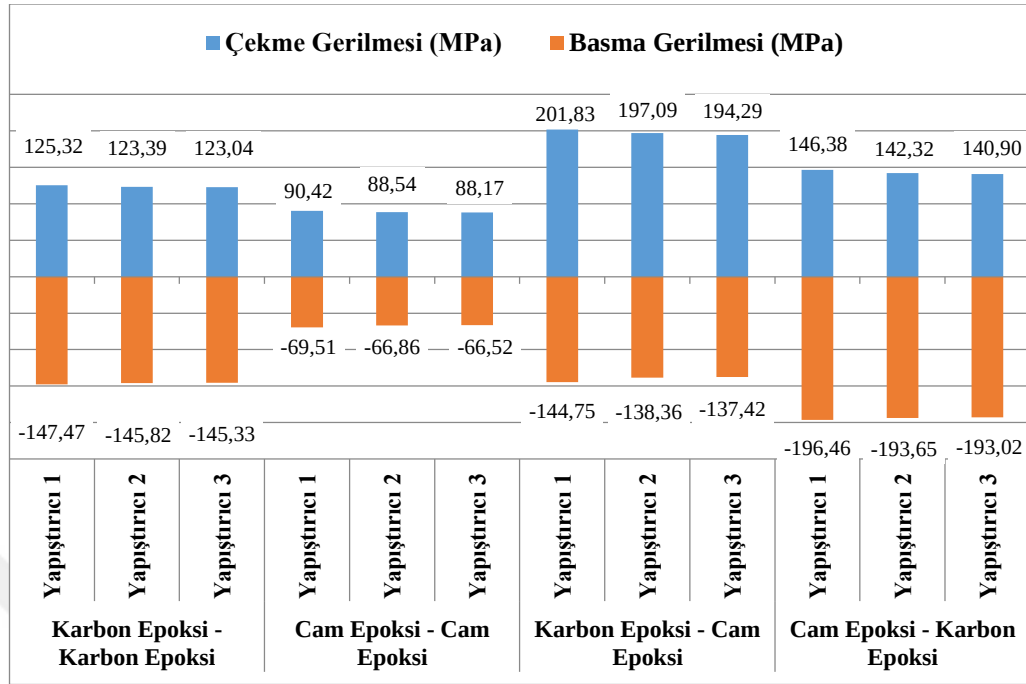
4.1 Çekme Yüğü Sonucu Bağlantının Tamamı İçin Elde Edilen Bulgular

Oluşturulan modellerin analizi sonucu modelin tamamında çekme yönü olan X yönünde ve Von Mises gerilme değerleri incelenmiştir.

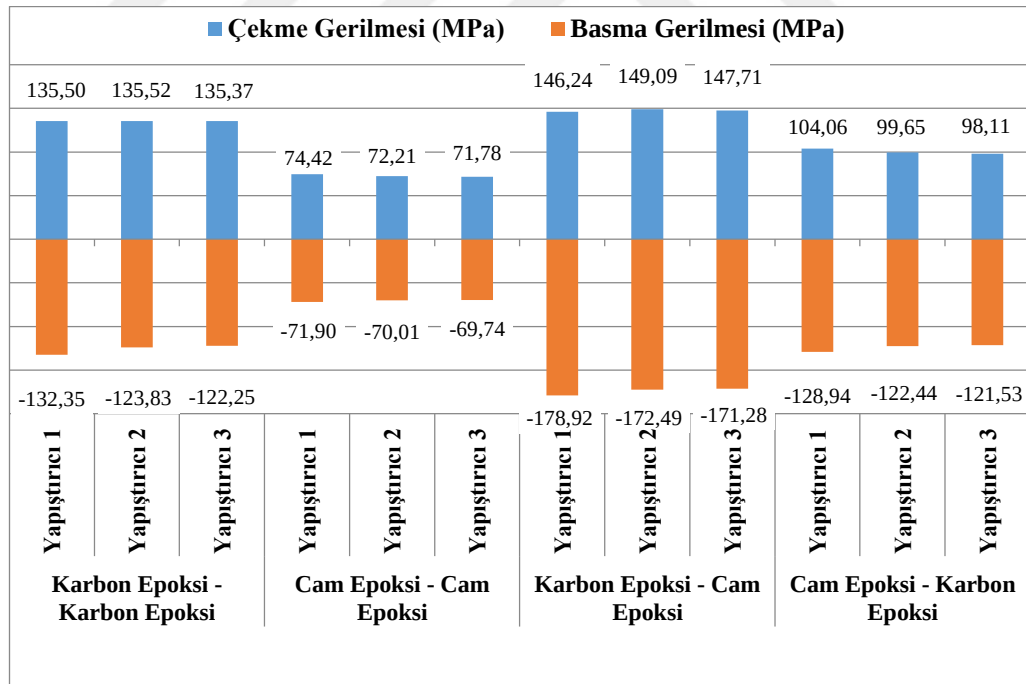
Şekil 4.2 ,4.3 ve 4.4 ‘te X yönünde modelin tamamında oluşan normal gerilmeler grafikler halinde verilmiştir.



Şekil 4.2. Model 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 7 - 8 - 9 - 10 - 11 - 12 X yönünde normal gerilmeler (Oryantasyon açısı $[45^{\circ}/-45^{\circ}]_8$).



Şekil 4.3. Model 13 - 14 - 15 - 16 - 17 - 18 - 19 - 20 - 21 - 22 - 23 - 24 X yönündeki normal gerilmeler (Oryantasyon açısı $[0^\circ/0^\circ]_8$).



Şekil 4.4. Model 25 - 26 - 27 - 28 - 29 - 30 - 31 - 32 - 33 - 34 - 35 - 36 X yönündeki normal gerilmeler (Oryantasyon açısı $[30^\circ/-30^\circ]_8$).

Oluşturulan 36 model arasında modelin tamamındaki X yönündeki normal gerilme değerleri incelendiğinde her oryantasyon açısı için minimum ve maksimum çekme ve basma gerilmeleri Çizelge 4.1, 4.2 ve 4.3 'te verilmiştir.

Çizelge 4.1. X yönündeki $[45^\circ/-45^\circ]_8$ oryantasyon açısında minimum ve maksimum çekme ve basma gerilmeleri.

	Oryantasyon Açısı	Alt Plaka	Üst Plaka	Yapıştırıcı	Gerilme (MPa)
Minimum Çekme	$[45^\circ/-45^\circ]_8$	Cam/epoksi	Cam/epoksi	3	77,55
Maksimum Çekme		Cam/epoksi	Karbon/epoksi	1	129,48
Minimum Basma		Cam/epoksi	Cam/epoksi	3	48,32
Maksimum Basma		Karbon/epoksi	Cam/epoksi	1	105,19

Çizelge 4.2. X yönündeki $[0^\circ/0^\circ]_8$ oryantasyon açısında minimum ve maksimum çekme ve basma gerilmeleri.

	Oryantasyon Açısı	Alt Plaka	Üst Plaka	Yapıştırıcı	Gerilme (MPa)
Minimum Çekme	$[0^\circ/0^\circ]_8$	Cam/epoksi	Cam/epoksi	3	88,17
Maksimum Çekme		Karbon/epoksi	Cam/epoksi	1	201,83
Minimum Basma		Cam/epoksi	Cam/epoksi	3	66,52
Maksimum Basma		Cam/epoksi	Karbon/epoksi	1	196,46

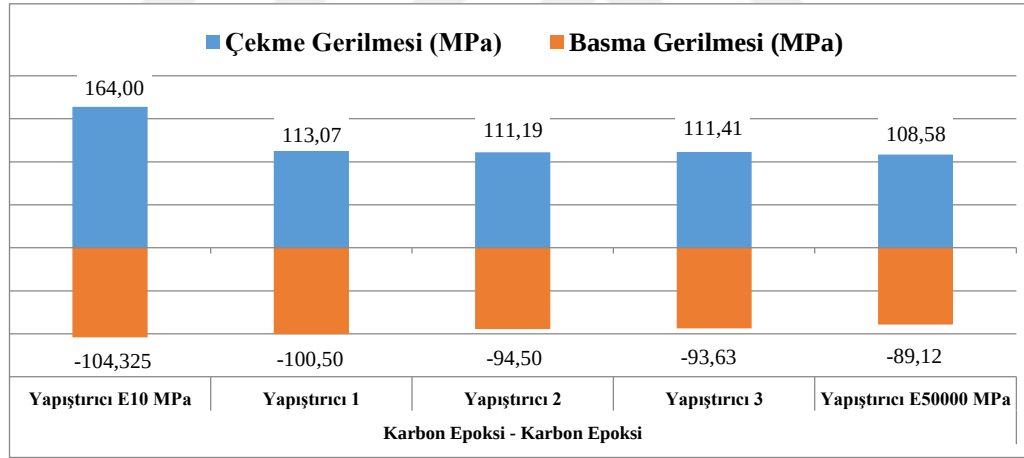
Çizelge 4.3. X yönündeki $[30^\circ/-30^\circ]_8$ oryantasyon açısında minimum ve maksimum çekme ve basma gerilmeleri.

	Oryantasyon Açısı	Alt Plaka	Üst Plaka	Yapıştırıcı	Gerilme (MPa)
Minimum Çekme	$[30^\circ/-30^\circ]_8$	Cam/epoksi	Cam/epoksi	3	71,78
Maksimum Çekme		Karbon/epoksi	Cam/epoksi	2	149,09
Minimum Basma		Cam/epoksi	Cam/epoksi	3	69,74
Maksimum Basma		Karbon/epoksi	Cam/epoksi	1	178,92

Çekme doğrultusu olan X yönündeki modelin tamamındaki maksimum çekme gerilmelerinde oryantasyon açılarına göre değerlendirme yapılmış ve en yüksek değerden en düşük değere doğru sıralanmıştır. Bu sıralama sonucunda $[0^\circ / 0^\circ]_8$ için 201,83 MPa, $[30^\circ / -30^\circ]_8$ için 149,09 MPa ve $[45^\circ / -45^\circ]_8$ için 129,48 MPa şeklinde bir dağılım elde edilmiştir. Basma gerilmelerinde de 196,46 MPa, 178,92 MPa ve 105,19 MPa ile yine aynı dizilim sırasında görülmüştür.

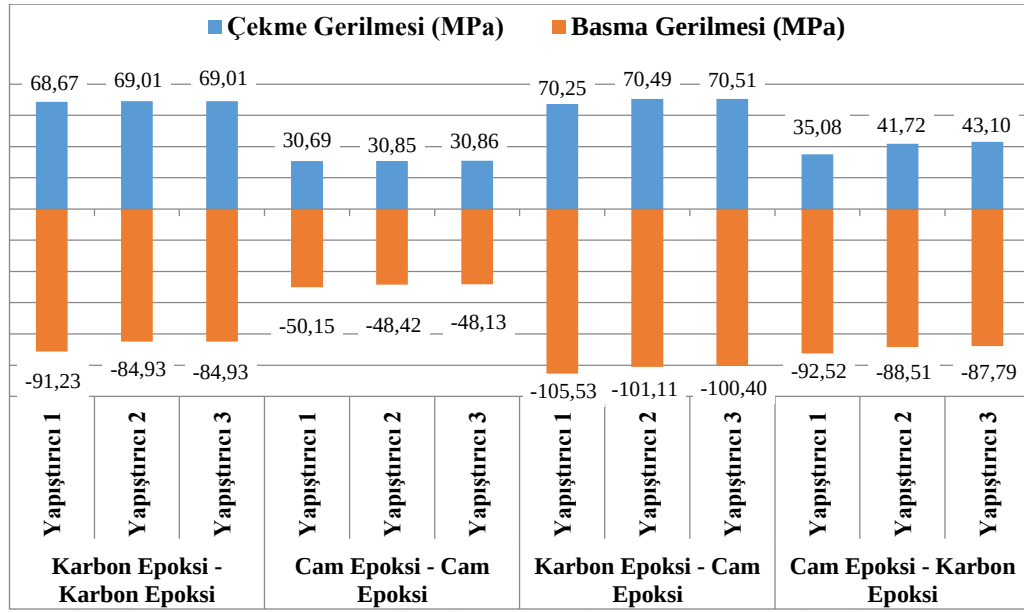
Modelin tamamındaki gerilme değerlerine göre burada kullanılan üç yapıştırıcı için gerilmeler açısından çok büyük bir fark görülmemiştir. Yapıştırıcı için Elastisite modülü yüksek ($E=50\ 000$ MPa) ve düşük ($E=10$ MPa) olan iki farklı yapıştırırmalı bağlantı modeli oluşturulmuş ve analiz bu modellerle gerçekleştirilmiştir.

Yapıştırıcı için Elastisite modülü $E=10$ MPa ve $E=50000$ MPa seçilerek alt tabaka Karbon/Epoksi üst tabaka Karbon/Epoksi oryantasyon açısı $(45^\circ / -45^\circ)_8$ olan modelde analiz sonuçları Şekil 4.5 'te gösterilmiştir.

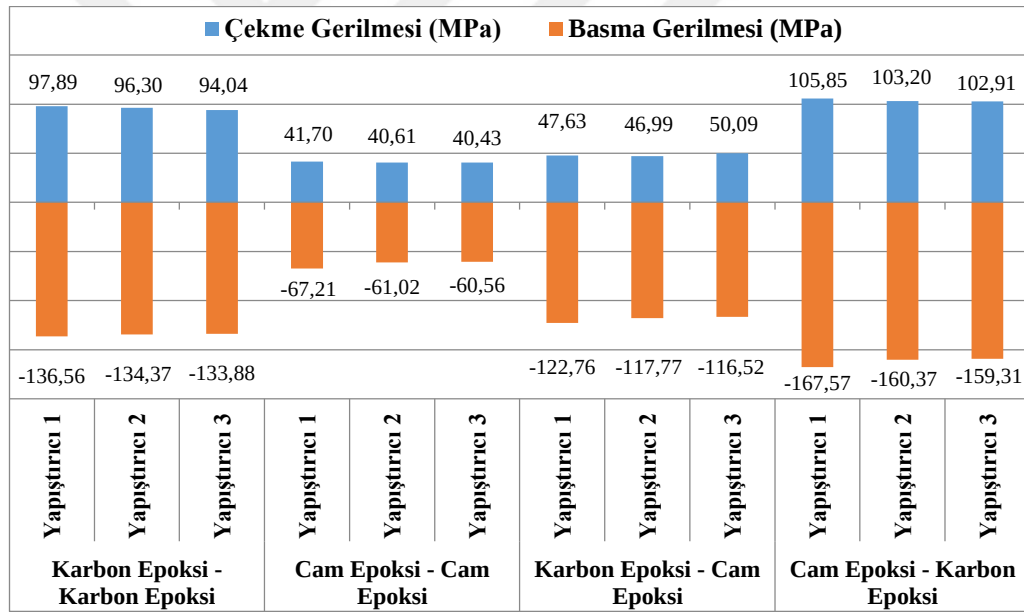


Şekil 4.5. Elastisite modülü değerleri denemesi.

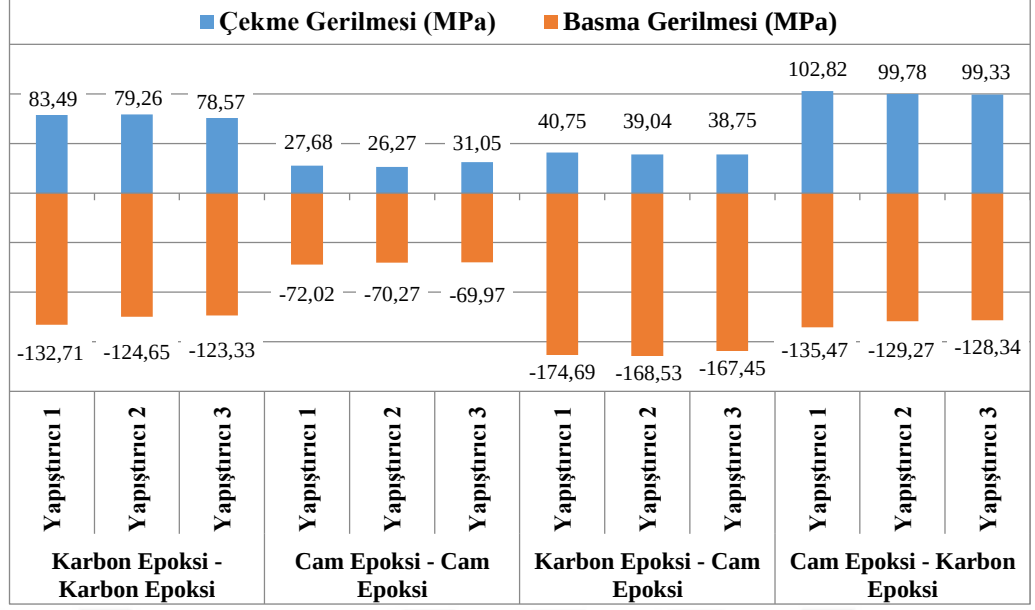
Oluşturulan modellerin analizi sonucu Y yönünde oluşan normal gerilmeler çıkarılmış ve Şekil 4.6, 4.7 ve 4.8 'te grafikler halinde verilmiştir.



Şekil 4.6. Model 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 7 - 8 - 9 - 10 - 11 - 12 Y yönünde normal gerilmeler (Oryantasyon açısı $[45^{\circ}/-45^{\circ}]_8$).



Şekil 4.7. Model 13 - 14 - 15 - 16 - 17 - 18 - 19 - 20 - 21 - 22 - 23 - 24 Y yönünde normal gerilmeler (Oryantasyon açısı $[0^{\circ}/0^{\circ}]_8$).



Şekil 4.8. Model 25 - 26 - 27 - 28 - 29 - 30 - 31 - 32 - 33 - 34 - 35 - 36 Y yönünde normal gerilmeler (Oryantasyon açısı $[30^\circ/-30^\circ]_8$).

Oluşturulan 36 model arasında modelin tamamındaki Y yönündeki normal gerilme değerleri incelendiğinde her oryantasyon açısı için minimum ve maksimum çekme ve basma gerilmeleri Çizelge 4.4, Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6 'da verilmiştir.

Çizelge 4.4. Y yönündeki $[45^\circ/-45^\circ]_8$ oryantasyon açısında minimum ve maksimum çekme ve basma gerilmeleri.

	Oryantasyon Açısı	Alt Plaka	Üst Plaka	Yapıştırıcı	Gerilme (MPa)
Min. Çekme	$[45^\circ/-45^\circ]_8$	Cam/epoksi	Cam/epoksi	1	30,69
Maks. Çekme		Karbon/epoksi	Cam/epoksi	3	70,51
Min. Basma		Cam/epoksi	Cam/epoksi	3	48,13
Maks. Basma		Karbon/epoksi	Cam/epoksi	1	105,53

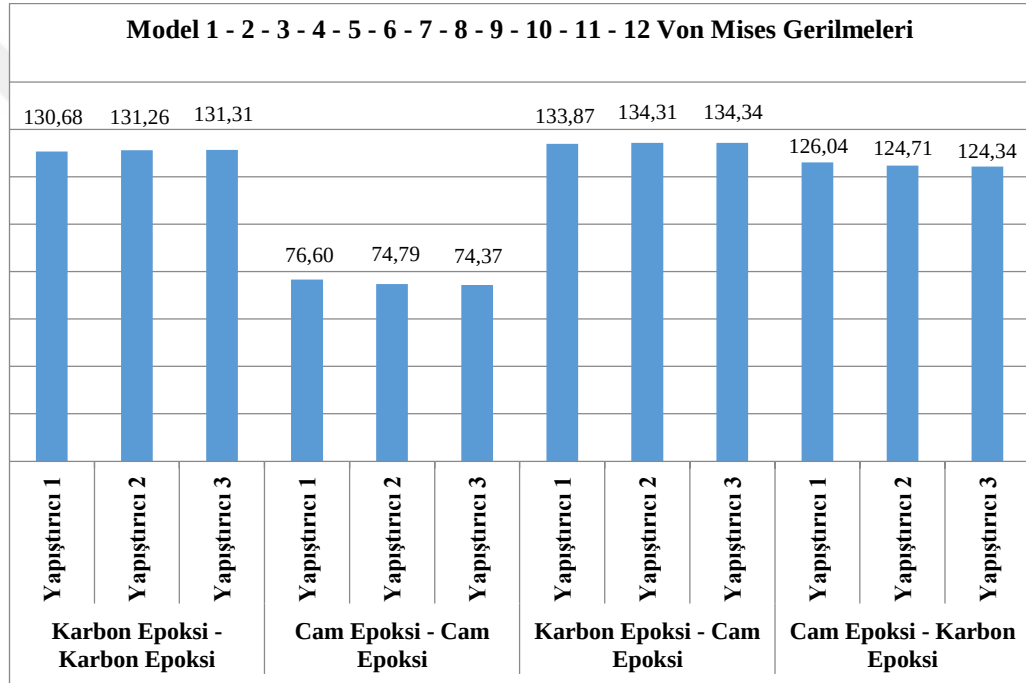
Çizelge 4.5. Y yönündeki $[0^\circ/-0^\circ]_8$ oryantasyon açısında minimum ve maksimum çekme ve basma gerilmeleri.

	Oryantasyon Açısı	Alt Plaka	Üst Plaka	Yapıştırıcı	Gerilme (MPa)
Min. Çekme	$[0^\circ/0^\circ]_8$	Cam/epoksi	Cam/epoksi	3	40,43
Maks. Çekme		Cam/epoksi	Karbon/epoksi	1	105,85
Min. Basma		Cam/epoksi	Cam/epoksi	3	60,56
Maks. Basma		Cam/epoksi	Karbon/epoksi	1	167,57

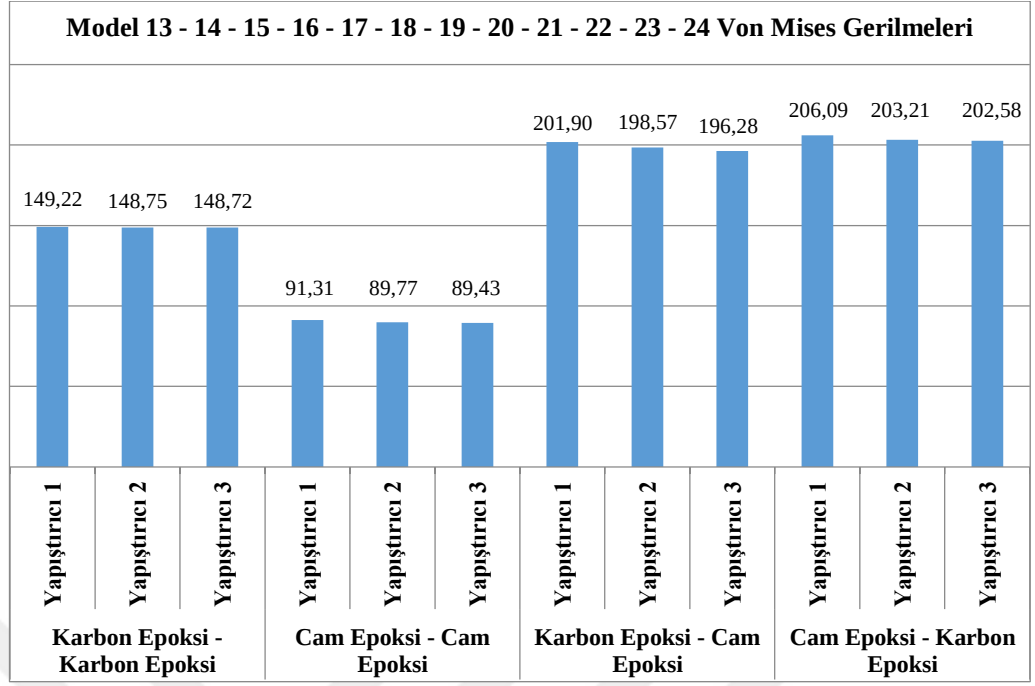
Çizelge 4.6. Y yönündeki $[30^\circ/-30^\circ]_8$ oryantasyon açısında minimum ve maksimum çekme ve basma gerilmeleri.

	Oryantasyon Açısı	Alt Plaka	Üst Plaka	Yapıştırıcı	Gerilme (MPa)
Min. Çekme	$[30^\circ/-30^\circ]_8$	Cam/epoksi	Cam/epoksi	2	26,27
Maks. Çekme		Cam/epoksi	Karbon/epoksi	1	102,82
Min. Basma		Cam/epoksi	Cam/epoksi	3	69,97
Maks. Basma		Karbon/epoksi	Cam/epoksi	1	174,69

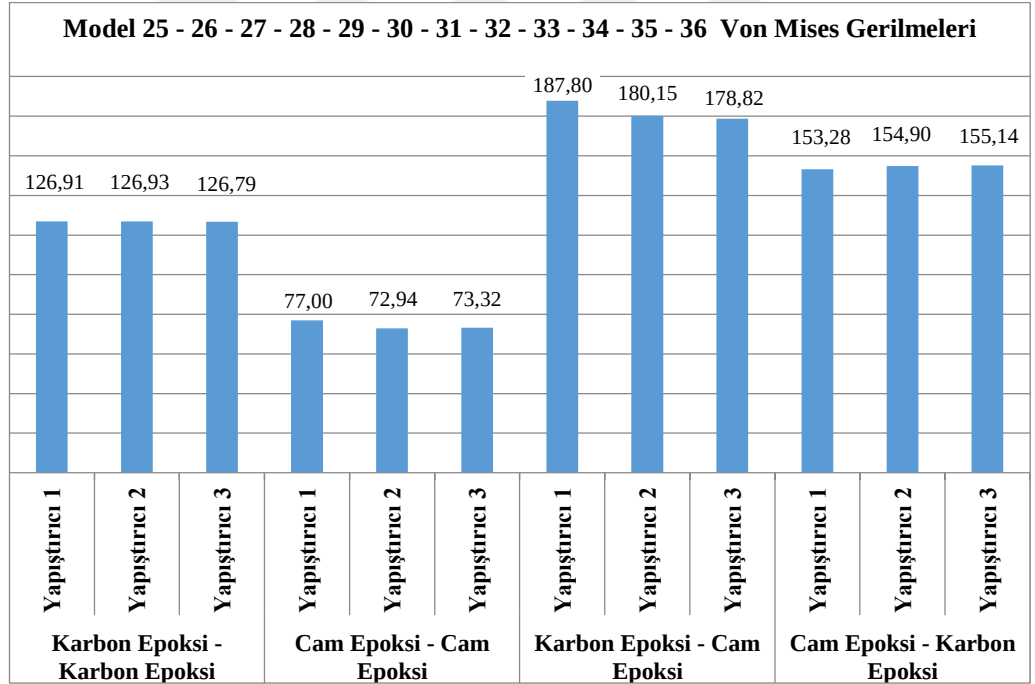
Oluşturulan modellerin analizi sonucu Von Mises gerilmeleri çıkarılmış ve Şekil 4.9, 4.10 ve 4.11 ‘de grafikler halinde verilmiştir.



Şekil 4.9. Model 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 7 - 8 - 9 - 10 - 11 - 12 Von Mises gerilmeleri (Oryantasyon açısı $[45^\circ/-45^\circ]_8$).



Şekil 4.10. Model 13 - 14 - 15 - 16 - 17 - 18 - 19 - 20 - 21 - 22 - 23 - 24 Von Mises gerilmeleri (Oryantasyon açısı $[0^\circ/0^\circ]_8$).



Şekil 4.11. Model 25 - 26 - 27 - 28 - 29 - 30 - 31 - 32 - 33 - 34 - 35 - 36 Von Mises gerilmeleri (Oryantasyon açısı $[30^\circ/-30^\circ]_8$).

Modelin tamamındaki Von Mises gerilmeleri incelendiğinde her oryantasyon açısı için maksimum ve minimum değerler Çizelge 4.7 'de verilmiştir.

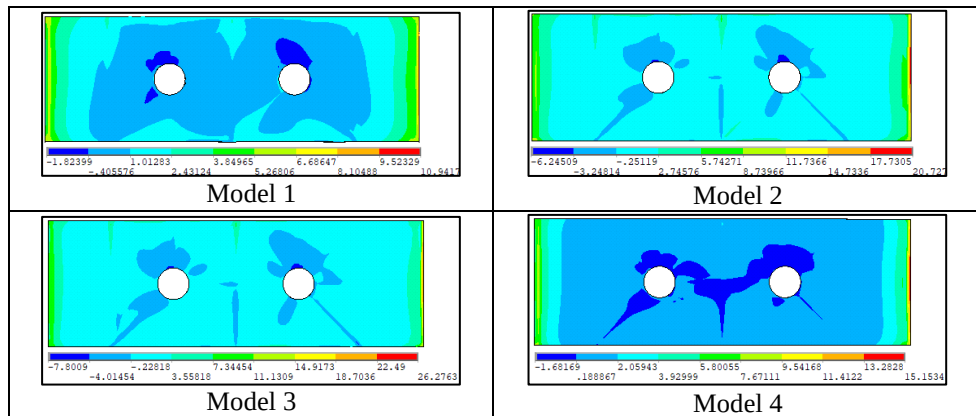
Çizelge 4.7. Minimum ve maksimum Von Mises gerilmeleri.

	Oryantasyon Açısı	Alt Plaka	Üst Plaka	Yapıştırıcı	Gerilme (MPa)
Minimum Von Mises	[45°/-45°] ₈	Cam/epoksi	Cam/epoksi	3	74,37
Maksimum Von Mises		Karbon/epoksi	Cam/epoksi	3	134,34
Minimum Von Mises	[0° / 0°] ₈	Cam/epoksi	Cam/epoksi	3	89,43
Maksimum Von Mises		Cam/epoksi	Karbon/epoksi	1	206,09
Minimum Von Mises	[30°/-30°] ₈	Cam/epoksi	Cam/epoksi	2	72,94
Maksimum Von Mises		Karbon/epoksi	Cam/epoksi	1	187,80

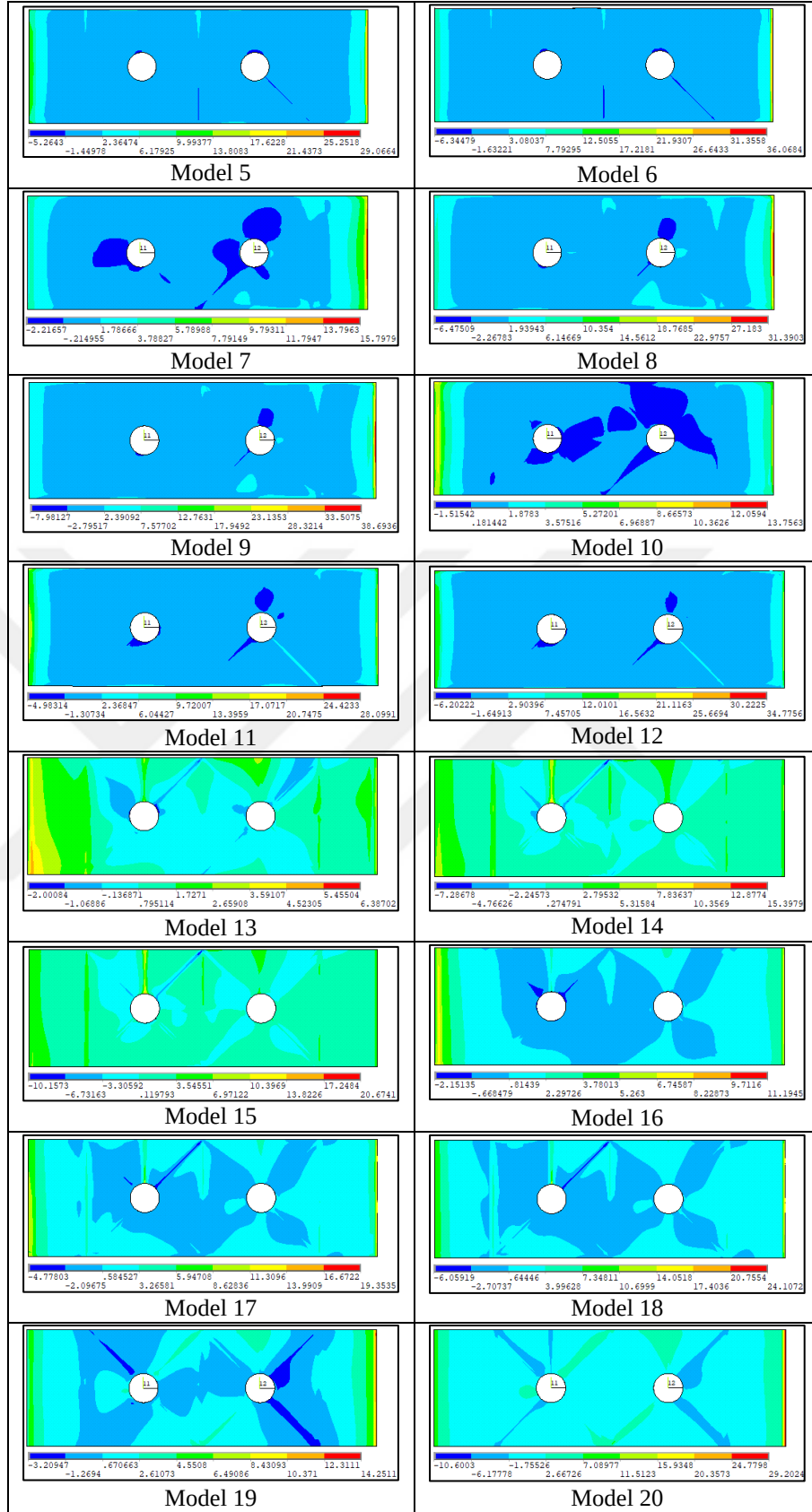
Maksimum Von Mises gerilmelerine göre değerlendirme yapılmış ve en yüksek değerden en düşük değere doğru sıralandığında X yönündeki gerilmelere benzer şekilde [0° / 0°]₈ için 206,09 MPa, [30° / -30°]₈ için 187,80 MPa ve [45° / -45°]₈ için 134,34 MPa şeklinde bir dağılım elde edilmiştir.

4.2 Çekme Yüğü Sonucu Yapıştırıcı Tabakasındaki Bulgular

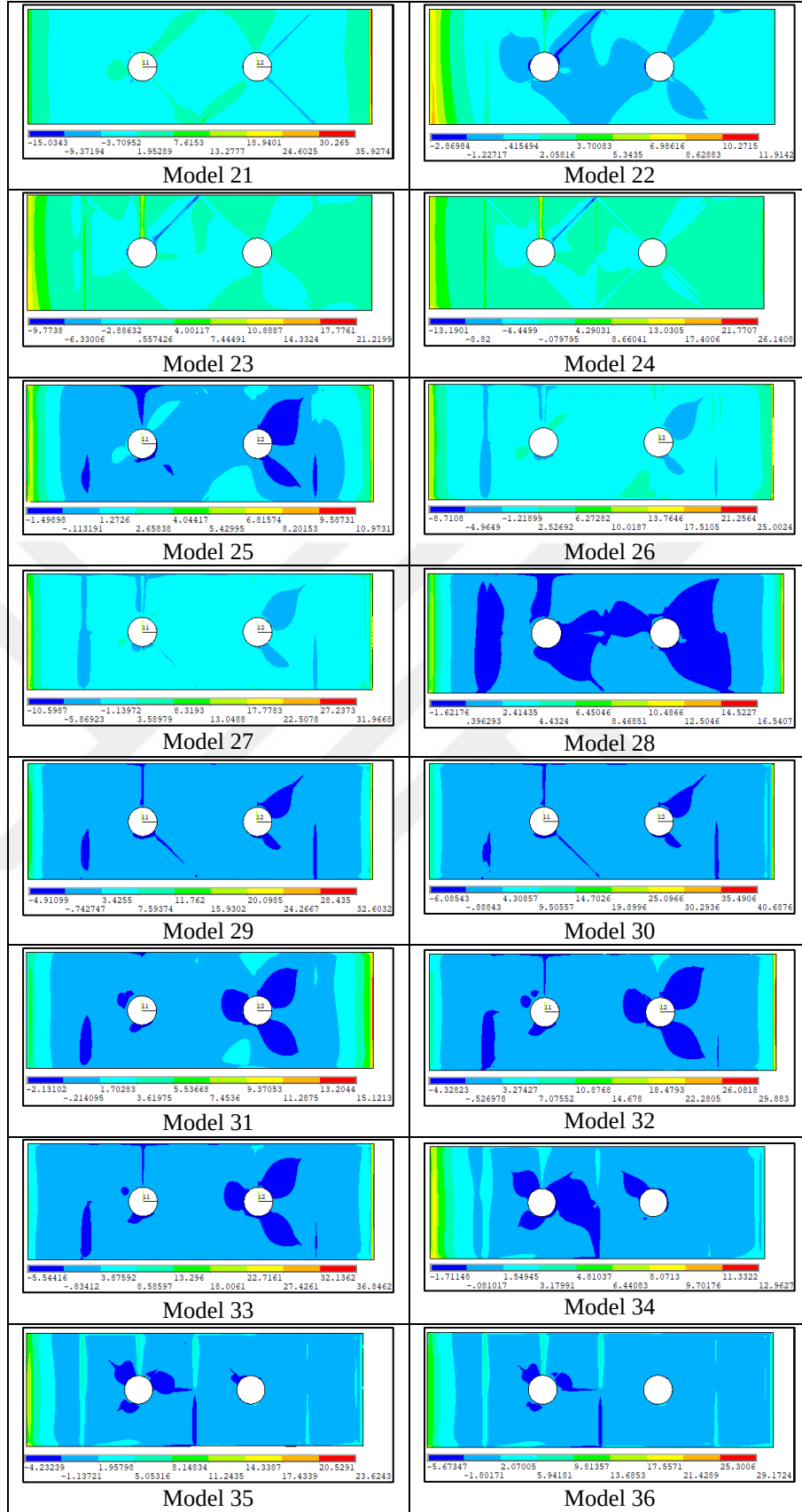
Oluşturulan modellerin analizi sonucu yapıştırıcı XZ yönünde kesmeye zorlandığı için bu eksendeki oluşan kayma gerilmeleri çıkarılmış ve Şekil 4.12 ‘de gerilme dağılımlarını gösteren görseller halinde verilmiştir.



Şekil 4.12. Yapıştırıcıda XZ yönünde oluşan kayma gerilmeleri.



Şekil 4.12 (devam). Yapıştırıcıda XZ yönünde oluşan kayma gerilmeleri.

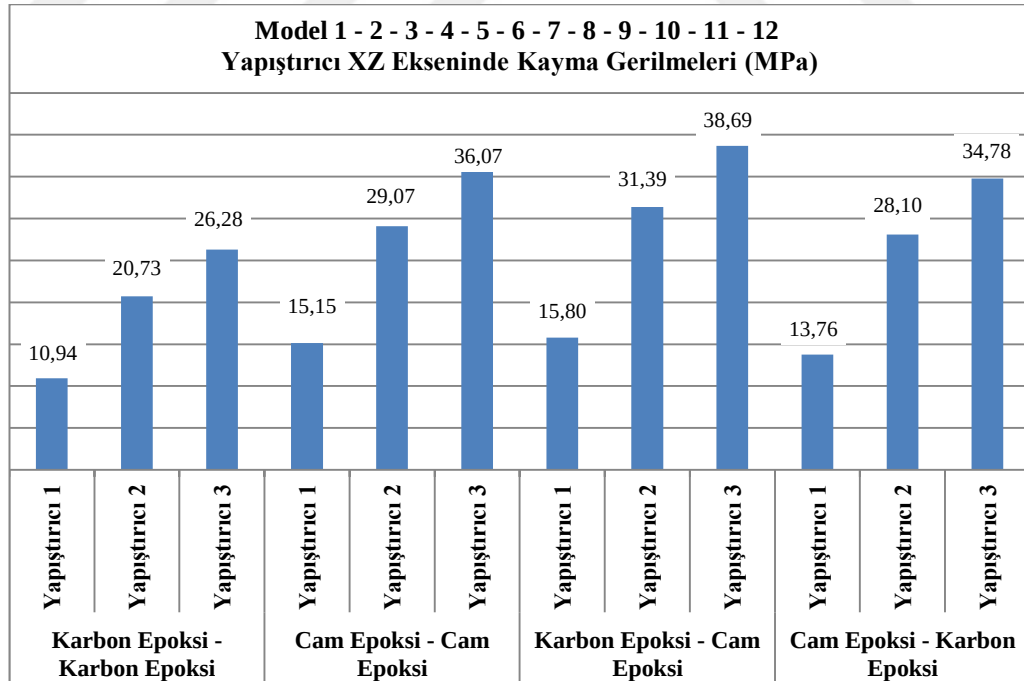


Şekil 4.12 (devam). Yapıştırıcıda XZ yönünde oluşan kayma gerilmeleri.

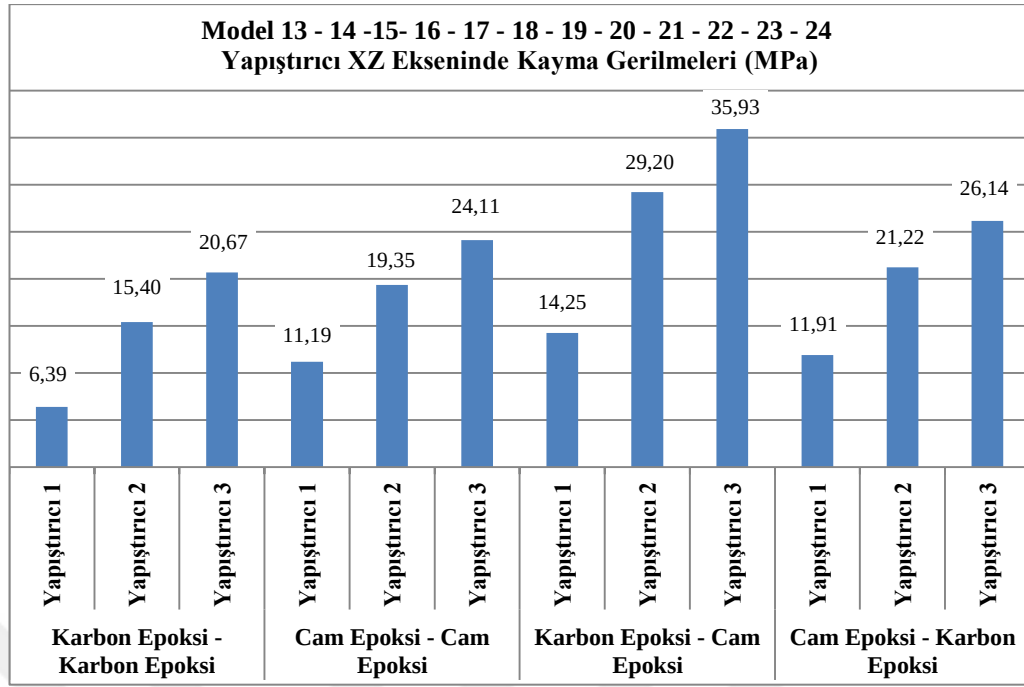
Çizelge 4.8. Yapıştırıcı Elastisite modülüne göre maksimum XZ yönünde kayma gerilmeleri değişimi.

XZ Yönünde Kayma Gerilmesi (MPa)					
Yapıştırıcı 1 (E=670 MPa)		Yapıştırıcı 2 (E=3300 MPa)		Yapıştırıcı 3 (E=5000 MPa)	
Model 1	10,94	Model 2	20,73	Model 3	26,28
Model 4	15,15	Model 5	29,07	Model 6	36,07
Model 7	15,80	Model 8	31,39	Model 9	38,69
Model 10	13,76	Model 11	28,10	Model 12	34,78
Model 13	6,39	Model 14	15,40	Model 15	20,67
Model 16	11,19	Model 17	19,35	Model 18	24,11
Model 19	14,25	Model 20	29,20	Model 21	35,93
Model 22	11,91	Model 23	21,22	Model 24	26,14
Model 25	10,97	Model 26	25,00	Model 27	31,97
Model 28	16,54	Model 29	32,60	Model 30	40,69
Model 31	15,12	Model 32	29,88	Model 33	36,86
Model 34	12,96	Model 35	23,62	Model 36	29,17

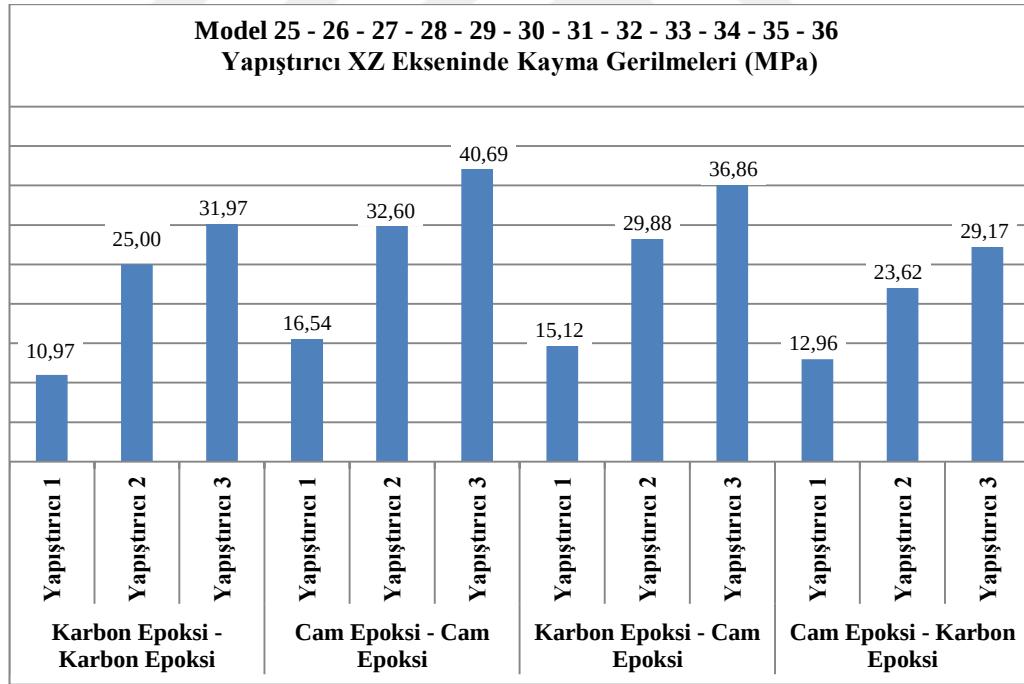
Yapıştırıcıdaki XZ yönünde kayma gerilme değerleri Çizelge 4.8 ‘de verilen gerilme değerlerinden anlaşılacağı gibi yapıştırıcıdaki Elastisite modülü artışı ile XZ yönündeki maksimum gerilmelerde artmıştır.



Şekil 4.13. Model 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 7 - 8 - 9 - 10 - 11 - 12 yapıştırıcı XZ ekseninde kayma gerilmeleri (Oryantasyon açısı $[45^\circ/-45^\circ]_8$).



Şekil 4.14. Model 12 - 13 - 14 - 15 - 16 - 17 - 18 - 19 - 20 - 21 - 22 - 23 - 24 yapıştırıcı XZ ekseninde kayma gerilmeleri (Oryantasyon açısı $[0^\circ/0^\circ]_8$).



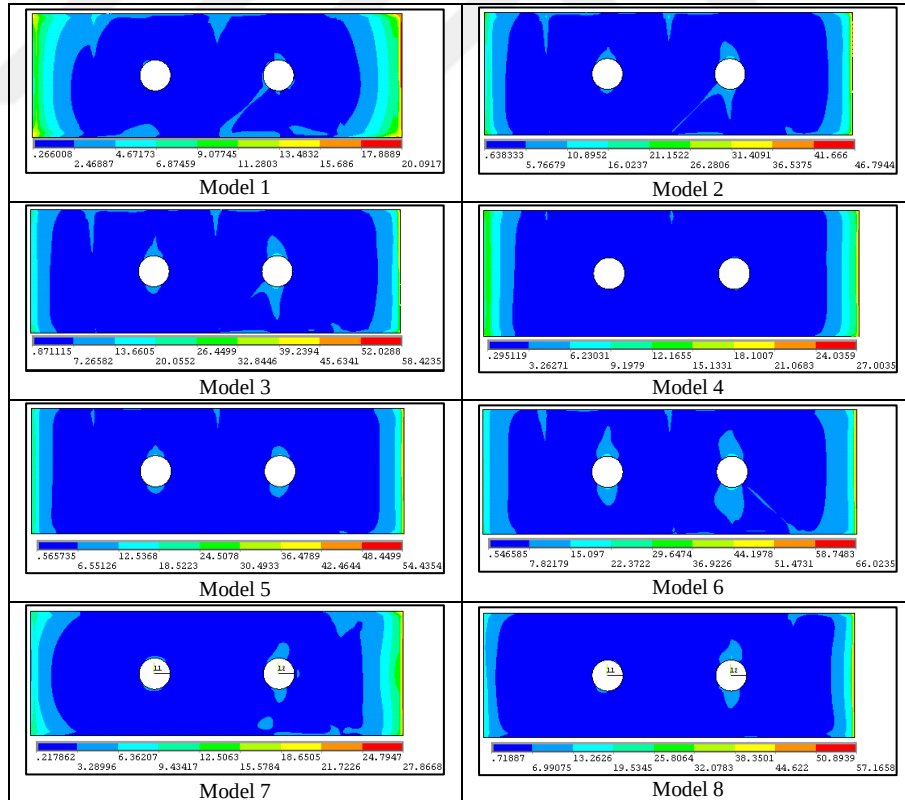
Şekil 4.15. Model 24 - 25 - 26 - 27 - 28 - 29 - 30 - 31 - 32 - 33 - 34 - 35 - 36 yapıştırıcı XZ ekseninde kayma gerilmeleri (Oryantasyon açısı $[30^\circ/-30^\circ]_8$).

Yapıştırıcı tabakasındaki XZ yönündeki kayma gerilme değerleri incelendiğinde minimum ve maksimum kayma gerilmeleri Çizelge 4.9 'da verilmiştir.

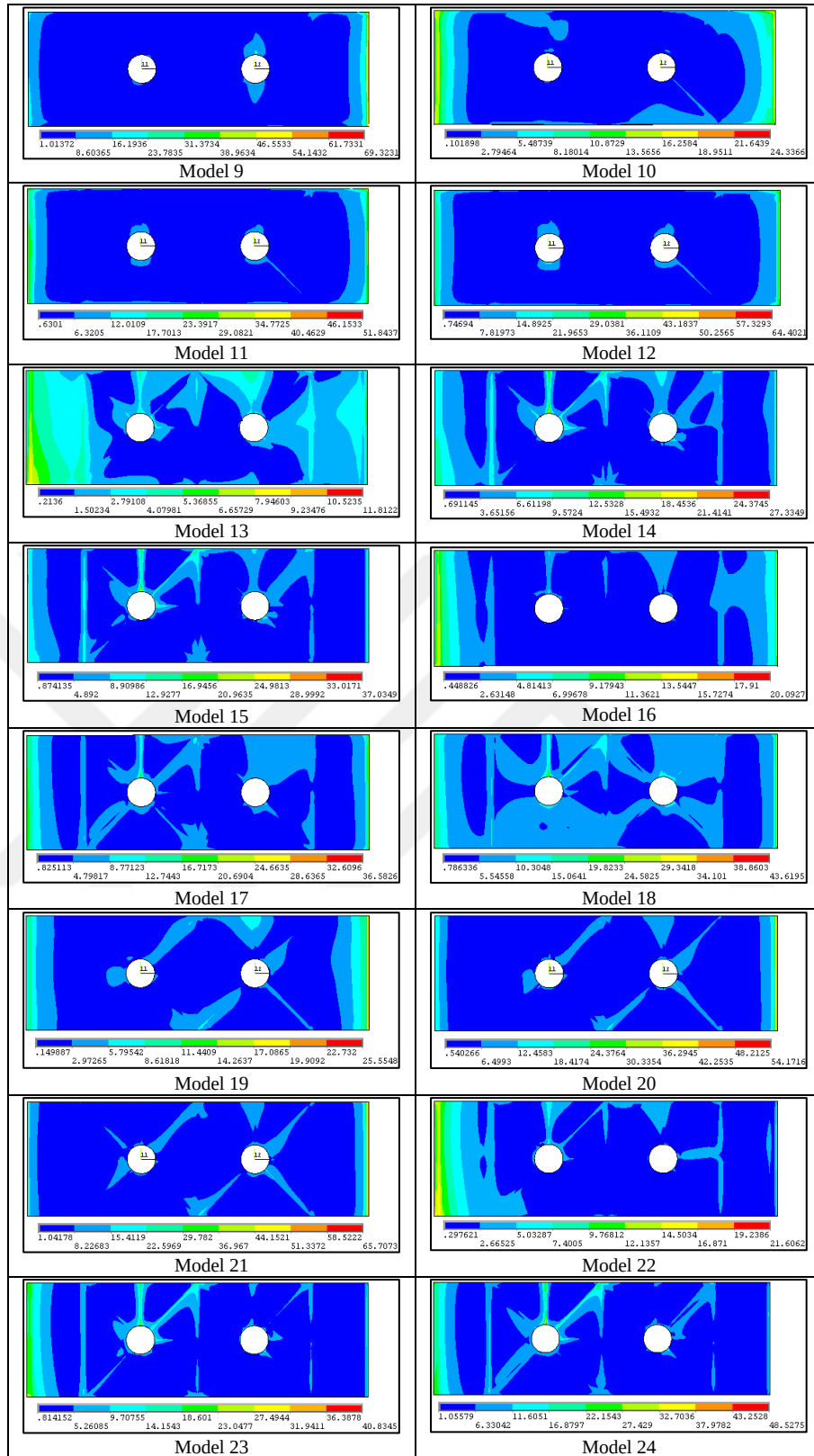
Çizelge 4.9. Yapıştırıcıda XZ yönünde oluşan oryantasyon açısına göre minimum ve maksimum kayma gerilmeleri.

	Oryantasyon Açısı	Alt Plaka	Üst Plaka	Yapıştırıcı	Gerilme (MPa)
Maks. Kayma	[45°/-45°] ₈	Karbon/epoksi	Cam/epoksi	3	38,69
Min. Kayma		Karbon/epoksi	Karbon/epoksi	1	10,94
Maks. Kayma	[0° / 0°] ₈	Karbon/epoksi	Cam/epoksi	3	35,93
Min. Kayma		Karbon/epoksi	Karbon/epoksi	1	6,39
Maks. Kayma	[30°/-30°] ₈	Cam/epoksi	Cam/epoksi	3	40,69
Min. Kayma		Karbon/epoksi	Karbon/epoksi	1	10,97

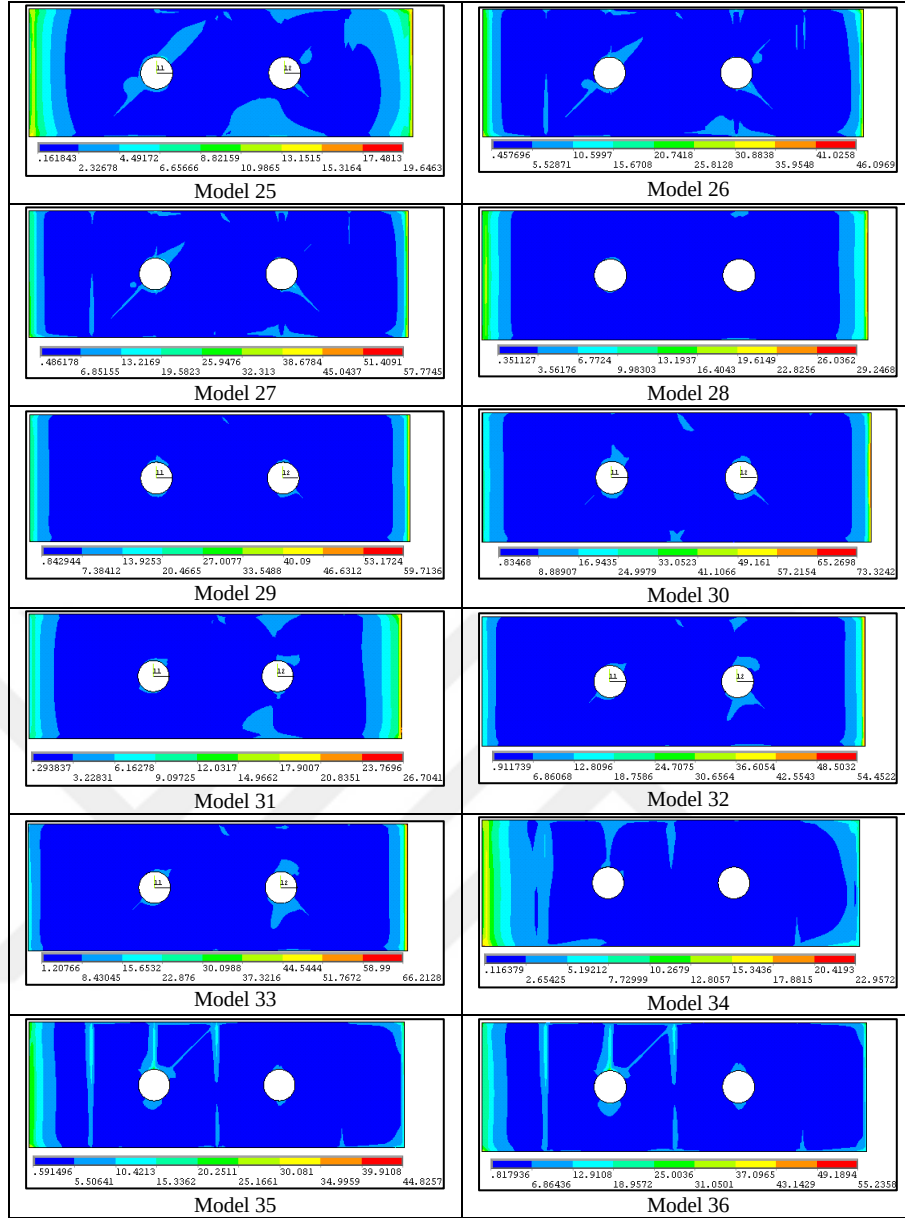
Oluşturulan modellerin analizi sonucu yapıştırıcıda oluşan Von Mises gerilmeleri çıkarılmış ve Şekil 4.16 'da gerilme dağılımları görseller halinde verilmiştir.



Şekil 4.16. Yapıştırıcıda oluşan Von Mises gerilmeleri.



Şekil 4.16 (devam). Yapıştırıcıda oluşan Von Mises gerilmeleri.

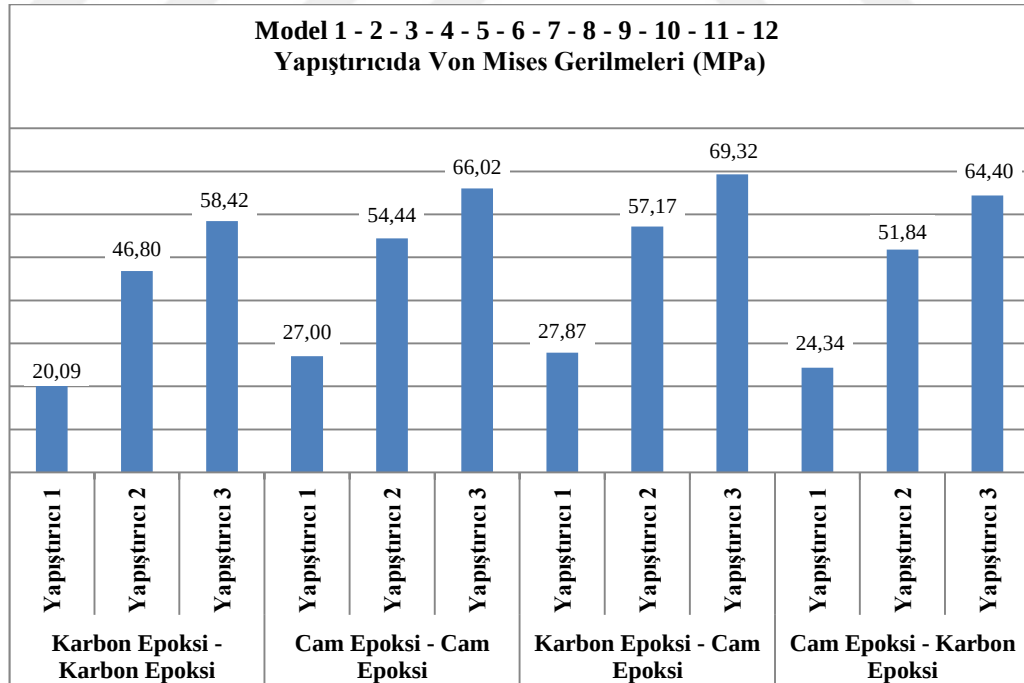


Şekil 4.8 (devam). Yapıştırıcıda oluşan Von Mises gerilmeleri.

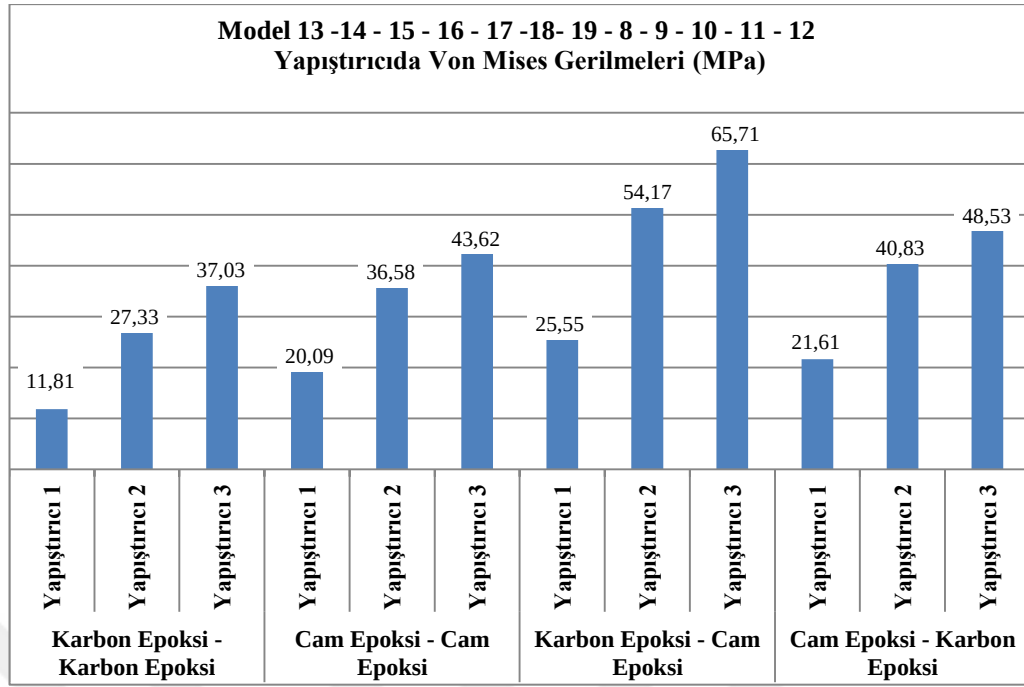
Çizelge 4.10. Yapıştırıcı Elastisite modülüne göre maksimum Von Mises gerilmeleri değişimi.

Von Mises Gerilmesi					
Yapıştırıcı 1 (E=670 MPa)		Yapıştırıcı 2 (E=3300 MPa)		Yapıştırıcı 3 (E=5000 MPa)	
Model 1	20,09 MPa	Model 2	46,80 MPa	Model 3	58,42 MPa
Model 4	27,00 MPa	Model 5	54,44 MPa	Model 6	66,02 MPa
Model 7	27,87 MPa	Model 8	57,17 MPa	Model 9	69,32 MPa
Model 10	24,34 MPa	Model 11	51,84 MPa	Model 12	64,40 MPa
Model 13	11,81 MPa	Model 14	27,33 MPa	Model 15	37,03 MPa
Model 16	20,09 MPa	Model 17	36,58 MPa	Model 18	43,62 MPa
Model 19	25,55 MPa	Model 20	54,17 MPa	Model 21	65,71 MPa
Model 22	21,61 MPa	Model 23	40,83 MPa	Model 24	48,53 MPa
Model 25	19,65 MPa	Model 26	46,10 MPa	Model 27	57,77 MPa
Model 28	29,25 MPa	Model 29	59,71 MPa	Model 30	73,32 MPa
Model 31	26,70 MPa	Model 32	54,45 MPa	Model 33	66,21 MPa
Model 34	22,96 MPa	Model 35	44,83 MPa	Model 36	55,24 MPa

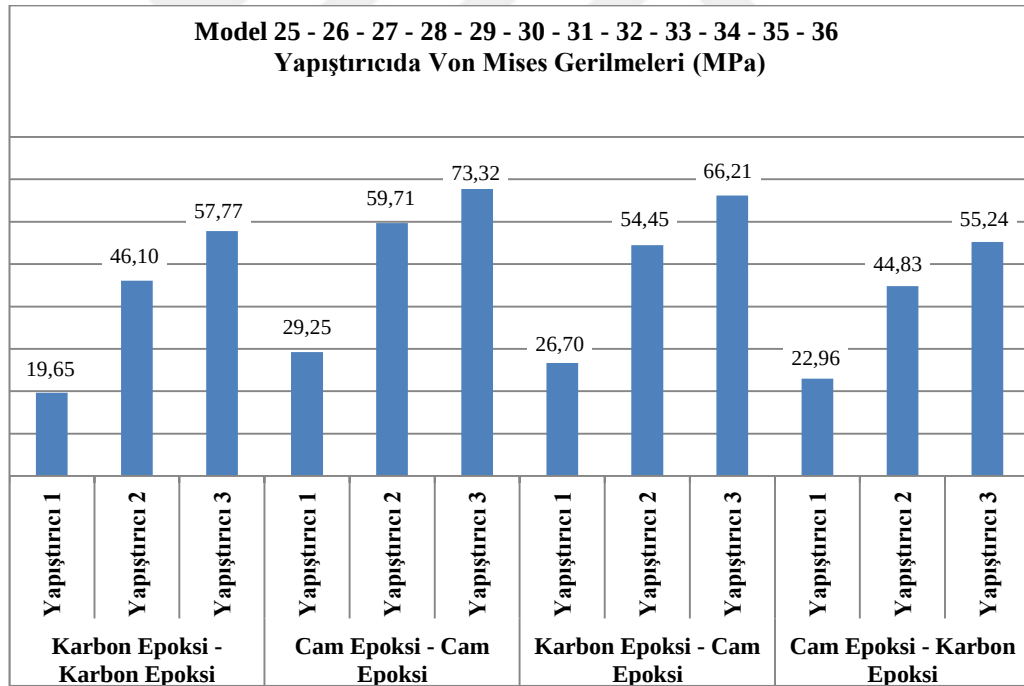
Yapıştırıcıdaki Von Mises gerilme değerleri Şekil 4.17, 4.18 ve 4.19 ‘da grafiklerde verilen gerilmelerden anlaşılabileceği gibi yapıştırıcıdaki Elastisite modülü artışı ile görülen Von Mises gerilmeleri de artmıştır.



Şekil 4.17. Model 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 7 - 8 - 9 - 10 - 11 - 12 yapıştırıcı Von Mises gerilmeleri (Oryantasyon açısı $[45^{\circ}/-45^{\circ}]_8$).



Şekil 4.18. Model 13 - 14 - 15 - 16 - 17 - 18 - 19 - 20 - 21 - 22 - 23 - 24 yapıştırıcı Von Mises gerilmeleri (Oryantasyon açısı $[45^{\circ}/-45^{\circ}]_8$).



Şekil 4.19. Model 25 - 26 - 27 - 28 - 29 - 30 - 31 - 32 - 33 - 34 - 35 - 36 yapıştırıcı Von Mises gerilmeleri (Oryantasyon açısı $[45^{\circ}/-45^{\circ}]_8$).

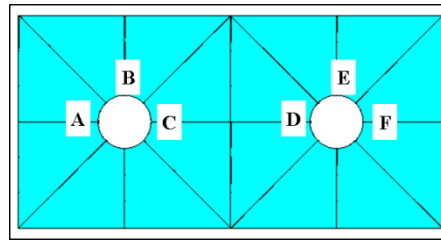
Yapıştırıcı tabakasındaki Von Mises gerilme değerleri incelendiğinde, oryantasyon açısına göre minimum ve maksimum gerilmeler Çizelge 4.11 'de verilmiştir.

Çizelge 4.11.Yapıştırıcıda oluşan oryantasyon açısına göre minimum ve maksimum Von Mises gerilmeleri.

	Oryantasyon Açısı	Alt Plaka	Üst Plaka	Yapıştırıcı	Gerilme (MPa)
Minimum Von Mises	$[45^\circ/-45^\circ]_8$	Karbon/epoksi	Karbon/epoksi	1	20,09
Maksimum Von Mises		Karbon/epoksi	Cam/epoksi	3	69,32
Minimum Von Mises	$[0^\circ / 0^\circ]_8$	Karbon/epoksi	Karbon/epoksi	1	11,81
Maksimum Von Mises		Karbon/epoksi	Cam/epoksi	3	65,71
Minimum Von Mises	$[30^\circ/-30^\circ]_8$	Karbon/epoksi	Karbon/epoksi	1	19,65
Maksimum Von Mises		Cam/epoksi	Cam/epoksi	3	73,32

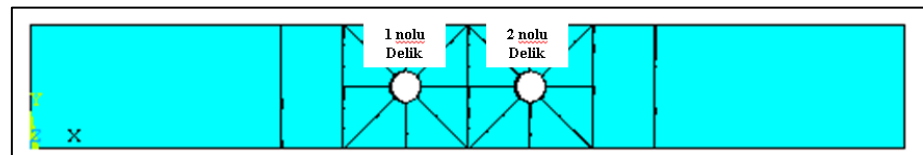
4.3 Çekme Yüğü Sonucu Delik Bölgeleri İçin Elde Edilen Bulgular

Delik bölgelerindeki gerilmeler Şekil 4.20 ‘da gösterilen A-C ve D-F doğrultuları tanımlanarak hesaplanmıştır. Bu doğrultular boyunca dönme açısı A ve D noktalarında $\theta = 0^\circ$, B ve E noktalarında $\theta = 90^\circ$, C ve F noktalarında $\theta = 180^\circ$ olacak şekilde tanımlanmıştır.



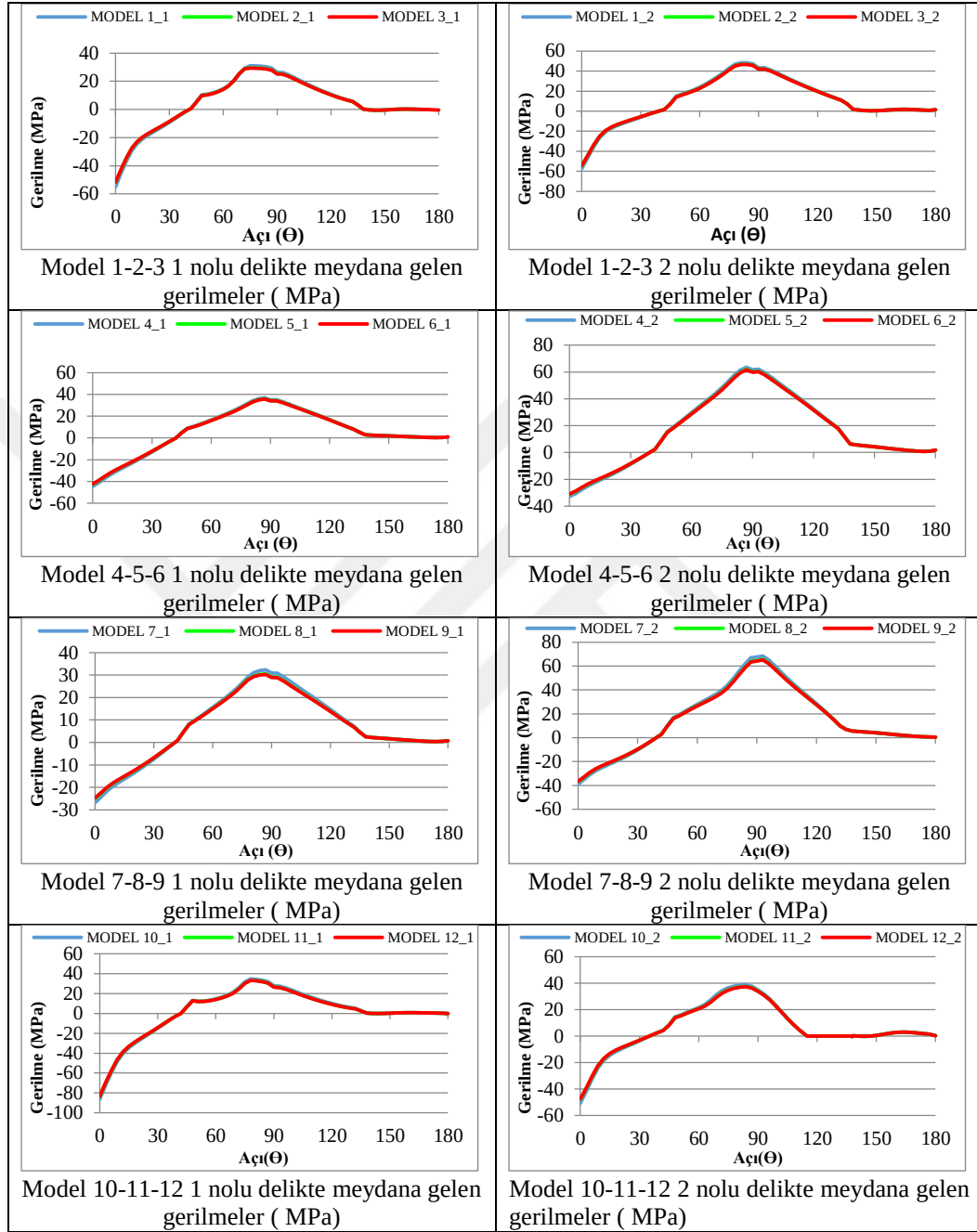
Şekil 4.20. Gerilmelerin tanımlandığı doğrultular.

Deliklerin sabitlenmiş olan uçta olan 1 nolu delik çekme yükünün uygulandığı kısımda olan ise 2 nolu delik olarak adlandırılmıştır. (Şekil 4.21)

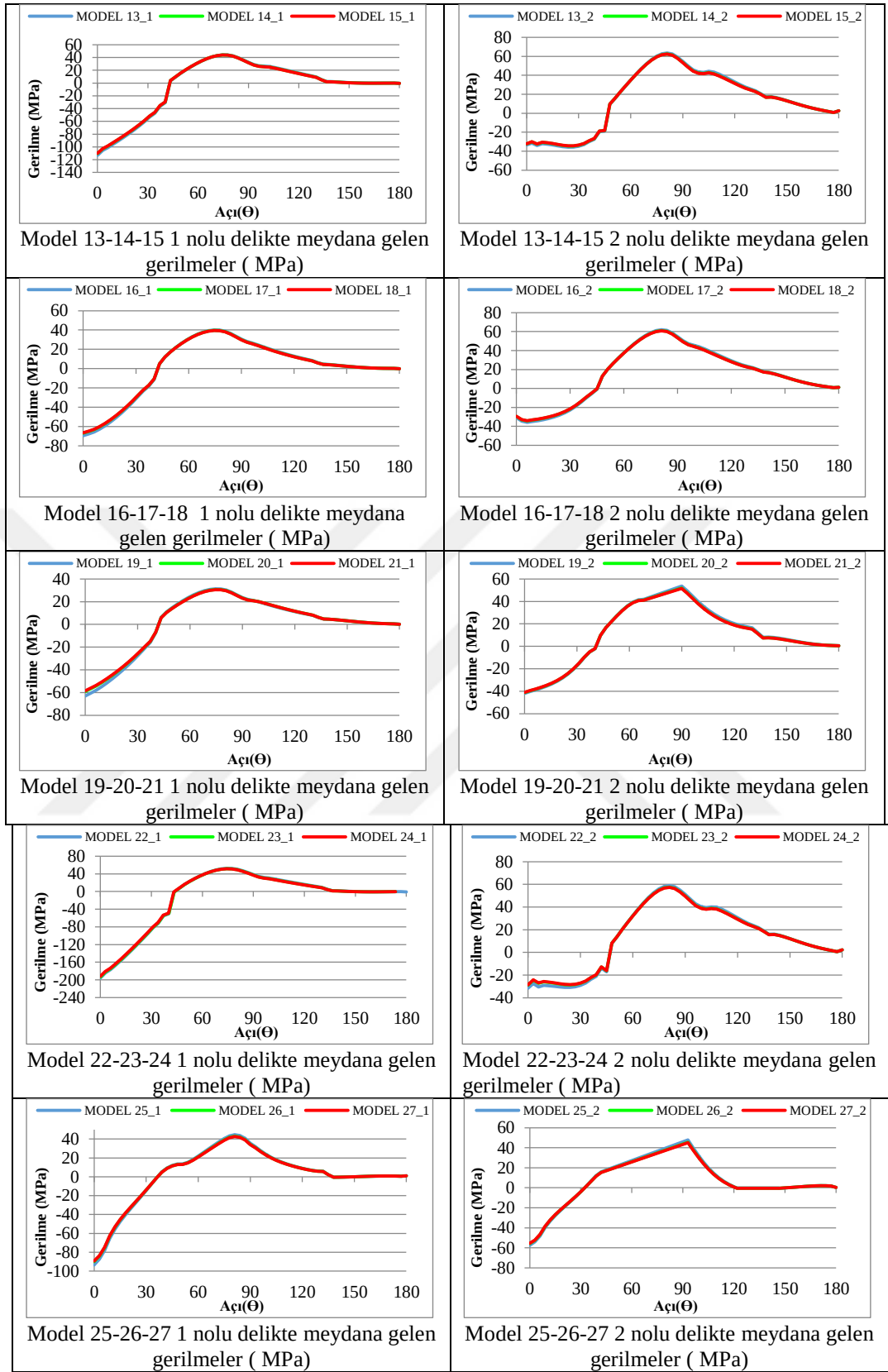


Şekil 4.21. Deliklerde oluşan gerilmeler için deliklerin adlandırılması.

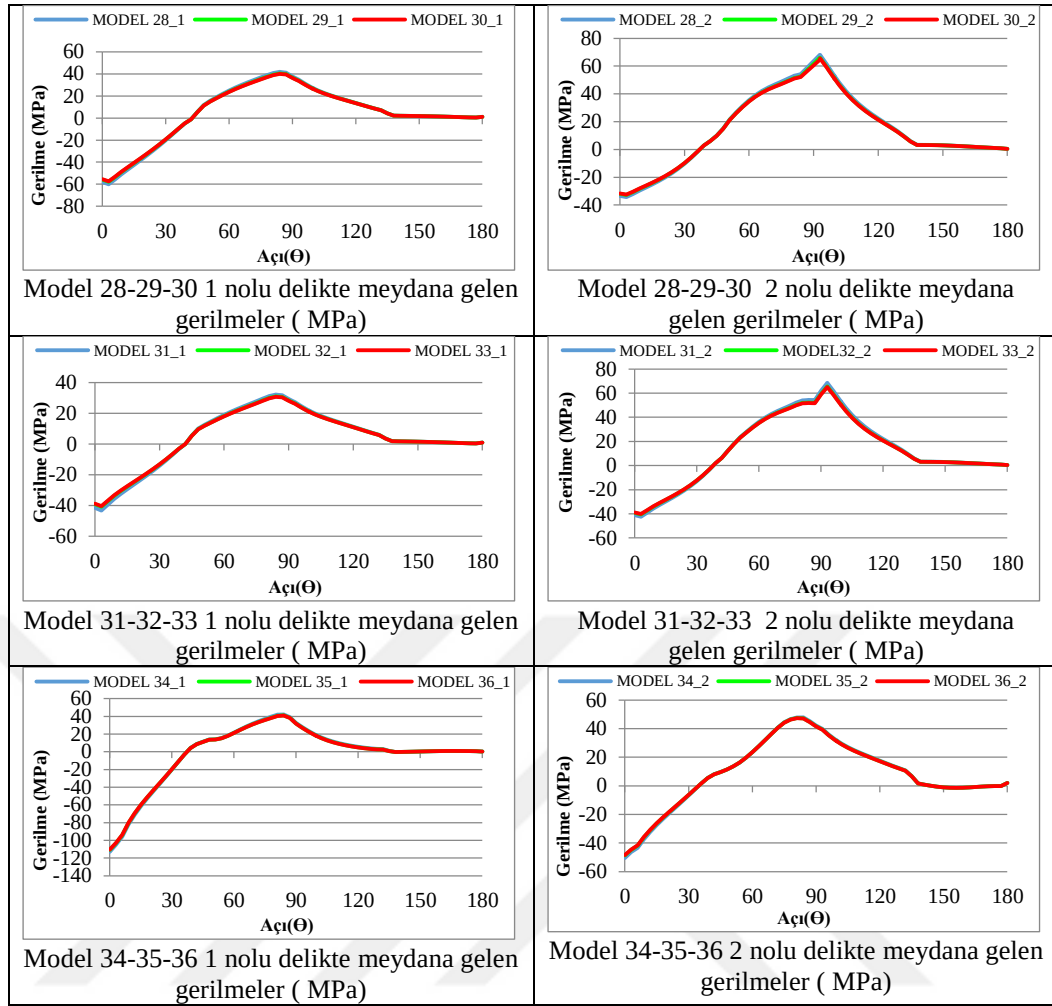
Şekil 4.22 ‘de 1 ve 2 nolu delik bölgeleri için silindirik koordinatlarda meydana gelen gerilme dağılımları verilmiştir.



Şekil 4.22. Çekme yükü uygulanması sonucu deliklerde A-C ve D-F boyunca silindirik koordinatlarda oluşan gerilmelerin grafiksel gösterimi.

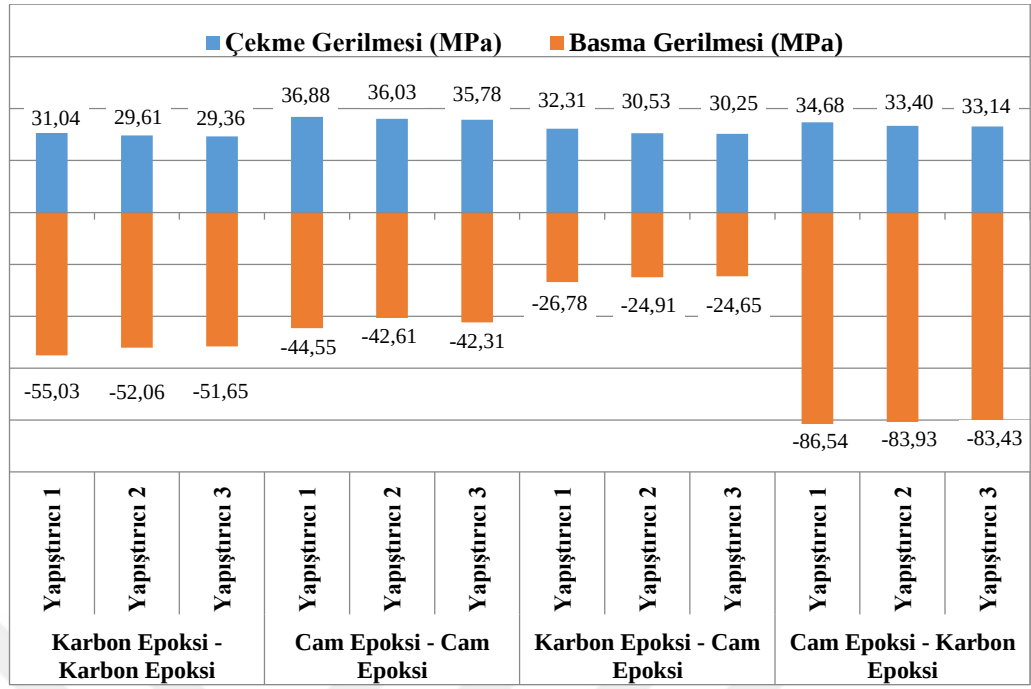


Şekil 4.22 (devam). Çekme yükü uygulanması sonucu deliklerde A-C ve D-F boyunca silindirik koordinatlarda oluşan gerilmelerin grafiksel gösterimi.

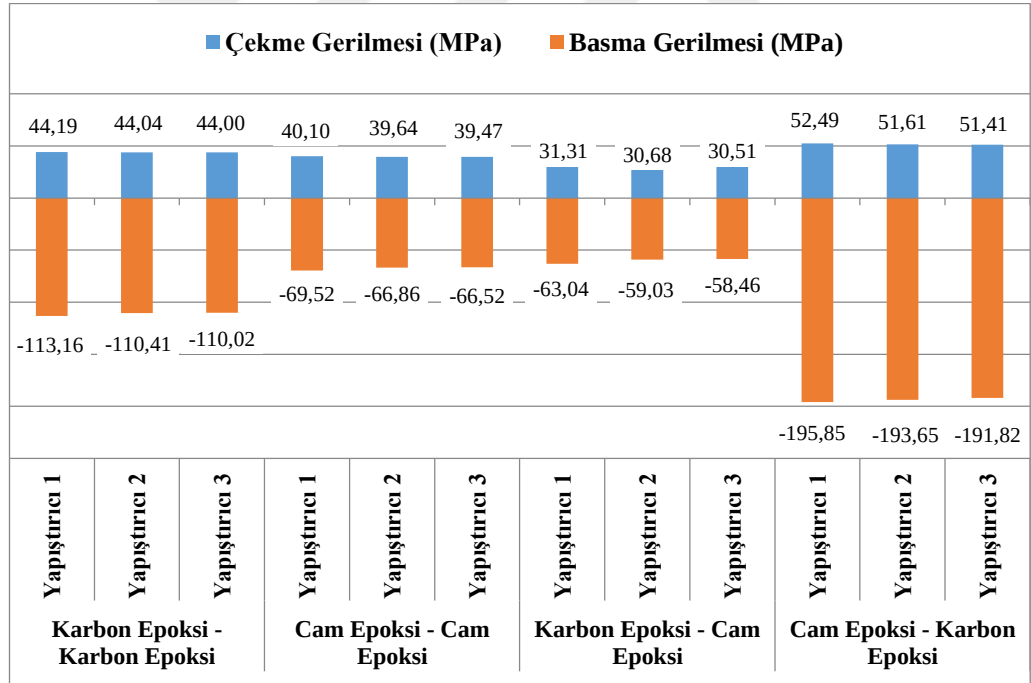


Şekil 4.22 (devam). Çekme yükü uygulanması sonucu deliklerde A-C ve D-F boyunca silindirik koordinatlarda oluşan gerilmelerin grafiksel gösterimi.

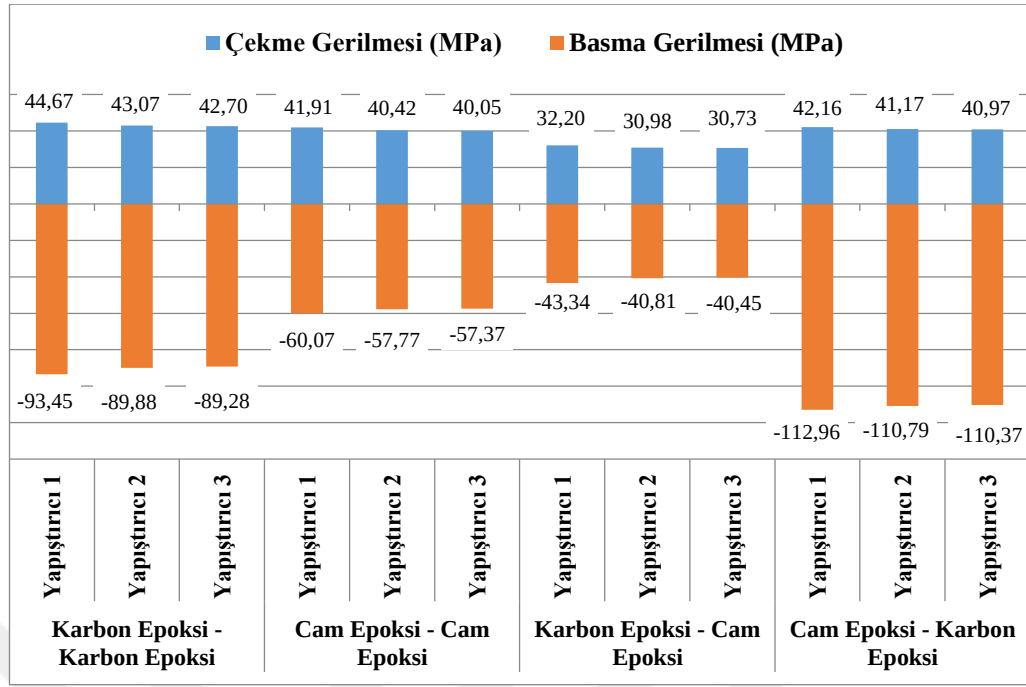
Deliklerde çekme yükü sonucu oluşan çekme ve basma gerilmelerinin maksimum ve minimum değerleri 1 nolu delik için Şekil 4.23, 4.24 ve 4.25 ‘te, 2 nolu delik için Şekil 4.26, 4.27 ve 4.28 ‘de grafikler halinde verilmiştir.



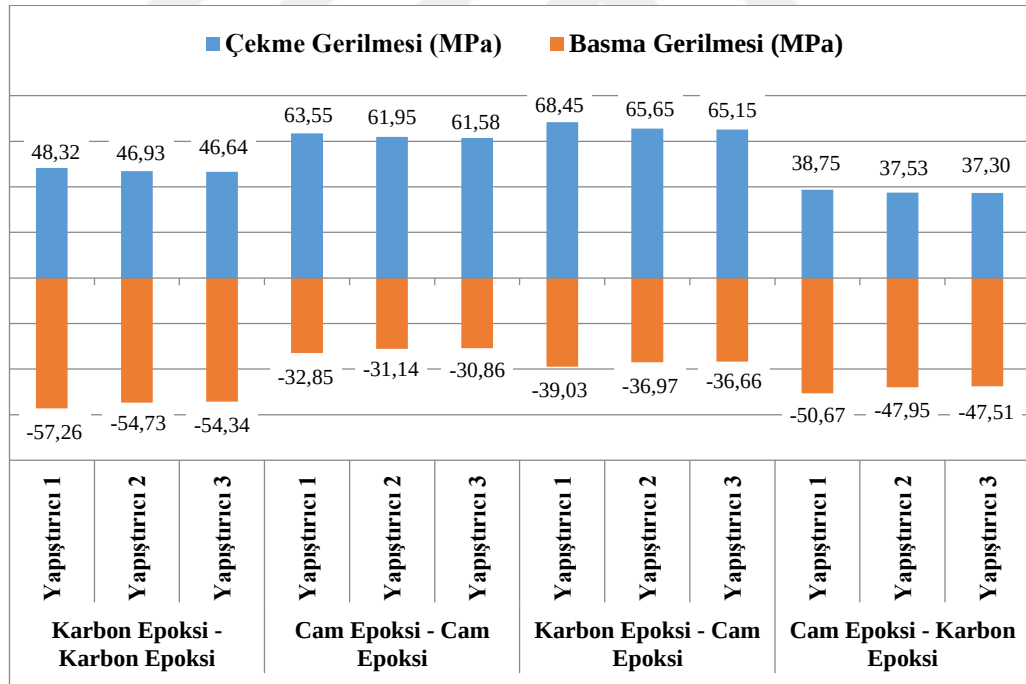
Şekil 4.23. Model 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 7 - 8 - 9 - 10 - 11 - 12 1 nolu delik silindirik koordinatlarda normal gerilmeler (Oryantasyon açısı $[45^{\circ}/-45^{\circ}]_8$).



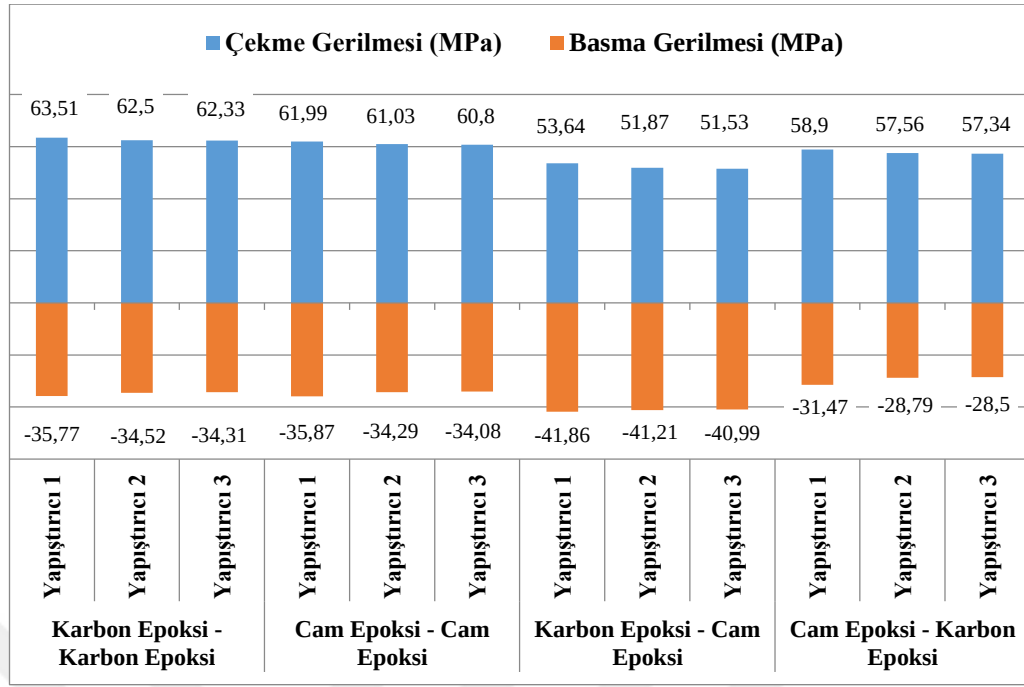
Şekil 4.24. Model 13 - 14 - 15 - 16 - 17 - 18 - 19 - 20 - 21 - 22 - 23 - 24 1 nolu delik silindirik koordinatlarda normal gerilmeler (Oryantasyon açısı $[0^{\circ}/0^{\circ}]_8$).



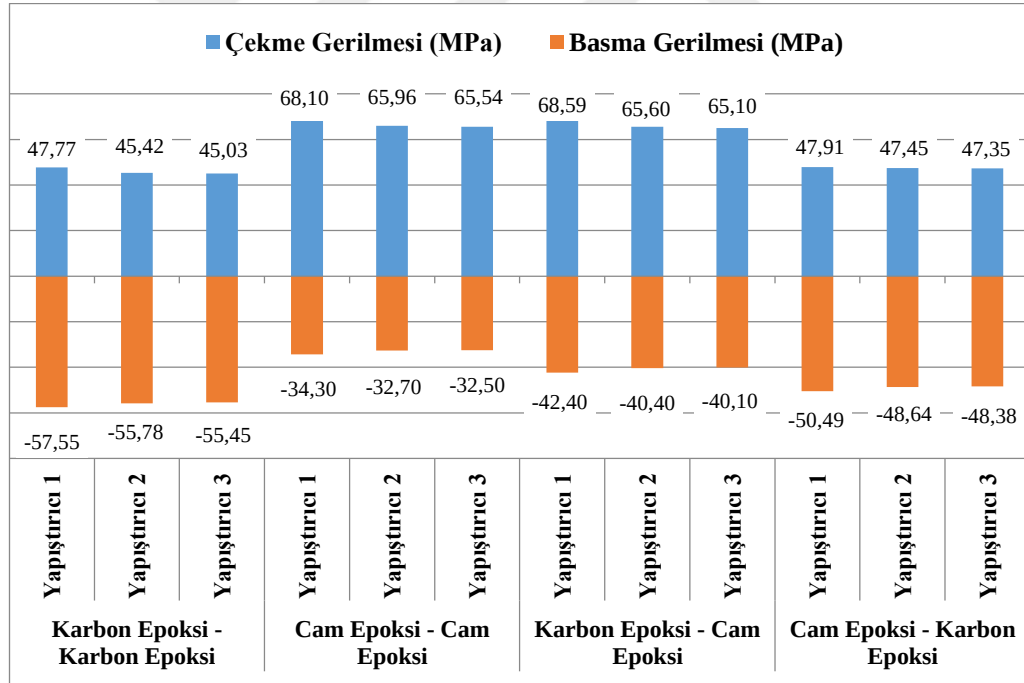
Şekil 4.25. Model 25 - 26 - 27 - 28 - 29 - 30 - 31 - 32 - 33 - 34 - 35 - 36 X 1 nolu delik silindirik koordinatlarda normal gerilmeler (Oryantasyon açısı $[30^{\circ}/-30^{\circ}]_8$).



Şekil 4.26. Model 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 7 - 8 - 9 - 10 - 11 - 12 2 nolu delik silindirik koordinatlarda normal gerilmeler (Oryantasyon açısı $[45^{\circ}/-45^{\circ}]_8$).



Şekil 4.27. Model 13 - 14 - 15 - 16 - 17 - 18 - 19 - 20 - 21 - 22 - 23 - 24 2 nolu delik silindirik koordinatlarda normal gerilmeler (Oryantasyon açısı $[0^\circ/0^\circ]_8$).



Şekil 4.28. Model 25 - 26 - 27 - 28 - 29 - 30 - 31 - 32 - 33 - 34 - 35 - 36 2 nolu delik silindirik koordinatlarda normal gerilmeler (Oryantasyon açısı $[30^\circ/-30^\circ]_8$).

Delik çevrelerindeki gerilme değerleri incelendiğinde Elastisite modülü 670 MPa olan yapıştırıcı ile 3300 MPa olan yapıştırıcı arasında delik çevrelerinde oluşan gerilmeler düşüş göstermiştir. 3300 MPa ile 5000 MPa yapıştırıcılar arasında fark

ihmal edilebilir seviyede görülmüştür. Model 1, model 2 ve model 3 için 1 nolu delikte silindirik koordinatlarda maksimum basma gerilmeleri sırasıyla 55,03 MPa, 52,06 MPa ve 51,65 MPa olarak bulunmuştur.

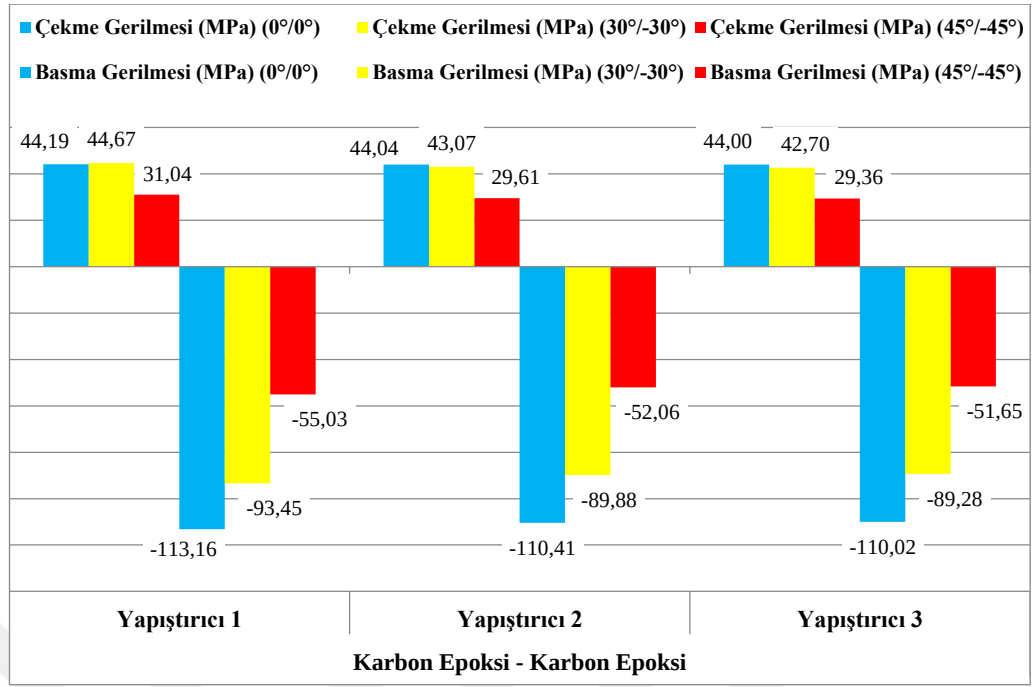
Oluşturulan 36 model arasında 1 ve 2 nolu delik etrafındaki silindirik koordinatlarda normal gerilme değerleri incelenmiştir. Üst plakanın çekme yüküne maruz kalması sonucu delik kenarlarında özellikle 1 nolu delikte basma yükünün daha etkili olduğu görülmüştür. Bulunan maksimum basma gerilmeleri Çizelge 4.12 'de verilmiştir.

Çizelge 4.12. 1 nolu delik etrafındaki silindirik koordinatlarda oluşan maksimum basma gerilmeleri.

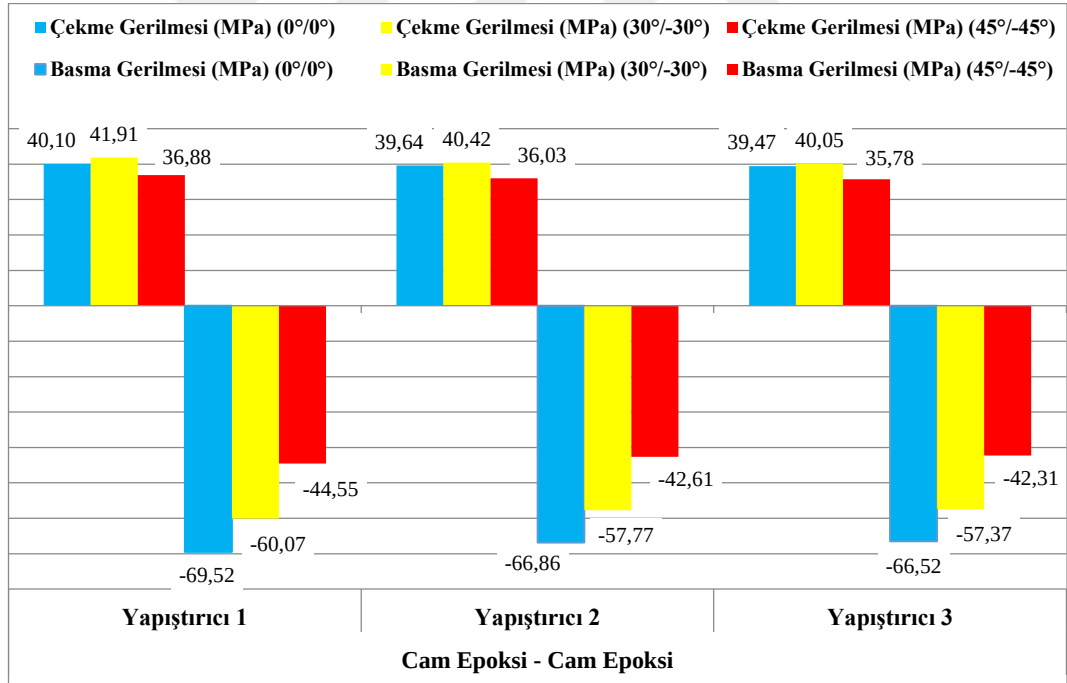
	Oryantasyon Açısı	Alt Plaka	Üst Plaka	Yapıştırıcı	Gerilme (MPa)
Maksimum Basma	$[45^\circ / -45^\circ]_8$	Cam/epoksi	Karbon/epoksi	1	86,54
Maksimum Basma	$[0^\circ / 0^\circ]_8$	Cam/epoksi	Karbon/epoksi	1	195,85
Maksimum Basma	$[30^\circ / -30^\circ]_8$	Cam/epoksi	Karbon/epoksi	1	112,96

1 nolu delik etrafındaki silindirik koordinatlarda X yönünde normal gerilme değerlerine göre değerlendirme yapılmış ve yüksek değerden en düşük değere doğru sıralandığında $[0^\circ / 0^\circ]_8$ için 195,85 MPa, $[30^\circ / -30^\circ]_8$ için 112,96 MPa ve $[45^\circ / -45^\circ]_8$ için 86,54 MPa şeklinde bir dağılım elde edilmiştir.

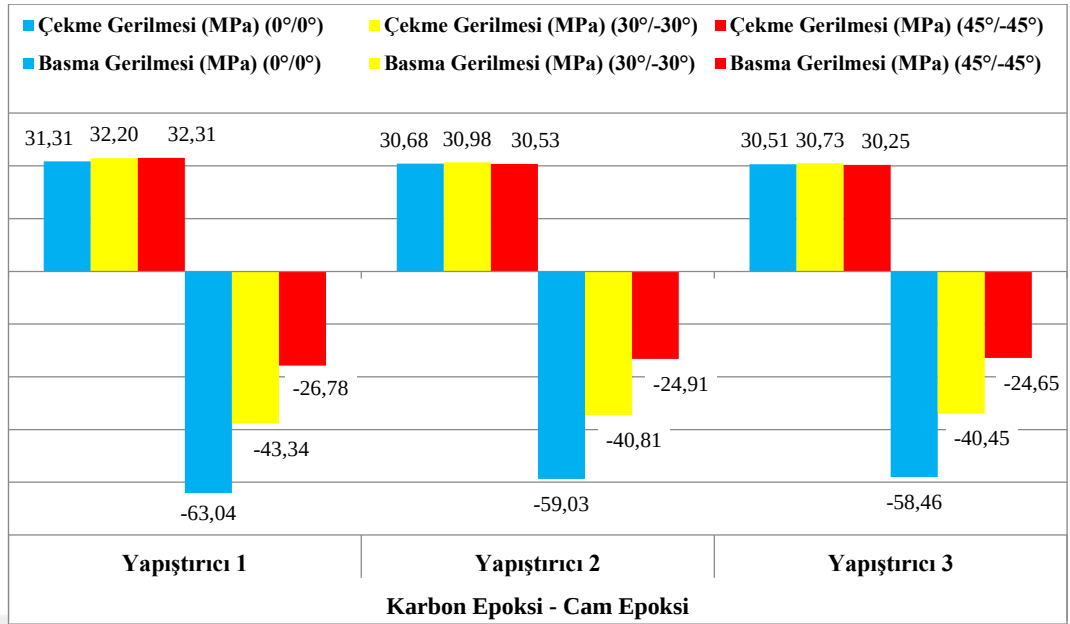
Delik etrafındaki gerilmeler oryantasyon açlarına göre grafikler oluşturulmuş ve bu grafikler alt ve üst tabakanın türü, yapıştırıcı ve oryantasyon açısına göre Şekil 4.29, 4.30, 4.31 ve 4.32 'de grafikler halinde verilmiştir.



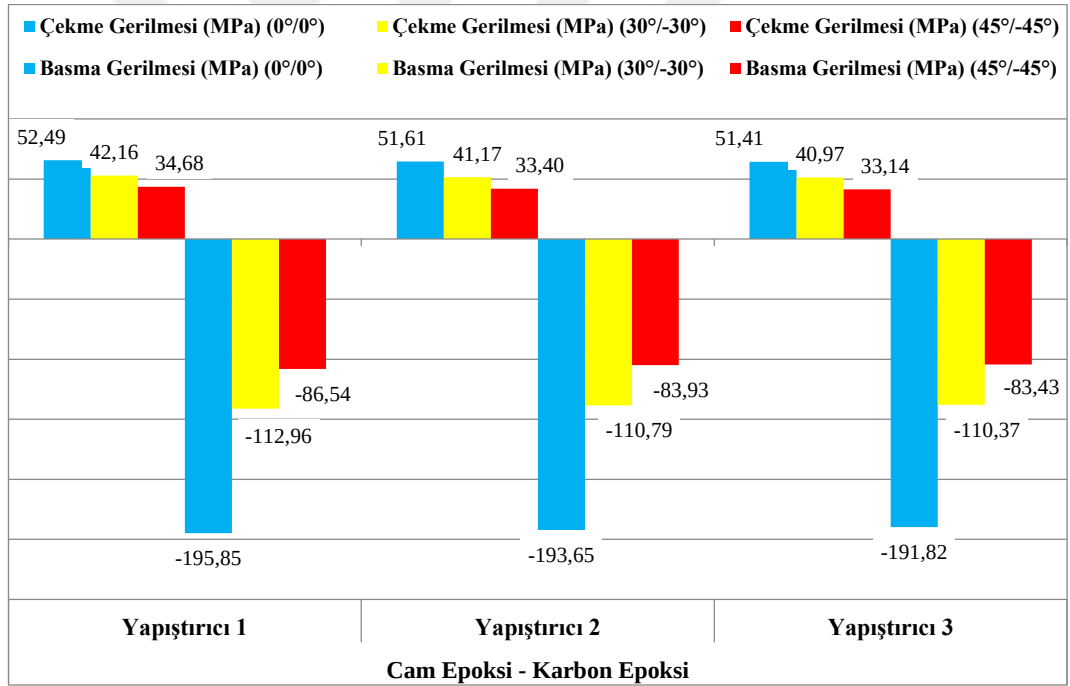
Şekil 4.29. Karbon/epoksi - karbon/epoksi plaka 1 nolu delik oryantasyon açısına göre gerilme değerleri.



Şekil 4.30. Cam/epoksi - cam/epoksi plaka 1 nolu delik oryantasyon açısına göre gerilme değerleri.



Şekil 4.31. Karbon/epoksi - cam epoksi plaka 1 nolu delik oryantasyon açısına göre gerilme değerleri.



Şekil 4.32. Cam/epoksi - karbon/epoksi plaka 1 nolu delik oryantasyon açısına göre gerilme değerleri.

1 nolu delik çevresinde görülen maksimum basma gerilmeleri değerlendirildiğinde en düşük değerden en yüksek değere göre sıralandığında $[45^\circ / -45^\circ]_8$, $[30^\circ / -30^\circ]_8$, ve $[0^\circ / 0^\circ]_8$ oryantasyon açısına sahip modellerde görülmüştür.

4.4 Kompozit Plakalarda Tsai-Wu Hasar Kriteri

Malzeme dayanımının deneysel olarak belirlenmesi tek eksenli gerilmelere dayanmaktadır. Bununla birlikte, gerçek kompozit yapılarda çok eksenli gerilim durumları mevcuttur. Bu çok eksenli gerilim durumlarında hasar tahmin edilmelidir. Bu amaçla birçok hasar kriteri geliştirilmiş ve aralarında Tsai – Wu hasar kriteri yaygın olarak kullanılmaktadır (Paepegem ve Degrieck).

Malzemelerin Tsai Wu hasar kriterine göre değerlendirilmesinde kullanılan malzeme dayanım özellikleri Çizelge 4.13 ve Çizelge 4.14 ‘te verilmiştir.

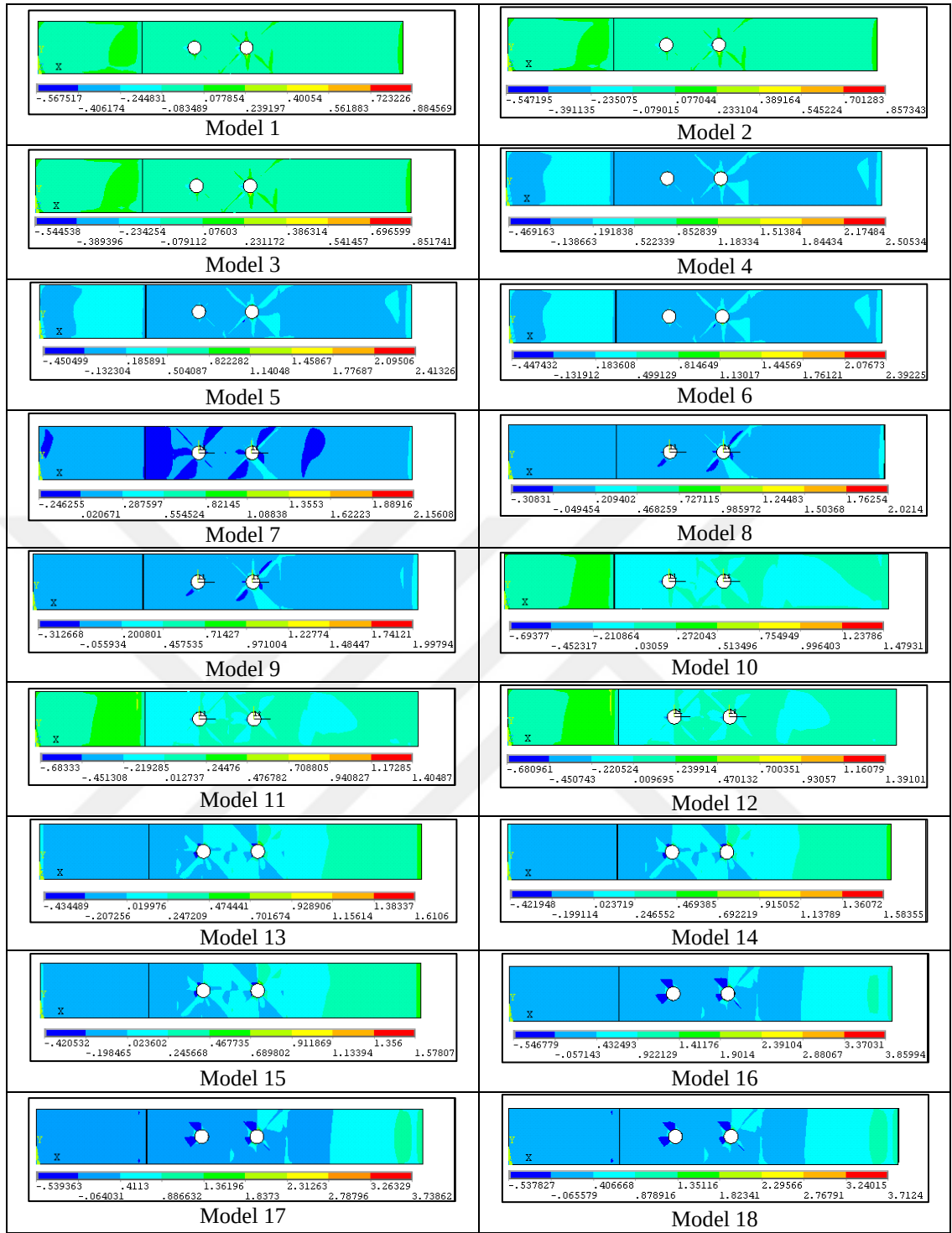
Çizelge 4.13. Karbon/epoksi tabakalı kompozit plaka dayanım özellikleri (Park 2017).

Karbon/Epoksi Plaka Dayanım Özellikleri	
Boyuna Çekme Dayanımı	1240 MPa
Boyuna Basma Dayanımı	1240 MPa
Enine Çekme Dayanımı	41 MPa
Enine Basma Dayanımı	170 MPa
Düzlemsel Kesme Dayanımı	80 MPa

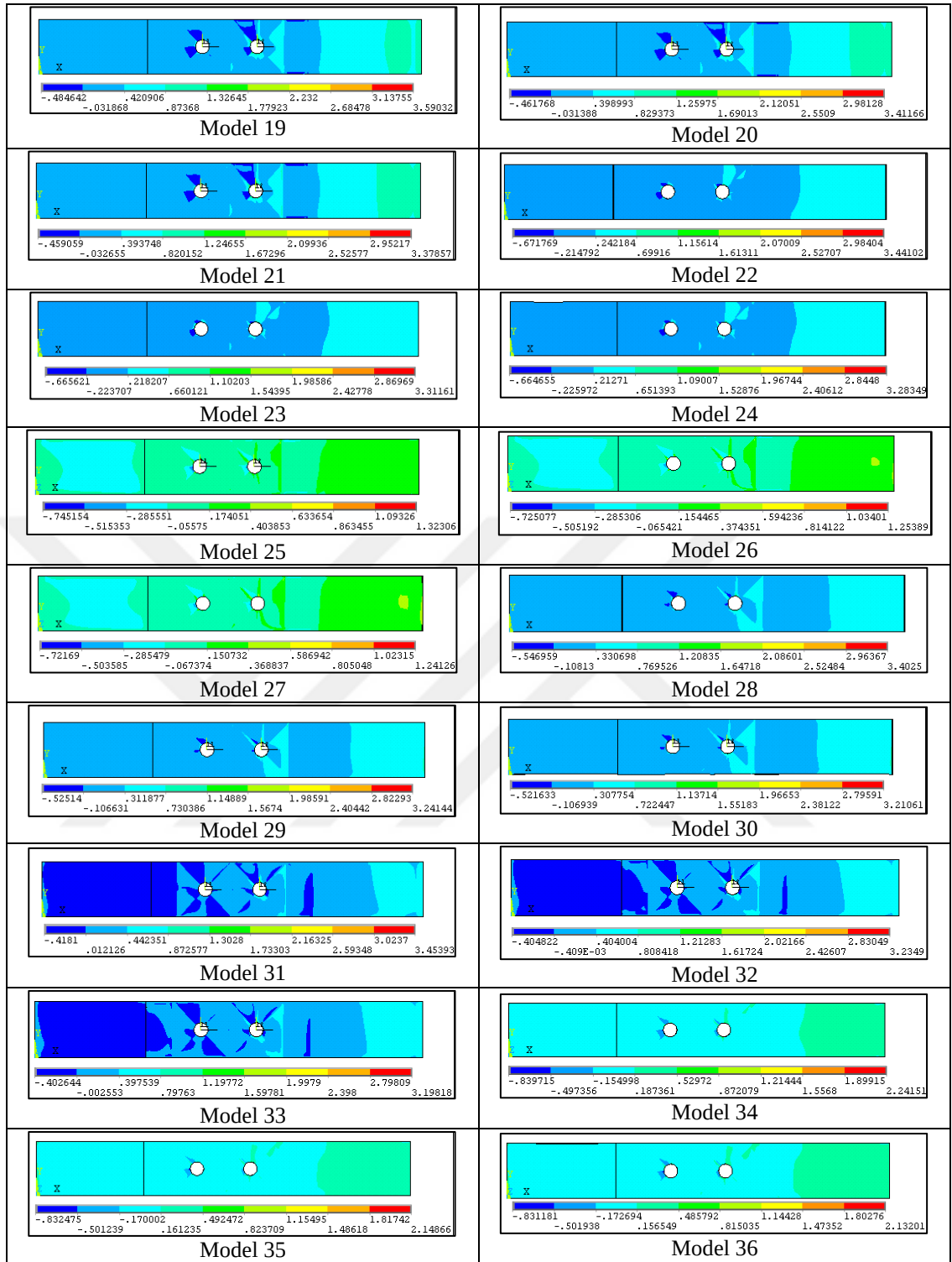
Çizelge 4.14. Cam/epoksi tabakalı kompozit plaka dayanım özellikleri (Kishore vd. 2009).

Cam/Epoksi Plaka Dayanım Özellikleri	
X Yönünde Çekme Dayanımı	500 MPa
X Yönünde Basma Dayanımı	300 MPa
Y Yönünde Çekme Dayanımı	22,5 MPa
Y Yönünde Basma Dayanımı	60 MPa
Z Yönünde Çekme Dayanımı	22,5 MPa
Z Yönünde Basma Dayanımı	60 MPa
1-2 Düzlemi Kesme Dayanımı	45 MPa
2-3 Düzlemi Kesme Dayanımı	30 MPa
1-3 Düzlemi Kesme Dayanımı	45 MPa

Çalışmada delinmiş tabakalı kompozit plakada Tsai Wu hasar kriterine göre değerlendirme yapılmıştır. Bu değerlendirme sonucu elde edilen gerilme görselleri Şekil 4.33 ‘te verilmiştir.



Şekil 4.33. Kompozit tabakalı plakalarda hesaplanan Tsai-Wu dayanım indeksi.



Şekil 4.33 (devam). Kompozit tabakalı plakalarda hesaplanan Tsai-Wu dayanım indeksi.

Tsai Wu hasar kriterine göre değerlendirme yapıldığında ise çekme gerilmesine göre Model 1,2 ve 3 olarak adlandırılan alt plaka karbon/epoksi, üst plaka karbon/epoksi, yapıştırıcı 1,2 ve 3 oryantasyon açısı $[45^\circ / -45^\circ]_8$ olan modelin Tsai Wu dayanım indeksi 1'in altında bulunmuş diğer modellerde 1'in üzerindedir.

4.5 Tartışma

Çalışmada yapıştırıcı Elastisite modülünün artışıyla yapıştırıcıda Von Mises gerilmelerinin de arttığı görülmüştür. Kırkayak (2019) yaptığı çalışmada yapıştırıcıda oluşan Von Mises gerilmeleri azaltmak için belli bölgelerde Elastisite modülü düşük yapıştırıcı kullanmış ve sonuçlarında o bölgelerde daha düşük gerilmeler elde etmiştir. Elde edilen sonuçlar bu çalışmanın sonuçlarıyla tutarlıdır.

Oluşturulan 36 model arasında modelin tamamındaki X yönündeki normal gerilme ve Von Mises gerilme değerlerinin maksimum değerleri incelendiğinde $[0^\circ / -0^\circ]_8$ oryantasyon açısındaki modellerin $[45^\circ / -45^\circ]_8$ ve $[30^\circ / -30^\circ]_8$ oryantasyon açısındaki modellere göre modelin tamamında gerilme dağılımlarının daha yüksek olduğu görülmüştür.

Çalışmada 3 farklı epoksi türü yapıştırıcı ile birleştirilmiş tabakalı kompozit plakalar arasında delik çevresi ve modelin tamamındaki gerilme değerleri incelendiğinde Elastisite modülü 670 MPa olan yapıştırıcı ile 3300 MPa olan yapıştırıcı arasında delik çevrelerinde oluşan gerilmeler az miktarda düşüş göstermiştir. 3300 MPa ile 5000 MPa yapıştırıcılar arasında fark ihmal edilebilir bir seviyede görülmüştür.

Delik çevresinde görülen maksimum basma gerilmeleri değerlendirilmiş en düşük değer $[45^\circ / -45^\circ]_8$ oryantasyon açısına sahip modellerde en yüksek ise $[0^\circ / 0^\circ]_8$ oryantasyon açısına sahip modellerde bulunmuştur. Yapılan analizlerin sonuçları Karakılçık ve arkadaşlarının (Karakılçık vd., 2016) bulduğu sonuçlar ile tutarlıdır. Özellikle 0° - 45° fiber takviye açıları için gerilme yığılması faktörü düşmüştür. Aynı zamanda Turan ve arkadaşları (Turan vd., 2010) yaptıkları çalışmanın sonucunda takviye açısı θ eksenel çekme doğrultusunda veya yakın doğrultularda (0° , 15° ve 30° açılarında) olduğu zaman pimin delik temas yüzeyi ve çevresinde fiber basma hasarları elde edilmiştir. Takviye açısının artmasıyla ($\theta > 45^\circ$) fiber basma hasarı oluşmamıştır. Sonuçların bu çalışmanın sonuçlarıyla tutarlı olduğu görülmüştür.

Tsai Wu hasar kriterine göre değerlendirme yapıldığında ise çekme gerilmesine göre Model 1,2 ve 3 olarak adlandırılan alt plaka karbon/epoksi, üst plaka karbon/epoksi, yapıştırıcı 1,2 ve 3 oryantasyon açısı $[45^\circ / -45^\circ]_8$ olan modelin Tsai Wu dayanım indeksi 1'in altında bulunduğu için 2 kN çekme yükünde güvenli olduğu

görülmüştür. Diğer modeller 2 kN çekme yükü altında Tsai Wu dayanım indeksi 1'in üzerinde bulunduğu için çekme gerilmesi altında hasara uğrayabilir. Aynı modellerin farklı oryantasyon açılarındaki durumlarına bakılacak olursa delik etrafındaki gerilmeler modelin tamamındaki gerilme dağılımlarına benzer şekilde Tsai Wu dayanım indeksine göre en güvenli modelden en az güvenli modele doğru $[45^\circ / -45^\circ]_8$, $[30^\circ / -30^\circ]_8$ ve $[0^\circ / -0^\circ]_8$ dizilimine göre sıralanabilir.



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada 3 farklı epoksi yapıştırıcı ile yapıştırılmış ve aynı zamanda çift pim ile bağlantı yapılmış aynı veya farklı cinsten ve farklı oryantasyon açılarına sahip tabakalı kompozit plakalardan oluşan otuz altı farklı modelde meydana gelen gerilme değerleri ve dağılımları ANSYS sonlu elemanlar yazımıyla incelenmiştir. Çalışmada bağlantı üç boyutlu olarak modellenmiş ve kontak analiz çalıştırılmıştır. Oluşturulan bu modele 2 kN çekme yükü uygulanmış ve tabakalarda ve delik çevrelerinde meydana gelen gerilmeler incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Buna ilave olarak hasar kriterlerinden Tsai-Wu hasar kriterine göre sonuçlar değerlendirilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir;

Yapıştırılmalı bağlantılarda yapıştırıcı Elastisite modülündeki artış ile birlikte bir noktaya kadar delik çevrelerinde gerilmeyi azaltmaya etkisi olup bir noktadan sonra etkisi artış oranında artmamaktadır. Bu nedenle yapıştırıcı seçiminde delik çevrelerindeki gerilmeler açısından değerlendirildiğinde, yapıştırıcı Elastisite modülünün yanında yapıştırıcının diğer özellikleri de önem kazanmaktadır.

Kullanılan kompozit malzemenin fiber oryantasyon açısı 0° 'den 45° ' ye doğru arttıkça delik çevrelerinde oluşan gerilmeler azalmaktadır.

Kullanılan kompozit malzemenin fiber oryantasyon açısı 0° 'den 45° ' ye doğru arttıkça delik çevrelerinde oluşan gerilmelere benzer şekilde modelin tamamında görülen gerilmeler de azalma göstermektedir.

Yapıştırıcının Elastisite modülünün artışıyla yapıştırıcıda oluşan XZ eksenindeki kayma gerilmeleri ve Von Mises gerilmelerinde artış görülmüştür.

Tsai Wu dayanım indeksine göre değerlendirme yapıldığında alt plaka karbon/epoksi üst plaka karbon/epoksi ve $[45^\circ / -45^\circ]_8$ dizilimine sahip modellerin 2 kN çekme yükünde Tsai Wu dayanım indeksine göre hasara karşı en güvenilir olduğu tespit edilmiştir. Bu da karbon/epoksi malzemenin dayanımının yüksek olması ve dizilim açısındaki artışın gerilmeyi düşürmesi nedeni ile beklendiği gibidir.

Tsai Wu dayanım indeksi yapıştırıcı Elastisite modülü artışıyla düştüğü görülmüştür. Bu nedenle yapıştırıcı Elastisite modülü artışı kompozit malzeme dayanımına olumlu yönde etki etmektedir.

Tsai Wu dayanım indeksine göre kompozit plaka modelleri en güvenilirinden an az güvenilirine doğru Alt plaka Karbon/Epoksi- Üst plaka Karbon/Epoksi, Alt plaka Cam/Epoksi- Üst plaka Karbon/Epoksi, Alt plaka Karbon/Epoksi- Üst plaka Cam/Epoksi ve Alt plaka Cam/Epoksi- Üst plaka Cam/Epoksi şeklinde sıralanabilir.

Oryantasyon açısına göre Tsai Wu dayanım indeksi değerleri düşükten yükseğe doğru sıralanacak olursa 45° , 30° ve 0° açılarında görülmüştür.



KAYNAKLAR

- Aldaş, K. ve Şen, F., 2011. Karma bağlantı uygulanmış farklı metal plakalarda meydana gelen gerilmelerin incelenmesi, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 2, 1-12.
- Alyanak, İ. ve Şen, F., 2015. Paralel çift pim uygulanmış ve yapıştırılmış karma bağlantılı kompozit plakaların çekme yükü altında gerilme analizi, Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2, 11-23.
- Ansys, Inc., 2013. ANSYS mechanical APDL element reference, Release 15, Canonsburg, USA.
- Ansys, I., 2017. ANSYS mechanical APDL contact technology guide, Release 18.2, Canonsburg, USA.
- Apalak, M. K., Aldaş, K. ve Şen, F., 2003. Thermal non-linear stresses in an adhesively bonded and laser-spot welded single-lap joint during laser-metal interaction, Journal of Materials Processing Technology, 1–19.
- Aydın, M. D., Temiz, Ş. ve Özel, A., 2004. Yapısal yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin belirlendiği deneysel yöntemler. Mühendis ve Makine, 45, 536, 18-24.
- Aydın, S., Solmaz, M. ve Turgut, A., 2011. Epoksi ve akrilik bazlı yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin belirlenmesi, 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), Elazığ, 383-388.
- Babu, V. S., Sasanka, C. T. ve Ravindra, K., 2013. Failure and stress analysis of glass fiber reinforced laminated composite pinned joints, Int J Advanced Design and Manufacturing Technology, 6, 2, 13-19.
- Beylergil, B., Cünedioğlu, Y. ve Aktaş, A., 2011. Experimental and numerical analysis of single lap composite joints with inter-adherent fibers, Composites: Part B, 42, 1885-1896.
- Bhavikatti, D. S., 2005. Finite element method, New Age International (P) Limited, Publishers, New Delhi.
- Callister, W. D. ve Retwisch, D. G., 2015. Malzeme bilimi ve mühendisliği, Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara.
- Chaudhari, S. P. ve Chaudhari, K. K., 2018. Comparison of static analysis of bonded, riveted and hybrid joints by using different materials, International Journal for Innovative Research in Science ve Technology, 4, 12, 55-63.
- Chawla, K. K., 2012. Composite materials: science and engineering, Springer Science & Business Media, New York.

- Cürgöl, İ., 1997. Makina elemanları 1. cilt, Kocaeli Üniversitesi Yayınları, Kocaeli.
- Çitil, Ş., Temiz, Ş. ve Özel, A., 2012. Çekmeye maruz ara boşluklu yapıştırma bağlantılarında gerilme analizi, Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 5, 2, 173-190.
- Daniel, I. M. ve Ishai, O., 2006. Engineering mechanics of composite materials, Oxford University Press, Inc., New York.
- He, X., 2010. Effect of mechanical properties of adhesives on stress distributions in structural bonded joints, London, International Association of Engineers, 2, 1168-1172.
- İşcan, B., Adin, H. ve Turgut, A., 2012. Bazı yapısal yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin belirlenmesi, Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 24 (2), 119-126.
- Jones, R. M., 1999. Mechanics of composite materials, Taylor & Francis, Inc., Philadelphia.
- Kadam, A. D., Desai, K. V. ve Chumble, R. P., 2015. Modal analysis of an adhesive joint, International Journal of Innovative Research in Science Engineering and Technology, 4, 6, 4137-4145.
- Karakılçık, S., Özbay, M. ve Adin, H., 2016. Dairesel delikli kompozit levhalarda gerilme yığılmalarının incelenmesi, Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 7, 1, 113-128.
- Karakuzu, R., Taylak, N., İçten, B. M. ve Aktaş, M., 2008. Effects of geometric parameters on failure behavior in laminated composite plates with two parallel pin-loaded holes, Composites Structures, 85, 1-8.
- Khechai, A., Tati, A., Belarbi, M. O. ve Guettala, A., 2018. Numerical analysis of stress concentration in isotropic and laminated plates with inclined elliptical holes, Journal of The Institution of Engineers (India), C, 511-522.
- Kiral, B. G., 2010. Effect of the clearance and interference-fit on failure of the pin-loaded composites, Materials and Design, 85-93.
- Kırkayak, L., 2019. Yapıştırma bağlantılı kompozitlerde yapıştırma geometrisinin gerilme dağılımına etkisi, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 25(1), 27-33.
- Kishore, A. N., Malhotra, S. K. ve Prasad, N. S., 2009. Failure analysis of multi-pin joints in glass fibre/epoxy composite laminates, Composite Structures, 91, 266-277.
- Liao, L., Huang, C. ve Sawa, T., 2013. Effect of adhesive thickness, adhesive type and scarf angle on the mechanical properties of scarf adhesive joints, International Journal of Solids and Structures, 50, 4333-4340.

- Madenci, E., 1998. Analysis of composite laminate with multiple fasteners, *Int. J. Solid Structures*, 35, 15, 1793-1811.
- Moaveni, S., 2015. *Sonlu elemanlar analizi teori ve ansys ile uygulamalar*, Palme Yayınevi, Ankara.
- Naveenraj, A., Karthick, R. ve Baskaran, P., 2020. Tensile strength analysis of serially pinned joints in e-glass composite plates, *Material Today: Proceedings*, 21, 78-82.
- Nerilli, F., Marino, M. ve Vairo, G., 2015. A numerical failure analysis of multi-bolted joints in FRP laminates based on basalt fibers, *Procedia Engineering*, 109, 492-506.
- Okutan, B., 2001. Stress and failure analysis of laminated composite pinned joints, *Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir*.
- Okutan, B. ve Karakuzu, R., 2003. The strength of pinned joints in laminated composites, *Composites Science and Technology*, 63, 893-905.
- Özel, A., Yazıcı, B., Akpınar, S., A. M. D., Temiz, Ş., 2014. A Study on the strength of adhesively bonded joints with different adherents, *Composites: Part B*, 62, 167-174.
- Özkan, E. ve Aldaş, K., 2017. Karma bağlantı yapılmış farklı sıcaklıklar altında değişik metal kombinasyonların gerilme analizi, *Aksaray Üniversitesi Journal of Science and Engineering*, 1, 1, 9-24.
- Paepegem, W. ve Degrieck, J., 2003. Calculation of damage-dependent directional failure indices from the Tsai–Wu static failure criterion, *Composites Science and Technology*, 63, 305-310.
- Pakdil, M., Şen, F. ve Sayman, O., 2009. Damage development in bolted composites with clearance subjected to preload, *International Journal of Engineering and Applied Sciences (IJEAS)*, 1, 4, 52-66.
- Park, H., 2017. Study on design and test of composite WIG vehicle considering on impact loading, *MATEC Web of Conferences*, 139, 00022.
- Pidaparti, R. M., 2017. *Engineering finite element analysis*, Morgan & Claypool Publishers, California.
- Pizzi, A. ve Mittal, K. L., 2003. *Handbook of adhesive technology*, Taylor & Francis Group, LLC, New York.
- Raviraja.S ve Ahmed, L., 2015. FEA and experimental evaluation of bonded, riveted and hybrid joints in glass fibre epoxy composite laminates, *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 4, 3, 214-221.

- Saraç, İ., Adin, H. ve Temiz, Ş., 2016. Experimental determination of the mechanical properties of adhesive joints bonded epoxy adhesive included Al_2O_3 nanoparticle, *European Journal of Technic*, 6, 2, 104-112.
- Sayman, O., 2012. Elasto-plastic stress analysis in an adhesively bonded single-lap joint, *Composites: Part B*, 43, 204-209.
- Smith, L. J. H., 1973. Adhesive bonded single lap joints, National Aeronautics and Space Administration, Virginia.
- Solmaz, M. Y., Kocabaş, İ. ve Gür, M., 2017. Effect of riveting on the joint strength of adhesively bonded double lap joints, *Anadolu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi A- Uygulamalı Bilimler ve Mühendislik*, 19, 1, 1-9.
- Strozzi, A., Baldini, A., Giacomini, M., Bertocchi, E. ve Bertocchi, L., 2011. Maximum equivalent stress in a pin-loaded lug in the presence of initial clearance, *J. Strain Analysis*, 46, 760-771.
- Şen, F. ve Aldaş, K., 2011. Effects of using different metal materials on stresses in metal-composite hybrid joints, *Cankaya University Journal of Science and Engineering*, 8, 1-13.
- Şen, F. ve Alyanak, İ., 2014. Paralel çift pimli ve yapıştırıcı karma bağlantılı kompozit levhaların ısı gerilme analizi, *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi*, 5, 2, 119-127.
- Şen, F., Pakdil, M., Sayman, O. ve Benli, S., 2008. Experimental failure analysis of mechanically fastened joints with clearance in composite laminates under preload, *Materials and Design*, 29, 1159-1169.
- Tang, Z. ve Sun, J., 2011. The Contact analysis for deep groove ball bearing based on ANSYS, *Procedia Engineering*, 23, 423-428.
- Turan, K. ve Gür, M., 2012. Pim bağlantılı tabakalı kompozit levhalarda ilerlemeli hasar analizi, *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 3, 2, 91-99.
- Turan, K., Kaman, M. O. ve Gür, M., 2010. Pim bağlantılı tabakalı kompozit levhalarda fiber takviye açısının hasar tipine etkisi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16, 2, 213-220.
- Vishwanath, K. S., 2018. Experimental verification of stress concentration factor in an unflawed lug using uniform & graded mesh of 2D linear & non-linear analysis using MSC.Nastran / MSC.Patran, *International Journal of Advanced Research*, 1069-1079.
- Wahab, M. A., 2014. The mechanics of adhesives in composite and metal joints, DEStech Publications, Inc., Pennsylvania.

Whitworth, H., Aluko, O. ve Tomlinson, N., 2008. Application of the point stress criterion to the failure of composite pinned joints, *Engineering Fracture Mechanics*, 75, 1829-1839.

Zhou, Y., Fei, Q. ve Tao, J., 2016. Profile design of loaded pins in composite single lap joints: From circular to non-circular. *Results in Physics* 6, pp. 471-480.



EKLER

EK A. Kullanılan Malzeme Konfigürasyonları



EK A. Kullanılan Malzeme Konfigürasyonları

Çizelge A1. Kurulan modellerin malzeme, oryantasyon açısı ve yapıştırıcı varyasyonları

[illegible]

Çizelge A1 (devam). Kurulan modellerin malzeme, oryantasyon açısı ve yapıştırıcı varyasyonları

Model 25	Alt plaka Karbon/Epoksi üst plaka Karbon/Epoksi oryantasyon açıları her iki plaka için $[30^{\circ}/-30^{\circ}]_8$ ve kullanılan yapıştırıcı türü Yapıştırıcı 1
Model 26	Alt plaka Karbon/Epoksi üst plaka Karbon/Epoksi oryantasyon açıları her iki plaka için $[30^{\circ}/-30^{\circ}]_8$ ve kullanılan yapıştırıcı türü Yapıştırıcı 2
Model 27	Alt plaka Karbon/Epoksi, üst plaka Karbon/Epoksi oryantasyon açıları her iki plaka için $[30^{\circ}/-30^{\circ}]_8$ ve kullanılan yapıştırıcı türü Yapıştırıcı 3
Model 28	Alt plaka Cam/Epoksi, üst plaka Cam/Epoksi oryantasyon açıları her iki plaka için $[30^{\circ}/-30^{\circ}]_8$ ve kullanılan yapıştırıcı türü Yapıştırıcı 1
Model 29	Alt plaka Cam/Epoksi, üst plaka Cam/Epoksi oryantasyon açıları her iki plaka için $[30^{\circ}/-30^{\circ}]_8$ ve kullanılan yapıştırıcı türü Yapıştırıcı 2
Model 30	Alt plaka Cam/Epoksi, üst plaka Cam/Epoksi oryantasyon açıları her iki plaka için $[30^{\circ}/-30^{\circ}]_8$ ve kullanılan yapıştırıcı türü Yapıştırıcı 3
Model 31	Alt plaka Karbon/Epoksi, üst plaka Cam/Epoksi oryantasyon açıları her iki plaka için $[30^{\circ}/-30^{\circ}]_8$ ve kullanılan yapıştırıcı türü Yapıştırıcı 1
Model 32	Alt plaka Karbon/Epoksi, üst plaka Cam/Epoksi oryantasyon açıları her iki plaka için $[30^{\circ}/-30^{\circ}]_8$ ve kullanılan yapıştırıcı türü Yapıştırıcı 2
Model 33	Alt plaka Karbon/Epoksi, üst plaka Cam/Epoksi oryantasyon açıları her iki plaka için $[30^{\circ}/-30^{\circ}]_8$ ve kullanılan yapıştırıcı türü Yapıştırıcı 3
Model 34	Alt plaka Cam/Epoksi, üst plaka Karbon/Epoksi oryantasyon açıları her iki plaka için $[30^{\circ}/-30^{\circ}]_8$ ve kullanılan yapıştırıcı türü Yapıştırıcı 1
Model 35	Alt plaka Cam/Epoksi, üst plaka Karbon/Epoksi oryantasyon açıları her iki plaka için $[30^{\circ}/-30^{\circ}]_8$ ve kullanılan yapıştırıcı türü Yapıştırıcı 2
Model 36	Alt plaka Cam/Epoksi, üst plaka Karbon/Epoksi oryantasyon açıları her iki plaka için $[30^{\circ}/-30^{\circ}]_8$ ve kullanılan yapıştırıcı türü Yapıştırıcı 3

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı: İlker ERZİNCANLI

EĞİTİM BİLGİLERİ (Kurum ve Yıl)

Lisans: Kocaeli Üniversitesi, Makine Mühendisliği 1999-2004

Yüksek Lisans: Aksaray Üniversitesi, Makine Mühendisliği 2018-2021

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLERİ

1. İZELTAŞ / Arge Mühendisi / 2006-2008
2. TOFAŞ / Arge Mühendisi / 2008-2012
3. DELPHİ DİZEL SİSTEMLERİ / Arge Mühendisi / 2012-2016

TEZDEN ÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER

Uluslararası Hakemli Dergilerde Yayınlanan Makaleler

- 1.
- 2.

Kongrelerde Sunulan Makaleler

- 1.
- 2.