

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

**ÇİFT ZİGZAG TİP YAPIŞTIRMA BAĞLANTILARIN
TASARIMI VE MEKANİK ANALİZİ**

DOKTORA TEZİ

Yük. Müh. Bahadır BİRECİKLİ

(102120201)

Anabilim Dalı: Makina Mühendisliği

Programı: Mekanik

Danışman: Prof. Dr. Aydın TURGUT

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 23 EYLÜL 2016

EYLÜL-2016



**ÇİFT ZİGZAG TİP YAPIŞTIRMA BAĞLANTILARIN
TASARIMI VE MEKANİK ANALİZİ**

Yük. Müh. Bahadır BİRECİKLİ

**Doktora Tezi
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Aydın TURGUT
EYLÜL-2016**

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇİFT ZİGZAG TİP YAPIŞTIRMA BAĞLANTILARIN
TASARIMI VE MEKANİK ANALİZİ

DOKTORA TEZİ

Yük. Müh. Bahadır BİRECİKLİ

(102120201)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 23 Eylül 2016
Tezin Savunulduğu Tarih : 28 Ekim 2016

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Aydın TURGUT (Bingöl Ü)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Mehmet ÜLKER (F.Ü)

Doç. Dr. Mete Onur KAMAN (F.Ü)

Doç. Dr. Kadir TURAN (D.Ü)

Doç. Dr. Murat Yavuz SOLMAZ (F.Ü)

EYLÜL-2016

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın hazırlanmasında ve çalışmaya büyük katkı sağlayan doktora öğrenimim boyunca engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım ve her konuda yardımını esirgemeyen çok kıymetli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Aydın TURGUT'a, tez izleme komitesi hocalarımdan Sayın Prof. Dr. Mehmet ÜLKER'e ve Sayın Doç. Dr. Mete Onur KAMAN'a, sayısal çalışmanın hazırlanmasında Sayın Prof. Dr. Şemsettin TEMİZ'e sonsuz teşekkür ederim.

Çalışmalarında yardımlarından dolayı Sayın Doç. Dr. Bahattin İŞCAN'a teşekkür ederim. Batman Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölüm Başkanı Sayın Doç. Dr. Hamit ADİN'e teşekkür ederim.

Tez çalışmasında kullanılan malzemelerin temin edilmesi ve üretilmesini sağlayan Odak Kompozit A.Ş.'ye ilgisi ve emeği bulunan Emin DEMİR'e teşekkür ederim.

Sonuçta beni bugünlere ulaştıran, her konuda desteklerini sunan, bana güvenen ve bana varlıkları ile manevi destek olan aileme ve akrabalarım sonsuz teşekkür ederim.

Bahadır BİRECİKLİ
ELAZIĞ – 2016

İÇİNDEKİLER

SAYFA NO

ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER	III
ÖZET.....	VII
SUMMARY.....	VIII
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	IX
TABOLAR LİSTESİ	XVI
SEMBOLLER LİSTESİ.....	XVII
KISALTMALAR	XVIII
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Literatür Özetleri	3
1.2. Kompozit Malzemeler	12
1.2.1. Kompozit Malzemelerin Matris Malzemesi.....	13
1.2.2. Kompozit Malzemelerin Fiber (elyaf) Malzemesi.....	14
1.2.2.1. Cam Elyaflar	15
1.2.2.2. Bor Elyaflar	17
1.2.2.3. Silisyum Karbür Elyaflar.....	17
1.2.2.4. Alümina Elyaflar	17
1.2.2.5. Aramid Elyaflar	18
1.2.2.6. Karbon Elyaflar	18
1.2.3. Elyaf Şekli ve Doğrultusu	18
1.2.4. Elyaf Geometrisinin Etkisi	18
1.2.5. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	19
1.2.5.1. Polimer Matrisli Kompozitler:.....	20
1.2.5.2. Metal Matrisli Kompozitler:	20
1.2.5.3. Seramik Matrisli Kompozitler:.....	20
1.2.6. Yapı Bileşenlerinin Şekline Göre	20
1.2.6.1. Partikül Esaslı Kompozitler.....	20
1.2.6.2. Lamel (pul) Esaslı Kompozitler	21
1.2.6.3. Fiber Esaslı Kompozitler	21
1.2.6.4. Dolgu (kafes) Kompozitler	22
1.2.6.5. Tabakalı Kompozitler	22

1.2.6.6.	Karma (Hibrid) Kompozitler:	23
1.2.7.	Kompozit Malzemelerin Avantajları ve Dezavantajları.....	24
1.2.8.	Kompozit Malzeme Kullanım Alanları	25
1.2.9.	Elyaf Takviyeli Kompozit Malzeme Üretim Yöntemleri.....	31
1.2.9.1.	Elle Yatırma	31
1.2.9.2.	Püskürtme.....	32
1.2.9.3.	Elyaf Sarma	32
1.2.9.4.	Reçine Transfer Kalıplama	32
1.2.9.5.	Hazır Kalıplama	33
1.2.9.6.	Vakum Bağlaması	33
1.2.9.7.	Otoklav Bağlaması	33
1.2.10.	Kompozit Malzemelerde Akma Kriterleri	34
1.3.	Yapıştırma Bağlantıları	35
1.3.1.	Adhezyon.....	35
1.3.2.	Kohezyon.....	36
1.3.3.	Yapıştırma Bağlantılarında Hasar Tipleri.....	36
1.3.4.	Yapıştırma Ek Yerindeki Kopmanın Değerlendirilmesi	38
1.3.5.	Yapışma Teorileri	38
1.3.5.1.	Mekanik Tutunma Teorisi	38
1.3.5.2.	Adsorpsiyon Teorisi	39
1.3.5.3.	Elektrostatik Teorisi.....	39
1.3.5.4.	Difüzyon Teorisi	39
1.3.6.	Birleştirme Teknikleri	39
1.3.6.1.	Mekanik Birleştirme	40
1.3.6.2.	Termal Birleştirme	40
1.3.6.3.	Yapıştırma Bağlantıları	40
1.3.7.	Yapıştırıcı Çeşitleri	41
1.3.7.1.	Kimyasal Reaksiyonla Sertleşen Yapıştırıcılar	41
1.3.7.1.1.	Epoksiler	41
1.3.7.1.2.	Anaerobikler	41
1.3.7.1.3.	Poliüretanlar	42
1.3.7.1.4.	Akrilikler.....	42
1.3.7.1.5.	Fenolikler	42
1.3.7.1.6.	Silikonlar	42
1.3.7.1.7.	Siyanoakrilikler	43

1.3.7.2.	Fiziksel Değişim ile Sertleşen Yapıştırıcılar	43
1.3.7.2.1.	Sıcak Eriyikler	43
1.3.7.2.2.	Kauçuk Yapıştırıcılar	43
1.3.7.2.3.	PVA (Polyvinyl Acetates).....	43
1.3.7.2.4.	Basınç Gerektirmeyen Yapıştırıcılar	43
1.3.8.	Formları Açısından Yapıştırıcılar	43
1.3.8.1.	Macun Tip Yapıştırıcılar	43
1.3.8.2.	Film Tip Yapıştırıcılar	44
1.3.8.3.	Düşük Viskoziteli Yapıştırıcılar	44
1.3.8.4.	Reçineler	44
1.3.8.5.	Düşük Yoğunluklu Yapıştırıcılar.....	44
1.3.8.6.	Köpükler	44
1.3.9.	Yapıştırıcılara Konulan Katkı Maddeleri.....	44
1.3.9.1.	Seyrelticiler	44
1.3.9.2.	Katalizatörler ve Katılaştırıcılar.....	44
1.3.9.3.	Hızlandırıcılar, Geciktiriciler ve Durdurucular.....	44
1.3.10.	Yapıştırıcıların Kullanım Yerleri	45
1.3.11.	Yapıştırma Bağlantı Türleri	46
1.3.12.	Yapıştırma Bağlantılarda Gerilme Analizi	47
1.3.13.	Yapıştırma Bağlantılarında Gerilmeler	48
1.3.14.	Yapıştırılacak Yüzeylerin Hazırlanması	51
2.	MATERYAL ve METOT	52
2.1.	Yapıştırılan Malzeme	52
2.2.	Yapıştırıcılar.....	56
2.3.	Numunelerin Teknik Özellikleri.....	59
2.4.	Sayısal Analiz.....	62
3.	BULGULAR.....	66
3.1.	DeneySEL Sonuçlar	67
3.2.	Sayısal Sonuçlar	88
3.2.1.	DeneySEL Sonuçlar ile Sayısal Sonuçların Karşılaştırılması	88
3.3.	Kritik Hatların Belirlenmesi	92
3.3.1.	AC Hattı Boyunca Gerilme Dağılımı Sonuçları	93
3.3.1.1.	AB Hattı.....	93
3.3.1.2.	BC Hattı.....	111
3.3.2.	Yapıştırıcı Ara Yüzey Hattı (A'C') Boyunca Gerilme Dağılımı Sonuçları..	129

3.3.2.1.	A'B' Hattı	130
3.3.2.2.	B'C' Hattı	146
3.3.3.	Kompozit Malzeme Yüzey Boyunca (AC) Gerilme Dağılımı Sonuçları	162
3.3.3.1.	Kompozit Yüzey AB Hattı	162
3.3.3.2.	Kompozit Yüzey BC Hattı	173
3.3.4.	Kalınlık Hattı (DE) Boyunca Gerilme Dağılımı Sonuçları	184
4.	SONUÇLAR VE TARTIŞMA	206
	KAYNAKLAR	210
	ÖZGEÇMİŞ	217



ÖZET

Tez konusu havacılık, uzay ve otomotiv endüstrisinde kullanılan yapıştırıcı ile birleştirilmiş kompozit bağlantıların mekanik özelliklerinin deneysel ve sayısal yöntemlerle araştırılmasıdır. Çalışmada, çift zigzag tip geometriye sahip bir yapıştırma bağlantısı kullanılmıştır. Yapıştırma geometrisi 30° , 45° , 60° , 75° olmak üzere dört farklı bindirme açısına sahiptir. Yapıştırma bağlantısında cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler kullanılmıştır. Bu malzemeler $[0^\circ/90^\circ]$, $[\pm 45^\circ]$ ve $[0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ]$ olmak üzere üç farklı elyaf yönlenmesinde; 13 kat (3 mm), 21 kat (5 mm) ve 30 kat (7 mm) tabakalı plakalar şeklinde prepreg (ön reçine emdirilmiş ıslak elyaf) kullanılarak üretilmiştir. Yapıştırma işlemi için sünek ve gevrek tip yapıştırıcılar kullanılmıştır.

Deneysel ve sayısal çalışmada bindirme açısının, fiber oryantasyon açısının, malzeme kalınlığının ve yapıştırıcı cinsinin hasar yükünün değişimine bağlı olarak mekanik davranışlar incelenmiştir. Yapıştırıcı tabakası ve yapıştırılan malzemelerde oluşan eş değer gerilmelerin hesaplanmasında von-Mises akma kriteri kullanılmıştır. Çift zigzag tip yapıştırma bağlantısına ait deneysel ve sayısal çalışmalar sonucunda mekanik davranışların geometrik parametrelere, fiber oryantasyon açısına ve yapıştırıcı cinsine bağlı olarak değiştiği gözlemlenmiştir. Hasar oluşumunda bindirme açısının en önemli geometrik parametre olduğu görülmüştür. Kompozitlerin fiber oryantasyon açıları, gerilme değerlerini önemli derecede etkilediği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Kompozit Malzeme, Yapıştırma Bağlantısı, Mekanik Özellikler, Üç Boyutlu Gerilme Analizi, Bağlantı Mukavemeti

SUMMARY

The Design and Mechanical Analysis of Double Zigzag Type Adhesive Joints

The subject of thesis, adhesive bonded joints with composite materials used in aviation, aerospace and automotive industry is to investigate the mechanical properties with numerical and experimental methods. A bonding joint with double zigzag type geometry is used in study. The bonding geometry has four types of overlap angles 30° , 45° , 60° , 75° respectively. Composite materials which made of glass fiber prepregs have used in this adhesive bonding joints. These materials by using prepreg (pre-impregnated) have three different orientation angles ($[0^\circ/90^\circ]$, $[\pm 45^\circ]$, $[0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ]$) and various adherend thicknesses (3 mm, 5 mm, 7 mm) produced. Ductile and brittle type adhesives are used for the bonding process.

Experimental and numerical studies of the overlap angle, angle of fiber orientation, depending on variation of thickness of the material and type of adhesive failure load on the mechanical behaviors are investigated. Von-Mises yield criterion is used for adhesive layer and adherends in the calculation of the equivalent stresses. The results of experimental and numerical analysis of the double zigzag type adhesive joint has showed that the variation of mechanical behaviors to vary depending on the geometric parameters, angle of fiber orientation and type of adhesive. The overlap angles have been observed that the most important geometrical parameters for failure behavior. In addition that fiber orientation angle of the composite materials is found to significantly affect the tensile stress.

Key Words: Composite Material, Adhesive Bonding Joints, Mechanical Properties, 3-D Stress Analysis, Joint Strength

ŞEKİLLER LİSTESİ

SAYFA NO

Şekil 1.1. Kompozit malzemelerin genel yapısı [42]	12
Şekil 1.2. Kompozit yapı oluşumu [44]	13
Şekil 1.3. Elyaf çeşitlerinin çekme gerilmelerinin birbiri ile karşılaştırılması [54].	15
Şekil 1.4. Takviye elemanlı kompozitler [52].	19
Şekil 1.5. Tanecikli kompozitlerin şematik gösterimi [52].	21
Şekil 1.6. Değişik tipte fiber kompozitler [52].	21
Şekil 1.7. İnce tabakanın başlıca iki tipi [53].	22
Şekil 1.8. Tabakalı kompozitlerin yapıştırılmamış görüntüsü [53].	23
Şekil 1.9. Simetrik ve anti simetrik tabaka dizilimi [54].	23
Şekil 1.10. Spor araçlarında kullanılan bazı kompozit malzemeler [55].	26
Şekil 1.11. Otomotiv sanayide kompozit malzeme kullanımı [55].	27
Şekil 1.12. Bazı müzik aletlerinde kullanılan kompozit malzemeler [55].	27
Şekil 1.13. F22 Kompozit parça dağılımları [57].	28
Şekil 1.14. Eurofighter ve Tornadoda kompozit parça dağılımları [58].	28
Şekil 1.15. Boeing 787 Dreamliner tipi uçakta kullanılan malzeme oranları [59].	29
Şekil 1.16. Kompozit malzemedan yapılmış otomobil ön paneli ve araç gövdesi [61]	31
Şekil 1.17. Gündelik hayatımıza girmiş olan kompozit malzemeler [61]	31
Şekil 1.18. Yapıştırma ek yerindeki kuvvetler [67].	36
Şekil 1.19. Adezyon ve kohezyon hasarlarının şematik gösterimi [68].	37
Şekil 1.20. Temel hasar tipleri [68].	37
Şekil 1.21. Otomobilde yapıştırıcıların kullanıldığı alanlar [80].	45
Şekil 1.22. Uçaklarda yapıştırıcıların kullanıldığı alanlar [80].	46
Şekil 1.23. Yapıştırma bağlantı türleri [67].	47
Şekil 1.24. Kaynaklı, perçinli ve yapıştırıcılı birleştirmelerdeki gerilme dağılımları [67]. ..	48
Şekil 1.25. Yapıştırma bağlantılarında gerilme çeşitleri ve dağılımları [67].	49
Şekil 1.26. Soyulma yükleri ve tasarım önlemleriyle dönüştürülmeleri [67].	50
Şekil 1.27. Eksantrik kuvvetlerden kaynaklanan problemlerin muhtelif çözümleri [67]. ...	50
Şekil 1.28. Bindirme uzunluğunun artması ile kopma yükünde meydana gelen artışın orantılı olmayışı [67].	50
Şekil 1.29. Yapıştırılacak yüzeylerdeki kirlerin adezyonu etkilemesi [67].	51
Şekil 2.1. Prepreg (ön reçine emdirilmiş ıslak elyaf)	53
Şekil 2.2. Üretilen numuneler	53
Şekil 2.3. Kompozitlerin elyaf yönlenmeleri	54
Şekil 2.4. Kompozit malzeme gerilme-gerinim grafiği	55
Şekil 2.5. DP-460 için gerilme-şekil değiştirme grafiği [94].	57
Şekil 2.6. ATLAC-580 için gerilme-şekil değiştirme grafiği [84].	58
Şekil 2.7. Kalıp şekli ve 0.20 mm lik sac numune	58
Şekil 2.8. Numunelerin yapıştırılması	59
Şekil 2.9. Numunelerin perspektif görünüşü	60
Şekil 2.10. (30°,45°,60°,75°) bindirme açılı numuneler ve ansys çizimleri	60
Şekil 2.11. Universal çekme cihazı	61
Şekil 2.12. Numunelerin çekme cihazına sabitlenmesi	61
Şekil 2.13. Sonlu eleman modelinde düğüm noktaları ve elemanları (Solid 185).	63

Şekil 2.14. Sonlu eleman modelinde düğüm noktaları ve elemanları (Solid 65).....	63
Şekil 2.15. Numunelerin sonlu elemanlara bölünmüş hali	64
Şekil 2.16. Numunelerin üç boyutlu sayısal katı modeli	65
Şekil 2.17. Kompozit malzemedeki tabaka oryantasyonları	65
Şekil 3.1. $[0/90^\circ]$ serim açısındaki bindirme açılarının yük - uzama grafiği	68
Şekil 3.2. $[\pm 45^\circ]$ serim açısındaki bindirme açılarının yük - uzama grafiği	68
Şekil 3.3. $[0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ]$ serim açısındaki bindirme açılarının yük - uzama grafiği	69
Şekil 3.4. $[0/90^\circ]$ serim açısında bindirme açısı 30° nin yük - uzama grafiği	69
Şekil 3.5. $[0/90^\circ]$ serim açısında bindirme açısı 45° nin yük - uzama grafiği	70
Şekil 3.6. $[0/90^\circ]$ serim açısında bindirme açısı 60° nin yük - uzama grafiği	70
Şekil 3.7. $[0/90^\circ]$ serim açısında bindirme açısı 75° nin yük - uzama grafiği	71
Şekil 3.8. Bindirme açısı 30° nin bütün serim açılarındaki yük - uzama grafiği	71
Şekil 3.9. Bindirme açısı 45° nin bütün serim açılarındaki yük - uzama grafiği	72
Şekil 3.10. Bindirme açısı 60° nin bütün serim açılarındaki yük - uzama grafiği	72
Şekil 3.11. Bindirme açısı 75° nin bütün serim açılarındaki yük - uzama grafiği	73
Şekil 3.12. $[0/90^\circ]$ serim açısındaki bindirme açılarının yük - uzama grafiği	73
Şekil 3.13. $[\pm 45^\circ]$ serim açısındaki bindirme açılarının yük - uzama grafiği	74
Şekil 3.14. $[0/90/\pm 45^\circ]$ serim açısındaki bindirme açılarının yük - uzama grafiği	74
Şekil 3.15. $[0/90^\circ]$ serim açısında bindirme açısı 30° nin yük - uzama grafiği	75
Şekil 3.16. $[0/90^\circ]$ serim açısında bindirme açısı 45° nin yük - uzama grafiği	75
Şekil 3.17. $[0/90^\circ]$ serim açısında bindirme açısı 60° nin yük - uzama grafiği	76
Şekil 3.18. $[0/90^\circ]$ serim açısında bindirme açısı 75° nin yük - uzama grafiği	76
Şekil 3.19. Bindirme açısı 30° nin bütün serim açılarındaki yük - uzama grafiği	77
Şekil 3.20. Bindirme açısı 45° nin bütün serim açılarındaki yük - uzama grafiği	77
Şekil 3.21. Bindirme açısı 60° nin bütün serim açılarındaki yük - uzama grafiği	78
Şekil 3.22. Bindirme açısı 75° nin bütün serim açılarındaki yük - uzama grafiği	78
Şekil 3.23. $[0/90^\circ]$ serim açısında bindirme açısı 30° nin yük - uzama grafiği	79
Şekil 3.24. $[0/90^\circ]$ serim açısında bindirme açısı 45° nin yük - uzama grafiği	79
Şekil 3.25. $[0/90^\circ]$ serim açısında bindirme açısı 60° nin yük - uzama grafiği	80
Şekil 3.26. $[0/90^\circ]$ serim açısında bindirme açısı 75° nin yük - uzama grafiği	80
Şekil 3.27. $[\pm 45^\circ]$ serim açısında bindirme açısı 30° nin yük - uzama grafiği	81
Şekil 3.28. $[\pm 45^\circ]$ serim açısında bindirme açısı 45° nin yük - uzama grafiği	81
Şekil 3.29. $[\pm 45^\circ]$ serim açısında bindirme açısı 60° nin yük - uzama grafiği	82
Şekil 3.30. $[\pm 45^\circ]$ serim açısında bindirme açısı 75° nin yük - uzama grafiği	82
Şekil 3.31. $[0/90/\pm 45^\circ]$ serim açısında bindirme açısı 30° nin yük - uzama grafiği	83
Şekil 3.32. $[0/90/\pm 45^\circ]$ serim açısında bindirme açısı 45° nin yük - uzama grafiği	83
Şekil 3.33. $[0/90/\pm 45^\circ]$ serim açısında bindirme açısı 60° nin yük - uzama grafiği	84
Şekil 3.34. $[0/90/\pm 45^\circ]$ serim açısında bindirme açısı 75° nin yük - uzama grafiği	84
Şekil 3.35. DP460 yapıştırıcısı ile birleştirilen numunelere ait deneysel gerilmeler	85
Şekil 3.36. DP460 yapıştırıcısı ile birleştirilen numunelere ait deneysel hasar yükleri	85
Şekil 3.37. ATLAC580 yapıştırıcısı ile birleştirilen numunelere ait deneysel gerilmeler...	86
Şekil 3.38. ATLAC580 yapıştırıcısı ile birleştirilen numunelere ait deneysel hasar yükleri	86
Şekil 3.39. DP460 yapıştırıcısına ait deneysel ve sayısal hasar yüklerin değişimi	90
Şekil 3.40. ATLAC580 yapıştırıcısına ait deneysel ve sayısal hasar yüklerin değişimi	90
Şekil 3.41. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantı çeşidinde kritik hatlar [AC]	93
Şekil 3.42. $[0^\circ/90^\circ]$ serim açısındaki normalleştirilmiş σ_x gerilmeleri	94

Şekil 3.43. [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_y gerilmeleri	94
Şekil 3.44. [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_z gerilmeleri	95
Şekil 3.45. [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş τ_{xy} gerilmeleri	95
Şekil 3.46. [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_{eqv} gerilmeleri.....	96
Şekil 3.47. [±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_x gerilmeleri	97
Şekil 3.48. [±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_y gerilmeleri	97
Şekil 3.49. [±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_z gerilmeleri.....	98
Şekil 3.50. [±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş τ_{xy} gerilmeleri.....	98
Şekil 3.51. [±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_{eqv} gerilmeleri	99
Şekil 3.52. [0°/90°/±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_x gerilmeleri	100
Şekil 3.53. [0°/90°/±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_y gerilmeleri	100
Şekil 3.54. [0°/90°/±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_z gerilmeleri.....	101
Şekil 3.55. [0°/90°/±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş τ_{xy} gerilmeleri.....	101
Şekil 3.56. [0°/90°/±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_{eqv} gerilmeleri.....	102
Şekil 3.57. 45° açığa ait [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_x gerilmeleri.....	103
Şekil 3.58. 45° açığa ait [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_y gerilmeleri.....	103
Şekil 3.59. 45° açığa ait [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_z gerilmeleri.....	104
Şekil 3.60. 45° açığa ait [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş τ_{xy} gerilmeleri	104
Şekil 3.61. 45° açığa ait [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_{eqv} gerilmeleri	105
Şekil 3.62. 45° açığa ait [±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_x gerilmeleri	106
Şekil 3.63. 45° açığa ait [±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_y gerilmeleri	106
Şekil 3.64. 45° açığa ait [±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_z gerilmeleri	107
Şekil 3.65. 45° açığa ait [±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş τ_{xy} gerilmeleri	107
Şekil 3.66. 45° açığa ait [±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_{eqv} gerilmeleri.....	108
Şekil 3.67. 45° açığa ait [0°/90°/±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_x gerilmeleri	109
Şekil 3.68. 45° açığa ait [0°/90°/±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_y gerilmeleri	109
Şekil 3.69. 45° açığa ait [0°/90°/±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_z gerilmeleri	110
Şekil 3.70. 45° açığa ait [0°/90°/±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş τ_{xy} gerilmeleri.....	110
Şekil 3.71. 45° açığa ait [0°/90°/±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_{eqv} gerilmeleri	111
Şekil 3.72. [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_x gerilmeleri	112
Şekil 3.73. [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_y gerilmeleri	112
Şekil 3.74. [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_z gerilmeleri	113
Şekil 3.75. [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş τ_{xy} gerilmeleri	113
Şekil 3.76. [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_{eqv} gerilmeleri.....	114
Şekil 3.77. [±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_x gerilmeleri	115
Şekil 3.78. [±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_y gerilmeleri	115
Şekil 3.79. [±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_z gerilmeleri.....	116
Şekil 3.80. [±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş τ_{xy} gerilmeleri	116
Şekil 3.81. [±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_{eqv} gerilmeleri	117
Şekil 3.82. [0°/90°/±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_x gerilmeleri	118
Şekil 3.83. [0°/90°/±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_y gerilmeleri	118
Şekil 3.84. [0°/90°/±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_z gerilmeleri.....	119
Şekil 3.85. [0°/90°/±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş τ_{xy} gerilmeleri.....	119
Şekil 3.86. [0°/90°/±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_{eqv} gerilmeleri.....	120
Şekil 3.87. 45° açığa ait [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_x gerilmeleri.....	121
Şekil 3.88. 45° açığa ait [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_y gerilmeleri.....	121

Şekil 3.89. 45° açiya ait [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_z gerilmeleri.....	122
Şekil 3.90. 45° açiya ait [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş τ_{xy} gerilmeleri.....	122
Şekil 3.91. 45° açiya ait [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_{eqv} gerilmeleri	123
Şekil 3.92. 45° açiya ait [$\pm 45^\circ$] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_x gerilmeleri	124
Şekil 3.93. 45° açiya ait [$\pm 45^\circ$] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_y gerilmeleri	124
Şekil 3.94. 45° açiya ait [$\pm 45^\circ$] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_z gerilmeleri	125
Şekil 3.95. 45° açiya ait [$\pm 45^\circ$] serim açısındaki normalleştirilmiş τ_{xy} gerilmeleri	125
Şekil 3.96. 45° açiya ait [$\pm 45^\circ$] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_{eqv} gerilmeleri.....	126
Şekil 3.97. 45° açiya ait [0°/90°/ $\pm 45^\circ$] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_x gerilmeleri	127
Şekil 3.98. 45° açiya ait [0°/90°/ $\pm 45^\circ$] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_y gerilmeleri	127
Şekil 3.99. 45° açiya ait [0°/90°/ $\pm 45^\circ$] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_z gerilmeleri	128
Şekil 3.100. 45° açiya ait [0°/90°/ $\pm 45^\circ$] serim açısındaki normalleştirilmiş τ_{xy} gerilmeleri	128
Şekil 3.101. 45° açiya ait [0°/90°/ $\pm 45^\circ$] serim, normalleştirilmiş σ_{eqv} gerilmeler.....	129
Şekil 3.102. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantı çeşidinde kritik hatlar [A'C']	129
Şekil 3.103. [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_x gerilmeleri	130
Şekil 3.104. [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_y gerilmeleri	131
Şekil 3.105. [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_z gerilmeleri	131
Şekil 3.106. [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş τ_{xy} gerilmeleri	132
Şekil 3.107. [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_{eqv} gerilmeleri.....	132
Şekil 3.108. [$\pm 45^\circ$] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_x gerilmeleri	133
Şekil 3.109. [$\pm 45^\circ$] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_y gerilmeleri	133
Şekil 3.110. [$\pm 45^\circ$] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_z gerilmeleri.....	134
Şekil 3.111. [$\pm 45^\circ$] serim açısındaki normalleştirilmiş τ_{xy} gerilmeleri.....	134
Şekil 3.112. [$\pm 45^\circ$] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_{eqv} gerilmeleri	135
Şekil 3.113. [0°/90°/ $\pm 45^\circ$] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_x gerilmeleri	135
Şekil 3.114. [0°/90°/ $\pm 45^\circ$] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_y gerilmeleri	136
Şekil 3.115. [0°/90°/ $\pm 45^\circ$] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_z gerilmeleri.....	136
Şekil 3.116. [0°/90°/ $\pm 45^\circ$] serim açısındaki normalleştirilmiş τ_{xy} gerilmeleri.....	137
Şekil 3.117. [0°/90°/ $\pm 45^\circ$] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_{eqv} gerilmeleri	137
Şekil 3.118. 45° açiya ait [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_x gerilmeleri.....	138
Şekil 3.119. 45° açiya ait [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_y gerilmeleri.....	139
Şekil 3.120. 45° açiya ait [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_z gerilmeleri	139
Şekil 3.121. 45° açiya ait [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş τ_{xy} gerilmeleri	140
Şekil 3.122. 45° açiya ait [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_{eqv} gerilmeleri	140
Şekil 3.123. 45° açiya ait [$\pm 45^\circ$] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_x gerilmeleri	141
Şekil 3.124. 45° açiya ait [$\pm 45^\circ$] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_y gerilmeleri	141
Şekil 3.125. 45° açiya ait [$\pm 45^\circ$] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_z gerilmeleri	142
Şekil 3.126. 45° açiya ait [$\pm 45^\circ$] serim açısındaki normalleştirilmiş τ_{xy} gerilmeleri.....	142
Şekil 3.127. 45° açiya ait [$\pm 45^\circ$] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_{eqv} gerilmeleri.....	143
Şekil 3.128. 45° açiya ait [0°/90°/ $\pm 45^\circ$] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_x gerilmeleri	143
Şekil 3.129. 45° açiya ait [0°/90°/ $\pm 45^\circ$] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_y gerilmeleri	144
Şekil 3.130. 45° açiya ait [0°/90°/ $\pm 45^\circ$] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_z gerilmeleri	144

Şekil 3.131. 45° açığa ait [0°/90°/±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş τ_{xy} gerilmeleri	145
Şekil 3.132. 45° açığa ait [0°/90°/±45°] serim, normalleştirilmiş σ_{eqv} gerilmeleri	145
Şekil 3.133. [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_x gerilmeleri	146
Şekil 3.134. [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_y gerilmeleri	147
Şekil 3.135. [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_z gerilmeleri	147
Şekil 3.136. [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş τ_{xy} gerilmeleri	148
Şekil 3.137. [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_{eqv} gerilmeleri.....	148
Şekil 3.138. [±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_x gerilmeleri	149
Şekil 3.139. [±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_y gerilmeleri	149
Şekil 3.140. [±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_z gerilmeleri.....	150
Şekil 3.141. [±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş τ_{xy} gerilmeleri.....	150
Şekil 3.142. [±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_{eqv} gerilmeleri	151
Şekil 3.143. [0°/90°/±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_x gerilmeleri	151
Şekil 3.144. [0°/90°/±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_y gerilmeleri	152
Şekil 3.145. [0°/90°/±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_z gerilmeleri.....	152
Şekil 3.146. [0°/90°/±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş τ_{xy} gerilmeleri.....	153
Şekil 3.147. [0°/90°/±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_{eqv} gerilmeleri	153
Şekil 3.148. 45° açığa ait [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_x gerilmeleri.....	154
Şekil 3.149. 45° açığa ait [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_y gerilmeleri.....	155
Şekil 3.150. 45° açığa ait [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_z gerilmeleri	155
Şekil 3.151. 45° açığa ait [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş τ_{xy} gerilmeleri	156
Şekil 3.152. 45° açığa ait [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_{eqv} gerilmeleri	156
Şekil 3.153. 45° açığa ait [±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_x gerilmeleri	157
Şekil 3.154. 45° açığa ait [±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_y gerilmeleri	157
Şekil 3.155. 45° açığa ait [±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_z gerilmeleri	158
Şekil 3.156. 45° açığa ait [±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş τ_{xy} gerilmeleri.....	158
Şekil 3.157. 45° açığa ait [±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_{eqv} gerilmeleri.....	159
Şekil 3.158. 45° açığa ait [0°/90°/±45°] serim, normalleştirilmiş σ_x gerilmeleri.....	159
Şekil 3.159. 45° açığa ait [0°/90°/±45°] serim, normalleştirilmiş σ_y gerilmeleri.....	160
Şekil 3.160. 45° açığa ait [0°/90°/±45°] serim, normalleştirilmiş σ_z gerilmeleri	160
Şekil 3.161. 45° açığa ait [0°/90°/±45°] serim, normalleştirilmiş τ_{xy} gerilmeleri	161
Şekil 3.162. 45° açığa ait [0°/90°/±45°] serim, normalleştirilmiş σ_{eqv} gerilmeleri	161
Şekil 3.163. Kompozit malzeme yüzeyindeki kritik hatlar [AC].....	162
Şekil 3.164. 45° açığa ait [0°/90°] serim açısındaki σ_x gerilmeleri	163
Şekil 3.165. 45° açığa ait [0°/90°] serim açısındaki σ_y gerilmeleri	163
Şekil 3.166. 45° açığa ait [0°/90°] serim açısındaki σ_z gerilmeleri	164
Şekil 3.167. 45° açığa ait [0°/90°] serim açısındaki τ_{xy} gerilmeleri	164
Şekil 3.168. 45° açığa ait [0°/90°] serim açısındaki σ_{eqv} gerilmeleri.....	165
Şekil 3.169. 45° açığa ait [±45°] serim açısındaki σ_x gerilmeleri.....	166
Şekil 3.170. 45° açığa ait [±45°] serim açısındaki σ_y gerilmeleri.....	166
Şekil 3.171. 45° açığa ait [±45°] serim açısındaki σ_z gerilmeleri.....	167
Şekil 3.172. 45° açığa ait [±45°] serim açısındaki τ_{xy} gerilmeleri.....	167
Şekil 3.173. 45° açığa ait [±45°] serim açısındaki σ_{eqv} gerilmeleri	168
Şekil 3.174. 45° açığa ait [0°/90°/±45°] serim açısındaki σ_x gerilmeleri	169
Şekil 3.175. 45° açığa ait [0°/90°/±45°] serim açısındaki σ_y gerilmeleri	169
Şekil 3.176. 45° açığa ait [0°/90°/±45°] serim açısındaki σ_z gerilmeleri.....	170

Şekil 3.177. 45° açığa ait $[0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ]$ serim açısındaki τ_{xy} gerilmeleri.....	170
Şekil 3.178. 45° açığa ait $[0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ]$ serim açısındaki σ_{eqv} gerilmeleri	171
Şekil 3.179. 45° açığa ait serim açılarındaki σ_x gerilmeleri.....	171
Şekil 3.180. 45° açığa ait serim açılarındaki σ_y gerilmeleri.....	172
Şekil 3.181. 45° açığa ait serim açılarındaki σ_z gerilmeleri	172
Şekil 3.182. 45° açığa ait $[0^\circ/90^\circ]$ serim açısındaki σ_x gerilmeleri	173
Şekil 3.183. 45° açığa ait $[0^\circ/90^\circ]$ serim açısındaki σ_y gerilmeleri	174
Şekil 3.184. 45° açığa ait $[0^\circ/90^\circ]$ serim açısındaki σ_z gerilmeleri	174
Şekil 3.185. 45° açığa ait $[0^\circ/90^\circ]$ serim açısındaki τ_{xy} gerilmeleri	175
Şekil 3.186. 45° açığa ait $[0^\circ/90^\circ]$ serim açısındaki σ_{eqv} gerilmeleri.....	175
Şekil 3.187. 45° açığa ait $[\pm 45^\circ]$ serim açısındaki σ_x gerilmeleri.....	176
Şekil 3.188. 45° açığa ait $[\pm 45^\circ]$ serim açısındaki σ_y gerilmeleri.....	177
Şekil 3.189. 45° açığa ait $[\pm 45^\circ]$ serim açısındaki σ_z gerilmeleri.....	177
Şekil 3.190. 45° açığa ait $[\pm 45^\circ]$ serim açısındaki τ_{xy} gerilmeleri.....	178
Şekil 3.191. 45° açığa ait $[\pm 45^\circ]$ serim açısındaki σ_{eqv} gerilmeleri	178
Şekil 3.192. 45° açığa ait $[0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ]$ serim açısındaki σ_x gerilmeleri	179
Şekil 3.193. 45° açığa ait $[0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ]$ serim açısındaki σ_y gerilmeleri	180
Şekil 3.194. 45° açığa ait $[0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ]$ serim açısındaki σ_z gerilmeleri.....	180
Şekil 3.195. 45° açığa ait $[0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ]$ serim açısındaki τ_{xy} gerilmeleri.....	181
Şekil 3.196. 45° açığa ait $[0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ]$ serim açısındaki σ_{eqv} gerilmeleri	181
Şekil 3.197. 45° açığa ait serim açılarındaki σ_x gerilmeleri.....	182
Şekil 3.198. 45° açığa ait serim açılarındaki σ_y gerilmeleri.....	183
Şekil 3.199. 45° açığa ait serim açılarındaki σ_z gerilmeleri	183
Şekil 3.200. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantı çeşidinde kritik hatlar [DE].....	184
Şekil 3.201. $[0^\circ/90^\circ]$ serim açısındaki normalleştirilmiş σ_x gerilmeleri	185
Şekil 3.202. $[0^\circ/90^\circ]$ serim açısındaki normalleştirilmiş σ_y gerilmeleri	185
Şekil 3.203. $[0^\circ/90^\circ]$ serim açısındaki normalleştirilmiş σ_z gerilmeleri	186
Şekil 3.204. $[0^\circ/90^\circ]$ serim açısındaki normalleştirilmiş τ_{xy} gerilmeleri	186
Şekil 3.205. $[0^\circ/90^\circ]$ serim açısındaki normalleştirilmiş σ_{eqv} gerilmeleri.....	187
Şekil 3.206. $[\pm 45^\circ]$ serim açısındaki normalleştirilmiş σ_x gerilmeleri	188
Şekil 3.207. $[\pm 45^\circ]$ serim açısındaki normalleştirilmiş σ_y gerilmeleri	188
Şekil 3.208. $[\pm 45^\circ]$ serim açısındaki normalleştirilmiş σ_z gerilmeleri.....	189
Şekil 3.209. $[\pm 45^\circ]$ serim açısındaki normalleştirilmiş τ_{xy} gerilmeleri.....	189
Şekil 3.210. $[\pm 45^\circ]$ serim açısındaki normalleştirilmiş σ_{eqv} gerilmeleri	190
Şekil 3.211. $[0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ]$ serim açısındaki normalleştirilmiş σ_x gerilmeleri	191
Şekil 3.212. $[0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ]$ serim açısındaki normalleştirilmiş σ_y gerilmeleri	191
Şekil 3.213. $[0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ]$ serim açısındaki normalleştirilmiş σ_z gerilmeleri.....	192
Şekil 3.214. $[0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ]$ serim açısındaki normalleştirilmiş τ_{xy} gerilmeleri.....	192
Şekil 3.215. $[0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ]$ serim açısındaki normalleştirilmiş σ_{eqv} gerilmeleri	193
Şekil 3.216. 45° açığa ait serim açılarındaki normalleştirilmiş σ_x gerilmeleri.....	194
Şekil 3.217. 45° açığa ait serim açılarındaki normalleştirilmiş σ_y gerilmeleri.....	194
Şekil 3.218. 45° açığa ait serim açılarındaki normalleştirilmiş σ_z gerilmeleri.....	195
Şekil 3.219. 45° açığa ait serim açılarındaki normalleştirilmiş τ_{xy} gerilmeleri.....	195
Şekil 3.220. 45° açığa ait serim açılarındaki normalleştirilmiş σ_{eqv} gerilmeleri	196
Şekil 3.221. 45° açığa ait $[0^\circ/90^\circ]$ serim açısındaki normalleştirilmiş σ_x gerilmeleri.....	197
Şekil 3.222. 45° açığa ait $[0^\circ/90^\circ]$ serim açısındaki normalleştirilmiş σ_y gerilmeleri.....	197
Şekil 3.223. 45° açığa ait $[0^\circ/90^\circ]$ serim açısındaki normalleştirilmiş σ_z gerilmeleri	198

Şekil 3.224. 45° açıya ait [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş τ_{xy} gerilmeleri	198
Şekil 3.225. 45° açıya ait [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_{eqv} gerilmeleri	199
Şekil 3.226. 45° açıya ait [$\pm 45^\circ$] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_x gerilmeleri	200
Şekil 3.227. 45° açıya ait [$\pm 45^\circ$] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_y gerilmeleri	200
Şekil 3.228. 45° açıya ait [$\pm 45^\circ$] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_z gerilmeleri	201
Şekil 3.229. 45° açıya ait [$\pm 45^\circ$] serim açısındaki normalleştirilmiş τ_{xy} gerilmeleri.....	201
Şekil 3.230. 45° açıya ait [$\pm 45^\circ$] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_{eqv} gerilmeleri.....	202
Şekil 3.231. 45° açıya ait [0°/90°/ $\pm 45^\circ$] serim, normalleştirilmiş σ_x gerilmeleri.....	203
Şekil 3.232. 45° açıya ait [0°/90°/ $\pm 45^\circ$] serim, normalleştirilmiş σ_y gerilmeleri.....	203
Şekil 3.233. 45° açıya ait [0°/90°/ $\pm 45^\circ$] serim, normalleştirilmiş σ_z gerilmeleri.....	204
Şekil 3.234. 45° açıya ait [0°/90°/ $\pm 45^\circ$] serim, normalleştirilmiş τ_{xy} gerilmeleri	204
Şekil 3.235. 45° açıya ait [0°/90°/ $\pm 45^\circ$] serim, normalleştirilmiş σ_{eqv} gerilmeleri	205
Şekil 4.1. Kohezyon hasar bölgeleri.....	207
Şekil 4.2. Adhezyon hasar bölgeleri.....	208

TABOLAR LİSTESİ

SAYFA NO

Tablo 1.1. Cam elyafların mekanik özellikleri ve bileşimleri [48].	17
Tablo 1.2. Hasar türleri ve sebepleri [68].	38
Tablo 1.3. Kopma türleri ve kuvveti artırma yöntemleri [68].	38
Tablo 2.1. Prepreg teknik özellikleri (GE 8903-280-37S)	53
Tablo 2.2. Cam elyaf kompozit malzemenin mekanik özellikleri	54
Tablo 2.3. Kompozit malzemenin fiber açıları	56
Tablo 2.4. Deneyde kullanılan yapısal yapıştırıcılar	57
Tablo 2.5. Yapıştırıcıların mekanik özellikleri	57
Tablo 2.6. Numunelerin geometrik ölçüleri	59
Tablo 3.1. Deneysel gerilmeler ve deneysel hasar yükleri	87
Tablo 3.2. Çalışmada kullanılan yapıştırıcıların çekme dayanımları	88
Tablo 3.3. Yapıştırıcı ara yüzeyindeki gerilmelerin karşılaştırılması	89
Tablo 3.4. Yapıştırıcı ara yüzeyindeki hasar yüklerinin karşılaştırılması	91

SEMBOLLER LİSTESİ

a	: Bindirme mesafesi uzunluğu
A	: Alan
b	: Bindirme mesafesi uzunluğu
E	: Elastisite modülü
F	: Çekme kuvveti
F_{deney}	: Deneysel hasar yükü
F_{ANSYS}	: ANSYS hasar yükü
G	: Kayma modülü
L	: Malzeme boyu
t	: Malzeme kalınlığı
X_Ç	: Çekme dayanımı
σ_x	: x yönündeki çekme gerilmesi
σ_y	: y yönündeki çekme gerilmesi
σ_z	: z yönündeki çekme gerilmesi
σ_{eqv}	: Von Mises gerilmesi
σ_{max}	: Maksimum gerilme
τ_{xy}	: x-y düzlemindeki kayma gerilmesi
ρ	: Yoğunluk
ν	: Poisson oranı
ε	: Normal şekil değişimi
(°)	: Derece

KISALTMALAR

EQV	: Eşlenik gerilme
EŞ	: Eşdeğer
SEM	: Sonlu Elemanlar Metodu
ASTM	: American Society for Testing and Materials
PVA	: Polyvinyl Acetates
AH	: Adhezyon hasarı
KH	: Kohesyon hasarı
ÖKH	: Özel Kohesyon hasarı
3D	: Üç Boyutlu

1. GİRİŞ

Yapıştırma, cıvata, perçin, kaynak ve lehim gibi mekanik birleştirme yöntemlerine alternatif olarak kullanılan bir birleştirme yöntemidir. Yapıştırma işlemi, birleştirilen parçaların ergime sıcaklıklarının altında yapılabildiği için; kaynak, lehim ve diğer bağlantı şekillerinde ergime sonucu kristal yapıda değişikliğe neden olmadığından ve gerilme yığılmaları oluşturmadığından kendisine uygun bir gelişme alanı bulmuştur.

Kırılan ve kopan malzemeleri tekrar kullanabilmek için mekanik birleştirme yöntemleri kullanılabilir. Ancak yapıştırıcılarla yapılan birleştirme daha kolay ve daha uzun ömürlüdür. Bu tip birleştirmelerde parçalar eski mukavemetine gelmese bile yine de uzun süre kullanılabilir. Yapıştırıcılar kullanılarak endüstride kullanıma yeni sunulacak birçok malzemeyi daha kolay ve daha kısa sürede birleştirmek mümkündür.

Özellikle kompozit malzemelerde meydana gelen hızlı gelişmeler ile birlikte, bağlantı güvenilirliğinin gerekli olduğu havacılık, uzay ve otomotiv sanayi gibi sektörlerde kompozit malzemeler kullanılacaksa, mekanik birleştirme yöntemlerinden uzaklaşılması zorunlu olmuştur.

Günümüzde mevcut malzemelerin birçok özelliği hızla gelişen teknolojinin ihtiyaçlarını karşılamayınca, üstün özellikleri olan kompozit malzemelerin üretilmesiyle bu alanda hızlı bir gelişme sürecine geçilmiştir. Kompozit malzemeler yüksek mukavemet/ağırlık ve yüksek rijitlik/ağırlık oranlarına sahiptir. Ayrıca mevcut malzemeler yerine daha hafif yapıların oluşumuna olanak sağlamıştır. Kompozit malzemeler güçlü bir yapıya sahip olması ve değişken maliyetlerinin düşürülmesiyle birlikte verimliliğin artırılmasıyla yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bakım onarım masrafları bakımından avantajlı olan kompozit malzemeler, uzun ömürlü, süratli ve daha hafif olmalarından tercih edilmektedirler. İmalat sanayi kapasite kullanım oranlarında dahi artık kompozit malzemeler bulunmaktadır.

Çok kuvvetli epoksi tipi yapıştırıcıların geliştirilmesi ve yapıştırma tekniklerindeki yenilikler, yapıştırma bağlantılarını tercih edilir hale getirmiştir.

Genellikle yapıştırma bağlantılarının mukavemeti, birleştirilen parçaların elastisite modülüne, geometrisine, kalınlığına, yapıştırıcının kayma modülüne, bindirme uzunluğuna, birleşen yüzeylerin ön işlemlerine ve yapışma işlemine bağlıdır. Bu şartlar araştırmacıların yapıştırıcılar ve yapıştırma bağlantılarının mekanik davranışlarının belirlenmesi üzerine yoğunlaşmasına yol açmıştır.

Yapıştırıcı kullanımından önce dikkate alınması gereken bazı faktörler vardır. Bunlar; yapıştırıcı ile yapıştırılacak malzemeler arasında bir uyum olmalı, çalışma ortamına ve hesaplanan çalışma yüklerine dayanmalıdır. Bununla birlikte, kürleşme sistemi, uygulama yöntemi, ön yüzey hazırlığı, yapışma süresi ve maliyetler de dikkate alınmalıdır.

Bu projenin başlangıcında, kompozit malzemelerin tasarımı ve bu malzemelerin mekanik özelliklerinin deneysel cihazlarla tespiti ile ilgili bir çalışma yapılmıştır. Fiber serim açısı değiştirilerek malzemenin farklı serim açılarındaki mukavemeti ve davranışı incelenmiştir.

Bu tez çalışmasında kullanılan tabakalı kompozit plakaların üretimi Odak Kompozit Teknolojileri A.Ş. tarafından yapılmıştır. Cam elyaf kompozit malzeme, prepreg (ön reçine emdirilmiş ıslak elyaf) kullanılarak üretilmiştir. Deney numuneleri, üretilen kompozit plakalardan CNC freze yardımıyla ASTM standartlarına uygun ve istenilen geometrik ölçülerde kesilmiştir. Deneyler, 100 kN yük kapasiteli test cihazında yapılmıştır. Analizler ANSYS 14.5 programında yapılmıştır. Daha sonra, deneysel ve sayısal analiz sonuçları karşılaştırılmıştır.

1.1. Literatür Özetleri

Kompozit malzemelerin yapıştırıcı ile birleştirilmesinde, yapıştırma bağlantılarının mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacı ile literatürde birçok sayısal ve deneysel çalışma yapılmıştır.

Solmaz ve Turgut [1], yaptıkları çalışmada, biri diğerine göre daha sünek olan iki farklı yapıştırıcı kullanılarak birleştirilen bağlantılarda serbest uç açısının ve bindirme mesafesinin bağlantı mukavemetini nasıl etkilediğini tespit etmeye çalışmışlardır. Elde edilen bu verilerden, her bir bağlantının ortalama kayma gerilmesi hesaplanmış ve sonuçları yapıştırıcı cinsi, uç açısı ve bindirme mesafesine göre karşılaştırılarak grafikler halinde sunmuşlardır. Grafikler değerlendirildiğinde uç açısına sahip numunelerin mukavemeti uç açısı olmayan numunelere göre daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir.

Turan ve Kaman [2], çalışmalarında iki kompozit levha kullanarak tek tesirli bir yapıştırma bağlantısının hasar analizini sayısal ve deneysel yöntemler kullanarak araştırmışlardır. Dört tabakalı karbon fiber takviyeli epoksi reçine matriksli kompozit levhalar kullanılmış olup yapışma bağlantısında bindirme uzunluğunun etkisi, malzeme genişliğinin etkisi ve yapıştırıcı kalınlığının etkisini sayısal olarak araştırmıştır. Yapışma alanındaki değişimin hasar yükleri üzerinde etkisinin olduğu görülmüştür. Örneğin yapıştırıcı kalınlığındaki artışın hasar yüklerini arttırdığı ayrıca hasar yükünün en düşük olduğu $[90^0]_4$ tabaka diziliminde en yüksek hasar yüküne sahip yapıştırma bağlantısında sadece matriks hasarı meydana geldiği görülmüştür. Yapıştırma bağlantısına ait sayısal çalışma sonuçlarına göre, kompozit levha genişliğinin hasar yükleri üzerine en etkili parametre olduğu belirlenmiştir.

Adin H. [3], açılı alın tip bir yapıştırma bağlantısında hasar yükü ve alın açısının etkisi araştırılmıştır. Cam elyaf kompozit numunelerin 15^0 - 30^0 - 45^0 - 60^0 - 75^0 lik açılı alın bağlantısı kullanarak çekme yükü altındaki etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Sonuçta bindirme açısı arttığında hasar yükü değerleri tüm bağlantı modellerinde azaldığı gözlemlenmiştir. 45^0 lik açıda bağlantı mukavemetinin en yüksek değere ulaşmıştır. Tüm numunelerde koheziv hasar oluşmuştur.

Adin H. [4], çekme yükü altında açılı alın tip bir yapıştırma bağlantısında alın açısının etkisi uzama hattı boyunca incelenmiştir. Cam elyaf kompozit numunelerin 15^0 - 30^0 - 45^0 - 60^0 - 75^0 lik açılı alın bağlantısını kullanarak çekme yükü altındaki etkisini uzama hattı boyunca deneysel olarak araştırılmıştır. Sonuçta maksimum uzama değerleri 60^0 lik açıda çıkmıştır. Uzama etkisinin mukavemet ve hasar yükü üzerinde açının artmasıyla arttığı belirlenmiştir.

Özel, Aydın ve Temiz [5], eğilme momenti uygulanmış tek katlı bir yapıştırma bağlantısının, iki boyutlu lineer olmayan sayısal analiz ile elasto-plastik gerilme analizini yapmışlardır. Geometrik özelliklerin tek katlı yapıştırma bağlantısının mukavemetine etkisini belirlemek amacıyla, her bir yapıştırıcı için dört ayrı yapıştırılan parça kalınlığı ve bindirme bölgesi uzunluğu kullanmışlardır. Elde edilen sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırmış, yapıştırılan parça kalınlığının artmasının bağlantı mukavemetini önemli ölçüde etkilediğini, esnek yapıştırıcılarda bindirme bölgesinin uzunluğunun artması ile taşınan yükün arttığını belirlemişlerdir.

Kadioğlu ve Es-Souni [6], tek katlı yapıştırma bağlantısının eğilme momenti ve çekme yüklerine mukavemetini deneysel çalışmalarla belirlemeye çalışmışlardır. Yapıştırılan parçaların plastisitesinin kopmaya önemli derecede etki ettiğini belirlemişlerdir. Deneysel sonuçlar, yüksek mukavemetli bir yapıştırma bağlantısı tasarımı yapılabilmesi için yapıştırılan parça, yapıştırıcı ve yükleme çeşidinin birlikte düşünülmesi gerektiğini göstermişlerdir.

Gunnion ve Herszberg [7], çalışmalarında, pahlı bir birleştirmenin performansında çeşitli parametrelerin etkilerini sonlu elemanlar modeliyle geliştirmişlerdir. Yapıştırma hattı boyunca gerilme dağılımlarını incelemişler ve maksimum gerilmelerin yoğunluklarını pah açısındaki değişimlere, yapıştırma kalınlığına, tabaka kalınlığına, plaka kalınlığına ve tabaka düzenine göre belirlemişlerdir.

Yang vd. [8], yaptıkları çalışmada, yapıştırılmış tekli bindirme birleştirmelerde, yapışkan gerilme dağılımlarına karar verebilmek için analitik bir model geliştirmişlerdir. Model oluştururken, yapışkanı von Mises akma kriterine göre elasto-plastik kabul ederken kompozit numuneleri ise lineer elastik kabul etmişlerdir. Tabakalanmış anizotropik plaka teorisini yapıştırılmış kompozit plakaların genel denklemlerinin türetilmesinde

uygulamışlardır. Geliştirdikleri gerilme modelinin yapışkan gerilme dağılımlarını Abaqus sonlu elemanlar analizi ile karşılaştırıp doğrulamışlardır.

Adams ve Peppiat [9], yapıştırıcı bağlantısının genişliği boyunca önemli gerilmelerin mevcut olduğunu tespit etmiş ve yapıştırılan malzemeler ile yapıştırıcıdaki kayma gerilmelerinin uygulanan yük doğrultusuna dik yönde de mevcut olduğunu ve yapıştırılan malzemelerde bu gerilmelere poisson oranının sebep olduğunu ifade etmişlerdir.

Guess vd. [10], iki farklı yapıştırıcı ve farklı kalınlıklarda yapıştırılan malzeme kullanarak; ürettikleri yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantılarının kayma dayanımları üzerinde analitik ve deneysel olarak çalışmışlardır. Numuneler üzerinde yaptıkları analizlerde kayma dayanımlarının çok düşük ve bu tipteki numunelerin hasarlarında soyulma gerilmesinin rolünün büyük olduğunu göstermişlerdir. Kalın malzeme kullanarak ürettikleri numunelerde ise yukarıda bahsedilenlerin tersine bir durumun oluştuğunu söylemişlerdir.

Pandey ve ark. [11], tarafından, viskoplastisite göz önüne alınarak gerçekleştirilen yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların lineer olmayan analizinde, yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların mukavemeti üzerine yapıştırma boyu, yapıştırılan malzemenin açılı durumları ve yapıştırıcı kalınlığı göz önüne alınmıştır. Yapıştırma uzunluğunun artmasıyla bağlantıda meydana gelen maksimum kayma ve soyulma gerilmelerinin azaldığı tespit edilmiştir.

Çalık [12], yapıştırma bağlantılarında mukavemet, birleşen levhaların kalınlığına, birleşen levhaların elastisite modülüne, bindirme uzunluğuna, yapışma yüzeyi ön işlemlerine, yapıştırıcının kayma modülüne ve yapışmanın maruz kalacağı diğer şartlara bağlı olduğunu söylemiştir. Yapıştırma ile birleşmede yapışma uzunluğunu artırma, yapışma hattının her iki ucunda ($x=0$ ve $x=l$) oluşan kayma gerilme konsantrasyonlarını yani maksimum kayma gerilmelerini belirli bir değerin ötesinde azaltmadığını ancak oluşan bu gerilme tepeciklerinin minimize edilmesi gerektiğini söylemiştir. Bunun içinde keskin bağlantı köşelerinin yuvarlatılması tavsiye edilmiştir.

Kumar ve Pandey [13], tarafından yapılan sayısal çalışmada, çeki yüküne maruz çift yapıştırıcı kullanılarak (bindirme uzunluğunun serbest uç kısımlarına yumuşak orta kısmına ise sert yapıştırıcı) birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantısında sonlu elemanlar

yöntemiyle düzlemsel şekil değiştirme kabulüne göre iki ve üç boyutlu gerilme analizi yapmışlardır. Bu çalışmada iki boyutlu gerilme analizinde ihmal edilen kayma gerilmelerinin, üç boyutlu gerilme analizlerinde aslında ihmal edilemeyecek büyüklükte olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca, bindirmenin yapıldığı bölgenin serbest uçlarında esnek karakterli yapıştırıcının kullanılması gerilme yığılmalarını azalttığını ve bağlantı dayanımını artırdığını sonucuna varmışlardır.

Kinloch [14], “Mühendislikte Yapıştırıcılar” adlı makalesinde, uçak ve otomotiv sanayisindeki kompozit malzemeler üzerinde yapıştırıcıların kullanılmaları üzerinde durmuştur. Yapıştırıcı kullanma nedenleri ve kullanmadaki kısıtlanan faktörler vurgulanmış, yapısal olarak göz önüne alınması gereken kurallar üzerinde durulmuştur. Ayrıca, kohezyon, adhezyon ve sertleşme olayları açıklanmaya çalışılmıştır. Numune geometrisinin soyulma kuvvetlerine etkisi teorik olarak incelenmiştir. Yapıştırırmalı birleştirmelerde çevre şartlarının bağlantı ömrü üzerindeki etkilerinin önemine dikkat çekilmiştir.

Sawa vd. [15], çekme yükü etkisi altında farklı malzemelerin yapıştırılmasıyla oluşan tek taraflı bir bindirme bağlantısında elastisite teorisi analizi kullanmışlardır. Yapıştırılan malzemelerin elastisite modül farklılıkları, malzeme kalınlığı ve yapıştırıcı tabaka kalınlığının ara yüzeyde oluşan gerilme dağılımı üzerine etkisini analiz etmişlerdir. Malzemelerin elastisite modülünün ve malzeme kalınlığının, ara yüzey serbest uçlarında oluşan gerilme dağılımları üzerine önemli bir etkisinin olduğunu analiz sonucunda ortaya çıkarmışlardır.

Sawa vd. [16], tek taraflı bir bindirmeli bağlantıda gerilme dağılımını ve gerilme dalga ilerlemesini üç boyutlu sonlu elemanlar metodu kullanarak analiz etmişlerdir. Malzemenin mekanik özelliklerinin, bindirme uzunluğunun, malzeme kalınlığının ve yapıştırıcı kalınlığının gerilme dalga ilerlemesi ve gerilme dağılımı üzerine etkilerini incelemişlerdir. Analiz sonunda yapıştırıcının elastisite modülünün artmasıyla maksimum gerilme değerinin arttığı sonucunu ortaya koymuşlardır. Bunun yanında yapıştırıcı kalınlığı, malzeme kalınlığı ve bindirme uzunluğunun artmasıyla gerilme değerinin azaldığı sonucuna varmışlardır.

Romanos [17], tek tesirli yapıştırırmalı bir bağlantıda yapışma uzunluğu boyunca, gerilmelerin üniform olması için yapıştırıcı kalınlığının kontrol altında tutulmasının gerektiğini belirtmiştir. Ancak gerilme değerlerinin üniform olabilmesi için yapışma boşluğunun sınırlandırılması gerektiğini belirtmiştir. Anaerobik tip yapıştırıcılar için yapışma boşluğu 0,05 mm ile 0,20 mm aralığını önermiştir.

Pfeiffer vd. [18], deneysel bir çalışmada yapışma alanının, bağlantı mukavemeti üzerine etkisini araştırmışlardır. Yapışma alanı artırıldığında tek tesirli bağlantının kesme mukavemetinin çok büyük bir oranda azaldığını belirtmişlerdir. Çünkü küçük yapışma alanındaki deformasyon direncinin, büyük yapışma alanındaki deformasyon direncinden daha çok olduğunu ileri sürmüşlerdir.

Ciba [19], deneysel bir çalışmada yapıştırıcı kalınlığı arttıkça kesme mukavemetinin azaldığını söylemiştir. Yapıştırıcı ile malzeme arasındaki adhezyon kuvvetlerinin, yapıştırıcının kendi içerisindeki kohezyon kuvvetlerinden daha fazla olduğunu belirtmiştir. Epoksi tip yapıştırıcı ile yapılan deneysel bir çalışmada 0,10 mm ile 0,50 mm yapışma boşluğu aralığında kesme mukavemetinde azalma meydana gelmiştir. Optimum yapışma kalınlığının 0,05 mm ile 0,15 mm aralığında olduğunu söylemiştir. Eğer yapışma kalınlığı çok ince ise yapıştırıcının tüm yüzeylere teması zor olduğunu; bundan dolayı yapıştırma bağlantılarında yapışma alanının önemi göz ardı edilmemesi gerektiğini söylemiştir.

Volkersen vd. [20], tek tesirli bir bindirme bağlantısında yapıştırıcı tabakasındaki kayma gerilmesi dağılımını incelemiştir. Yapıştırılan malzemelerin çekme yükü etkisinde deformasyona uğradığını ve yükten dolayı malzemede eğilme olmadığını kabul ederek bir çalışma yapmışlardır. Ayrıca, yapıştırıcının lineer elastik bir katı olduğu ve yalnızca kayma gerilmelerinden dolayı deforme olduğunu kabul etmişlerdir. Yapıştırıcı tabakasındaki kayma gerilmelerinin bindirme hattının her iki ucunda en yüksek değeri aldığını göstermişlerdir.

Taib vd. [21], çekme yüküne maruz epoksi yapıştırıcı ile yapıştırılan cam fiber takviyeli numunelerde deneysel bir çalışma yapmışlardır. Ortamın neminin ve yapıştırıcı kalınlığının etkilerini deneysel olarak incelemiştir. Deney sonucunda ortam nem değeri ve yapıştırıcı kalınlığının artmasıyla malzemelerin çok düşük hasar yüklerinde koptuğunu belirlemişlerdir.

Mazumdar ve ark. [22], deneysel bir çalışmada tek tesirli bir bağlantıda yapıştırıcı ile birleştirilen kompozit malzemelerin statik hasar yükünü ve yorulma davranışlarını araştırmışlardır. Hasar yükünün bindirme uzunluğu kadar yapıştırıcı kalınlığına da bağlı olduğu sonucuna varmışlardır.

Ojalvo ve Idinoff [23], yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek bindirme bağlantılarındaki gerilme dağılımında yapıştırıcı kalınlığının etkisini araştırmışlardır. Kayma gerilmesi denklemlerinde bazı katsayıları düzenleyerek yapıştırıcıda oluşan soyulma gerilmesi için diferansiyel denklemde ve sınır şartlarında tamamen yeni terimler bulmuşlardır. Yapıştırıcı kalınlığı ne kadar az olursa olsun, yapıştırıcı kalınlığı boyunca kayma gerilmesi dağılımının tahmin edilebildiğini belirtmişlerdir.

Sayman [24], yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek tesirli bağlantılarda kayma gerilmelerini hesaplayabilmek için analitik olarak elasto-plastik gerilme analizi yapmıştır. Yapılan çalışmada kayma gerilmelerinin yapıştırıcı kalınlığı boyunca sabit olduğunu kabul edip, eğilme momentinin etkisi çözümde ihmal edilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemiyle, sunduğu analitik yöntemi karşılaştırmış ve birbiri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Sayman, sunduğu bu metodun iki boyutlu gerilme analizi için uygun olduğunu ve soyulma gerilmelerinin bu yöntemle elde edilemeyeceğini belirtmiştir. Ayrıca yapıştırılan malzemenin kalınlığının artmasıyla, kayma gerilmelerinin bağlantının serbest uçlarında azaldığını da ifade etmiştir.

He [25], çeki yüküne maruz tek tesirli bağlantı geometrisi kullanarak yaptığı üç boyutlu sonlu elemanlar analizinde, yapıştırıcı bölgesinin sert uçlarının sağ ve sol tarafının yüksek gerilmelere maruz kaldığını belirtmiş ve ayrıca yüksek gerilmelerin yapıştırıcı ile alt malzeme arasında olduğunu göstermiştir. Yapıştırma bölgesinin orta kısmında ise gerilmelerin çok daha az olduğunu ifade etmiştir.

Akpınar vd. [26], eğilme yüküne maruz farklı fiber oryantasyon açılara $[90/\pm 45/0]_{2s}$, $[0/90]_{4s}$, $[45/-45]_{4s}$, $[0]_{16}$ ve $[90]_{16}$ sahip tek tesirli kompozit bağlantılarda lineer olmayan sonlu elemanlar yöntemi ile üç boyutlu gerilme analizi yapmışlardır. Yapılan analizde, iki boyutlu gerilme analizinde ihmal edilen (τ_{yz} ve τ_{xz}) kayma gerilmeleri, üç boyutlu gerilme analizinde büyük bir etkiye sahip olduğu ve ihmal edilmemesi gerektiği belirtmişlerdir. Sonlu eleman analiz sonuçları kompozitlerin oryantasyon açısının değiştirilmesi gerilme değerlerini önemli derecede etkilediğini göstermişlerdir.

Temiz [27], tek tesirli bindirme bağlantısında bindirmenin yapıldığı bölgenin serbest uçlarında esnek, orta kısmında ise sert özellikli yapıştırıcı kullanarak oluşturduğu sonlu elemanlar modelinde gerilme analizi yapmıştır. Bu gerilme analiz sonuçları, bindirmenin yapıldığı bölgenin serbest uçlarında esnek karakterli yapıştırıcının kullanılması gerilme yığılmalarını azalttığını ve bağlantının mukavemetini artırdığını göstermiştir.

Özel vd. [28], bindirme uzunluğu üzerine yaptıkları bir çalışma sonucunda bindirme uzunluğunun artırılması bağlantının hasar yükünü artırdığını, ancak hasar yükündeki bu artış belirli bir bindirme uzunluğuna kadar geçerli olup, bu uzunluktan sonraki bindirme uzunluğundaki artışın hasar yüküne etki etmediği ifade etmişlerdir.

Reis vd. [29], üç farklı malzeme kullanarak (alüminyum, sertleştirilmiş çelik ve karbon/epoksi kompozit) birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantısı üzerine çalışma yapmışlar ve bağlantıların mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Deneysel çalışmalar ve sayısal analiz sonuçlarına göre; kayma gerilmesinin malzemenin rijitliğine bağlı olduğu ve en yüksek kayma gerilmesi en yüksek rijitlikteki malzemelerin birleştirildiği bağlantıda elde edildiği ifade etmişlerdir. Rijitliğin artması bağlantının mukavemetini artırmış, bağlantının serbest uçlarında meydana gelen dönmeyi azaltmış ve yapıştırıcıda daha düzgün bir gerilme dağılımı oluşmasını sağladığını söylemişlerdir.

Özel vd. [30], farklı oryantasyon açısına sahip kompozitler ile farklı kalınlıklara sahip alüminyumların yapıştırıcıyla birleştirilerek elde edilen tek tesirli bağlantı konfigürasyonların çekme yükü altındaki mekanik davranışları deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Deneylerden ve üç boyutlu sonlu elemanlar analizinden elde edilen sonuçlara göre dört farklı oryantasyon açısı, farklı kalınlık ve farklı bindirme uzunluğu bağlantının yük taşıma kapasitesini ve gerilme dağılımını etkilediğini belirtmişlerdir.

Pinto vd. [31], farklı kalınlıklara sahip tek tesirli bindirme bağlantısında esnek ve sert iki farklı yapıştırıcı kullanarak bağlantının çekme yükü altındaki mekanik davranışlarını deneysel olarak incelemişlerdir. Esnek yapıştırıcı kullanılarak her iki malzeme kalınlığının artırılmasıyla elde edilen bağlantı tipinde bağlantının mukavemetinde çok az bir düşüş olduğunu ancak sert yapıştırıcı kullanarak elde edilen diğer bağlantı tipinde ise bağlantının mukavemetinde artış olduğu ifade etmişlerdir.

Gültekin [32], yapıştırıcıyla birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantılarda bindirme uzunluğunun artırılması, bağlantının yük taşıma ve yer değiştirme kapasitesinin değerini arttığını söylemiştir. Ancak bindirme uzunluğunun artırılmasından ziyade genişliğinin artırılması, bağlantının hem yük taşıma hem de yer değiştirme kapasitesini daha fazla arttığını belirtmiştir.

Sawa ve Uchida [33], tek taraflı bindirme bağlantılarında ara yüzeydeki kayma ve soyulma gerilmeleri üzerine yapıştırıcı tabakası kalınlığının etkisini incelemişlerdir. Sonuç olarak ara yüzeyde serbest uçlara yakın bölgede oluşan gerilmelerin yapıştırıcı kalınlığının artmasıyla arttığını görmüşlerdir.

Neto vd. [34], kompozit malzemelerin yapıştırma bağlantıları üzerine deneysel bir çalışma yapmışlardır. 10-80 mm arasında farklı bindirme uzunluğuna sahip tek bindirme bağlantılı bir modelde gevrek ve sünek olan iki farklı yapıştırıcı kullanmışlardır. Deney sonuçlarına göre bağlantıda kohezyon hasarı oluşmuştur. Sünek tip yapıştırıcılı bağlantıda bindirme uzunluğunun artmasıyla hasar yükünün artmış olduğu ve bütün bindirme uzunluğu ölçülerinde ise kohezyon hasarı olduğu gözlemlenmiştir. Gevrek tip yapıştırıcılı bağlantıda 30 mm bindirme uzunluğunda kompozit malzemede hasar olduğu belirlenmiştir.

Magalhaes vd. [35], tek bindirme bağlantılı bir modelde farklı oryantasyon açısına sahip cam elyaf takviyeli bir kompozit malzemenin sayısal analizini yapmışlardır. Sonuçta yapıştırıcı kalınlığı boyunca oluşan gerilmeler bindirme uzunluğunun uçlarında oluşmuştur. Hasar oluşumu yapıştırıcı ara yüzeyinde meydana gelmiştir. Bu da malzemede yeterli yüzey temizliğinin yapılmadığından kaynaklandığı göstermişlerdir.

Akpınar S. [36], basamaklı tip bindirmeli bir bağlantıda aynı yapışma alanında farklı basamak sayısının gerilme değerlerini deneysel olarak araştırmıştır. Basamaklı modelde yük taşıma kapasitesi basamaksız modele göre % 68 oranında artmıştır. Basamaklı tip yapıştırma bağlantısında soyulma gerilmeleri, bindirme alanının uçlarında azalmıştır. Bu tip bir modelin bağlantı mukavemetini olumlu yönde iyileştirdiğini deneysel olarak tespit etmiştir.

Li vd. [37], bindirme uçları kavisli ve düz olan tek bindirmeli bir yapıştırıcı bağlantılı modelin çekme yükü etkisindeki davranışını sayısal ve deneysel olarak araştırmışlardır.

Kavislerin kayma gerilmelerini biraz arttırırken yapıştırıcıdaki soyulma gerilmelerini azalttığını tespit etmişlerdir.

Kishore vd. [38], cam elyaf kompozit malzemede içten kenetli tip ve düz tip tek bindirmeli bir bağlantı modeli geliştirmiştir. İçten kenetli tip bağlantı, modelin tasarımından dolayı eksantrikliği ortadan kaldırıp bağlantının mukavemetini arttırmıştır. İçten kenetli tip bağlantının düz bağlantı tipine göre %90 lık bir mukavemet artışı sağladığı görülmüştür.

Lee M. vd. [39], çekme yükü altında alüminyum alaşımlı çubuklarda 0-15-30-60-75-90° lik açılı alın tip bir bağlantıda deneysel çalışma yapmışlardır. Bindirme açısı 0° dan 30° ye çıktığında bağlantı mukavemetinde küçük bir azalma olmuştur. Daha küçük açılarda kohezyon hasarı meydana gelmiştir. 60° ve daha büyük açılarda adhezyon-kohezyon hasarı oluşmuştur. Hasar yükündeki değişim 60° lik açıda %4.5, 75° lik açıda %1.8 dir. Yapıştırılan kalınlığı çekme mukavemetini önemli ölçüde etkilemiştir. Yapıştırılan kalınlığı azalırken nominal çekme mukavemeti azalmakta ve ara yüzey bozulma miktarı arttığını göstermişlerdir.

Afendi M. vd. [40], gevrek tip bir yapıştırıcı kullanarak yapıştırıcı kalınlığı ve açılı bindirme modelinin bağlantı mukavemetine etkisini araştırmıştır. Açılar 0°,45°,60°,75° ve 90° dir. Üç çeşit yapıştırma bağlantısı kullanmıştır. Alın, açılı alın ve tek taraflı bindirme bağlantı modeli. Deneysel sonuçlara göre 45° lik açılı bağlantı modeli daha fazla yük taşımıştır. Açılı alın tip bağlantılı numunedeki hasar yükü açının artmasıyla azalmıştır. En düşük hasar yükü tek tesirli bağlantıda görülmüştür. Yapıştırıcı kalınlığı 0.1 ve 1.2 mm arasında değişmiştir. Bağlantı mukavemeti yapıştırıcı kalınlığı ve açının artmasıyla azaldığını gözlemlemişlerdir.

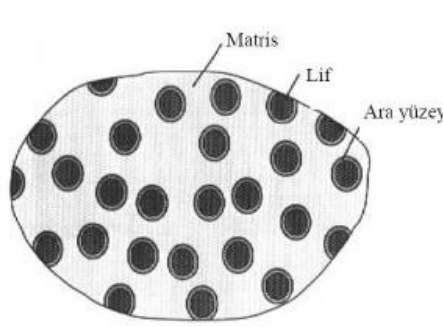
Afendi M. vd. [41], sol parça çelik ve sağ parça alüminyum olan malzemeleri 45°-60°-75° lik açılı alın bağlantı ve 0.1-1.0 mm arasında değişen farklı yapıştırıcı kalınlıklarında birleştirerek çekme yükü altında deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Açılı alın bağlantısındaki gerilmeler açının artmasına bağlı olarak doğru orantılı bir şekilde artmıştır. Deneysel sonuçlar teorik değerlerle uyumlu çıktığı gözlemlenmiştir. Açılı alın bağlantısındaki maksimum yük, açının ve yapıştırıcı kalınlığının azalmasıyla arttığını belirlemişlerdir.

Orijinal Katkı

Literatürde, yaygın olarak çeşitli değişkenlerin yapıştırma bağlantısındaki gerilme dağılımına etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada, literatür araştırmalarına göre daha önce kompozit yapılarda hiç kullanılmadığı tespit edilen çift alın açılı (zigzag) geometriye sahip bir model önerilmiş ve incelenmiştir. Böylece bu yeni tip yapıştırma bağlantısının mekanik özellikleri ile ilgili literatüre önemli bir verinin sunulması amaçlanmaktadır.

1.2. Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler, iki ya da daha fazla sayıdaki, aynı veya farklı gruptaki malzemelerin en iyi özelliklerini yeni ve tek bir malzemedeki toplamak amacıyla makro düzeyde birleştirilmesiyle oluşturulan malzemeler olarak adlandırılırlar. Kompozit malzemeyi oluşturan bileşenler matris ve lif (Şekil 1.1) birbirinden farklı kimyasal yapıdadırlar ve bunları ayıran belli bir ara yüzey vardır [42].



Şekil 1.1. Kompozit malzemelerin genel yapısı [42]

Kompozit malzemeler, matris ve fiberlerin bir araya getirilmesiyle oluşmaktadır. Bu iki malzeme grubundan, fiber malzeme kompozit malzemenin mukavemet ve yük taşıma özelliğini sağlar. Matris ise kompozit malzemenin önemli bir bileşeni olup yükü fiberlere iletir, darbelerden korur ve kompozitin tokluğunu sağlar [43].

Matris olarak kullanılan malzemenin bir amacı da fiber malzemeleri yük altında bir arada tutabilmek ve yükü lifler arasında homojen olarak dağıtmaktır. Böylece fiber malzemelerde plastik deformasyon gerçekleştiğinde ortaya çıkacak çatlak ilerlemesi olayının önüne geçilmiş olur. Matris malzemesi olarak metal alaşımları kullanıldığı gibi, daha uygun olan reçinelerde kullanılmaktadır. Matrislere örnek olarak polimer, seramik ve metalleri, fiberlere örnek olarak; cam elyafı, karbon elyafı, aramid elyafı verilebilir.

En çok kullanılan kompozit malzeme kombinasyonları; cam elyafı + epoksi, karbon elyafı + epoksi ve aramid elyafı + epoksi birleşimleridir [44]. Bir kompozit malzemenin oluşumunun şematik gösterimi Şekil 1.2’de yer almaktadır.



Şekil 1.2. Kompozit yapı oluşumu [44]

Kompozit yapılarda yükü taşıyan elyafların fonksiyonlarını yerine getirmeleri açısından matrisin mekanik özelliklerinin rolü çok büyüktür. Kesme yükü altındaki bir gerilmeye dayanım, elyaflarla matris arasında iyi bir yapışma ve matrisin yüksek kesme mukavemeti özelliklerini gerektirir. Elyaf yönlenmelerine dik doğrultuda matrisin mekanik özellikleri ve elyaf ile matris arasındaki bağ kuvvetleri, kompozit yapının mukavemetini belirleyici önemli hususlardır. Matris elyafa göre daha zayıf ve daha esnektir. Bu özellik kompozit yapıların tasarımında dikkat edilmesi gereken bir husustur [44].

1.2.1. Kompozit Malzemelerin Matris Malzemesi

Matris, kompozit malzemeyi oluşturan ana bileşenlerden biri olup istenilen özelliğin düzgün şekilde sağlanabilmesini sağlar. Fiberler matris malzemesinin içinde yer alır. Malzeme içerisinde matrisin üç temel görevi vardır. Lifleri (elyafları) bir arada tutar ve çatlak ilerlemesini yavaşlatır; elyafları çevresel ve kimyasal etkilerden korumak ve yükü elyaflara aktararak yapıya rijitlik kazandırır [45]. İdeal bir matris malzemesi başlangıçta düşük viskoziteli bir yapıda iken daha sonra elyafları sağlam ve uygun bir şekilde çevreleyebilecek katı forma kolaylıkla geçebilmelidir [46].

Matrisler fiberlerle kıyaslandıklarında düşük mekanik özellikler sergilemesine rağmen kompozit malzemeye birçok mekanik özellik matrislerden alınmaktadır. Bu özellikler basma dayanımı, kesme dayanımı, ısıl genleşme katsayısı ve yorulma dayanımıdır.

Bileşenlerin seçimi kompozit malzeme tasarımında dikkat edilmesi gereken hususlardan biridir [46].

Kompozit malzemelerin üretiminde dört tip reçine kullanılmaktadır. Bunlar fenolik, polyester, vinilester ve epoksi reçinesidir. İmal edilecek kompozit malzemelerde yüksek mukavemet aranmaz ise en çok kullanılan reçine türü polyester reçinesi iken imal edilecek kompozit malzeme yüksek mukavemet gerektiriyorsa epoksi reçine kullanılmaktadır. Gelişmiş kompozitlerde genellikle tercih edilen ve her tür elyaf ile kullanılabilen bir reçinedir. Epoksi reçineler iki veya daha fazla epoksi içermekte olan bileşenlerin bir araya gelmesiyle oluşur. Epoksi reçinesinin rengi berraktır ve sıvı haldedir. Tüm polimerler yüksek sıcaklıkta kauçuklaşırlar ve düşük sıcaklıkta saydamlaşırlar [46].

Epoksilerin avantajları [46].

- 1- Yüksek aşınma direncine sahip malzemelerdir.
- 2- Kimyasal dirençleri yüksektir ve uçucu malzeme değildir.
- 3- Düşük ve yüksek sıcaklıklarda sertleşebilme özelliğine sahiptirler.
- 4- Elyaf yapılar ile yüksek bağ mukavemeti sağlarlar.

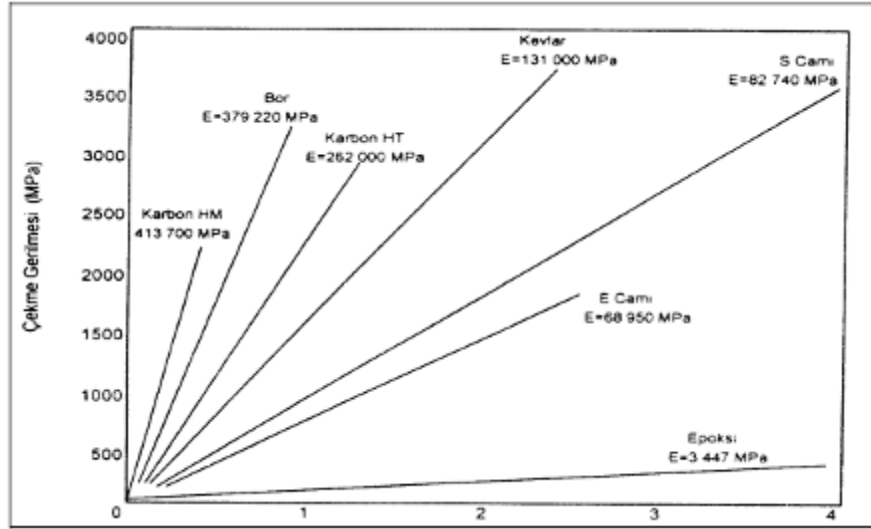
Epoksilerin dezavantajları [46].

- 1- Polyesterle kıyaslandığında pahalı bir malzemedir.
- 2- Polyestere oranla düşük viskoziteye sahiptirler.

1.2.2. Kompozit Malzemelerin Fiber (elyaf) Malzemesi

Fiberlere değişik kaynaklarda lifler veya elyaflarda denilmektedir. Elyaflar kompozit malzeme içerisinde mukavemeti sağlayan temel elemanlardır. Elyafların mühendislik malzemeleri olmasının en önemli nedenleri [54].

- 1- Üstün mikro yapısal özellikler, küçük çapta üretilmeleri ve tane boyutlarının küçük olması.
- 2- Boy/çap oranının artması halinde matris malzemesinden elyaf malzemeye iletilen yük miktarının artması.
- 3- Elastisite modülünün çok yüksek olması.
- 4- Düşük yoğunluğunun olması.
- 5- Üretim kolaylığı.
- 6- Yüksek dayanımlı olmasıdır.



Şekil 1.3. Elyaf çeşitlerinin çekme gerilmelerinin birbiri ile karşılaştırılması [54].

Burada özellikle cam elyafı hakkında detaylı bilgi verilecektir.

1.2.2.1.Cam Elyaflar

Cam elyafı, elyaf takviyeli kompozitler arasında en fazla bilinen ve kullanılandır. Cam elyaflar, sıradan bir şişe camından yüksek saflıktaki kuartz camına kadar pek çok tipte imal edilirler. Cam amorf bir malzemedir ve polimerik yapıdadır. Üç boyutlu moleküler yapıda bir silisyum atomu dört oksijen atomu ile çevrilmiştir. Silisyum metalik olmayan hafif bir malzemedir, doğada genellikle oksijenle birlikte silis (SiO_2) şeklinde bulunur. Cam eldesi için silis kumu, katkı malzemeleri ile birlikte kuru halde iken 1260°C civarına ısıtılır ve soğumaya bırakıldığında sert bir yapı elde edilir [47].

Cam elyafların bazı özellikleri aşağıdaki gibi özetlenebilir: [47].

- ▲ Çekme mukavemeti yüksektir, birim ağırlık başına mukavemeti çeliğinkinden yüksektir.
- ▲ Isıl dirençleri düşüktür. Yanmazlar, ancak yüksek sıcaklıkta yumuşarlar.
- ▲ Kimyasal malzemelere karşı dirençlidirler.
- ▲ Nem absorbe etme özellikleri yoktur, ancak cam elyafı kompozitlerde matris ile cam elyaf arasında nemin etkisi ile bir çözülme olabilir. Özel elyaf kaplama işlemleri ile bu etki ortadan kaldırılabilir.
- ▲ Elektriği iletmezler. Bu özellik sayesinde elektriksel yalıtımın önem kazandığı durumlarda cam elyafı kompozitlerin kullanılmasına imkan tanır. Cam elyaf

imalinde silis kumuna çeşitli katkı malzemeleri eklendiğinde yapı bu malzemelerin etkisi ile farklı özellikler kazanır. Dört farklı tipte cam elyaf mevcuttur.

1. A (Alkali) Camı: Alkali oranı yüksek olan bir cam türüdür. Bundan dolayı elektriksel yalıtkanlık özelliği düşüktür. En yaygın cam tiplerinden biri olan A camının kimyasal direnci yüksektir [48].

2. C (Korozyon) Camı: Kimyasal çözeltilere direnci çok yüksektir özellikle depolama tanklarında kullanılırlar[48].

3. E (Elektrik) Camı: Yapısında bulundurduğu alkali oranının düşük olması sebebiyle elektrik yalıtkanlığı diğer cam türlerine göre çok iyidir. E camının suya karşı olan direnci ve mukavemeti oldukça yüksektir. Nemli ortamlara olan direnci yüksek olduğu için böyle ortamlarda kullanmak için E camı kullanılmaktadır. Fiber oluşturma özelliği gayet iyidir.

E-camın avantajları; yüksek rijitlik, düşük maliyet, yüksek dayanım, kısmen düşük yoğunluk, ısıya karşı dayanım, kısmen neme duyarlı olmama, iyi kimyasal dayanım, iyi elektrik yalıtımı sağlamasıdır [48].

E-camın dezavantajları; düşük modülü, uygun işlem görmezse kendi kendini aşındırma ve bunun sonucu dayanımının azalması, karbon ve organik fiberlerle karşılaştırıldığında yüksek yoğunluğa sahip olması ve kısmen düşük yorulmadır [48].

4. S (Mukavemet) Camı: Yüksek mukavemetli bir camdır. Çekme mukavemeti E camına oranla %33 daha yüksektir. Ayrıca yüksek sıcaklıklarda oldukça iyi bir yorulma direncine sahiptir. Bu özellikleri nedeniyle havacılıkta ve uzay endüstrisinde tercih edilir [48].

Tablo 1.1. Cam elyafların mekanik özellikleri ve bileşimleri [48].

Özellikler	Cam Tipi			
	A	C	E	S
Özgül Ağırlık (gr/cm^3)	2.50	2.49	2.54	2.48
Elastik Modül (GPa)	-	69.0	72.4	85.5
Çekme Mukavemeti	3033.0	3033.0	3448.0	4585.0
Isıl Genleşme Katsayısı	8.6	7.2	5.0	5.6
Yumuşama Sıcaklığı	727.0	749.0	841.0	970.0
Katkı Malzemeleri (%)				
SiO ₂	72.0	64.4	52.4	64.4
Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃	0.6	4.1	14.4	25.0
CaO	10.0	13.4	17.2	-
MgO	2.5	3.3	4.6	10.3
Na ₂ O, K ₂ O	14.2	9.6	0.8	0.3
B ₂ O ₃	-	4.7	10.6	-
BaO	-	0.9	-	-

1.2.2.2.Bor Elyaflar

Bor elyaflar aslında kendi içlerinde kompozit yapıdadırlar. Çekirdek olarak adlandırılan ince bir flamanın üzerine bor kaplanarak imal edilirler. Çekirdek genellikle tungstendir. Bor elyafların Silisyum Karbür (SiC) veya Bor Karbür (B₄C) kaplanmasıyla yüksek sıcaklıklarda dayanımı artar. Özellikle bor karbür kaplanmasıyla çekme mukavemeti önemli ölçüde artırılabilir. Bor elyafların erime sıcaklıkları 2040⁰C civarındadır [49].

1.2.2.3.Silisyum Karbür Elyaflar

Silisyum karbürün tungsten çekirdek üzerine kaplanması ile elde edilirler. 0,1 mm ile 0,14 mm çaplarında üretilirler. Yüksek sıcaklıklardaki özellikleri bor elyaflardan daha iyidir. Silisyum karbür elyaf 1370⁰C ta mukavemetinin sadece %30'nu kaybeder. Bu elyaflar genellikle titanyum matrisle kullanılırlar. Jet motor parçalarında titanyum, alüminyum ve vanadyum alaşımlı matris ile kullanılırlar [51].

1.2.2.4.Alümina Elyaflar

Alümina, alüminyum oksittir (Al₂O₃). Elyaf formundaki alümina 0,02 mm çapındaki alümina flamanın silisyum dioksit (SiO₂) kaplanması ile elde edilir [46].

Bu malzemeler yüksek sıcaklık dayanımları nedeniyle uçak motorlarında kullanılmaktadır [46].

1.2.2.5.Aramid Elyaf lar

Aramid, aromatik polyamidin kısaltılmış adıdır. Polyamidler uzun zincirli polimerlerdir. Uçak yapılarında düşük basma mukavemetleri nedeniyle, karbon elyaf larla birlikte hibrid kompozit olarak kumanda yüzeylerinde kullanılmaktadırlar. Aramid elyaf lar elektriksel iletkenliğ e sahip değildirler. Basma mukavemetlerin iyi olmamasının yanı sıra kevlar /epoksi kompozitlerinin nem absorbe etme özellikleri kötüdür [49].

1.2.2.6.Karbon Elyaf lar

Karbon elyaf ların en önemli özellikleri düşük yoğunluğun yanı sıra yüksek mukavemet ve tokluk değerleridir. Karbon elyaf lar, nemden etkilenmezler ve sürünme mukavemetleri çok yüksektir. Aşınma ve yorulma mukavemetleri oldukça iyidir. Bu nedenle askeri ve sivil uçak yapılarında yaygın bir kullanım alanına sahiptirler. Karbon elyaf lar çeşitli plastik matrislerle ve en yaygın olarak epoksi reçinelerle kullanılırlar. Ayrıca karbon elyaf lar alüminyum, magnezyum gibi metal matrislerle de kullanılırlar [50].

1.2.3. Elyaf Şekli ve Doğrultusu

Kompozit malzemelerde çok değişik elyaf geometrisi kullanılır. Bunlar genellikle üç ana guruba ayrılırlar: [45].

(a) Tek yönlü (0°) bütün elyaf lar bir doğrultuda ve aynı yönde düzenlenmiş.

(b) Çift yönlü ($0^\circ/90^\circ$), bir kısım elyaf lar (0°) de yönlenirken diğerleri de (90°) olarak tanzim edilirler. Uzun tek yönlü olarak elyaf lar elyaf eksenine paralel olarak yüklendiğinde kompozit bu yönde yüksek dayanım ve yüksek rijitlik verir. En düşük özellikler ise elyaf eksenine dik doğrultuda yapılan düzenlemelerde elde edilir. Fakat elde edilen bu özellikler anizotropiktir. Bu durum; ya örme türü elyaf kullanılarak ya da tek yönlü olarak düzenlenen elyaf tabakalarının sırasıyla hem 0° de hem de 90° de düzenlenerek sağlanır.

(c) Çok yönlü ($0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ$), birden fazla elyaf ların farklı yönlerde düzenlenmesiyle elde edilir.

1.2.4. Elyaf Geometrisinin Etkisi

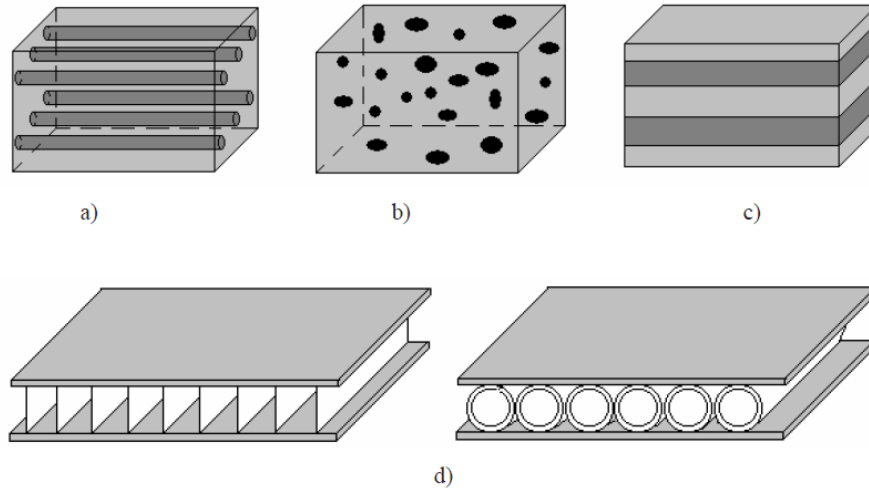
Bütün elyaf lar bir yönde düzenlenirse kompozit bu yönde oldukça dayanıklı ve rijit olacak, fakat bu yöne dik doğrultuda ise düşük elastik modüle ve dayanıma sahip olacaktır. Tek yönde takviyeli kompozit elyaf ekseninden (0°)'den küçük ayrılmalarla test edildiğinde dayanımda hayli düşmeler gösterir. Elyaf takviyeli kompozitlerin mekanik özelliği üzerine elyaf doğrultusunun etkisi büyüktür. Örneğin tek yönlü cam elyaf takviyeli

tabakalı kompozitin çekme modülü üzerine değişik elyaf yerleştirme açılarının etkisi vardır. Hangi tür kompozit olursa olsun anizotropik özellik gösterdiği açıktır. Eğer aynı miktarda elyafın yarısı tek yönlü diğer yarısı da dik yönlerde düzenlenirse dokuma bu durumda her iki yönde de eşit dayanım ve rijitlik sağlanabilmektedir [45].

Ancak bütün bu geometrik düzenlemelerden hiçbiri tek yönlü takviyeli kompozit malzeme kadar dayanımı yüksek değildir. Aynı miktarda elyaf düzlem içinde rastgele yönlendirilmişse o zaman kompozit malzeme düzlem içinde bütün yönlerde eşit dayanım ve elastisite modülüne sahip olacaktır. Tek yönlü kompozit malzemedeki mekanik özellikler, elyaflar eksene dik doğrultuda olan çift yönlü kompozitten daha az değere sahiptir. Elyaflar paralel oldukları doğrultuda yüksek mukavemet sağlarken yönlenmesine dik doğrultuda düşük mukavemet sağlamaktadır [45].

1.2.5. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeleri değişik şekillerde sınıflandırmak mümkündür. Matris malzemesinin türüne göre polimer matrisli kompozitler, metal matrisli kompozitler ve seramik matrisli kompozitler gibi bir gruplandırma yapılabilirdiği gibi yapı bileşenlerinin şekillerine göre de fiber kompozitler, partikül kompozitler, lamel kompozitler, dolgu kompozitler, tabaka yapıları kompozitler ve hibrid kompozitler şeklinde bir sınıflandırma yapılabilir [52].



Şekil 1.4. Takviye elemanlı kompozitler [52].

a) fiber takviyeli b) partikül takviyeli c) tabakalı kompozitler d) dolgu kompozitler

1.2.5.1.Polimer Matrisli Kompozitler:

Matris olarak kullanılan plastik, esneklik verici darbe emici olarak kullanılan plastiğin özelliğine sahip olmaktadır. Kullanılabilecek plastiğin türleri üç ayrı sınıfta incelenebilir [52].

Elastomerler: Üç boyutlu şebeke yapısı oluşturarak yüksek esneklik gösteren polimerlerden meydana gelirler.

Termoplastikler: Termoplastikler rijit bir yapıya sahip değildir. Isıtılırsa yumuşar, sıcaklık arttıkça vizkozitesi düşer. Bu özellik bunlardan yapılan ürünleri daha ekonomik yapar ve kolaylıkla şekillenmesini sağlar.

Termoset Plastikler: Kompozit malzeme imalinde en çok kullanılan reçineler termosetlerdir. Termoset reçinelere örnek olarak polyesterler, fenolikler, epoksiler, vinilesterler ve silikonlar kullanılmaktadır. Epoksi reçineler yüksek mukavemet istenen yerlerde kullanılır.

1.2.5.2.Metal Matrisli Kompozitler:

Metalik fiberlerle takviye edilmiş metal matrisli kompozitler her iki fazın uyumlu çalışması ile yüksek sıcaklıklarda yüksek mukavemet özelliklerini vermektedirler. Bakır ve alüminyum matrisli, wolfram ve molibden fiberli kompozitler ve Al-Cu kompoziti bize bu kompozisyonu veren en iyi örneklerdir. Bu tip kompozitler, matrisin özelliklerini iyileştirdiği gibi bu özelliklere daha ekonomik olarak ulaşılmasını sağlar. Bu kompozitlerde metal matris içine gömülen ikinci faz, sürekli lifler şeklinde olabildiği gibi gelişi güzel olarak dağıtılmış küçük parçalar halinde de olabilmektedir [52].

1.2.5.3.Seramik Matrisli Kompozitler:

Metal veya metal olmayan malzemelerin birleşimiyle oluşan seramik kompozitler, yüksek sıcaklıklara karşı çok iyi dayanım göstermekle birlikte rijit ve gevrek bir yapıya sahiptirler. Ayrıca iyi elektrik yalıtıcıdır [52].

1.2.6. Yapı Bileşenlerinin Şekline Göre

1.2.6.1.Partikül Esaslı Kompozitler

Partikül esaslı kompozitler, bir veya iki boyutlu makroskobik partiküllerin oluşturdukları malzemelerdir. Makroskobik boyutlu partiküller kompozit malzeme özelliklerine etki ederler. Partiküller matris içinde tamamen rastgele dağılmakta ve bu

nedenle izotropik özellik göstermemektedir. Partikül esaslı kompozitlerin maliyeti düşük ve rijitliği de oldukça iyi olmaktadır [52].

Tanecikler, herhangi bir şekil, ebat ya da konfigürasyona sahip olabilir. En bilinen örnekleri beton ve elyaf levhasıdır. Tanecikli kompozitlerin birkaç çeşidinin şematik gösterimi Şekil 1.5’de gösterilmiştir [52].



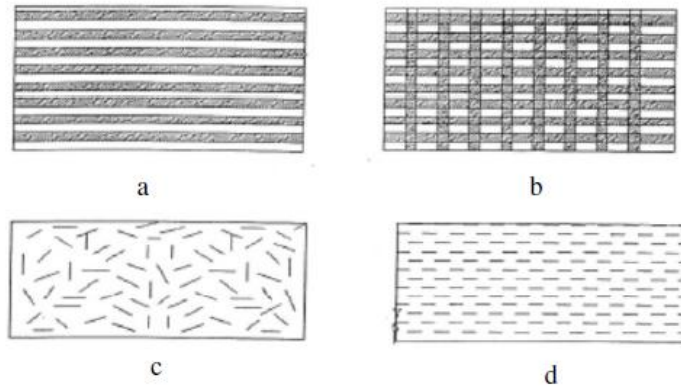
Şekil 1.5. Tanecikli kompozitlerin şematik gösterimi [52].

1.2.6.2.Lamel (pul) Esaslı Kompozitler

Yüksek yük taşıma kabiliyeti olup büyük uzunluk/çap oranında dolgu maddesi ilave edilerek üretilir. Matris içinde yer alan pulların konsantrasyonu düşük olabileceği gibi birbiri ile temas etmelerini sağlayacak derecede yüksek değerlerde olabilirler. Pul esaslı sistemin maliyeti biraz daha fazla ancak mukavemet özellikleri iyidir [52].

1.2.6.3.Fiber Esaslı Kompozitler

Mühendislikte kullanılan malzemelerin pek çoğu fiber şeklinde üretildiklerinden mukavemet ve rijitlikleri kütle hallerindeki değerlerinden çok üstünde olabilmektedirler. Örneğin karbon fiberlerin çekme mukavemeti kütle halindeki grafitten elli kat rijitliği ise üç kat daha yüksektir. Fiberlerin bu özelliklerinin fark edilmesi ile fiber kompozitlerin üretilme süreci başlamıştır. Günümüzdeki düşük performanslı ev eşyalarından roket motorlarına değin kullanım alanı bulan malzemeler olmuşlardır [52].



Şekil 1.6. Değişik tipte fiber kompozitler [52].

- a) Tek yönlü pekiştirilmiş sürekli fiberler b) Örgü formunda fiberler
c) Rastgele yönlenmiş süresiz fiberler d) Yönlendirilmiş süresiz fiberler

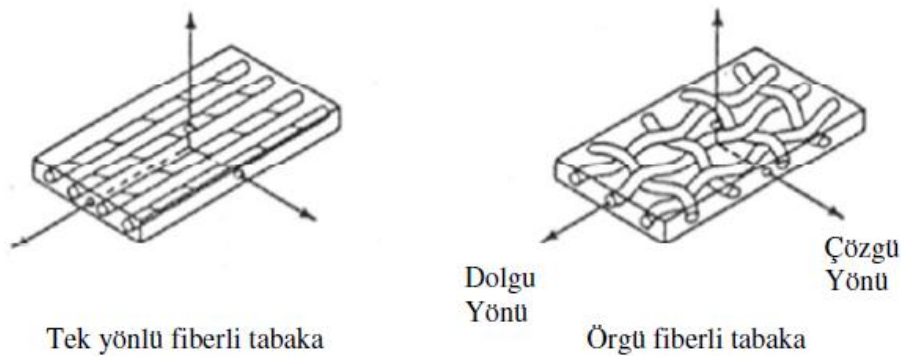
Fiber matris kompozitlerinin mühendislik performansını etkileyen en önemli faktörler; Fiberlerin şekli, uzunluğu, yönlenmesi, matrisin mekanik özellikleri ve fiber-matris ara yüzey özellikleridir. [52].

1.2.6.4.Dolgu (kafes) Kompozitler

Üç boyutlu sürekli bir matris malzemesinin yine üç boyutlu dolgu maddesi ile doldurulması sonucu oluşan malzemelerdir. Matris çeşitli geometrik şekillere sahip bir iskelet yapısındadır. Düzgün petekler, hücreler veya süngere benzeyen gözenekli yapılar arasında metalik, organik veya seramik esaslı dolgu maddeleri yer alabilir [53].

1.2.6.5.Tabakalı Kompozitler

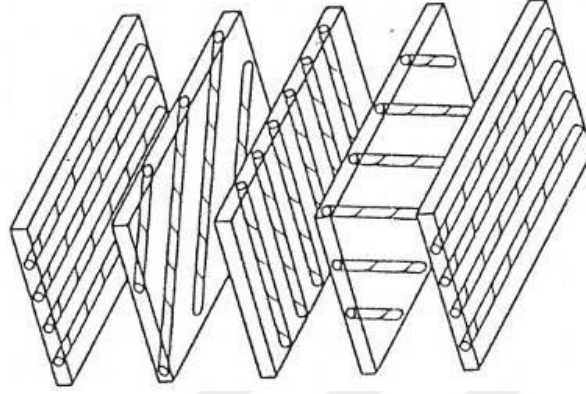
Tabaka yapısında olan kompozit malzemeler, birbirine yapışmış en az iki farklı malzemenin katmanından oluşmaktadır. Bileşen katmanlarının en iyi yönü, daha yararlı malzeme elde etmek için yapışmış malzeme kombine etmekte kullanılır. Katmanın temel yapı bloğu, tek yönlü fiberler veya matris içinde örülmüş fiberlerin düzeninde olan ince tabakadır. Malzeme eksenleri, fiber yönüne paralel ve dik olan esas malzeme eksenleri ile iki tipik düz ince tabakalar şekil 1.7’de gösterilmiştir. Matris organik, metalik, seramik ya da karbon olabilir [53].



Şekil 1.7. İnce tabakanın başlıca iki tipi [53].

Tabakalı kompozit, şekil 1.8’de gösterildiği gibi değişken olarak yönlenmiş malzeme yönleri ile ince katmanların bir dizisidir. Şekil 1.8’deki katmanların fiber yönlenmesi katmanın orta yüzeyi çevresinde simetrik değildir. Levhanın katmanları genellikle her bir

katmanda kullanılan aynı matris malzemesi ile yapıştırılır. Levhanın mekanik tepkimesi bunu oluşturan her bir katmandan farklıdır. Tabakanın tepkimesi her bir katmanın özelliğine bağlı olduğu kadar katmanların diziliş sırasına da bağlıdır [53].



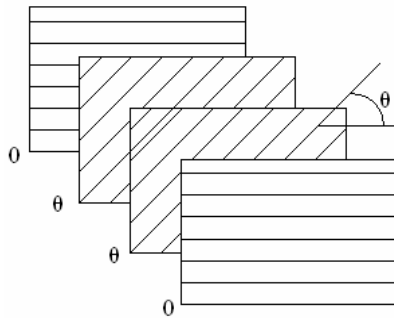
Şekil 1.8. Tabakalı kompozitlerin yapıştırılmamış görüntüsü [53].

1.2.6.6.Karma (Hibrid) Kompozitler:

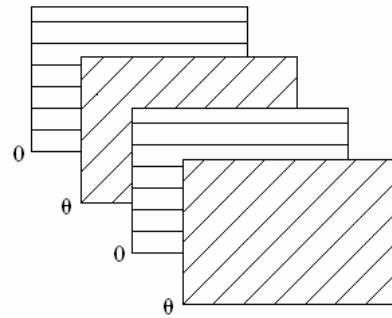
Aynı kompozit yapıda iki ya da daha fazla elyaf çeşidinin bulunmasıyla oluşan kompozitlere hibrid kompozitler denir. Bu alan yeni tip kompozitlerin geliştirilmesine uygun bir alandır. Örneğin, kevlar ucuz ve tok bir elyaftır ancak basma mukavemeti düşüktür. Grafit ise düşük tokluğa sahip, pahalı ancak iyi basma mukavemeti olan bir elyaftır. Bu iki elyafın kompozit yapısında hibrid kompozitin tokluğu grafit kompozitten iyi, maliyeti düşük ve basma mukavemeti de kevlar elyaflı kompozitten daha yüksek olmaktadır [54].

Fiber takviye açısının değişimi ile bir araya getirilmiş olan tabakaların, simetrik veya anti simetrik tabaka dizilimi mümkündür [54].

Simetrik Tabaka Dizilimi



Anti - Simetrik Tabaka Dizilimi



Şekil 1.9. Simetrik ve anti simetrik tabaka dizilimi [54].

Temel olarak kompozit malzemelerin birleştirilmesinde iki farklı yöntem kullanılmaktadır: [54].

- 1- Çözülebilir (mekanik) birleştirmeler.
- 2- Adhesiv yapıştırıcılar ile (çözülemeyen) birleştirmeler.

1.2.7. Kompozit Malzemelerin Avantajları ve Dezavantajları

Kompozit malzemeler sahip oldukları birçok özelliklerinden dolayı metal malzemelere göre önem kazanmışlardır. Kompozit malzemelerin genel olarak avantajlarını ve dezavantajlarını aşağıdaki gibi sıralayabiliriz: [55].

- ▲ Aynı ağırlıktaki metallere oranla mukavemetleri çok yüksektir.
- ▲ Yorulma dayanım limitleri metallerden çok fazladır.
- ▲ Titreşim sönümleme özelliği metalik malzemelere göre çok yüksektir, doğal bir titreşim sönümleme ve şok yutabilme özelliği vardır. Çatlak yürümesi de minimize edilmiş olmaktadır.
- ▲ Elyaf (Fiber) takviyeli kompozitler çok yönlü kullanım kolaylıkları sağlar. Korozyona dayanım mükemmeldir, hava etkileşiminden ve çoğu kimyasal etkilerden zarar görmezler.
- ▲ Darbeyi soğurma enerjileri metallerden önemli ölçüde fazladır.
- ▲ Düşük ısı iletkenliğine sahiptirler.
- ▲ İyi bir görünüme sahiptir ve yeni tasarım esneklikleri sunar.
- ▲ Diğer malzemelerle uyumludur. Ağırlık, maliyet ve üretim süresinden tasarruf sağlanır.
- ▲ Kolay imal edilebilir ve yüksek üretim miktarlarına ulaşabilir, tahta gibi kolayca kesilir, delinir, zımparalanır. Elmas uçlu kalemle daha iyi sonuç alınmaktadır.
- ▲ Çok iyi fiziksel özelliklerinin yanında, çok iyi kimyasal özelliklere de sahiptir.
- ▲ Uzun ömre ve iyi bir performansa sahiptirler.
- ▲ İçine konan elyafların doğrultuları ayarlanarak istenen yönde yüksek mukavemet sağlanabilir.
- ▲ Radar yansıtması düşüktür. Bu özellik askeri uçaklarda istenilen bir özelliktir.
- ▲ Kalıplama esnasında reçineye ilave edilen pigmentler sayesinde istenen renk verilebilir. Bu işlem ek bir masraf ve işçilik gerektirmez. Polyester reçine, özel

pigment katkıları ile renklendirilmek suretiyle, amaca uygun kendinden renkli olarak da üretilebilir.

▲ Işığın yayması sayesinde, diffüze ışığın önem kazandığı seralarda ve güneş kollektörü yapımında önemli avantaj sağlar.

- ✓ Kompoziti oluşturan her bir bileşenin olumlu olumsuz tüm özellikleri nihai parçaya yansır.
- ✓ Ham malzemesi pahalıdır. Ancak bağlantı elemanları sayısında ve ağırlıkta azalma olması dikkate alındığında, toplam maliyette bir düşme söz konusu olur.
- ✓ Kompozitler kırılğan (gevrek) malzeme olmalarından dolayı kolaylıkla zarar görürler ve onarılmalarında yeni problemler oluşabilir.
- ✓ Yanma ve duman çıkarma özellikleri dezavantaj olarak değerlendirilmektedir.
- ✓ Uzman personel gerektirmektedir.
- ✓ Malzemenin kalitesi üretim yönteminin kalitesine bağlıdır.
- ✓ Sınırlı raf ömürleri vardır. Özel şartlarda korunmaları gerekir.
- ✓ Kompozit bir parça üretiminde kalıp, vakumlama ve özel basınçlı fırınlama ihtiyaçlarından ötürü maliyetli bir işlemdir.
- ✓ Kompozitler geri dönüşümü olmayan malzemelerdir.

1.2.8. Kompozit Malzeme Kullanım Alanları

İnsanoğlu ilk çağlardan beri kırılğan malzemelerin içine bitkisel veya hayvansal lifler koyarak kırılğanlık özelliğinin giderilmesine çalışmıştır. Bu konuda en iyi örnek kerpiçtir. Kerpiç üretiminde killi çamur içine katılan saman, sarmaşık dalları gibi sap ve lifler, kerpiciin gerek üretim, gerek kullanım sırasındaki dayanımını artırmaktadır. Özellikleri ve lif yönleri farklı ağaç levhalar üst üste konularak yapılan ok yayları bir başka örnek olarak verilebilir. Ahşap, kemik gibi malzemeler tabii kompozit malzemelerdir [55].

Cam liflerinin sanayide kullanımıyla ilgili ilk kayıt 1877 tarihli dir. Öte yandan, liflerle takviye edilmiş sentetik reçineler 1950’li yılların ortalarından itibaren endüstride kullanılmaya başlanmıştır. Bu malzemenin en tanınmış grubunu “cam elyaf takviyeli polyester” oluşturmaktadır. Ülkemizde “fiber-glass” diye tanınan bu malzeme 1960’lı yılların başından itibaren Türkiye’de sıvı depolarında, çatı levhalarında, küçük deniz

teknelerinin yapımında kullanılmaya başlanmıştır. Ayrıca seri üretimi yapılmış ilk yerli otomobil olan Anadol'un kaportası da bu malzemeden üretilmiştir [55].

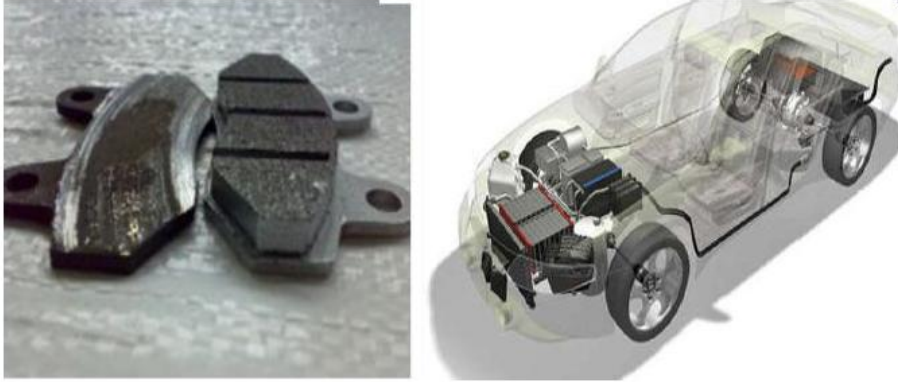
Kompozit malzemeler yapıları ve özellikleri sayesinde çok çeşitli alanlarda kullanılır. Farklı sektörlerde hammadde olarak kullanıldığı gibi imalatta yardımcı ekipmanlar olarak da kullanılırlar. Kompozit malzemelerin yaygın olarak kullanıldığı başlıca sektörler aşağıda özetlenmektedir [55].

- ✓ Havacılık / Uzay / Savunma
- ✓ Denizcilik
- ✓ Taşımacılık ve Otomotiv sanayi
- ✓ Spor malzemeleri (yüksek atlama sıırıkları, tenis racketleri, sörf, yarış tekneleri)
- ✓ Tıbbi cihazlar
- ✓ Robot yapımı
- ✓ Kimya sanayi
- ✓ Elektrik-Elektronik
- ✓ Müzik aletleri
- ✓ Ev aletleri ve iş ekipmanları
- ✓ Yapı sektörü
- ✓ Askeri uygulamalar
- ✓ Tarım ve gıda



Şekil 1.10. Spor araçlarında kullanılan bazı kompozit malzemeler [55].

Otomotiv sanayi, müşterilerinin ihtiyaçlarına karşılık vermek adına daha hafif otomobiller üretmektedirler. Hafif otomobiller daha çabuk hızlanabilen, daha çabuk durabilen, ilerlemek için daha küçük bir motora ve daha az benzine ihtiyaç duyan araç anlamına gelmektedir. Kaporta parçaları, bazı motor parçaları, tamponlar ve lastiklerde kompozit malzemeler kullanılmaktadır [55].



Şekil 1.11. Otomotiv sanayide kompozit malzeme kullanımı [55].



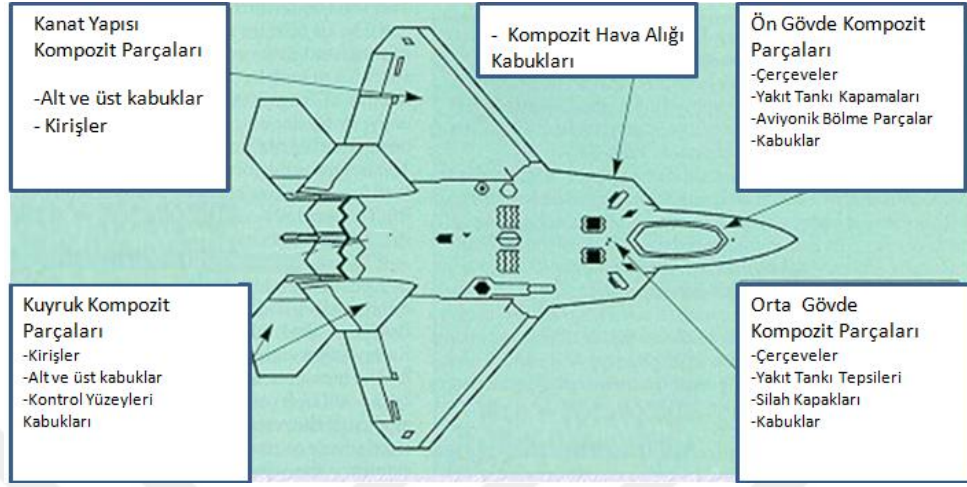
Şekil 1.12. Bazı müzik aletlerinde kullanılan kompozit malzemeler [55].

Kompozit malzemeler, havacılık sanayinde ilk olarak F14 ve F15 savaş uçaklarının kuyruk kabuklarında kullanılmıştır. Başlangıçta bu malzemeler yapısal yük taşımayan ikincil yapılarda kullanılmış olup, malzemeler üzerinde yapılan ar-ge çalışmaları sonucunda, kanat ve gövde yapılarını oluşturan birincil bileşenlerde de kullanılmaya başlanmıştır [55].

Havacılıkta böyle malzemelere büyük ihtiyaç duyulmaktadır. Daha hafif malzemeyle atmosfer şartlarına dayanım ve yüksek mukavemet sağlanmaktadır [56]. Amaç daha az yakıt harcamak, daha yüksek hıza ulaşmak ve verimliliği sağlamaktır. Bu kullanımda sadece maddi kazanç düşünülmeyip stratejik performanslarda dikkate alınmıştır. Özellikle titreşim, yorulma ve ısı dayanımı gibi nitelikler uzay ve havacılık sanayinde birleşik malzemelerin önde gelen avantajlarıdır [56].

Kompozit malzemelerin uçaklarda kullanım oranı gün geçtikçe artmıştır. Başlarda %18 oranında F18 savaş uçağında kullanılan yapılar, %24 kullanım ile F22’de, %28

kullanım ile A320 yolcu uçağında, %40 kullanım ile Eurofighter savaş uçağında uygulanmıştır [56].



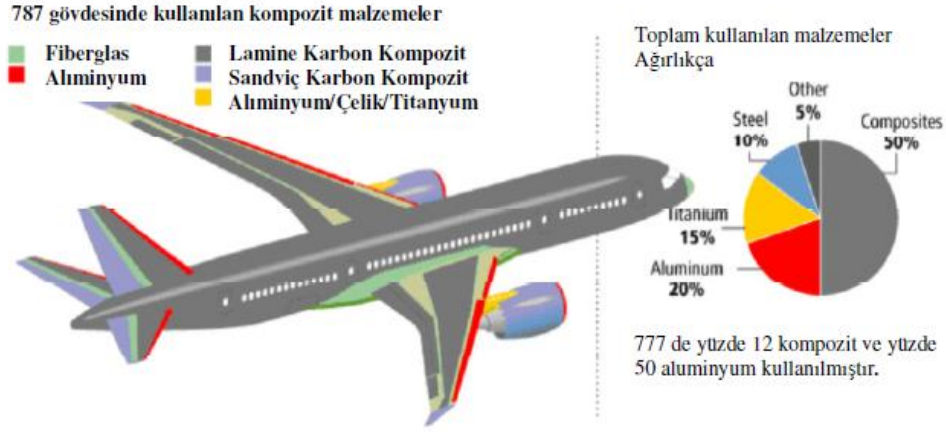
Şekil 1.13. F22 Kompozit parça dağılımları [57].

Uçak yapılarında kompozit malzeme kullanımının temel nedeni sahip oldukları düşük yoğunluktur. Kompozit yapı, uçak üzerinde oluşan yüksek yükleri, istenilen yönde yük alma özelliği sayesinde yüksek performansta karşılar. Metal yapılara kıyasla oldukça hafif bir yapı oluşabilmektedir [57].



Şekil 1.14. Eurofighter ve Tornadoda kompozit parça dağılımları [58].

Boeing 757 ve 767 kompozitlerin yaygın olarak kullanıldığı ilk ticarî uçaklardır. Güncel bir örnek olan Boeing 787 Dreamliner tipi uçaklarda kompozitler özellikle havacılık alanında sürekli artmaktadır (Şekil 1.15) [59].



Şekil 1.15. Boeing 787 Dreamliner tipi uçakta kullanılan malzeme oranları [59]

Kompozit malzemeler havacılık sanayinde planör gövdesi, uçak gövde ve iç dekorasyonu, helikopter iç ve dış parçaları ve uzay araçlarında başarı ile kullanılmaktadır [59].

Denizcilik sektöründe eskiye oranla neredeyse tamamen kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Hafiflik, dayanıklılık ve korozyona karşı yüksek direnç en önemli kullanım sebepleridir [59].

Elektrik ve elektronik sanayinde amaca uygun özellikleri ve başta elektriksel izolasyon olmak üzere taşıdığı üstün nitelikler nedeniyle her türlü elektrik ve elektronik malzemenin yapımında üretim malzemesi olarak kullanılırlar. Mükemmel bir elektrik yalıtkanı olması gerek aydınlatma, gerek enerji nakil hatlarında, iç mekânda ve dış mekânda kullanılan elektrik armatürleri, rüzgâr jeneratörleri ve bu jeneratörlerde hem taşıyıcı direk hem de pervane kanatlarında kullanılmaktadır [59].

Taşımacılık sektöründe frigofirik kamyon kasaları ve nakliye tankerleri gibi üretimler yapılmaktadır. Üreticiye kolay kalıplama imkanı, malzemedен tasarruf ve düşük maliyet gibi avantajlar sağlarken kullanıcıya da yüksek ısı izolasyonu ve kolay temizlenme gibi kolaylıklar sağlar [59].

İş makinelerinin koruma kapakları ve çalışma kabinleri yapımında da kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Bu şekilde üretimde kullanılan parça sayısı azaltılabilmekte, yekpare parçaların üretimi mümkün olmaktadır [59].

Mobilya sanayi kompozitlerden geniş bir şekilde yararlanır. Masa, sandalye, sehpa, koltuk, kütüphane, mutfak dolapları, çiçek saksıları, televizyon kabinleri, dikiş makinesi parçaları ayrıca saç kurutma makinesi gibi çok kullanılan ev aletlerinde ve dekoratif eşyalar kompozitten yapılmaktadır. Bu şekilde komple ve karmaşık parça üretimi, montaj kolaylığı, elektriksel etkilerden korunum ve hafiflik gibi avantajlar sağlanmaktadır [60].

Tarım sektöründe sera, ilaçlama deposu, tahıl depolama siloları, drenaj suyu boruları ve sulama kanalları yapımında kullanılmaktadır. Seri üretim imkanları, kolay montaj, düşük yatırım imkanı, düşük kalıp maliyeti, kapasitenin tam kullanılabilmesi gibi avantajlar sağlar [60].

İnşaat sektöründe cephe kaplamaları, tatil evleri, büfeler, otobüs durakları, soğuk hava depoları, inşaat kalıpları, ondüle levhalar birer kompozit malzeme uygulamalarıdır. Ayrıca izolasyon problemlerine çözüm ve yüksek mekanik dayanım gibi faydalar sağlamaktadır.

Şehir planlamasında kompozitler çevre güzelleştirme (banklar, çöp bidonu, elektrik direği) ve toplu konut yapımlarında kullanılmaktadır [60].

Ulaşımda kaporta, kabin, oturma birimi, konteynır tabanı, otobüs havalandırma kanalları, port bagaj parçaları, gösterge paneli, açık alan servis (golf arabası) araçları, teleferik ve trenlerde kullanılmaktadır [60].

Karayollarında, şehir içi ve şehir dışı yollarda kenar dikmesi, trafik işaret levhaları, ışık perdeleri, baş üstü levhaları ve özellikle şehir içinden geçen otoyolların kenarlarına yerleştirilerek gürültü kirliliğini önleyen ses yalıtım duvarları olarak kullanılmaktadır.

Silah, roket ve diğer mühimmat sanayisinde önemli bir yere sahiptirler. Miğfer ve kurşungeçirmez yelekler, zırhlı taşıtlarda çok yaygın olarak kullanılmaktadır [60].

Formula 1 arabalarının yapımına ait düzenlemeler çok özeldir ve titizlikle uygulanmaktadır. Tasarım mühendisleri en az ağırlıkla en sağlam çözümü bulmak durumundadırlar. Daha önceleri yarış arabalarında hafif bir metal olan alüminyum kullanılmaktaydı artık kompozit malzemeler çok daha düşük ağırlıklarla ikiye katlanabilmektedir. Ayrıca karmaşık parçaların kompozit malzemelerle üretilebilmesi F1

otomobillerin üretiminde gerekli parça sayısını azaltabilmektedir. Alüminyumla 200'den fazla parçayla üretilen gövde ve şase kompozitle beş parçaya düşürülmüştür [61].



Şekil 1.16. Kompozit malzemeden yapılmış otomobil ön paneli ve araç gövdesi [61]



Şekil 1.17. Gündelik hayatımıza girmiş olan kompozit malzemeler [61]

1.2.9. Elyaf Takviyeli Kompozit Malzeme Üretim Yöntemleri

İstenilen özelliklerde ve biçimde kompozit malzeme üretimi için birçok yöntem bulunmaktadır [61].

1.2.9.1.Elle Yatırma

Dokuma veya kırılmış elyaflarla hazırlanmış takviye kumaşlar, hazırlanmış olan kalıp üzerine elle yatırılır sonrasında da sıvı reçine elyaf katmanlarına emdirilir. Elyaf yatırılmadan önce kalıplar temizlenerek jelkot sürülür. Jelkot sertleştikten sonra elyaf katları yatırılır. Reçine ise kompozit malzemenin hazır olması için en son sürülür. Bu işlemde elyaf kumaşına reçinenin iyi nüfuz etmesi önemlidir. El yatırma tekniğinde en çok polyester ve epoksi ile birlikte vinilester ve fenolik reçineler de tercih edilmektedir. Elle

yatırma yoğun işçilik gerektirmesine rağmen düşük sayıdaki üretimler için çok uygundur [61].

1.2.9.2.Püskürtme

Püskürtme yöntemi, elle yatırma yönteminin aletli şekli olarak kabul edilebilir. Kırpılmış elyaflar kalıp yüzeyine içine sertleştirici katılmış reçine ile birlikte özel bir tabanca ile püskürtülür. Elyafın kırılma işlemi tabanca üzerinde bulunan ve bağımsız çalışan bir kırpıcı sayesinde yapılır. Püskürtülme işlemi sonrası yüzeyin bir rulo ile düzeltilmesiyle ürün hazırlanmış olur [61].

1.2.9.3.Elyaf Sarma

Bu yöntem özel biçime sahip ürünlerin seri üretimine uygundur. Elyaf sarma yöntemi sürekli elyaf liflerinin reçine ile ıslatıldıktan sonra bir makaradan çekilerek dönen bir kalıp üzerine sarılmasıdır. Sürekli liflerin farklı açılarla kalıba sarılmasıyla farklı mekanik özelliklerde ürünler elde edilebilir. Yeterli sayıda elyaf katının sarılmasından sonra ürün sertleşir. Ardından döner kalıp ayrılır. Bu yöntemle yapılan ürünler arasında silindirik borular, araba şaftları, uçak su tankları, yat direkleri ve dairesel basınç tankları sayılabilir [61].

1.2.9.4.Reçine Transfer Kalıplama

Bu kompozit üretim yöntemi, elle yatırma sistemlerine göre daha hızlı ve uzun ömürlü olmakla birlikte iki parçalı kalıp kullanmak gereklidir. Kalıbın kompozit malzemeye yapılması çelik maliyetine göre daha düşük kalmasına neden olmaktadır. Bu yöntemle çoğunluk jelkotlu veya jelkotsuz her iki yüzeyde düzgün olması istenen parçalarda kullanılır. Takviye malzemesi olarak kuru keçe, kumaş veya ikisinin kombinasyonu kullanılır. Takviye malzemesi önceden kalıp boşluğunu dolduracak şekilde kalıba yerleştirilir ve kalıp kapatılır. Elyaf lar matris içinde geç çözünen reçinelerle kaplanarak kalıp içerisinde sürüklenmesi önlenir. Reçine basınç altında kalıba pompalanır. Elyafın kalıba yerleştirilme işlemi gerektirmesinden dolayı uzun sayılabilecek bir işçilik gerektirir. Kalıp kapalı olduğu için ise zararlı gazlar azalır ve gözeneksiz bir ürün elde edilebilir. Bu yöntemle karmaşık parçalar üretilebilir. Concorde uçaklarında, Formula 1 arabalarında bazı parçalar bu yöntemle hazırlanmaktadır [61].

1.2.9.5.Hazır Kalıplama

Hazır kalıplama bünyesinde cam elyaf, reçine, katkı ve dolgu malzemeleri içeren hazır kalıplama bileşimleri olarak adlandırılan kompozit malzemelerin sıcak pres kalıplarla ürüne dönüştürülmesidir. Karmaşık şekillerin üretilebilmesi, metal parçaların bünye içine gömülebilmesi, farklı cidar kalınlıkları gibi avantajları bulunmaktadır. Diğer kompozit malzeme üretim tekniklerinin olanak vermediği delik gibi karmaşık şekiller elde edilebilmektedir. Iskarta oranı düşüktür. Bu yöntemin dezavantajları; kalıplama bileşimlerinin buzdolaplarında saklanma gerekliliği, kalıpların metal olmasından dolayı diğer kalıplardan daha maliyetli olması ve büyük parçaların üretimi için büyük ve pahalı preslere ihtiyaç olmasıdır [61].

1.2.9.6.Vakum Bağlaması

Kompozit malzeme genellikle geniş sandviç yapılı bir kalıba yerleştirilir, ardından bir vakum torbası en üst katman olarak yerleştirilir. İçerideki havanın emilmesiyle vakum torbası, yatırılan malzemenin üzerine bir atmosferlik basınç uygulayarak aşağıya çekilir. Sonra tüm bileşim bir fırına yerleştirilerek reçinenin kür işlemi için ısıtılır. Bu yöntem sıklıkla elyaf sarma ve yatırma teknikleri ile bağlantılı olarak uygulanır. Kompozit malzeme tamir işlemlerinde de kullanılmaktadır [61].

1.2.9.7.Otoklav Bağlaması

Termoset kompozit malzemelerin performanslarını artırmak için elyaf/reçine oranını artırmak ve malzeme içinde oluşabilecek hava boşluklarını tamamen gidermek gerekmektedir. Bunun sağlanması, malzemenin yüksek ısı ve basınca maruz kalmasıyla sağlanabilir. Vakum bağlaması yöntemindeki gibi sızdırmaz bir torba ile elyaf/reçine yatırmasına basınç uygulanabilir. Fakat bir atmosferden fazla düzenli ve kontrol edilebilir bir basıncın uygulanabilmesi için dış basınca ihtiyaç duyulur. Otoklav bağlaması yönteminde basıncın, ısının ve emişin kontrol edilebildiği bir basınçlı kap kullanılmaktadır. Fırın yerine bir otoklav tankı kullanılır. Böylece özel amaçlar için yüksek kalitede kompozit üretebilmek için kür şartları tam olarak kontrol edilebilir. Bu yöntem diğerlerine oranla daha uzun sürede uygulanır ve daha pahalıdır [61].

1.2.10. Kompozit Malzemelerde Akma Kriterleri

Tabakaların hasar gerilmeleri için birçok akma teorisi ortaya konmuştur. Bu teorilerin hemen hepsi tabakaların homojen ve gerilme-şekil değiştirmenin lineer olduğu varsayımı üzerine kurulmuştur. Bütün teoriler ana malzeme yönündeki mukavemet parametreleri ile açıklanabilir. Malzemelerin akma davranışını tanımlayan farklı akma kriterleri bulunmaktadır. İzotropik malzemeler (çelik, Al v.s.) için geliştirilmiş olan bilindik yedi tane akma kriteri vardır [55]. Bunlar:

- 1-Maksimum gerilme (Rankine) teorisi
- 2-Coulomb gerilme teorisi
- 3-Mohr gerilme teorisi
- 4-Maksimum şekil değiştirme teorisi
- 5-Genel şekil değiştirme teorisi
- 6-Toplam şekil değiştirme enerjisi teorisi
- 7-Biçim değiştirme enerjisi (Von- Mises) teorisi

Kompozit malzemeler için geliştirilmiş akma kriterleri yukarda sayılan akma kriterlerinden yola çıkarak bulunmuştur. Kompozit malzemeler için geliştirilmiş akma kriterleri dört tanedir [55]. Bunlar:

- 1-Tsai- Hill teorisi
- 2-Tsai- Wu teorisi
- 3-Hoffman teorisi
- 4-Hashin Hasar Teorisi

1.3. Yapıştırma Bağlantıları

Yapıştırıcı ASTM (American Society for Testing and Materials) tarafından, “yüzey teması ile malzemeleri bir arada tutabilen madde” olarak tanımlanmıştır [62].

Adams ve Wake, yapıştırıcıları yüzeylere uygulandığında bunları birlikte tutan ve ayrılmaya karşı direnç gösteren polimerik birer malzeme olarak tanımlamıştır. Yapışma işlemi, yapıştırıcının kendi içinde ve yapıştırıcı ile malzeme arasında meydana gelen fiziksel ve kimyasal olaylar sonucunda gerçekleşir [63].

Yapışma ise yapıştırıcı ile malzeme arasındaki çekiciliğe denir [64]. İki yüzeyin moleküller, iyonlar ve atomlar arası etkileşimden dolayı oluşan çekim kuvvetleriyle bir arada tutulması olarak tanımlanır. Yapıştırıcılar sıvı, katı, macun, bant gibi birçok fiziksel şekilde olabilir. Yapısal ve yapısal olmayan yapıştırma olarak iki temel yapıştırıcı ile birleştirme bağlantısı vardır. Yapısal yapıştırma, dizayn sınırları içinde yapının sürekliliğini kaybetmeden yük taşıyabilen yapıştırıcı ile birleştirme sistemidir. Bunlar uzay sanayi, otomotiv endüstrisi, gemicilik ve benzeri birçok alanda kullanılmaktadır [65].

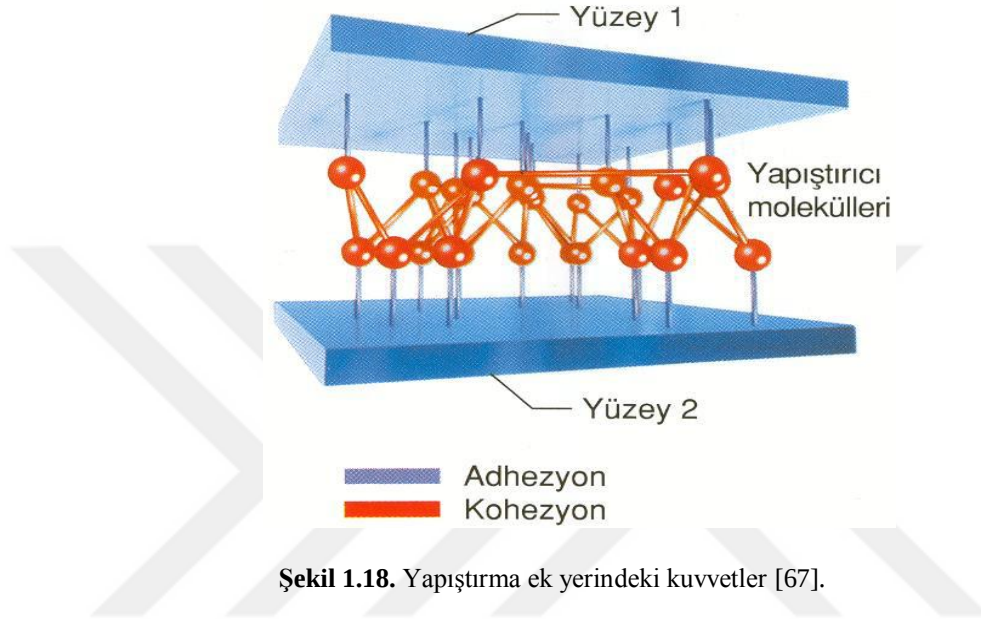
Yapıştırma bağlantıların dayanıklılığını değerlendirmek için dış yüklere, mekanik ya da çevresel faktörlere karşı nasıl tepki vereceğinin iyi anlaşılması gerekir. Yapıştırma bağlantıların performansı ve dayanıklılığı, malzeme ve yapıştırıcı özelliklerine, malzeme ve yapıştırıcı arasındaki fiziksel kimyasal iç etkileşime, bağlantı şartlarına, bağlantı geometrisine, bağlantıdaki artık gerilmelere ve yapıştırma hattındaki hatalara bağlıdır. İyi bir yapışma ve optimum bağlantı performansı verecek yapıştırıcı malzeme kombinasyonu için yukarıdaki faktörlerin hesaba katılması gerekir [66].

1.3.1. Adhezyon

Yapıştırıcı ile yapıştırılan yüzey arasında meydana gelir. İki yüzeyin ara yüzey kuvvetleri (valans kuvvetleri) tarafından bir arada tutulması olayıdır. “Van der Waals kuvvetleri” olarak adlandırılan çekim ve yüzeye tutunma fiziksel kuvvetleri Şekil 1.18’de yapışmadaki en önemli faktördür [67].

1.3.2. Kohezyon

Yapıştırıcı molekülleri arasında bulunan ve yapıştırıcıyı bir arada tutan kuvvettir (Şekil 1.18). Moleküller arası çekim kuvvetleri (Van der Waals kuvvetleri) ve polimer moleküllerinin kendi aralarında kenetlenmesi gibi kuvvetler kohezyona etki eder. Bir yapıştırma işleminde adhezyon ve kohezyon kuvvetleri yaklaşık eşit olmalıdır [67].



Şekil 1.18. Yapıştırma ek yerindeki kuvvetler [67].

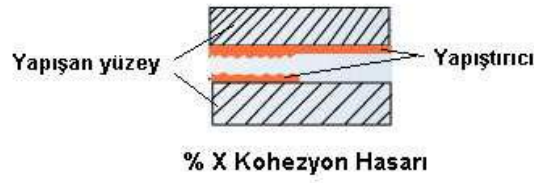
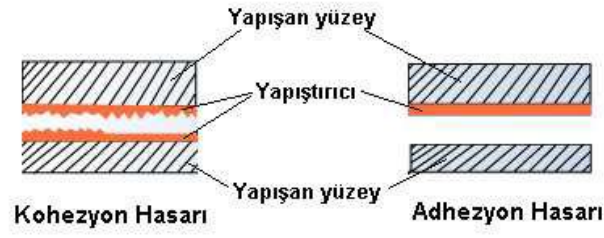
1.3.3. Yapıştırma Bağlantılarında Hasar Tipleri

Farklı yükleme şartlarında yapıştırma bağlantılarının veya yapıştırıcının mekanik özelliklerinin tamamıyla anlaşılabilmesi için hasar tiplerinin karakterize edilmesi gerekir. Bir grup malzeme veya parçanın yapıştırıcı ile bir araya getirildiği yapıştırma bağlantılarında genel olarak iki tip hasar modeli ile karşılaşılır [68].

Adhezyon Hasarı: Yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme ara yüzeyinde gözle görülen bir ayrılmanın olduğu kopma olayıdır [68].

Kohezyon Hasarı: Yapıştırıcı veya yapıştırılan malzemede gözle görülebilir hasarın olduğu kopma şeklidir. Yapıştırıcı kalıntılar genellikle her iki yüzeyde de bulunur [68].

Temel hasar modelinin tayini, yapıştırma bağlantısına uygulanan herhangi bir mekanik testin sonuçlarının daha iyi anlaşılmasını ve hasar çeşitlerinin sınıflandırılmasını sağlar. Birden fazla hasar modeli oluşmuşsa her bir hasar modelinin yaklaşık yüzde oranı her bir tanımlama sonunda verilmelidir [68].



Şekil 1.19. Adezyon ve kohezyon hasarlarının şematik gösterimi [68].

Hasar Tipleri	
Yapıştırılan malzemede meydana gelen hasarlar	 Yapıştırılan malzemelerin birinde veya ikisinde de hasarın olması
	 Kohesiv yapıştırılan malzeme hasarı
	 Kalkma (Deleminasyon) yoluyla hasar
Yapıştırıcıda meydana gelen hasarlar	 Kohezyon hasarı
	 Özel kohezyon hasarı
	 Adhezyon hasarı

Şekil 1.20. Temel hasar tipleri [68].

1.3.4. Yapıştırma Ek Yerindeki Kopmanın Değerlendirilmesi

Tablo 1.2. Hasar türleri ve sebepleri [68].

Hasar Türü	Sebebi
Adhezyon (yapışma) Hasarı	Kohezyon dayanımı > Yüzeyler arası dayanım
Kohezyon Hasarı	Yüzeyler arası dayanım > Kohezyon dayanımı
Adhezyon/Kohezyon Karışık Hasar	Yüzeyler arası dayanım ~ Kohezyon dayanımı

Tablo 1.3. Kopma türleri ve kuvveti artırma yöntemleri [68].

Kopma Türü	Kuvveti Artırma Yöntemleri
Adhezyon Kopması	Yapışmanın zayıf noktası, yapıştırılan parça ile yapıştırıcı arasındaki temas yüzeyidir. Ya malzeme yapıştırmaya uygun değil ya da yapıştırma yüzeyi kirlidir. Her iki durumda da kuvvet, yüzeye uygun ön işlem yapılmasıyla artırılabilir.
Kohezyon Kopması	Yapıştırıcı dış etkiler nedeniyle aşırı gerilime maruz kalmıştır (ör: gerilim tepeleri, sıcaklık, yaşlanma vs.) Çözüm: Parçaların şeklinde değişiklik yapmak ve/veya daha uygun yapıştırıcı seçmek.

1.3.5. Yapışma Teorileri

Bugüne kadar yapışma mekanizmasını açıklamak için bilim adamları yaklaşık kırk teori ortaya atmışlardır. Bu teoriler moleküler, mikroskobik ve makroskobik seviyelerdeki kavramları esas almışlardır. Burada bu teorilerden en kapsamlı olan dört tanesinden bahsedilecektir [69].

1.3.5.1. Mekanik Tutunma Teorisi

McBain ve Hopkins [70], bir katı yüzey üzerine sıvı yapıştırıcı sürüldüğü zaman, yapıştırıcının gözeneklere gireceğini, mekanik tutunma olacağını ve dolayısıyla iyi bir yapışma meydana geleceğini söylemiştir. Mekanik tutunma, yapıştırıcının, malzeme yüzeyinden kalkmasını önler. Venables vd. [71], yapıştırıcının mekanik tutunma ile yapışmasını artıran bazı alüminyum malzemelerin yüzey işlemlerinin, aslında yüzeyde gözenekleri arttırdığını göstermiştir. Gerçekte malzeme yüzeylerini pürüzlendirmek ve

yüzeydeki yağ, pas ve benzeri kirleri temizlemek yüzey alanını arttırır ve yapıştırıcının yüzeye daha iyi yayılmasını ve ıslatmasını sağlar [72].

1.3.5.2.Adsorpsiyon Teorisi

Adsorpsiyon teorisi, esas malzeme ile yapıştırıcı arasında iyi bir temas sağlanması şartıyla ara yüzeyde atomlar arası ve moleküller arası kuvvetlerin oluşması sonucu yapışmanın meydana geldiğini ileri sürer. Bu teori, yapıştırıcı biliminde halen en fazla kabul edilen uygulanabilir teoridir [64] ve Sharpe ve Schornhorn tarafından geliştirilmiştir [73]. Yapıştırıcı malzeme ara yüzeyindeki kuvvetler genel olarak iki kategoride gruplanabilir: a) İyonik, kovalent ve metalik bağlar olan birincil kuvvetler. b) Van der Waals kuvvetleri, dipol-dipol, indüklenmiş dipol-dipol, hidrojen bağları ve asit-baz iç etkileşimini kapsayan ikincil kuvvetler [64].

1.3.5.3.Elektrostatik Teorisi

Araştırmacılar 1948 yılında yapıştırıcı ile malzeme arasındaki elektron transferinin, yapışmanın oluşmasını sağlayan bir çekim şarjı ürettiğini ileri sürmüşlerdir. Yapıştırıcı ile malzeme arasındaki bağı kapasitöre benzetmişlerdir. Kapasitörün plakları kaldırıldığında, şarjı boşalır ve deşarj oluncaya kadar artan bir potansiyel meydana gelir. Bu durum en fazla tartışılan teorilerden biri olmuştur [74].

1.3.5.4.Difüzyon Teorisi

Difüzyon teorisi, biraz mekanik tutunma teorisine benzemektedir. Fakat difüzyon teorisi moleküler seviyededir. Voyutski, tarafından geliştirilen difüzyon teorisi iki polimer malzemenin birbirleri içine difüze olmasıyla yapışma meydana geleceğini ifade eder [74].

1.3.6. Birleştirme Teknikleri

- Mekanik; cıvata, vida, perçin
- Termal; kaynak, pirinç lehim veya lehim
- Kimyasal; yapıştırıcı

1.3.6.1.Mekanik Birleştirme

Bu yöntemde kullanılan bağlantı elemanların parçalar üzerinde kullanılabilmesi için parçalar üzerinde delik delinmesi gerekmektedir. Delik delinen bölgenin mukavemet açısından zayıflaması anlamına gelmektedir. Bağlantı elemanlarına yük uygulandığında kesit olarak zayıf olan delik açılmış bölgede gerilme yığılmaların oluşmasına sebep olmaktadır. Bağlantının mukavemetli olması için parça kalınlıklarının artırılması ya da mukavemet açısından daha dayanıklı malzemeler kullanılması gerekmektedir. Bu durum bağlantı bölgesinde ağırlığın ve maliyetin artması anlamına gelmektedir özellikle günümüzde uçaklarda ağırlığın ve maliyetin artması istenmeyen bir durumdur [75].

1.3.6.2.Termal Birleştirme

Termal bileştirmede özellikle kaynak ve lehimde malzemelerin aynı olması gerekmektedir. Termal bileştirme sırasında oluşan yüksek sıcaklıktan dolayı istenmeyen gerilmelere neden olur, bunun sonucunda parça yorgunluğu ve parçaların metal yapısında bozulma meydana gelmektedir. Lehim, birleştirilen parçalardan daha düşük ergime sıcaklığına sahiptir [75].

1.3.6.3.Yapıştırma Bağlantıları

Yapıştırma bağlantılarının avantajları ve dezavantajları aşağıdaki gibi ifade edilmiştir [75,76];

- ▲ Düzgün gerilme dağılımı ve daha büyük yük taşıma alanı temin edilmesi.
- ▲ Herhangi bir şekilde ince ve kalın malzemelerin birleştirilmesi.
- ▲ Benzer veya farklı malzemelerin birleştirilmesi.
- ▲ Yorulma ve tekrarlı yük dayanımı.
- ▲ Düzgün yüzeyli birleştirme olanağı.
- ▲ Değişik ortamlara karşı bağlantıda yalıtım olanağı sağlanması.
- ▲ Birçok teknolojiye kolaylıkla uygulanabilir olması.
- ▲ Isı ve elektrik iletkenliğine karşı yalıtkan olarak kullanılabilmesi.
- ▲ Yüksek darbe ve titreşim sönümleme kabiliyeti.
- ▲ Dikkat çekici dayanım/ağırlık oranı.
- ▲ Sızdırmazlık.
- ▲ Mekanik birleştirme yöntemlerinden daha kolay ve ucuz olması.

- ▲ Diğer mekanik birleştirme yöntemleriyle birleştirilebilir olması.
- ▲ Bağlama elemanı üretiminde yüksek enerji girişine gerek olmaması.
- ✓ Parçaların birleştirilmesi zordur. Yüzey hazırlığı ve temizliği gerektirir.
- ✓ Yapıştırıcının mekanik özellikleri zaman ve sıcaklığa bağımlılık gösterir.
- ✓ Düşük soyulma dayanımı ve darbe dayanımı sağlar.
- ✓ Bağlantı ya da yapıştırıcının performansı ile ilgili verilerdeki eksiklikler.
- ✓ Yapıştırma bağlantısının ömrü maruz kaldığı çevresel etkilere bağımlıdır.

1.3.7. Yapıştırıcı Çeşitleri

Yapıştırılacak malzemenin cinsi, yapıştırıcının fiziksel formu, sertleşme olayı, bağlantı mukavemet özellikleri, çalışma şartlarındaki sürekliliği ve yapıştırıcının uygulama metodu sınıflamada rol oynayan faktörlerdir. Yapıştırıcılar özelliklerine göre iki ana gruba ayrılırlar [75].

1.3.7.1. Kimyasal Reaksiyonla Sertleşen Yapıştırıcılar

1.3.7.1.1. Epoksiler

Epoksi reçine ve bir sertleştiriciden oluşan iki bileşenli yapıştırıcılardır. Metal, cam ve seramik gibi çoğu mühendislik malzemesinin yapıştırılmasında kullanılabilir. Yüksek yapışma, iyi çekme ve kayma mukavemeti, yüksek rijitlik, sürtünme direnci, küçük büzülme miktarıyla kolay sertleşme ve yüksek sıcaklıklara iyi tolerans sunmak üzere tasarlanabilen dayanıklı yapıştırıcılardır. Epoksiler avantajlarının çokluğu ve tüm elyaf malzemelerde kullanılabilmesi nedeniyle, havacılık sanayisinde yaygın bir kullanım alanına sahiptirler [77].

1.3.7.1.2. Anaerobikler

Havaya karıştığında akışkan kalan bir yapışkan bileşenidir. Bağlantı alanına hapsedildiğinde bir reçine içinde katılaşır. Anaerobik kelimesinin anlamı, atmosferik oksijen olmadan çalışmadır. Bunun için yapıştırma işleminden hemen sonra yapıştırma bölgesi, havanın girişi engellenecek şekilde kaplanır. Anaerobik yapıştırıcılar, iyi rutubet ve çözelti direncine sahiptirler [77].

1.3.7.1.3. Poliüretanlar

Poliüretanlar tek bileşen halinde de satılmasına karşın, çoğunlukla reçine ve katalizör olmak üzere iki bileşen halinde satılmaktadır. Epoksi reçinelerle karşılaştırıldığında çalışma ömrü çok daha sınırlı olup nemli ortamlara karşı daha hassastır. Oda sıcaklığında veya ısıtılarak kürleştirilebilir. Kürleşme esnasında boyut değişiminden kaynaklanan artık gerilmeler pek oluşmaz. Poliüretan yapıştırıcılar genellikle düşük sıcaklıklarda, epoksi reçinelerden daha iyi mukavemet ve tokluğa sahiptirler. İyi elastik özellik gösterirler. Bununla beraber toksik özelliklere sahip olduğu için bileşimlerine elle dokunulduğu zaman tehlikeli olabilirler [77].

1.3.7.1.4. Akrilikler

Akrilikler, hem metaller hem de plastikler için iyi soyulma mukavemetine sahiptirler. 110⁰C ile 120⁰C arasında elastik özelliklerini değiştirmeden korurlar. Bu yapıştırıcılar rutubetli ortamlara karşı dirençlidir ve nemden dolayı mukavemetlerinde bozulma söz konusu değildir. Bununla beraber bu yapıştırıcılar yanıcı olup yüksek sıcaklıklarda zamanla bozulurlar [77].

1.3.7.1.5. Fenolikler

Fenolikler, doğal bileşiklerden elde edilmeyen ilk yapıştırıcıdır. Molekül iskeleti, benzen halkalarının birleştirilmesi ile elde edilmiştir. -60⁰C gibi düşük sıcaklıklarda oldukça gevrek ve yüksek sıcaklıklarda ısıtılarak kürleşir. Pahalı olup çevresel faktörlere dirençlidir. Ahşap ve tabakalı yapılarda ilk tercih edilen yapıştırıcıdır [77].

1.3.7.1.6. Silikonlar

Silikon yapıştırıcılar sınırlı koheziv dayanıma sahiptirler. Fakat -60⁰C'den 370⁰C'ye kadar olağanüstü bir sıcaklık aralığında çalışma şartlarına sahiptirler. Yüksek sıcaklıklarda özelliklerinin çoğunu, düşük sıcaklıklarda ise esnekliklerini korurlar. Zincir yapısı çok esnek olup iyi soyulma mukavemeti gösterirler. Çoğu silikon yapıştırıcılar havadaki nem ile oda sıcaklığında sertleşebilen yapıştırıcılardır. Silikonlar, metal, cam, lastik ve plastiklerin yapıştırılmasında ve mikro elektronik endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır [77].

1.3.7.1.7. Siyanoakrilikler

Atmosferik nemnin etkisi altında kısa sürede katılaşır. Yapıştırıcı sıvıdan katıya direkt olarak dönüştüğü için herhangi bir akma, bozulma ya da sızma gibi bir sorun ile karşılaşmamaktadır. Gözenekli olmayan malzemelerin birleştirilmesi için uygundur. Örneğin; cam, kauçuk, metaller, plastikler. Parmakları da hemen yapıştırdığı için piyasada genellikle ‘süper zambak’ olarak adlandırılır [77].

1.3.7.2. Fiziksel Değişim ile Sertleşen Yapıştırıcılar

Kimyasal reaksiyon ile sertleşen yapıştırıcılara göre daha az dayanım gösterirler. Fiziksel değişim ile sertleşen yapıştırıcılara yapısal olmayan yapıştırıcılar da denir. Yaygın olarak kullanılan tipleri ise sıcak eriyikler, kauçuk yapıştırıcılar, PVA’lar ve basınç gerektirmeyen yapıştırıcılardır [78].

1.3.7.2.1. Sıcak Eriyikler

Polimer esaslı olup hafif yüklere maruz yapışma modellerinde hızlıca birleştirmek için kullanılırlar. Bunlar akışkan hale gelinceye kadar ısıtılırlar, bağlantı yüzeyleri üzerine koyulurlar ve oda sıcaklığına gelinceye kadar bekletilirler [78].

1.3.7.2.2. Kauçuk Yapıştırıcılar

Yüke maruz kalan yapışmalar için uygun değildir. Su ortamının ya da çözülmenin kaybolması ile sertleşir [78].

1.3.7.2.3. PVA (Polyvinyl Acetates)

Endüstride oldukça geniş kullanım alanlarına sahiptirler. Ağaç, karton gibi gözenekli malzemelerin yapışması için uygundur [78].

1.3.7.2.4. Basınç Gerektirmeyen Yapıştırıcılar

Yüke maruz yapışmalar için uygun değildir. Bu yapıştırıcılar sertleşmemelerine rağmen çevre şartları durumlarını değiştirir. Etiket için uygundur [78].

1.3.8. Formları Açısından Yapıştırıcılar

Kullanım formlarına göre yapıştırıcılar aşağıdaki gruplarda değerlendirilebilirler. [78].

1.3.8.1. Macun Tip Yapıştırıcılar

Metal ya da kompozit malzemeleri birleştirmek için kullanılan iki parçalı oda sıcaklığında sertleşen yapıştırıcılardır. Yapıştırıcı kalınlığının 0,10 ve 0,20 mm arasında olması yapışma için yeterlidir [78].

1.3.8.2.Film Tip Yapıştırıcılar

Metalik ya da kompozit malzemelerin yapıştırılması ya da prepreglerin yapışmasına yardım etmesi için kullanılan epoksi esaslı malzemelerdir. Çok geniş yapışma alanlarına sahiptirler [78].

1.3.8.3.Düşük Viskoziteli Yapıştırıcılar

Oda sıcaklığında ya da yüksek (120 °C-180 °C) sıcaklıklarda sertleşirler. Birleşmeler içindeki süreksizliklere karşı daha fazla kayma mukavemetine sahip olduklarından dolayı yapısal bütünlüğü korurlar [78].

1.3.8.4.Reçineler

İki parçalı düşük vizkoziteli epoksi reçinelerdir. Kompozit kumaşların emdirilmesi için kullanılırlar [78].

1.3.8.5.Düşük Yoğunluklu Yapıştırıcılar

İki parçalı yapıştırıcılar olup mükemmel yapışma istenen tabakaların yapıştırılmasında veya kompozit kumaş tabakalarının yapıştırılmasında kullanılırlar [78].

1.3.8.6.Köpükler

Birleşmede boşlukları doldurarak, birleşen parçaların tümünü birbirlerine kuvvetlice yapıştırır. Köpükler, kuruma süresince genişleyen epoksi esaslı yapıştırıcılardır [78].

1.3.9. Yapıştırıcılara Konulan Katkı Maddeleri

1.3.9.1.Seyrelticiler

Diğer elemanların konsantrasyonunu ve viskozitesini azaltmak için kullanılır. Yapıştırıcıların düzgün ve ince tabaka halinde uygulanmasını sağlar [78].

1.3.9.2.Katalizatörler ve Katılaştırıcılar

Yapıştırıcılar için katılaşmayı hızlandıran elemanlardır. Katılaştırıcılar monomerik, polimerik veya bileşimleri üzerine oluşturulmuş türlere sahiptirler. Etkisi kimyasal olarak ana elemanla birleşmesi sonucu ortaya çıkar. Katılaştırıcı/ana eleman oranı yapıştırıcıların fiziksel özelliklerini belirler. Asitler, bazlar, tuzlar, kükürt bileşimleri ve peroksitler emniyetle kullanılan katalizörlerdir [78].

1.3.9.3.Hızlandırıcılar, Geciktiriciler ve Durdurucular

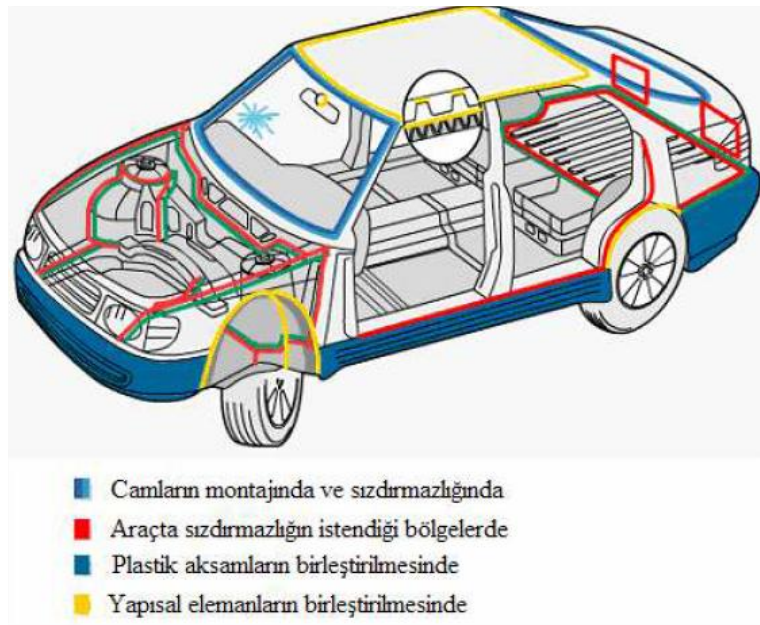
Bu elemanlar katılaşma hızını kontrol ederler. Hızlandırıcılar katılaşma hızını arttırmırlar. Geciktiriciler katılaşma hızını azaltırlar ve yapıştırıcının depolama ve çalışma

ömrünü arttırmak. Durdurucular ise reaksiyonu tamamen keserler ve belli yapıştırıcılar için depolama ve çalışma ömrünü de arttırmak [78].

1.3.10. Yapıştırıcıların Kullanım Yerleri

Geleneksel birleştirme yöntemlerine göre uygulamadaki kolaylığı, düşük maliyeti ve hafifliğinden dolayı kompozit malzemelerin birleştirilmesinde yapıştırma bağlantılarının kullanımı yaygınlaşmıştır. Hafifliğin, rijitliğin ve güvenilirliğin önemli olduğu hava taşıtlarında yapıştırma bağlantısı önemli oranda kullanılmaktadır [79].

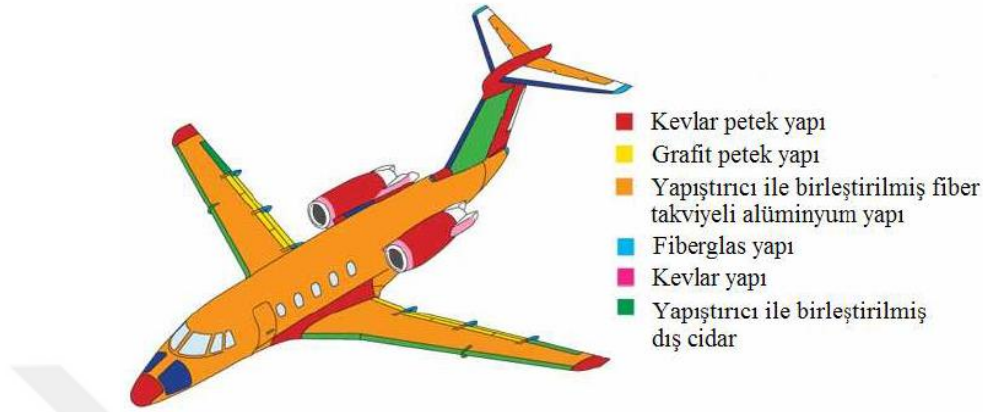
Yapıştırma bağlantıları havacılık ve uzay sanayi, otomotiv ve inşaat sektörleri, elektrik-elektronik, paketlenme, beyaz eşya, deniz taşıtları, bio-medikal alan, spor ekipmanları gibi son derece yaygın bir kullanım alanı sunmaktadır. Otomotiv endüstrisinde yapıştırıcıların oldukça geniş kullanım alanı bulunmaktadır. Mil göbek bağlantılarının emniyete alınmasında, rulmanlı yatakların montaj işlemlerinde, motor bloğu-kapak sızdırmazlıklarının sağlanmasında sıvı conta olarak, kapı panellerinin oluşturulmasında ve birçok cam, plastik parçaların birleştirilmesinde yapıştırıcılar kullanılmaktadır. Ayrıca yüksek hız trenlerinin dış panellerinin üzerine de yapıştırıcı sürülmektedir. Şekil 1.21’de bir otomobilde yapıştırıcıların kullanım alanları gösterilmektedir [80].



Şekil 1.21. Otomobilde yapıştırıcıların kullanıldığı alanlar [80].

Günümüzde yapıştırıcıların yaygın olarak kullanıldığı alanlardan birisi de uzay ve uçak sanayisidir. Boeing 747, Lockheed C-5A, F111 ve diğer birçok uçaklarda gövde ve

kanat panellerinde yapıştırıcılar kullanılmaktadır. Şekil 1.22'den de görüleceği üzere uçakların büyük bir kısmı kompozit yapılardan oluşmaktadır. Bu yapılarda kullanılan petek dokulu sandviç yapılarda yapıştırıcı ile birleştirme tekniği kullanılmaktadır [80].



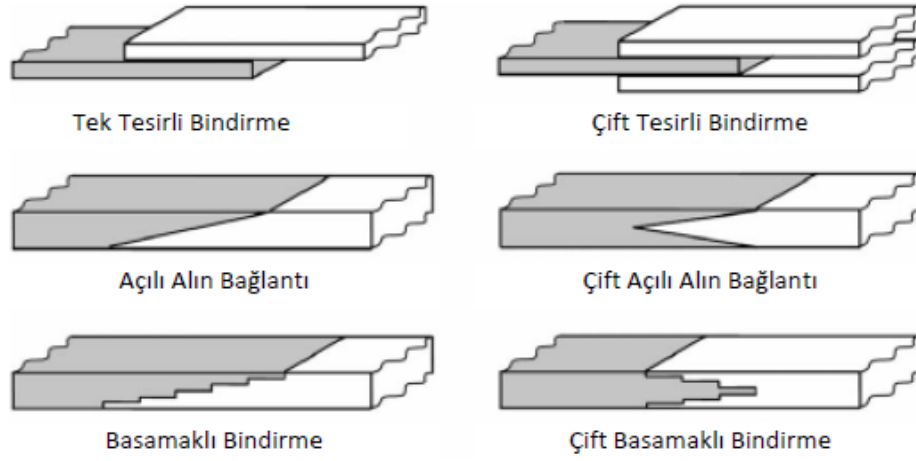
Şekil 1.22. Uçaklarda yapıştırıcıların kullanıldığı alanlar [80].

1.3.11. Yapıştırma Bağlantı Türleri

Yapıştırma bağlantı mukavemeti yapıştırıcıya, yapıştırılacak malzemeye, çalışma ortamına, ek yeri tasarımına ve yüke bağlıdır [67].

Bir yapıştırıcının fiziksel ve kimyasal özellikleri, onun kohezyon (iç yapışma) ve adhezyon (yüzeylere tutunma) kuvvetini belirler. Yapıştırma bağlantısının dayanıklılığı da yapıştırıcının özelliklerine bağlıdır. Farklı yapıştırıcı teknolojileri, kuvvet, yüzeye tutunma özellikleri ve Young's modülü esneklik yönünden değişik alternatifler sağlar [67].

Yapıştırılacak malzemeler ve yapışma yüzeyi son kat işlemleri için ve ek yeri tasarımında birinci seçim kriteridir. Fakat en uygun yapıştırıcının belirlenmesinde malzemelerin mekanik özellikleri ve parçaların sertliği de çok önemlidir. Bağlantının çalışma ortamı (sıcaklık, kimyasallar, nem, vs.) yapıştırıcı seçimini doğrudan etkiler. Çalışma ortamı ve tatbik edilen kuvvetler dayanıklılığı belirleyen en önemli parametrelerdir. Ek yeri tasarımı, seçilen yapıştırıcıdan en yüksek verimi almakta en önemli parametredir. Tasarım yapıştırıcının özelliklerine göre ayarlanmalı örneğin hacimsel küreleşme, boşluk doldurma ve en zor yük şartları (soyulma, yarıлма) engellenecek şekilde optimize edilmelidir [67].



Şekil 1.23. Yapıştırma bağlantı türleri [67].

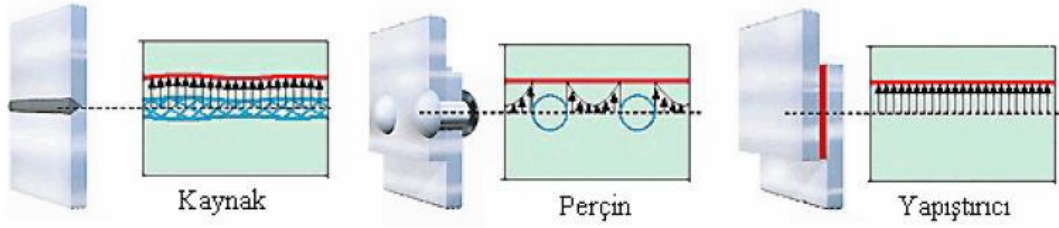
Yapıştırıcı kalınlığı belli sınırlar içerisinde bulunmalıdır. Aşırı derecede kalın yapıştırıcı tabakası tutma kuvvetini azaltırken; ince tabakalar, boşluklu birleştirmelere sebep olabilir [67].

İyi bir yapışma için yapıştırıcı kalınlığının 0,05 mm ila 0,20 mm arasında olması beklenirken yapışma uzunluğu problemin durumuna göre değişiklik arz edebilir [67].

Bir tasarımı yapıştırmaya uygun hale getirmenin diğer bir önemli yolu da yapışma alanını artırmaktır. Eğer yapışma alanı çok küçükse, genellikle çok yüksek soyulma veya yarıma gerilmeleri doğar. Yapıştırıcı ve parçaların sertliği ek yerinin kopma yükünü etkiler. Genellikle parçalar ne kadar sert ise; ek yerinin kuvveti parçaların şeklinden o kadar az etkilenir [67].

1.3.12. Yapıştırma Bağlantılarda Gerilme Analizi

Malzemelerin yapıştırıcı kullanılarak birleştirilmesi, mekanik bağlantı elemanları kullanılmasına kıyasla önemli avantajlar sağlar. Yapıştırıcı, yük ve gerilimi tüm birleşim yüzeyine yayarak statik ve dinamik yüklerin düzgün dağılmasını sağlar ve gerilimin belli noktalarda yoğunlaşmasını engeller. Dolayısıyla yapıştırıcı ile gerçekleştirilmiş bir bağlantı, bükülme ve titreşime, mekanik yöntemle yapılan bir bağlantıdan daha dayanıklıdır [67].



Şekil 1.24. Kaynaklı, perçinli ve yapıştırıcı birleştirmelerdeki gerilme dağılımları [67].

Yapıştırma bağlantılarının son derece yaygın bir kullanım alanı sunması ve mekanik birleştirme yöntemleriyle karşılaştırıldığında büyük avantajlar sağlamasına rağmen, yapısal yapıştırıcının mekanik özelliklerinin belirlenmesi, güvenilirliği ve tekrarlanmada yaşanan zorluklar, bu teknolojinin benimsenmesinde güçlüklerle karşılaşılmasına sebep olmaktadır. Bu durum, araştırmacıların tasarım amaçlarına uygun mekanik özelliklerin tespiti üzerine yoğunlaşmalarına sebep olmuştur. Yapısal yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin (çekme ve kayma modülleri, Poisson oranı, akma ve çekme dayanımı vb.) doğru olarak belirlenmesi, yapıştırma bağlantısının tasarımında malzeme seçimi, hasar kriterlerini belirleme, yüklü bağlantıdaki gerilme dağılımlarını hesaplayabilme ve kalite kontrol gibi parametrelerden dolayı oldukça önemlidir [81].

Yapıştırıcı ile birleştirme tekniğinin kaynak, perçin ve diğer mekanik bağlantıların tümünün yerini alacağını düşünülmesi yanlıştır. Bu alışılmış birleştirme tekniklerinin her biri farklı şartlar altında kendine özgü üstünlüklere sahiptir [81].

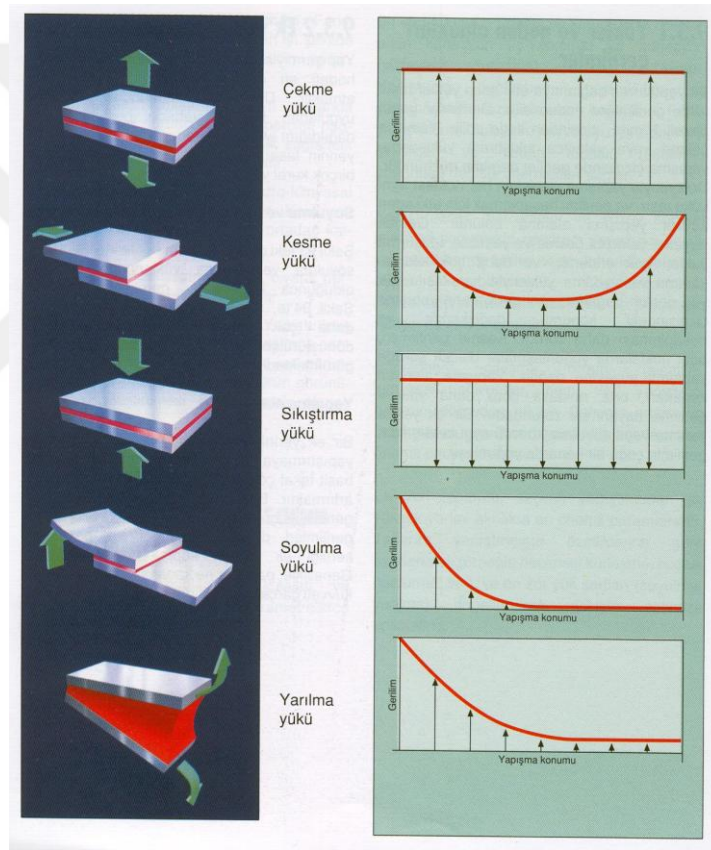
1.3.13. Yapıştırma Bağlantılarında Gerilmeler

Şekil 1.25’de yapıştırma bağlantılarında beş önemli gerilme etkili olur. Bunlar; çekme, kesme, sıkıştırma, soyulma ve yarılmadır. Bağlantı mukavemetinden en yüksek verim elde etmek için bu gerilme çeşitleri göz önünde bulundurulmalıdır. Yapıştırıcıların soyulma etkisinin oluşturduğu gerilme dağılımlarına karşı dayanımları zayıf iken çekme, basma ve kayma yüklerinin oluşturduğu gerilme dağılımlarına karşı mukavemetleri oldukça iyidir [67].

Bağlantı, yapıştırma mukavemetinin artması açısından, yapıştırma yüzeylerinde kayma (kesme) gerilmeleri olacak şekilde yapılmalıdır. Yapıştırma bağlantılarının soyulma ve çekme mukavemetleri kesme mukavemetine göre daha azdır. Yapıştırma bağlantısı kullanım yerine göre değişik gerilmelere maruz kalabilir. Yapıştırma bağlantılarında meydana gelen temel gerilme çeşitleri ve dağılımları şekil 1.26’da görülmektedir. Bu temel

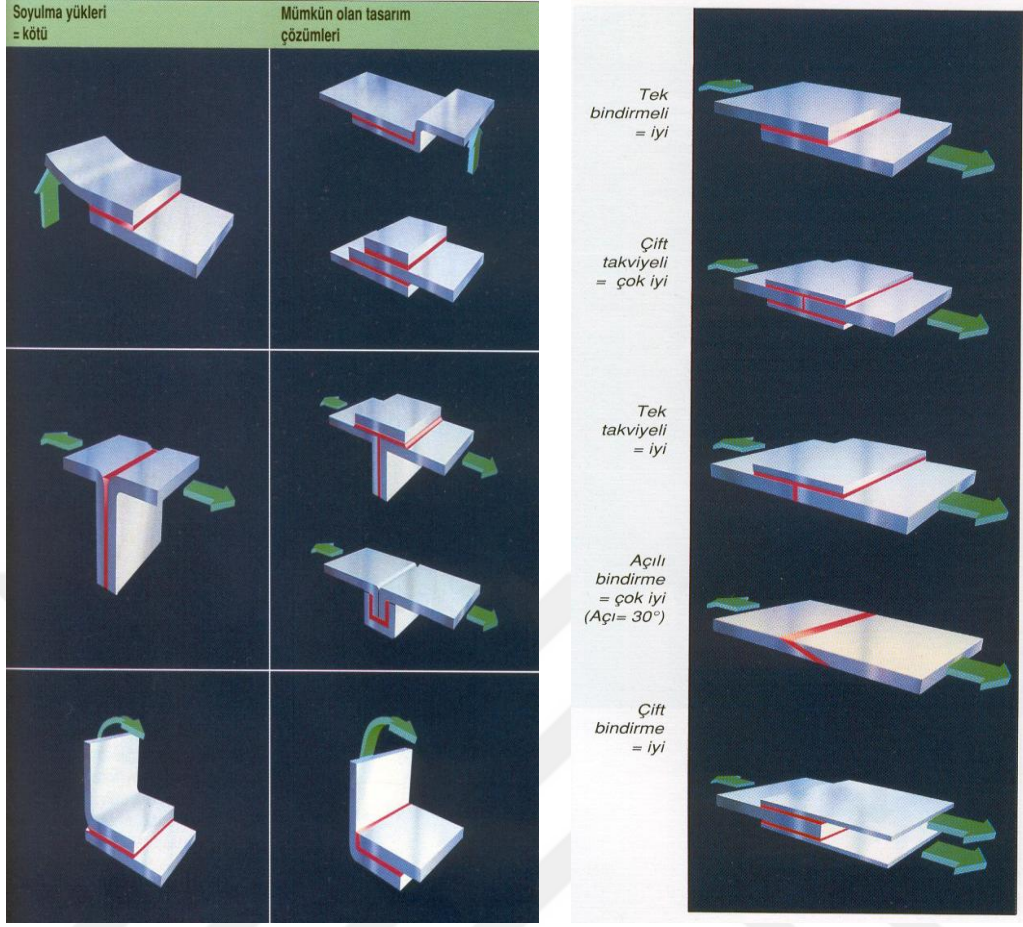
gerilmelerin yanı sıra birkaçının bir arada bulunduğu birleşik gerilmeler de meydana gelebilir. Uygulamadaki gerilmelerin büyük çoğunluğu birleşik gerilmelerdir [67].

Yapıştırma bağlantısının çekme ve basma gerilmelerine zorlanması halinde gerilme dağılımı, yapıştırma uzunluğu boyunca düzgün olmaktadır. Bağlantı kaymaya zorlandığında, gerilmeler uç kısımlarda yoğunlaşmaktadır. Soyulma ve yarıлма yüklemeleri uygulandığında ise gerilme dağılımı iki uç arasında çok büyük farklılıklar göstermektedir. Mümkün olduğu yerlerde bağlantılarda, yükün büyük bir kısmı kesme yükü olarak iletilebilecek şekilde oluşturulmalıdır [67].



Şekil 1.25. Yapıştırma bağlantılarında gerilme çeşitleri ve dağılımları [67].

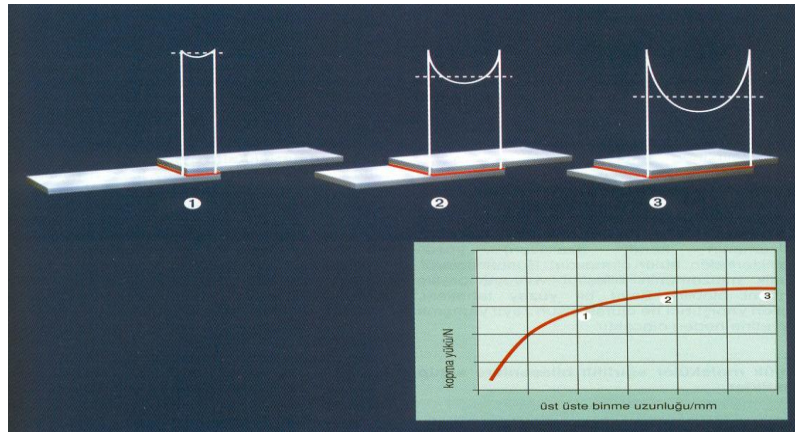
Üst üste binen bir ek yerinin düzgün kesme gerilim dağılımı göstermemesi için birçok neden vardır. Sebeplerden biri, böyle bir ek yerine etki eden eksantrik kuvvetlerin eğilme momentine yol açmasıdır. Bu eğilme momenti, özellikle yapışma alanının kenarlarında ilave çekme gerilimleri doğurur. Şekil 1.27'de görüldüğü gibi yapışma çizgisine etki eden eksantrik kuvvetlerin yol açtığı eğilme momentinin olumsuz etkilerini en aza indirmenin çeşitli yolları vardır [67].



Şekil 1.26. Soyulma yükleri ve tasarım önlemleriyle dönüştürülmeleri [67].

Şekil 1.27. Eksantrik kuvvetlerden kaynaklanan problemlerin muhtelif çözümleri [67].

Şekil 1.28’de, kesme gerilimi ortalama değerinin üst üste binme uzunluğu arttıkça düştüğü, bunun neticesinde kopma yükünde orantısız bir artış meydana geldiği görülüyor. Eğer yükü taşımak için yapışma yüzeyini artırmak gerekiyorsa, üst üste binmedense ek yeri enini artırmak daha iyidir [67].

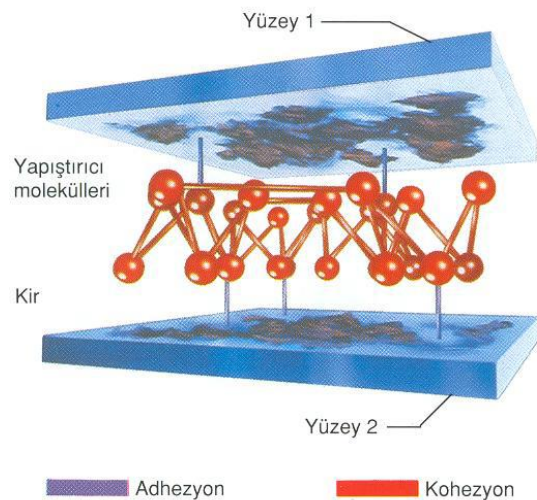


Şekil 1.28. Bindirme uzunluğunun artması ile kopma yükünde meydana gelen artışın orantılı olmayışı [67].

1.3.14. Yapıştırılacak Yüzeylerin Hazırlanması

Yapıştırma bağlantılar, yapıştırıcı ve yüzeyler arasında tam bir temas olmamasından olumsuz etkilenirler. Başarılı bir yapıştırma işlemi için tasarımda iyi bir önileşim ve uygun yapıştırıcı belirlenmelidir. Basit mekanik temizleme ve karmaşık fiziksel yüzey hazırlamaya kadar birçok önileşim yöntemi mevcuttur. Yüzey hazırlama, yapıştırıcı ile birleştirme işleminde en kritik aşamadır. Tatmin edici bir yüzey hazırlığı yapılmadığı takdirde, bağlantı yapıştırıcı yüzey temas seviyesinde önceden tahmin edilemez biçimde kopacaktır. Doğru yüzey hazırlama yapıldığında, yapıştırıcıdan beklenen kuvvet elde edilebilecek ve kopmalar yapıştırıcının kohezyon kuvvetinin aşılması ve yapıştırıcı tabakasının ikiye ayrılması şeklinde olacaktır. Birçok plastik ve metal malzemede basit zımparalama veya solventle temizleme kullanılır. Ancak bazı metallerde, iyi bir yapışma veya uzun vadeli ortam şartlarına dayanım elde etmek için bu basit yüzey hazırlama yöntemleri yeterli olmayabilir [82].

Yapışma kuvveti büyük ölçüde yapıştırılacak yüzeyler ile yapıştırıcı arasındaki adhezyon kuvveti tarafından belirlenir. Yüzeylere iyi bir önileme yapıldığı oranda yapışma kuvvetinin artacağı iyi anlaşılmalıdır. Şekil 1.29’da yapıştırılacak yüzeylerdeki kirlerin adhezyonu düşürdüğü görülmektedir. Adhezyon kuvveti, yağ alma veya mekanik aşındırma ile istenmeyen yüzey tabakalarının temizlenmesi, primer ile kaplayarak yeni aktif bir yüzey oluşturulması işlemi ile yüzey aktivitesinin değiştirilmesi ile artmaktadır [82].



Şekil 1.29. Yapıştırılacak yüzeylerdeki kirlerin adhezyonu etkilemesi [67].

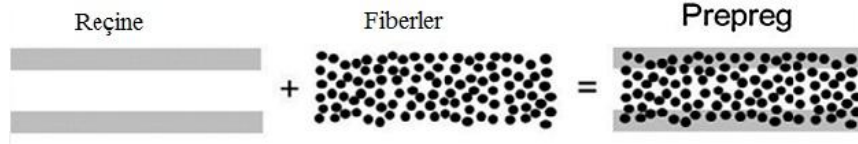
2. MATERYAL ve METOT

Bu tezin konusu havacılık, uzay ve otomotiv endüstrisinde kullanılan yapıştırıcı ile birleştirilmiş kompozit bağlantıların mekanik özelliklerinin deneysel ve sayısal yöntemlerle araştırılmasıdır. Kompozit malzemeler geleneksel malzemelere göre üstün mukavemet ve performans özellikleri göstermektedir. Ayrıca üretim ve tasarım kolaylığı sayesinde teknolojilerin araştırma ve geliştirilmesi için büyük önem taşımaktadır. Kompozit malzemeler Bilim ve Teknoloji Kurulu'nun 2005/4 Ek 1' de yer alan "Öncelikli Alanlar" kapsamında yer almaktadır.

Bu tezin amacı, çekme yüküne maruz farklı bindirme açılarında ve farklı kalınlıklarda malzemeler kullanarak, elde edilen zigzag tip bindirme bağlantı konfigürasyonlarının mekanik davranışlarını deneysel ve sayısal olarak incelemektir. Bindirme açısının bağlantının hasar yüküne etkisini deneysel olarak incelemek için dört farklı tip ($30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$) bindirme açı değeri, cam elyaf tabakalara ait üç farklı tip fiber oryantasyon açısı ($0^\circ/90^\circ, \pm 45^\circ, 0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ$), gevrek ve sünek tip yapıştırıcı kullanılarak her bir bağlantı tipinden otuz iki adet bağlantı numunesi tasarlanmış ve üretilmiştir. Deney sonuçlarının hassasiyeti için aynı bağlantı tipinden üçer adet numune üretilip deney tekrarı yapılmıştır. Malzeme kalınlığının bağlantının hasar yüküne etkisini incelemek içinse; üç farklı kalınlığa sahip (3 mm, 5 mm, 7 mm) numuneler hazırlanmış ve üretilmiştir. Daha sonra deneysel ve sayısal analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

2.1. Yapıştırılan Malzeme

Cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler, Odak Kompozit Teknolojileri A.Ş. tarafından prepreg (ön reçine emdirilmiş ıslak elyaf) kullanılarak üretilmiştir (Şekil 2.1). Prepreg (pre-impregnated) reçine emdirilmiş kompozit kumaşlar için kullanılan bir terimdir. Prepreglerin teknik özellikleri Tablo 2.1'de gösterilmiştir. Numunelerin geometrik ölçüleri Tablo 2.6 da ve numunelerin geometrik şekli ise Şekil 2.9 da gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Prepreg (ön reçine emdirilmiş ıslak elyaf)

Tablo 2.1. Prepreg teknik özellikleri (GE 8903-280-37S)

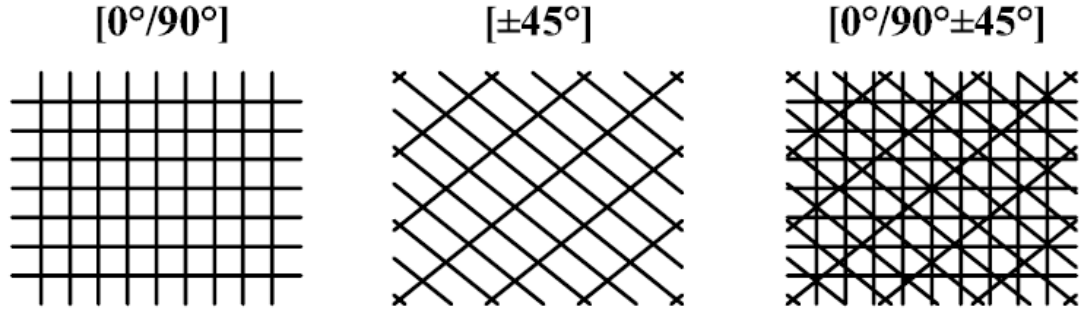
Prepreg çeşidi	Örgülü twill 2/2
Reçine	Epoksi
Fiber çeşidi	çözücü: 7,0/cm cam fiber (204 tex) atkı: 6,5/cm cam fiber (204 tex)
Fiber ağırlığı	280 g/m ²
Prepreg ağırlığı	444 g/m ²
Reçine içeriği	37 % +- 3 %
Genişlik	100 cm
Rulo uzunluğu	100 m
Tabaka kalınlığı	0,20 mm

Prepreg sistemde takviye malzemesi olarak 280 gr/m² birim ağırlığında örgülü twill E201 camları kullanılmıştır. Matris malzemesi olarak da epoksi malzeme kullanılmıştır. Plaka kesimlerinde keskin köşelerde minimum 2 mm radyüs olacak şekilde kesim işlemi yapılmıştır. Bindirme açıları Odak Kompozit Teknolojileri A.Ş. tarafından CNC freze tezgahında elmas uçlu kalemle işlenerek numuneler nihai şeklini almıştır.



Şekil 2.2. Üretilen numuneler

Malzemeler Odak Kompozit Teknolojileri A.Ş. tarafından $[0^\circ/90^\circ]$, $[\pm 45^\circ]$ ve $[0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ]$ olmak üzere üç farklı elyaf yönlenmesinde; 13 kat (3 mm), 21kat (5 mm) ve 30 kat (7 mm) tabakalı plakalar şeklinde üretilmiştir.



Şekil 2.3. Kompozitlerin elyaf yönlenmeleri

Bu malzemeler Sgl Grup firmasının orijinal seri numaralı cam takviyeli epoksi prepreg (ön reçine emdirilmiş ıslak elyaf) kompozit malzemeleridir. Reçine, ağırlıkça 1000 g/m² ye kadar olan kumaşların tüm takviye malzemeleri için kullanılabilir. Reçine içeriği yapım ve proses işlemlerinin ihtiyacına göre %30 dan %50'ye kadar esnek tutulabilmektedir.

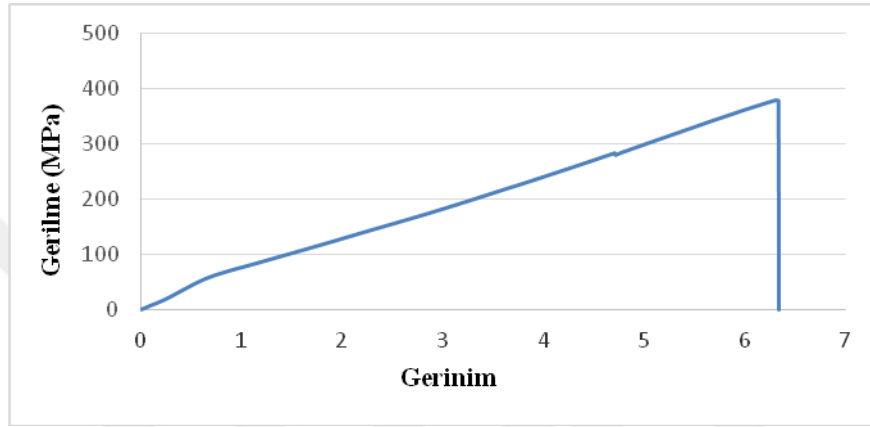
Kompozitlerin mekanik özellikleri Dokuz Eylül Üniversitesi Kompozit Araştırma ve Test Laboratuvarında, Shimadzu marka AG-X model çekme test cihazı ile belirlenmiştir. Çekme cihazı 100 kN kapasiteye sahip olup cihaza entegre video extensometer ile daha doğru sonuçlar elde edilmektedir. Çekme testleri ASTM D3039-76 standardına göre yapılmıştır. Fiber takviye doğrultusunda ve fibere dik doğrultuda hazırlanmış test numuneleri kullanılmıştır.

Tablo 2.2. Cam elyaf kompozit malzemenin mekanik özellikleri

E_1	E_2	ν_{12}	G_{12}	X_C
MPa	MPa	—	MPa	MPa
28.250	28.250	0,13	3.400	379,232

Üretilen kompozit malzemenin mekanik özelliklerinin (E_1 , E_2 , G_{12} , ν_{12} , X_C) bulunması için öncelikle düz bir parça kompozit tabaka alınarak asal eksenlerinden biri yükleme yönüne denk gelecek şekilde üzerine iki adet gerinim ölçer tutturulmuştur. Gerinim

ölçerlerden biri asal eksen yönünde diğeri ise ona dik yönde yerleştirilmiştir. Daha sonra deney numunesi 100 kN kapasiteli Shimadzu çekme test cihazına bağlanarak kırılma noktasına kadar 0,5 mm/dk çekme hızında yüklemeye tabi tutulmuştur. Her adımda Vishay dijital gösterge ile ölçülen ε_1 ve ε_2 uzama değerleri Tablo 2.2’de verilen poisson oranının (ν_{12}) saptanmasında kullanılmıştır. Maksimum gerilme yani çekme dayanımı uygulanan en büyük kuvvetin deney numunesinin kesit alanına bölünmesi ile elde edilmiştir.



Şekil 2.4. Kompozit malzeme gerilme-gerinim grafiği

Kayma modülü G_{12} ‘nin bulunması için, 45^0 lik fiber açılı numuneler deney numunesi üzerine konulan gerinim ölçer vasıtasıyla, kırılma değerine kadar adım adım artarak yüklenen deney numunesi üzerinden çizilen gerilme-şekil değiştirme grafiği üzerinden hesaplanan E_x elastisite modülü değerlerinden yararlanılarak (2.1) denklemiyle hesaplanmıştır [53].

$$G_{12} = \frac{1}{\left(\frac{4}{E_x}\right) - \left(\frac{1}{E_1}\right) - \left(\frac{1}{E_2}\right) + \left(\frac{2\nu_{21}}{E_1}\right)} \quad (2.1)$$

Deney numunelerinin birbirine dik yönlerinde aynı mukavemet değerini elde etmek amacıyla çift yönlü twill dokuma tipi tercih edilmiştir. Deney numunelerinde 0,20 mm tabaka kalınlıklı, 280 g/m²’lik Sigratex E 201 camı $[0^0/90^0]$ ve $[\pm 45^0]$ fiber açılı kumaşlar kullanılmıştır.

Tablo 2.3. Kompozit malzemenin fiber açıları

[illegible]

2.2. Yapıştırıcılar

Sıvı veya film yapıştırıcılar yapıştırma işleminde kullanılabilir. Yapısal yapıştırma bağlantılarında sıvı yapıştırıcılar çok daha sık kullanılırlar. Uniform gerilme dağılımı, iyi ve düzgün boşluk doldurma ile yüksek bağlantı dayanımı gibi avantajlara sahiptirler. Fakat sıvı yapıştırıcıların uygulanmasında bazı zorluklar da vardır. Film yapıştırıcılar, yapıştırma bağlantılarında sabit ve düzgün bir yapışma tabakası oluşturduğundan çok daha iyi tutunma özelliğine sahiptirler.

Bu çalışmada gevrek (ATLAC580) ve sünek (DP460) olmak üzere iki farklı tip sıvı yapıştırıcı kullanılmış ve bu yapıştırıcıların kürleşme şartları Tablo 2.4’de verilmiştir.

3M™ DP460; epoksi (B) ve hızlandırıcı (A) nın hacimce B:A=2:1 oranında karışımıyla oluşan sıvı yapıştırıcıdır. Metal, seramik, cam ve birçok kompozit malzemenin birleştirilmesinde kullanılır.

ATLAC 580; ısıya dayanıklı ve esneklik özelliği olan düşük viskoziteli epoksi bazlı bir vinilester reçinedir. Fabrikasyon metotlarında sarma ve püskürtmede de kullanılabilir. Asit ve tuzlu solüsyonlara karşı dayanıklıdır ve mükemmel yapışma özelliklerine sahiptir. Atlac 580'nin, hacimce 0.5% NL63-10P hızlandırıcı ve 1.5% Butanox M-50 sertleştirici karışımıyla kürleşmesi sağlanmaktadır.

Tablo 2.4. Deneyde kullanılan yapısal yapıştırıcılar

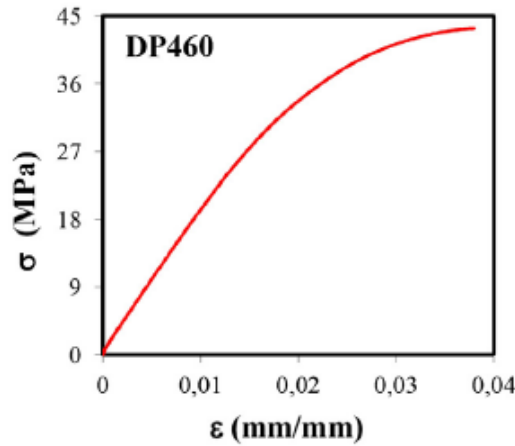
Yapıştırıcı	Bileşen	Kürleşme sıcaklığı ve zaman	Cins
3M™ DP 460	Epoksi/ Hızlandırıcı	120°C/60 dk.	Sıvı
Vinylester ATLAC 580	Epoksi/ Hızlandırıcı+Sertleştirici	100°C/180 dk.	Sıvı

Çalışmada kullanılan DP 460 yapısal yapıştırıcısının mekanik özellikleri ve gerilme-şekil değiştirme diyagramı Akpınar'ın [94] doktora çalışmasından alınmıştır. Tablo 2.5 ve Şekil 2.5'de verilmiştir.

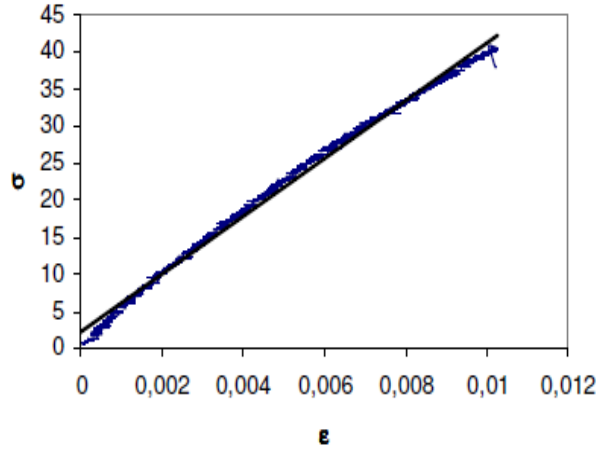
Çalışmada kullanılan ATLAC 580 yapıştırıcısının mekanik özellikleri ve gerilme-şekil değiştirme diyagramı Adin'in [84] doktora çalışmasından alınmıştır. Tablo 2.5 ve Şekil 2.6'da verilmiştir.

Tablo 2.5. Yapıştırıcıların mekanik özellikleri

	DP 460 [94]	ATLAC [84]
Elastisite Modülü (E) (MPa)	2077,10	442,46
Poisson Oranı (ν) (-)	0,38	0,37
Çekme Dayanımı (σ) (MPa)	44,615	40,618



Şekil 2.5. DP-460 için gerilme-şekil değiştirme grafiği [94].



Şekil 2.6. ATLAC-580 için gerilme-şekil değiştirme grafiği [84].

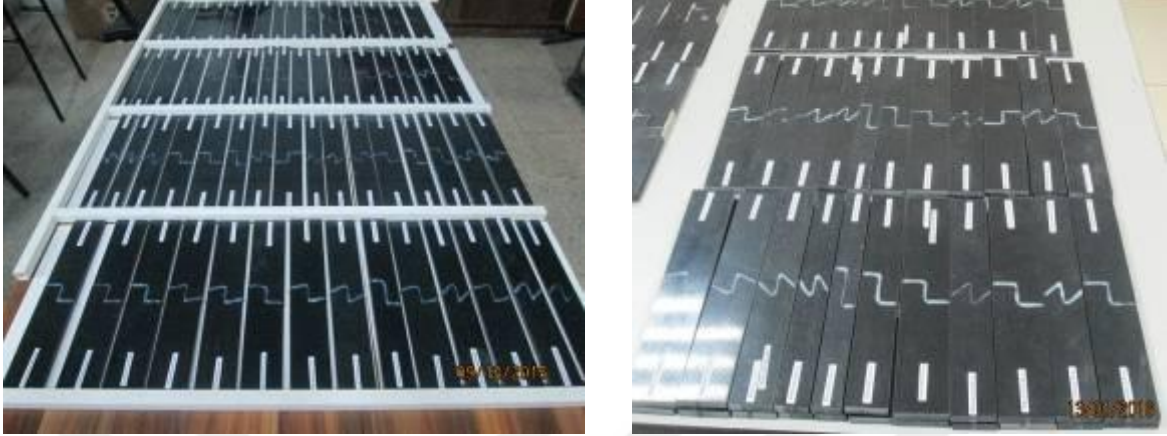
Yapıştırma bağlantılarının yüksek dayanım sergileyebilmesi yapıştırılacak yüzey hazırlama yöntemlerine bağlıdır. İstenilen boyutlara getirilmiş numuneler, üzerinden yağ, kir ve toz gibi yapışma olayını engelleyecek yabancı maddelerden temizlenmesi için önce saf suyla yıkanmış sonra tüy bırakmayan özel mikrofiber bezlerle silinmiştir. Daha sonra saf alkolle yapıştırılacak yüzeyler yıkanmış ve yüzeylerden alkol tamamıyla buharlaşmaya kadar bekletilmiştir.

Yapıştırılan malzemelerde yapıştırıcı kalınlığının ayarlanabilmesi iyi tasarlanmış bir kalıbın kullanımını gerektirmektedir. Bunun için numune boyunun 250,20 mm olacak şekilde sabit kalması için çalışmamızda kullanılmak üzere Şekil 2.7’de gösterilen 0.20 mm kalınlığındaki sac malzemeden parçalar kesilerek Şekil 2.7 de gösterilen kalıp içerisine yerleştirilecek şekilde yapıştırıcı kalınlığı sabit tutulmuştur.



Şekil 2.7. Kalıp şekli ve 0.20 mm lik sac numune

DP460 ve ATLAC580 yapıştırıcıları, yüzeye uygulanırken bindirme bölgelerine bir master yardımıyla sürülmüştür.



Şekil 2.8. Numunelerin yapıştırılması

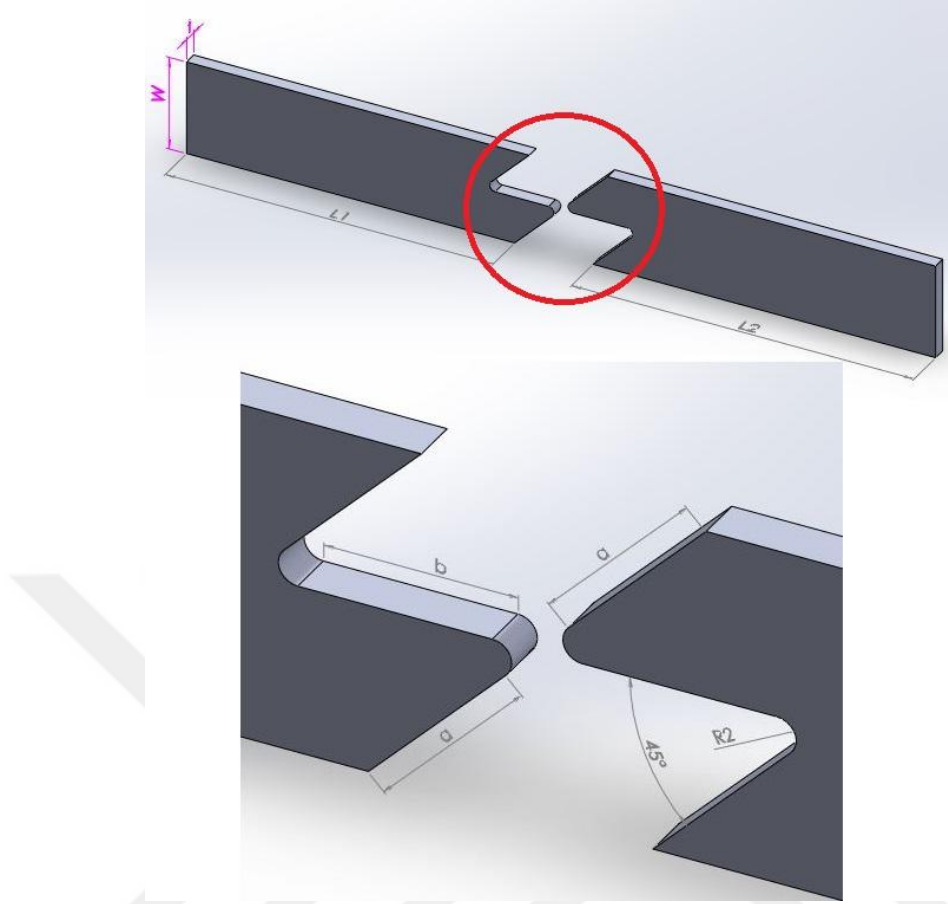
2.3. Numunelerin Teknik Özellikleri

Deneylerde kullanılan tüm numuneler, üretilen kompozit plakalardan CNC freze cihazında ASTM standartlarına uygun ve istenilen geometrik ölçülerde kesilmiştir. Her bir test numunesinin boyu 250 mm dir. Numunelerin her iki kenarından 25 mm lik kısım deney test cihazına sabitlenmesi için çene payı olarak bırakılmıştır.

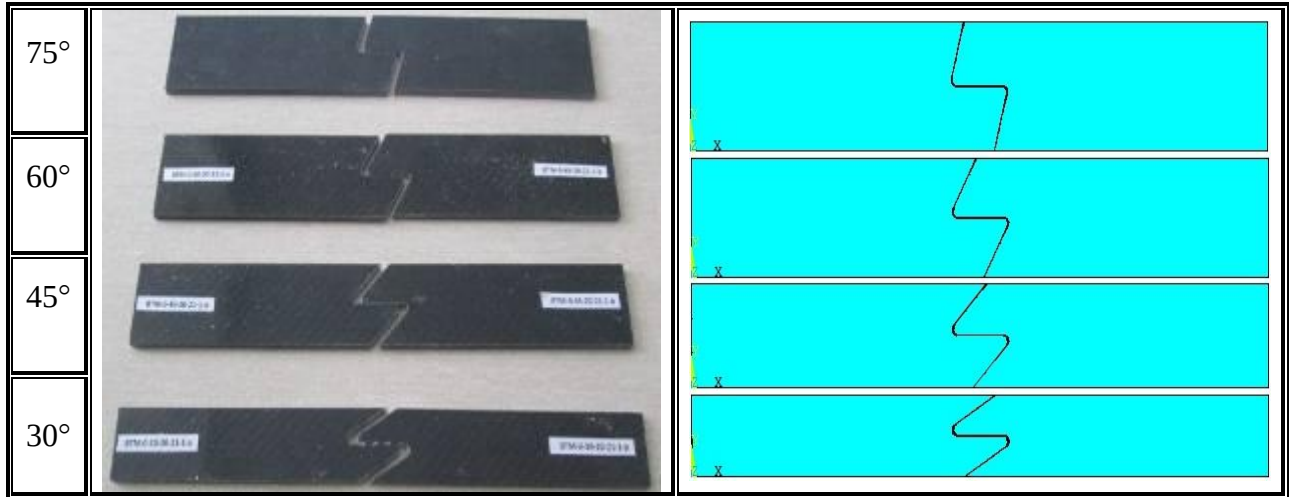
Tablo 2.6. Numunelerin geometrik ölçüleri

Fiber Takviye Açısı (°)	Kalınlık (t) mm	Açı (°) (derece)	Genişlik (w) (mm)	Bindirme Mesafesi (a) (mm)	Bindirme Mesafesi (b) (mm)	L1 (mm)	L2 (mm)
[±45°] [0°90°] [0°90°±45°]	3 5 7	30	27,46	20	20	118,68	131,32
		45	35,12	20	20	122,27	127,73
		60	40,64	20	20	126,73	123,27
		75	43,66	20	20	131,75	118,25

Numunelerin 3D çizimleri Şekil 2.9’da görülmektedir. Şekil 2.10’da ise numunelerin orijinal hali ve ANSYS’te modellenmiş hali görülmektedir.



Şekil 2.9. Numunelerin perspektif görünüşü



Şekil 2.10. (30°,45°,60°,75°) bindirme açılı numuneler ve ansys çizimleri

Deneyler Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi'nde bulunan ve Şekil 2.11'de gösterilen bilgisayar kontrollü Zwick/Roell marka Z100 tip 100 kN yük kapasiteli sabit hızlı universal çekme cihazında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.11. Universal çekme cihazı

Alttaki çene sabit üstteki çene ise hareket etmektedir (Şekil 2.12). Önyüklem için 0.10 MPa verilmiştir. Tezde deney cihazının kalibrasyonu yapılmıştır. Ortamın neminin malzeme özelliklerine etki etmediği kabul edilmiştir. Çekme işlemi 1 mm/dk. hızda yapılmıştır.



Şekil 2.12. Numunelerin çekme cihazına sabitlenmesi

2.4. Sayısal Analiz

Yapıştırma bağlantısı analizlerinde, analitik ve sayısal olmak üzere iki esas yaklaşım vardır. Birinci yaklaşımda, sınır şartları belirlenir ve diferansiyel denklemlerden elde edilen bir formülasyon bulunur. Bu çözümlerle yapıştırma bağlantısının herhangi bir noktasındaki gerilme değerleri elde edilir. İkinci yaklaşımda ise diferansiyel denklemlerin çözümleri sayısal yöntemlerle elde edilir. Her iki yöntemde de yapıştırma bağlantısında oluşan elastik ve elasto-plastik davranış dikkate alınarak çeşitli analizler yapılabilir [85].

Sonlu elemanlar analizinde yapıştırma bağlantılarını elemanlara ayırma işlemi çok önemlidir. Çalışmada bindirme açısının, fiber oryantasyon açısının, malzeme kalınlığının ve yapıştırıcı cinsinin etkisi incelendiğinden, kullanılan eleman boyutlarının bu parametrelerden etkilenmemesi için tüm modellerde mümkün olduğunca aynı boyutlara sahip elemanlar kullanılmıştır. Lineer olmayan sonlu elemanlar analizlerinde, bulk numunelerinin tek eksenli çekme deneylerinden elde edilmiş olan gerilme-şekil değiştirme davranışları dikkate alınmıştır. Yapıştırıcı tabakası ve yapıştırılan malzemelerde oluşan eş değer gerilmelerin hesaplanması için denklem (2.2)'de verilen von-Mises akma kriteri kullanılmıştır.

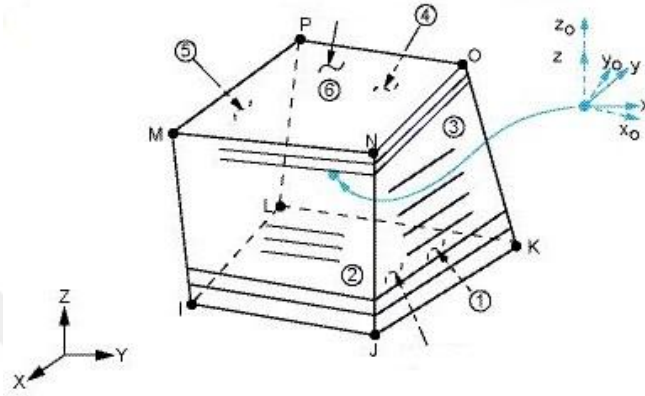
$$\sigma_{eqv} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + 3\tau_{xy}^2} \quad (2.2)$$

Sonlu elemanlar metodunda problemin çözümünde eleman tipi önemlidir. Modelin cinsine göre düz, üçgen, dörtgen, yamuk gibi çeşitli elemanlar kullanılabilir. Çünkü eleman tipi yapılabilecek hatanın büyüklüğünde etkilidir. Ayrıca seçilen eleman tipinde düğüm sayısı da önemlidir. Eleman sayısı arttıkça çözüme olan yaklaşım daha çok artmaktadır. Bu nedenle eleman sayısı mümkünse yüksek tutulmalıdır. Bunun için çalışmamızda düğüm sayısı 20.970 ve eleman sayısı da 15.976 olarak belirlenmiştir.

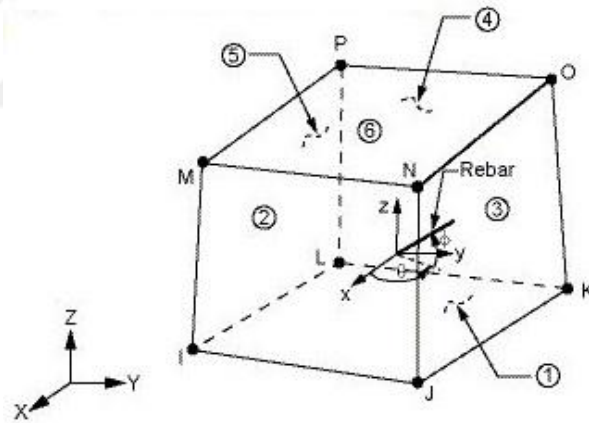
Eleman sayısı ile birlikte eleman sıklığı da çok önemlidir. Modelin tamamından ziyade bir bölümünün incelenmesi daha önemli olmaktadır. Bunun için ilgili bölgede elemanlar daha sık tutularak modelin diğer bölümleri daha geniş tutulabilir (Şekil 2.15).

Kompozit malzeme için üç serbestlik derecesi ve 8 düğüm noktasına sahip üç boyutlu dikdörtgen prizması olan tabakalı Solid185 elemanı kullanılarak analiz yapılmıştır.

Yapıştırıcı malzeme için üç serbestlik derecesi ve 8 düğüm noktasına sahip üç boyutlu dikdörtgen prizması olan Solid65 elemanı kullanılarak analiz yapılmıştır (Şekil 2.13-2.14). Yapıştırma işleminin gerçekleştirildiği alanda gerilme dağılımlarının hassasiyeti için kritik bölge çok küçük elemanlara bölünmüştür.



Şekil 2.13. Sonlu eleman modelinde düğüm noktaları ve elemanları (Solid 185).



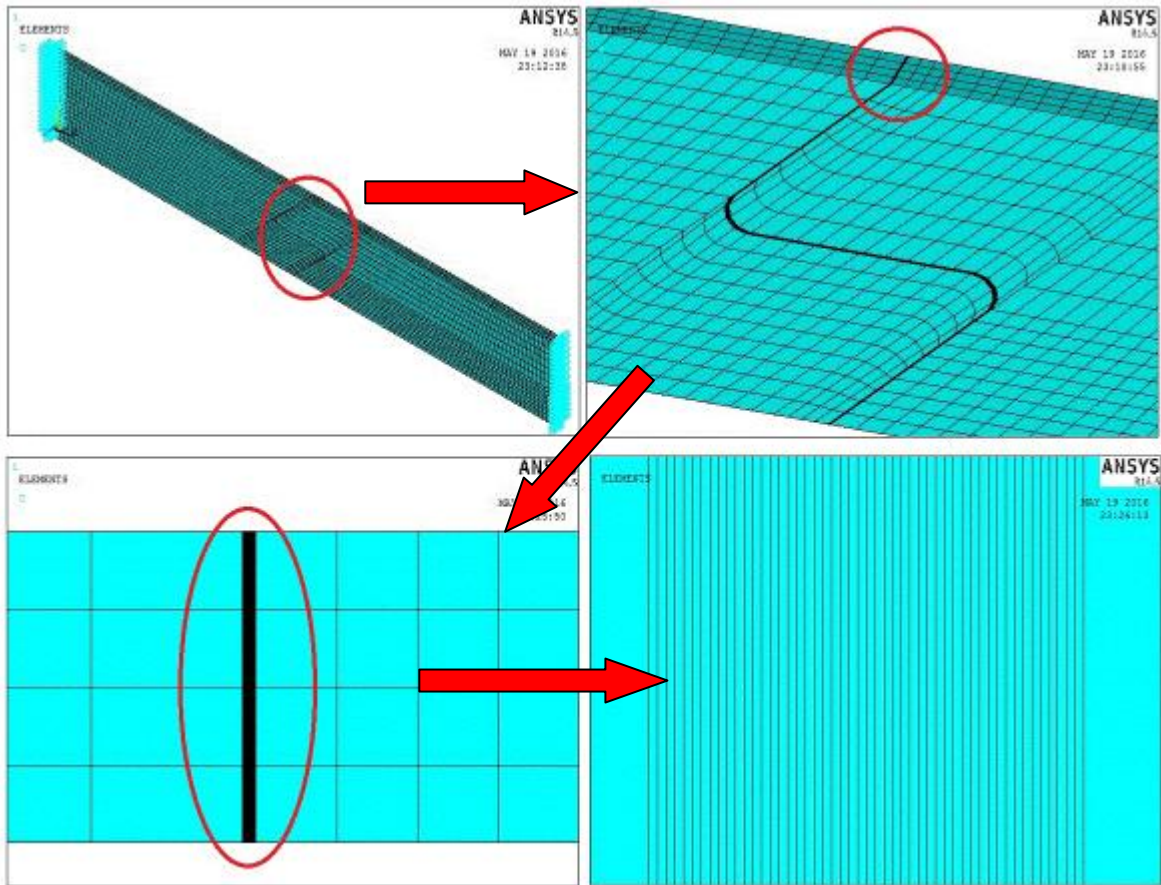
Şekil 2.14. Sonlu eleman modelinde düğüm noktaları ve elemanları (Solid 65).

Numunelerin elastik ve elasto-plastik gerilme analizleri, sonlu elemanlar paket programı ANSYS 14.5 kullanılarak yapılmıştır. Numuneler kompozit ve tabakalı bir malzeme olduğu için ANSYS'te üç boyutlu olarak modellenmiştir. Analizde kullanılan model boyutları ve yükleme şartları deneysel çalışmalarda kullanılan parametrelerle aynı olarak girilmiştir (Şekil 2.15).

Modeller oluşturulduktan sonra, numune sonlu elemanlara bölünerek sınır şartları uygulanmış ve çözüm gerçekleştirilmiştir. Sınır şartları, ankastre taraf için x, y ve z

yönünde çekme olmadığı kabul edilerek yani $U_x=0$, $U_y=0$ ve $U_z=0$; kuvvet uygulanan tarafta ise sadece x yönünde çekme olduğu kabul edilerek $U_x \neq 0$, $U_y=0$ ve $U_z=0$ olarak programa girilmiştir. ANSYS'te oluşturulan modelin sonlu eleman model yapısı ve sınır şartları Şekil 2.15'de görüldüğü gibidir.

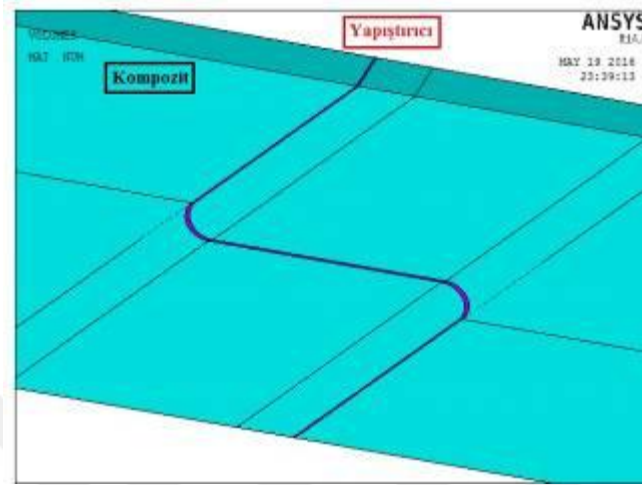
Gerilme hatları belirlenerek σ_x , σ_y , σ_z , τ_{xy} , σ_{eqv} gerilme dağılımları incelenmiştir. Kritik hassasiyet gerektiren bölgelerde oluşturulan düzgün ve ince ağ yapısı Şekil 2.15'de gösterildiği gibidir.



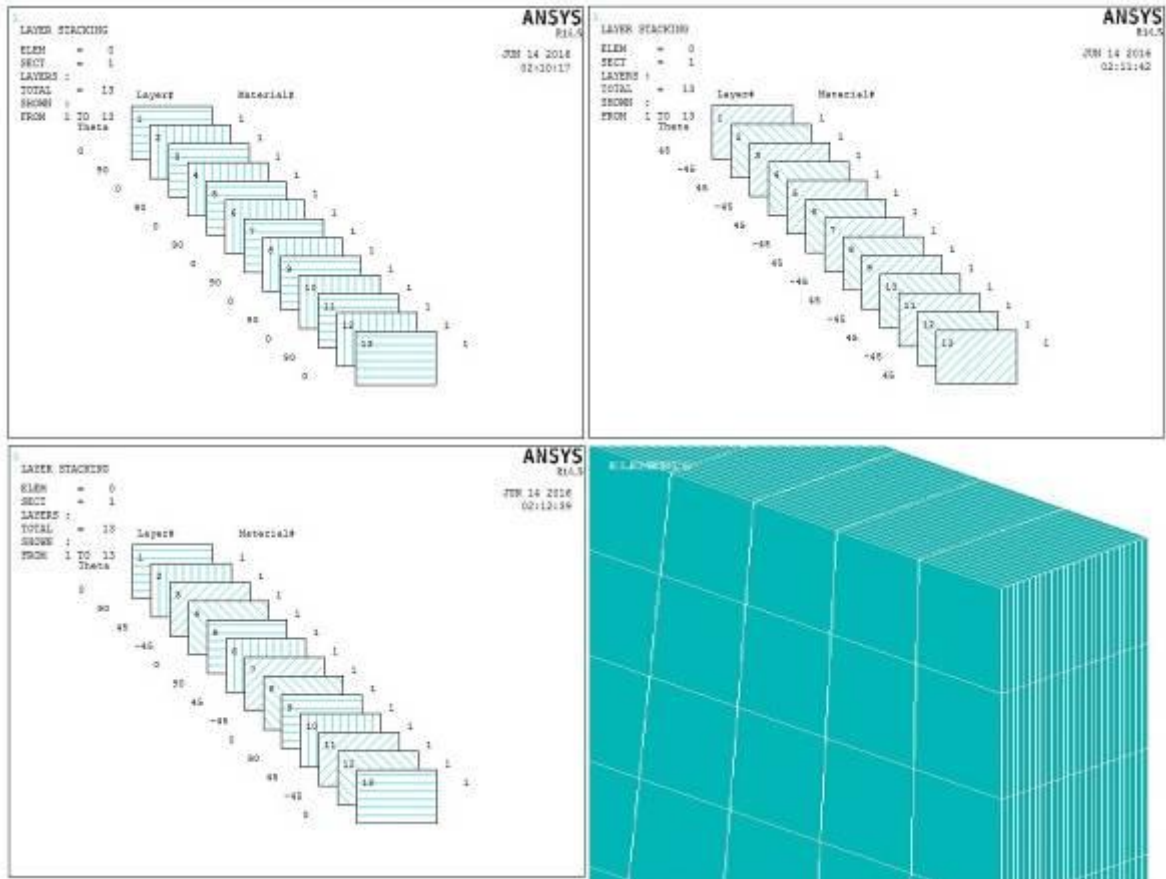
Şekil 2.15. Numunelerin sonlu elemanlara bölünmüş hali

Deneyisel çalışmalarda kullanılan numunelerin bire bir modelleri Tablo 2.6 da verilen geometrik ölçülere göre oluşturulmuştur. Deneyisel çalışmalar sonucunda Tablo 2.2 ve Tablo 2.5'de verilen kompozit malzeme ve yapıştırıcı malzemelerin mekanik özellikleri programa girilmiştir.

Kompozit malzeme ve yapıştırıcı üç boyutlu sayısal katı modelde gösterilmiştir. (Şekil 2.16). Tablo 2.3’de verilen $[0^\circ/90^\circ]$, $[\pm 45^\circ]$ ve $[0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ]$ tabaka oryantasyonları sonlu eleman analizleri için Şekil 2.17’de gösterildiği gibi modellenmiştir.



Şekil 2.16. Numunelerin üç boyutlu sayısal katı modeli



Şekil 2.17. Kompozit malzemedeki tabaka oryantasyonları

3. BULGULAR

Cam takviyeli epoksi prepreg (ön reçine emdirilmiş ıslak elyaf) kompozit malzemeden üretilen test plakaları, Tablo 2.6'da verilen geometrik ölçülerde elmas uçlu kesici kullanarak CNC dik işleme merkezi ile hassas bir şekilde kesilmiştir. Plaka kesimlerinde keskin köşelerde minimum 2 mm radyüs olacak şekilde işlem yapılmıştır. Çünkü keskin köşelerde gerilme yığılması olduğundan tasarımda buna dikkat edilmelidir. Her bir test numunesinin boyu 250 mm dir. Numunelerin her iki kenarından 25 mm lik kısım test cihazına sabitlenmesi için çene payı olarak ayarlanmıştır. Ayrıca yüzey pürüzlülüğü minimum ve boyut hassasiyeti maksimum seviyede tutulmuştur.

Prepregler ortalama 3 mm, 5 mm ve 7 mm kalınlığına sahip olup test kuponların kalınlık toleransları $\pm 0,25$ mm; diğer ölçü toleransları $\pm 0,1$ mm olacak şekilde üretilmiştir. Prepreglerin serim açıları $[0^\circ/90^\circ]$, $[\pm 45^\circ]$ ve $[0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ]$ olmak üzere üç farklı şekilde serilmiştir. Bindirme açısı ($30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$) olmak üzere dört farklı tip açı değeri mevcuttur.

Gevrek ve sünek tip olmak üzere iki farklı yapıştırıcı numuneleri birleştirmek üzere yapıştırma bağlantısında kullanılmıştır. DP460 yapıştırıcısı sünek tip malzeme özelliği gösterirken, ATLAC580 yapıştırıcısı gevrek tip malzeme özelliğine sahiptir.

Çekme deneyleri 100 kN yük kapasiteli sabit hızlı test cihazında gerçekleşmiştir. Çekme işlemi 1 mm/dk. hızda yapılmıştır. Ortamın neminin malzeme özelliklerine etki etmediği kabul edilerek deney cihazının kalibrasyonu yapılmıştır.

Çekme testinden elde edilen deneysel sonuçlar ile ANSYS den elde edilen sayısal analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Deneysel ve sayısal sonuçlar incelendiğinde sonuçların uyumlu olduğu görülmektedir. Bu uyum, oluşturulan sonlu eleman modelinin doğruluğunu desteklemektedir.

3.1. Deneysel Sonuçlar

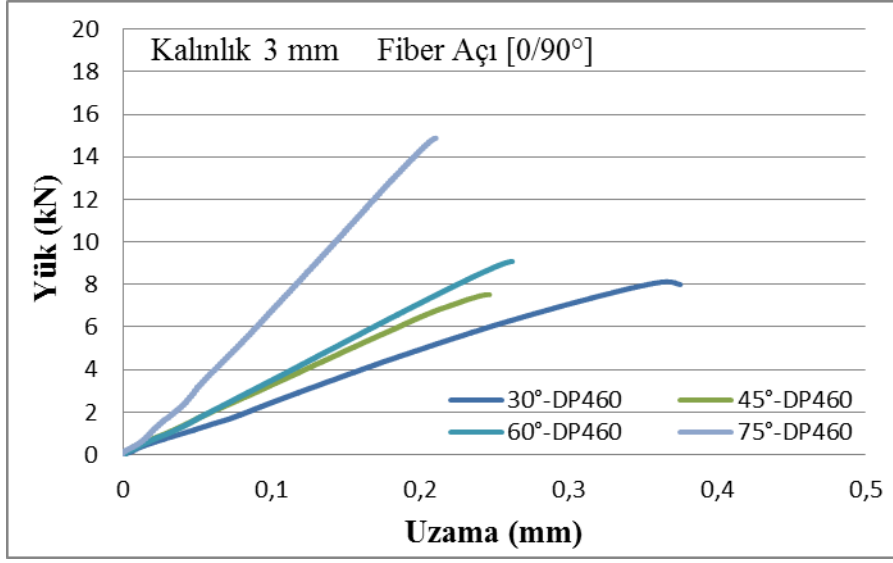
Numunelerin en, boy ve kalınlık değerleri tek tek dijital kumpasla ölçülerek yazılım programında numunelerin birebir modeli oluşturulmuştur. Ayrıca cihaz çene payı dikkate alınarak numunelerin son ölçüleri kaydedilmiştir. Çekme cihazında gerekli güvenlik önlemleri alındıktan sonra çekme işlemi 1 mm/dk. hızda yapılmaya başlanmıştır. Kompozit malzemenin kopma gerilmesi yapıştırıcıların kopma gerilmelerine göre daha yüksek olduğundan; numunelerin yapıştırıcı bölgesinden hasara uğrayacağı beklenmekteydi. Deney esnasında ilk çatlağın yapıştırıcı ara yüzeyinde görülmesi beklentiyi doğrulamıştır. Sünek tip yapışma ile gevrek tip yapışma bağlantısı bazı numunelerde farklı hasar karakteristikleri göstermiştir.

Test numunesi yapıştırıcı bölgesinden tamamen koptuktan sonra deney sonlandırılmıştır. Bindirme bölgesinde oluşan hasar tek tek incelenmiştir. Dp460 ve Atlac580 yapıştırma bağlantılarına ait çekme cihazından okunan deneysel hasar kuvvetleri yapışma alanına bölünerek deneysel gerilmeler hesaplanmıştır. Deney sonucunda kaydedilen hasar yükleri ve hesaplanan gerilmeler düzenlenerek Tablo 3.1’de verilmiştir.

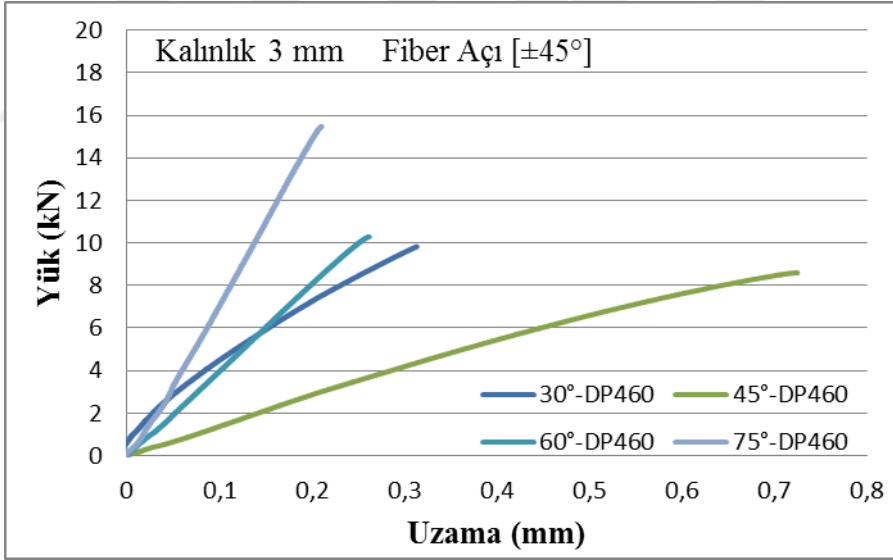
$$\text{Deneysel Gerilme (MPa)} = \frac{\text{Deneysel Hasar Yüğü (N)}}{\text{Yapışma Alanı (mm}^2\text{)}} \quad (2.3)$$

3.1.1. DP460 Yapıştırıcısına Ait Deney Sonuçları

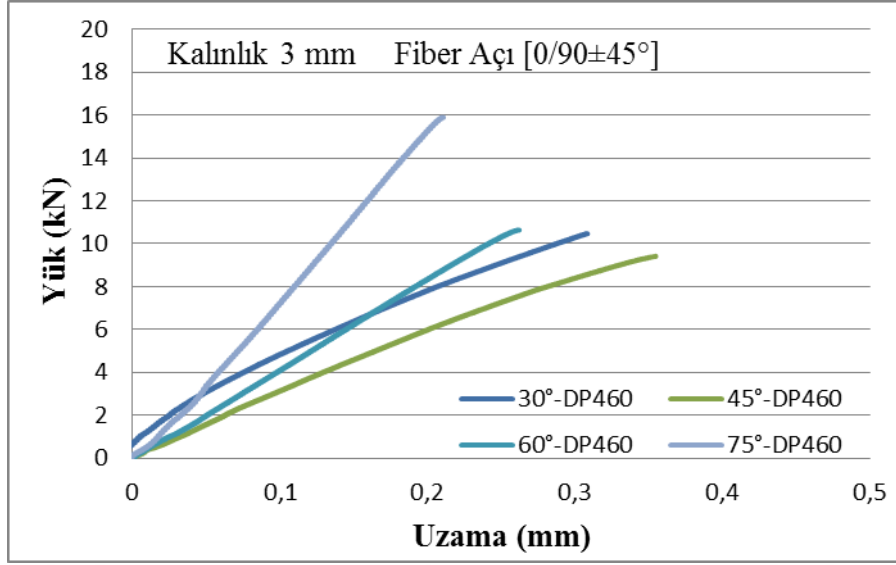
DP460 yapıştırıcısına ait deneylerden elde edilen sonuçlar Şekil 3.1-3.3’de [0/90°], [±45°] ve [0°/90°/±45°] serim açılarında bindirme açılarının değişimine göre sunulmuştur. Şekil 3.4-3.7’de [0/90°] serim açısında 3 mm, 5 mm ve 7 mm kalınlıklarda bindirme açıların değişimine göre sunulmuştur. Ayrıca Şekil 3.7-3.11’de ise 30°, 45°, 60° ve 75° bindirme açılarında farklı serim açıların değişimine göre sunulmuştur.



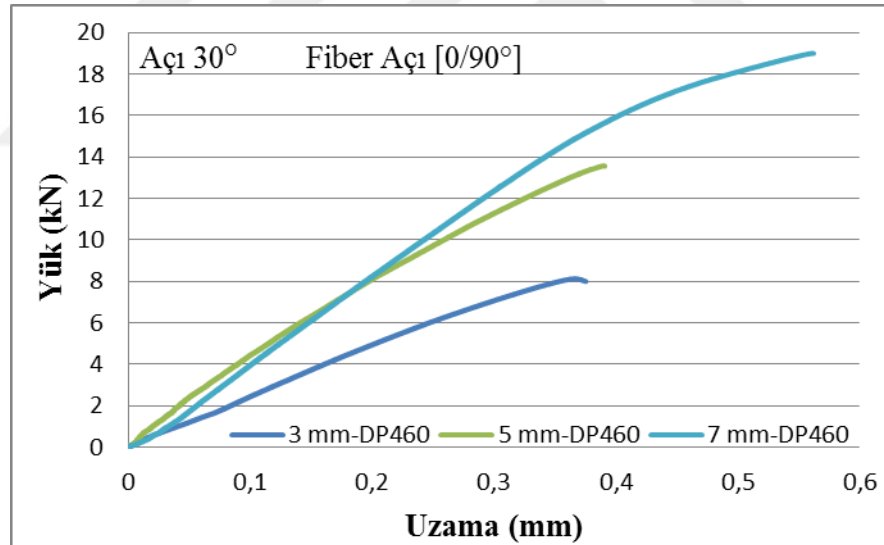
Şekil 3.1. [0/90°] serim açısındaki bindirme açılarının yük - uzama grafiği



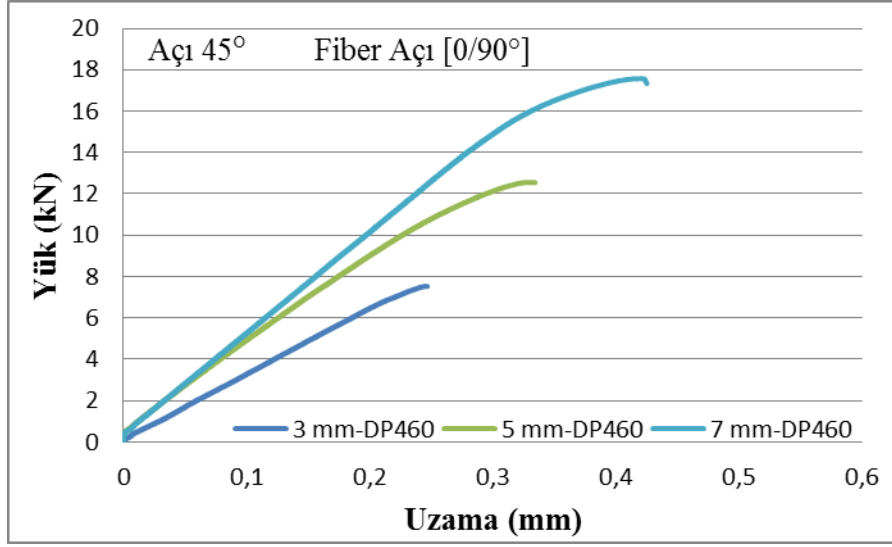
Şekil 3.2. [±45°] serim açısındaki bindirme açılarının yük - uzama grafiği



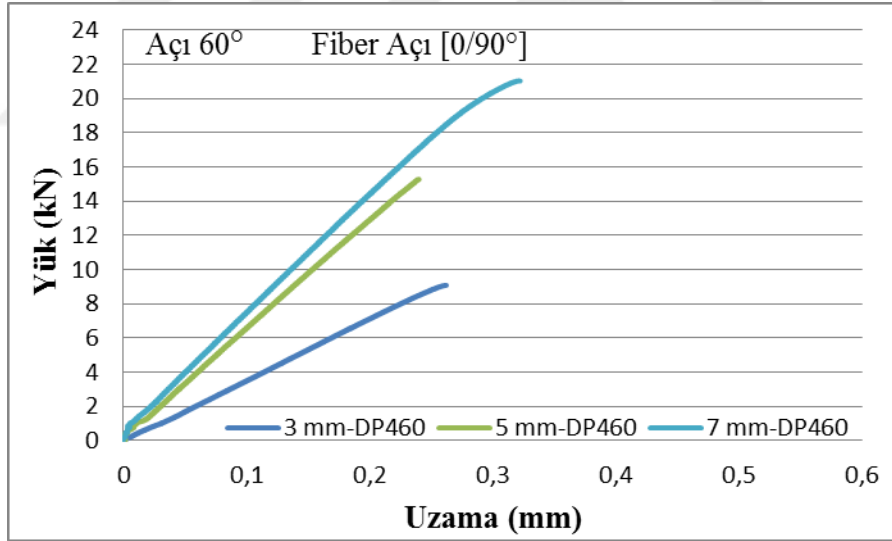
Şekil 3.3. [0°/90°/±45°] serim açısındaki bindirme açılarının yük - uzama grafiği



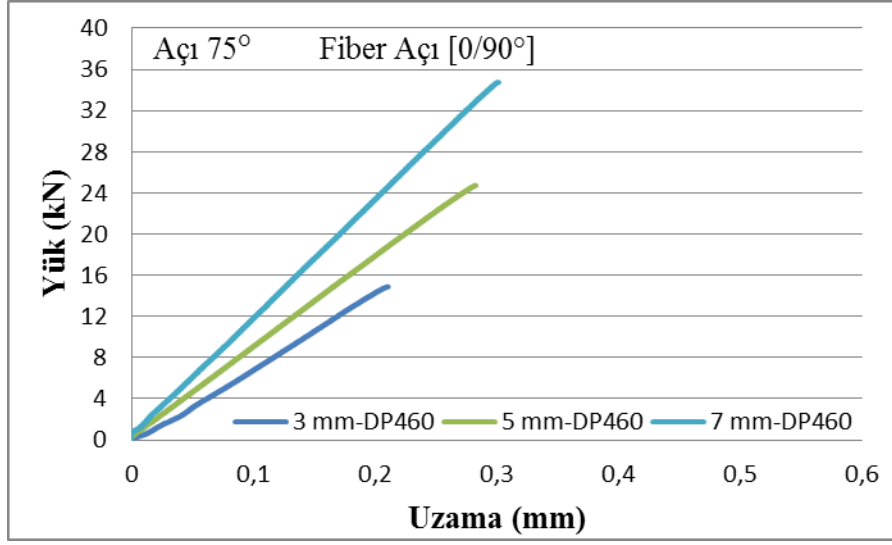
Şekil 3.4. [0/90°] serim açısında bindirme açısı 30° nin yük - uzama grafiği



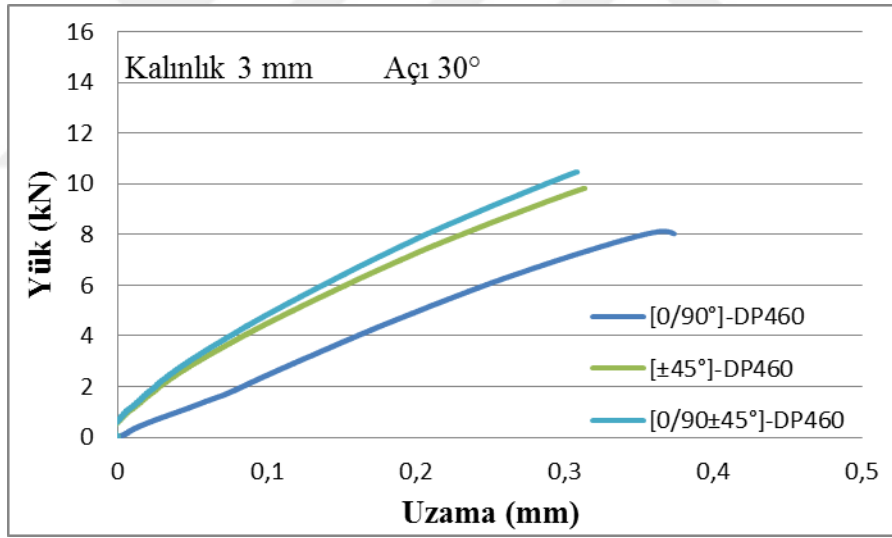
Şekil 3.5. [0/90°] serim açısında bindirme açısı 45° nin yük - uzama grafiği



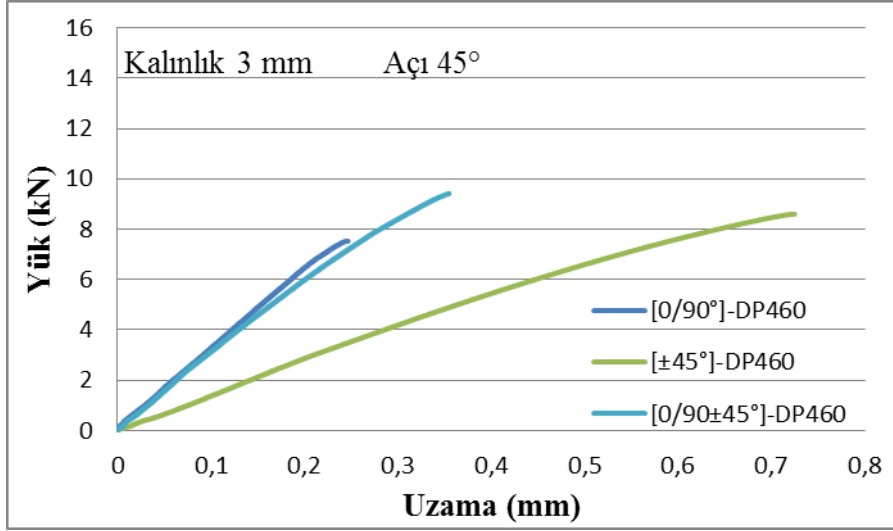
Şekil 3.6. [0/90°] serim açısında bindirme açısı 60° nin yük - uzama grafiği



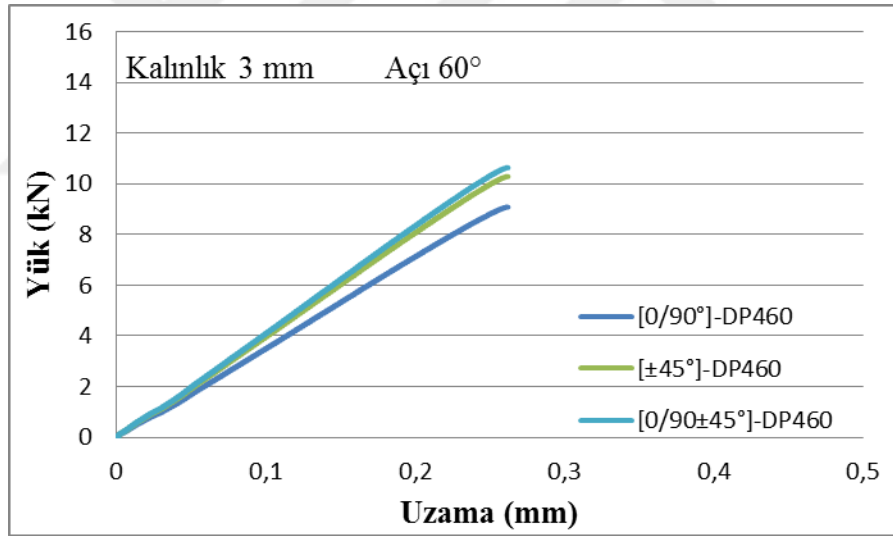
Şekil 3.7. [0/90°] serim açısında bindirme açısı 75° nin yük - uzama grafiği



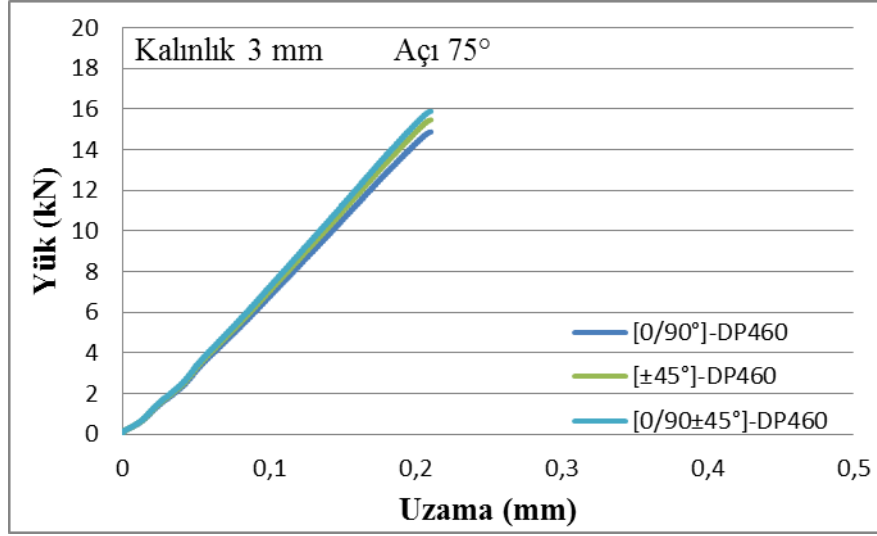
Şekil 3.8. Bindirme açısı 30° nin bütün serim açılarındaki yük - uzama grafiği



Şekil 3.9. Bindirme açısı 45° nin bütün serim açılarındaki yük - uzama grafiği



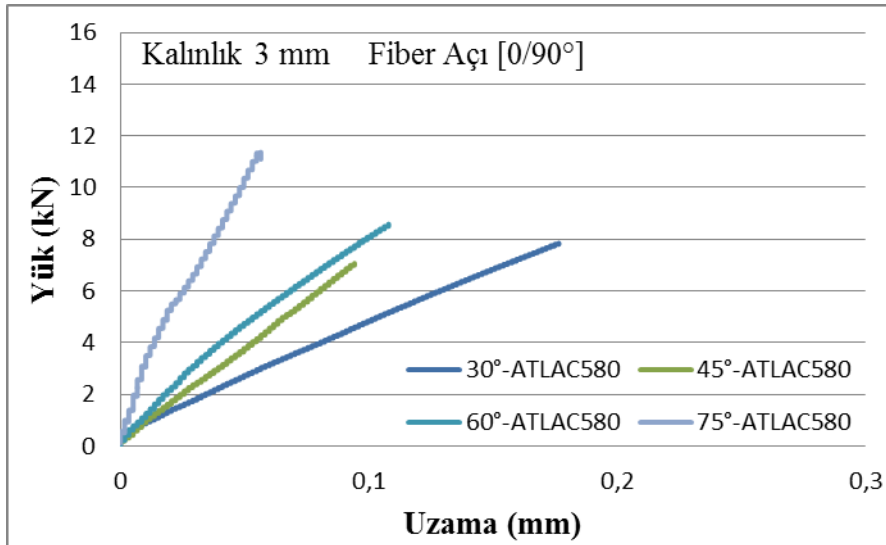
Şekil 3.10. Bindirme açısı 60° nin bütün serim açılarındaki yük - uzama grafiği



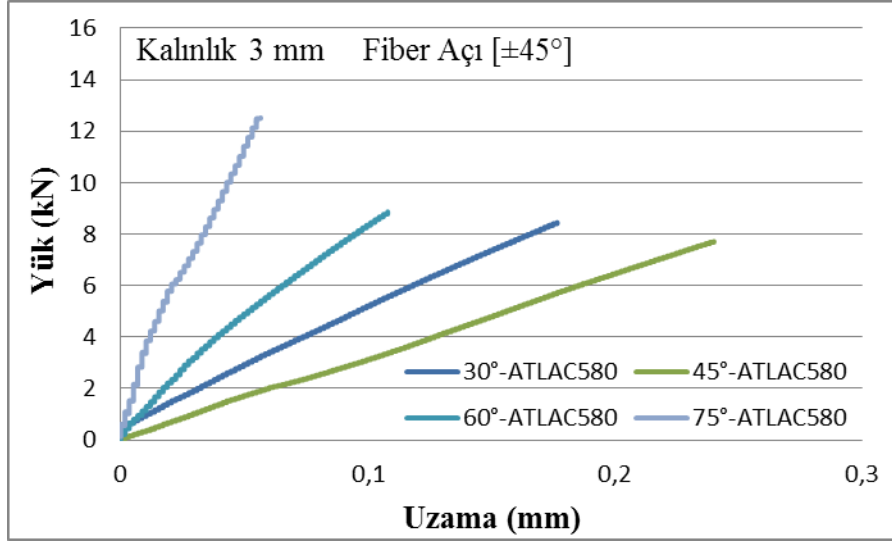
Şekil 3.11. Bindirme açısı 75° nin bütün serim açılarındaki yük - uzama grafiği

3.1.2. ATLAC 580 Yapıştırıcısına Ait Deney Sonuçları

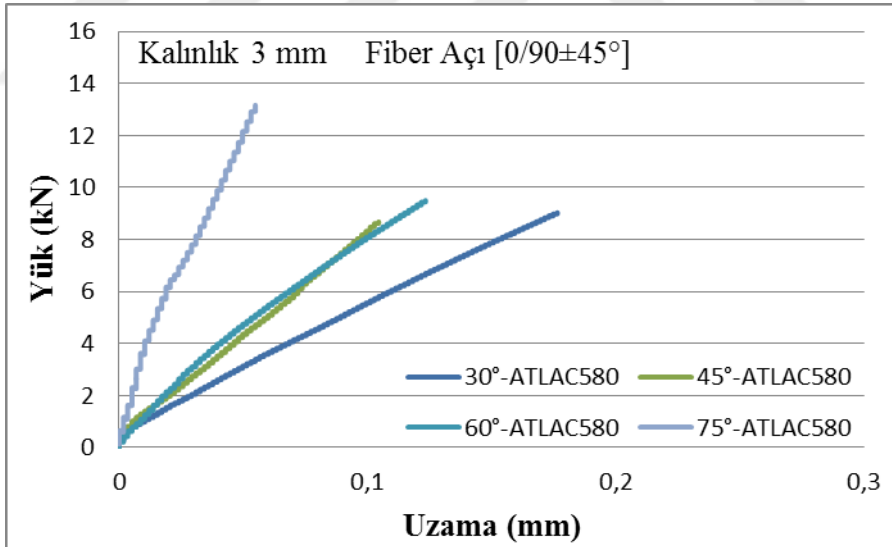
ATLAC580 yapıştırıcısına ait deneylerden elde edilen sonuçlar Şekil 3.12-3.14'de [0/90°], [±45°] ve [0°/90°/±45°] serim açılarındaki bindirme açılarının değişimine göre sunulmuştur. Şekil 3.15-3.18'de [0/90°] serim açısında 3 mm, 5 mm ve 7 mm kalınlıklarda bindirme açılarındaki değişimine göre sunulmuştur. Ayrıca Şekil 3.19-3.22'de ise 30°, 45°, 60° ve 75° bindirme açılarındaki farklı serim açılarındaki değişimine göre sunulmuştur.



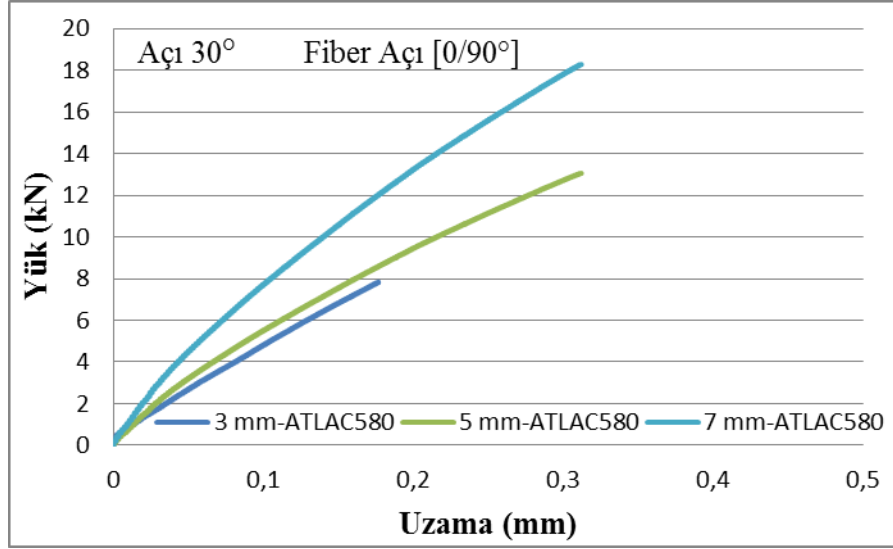
Şekil 3.12. [0/90°] serim açısındaki bindirme açılarındaki yük - uzama grafiği



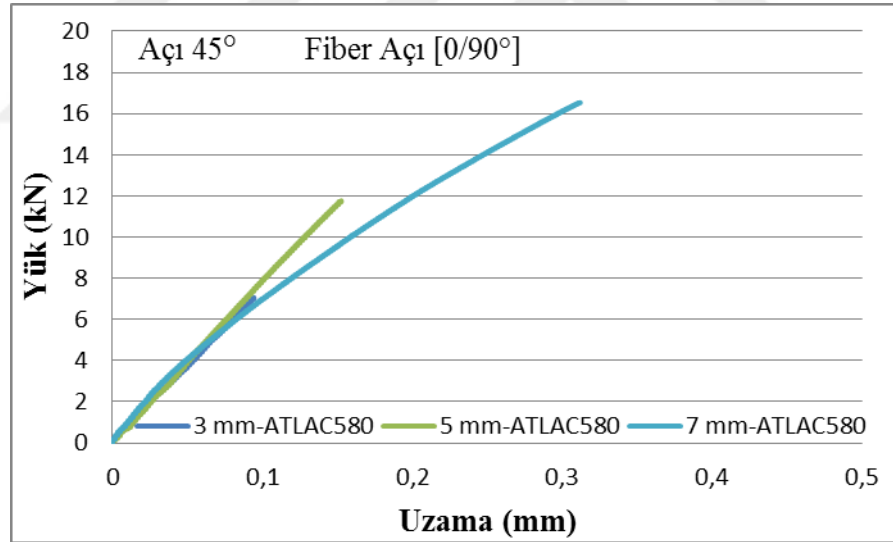
Şekil 3.13. $[\pm 45^\circ]$ serim açısındaki bindirme açılarının yük - uzama grafiği



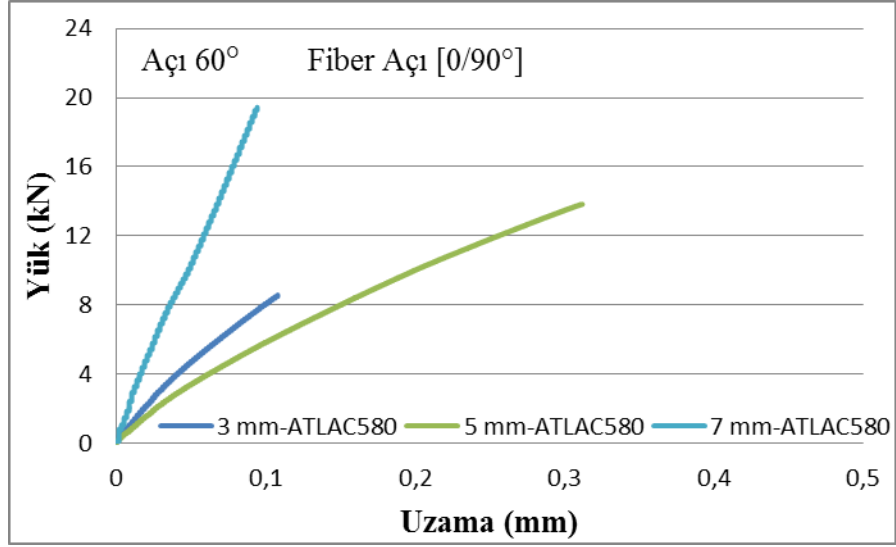
Şekil 3.14. $[0/90 \pm 45^\circ]$ serim açısındaki bindirme açılarının yük - uzama grafiği



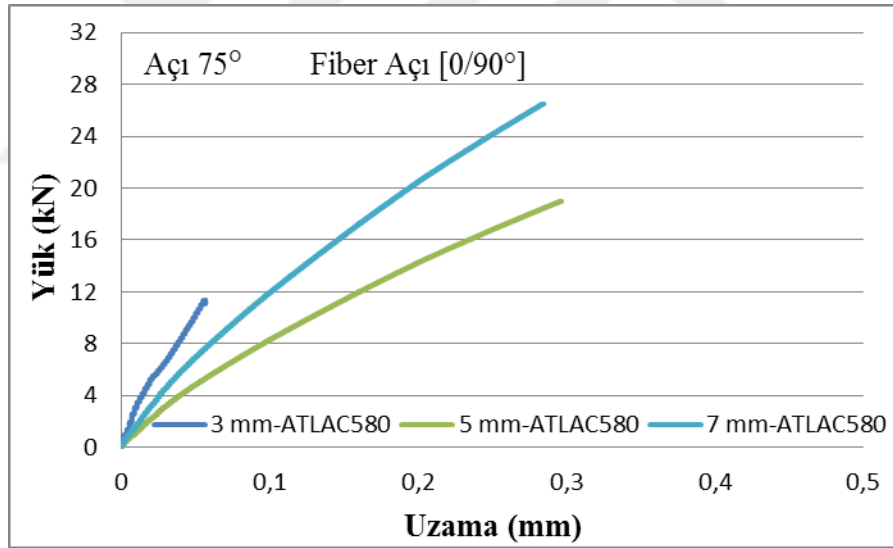
Şekil 3.15. $[0/90^\circ]$ serim açısında bindirme açısı 30° nin yük - uzama grafiği



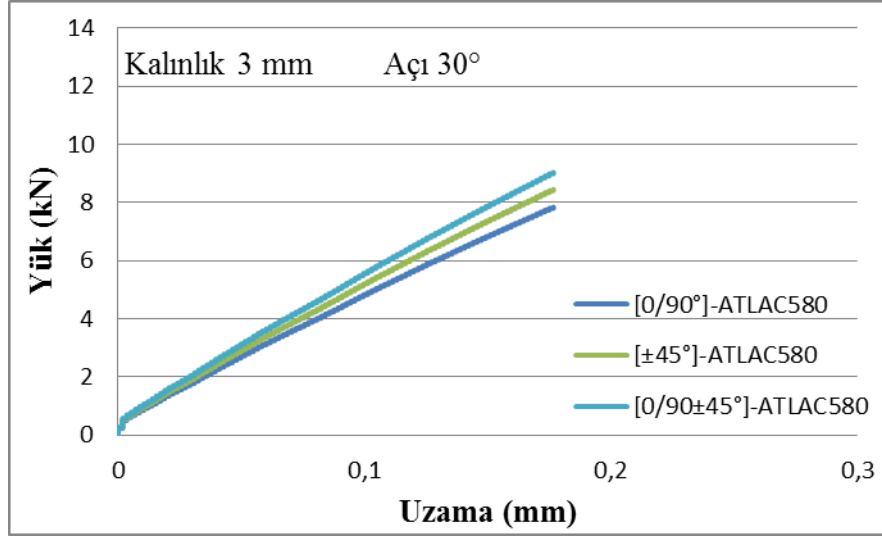
Şekil 3.16. $[0/90^\circ]$ serim açısında bindirme açısı 45° nin yük - uzama grafiği



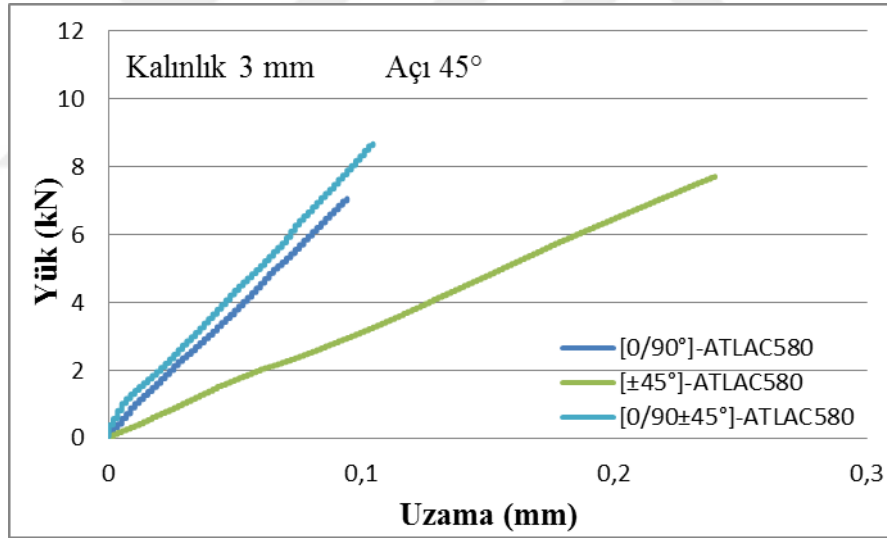
Şekil 3.17. [0/90°] serim açısında bindirme açısı 60° nin yük - uzama grafiği



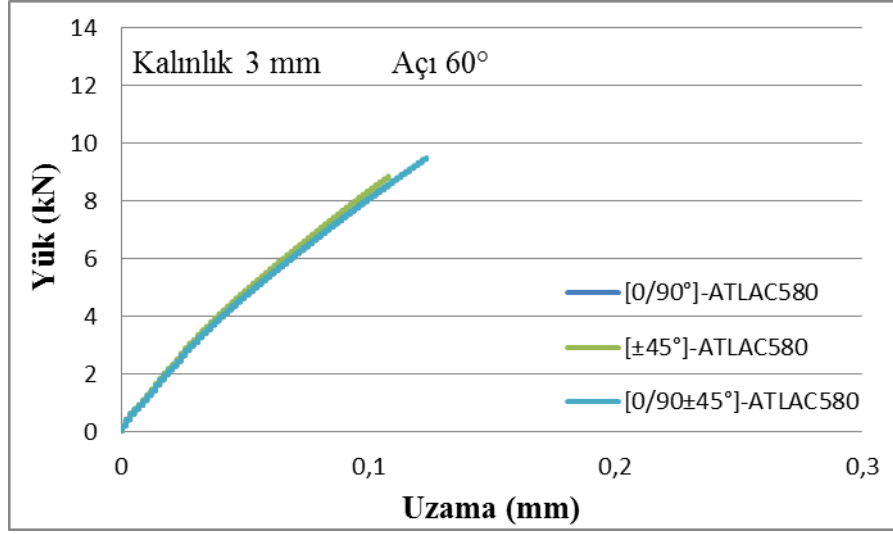
Şekil 3.18. [0/90°] serim açısında bindirme açısı 75° nin yük - uzama grafiği



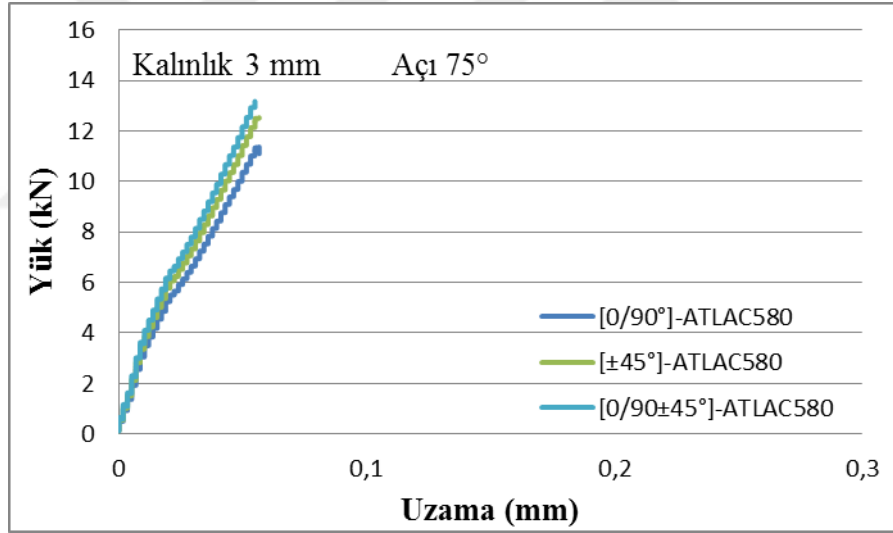
Şekil 3.19. Bindirme açısı 30° nin bütün serim açılarındaki yük - uzama grafiği



Şekil 3.20. Bindirme açısı 45° nin bütün serim açılarındaki yük - uzama grafiği



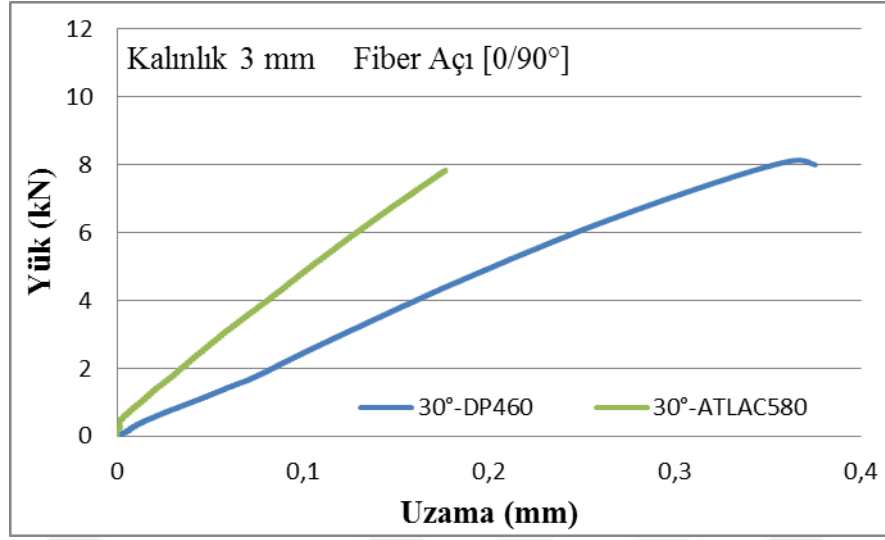
Şekil 3.21. Bindirme açısı 60° nin bütün serim açılarındaki yük - uzama grafiği



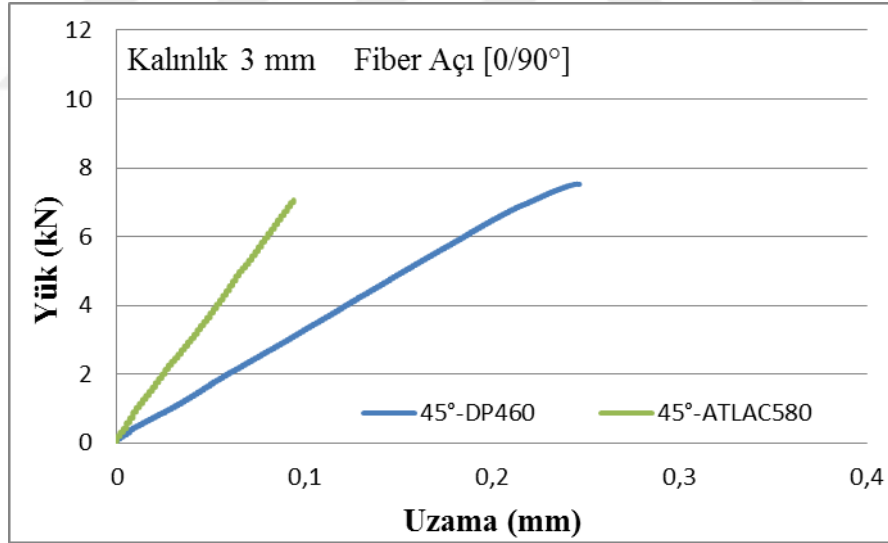
Şekil 3.22. Bindirme açısı 75° nin bütün serim açılarındaki yük - uzama grafiği

3.1.3. Yapıştırıcılara Ait Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

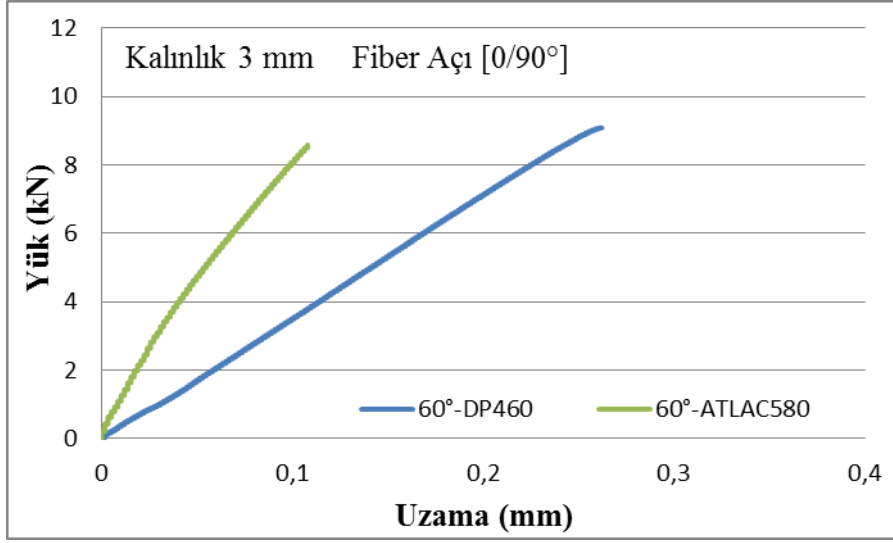
DP460 ve ATLAC580 yapıştırıcılarına ait deneylerden elde edilen sonuçlar Şekil 3.23-3.26'da 3 mm malzeme kalınlığında ve [0/90°] serim açısında bindirme açılarının değişimine göre sunulmuştur. Şekil 3.27-3.30'da 3 mm malzeme kalınlığında ve [±45°] serim açısında bindirme açılarının değişimine göre sunulmuştur. Ayrıca Şekil 3.31-3.34'de ise 3 mm malzeme kalınlığında ve [0/90/±45°] serim açısında bindirme açılarının değişimine göre sunulmuştur.



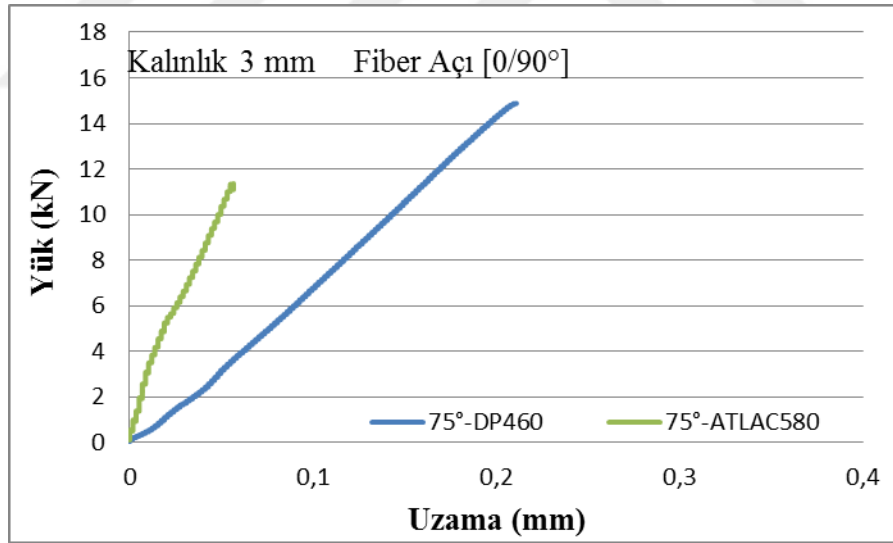
Şekil 3.23. [0/90°] serim açısında bindirme açısı 30° nin yük - uzama grafiği



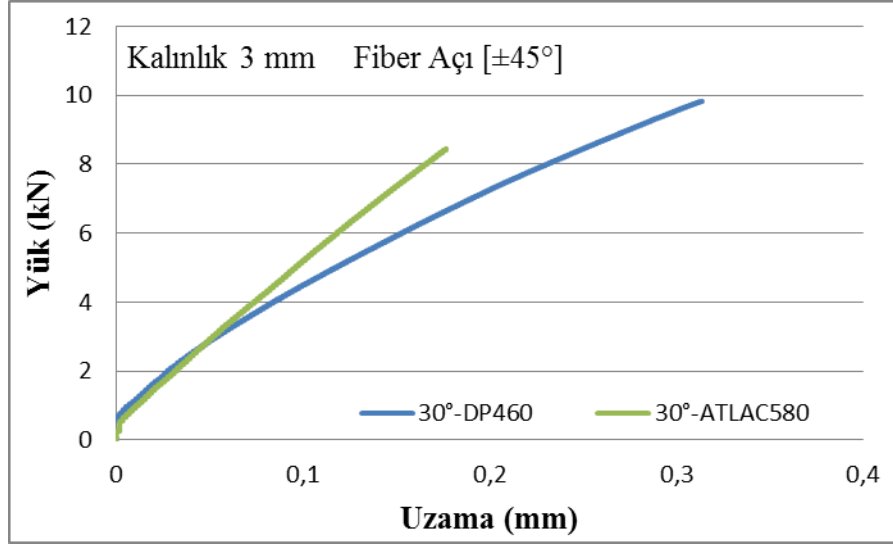
Şekil 3.24. [0/90°] serim açısında bindirme açısı 45° nin yük - uzama grafiği



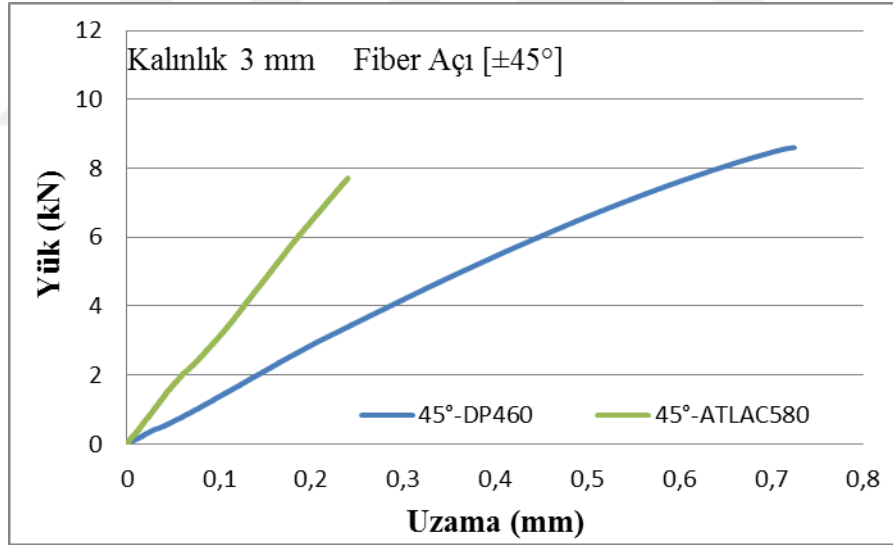
Şekil 3.25. [0/90°] serim açısında bindirme açısı 60° nin yük - uzama grafiği



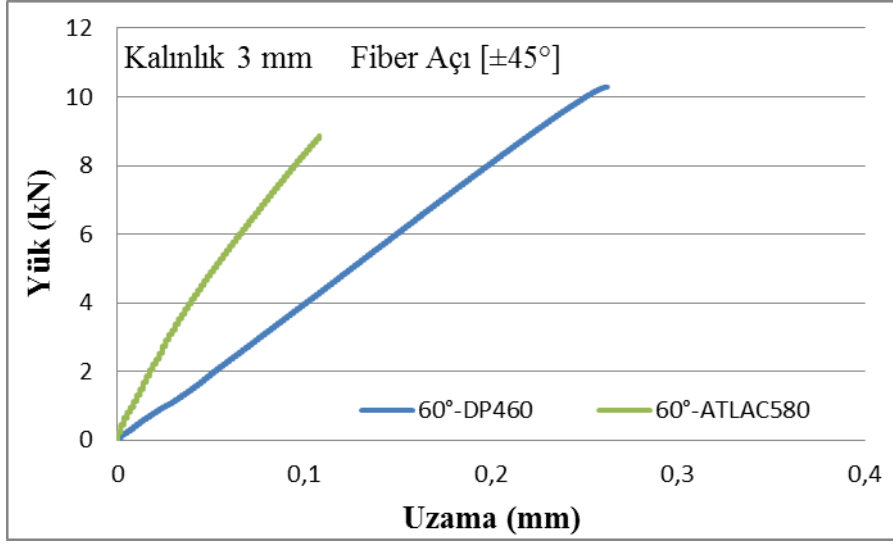
Şekil 3.26. [0/90°] serim açısında bindirme açısı 75° nin yük - uzama grafiği



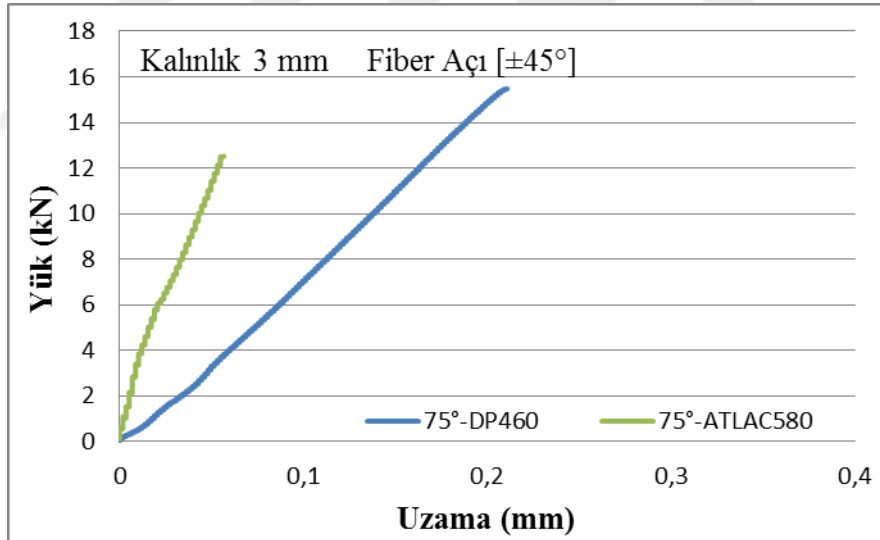
Şekil 3.27. [$\pm 45^\circ$] serim açısında bindirme açısı 30° nin yük - uzama grafiği



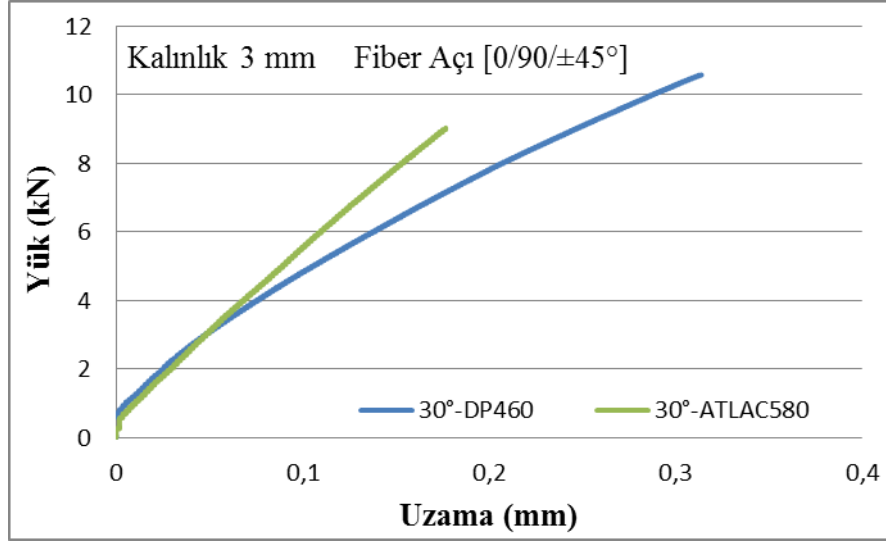
Şekil 3.28. [$\pm 45^\circ$] serim açısında bindirme açısı 45° nin yük - uzama grafiği



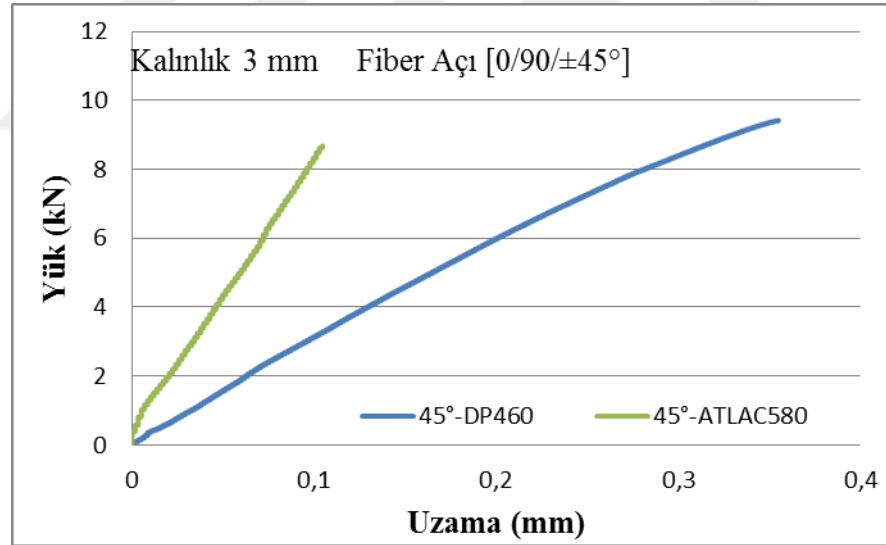
Şekil 3.29. [$\pm 45^\circ$] serim açısında bindirme açısı 60° nin yük - uzama grafiği



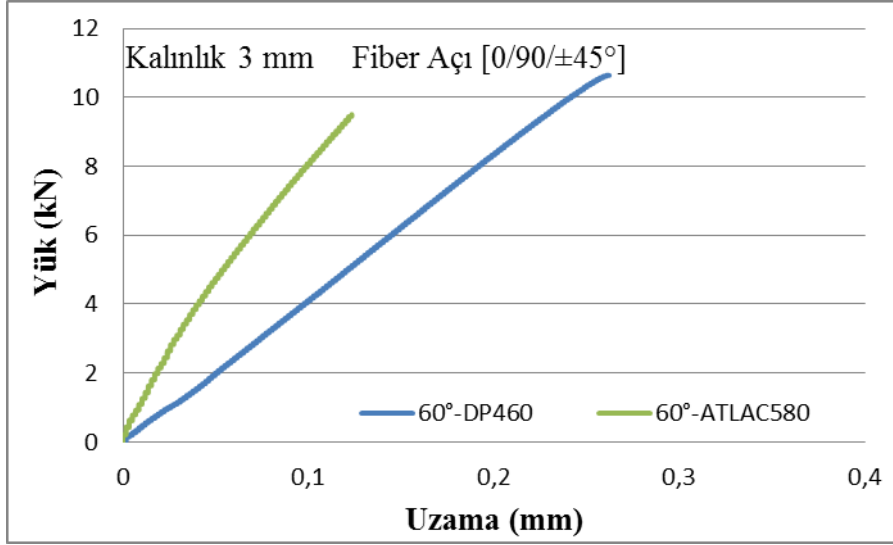
Şekil 3.30. [$\pm 45^\circ$] serim açısında bindirme açısı 75° nin yük - uzama grafiği



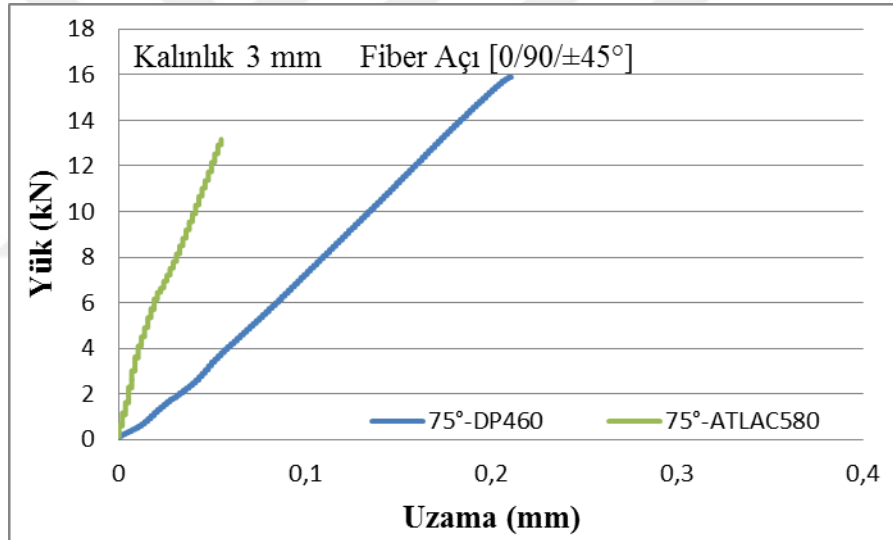
Şekil 3.31. [0/90/±45°] serim açısında bindirme açısı 30° nin yük - uzama grafiği



Şekil 3.32. [0/90/±45°] serim açısında bindirme açısı 45° nin yük - uzama grafiği

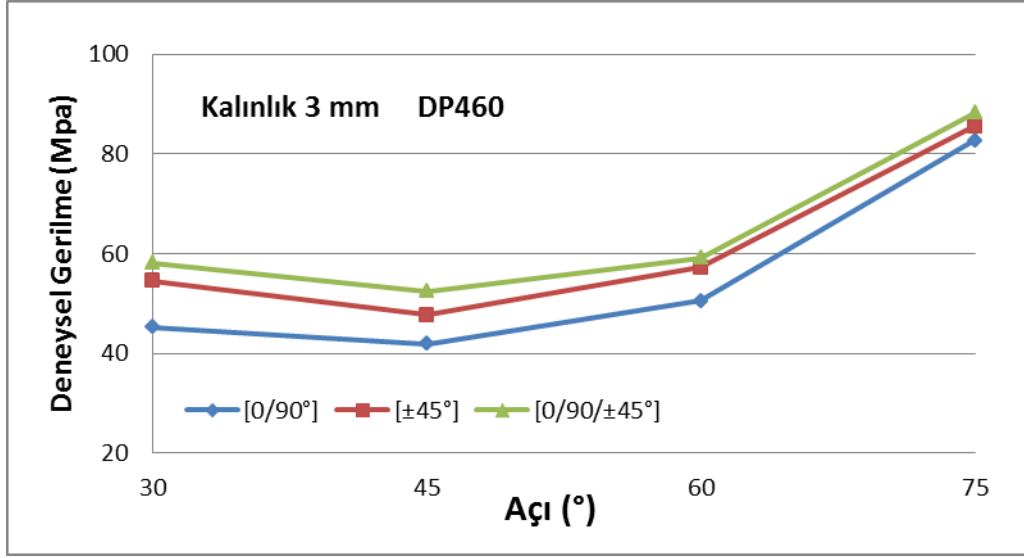


Şekil 3.33. $[0/90/\pm 45^\circ]$ serim açısında bindirme açısı 60° nin yük - uzama grafiği



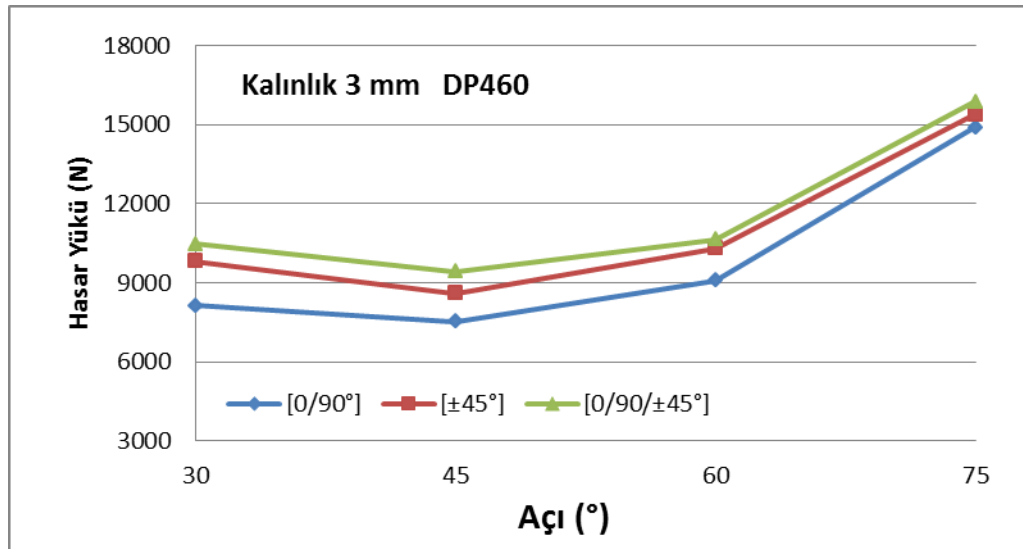
Şekil 3.34. $[0/90/\pm 45^\circ]$ serim açısında bindirme açısı 75° nin yük - uzama grafiği

Şekil 3.35’de Dp460 yapıştırıcısı ile birleştirilen yapıştırmalı bağlantıda her bir bindirme açısı değerine karşılık gelen deneysel gerilme değerleri verilmiştir. Açı 30° iken gerilme değeri 47 MPa çıkmıştır. 45° açıda gerilme değeri biraz düşmeye başlamıştır ve 44 MPa olarak okunmuştur. Açı 60° ye geldiğinde gerilme değerindeki artış belirgin hale gelmiş olup 52 MPa ulaşmıştır. Açı 75° olduğunda gerilme değeri hızlı bir şekilde artarak maksimum seviye olan 85 MPa ulaşmıştır. Tasarlanan bağlantı geometrisinde bindirme açısı değerinin artmasıyla gerilme değerleri artmakta olduğu deney sonucunda ortaya çıkmıştır.



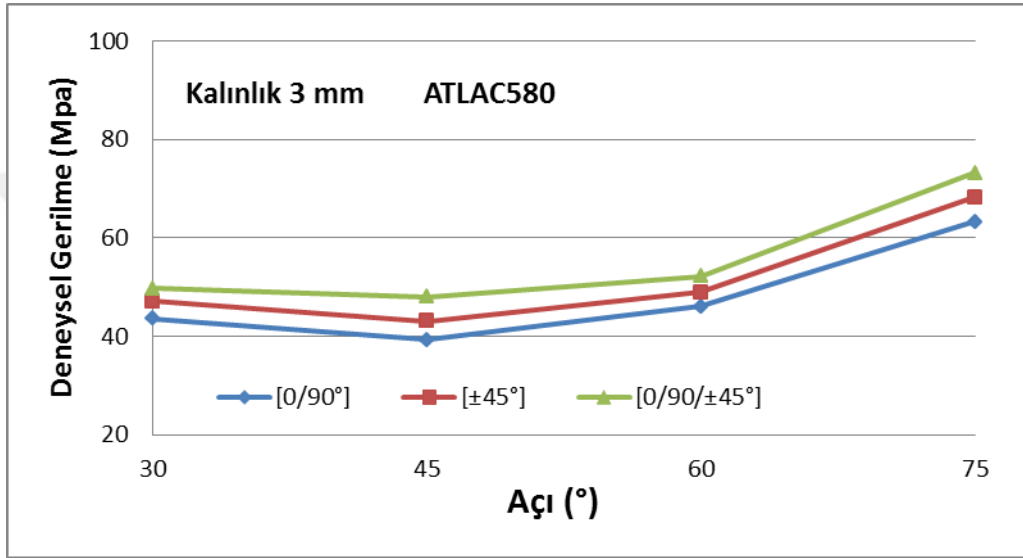
Şekil 3.35. DP460 yapıştırıcısı ile birleştirilen numunelere ait deneysel gerilmeler

Kompozit malzeme üç farklı serim açısıyla üretildiğinden her bir serim açısının yapıştırma bağlantısına etkisini deneysel olarak incelendiğinde; $[0^\circ/90^\circ]$ fiber oryantasyon açısına sahip malzemede en düşük gerilme değerleri elde edilmiştir. Serim açısı $[\pm 45^\circ]$ de gerilme değerleri artarken çok yönlü olan $[0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ]$ fiber oryantasyon açısında en yüksek gerilme değerleri ortaya çıkmıştır. Cam takviyeli epoksi prepreg kompozit malzemeler farklı serim açılarında üretilmesiyle; deney sonuçlarında gözle görülür bir fark oluşturduğu grafiklerden anlaşılmaktadır. Grafikler incelendiğinde deneysel hasar yüklerinin bindirme açısı ve kompozit fiber açılara bağlı olarak değişimlerinin Şekil 3.35'dekine benzer bir değişim gösterdiği fark edilmektedir.

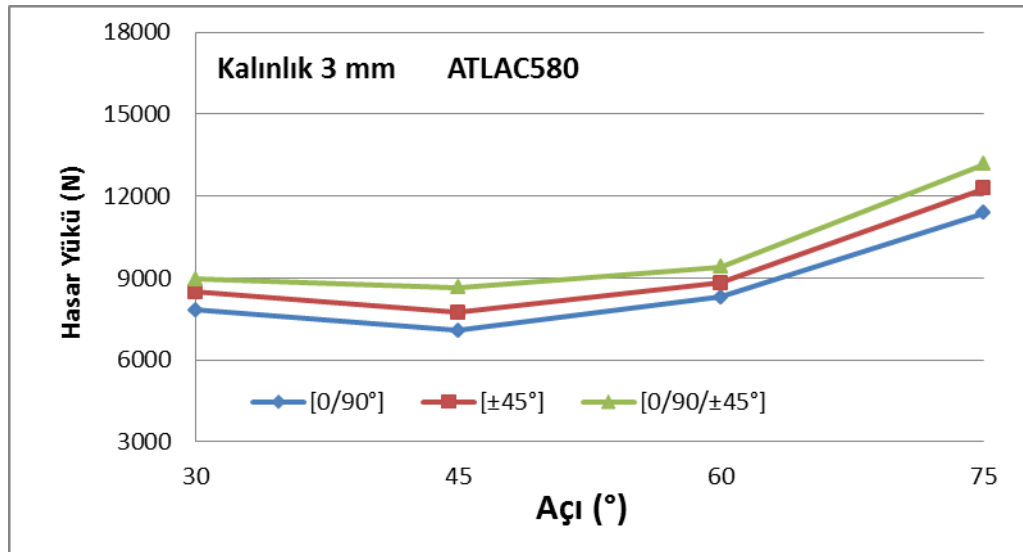


Şekil 3.36. DP460 yapıştırıcısı ile birleştirilen numunelere ait deneysel hasar yükleri

Atlac580 yapıştırıcısı ile birleştirilen numunelerde deneysel gerilmeler ve hasar yükleri, Dp460 yapıştırıcısına göre daha düşük çıkmıştır. Çünkü Atlac580'in çekme dayanımı 40,618 MPa iken Dp460'ın çekme dayanımı 44,615 MPa'dır. Şekil 3.37 ve Şekil 3.38'deki grafiklerde gösterilen deneysel verilerin daha düşük çıkması bu durumu göstermektedir. Ayrıca her iki yapıştırıcının farklı karakteristiklere ve özelliklere sahip olması da bu farklılığı ortaya çıkarmaktadır.



Şekil 3.37. ATLAC580 yapıştırıcısı ile birleştirilen numunelere ait deneysel gerilmeler



Şekil 3.38. ATLAC580 yapıştırıcısı ile birleştirilen numunelere ait deneysel hasar yükleri

Tablo 3.1. Deneyisel gerilmeler ve deneyisel hasar yükleri

No	Açı (°)	Kalınlık (mm)	Fiber Açısı (°)	Yapışma Alanı (mm ²)	Yapıştırıcılar			
					DP 460		ATLAC 580	
					Hasar Yükü (N)	Deneyisel Gerilme (N/mm ²)	Hasar Yükü (N)	Deneyisel Gerilme (N/mm ²)
1	30	3	[0/90]	180	8136,0	45,20	7837,2	43,54
2	45	3	[0/90]	180	7531,2	41,84	7074,0	39,30
3	60	3	[0/90]	180	9091,8	50,51	8303,4	46,13
4	75	3	[0/90]	180	14900,4	82,78	11390,4	63,28
5	30	3	[±45]	180	9811,8	54,51	8485,2	47,14
6	45	3	[±45]	180	8593,2	47,74	7743,6	43,02
7	60	3	[±45]	180	10292,4	57,18	8809,2	48,94
8	75	3	[±45]	180	15390,0	85,50	12276,0	68,20
9	30	3	[0/90/±45]	180	10472,4	58,18	8949,6	49,72
10	45	3	[0/90/±45]	180	9433,8	52,41	8649,0	48,05
11	60	3	[0/90/±45]	180	10645,2	59,14	9405,0	52,25
12	75	3	[0/90/±45]	180	15885,0	88,25	13170,6	73,17
13	30	5	[0/90]	300	13560,0	45,20	13062,0	43,54
14	45	5	[0/90]	300	12552,0	41,84	11790,0	39,30
15	60	5	[0/90]	300	15153,0	50,51	13839,0	46,13
16	75	5	[0/90]	300	24834,0	82,78	18984,0	63,28
17	30	5	[±45]	300	18330,0	61,10	13200,0	44,00
18	45	5	[±45]	300	14853,0	49,51	12165,0	40,55
19	60	5	[±45]	300	17154,0	57,18	14196,0	47,32
20	75	5	[±45]	300	25650,0	85,50	19101,0	63,67
21	45	5	[0/90/±45]	300	15723,0	52,41	14415,0	48,05
22	60	5	[0/90/±45]	300	17742,0	59,14	15675,0	52,25
23	30	7	[0/90]	420	18984,0	45,20	18286,8	43,54
24	45	7	[0/90]	420	17572,8	41,84	16506,0	39,30
25	60	7	[0/90]	420	21214,2	50,51	19374,6	46,13
26	75	7	[0/90]	420	34767,6	82,78	26577,6	63,28
27	45	7	[±45]	420	21592,2	51,41	17031,0	40,55
28	60	7	[±45]	420	24015,6	57,18	19874,4	47,32
29	30	7	[0/90/±45]	420	24435,6	58,18	20882,4	49,72
30	45	7	[0/90/±45]	420	22012,2	52,41	20181,0	48,05
31	60	7	[0/90/±45]	420	24838,8	59,14	22663,2	53,96
32	75	7	[0/90/±45]	420	37065,0	88,25	30731,4	73,17

3.2. Sayısal Sonuçlar

Çift zigzag tip yapıştırma bağlantılarının tasarımında, kompozit malzemelerin ve yapıştırıcıların gerilme-şekil değiştirme davranışları göz önüne alınarak, lineer elastik ve elasto-plastik sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Sonlu elemanlar analizlerinde hasar yükü belirlenirken yapıştırıcıların aşağıda verilen çekme dayanımları dikkate alınmış ve grafiklerde σ^* olarak ifade edilmiştir. DP460 sünek bir yapıştırıcı malzeme olduğu için lineer olmayan analiz yapılmıştır. ATLAC 580 ise gevrek bir yapıştırıcı malzeme olduğu için lineer analiz yapılmıştır.

Tablo 3.2. Çalışmada kullanılan yapıştırıcıların çekme dayanımları

	DP460	ATLAC580
$\sigma^* (MPa)$	44,615	40,618

Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantılara yük uygulandığı zaman yapıştırıcı tabakasında üç eksenli gerilme durumu söz konusu olmaktadır. Bu sebeple eş değer gerilmeler, von-Mises akma kriterine göre hesaplanmış ve bu eş değer gerilmeler yapıştırıcı ara yüzeyinde yapıştırıcının çekme dayanımına ulaştığında hasarın meydana geldiği kabul edilmiştir.

3.2.1. Deneysel Sonuçlar ile Sayısal Sonuçların Karşılaştırılması

Sayısal çözümde yapıştırıcılara ait çekme dayanım değerleri programa girilmiştir. ANSYS hasar yükünü bulmak için; her numuneye özgü ayrı ayrı yaklaşım programları yapılmıştır. ANSYS'te yapıştırıcı ara yüzeyine ait von Mises akma gerilmesi o yapıştırıcının çekme dayanım değerine yaklaştıkça kadar uygulanan basınç değeri değiştirilerek her seferinde programın txt dosyası tekrar ANSYS'e okutulmuştur. Yapıştırma bağlantılarında hasar çoğunlukla yapıştırıcı ara yüzeyinde olduğu için bu ara yüzeydeki gerilmeler dikkate alınmıştır. Ayrıca kompozit malzemenin kopma gerilmesi yapıştırıcıların kopma gerilmelerinden çok büyük olduğu için yapıştırıcı bölgesinden kopmalar meydana gelmiştir. Çekme testi bittiğinde numunelerin kompozit malzemeden değil de yapıştırıcıdan kopması bunun bir sonucu olarak gösterilebilir.

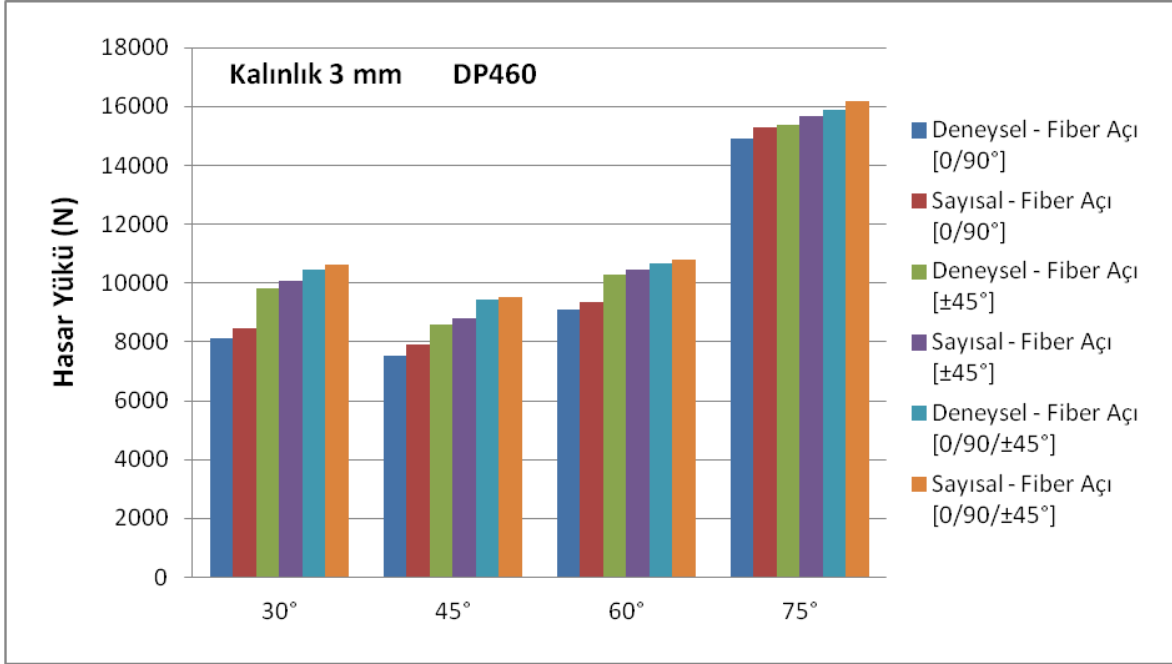
Yapıştırıcıların çekme gerilme değerleri, Sonlu Elemanlar Analizi (SEM) ile bulunan yapıştırıcı ara yüzeyindeki maksimum gerilmeler ile karşılaştırılmıştır. Gerilmeler birbirine

yakın çıkmıştır, bu yaklaşım oranı Tablo 3.2 ve Tablo 3.3’de rahatlıkla görülmektedir. Böylece sayısal analiz verilerinin deneysel analiz verilerine yaklaşması, gerilme dağılımının incelenmesinde sayısal analiz sonuçlarının kullanılabileceğini göstermiştir.

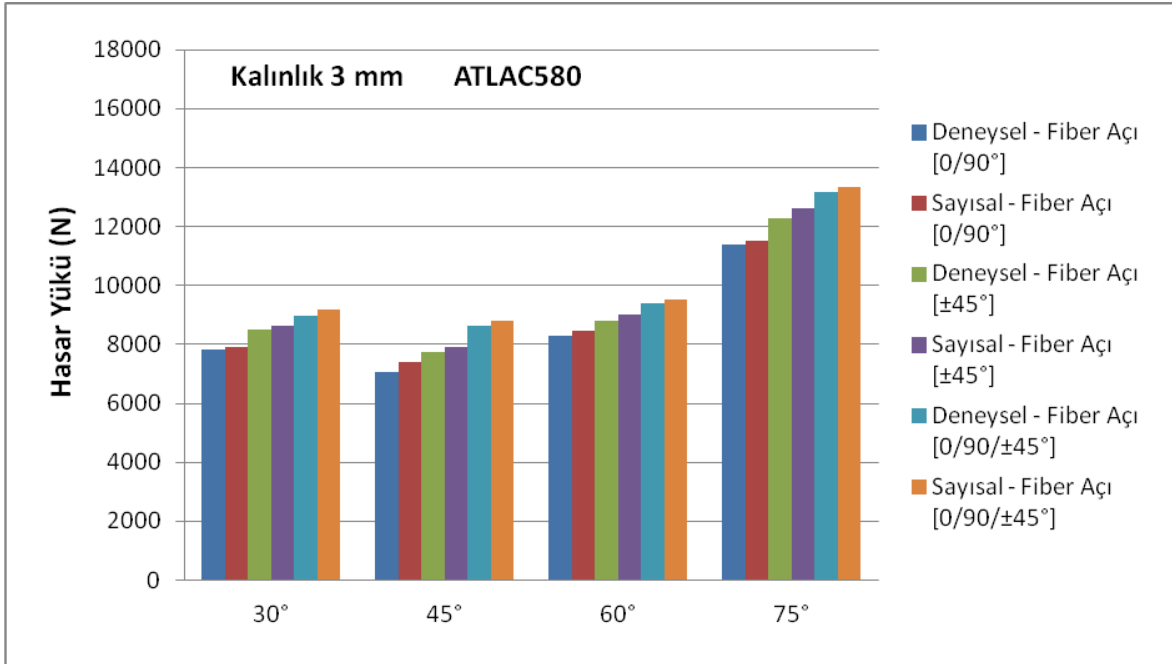
Tablo 3.3. Yapıştırıcı ara yüzeyindeki gerilmelerin karşılaştırılması

No	Açı (°)	Kalınlık (mm)	Fiber Açısı (°)	DP 460			ATLAC 580		
				Çekme dayanımı σ^* (MPa)	ANSYS σ_{eqv} (MPa)	Yaklaşım Oranı (σ^*/σ_{eqv})	Çekme dayanımı σ^* (MPa)	ANSYS σ_{eqv} (MPa)	Yaklaşım Oranı (σ^*/σ_{eqv})
1	30	3	[0/90]	44,615	43,930	1,015593	40,618	40,6170	1,000025
2	45	3	[0/90]	44,615	44,616	0,999978	40,618	40,6170	1,000025
3	60	3	[0/90]	44,615	44,616	0,999978	40,618	40,6180	1,000000
4	75	3	[0/90]	44,615	44,616	0,999978	40,618	40,6180	1,000000
5	30	3	[±45]	44,615	44,480	1,003035	40,618	40,0600	1,013929
6	45	3	[±45]	44,615	44,616	0,999978	40,618	40,5300	1,002171
7	60	3	[±45]	44,615	44,613	1,000045	40,618	40,6180	1,000000
8	75	3	[±45]	44,615	44,615	1,000000	40,618	40,6180	1,000000
9	30	3	[0/90/±45]	44,615	44,616	0,999978	40,618	40,6140	1,000098
10	45	3	[0/90/±45]	44,615	44,615	1,000000	40,618	40,6170	1,000025
11	60	3	[0/90/±45]	44,615	44,615	1,000000	40,618	40,6180	1,000000
12	75	3	[0/90/±45]	44,615	44,615	1,000000	40,618	40,6180	1,000000
13	30	5	[0/90]	44,615	43,970	1,014669	40,618	39,8700	1,018761
14	45	5	[0/90]	44,615	44,616	0,999978	40,618	40,6176	1,000010
15	60	5	[0/90]	44,615	44,616	0,999978	40,618	40,6180	1,000000
16	75	5	[0/90]	44,615	44,616	0,999978	40,618	40,6180	1,000000
17	30	5	[±45]	44,615	43,833	1,017840	40,618	40,6173	1,000017
18	45	5	[±45]	44,615	44,615	1,000000	40,618	40,7500	0,996761
19	60	5	[±45]	44,615	43,720	1,020471	40,618	40,6179	1,000002
20	75	5	[±45]	44,615	44,616	0,999978	40,618	40,6308	0,999685
21	45	5	[0/90/±45]	44,615	44,615	1,000000	40,618	40,7500	0,996761
22	60	5	[0/90/±45]	44,615	44,615	1,000000	40,618	40,6180	1,000000
23	30	7	[0/90]	44,615	44,000	1,013977	40,618	39,8800	1,018506
24	45	7	[0/90]	44,615	44,616	0,999978	40,618	40,6176	1,000010
25	60	7	[0/90]	44,615	44,616	0,999978	40,618	40,6180	1,000000
26	75	7	[0/90]	44,615	44,616	0,999978	40,618	40,6180	1,000000
27	45	7	[±45]	44,615	44,615	1,000000	40,618	40,6178	1,000005
28	60	7	[±45]	44,615	43,704	1,020845	40,618	40,6179	1,000002
29	30	7	[0/90/±45]	44,615	44,616	0,999978	40,618	40,6179	1,000002
30	45	7	[0/90/±45]	44,615	44,615	1,000000	40,618	40,6180	1,000000
31	60	7	[0/90/±45]	44,615	44,615	1,000000	40,618	40,6180	1,000000
32	75	7	[0/90/±45]	44,615	44,615	1,000000	40,618	40,6180	1,000000

Şekil 3.39 ve Şekil 3.40'ta yapıştırıcılara ait deneysel ve sayısal hasar yüklerinin değişimi görülmektedir. Tablo 3.4 ise tüm numunelere ait yapıştırıcı ara yüzeyindeki hasar yüklerinin karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 3.39. DP460 yapıştırıcısına ait deneysel ve sayısal hasar yüklerin değişimi



Şekil 3.40. ATLAC580 yapıştırıcısına ait deneysel ve sayısal hasar yüklerin değişimi

Tablo 3.4. Yapıştırıcı ara yüzeyindeki hasar yüklerinin karşılaştırılması

No	Açı (°)	Fiber Açısı (°)	Yapışma Alanı (mm ²)	Yapıştırıcılar					
				DP 460			ATLAC 580		
				DeneySEL Hasar Yüğü (N)	ANSYS Hasar Yüğü (N)	Yaklaşım Oranı F_{deney}/F_{ANSYS}	DeneySEL Hasar Yüğü (N)	ANSYS Hasar Yüğü (N)	Yaklaşım Oranı F_{deney}/F_{ANSYS}
1	30	[0/90]	180	8.136	8.460	0,96170	7.837	7.920	0,98955
2	45	[0/90]	180	7.531	7.920	0,95091	7.074	7.380	0,95854
3	60	[0/90]	180	9.091	9.360	0,97135	8.303	8.460	0,98149
4	75	[0/90]	180	14.900	15.300	0,97388	11.390	11.520	0,98875
5	30	[±45]	180	9.811	10.080	0,97339	8.485	8.640	0,98208
6	45	[±45]	180	8.593	8.820	0,97429	7.743	7.920	0,97773
7	60	[±45]	180	10.292	10.440	0,98586	8.809	9.000	0,97880
8	75	[±45]	180	15.390	15.660	0,98276	12.276	12.600	0,97429
9	30	[0/90/±45]	180	10.472	10.620	0,98610	8.949	9.180	0,97490
10	45	[0/90/±45]	180	9.433	9.540	0,98887	8.649	8.820	0,98061
11	60	[0/90/±45]	180	10.645	10.800	0,98567	9.405	9.540	0,98585
12	75	[0/90/±45]	180	15.885	16.200	0,98056	13.170	13.320	0,98878
13	30	[0/90]	300	13.560	14.100	0,96170	13.062	13.200	0,98955
14	45	[0/90]	300	12.552	13.200	0,95091	11.790	12.300	0,95854
15	60	[0/90]	300	15.153	15.600	0,97135	13.839	14.100	0,98149
16	75	[0/90]	300	24.834	25.500	0,97388	18.984	19.200	0,98875
17	30	[±45]	300	18.330	18.600	0,98548	13.200	13.500	0,97778
18	45	[±45]	300	14.853	15.300	0,97078	12.165	12.600	0,96548
19	60	[±45]	300	17.154	17.400	0,98586	14.196	14.400	0,98583
20	75	[±45]	300	25.650	26.400	0,97159	19.101	19.200	0,99484
21	45	[0/90/±45]	300	15.723	15.900	0,98887	14.415	14.700	0,98061
22	60	[0/90/±45]	300	17.742	18.000	0,98567	15.675	15.900	0,98585
23	30	[0/90]	420	18.984	19.740	0,96170	18.286	18.480	0,98955
24	45	[0/90]	420	17.572	18.480	0,95091	16.506	17.220	0,95854
25	60	[0/90]	420	21.214	21.840	0,97135	19.374	19.740	0,98149
26	75	[0/90]	420	34.767	35.700	0,97388	26.577	26.880	0,98875
27	45	[±45]	420	21.592	22.680	0,95204	17.031	17.640	0,96548
28	60	[±45]	420	24.015	24.360	0,98586	19.874	20.160	0,98583
29	30	[0/90/±45]	420	24.435	24.780	0,98610	20.882	21.420	0,97490
30	45	[0/90/±45]	420	22.012	22.680	0,97056	20.181	20.580	0,98061
31	60	[0/90/±45]	420	24.838	25.200	0,98567	22.663	23.100	0,98109
32	75	[0/90/±45]	420	37.065	37.800	0,98056	30.731	31.080	0,98878

3.3. Kritik Hatların Belirlenmesi

Deneysel sonuçlar ve sayısal analiz sonuçları karşılaştırıldığında sonuçların uyumlu olduğu görülmektedir. Bu uyum, oluşturulan sonlu eleman modelinin doğruluğunu göstermektedir.

Çift zigzag tip yapıştırma bağlantılarının tasarımında kritik bölge, yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemenin ara yüzeyleridir. Bu sebeple yapıştırıcı tabakasındaki mekanik analizler yapılırken dört farklı tip kritik hat belirlenerek gerilme dağılımları dikkate alınmıştır. Bunlar:

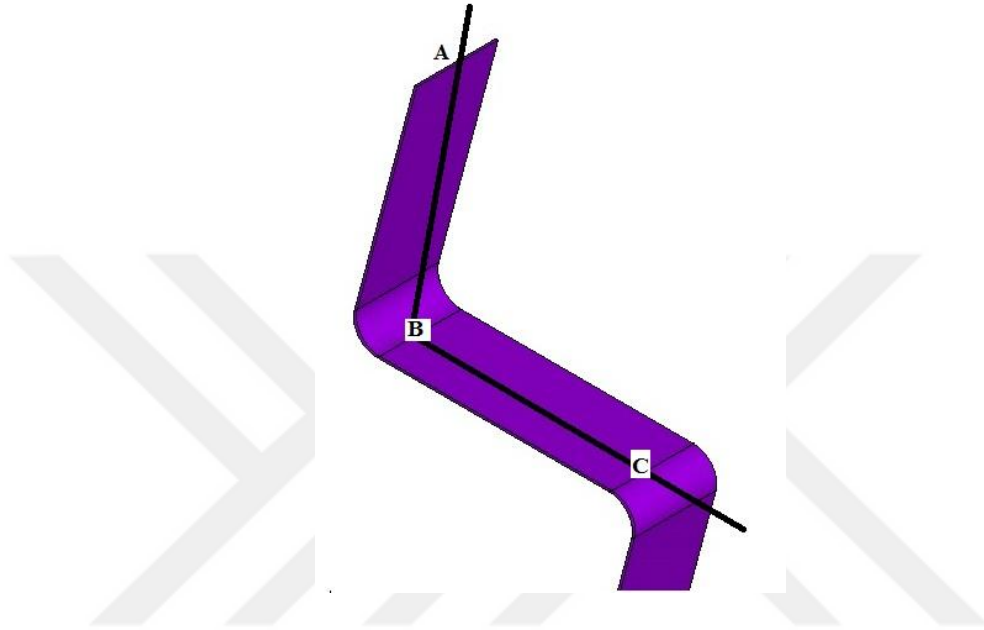
- 1- Yapıştırıcı yüzey (AC) (Şekil 3.41)
- 2- Yapıştırıcı ara yüzey (A'C') (Şekil 3.102)
- 3- Kompozit malzeme yüzeyi (A'C') (Şekil 3.163)
- 4- Kalınlık boyunca incelenen yüzey (DE) (Şekil 3.200)

İki farklı tip yapıştırıcı kullanılan yapışma bağlantısında dört farklı geometrik yapıya sahip, üç farklı serim açısında ve üç farklı malzeme kalınlığında, yapıştırıcıların çekme dayanımına ulaşmaya kadar ANSYS'te analizler tekrarlanarak yapılmıştır. Analiz sonunda kritik hat boyunca yapıştırıcı tabakası üzerinden alınan gerilme dağılımları, her bir yapıştırıcının çekme dayanımına bölünerek normalleştirilmiş ve grafiklerde $[(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \sigma_{eqv})/\sigma^*]$ olarak gösterilmiştir.

Benzer şekilde kritik hat boyunca yapıştırıcı tabakası üzerinden alınan gerilme dağılımlarının okunduğu yer (s) bindirme uzunluğuna (L) bölünerek normalleştirilmiş ve grafiklerde (s/L) olarak gösterilmiştir.

3.3.1. AC Hattı Boyunca Gerilme Dağılımı Sonuçları

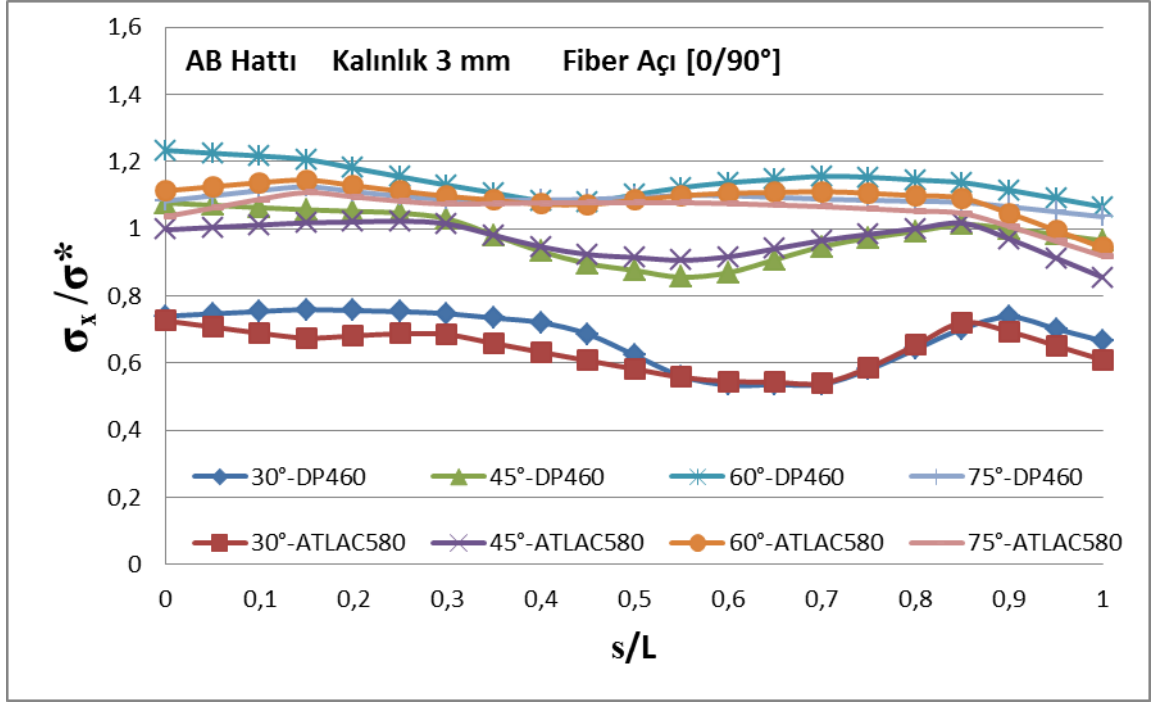
Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıda, yapıştırıcı yüzeyinde A noktasından B noktasına (AB) ve B noktasından C noktasına (BC) olmak üzere; kritik hatlar belirlenip gerilme dağılımları bu hatlar üzerinden alınarak grafikler oluşturulmuştur.



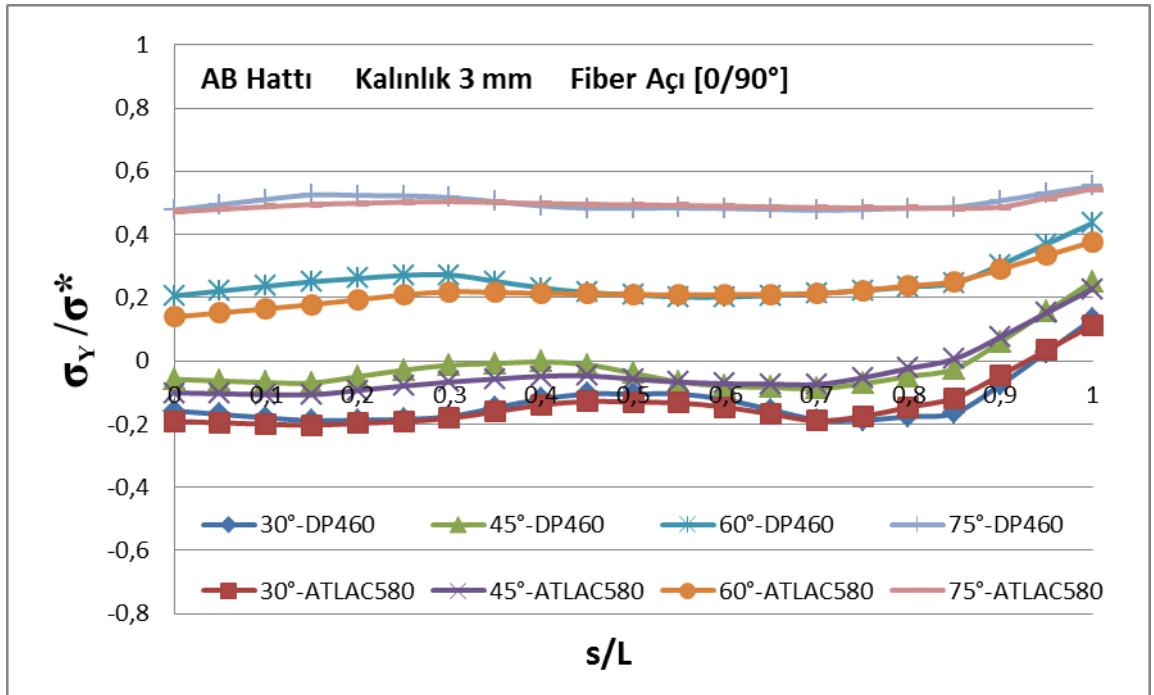
Şekil 3.41. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantı çeşidinde kritik hatlar [AC]

3.3.1.1.AB Hattı

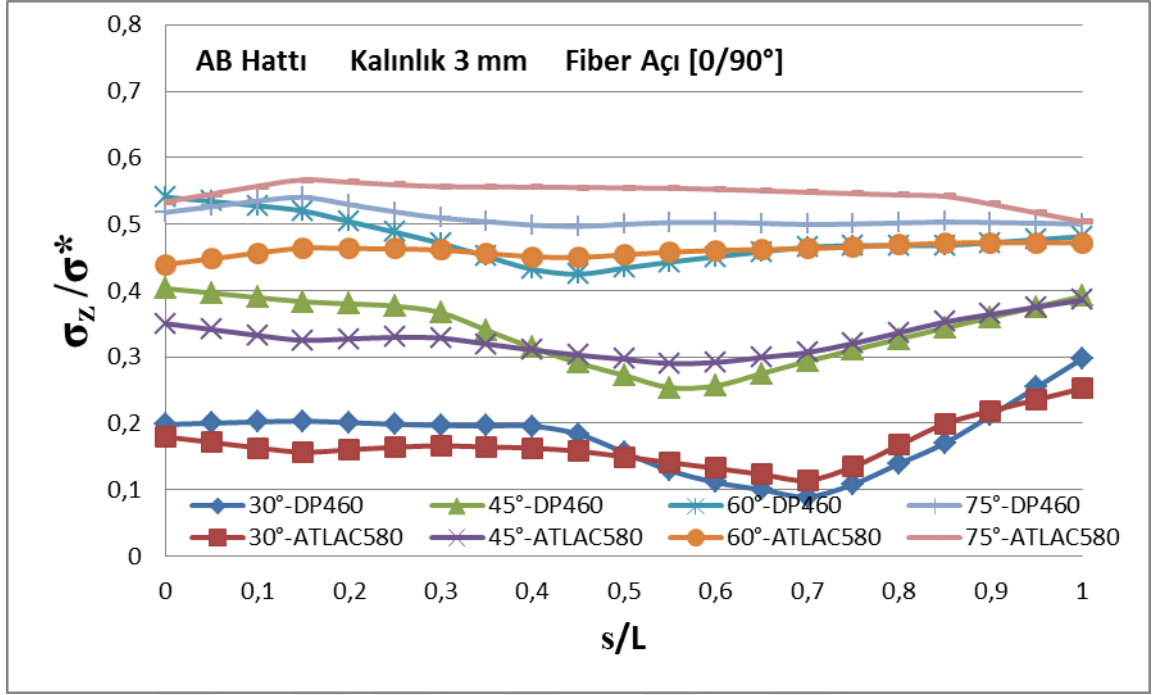
Şekil 3.42-3.46, 3 mm malzeme kalınlığında $[0^\circ/90^\circ]$ serim açısına sahip Dp460 ve Atlac580 ile birleştirilmiş yapışma bağlantılarında (A-B) hattı boyunca oluşan normalleştirilmiş gerilme dağılımlarını göstermektedir. Her iki yapıştırıcı için bindirme açısı arttıkça gerilmeler artmaktadır. 30° - 45° açılarda gerilme farkı daha çok iken 60° - 75° açılarda gerilme farkı biraz daha az çıkmıştır. Bunun nedeni olarak bindirme açısındaki geometrik yapı söylenebilir. Dp460 yapıştırıcısına ait gerilmeler Atlac580 yapıştırıcısına ait gerilmelerden daha yüksek çıkmıştır. Çünkü çekme dayanımı daha yüksektir. Normal gerilme değerlerinde ($s/L=0.5$) te aşağı yönlü küçük tepecikler ortaya çıkmıştır. Kayma gerilmeleri 30° bindirme açısında negatif çıkmıştır. Von-Mises gerilmelerinde küçük açıda daha büyük gerilmeler oluşmuştur. Keskin köşelerin olmamasından x yönündeki normal gerilme ve von-Mises gerilmelerinde ($s/L=1$) de azalma, diğer gerilmelerde artış meydana gelmiştir.



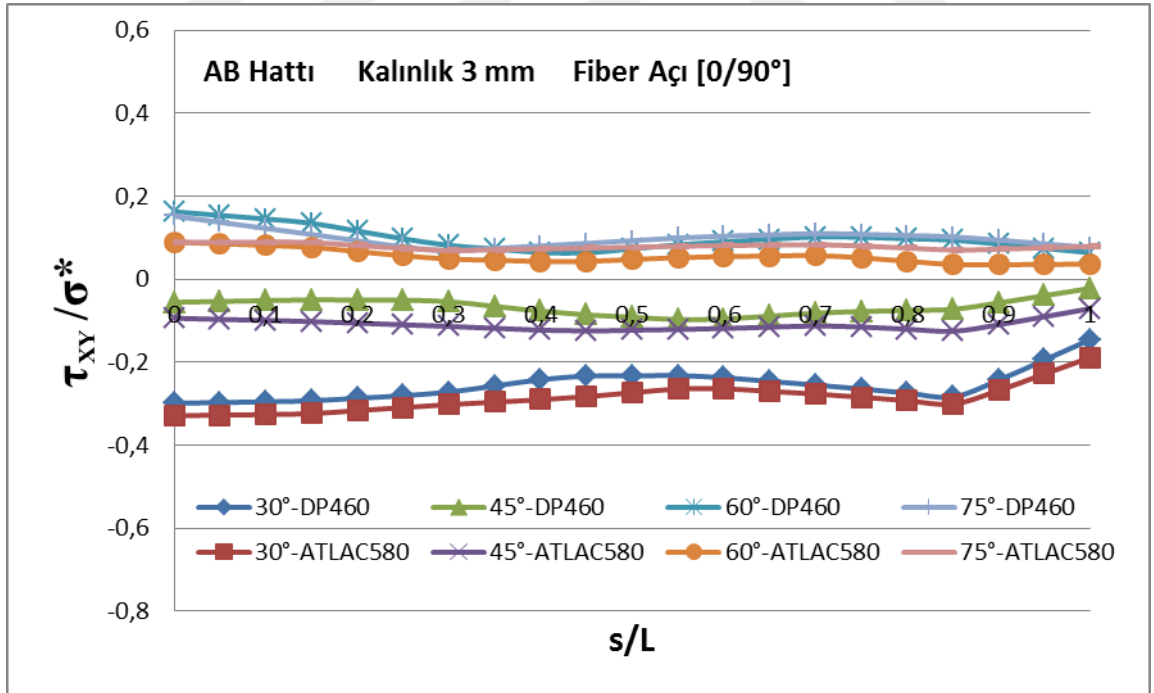
Şekil 3.42. [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_x gerilmeleri



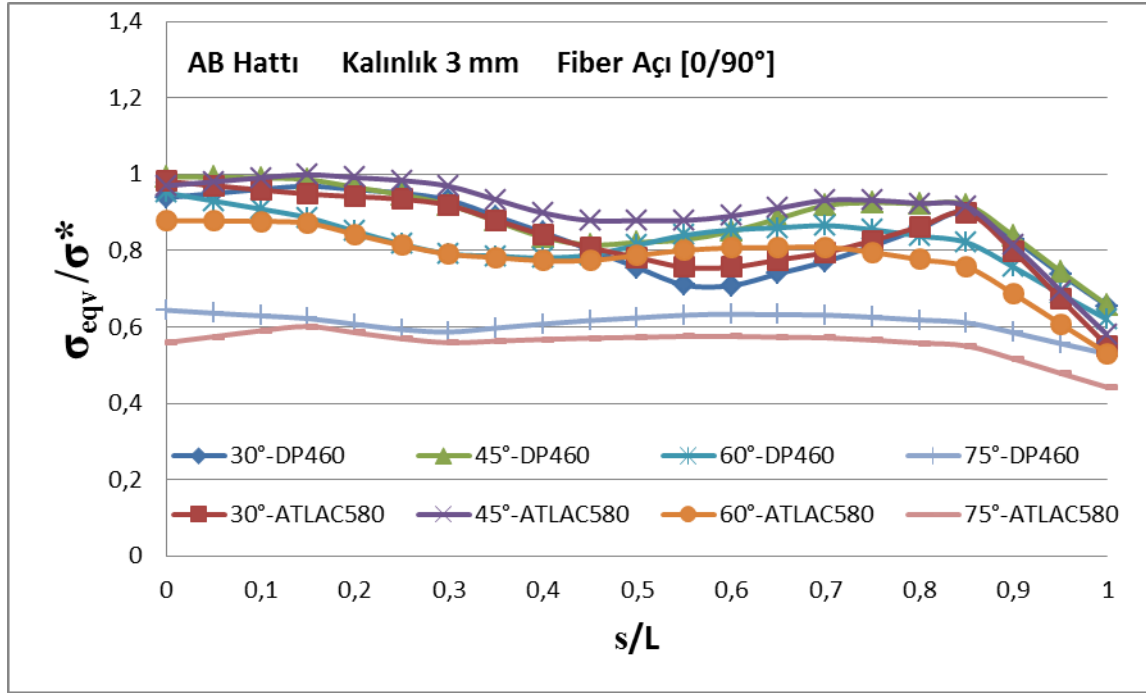
Şekil 3.43. [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_y gerilmeleri



Şekil 3.44. [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_z gerilmeleri

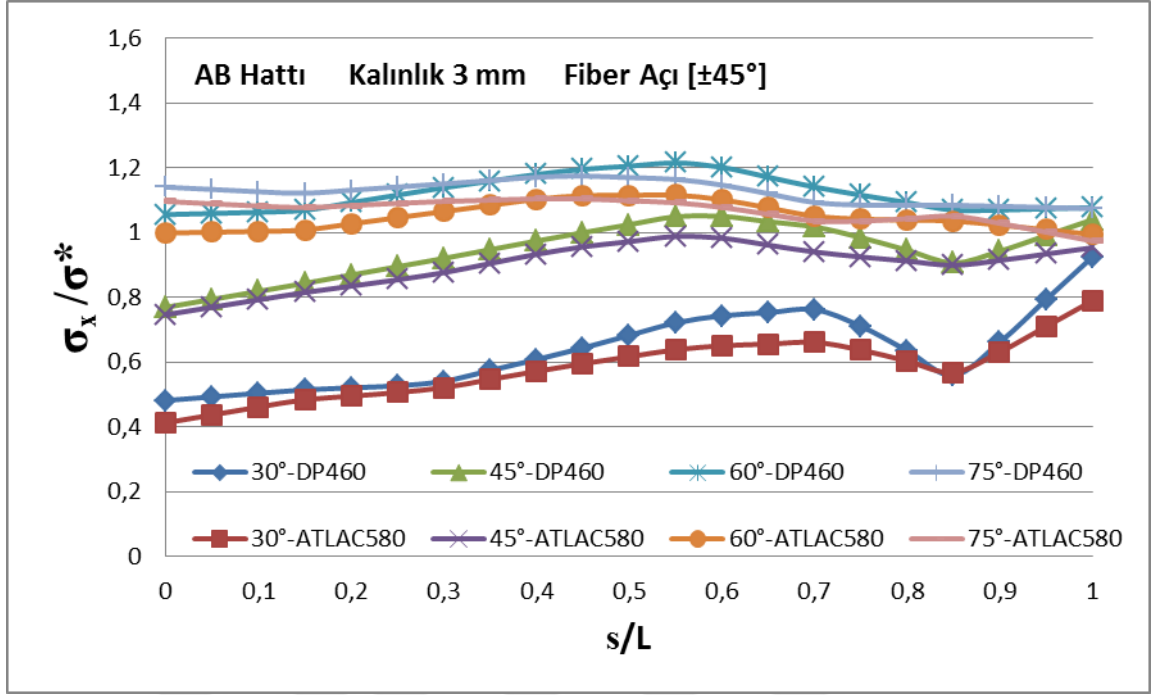


Şekil 3.45. [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş τ_{xy} gerilmeleri

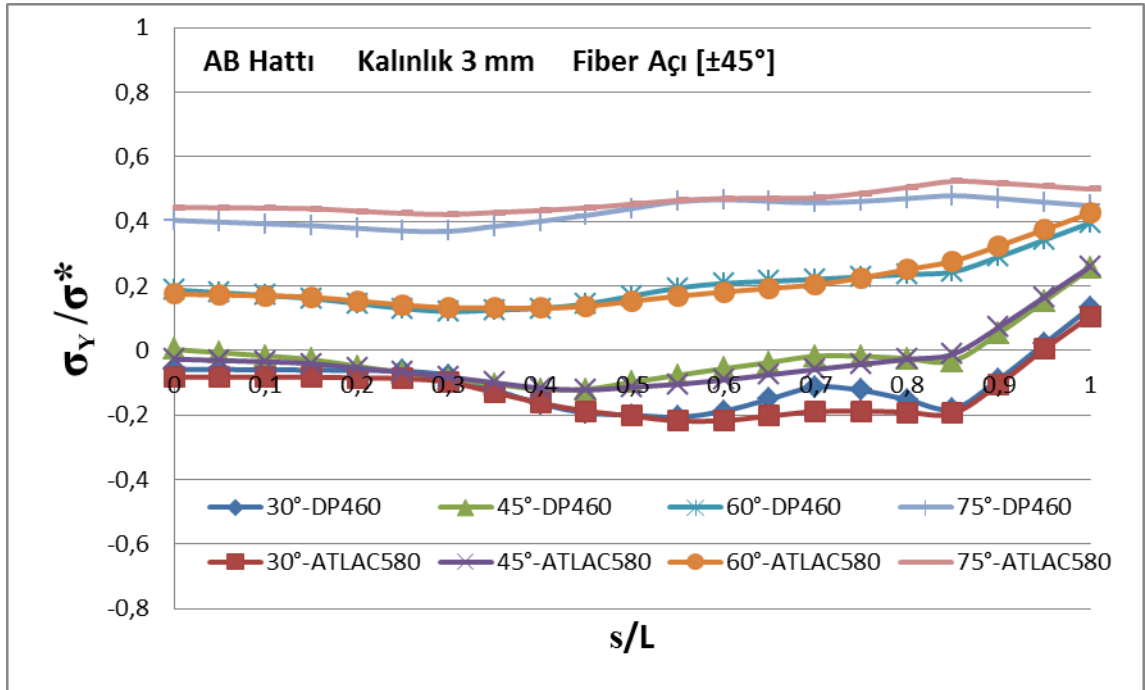


Şekil 3.46. [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_{eqv} gerilmeleri

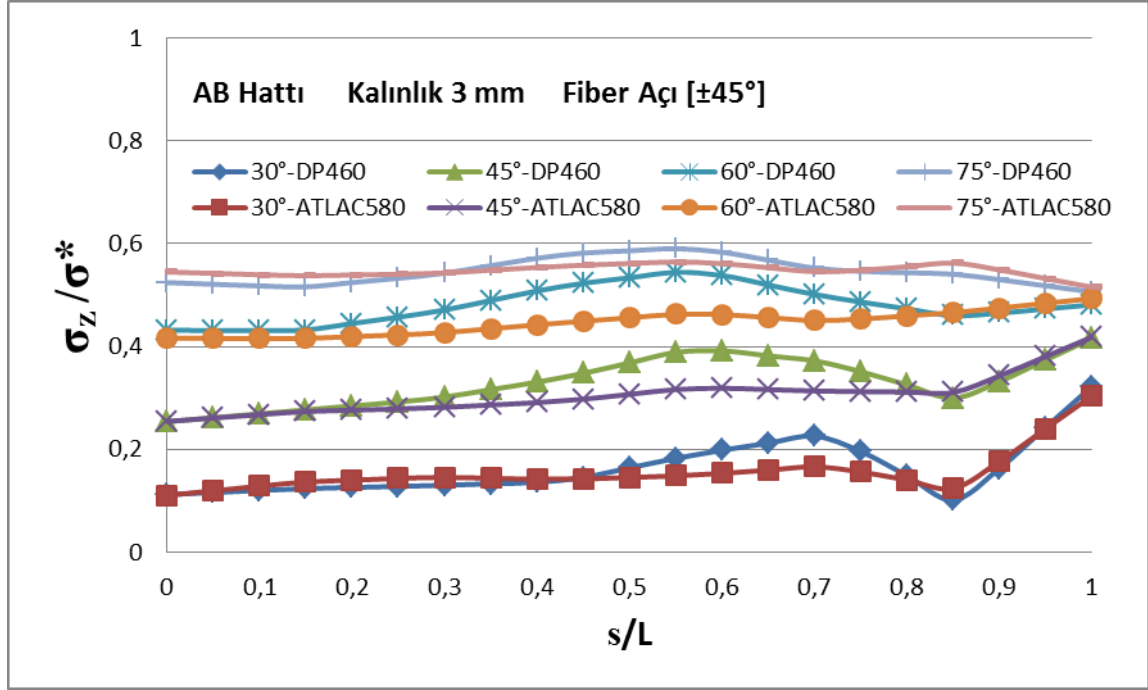
Şekil 3.47-3.51, 3 mm malzeme kalınlığında [$\pm 45^\circ$] serim açısına sahip Dp460 ve Atlac580 ile birleştirilmiş yapışma bağlantılarında (A-B) hattı boyunca oluşan normalleştirilmiş gerilme dağılımlarını göstermektedir. Her iki yapıştırıcı için bindirme açısı arttıkça gerilmeler artmaktadır. 30°- 45° açılarda gerilme farkı daha çok iken 60°-75° açılarda gerilme farkı biraz daha az çıkmıştır. Bunun nedeni olarak bindirme açısındaki geometrik yapı söylenebilir. Dp460 yapıştırıcısına ait gerilmeler Atlac580 yapıştırıcısına ait gerilmelerden daha yüksek çıkmıştır. Çünkü çekme dayanımı daha yüksektir. Tüm gerilme değerlerinde ($s/L=0,5$) te diğer serim açısının tersine yukarı yönlü küçük tepelikler ortaya çıkmıştır. Kayma gerilmeleri 30° bindirme açısında negatif çıkmıştır. Von-Mises gerilmelerinde küçük açıda daha büyük gerilmeler oluşmuştur. Von-Mises gerilmelerinde ($s/L=1$) de azalma, diğer gerilmelerde artış meydana gelmiştir.



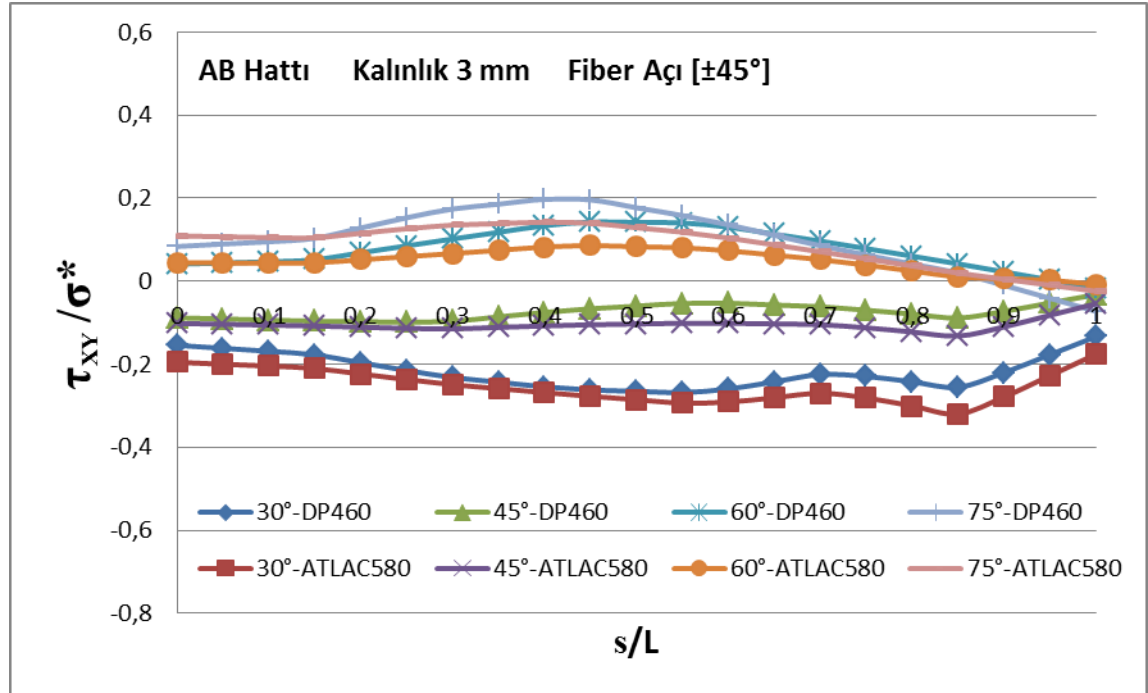
Şekil 3.47. [±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_x gerilmeleri



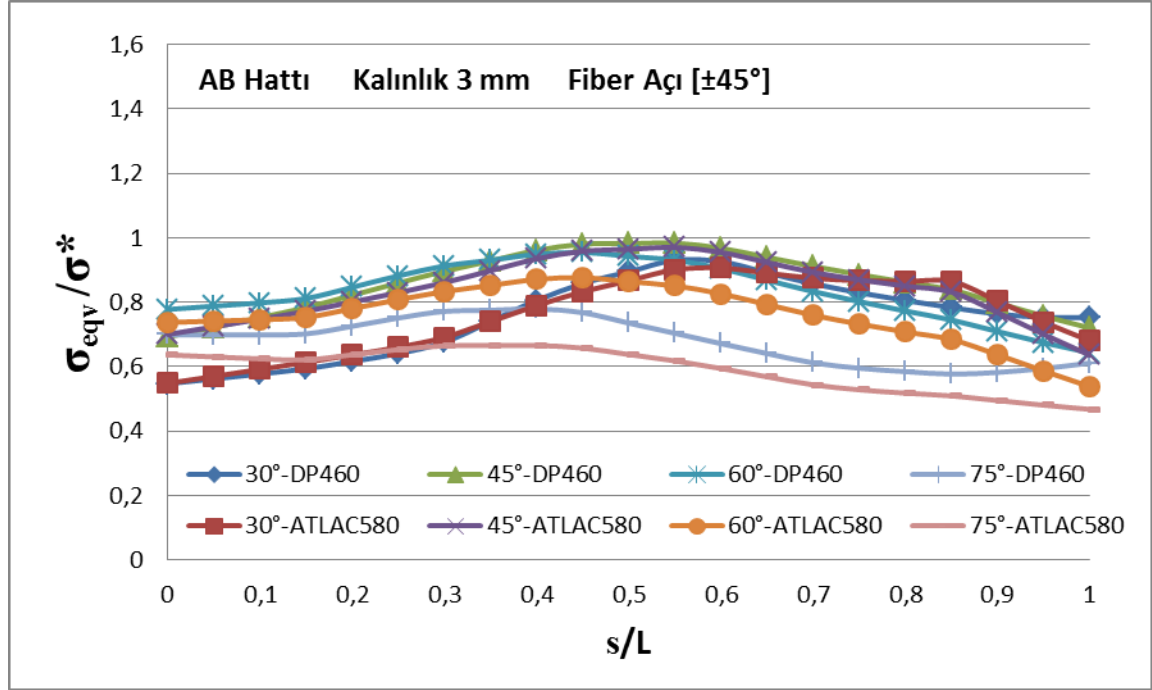
Şekil 3.48. [±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_y gerilmeleri



Şekil 3.49. $[\pm 45^\circ]$ serim açısındaki normalleştirilmiş σ_z gerilmeleri

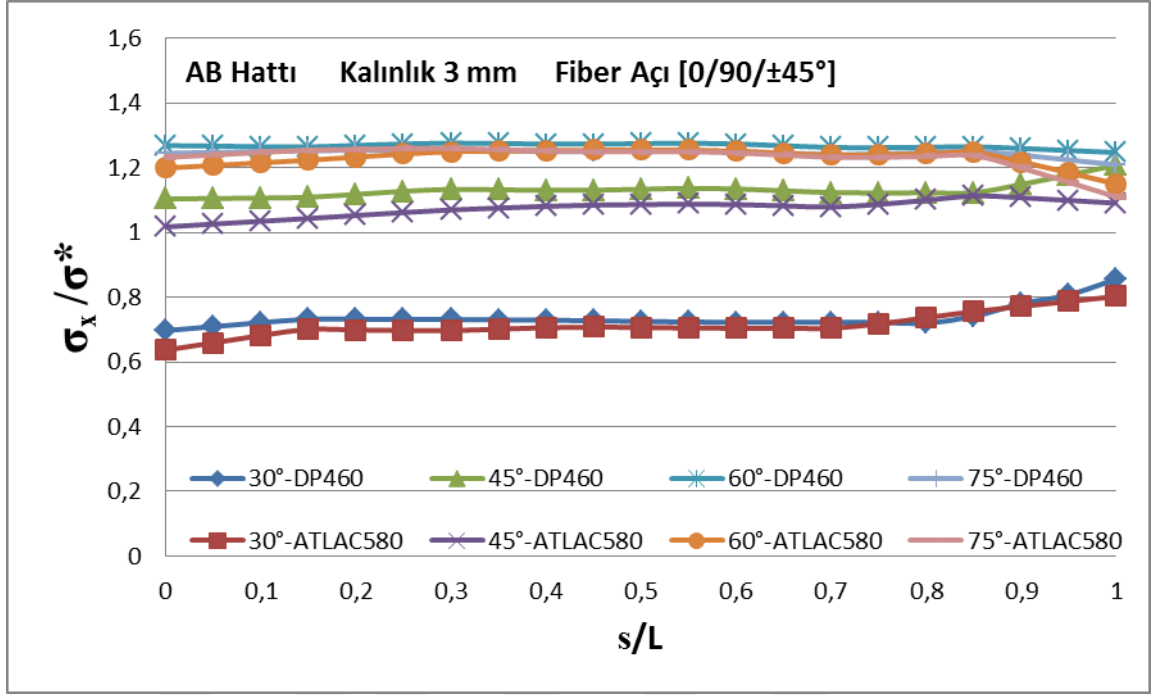


Şekil 3.50. $[\pm 45^\circ]$ serim açısındaki normalleştirilmiş τ_{xy} gerilmeleri

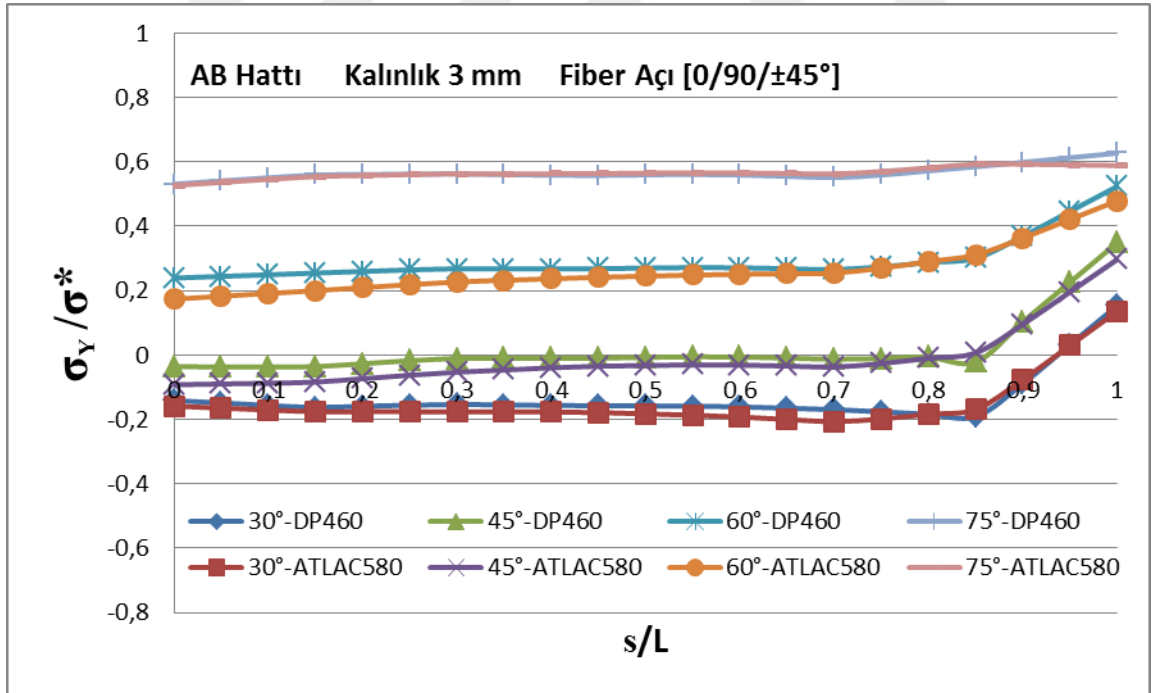


Şekil 3.51. [±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_{eqv} gerilmeleri

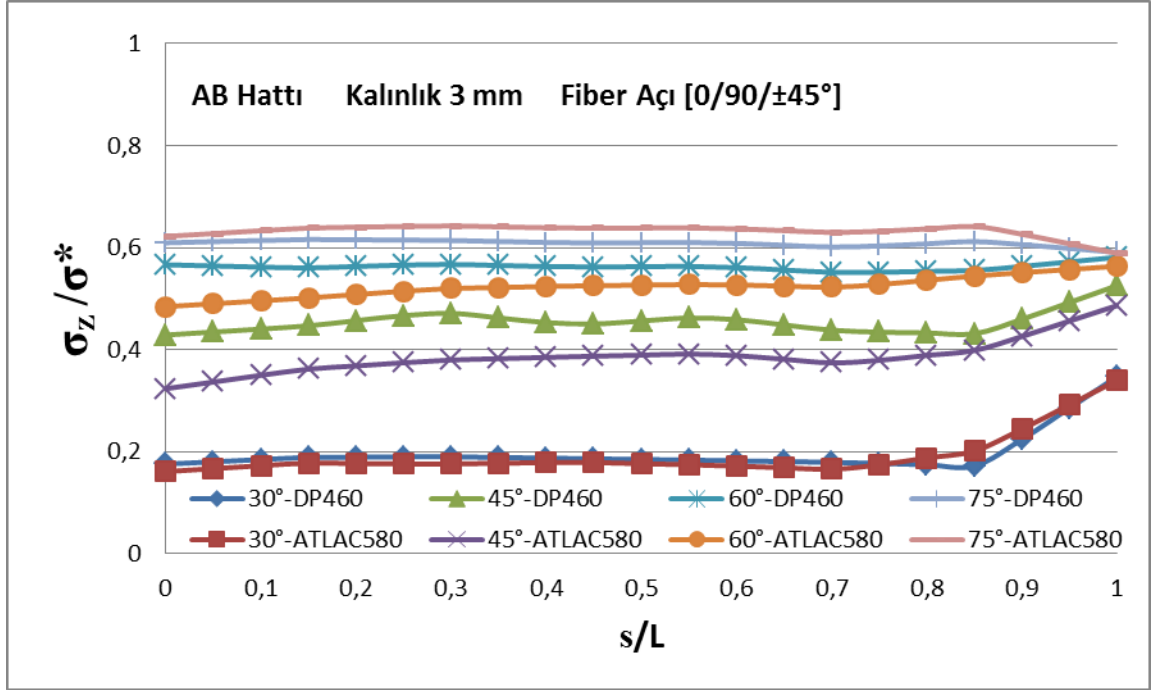
Şekil 3.52-3.56, 3 mm malzeme kalınlığında $[0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ]$ çok yönlü serim açısına sahip Dp460 ve Atlac580 ile birleştirilmiş yapışma bağlantılarında (A-B) hattı boyunca oluşan normalleştirilmiş gerilme dağılımlarını göstermektedir. Her iki yapıştırıcı için bindirme açısı arttıkça gerilmeler artmaktadır. 30° - 45° açılarda gerilme farkı daha çok iken 60° - 75° açılarda gerilme farkı biraz daha az çıkmıştır. Bunun nedeni olarak bindirme açısındaki geometrik yapı söylenebilir. $[0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ]$ serim açısındaki gerilme değerleri diğer iki serim açısına göre daha yüksek çıkmıştır. Dp460 yapıştırıcısına ait gerilmeler Atlac580 yapıştırıcısına ait gerilmelerden daha yüksek çıkmıştır. Çünkü çekme dayanımı daha yüksektir. Tüm gerilme değerlerinde ($s/L=0,5$) te diğer iki serim açısında görülen tepecikler bu serim açısında yoktur. Kayma gerilmeleri 30° bindirme açısında negatif çıkmıştır. Von-Mises gerilmelerinde küçük açıda daha büyük gerilmeler oluşmuştur. Von-Mises gerilmelerinde ($s/L=1$) de azalma, diğer gerilmelerde artış meydana gelmiştir. Bu serim açısı daha uniform gerilme dağılımı oluşturmuştur.



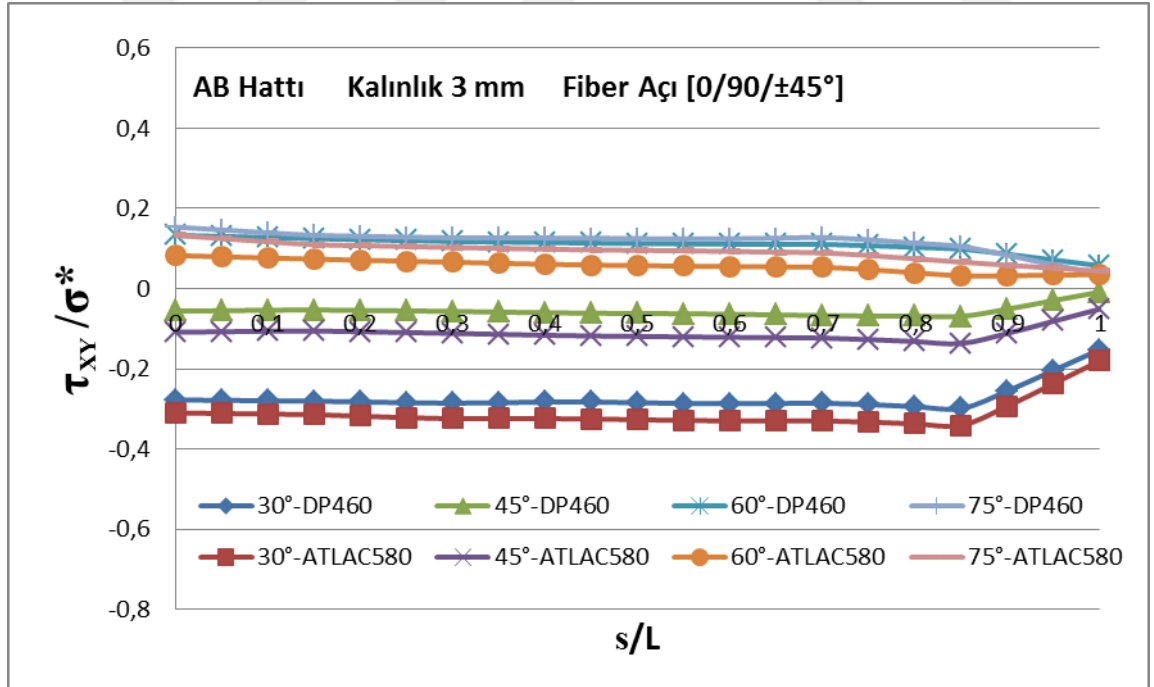
Şekil 3.52. [0°/90°/±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_x gerilmeleri



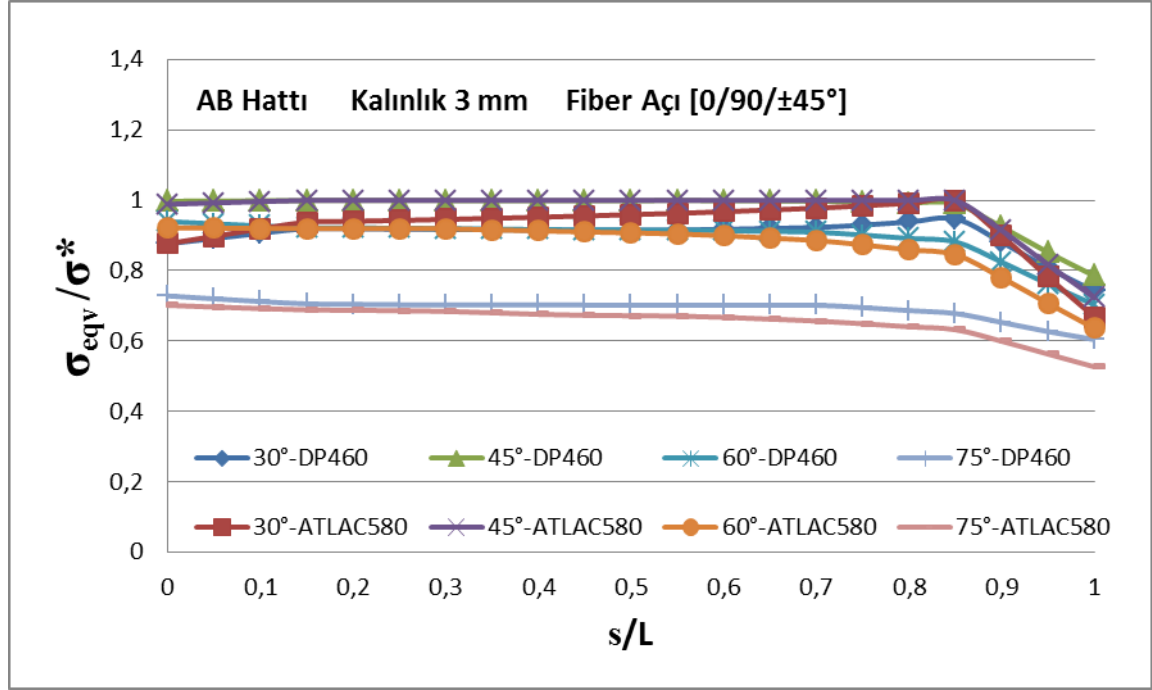
Şekil 3.53. [0°/90°/±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_y gerilmeleri



Şekil 3.54. [0°/90°/±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_z gerilmeleri

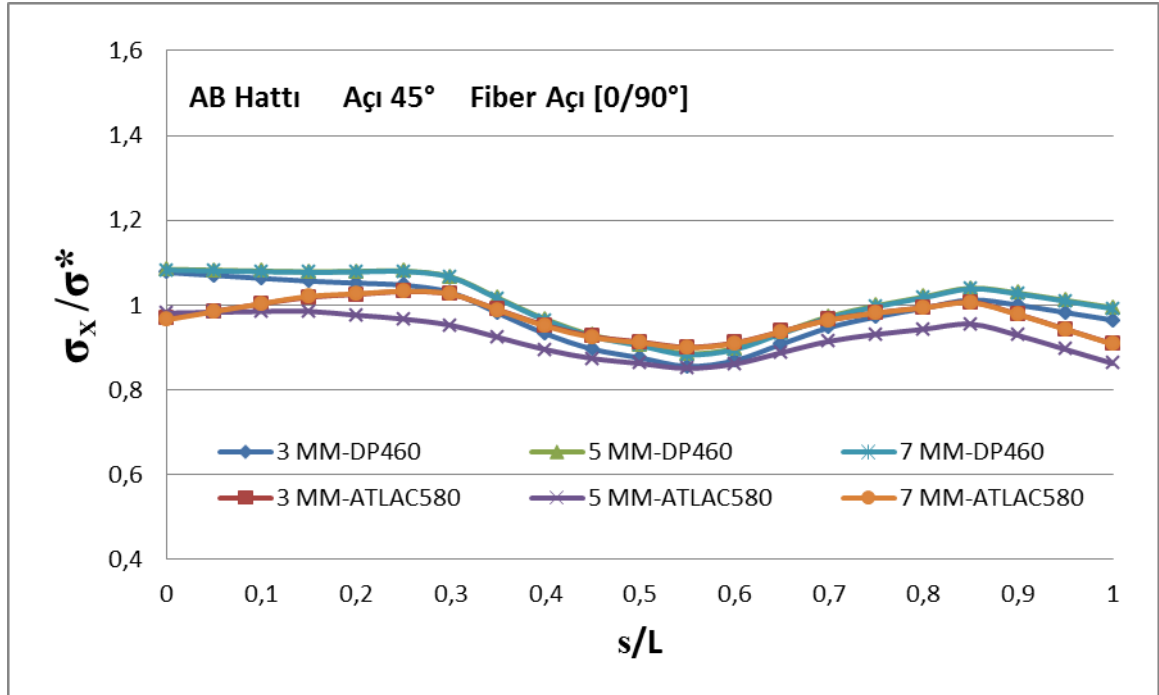


Şekil 3.55. [0°/90°/±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş τ_{xy} gerilmeleri

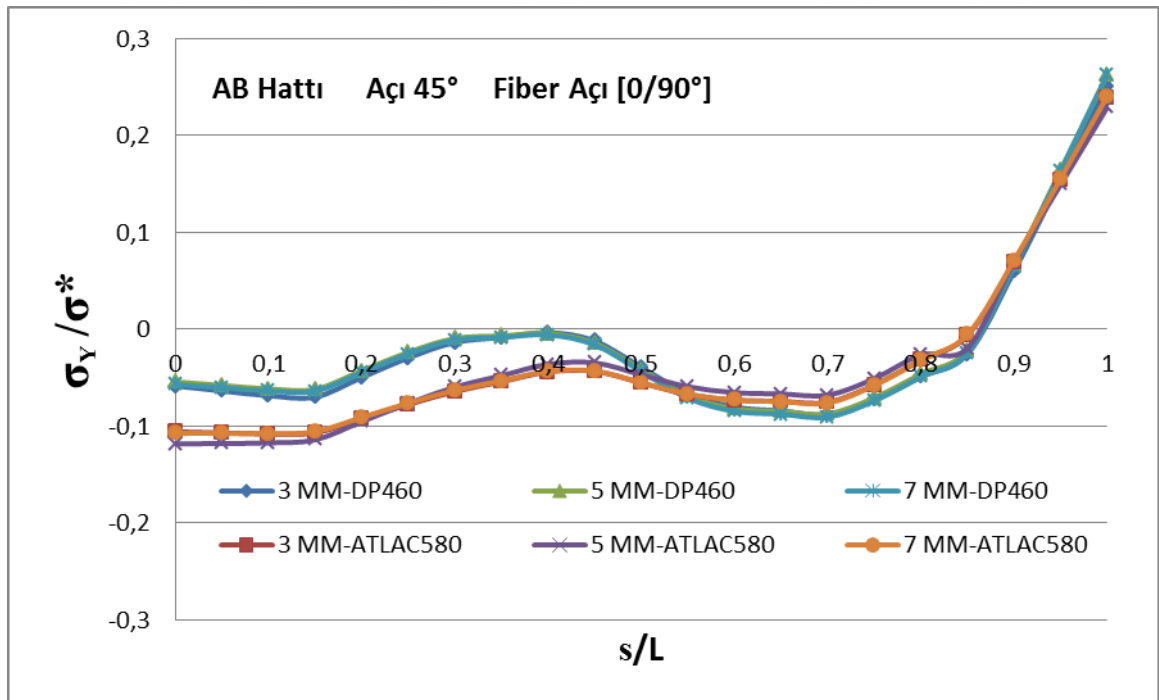


Şekil 3.56. [0°/90°/±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_{eqv} gerilmeleri

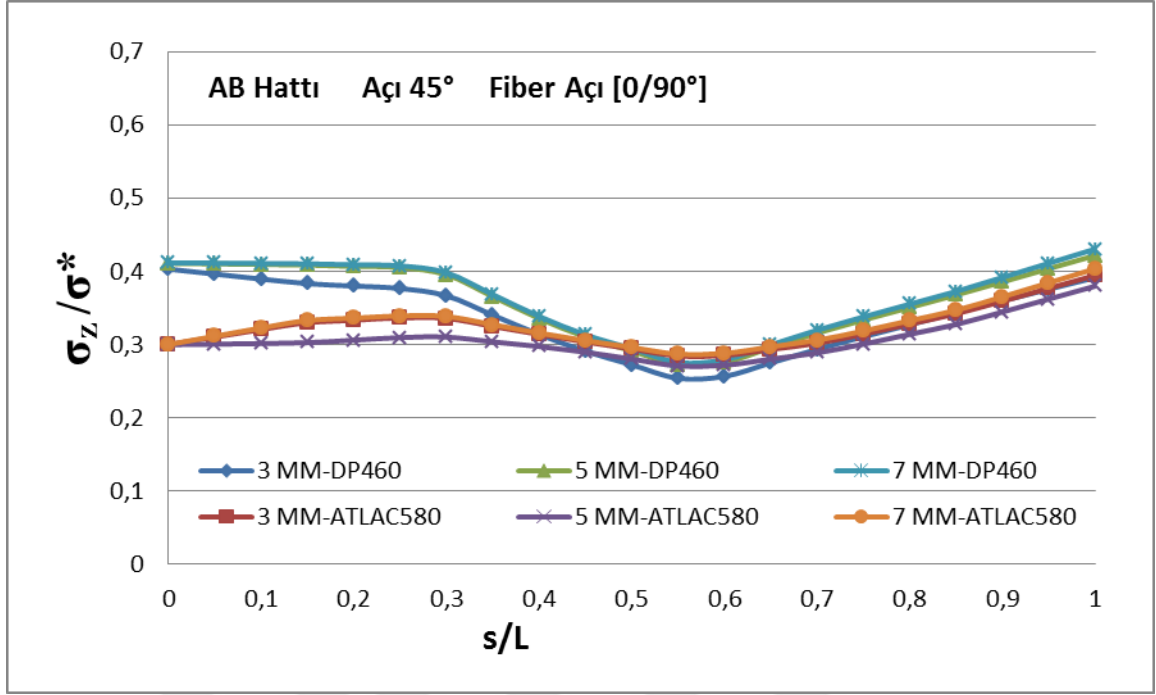
Şekil 3.57-3.61, 3 mm, 5 mm ve 7 mm malzeme kalınlığı için 45° bindirme açısında ve [0°/90°] serim açısına sahip Dp460 ve Atlac580 ile birleştirilmiş yapışma bağlantılarında (A-B) hattı boyunca oluşan normalleştirilmiş gerilme dağılımlarını göstermektedir. Dp460 yapıştırıcısına ait gerilmeler Atlac580 yapıştırıcısına ait gerilmelere göre biraz daha yüksek çıkmıştır. Çünkü çekme dayanımı daha yüksektir. Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıda malzeme kalınlığı bağlantı mukavemeti üzerine etkisinin olduğu, ancak bu etkinin önemli bir seviyede olmadığı görülmektedir. Malzeme kalınlığı arttıkça yapıştırılan alan artmış ve doğal olarak da taşınan yükte artmıştır. Tüm gerilme değerlerinde (s/L=0,5) te aşağı yönlü tepecikler görülmektedir. Kayma gerilmeleri tüm kalınlıklarda negatif çıkmıştır. Von-Mises gerilmelerinde (s/L=1) de azalma, diğer gerilmelerde artış meydana gelmiştir.



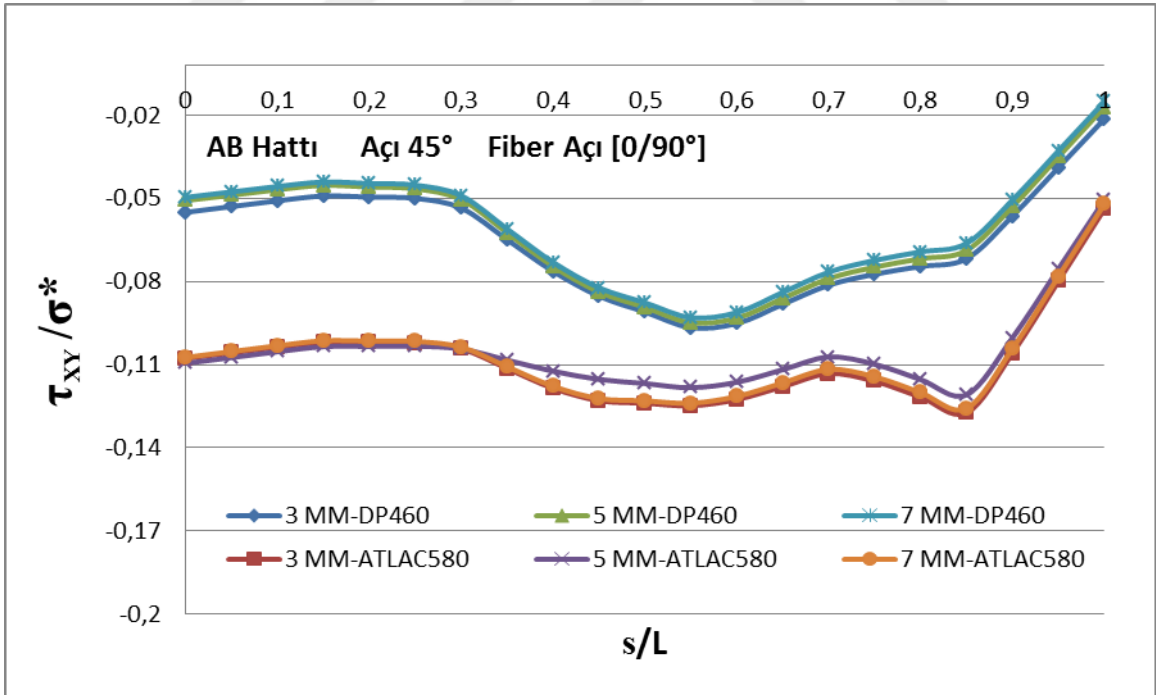
Şekil 3.57. 45° açığa ait [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_x gerilmeleri



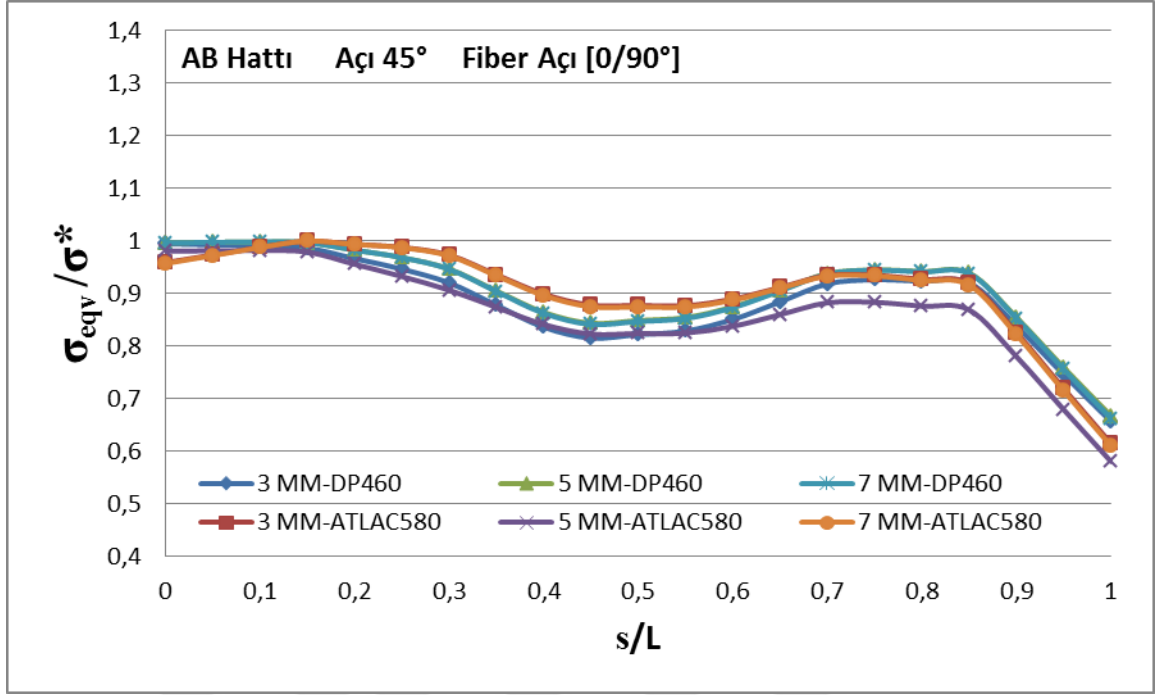
Şekil 3.58. 45° açığa ait [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_y gerilmeleri



Şekil 3.59. 45° açığa ait [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_z gerilmeleri

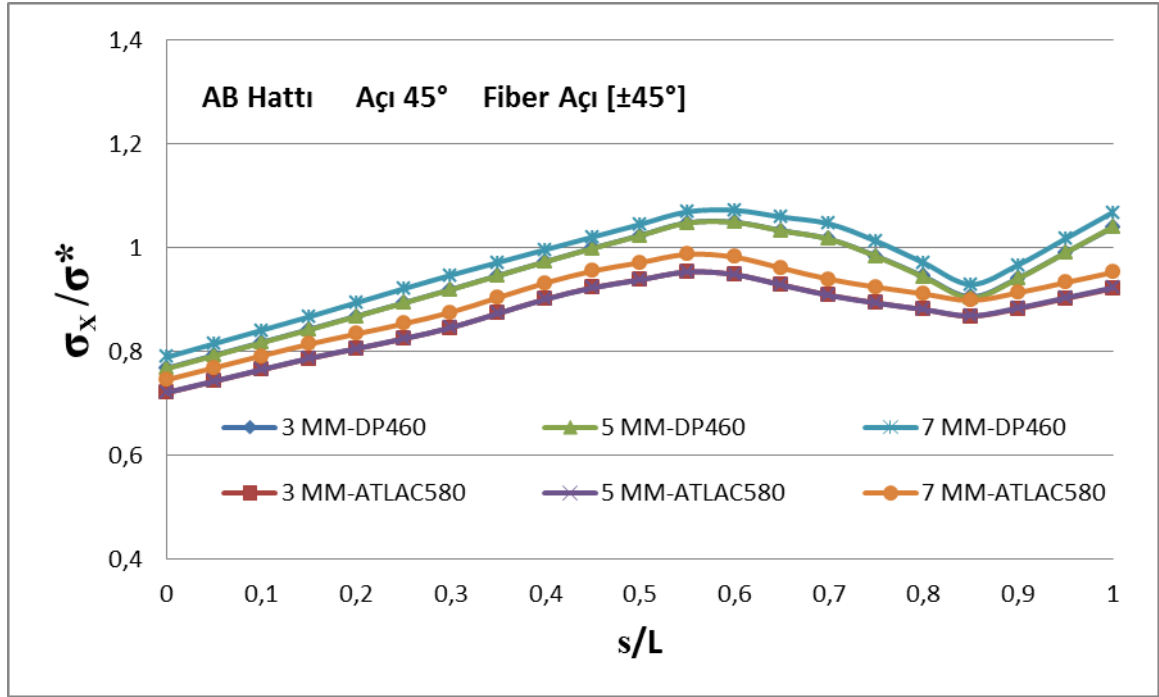


Şekil 3.60. 45° açığa ait [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş τ_{xy} gerilmeleri

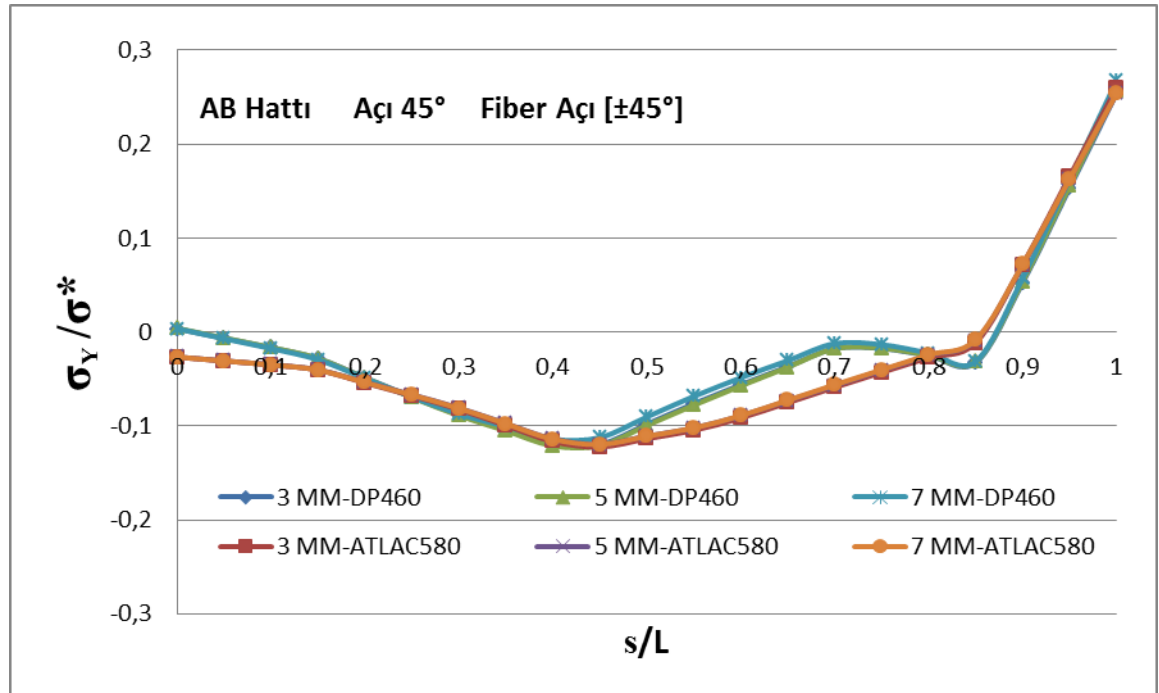


Şekil 3.61. 45° açığa ait [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_{eqv} gerilmeleri

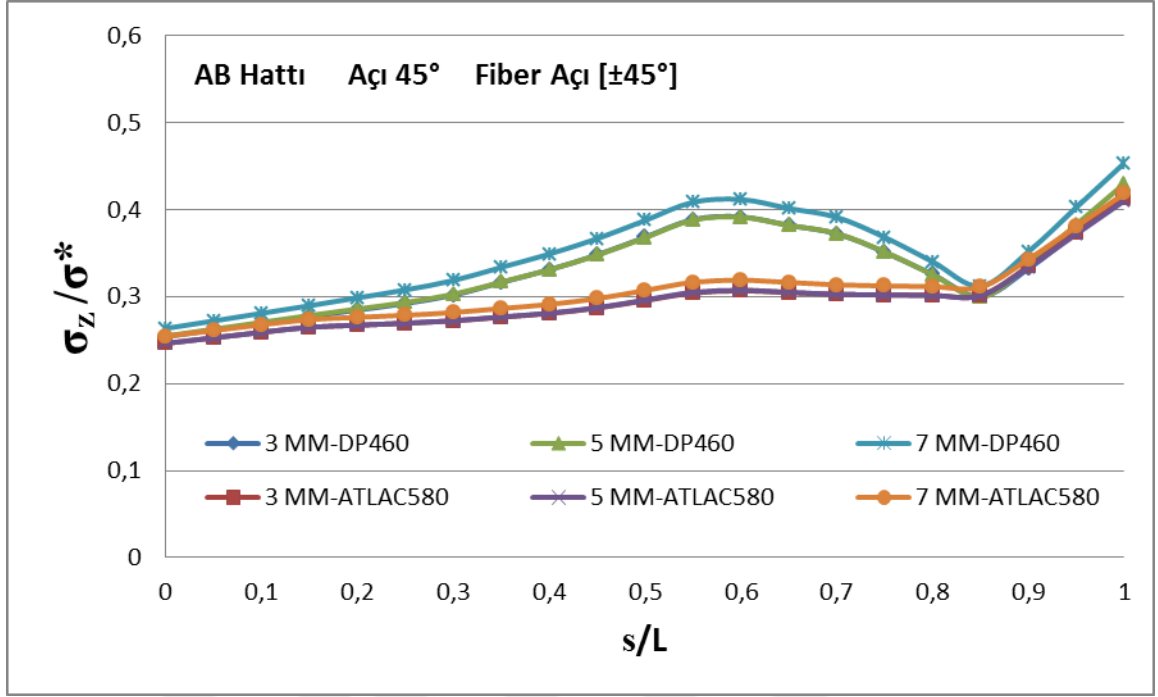
Şekil 3.62-3.66, 3 mm, 5 mm ve 7 mm malzeme kalınlığı için 45° bindirme açısında ve $[\pm 45^\circ]$ serim açısına sahip Dp460 ve Atlac580 ile birleştirilmiş yapışma bağlantılarında (A-B) hattı boyunca oluşan normalleştirilmiş gerilme dağılımlarını göstermektedir. Dp460 yapıştırıcısına ait gerilmeler Atlac580 yapıştırıcısına ait gerilmelere göre biraz daha yüksek çıkmıştır. Çünkü çekme dayanımı daha yüksektir. Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıda malzeme kalınlığı bağlantı mukavemeti üzerine etkisinin olduğu, ancak bu etkinin önemli bir seviyede olmadığı görülmektedir. Malzeme kalınlığı arttıkça yapıştırılan alan artmış ve doğal olarak da taşınan yükte artmıştır. Tüm gerilme değerlerinde ($s/L=0,5$) te yukarı yönlü tepecikler görülmektedir. Kayma gerilmeleri tüm kalınlıklarda negatif çıkmıştır. Gerilme değerleri 5 mm ve 7 mm kalınlık için hemen hemen çakışık çıkmıştır. Von-Mises gerilmelerinde ($s/L=0$ ve $s/L=1$) de azalma, diğer gerilmelerde artış meydana gelmiştir. Von-Mises gerilme değeri ($s/L=0,5$) te maksimum değere ulaşmıştır.



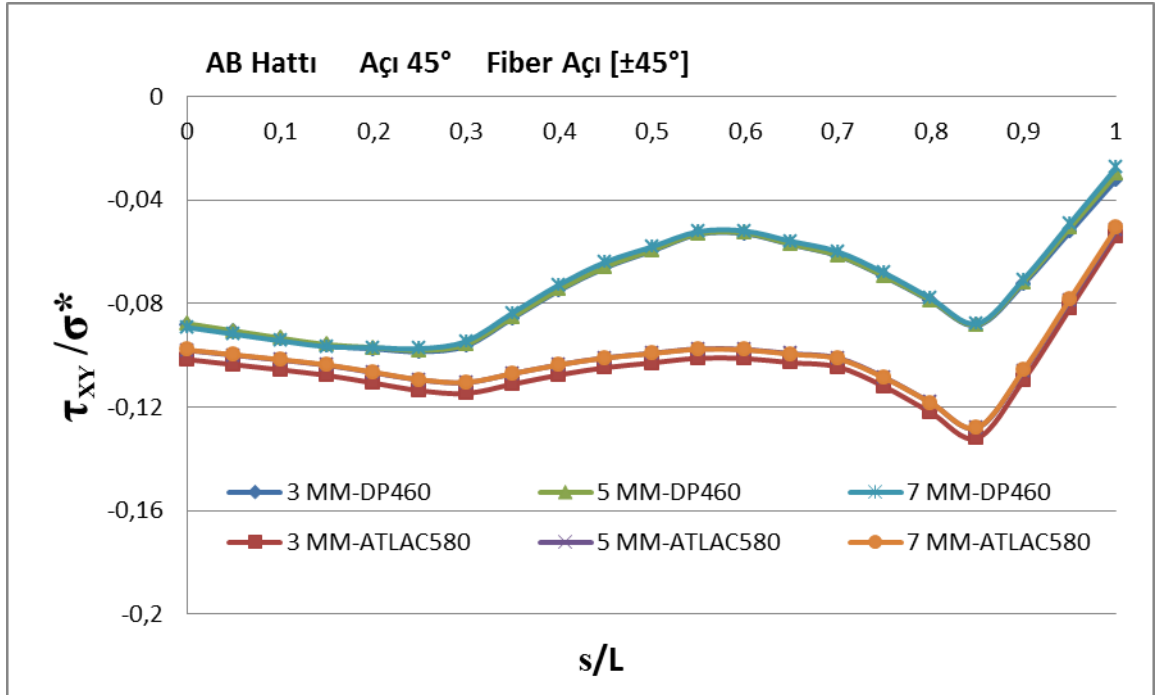
Şekil 3.62. 45° açığa ait [±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_x gerilmeleri



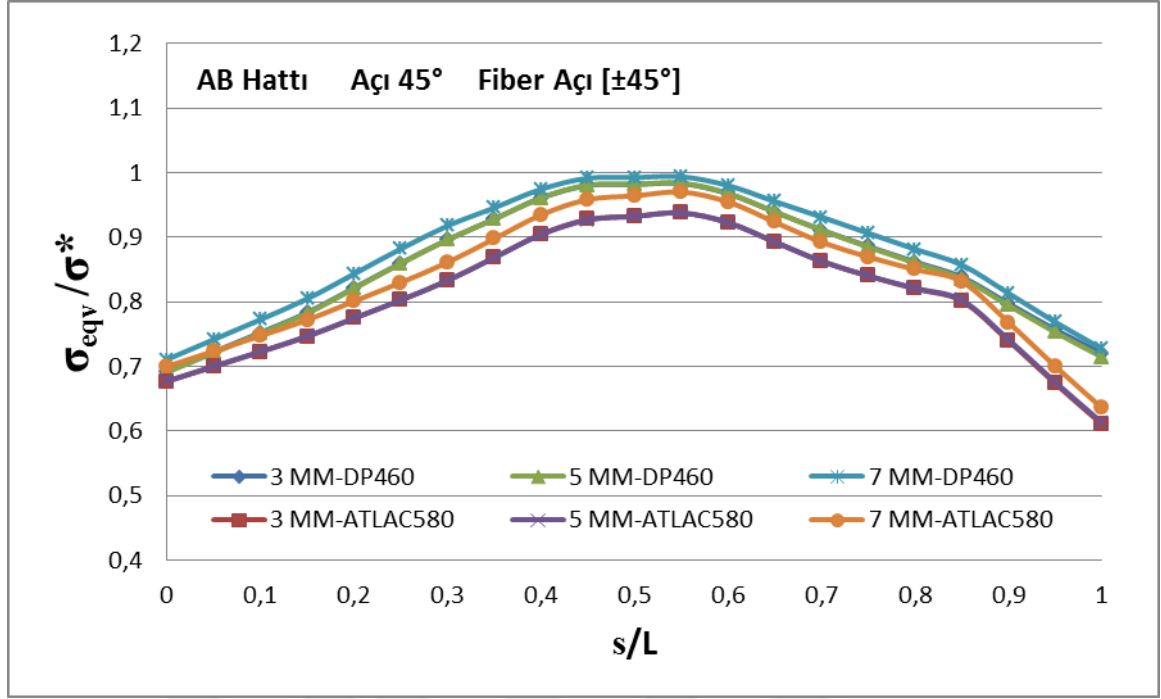
Şekil 3.63. 45° açığa ait [±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_y gerilmeleri



Şekil 3.64. 45° açığa ait [±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_z gerilmeleri

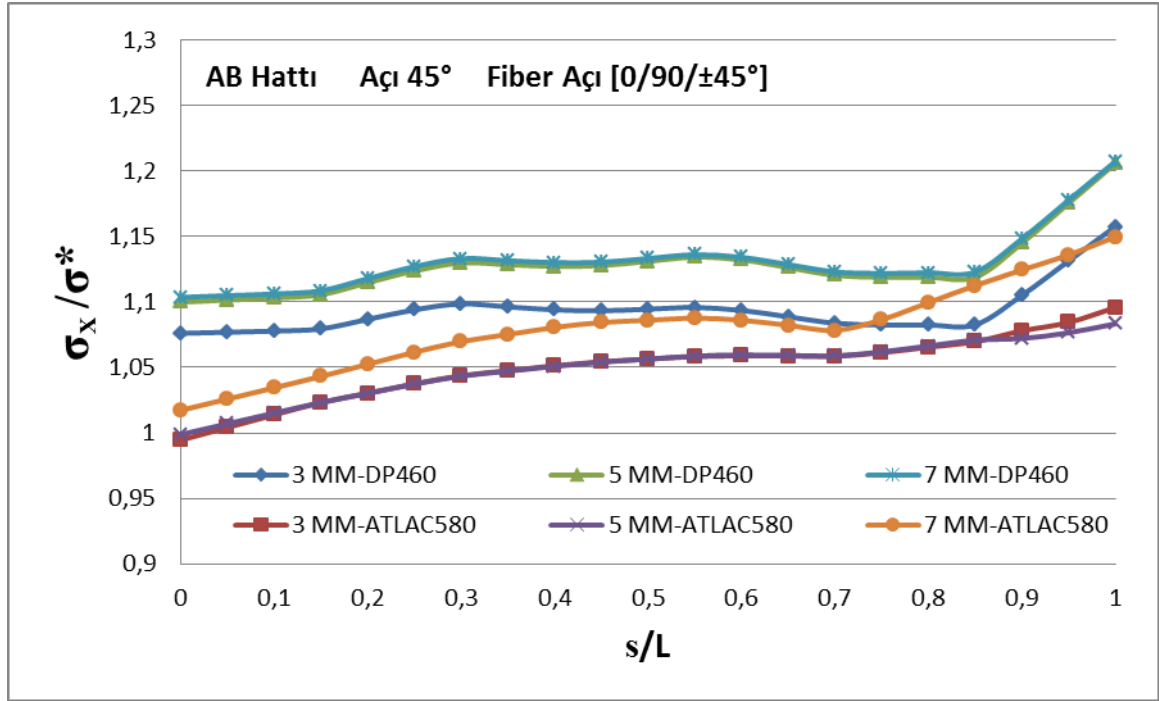


Şekil 3.65. 45° açığa ait [±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş τ_{xy} gerilmeleri

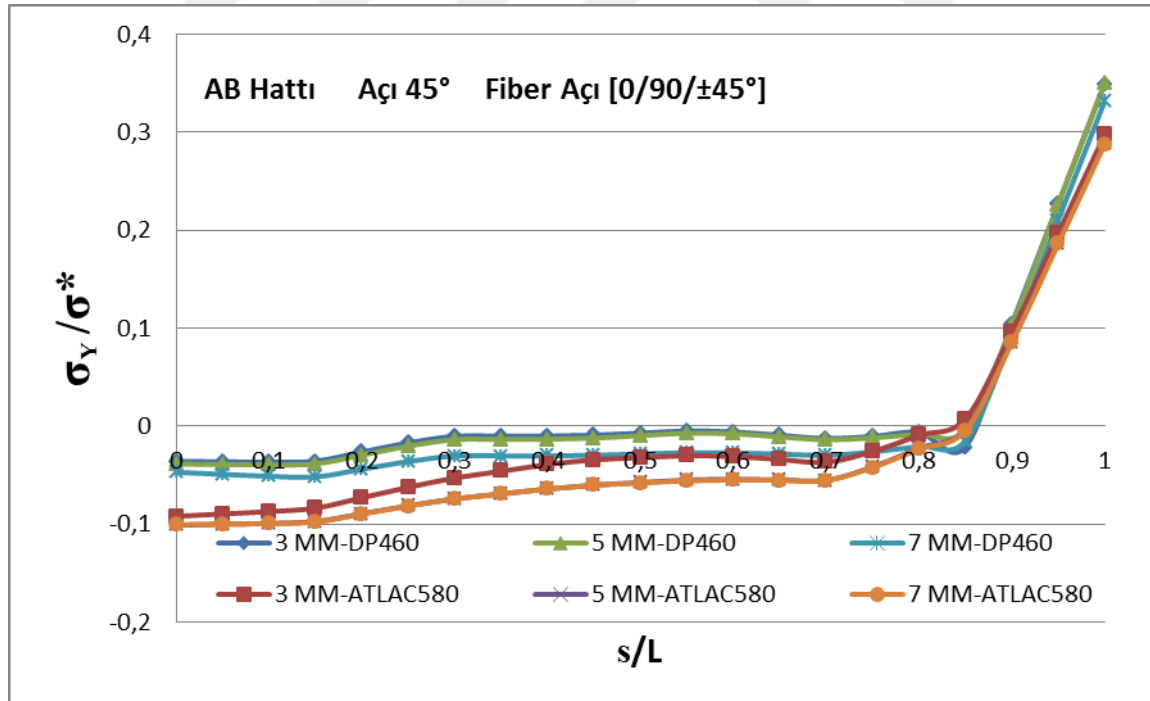


Şekil 3.66. 45° açıda serim açısındaki normalleştirilmiş σ_{eqv} gerilmeleri

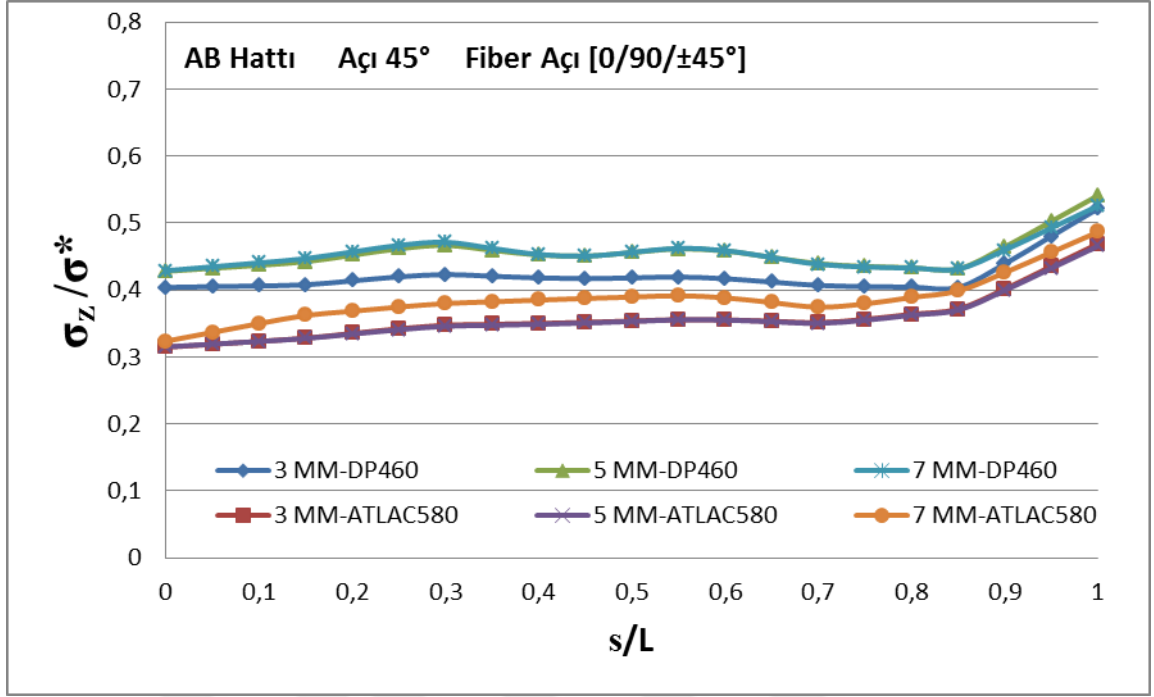
Şekil 3.67-3.71, 3 mm, 5 mm ve 7 mm malzeme kalınlığı için 45° bindirme açısında ve [0°/90°/±45°] serim açısına sahip Dp460 ve Atlac580 ile birleştirilmiş yapışma bağlantılarında (A-B) hattı boyunca oluşan normalleştirilmiş gerilme dağılımlarını göstermektedir. Dp460 yapıştırıcısına ait gerilmeler Atlac580 yapıştırıcısına ait gerilmelere göre biraz daha yüksek çıkmıştır. Çünkü çekme dayanımı daha yüksektir. Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıda malzeme kalınlığı bağlantı mukavemeti üzerine etkisinin olduğu, ancak bu etkinin önemli bir seviyede olmadığı görülmektedir. Malzeme kalınlığı arttıkça yapıştırılan alan artmış ve doğal olarak da taşınan yükte artmıştır. Tüm gerilme değerlerinde diğer iki serim açısında (s/L=0,5) te görülen tepecikler bu serim açısında yoktur. Daha uniform bir gerilme dağılımı oluşmuştur. Kayma gerilmeleri tüm kalınlıklarda negatif çıkmıştır. Gerilme değerleri 5 mm ve 7 mm kalınlık için hemen hemen çakışık çıkmıştır. Von-Mises gerilmelerinde (s/L=1) de azalma, diğer gerilmelerde artış meydana gelmiştir.



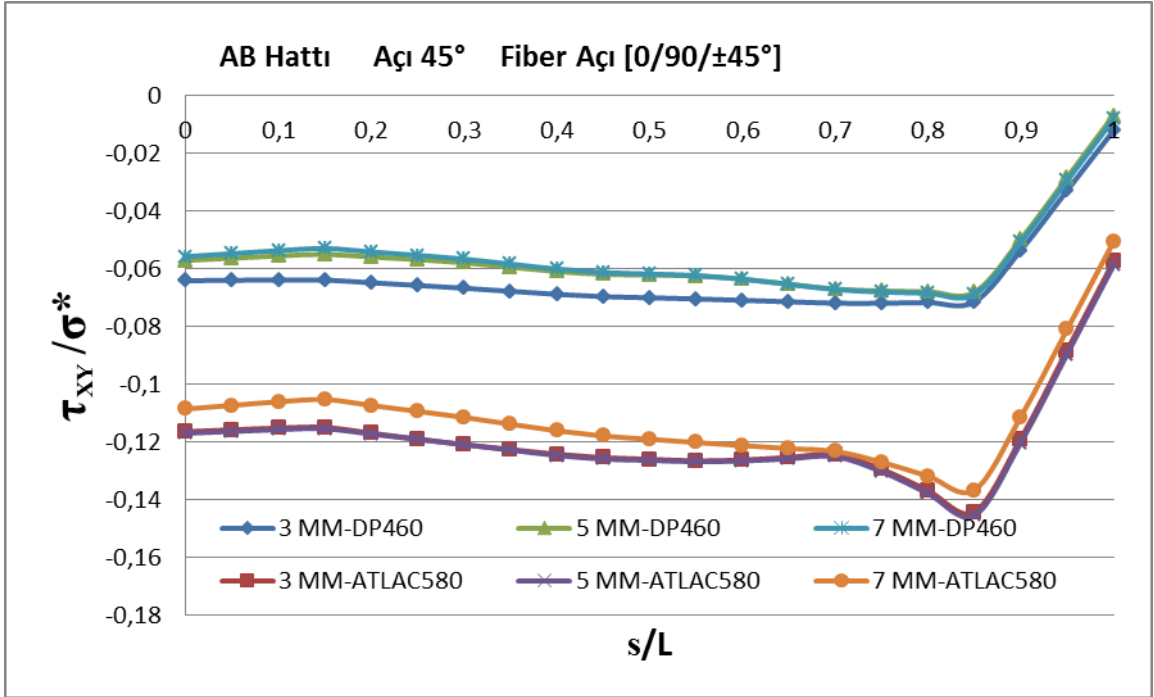
Şekil 3.67. 45° açığa ait [0°/90°/±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_x gerilmeleri



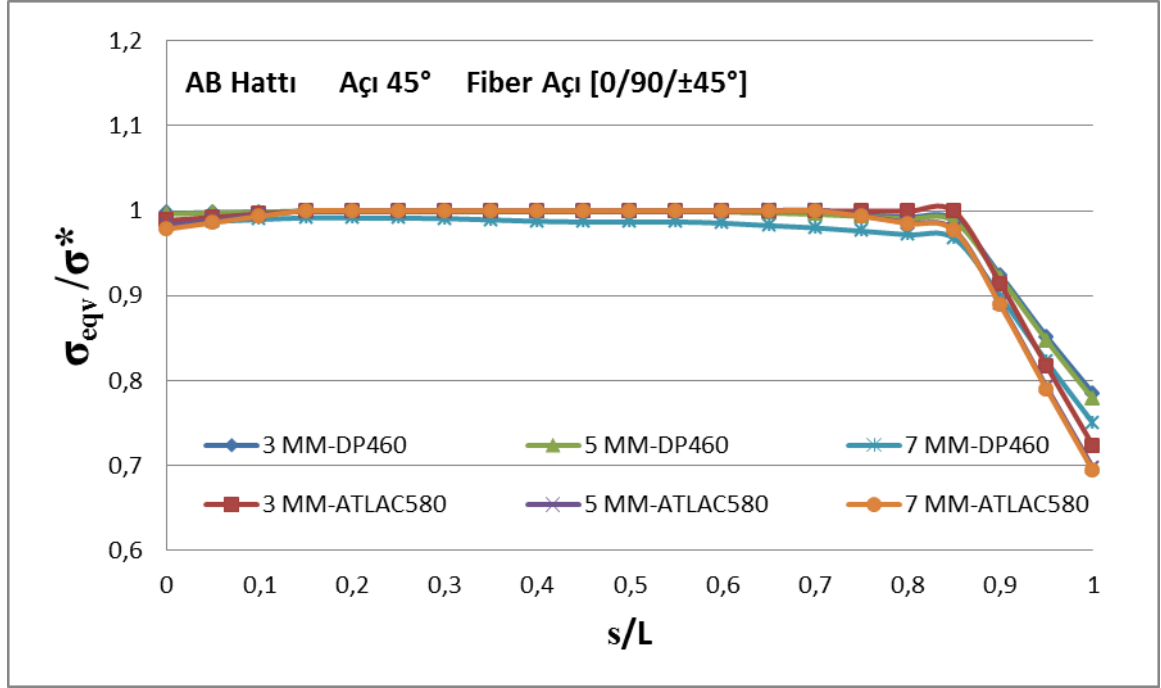
Şekil 3.68. 45° açığa ait [0°/90°/±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_y gerilmeleri



Şekil 3.69. 45° açığa ait [0°/90°/±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_z gerilmeleri



Şekil 3.70. 45° açığa ait [0°/90°/±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş τ_{xy} gerilmeleri

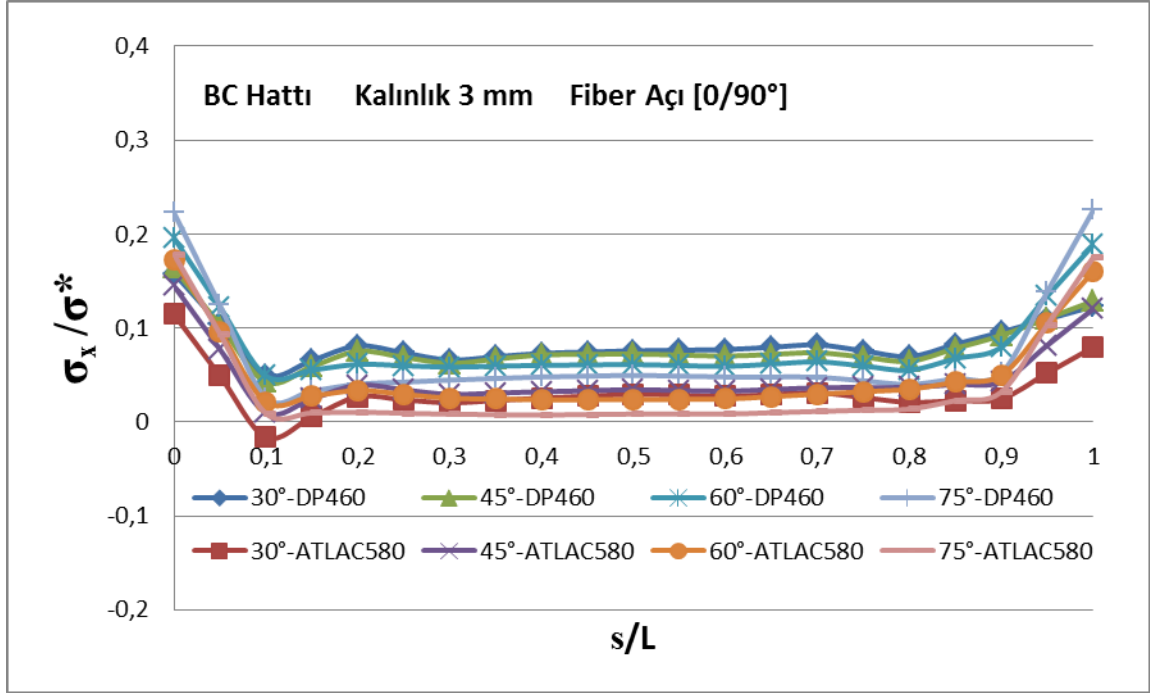


Şekil 3.71. 45° açığa ait [0°/90°/±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_{eqv} gerilmeleri

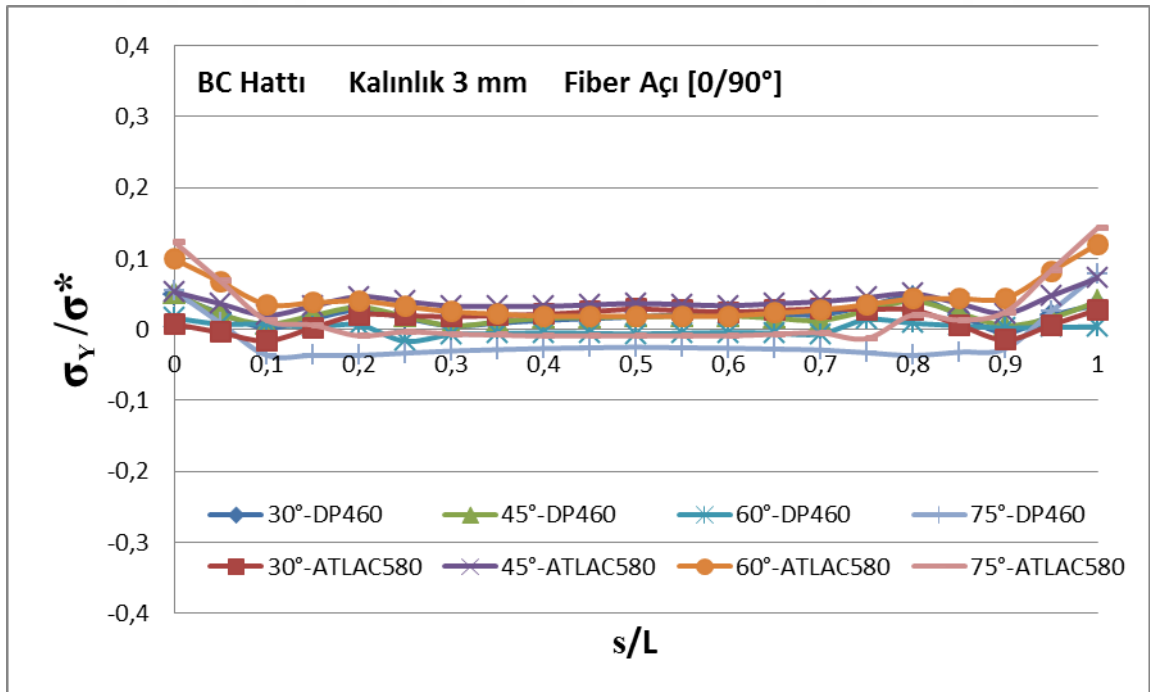
3.3.1.2. BC Hattı

Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıda, yapıştırıcı yüzeyinde B noktasından C noktasına (BC) olmak üzere; kritik hatlar belirlenip gerilme dağılımları bu hatlar üzerinden alınarak grafikler oluşturulmuştur (Şekil 3.41).

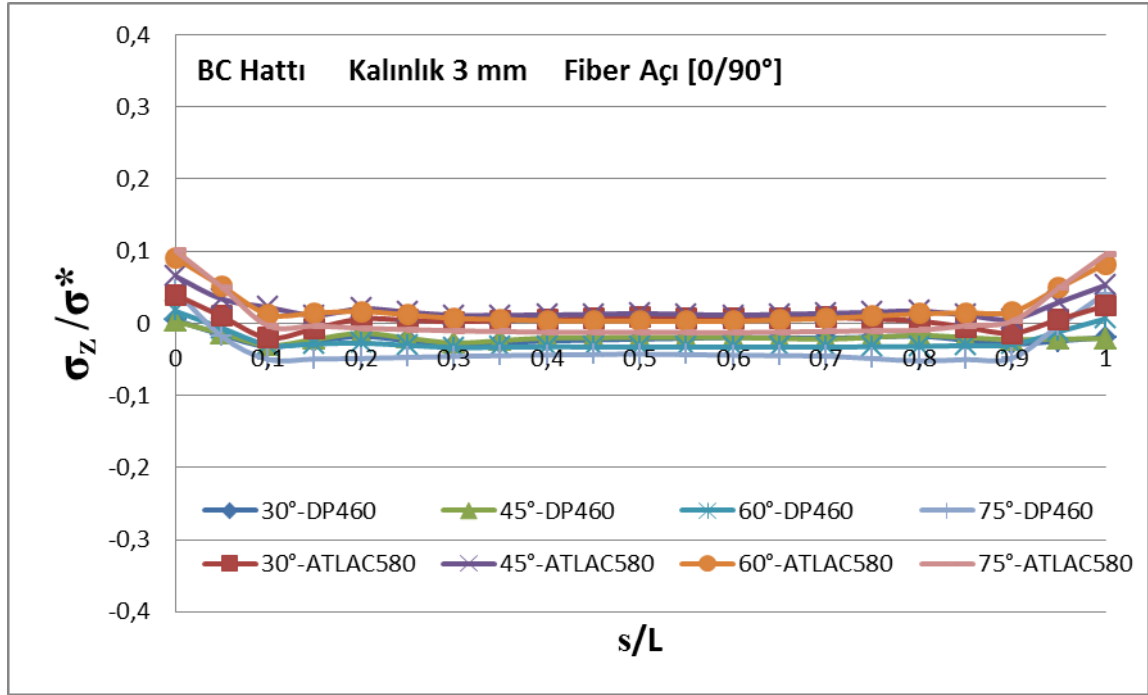
Şekil 3.72-3.76, 3 mm malzeme kalınlığında [0°/90°] serim açısına sahip Dp460 ve Atlac580 ile birleştirilmiş yapışma bağlantılarında (B-C) hattı boyunca oluşan normalleştirilmiş gerilme dağılımlarını göstermektedir. Her iki yapıştırıcı için bindirme açısı arttıkça gerilmeler artmaktadır. Bindirme açılarına ait gerilme değerleri birbirine yakın çıkmıştır. Numunenin geometrik yapısı (BC) hattı için açısız olduğundan gerilmeler yakın çıktığı söylenebilir. Kayma gerilmesi ve von-Mises gerilmelerinde Atlac580 yapıştırıcısına ait gerilmeler Dp460 yapıştırıcısına ait gerilmelerden biraz daha yüksek çıkmıştır. Bu farklılık yapıştırıcının karakteristiğinden kaynaklandığı söylenebilir. Normal gerilme değerlerinde (s/L=0) de azalmalar (s/L=1) artışlar görülmektedir. Von-Mises gerilmelerinde küçük açıda daha büyük gerilmeler oluşmuştur. Von-Mises gerilmelerinde (s/L=1) de azalma, diğer gerilmelerde artış meydana gelmiştir.



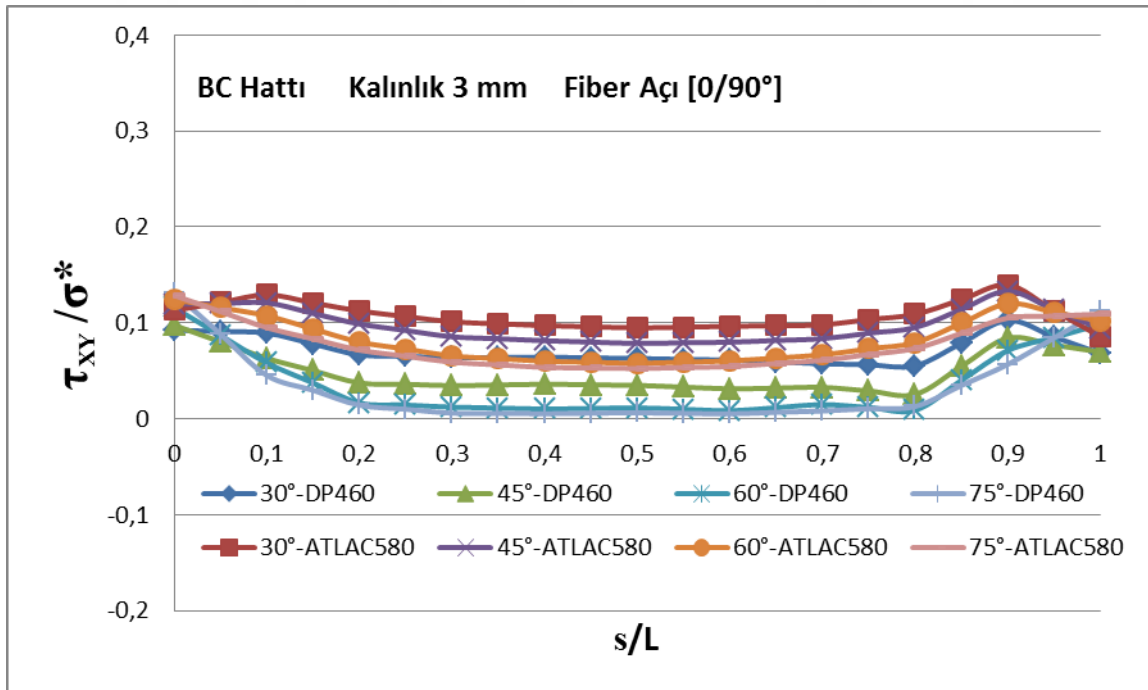
Şekil 3.72. [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_x gerilmeleri



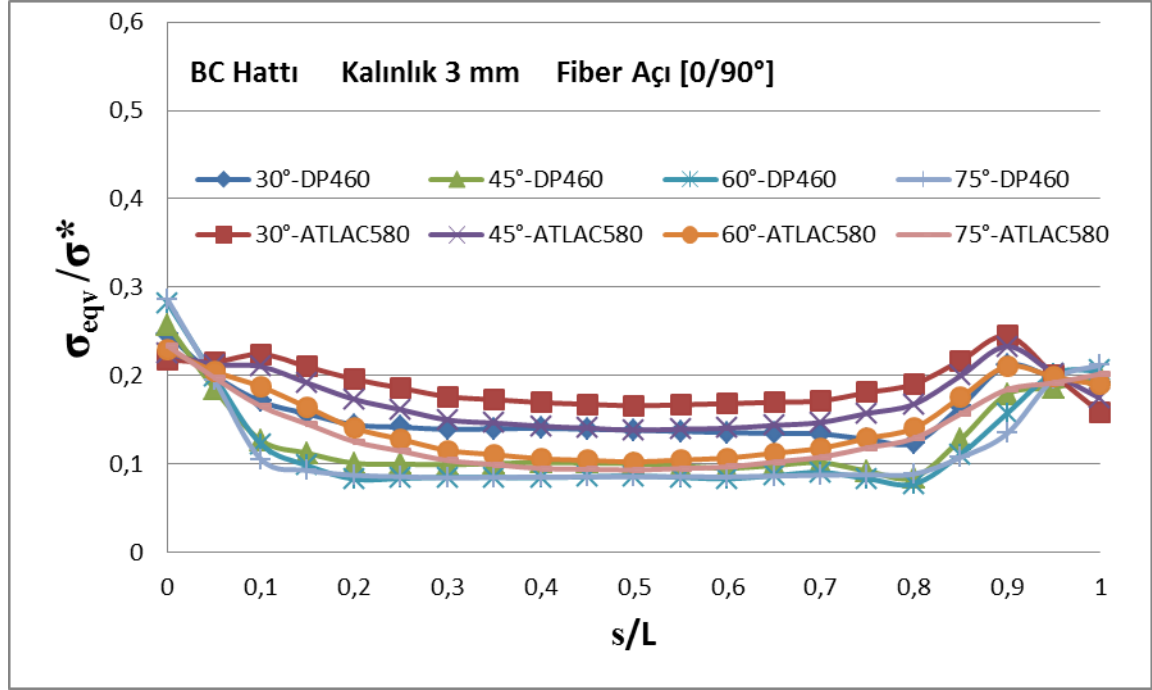
Şekil 3.73. [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_y gerilmeleri



Şekil 3.74. [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_z gerilmeleri

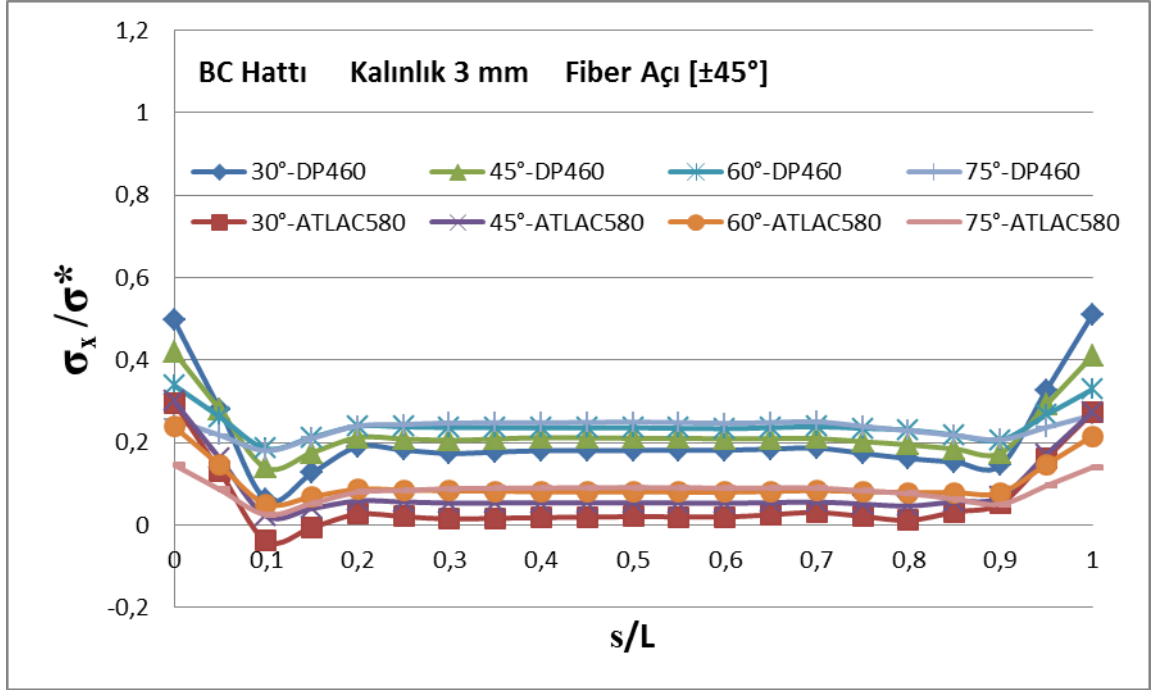


Şekil 3.75. [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş τ_{xy} gerilmeleri

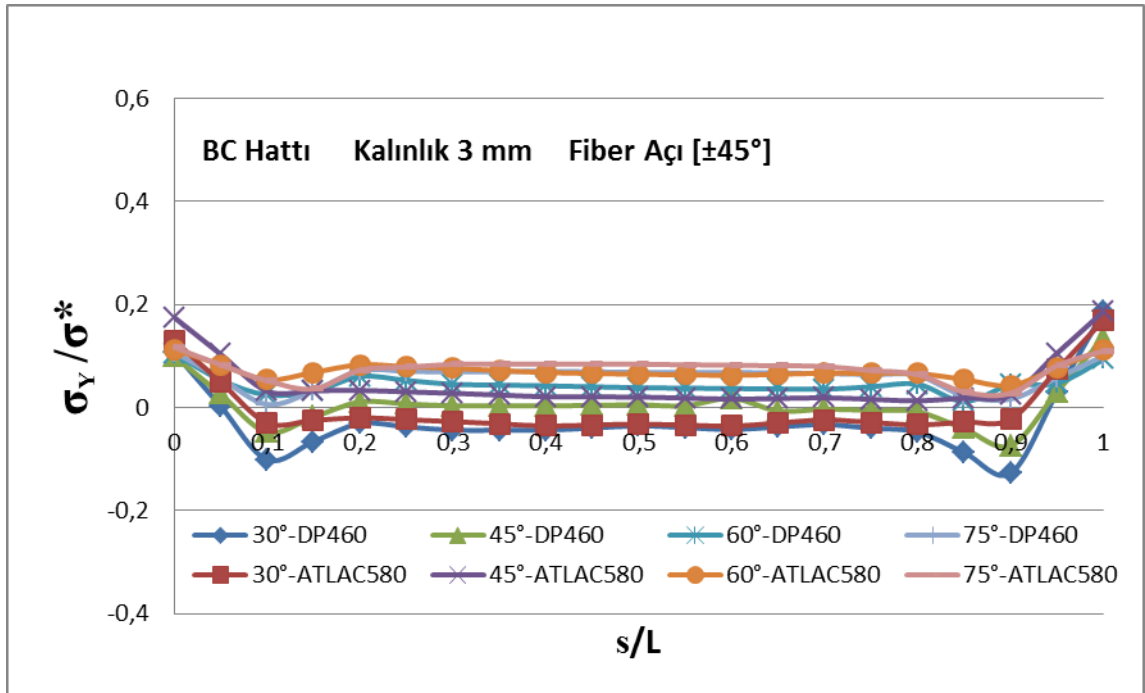


Şekil 3.76. [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_{eqv} gerilmeleri

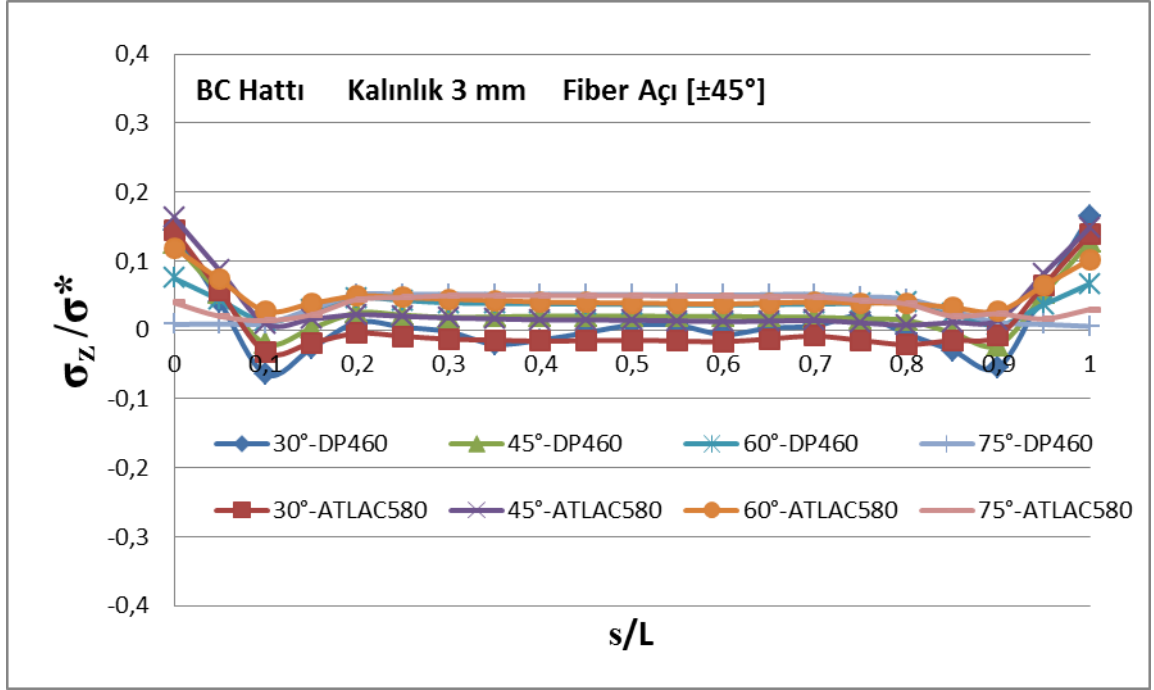
Şekil 3.77-3.81, 3 mm malzeme kalınlığında $[\pm 45^\circ]$ serim açısına sahip Dp460 ve Atlac580 ile birleştirilmiş yapışma bağlantılarında (B-C) hattı boyunca oluşan normalleştirilmiş gerilme dağılımlarını göstermektedir. Her iki yapıştırıcı için bindirme açısı arttıkça gerilmeler artmaktadır. Bindirme açılarına ait gerilme değerleri birbirine yakın çıkmıştır. Numunenin geometrik yapısı (BC) hattı için açısız olduğundan gerilmeler yakın çıktığı söylenebilir. $[\pm 45^\circ]$ serim açısına ait gerilmeler $[0^\circ/90^\circ]$ serim açısına göre daha yüksek çıkmıştır. Kayma gerilmesinde Atlac580 yapıştırıcısına ait gerilmeler Dp460 yapıştırıcısına ait gerilmelerden biraz daha yüksek çıkmıştır. Bu farklılık yapıştırıcının karakteristiğinden kaynaklandığı söylenebilir. Normal gerilme değerlerinde ($s/L=0$) de azalmalar ($s/L=1$) artışlar görülmektedir. Von-Mises gerilmelerinde küçük açıda daha büyük gerilmeler oluşmuştur. $[\pm 45^\circ]$ serim açısına göre von-Mises gerilmelerinde ($s/L=0$) de azalma, ($s/L=1$) de artış meydana gelmiştir.



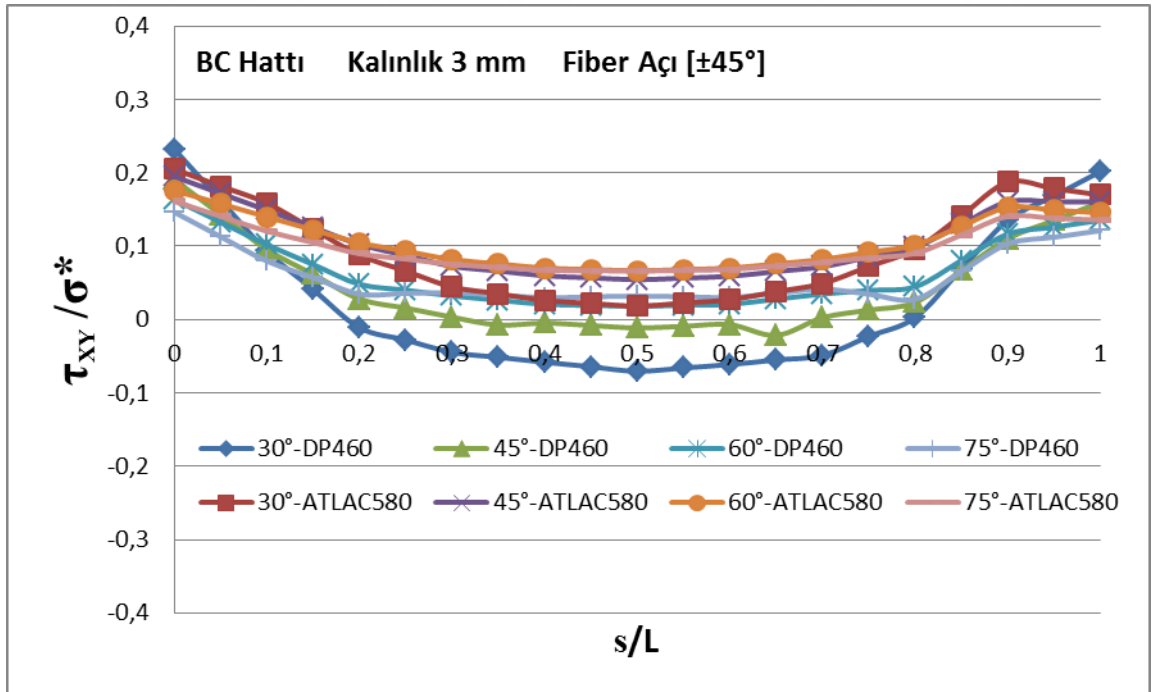
Şekil 3.77. [±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_x gerilmeleri



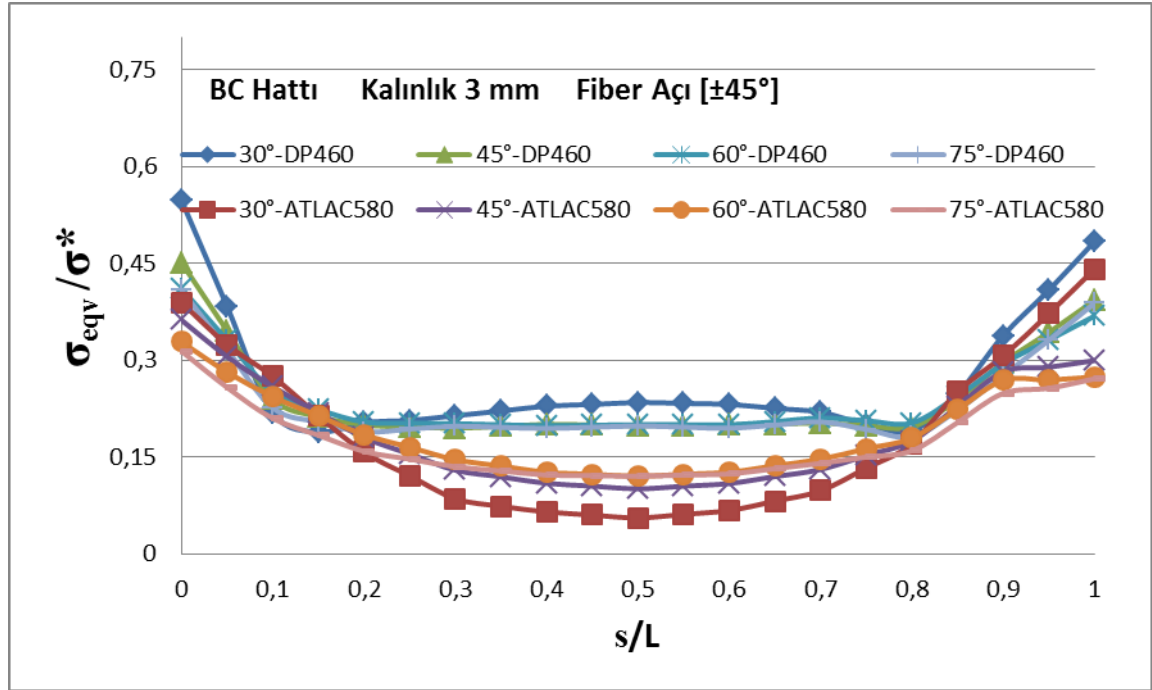
Şekil 3.78. [±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_y gerilmeleri



Şekil 3.79. [±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_z gerilmeleri

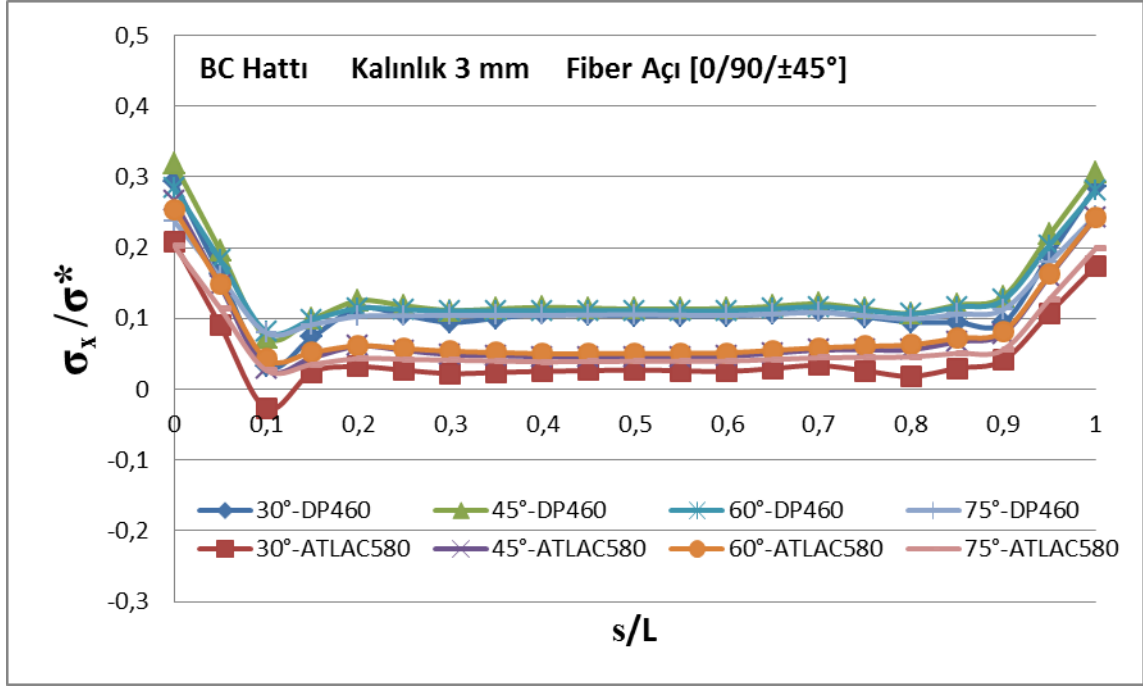


Şekil 3.80. [±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş τ_{xy} gerilmeleri

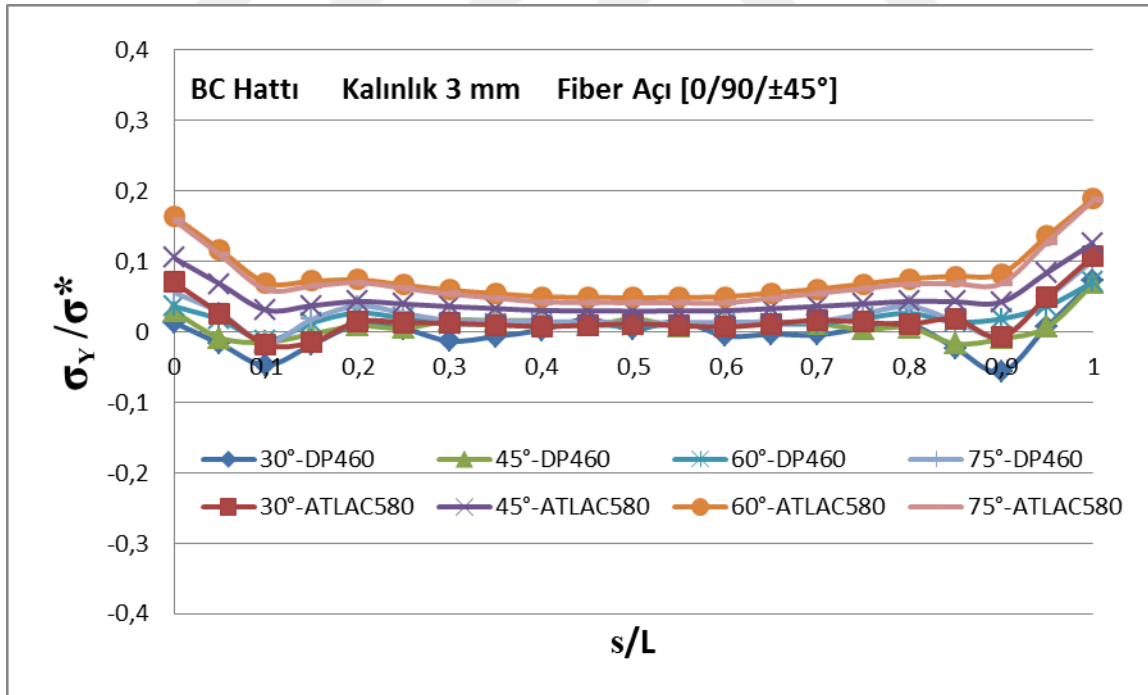


Şekil 3.81. [±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_{eqv} gerilmeleri

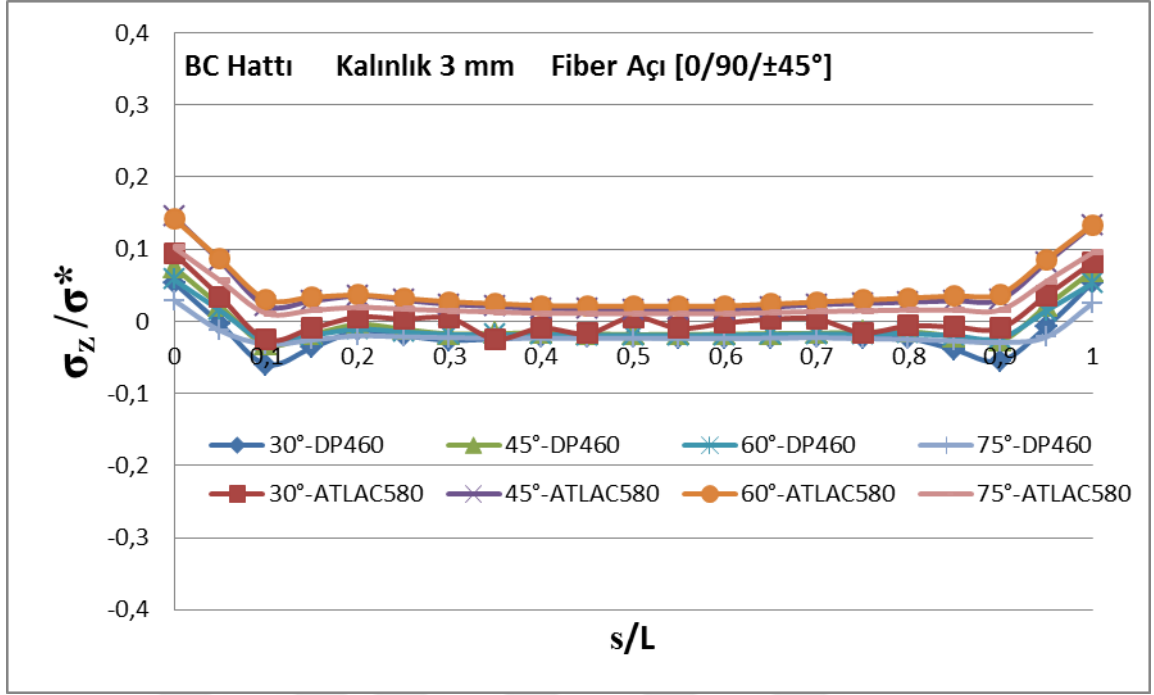
Şekil 3.82-3.86, 3 mm malzeme kalınlığında [0°/90°/±45°] serim açısına sahip Dp460 ve Atlac580 ile birleştirilmiş yapışma bağlantılarında (B-C) hattı boyunca oluşan normalleştirilmiş gerilme dağılımlarını göstermektedir. Her iki yapıştırıcı için bindirme açısı arttıkça gerilmeler artmaktadır. Bindirme açılarına ait gerilme değerleri birbirine yakın çıkmıştır. Numunenin geometrik yapısı (BC) hattı için açısız olduğundan gerilmeler yakın çıktığı söylenebilir. Kayma gerilmesi ve von-Mises gerilmelerinde, Atlac580 yapıştırıcısına ait gerilmeler Dp460 yapıştırıcısına ait gerilmelerden biraz daha yüksek çıkmıştır. Bu farklılık yapıştırıcının karakteristiğinden kaynaklandığı söylenebilir. Tüm gerilme değerlerinde ($s/L=0$) de azalmalar ($s/L=1$) artışlar görülmektedir. Kayma gerilmesi ve von-Mises gerilmelerinde küçük açıda daha büyük gerilmeler oluşmuştur. [0°/90°/±45°] serim açısında von-Mises gerilmeleri diğer serim açılarına göre daha yüksek çıkmıştır.



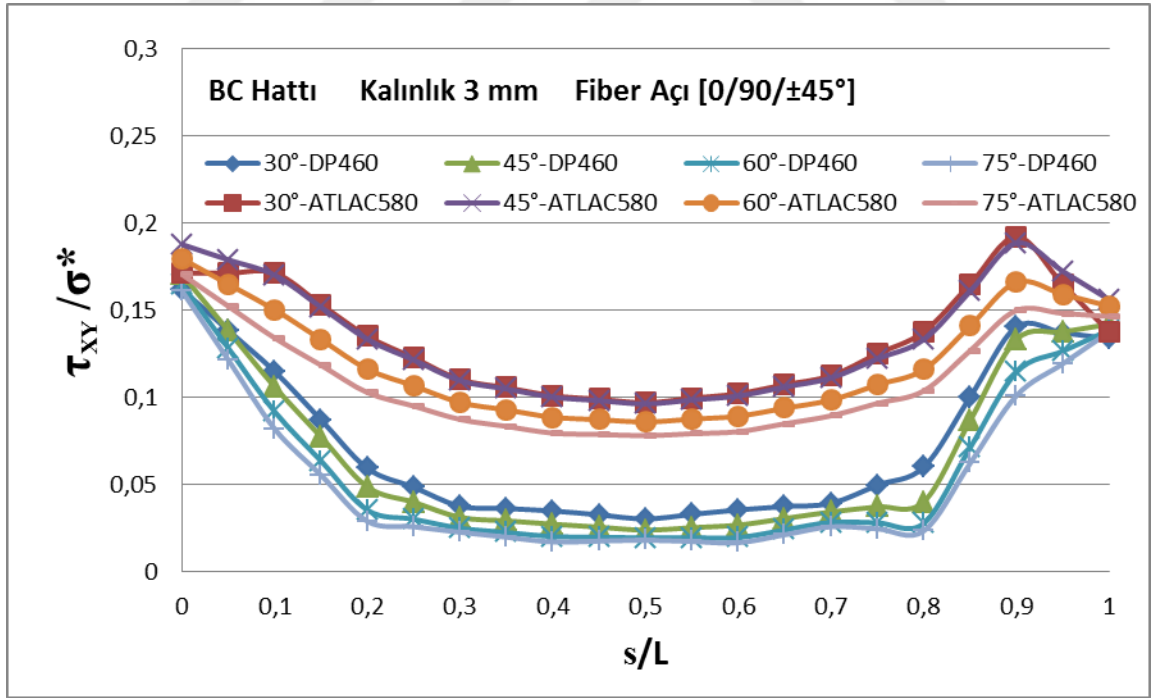
Şekil 3.82. [0°/90°/±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_x gerilmeleri



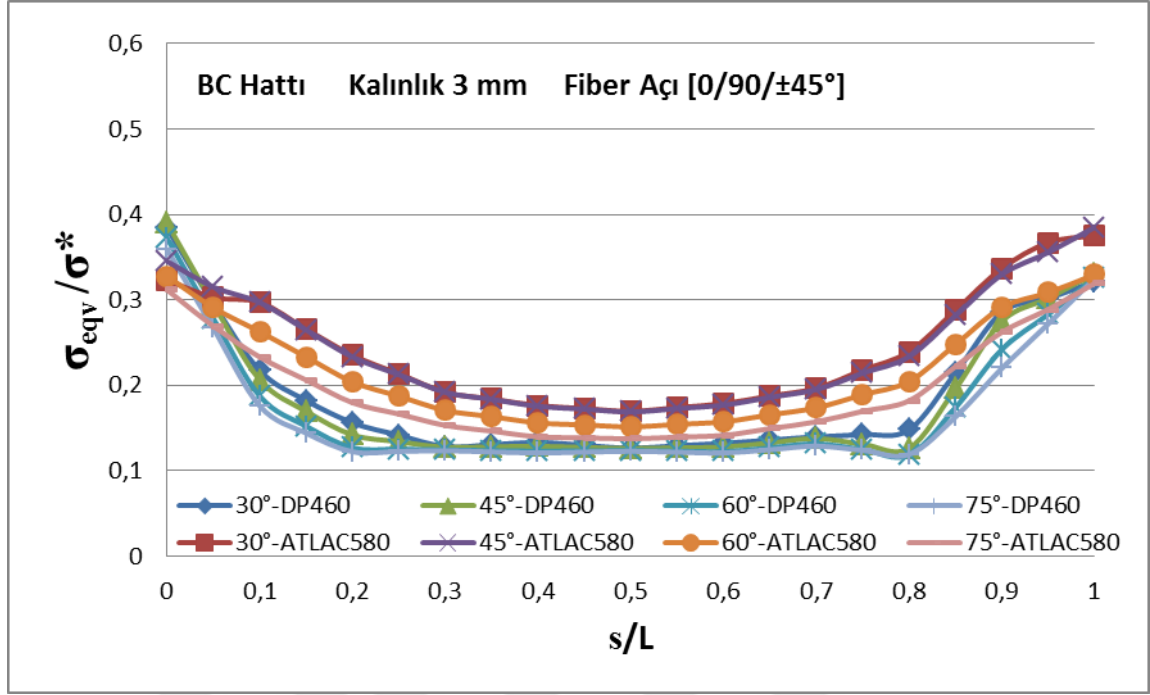
Şekil 3.83. [0°/90°/±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_y gerilmeleri



Şekil 3.84. [0°/90°/±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_z gerilmeleri

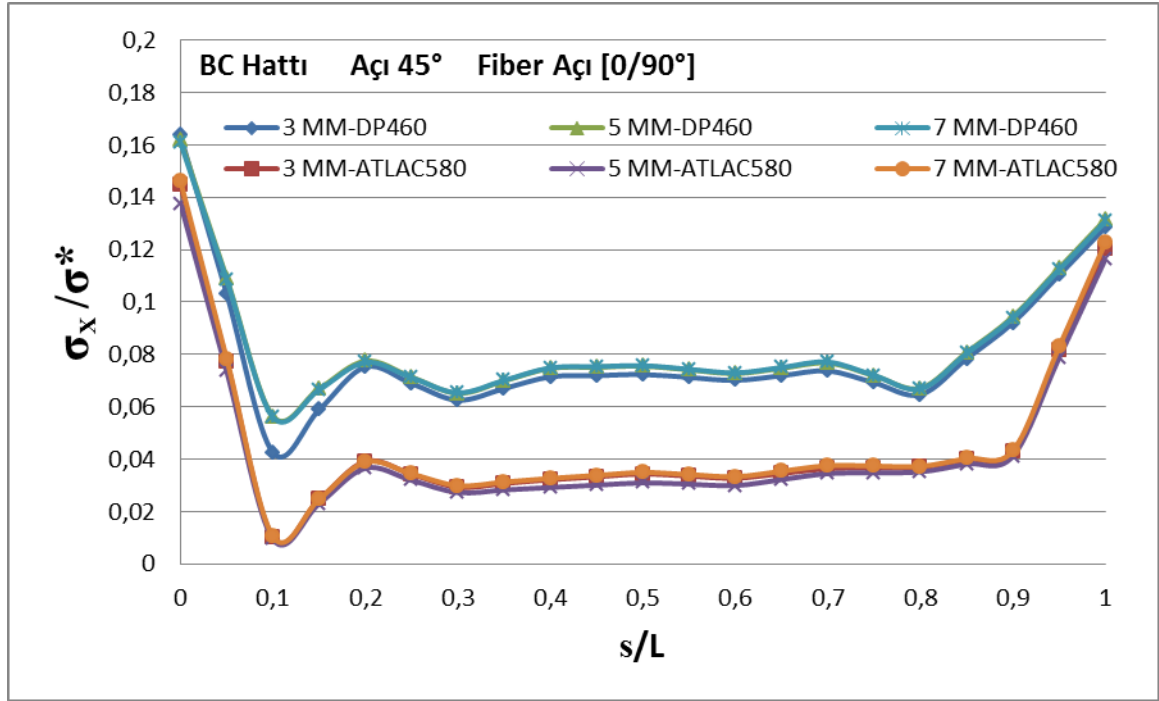


Şekil 3.85. [0°/90°/±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş τ_{xy} gerilmeleri

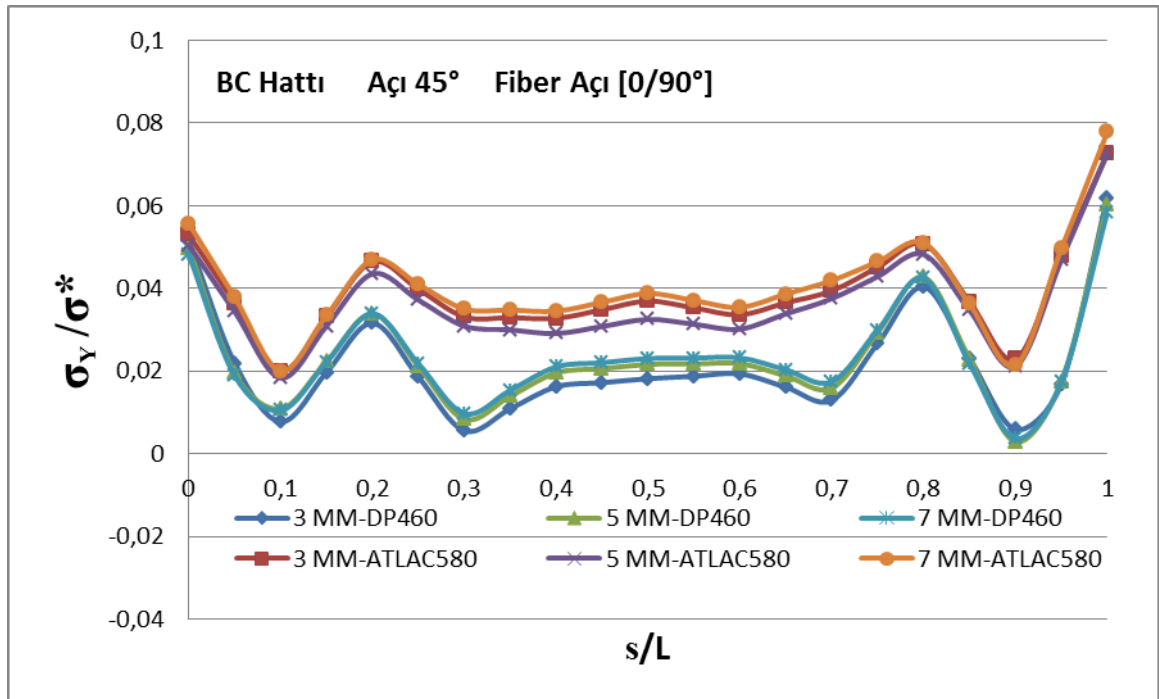


Şekil 3.86. [0°/90°/±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_{eqv} gerilmeleri

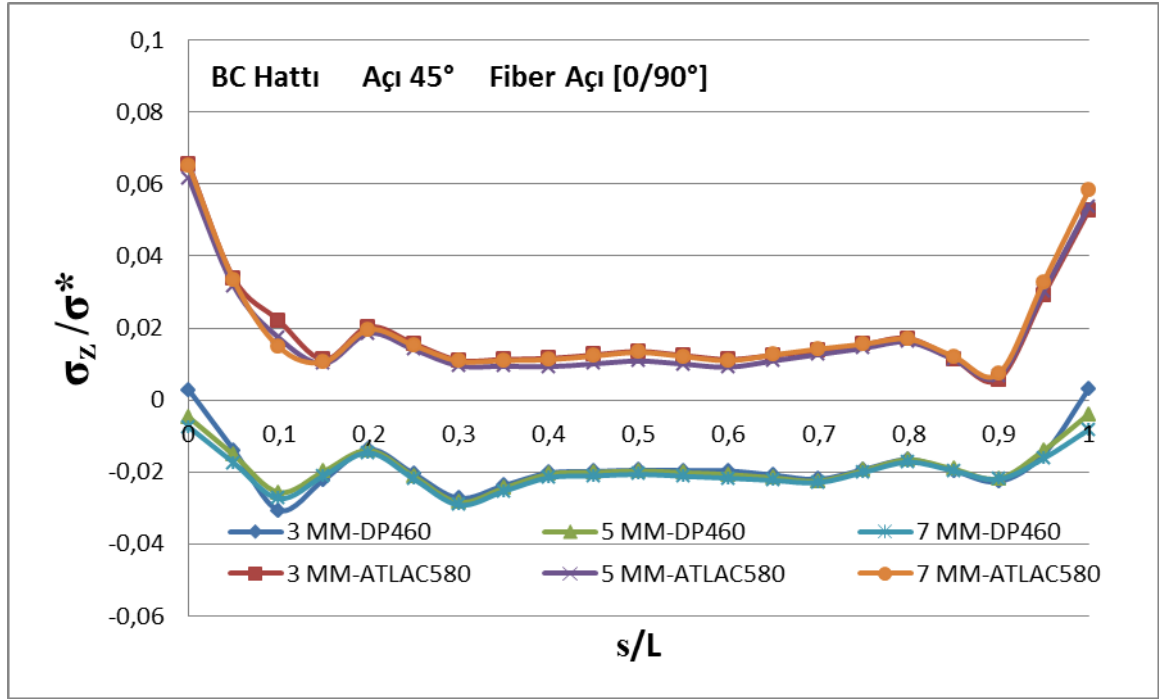
Şekil 3.87-3.91, 3 mm, 5 mm ve 7 mm malzeme kalınlığı için 45° bindirme açısında ve [0°/90°] serim açısına sahip Dp460 ve Atlac580 ile birleştirilmiş yapışma bağlantılarında (B-C) hattı boyunca oluşan normalleştirilmiş gerilme dağılımlarını göstermektedir. Dp460 yapıştırıcısına ait gerilmeler Atlac580 yapıştırıcısına ait gerilmelere göre sadece x yönündeki gerilmede yüksek çıkmıştır. Diğer gerilmelerde tam tersi durum gerçekleşmiştir. Bu farklılık yapıştırıcının karakteristiğinden kaynaklandığı söylenebilir. Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıda malzeme kalınlığı bağlantı mukavemeti üzerine etkisinin olduğu, ancak bu etkinin önemli bir seviyede olmadığı görülmektedir. Malzeme kalınlığı arttıkça yapıştırılan alan artmış ve doğal olarak da taşınan yükte artmıştır. Kayma gerilmeleri (AB) hattının tersine tüm kalınlıklarda pozitif çıkmıştır. Kayma gerilmesi hariç tüm gerilmelerde (s/L=0) da azalma oluşurken (s/L=1) de artış meydana gelmiştir. Kayma gerilmesi ve von-Mises gerilmelerinde (s/L=1) de azalma, diğer gerilmelerde artış meydana gelmiştir.



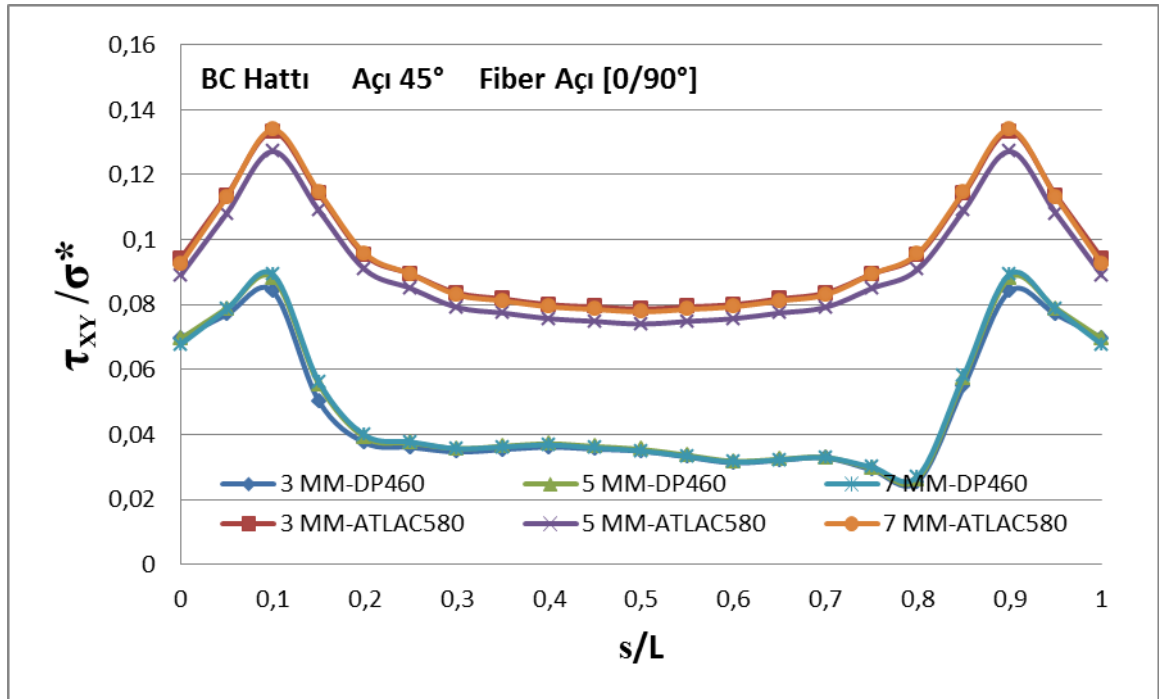
Şekil 3.87. 45° açiya ait [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_x gerilmeleri



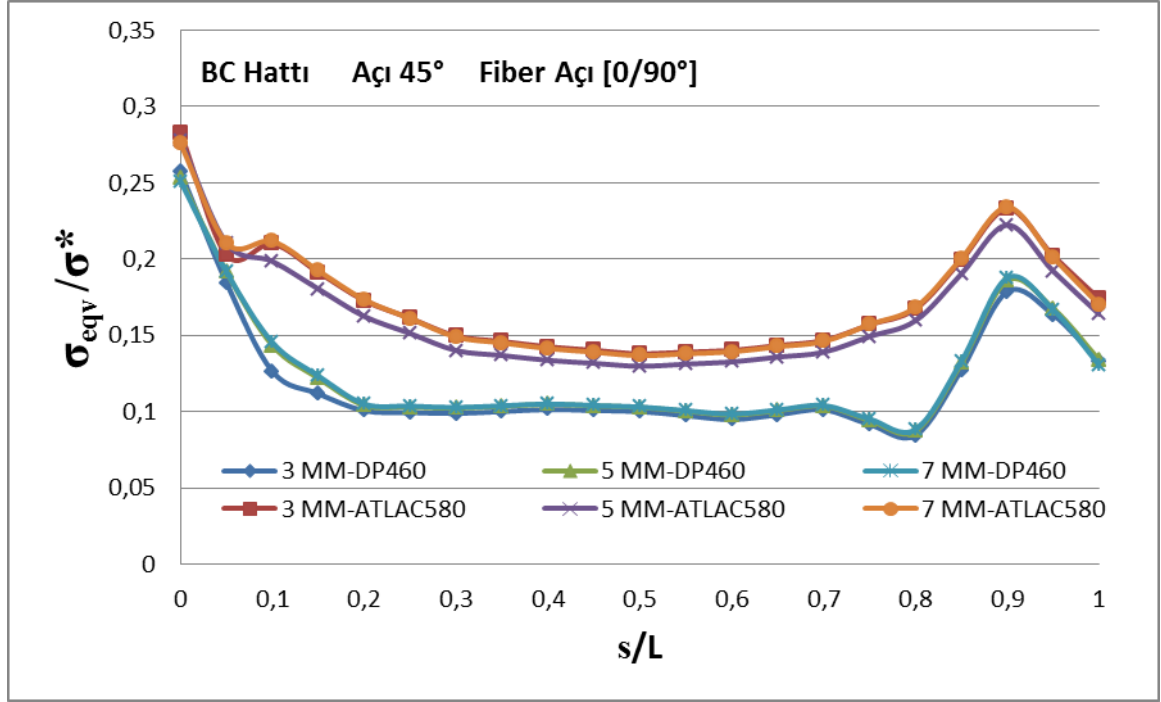
Şekil 3.88. 45° açiya ait [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_y gerilmeleri



Şekil 3.89. 45° açiya ait [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_z gerilmeleri

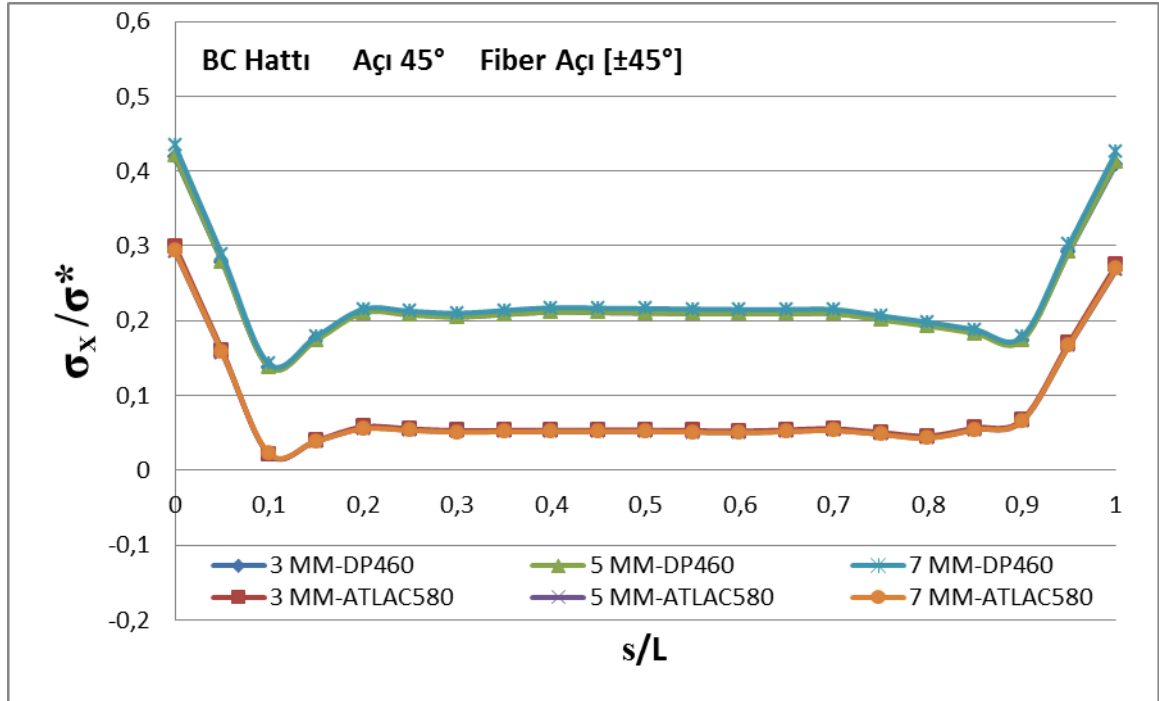


Şekil 3.90. 45° açiya ait [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş τ_{xy} gerilmeleri

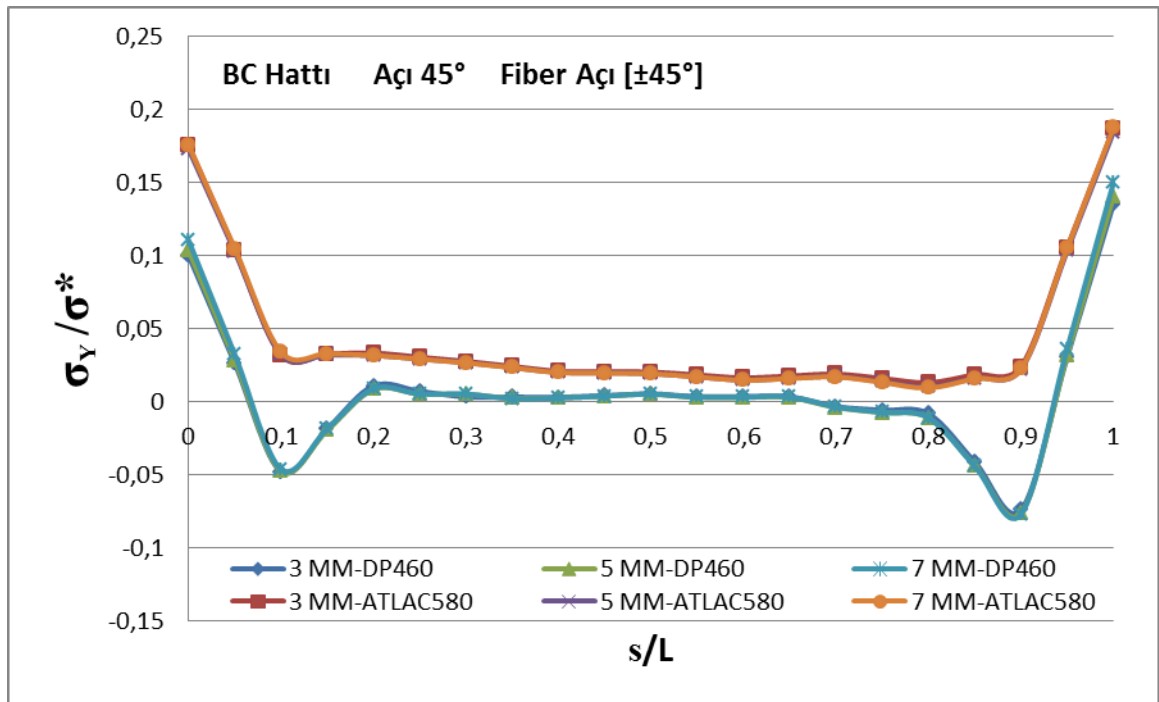


Şekil 3.91. 45° açığa ait [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_{eqv} gerilmeleri

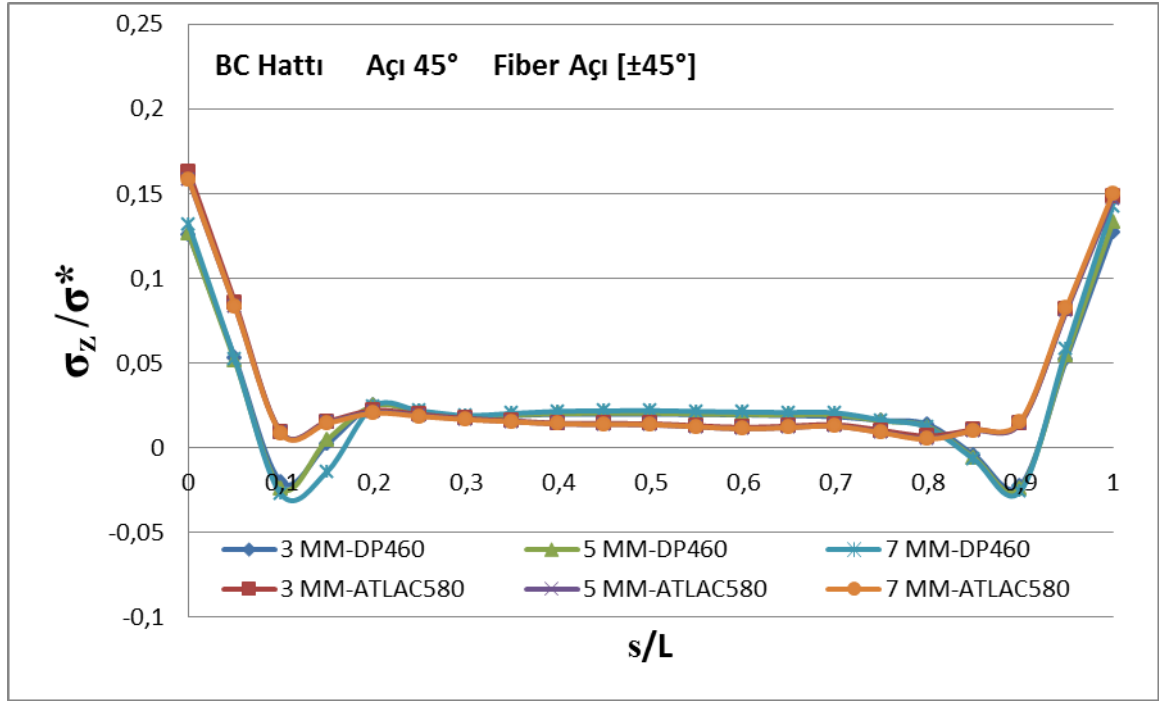
Şekil 3.92-3.96, 3 mm, 5 mm ve 7 mm malzeme kalınlığı için 45° bindirme açısında ve $[\pm 45^\circ]$ serim açısına sahip Dp460 ve Atlac580 ile birleştirilmiş yapışma bağlantılarında (B-C) hattı boyunca oluşan normalleştirilmiş gerilme dağılımlarını göstermektedir. Dp460 yapıştırıcısına ait gerilmeler Atlac580 yapıştırıcısına ait gerilmelere göre sadece x yönündeki gerilmelerde ve von-Mises gerilmesinde yüksek çıkmıştır. Diğer gerilmelerde tam tersi durum gerçekleşmiştir. Bu farklılık yapıştırıcının karakteristiğinden kaynaklandığı söylenebilir. Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıda malzeme kalınlığı bağlantı mukavemeti üzerine etkisinin olduğu, ancak bu etkinin önemli bir seviyede olmadığı görülmektedir. Malzeme kalınlığı arttıkça yapıştırılan alan artmış ve doğal olarak da taşınan yükte artmıştır. Kayma gerilmeleri (AB) hattının tersine tüm kalınlıklarda pozitif çıkmıştır. Tüm gerilmelerde ($s/L=0$) da azalma oluşurken ($s/L=1$) de artış meydana gelmiştir. $[\pm 45^\circ]$ serim açısına sahip gerilme değerleri, $[0^\circ/90^\circ]$ serim açısındaki gerilme değerlerinden daha yüksek çıkmıştır.



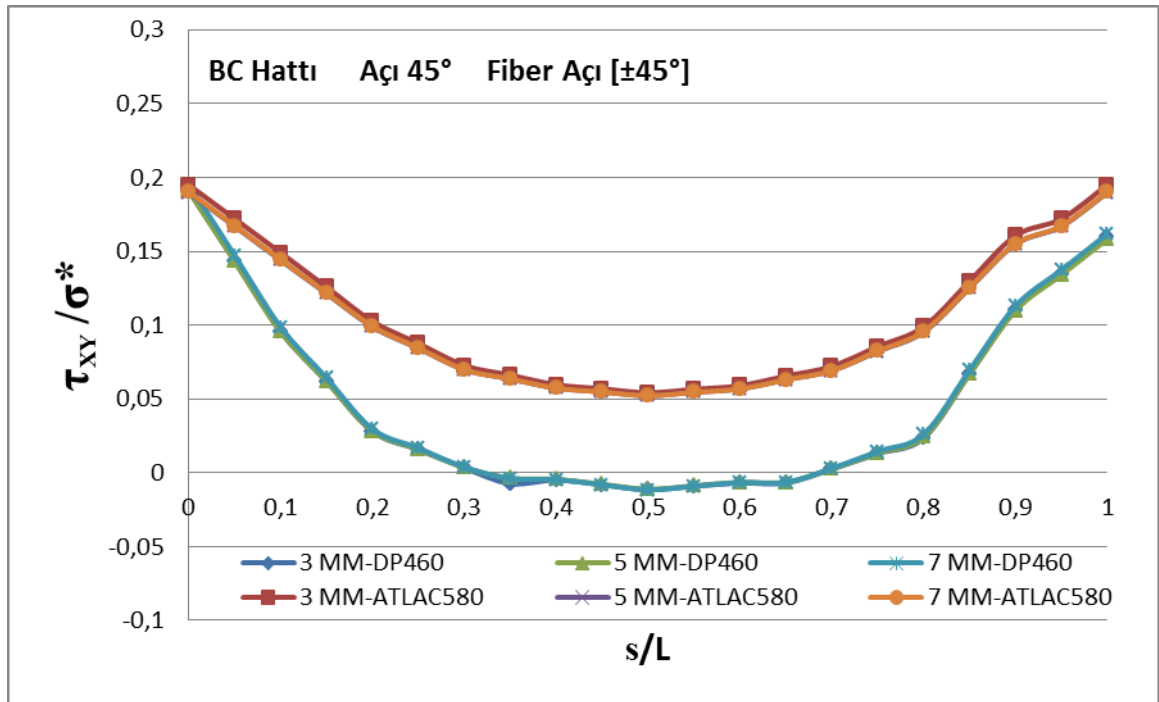
Şekil 3.92. 45° açığa ait [±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_x gerilmeleri



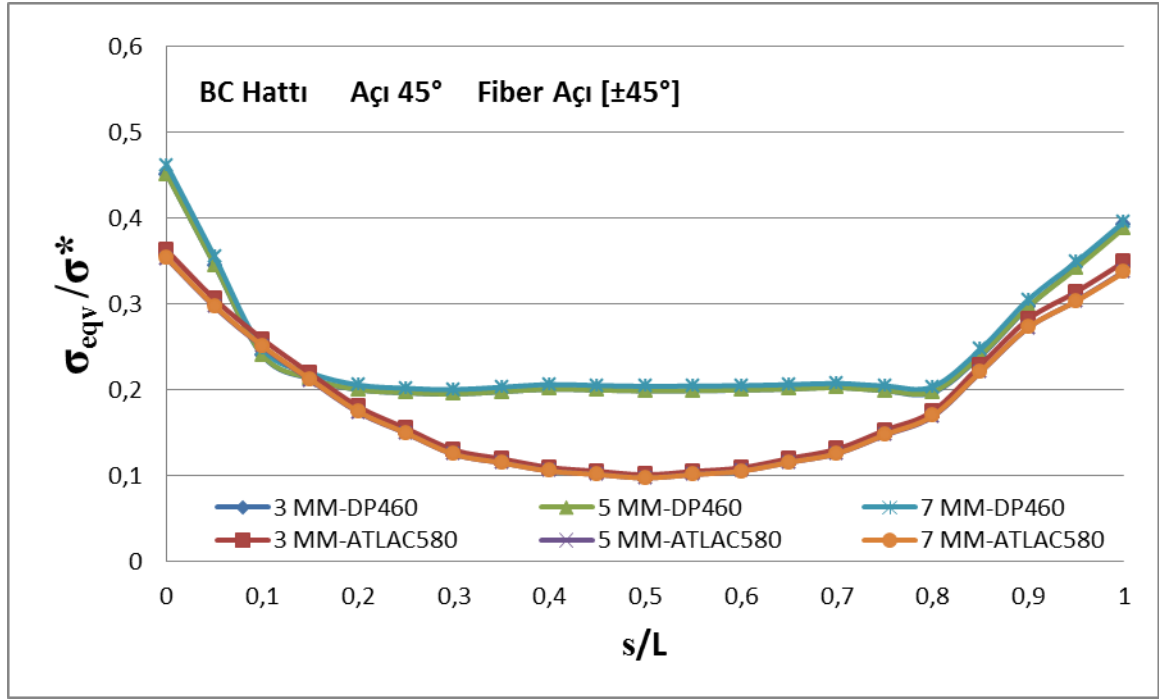
Şekil 3.93. 45° açığa ait [±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_y gerilmeleri



Şekil 3.94. 45° açığa ait [±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_z gerilmeleri

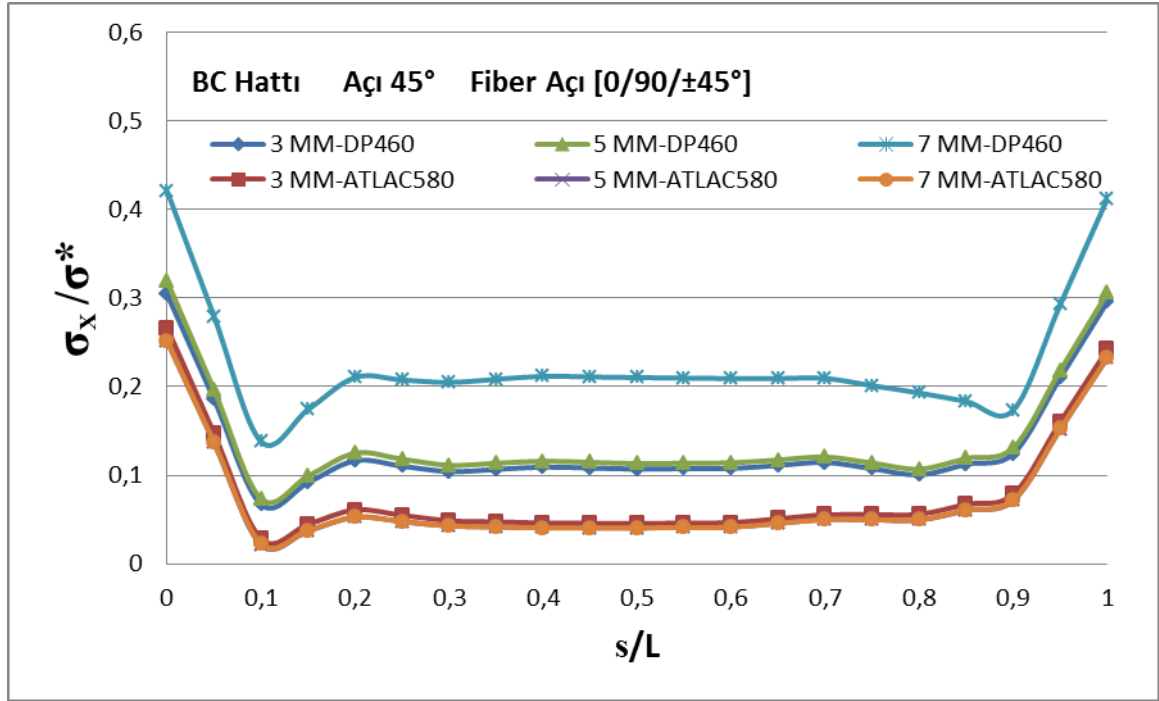


Şekil 3.95. 45° açığa ait [±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş τ_{xy} gerilmeleri

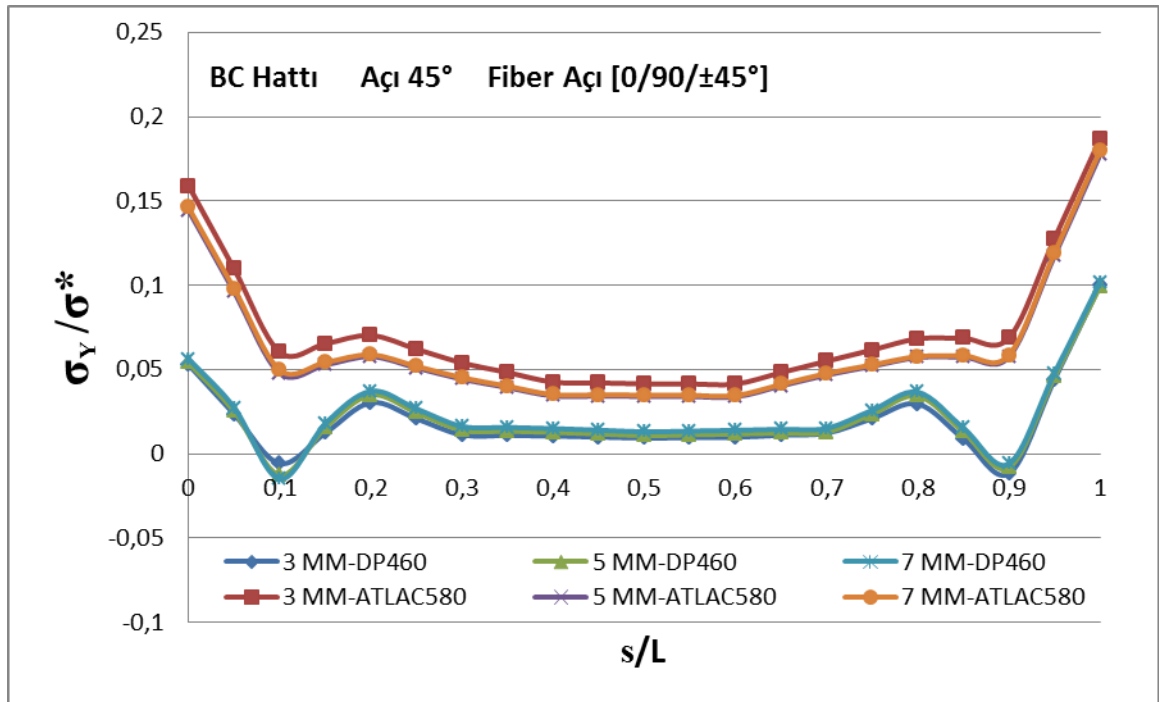


Şekil 3.96. 45° açığa ait $[\pm 45^\circ]$ serim açısındaki normalleştirilmiş σ_{eqv} gerilmeleri

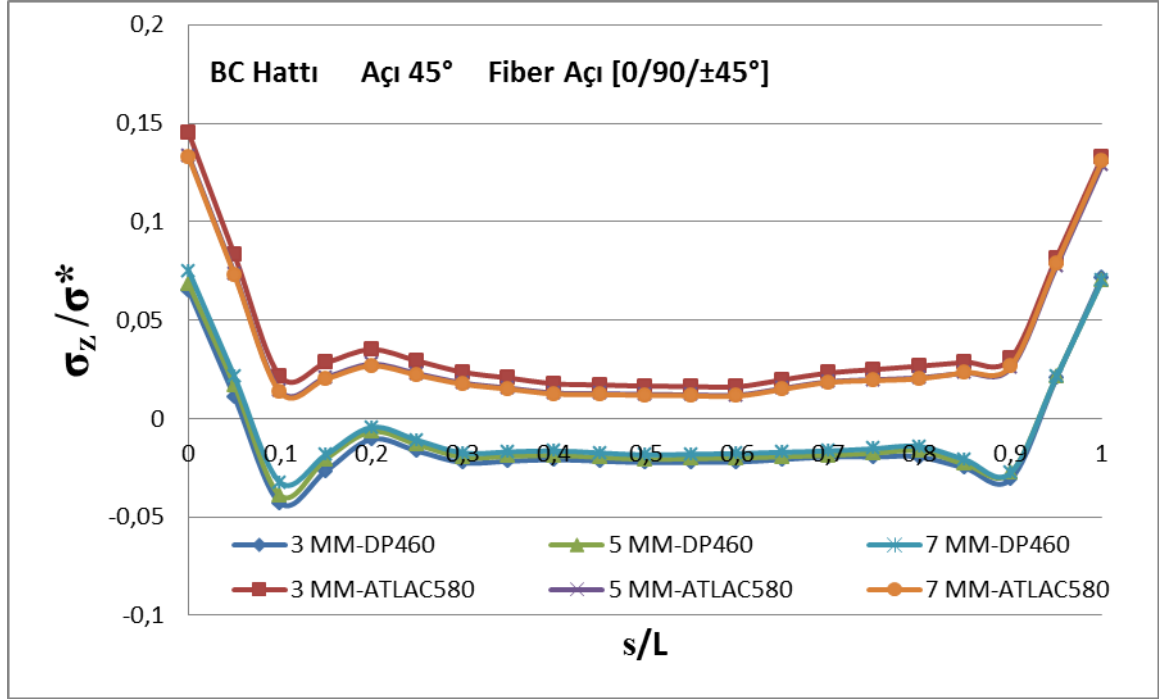
Şekil 3.97-3101, 3 mm, 5 mm ve 7 mm malzeme kalınlığı için 45° bindirme açısında ve $[0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ]$ serim açısına sahip Dp460 ve Atlac580 ile birleştirilmiş yapışma bağlantılarında (B-C) hattı boyunca oluşan normalleştirilmiş gerilme dağılımlarını göstermektedir. Dp460 yapıştırıcısına ait gerilmeler Atlac580 yapıştırıcısına ait gerilmelere göre sadece s yönündeki gerilmede yüksek çıkmıştır. Diğer gerilmelerde tam tersi durum gerçekleşmiştir. Bu farklılık yapıştırıcının karakteristiğinden kaynaklandığı söylenebilir. Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıda malzeme kalınlığı bağlantı mukavemeti üzerine etkisinin olduğu, ancak bu etkinin önemli bir seviyede olmadığı görülmektedir. Malzeme kalınlığı arttıkça yapıştırılan alan artmış ve doğal olarak da taşınan yükte artmıştır. Kayma gerilmeleri (AB) hattının tersine tüm kalınlıklarda pozitif çıkmıştır. Tüm gerilmelerde ($s/L=0$) da azalma oluşurken ($s/L=1$) de artış meydana gelmiştir.



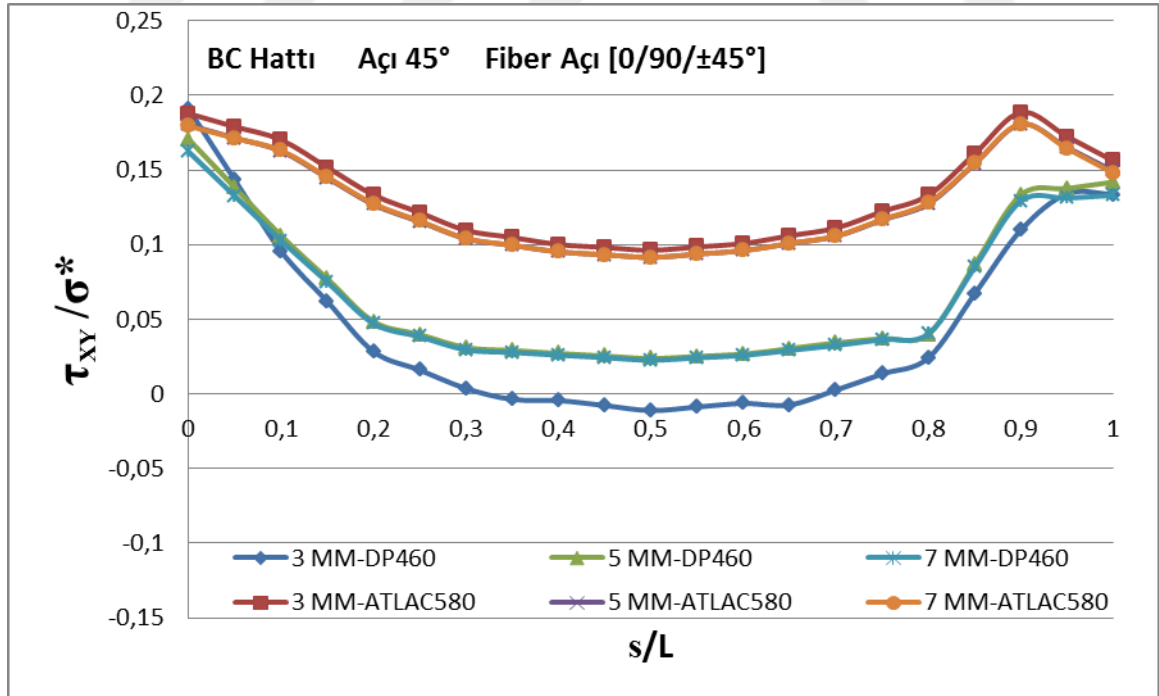
Şekil 3.97. 45° açılıya ait [0°/90°/±45°] serim açılındaki normalleştirilmiş σ_x gerilmeleri



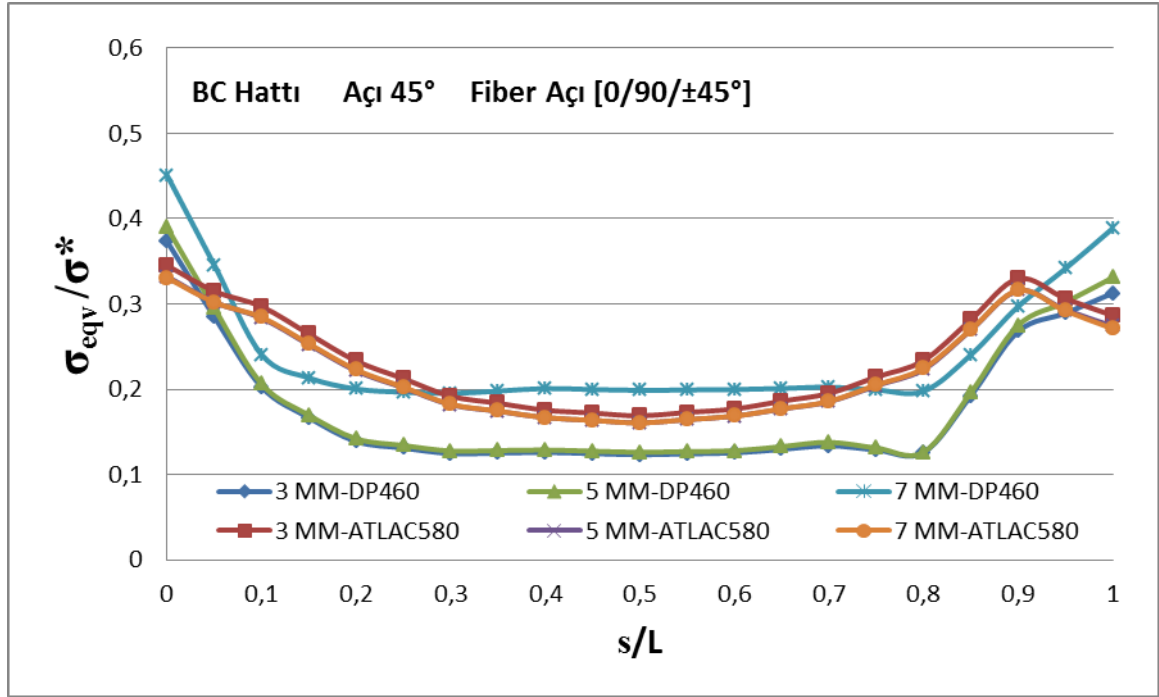
Şekil 3.98. 45° açılıya ait [0°/90°/±45°] serim açılındaki normalleştirilmiş σ_y gerilmeleri



Şekil 3.99. 45° açığa ait [0°/90°/±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_z gerilmeleri



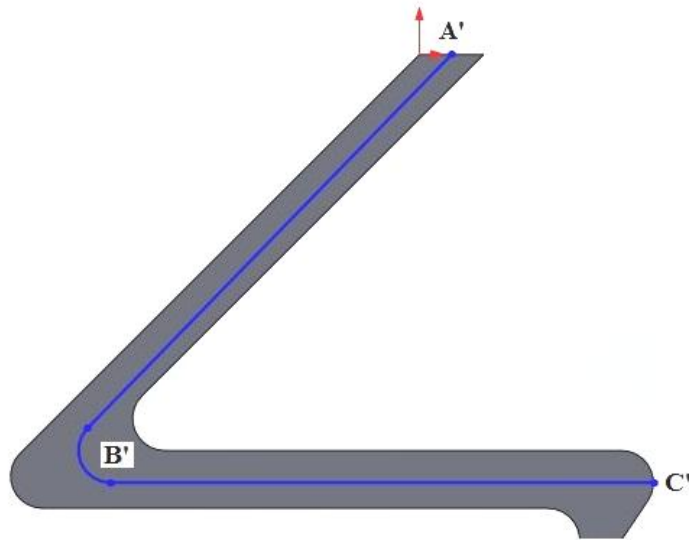
Şekil 3.100. 45° açığa ait [0°/90°/±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş τ_{xy} gerilmeleri



Şekil 3.101. 45° açığa ait [0°/90°/±45°] serim, normalleştirilmiş σ_{eqv} gerilmeler

3.3.2. Yapıştırıcı Ara Yüzey Hattı (A'C') Boyunca Gerilme Dağılımı Sonuçları

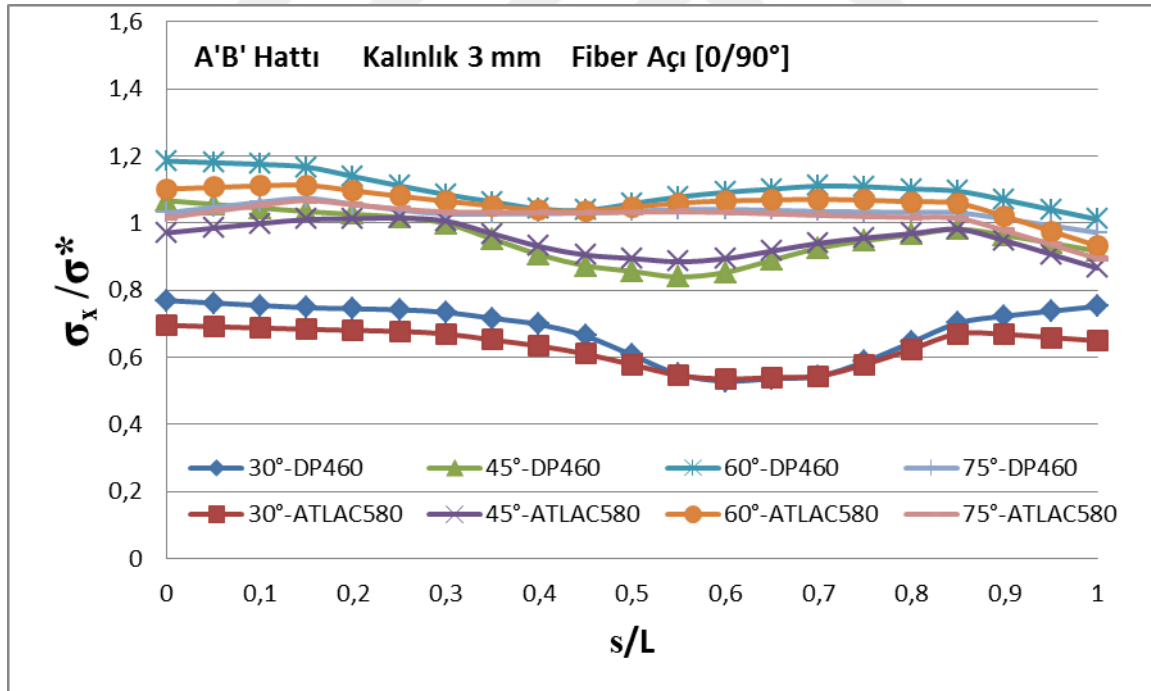
Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıda, yapıştırıcı ara yüzeyinde A' noktasından B' noktasına (A'B') ve B' noktasından C' noktasına (B'C') olmak üzere; kritik hatlar belirlenip gerilme dağılımları bu hatlar üzerinden alınarak grafikler oluşturulmuştur.



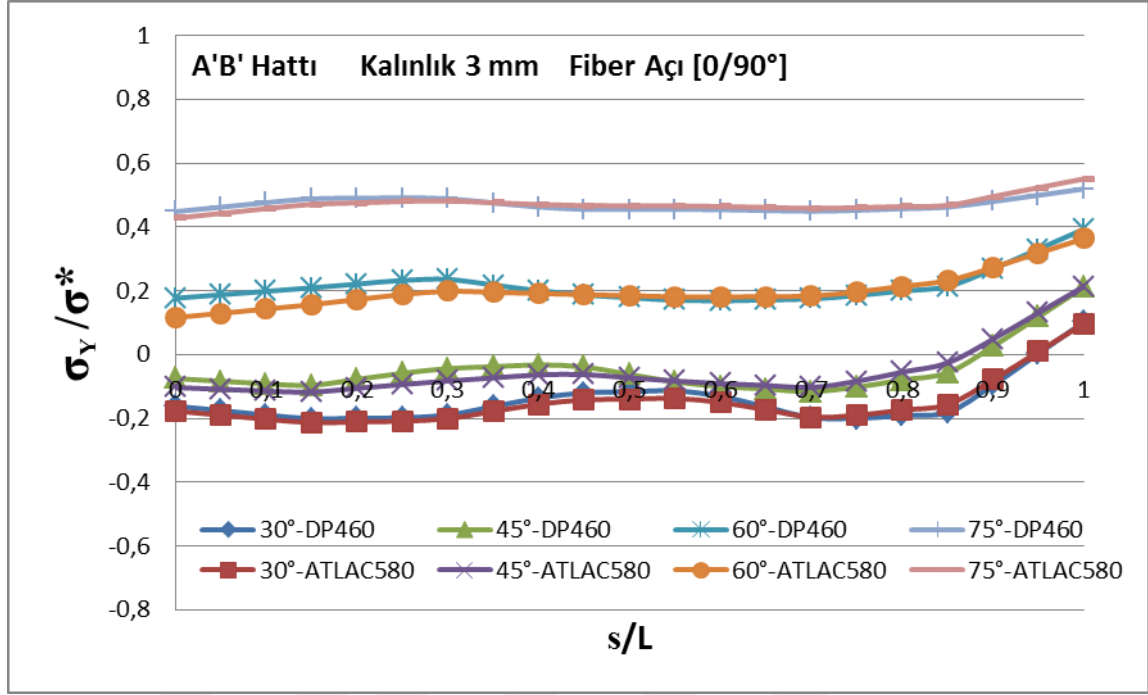
Şekil 3.102. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantı çeşidinde kritik hatlar [A'C']

3.3.2.1.A'B' Hattı

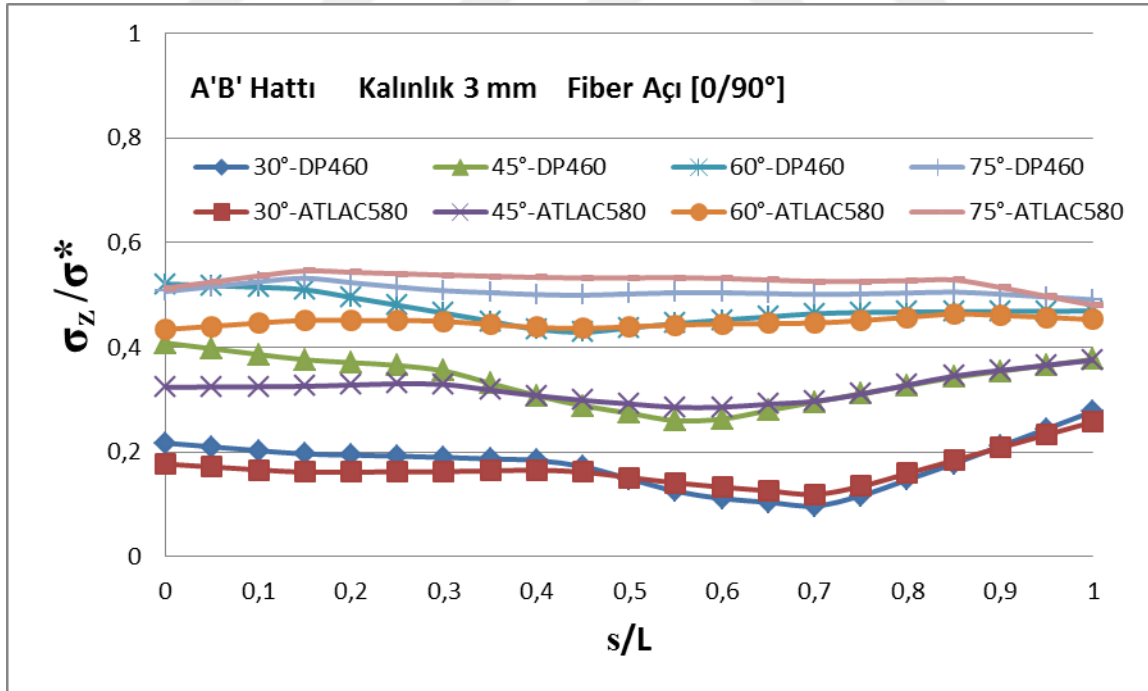
Şekil 3.103-3.117, 3 mm malzeme kalınlığında $[0^\circ/90^\circ]$, $[\pm 45^\circ]$ ve $[0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ]$ serim açısına sahip Dp460 ve Atlac580 ile birleştirilmiş yapışma bağlantılarında (A'-B') hattı boyunca oluşan normalleştirilmiş gerilme dağılımlarını göstermektedir. Yapıştırıcı ara yüzeydeki (A'B') gerilme değerleri bütün serim açılarında, yapıştırıcı normal yüzeydeki (AB) gerilme değerleriyle hemen hemen aynı çıkmıştır. Yapışma hattının her iki uç noktasında ($s/L=0$ ve $s/L=1$) oluşan gerilmelerde ani keskin sıçramalar yerine daha yumuşak geçişler görülmektedir. Grafiklerdeki eğriler daha düzgün çıkmıştır. Bu hattın daha uniform bir gerilme dağılımına sahip olduğu söylenebilir. Yapıştırıcıların karakteristik durumları (AB) hattıyla benzerlik göstermektedir. Gerilme değerleri en fazla $[0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ]$ serim açısına sahip malzemelerde görülürken en az gerilme değerleri $[0^\circ/90^\circ]$ serim açısına sahip malzemelerde ortaya çıkmıştır.



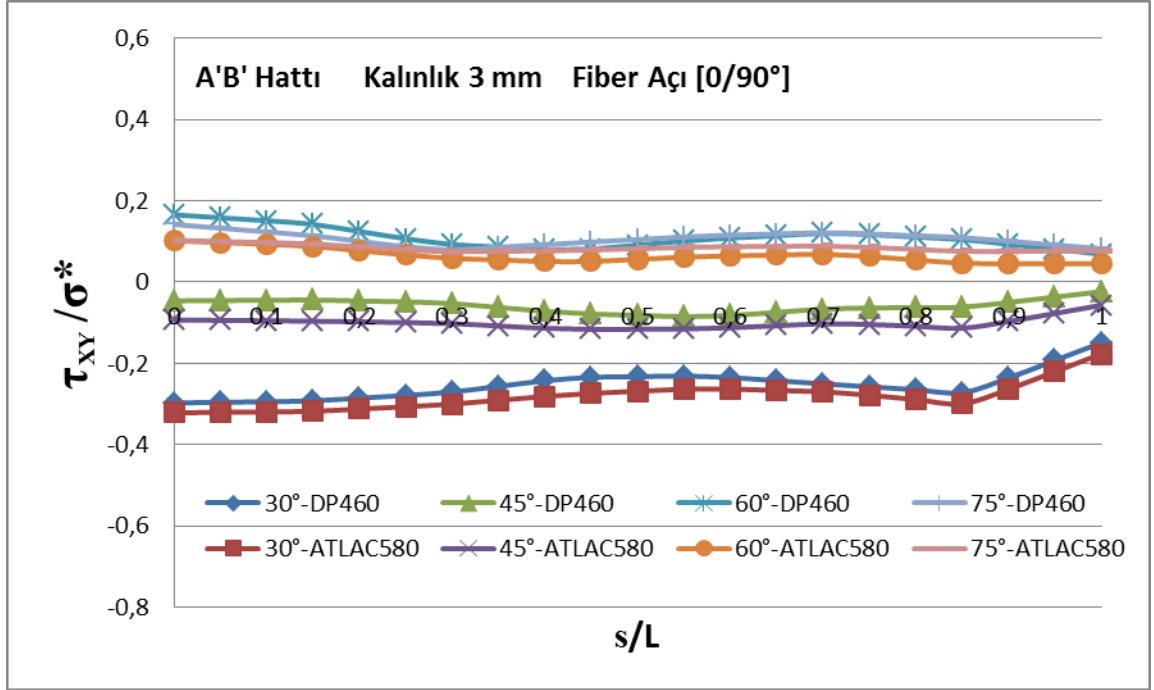
Şekil 3103. $[0^\circ/90^\circ]$ serim açısındaki normalleştirilmiş σ_x gerilmeleri



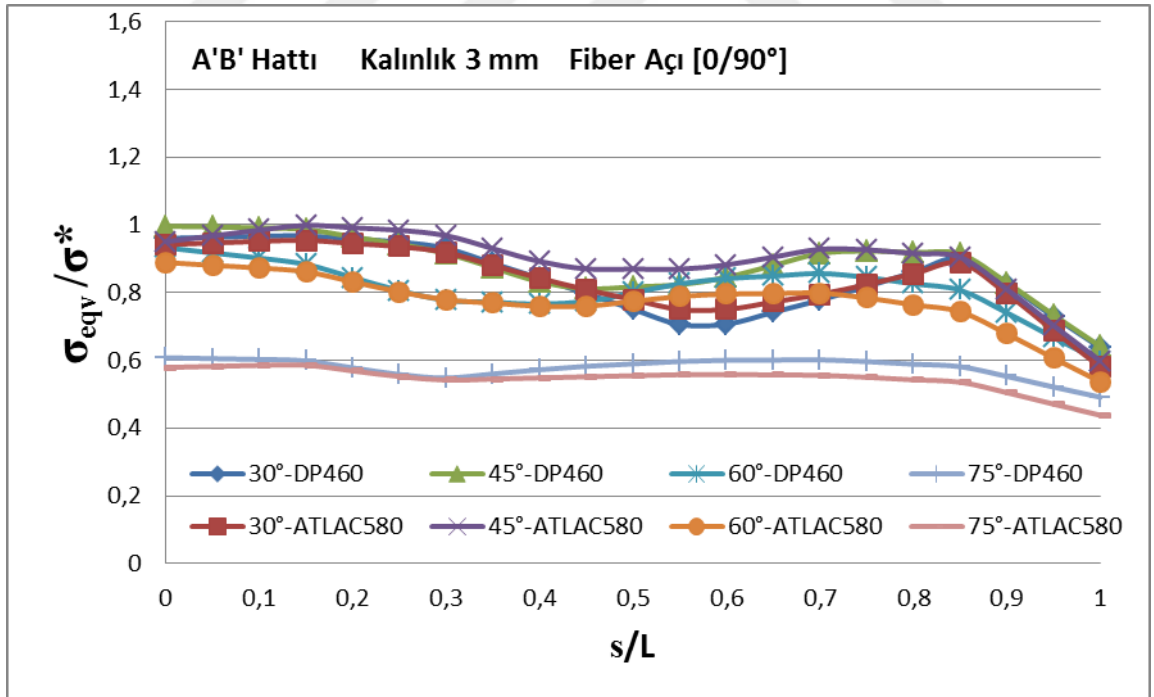
Şekil 3.104. [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_y gerilmeleri



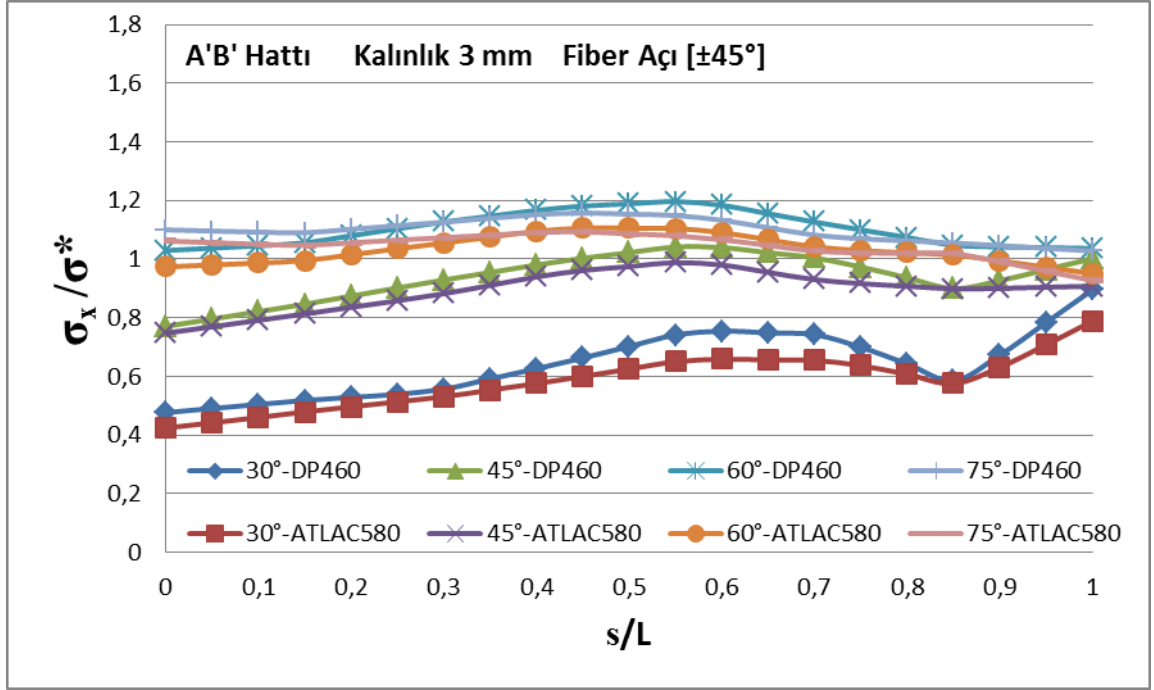
Şekil 3.105. [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_z gerilmeleri



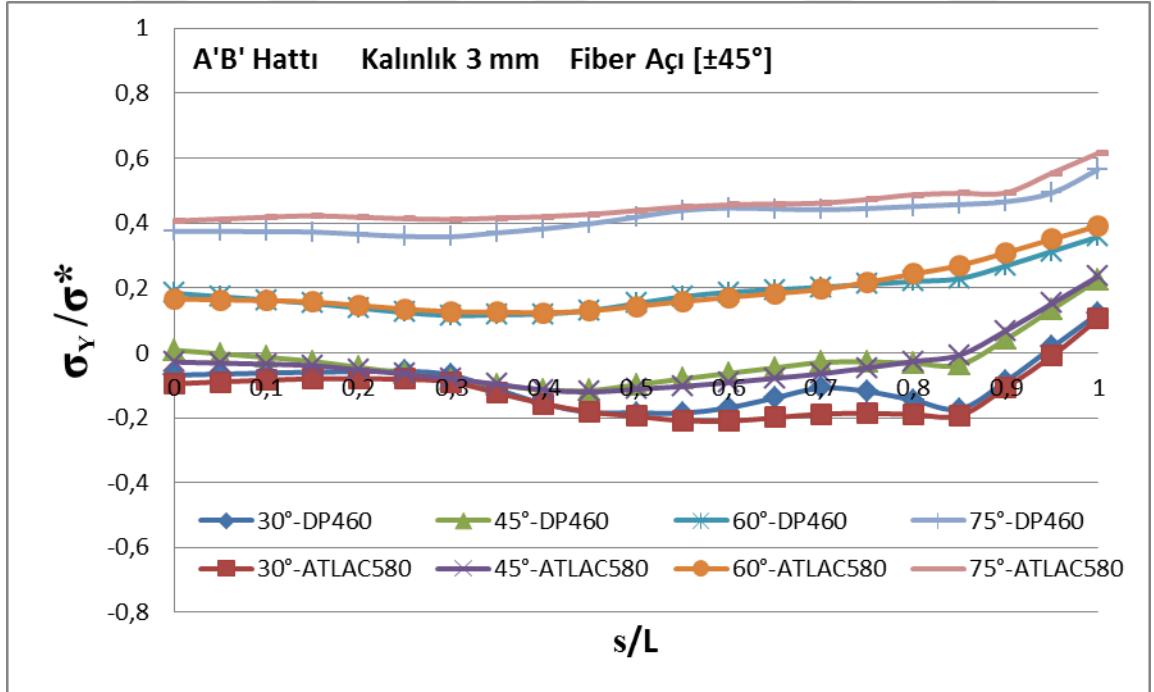
Şekil 3.106. [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş τ_{xy} gerilmeleri



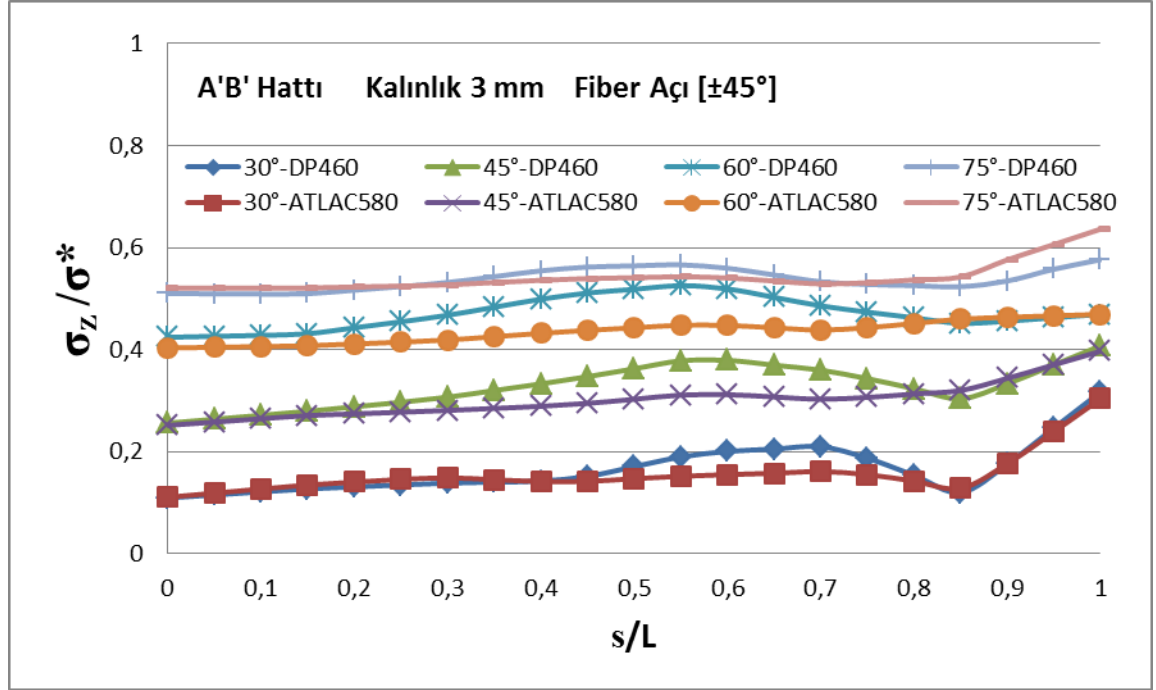
Şekil 3.107. [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_{eqv} gerilmeleri



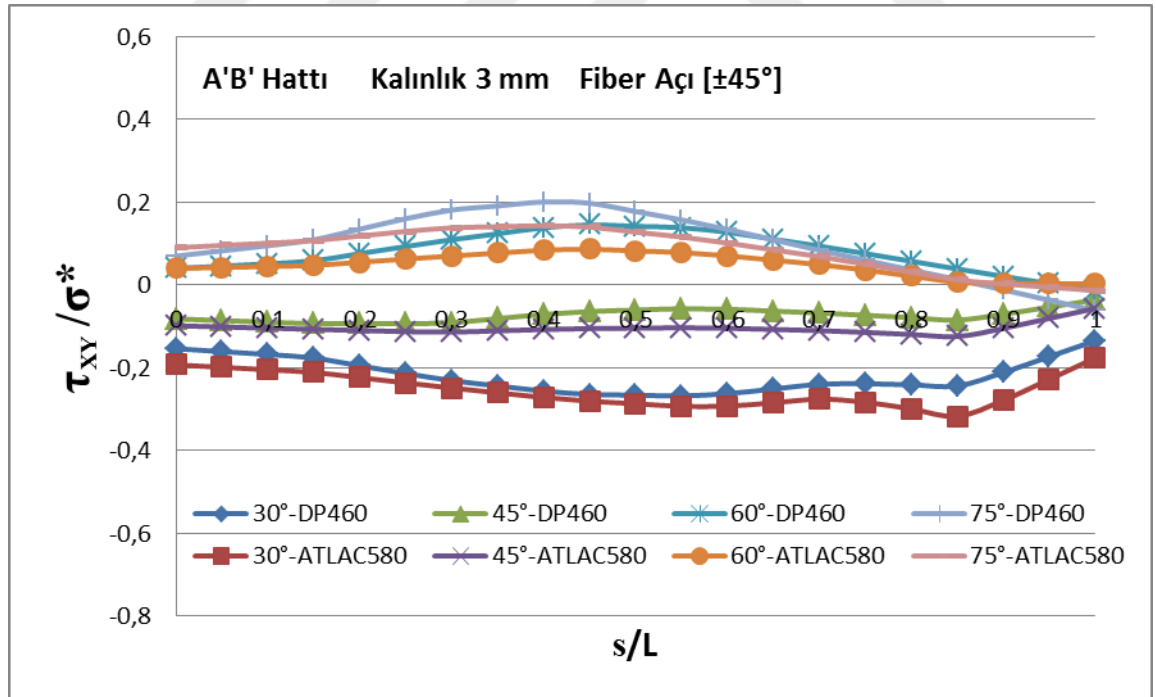
Şekil 3.108. [±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_x gerilmeleri



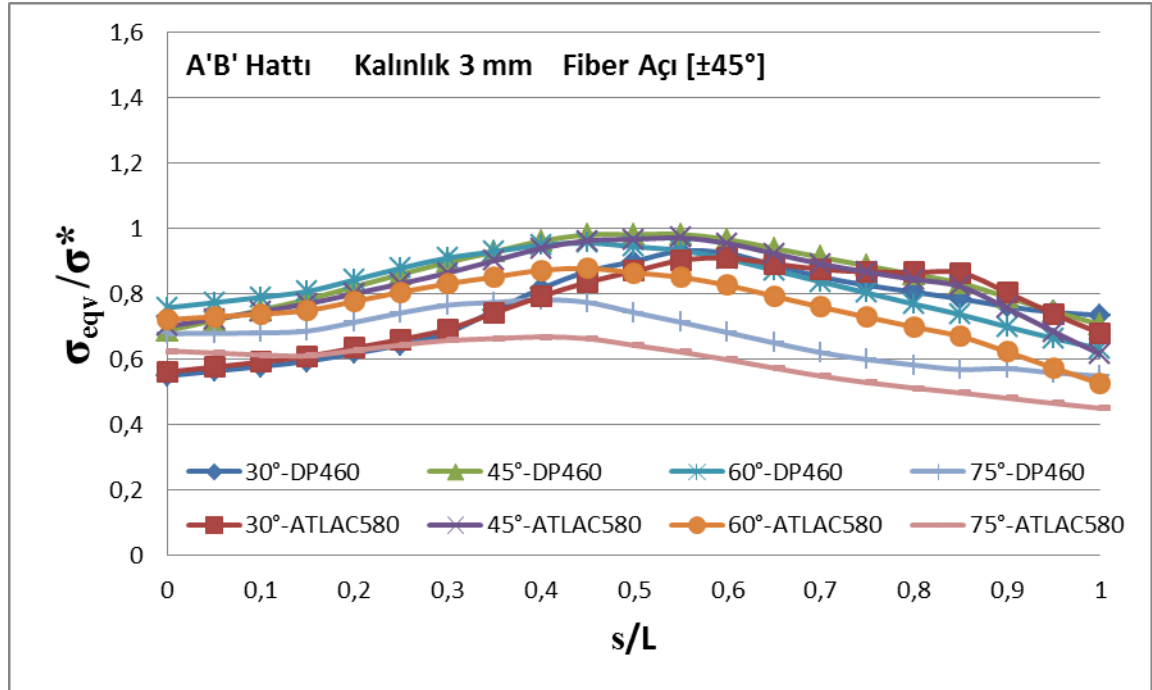
Şekil 3.109. [±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_y gerilmeleri



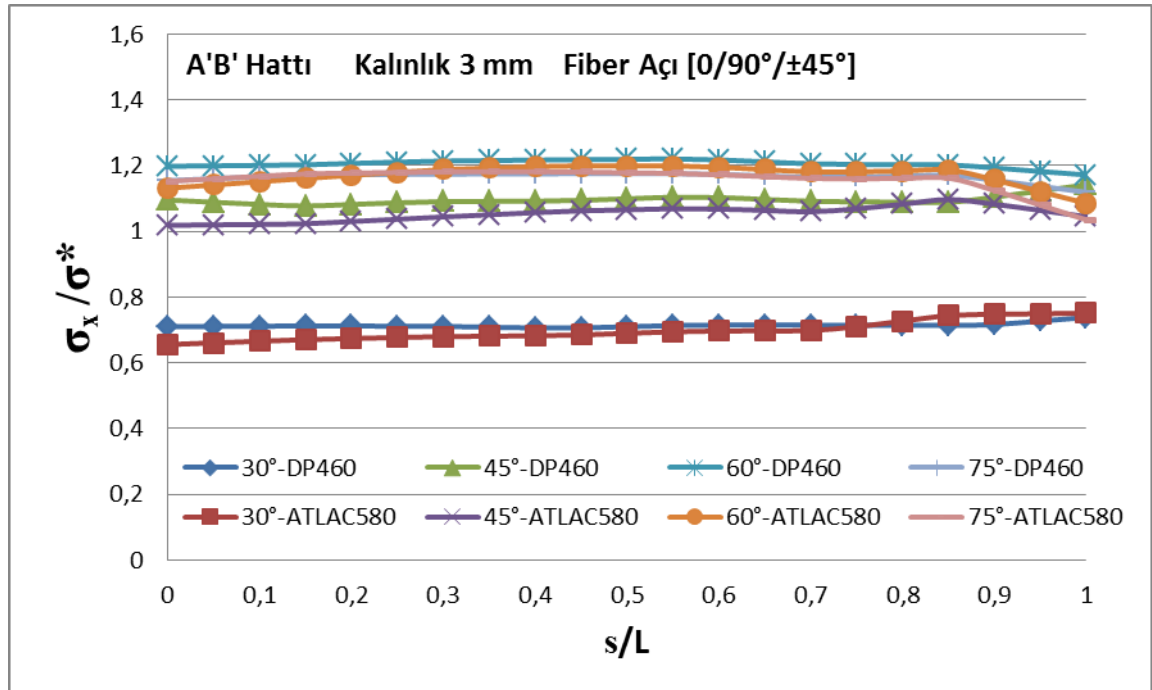
Şekil 3.110. [±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_z gerilmeleri



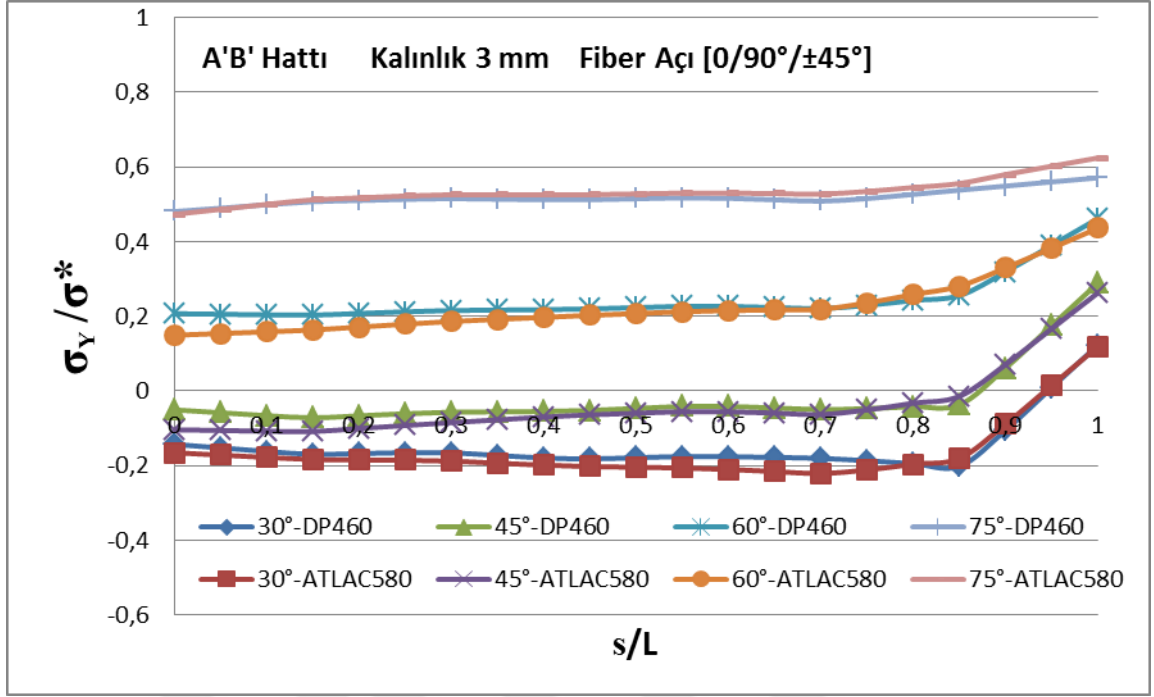
Şekil 3.111. [±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş τ_{xy} gerilmeleri



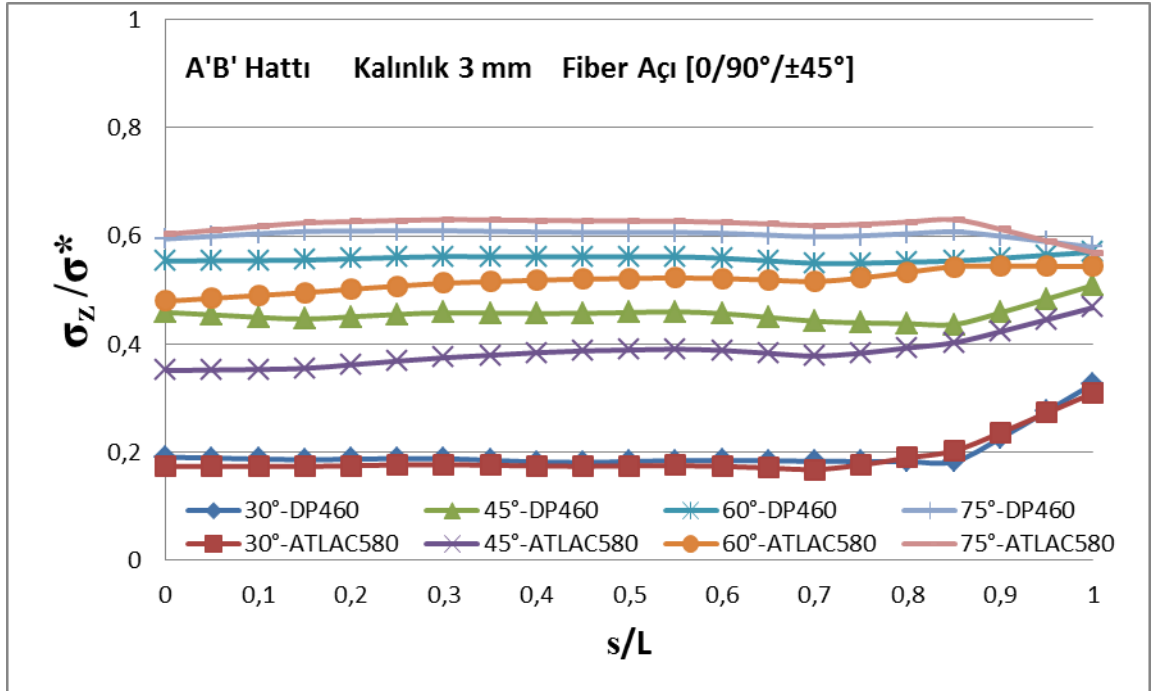
Şekil 3.112. $[\pm 45^\circ]$ serim açısındaki normalleştirilmiş σ_{eqv} gerilmeleri



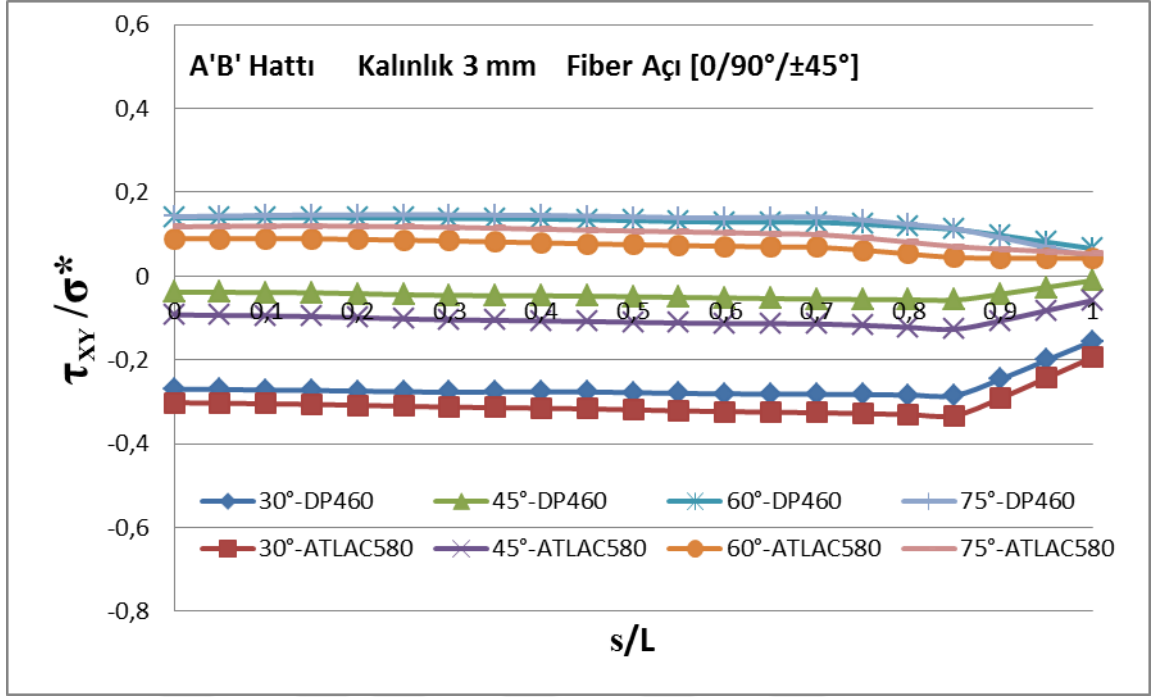
Şekil 3.113. $[0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ]$ serim açısındaki normalleştirilmiş σ_x gerilmeleri



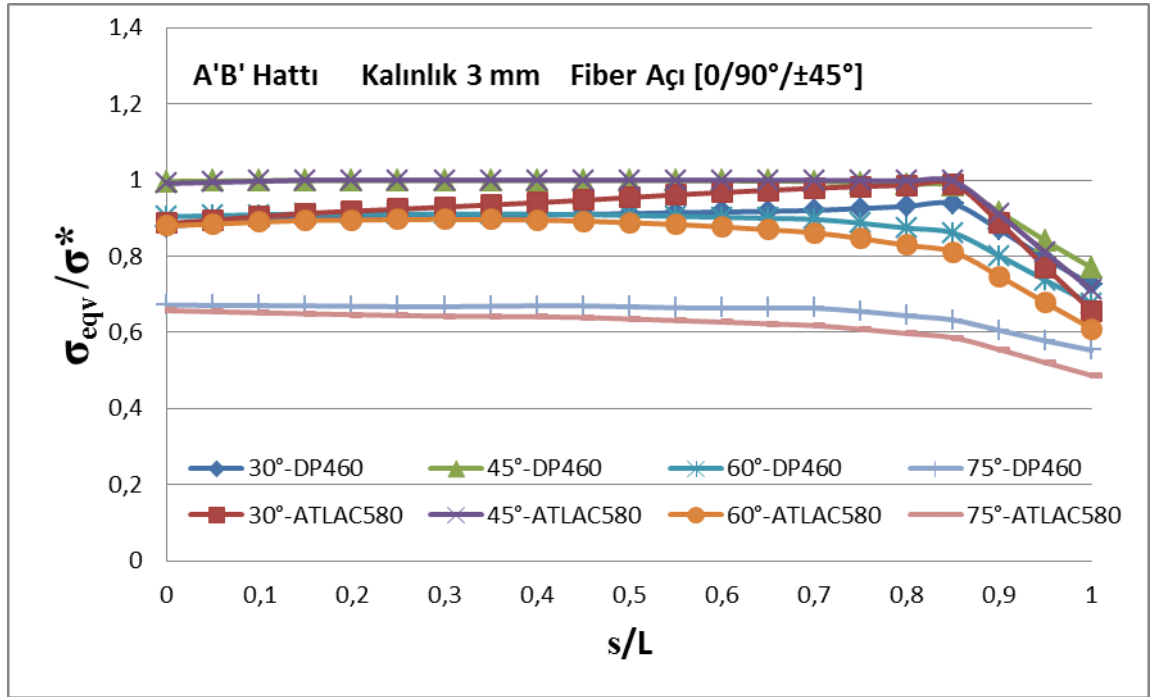
Şekil 3.114. [0°/90°/±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_y gerilmeleri



Şekil 3.115. [0°/90°/±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_z gerilmeleri

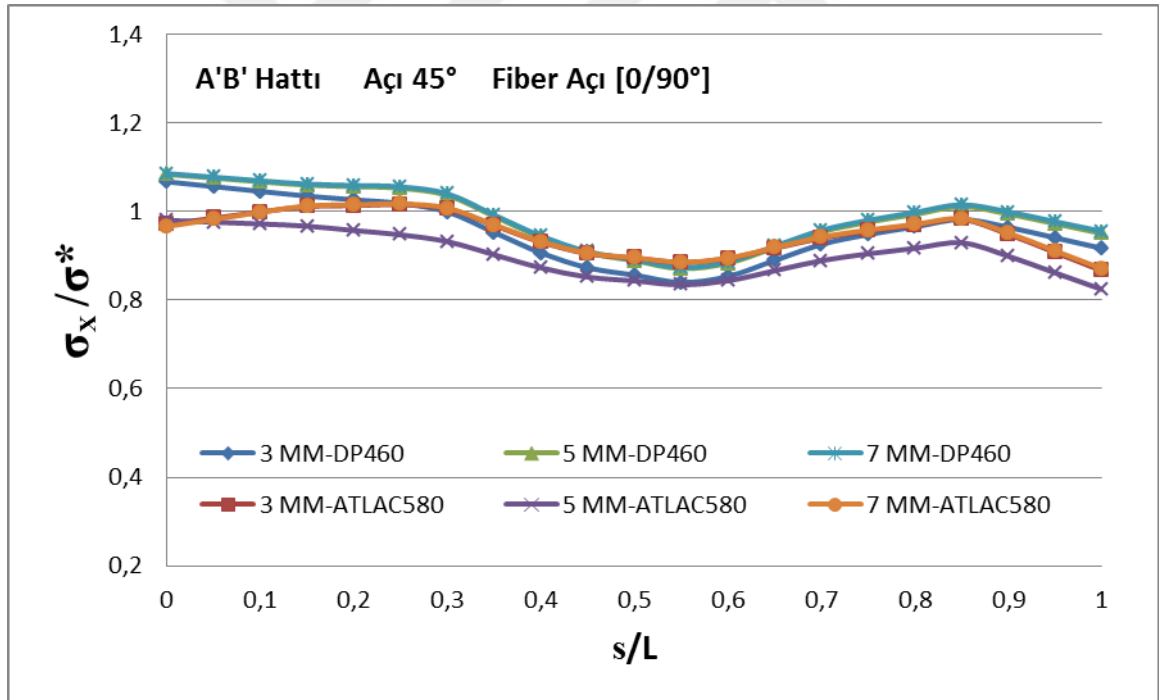


Şekil 3.116. [0°/90°/±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş τ_{xy} gerilmeleri

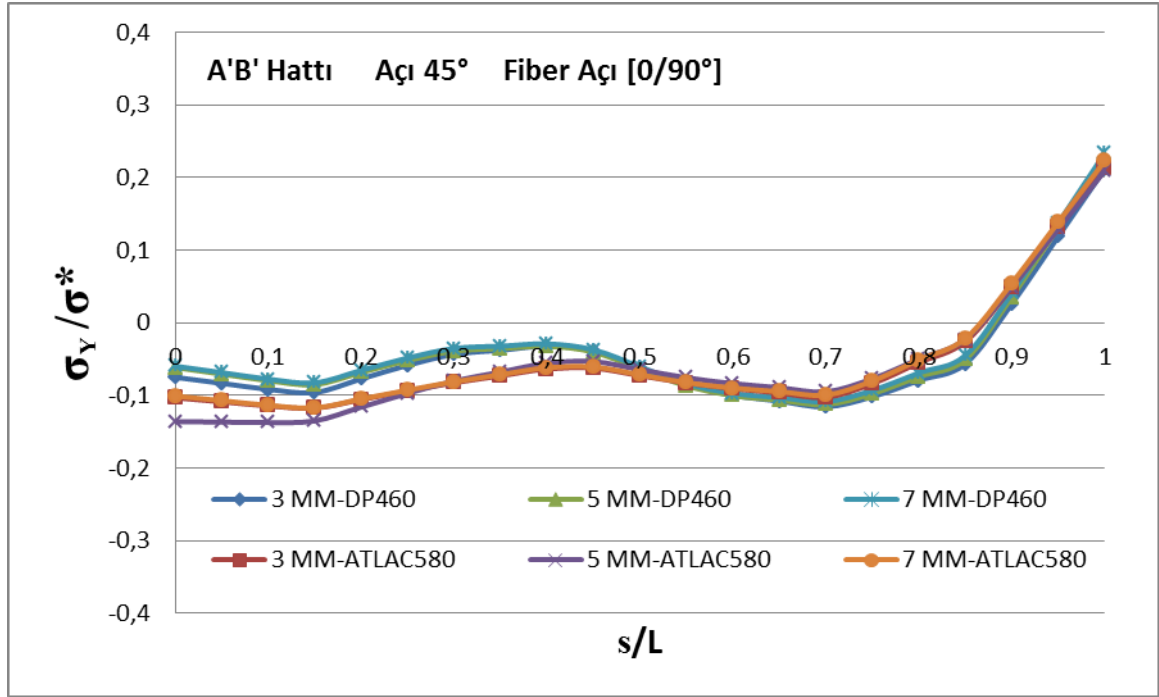


Şekil 3.117. [0°/90°/±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_{eqv} gerilmeleri

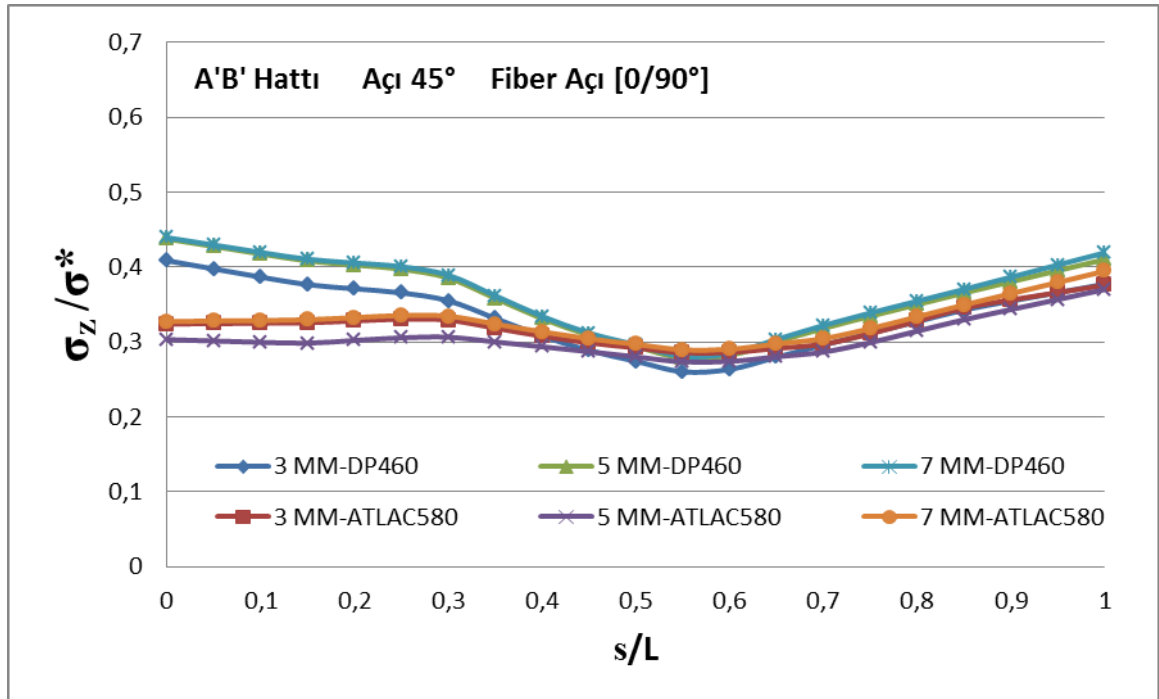
Şekil 3.118-3.132, 3 mm, 5 mm ve 7 mm malzeme kalınlığı için 45° bindirme açısında ve [0°/90°], [±45°], [0°/90°/±45°] serim açısına sahip Dp460 ve Atlac580 ile birleştirilmiş yapışma bağlantılarında (A'B') hattı boyunca oluşan normalleştirilmiş gerilme dağılımlarını göstermektedir. Yapıştırıcı ara yüzeydeki (A'B') gerilme değerleri bütün serim açılarında, yapıştırıcı normal yüzeydeki (AB) gerilme değerleriyle hemen hemen aynı çıkmıştır. Yapışma hattının her iki uç noktasında (s/L=0 ve s/L=1) oluşan gerilmelerde ani keskin sıçramalar yerine daha yumuşak geçişler görülmektedir. Grafiklerdeki eğriler daha düzgün çıkmıştır. Bu hattın daha uniform bir gerilme dağılımına sahip olduğu söylenebilir. Yapıştırıcıların karakteristik durumları (AB) hattıyla benzerlik göstermektedir. Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıda malzeme kalınlığı bağlantı mukavemeti üzerine etkisinin olduğu, ancak bu etkinin önemli bir seviyede olmadığı görülmektedir. Malzeme kalınlığı arttıkça yapıştırılan alan artmış ve doğal olarak da taşınan yükte artmıştır.



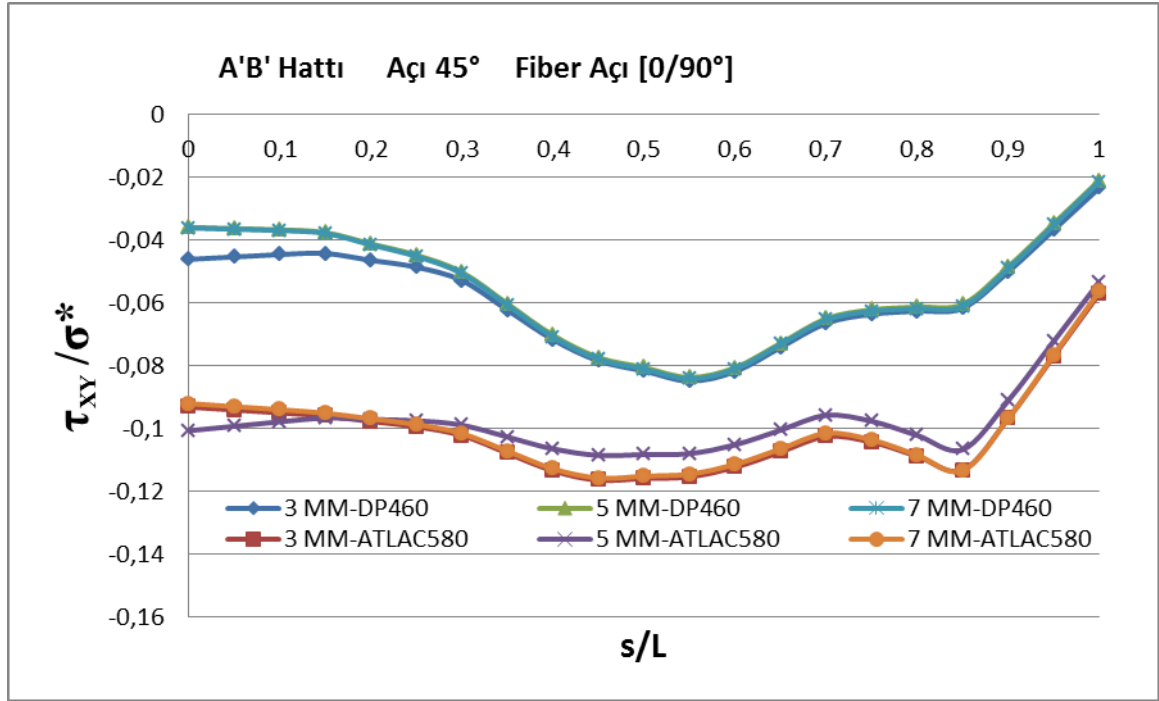
Şekil 3.118. 45° açısı ait [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_x gerilmeleri



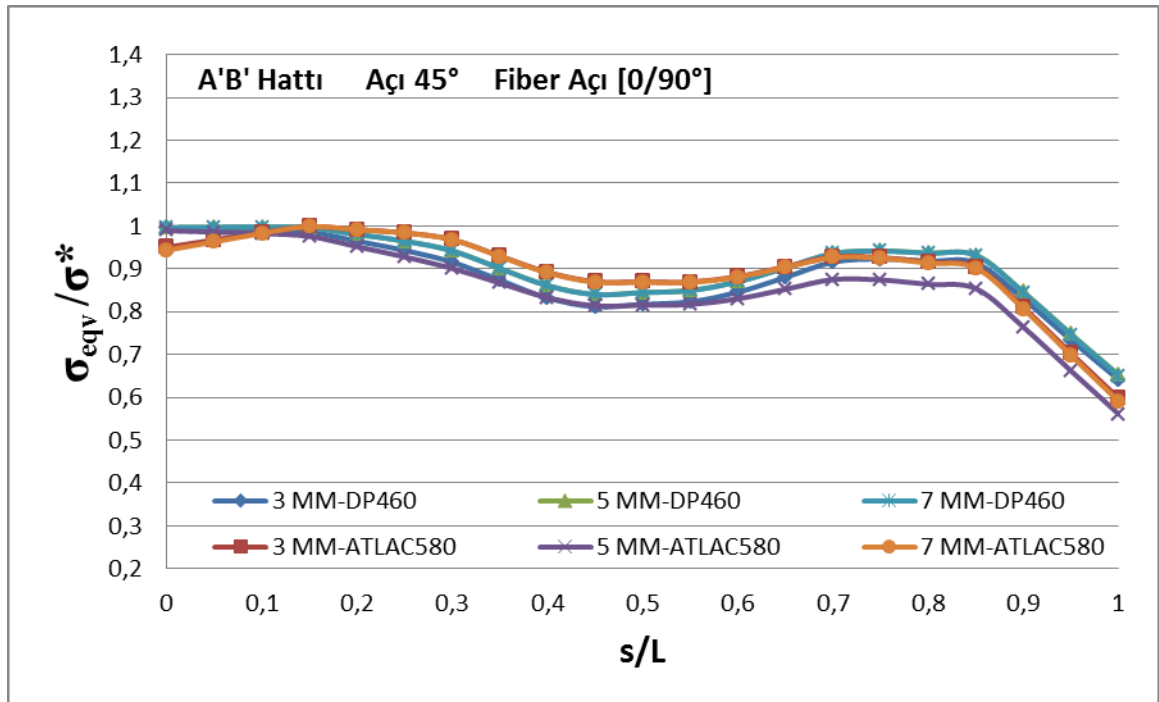
Şekil 3.119. 45° açılıya ait [0°/90°] serim açılındaki normalleştirilmiş σ_y gerilmeleri



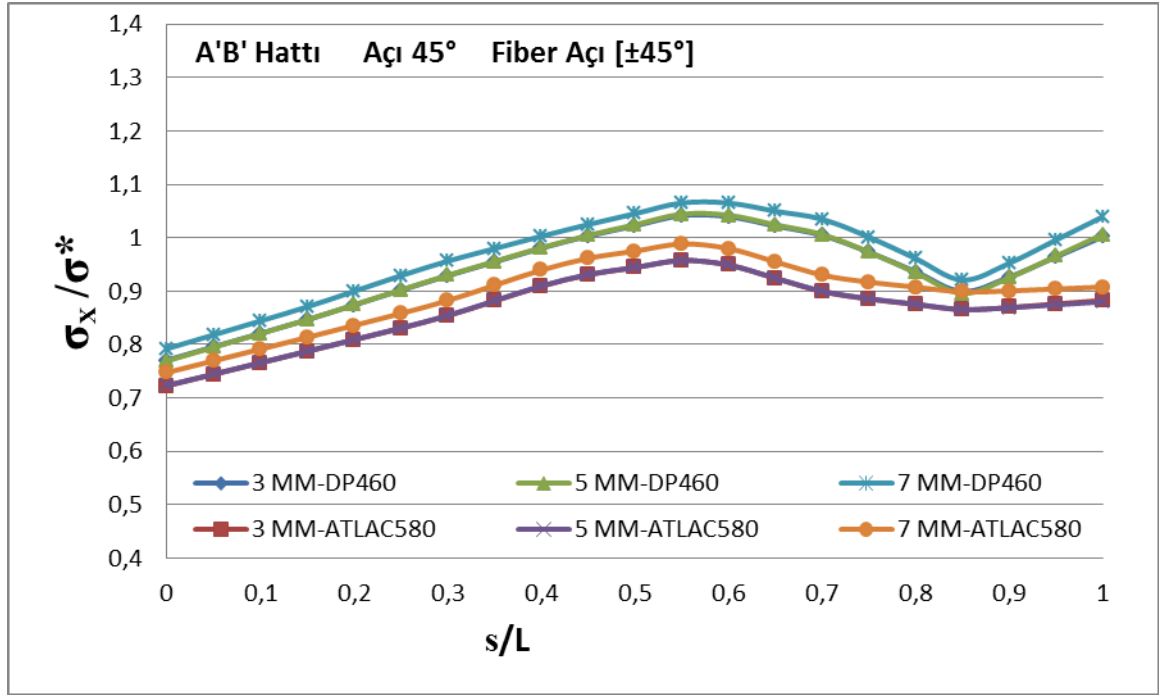
Şekil 3.120. 45° açılıya ait [0°/90°] serim açılındaki normalleştirilmiş σ_z gerilmeleri



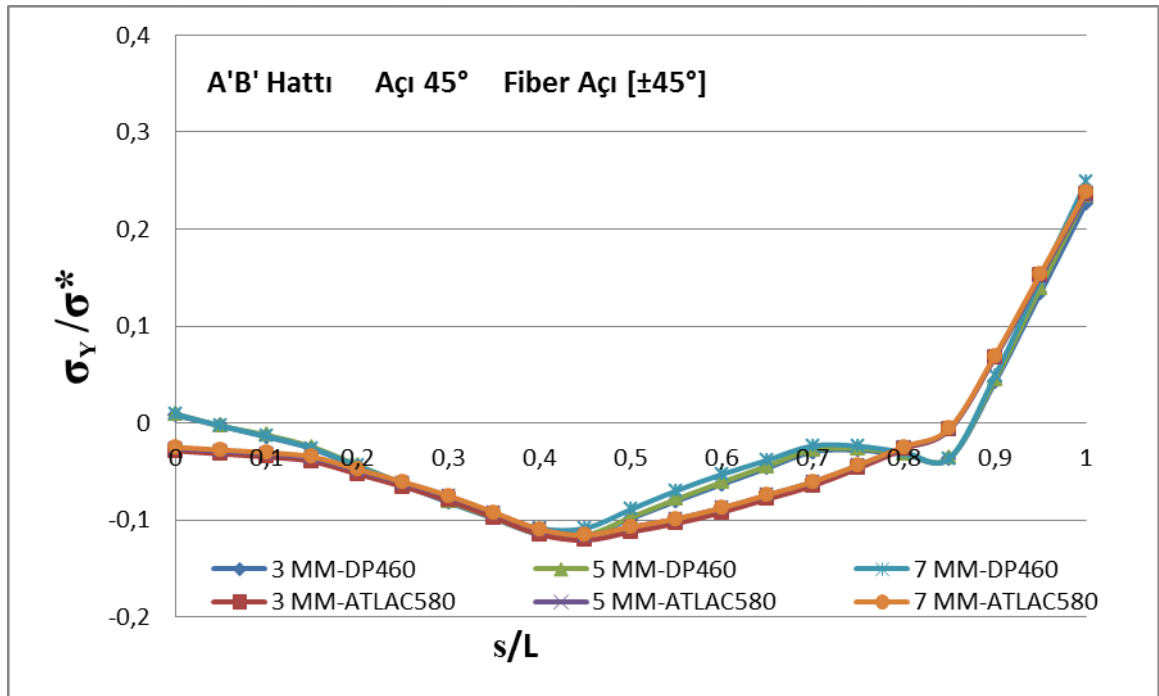
Şekil 3.121. 45° aç ıya ait [0°/90°] serim aç ısında ki normalleştirilmiş τ_{xy} gerilmeleri



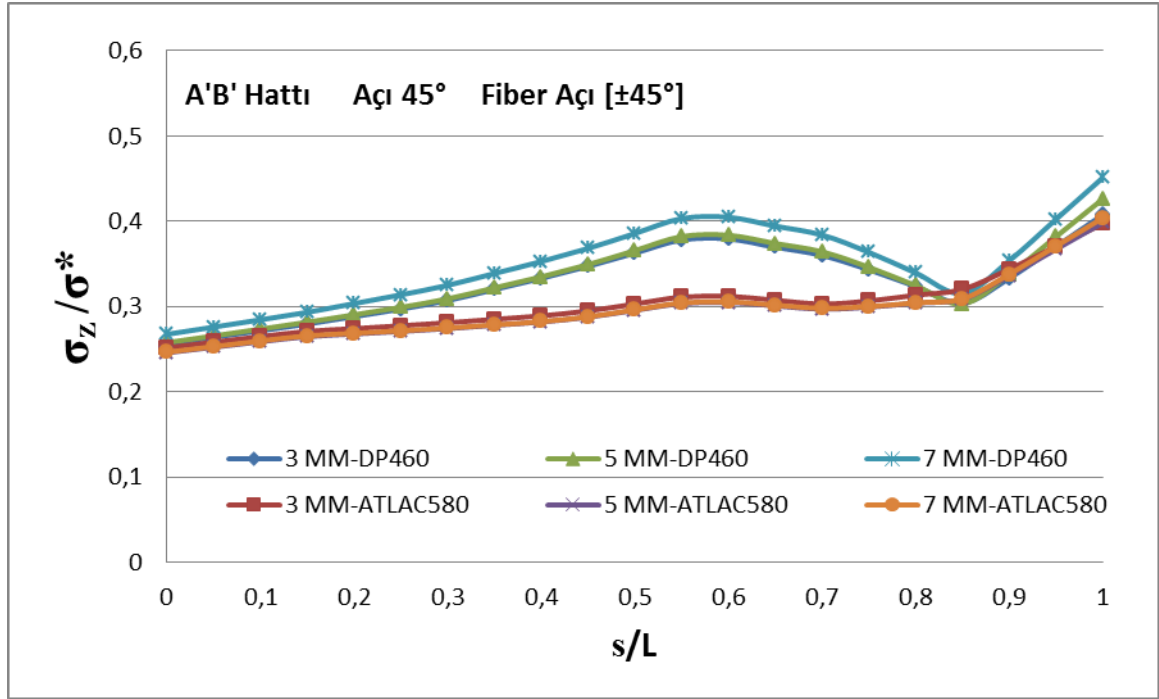
Şekil 3.122. 45° aç ıya ait [0°/90°] serim aç ısında ki normalleştirilmiş σ_{eqv} gerilmeleri



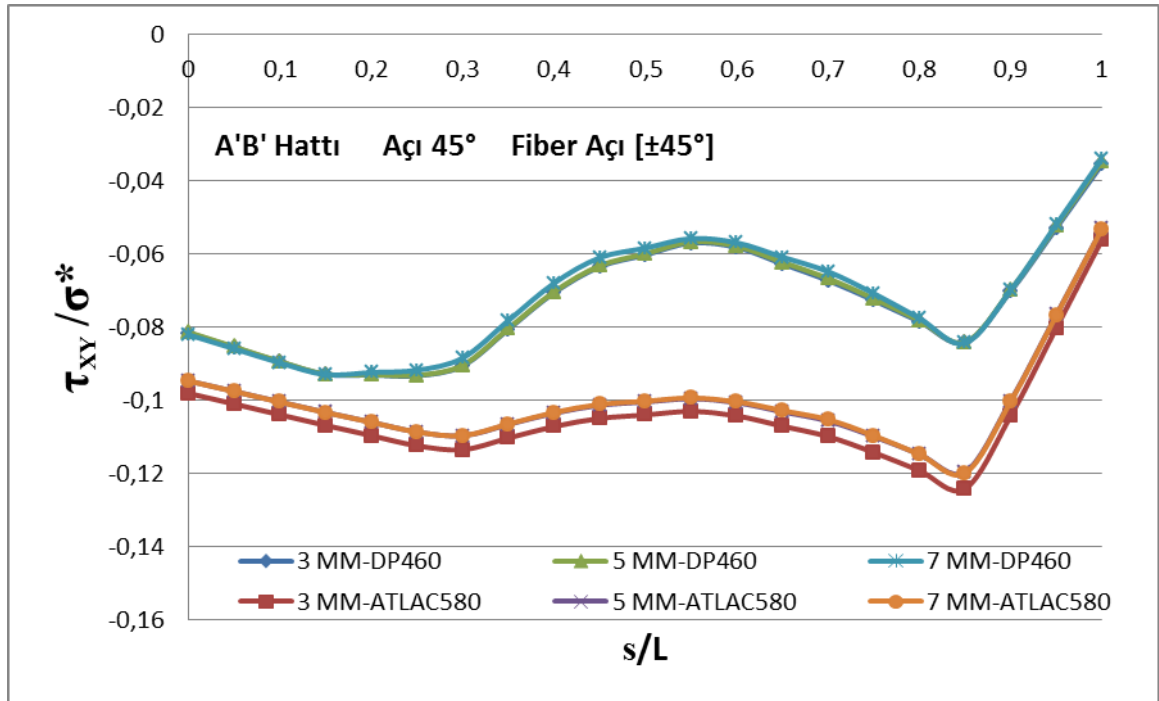
Şekil 3.123. 45° açığa ait [±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_x gerilmeleri



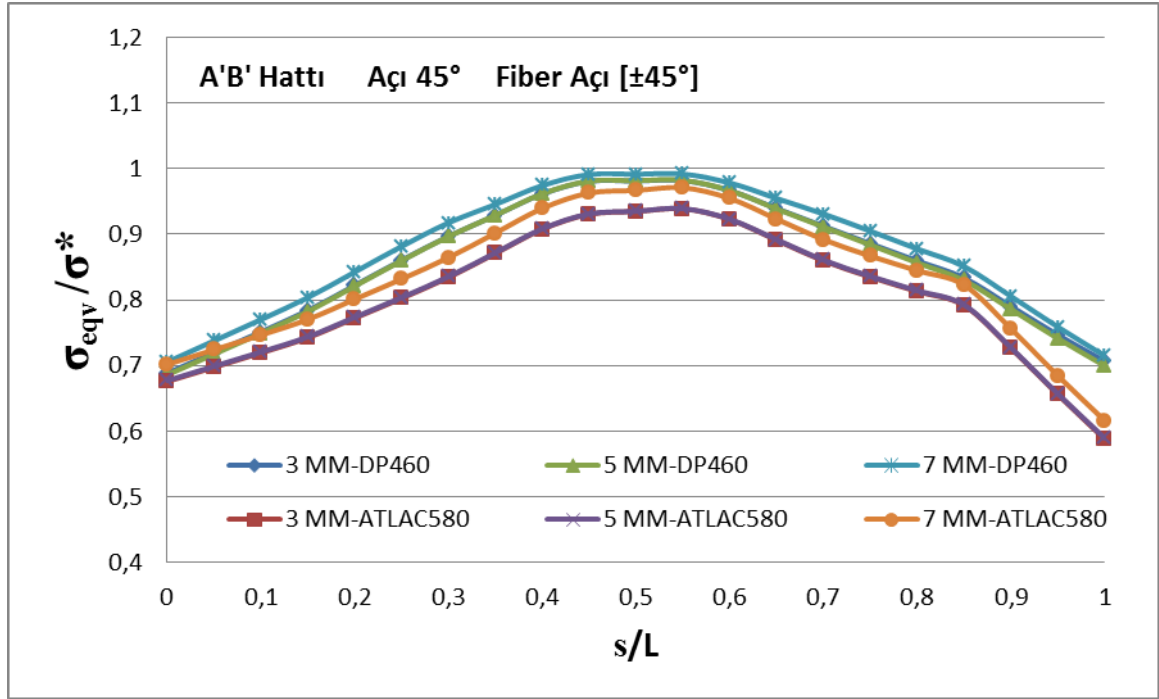
Şekil 3.124. 45° açığa ait [±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_y gerilmeleri



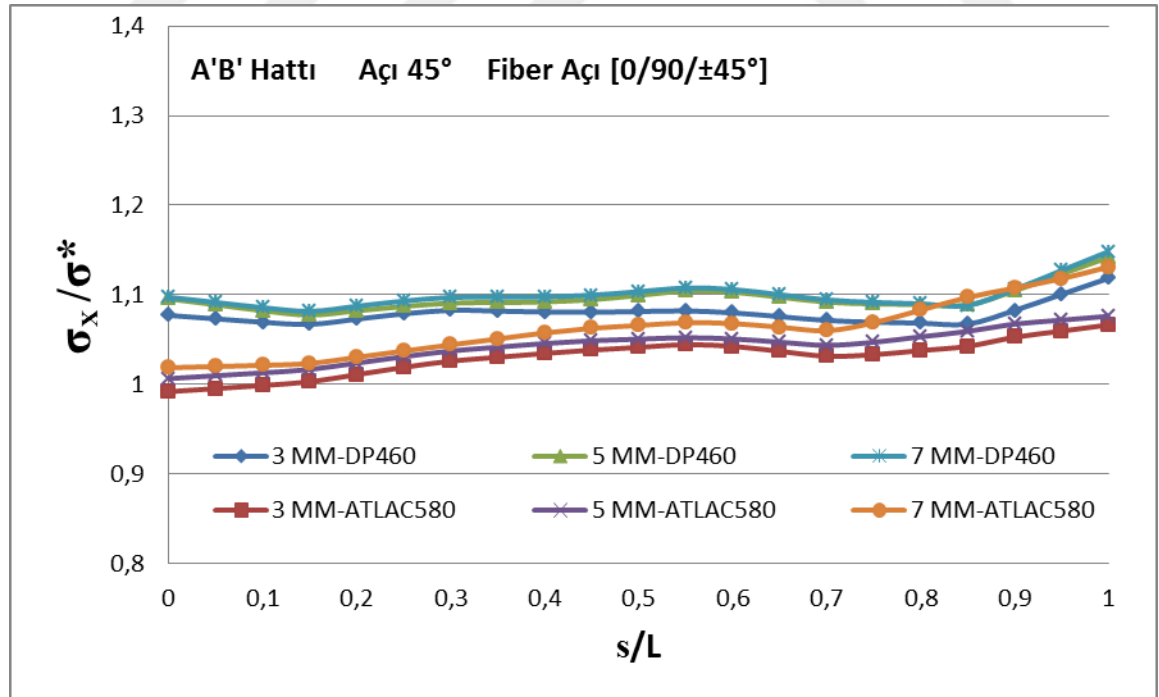
Şekil 3.125. 45° açiya ait [±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_z gerilmeleri



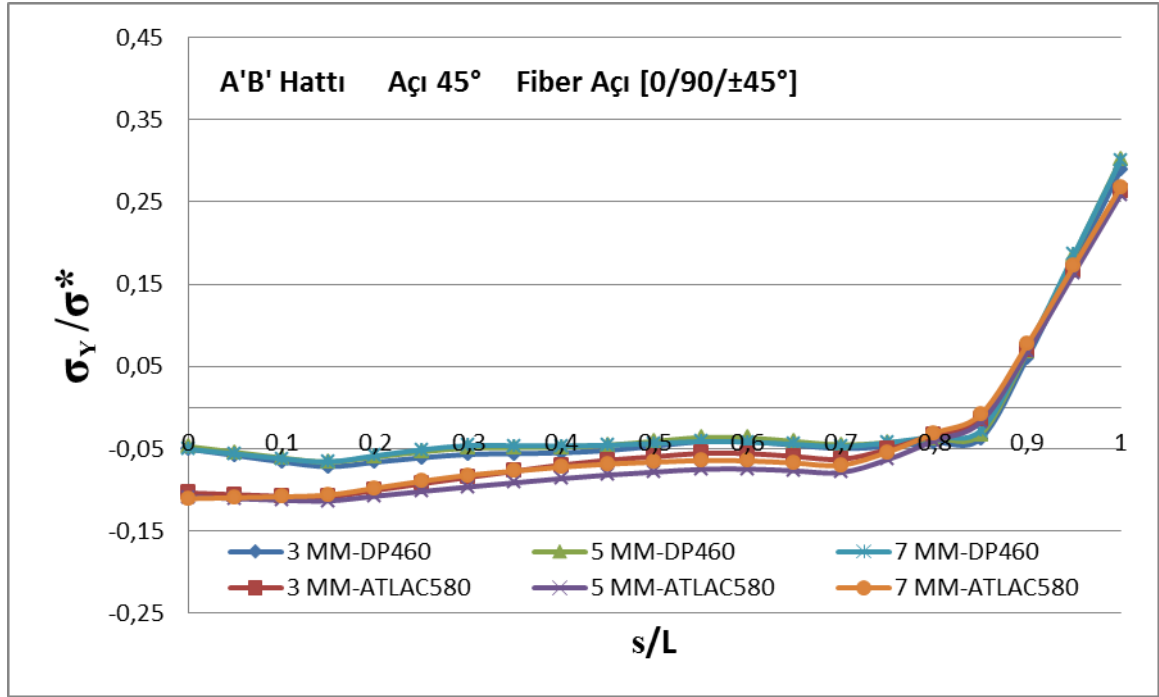
Şekil 3.126. 45° açiya ait [±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş τ_{xy} gerilmeleri



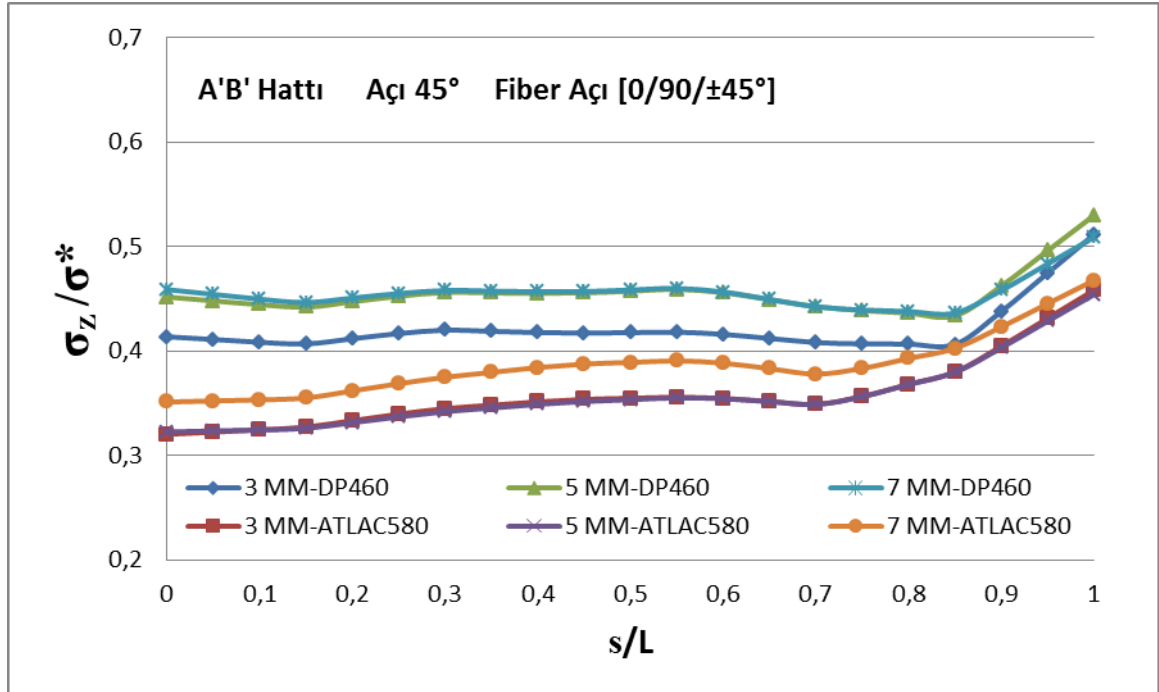
Şekil 3.127. 45° açığa ait [±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_{eqv} gerilmeleri



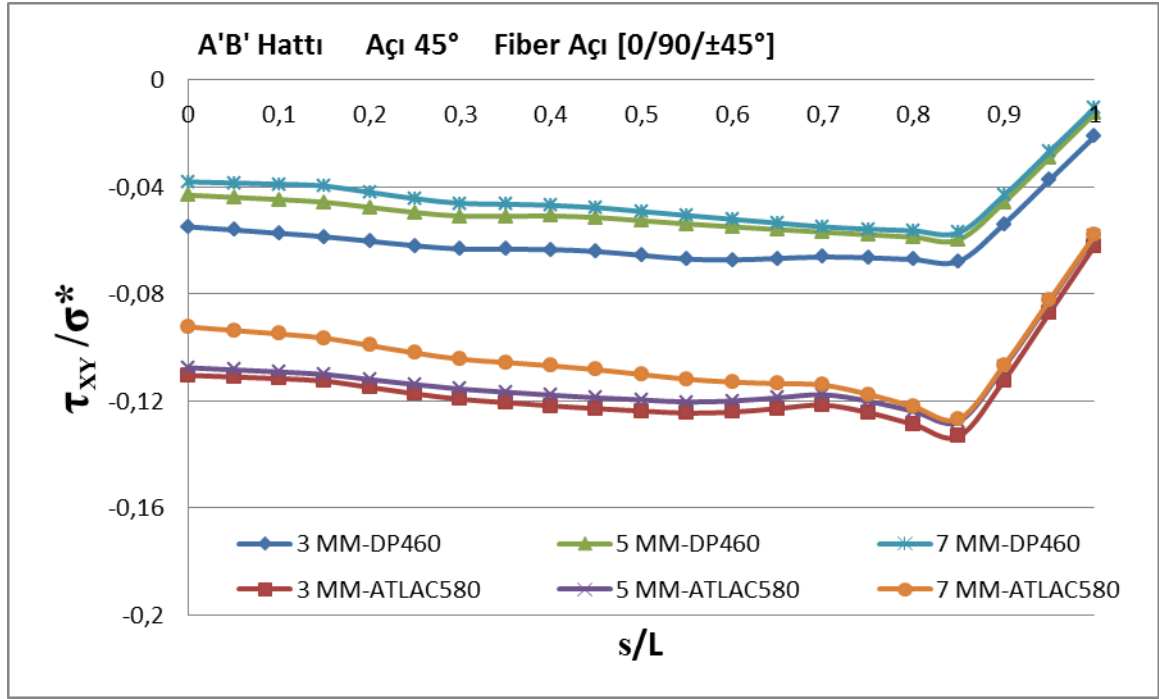
Şekil 3.128. 45° açığa ait [0°/90°/±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_x gerilmeleri



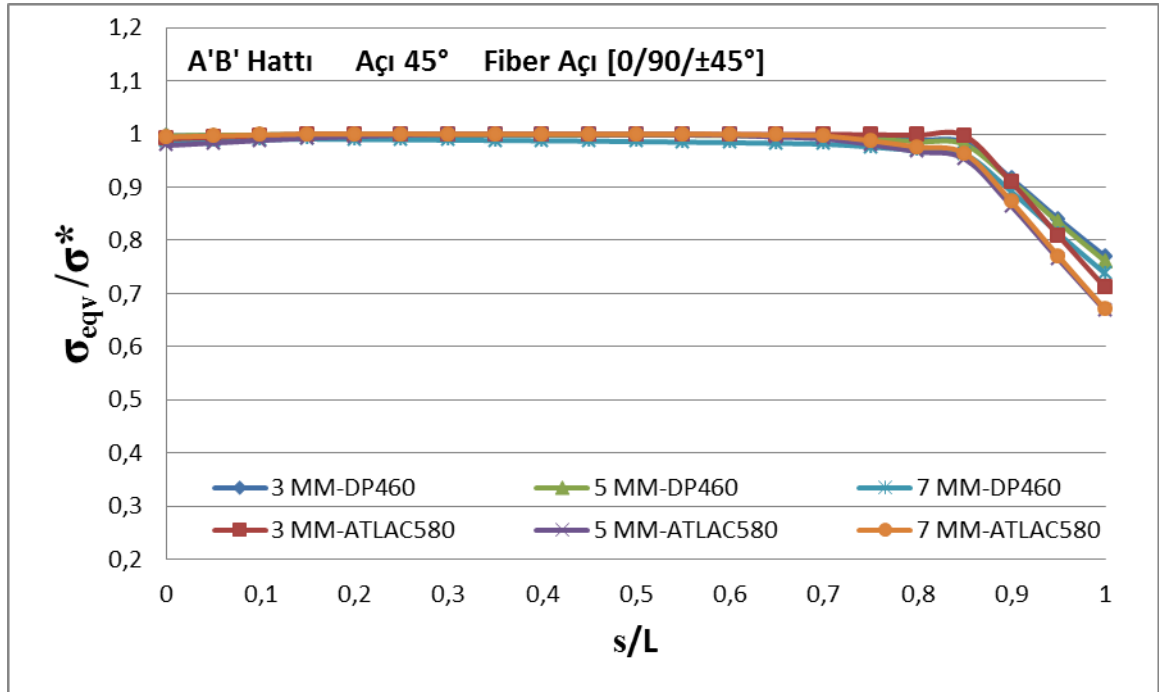
Şekil 3.129. 45° açığa ait [0°/90°/±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_y gerilmeleri



Şekil 3.130. 45° açığa ait [0°/90°/±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_z gerilmeleri



Şekil 3.131. 45° açığı aıt [0°/90°/±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş τ_{xy} gerilmeleri

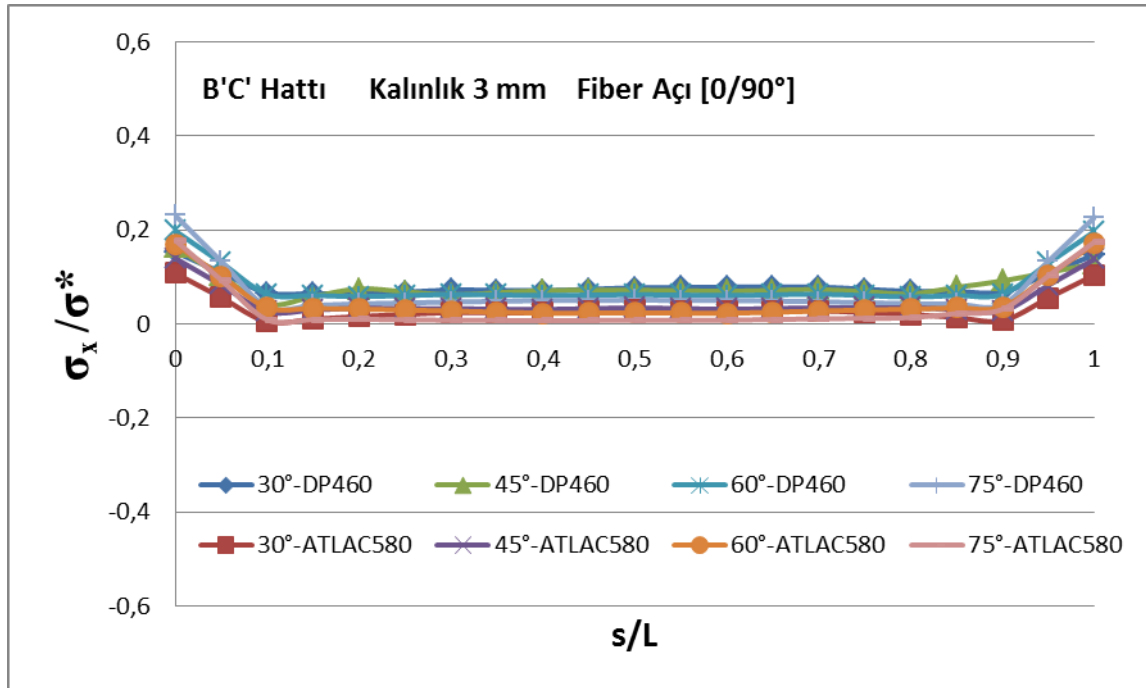


Şekil 3.132. 45° açığı aıt [0°/90°/±45°] serim, normalleştirilmiş σ_{eqv} gerilmeleri

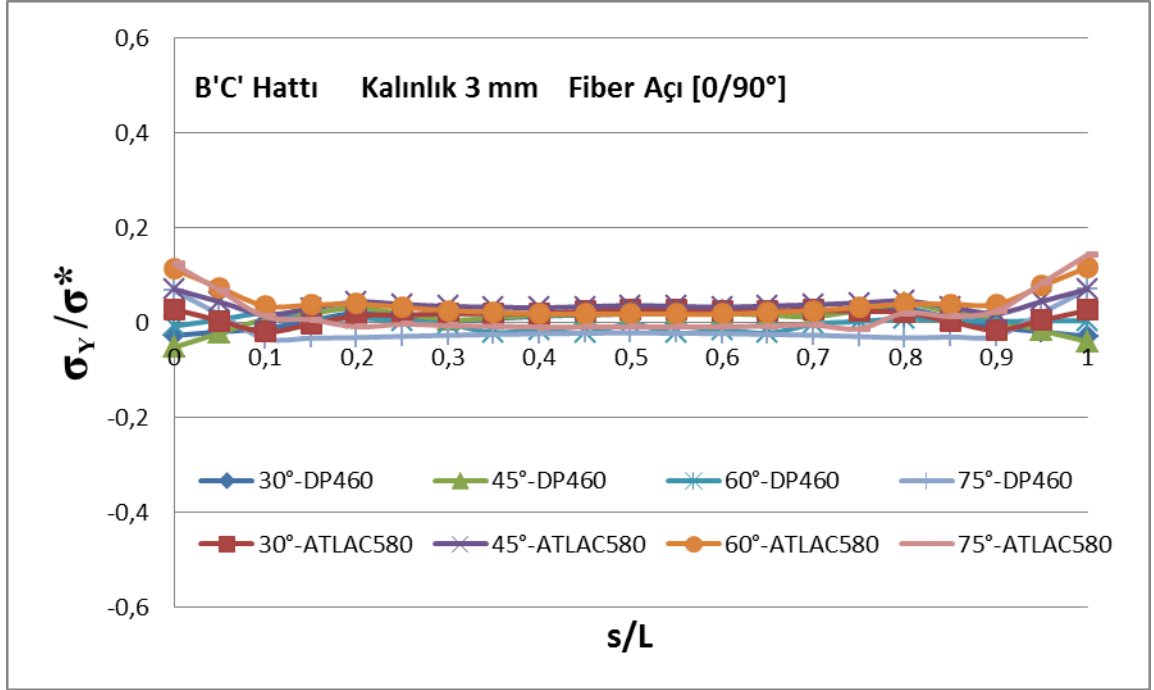
3.3.2.2. B'C' Hattı

Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıda, yapıştırıcı yüzeyinde B' noktasından C' noktasına (B'C') olmak üzere; kritik hatlar belirlenip gerilme dağılımları bu hatlar üzerinden alınarak grafikler oluşturulmuştur (Şekil 3.102)

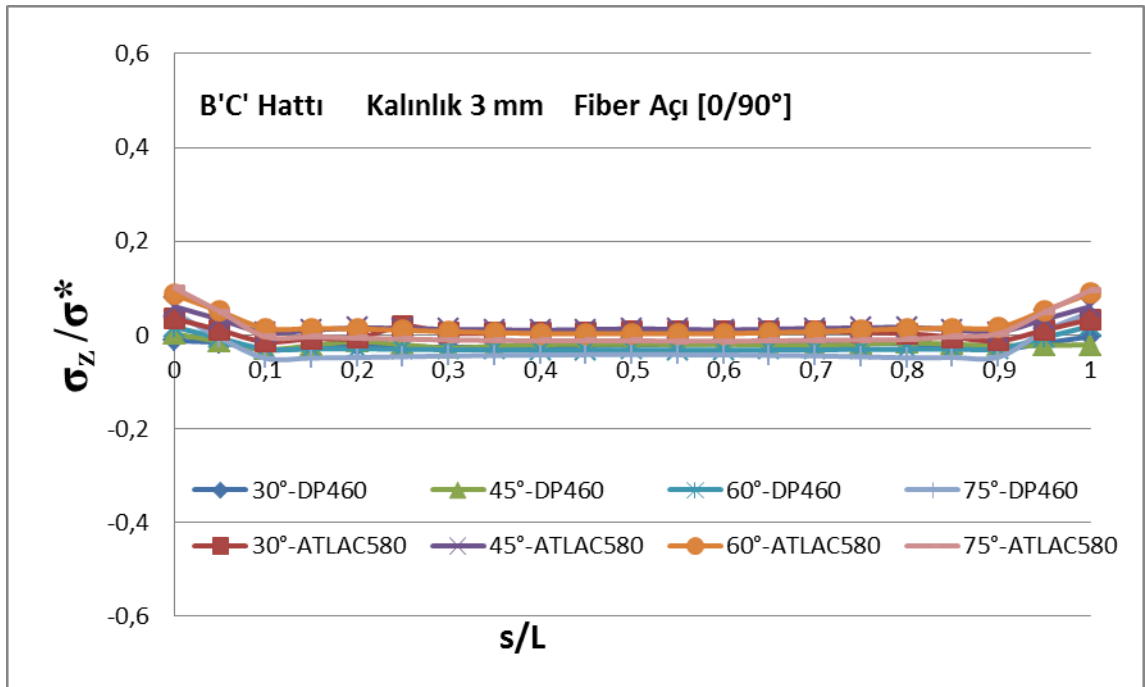
Şekil 3.133-3.147, 3 mm malzeme kalınlığında $[0^\circ/90^\circ]$ serim açısına sahip Dp460 ve Atlac580 ile birleştirilmiş yapışma bağlantılarında (B'-C') hattı boyunca oluşan normalleştirilmiş gerilme dağılımlarını göstermektedir. Yapıştırıcı ara yüzeydeki (B'C') gerilme değerleri bütün serim açılarındaki, yapıştırıcı normal yüzeydeki (BC) gerilme değerleriyle hemen hemen aynı çıkmıştır. Yapışma hattının her iki uç noktasında ($s/L=0$ ve $s/L=1$) oluşan gerilmelerde ani keskin sıçramalar yerine daha yumuşak geçişler görülmektedir. Grafiklerdeki eğriler daha düzgün çıkmıştır. Bu hattın daha uniform bir gerilme dağılımına sahip olduğu söylenebilir. Yapıştırıcıların karakteristik durumları (BC) hattıyla benzerlik göstermektedir. Gerilme değerleri en fazla $[0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ]$ serim açısına sahip malzemelerde görülürken en az gerilme değerleri $[0^\circ/90^\circ]$ serim açısına sahip malzemelerde ortaya çıkmıştır.



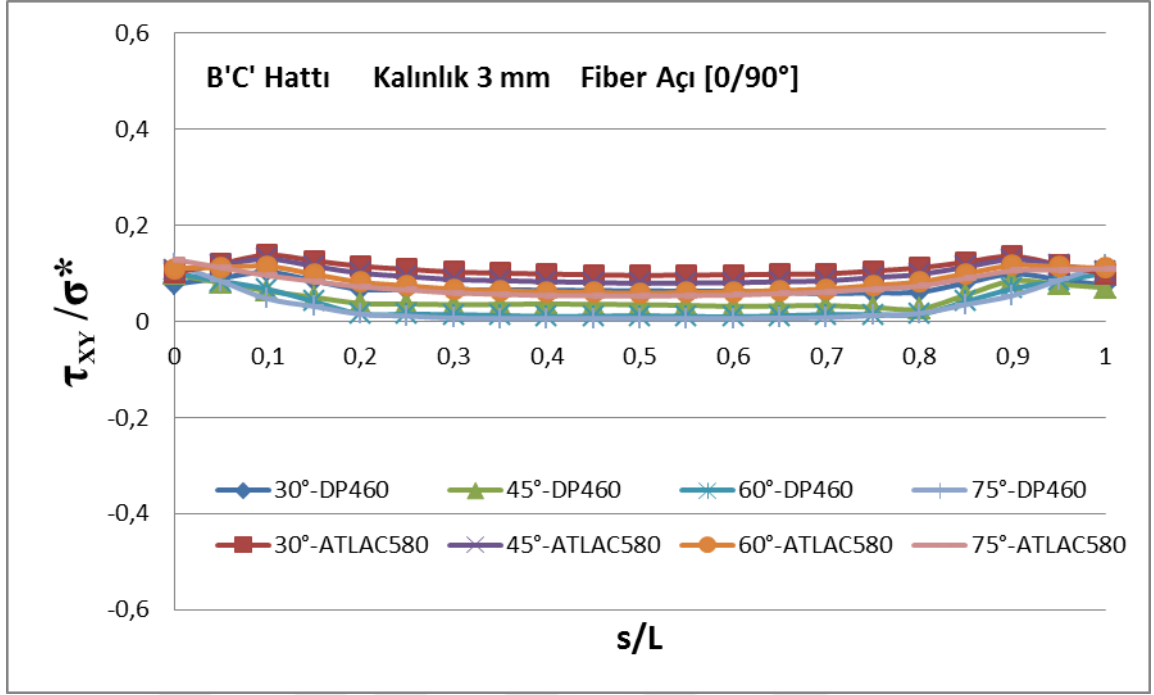
Şekil 3.133. $[0^\circ/90^\circ]$ serim açısındaki normalleştirilmiş σ_x gerilmeleri



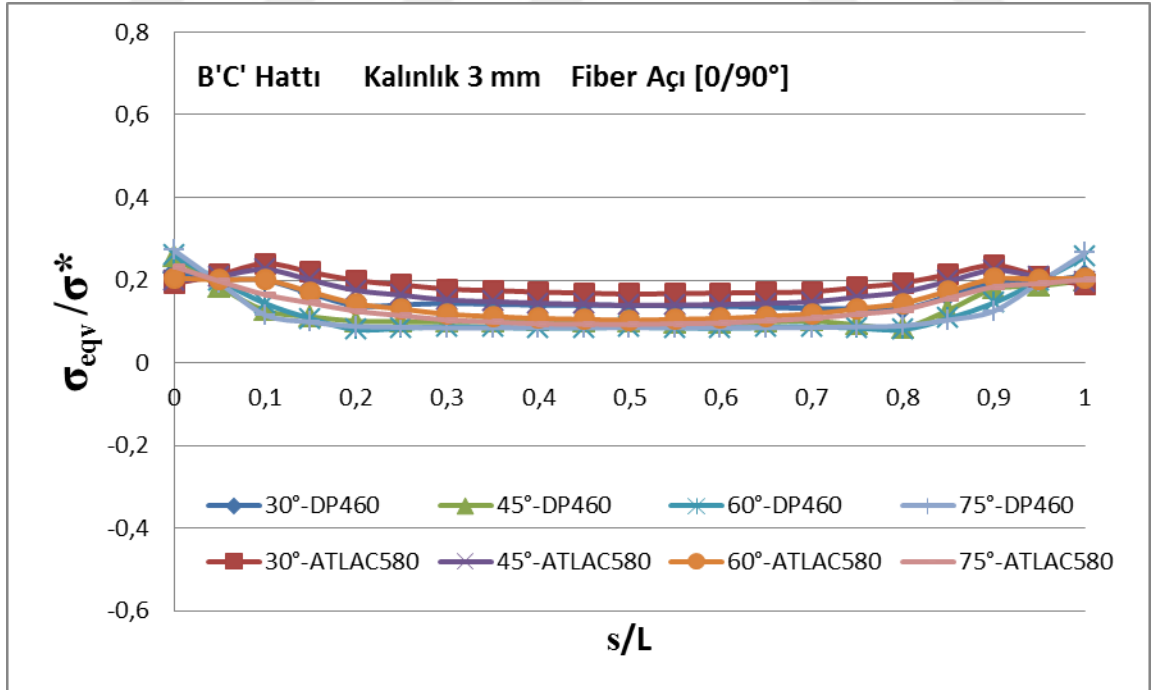
Şekil 3.134. [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_y gerilmeleri



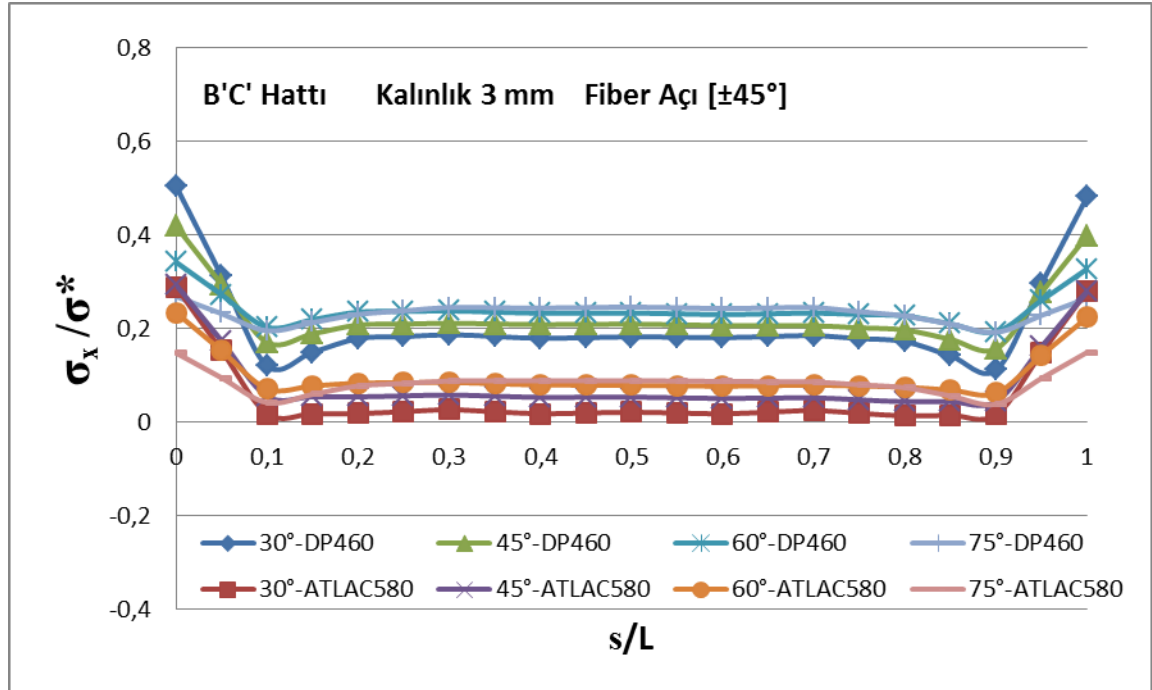
Şekil 3.135. [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_z gerilmeleri



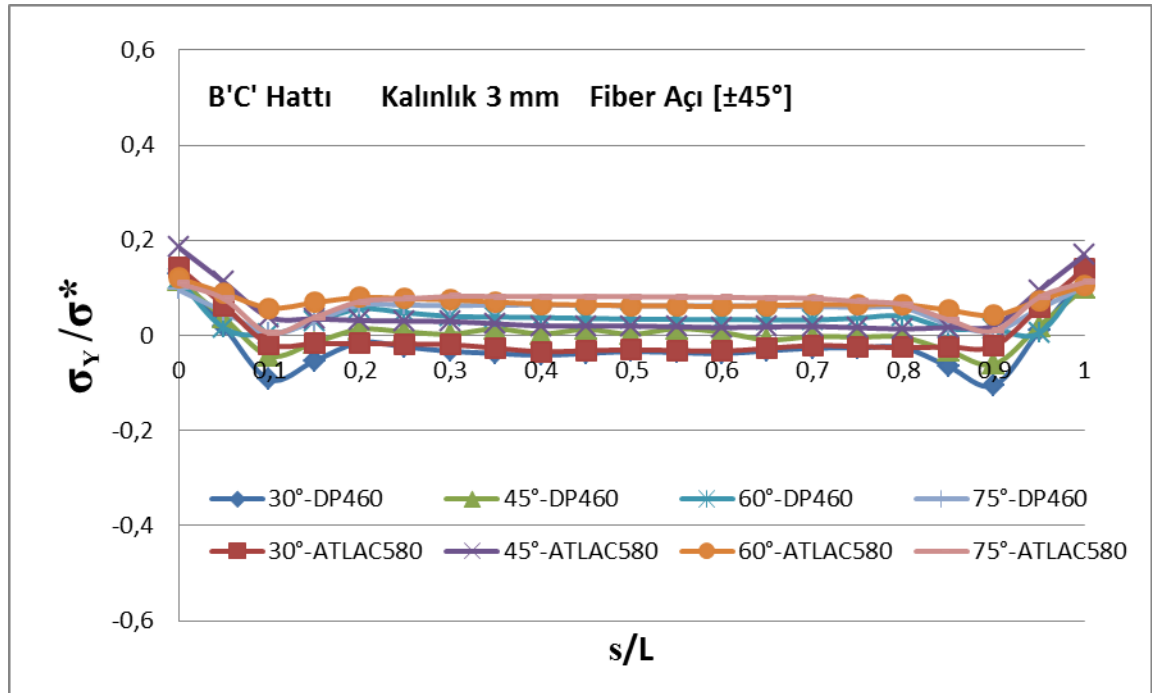
Şekil 3.136. [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş τ_{xy} gerilmeleri



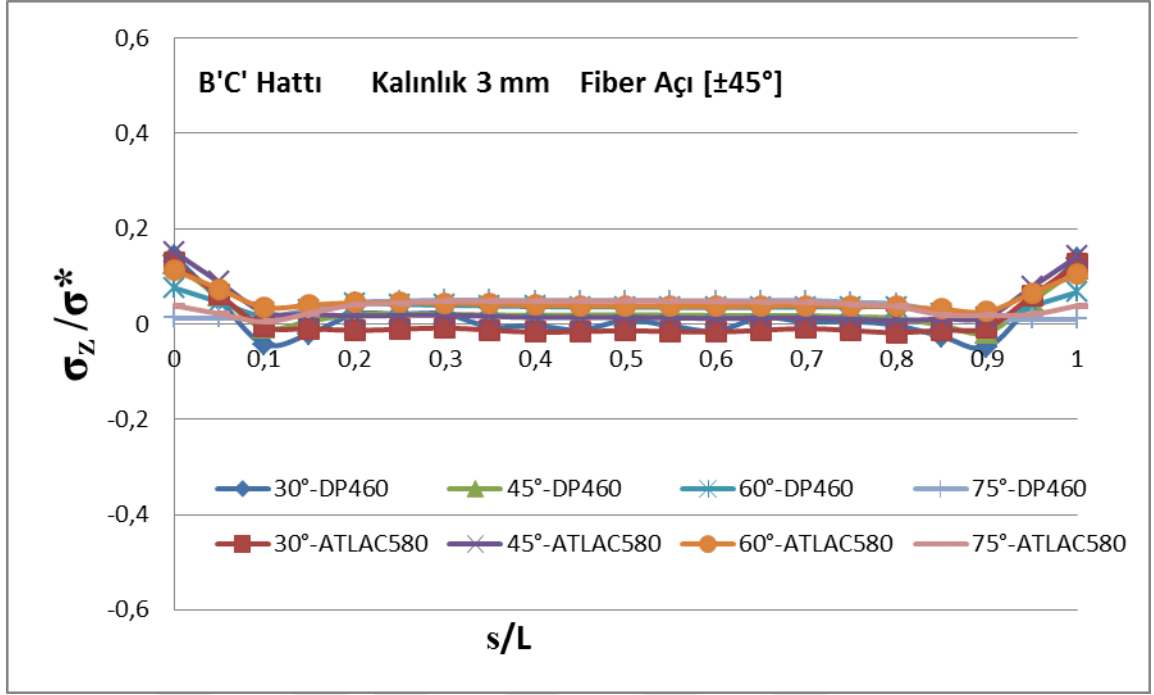
Şekil 3.137. [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_{eqv} gerilmeleri



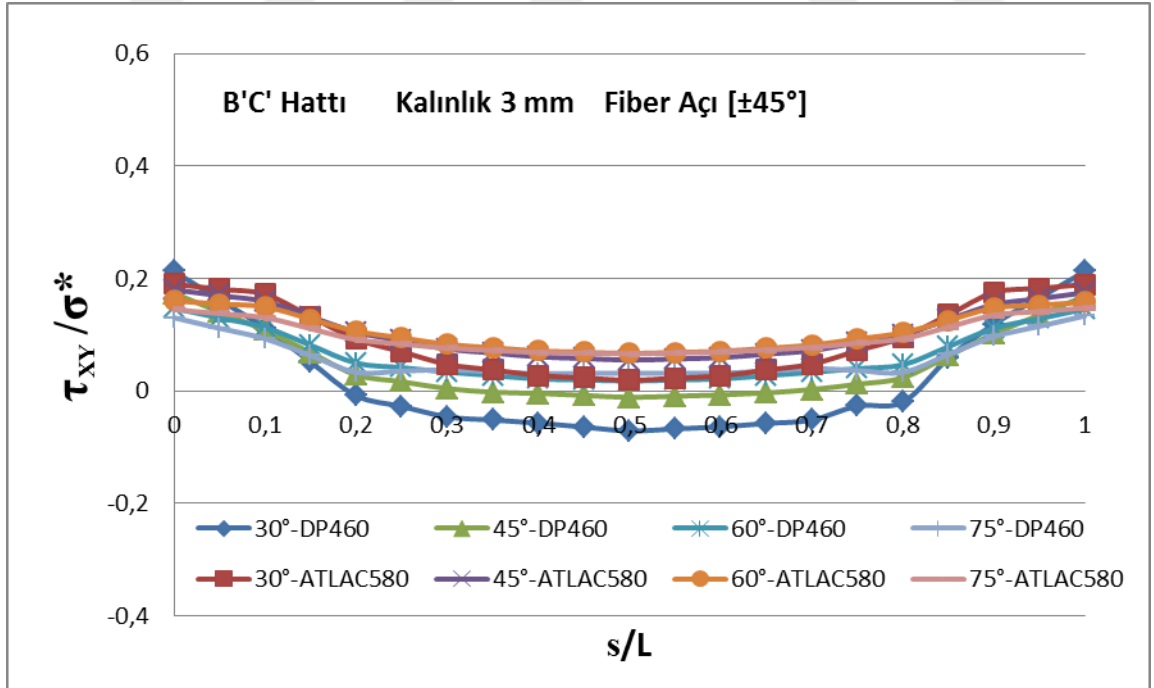
Şekil 3.138. [±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_x gerilmeleri



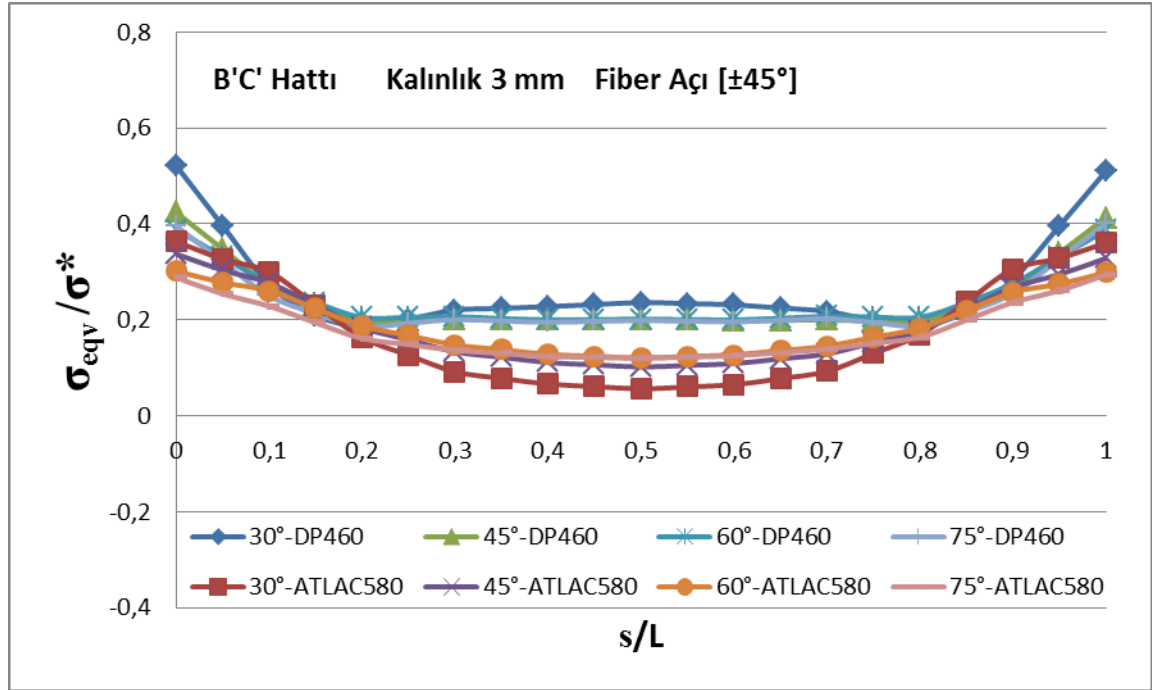
Şekil 3.139. [±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_y gerilmeleri



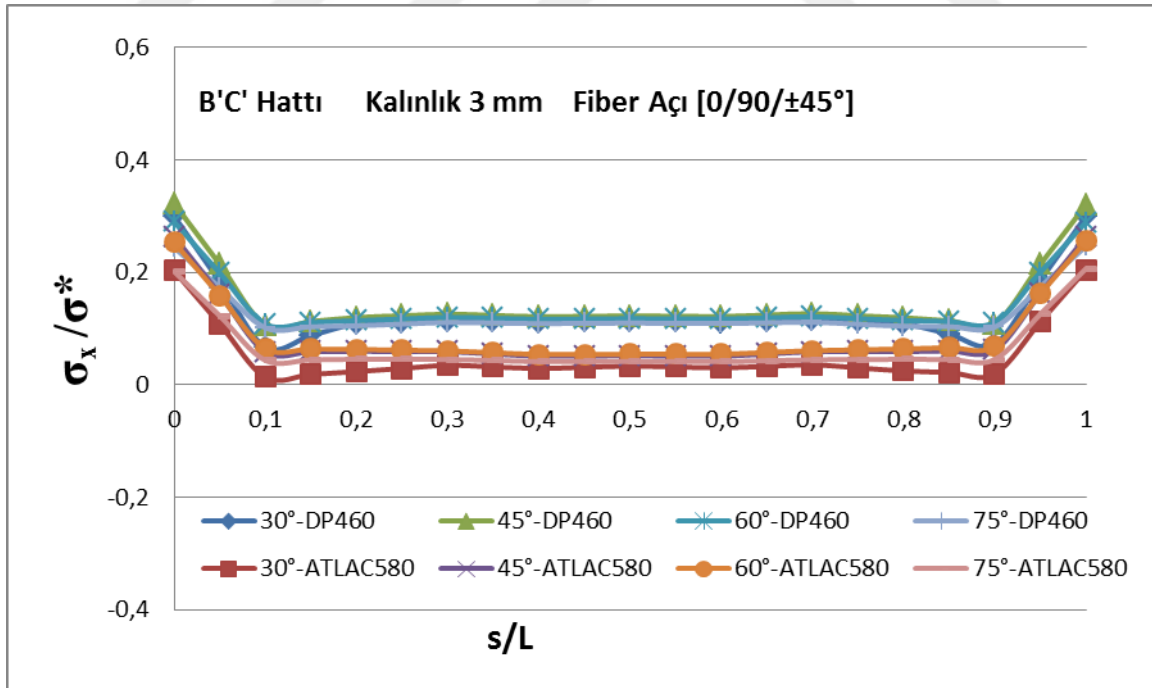
Şekil 3.140. [±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_z gerilmeleri



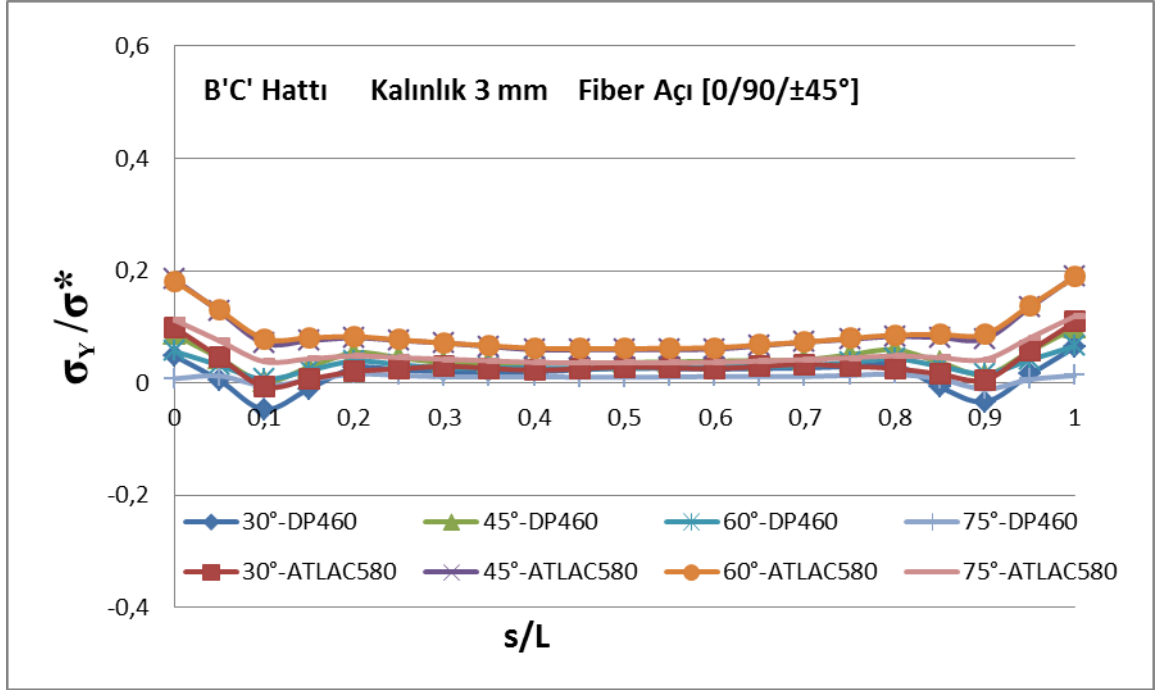
Şekil 3.141. [±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş τ_{xy} gerilmeleri



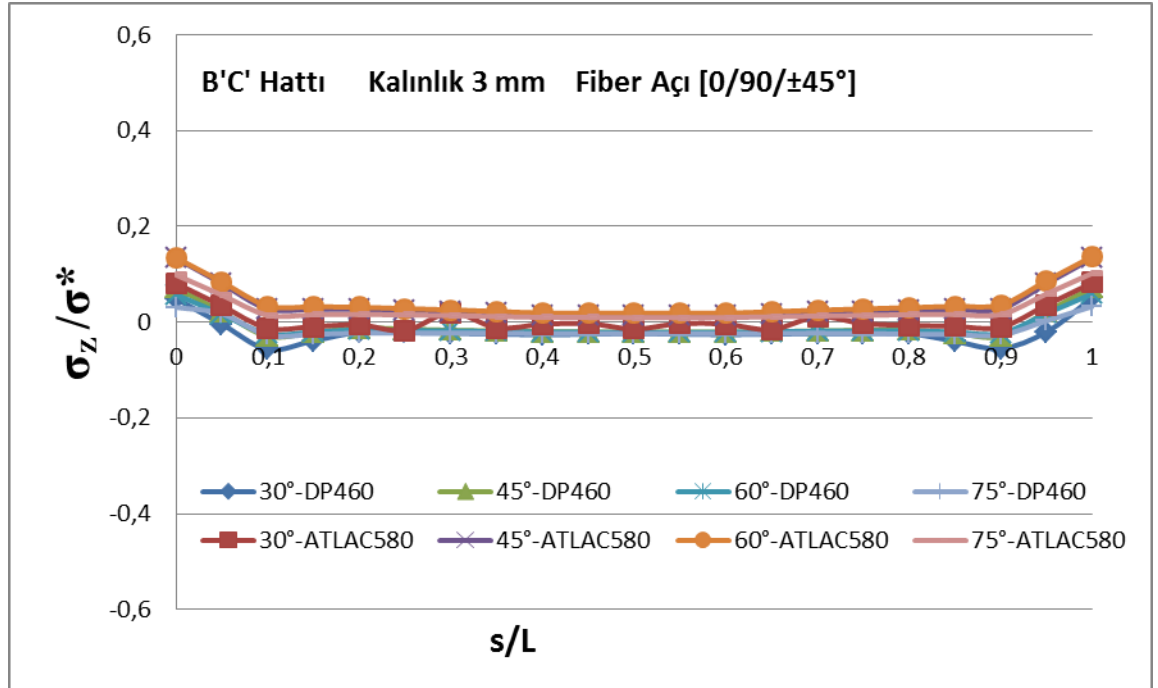
Şekil 3.142. [±45°] serim açısındaki normleştirilmiş σ_{eqv} gerilmeleri



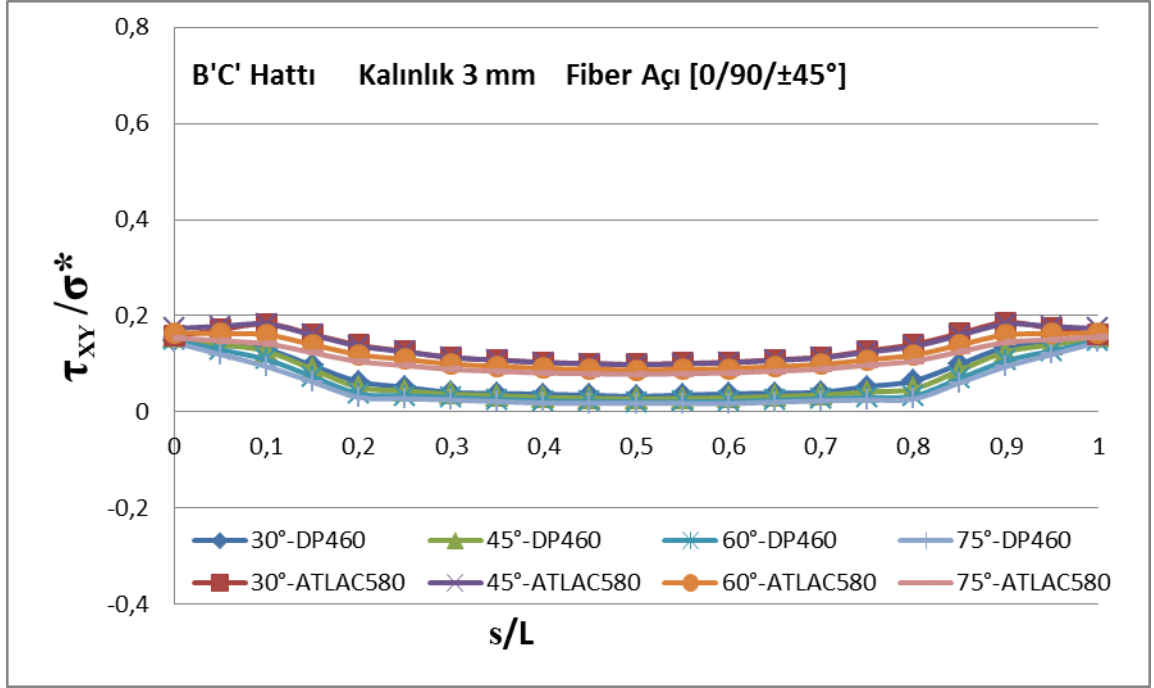
Şekil 3.143. [0°/90°/±45°] serim açısındaki normleştirilmiş σ_x gerilmeleri



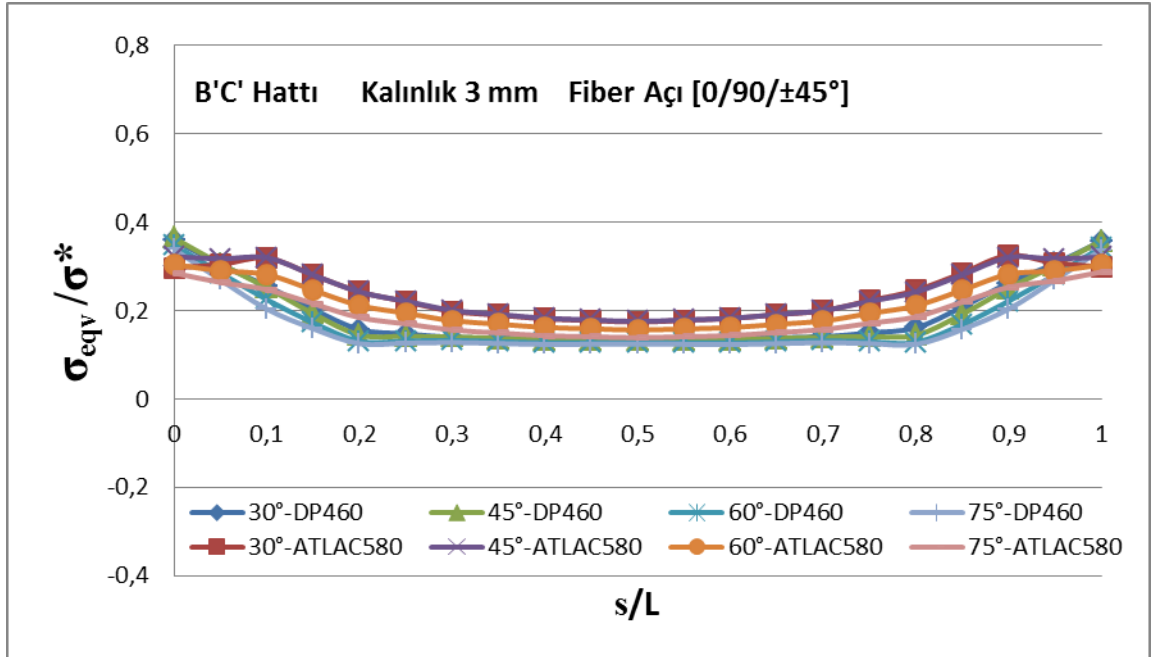
Şekil 3.144. [0°/90°/±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_y gerilmeleri



Şekil 3.145. [0°/90°/±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_z gerilmeleri

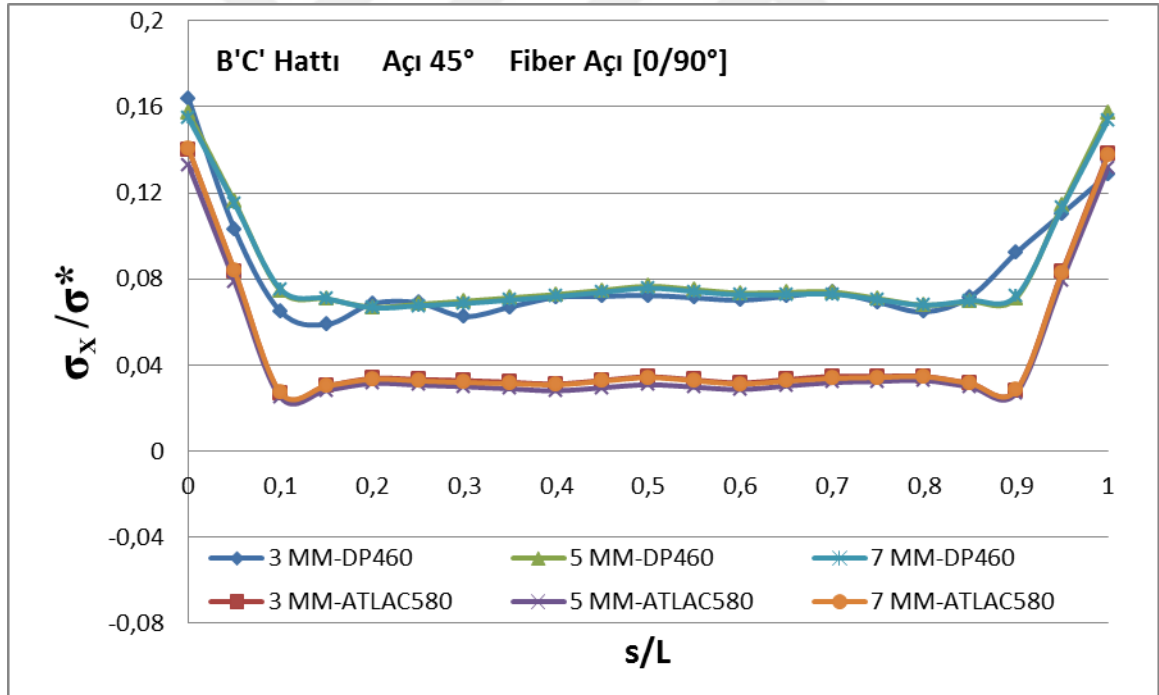


Şekil 3.146. [0°/90°/±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş τ_{xy} gerilmeleri

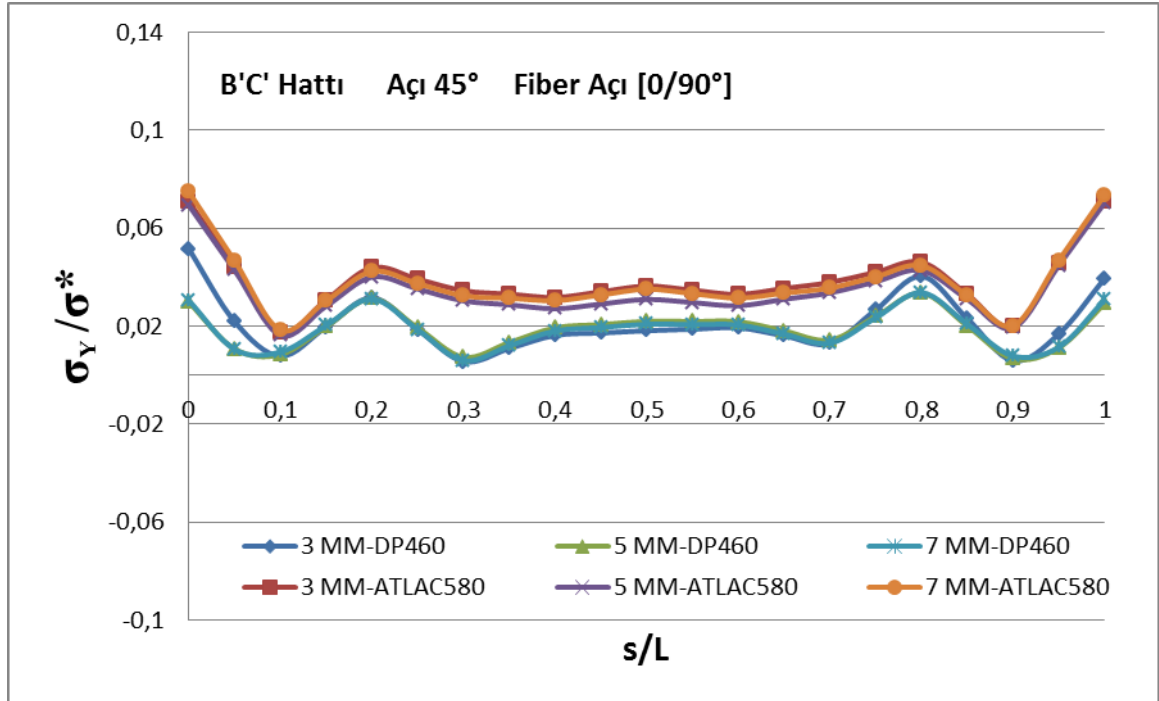


Şekil 3.147. [0°/90°/±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_{eqv} gerilmeleri

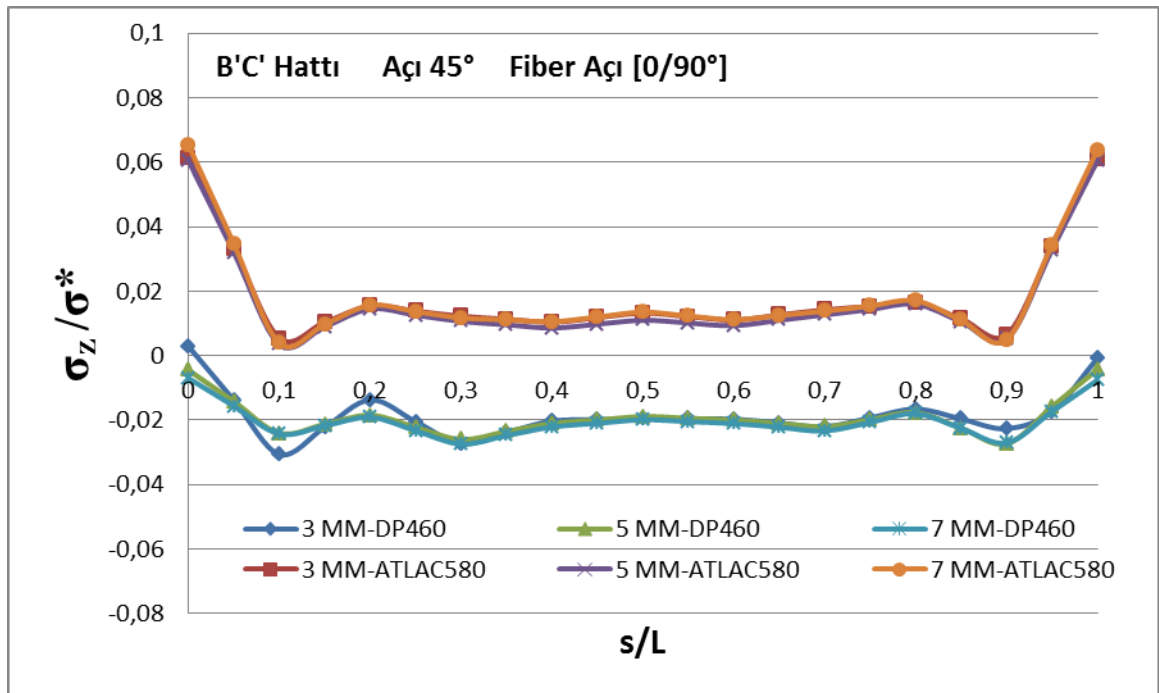
Şekil 3.148-3.162, 3 mm, 5 mm ve 7 mm malzeme kalınlığı için 45° bindirme açısında ve [0°/90°], [±45°], [0°/90°/±45°] serim açısına sahip Dp460 ve Atlac580 ile birleştirilmiş yapışma bağlantılarında (B'C') hattı boyunca oluşan normalleştirilmiş gerilme dağılımlarını göstermektedir. Yapıştırıcı ara yüzeydeki (B'C') gerilme değerleri bütün serim açılarında, yapıştırıcı normal yüzeydeki (BC) gerilme değerleriyle hemen hemen aynı çıkmıştır. Yapışma hattının her iki uç noktasında (s/L=0 ve s/L=1) oluşan gerilmelerde ani keskin sıçramalar yerine daha yumuşak geçişler görülmektedir. Grafiklerdeki eğriler daha düzgün çıkmıştır. Bu hattın daha uniform bir gerilme dağılımına sahip olduğu söylenebilir. Yapıştırıcıların karakteristik durumları (BC) hattıyla benzerlik göstermektedir. Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıda malzeme kalınlığı bağlantı mukavemeti üzerine etkisinin olduğu, ancak bu etkinin önemli bir seviyede olmadığı görülmektedir. Malzeme kalınlığı arttıkça yapıştırılan alan artmış ve doğal olarak da taşınan yükte artmıştır.



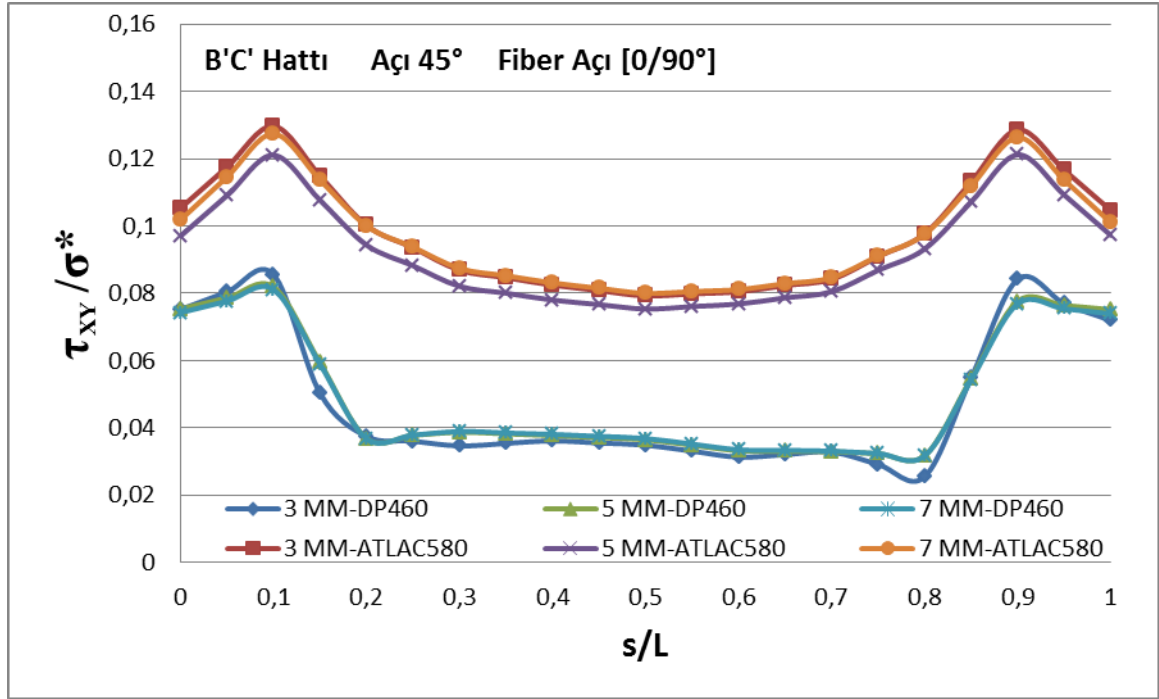
Şekil 3.148. 45° açığa ait [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_x gerilmeleri



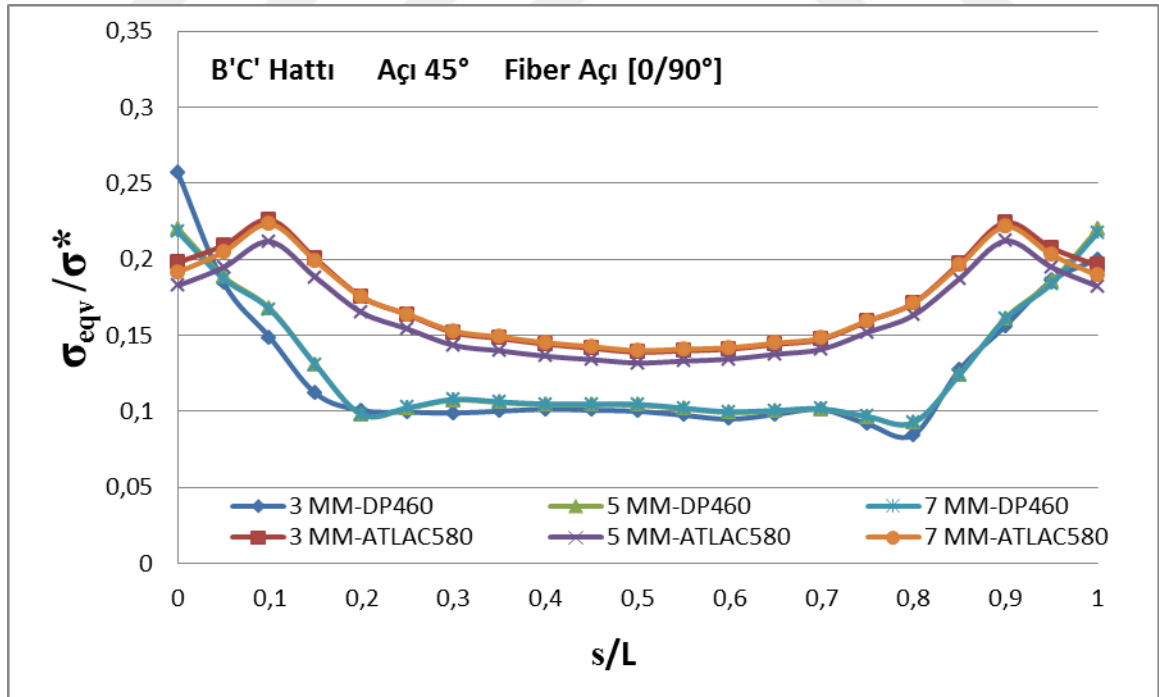
Şekil 3.149. 45° aç ıya ait [0°/90°] serim aç ısında ki normalleştirilmiş σ_y gerilmeleri



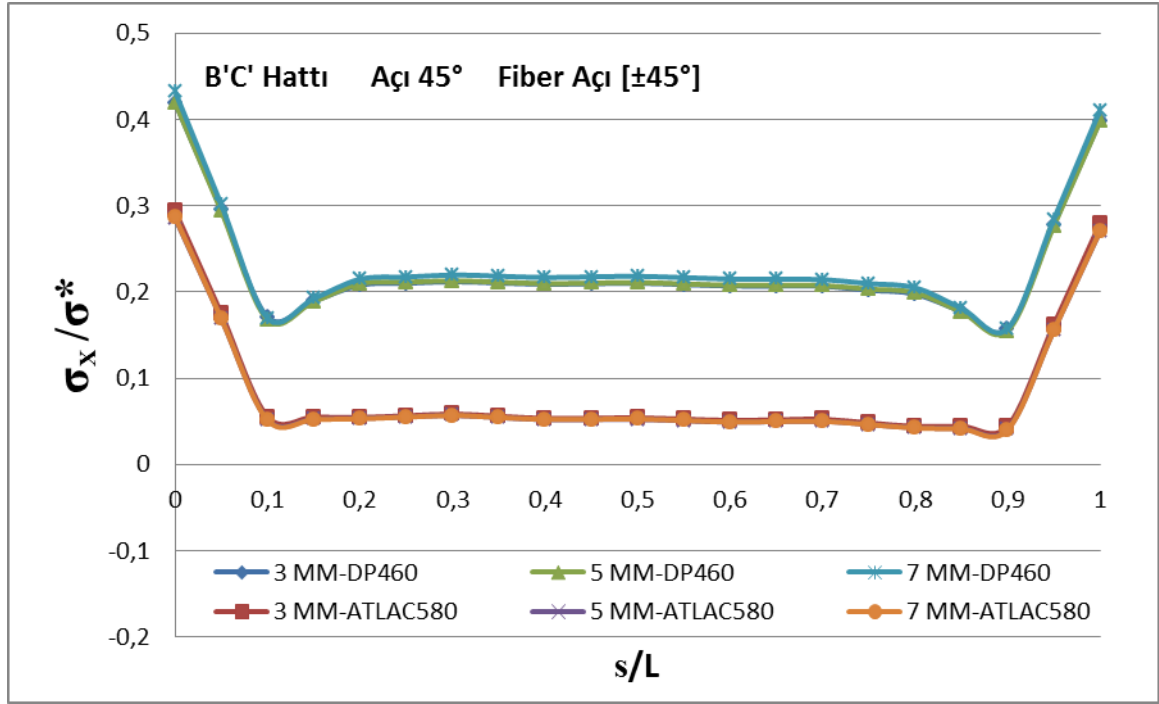
Şekil 3.150. 45° aç ıya ait [0°/90°] serim aç ısında ki normalleştirilmiş σ_z gerilmeleri



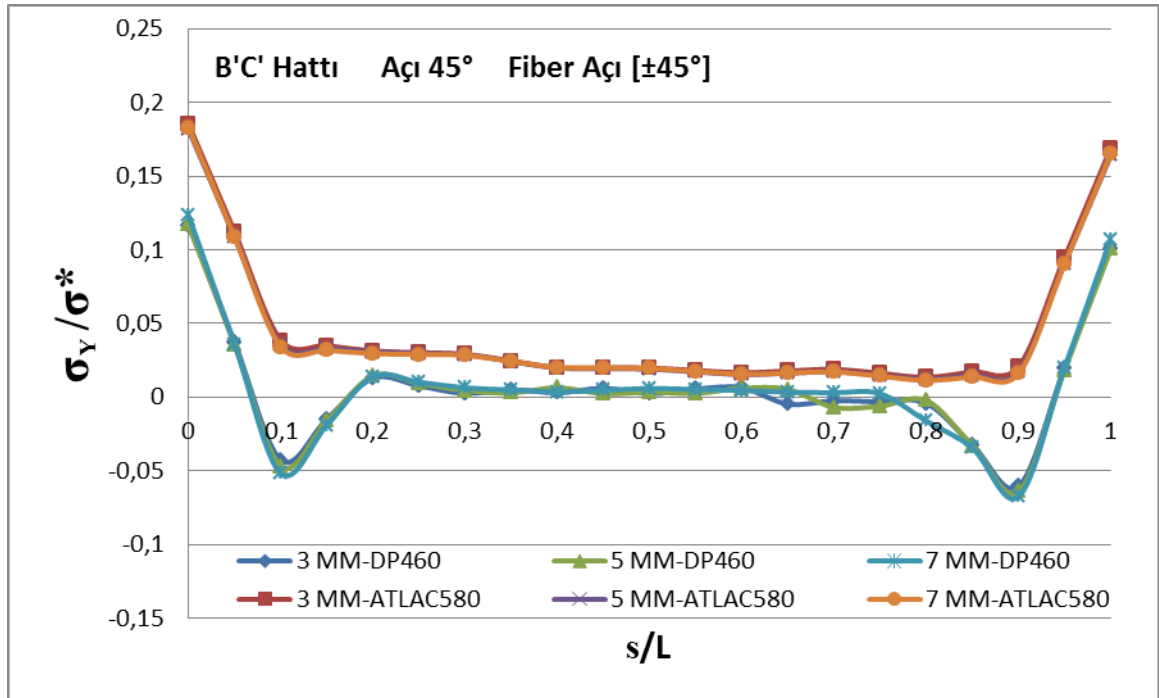
Şekil 3.151. 45° aç ıya ait [0°/90°] serim aç ısında ki normalleştirilmi ş τ_{xy} gerilmeleri



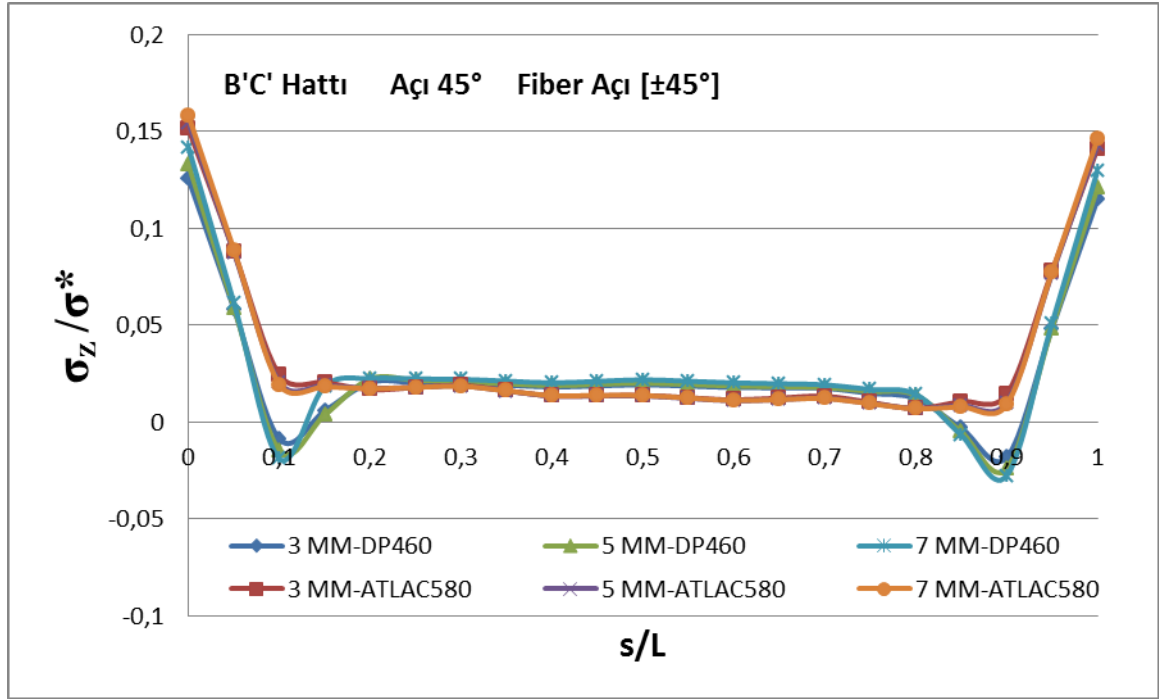
Şekil 3.152. 45° aç ıya ait [0°/90°] serim aç ısında ki normalleştirilmi ş σ_{eqv} gerilmeleri



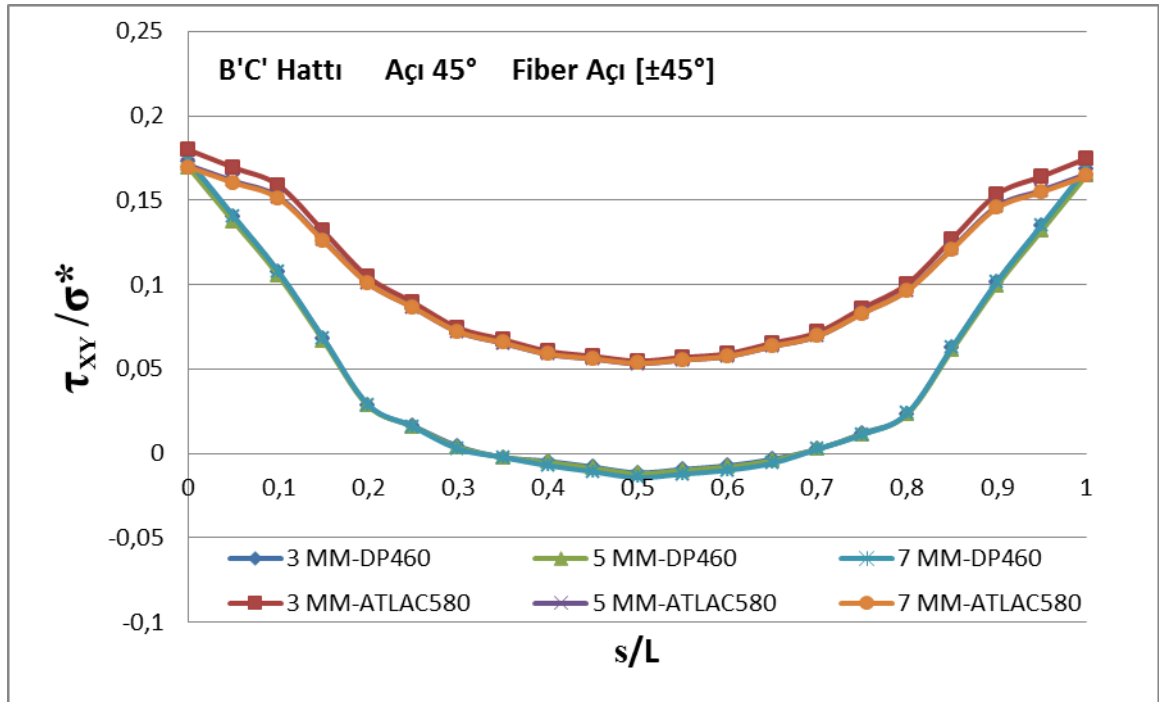
Şekil 3.153. 45° açığa ait [±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_x gerilmeleri



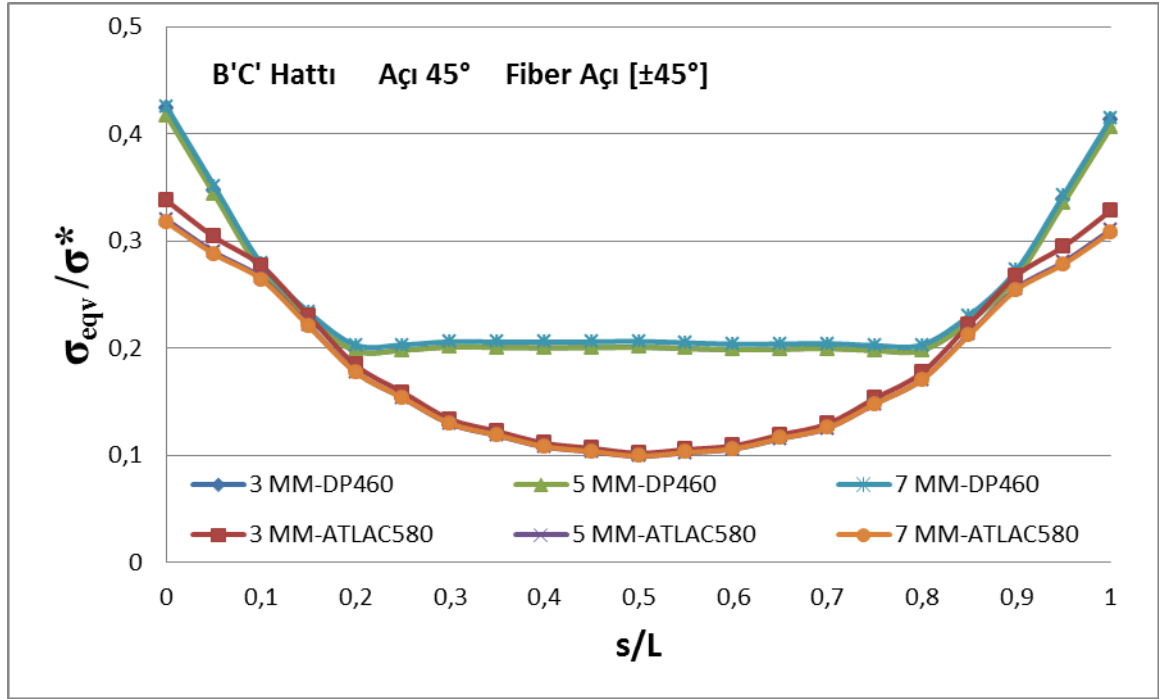
Şekil 3.154. 45° açığa ait [±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_y gerilmeleri



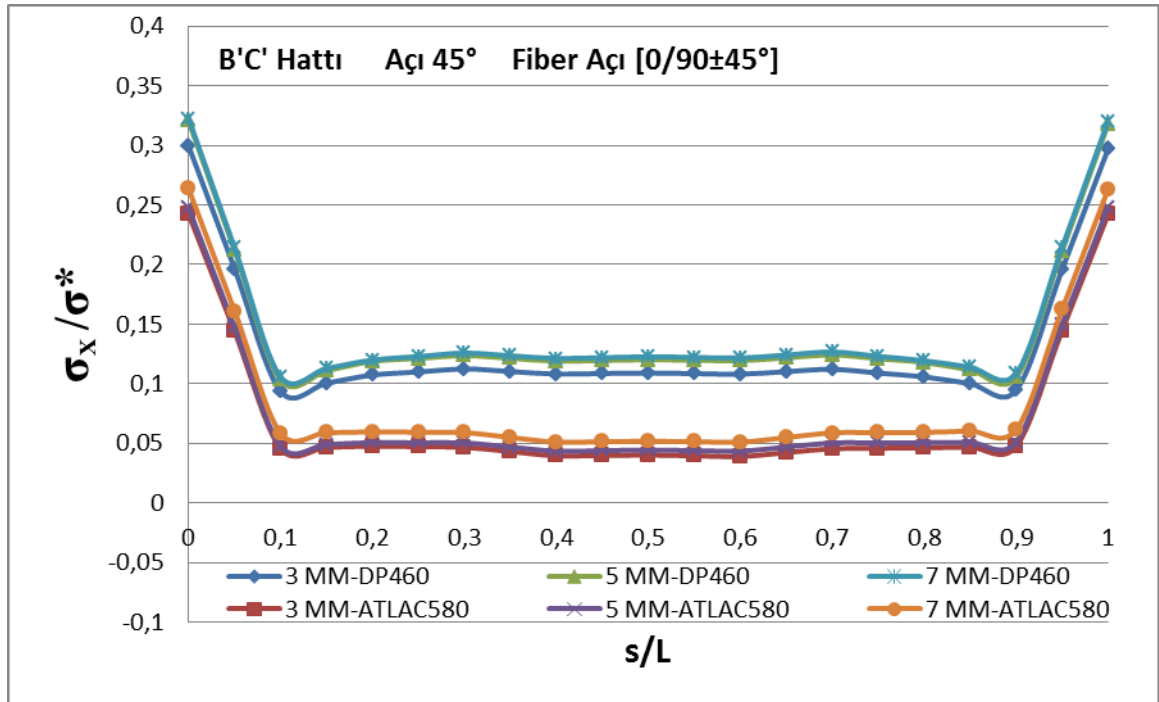
Şekil 3.155. 45° aç ıya ait [±45°] serim aç ısında ki normalleştirilmiş σ_z gerilmeleri



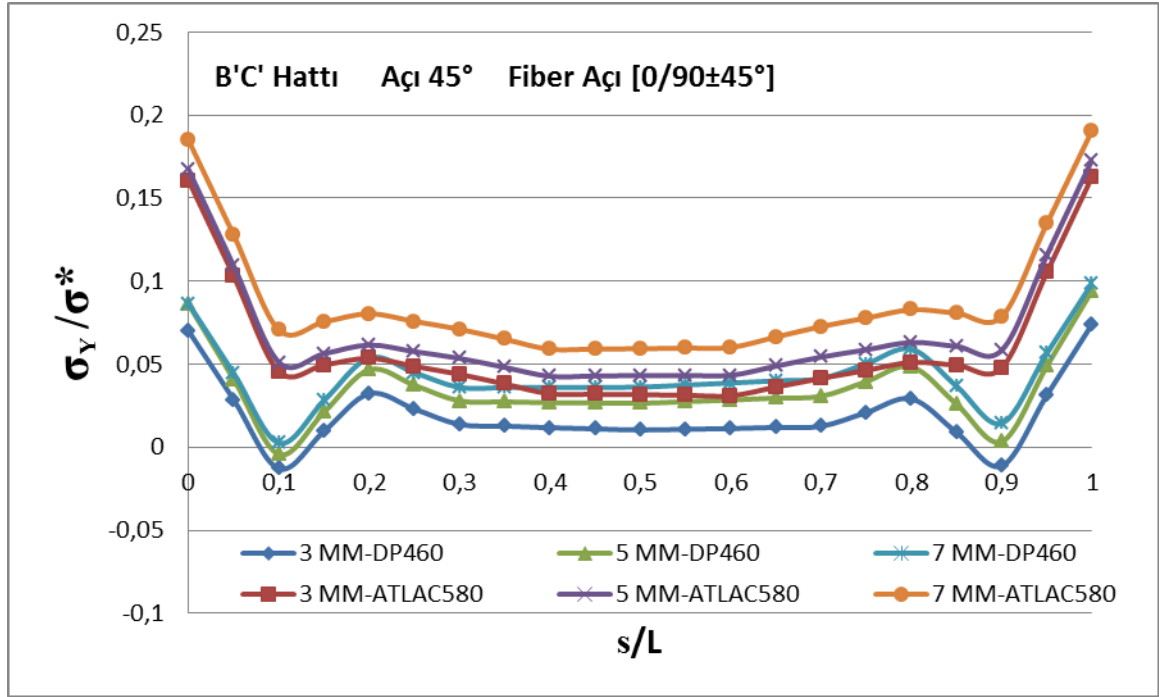
Şekil 3.156. 45° aç ıya ait [±45°] serim aç ısında ki normalleştirilmiş τ_{xy} gerilmeleri



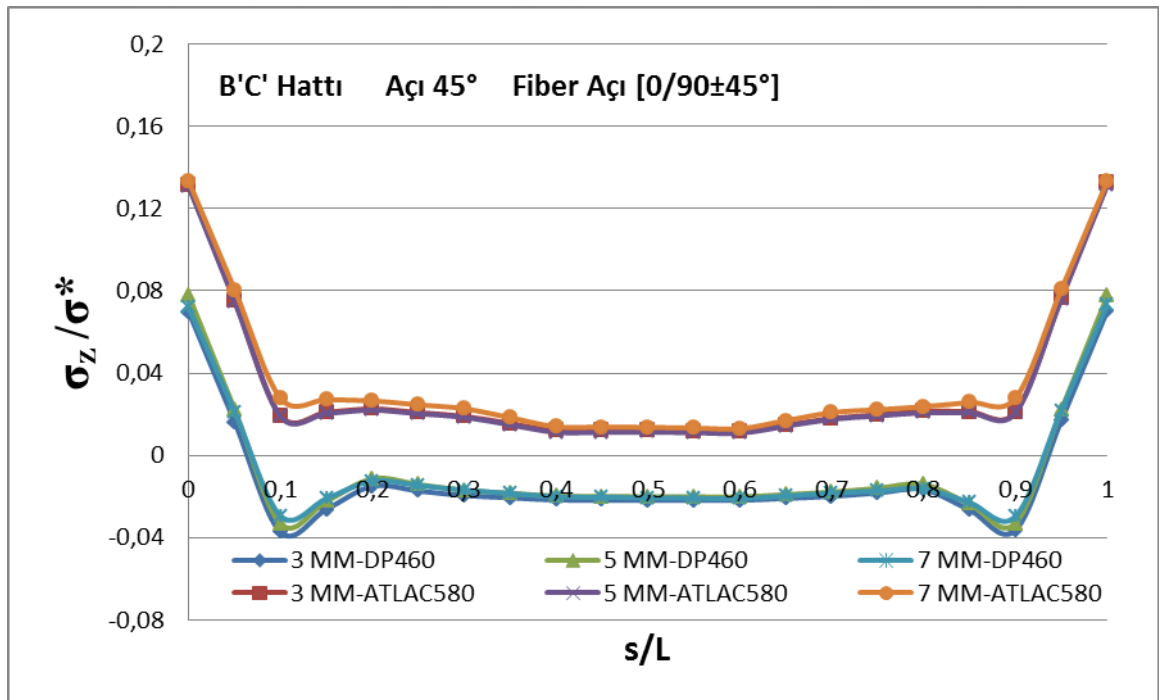
Şekil 3.157. 45° açığa ait [±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_{eqv} gerilmeleri



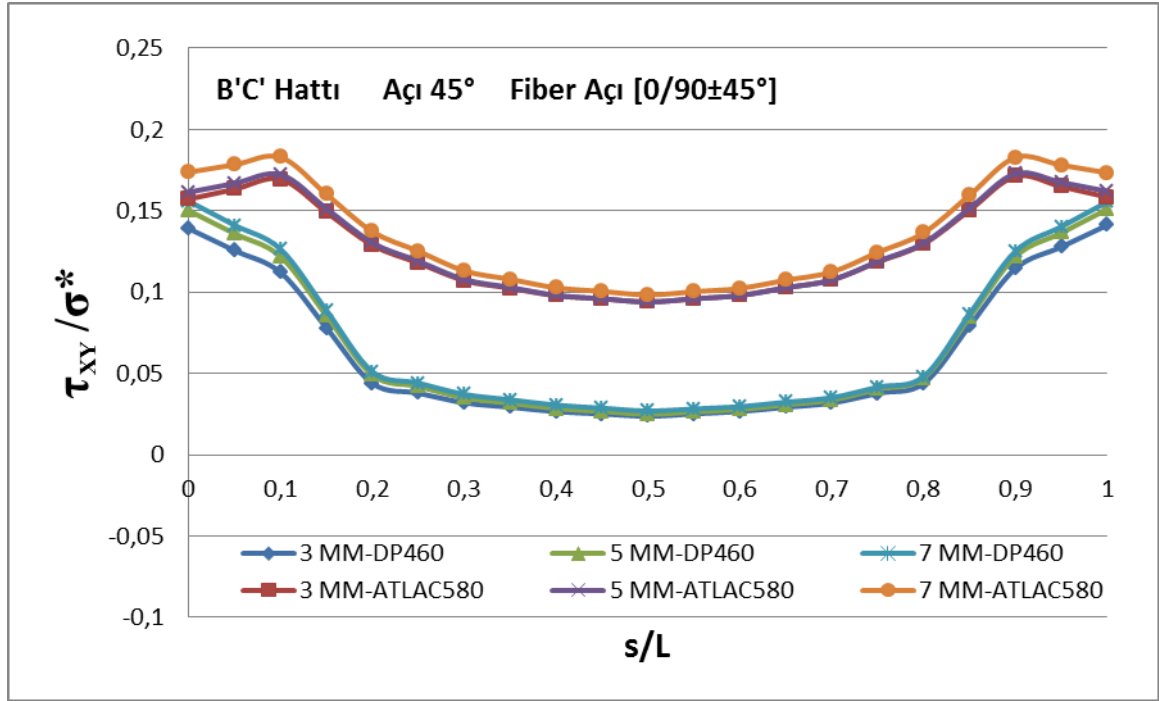
Şekil 3.158. 45° açığa ait [0°/90°±45°] serim, normalleştirilmiş σ_x gerilmeleri



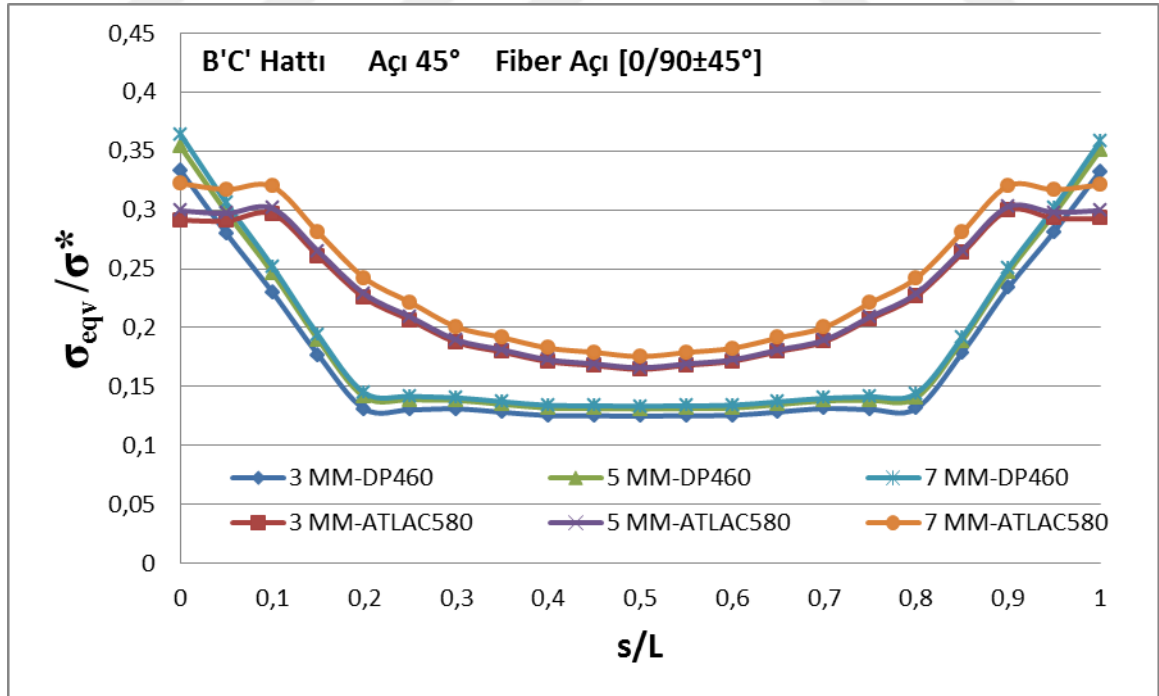
Şekil 3.159. 45° açığa ait [0°/90°/±45°] serim, normalleştirilmiş σ_y gerilmeleri



Şekil 3.160. 45° açığa ait [0°/90°/±45°] serim, normalleştirilmiş σ_z gerilmeleri



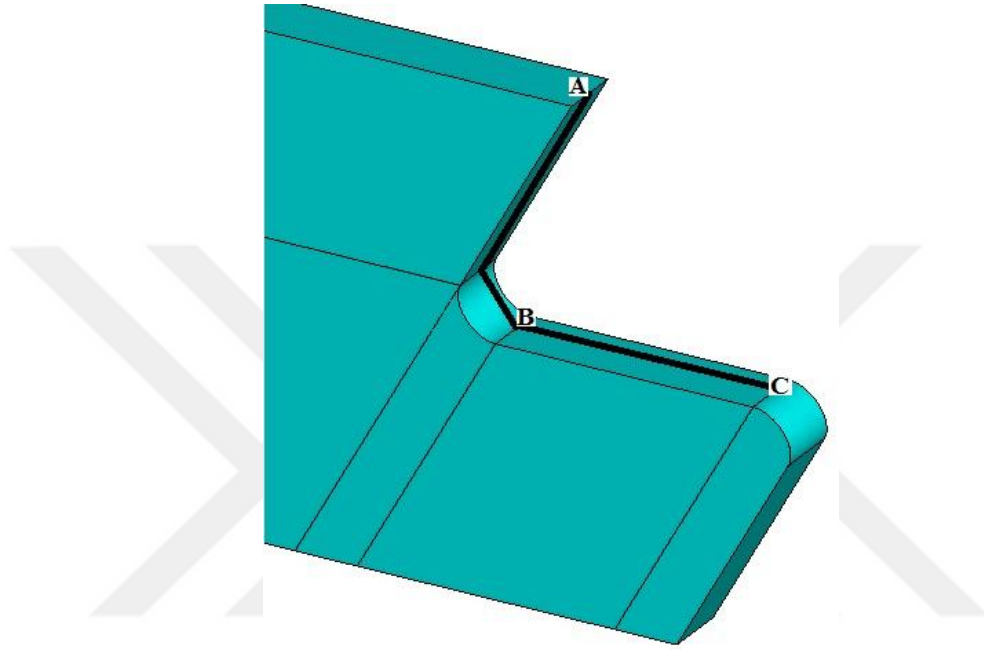
Şekil 3.161. 45° açığa ait [0°/90°/±45°] serim, normalleştirilmiş τ_{xy} gerilmeleri



Şekil 3.162. 45° açığa ait [0°/90°/±45°] serim, normalleştirilmiş σ_{eqv} gerilmeleri

3.3.3. Kompozit Malzeme Yüzey Boyunca (AC) Gerilme Dağılımı Sonuçları

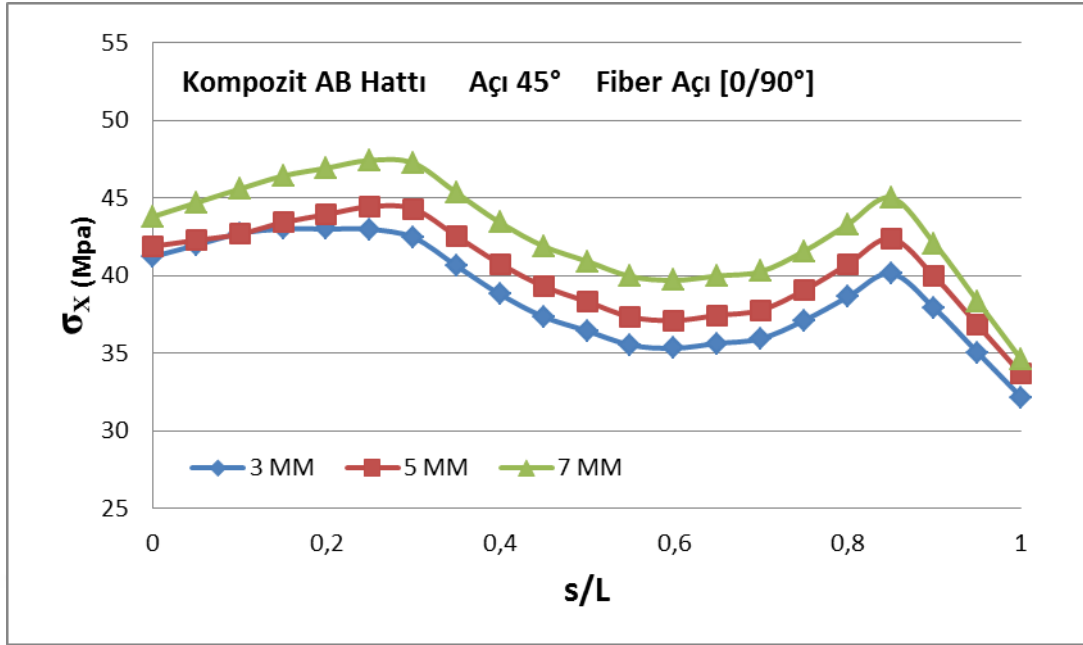
Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıda kompozit malzeme yüzeyinde A noktasından B noktasına (AB) ve B noktasından C noktasına (BC) olmak üzere; kritik hatlar belirlenip gerilme dağılımları bu hatlar üzerinden alınarak grafikler oluşturulmuştur (Şekil 163).



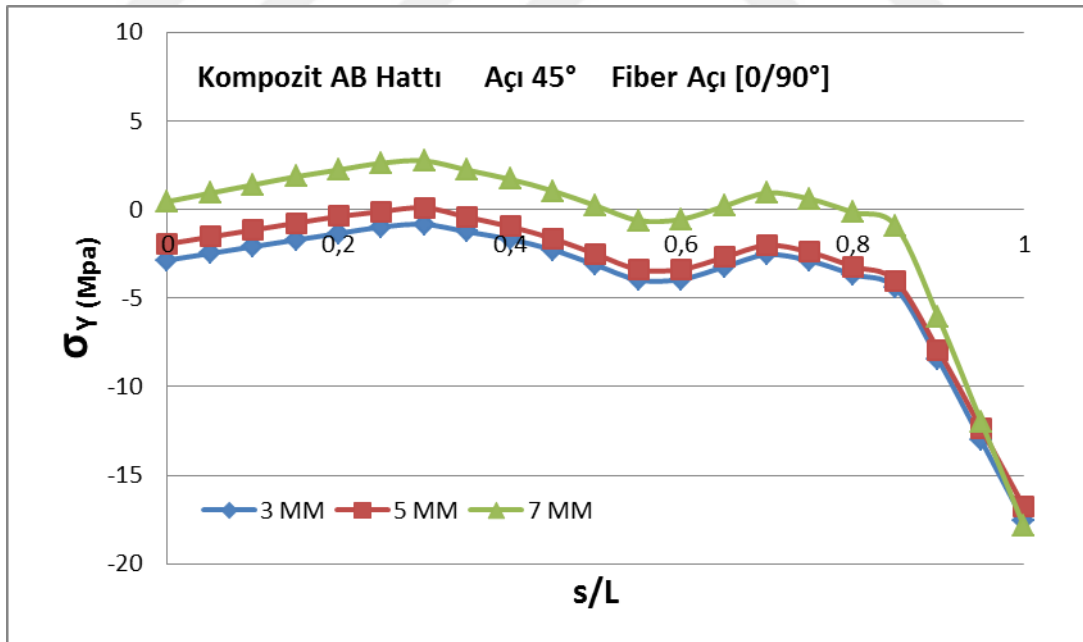
Şekil 3.163. Kompozit malzeme yüzeyindeki kritik hatlar [AC]

3.3.3.1. Kompozit Yüzey AB Hattı

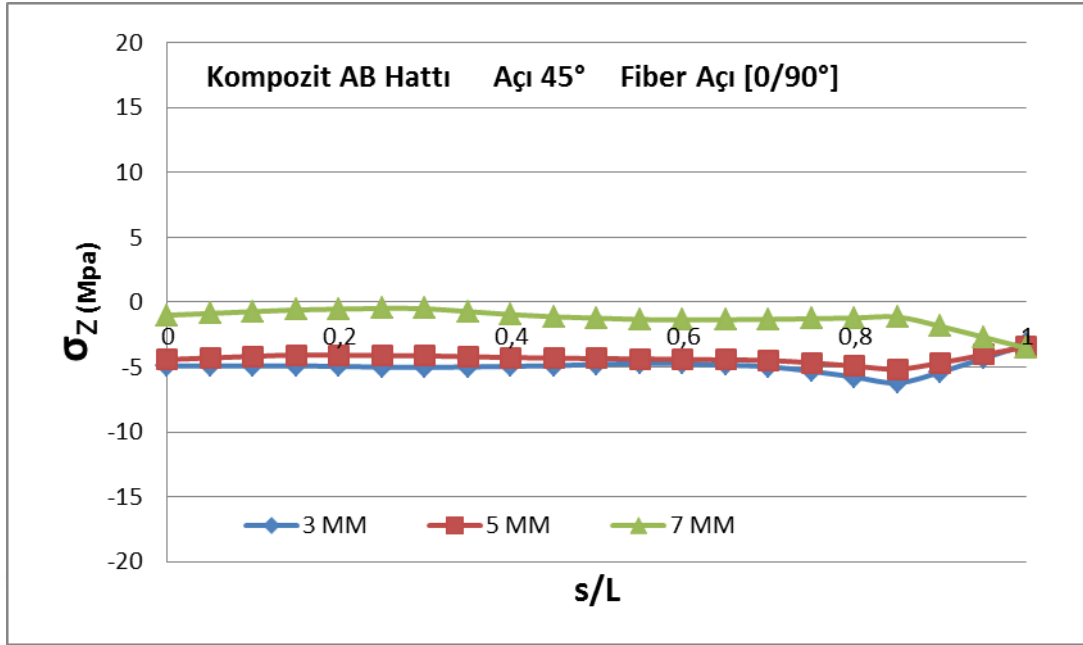
Şekil 3.164-3.168, 3 mm, 5 mm ve 7 mm malzeme kalınlığı için 45° bindirme açısında ve $[0^\circ/90^\circ]$ serim açısına sahip cam elyaf kompozit malzemede (A-B) hattı boyunca oluşan gerilme dağılımlarını göstermektedir. Malzeme kalınlığının bağlantı mukavemeti üzerine etkisinin olduğu, ancak bu etkinin önemli bir seviyede olmadığı görülmektedir. 7 mm kalınlığa sahip kompozit malzemede en yüksek gerilmeler çıkmıştır. 3 mm kalınlığa sahip kompozit malzemede ise en düşük gerilmeler çıkmıştır. Malzeme kalınlığı arttıkça yapıştırılan alan artmış ve doğal olarak da taşınan yükte artmıştır. Normal gerilme değerlerinde ($s/L=0$) de artma, ($s/L=1$) de azalma görülmektedir. Kayma gerilmeleri ($s/L=0,5$) te tüm kalınlıklarda negatif çıkmıştır. Von-Mises gerilmelerinde ($s/L=0,5$) de azalma meydana gelirken bindirme uçlarında gerilmeler sabit kalmıştır.



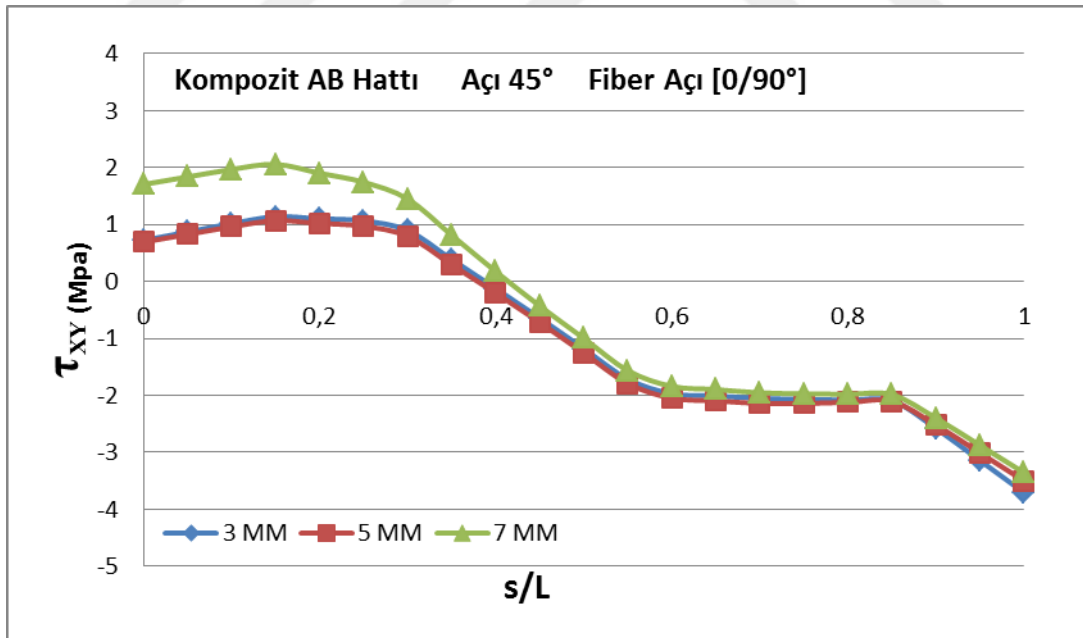
Şekil 3.164. 45° açığa ait [0°/90°] serim açısındaki σ_x gerilmeleri



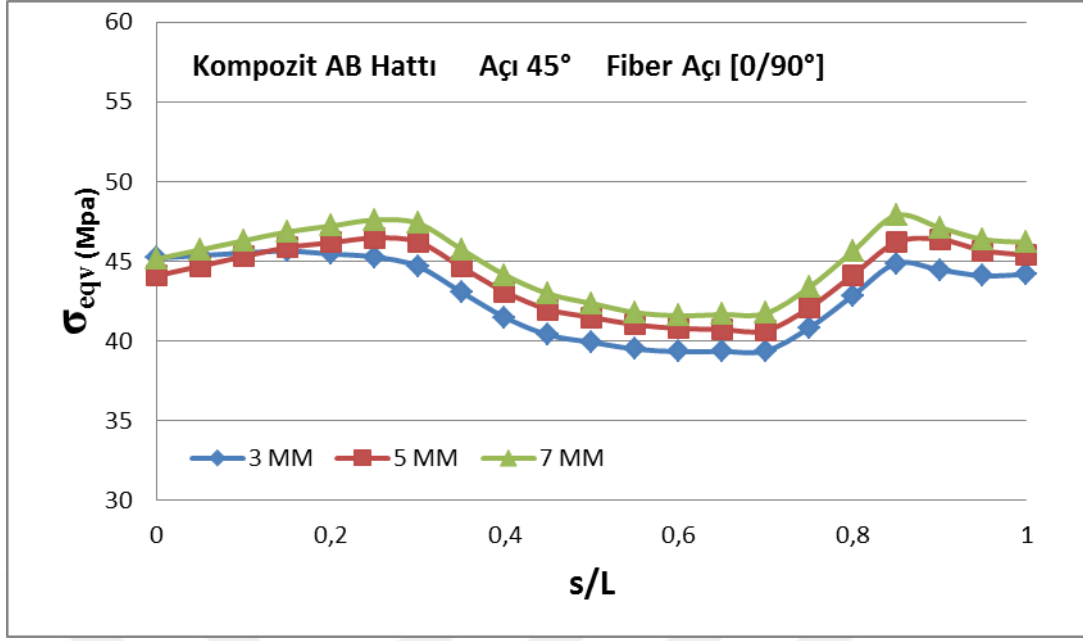
Şekil 3.165. 45° açığa ait [0°/90°] serim açısındaki σ_y gerilmeleri



Şekil 3.166. 45° açığa ait [0°/90°] serim açısındaki σ_z gerilmeleri

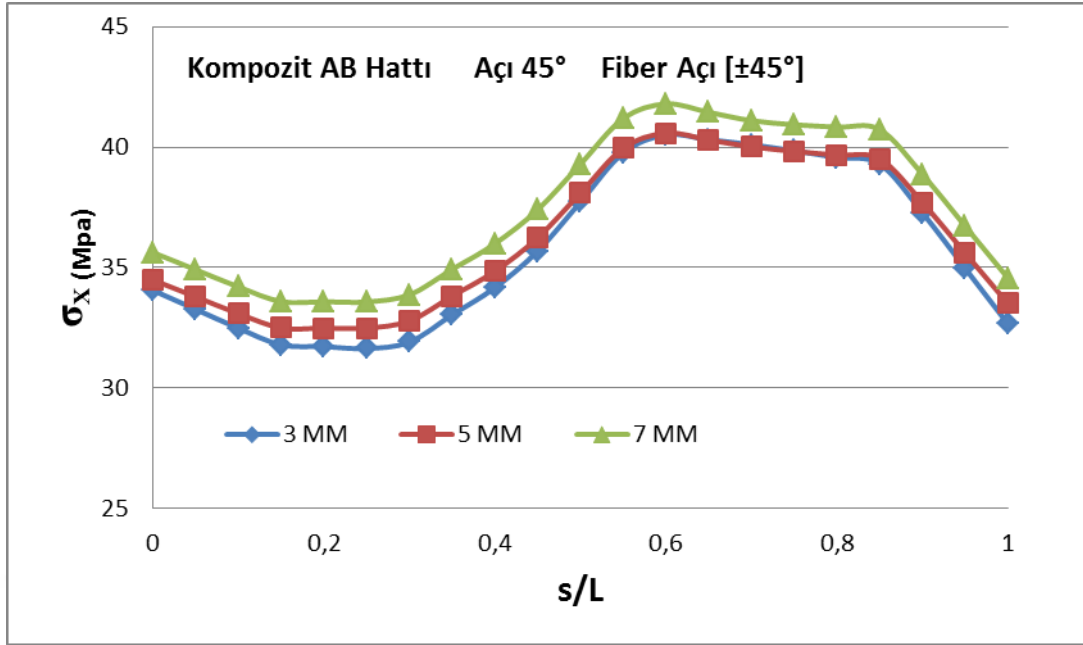


Şekil 3.167. 45° açığa ait [0°/90°] serim açısındaki τ_{xy} gerilmeleri

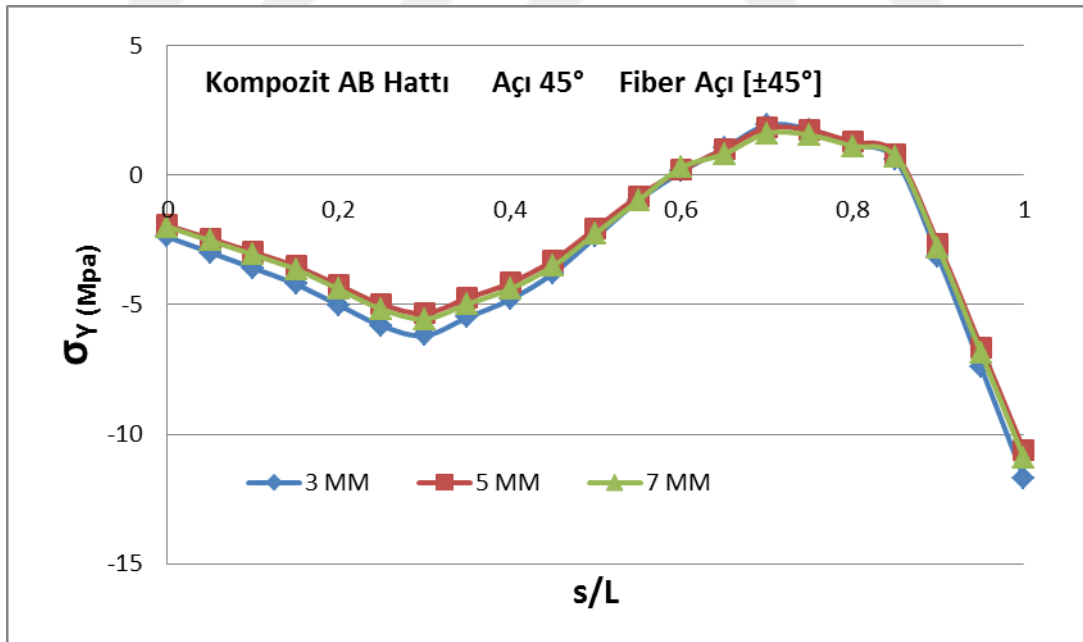


Şekil 3.168. 45° açığa ait [0°/90°] serim açısındaki σ_{eqv} gerilmeleri

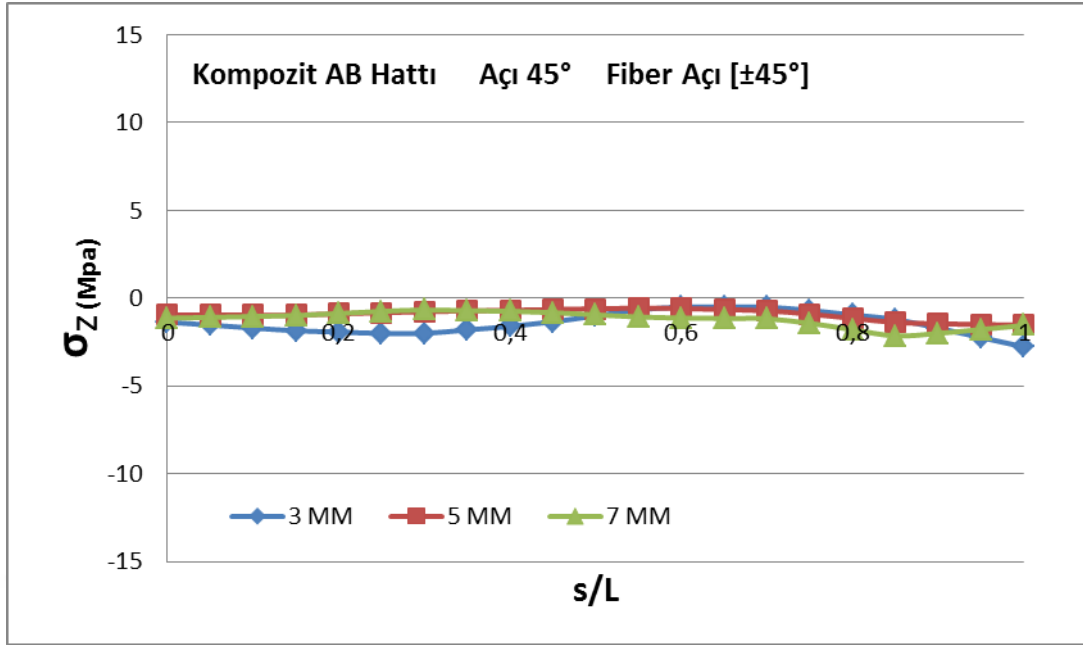
Şekil 3.169-3.173, 3 mm, 5 mm ve 7 mm malzeme kalınlığı için 45° bindirme açısında ve $[\pm 45^\circ]$ serim açısına sahip cam elyaf kompozit malzemede (A-B) hattı boyunca oluşan gerilme dağılımlarını göstermektedir. Malzeme kalınlığının bağlantı mukavemeti üzerine etkisinin olduğu, ancak bu etkinin önemli bir seviyede olmadığı görülmektedir. 7 mm kalınlığa sahip kompozit malzemede en yüksek gerilmeler çıkmıştır. 3 mm kalınlığa sahip kompozit malzemede ise en düşük gerilmeler çıkmıştır. Malzeme kalınlığı arttıkça yapıştırılan alan artmış ve doğal olarak da taşınan yükte artmıştır. Normal gerilme değerlerinde bindirme uçlarında azalma görülmektedir. Kayma gerilmeleri ($s/L < 0,5$) te tüm kalınlıklarda negatif çıkmıştır. Von-Mises gerilmelerinde ($s/L = 1$) de artış meydana gelmiştir.



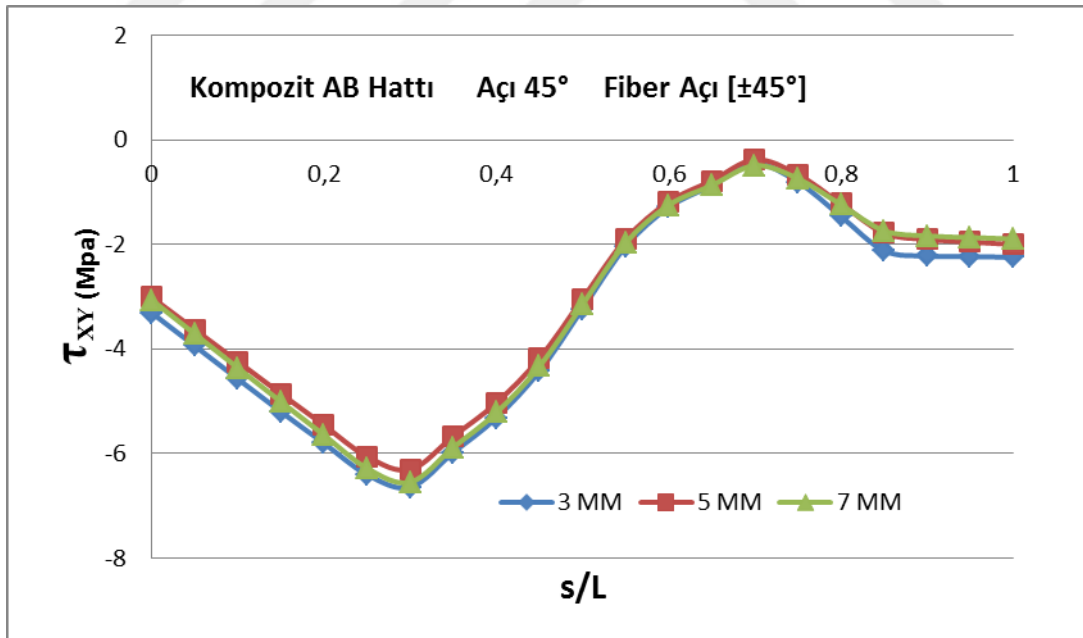
Şekil 3.169. 45° açığa ait [±45°] serim açısındaki σ_x gerilmeleri



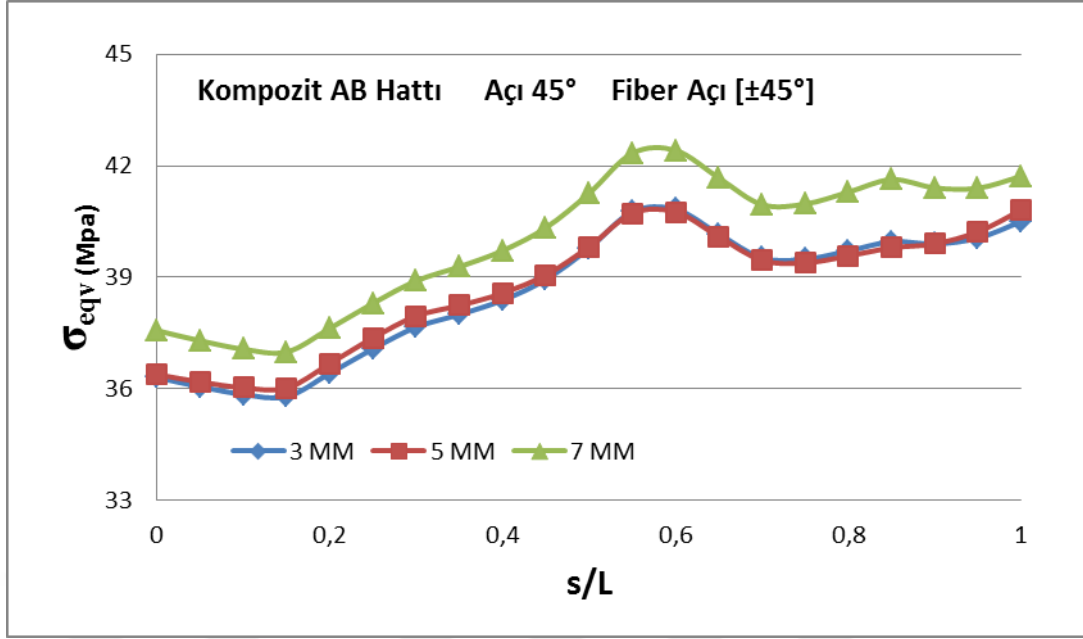
Şekil 3.170. 45° açığa ait [±45°] serim açısındaki σ_y gerilmeleri



Şekil 3.171. 45° açığa ait [±45°] serim açısındaki σ_z gerilmeleri

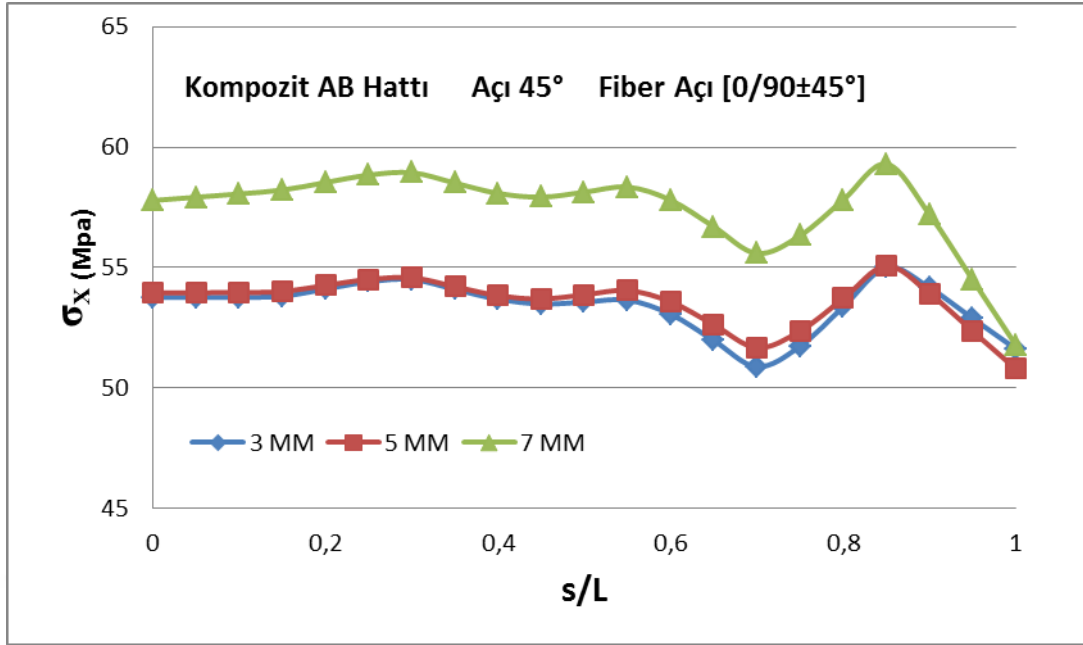


Şekil 3.172. 45° açığa ait [±45°] serim açısındaki τ_{xy} gerilmeleri

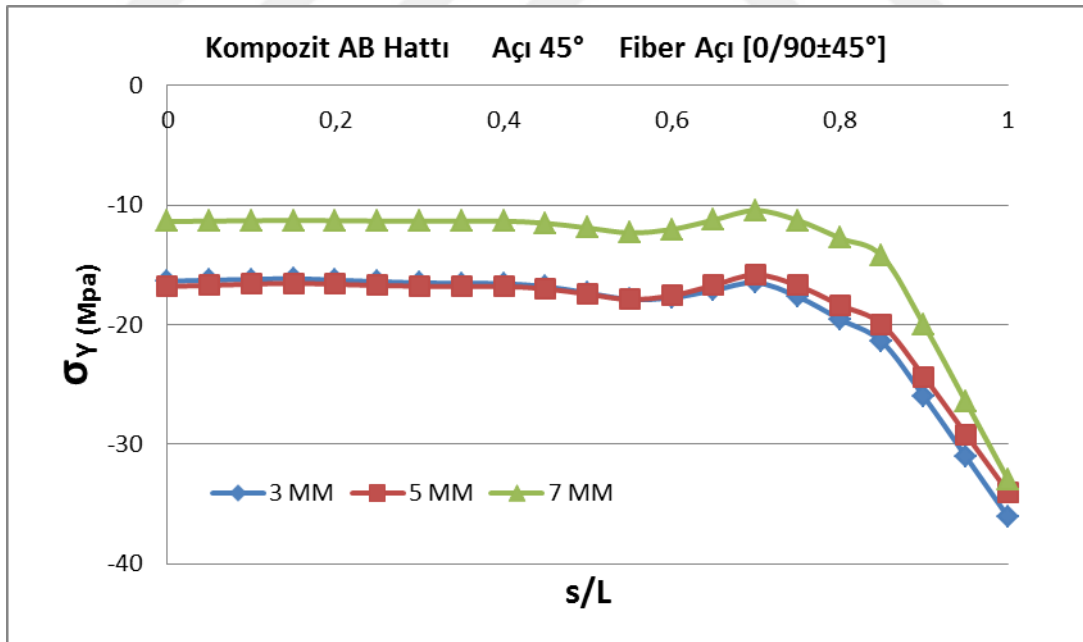


Şekil 3.173. 45° açığa ait $[\pm 45^\circ]$ serim açısındaki σ_{eqv} gerilmeleri

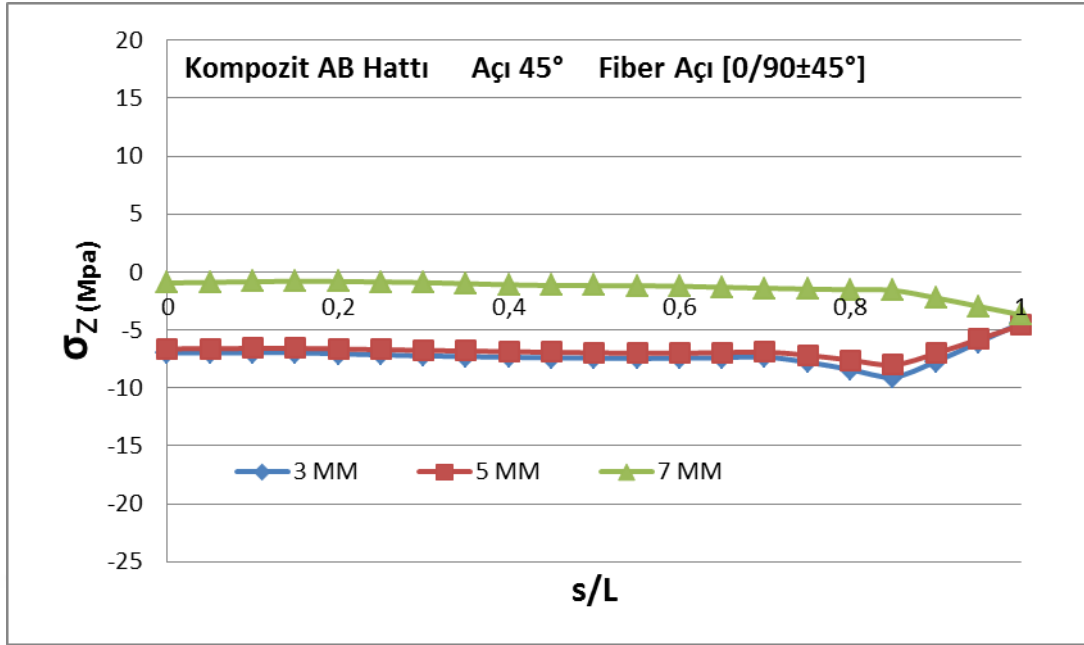
Şekil 3.174-3.178, 3 mm, 5 mm ve 7 mm malzeme kalınlığı için 45° bindirme açısında ve $[0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ]$ serim açısına sahip cam elyaf kompozit malzemede (A-B) hattı boyunca oluşan gerilme dağılımlarını göstermektedir. Malzeme kalınlığının bağlantı mukavemeti üzerine etkisinin olduğu, ancak bu etkinin önemli bir seviyede olmadığı görülmektedir. 7 mm kalınlığa sahip kompozit malzemede en yüksek gerilmeler çıkmıştır. 3 mm kalınlığa sahip kompozit malzemede ise en düşük gerilmeler çıkmıştır. Malzeme kalınlığı arttıkça yapıştırılan alan artmış ve doğal olarak da taşınan yükte artmıştır. $[0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ]$ serim açısındaki gerilme değerleri diğer iki serim açısına göre çok yüksek çıkmıştır. Bunun nedeni çok yönlü elyaf yönlenmesinden kaynaklanmaktadır. Normal gerilme değerlerinde bindirme uçlarında azalma görülmektedir. Kayma gerilmeleri ($s/L < 0,5$) te tüm kalınlıklarda negatif çıkmıştır. Von-Mises gerilmelerinde ($s/L = 1$) de ani bir artış meydana gelmiştir.



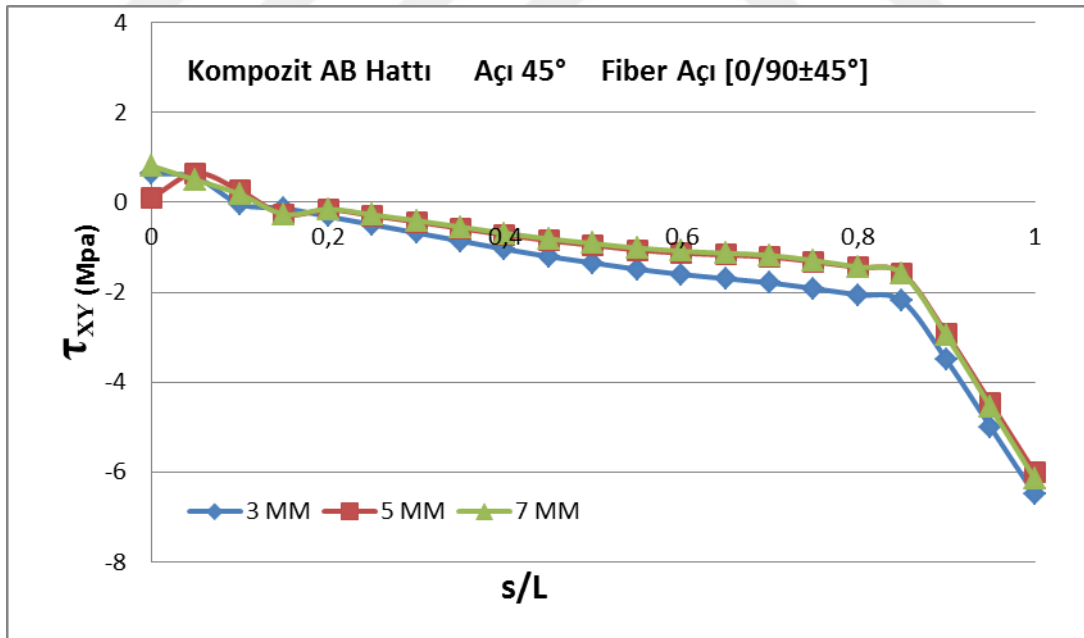
Şekil 3.174. 45° açığa ait [0°/90°±45°] serim açısındaki σ_x gerilmeleri



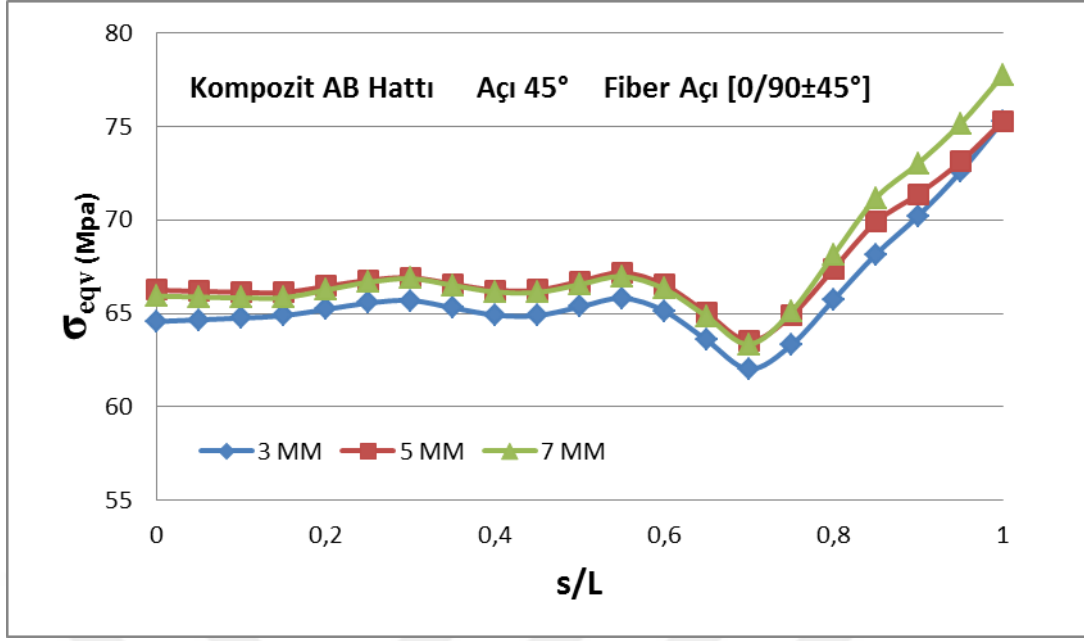
Şekil 3.175. 45° açığa ait [0°/90°±45°] serim açısındaki σ_y gerilmeleri



Şekil 3.176. 45° açığa ait [0°/90°±45°] serim açısındaki σ_z gerilmeleri

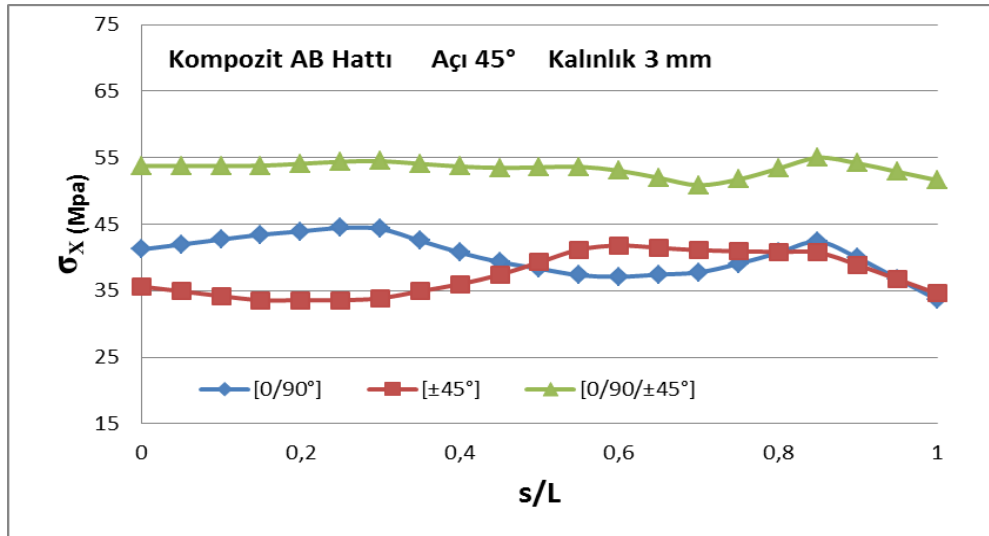


Şekil 3.177. 45° açığa ait [0°/90°±45°] serim açısındaki τ_{xy} gerilmeleri

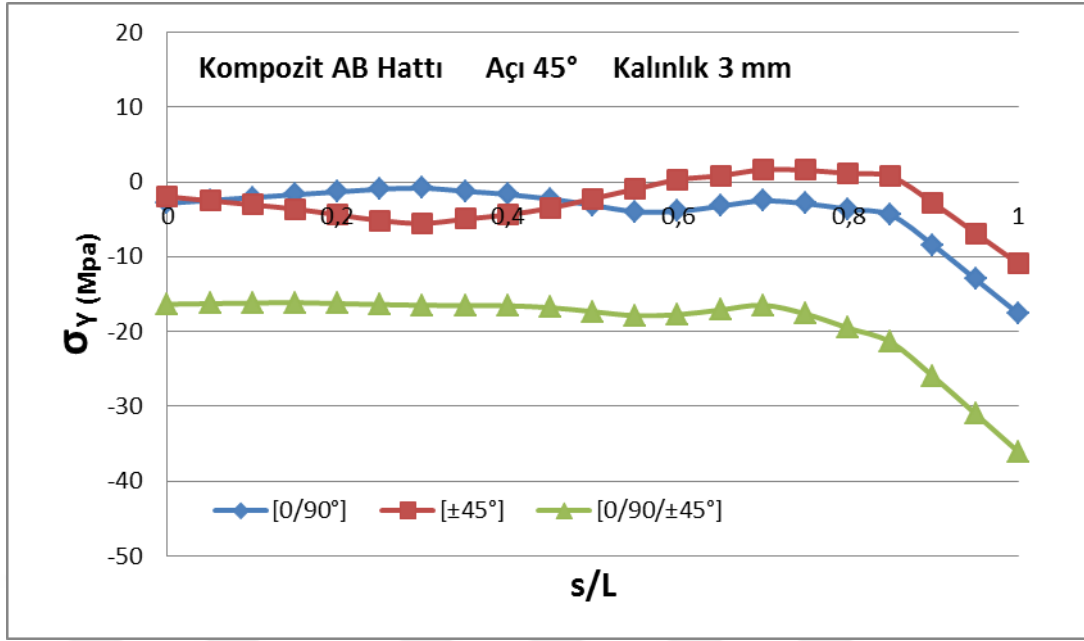


Şekil 3.178. 45° açıya ait $[0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ]$ serim açısındaki σ_{eqv} gerilmeleri

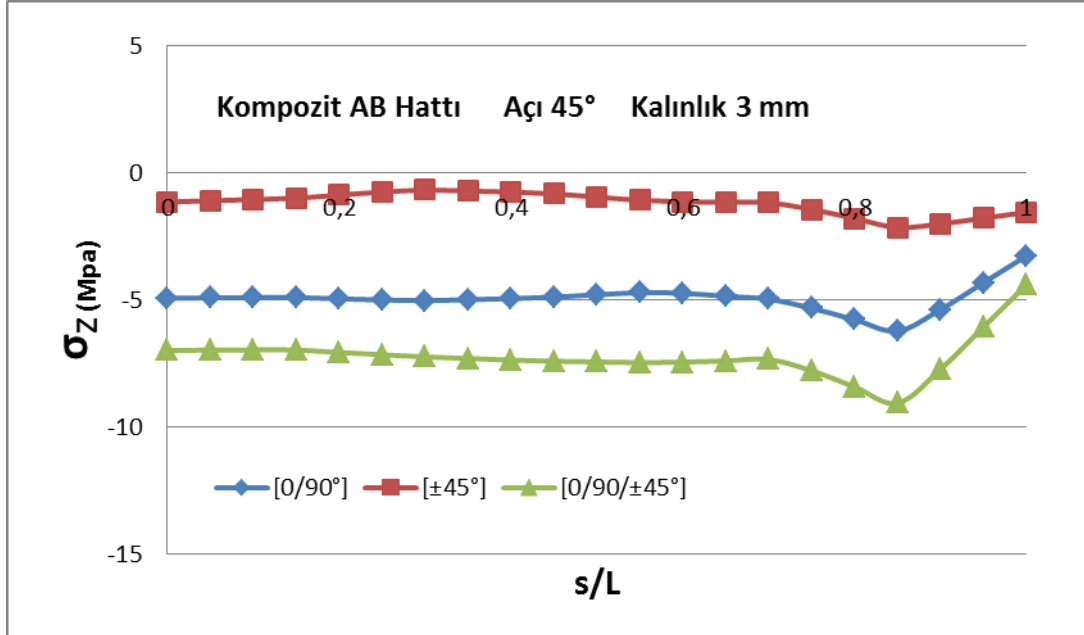
Şekil 3.179-3.181, 3 mm malzeme kalınlığı için 45° bindirme açısında ve $[0^\circ/90^\circ]$, $[\pm 45^\circ]$, ve $[0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ]$ serim açısına sahip cam elyaf kompozit malzemede (A-B) hattı boyunca oluşan normal gerilme dağılımlarını göstermektedir. X yönündeki normal gerilme değerleri pozitif çıkarken, y ve z yönündeki normal gerilme değerleri negatif çıkmıştır. Normal gerilme değerleri ($s/L=1$) de x ve y yönünde artarken; z yönünde azalma meydana gelmiştir. Gerilme değerleri en fazla $[0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ]$ serim açısına sahip malzemelerde görülürken en az gerilme değerleri $[0^\circ/90^\circ]$ serim açısına sahip malzemelerde ortaya çıkmıştır.



Şekil 3.179. 45° açıya ait serim açılarındaki σ_x gerilmeleri



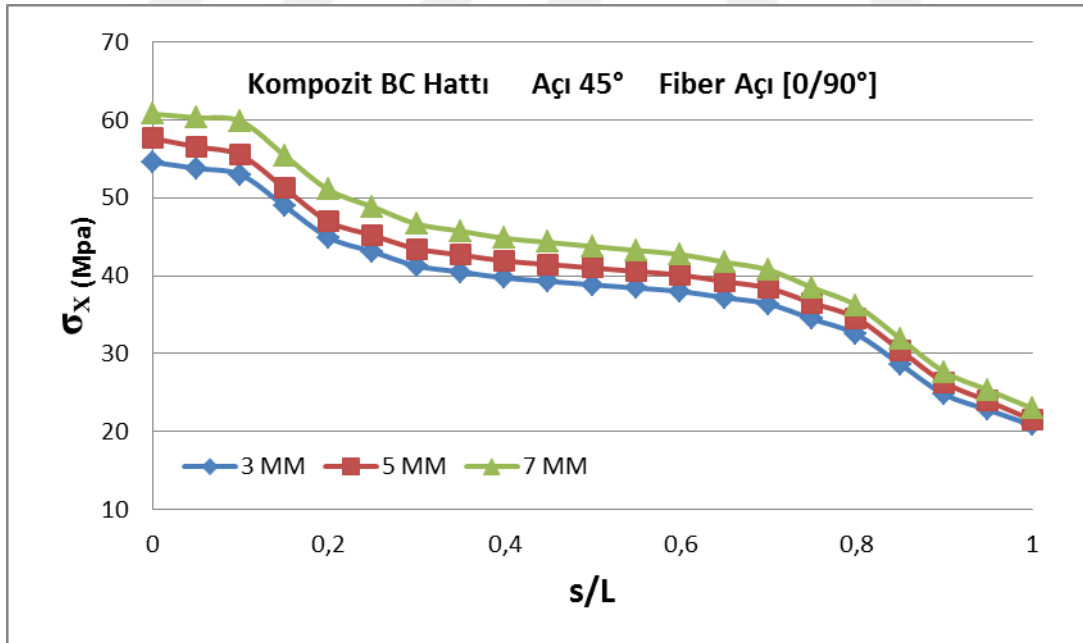
Şekil 3.180. 45° açığa ait serim açılarındaki σ_Y gerilmeleri



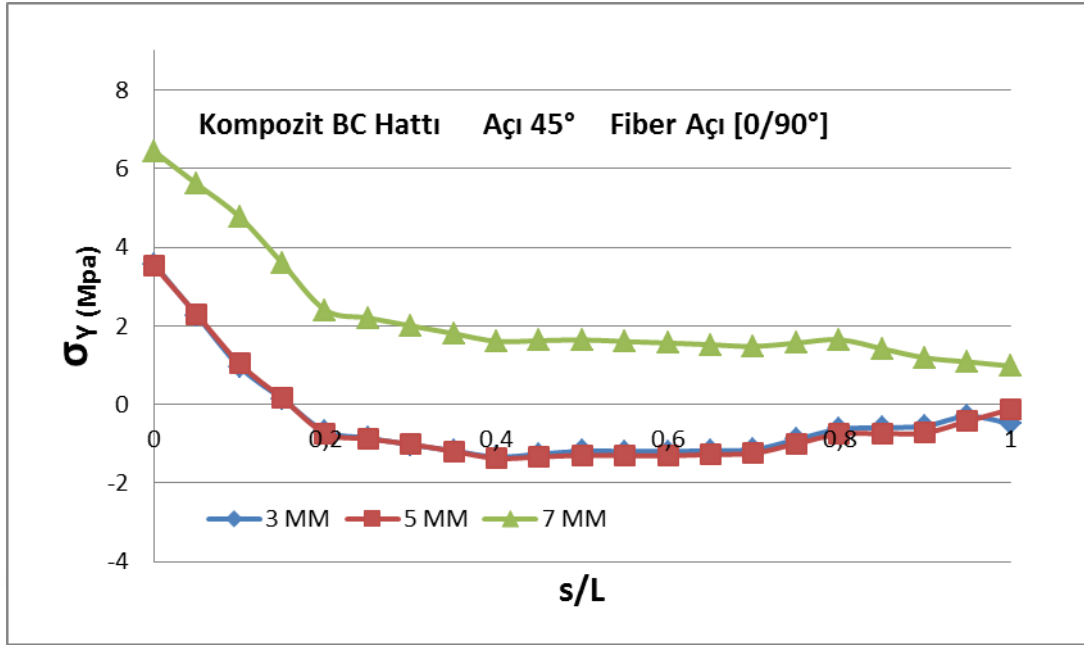
Şekil 3.181. 45° açığa ait serim açılarındaki σ_Z gerilmeleri

3.3.3.2. Kompozit Yüzey BC Hattı

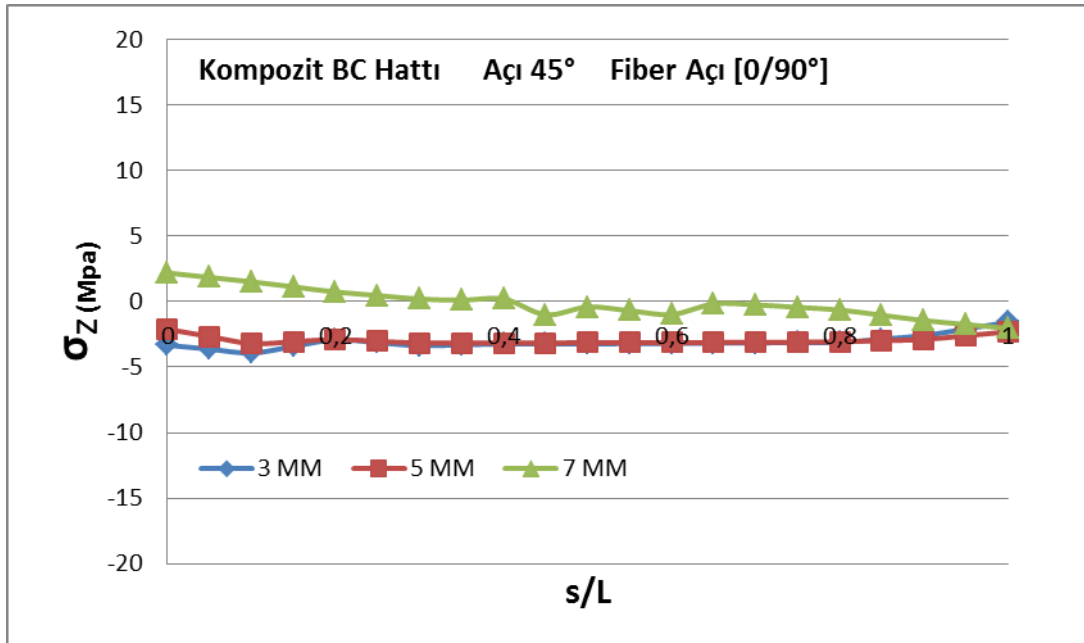
Şekil 3.182-3.186, 3 mm, 5 mm ve 7 mm malzeme kalınlığı için 45° bindirme açısında ve [0°/90°] serim açısına sahip cam elyaf kompozit malzemede (B-C) hattı boyunca oluşan gerilme dağılımlarını göstermektedir. Malzeme kalınlığının bağlantı mukavemeti üzerine etkisinin olduğu, ancak bu etkinin önemli bir seviyede olmadığı görülmektedir. 7 mm kalınlığa sahip kompozit malzemede en yüksek gerilmeler çıkmıştır. 3 mm kalınlığa sahip kompozit malzemede ise en düşük gerilmeler çıkmıştır. Malzeme kalınlığı arttıkça yapıştırılan alan artmış ve doğal olarak da taşınan yükte artmıştır. Normal gerilme değerlerinde bindirme uçlarında azalma görülmektedir. Kayma gerilmeleri ($s/L=0$) te tüm kalınlıklarda negatif çıkmıştır. Von-Mises gerilmelerinde ($s/L=1$) de azalma meydana gelmiştir.



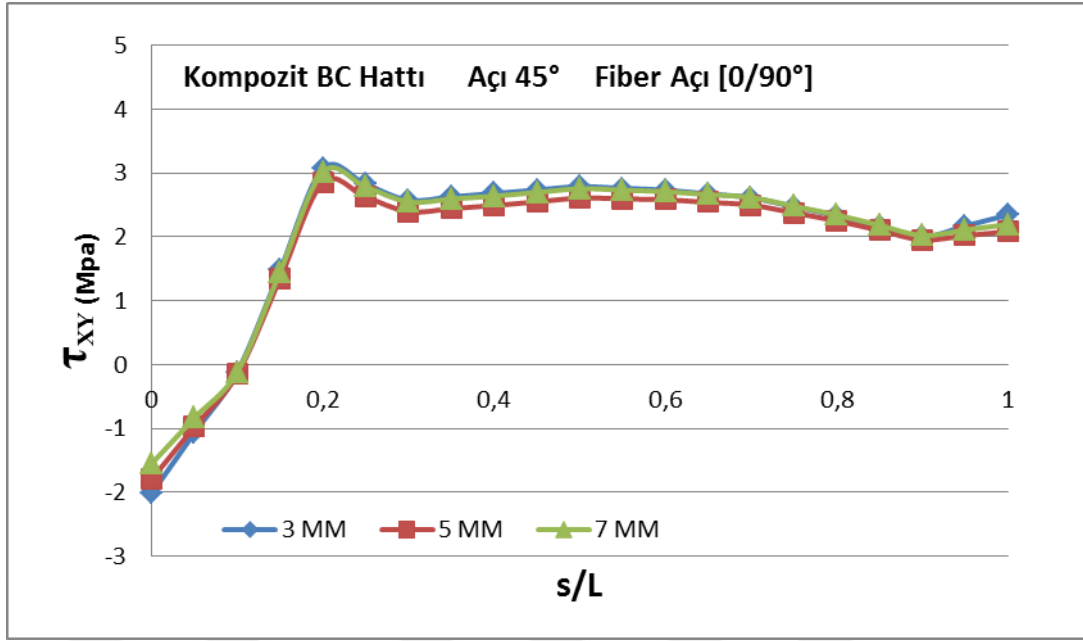
Şekil 3.182. 45° açısı aitt [0°/90°] serim açısındaki σ_x gerilmeleri



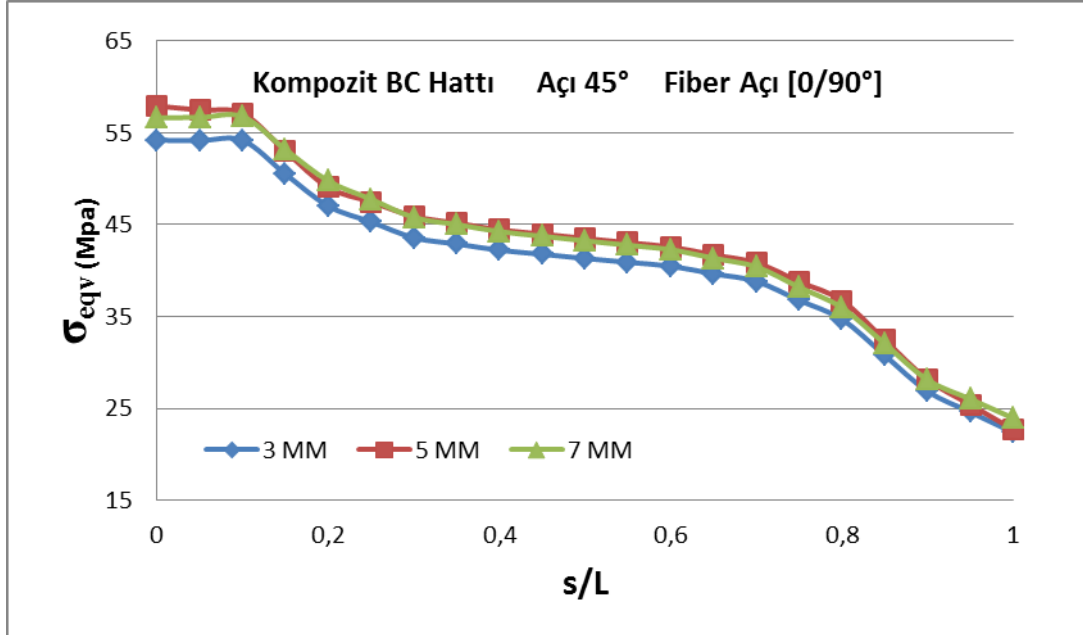
Şekil 3.183. 45° aç ıya ait [0°/90°] serim aç ısında ki σ_y gerilmeleri



Şekil 3.184. 45° aç ıya ait [0°/90°] serim aç ısında ki σ_z gerilmeleri

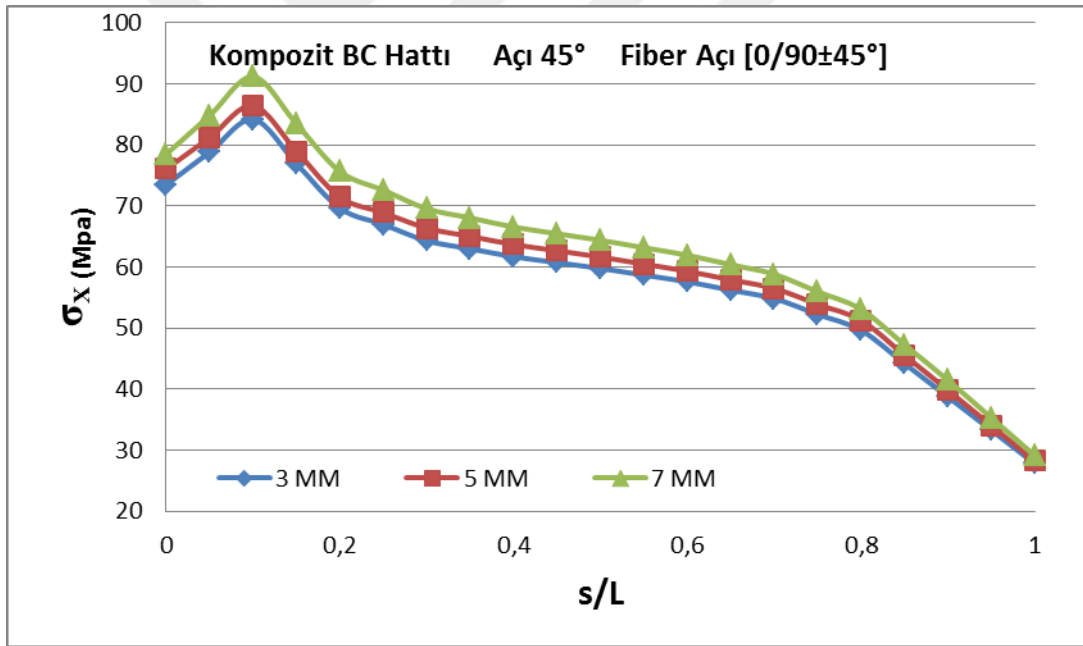


Şekil 3.185. 45° açığa ait [0°/90°] serim açısındaki τ_{xy} gerilmeleri

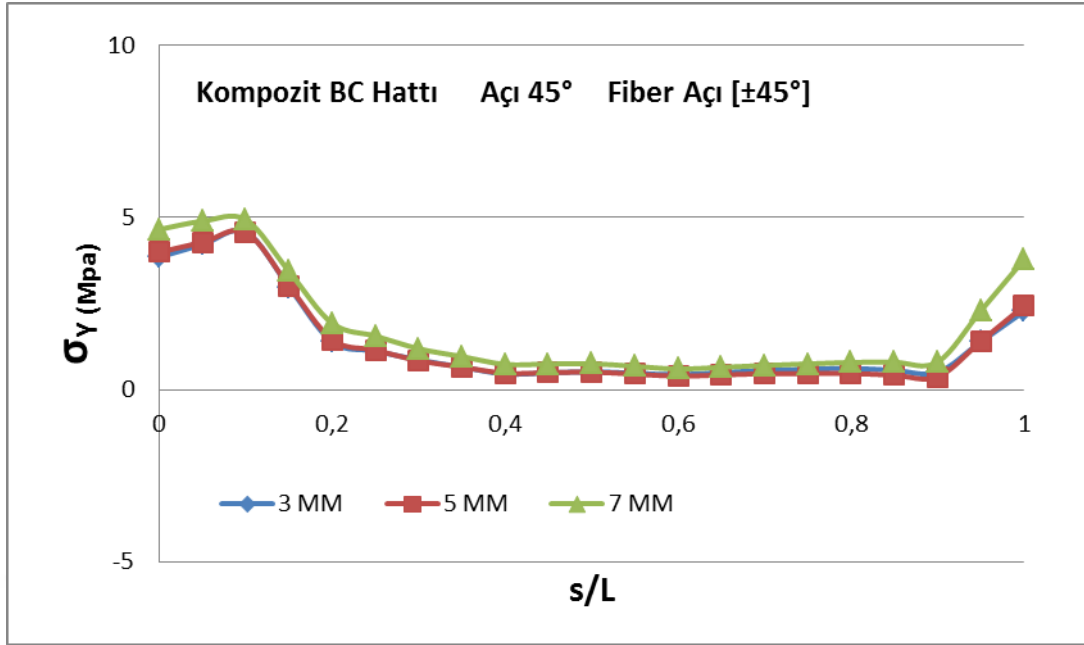


Şekil 3.186. 45° açığa ait [0°/90°] serim açısındaki σ_{eqv} gerilmeleri

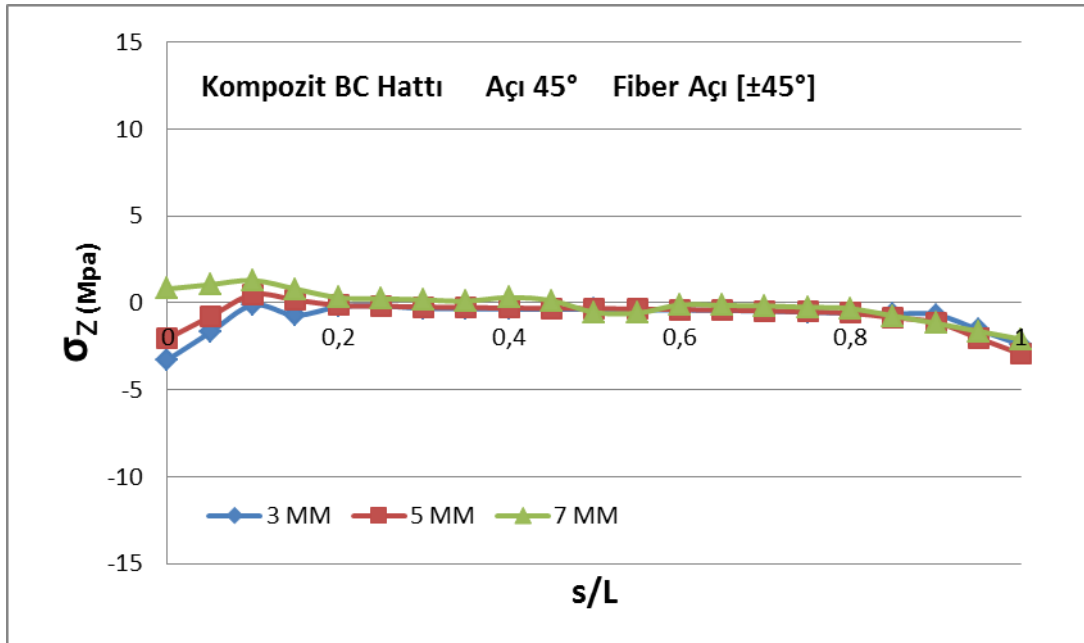
Şekil 3.187-3.191, 3 mm, 5 mm ve 7 mm malzeme kalınlığı için 45° bindirme açısında ve $[\pm 45^\circ]$ serim açısına sahip cam elyaf kompozit malzemede (B-C) hattı boyunca oluşan gerilme dağılımlarını göstermektedir. Malzeme kalınlığının bağlantı mukavemeti üzerine etkisinin olduğu, ancak bu etkinin önemli bir seviyede olmadığı görülmektedir. 7 mm kalınlığa sahip kompozit malzemede en yüksek gerilmeler çıkmıştır. 3 mm kalınlığa sahip kompozit malzemede ise en düşük gerilmeler çıkmıştır. Malzeme kalınlığı arttıkça yapıştırılan alan artmış ve doğal olarak da taşınan yükte artmıştır. Normal gerilme değerlerinde bindirme uçlarında azalma görülmektedir. Kayma gerilmeleri $[0^\circ/90^\circ]$ serim açısına göre pozitif çıkmıştır. Von-Mises gerilmelerinde ($s/L=1$) de azalma meydana gelmiştir.



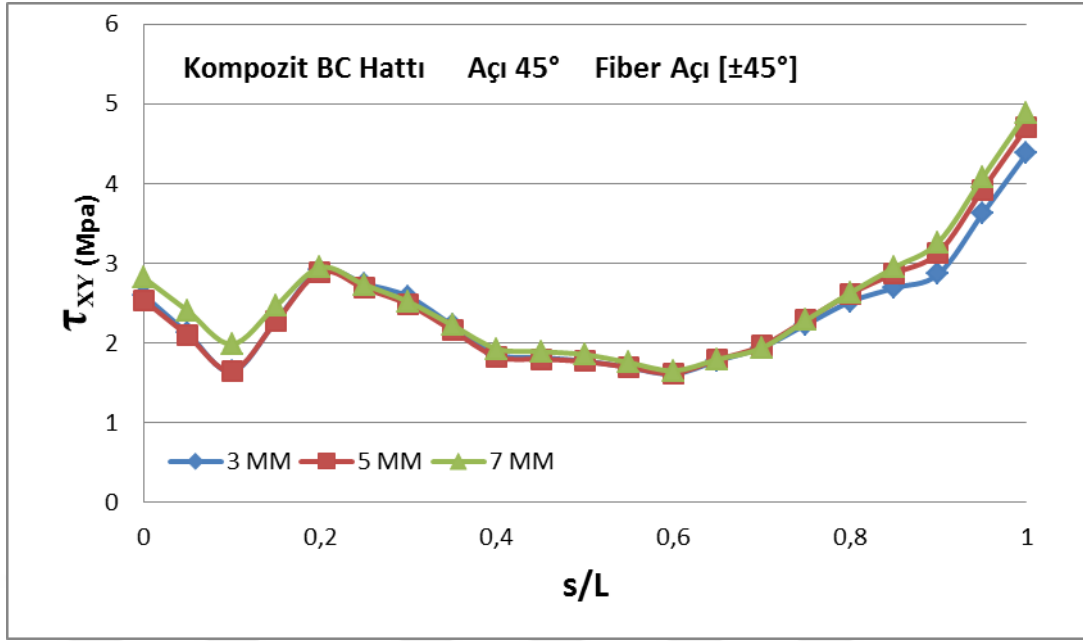
Şekil 3.187. 45° açığa ait $[\pm 45^\circ]$ serim açısındaki σ_x gerilmeleri



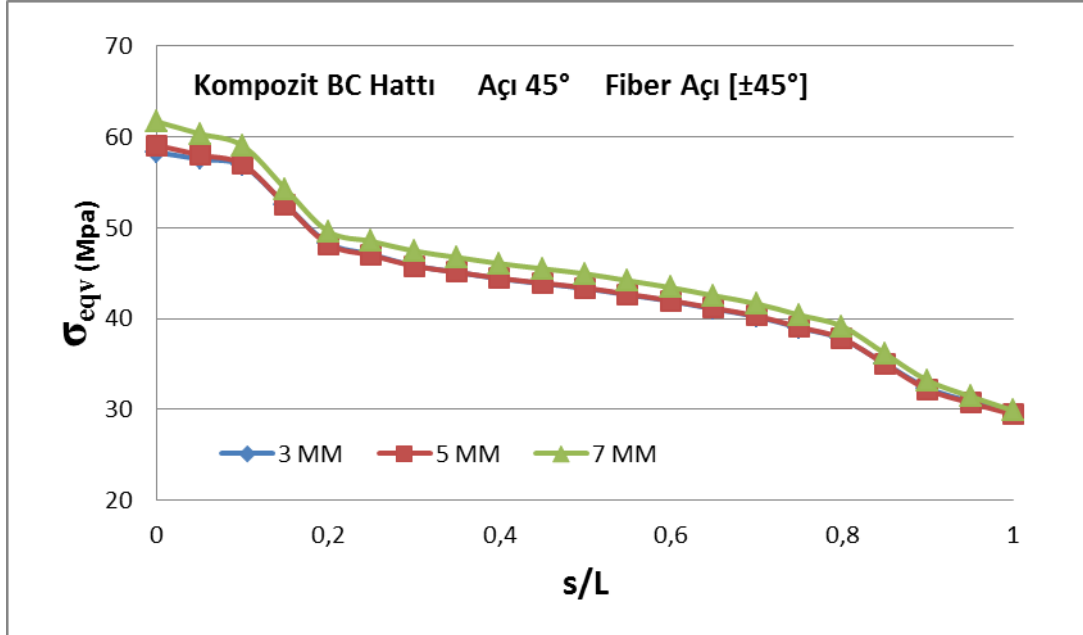
Şekil 3.188. 45° aç ıya ait [±45°] serim aç ısında k i σ_Y gerilmeleri



Şekil 3.189. 45° aç ıya ait [±45°] serim aç ısında k i σ_Z gerilmeleri

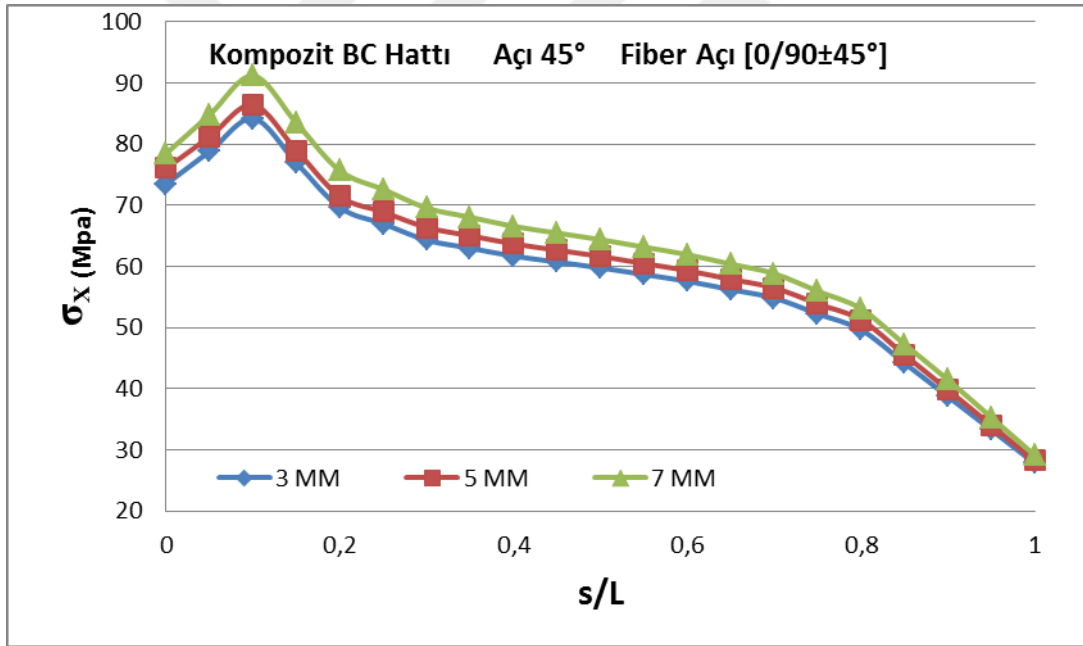


Şekil 3.190. 45° aç ıya ait [±45°] serim aç ısında k ı τ_{xy} gerilmeleri

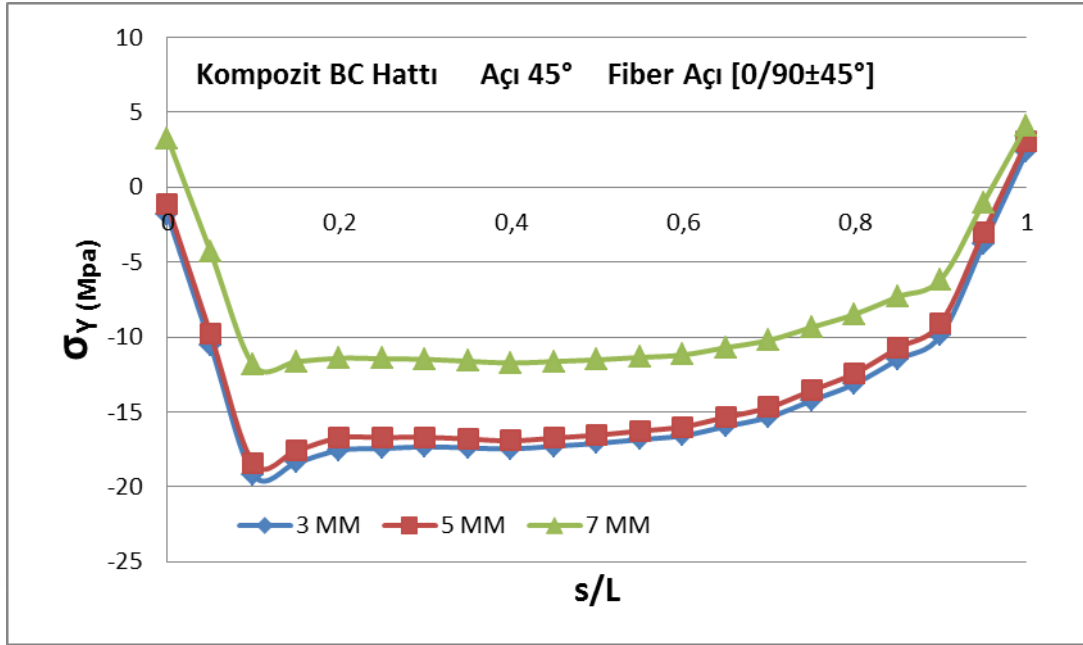


Şekil 3.191. 45° aç ıya ait [±45°] serim aç ısında k ı σ_{eqv} gerilmeleri

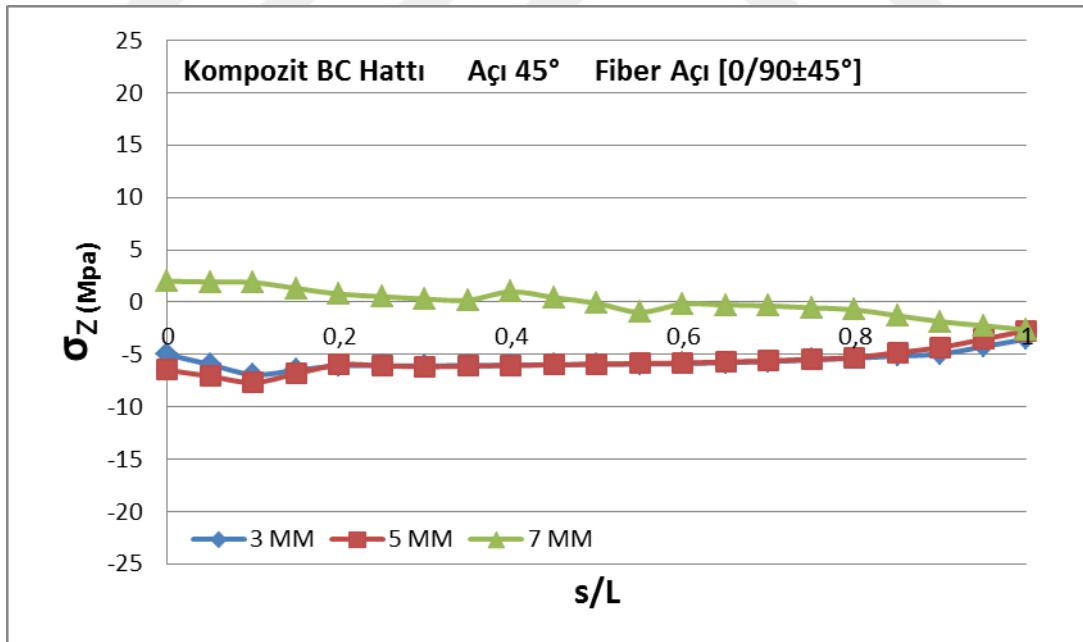
Şekil 3.192-3.196, 3 mm, 5 mm ve 7 mm malzeme kalınlığı için 45° bindirme açısında ve $[0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ]$ serim açısına sahip cam elyaf kompozit malzemede (B-C) hattı boyunca oluşan gerilme dağılımlarını göstermektedir. Malzeme kalınlığının bağlantı mukavemeti üzerine etkisinin olduğu, ancak bu etkinin önemli bir seviyede olmadığı görülmektedir. 7 mm kalınlığa sahip kompozit malzemede en yüksek gerilmeler çıkmıştır. 3 mm kalınlığa sahip kompozit malzemede ise en düşük gerilmeler çıkmıştır. Malzeme kalınlığı arttıkça yapıştırılan alan artmış ve doğal olarak da taşınan yükte artmıştır. $[0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ]$ serim açısındaki gerilme değerleri diğer iki serim açısına göre daha yüksek çıkmıştır. Bunun nedeni çok yönlü elyaf yönlenmesinden kaynaklanmaktadır. Normal gerilme değerlerinde bindirme uçlarında azalma ve artış görülmektedir. Kayma gerilmeleri ($s/L=0$) de negatif çıkmıştır. Von-Mises gerilmelerinde ($s/L=1$) de azalma meydana gelmiştir.



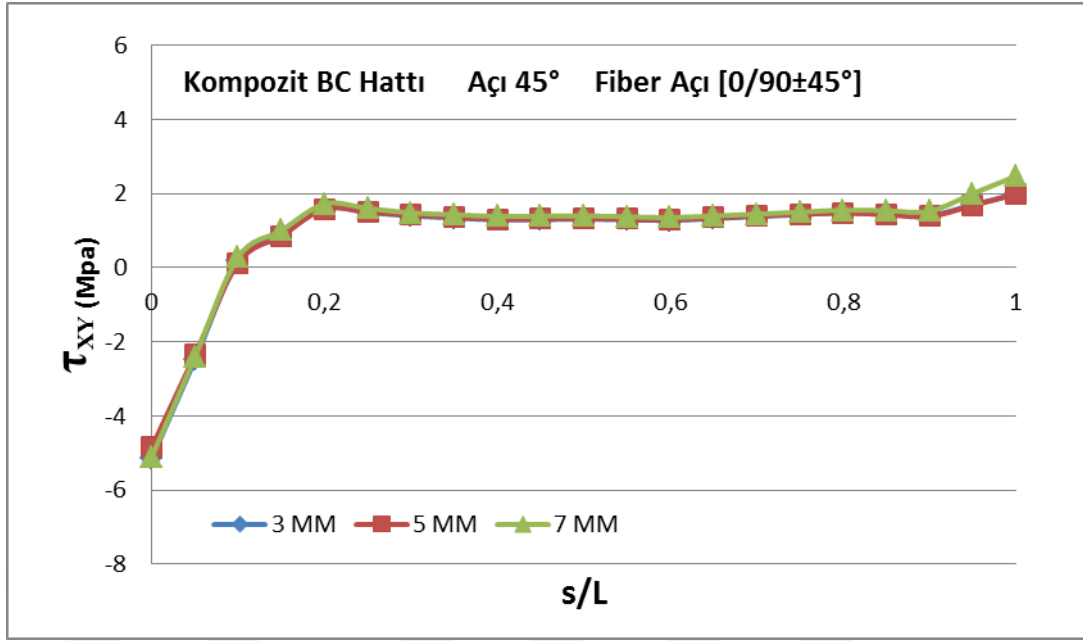
Şekil 3.192. 45° açısına ait $[0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ]$ serim açısındaki σ_x gerilmeleri



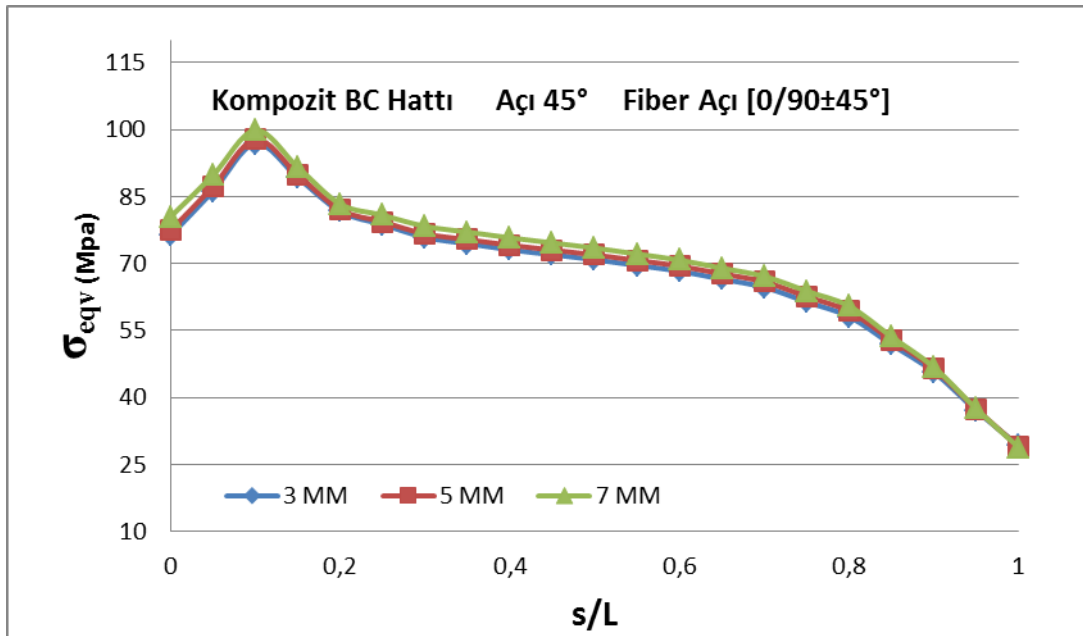
Şekil 3.193. 45° aç ıya ait [0°/90°/±45°] serim aç ısında ki σ_y gerilmeleri



Şekil 3.194. 45° aç ıya ait [0°/90°/±45°] serim aç ısında ki σ_z gerilmeleri

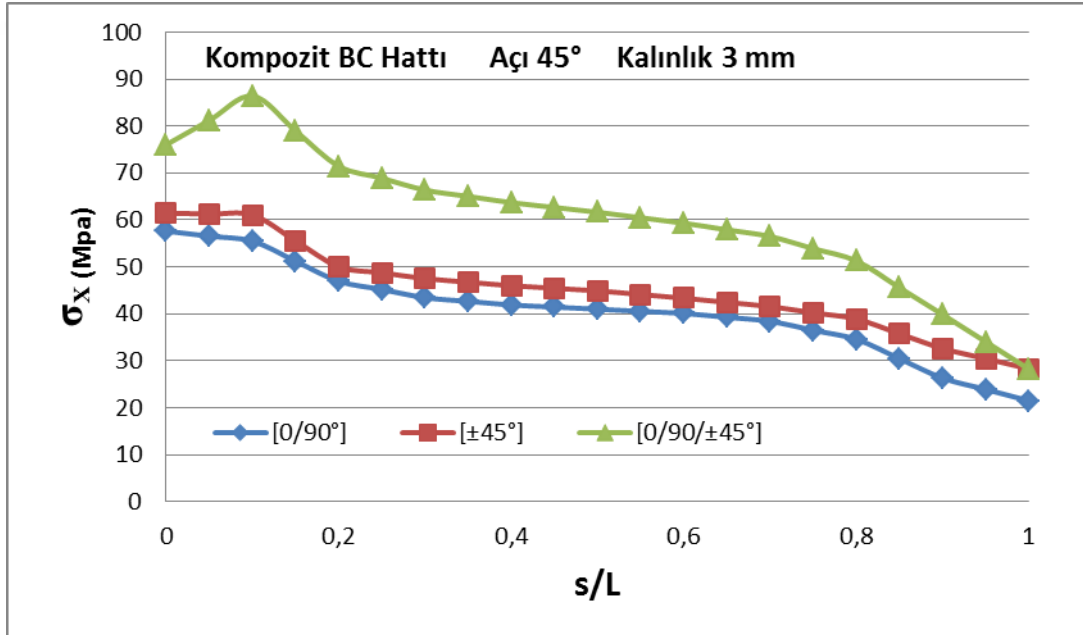


Şekil 3.195. 45° açığa ait [0°/90°±45°] serim açısındaki τ_{xy} gerilmeleri

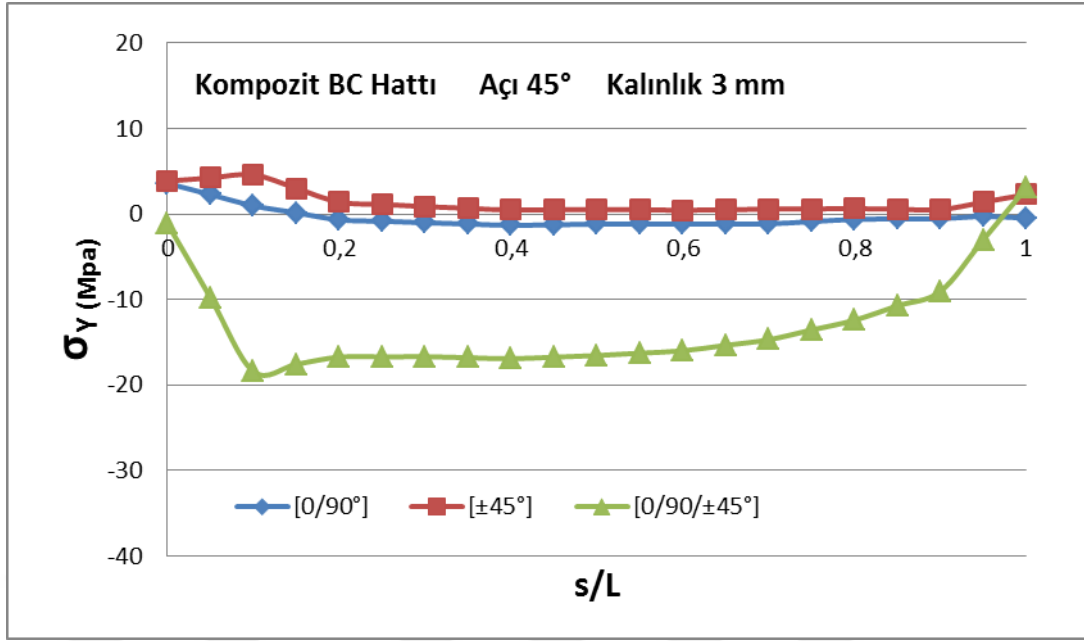


Şekil 3.196. 45° açığa ait [0°/90°±45°] serim açısındaki σ_{eqv} gerilmeleri

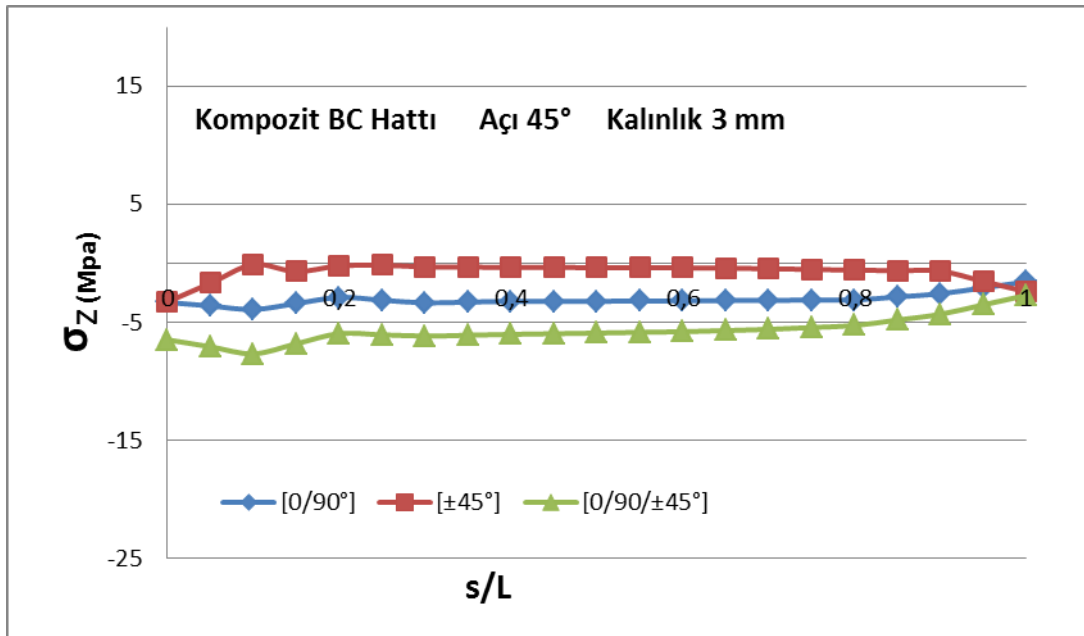
Şekil 3.197-3.199, 3 mm malzeme kalınlığı için 45° bindirme açısında ve [0°/90°], [±45°], ve [0°/90°/±45°] serim açısına sahip cam elyaf kompozit malzemede (B-C) hattı boyunca oluşan normal gerilme dağılımlarını göstermektedir. X yönündeki normal gerilme değerleri pozitif çıkarken, y ve z yönündeki normal gerilme değerleri negatif çıkmıştır. Normal gerilme değerleri (s/L=1) de x yönünde azalırken; y ve z yönünde hemen hemen sabit kalmıştır. Gerilme değerleri en fazla [0°/90°/±45°] serim açısına sahip malzemelerde görülürken en az gerilme değerleri [0°/90°] serim açısına sahip malzemelerde ortaya çıkmıştır.



Şekil 3.197. 45° açiya ait serim açılarındaki σ_x gerilmeleri



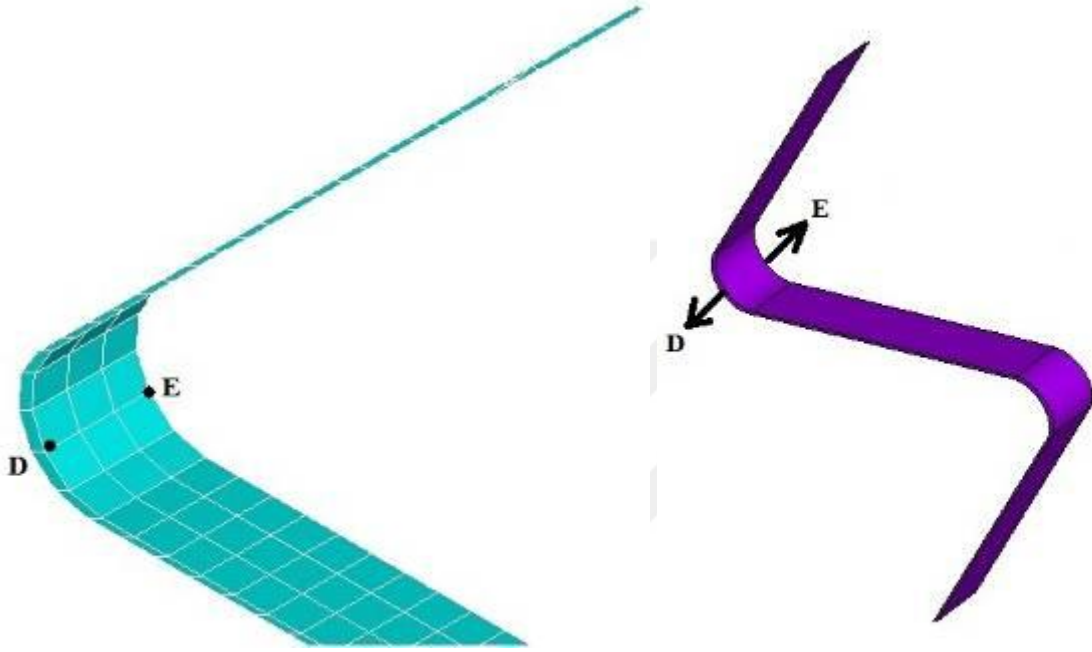
Şekil 3.198. 45° açığa ait serim açılarındaki σ_y gerilmeleri



Şekil 3.199. 45° açığa ait serim açılarındaki σ_z gerilmeleri

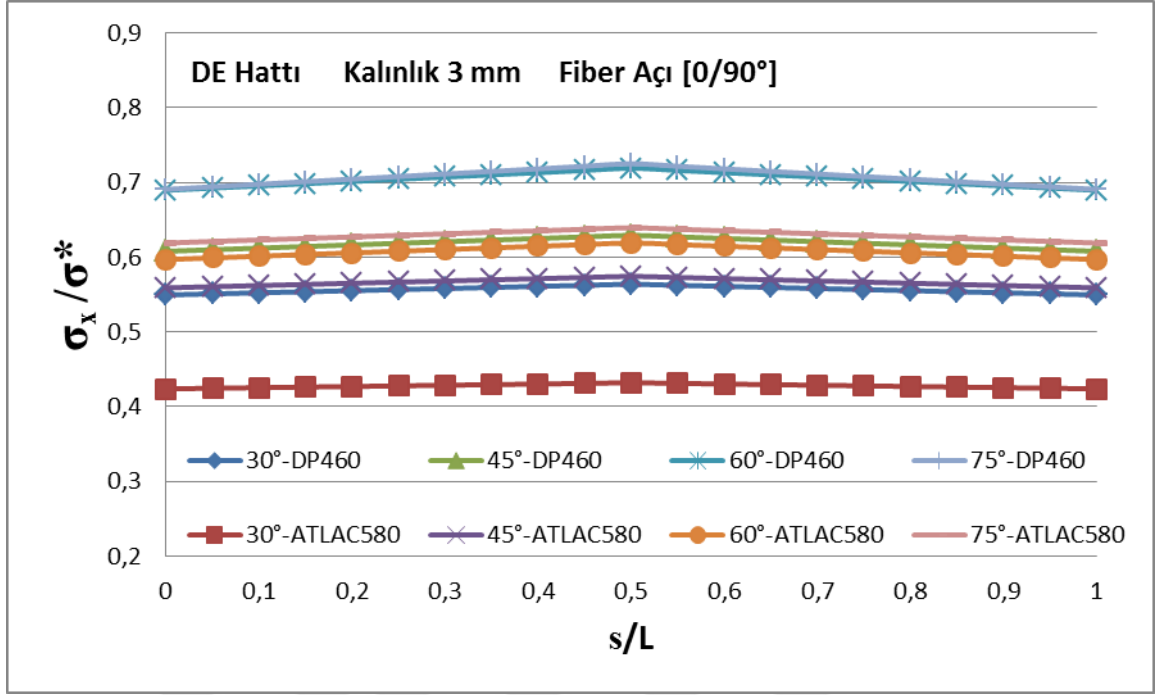
3.3.4. Kalınlık Hattı (DE) Boyunca Gerilme Dağılımı Sonuçları

Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıda, yapıştırıcı yüzeyinde D noktasından E noktasına (DE) kalınlık boyunca kritik hatlar belirlenip gerilme dağılımları bu hatlar üzerinden alınarak grafikler oluşturulmuştur.

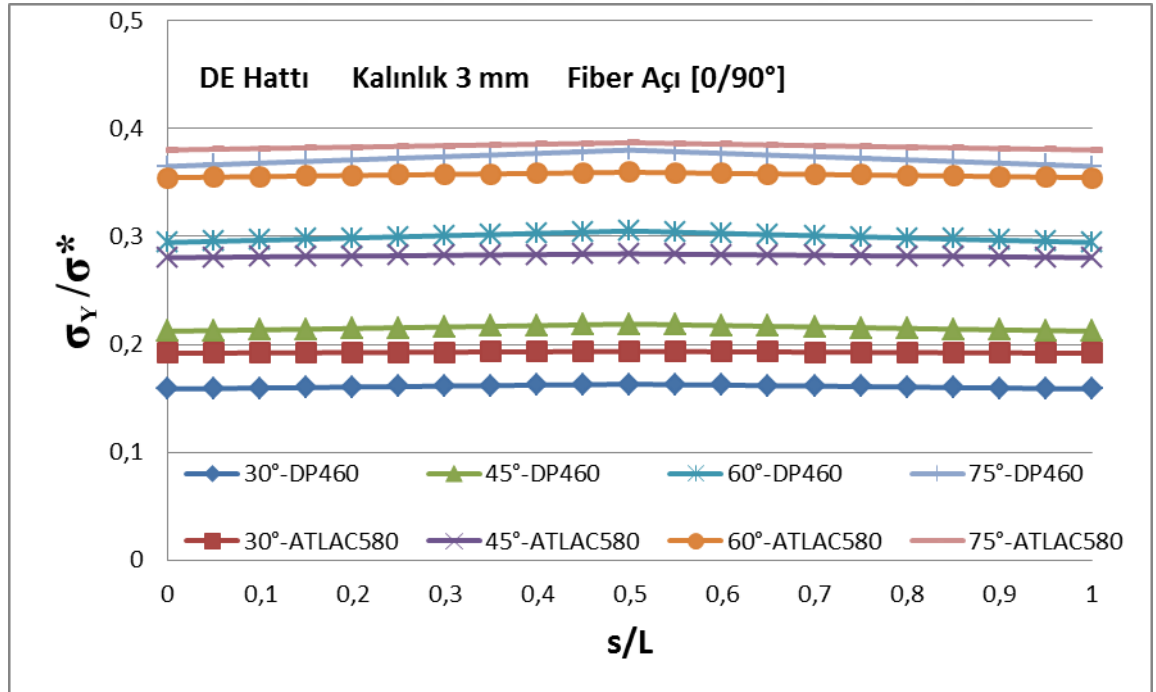


Şekil 3.200. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantı çeşidinde kritik hatlar [DE]

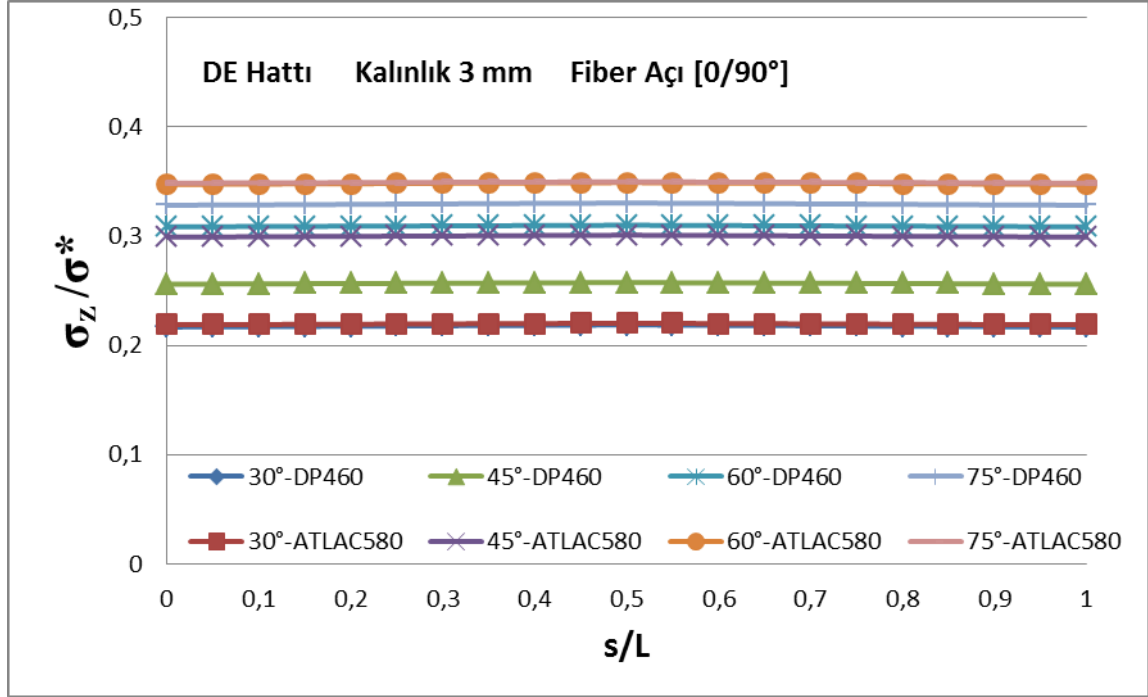
Şekil 3.201-3.205, 3 mm malzeme kalınlığında $[0^\circ/90^\circ]$ serim açısına sahip Dp460 ve Atlac580 ile birleştirilmiş yapışma bağlantılarında (D-E) hattı boyunca oluşan normalleştirilmiş gerilme dağılımlarını göstermektedir. Her iki yapıştırıcı için bindirme açısı arttıkça gerilmeler artmaktadır. Dp460 yapıştırıcısına ait gerilmeler Atlac580 yapıştırıcısına ait gerilmelerden daha yüksek çıkmıştır. Çünkü çekme dayanımı daha yüksektir. 30° - 45° açılarda gerilme farkı daha çok iken 60° - 75° açılarda gerilmeler arasındaki fark biraz daha az çıkmıştır. Bunun nedeni olarak bindirme açısındaki geometrik yapı söylenebilir. Hat boyunca bütün gerilme değerleri sabit bir eğride uniform olarak meydana gelmiştir.



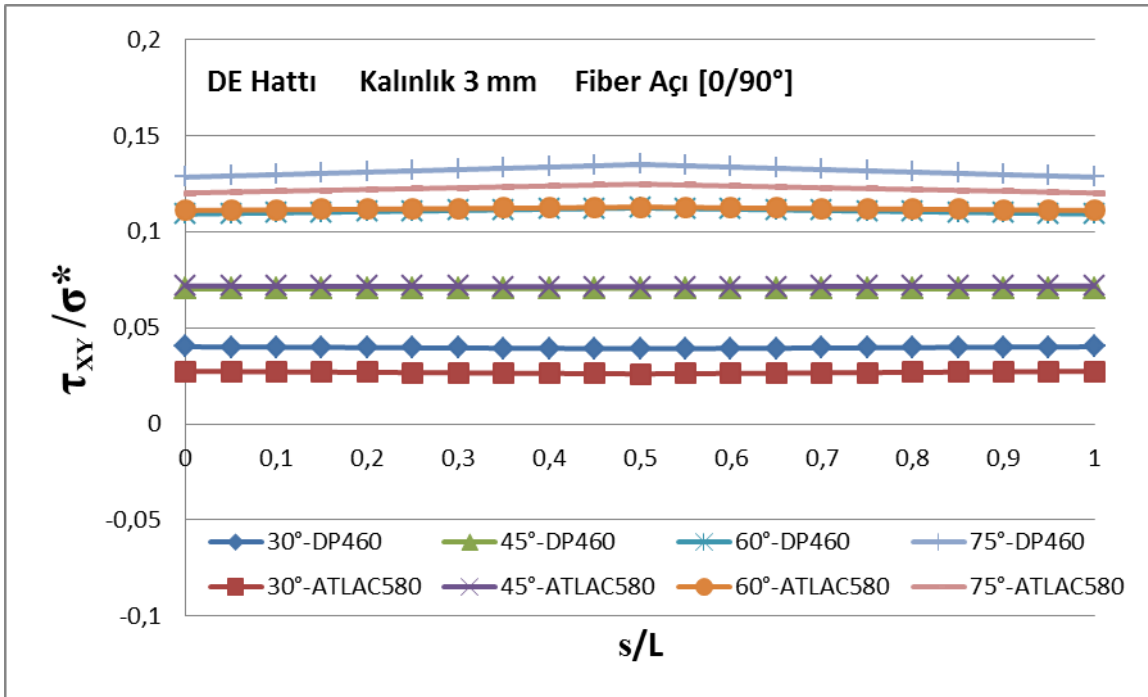
Şekil 3.201. [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_x gerilmeleri



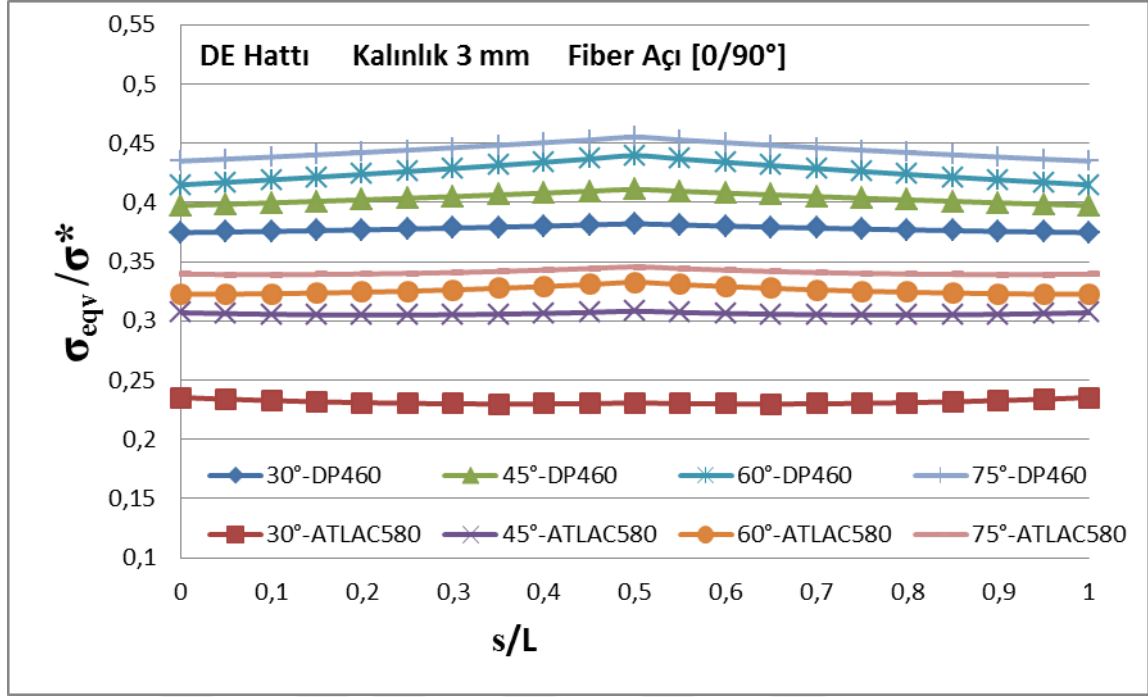
Şekil 3.202. [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_y gerilmeleri



Şekil 3.203. [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_z gerilmeleri

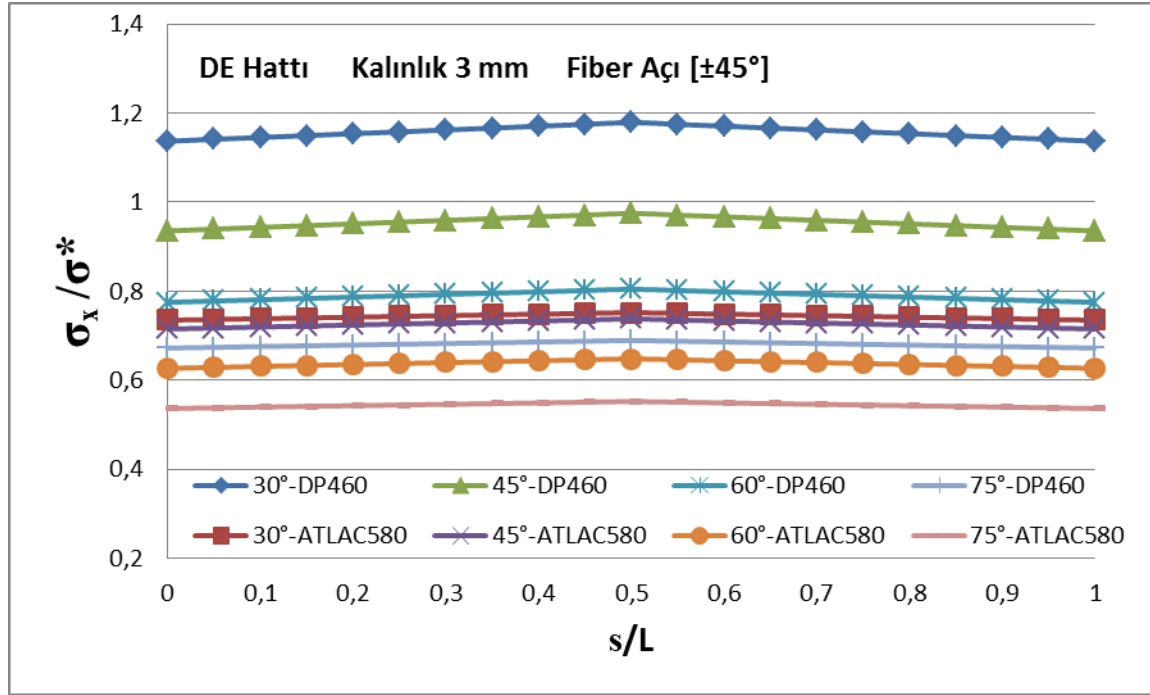


Şekil 3.204. [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş τ_{xy} gerilmeleri

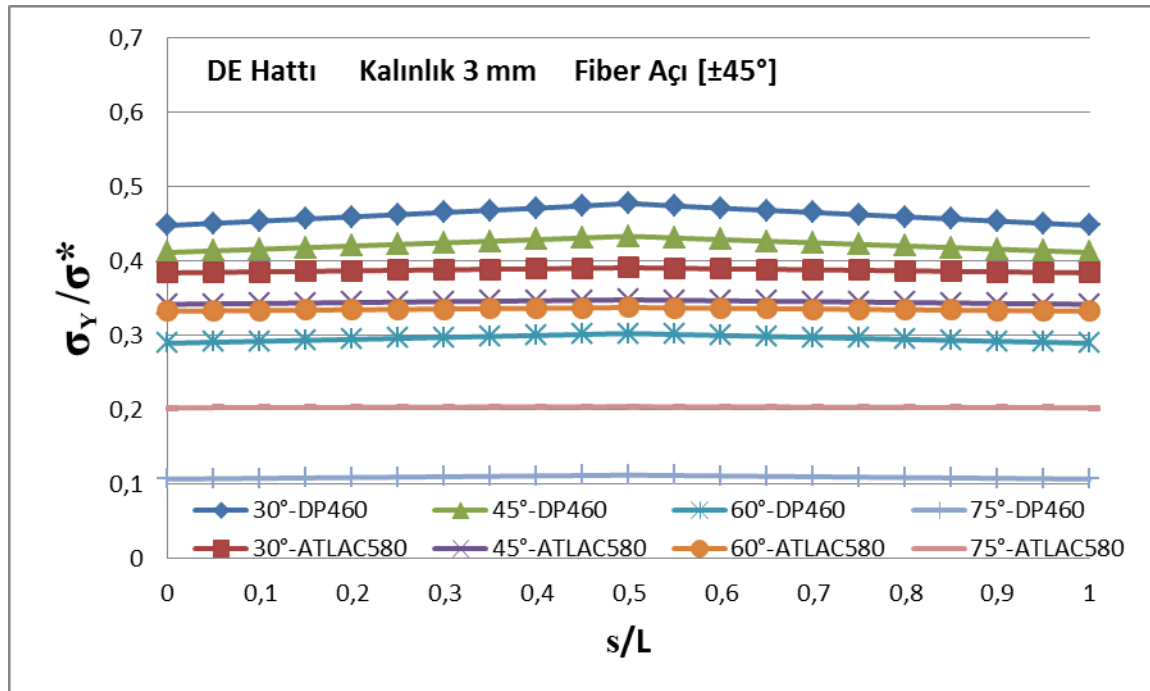


Şekil 3.205. [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_{eqv} gerilmeleri

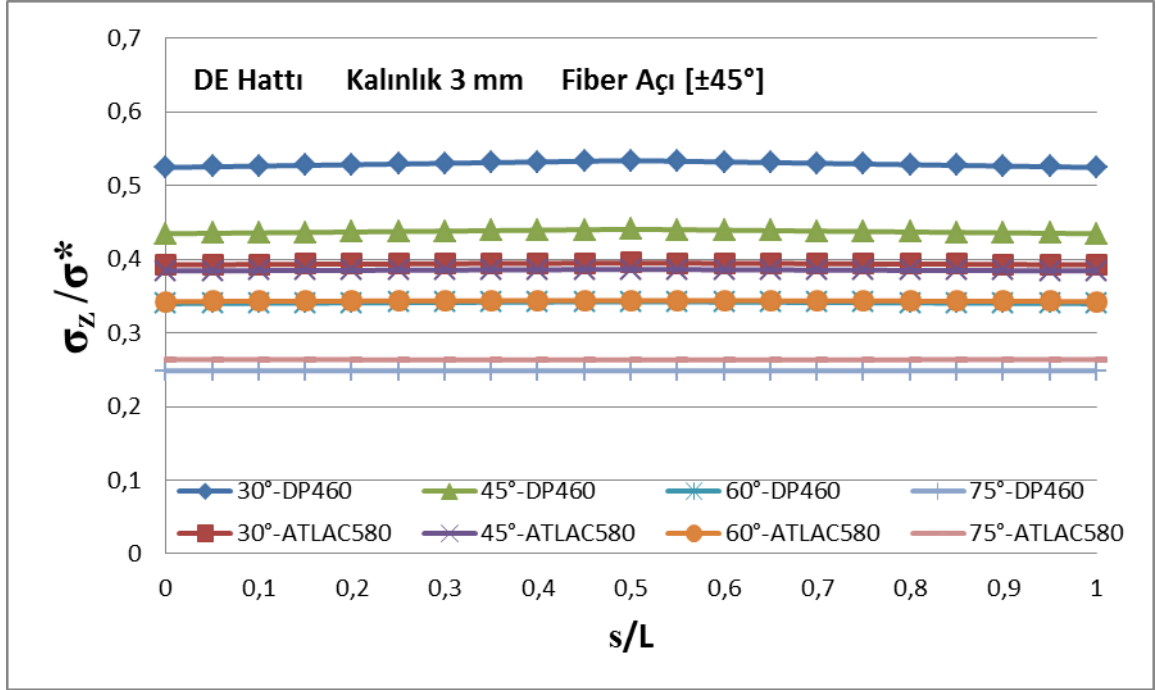
Şekil 3.206-3.210, 3 mm malzeme kalınlığında $[\pm 45^\circ]$ serim açısına sahip Dp460 ve Atlac580 ile birleştirilmiş yapışma bağlantılarında (D-E) hattı boyunca oluşan normalleştirilmiş gerilme dağılımlarını göstermektedir. $[0^\circ/90^\circ]$ serim açısının tersine her iki yapıştırıcı için bindirme açısı arttıkça gerilmeler azalmaktadır. Dp460 yapıştırıcısına ait gerilmeler Atlac580 yapıştırıcısına ait gerilmelerden daha yüksek çıkmıştır. Çünkü çekme dayanımı daha yüksektir. 30° - 45° açılarda gerilme farkı daha çok iken 60° - 75° açılarda gerilme farkı biraz daha az çıkmıştır. Bunun nedeni olarak bindirme açısındaki geometrik yapı söylenebilir. Hat boyunca bütün gerilme değerleri sabit bir eğride uniform olarak meydana gelmiştir. $[\pm 45^\circ]$ serim açısındaki gerilme değerleri, $[0^\circ/90^\circ]$ serim açısına göre daha yüksek çıkmıştır. Bunun nedeni elyaf yönlenmesinden kaynaklanmaktadır.



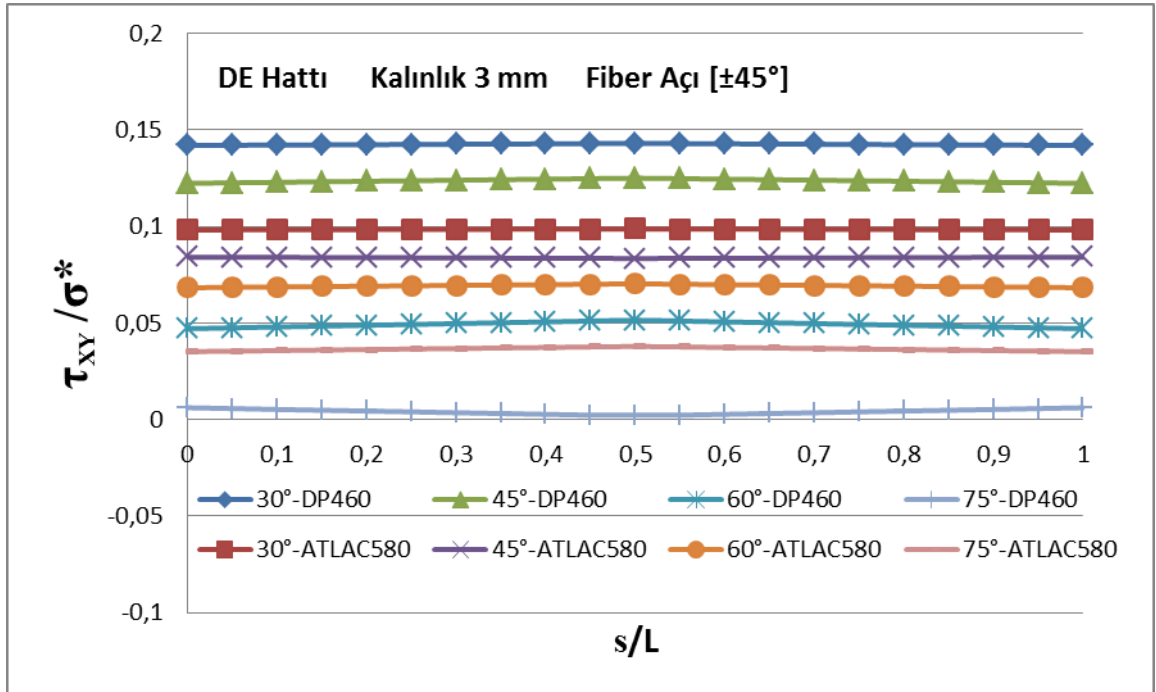
Şekil 3.206. [±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_x gerilmeleri



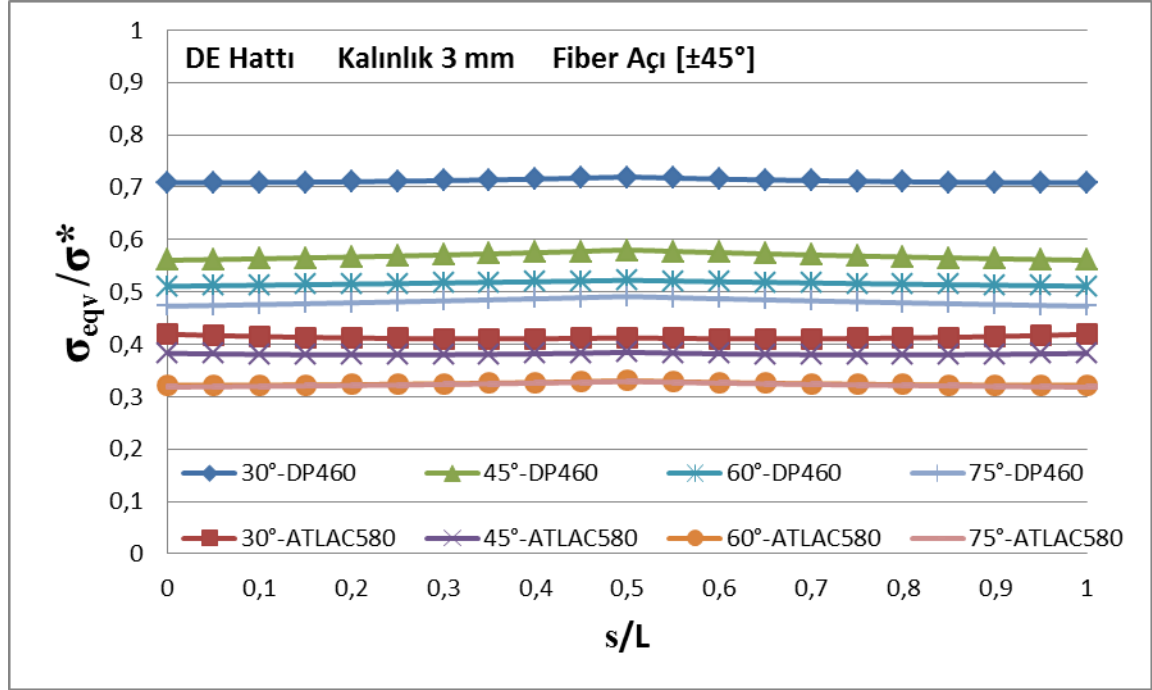
Şekil 3.207. [±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_y gerilmeleri



Şekil 3.208. [±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_z gerilmeleri

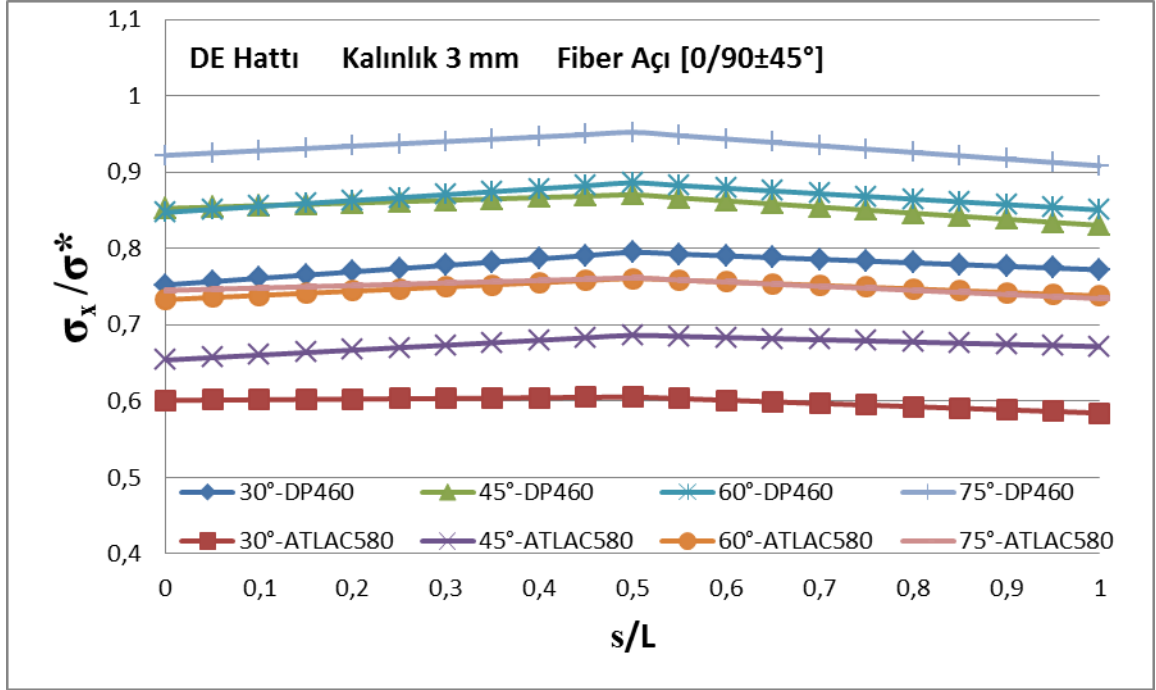


Şekil 3.209. [±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş τ_{xy} gerilmeleri

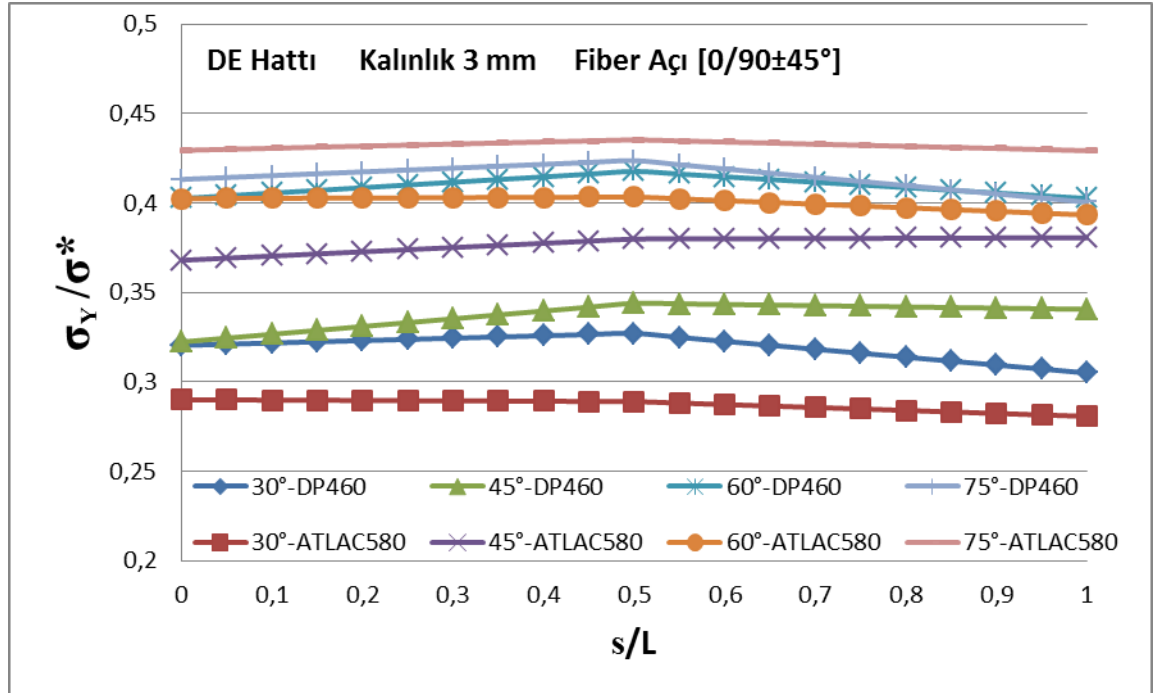


Şekil 3.210. [±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_{eqv} gerilmeleri

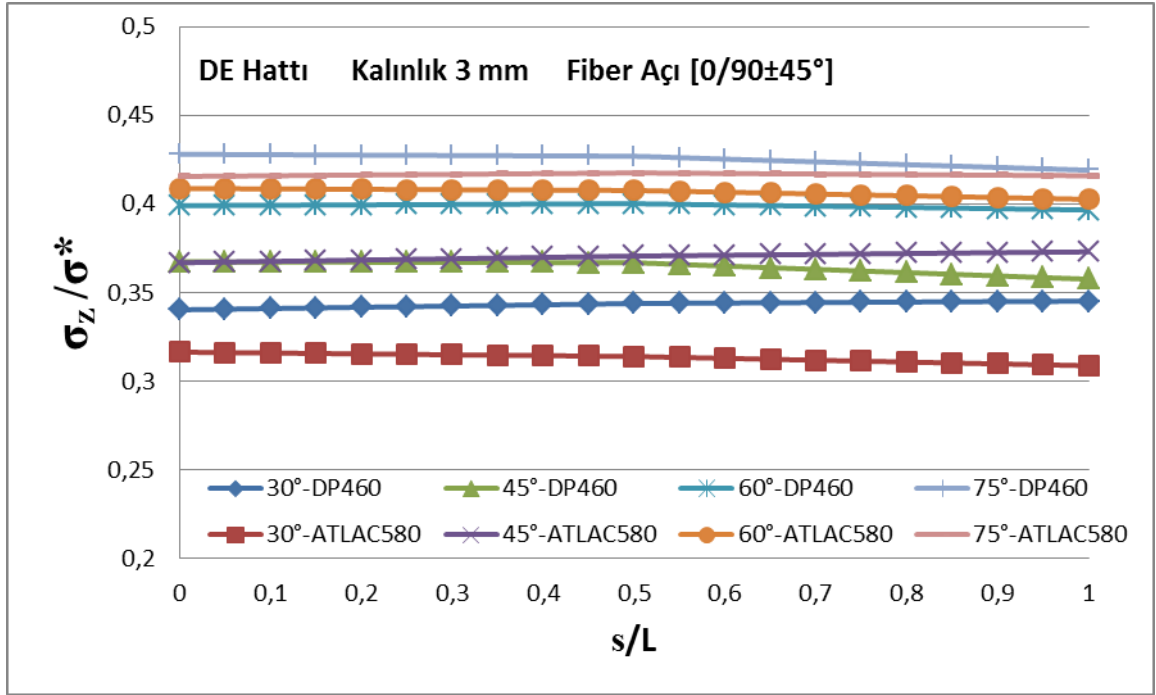
Şekil 3.211-3.215, 3 mm malzeme kalınlığında [0°/90°/±45°] serim açısına sahip Dp460 ve Atlac580 ile birleştirilmiş yapışma bağlantılarında (D-E) hattı boyunca oluşan normalleştirilmiş gerilme dağılımlarını göstermektedir. Her iki yapıştırıcı için bindirme açısı arttıkça gerilmeler artmaktadır. Dp460 yapıştırıcısına ait gerilmeler Atlac580 yapıştırıcısına ait gerilmelerden daha yüksek çıkmıştır. Çünkü çekme dayanımı daha yüksektir. 30°- 45° açılarda gerilme farkı daha çok iken 60°-75° açılarda gerilme farkı biraz daha az çıkmıştır. Bunun nedeni olarak bindirme açısındaki geometrik yapı söylenebilir. Hat boyunca bütün gerilme değerleri sabit bir eğride uniform olarak meydana gelmiştir.



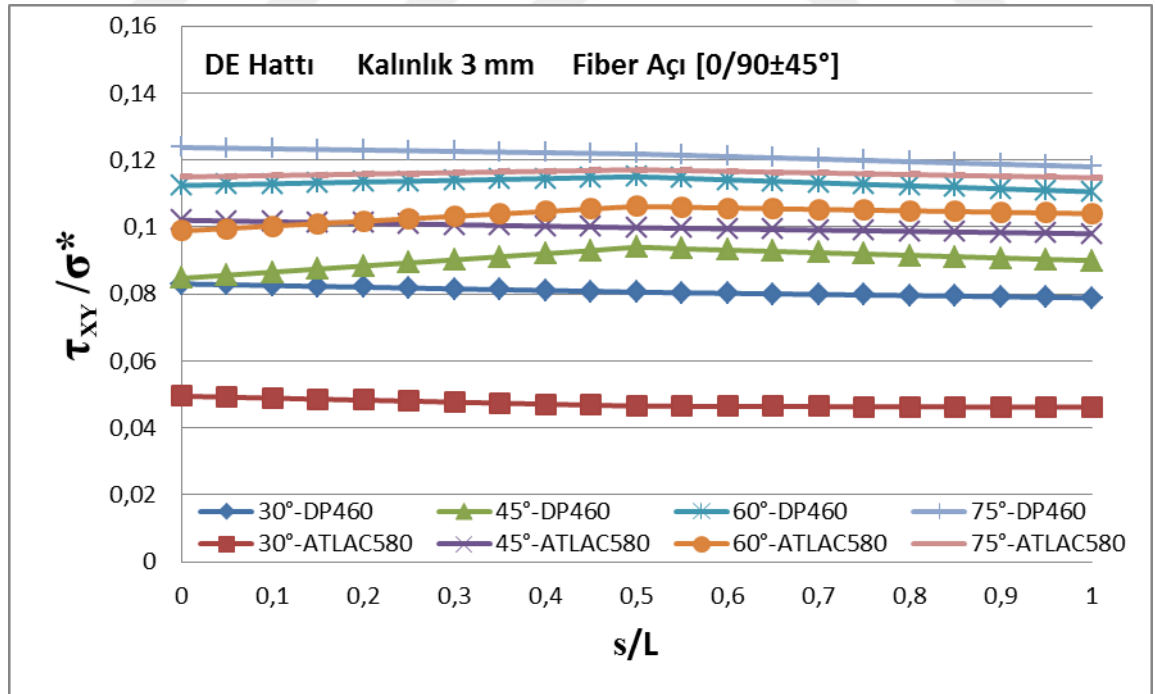
Şekil 3.211. [0°/90°/±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_x gerilmeleri



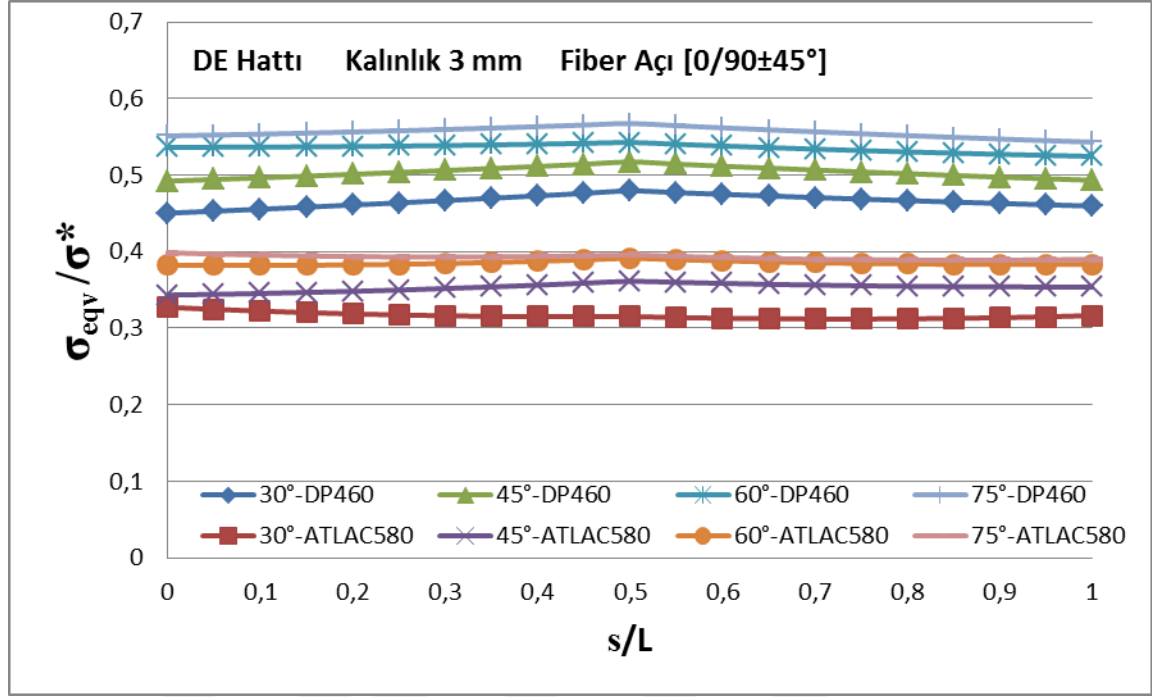
Şekil 3.212. [0°/90°/±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_y gerilmeleri



Şekil 3.213. [0°/90°/±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_z gerilmeleri

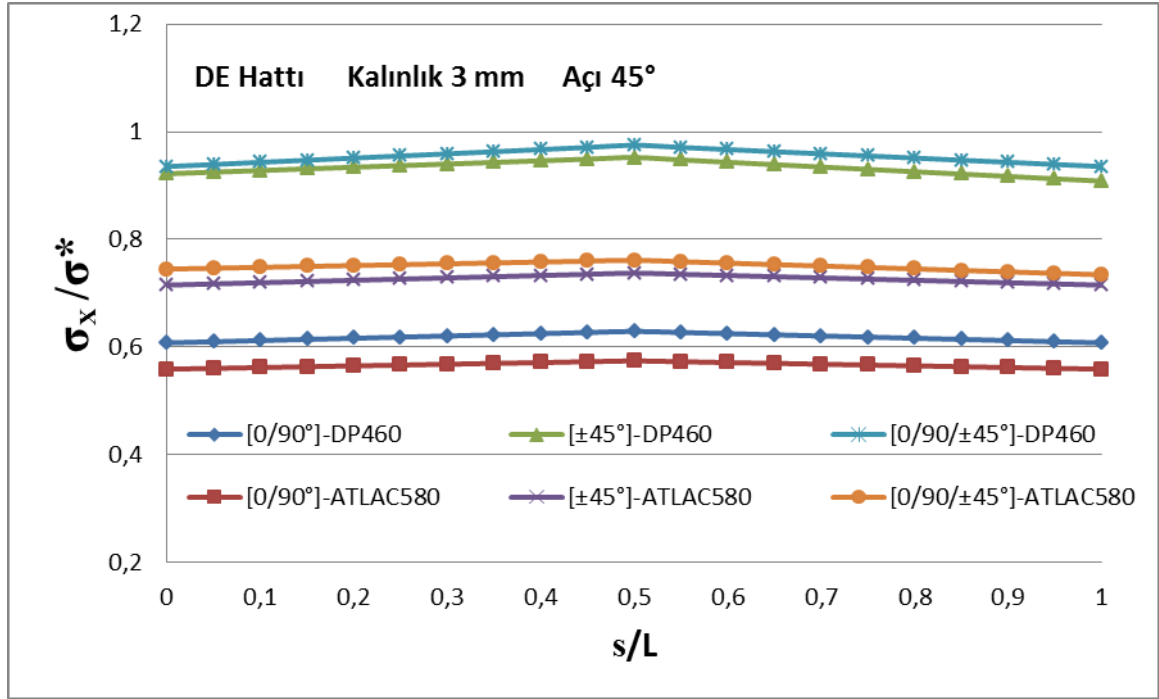


Şekil 3.214. [0°/90°/±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş τ_{xy} gerilmeleri

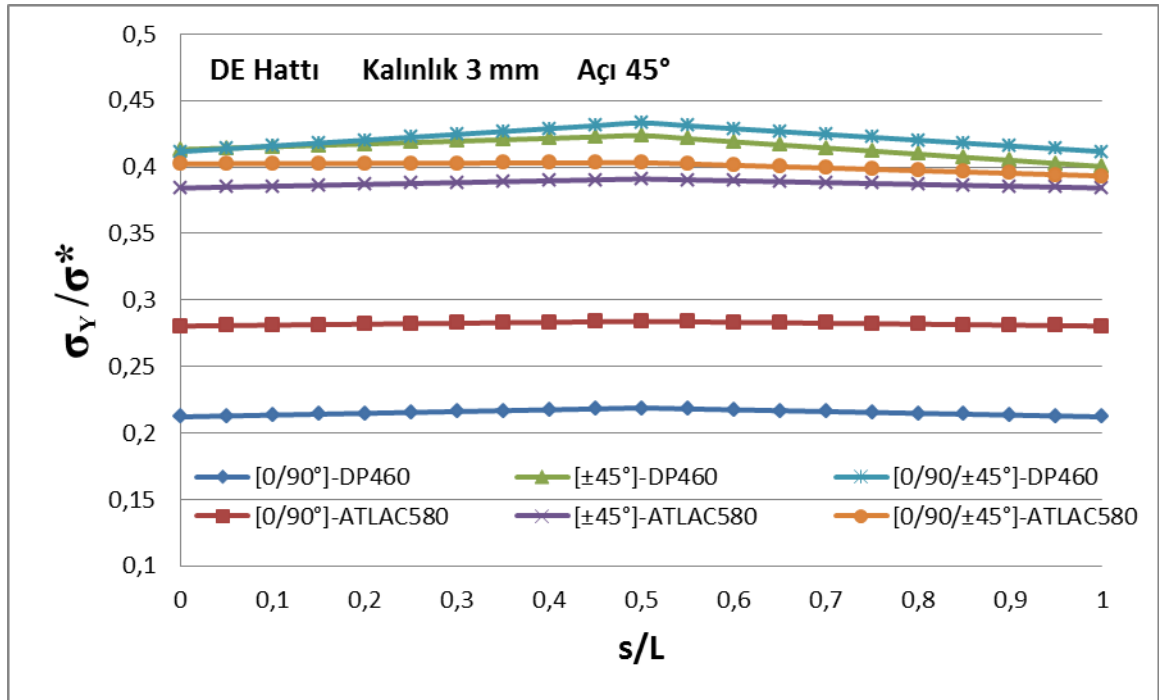


Şekil 3.215. [0°/90°/±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_{eqv} gerilmeleri

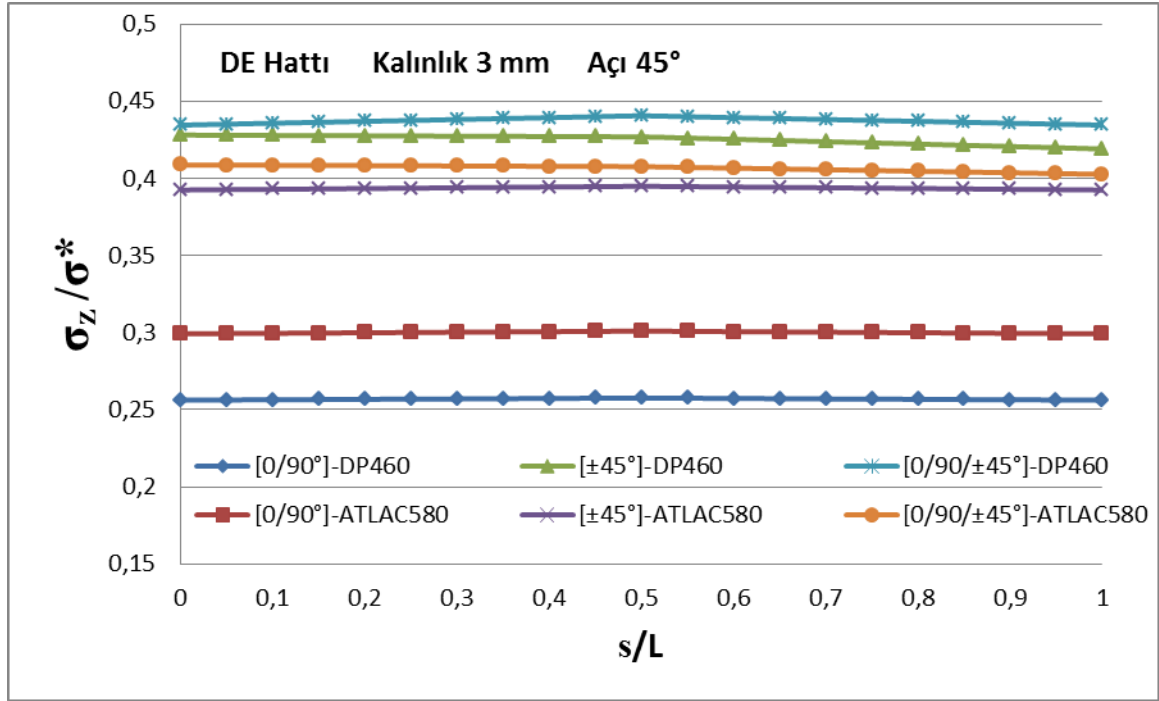
Şekil 3.216-3.220, 3 mm malzeme kalınlığı için 45° bindirme açısında ve [0°/90°], [±45°], [0°/90°/±45°] serim açısına sahip Dp460 ve Atlac580 ile birleştirilmiş yapışma bağlantılarında (DE) hattı boyunca oluşan normalleştirilmiş gerilme dağılımlarını göstermektedir. Dp460 yapıştırıcısına ait gerilmeler Atlac580 yapıştırıcısına ait gerilmelerden daha yüksek çıkmıştır. Çünkü çekme dayanımı daha yüksektir. Gerilme değerleri en fazla [0°/90°/±45°] serim açısına sahip malzemelerde görülürken en az gerilme değerleri [0°/90°] serim açısına sahip malzemelerde ortaya çıkmıştır. Bunun nedeni çok yönlü elyaf yönlenmesinden kaynaklanmaktadır. Hat boyunca bütün gerilme değerleri sabit bir eğride uniform olarak meydana gelmiştir.



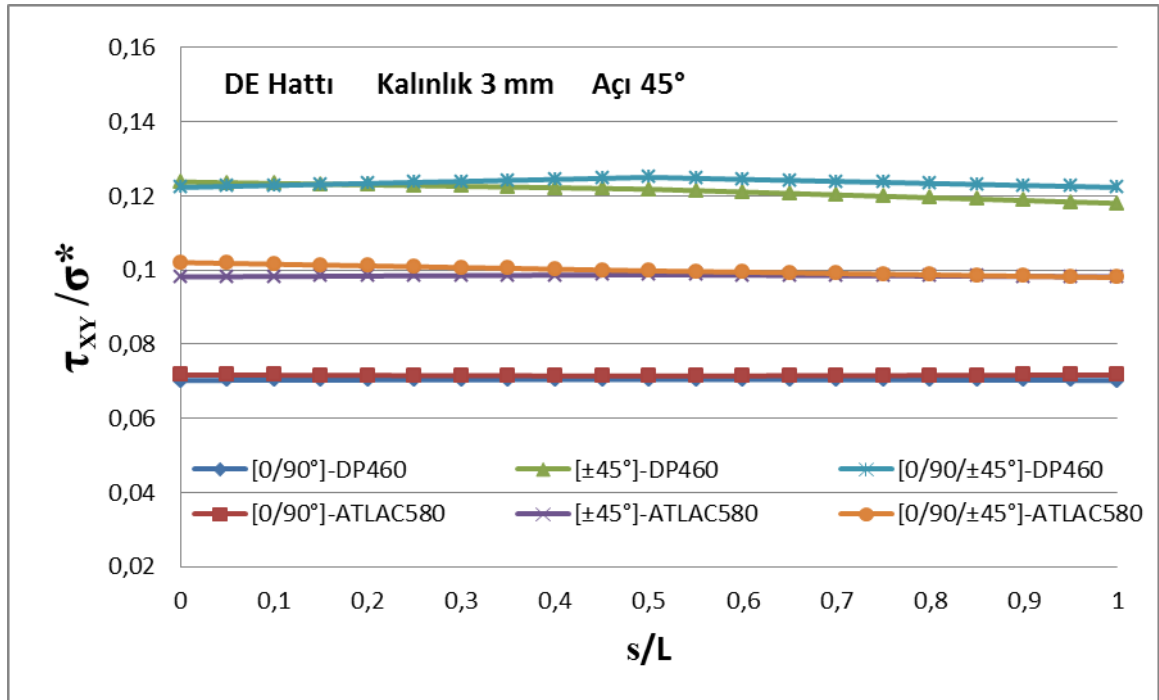
Şekil 3.216. 45° açığa ait serim açılarındaki normalleştirilmiş σ_x gerilmeleri



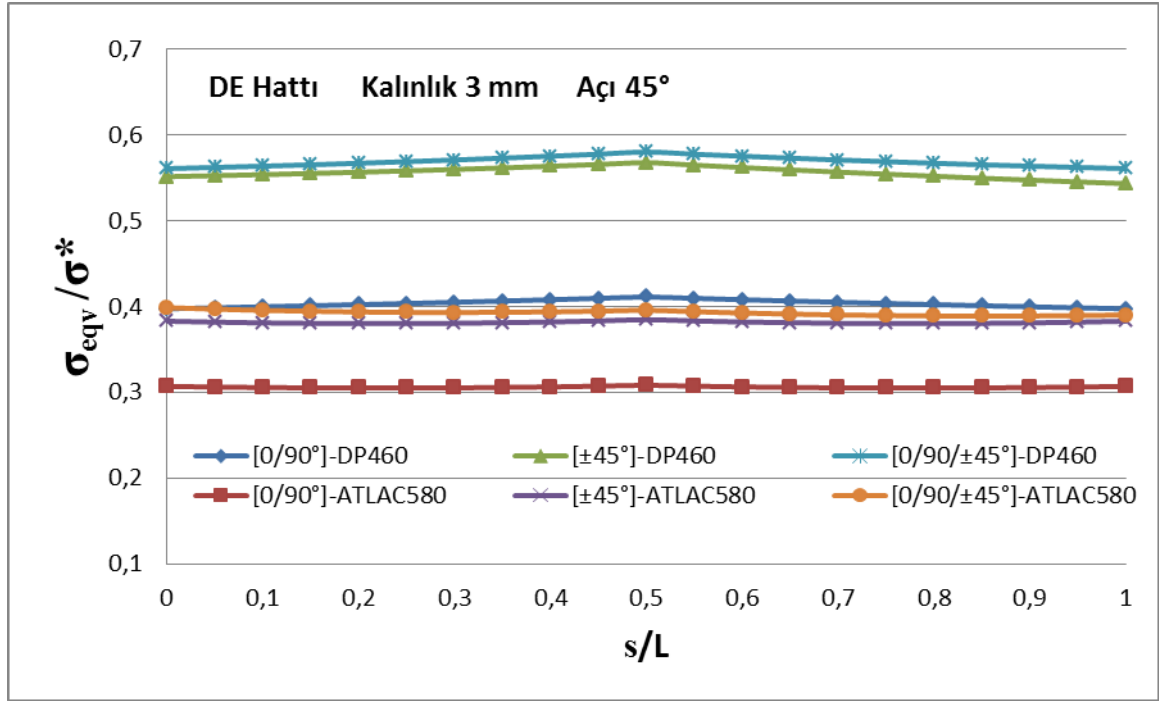
Şekil 3.217. 45° açığa ait serim açılarındaki normalleştirilmiş σ_y gerilmeleri



Şekil 3.218. 45° açığa ait serim açılarındaki normalleştirilmiş σ_z gerilmeleri

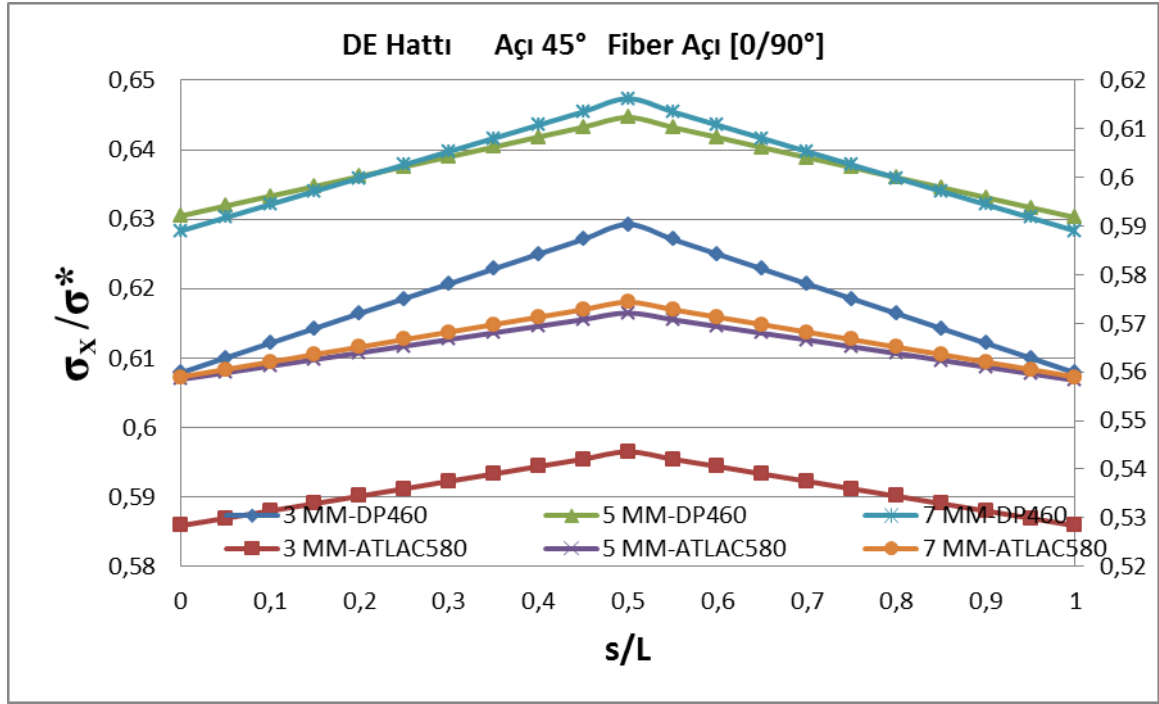


Şekil 3.219. 45° açığa ait serim açılarındaki normalleştirilmiş τ_{xy} gerilmeleri

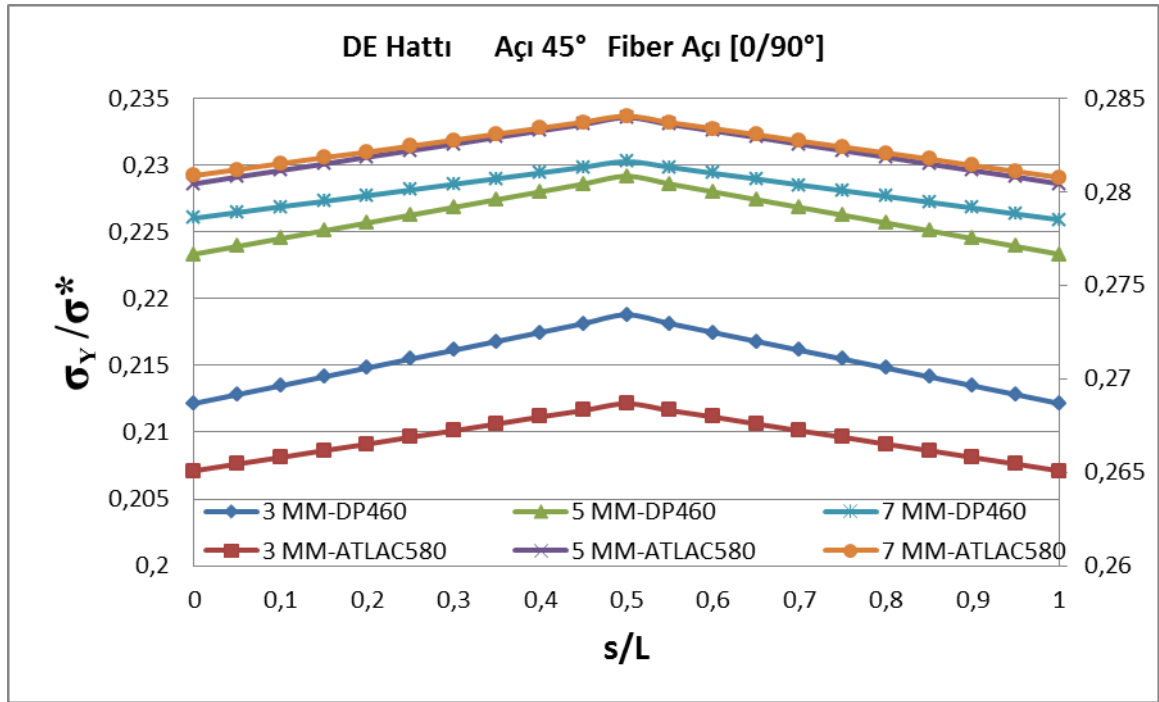


Şekil 3.220. 45° açıda DE hattı boyunca oluşan normalleştirilmiş σ_{eqv} gerilmeleri

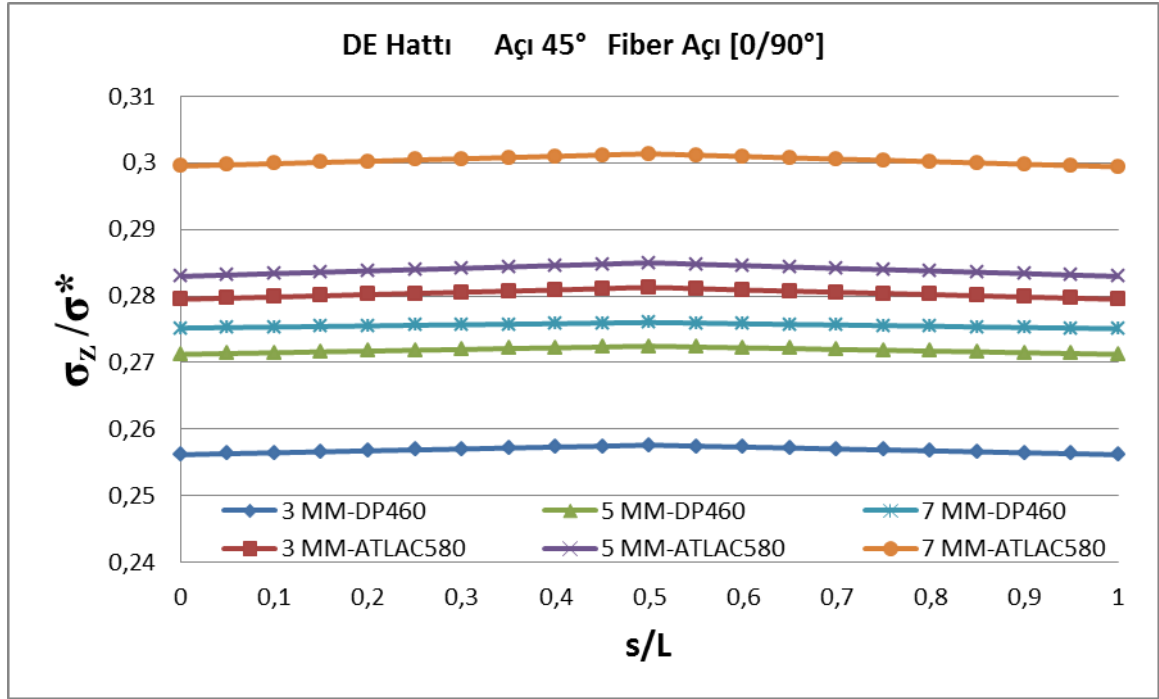
Şekil 3.221-3.225, 3 mm, 5 mm ve 7 mm malzeme kalınlığı için 45° bindirme açısında ve [0°/90°] serim açısına sahip Dp460 ve Atlac580 ile birleştirilmiş yapışma bağlantılarında (DE) hattı boyunca oluşan normalleştirilmiş gerilme dağılımlarını göstermektedir. Çift dikey eksenli grafiklerde soldaki dikey eksen DP460 yapıştırıcısına ait verileri, sağdaki dikey eksen ATLAC580 yapıştırıcısına ait verileri göstermektedir. Dp460 yapıştırıcısına ait gerilmeler Atlac580 yapıştırıcısına ait gerilmelere göre biraz daha yüksek çıkmıştır. Çünkü çekme dayanımı daha yüksektir. Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıda malzeme kalınlığı bağlantı mukavemeti üzerine etkisinin olduğu, ancak bu etkinin önemli bir seviyede olmadığı görülmektedir. Malzeme kalınlığı arttıkça yapıştırılan alan artmış ve doğal olarak da taşınan yükte artmıştır. Tüm gerilme değerlerinde ($s/L=0,5$) te yukarı yönlü tepecikler görülmektedir. Kayma gerilmeleri tüm kalınlıklarda hemen hemen sıfıra yakın çıkmıştır.



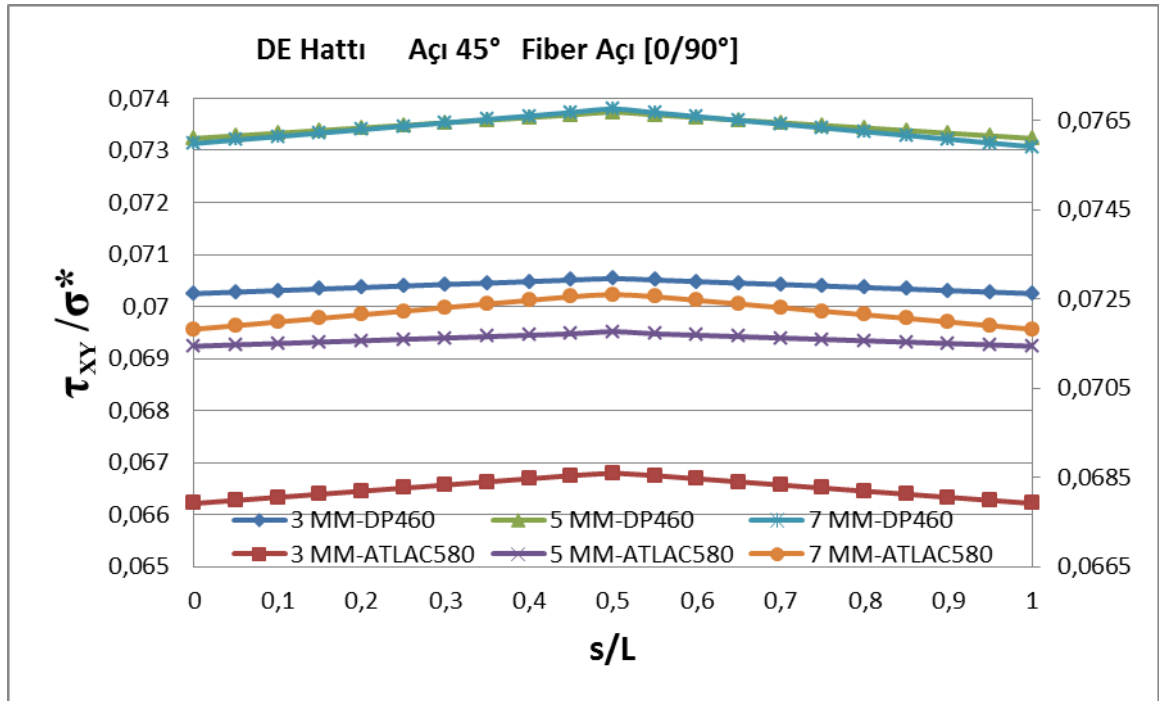
Şekil 3.221. 45° açığa ait [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_x gerilmeleri



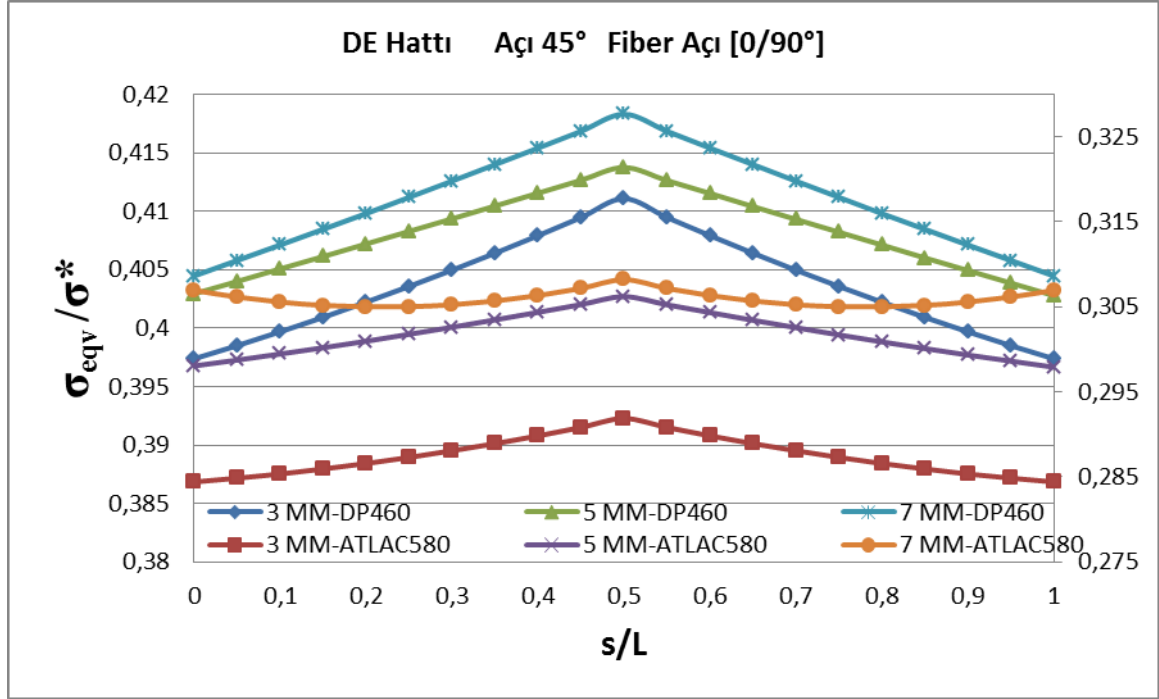
Şekil 3.222. 45° açığa ait [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_y gerilmeleri



Şekil 3.223. 45° aç ıya ait [0°/90°] serim aç ısında ki normalleştirilmiş σ_z gerilmeleri

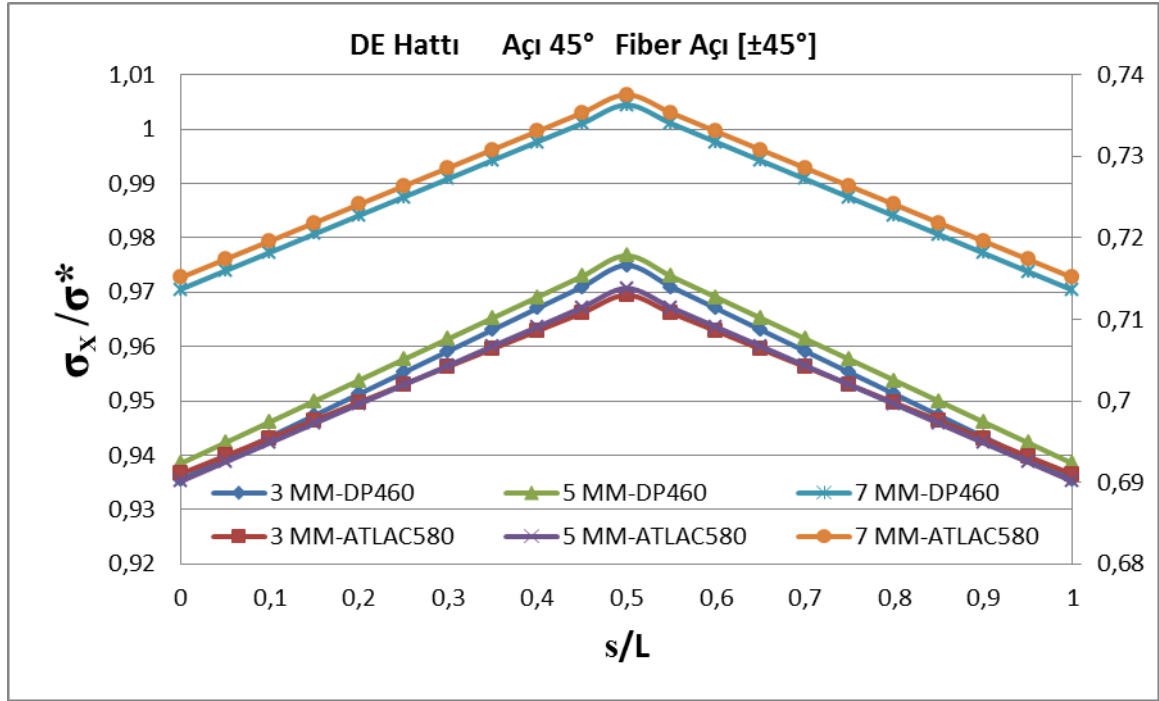


Şekil 3.224. 45° aç ıya ait [0°/90°] serim aç ısında ki normalleştirilmiş τ_{xy} gerilmeleri

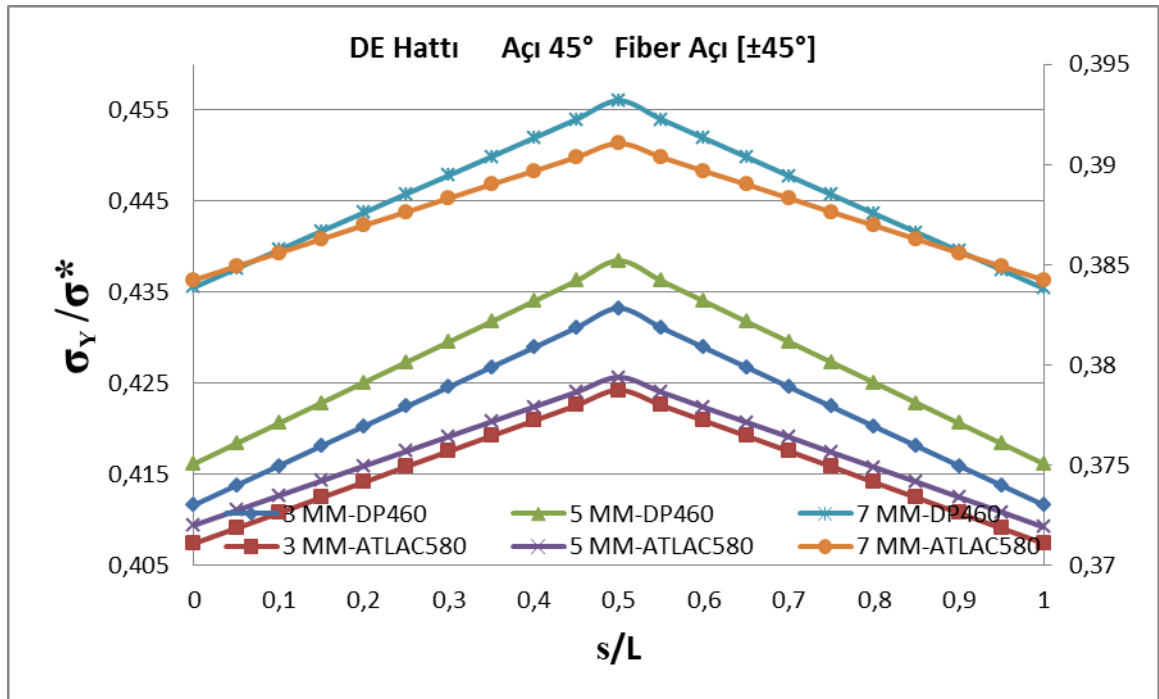


Şekil 3.225. 45° açığa ait [0°/90°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_{eqv} gerilmeleri

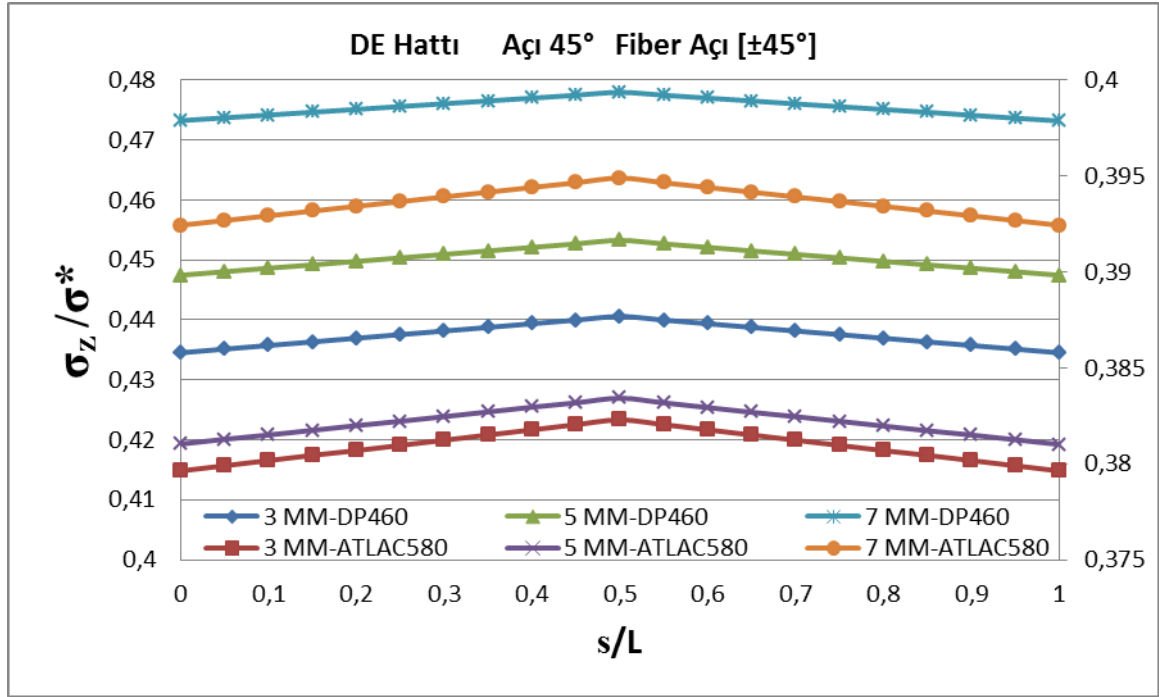
Şekil 3.226-3.230, 3 mm, 5 mm ve 7 mm malzeme kalınlığı için 45° bindirme açısında ve $[\pm 45^\circ]$ serim açısına sahip Dp460 ve Atlac580 ile birleştirilmiş yapışma bağlantılarında (DE) hattı boyunca oluşan normalleştirilmiş gerilme dağılımlarını göstermektedir. Çift dikey eksenli grafiklerde soldaki dikey eksen DP460 yapıştırıcısına ait verileri, sağdaki dikey eksen ATLAC580 yapıştırıcısına ait verileri göstermektedir. Dp460 yapıştırıcısına ait gerilmeler Atlac580 yapıştırıcısına ait gerilmelere göre biraz daha yüksek çıkmıştır. Çünkü çekme dayanımı daha yüksektir. Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıda malzeme kalınlığı bağlantı mukavemeti üzerine etkisinin olduğu, ancak bu etkinin önemli bir seviyede olmadığı görülmektedir. Malzeme kalınlığı arttıkça yapıştırılan alan artmış ve doğal olarak da taşınan yükte artmıştır. Tüm gerilme değerlerinde ($s/L=0,5$) te yukarı yönlü tepecikler görülmektedir. $[\pm 45^\circ]$ serim açısındaki gerilme değerleri $[0^\circ/90^\circ]$ serim açısına göre daha yüksek çıkmıştır. Bunun nedeni elyaf yönlenmesinden kaynaklanmaktadır.



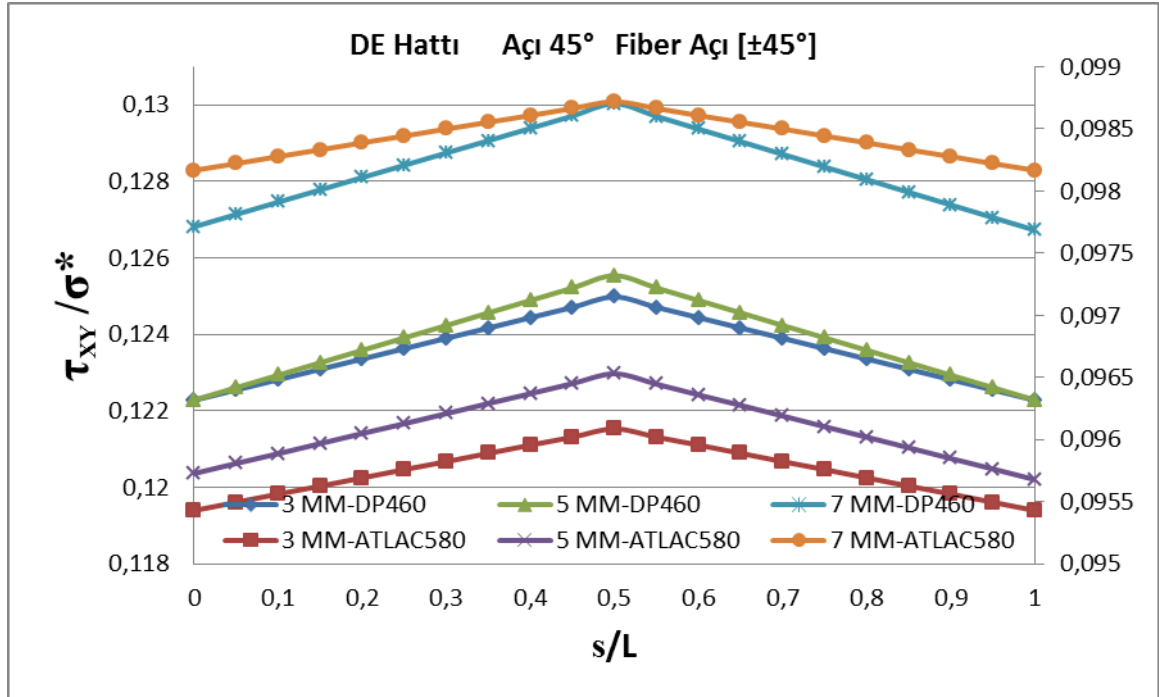
Şekil 3.226. 45° açığa ait [±45°] serim açısındaki normleştirilmiş σ_x gerilmeleri



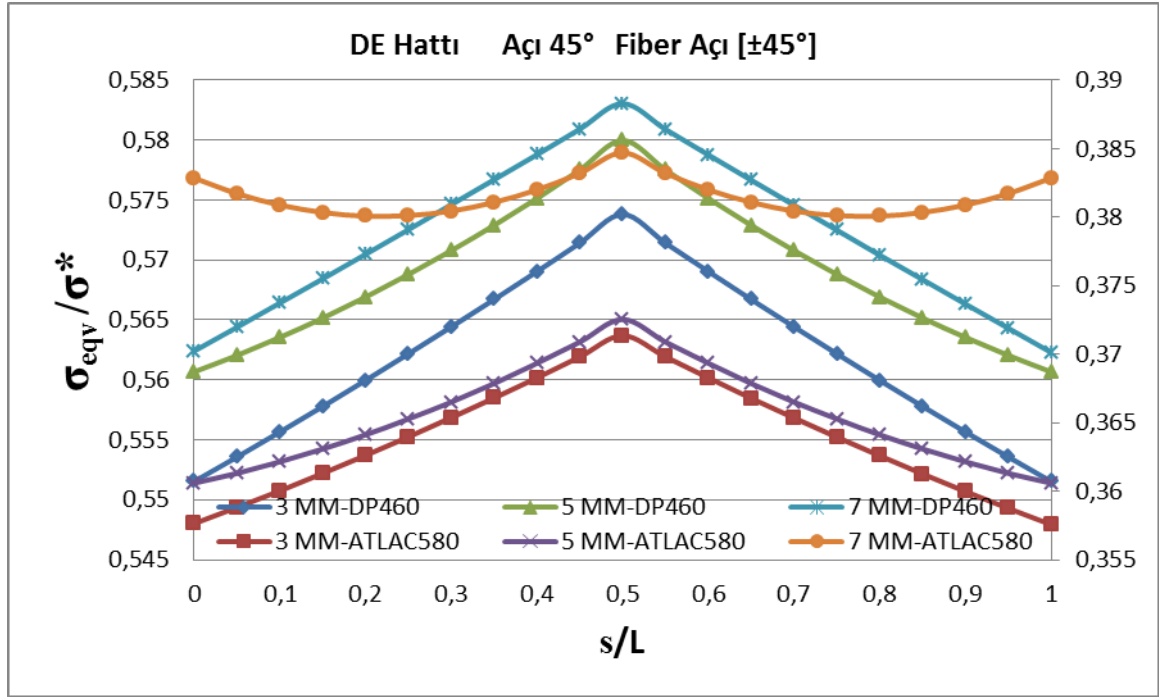
Şekil 3.227. 45° açığa ait [±45°] serim açısındaki normleştirilmiş σ_y gerilmeleri



Şekil 3.228. 45° aç 45° a ait [±45°] serim aç 45°ındaki normalleştirilmiş σ_z gerilmeleri

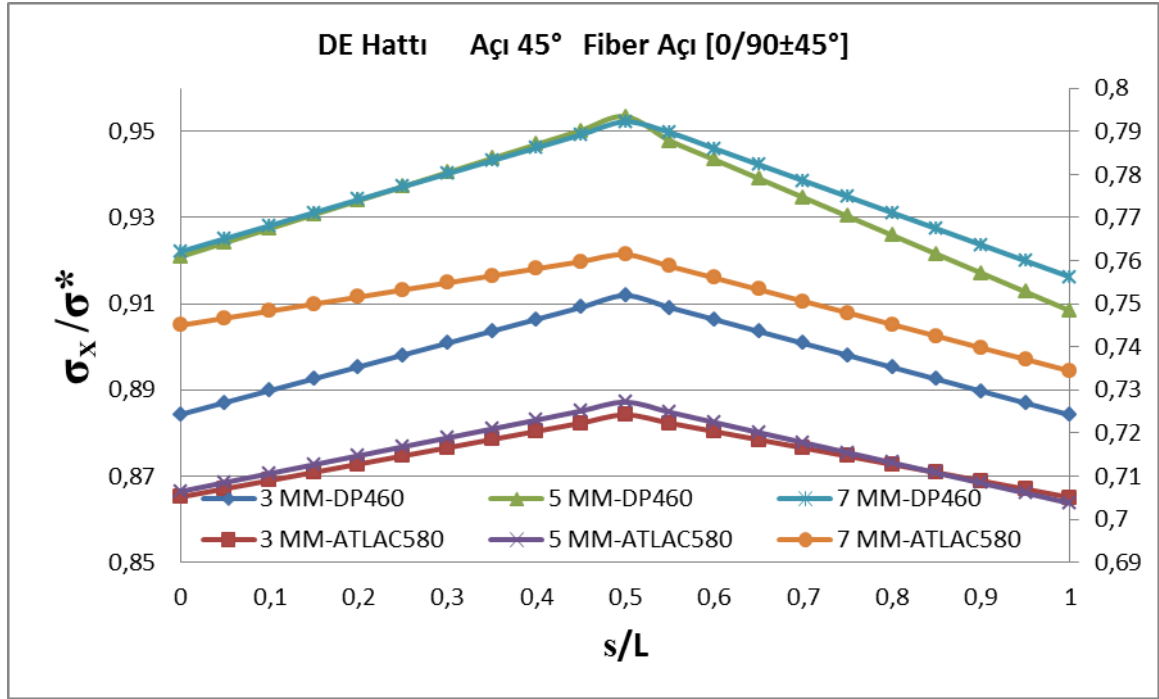


Şekil 3.229. 45° aç 45° a ait [±45°] serim aç 45°ındaki normalleştirilmiş τ_{xy} gerilmeleri

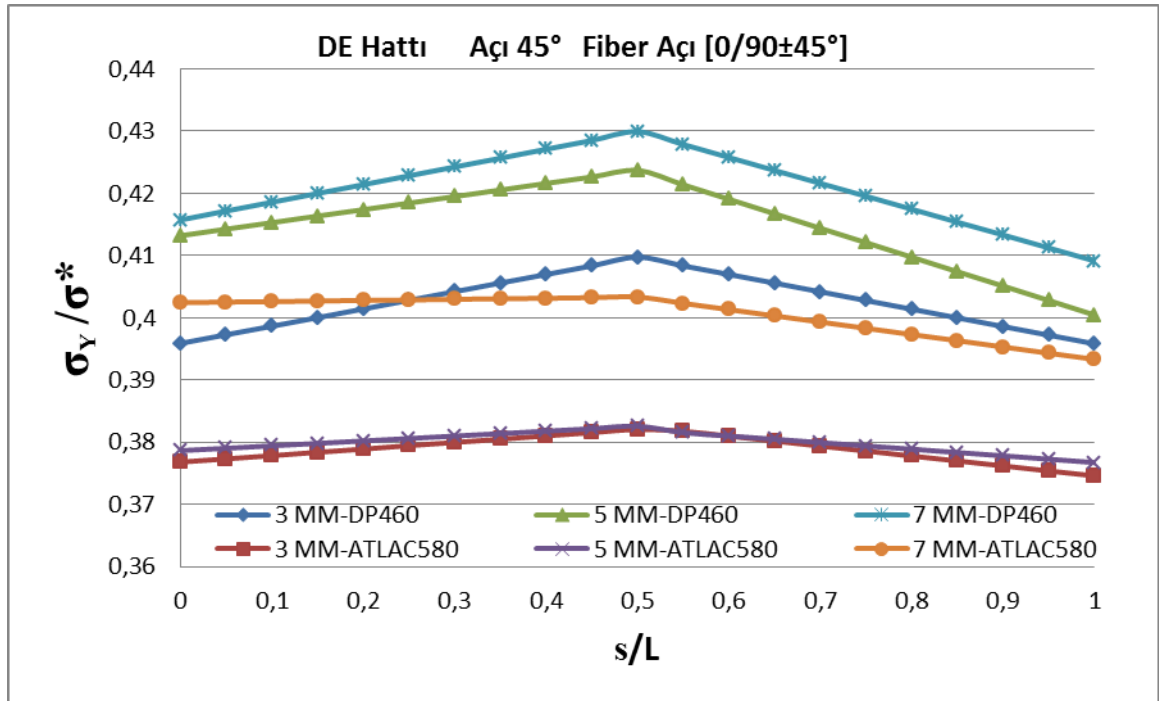


Şekil 3.230. 45° açığa ait [±45°] serim açısındaki normalleştirilmiş σ_{eqv} gerilmeleri

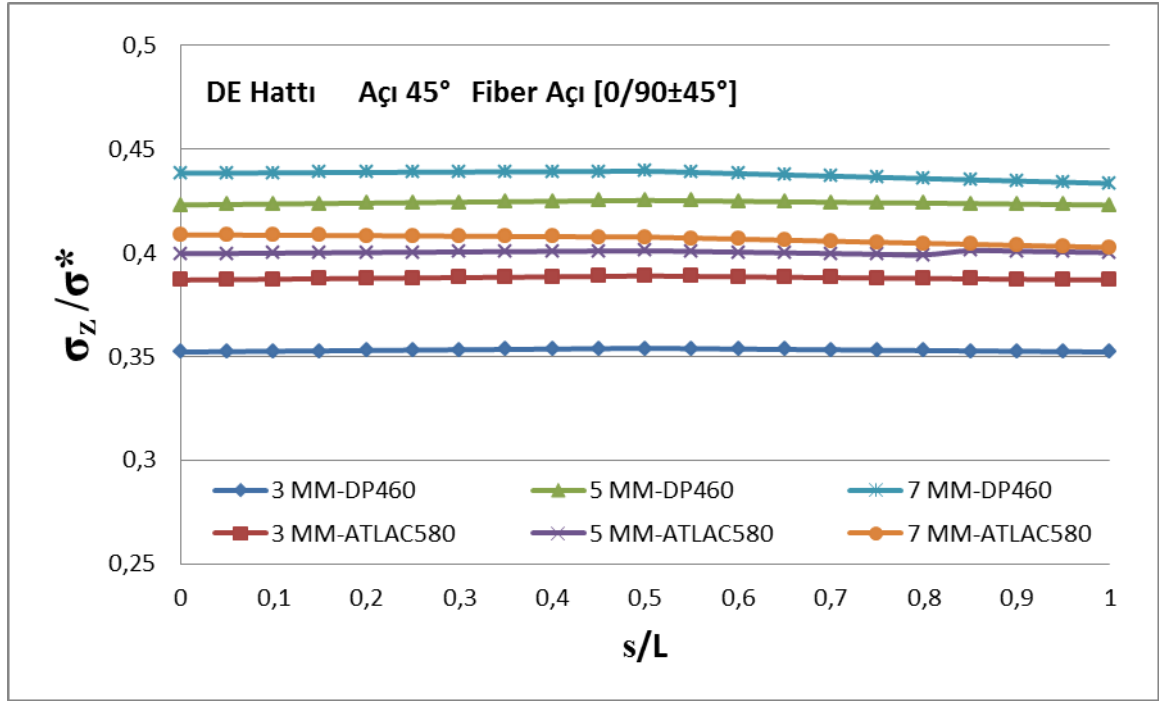
Şekil 3.231-3.235, 3 mm, 5 mm ve 7 mm malzeme kalınlığı için 45° bindirme açısında ve [0°/90°/±45°] serim açısına sahip Dp460 ve Atlac580 ile birleştirilmiş yapışma bağlantılarında (DE) hattı boyunca oluşan normalleştirilmiş gerilme dağılımlarını göstermektedir. Çift dikey eksenli grafiklerde soldaki dikey eksen DP460 yapıştırıcısına ait verileri, sağdaki dikey eksen ATLAC580 yapıştırıcısına ait verileri göstermektedir. Dp460 yapıştırıcısına ait gerilmeler Atlac580 yapıştırıcısına ait gerilmelere göre biraz daha yüksek çıkmıştır. Çünkü çekme dayanımı daha yüksektir. Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıda malzeme kalınlığı bağlantı mukavemeti üzerine etkisinin olduğu, ancak bu etkinin önemli bir seviyede olmadığı görülmektedir. Malzeme kalınlığı arttıkça yapıştırılan alan artmış ve doğal olarak da taşınan yükte artmıştır. Tüm gerilme değerlerinde (s/L=0,5) te yukarı yönlü tepelikler görülmektedir. Kayma gerilmelerinde (s/L=1) de aşağı yönlü bir azalma görülmektedir.



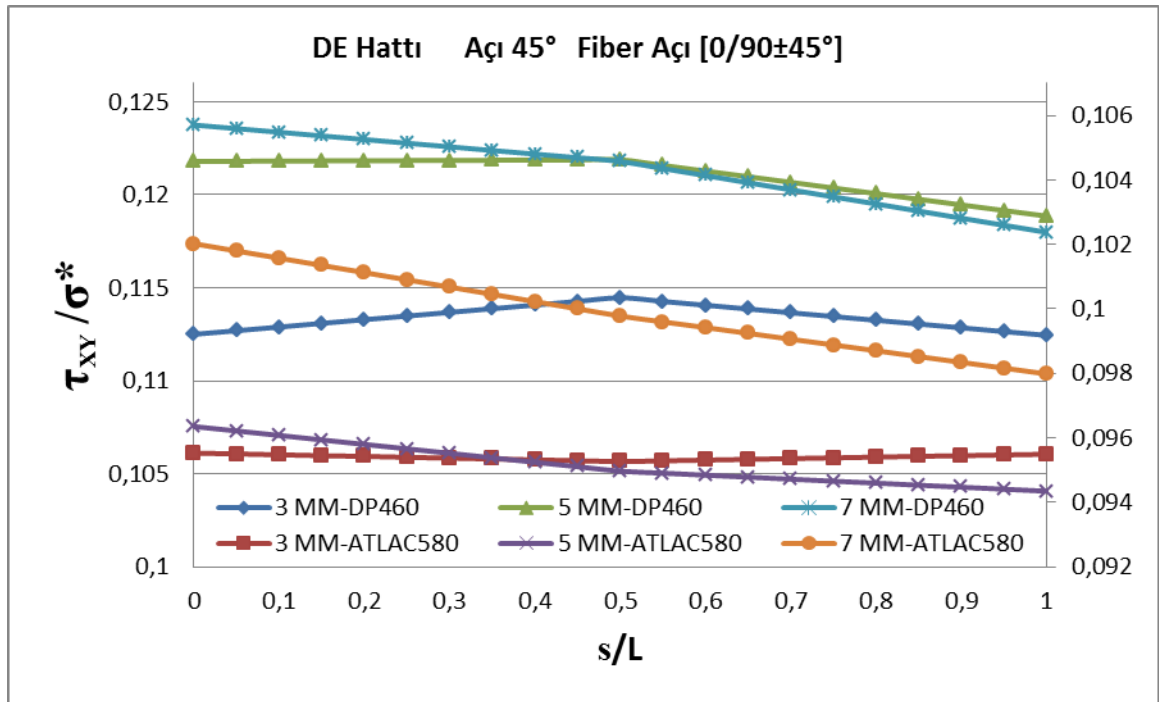
Şekil 3.231. 45° açığa ait [0°/90°/±45°] serim, normalleştirilmiş σ_x gerilmeleri



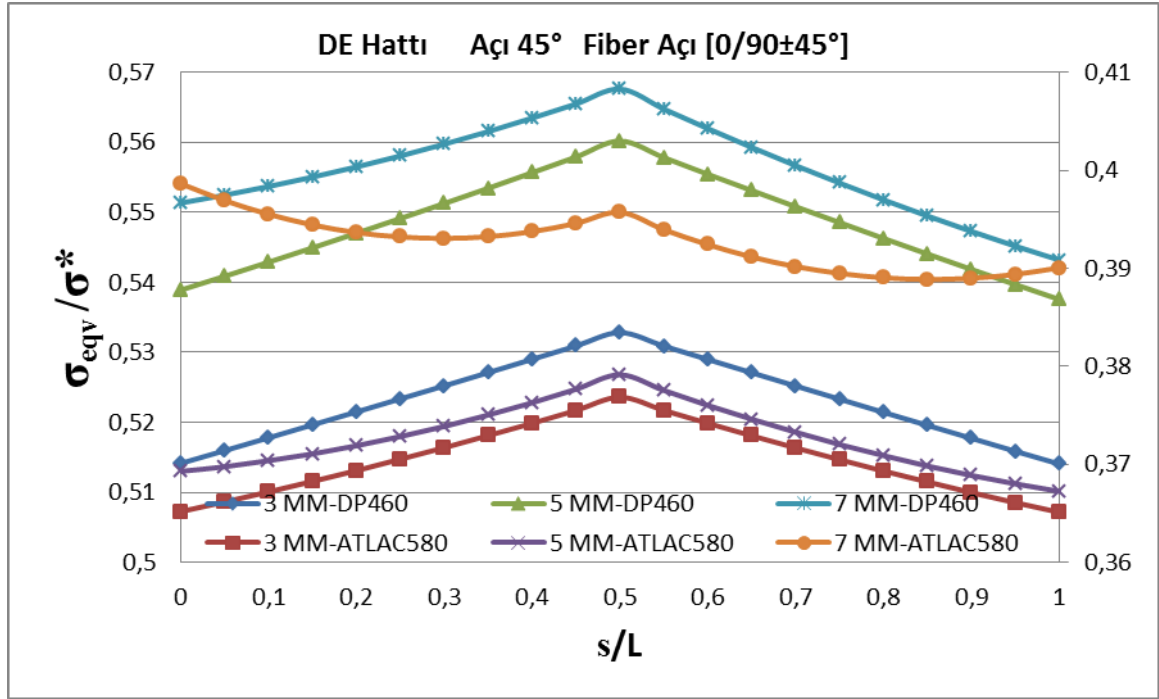
Şekil 3.232. 45° açığa ait [0°/90°/±45°] serim, normalleştirilmiş σ_y gerilmeleri



Şekil 3.233. 45° açığa ait [0°/90°/±45°] serim, normalleştirilmiş σ_z gerilmeleri



Şekil 3.234. 45° açığa ait [0°/90°/±45°] serim, normalleştirilmiş τ_{xy} gerilmeleri



Şekil 3.235. 45° açığı aitt [0°/90°/±45°] serim, normalleştirilmiş σ_{eqv} gerilmeleri

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

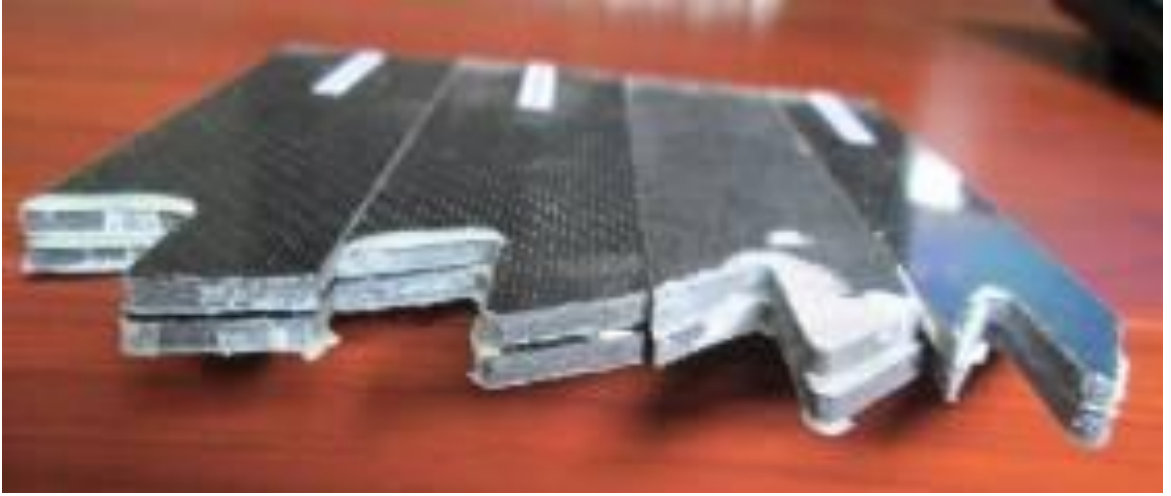
Literatürde yapıştırıcıyla birleştirilmiş birçok bağlantı tipine rastlanmaktadır. Aynı numune üzerinde hem açılı hem açısız bindirme bölgelerinin olduğu bir bağlantı tipine pek rastlanmamıştır. Genelde açılı bağlantılar bir numunede açısız bağlantılar bir diğer numunede olacak şekilde çalışmalar yapılmıştır. Bu yüzden bu çalışmada, çekme yüklerine maruz çift zikzak tip yapıştırma bağlantısında sünek ve gevrek tip iki farklı yapıştırıcı (DP460 ve Atlac580) kullanılarak farklı açı konfigürasyonlarında ($30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$) ve ortalama 3 mm, 5 mm ve 7 mm kalınlığına sahip cam takviyeli epoksi prepreglerin farklı serim açılarında ($[0^\circ/90^\circ]$, $[\pm 45^\circ]$ ve $[0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ]$) numuneler tasarlanmış ve üretilmiştir. Bağlantının mekanik özelliklerini belirlemeye yönelik deneysel ve sayısal bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Deneyler ve sayısal analizler sonunda elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

▲ Tüm numune tipleri için deneysel sonuçlar ve sonlu eleman analizlerinden elde edilen verilerin oldukça uyumlu olduğu görülmüştür. Sonlu elemanlar analiz sonuçları hasar açısından en kritik bölgenin yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme yüzeylerinin (AC, A'C' ve DE) olduğunu göstermiştir.

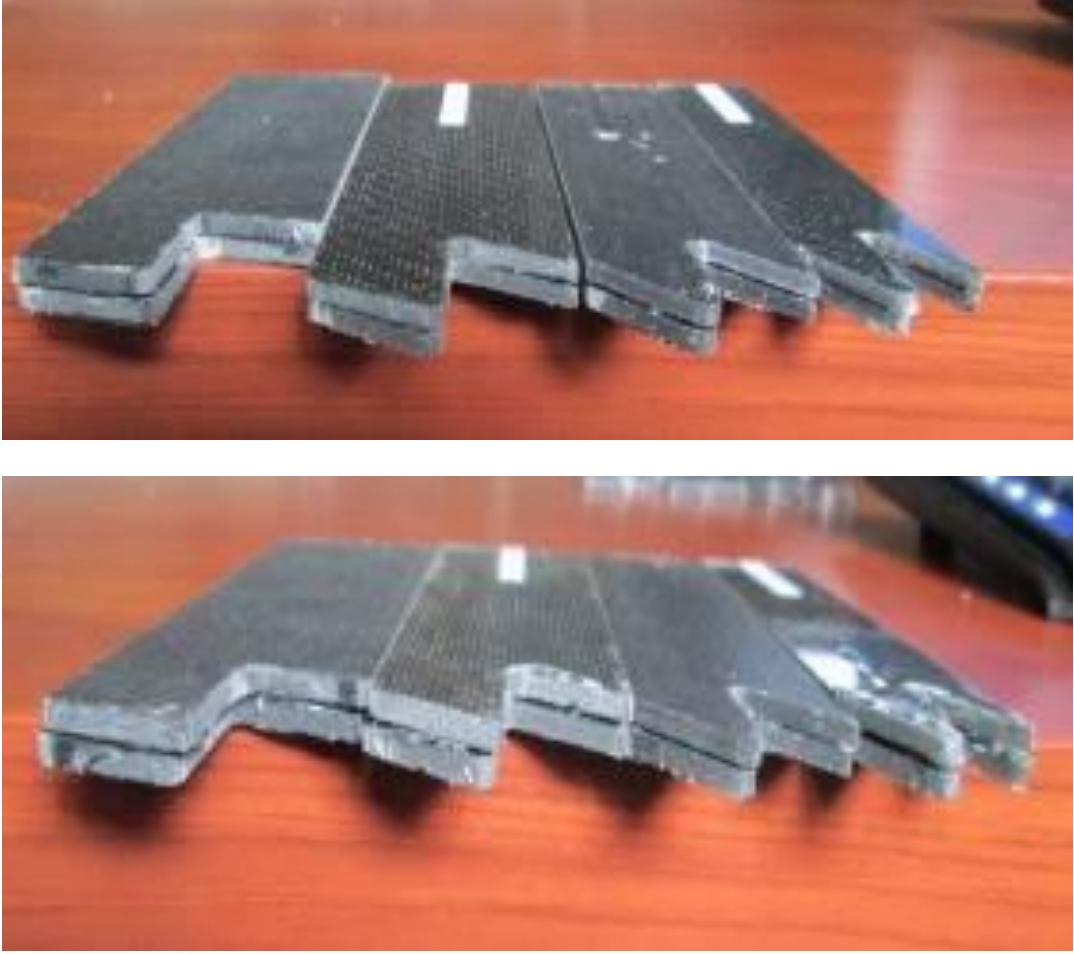
▲ Kompozit malzemeler çekme deneyleri sonucunda herhangi bir hasara uğramamıştır. Kopmalar yapışma bölgesinde olmuştur. Çünkü kompozit malzemelerin çekme mukavemeti, yapıştırıcıların çekme mukavemetlerinden çok daha yüksektir (Tablo 2.2-2.5).

▲ DP460 yapıştırıcısına ait gerilme değerleri, Atlac580 yapıştırıcısına ait gerilme değerlerinden daha yüksek çıkmıştır. Çünkü DP460'ın elastisite modülü 2077,10 MPa iken Atlac580'in elastisite modülü 442,46 MPa'dır. Yapıştırıcının elastisite modülünün artmasıyla gerilme değerleri artmıştır. Sadece (BC) hattı için Atlac580 yapıştırıcısının gerilme değeri daha yüksek çıkmıştır. Bu farklılık yapıştırıcının karakteristiğinden kaynaklandığı söylenebilir.

▲ Hem açılı yüzeyde hem de açısız yüzeyde yapıştırıcı tabakasının kaldığı görülmüştür. Hasar yüzeyleri incelendiğinde, genellikle sünek yapıştırıcıda kohezyon hasarlar, gevrek yapıştırıcısında ise adhezyon hasarlar görülmüştür. Ancak kohezyon hasarlar daha fazla olmuştur (Şekil 3.236-3.237). Küçük açılarda kohezyon hasarı meydana gelirken; büyük açılarda adhezyon/kohezyon karışık hasarı oluşmuştur.



Şekil 4.1. Kohezyon hasar bölgeleri



Şekil 4.2. Adhezyon hasar bölgeleri

▲ Bindirme açısı olan bağlantıdaki gerilmeler, açının artmasına bağlı olarak doğru orantılı bir şekilde artmaktadır. Bindirme açısının artması gerilme değerini yaklaşık %81 arttırmıştır. Yalnız bindirme açısı 30° den 45° ye çıktığında gerilmede %5 lik bir düşüş olmuştur. 75° açılı bağlantı modeli en fazla yükü taşımıştır. Hasar yükleri aynı yapışma alanında açının artmasıyla artmaktadır. En düşük hasar yükü 45° açıdaki bağlantıda çıkmıştır.

▲ Kompozitlerin oryantasyon açıları, gerilme değerlerini önemli derecede etkilediği söylenebilir. $[0^\circ/90^\circ]$ yerine $[\pm 45^\circ]$ lik kumaşlar kullanılması gerilme değerinde ortalama %10 artış göstermiştir. Çok yönlü kumaş $[0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ]$ kullanıldığında gerilme değeri ortalama %15 artış göstermiştir. Bu artış oranı küçük bindirme açılarında daha yüksek iken büyük bindirme açılarında daha azdır.

▲ Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıda malzeme kalınlığının bağlantı mukavemeti üzerine etkisinin olduğu, ancak bu etkinin önemli bir seviyede olmadığı anlaşılmaktadır.

▲ Malzeme kalınlığı arttıkça yapıştırılan alan artmış ve doğal olarak da taşınan yükte artmıştır. Alan ve basıncın kuvvetle doğru orantılı olduğundan dolayı, farklı yüzey alanlarına eşdeğer gerilme etki ettiğinden yüzey alanı arttıkça taşınan yük artmıştır.

▲ Malzeme kalınlığı 7 mm olan bağlantı tipi, kalınlığı ağırlık bakımından %44 daha az olan 5 mm bağlantı tipine göre yaklaşık % 40 daha fazla yük taşımıştır. Malzeme kalınlığı 5 mm olan bağlantı tipi, kalınlığı ağırlık bakımından %62 daha az olan 3 mm bağlantı tipine göre yaklaşık % 67 daha fazla yük taşımıştır. Ayrıca malzemenin kalınlığının artmasıyla, kayma gerilmelerinin bağlantının serbest uçlarında azaldığı da söylenebilir.

▲ Yapışma hattının her iki uç noktasında ($s/L=0$ ve $s/L=1$) oluşan gerilmelerdeki artışlar, tasarımda keskin köşelerin olmamasından kaynaklandığı; dolayısıyla gerilme yığılmalarını azalttığı söylenebilir.

▲ Ayrıca sünek karakterli yapıştırıcının kullanılması gerilme yığılmalarını azalttığı ve bağlantının mukavemetini artırdığı söylenebilir.

▲ Yapıştırıcı ara yüzeydeki (A'C') gerilme değerleri, yapıştırıcı normal yüzeydeki (AC) gerilme değerleriyle hemen hemen aynı çıkmıştır. Yapışma hattının her iki uç noktasında ($s/L=0$ ve $s/L=1$) oluşan gerilmelerde ani keskin sıçramalar yerine daha yumuşak geçişler görülmektedir. Bu hattın daha uniform bir gerilme dağılımına sahip olduğu söylenebilir.

▲ Bindirme açısının olmadığı (BC) hattının ($s/L=0$) noktasında oluşan kesme yükleri azalmakta iken; ($s/L=1$) noktasında kesme yükleri artmaktadır. Buna neden olarak ilgili alanda oluşan deformasyon direncinin olduğu söylenebilir.

Sonuç olarak, yapıştırma işleminin gerçekleştirildiği bölgede sünek ve gevrek karakterli yapıştırıcı kullanmak, cam takviyeli epoksi prepreglerin serim açılarını kullanmak, bindirme açıları kullanmak ve farklı malzeme kalınlıkları kullanmak; yapıştırma bağlantısında oluşan gerilme ve şekil değiştirme dağılımlarında değişimlere neden olur. Bu değişimler gerilme yığılmaları, bağlantının taşıyabildiği yük miktarı, uzun süreli performansı üzerinde çok büyük etkiye sahiptir ve yapıştırma bağlantılarının dayanımını artırır.

KAYNAKLAR

- [1] **Solmaz, M.Y. ve Turgut, A.**, 2009. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş basit bindirme bağlantılarında serbest uç açısı ve bindirme mesafesinin bağlantı mukavemeti üzerine etkisinin deneysel olarak araştırılması. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 21(2) 24-26.
- [2] **Turan K. ve Kaman M.O.**, 2010. Tek tesirli yapıştırma bağlantılarında ilerlemeli hasar analizi, Pamukkale Üniversitesi, *Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16, 3, 315-323.
- [3] **Adin H.**, 2012. The investigation of the effect of angle on the failure load and strength of scarf lap joints, *International Journal of Mechanical Sciences*, 61: 24-31.
- [4] **Adin H.**, 2012. The effect of angle on the strain of scarf lap joints subjected to tensile loads, *Applied Mathematical Modelling*, 36: 2858-2867.
- [5] **Ozel A., Aydın M.D., Temiz S.**, 2003. “The effects of overlap length and adherend thickness on the strength of adhesively bonded joints subjected to bending moment”, Ataturk Üniversitesi, Erzurum, 18 (3): 313-317.
- [6] **Kadioglu F., Es-Souni M.**, 2003. “Use of thin adherends in adhesively bonded joints under different loading modes”, *Maney for the Institute of Materials, Minerals And Mining*, 610: 1-5.
- [7] **Gunnion, A.J., and Herszberg, I.**, 2006. Parametric Study of Scarf Joints in composite Structures. *Composites Structures*, 75: 364-376.
- [8] **Yang, C., Huang, H., Tomblin, J.S., and Sun, W.**, 2004. Elastic-Plastic Model of Adhesive-Bonded Single Lap Composite Joints. *Journal of Composite Materials*, 38: 293-309.
- [9] **Adams, R. D. and Peppiatt, N. A.**, 1974. Stress analysis of adhesive-bonded lap joints. *Journal of Strain Analysis*, 9, 185-196.
- [10] **Guess, T.R., Allred, R.E. and Gerstle, F.P.**, 1977. Comparasion of lap shear test specimens, *Journal of Testing and Evaluation*, 5, 2, 84-95.
- [11] **Pandey, P.C., Shankaragouda, H. And Singh, Kr.A.**, 1999. Nonlinear analysis of adhesively bonded lap joints considering viscoplasticity in adhesives, *Computers and Structures*, 70, 387-413.

- [12] **Çalık A.**, 2008. Yapıştırıcılar ve köşeleri yuvarlatılmış basamaklı bindirme yapıştırıcı bağlantılarda gerilme analizi, *Yüksek Lisans Tezi*, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak.
- [13] **Kumar, S. and Pandey, P.C.**, 2010. Behavior of Bi-adhesive Joints. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 24- 1251–1281.
- [14] **Kinloch, A.J.** 1997. *Adhesives in Engineering*. Proc. Instn. Mech. Engrs., s307-335.
- [15] **Sawa, T., Liu, J., Nakano, K., Tanaka, J.**, 2000. A Two Dimensional Stress Analysis of Single Lap Adhesive Joints of Dissimilar Adherents Subjected to Tensile Loads, *J. of Adhesion Science and Technology*, 14, 43-66.
- [16] **Sawa, T., Higuchi, I., & Suga, H.**, 2002. Three-Dimensional Finite Element Analysis of Single-Lap Adhesive Joints Under Impact Loads, *J. of Adhesion Sci. Technology*, 16, 1585-1601.
- [17] **Romanos, G.**, 1999. Strength Evaluation of Axisymmetric Bonded Joints Using Anaerobic Adhesives. *Int. J. of Materials and Product Technology*, 14, 430-443.
- [18] **Pfeiffer, P., & Shakal, M.**, 1998. Effect of Bonded Metal Substrate Area and its Thickness on the Strength and Durability of Adhesively Bonded Joints, *J. Of Adhesion Sci. Technology*, 12, 339-348.
- [19] **Ciba**, 1999. Ciba User's Guide to Adhesive, Surface Preparation and Pretreatment. *Ciba Specialty Chemicals*, Switzerland.
- [20] **Volkersen, O.**, 1938. Die Nietkraftverteilung in zugbeanspruchten Nietverbindungen mit konstanten Laschenquerschnitten, *Luftfahrtforschung*, vol 15, 41-47.
- [21] **Taib, A., Boukhili, R., Achiou, S. ve Bouheili, H.**, 2006. Bonded joints with composite adherends; part 2 finite element analysis of joggle lap joints. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 26 237-248.
- [22] **Mazumdar, S.K. ve Mallick, P.K.**, 1998. Static and fatigue behaviour of adhesive joints in SMC-SMC composites. *Polimer Composites*, 19(2) 139-146.
- [23] **Ojalvo, I. U., Idinoff, H. L.**, 1978. Bond thickness upon stresses in single-lap adhesive joints, *AIAA Journal*, 16, 3, 204-211.
- [24] **Sayman, O.**, 2012. Elasto-Plastic Stress Analysis in an Adhesively Bonded Single-Lap Joint, *Composites Part B*, 43(2), 204-209.

- [25] **He, X.**, 2011. FEA of Stress Behavior in the Single-Lap Adhesive Joint. *International Conference on Advanced Materials and Computer Science*, Chengdu.
- [26] **Akpınar, S. and Aydın, M.D.**, 2014. 3-D Non-Linear Stress Analysis on the Adhesively Bonded Composite Joint Under Bending Moment. *International Journal of Mechanical Science*, 81,149-157.
- [27] **Temiz, S.**, 2006. Application of Bi-Adhesive in Double-Strap Joints Subjected to Bending Moment. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 20(14),1547–1560.
- [28] **Özel, A., Temiz, S. and Aydın, M.D.**, 2005. Effect of Overlap Length on Durability of Joints Bonded With a Pressure-Sensitive Adhesive. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 19 (1), 57–71.
- [29] **Reis, P.N.B., Ferreira, J.A.M., Antunes, F.**, 2011. Effect of Adherend's Rigidity on the Shear Strength of Single Lap Adhesive Joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 31, 193-201.
- [30] **Özel, A., Yazıcı, B., Akpınar, S., Aydın, M.D. and Temiz, S.**, 2014. A Study on the Strength of Adhesively Bonded Joints With Different Adherends. *Composites Part B*, 62,167-174.
- [31] **Pinto, A.M.G., Campilho, R.D.S.G., Mendes, I.R., Baptista, A.P.M.**, 2004. Numerical and Experimental Analysis of Balanced and Unbalanced Adhesive Single-Lap Joints Between Aluminium Adherends. *Journal of Adhesion*, 90: 89-103.
- [32] **Gültekin, K.**, 2014. Yapıştırıcıyla Birleştirilmiş Bağlantılarda Malzeme Genişliğinin ve Kalınlığının Bağlantının Yük Taşıma Kapasitesine Etkisi. *Y.Lisans Tezi*, Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi.
- [33] **Sawa, T. and Uchida, H.**, 1997. A Two Dimensional Stress Analysis and Strength Evaluation of Hand Adhesive Butt Joints Subjected to Tensile Loads, *J. Of Adhesion Science and Technology.*, 11: 811-833.
- [34] **Neto, J., Campilho, R., da Silva L.**, 2012. Parametric study of adhesive joints with composites , *J. Of Adhesion Science and Technology.*, 37: 96-101.
- [35] **Magalhaes, A., de Moura, m., da Gonçalves j.**, 2005. Evaluation of stress concentration effects in single-lapbonded joints of laminate composite materials , *J. Of Adhesion Science and Technology.*, 25: 313-319.
- [36] **Akpınar S.**, 2014. The strength of the adhesively bonded step-lap joints for different step numbers, *Composites: Part B.*, 67:170–178.

- [37] **Li G. vd.**, 2001. Finite element and experimental studies on single-lap balanced joints in tension , *J. Of Adhesion Science and Technology.*, 21: 211-220.
- [38] **Kishore N. vd.**, 2012. An experimental study of Flat-Joggle-Flat bonded joints in composite laminates , *J. Of Adhesion Science and Technology.*, 35: 55-58.
- [39] **Lee M. vd.**, 2013. Effects of adherend thickness and taper on adhesive bond strength measured by portable pull-off tests , *J. Of Adhesion Science and Technology.*, 44: 259-268.
- [40] **Afendi M. vd.**, 2013. Strength prediction and reliability of brittle epoxy adhesively bonded dissimilar joint , *J. Of Adhesion Science and Technology.*, 45: 21-31.
- [41] **Afendi M. vd.**, 2011. Strength prediction of epoxy adhesively bonded scarf joints of dissimilar adherends , *J. Of Adhesion Science and Technology.*, 31: 402-411.
- [42] **Topal, U.**, 2008. Optimization of laminated composite plates using modified feasible direction method. *Doktora Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, Türkiye.
- [43] **Altan, G.**, (2004) Kompozit Disklerde Termal Gerilme Analizi. *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Denizli.
- [44] **Ural T.**, 2009. Silindirik Kapların Burkulma Analizi. *Doktora Tezi*, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- [45] **Kazanç, V.**, 2002. Kompozit malzemeler ve mekanik özellikleri, Süleyman Demirel Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, *Bitirme Ödevi*, Isparta
- [46] **Kayrak, M. A.**, 1999. Havacılık Kompozitleri ve Mukavemet-Maliyet Analizleri, Eskişehir. 1-30.
- [47] **Mallick P.K.**, 1993. "Fiber Reinforced Composites Materials, Manufacturing, and Design." Second Edition. Marcel Dekker, New York, USA.
- [48] **Autor, K.**, 2006. *Mechanics of Composite Materials*, Taylor and Francis Group, 38- 54.
- [49] **Chawla, K. K.**, 1987. Composite Materials Science and Engineering, *Springer Verlag Newyork Inc.*, 140-283.
- [50] **Rouchan, J.**, 1987. Matériaux composites pour d'aéronefs, Ecole Nationale Supérieure d'Ingenieurs de Constructions Aeronautiques. 95.
- [51] **Anonim**, 1984. A.S.M. International, Composite materials I the basics, Materials Engineering Institute. 10-15s Ohio.

- [52] **Staab, G. H.**, 1999. Laminar composites, US: Butterworth-Heinemann.
- [53] **Jones, R. M.**, 1999. Mechanics of composite materials, Taylor & Francis Inc., PA.
- [54] **Ünal, O.**, 2004. Yapı malzemesi ders notları.
- [55] **Akbulut, H.**, 2010. Kompozit Malzemelere Giriş Bölüm 1. Atatürk Üniversitesi, Erzurum, Türkiye.
- [56] **Yılmaz, M. ve Sayman, O.**, 2005. Kompozit basınçlı tüpte gerilme analizi, D. E.Ü. Mühendislik Fakültesi, Makine Müh. Bölümü, İzmir.
- [60] **Arıcasoy, O.**, 2006. İstanbul Ticaret Odası - Kompozit sektör raporu.
- [62] **ASTM D1002**, 1983. Standard test method for strength properties of adhesives in shear by tension loading. Philadelphia.
- [63] **Adams, R. D., and Wake, W. C.**, 1984. Structural adhesive joint in engineering, Elsevier Science Publisher, London.
- [64] **Kinloch, A.J.**, 1987. Adhesion and adhesive science and technology. First Edition Chapman and Hall.
- [66] **Parvatareddy, H.**,1997. Durability of polyimide adhesives and their bonded joints for high temperature applications, *Ph.D.These*, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.
- [67] **Loctite European Group**, 1997. Loctite Worldwide Design Handbook, Loctite Corporation, Hartford.
- [68] **TS EN ISO 10365/Nisan**, 2001. Yapıştırıcılar-Başlıca kusurların gösterilmesi, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [69] **Temiz, S.**, 2003. Yapıştırma Bağlantılarının Mekanik Özellikleri Üzerine Çevresel Faktörlerin Etkisinin İncelenmesi. *Doktora Tezi*, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- [70] **McBain, J.W. and Hopkins, D.G.**, 1925. *Journal of Physical Chemistry*,29,188.
- [71] **Venables, J. D., McNamara, D. K., Chen, J.M., Sun, T. S., and Hopping, R.L.**, 1979. *Applied Surface Science*, 3,88.
- [72] **Jennings, C.W.**, 1972. *Journal of Adhesion*, 4,25.
- [73] **Sharpe, L.H.,and Schonhorn , H.**, 1963. *Chemical Engineering News*,15,67.
- [74] **Voyutskii, S.S.**, 1963.Autohesion and Adhesion of High Polymers,Wiley-Interscience, New York.
- [75] **Edwards, K.L.**, 1998. A brief insight into the selection and use of engineering adhesives for preliminary joint design. *Materials and Design*, 19, 121-123.

- [76] **Kayacan, R.**, 1988. Yapıştırma ve metal bağlantılar için yapıştırıcı kullanımı. *Yüksek Lisan Tezi*, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [77] **Brandon, D. ve Kaplan, W.D.**, 1997. Joining processes. John Wiley and Sons, Chichester, England.
- [78] **Kodakoğlu L.**, 1996. Yapıştırıcıların Genel Özellikleri ve Çekme Gerilmesine Maruz Yapışma Birleşmesinin Analitik ve 333 Olarak İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Uçak Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul Türkiye.
- [79] **Yarrington, P., Zhang, J., Collier, C. ve Bednarczyk, B.A.**, 2005. Failure analysis of adhesively bonded composite joints, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1-23.
- [80] **Özenç, M.**, 2007. Yapıştırma bağlantılarının darbe yükleri altındaki davranışlarının incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
- [81] **Jeandrau, J.P.**, 1991. Analysis and Design Data for Adhesively Bonded Joints. *Int.J.Adhesion and Adhesives*, 11(2), 71-79.
- [82] **Demirgen, T.**, 2007. Metal Yapıştırma Bağlantı Performansının Bilgisayar Destekli Modelleme ile İncelenmesi, *Yüksek Lisan Tezi*, Sakarya Üniversitesi, Sakarya.
- [83] **ASTM D 3039/D 3039M-00**, 1990. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- [84] **Adin H.**, 2007. Yapıştırıcı ile Birleştirilmiş Ters Z Tipi Kompozit Malzeme Bağlantılarının Mekanik Analizi, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [85] **Aydın, M.D.**, 2003. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantısının mekanik özelliklerinin deneysel ve teorik incelenmesi. *Doktora Tezi*, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- [86] **Gür, M. ve Turgut, A.**, 1994. Statik Sürtünmeli Temas Problemlerinin Sonlu Elemanlar Metoduyla Çözümü, Tr. *Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 18, 119-125.

- [87] **Turgut, A., Arslan N., Kaman M.O.**, 2000. Düzlem Kafes Sistemlerinin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Analizi, *Fırat Üniv. Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12, 209-217.
- [88] **Gür, M., Turgut, A., ve Sancaktar, E.**, 1995. The effect of fiber type on the level of stress concentration created in filleted composite rectangular bars in bending, *International mechanical Engineering Congress and Exposition*, ASME, 49-55.
- [89] **Solmaz M. Y.**, 2008. Yapıştırıcı İle Birleştirilmiş Bağlantıların Mekanik Analiz ve Tasarımları, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [90] **Palancıoğlu, H., Sen, F., Aldaş, K.**, 2008. Yapıştırma bağlantıları ve uygulama usulleri, *Makine Tek Dergisi, Bileşim Yayıncılık*, İstanbul, 123, 38-42.
- [91] **Razmi A.**, 2011. Kompozit Parçaların Çeşitli Yapıştırırmalı Bağlantı Tasarımlarının Karşılaştırılması, *Yüksek lisans Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [92] **Baldan A.**, 2012. Adhesion phenomena in bonded joints, *J. Of Adhesion Science and Technology*, 38: 95-116.
- [93] **ANSYS**, Release 14.5 Documentation, Swanson Analysis System Inc., Houston, PA, USA.
- [94] **Akpınar, S.**, 2012. Yapıştırıcıyla Birleştirilmiş T-Bağlantılarda Üç Boyutlu Gerilme Analizi. *Doktora Tezi*. Erzurum Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Erzurum.

İnternet Kaynakları:

- [57] www.allstar.fiu.edu/aero/f22raptor.html FF-22 savaş uçağı resmi. 2012.
- [58] www.sldinfo.com/the-role-of-the-eurofighter Eurofighter savaş uçağı resmi. 2012.
- [59] www.seattlepi.com/dayart/20070629/787materials.gif Composite Materials. 2012.
- [61] www.turkcadcam.net/rapor/kompozit-malzemeler/index.html Kompozit malzemeden yapılmış otomobil ön paneli. 01.05.2008.
- [65] www.uted.org/dergi/2005/aralik/aralik_10.htm Uçak Teknisyenleri Derneği. 2005.
- [95] www.astm.org/Standards/D1002.htm ASTM. 2012.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı:	Bahadır BİRECİKLİ
Doğum tarihi:	1982
Doğum yeri:	Diyarbakır
Lise:	1997–2000 Batman Anadolu Lisesi
Lisans (BsC):	2000–2005 Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans (MsC):	2005–2008 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Müh. Anabilim Dalı, Isı Proses Programı
Doktora (PhD):	2011–2016 Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Müh. Bölümü Mekanik Programı

Çalıştığı kurumlar

2005–2008	Yıldız Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi Makina Mühendisliği Termodinamik ve Isı Proses A.B.D. Araştırma Görevlisi
2008–2009	Aygaz A.Ş. Güneydoğu Anadolu Bölgesi Saha Yöneticisi
2010–	Batman Üniversitesi Batman Meslek Yüksek Okulu Elektrik ve Enerji Bölümü İklimlendirme ve Soğutma Teknolojisi Programı Öğretim Görevlisi