

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

**İÇ BASINCA MARUZ TABAKALI KOMPOZİT BORULARIN FARKLI  
BİRLEŞTİRME YÖNTEMLERİ İLE YAPIŞTIRILMASI VE GERİLME  
ANALİZİ**

**İSMAİL YASİN SÜLÜ**

**DOKTORA TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**KASIM 2014**



## **ONUR SÖZÜ**

Doktora Tezi olarak sunduğum “İç Basınca Maruz Tabakalı Kompozit Boruların Farklı Birleřtirme Yöntemleri İle Yapıştırılması ve Gerilme Analizi” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı dűşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığını ve yararlandığım bütün kaynakların, hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

İSMAİL YASİN SÜLÜ

## ÖZET

Doktora Tezi

### İÇ BASINCA MARUZ TABAKALI KOMPOZİT BORULARIN FARKLI BİRLEŞTİRME YÖNTEMLERİ İLE YAPIŞTIRILMASI VE GERİLME ANALİZİ

İsmail Yasin SÜLÜ

İnönü Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

175 + xxi sayfa

2014

Danışman: Prof. Dr. Şemsettin TEMİZ

Bu çalışmada, iç basınca maruz farklı yapıştırıcılar (DP 410 ve DP 490) ve yapıştırma bağlantı türleri ile birleştirilen tabakalı kompozit boruların gerilme analizleri yapılarak, uygun parametrelerin araştırılması amaçlanmıştır. Tabakalı kompozit borular, farklı özelliklere sahip en az iki tabakanın kombinasyonundan oluşur. Çok değişik kombinasyonlarla tabakalanmış kompozit boruların üretimi mümkündür. Bu boruların farklı yama bağlantı türleri ile yapıştırılarak birleştirilmesi, geleneksel birleştirme yöntemlerine göre birçok avantaja sahiptir. Bu sebepten, tabakalı kompozit boruların farklı bağlantı metotları ile birleştirilmesi ve bu bağlantı türlerinin hangisinin daha dayanıklı ve uzun ömürlü bir bağlantı sağladığının araştırılması yapılmıştır. Farklı birleştirme durumlarında, boru kalınlığının, bindirme uzunluğunun, yama malzemesinin, kompozit tabaka sayısının, oryantasyon açılarının bağlantı dayanımına etkileri deneysel testlerle ve nümerik analizlerle belirlenmesi çalışılmıştır.

ANAHTAR KELİMELER: Kompozit borular, Yapıştırıcı, Gerilme analizi, İç basınç, Hasar analizi, Tabakalı kompozitler

## **ABSTRACT**

Ph.D. Thesis

### **STRESS ANALYSIS AND BONDING WITH DIFFERENT JOINING METHODS OF LAYER COMPOSITE PIPES SUBJECTED TO INTERNAL PRESSURE**

İsmail Yasin SÜLÜ

İnönü University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Mechanical Engineering

175 + xxi pages

2014

Supervisor: Prof. Dr. Şemsettin TEMİZ

In this study, it is aimed that stresses analysis of multi-layered composite pipes subject to internal pressure are adhesives (DP 410 and DP 490) and adhesively bonded with different methods, and the appropriate parameters are determined for these cases. The composite pipes occur from layers with different orientation. The composite pipes can be produced by using different orientation. According to the conventional joining methods, this pipes bonded with different joint methods have a lot of advantages. In this reason, multi-layered composite pipes adhesively bonded with different joint methods and the joint methods were examined about long service life and durability. In different joining situations, effects of the thickness of pipe, the overlap length, the patch material, the composite layer number, the orientation angles are investigated for joining strength by experimental tests and numerical analysis.

**KEYWORDS:** Composite pipes, Adhesive, Stress analysis, Internal pressure, Failure analysis, Laminated Composites

## TEŞEKKÜR

Çalıőmalarımın her safhasında önerilerini ve yardımını eksik etmeyen, bilgisinden ve tecrübelerinden her zaman yararlandığım çok değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. şemsettin TEMİZ'e, benden desteklerini ve bilgilerini esirgemeyen tez izleme komitesi üyeleri Sayın Yrd. Doç. Dr. Yaőar AYZ ve Yrd. Doç. Dr. Eray ARSLAN'a, Makine Mühendisliği Bölüm başkanı Prof. Dr. Mehmet YILMAZ'a, bölüm hocam Yrd. Doç. Dr. A. Muttalip őAHİNASLAN'a ve bir birinden değerli bölüm hocalarıma teşekkür ederim.

Desteklerini, güvenlerini benden hiçbir zaman esirgemeyen, bana olan inançlarından bir an olsun őüphe duymayan ve őuana kadar geldiğim her basamakta her zaman yanımda olan, evlatlık borcumun yanında minnet ve vefa borcum olan aileme sonsuz őükranlarımı sunarım.

**İsmail Yasin SÜLÜ**

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xix
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xxi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Kompozit Malzemelerin Mekanikliği.....	3
1.2. Kompozit Malzemeler için Hasar Kriterleri.....	5
1.2.1. Maksimum gerilme teorisi.....	6
1.2.2. Mukavemet oranı.....	6
1.2.3. Maksimum şekil değiştirme teorisi.....	7
1.2.4. Tsai–Hill hasar teorisi.....	7
1.2.5. Tsai–Wu hasar teorisi.....	8
1.2.6. Hashin hasar teorisi.....	9
2. KAYNAK ÖZETLERİ.....	10
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	20
3.1. Kapsam ve İçerik.....	20
3.2. Çalışmalarda Kullanılan Yapısal Yapıştırıcı Malzemeler.....	25
3.3. Çalışmalarda Kullanılan Kompozit Malzemeler.....	25
3.4. Çalışmalarda Kullanılan Temel Parametreler.....	26
3.5. Deneysel Test Düzenekleri.....	27
3.6. Sonlu Elemanlar Yöntemi.....	29
3.6.1. Sonlu elemanlar modeli.....	35
3.7. Deneysel ve Nümerik Çalışmalar.....	36
4. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	43
4.1. Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin Tespiti.....	43
4.2. Yapıştırıcı Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin Tespiti.....	47
4.3. Deneysel Çalışmalar.....	50
4.3.1. Kompozit boruların deneysel çalışması.....	50
4.3.2. Alın alına yapıştırılarak birleştirilen kompozit boruların deneysel çalışması.....	52
4.3.3. Yama kullanılarak birleştirilen kompozit boruların deneysel çalışması.....	56
4.3.4. Kademeli olarak birleştirilen kompozit boruların deneysel çalışması.....	64
4.4. Nümerik Çalışmalar.....	72
4.4.1. Kompozit boruların nümerik sonuçları.....	76
4.4.1.1. İç basınç altında kompozit boruların nümerik sonuçları.....	76
4.4.2. Alın alına yapıştırılan kompozit boruların nümerik sonuçları.....	83
4.4.2.1. İç basınç altında DP 490 yapıştırıcı ile alın alına yapıştırılan kompozit boruların nümerik sonuçları.....	84
4.4.2.2. İç basınç altında DP 410 yapıştırıcı ile alın alına yapıştırılan kompozit boruların nümerik sonuçları.....	91
4.4.3. Yama kullanılarak yapıştırılan kompozit boruların nümerik sonuçları.....	98

4.4.3.1.	İç basınç altında DP 410 yapıştırıcı ile yama kullanılarak yapıştırılan kompozit boruların nümerik sonuçları.....	101
4.4.3.2.	İç basınç altında DP 490 yapıştırıcı ile yama kullanılarak yapıştırılan kompozit boruların nümerik sonuçları.....	115
4.4.3.3.	Bindirme uzunluğunun yama kullanılarak yapıştırılan kompozit borular üzerinde etkisi.....	130
4.4.4.	Kademeli olarak yapıştırılan kompozit boruların nümerik sonuçları.....	132
4.4.4.1.	İç basınç altında DP 410 yapıştırıcı kullanılarak kademeli olarak yapıştırılan kompozit boruların nümerik sonuçları.....	135
4.4.4.2.	İç basınç altında DP 490 yapıştırıcı kullanılarak kademeli olarak yapıştırılan kompozit boruların nümerik sonuçları.....	149
4.4.4.3.	Bindirme uzunluğunun kademeli olarak yapıştırılan kompozit borular üzerinde etkisi.....	163
5.	TARTIŞMA VE SONUÇ.....	165
	KAYNAKLAR.....	168
	ÖZGEÇMİŞ.....	174



## ŞEKİL DİZİNİ

Şekil 1.1.	Tabakalarda kullanılan eksen takımları [12-14].....	4
Şekil 3.1.	Tabakalı kompozit boru (a), (b), (c).....	21
Şekil 3.2.	Tabakalı kompozit boruların yapıştırıcı malzemelerle alın alına yapıştırılması (a), (b), (c) .....	22
Şekil 3.3.	Tabakalı kompozit boruların gömme kompozit yamalarla yapıştırıcı malzemeleri kullanarak yapıştırıcı malzemelerle birleştirilmesi (a), (b), (c).....	23
Şekil 3.4.	Tabakalı kompozit boruların yapıştırıcı malzemeleri kullanarak kademeli olarak birleştirilmesi (a), (b), (c).....	24
Şekil 3.5.	İç basınca maruz bırakılarak boru patlatma test ünitesi.....	28
Şekil 3.6.	Patlatma ünitesinde kullanılan yardımcı aparatlar.....	28
Şekil 3.7.	Üç boyutlu gerilme durumu.....	30
Şekil 3.8.	Kompozit borunun alın alına birleştirme yöntemindeki sonlu elemanlar modeli.....	36
Şekil 3.9.	Deneysel çalışmalar için hazırlanmış 4 tabakalı kompozit boruların yapıştırıcı malzemeleri kullanarak birleştirilmesi.....	37
Şekil 3.10.	Standartlara göre numune ölçülerinin gösterimi [86-87]; (a) ASTM D3039-76, (b) ASTM D3410, (c) ASTM D7078 [87], (d) ISO 527-2 [88].....	38
Şekil 3.11.	ASTM D3410 standardına göre hazırlanmış 90 <sup>0</sup> elyaf yönlü basma numuneleri, (a) 4 tabaka, (b) 6 tabaka, (c) 8 tabaka.....	39
Şekil 3.12.	ASTM D3410 standardına göre hazırlanmış 0 <sup>0</sup> elyaf yönlü basma numuneleri, (a) 4 tabaka, (b) 6 tabaka, (c) 8 tabaka.....	39
Şekil 3.13.	ASTM D3039-76 standardına göre hazırlanmış 0 <sup>0</sup> elyaf yönlü çekme numuneleri, (a) 4 tabaka, (b) 6 tabaka, (c) 8 tabaka.....	39
Şekil 3.14.	ASTM D3039-76 standardına göre hazırlanmış 90 <sup>0</sup> elyaf yönlü çekme numuneleri, (a) 4 tabaka, (b) 6 tabaka, (c) 8 tabaka.....	40
Şekil 3.15.	ASTM D7078 standardına göre hazırlanmış 0 <sup>0</sup> elyaf yönlü 4 tabakalı, 6 tabakalı ve 8 tabakalı kayma numuneleri.....	40
Şekil 3.16.	ASTM D7078 standardına göre hazırlanmış 90 <sup>0</sup> elyaf yönlü 4 tabakalı, 6 tabakalı ve 8 tabakalı kayma numuneleri.....	40
Şekil 3.17.	Yapıştırıcı malzemelerin bulk model olarak dökümünün yapıldığı kalıp üretimi.....	41
Şekil 3.18.	DP 410 yapısal yapıştırıcı malzemelerin ISO 527-2 standardına uygun bulk model olarak dökülmüş numuneleri.....	41
Şekil 3.19.	DP 490 yapısal yapıştırıcı malzemelerin ISO 527-2 standardına uygun bulk model olarak dökülmüş numuneleri.....	42
Şekil 3.20.	Çeki-bası testlerinin yapıldığı Shimadzu marka test cihazı.....	42
Şekil 4.1.	0 <sup>0</sup> elyaf doğrultulu 8 tabakalı kompozit çekme numunesinin çekme testi sonrası görünümü.....	43
Şekil 4.2.	90 <sup>0</sup> elyaf doğrultulu 4 tabakalı kompozit çekme numunesinin çekme testi sonrası görünümü.....	44
Şekil 4.3.	0 <sup>0</sup> elyaf doğrultulu 4 tabakalı kompozit basma numunesinin basma testi sonrası görünümü.....	45
Şekil 4.4.	90 <sup>0</sup> elyaf doğrultulu 4 tabakalı kompozit basma numunesinin basma testi sonrası görünümü.....	45
Şekil 4.5.	0 <sup>0</sup> elyaf doğrultulu 4 tabakalı kompozit kayma numunesinin	

	kayma testinin adım adım görünümü.....	45
Şekil 4.6.	90 <sup>0</sup> elyaf doğrultulu 8 tabakalı kompozit kayma numunesinin kayma testinin adım adım görünümü.....	46
Şekil 4.7.	(a) 0 <sup>0</sup> ve (b) 90 <sup>0</sup> elyaf doğrultulu 4 tabakalı kompozit numunelerinin poisson oranı tespiti.....	46
Şekil 4.8.	0 <sup>0</sup> elyaf doğrultulu 4 tabakalı kompozit numunelerinin kayma modülü tespiti.....	46
Şekil 4.9.	90 <sup>0</sup> elyaf doğrultulu 4 tabakalı kompozit numunelerinin kayma modülü tespiti.....	47
Şekil 4.10.	DP 410 yapısal yapıştırıcı bulk modelin çekme testi sonrası görünüm.....	48
Şekil 4.11.	DP 490 yapısal yapıştırıcı bulk modelin çekme testi sonrası görünümü.....	48
Şekil 4.12.	DP 490 yapısal yapıştırıcı bulk modelin poisson oranı tespiti.....	49
Şekil 4.13.	Yapıştırıcıların gerilme-şekil değiştirme grafikleri: (a) DP 490; (b) DP 410.....	49
Şekil 4.14.	45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar deneyleri.....	51
Şekil 4.15.	55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup> oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar deneyleri.....	52
Şekil 4.16.	55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar deneyleri.....	52
Şekil 4.17.	DP 410 yapıştırıcı ile alın alına birleştirilmiş 45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları....	54
Şekil 4.18.	DP 490 yapıştırıcı ile alın alına birleştirilmiş 45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları....	54
Şekil 4.19.	DP 410 türü yapıştırıcı ile alın alına birleştirilmiş 55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları.....	54
Şekil 4.20.	DP 490 türü yapıştırıcı ile alın alına birleştirilmiş 55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları.....	55
Şekil 4.21.	DP 410 türü yapıştırıcı ile alın alına birleştirilmiş 55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları.....	55
Şekil 4.22.	DP 490 türü yapıştırıcı ile alın alına birleştirilmiş 55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları.....	55
Şekil 4.23.	DP 410 yapıştırıcı ile 20 mm yama kullanılarak yapıştırılan 45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları.....	58
Şekil 4.24.	DP 490 yapıştırıcı ile 20 mm yama kullanılarak yapıştırılan 45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları.....	58
Şekil 4.25.	DP 410 yapıştırıcı ile 30 mm yama kullanılarak yapıştırılan 45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları.....	58
Şekil 4.26.	DP 490 yapıştırıcı ile 30 mm yama kullanılarak yapıştırılan 45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları.....	59

Şekil 4.27.	DP 410 yapıştırıcı ile 40 mm yama kullanılarak yapıştırılan 45 <sup>0</sup> / 45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları.....	59
Şekil 4.28.	DP 490 yapıştırıcı ile 40 mm yama kullanılarak yapıştırılan 45 <sup>0</sup> / 45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları.....	59
Şekil 4.29.	DP 410 yapıştırıcı ile 20 mm yama kullanılarak yapıştırılan 55 <sup>0</sup> / 55 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup> oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları.....	60
Şekil 4.30.	DP 490 yapıştırıcı ile 20 mm yama kullanılarak yapıştırılan 55 <sup>0</sup> / 55 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup> oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları.....	60
Şekil 4.31.	DP 410 yapıştırıcı ile 30 mm yama kullanılarak yapıştırılan 55 <sup>0</sup> / 55 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup> oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları.....	60
Şekil 4.32.	DP 490 yapıştırıcı ile 30 mm yama kullanılarak yapıştırılan 55 <sup>0</sup> / 55 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup> oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları.....	61
Şekil 4.33.	DP 410 yapıştırıcı ile 40 mm yama kullanılarak yapıştırılan 55 <sup>0</sup> / 55 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup> oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları.....	61
Şekil 4.34.	DP 490 yapıştırıcı ile 40 mm yama kullanılarak yapıştırılan 55 <sup>0</sup> / 55 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup> oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları.....	61
Şekil 4.35.	DP 410 yapıştırıcı ile 20 mm yama kullanılarak yapıştırılan 55 <sup>0</sup> / 55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları.....	62
Şekil 4.36.	DP 490 yapıştırıcı ile 20 mm yama kullanılarak yapıştırılan 55 <sup>0</sup> / 55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları.....	62
Şekil 4.37.	DP 410 yapıştırıcı ile 30 mm yama kullanılarak yapıştırılan 55 <sup>0</sup> / 55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları.....	62
Şekil 4.38.	DP 490 yapıştırıcı ile 30 mm yama kullanılarak yapıştırılan 55 <sup>0</sup> / 55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları.....	63
Şekil 4.39.	DP 410 yapıştırıcı ile 40 mm yama kullanılarak yapıştırılan 55 <sup>0</sup> / 55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları.....	63
Şekil 4.40.	DP 490 yapıştırıcı ile 40 mm yama kullanılarak yapıştırılan 55 <sup>0</sup> / 55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları.....	63
Şekil 4.41.	DP 410 yapıştırıcı ile 10 mm bindirme uzunluğunda kademeli olarak yapıştırılan 45 <sup>0</sup> / 45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları.....	66
Şekil 4.42.	DP 490 yapıştırıcı ile 10 mm bindirme uzunluğunda kademeli olarak yapıştırılan 45 <sup>0</sup> / 45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları.....	66
Şekil 4.43.	DP 410 yapıştırıcı ile 15 mm bindirme uzunluğunda kademeli olarak yapıştırılan 45 <sup>0</sup> / 45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> oryantasyon açılı tabakalı	

	kompozit boruların hasar durumları.....	66
Şekil 4.44.	DP 490 yapıştırıcı ile 15 mm bindirme uzunluğunda kademeli olarak yapıştırılan 45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları.....	67
Şekil 4.45.	DP 410 yapıştırıcı ile 20 mm bindirme uzunluğunda kademeli olarak yapıştırılan 45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları.....	67
Şekil 4.46.	DP 490 yapıştırıcı ile 20 mm bindirme uzunluğunda kademeli olarak yapıştırılan 45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları.....	67
Şekil 4.47.	DP 410 yapıştırıcı ile 10 mm bindirme uzunluğunda kademeli olarak yapıştırılan 55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup> oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları.....	68
Şekil 4.48.	DP 490 yapıştırıcı ile 10 mm bindirme uzunluğunda kademeli olarak yapıştırılan 55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup> oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları.....	68
Şekil 4.49.	DP 410 yapıştırıcı ile 15 mm bindirme uzunluğunda kademeli olarak yapıştırılan 55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup> oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları.....	68
Şekil 4.50.	DP 490 yapıştırıcı ile 15 mm bindirme uzunluğunda kademeli olarak yapıştırılan 55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup> oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları.....	69
Şekil 4.51.	DP 410 yapıştırıcı ile 20 mm bindirme uzunluğunda kademeli olarak yapıştırılan 55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup> oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları.....	69
Şekil 4.52.	DP 490 yapıştırıcı ile 20 mm bindirme uzunluğunda kademeli olarak yapıştırılan 55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup> oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları.....	69
Şekil 4.53.	DP 410 yapıştırıcı ile 10 mm bindirme uzunluğunda kademeli olarak yapıştırılan 55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları.....	70
Şekil 4.54.	DP 490 yapıştırıcı ile 10 mm bindirme uzunluğunda kademeli olarak yapıştırılan 55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları.....	70
Şekil 4.55.	DP 410 yapıştırıcı ile 15 mm bindirme uzunluğunda kademeli olarak yapıştırılan 55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları.....	70
Şekil 4.56.	DP 490 yapıştırıcı ile 15 mm bindirme uzunluğunda kademeli olarak yapıştırılan 55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları.....	71
Şekil 4.57.	DP 410 yapıştırıcı ile 20 mm bindirme uzunluğunda kademeli olarak yapıştırılan 55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları.....	71
Şekil 4.58.	DP 490 yapıştırıcı ile 20 mm bindirme uzunluğunda kademeli olarak yapıştırılan 55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları.....	71
Şekil 4.59.	Nümerik ve deneysel hasar iç basınçlarının karşılaştırılması; (a) kompozit boru, (b) alın altına birleştirme (DP 410), (c) yama ile birleştirme (DP 410), (d) kademeli olarak birleştirme (DP 410)...	74
Şekil 4.60.	Nümerik ve deneysel hasar iç basınçlarının karşılaştırılması; (a)	

	alın altına birleştirme (DP 490), (b) yama ile birleştirme (DP 490), (c) kademeli olarak birleştirme (DP 490).....	75
Şekil 4.61.	45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> oryantasyon açılı 4 tabakalı kompozit boruların kayma gerilmelerinin karşılaştırılması (7.8 MPa).....	78
Şekil 4.62.	Farklı oryantasyon açılı 4 tabakalı kompozit boruların; (a) radyal, (b) teğetsel, (c) eksenel ve (d) kayma gerilmelerinin karşılaştırılması (45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> için 7.8 MPa, 55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup> için 7.7 MPa, 55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> için 9.5 MPa).....	79
Şekil 4.63.	Farklı oryantasyon açılı 4 tabakalı kompozit boruların tabakalarında oluşan; (a) dairesel, (b) kayma ve (c) eksenel gerilmelerinin karşılaştırılması (45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> için 7.8 MPa, 55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup> için 7.7 MPa, 55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> için 9.5 MPa)...	80
Şekil 4.64.	Farklı oryantasyon açılı 6 tabakalı kompozit boruların; (a) radyal, (b) teğetsel, (c) eksenel ve (d) kayma gerilmelerinin karşılaştırılması (45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> için 11.5 MPa, 55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup> için 11.5 MPa, 55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> için 14 MPa).....	81
Şekil 4.65.	Farklı oryantasyon açılı 8 tabakalı kompozit boruların; (a) radyal, (b) teğetsel, (c) eksenel ve (d) kayma gerilmelerinin karşılaştırılması (45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> için 15 MPa, 55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup> için 15 MPa, 55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> için 17.5 MPa).....	82
Şekil 4.66.	Yapıştırıcı ile alın altına birleştirme durumunda gerilme ölçüm hattı.....	83
Şekil 4.67.	45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> oryantasyon açılı 4 tabakalı kompozit boruların alın altına birleştirmede kullanılan DP 490 yapıştırıcının A-B gerilme hattı üzerindeki kayma gerilmelerinin karşılaştırılması (5.85 MPa).....	85
Şekil 4.68.	Farklı oryantasyon açılı 4 tabakalı kompozit boruların alın altına birleştirmede kullanılan DP 490 yapıştırıcının A-B gerilme hattı üzerindeki; (a) radyal, (b) teğetsel, (c) eksenel ve (d) kayma gerilmelerinin karşılaştırılması (45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> için 5.85 MPa, 55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup> için 5.2 MPa, 55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> için 6.8 MPa)...	86
Şekil 4.69.	Farklı oryantasyon açılı 4 tabakalı kompozit boruların alın altına birleştirmede kullanılan DP 490 yapıştırıcının A-B gerilme hattı üzerindeki; (a) kayma, (b) Von-Mises gerilmelerinin karşılaştırılması (45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> için 5.85 MPa, 55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup> için 5.2 MPa, 55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> için 6.8 MPa).....	87
Şekil 4.70.	DP 490 yapıştırıcı kullanarak alın altına birleştirilen farklı oryantasyon açılı 4 tabakalı kompozit boruların A-B gerilme hattı üzerindeki; (a) radyal, (b) teğetsel, (c) eksenel ve (d) kayma gerilmelerinin karşılaştırılması (45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> için 5.85 MPa, 55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup> için 5.2 MPa, 55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> için 6.8 MPa)...	88
Şekil 4.71.	Farklı oryantasyon açılı 6 tabakalı kompozit boruların alın altına birleştirmede kullanılan DP 490 yapıştırıcının A-B gerilme hattı üzerindeki; (a) teğetsel, (b) kayma, (c) Von-Mises ve (d) kompozit borunun teğetsel gerilmelerinin karşılaştırılması (45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> için 9 MPa, 55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup> için 9.5 MPa, 55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> için 12 MPa).....	89
Şekil 4.72.	Farklı oryantasyon açılı 8 tabakalı kompozit boruların alın altına	

	birleştirmede kullanılan DP 490 yapıştırıcının A-B gerilme hattı üzerindeki; (a) teğetsel, (b) kayma, (c) Von-Mises ve (d) kompozit borunun teğetsel gerilmelerinin karşılaştırılması ( $45^0/45^0/45^0/45^0/45^0/45^0/45^0$ için 12.5 MPa, $55^0/55^0/55^0/55^0/30^0/30^0/30^0/30^0$ için 12.5 MPa, $55^0/55^0/55^0/55^0/55^0/55^0/55^0$ için 15 MPa).....	90
Şekil 4.73.	Farklı oryantasyon açılı 4 tabakalı kompozit boruların alın alına birleştirmede kullanılan DP 410 yapıştırıcının A-B gerilme hattı üzerindeki; (a) radyal, (b) teğetsel, (c) eksenel ve (d) kayma gerilmelerinin karşılaştırılması ( $45^0/45^0/45^0/45^0$ için 7.5 MPa, $55^0/55^0/30^0/30^0$ için 7 MPa, $55^0/55^0/55^0/55^0$ için 8 MPa).....	93
Şekil 4.74.	Farklı oryantasyon açılı 4 tabakalı kompozit boruların alın alına birleştirmede kullanılan DP 410 yapıştırıcının A-B gerilme hattı üzerindeki; (a) kayma, (b) Von-Mises gerilmelerinin karşılaştırılması ( $45^0/45^0/45^0/45^0$ için 7.5 MPa, $55^0/55^0/30^0/30^0$ için 7 MPa, $55^0/55^0/55^0/55^0$ için 8 MPa).....	94
Şekil 4.75.	DP 410 yapıştırıcı kullanarak alın alına birleştirilen farklı oryantasyon açılı 4 tabakalı kompozit boruların A-B gerilme hattı üzerindeki; (a) radyal, (b) teğetsel, (c) eksenel ve (d) kayma gerilmelerinin karşılaştırılması ( $45^0/45^0/45^0/45^0$ için 7.5 MPa, $55^0/55^0/30^0/30^0$ için 7 MPa, $55^0/55^0/55^0/55^0$ için 8 MPa).....	95
Şekil 4.76.	Farklı oryantasyon açılı 6 tabakalı kompozit boruların alın alına birleştirmede kullanılan DP 410 yapıştırıcının A-B gerilme hattı üzerindeki; (a) teğetsel, (b) kayma, (c) Von-Mises ve (d) kompozit borunun teğetsel gerilmelerinin karşılaştırılması ( $45^0/45^0/45^0/45^0/45^0/45^0$ için 11 MPa, $55^0/55^0/55^0/30^0/30^0/30^0$ için 11 MPa, $55^0/55^0/55^0/55^0/55^0/55^0$ için 13 MPa).....	96
Şekil 4.77.	Farklı oryantasyon açılı 8 tabakalı kompozit boruların alın alına birleştirmede kullanılan DP 410 yapıştırıcının A-B gerilme hattı üzerindeki; (a) teğetsel, (b) kayma, (c) Von-Mises ve (d) kompozit borunun teğetsel gerilmelerinin karşılaştırılması ( $45^0/45^0/45^0/45^0/45^0/45^0/45^0/45^0$ için 14.5 MPa, $55^0/55^0/55^0/55^0/30^0/30^0/30^0/30^0$ için 14.5 MPa, $55^0/55^0/55^0/55^0/55^0/55^0/55^0/55^0$ için 17.5 MPa).....	97
Şekil 4.78.	Yama kullanarak birleştirme durumunda gerilme ölçüm hatları.	98
Şekil 4.79.	$45^0/45^0/45^0/45^0$ oryantasyon açılı yama kullanılarak (20 mm) 4 tabakalı kompozit boruların yapıştırmada kullanılan DP 410 yapıştırıcının gerilme hatları üzerinde oluşan Von-Mises gerilmelerinin karşılaştırılması (4.5 MPa).....	99
Şekil 4.80.	DP 410 yapıştırıcı kullanarak birleştirilen $45^0/45^0/45^0/45^0$ oryantasyon açılı yama (20 mm) ve 4 tabakalı kompozit boruların; (a) radyal ve (b) kayma gerilmelerinin karşılaştırılması (4.5 MPa).....	100
Şekil 4.81.	Farklı oryantasyon açılı yama kullanılarak (20 mm) 4 tabakalı kompozit boruların birleştirmede kullanılan DP 410 yapıştırıcının A-B gerilme hattı üzerindeki; (a) radyal, (b) teğetsel, (c) eksenel, (d) kayma gerilmelerinin karşılaştırılması ( $45^0/45^0/45^0/45^0$ için 4.5 MPa, $55^0/55^0/30^0/30^0$ için 5.5 MPa, $55^0/55^0/55^0/55^0$ için 6 MPa).....	103
Şekil 4.82.	Farklı oryantasyon açılı yama kullanılarak (20 mm) 4 tabakalı	

	kompozit boruların birleştirmede kullanılan DP 410 yapıştırıcının A-B gerilme hattı üzerindeki; (a) kayma, (b) Von-Mises gerilmelerinin karşılaştırılması ( $45^0/-45^0/45^0/-45^0$ için 4.5 MPa, $55^0/-55^0/30^0/-30^0$ için 5.5 MPa, $55^0/-55^0/55^0/-55^0$ için 6 MPa).....	104
Şekil 4.83.	DP 410 yapıştırıcı kullanarak yama (20 mm) kullanarak birleştirilen farklı oryantasyon açılı 4 tabakalı kompozit boruların A-B gerilme hattı üzerindeki; (a) radyal, (b) teğetsel, (c) eksenel, (d) kayma gerilmelerinin karşılaştırılması ( $45^0/-45^0/45^0/-45^0$ için 4.5 MPa, $55^0/-55^0/30^0/-30^0$ için 5.5 MPa, $55^0/-55^0/55^0/-55^0$ için 6 MPa).....	105
Şekil 4.84.	Farklı oryantasyon açılı 4 tabakalı kompozit boruları yama kullanılarak birleştirmede kullanılan DP 410 yapıştırıcının A-B gerilme hattı üzerindeki; 30mm yama boyunda (a) teğetsel, (b) Von-Mises ( $45^0/-45^0/45^0/-45^0$ için 6 MPa, $55^0/-55^0/30^0/-30^0$ için 6.5 MPa, $55^0/-55^0/55^0/-55^0$ için 7.5 MPa) ve 40 mm yama boyunda (c) teğetsel, (d) Von-Mises gerilmelerinin karşılaştırılması ( $45^0/-45^0/45^0/-45^0$ için 7.5 MPa, $55^0/-55^0/30^0/-30^0$ için 7.5 MPa, $55^0/-55^0/55^0/-55^0$ için 9 MPa).....	106
Şekil 4.85.	Farklı oryantasyon açılı yama kullanılarak (20 mm) 6 tabakalı kompozit boruların birleştirmede kullanılan DP 410 yapıştırıcının A-B gerilme hattı üzerindeki; (a) radyal, (b) teğetsel, (c) eksenel, (d) kayma gerilmelerinin karşılaştırılması ( $45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0$ için 7 MPa, $55^0/-55^0/55^0/-30^0/30^0/-30^0$ için 8 MPa, $55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$ için 9 MPa).....	107
Şekil 4.86.	Farklı oryantasyon açılı yama kullanılarak (20 mm) 6 tabakalı kompozit boruların birleştirmede kullanılan DP 410 yapıştırıcının A-B gerilme hattı üzerindeki; (a) kayma, (b) Von-Mises gerilmelerinin karşılaştırılması ( $45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0$ için 7 MPa, $55^0/-55^0/55^0/-30^0/30^0/-30^0$ için 8 MPa, $55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$ için 9 MPa).....	108
Şekil 4.87.	DP 410 yapıştırıcı kullanarak yama (20 mm) kullanarak birleştirilen farklı oryantasyon açılı 6 tabakalı kompozit boruların A-B gerilme hattı üzerindeki; (a) radyal, (b) teğetsel, (c) eksenel, (d) kayma gerilmelerinin karşılaştırılması ( $45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0$ için 7 MPa, $55^0/-55^0/55^0/-30^0/30^0/-30^0$ için 8 MPa, $55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$ için 9 MPa).....	109
Şekil 4.88.	Farklı oryantasyon açılı 6 tabakalı kompozit boruları yama kullanılarak birleştirmede kullanılan DP 410 yapıştırıcının A-B gerilme hattı üzerindeki; 30mm yama boyunda (a) teğetsel ( $45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0$ için 9 MPa, $55^0/-55^0/55^0/-30^0/30^0/-30^0$ için 9.5 MPa, $55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$ için 10.5 MPa) ve 40 mm yama boyunda (b) teğetsel ( $45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0$ için 10.5 MPa, $55^0/-55^0/55^0/-30^0/30^0/-30^0$ için 11 MPa, $55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$ için 11.5 MPa) gerilmelerinin karşılaştırılması.....	110
Şekil 4.89.	Farklı oryantasyon açılı yama kullanılarak (20 mm) 8 tabakalı kompozit boruların birleştirmede kullanılan DP 410 yapıştırıcının A-B gerilme hattı üzerindeki; (a) radyal, (b) teğetsel, (c) eksenel, (d) kayma gerilmelerinin karşılaştırılması ( $45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0$ için 10 MPa, $55^0/-55^0/55^0/-$	

	55°/30°/-30°/30°/-30° için 10.5 MPa, 55°/-55°/55°/-55°/55°/-55°/55°/-55° için 11.5 MPa).....	111
Şekil 4.90.	Farklı oryantasyon açılı yama kullanılarak (20 mm) 8 tabakalı kompozit boruların birleştirmede kullanılan DP 410 yapıştırıcının A-B gerilme hattı üzerindeki; (a) kayma, (b) Von-Mises gerilmelerinin karşılaştırılması (45°/-45°/45°/-45°/45°/-45°/45°/-45° için 10 MPa, 55°/-55°/55°/-55°/30°/-30°/30°/-30° için 10.5 MPa, 55°/-55°/55°/-55°/55°/-55°/55°/-55° için 11.5 MPa).....	112
Şekil 4.91.	DP 410 yapıştırıcı kullanarak yama (20 mm) kullanarak birleştirilen farklı oryantasyon açılı 8 tabakalı kompozit boruların A-B gerilme hattı üzerindeki; (a) radyal, (b) teğetsel, (c) eksenel, (d) kayma gerilmelerinin karşılaştırılması 45°/-45°/45°/-45°/45°/-45°/45°/-45° için 10 MPa, 55°/-55°/55°/-55°/30°/-30°/30°/-30° için 10.5 MPa, 55°/-55°/55°/-55°/55°/-55°/55°/-55° için 11.5 MPa).....	113
Şekil 4.92.	Farklı oryantasyon açılı 8 tabakalı kompozit boruları yama kullanılarak birleştirmede kullanılan DP 410 yapıştırıcının A-B gerilme hattı üzerindeki; 30mm yama boyunda (a) teğetsel (45°/-45°/45°/-45°/45°/-45°/45°/-45° için 11.5 MPa, 55°/-55°/55°/-55°/30°/-30°/30°/-30° için 12.5 MPa, 55°/-55°/55°/-55°/55°/-55°/55°/-55° için 13.5 MPa) ve 40 mm yama boyunda (b) teğetsel (45°/-45°/45°/-45°/45°/-45°/45°/-45° için 13.5 MPa, 55°/-55°/55°/-55°/30°/-30°/30°/-30° için 14 MPa, 55°/-55°/55°/-55°/55°/-55°/55°/-55° için 15 MPa) gerilmelerinin karşılaştırılması.....	114
Şekil 4.93.	Farklı oryantasyon açılı yama kullanılarak (20 mm) 4 tabakalı kompozit boruların birleştirmede kullanılan DP 490 yapıştırıcının A-B gerilme hattı üzerindeki; (a) radyal, (b) teğetsel, (c) eksenel, (d) kayma gerilmelerinin karşılaştırılması (45°/-45°/45°/-45° için 3.5 MPa, 55°/-55°/30°/-30° için 3.5 MPa, 55°/-55°/55°/-55° için 4 MPa).....	118
Şekil 4.94.	Farklı oryantasyon açılı yama kullanılarak (20 mm) 4 tabakalı kompozit boruların birleştirmede kullanılan DP 490 yapıştırıcının A-B gerilme hattı üzerindeki; (a) kayma, (b) Von-Mises gerilmelerinin karşılaştırılması (45°/-45°/45°/-45° için 3.5 MPa, 55°/-55°/30°/-30° için 3.5 MPa, 55°/-55°/55°/-55° için 4 MPa).....	119
Şekil 4.95.	DP 490 yapıştırıcı kullanarak yama (20 mm) kullanarak birleştirilen farklı oryantasyon açılı 4 tabakalı kompozit boruların A-B gerilme hattı üzerindeki; (a) radyal, (b) teğetsel, (c) eksenel, (d) kayma gerilmelerinin karşılaştırılması (45°/-45°/45°/-45° için 3.5 MPa, 55°/-55°/30°/-30° için 3.5 MPa, 55°/-55°/55°/-55° için 4 MPa).....	120
Şekil 4.96.	Farklı oryantasyon açılı 4 tabakalı kompozit boruları yama kullanılarak birleştirmede kullanılan DP 490 yapıştırıcının A-B gerilme hattı üzerindeki; 30mm yama boyunda (a) teğetsel, (b) Von-Mises (45°/-45°/45°/-45° için 4.2 MPa, 55°/-55°/30°/-30° için 4.2 MPa, 55°/-55°/55°/-55° için 5.4 MPa) ve 40 mm yama boyunda (c) teğetsel, (d) Von-Mises gerilmelerinin karşılaştırılması (45°/-45°/45°/-45° için 5.4 MPa, 55°/-55°/30°/-	



	30° için 5.4 MPa, 55°/55°/55°/55° için 6.4 MPa).....	121
Şekil 4.97.	Farklı oryantasyon açılı yama kullanılarak (20 mm) 6 tabakalı kompozit boruların birleştirmede kullanılan DP 490 yapıştırıcının A-B gerilme hattı üzerindeki; (a) radyal, (b) teğetsel, (c) eksenel, (d) kayma gerilmelerinin karşılaştırılması (45°/45°/45°/45°/45°/45° için 4.2 MPa, 55°/55°/55°/30°/30°/30° için 5.2 MPa, 55°/55°/55°/55°/55° için 5.5 MPa).....	122
Şekil 4.98.	Farklı oryantasyon açılı yama kullanılarak (20 mm) 6 tabakalı kompozit boruların birleştirmede kullanılan DP 490 yapıştırıcının A-B gerilme hattı üzerindeki; (a) kayma, (b) Von-Mises gerilmelerinin karşılaştırılması (45°/45°/45°/45°/45°/45° için 4.2 MPa, 55°/55°/55°/30°/30°/30° için 5.2 MPa, 55°/55°/55°/55°/55° için 5.5 MPa).....	123
Şekil 4.99.	DP 490 yapıştırıcı kullanarak yama (20 mm) kullanarak birleştirilen farklı oryantasyon açılı 6 tabakalı kompozit boruların A-B gerilme hattı üzerindeki; (a) radyal, (b) teğetsel, (c) eksenel, (d) kayma gerilmelerinin karşılaştırılması (45°/45°/45°/45°/45°/45° için 4.2 MPa, 55°/55°/55°/30°/30°/30° için 5.2 MPa, 55°/55°/55°/55°/55° için 5.5 MPa).....	124
Şekil 4.100.	Farklı oryantasyon açılı 6 tabakalı kompozit boruları yama kullanılarak birleştirmede kullanılan DP 490 yapıştırıcının A-B gerilme hattı üzerindeki; 30mm yama boyunda (a) teğetsel (45°/45°/45°/45°/45°/45° için 5 MPa, 55°/55°/55°/30°/30°/30° için 6 MPa, 55°/55°/55°/55°/55° için 6.5 MPa) ve 40 mm yama boyunda (b) teğetsel (45°/45°/45°/45°/45°/45° için 5.9 MPa, 55°/55°/55°/30°/30°/30° için 6.8 MPa, 55°/55°/55°/55°/55° için 7.6 MPa) gerilmelerinin karşılaştırılması.....	125
Şekil 4.101.	Farklı oryantasyon açılı yama kullanılarak (20 mm) 8 tabakalı kompozit boruların birleştirmede kullanılan DP 490 yapıştırıcının A-B gerilme hattı üzerindeki; (a) radyal, (b) teğetsel, (c) eksenel, (d) kayma gerilmelerinin karşılaştırılması (45°/45°/45°/45°/45°/45°/45°/45° için 7 MPa, 55°/55°/55°/55°/30°/30°/30°/30° için 7.5 MPa, 55°/55°/55°/55°/55°/55° için 8.5 MPa).....	126
Şekil 4.102.	Farklı oryantasyon açılı yama kullanılarak (20 mm) 8 tabakalı kompozit boruların birleştirmede kullanılan DP 490 yapıştırıcının A-B gerilme hattı üzerindeki; (a) kayma, (b) Von-Mises gerilmelerinin karşılaştırılması (45°/45°/45°/45°/45°/45°/45°/45° için 7 MPa, 55°/55°/55°/55°/30°/30°/30°/30° için 7.5 MPa, 55°/55°/55°/55°/55°/55°/55° için 8.5 MPa).....	127
Şekil 4.103.	DP 490 yapıştırıcı kullanarak yama (20 mm) kullanarak birleştirilen farklı oryantasyon açılı 8 tabakalı kompozit boruların A-B gerilme hattı üzerindeki; (a) radyal, (b) teğetsel, (c) eksenel, (d) kayma gerilmelerinin karşılaştırılması (45°/45°/45°/45°/45°/45°/45°/45° için 7 MPa, 55°/55°/55°/55°/30°/30°/30°/30° için 7.5 MPa, 55°/55°/55°/55°/55°/55°/55° için 8.5 MPa).....	128
Şekil 4.104.	Farklı oryantasyon açılı 8 tabakalı kompozit boruları yama kullanılarak birleştirmede kullanılan DP 490 yapıştırıcının A-B gerilme hattı üzerindeki; 30mm yama boyunda (a) teğetsel (45°/	

	45°/45°/-45°/45°/-45°/45°/-45° için 8 MPa, 55°/-55°/55°/-55°/30°/-30°/30°/-30° için 8.5 MPa, 55°/-55°/55°/-55°/55°/-55°/55°/-55° için 9.5 MPa) ve 40 mm yama boyunda (b) teğetsel (45°/-45°/45°/-45°/45°/-45°/45°/-45° için 8 MPa, 55°/-55°/55°/-55°/30°/-30°/30°/-30° için 9 MPa, 55°/-55°/55°/-55°/55°/-55°/55°/-55° için 10 MPa) gerilmelerinin karşılaştırılması.....	129
Şekil 4.105.	55°/-55°/55°/-55° oryantasyon açılı 4 tabakalı kompozit boruların A-B gerilme hattı üzerindeki yama kullanarak birleştirmede kullanılan; DP 410 yapıştırıcının 20 mm (6 MPa), 30 mm (7.5 MPa) ve 40 mm (9 MPa) yama boylarında (a) teğetsel, (b) Von-Mises ve DP 490 yapıştırıcının 20 mm (4 MPa), 30 mm (5.4 MPa) ve 40 mm (6.4 MPa) yama boylarında (c) teğetsel, (d) Von-Mises gerilmelerinin karşılaştırılması.....	131
Şekil 4.106.	Kademeli olarak yapıştırma durumunda gerilme ölçüm hatları....	133
Şekil 4.107	45°/-45°/45°/-45° oryantasyon açılı kademeli (10 mm) olarak yapıştırılan 4 tabakalı kompozit boruların; (a) teğetsel, (b) kayma ve DP 410 yapıştırıcının (c) Von-Mises gerilmelerinin karşılaştırılması (6 MPa).....	134
Şekil 4.108.	Farklı oryantasyon açılı kademeli (10 mm) olarak 4 tabakalı kompozit boruların birleştirmede kullanılan DP 410 yapıştırıcının C-D gerilme hattı üzerinde; (a) radyal, (b) teğetsel, (c) eksenel, (d) kayma gerilmelerinin karşılaştırılması ( 45°/-45° /45°/-45° için 6 MPa, 55°/-55°/30°/-30° için 6 MPa, 55°/-55°/55°/-55° için 7 MPa).....	137
Şekil 4.109.	Farklı oryantasyon açılı kademeli (10 mm) olarak 4 tabakalı kompozit boruların birleştirmede kullanılan DP 410 yapıştırıcının C-D gerilme hattı üzerinde; (a) kayma, (b) Von-Mises gerilmelerinin karşılaştırılması (45°/-45° /45°/-45° için 6 MPa, 55°/-55°/30°/-30° için 6 MPa, 55°/-55°/55°/-55° için 7 MPa).....	138
Şekil 4.110.	DP 410 yapıştırıcı kullanarak kademeli (10 mm) olarak birleştirilen farklı oryantasyon açılı 4 tabakalı kompozit boruların C-D gerilme hattı üzerinde; (a) radyal, (b) teğetsel, (c) eksenel, (d) kayma gerilmelerinin karşılaştırılması (45°/-45° /45°/-45° için 6 MPa, 55°/-55°/30°/-30° için 6 MPa, 55°/-55°/55°/-55° için 7 MPa).....	139
Şekil 4.111.	Farklı oryantasyon açılı 4 tabakalı kompozit boruları kademeli olarak birleştirmede kullanılan DP 410 yapıştırıcının C-D gerilme hattı üzerinde; 15 mm yama boyunda (a) teğetsel, (b) Von-Mises ( 45°/-45° /45°/-45° için 7 MPa, 55°/-55°/30°/-30° için 7.5 MPa, 55°/-55°/55°/-55° için 7.5 MPa) ve 20 mm yama boyunda (c) teğetsel, (d) Von-Mises gerilmelerinin karşılaştırılması ( 45°/-45° /45°/-45° için 8 MPa, 55°/-55°/30°/-30° için 8 MPa, 55°/-55°/55°/-55° için 9 MPa).....	140
Şekil 4.112.	Farklı oryantasyon açılı kademeli (10 mm) olarak 6 tabakalı kompozit boruların birleştirmede kullanılan DP 410 yapıştırıcının C-D gerilme hattı üzerinde; (a) radyal, (b) teğetsel, (c) eksenel, (d) kayma gerilmelerinin karşılaştırılması ( 45°/-45°/45°/-45°/45°/-45° için 5.5 MPa, 55°/-55°/55°/-30°/30°/-30° için 6 MPa, 55°/-55°/55°/-55°/55°/-55° için 6.5 MPa).....	141

- Şekil 4.113. Farklı oryantasyon açılı kademeli (10 mm) olarak 6 tabakalı kompozit boruların birleştirmede kullanılan DP 410 yapıştırıcının C-D gerilme hattı üzerinde; (a) kayma, (b) Von-Mises gerilmelerinin karşılaştırılması ( $45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0$  için 5.5 MPa,  $55^0/-55^0/55^0/-30^0/30^0/-30^0$  için 6 MPa,  $55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$  için 6.5 MPa)..... 142
- Şekil 4.114. DP 410 yapıştırıcı kullanarak kademeli (10 mm) olarak birleştirilen farklı oryantasyon açılı 6 tabakalı kompozit boruların C-D gerilme hattı üzerinde; (a) radyal, (b) teğetsel, (c) aksenal, (d) kayma gerilmelerinin karşılaştırılması ( $45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0$  için 5.5 MPa,  $55^0/-55^0/55^0/-30^0/30^0/-30^0$  için 6 MPa,  $55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$  için 6.5 MPa)..... 143
- Şekil 4.115. Farklı oryantasyon açılı 6 tabakalı kompozit boruları kademeli olarak birleştirmede kullanılan DP 410 yapıştırıcının C-D gerilme hattı üzerinde; 15 mm yama boyunda (a) teğetsel ( $45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0$  için 7 MPa,  $55^0/-55^0/55^0/-30^0/30^0/-30^0$  için 7.5 MPa,  $55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$  için 8 MPa) ve 20 mm yama boyunda (b) teğetsel ( $45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0$  için 8.5 MPa,  $55^0/-55^0/55^0/-30^0/30^0/-30^0$  için 8 MPa,  $55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$  için 9 MPa) gerilmelerinin karşılaştırılması..... 144
- Şekil 4.116. Farklı oryantasyon açılı kademeli olarak (10 mm) 8 tabakalı kompozit boruların birleştirmede kullanılan DP 410 yapıştırıcının C-D gerilme hattı üzerinde; (a) radyal, (b) teğetsel, (c) aksenal, (d) kayma gerilmelerinin karşılaştırılması ( $45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0$  için 6 MPa,  $55^0/-55^0/55^0/-55^0/30^0/-30^0/30^0/-30^0$  için 6.5 MPa,  $55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$  için 7 MPa)..... 145
- Şekil 4.117. Farklı oryantasyon açılı kademeli olarak (10 mm) 8 tabakalı kompozit boruların birleştirmede kullanılan DP 410 yapıştırıcının C-D gerilme hattı üzerinde; (a) kayma, (b) Von-Mises gerilmelerinin karşılaştırılması ( $45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0$  için 6 MPa,  $55^0/-55^0/55^0/-55^0/30^0/-30^0/30^0/-30^0$  için 6.5 MPa,  $55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$  için 7 MPa)..... 146
- Şekil 4.118. DP 410 yapıştırıcı kullanarak kademeli (10 mm) olarak birleştirilen farklı oryantasyon açılı 8 tabakalı kompozit boruların C-D gerilme hattı üzerinde; (a) radyal, (b) teğetsel, (c) aksenal, (d) kayma gerilmelerinin karşılaştırılması ( $45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0$  için 6 MPa,  $55^0/-55^0/55^0/-55^0/30^0/-30^0/30^0/-30^0$  için 6.5 MPa,  $55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$  için 7 MPa)..... 147
- Şekil 4.119. Farklı oryantasyon açılı 8 tabakalı kompozit boruları kademeli olarak birleştirmede kullanılan DP 410 yapıştırıcının C-D gerilme hattı üzerinde; 15 mm yama boyunda (a) teğetsel ( $45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0$  için 7.5 MPa,  $55^0/-55^0/55^0/-55^0/30^0/-30^0/30^0/-30^0$  için 8 MPa,  $55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$  için 8.5 MPa) ve 20 mm yama boyunda (b) teğetsel ( $45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0$  için 9 MPa,  $55^0/-55^0/55^0/-55^0/30^0/-30^0/30^0/-30^0$  için 9.5 MPa,  $55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$  için 9.5 MPa) gerilmelerinin karşılaştırılması..... 148
- Şekil 4.120. Farklı oryantasyon açılı kademeli (10 mm) olarak 4 tabakalı

	kompozit boruların birleştirmede kullanılan DP 490 yapıştırıcının C-D gerilme hattı üzerinde; (a) radyal, (b) teğetsel, (c) eksenel, (d) kayma gerilmelerinin karşılaştırılması ( $45^0/-45^0 /45^0/-45^0$ için 4.4 MPa, $55^0/-55^0/30^0/-30^0$ için 4.4 MPa, $55^0/-55^0/55^0/-55^0$ için 4.8 MPa).....	151
şekil 4.121.	Farklı oryantasyon açılı kademeli (10 mm) olarak 4 tabakalı kompozit boruların birleştirmede kullanılan DP 490 yapıştırıcının C-D gerilme hattı üzerinde; (a) kayma, (b) Von-Mises gerilmelerinin karşılaştırılması ( $45^0/-45^0 /45^0/-45^0$ için 4.4 MPa, $55^0/-55^0/30^0/-30^0$ için 4.4 MPa, $55^0/-55^0/55^0/-55^0$ için 4.8 MPa).....	152
şekil 4.122.	DP 490 yapıştırıcı kullanarak kademeli (10 mm) olarak birleştirilen farklı oryantasyon açılı 4 tabakalı kompozit boruların C-D gerilme hattı üzerinde; (a) radyal, (b) teğetsel, (c) eksenel, (d) kayma gerilmelerinin karşılaştırılması ( $45^0/-45^0 /45^0/-45^0$ için 4.4 MPa, $55^0/-55^0/30^0/-30^0$ için 4.4 MPa, $55^0/-55^0/55^0/-55^0$ için 4.8 MPa).....	153
şekil 4.123.	Farklı oryantasyon açılı 4 tabakalı kompozit boruları kademeli olarak birleştirmede kullanılan DP 490 yapıştırıcının C-D gerilme hattı üzerinde; 15 mm yama boyunda (a) teğetsel, (b) Von-Mises ( $45^0/-45^0 /45^0/-45^0$ için 4.8 MPa, $55^0/-55^0/30^0/-30^0$ için 4.8 MPa, $55^0/-55^0/55^0/-55^0$ için 5.6 MPa) ve 20 mm yama boyunda (c) teğetsel, (d) Von-Mises gerilmelerinin karşılaştırılması ( $45^0/-45^0 /45^0/-45^0$ için 5.6 MPa, $55^0/-55^0/30^0/-30^0$ için 6 MPa, $55^0/-55^0/55^0/-55^0$ için 6.4 MPa).....	154
şekil 4.124.	Farklı oryantasyon açılı kademeli (10 mm) olarak 6 tabakalı kompozit boruların birleştirmede kullanılan DP 490 yapıştırıcının C-D gerilme hattı üzerinde; (a) radyal, (b) teğetsel, (c) eksenel, (d) kayma gerilmelerinin karşılaştırılması ( $45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0$ için 3.9 MPa, $55^0/-55^0/55^0/-30^0/30^0/-30^0$ için 4.2 MPa, $55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$ için 4.5 MPa).....	155
şekil 4.125.	Farklı oryantasyon açılı kademeli (10 mm) olarak 6 tabakalı kompozit boruların birleştirmede kullanılan DP 490 yapıştırıcının C-D gerilme hattı üzerinde; (a) kayma, (b) Von-Mises gerilmelerinin karşılaştırılması ( $45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0$ için 3.9 MPa, $55^0/-55^0/55^0/-30^0/30^0/-30^0$ için 4.2 MPa, $55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$ için 4.5 MPa).....	156
şekil 4.126.	DP 490 yapıştırıcı kullanarak kademeli (10 mm) olarak birleştirilen farklı oryantasyon açılı 6 tabakalı kompozit boruların C-D gerilme hattı üzerinde; (a) radyal, (b) teğetsel, (c) eksenel, (d) kayma gerilmelerinin karşılaştırılması ( $45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0$ için 3.9 MPa, $55^0/-55^0/55^0/-30^0/30^0/-30^0$ için 4.2 MPa, $55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$ için 4.5 MPa).....	157
şekil 4.127.	Farklı oryantasyon açılı 6 tabakalı kompozit boruları kademeli olarak birleştirmede kullanılan DP 490 yapıştırıcının C-D gerilme hattı üzerinde; 15 mm yama boyunda (a) teğetsel ( $45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0$ için 4.5 MPa, $55^0/-55^0/55^0/-30^0/30^0/-30^0$ için 5.4 MPa, $55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$ için 6 MPa) ve 20 mm yama boyunda (b) teğetsel ( $45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0$ için 6 MPa, $55^0/-55^0/55^0/-30^0/30^0/-30^0$ için 6.8 MPa, $55^0/-55^0/55^0/-$	

	55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> için 6.4 MPa) gerilmelerinin karşılaştırılması.....	158
Şekil 4.128.	Farklı oryantasyon açılı kademeli olarak (10 mm) 8 tabakalı kompozit boruların birleştirmede kullanılan DP 490 yapıştırıcının C-D gerilme hattı üzerinde; (a) radyal, (b) teğetsel, (c) aksenal, (d) kayma gerilmelerinin karşılaştırılması (45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> için 4.8 MPa, 55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup> için 4.8 MPa, 55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> için 4.8 MPa).....	159
Şekil 4.129.	Farklı oryantasyon açılı kademeli olarak (10 mm) 8 tabakalı kompozit boruların birleştirmede kullanılan DP 490 yapıştırıcının C-D gerilme hattı üzerinde; (a) kayma, (b) Von-Mises gerilmelerinin karşılaştırılması (45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> için 4.8 MPa, 55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup> için 4.8 MPa, 55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> için 4.8 MPa)...	160
Şekil 4.130.	DP 490 yapıştırıcı kullanarak kademeli (10 mm) olarak birleştirilen farklı oryantasyon açılı 8 tabakalı kompozit boruların C-D gerilme hattı üzerinde; (a) radyal, (b) teğetsel, (c) aksenal, (d) kayma gerilmelerinin karşılaştırılması (45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> için 4.8 MPa, 55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup> için 4.8 MPa, 55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> için 4.8 MPa).....	161
Şekil 4.131.	Farklı oryantasyon açılı 8 tabakalı kompozit boruları kademeli olarak birleştirmede kullanılan DP 490 yapıştırıcının C-D gerilme hattı üzerinde; 15 mm yama boyunda (a) teğetsel (45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> için 5.2 MPa, 55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup> için 5.6 MPa, 55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> için 6 MPa) ve 20 mm yama boyunda (b) teğetsel (45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> için 6.4 MPa, 55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup> için 6.8 MPa, 55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> için 7.2 MPa) gerilmelerinin karşılaştırılması.....	162
Şekil 4.132	55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> oryantasyon açılı 4 tabakalı kompozit boruların C-D gerilme hattı üzerinde kademeli olarak birleştirmede kullanılan; DP 410 yapıştırıcının 10 mm (7 MPa), 15 mm (7.5 MPa) ve 20 mm (9 MPa) yama boylarında (a) teğetsel, (b) Von-Mises ve DP 490 yapıştırıcının 10 mm (4.8 MPa), 15 mm (5.6 MPa) ve 20 mm (6.4 MPa) yama boylarında (c) teğetsel, (d) Von-Mises gerilmelerinin karşılaştırılması.....	164

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1.	DP 410 Yapısal yapıştırıcı özellikleri.....	25
Çizelge 3.2.	DP 490 Yapısal yapıştırıcı özellikleri.....	25
Çizelge 3.3.	Tabakalı kompozit boru parametreleri.....	26
Çizelge 3.4.	Tabakalı kompozit boruların alın alına yapıştırma parametreleri.....	26
Çizelge 3.5.	Tabakalı kompozit boruların kademeli yapıştırma parametreleri.....	26
Çizelge 3.6.	Tabakalı kompozit boruların yama ile yapıştırma parametreleri	27
Çizelge 4.1.	E-glass fiber takviyeli tabakalı kompozit malzemelerin mekaniksel özellikleri.....	44
Çizelge 4.2.	Tabakalı kompozit numunelerin fiber ve matris yüzdesi sonuçları.....	47
Çizelge 4.3.	Yapıştırıcıların mekaniksel özellikleri.....	48
Çizelge 4.4.	Farklı oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların deneysel ortalama hasar iç basınçları.....	50
Çizelge 4.5.	DP 410 yapıştırıcı ile alın alına yapıştırılmış farklı oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların deneysel ortalama hasar iç basınçları.....	53
Çizelge 4.6.	DP 490 yapıştırıcı ile alın alına yapıştırılmış farklı oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların deneysel ortalama hasar iç basınçları.....	53
Çizelge 4.7.	DP 410 yapıştırıcı ile yama kullanılarak yapıştırılmış farklı oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların deneysel ortalama hasar iç basınçları.....	56
Çizelge 4.8.	DP 490 yapıştırıcı ile yama kullanılarak yapıştırılmış farklı oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların deneysel ortalama hasar iç basınçları.....	57
Çizelge 4.9.	DP 410 yapıştırıcı ile kademeli olarak yapıştırılmış farklı oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların deneysel ortalama hasar iç basınçları.....	65
Çizelge 4.10.	DP 490 yapıştırıcı ile kademeli olarak yapıştırılmış farklı oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların deneysel ortalama hasar iç basınçları.....	65
Çizelge 4.11.	Farklı oryantasyon açılı 4, 6 ve 8 tabakalı kompozit boruların iç basınç yüklemeleri altındaki nümerik hasar iç basınçları.....	78
Çizelge 4.12.	Farklı oryantasyon açılı 4, 6 ve 8 tabakalı kompozit boruların DP 490 yapıştırıcı ile alın alına yapıştırılarak iç basınç yüklemeleri altındaki nümerik hasar iç basınçları.....	85
Çizelge 4.13.	Farklı oryantasyon açılı 4, 6 ve 8 tabakalı kompozit boruların DP 410 yapıştırıcı alın alına yapıştırılarak iç basınç yüklemeleri altındaki nümerik hasar iç basınçları.....	91
Çizelge 4.14.	DP 410 yapıştırıcı kullanılarak farklı uzunlukta yama ile birleştirilen farklı oryantasyon açılı 4, 6 ve 8 tabakalı kompozit boruların iç basınç yüklemesi altındaki nümerik hasar iç basınçları.....	102
Çizelge 4.15.	DP 490 yapıştırıcı kullanılarak farklı uzunlukta yama ile birleştirilen farklı oryantasyon açılı 4, 6 ve 8 tabakalı	

	kompozit boruların iç basınç yüklemesi altındaki nümerik hasar iç basınçları.....	116
Çizelge 4.16.	DP 410 yapıştırıcı kullanılarak farklı uzunlukta kademeli olarak birleştirilen farklı oryantasyon açılı 4, 6 ve 8 tabakalı kompozit boruların iç basınç yüklemesi altındaki nümerik hasar iç basınçları.....	136
Çizelge 4.17.	DP 490 yapıştırıcı kullanılarak farklı uzunlukta kademeli olarak birleştirilen farklı oryantasyon açılı 4, 6 ve 8 tabakalı kompozit boruların iç basınç yüklemesi altındaki nümerik hasar iç basınçları.....	150

## SİMGELER VE KISALTMALAR

$E$	Elastisite Modülü
$\sigma$	Normal Gerilme
$\tau$	Kayma Gerilmesi
$G$	Kayma Modülü
$\varepsilon$	Normal Şekil Değişirme
$\nu$	Poisson Oranı
$\gamma$	Kayma Açısı
$U$	Şekil Değişirme Enerjisini
$C_{kj}$	Elastiklik Katsayısı
$K$	Sistem Rijitlik Matrisi
$\alpha$	Isıl Genleşme Katsayısı



## 1.GİRİŞ

Günümüz teknolojisinde uzay, havacılık, savunma, otomotiv, petro-kimya ve inşaat gibi sektörlerde yüksek mukavemet ve mekanik özelliklerine sahip, hafif ve tamirata mümkün malzemelere ihtiyaç duyulmuştur. Bu gereksinimleri karşılamak için 1960'lı yıllardan günümüze birçok sanayi kolunda kullanılmak ve istenilen kullanım şartlarına cevap veren kompozit malzemelerin üretimi yaygınlaşmıştır.

Kompozitlerin kullanımı özellikle yüksek mukavemetin, ısıl dayanımın önemli olduğu havacılık, savunma ve otomotiv sektörlerinde metallere göre birçok avantajlara sahip olmalarından dolayı bu sektörlerde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Farklı kullanım alanları için istenilen özellikler doğrultusunda kompozit malzemeler tasarlanmakta ve üretilmektedir. Kompozit malzemeler hafiflik, rijitlik ve boyut kararlılığı (Genleşme katsayıları nispeten düşük olup sert, sağlam bir yapı ve büyük bir boyut kararlılığı gösterir), yüksek mekanik özellikler (Çekme, basma, darbe, yorulma dayanımları çok yüksektir) , yüksek kimyasal direnç (Kompozitler birçok kimyasal maddelere, bu arada asitler, alkaliler, çözücüler ve açık hava şartlarına karşı son derece direnç gösterirler. Kimya tesisleri için çok kullanılan malzemelerdir), yüksek ısı dayanımı, elektriksel özellikler (Elektriksel özellikler kompozitlerde isteğe göre ayarlanabilir) bakımından da metallere göre önemli avantaj sağlamaktadırlar.

Kompozitlerin metallere göre dezavantajları ise; kompozitler kırılğan bir yapıya sahip olduklarından bu malzemeler plastik deformasyon olmadan malzeme anlık kırılabilmektedir. Buna karşın metallerde kırılma olmadan belli aşamalar gerçekleştiğinden önceden önlemi alınabilir. Ayrıca kompozit malzemelerin anizotropik ve kırılğan bir yapıya sahip olmaları gerilme yığılmalarındaki davranışlarının metallere göre farklı olmasına sebebiyet vermektedir. Bu sebepten dolayı kompozit üretimlerinde metallere göre daha karmaşık ve detaylı çalışmaların yapılması gerekmektedir.

Kompozit boruların kullanımı gelişen teknoloji, dayanım ve ekonomiklik açısından büyük önem kazanmıştır. Günümüzde otomotiv, havacılık, petro-kimya, doğalgaz ve petrol boru hatları, şebeke suyu boru hatları, termik ve hidrolik santraller gibi sanayi alanlarında sıvı ve gazların bir noktadan diğer bir noktaya iletilmesi gibi önemli alanlarda kullanılmaktadır. Genel olarak çelik gibi metal malzemelerden üretilen borular, korozyon, mukavemet ve ortam şartlarından etkilenerak kısa süre

içerisinde hasara uğramakta ve bunun sonucu olarak yenileri ile değiştirilmektedir. Bunun gibi dezavantajlardan dolayı kompozit boruların kullanımı yaygınlaşmaktadır. Bunun sonucu olarak da farklı kompozit boruların seçilmesi, bu boruların birleştirilmesinde farklı yöntemler kullanılması ve maruz kaldıkları iç basınç, sıcaklık ve farklı yükleme durumları altındaki mekanik davranışlarının belirlenmesi konusunda birçok farklı çalışmalar yapılmıştır.

Knox ve arkadaşları, boru çalışma sistemlerinin aksenel ve eğme kuvvetlerinden oluşan sürünme yüklemesine maruz bırakıldığında, yapıştırıcı ile birleştirilmiş polimer kompozit boruların (GRE) davranışlarını araştırmışlardır [1]. Knox ve arkadaşları, yaptığı başka bir çalışmada polimer kompozit boruları (GRE) belirli açılarla konik olarak yapıştırmış, çeşitli mod ve yüklemeler uygulayıp, uzun süreçte sürünme performansını ve bağlantılardaki hasar toleranslarını araştırmışlardır. [2].

Sekercioglu ve arkadaşı, çelik, bronz ve alüminyum silindirik elamanları yapıştırıcılarla mukavemetli bir şekilde birleştirerek farklı yüklemeler altındaki davranışlarını ve dayanımlarını araştırmışlardır [3].

Cheng ve arkadaşı, elipsoidal ve küresel parçacık ve fiber takviyeli kompozit boruların hasar mukavemetini artırmak için, parçacık ve fiber takviyeli piezoelektrik malzemeli kompozit boruları tekil birleştirme bağlantı elemanlarıyla birleştirdikten sonra uygulanan burulma yükü altındaki davranışları üzerine araştırmalar yapmışlardır [4].

Ouyang ve arkadaşı, yapıştırıcı ile yapıştırılmış boruların burulma yüklemesi altında elastik davranışlarını incelemiştir. Bu çalışmada kohesive zone model temel alınarak analitik derivasyonlar yapılmıştır [5].

Xu ve arkadaşı, fiber takviyeli kompozit tüplerin burulma yüklemesi altındaki mekanik davranışlarını sonlu farklar metodunu kullanarak incelemiştir [6].

Das ve arkadaşı, tabakalandırılmış fiber takviyeli plastik kompozit boruların gerilme altında hasara uğramasını ve oluşan kusurun mod-II' ye göre büyümesi üzerine çalışmışlardır. Çalışmada enerji yayılım oranı gerinimini hesaplamak için Virtual Crack Closure Tekniği kullanmışlardır. Bu çalışmayla yapıştırıcının hasar durumu üzerine araştırma yapmışlardır [7].

Esmael ve arkadaşı, burulmaya maruz tek bağlantılı ve soket boruların tepkisini ve yapıştırıcının delaminasyona etkisini incelemiştir. Burada kompozit, çelik ve alüminyum borular kullanmışlardır [8].

Parashar ve arkadaşı, farklı yükler altında fiber takviyeli polimer (FRP) borularının birleştirme elemanı ile yapıştırılarak kompozit boruların kayma gerilmeleri ile ilgili tasarım parametrelerini araştırmışlardır [9].

Croccolo ve arkadaşları, bir çelik boru içerisine karbon epoksiden üretilmiş boruyu sıkıştırarak yerleştirip, anaerobic yapıştırıcı ile birleştirmişler. Sıkışma basıncı altındaki bağlantının sürünme katsayısı ve yapıştırıcı kayma mukavemeti üzerine çalışmışlardır [10].

Labbe ve arkadaşı, aksel yüklemeye maruz boruların bindirilerek birleştirilmesi hakkında çok amaçlı bir optimizasyon araştırması yapmışlardır. Genel olarak aksel yük taşıyan boruların tek türlü bağlantı elemanı ile birleştirilmesinin optimizasyon yapılandırılmasını yapmışlardır [11].

Çalışmamızda, tabakalı kompozit boruların farklı yama türleriyle birleştirilmesi için gerekli parametrelerin incelenmesi, boru kalınlığı, bindirme uzunluğu, yama malzemesi ve kalınlığı, kompozit tabaka sayısı ve oryantasyon açısı gibi parametrelerin bağlantı dayanımına etkilerinin belirlenmesi amaçlanmaktadır.

### 1.1. Kompozit Malzemelerin Mekanik

Kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için öncelikle kompozit malzemelerde gerilme-şekil değiştirme bağıntısının incelenmesi gerekmektedir. Kompozit malzemelerdeki gerilme-şekil değiştirme bağıntısının temelinde diğer malzemelerde olduğu gibi Hooke kanunu yer almaktadır. Genelleştirilmiş Hooke kanunu üç boyutlu bir cisim için şu şekilde yazılabilir [12-14];

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

Yukarıda matris şeklinde belirtilen gerilme-şekil değiştirme bağıntısı şu şekilde de ifade edilebilir [12-14]:

$$\sigma_k = C_{kj} \varepsilon_j \quad (k, j = 1, 2, \dots, 6) \quad (1.2)$$

Burada  $C_{kj}$  elastiklik katsayılarıdır.

Şekil değiştirme enerjisi yoğunluk fonksiyonu  $U_o$  aşağıdaki gibi belirtilebilir [12-14]:

$$U_o = \int_0^{\epsilon_i} \sigma_i d\epsilon_i \quad (1.3)$$

Denklem 1.2' deki ifade Denklem 1.3'de yerine konur ve integral alınırsa;

$$U_o = \frac{1}{2} C_{ij} \epsilon_i \epsilon_j \quad (1.4)$$

ifadesi elde edilir [12-14].

Tabakalarda kullanılan koordinat sistemi 1-2 olarak isimlendirilir (Şekil 1.1). Burada 1 nolu yön elyaflara paralel yönünü belirtir. 2 nolu yön ise elyaflara dik olan yönü gösterir. x-y koordinat sistemi ile 1-2 yerel eksen koordinat sistemi açılı laminalarda çakışmaz. Bu durumda x-y genel eksen koordinat sistemi ile 1-2 koordinat sistemi arasındaki bağıntı dönüşüm matrisi ile aşağıda belirtildiği gibi sağlanır [12-14].

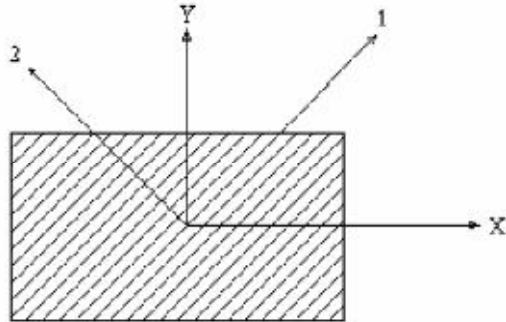
$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

$[T]$  dönüşüm matrisinin ifadesi aşağıda gösterildiği şekildedir [12-14]:

$$[T]^{-1} = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & 2sc \\ s^2 & c^2 & -2sc \\ -sc & sc & c^2 - s^2 \end{bmatrix} \quad (1.6)$$

$$[T] = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & 2sc \\ s^2 & c^2 & -2sc \\ -sc & sc & c^2 - s^2 \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

$$c = \cos(\theta), s = \sin(\theta)$$



**Şekil 1.1** Tabakalarda kullanılan eksen takımları [12-14]

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1}[Q] \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (1.8)$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12}/2 \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy}/2 \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12}/2 \end{bmatrix} = [R][T][R]^{-1} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy}/2 \end{bmatrix} \quad (1.10)$$

[R] Reuter matrisidir ve ifade şekli aşağıda gösterilmiştir [12-14]:

$$[R] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (1.11)$$

x-y koordinat eksen takımında gösterilen gerilme-şekil değiştirme bağıntısı ise aşağıda gösterildiği gibi olur [12-14]:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1}[Q][R][T][R]^{-1} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (1.12)$$

## 1.2.Kompozit Malzemeler için Hasar Kriterleri

Başarılı bir yapının tasarımı emniyetli ve verimli malzemelerin kullanımını gerektirir. Teoriler, hasar kriterleri için bir malzemedeki gerilme durumları kıyaslanarak geliştirilmiştir. Hasar kriterleri sadece ifadelerle ortaya konmamış olup, bunlarla ilgili uygulamalar deneylerle de doğrulanmıştır [12-14].

Tabakaların mukavemeti her bir tabakanın mukavemetiyle ilişkilendirilmiştir. Bu, tabakaların mukavemetini bulmak için basit ve ekonomik bir metottür. Bir açılı tabakanın hasar çalışması için çeşitli teoriler geliştirilmiştir. Bu teoriler genel olarak tek yönlü tabakaların normal ve kesme dayanımlarının üzerine temellendirilmiştir [12-14].

Kompozit malzemelerin yerel eksenindeki (1-2-3) ekseninde maksimum kayma gerilmeleri, maksimum normal gerilmeleri, maksimum birim uzama ve maksimum kayma açıları aşağıdaki gibi gösterilmektedir [12-14];

- $\sigma_1^C$  : Maksimum basma dayanımı (1 yönünde)
- $\sigma_1^T$  : Maksimum çekme dayanımı (1 yönünde)
- $\sigma_2^C$  : Maksimum basma dayanımı (2 yönünde)
- $\sigma_2^T$  : Maksimum çekme dayanımı (2 yönünde)
- $\sigma_3^C$  : Maksimum basma dayanımı (3 yönünde)
- $\sigma_3^T$  : Maksimum çekme dayanımı (3 yönünde)
- $\tau_{12}^S$  : Maksimum kayma dayanımı (1-2 yönünde)
- $\tau_{23}^S$  : Maksimum kayma dayanımı (2-3 yönünde)
- $\tau_{13}^S$  : Maksimum kayma dayanımı (1-3 yönünde)
- $\epsilon_1^C$  : Maksimum basma birim uzaması (1 yönünde)
- $\epsilon_1^T$  : Maksimum çekme birim uzaması (1 yönünde)
- $\epsilon_2^C$  : Maksimum basma birim uzaması (2 yönünde)
- $\epsilon_2^T$  : Maksimum çekme birim uzaması (2 yönünde)
- $\epsilon_3^C$  : Maksimum basma birim uzaması (3 yönünde)
- $\epsilon_3^T$  : Maksimum çekme birim uzaması (3 yönünde)
- $\gamma_{12}^S$  : Maksimum kayma açısı (1-2 yönünde)
- $\gamma_{23}^S$  : Maksimum kayma açısı (2-3 yönünde)
- $\gamma_{13}^S$  : Maksimum kayma açısı (1-3 yönünde)

### 1.2.1. Maksimum gerilme teorisi

Maksimum hasar teorisi Tresca tarafından, maksimum kayma gerilme teorisi Rankine tarafından maksimum normal gerilme teorileri ile ilişkilidir. Bir tabaka üstüne etki eden gerilmeler, yerel koordinat eksenindeki (1-2-3) normal ve kayma gerilmeleriyle çözümlenebilmektedir. Kompozit tabakalardaki normal ve kayma gerilmeleri aşağıdaki gibi olduğu takdirde kompozit malzemelerde hasar oluşmamaktadır [12-14].

$$\begin{aligned}
& - \sigma_1^C < \sigma_1 < \sigma_1^T \\
& - \sigma_2^C < \sigma_2 < \sigma_2^T \\
& - \sigma_3^C < \sigma_3 < \sigma_3^T \\
& - \tau_{12}^S < \tau_{12} < \tau_{12}^S \\
& - \tau_{23}^S < \tau_{23} < \tau_{23}^S \\
& - \tau_{13}^S < \tau_{13} < \tau_{13}^S
\end{aligned} \tag{1.13}$$

### 1.2.2. Mukavemet oranı

Bu teoride maksimum gerilme teorisi gibi bir hasar teorisidir. Bu teoride Mukavemet oranının (SR) belirlenmesi hasar hakkında bize bilgi vermektedir. Mukavemet oranı aşağıdaki gibi belirlenir [12-14];

$$SR = \frac{\text{Uygulanabilecek maksimum yük}}{\text{Uygulanan yük}} \quad (1.14)$$

Eğer  $SR > 1$  ise, tabakalar emniyetlidir ve hasar oluşmamıştır.  $SR < 1$  ise tabakalar emniyetli değildir ve hasar oluşmuştur.  $SR = 1$  ise, hasar yüküne ulaşmıştır [12-14].

### 1.2.3. Maksimum şekil değiştirme teorisi

Bu teori, Tresca tarafından maksimum kayma gerilmesi teorisi ve St. Venant tarafından maksimum normal gerilme teorisi üzerine temellendirilmiştir. Bir tabaka üstüne etki eden gerilmeler, yerel koordinat eksenindeki (1-2-3) normal ve kayma gerilmeleriyle çözümlenebilmektedir. Aşağıda gösterilen şartları sağlaması durumunda malzemede hasar oluşmamaktadır [12-14].

$$\begin{aligned} -\varepsilon_1^C < \varepsilon_1 < \varepsilon_1^T \\ -\varepsilon_2^C < \varepsilon_2 < \varepsilon_2^T \\ -\varepsilon_3^C < \varepsilon_3 < \varepsilon_3^T \\ -\gamma_{12}^S < \gamma_{12} < \gamma_{12}^S \\ -\gamma_{23}^S < \gamma_{23} < \gamma_{23}^S \\ -\gamma_{13}^S < \gamma_{13} < \gamma_{13}^S \end{aligned} \quad (1.15)$$

### 1.2.4. Tsai–Hill hasar teorisi

Bu teori, Von-Mises' in çarpılma enerjisinin hasar teorisi üzerine temellendirilmiştir. Bu teoriye göre kompozit malzemedeki tabakalar üzerindeki gerilme dağılımı, aşağıdaki formülasyonu sağlıyorsa malzemede hasar meydana gelmez [12-14].

$$\begin{aligned} (G_2 + G_3)\sigma_1^2 + (G_1 + G_3)\sigma_2^2 + (G_1 + G_2)\sigma_3^2 - 2G_3\sigma_1\sigma_2 - 2G_2\sigma_1\sigma_3 \\ - 2G_1\sigma_2\sigma_3 + 2G_4\tau_{23}^2 + 2G_5\tau_{13}^2 + 2G_6\tau_{12}^2 < 1 \end{aligned} \quad (1.16)$$

$$G_1 = \frac{1}{2} \left[ \frac{2}{(\sigma_2^T)^2} - \frac{1}{(\sigma_1^T)^2} \right],$$

$$G_2 = \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{(\sigma_1^T)^2} \right],$$

$$G_3 = \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{(\sigma_1^T)^2} \right],$$

$$G_6 = \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{(\tau_{12})^2} \right].$$

Tek yönlü tabaka, düzlem gerilme altında olduğu varsayılarak,

$$\sigma_3 = \tau_{13} = \tau_{23} = 0$$

olur.

### 1.2.5. Tsai–Wu hasar teorisi

Bu teori, Beltrami'nin toplam şekil değiştirme enerjisi hasar teorisi üzerine temellendirilmiştir. Tsai–Wu hasar teorisi, kompozit malzemedeki tabakalarda düzlem gerilme durumunda oluşan gerilmelerin aşağıdaki denklemi sağlaması halinde malzemenin hasara uğramadığı ileri sürülmüştür [12-14].

$$H_1 \sigma_1 + H_2 \sigma_2 + H_6 \tau_{12} + H_{11} \sigma_1^2 + H_{22} \sigma_2^2 + H_{66} \tau_{12}^2 + 2H_{12} \sigma_1 \sigma_2 < 1 \quad (1.17)$$

$$H_1 = \frac{1}{\sigma_1^T} - \frac{1}{\sigma_1^C},$$

$$H_{11} = \frac{1}{\sigma_1^T \sigma_1^C},$$

$$H_2 = \frac{1}{\sigma_2^T} - \frac{1}{\sigma_2^C},$$

$$H_{22} = \frac{1}{\sigma_2^T \sigma_2^C},$$

$$H_6 = 0$$

$$H_{66} = \frac{1}{(\tau_{12})^2}$$

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma,$$

$$H_{12} = \frac{2}{\sigma^2} - \frac{(H_1 + H_2)}{\sigma} - \frac{1}{2}(H_{11} + H_{22} + H_{66})$$



### 1.2.6. Hashin hasar teorisi

Hashin hasar teorisi basma ve çekmede elyaf hasarı, matriksin kırılma modlarını ortaya çıkarmak için ortaya çıkarılan bir teoridir [12- 16].

Matriksdeki çekme hasarı aşağıdaki durumlar olduğu takdirde meydana gelir [12- 16].

$$\sigma_2 > 0 \text{ ise,}$$

$$\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_2^T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{\tau_{12}^S}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{\tau_{23}^S}\right)^2 \geq 1 \quad (1.18)$$

Matriksdeki basma hasarı aşağıdaki durumlar olduğu takdirde meydana gelir [12- 16].

$$\sigma_2 < 0 \text{ ise,}$$

$$\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_2^C}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{\tau_{12}^S}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{\tau_{23}^S}\right)^2 \geq 1 \quad (1.19)$$

Elyaf- matriks arasındaki kayma hasarı aşağıdaki durum sağlandığı takdirde meydana gelir [12- 16].

$$\sigma_1 < 0 \text{ ise,}$$

$$\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_1^C}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{\tau_{12}^S}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{\tau_{13}^S}\right)^2 \geq 1 \quad (1.20)$$

Elyaf çekme hasarı aşağıdaki durum sağlandığı takdirde meydana gelir [12- 16].

$$\sigma_1 > 0 \text{ ise,}$$

$$\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_1^T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{\tau_{12}^S}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{\tau_{13}^S}\right)^2 \geq 1 \quad (1.21)$$

Elyaf çekme hasarı aşağıdaki durum sağlandığı takdirde meydana gelir [12- 16].

$$\sigma_1 < 0 \text{ ise,}$$

$$\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_1^C}\right) \geq 1 \quad (1.22)$$

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

Mühendislik çalışmalarında malzemelerde zamanla hasarlar oluşabilmektedir. Tabakalı kompozit boru malzemelerinin mühendislik alanında kullanımı yaygınlaşmaktadır. Kompozit boruların kullanım yerlerine göre farklı birleştirme yöntemlerinin belirlenmekte ve bu malzemelerin mühendislik uygulamalarında ve sanayide kullanım yerlerine ve çalışma şartlarına göre mekanik özelliklerinin belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Kompozit borular ve kompozit boruların birleştirme teknikleri konusunda birçok çalışma yapılmıştır.

Kitching ve arkadaşı, cam takviyeli eğik plastik kompozit boruların iç basınca, iç ve dış düzlemde eğilmeye maruz bırakıldığı durumda, beş dik açılı çoklu eğik kompozit borulardaki gerilme dağılımlarının ölçümlerini yapmışlardır ve buldukları deneysel ve teorik sonuçları karşılaştırmışlardır[17].

Alman ve arkadaşları, farklı metal folyolar arasındaki ara yüzde yüksek sıcaklık sentezi ve kendiliğinden yayılan indüksiyonla metal ve intermetalik laminer kompozitler üretmişler. Onların oda sıcaklığında gerilme davranışlarını incelemişlerdir [18].

Imanaka ve arkadaşları, yapıştırıcı ile birleştirilmiş CFRP boru / çelik mil bağlantılarının yorulma dayanımlarını etkileyen temel bir parametreyi araştırmak için bir seri numuneyi döndürerek eğme yorulma testlerini farklı boru kalınlıklı ve farklı bindirme uzunluklu bağlantılar üzerine çalışmışlardır. Yapıştırıcı tabakadaki gerilme dağılımlarını sonlu elemanlar metodu analizleri ile belirlemişlerdir. [19]

Gargiulo ve arkadaşları, fiber sarım açılarının kompozit boruların hasar yükü üzerine etkilerini araştırmışlardır. Deneysel sonuçları kıyaslamak için örnek problemlerin hasar tahminini farklı hasar kriterlerinin kullanıldığı sonlu elemanlar ve ince kabuk analizlerini uygulayarak yapmışlardır [20].

Matemilola ve arkadaşı, anizotropik kompozit silindiri, basit destekli çarpma etkisini belirlemek için analitik bir çözüm geliştirmişlerdir. Silindir ve elastik çarpma arasında uyumluluk durumundan temas kuvvetini elde etmişlerdir [21].

Adali ve arkadaşı, iç ve dış basınç altında ince hibrit kompozit silindirleri modellemişler ve çalışmalarında maksimum gerilme kriterleriyle belirlenmiş hasar basıncının alt sınır değeri olarak tabii tutulduğu uygun değerlerde kompozit silindirler tasarlamışlardır [22].

Chaudhuri ve arkadaşı, uzun kalın kompozit silindir kabuklarındaki oluşan kesme türünün kararsız yayılımının tahmini için tamamen lineer olmayan bir analiz üzerine araştırma yapmışlardır [23].

Huysmans ve arkadaşları, gelenekselleşmiş tabakalama methodlarının eksikliklerini ortadan kaldırmak için çalışmalar yapmışlardır. Boru dış yüzeyi etrafına sonradan sarılan prepreg bantlarını kullanarak yapıştırıcı tipi bağlantı elemanı oluşturmuşlardır [24].

Tzeng, değişen basınca maruz kompozit silindirdeki dinamik davranışlar tarafından oluşturulan kırılma davranışını araştırmıştır [25].

Huysmans ve arkadaşları, iç basınç yükü altında cam fiber takviyeli plastik borular için yeni geliştirilmiş bir birleştirici türü üzerine üç boyutlu sonlu elemanlar analizi yapmışlardır. Birleştirici eleman içindeki gerilme dağılımları ile birleştirici eleman köşelerinde ve boru içinde yer alan gerilme yoğunluklarının homojen olmadığını göstermişlerdir [26].

Hyer ve arkadaşı, eliptik kompozit silindirlerin iç basınca tepkisini göstermek için Kantorovich metodu, Rayleigh-Ritz işlemi metodu ve toplam potansiyel enerjinin minimize metodu üzerine dayalı yarı analitik bir çözüm geliştirmişlerdir [27].

Sun ve arkadaşları, kompozit basınçlı kapların bir türü olan filament sarılı katı roket motor gövdelerinin patlama basıncı ve gerilmeleri konusunda araştırma yapmışlardır. Çalışmalarında, hasar analizi için maksimum gerilme hasar kriteri ve sertlik degradasyon modelini kullanmışlardır [28].

Knox ve arkadaşları, dış mekanik yüklemelere maruz, yapıştırılarak birleştirilmiş kompozit boru bağlantılarının yorulma performansını deneysel olarak çalışmışlardır [29].

Zhao ve arkadaşları, yerel katmanlara ayrılmış çok tabakalı kompozit silindirlerin gerilme analizleri konusunda çalışma yapmışlardır. Problemleri için doğrusal türevli fark denklemlerinin geliştirildiği gerçekçi bir analitik model önermişlerdir [30]. Ayrıca sınırlı bir bölge üzerindeki kırılmış elyafli çok tabakalı kompozit silindirin de gerilme analizlerini yapmışlardır [31].

Verijenko ve arkadaşları, iç ve dış tabakalar arası basınç altında silindiriksel anizotropiye sahip çok tabakalı basınç kaplarının gerilme analizlerini araştırmışlardır. Çalışmalarında, iç ve dış basınç altındaki tabakalı ortotropik basınçlı kap için tam analitik çözümler elde etmişlerdir [32].

Xia ve arkadaşları, tabakalandırılmış filament sarımlı yapılardan üretilmiş kompozit boruların mekanik özelliklerini araştırmışlardır. İç basınca maruz kalmış kompozit boruların gerilme ve deformasyon çözümlerini tam elastik çözüme sahip üç boyutlu anizotropik elastiklik üzerine temellendirmişlerdir. Boruların sarım açıları için her tabakanın dikkate alındığı üç farklı oryantasyon açıları düşünmüşler ve her tabakanın yarıçapının aynı olmadığını belirtmişlerdir [33]. Başka bir çalışmada, eğme momenti altında tabakalandırılmış filament sarımlı kompozit boruların tam çözümünü klasik tabaka-levha teorisi üzerine temellendirmişlerdir. Mevcut analitik yöntemi kullanarak, filament sarımlı elyaf takviyeli tabakalı boruların detaylı bir şekilde gerilme-şekil değiştirme tepkilerini ve sapmalarını araştırmışlardır [34].

Parnas ve arkadaşı, elyaf takviyeli kompozit basınçlı kapların davranışlarını önceden tahmin etmek ve tasarlamak için analitik bir çözüm geliştirmişlerdir. Elastik problem formülasyonunda klasik tabakalar teorisini ve genelleştirilmiş düzlem gerilme modelini kullanmışlardır. Bazı üç boyutlu hasar teorilerini, basınçlı kabın maksimum açısal hızı, maksimum eksenel kuvveti, patlama basıncı ve sarım açısı için en uygun değerleri elde etmek için kullanmışlardır [35].

Matsunaga, hem normal gerilme hemde transvers kesmenin etkilerinin hesabını içine alan global yüksek dereceli eğri teorisini kullanarak, mekanik ve termal yüklemeye maruz çapraz tabakalı kompozit ve tabakalı dairesel eğrilerin gerilme ve yer değiştirmelerini analiz etmiştir [36].

Huang, polimer kompozit silindirin nihai eğme mukavemetini araştırmış ve termal artık gerilmelerin dahil edilmiş ve dahil edilmemiş tahmini sonuçlarını karşılaştırmıştır. Termal artık gerilmelerin kompozit silindirin yük-bükülme eğrisinin sonraki kısımların da marjinal bir etkiye sahip olduğunu bulmuştur [37].

Liu ve arkadaşları, çift katmanlı tüp için hidrolik genleşme ilkesi konusunda çalışmışlardır. Hidrolik şekillendirme süresi boyunca çift katmanlı tüpün kuvvet durumunu analiz etmişlerdir. Elastisite ve plastisite teorilerini kullanarak tüplerin iç ve dış kısımları için gerilme ve şekil değiştirmeleri değerlendirmişlerdir [38].

Tarakçioğlu ve arkadaşları, değişen iç basınç altında filament sarımlı kompozit boruların yorulma davranışını incelemişlerdir. Elyaf cam/epoksi malzemelerinden yapılmış kompozit boruları, uçlarının açık olduğu durumlar altında test etmişlerdir. Test örneklerinde  $\pm 55^{\circ}$  sarım açılarına sahip dört tabakalı kompozit borular kullanmışlardır [39].

Farshad, iç hidrostatik basınç altında çok tabakalı boruların uzun süreli davranışlarının tahmini için yeni bir metodoloji oluşturmuştur. Karesel/lineer gerilim analizlerinin birleşimi ile çok katmanlı kalın duvarlı boruların üç boyutlu teorisinin kullanıldığı bir işlem kullanmıştır [40].

Sayman, hidro-termal yükleme altında kalın ya da ince çok tabakalı kompozit silindirler için genel bir gerilme analizi geliştirmiştir. Tabakalarda simetrik olan ve simetrik olmayan oryantasyon açılarını kullanmıştır. Bununla birlikte düzlem şekil değiştirme için kompozit boru uçlarının kapalı ve açık durumlarını dikkate alarak çözümler gerçekleştirmiştir. Termal yüklemeler için düzgün ve parabolik dağılımları tercih etmiştir [41].

Kruijer ve arkadaşları, termoplastik takviyeli boruların mekaniksel analizlerini yapmışlardır. Polietilen ve aramidten üretilmiş borunun basınç altındaki kendine özgü deformasyonunu incelemiştirler [42].

Zou ve arkadaşı, denizden çıkarılan petrol ve gaz endüstrisinde yaygınlaşan kompozit boruların çeşitli bağlantı konfigürasyonlarla bu boruları birleştirme konusunda çalışmalar yapmışlardır. Boru sistemlerinde yaygın yükleme durumlarından biri olan burulmaya maruz çeşitli bağlantı konfigürasyonlarını araştırmışlardır. Boru ve soket tipi sandviç sarımlı bağlantıların yapıştırıcı tabakalarındaki gerilme alanlarını değerlendirmek için teorik analizler kullanmışlardır [43].

Marinucci ve arkadaşı, iç basınç altında oluşan hasar için yüklenmiş asimetric ve dengelenmemiş kompozit silindirlerdeki elyaf ve matriksdeki hasarları incelemiştirler. Silindirlerin kırılmış yüzeylerinin optik ve elektron mikro grafiği taramasını sunmuşlardır. Enine ve boyuna hasarlar olarak fiber hasarını, enine çatlakları, delaminasyonları ve matriks kusurları tarafından oluşturulan hasarları göstermişlerdir. Ayrıca kırılma türlerini ve modlarını da belirlemiştirler [44].

Chen ve arkadaşları, üç fazlı piyozoelektrikli kompozit silindirlerde gerilme alanı için kesin bir çözüm elde etmişlerdir. Çalışmalarında, üç fazlı kompozit silindirin her bir durumunu, dönüşüm tekniği ile birleştirilmiş analitik süreklilik metodu üzerine temellendirmişlerdir. Açık bir şekilde sıcaklık ve gerilme fonksiyonlarının genel ifadelerini türetmişler. Gerilme ve elektro yer değiştirmenin doğru orantılı olduğunu ortaya çıkarmışlardır [45].

Casari ve arkadaşları, kalın filament sarımlı tüplerde artık gerilmelerin karakterizasyonu için bir metot üzerine çalışmışlardır. Çalışmalarında, yatay eksene

göre  $\pm 35^0$ ,  $\pm 55^0$  ve  $\pm 85^0$  dereceli açılarla sarılmış T700 karbon elyaf, R cam elyaf ve E cam elyaf üzerine temellendirilmiş ıslak sarımlı epoksi tüplerini içeren üç malzemeyi dikkate almışlardır. Kompozit borularda çalışma ömrü önemli olduğundan, iç gerilmeleri ölçmüşler ve onları nümerik öngörülerle kıyaslamışlardır [46].

Theotokoglou, kalın kompozit tüplerin sonlu elemanlar analizi konusunda çalışmıştır. Çalışmasında, süper pozisyon prensibi üzerine temellendirilmiş delaminasyonun halka ve şerit türlerini nümerik olarak araştırmıştır. Delaminasyonun iki türü için iki boyutlu sonlu elemanlar modeli oluşturmuş ve dış basınç yüklemesine rağmen, tabakalar arası şekil değiştirme enerjisi yayılım oranı tahminlerini yapmıştır [47].

Tabakov ve arkadaşı, silindiriksel kabuğun uçlarını kapatarak radyal, dairesel ve kesme gerilmelerinin belirlendiği gerilme fonksiyonu yaklaşımını kullanarak, eksiksiz elastik çözümler elde etmişlerdir. Herhangi bir kalınlıkta ve isteğe bağlı tabaka sayısı ile çok tabakalı basınçlı kabın doğru bir şekilde analizini yapmak için cebirsel denklemler sistemini doğrulamışlardır. Literatürde bulunan diğer üç boyutlu çözümlerle de karşılaştırmışlardır [48].

Lees, cam elyaf takviyeli polimer boruların korozyon direncini incelemiş ve yüksek aksenal yüklerin ve düşük iç basıncın birleşimine maruz kalan bağlantıların performansını araştırmıştır [49].

Cheng ve arkadaşları, aktif bir şekilde yapışkan tabakalardaki gerilme yoğunluğunu azaltmak için, bağlantı coupler' deki sensör olarak piezoelektrik tabakaların bütünleştirilmesiyle yeni şık bir kompozit boru birleştirme sistemi geliştirmişlerdir. Aksenal yük altında bağlantı sistemlerinin karakteristiklerini araştırmışlardır [50].

Kruijer ve arkadaşları, çelik takviyeli termoplastik boruların zamana bağlı davranış analizlerini yapmışlardır. Bu analizler sonucu çelik takviyeli termoplastik boruların analiz edilmeye ve tanımlanmaya ihtiyaç duyulan zamana bağlı davranışlarını göstermişlerdir [51].

Castello ve arkadaşı, termal yalıtımlı yüksek yapısal direncin birleştirildiği açık denizdeki petrol ve gaz taşımak için kullanılacak dairesel polipropilenden ayrılmış iki çelik tabakadan oluşturulmuş sandviç borular konusunda çalışmışlardır. Açık denizdeki üretimde çalışacak tipte iç çaplı sandviç boruları boyuna bükme ve

dış basınç altında çelik ve polimer arasındaki yapıştırıcı tabakanın taşıma gücü üzerine etkisini nümeriksel olarak analiz yapmışlardır [52].

Buarque ve arkadaşı, cam fiber/vinil-ester kompozit boruların gerilme direnci üzerine silindirik hataların etkisini araştırmışlardır. Halka test kullanarak özellikleri belirlemişlerdir. Gruplar arasında değişik analizler kullanarak kusurların derinliğinin ve yarıçapının elde edilen sonuçlar üzerinde önemini doğrulamışlardır [53].

Cheng ve arkadaşları, piezoelektrik malzemelerin yüksek elektro-mekanik bağlantı performansı ile birleştirilmesini, tasarlanmasını ve kompozit boruların birleştirme sistemlerinin yapıştırılarak bağlanmasının analizlerini ve tasarımlarını çalışmışlardır. Piezoelektrik tabakaların bütünleştirilmesinin verimliliğini ve kompozitin etkisini teorik olarak doğrulamak için birinci dereceden kayma deformasyon teorisine dayanan bir elektro-mekanik model oluşturmuşlardır [54].

Mertiny ve arkadaşı, çalışmalarında fiber takviyeli polimer kompozit tüplerin avantaj özelliklerini kullanarak, bu tüplerin birleştirildikten sonra yorulma hasarı durumlarını incelemişlerdir. Modelledikleri mekanik model sayesinde tüpte ve bağlantılardaki hasarların ölçülmesini tartışmışlardır [55].

Peck ve arkadaşları 36 FRP kompozit boruları birleştirmişler ve kürleşen boru bağlantılarının mekanik özelliklerini iç basınç testi ve dört nokta destekli eğme testi yaparak değerlendirmişlerdir. Artık özelliklerdeki çeşitliliğin kürleşme derecesini belirlemek için bir mekanizma bulmuşlar ve bu durum daha önce kullanılmış benzer değişkenlikteki kürleşmiş bir kompozit modelin sonlu elemanlar analizi ile doğrulamışlardır [56].

Vedvik ve arkadaşı, sıvı ve gaz ortamında kaçağa ve difüzyona karşı koyabilecek güçlü bir dayanım ve metalik bir astar elde etmek için aç katmanlı tabakalar kullanarak yüksek basınca ve aksel yüklerle dayanıklı filament sargılı kalın duvarlı kompozit borular tasarlamışlardır. Minimum potansiyel enerji yaklaşımını kullanarak, tabakalarda yaklaşık gerilme ve şekil değiştirme alanlarını elde etmişlerdir. Ortalama değerlerin öngörüldüğü metotlarla da kıyaslayarak hasar gelişiminde daha iyi bir fiziksel yorum elde edebilmişlerdir [57].

Hu ve arkadaşı, hidrojen depolamada kullanılan kompozit silindirlerin yüksek basınç uygulaması ve emniyetli kurulumu için kırılma davranışlarını incelemişlerdir. Sonlu elemanlar tekniği ve kırılma mekaniğini kullanarak silindir astarlardaki

eksenel yüzey akışlarını araştırmak için kapsamlı bir sonlu elemanlar modeli geliştirmişlerdir [58]

Onder ve arkadaşları, maksimum patlama basıncı için simetrik ve simetrik olmayan kabukları en uygun açılı tabaka oryantasyonları ile tasarlamışlardır. Değişen iç basınç altında filament sarımlı kompozit basınçlı kapların patlama basıncını araştırmışlardır. Filament sarımlı kompozit basınçlı kaplarda sarım açısının ve sıcaklığın etkilerini incelemişlerdir. Sonlu elemanlar metodu ve deneysel çalışmalar ile en uygun sarım açılarını doğrulamışlardır. Tüplerin patlama hasar basıncını doğrulamak için Tsai-Wu hasar kriterini ve maksimum şekil değiştirme ve gerilme teorilerini kullanmışlardır [59].

Gemi ve arkadaşları, iç basınç altında filament sarımlı kompozit boruların yorulma hasar davranışlarını incelemişlerdir. Çalışmalarında,  $\pm 75^0$  sarım açılı dört tabakaya sahip ve E-cam/epoksiden yapılmış filament sarımlı borular kullanmışlardır. Yapılan testlerde, oluşan hasarlardan S-N eğrisini elde etmişlerdir [60].

Bakaiyan ve arkadaşları, takviyeli tabakalarda farklı açılara ve anizotropik davranışlara sahip filament sarım teknolojisiyle üretilmiş kompozit borular üzerine çalışmışlardır. Çalışmalarında, sıcaklık gradyanı, iç basınç altında boruların deformasyonları ve termal gerilmeler için üç boyutlu anizotropik elastiklik üzerine temellendirilmiş tam elastik çözüm konusunda çalışmışlardır. Mevcut teoriyi kullanarak, farklı açılara sahip tabakalı boruların tasarımı için gerilme, şekil değiştirme ve deformasyon dağılımlarını araştırmışlardır [61].

Hutar ve arkadaşları, farklı malzemelerin içerdiği tabakalardan oluşturulmuş borular üzerine çalışmalar yapmışlardır. Çalışmalarında, kırılma tokluğunu etkileyen parametreleri incelemişlerdir. Ayrıca gerilme yoğunluk faktörü ve biaxiality faktörünün hesaplamalarını yapmışlardır [62].

Tsukrov ve arkadaşı, homojen sınır şartlarına maruz kalan silindirik olarak ortotropik tabakalı çok tabakalandırılmış kompozit silindirdeki yer değişim ve gerilme alanları için analitik ifadeleri incelemişlerdir. Tabakalar arasında mükemmel yapıştırma varsayımlarını çözümlerle doğrulamışlardır. Transfer matriks yaklaşımını kullanarak sınır şartlarından bulunan integrasyon sabitlerinin terimlerin de yer değişimini, şekil değiştirmeyi ve gerilmeyi ifade etmişlerdir [63].

Hutaş ve arkadaşları, çatlak koruyucu tabakanın çok tabakalı kompozit boruların bütünlüğü üzerine etkisinin analizlerini yapmışlardır. Çalışmalarında, iki



farklı homojen malzemelerin kullanıldığı iki malzeme içeren yapıların özel bir durumu olarak çok tabakalı boru modellemiştir. Tanımlanan iki malzeme arasındaki ara yüzey boyunca bir çatlakın ilerlemesini incelemiştir [64].

Jahromi ve arkadaşları, dikkate değer yüksek artık gerilmelerin neden olduğu tabakalandırılmış metal-seramik kompozit kaplarla metal kapları kıyaslama çalışması yapmışlardır. Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemedan yapılmış kompozit kapları incelemiştir. Değişen plastik ve elastik özellikli malzemeler için değişen malzeme özellikleri metodunun bir uzantısını kompozit kaplardaki artık gerilmeyi hesaplamak için kullanmışlardır [65].

Arellano ve arkadaşları, filament sarımlı kompozit yapıların mekanik tepkilerini genelleştirmek için basitleştirilmiş metotlar ile filament sarımlı kompozitlerin testini yapmışlardır. Dijital görüntü korelasyon ile yer değiştirme alanının ölçülmesiyle düz örnekler kullanarak  $\pm 55^\circ$  açılarında filament sarımlı kompozitlerin şekil değiştirme alanının karakterizasyon çalışmasını yapmışlardır. Sonlu elemanlar metodu simülasyonlarını ve şekil değiştirme gösterge ölçümlerini kıyaslayarak, dijital görüntü korelasyonundan elde edilen şekil değiştirme değerlerini doğrulamayı başarmışlardır [66].

Ansari ve arkadaşları, döngüsel iç basınç ve sıcaklık yüklemelerine maruz kalan çok tabakalı filament sarımlı kompozit boruların gerilme analizini üç boyutlu anizotropik elastisite üzerine temellendirmişlerdir. Zamana bağlı gerilme, şekil değiştirme, deformasyon dağılımlarını sonlu farklar tekniğini kullanarak nümerik olarak elde etmişlerdir [67].

Jiu-sheng ve arkadaşları, sonlu elastisitenin çerçevesinde burulma ve eksenel germe ile birleştirilmiş iç basınca maruz üç tabakalı elyaf takviyeli anizotropik kauçuk boruların geniş deformasyonunun kararsızlık analizini incelemiştir. Eksenel, burulma, iç basınç ve asal germe arasındaki elyaf takviyeli sıkıştırılmaz hiper-elastik malzeme modelini elde etmişlerdir [68].

Parashar ve arkadaşı, fiber takviyeli polimer boruların endüstride kullanılan metalik borulara karşı avantaj özelliklerini araştırmışlardır. Çalışmalarında, bu boruların farklı yükler altındaki hasar mekanizmalarını incelemişler ve sonlu elemanlar analizleriyle fiber takviyeli polimer boruların yapıştırılarak birleştirilmesinin, kırılma mekaniği ve malzeme dayanımına etkilerini araştırmışlardır [69].

Arjomandi ve arkadaşı, sonlu elemanlar metodunu kullanarak tabakalı kompozit borular için nümerik parametrik modelleri araştırmayı gerçekleştirmişlerdir. Sandviç boruların ön burkulma, burkulma ve son burkulma yanıtları üzerine birkaç önemli geometrik, yapısal ve malzeme özelliklerinin çeşitli birleşimlerini kapsayan parametrelerin etkilerini araştırmışlardır [70].

Bouhafs ve arkadaşları, iç basınç altında kalın kompozit boruların mekanik tepkisini çalışmak için analitik bir metot geliştirmişlerdir. Bu metodu, Tsai tarafından önerilen kalın çok tabakalı kompozit silindirler için özel bir model kullanarak tüm sınır koşullarına empoze edilmiş bitişik iki katman arasındaki ara yüzey üzerindeki yüzey gerilimini karşılamak üzere radyal ve aksenal gerilmeleri hesaplamalarda kullanmışlardır. Olasılık analizi üzerine temellendirilmiş çok tabakalı kompozit boruların tasarımının gelişimi için de tartışmışlardır [71].

Yuan ve arkadaşları, uçak gövdelerini bir kompozit silindir olarak idealize edip, onun titreşim akustik özelliklerini hem deneysel hemde nümerik olarak çalışmışlar ve bir kompozit silindirin içteki basıncını minimize edilmesini genetik algoritma ile gerçekleştirmişlerdir [72].

Shamsuddoha ve arkadaşları, birçok çalışmada, elyaf takviyeli polimer temelli kompozitlerin çelik boru tamiratı için etkili kullanıldığını fark etmişler ve elyaf takviyeli kompozit sarımları ile oyulmuş boruları birleştirmek ve hasarları tamir etmek konusunda araştırma yapmışlardır. Çalışmalarında, yer altı, su altı ve havadaki borular için elyaf takviyeli polimer kompozitlerin kullanımının kapsamlı bir incelemesini yapmışlardır [73].

Hutaş ve arkadaşları, iki katmanlı koruyucu ve ana borudan oluşan üç tabakalı kompozit plastik boruda, iç ve dış çatlaklar için gerilme yoğunluk faktörünü sonlu elemanlar gerilme analizi ile hesaplamışlardır. Polietilen basınçlı boruları iç basınç ile yüklemişler ve malzeme özelliklerini adım adım değiştirerek kırılma mekaniği yaklaşımıyla tekil tabakalar arasındaki ara yüzeylerdeki oluşumları incelemişlerdir [74].

Lin ve arkadaşları, sırası ile atmosferik ve hidrolik basınç testinin uygulandığı termo-mekanik koşullar altında kompozit basınçlı kapların mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Atmosferik yorulma testi süresince, basınçlı kabın ve gazın sıcaklığının dikkate değer biçimde değiştiğini termo-mekanik döngüsel yüklemeler altında göstermişlerdir. Ayrıca sıcaklık değişim oranı boyunca da filament sarımlı

reçine matrisi ve bağımlı bileşimli kompozitlerin mekanik özelliklerinin değiştiğini de göstermişlerdir [75].

Rafiee, birçok problemi ortadan kaldırmak için kuvars kum çekirdekli tabakalandırılmış kompozitlere uygun olan ardışık bir hasar modeli geliştirmiştir. Ana parametre olarak kum oranı, tabaka sayısı ve sarım açılarının kullanıldığı istenilen dayanımları hesaplamak için bir bilgisayar kodu yazmıştır. Geliştirilen yöntemin uygunluğunu belirlemek için cam takviyeli polyester boruların basınç sınıflarını ve çaplarını farklı oranlarda incelemiştir [76].

Deniz ve arkadaşları, darbe yüklemelerinin ve deniz suyunun döngüsel iç basınç altında cam-epoksi kompozit boruların yorulma ömrü üzerine etkilerini deneysel olarak araştırmışlardır. Kullanılan boruları filament sarım tekniği ile ürettirmişlerdir. Kompozit örnekleri üç, altı ve dokuz aylık periyodlar için deniz suyu içine daldırarak deniz suyunun etkilerini gözlemlemişlerdir ve yorulma hasar tipini belirlemişlerdir [77].

Parashar ve arkadaşı, fiber takviyeli polimer boru bölümlerinin yapıştırma bağlantısına fiber mimarisi ve fiberlerin istiflenmesinin etkilerini araştırmışlardır. Çalışmalarında, malzeme dayanımı gibi kriter tabanlı kırılma mekanikleri ile bağlantılı sonlu elemanlar analizlerini uygulamışlardır [78].

Aguiar ve arkadaşları, boru hattı analiz uygulamalarında ve genel yükselticilerde genel üç boyutlu geniş yer değiştirmeler altında ara tabakalarda kayma durumlu üç boyutlu çok katmanlı boru kirişlerinin davranışlarını araştırmışlardır. Her tabaka için Timoshenko kirişinin dikkate alındığı yeni bir sonlu elemanlar modeli formüle etmişlerdir [79].

An ve arkadaşları, dış hidro-statik basınç altında sertleşmiş çimentolu kompozitler ile doldurulmuş katmanlı boruların deneysel ve nümerik olarak çökme davranışlarını incelemişlerdir. Dış basınca maruz bırakılarak yapılan çökme analizlerini, hiperbarik basınç odasını kullanarak tabakalı boruların tam ölçekli laboratuvar testlerini yapmışlardır [80].

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

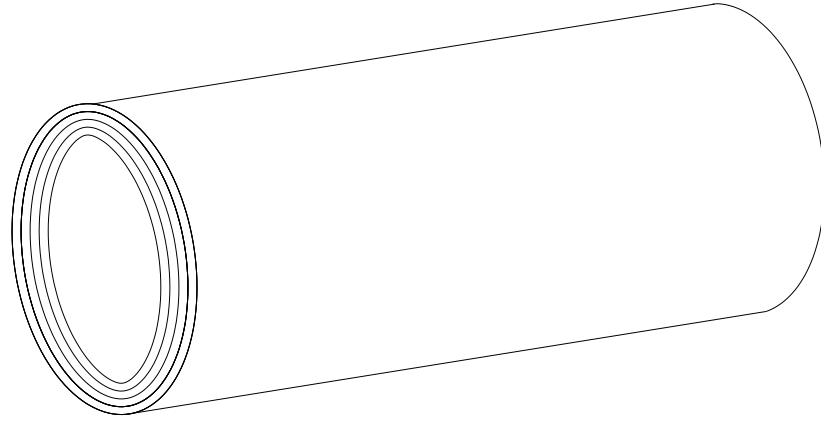
#### 3.1. Kapsam ve İçerik

Bu çalışmada, iç basınca maruz bırakılmış tabakalı kompozit boruların ve tabakalı kompozit boruların farklı birleştirme yöntemleri ile yapıştırılması durumlarının farklı oryantasyonlarda, farklı bindirme uzunluklarında, farklı tabaka sayılarında ve farklı yapıştırıcı malzemeler kullanıldığında mekanik özellikleri belirlenmiştir ve hasar durumları incelenmiştir. Çalışmalar hem nümerik hem deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel olarak yapıştırıcıların ve kompozit boruların mekaniksel özellikleri belirlenmiştir. Deneysel çalışmalarda, 4 tabakalı kompozit boruların ve bu boruların farklı birleştirme yöntemleriyle yapıştırılması sonucu belirlenen modeller hazırlanarak, iç basınca maruz bırakılmıştır ve testleri yapılmıştır. Nümerik çalışmalarda, 4, 6, ve 8 tabakalı kompozit boruların ve bu boruların farklı birleştirme yöntemleriyle yapıştırılması sonucu belirlenen modellerin analizleri yapılmıştır. Ayrıca sonlu elemanlar temelinde çalışan ANSYS 14.5 ticari paket programı kullanılmıştır. Belirlenen problemler için ANSYS 14.5' de parametrik makrolar yazılmıştır. Bu makroların verdiği sonuçların doğruluğundan emin olmak için modellerin deneysel çalışmaları yapılmıştır.

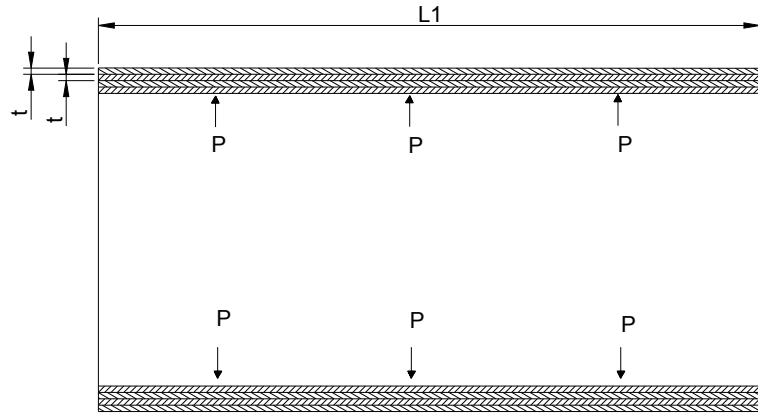
Çalışmada, kompozit borular (Şekil 3.1), alın altına yapıştırılarak birleştirilmiş kompozit borular (Şekil 3.2), kompozit yama kullanılarak yapıştırıcı ile birleştirilmiş kompozit borular (Şekil 3.3) ve iki farklı iç çapa sahip yapıştırıcı kullanarak kademeli olarak birleştirilmiş kompozit borular (Şekil 3.4) olarak dört farklı model çalışılmıştır.

Deneysel çalışmalarda, Ø 102 mm ve Ø 105.4 mm iç çaplara sahip 4 tabakalı kompozit borular kullanılmıştır ve kullanılan kompozit boruların et kalınlıkları 1.5 mm olacak şekilde ürettirilmiştir. Her bir tabakanın kalınlığı (t) 0.375 mm olarak hesaplanmıştır. Şekil 3.1-3.3' de kullanılan borular ve Şekil 3.4' de küçük çapa sahip olan borunun iç çapı Ø 102 mm' dir. Şekil 3.3' de kullanılan yamanın ve Şekil 3.4' de kullanılan büyük çapa sahip borunun iç çapı Ø 105.4 mm' dir. Nümerik modeller oluşturulurken, 4 tabakalı boru modellerinde de bu iç çaplar dikkate alınmıştır. 6 ve 8 tabakalı boruların kullanıldığı modellerde ise küçük çapa sahip boruların iç çapı Ø 102 mm olarak dikkate alınmıştır ve tabaka kalınlığının (t) 0.375 mm olduğunu

düşünülerek tabaka sayısının durumuna göre yama ve büyük çaplı borunun iç çapı belirlenmiştir. Yapıştırıcı tabakanın kalınlığı ( $t_1$ ) 0.2 mm olarak dikkate alınmıştır.

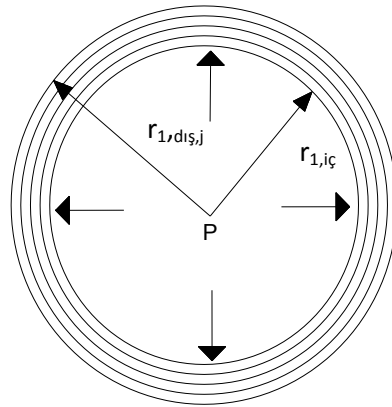


(a)



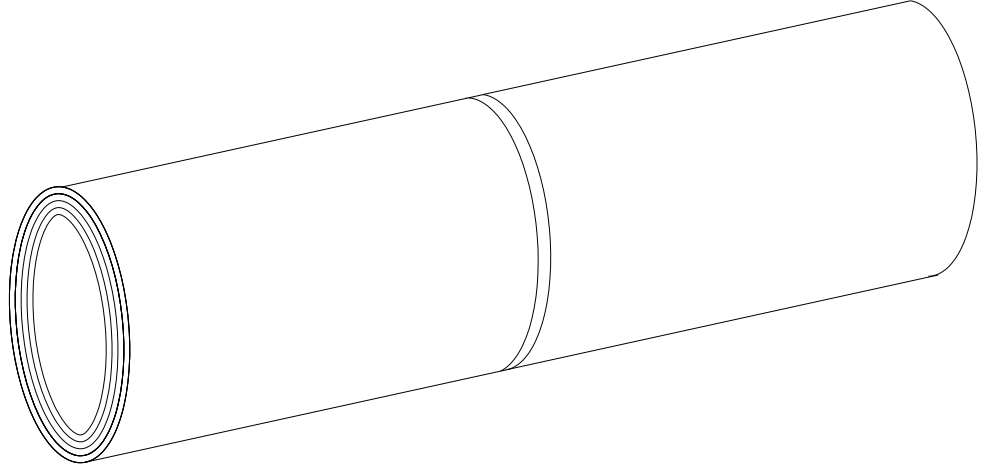
Tabakalı Kompozit Boru

(b)

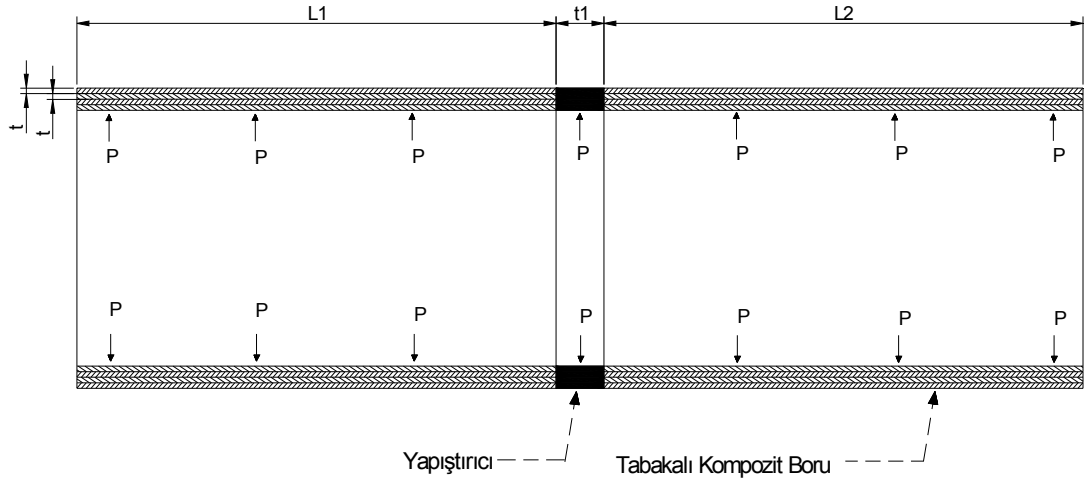


(c)

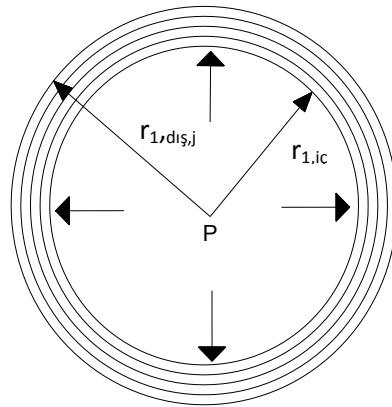
Şekil 3.1. Tabakalı kompozit boru (a), (b), (c)



(a)

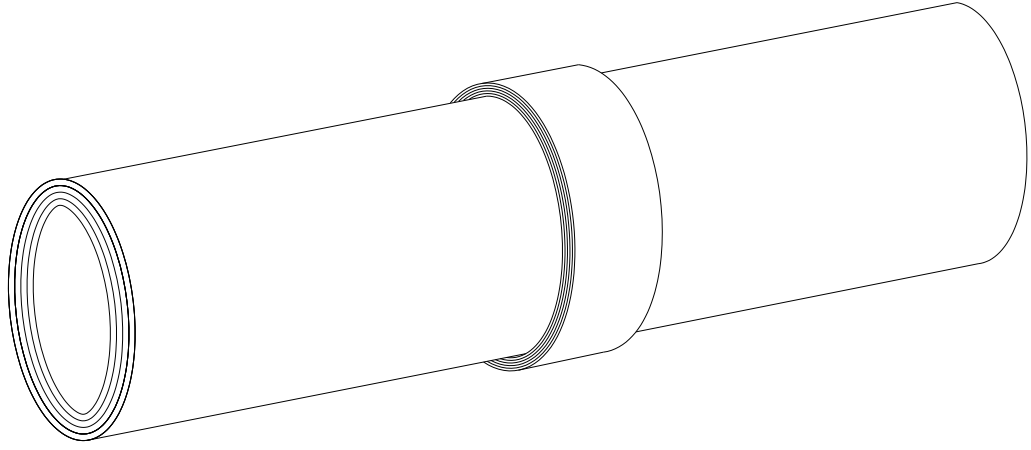


(b)

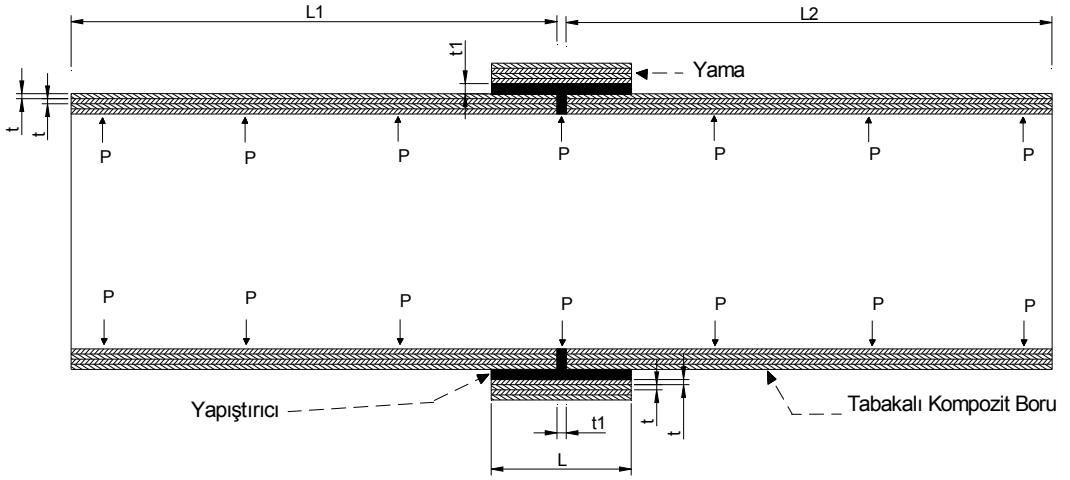


(c)

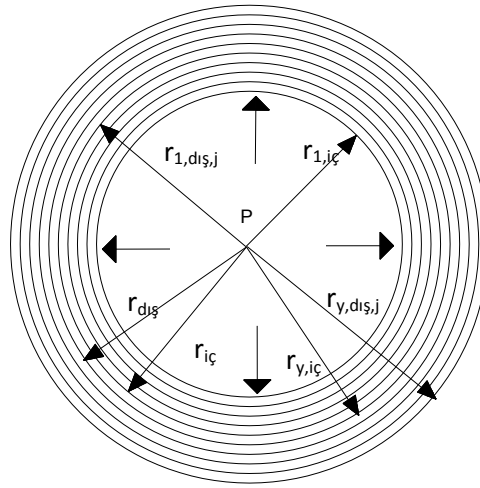
**Şekil 3.2.** Tabakalı kompozit boruların yapıştırıcı malzemelerle alın alına yapıştırılması (a), (b), (c)



(a)

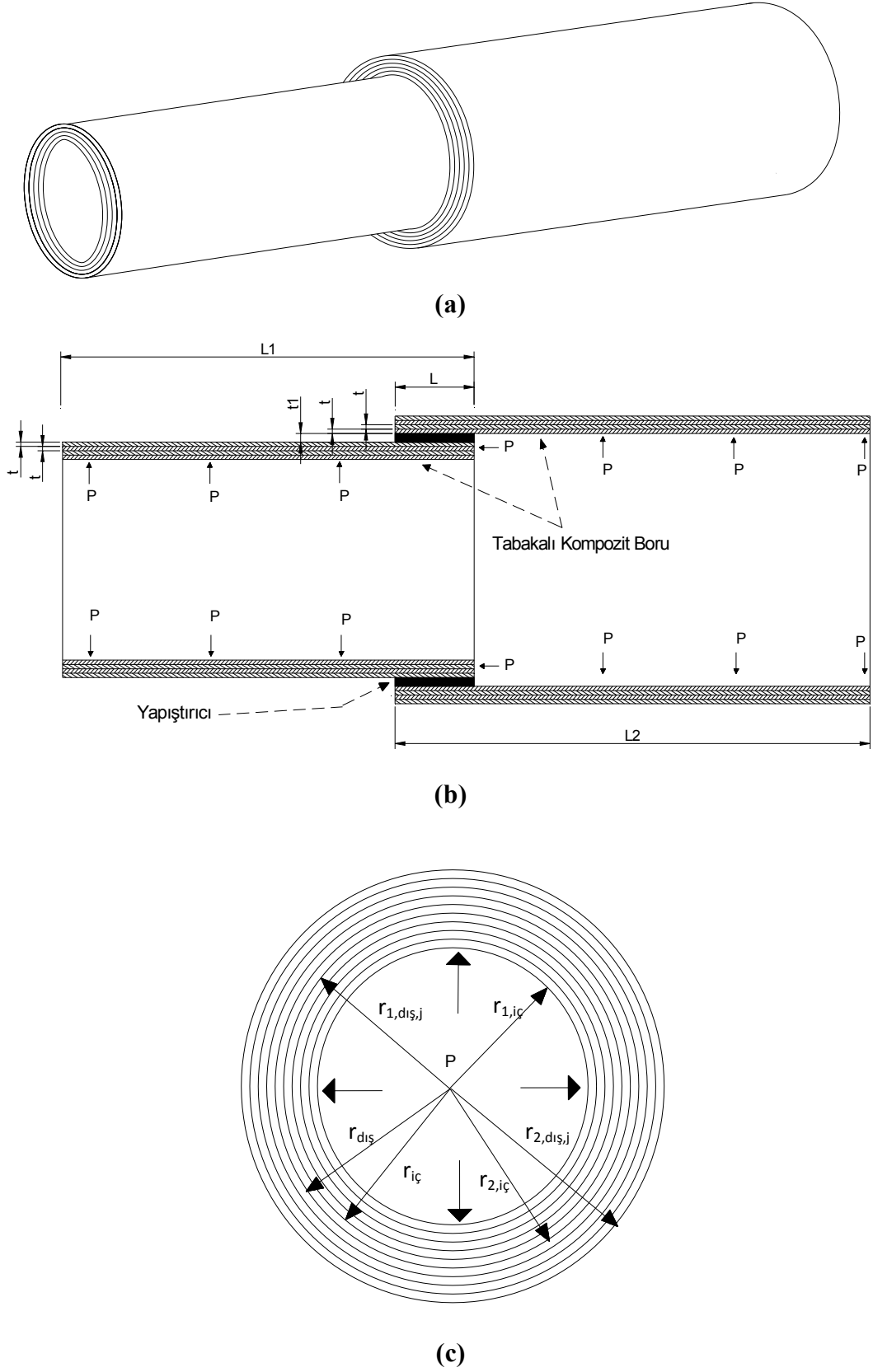


(b)



(c)

**Şekil 3.3.** Tabakalı kompozit boruların gömme kompozit yamalarla yapıştırıcı malzemeleri kullanarak yapıştırıcı malzemelerle birleştirilmesi (a), (b), (c)



**Şekil 3.4.** Tabakalı kompozit boruların yapıştırıcı malzemeleri kullanarak kademeli olarak birleştirilmesi (a), (b), (c)



### 3.2. Çalışmalarda Kullanılan Yapısal Yapıştırıcı Malzemeler

Çalışmalarda iki farklı yapısal yapıştırıcı kullanılmıştır. Yapıştırıcılar DP 410 (Çizelge 3.1) ve DP 490 (Çizelge 3.2) olup, aşağıda belirtilen özelliklere sahiptirler;

**Çizelge 3.1.** DP 410 Yapısal yapıştırıcı özellikleri

DP 410	
Yapışkan cinsi	Epoksi
Viskozitesi	Tiksotropik
Renk	Kirli beyaz
Kuruma Zamanı (dk.)	8-10
Kürleşme Zamanı (dk.)	25-30
Kayma Dayanımı (Al-MPa)	34
Soyma Dayanımı (Al, N/cm)	100

**Çizelge 3.2.** DP 490 Yapısal yapıştırıcı özellikleri

DP 490	
Yapışkan cinsi	Epoksi
Viskozitesi	Tiksotropik
Renk	Siyah
Kuruma Zamanı (dk.)	180
Kürleşme Zamanı (dk.)	200-240
Kayma Dayanımı (Al-MPa)	30.2
Soyma Dayanımı (Al, N/cm)	92

### 3.3. Çalışmalarda Kullanılan Kompozit Malzemeler

Deneyisel çalışmalarımızda 4 tabakalı kompozit borular ve bu boruların farklı birleştirme yöntemleriyle yapıştırılarak oluşturulan modeller kullanılmıştır. Nümerik çalışmalarımızda ise 4, 6 ve 8 tabakalı kompozit boruların ve bu boruların farklı birleştirme yöntemleriyle yapıştırılarak oluşturulan modellerin analizleri yapılmıştır. Deneyisel olarak kompozitlerin mekaniksel özelliklerini belirlemek için kompozit borularla aynı özelliklere sahip kompozit levhalar üretilmiştir. Borularda kullanılan elyaf türü 600 text kalınlıkta cam elyafıdır. Kullanılan matris malzemesi ise EPR 828 EL epoksi reçine EPH 875 sertleştirici ile karıştırılarak oluşturulmuştur. Üretim esnasında borular 1 m üretilmiş ve daha sonra istenilen ölçülerde üretim yapan firmaya kestirilmiştir.

### 3.4. Çalışmalarda Kullanılan Temel Parametreler

Çalışmalarımızda dört farklı model çalışılmıştır. Bu modeller birbirinden farklı olduğunda her biri için farklı sayıda parametre (Çizelge 3.3-3.6) belirlenmiştir.

**Çizelge 3.3.** Tabakalı kompozit boru parametreleri

Tabaka sayıları	Oryantasyon açıları
4	$45^0/-45^0/45^0/-45^0$
	$55^0/-55^0/30^0/-30^0$
	$55^0/-55^0/55^0/-55^0$
6	$45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0$
	$55^0/-55^0/55^0/-30^0/30^0/-30^0$
	$55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$
8	$45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0$
	$55^0/-55^0/55^0/-55^0/30^0/-30^0/30^0/-30^0$
	$55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$

**Çizelge 3.4.** Tabakalı kompozit boruların alın alına yapıştırma parametreleri

Tabaka sayıları	Oryantasyon açıları	Yapıştırıcı
4	$45^0/-45^0/45^0/-45^0$	DP 410, DP 490
	$55^0/-55^0/30^0/-30^0$	DP 410, DP 490
	$55^0/-55^0/55^0/-55^0$	DP 410, DP 490
6	$45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0$	DP 410, DP 490
	$55^0/-55^0/55^0/-30^0/30^0/-30^0$	DP 410, DP 490
	$55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$	DP 410, DP 490
8	$45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0$	DP 410, DP 490
	$55^0/-55^0/55^0/-55^0/30^0/-30^0/30^0/-30^0$	DP 410, DP 490
	$55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$	DP 410, DP 490

**Çizelge 3.5.** Tabakalı kompozit boruların kademeli yapıştırma parametreleri

Tabaka sayıları	Oryantasyon açıları	Yapıştırıcı	Bindirme Uzunluğu (mm)
4	$45^0/-45^0/45^0/-45^0$	DP 410, DP 490	10,15,20
	$55^0/-55^0/30^0/-30^0$	DP 410, DP 490	10,15,20
	$55^0/-55^0/55^0/-55^0$	DP 410, DP 490	10,15,20
6	$45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0$	DP 410, DP 490	10,15,20
	$55^0/-55^0/55^0/-30^0/30^0/-30^0$	DP 410, DP 490	10,15,20
	$55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$	DP 410, DP 490	10,15,20
8	$45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0$	DP 410, DP 490	10,15,20
	$55^0/-55^0/55^0/-55^0/30^0/-30^0/30^0/-30^0$	DP 410, DP 490	10,15,20
	$55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$	DP 410, DP 490	10,15,20

**Çizelge 3.6.** Tabakalı kompozit boruların yama ile yapıştırma parametreleri

Tabaka sayıları	Oryantasyon açıları	Yapıştırıcı	Bindirme Uzunluğu (mm)
4	$45^0/-45^0/45^0/-45^0$	DP 410, DP 490	20,30,40
	$55^0/-55^0/30^0/-30^0$	DP 410, DP 490	20,30,40
	$55^0/-55^0/55^0/-55^0$	DP 410, DP 490	20,30,40
6	$45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0$	DP 410, DP 490	20,30,40
	$55^0/-55^0/55^0/-30^0/30^0/-30^0$	DP 410, DP 490	20,30,40
	$55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$	DP 410, DP 490	20,30,40
8	$45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0$	DP 410, DP 490	20,30,40
	$55^0/-55^0/55^0/-55^0/30^0/-30^0/30^0/-30^0$	DP 410, DP 490	20,30,40
	$55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$	DP 410, DP 490	20,30,40

### 3.5. Deneysel Test Düzenegi

Deney düzenegi iki kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısım 40 litre yağ tankı içeren 300 bar civarında yağ basabilen hidrolik test ünitesi (Şekil 3.5), ikinci kısımda 80 litre yağ depolanabilecek ve patlatma işleminin emniyetli olarak gerçekleştirileceği üniteden oluşmaktadır. Patlatma testleri için 46 numara hidrolik yağ kullanılmıştır. Ayrıca, deneysel çalışmaların daha sağlıklı ve düzenli yapılabilmesi için ve bazı numunelerin testlerini istenilen doğrulukta gerçekleştirebilmek için yardımcı aparatlarda tasarlanmış ve üretilmiştir (Şekil 3.6). Yardımcı aparatlar, yapıştırılmış boruların aynı merkezli olarak bağlanmasını ve boruların açık olan uç kısımların plakalar arasına sıkıştırılarak kapatılırken, hasara uğramadan sağlıklı bir şekilde bağlanmasını sağlamaktadır. Özellikle kademeli olarak yapıştırma testlerinde bu aparatlar kullanılmıştır. Çünkü bu işlemde birleştirilen boruların iç içe geçmesi olayından dolayı plakalar arasına sıkıştırma işlemi sırasında yapıştırıcıların hasara uğrama durumu olmaktadır. Şekil 3.6'daki aparatlar kullanılarak, bu sorun ortadan kaldırılmıştır.



Şekil 3.5. İç basınca maruz bırakılarak boru patlatma test ünitesi



Şekil 3.6. Patlatma ünitesinde kullanılan yardımcı aparatlar

### 3.6. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Birçok alanda ileri mühendislik sistemlerinin modellenmesi ve simülasyonunda sonlu elemanlar yöntemi önemli bir hale geldi [81]. Sonlu elemanlar yöntemi, genel sınır şartlarına tabi karmaşık etkilere sahip mühendislik problemlerinin yaklaşık çözümleri için güçlü bir hesaplama tekniği olarak Turner ve arkadaşları tarafından tanımlanmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi çeşitli mühendislik disiplinlerinde fiziksel bir olayın modellenmesi veya tasarlanmasında önemli bir adıma sahiptir [82,83].

Sonlu elemanlar analizi yönteminde ana basamaklar aşağıda sıralandığı gibidir. [82];

- Alt etki alanlarının sonlu sayı içindeki etki alanlarına bölümlenme,
- İnterpolasyon fonksiyonlarının seçilmesi,
- Alt etki alanı için eleman matrisi geliştirilmesi,
- Tüm etki alanı için genel matris elde etmek için her bir alt etki alanı için eleman matrislerini toplama,
- Sınır koşullarını uygulama,
- Denklemleri çözme,
- Yapılması istenen ek hesaplamaları yaptırma.

Sonlu elemanlar analizi kavramına dayalı bir yaklaşık çözüm oluşturulmuş üç ana yaklaşım vardır:

**Doğrudan yaklaşım:** Bu yaklaşım oldukça basit problemler için kullanılır ve genellikle sonlu elemanlar analizinin kavramını ve onun önemli basamaklarını açıklamak için bir araç olarak hizmet eden bir yaklaşımdır.

**Yüklenmiş artıklar:** Bu çok yönlü bir yaklaşım olup, işlevsel yapılandırılmamış problemler için sonlu elemanlar analizinin uygulanmasını sağlamaktadır. Bu yaklaşımda bünye diferansiyel denklemleri, akışkanlar mekaniğinin ve ısı transferinde olduğu gibi doğrudan kullanır.

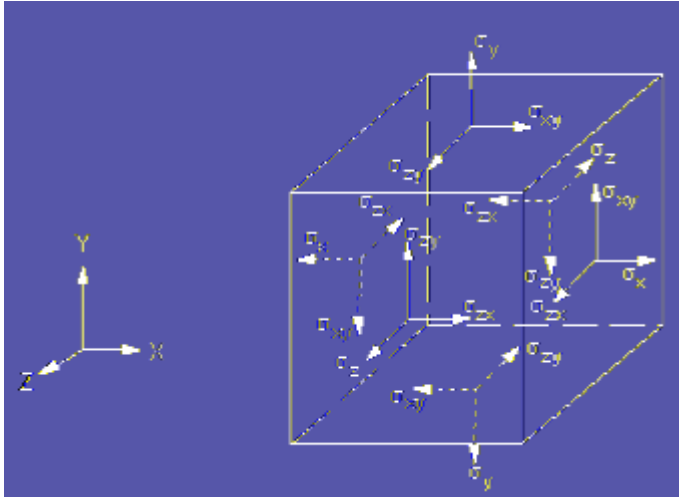
**Varyasyonel yaklaşım:** Bu yaklaşım extremizing bir fonksiyonel içeren varyasyon hesaplamasına dayanır. Bu fonksiyonel yapısal mekaniklerde potansiyel enerjiye karşılık gelir.

Denklemlerin genel sistemi bir matris gösteriminde aşağıdaki gibi içine konulabilir:

$$F = Ku \quad (3.1)$$

Burada  $K$  sistem rijitlik matrisi,  $u$  bilinmeyenlerin vektörü ve  $F$  kuvvet vektörüdür. Problemin doğasına bağlı olarak,  $K$   $u$ 'ya bağlı olabilir,  $K=K(u)$ , ve  $F$  zamana bağlı olabilir,  $F=F(t)$  [82].

Üç boyutlu gerilme durumu kübik bir eleman üzerinde aşağıdaki gibi gösterilmektedir [12, 84, 85].



**Şekil 3.7.** Üç boyutlu gerilme durumu

Bir cisimdeki denge denklemleri elastisite teorisine göre aşağıdaki gibidir;

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + F_x &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + F_y &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + F_z &= 0 \end{aligned} \quad (3.2)$$

Burada  $F_x$ ,  $F_y$  ve  $F_z$  birim hacimdeki cisim kuvvetlerini ifade etmektedir.

Lineer (doğrusal) elastik ve izotropik malzemeler için üç boyutlu gerilme şekil değiştirme bağıntısı aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}$$

$$\begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(1-2\nu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(1-2\nu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(1-2\nu) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} \quad (3.3)$$

Denklem 3.3' de gösterilen ifade aşağıdaki gibi de ifade edilebilir.

$$\{\sigma\} = [E]\{\varepsilon\} \quad (3.4)$$

Denklem 3.5 'de gösterilen ifade şekil değiştirme-deplasman bağıntısını göstermektedir.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} \quad (3.5)$$

Denklem 3.5' de gösterilen ifade Denklem 3.6' da gösterildiği gibi de ifade edilebilir.

$$\{\varepsilon\} = [D]\{\delta\} \quad (3.6)$$

İki boyutlu düzlemsel gerilme durumunda;

$\sigma_z = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0$  olur. Bu durumu göz önüne aldığımızda, gerilme-şekil değiştirme bağıntısı aşağıdaki gibi olur;

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (3.7)$$

Bu durumda şekil değiştirme-deplasman bağıntısı da aşağıdaki gibi olur;

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} \quad (3.8)$$

Elastik bir cismin potansiyel enerjisi, minimum potansiyel enerji teorisine göre;

$$\Pi = U - W \quad (3.9)$$

Burada,  $U$  şekil değiştirme enerjisini,  $W$  ise dış kuvvetlerin cisim üzerinde yapmış olduğu işi göstermektedir. Minimum potansiyel enerji teorisine göre bir cismin dengede olabilmesi için potansiyel enerjinin minimum olması gerekmektedir. Bu durumda potansiyel enerji,

$$\delta\Pi = \delta U - \delta W = 0 \quad (3.10)$$

olmalıdır. Doğrusal ve elastik bir cisim için şekil değiştirme enerjisi,

$$U = \frac{1}{2} \int_V \{\varepsilon\}^T \{\sigma\} dV = \frac{1}{2} \int_V \{\varepsilon\}^T [E] \{\varepsilon\} dV \quad (3.11)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Bir cisme etki eden dış yükler üç gruba ayrılır. Bunlar; noktasal yükler, yayılı yükler ve cisim kuvvetleridir. Dış yüklerin cisim üzerinde yaptıkları iş:

$$W = \int_V \{\delta\}^T \{b\} dV - \int_{S_l} \{\delta\}^T [T] dS_l + \sum_{i=1}^I \{\delta_i\}^T \{P_i\} \quad (3.12)$$

Deplasman vektörü şekil fonksiyonu cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\{\delta\} = \begin{Bmatrix} u(x, y, z) \\ v(x, y, z) \\ w(x, y, z) \end{Bmatrix} = [N] \{q\} \quad (3.13)$$

Şekil değiştirme vektörü düğüm noktalarının yer değiştirmesi  $\{q\}$ ' ya bağlı olarak aşağıdaki gibi gösterilebilir:

$$\{\varepsilon\} = [d][N] \{q\} = [B] \{q\} \quad (3.14)$$



Gerilme vektörünün düğüm noktalarının fonksiyonu olarak ifadesi

$$\{\sigma\} = [D]\{\{\varepsilon\} - \{\varepsilon_0\}\} = [D][B]\{q\} - [D]\{\varepsilon_0\}, \varepsilon_0 = \{\alpha\Delta T, \alpha\Delta T, 0\}^T \quad (3.15)$$

Burada,  $\alpha$  ısı genleşme katsayısı,  $\Delta T$  sıcaklık farkıdır. Bu durumda bir elemana ait şekil değiştirme enerjisi:

$$\begin{aligned} \Pi^e = \frac{1}{2} \int_{V^e} \{q\}^T [B]^T [D] [B] \{q\} dV - \int_{V^e} \{q\}^T [B]^T [D] [\varepsilon_0] dV \\ - \int_{V^e} \{q\}^T [N]^T [b] dV - \int_{S_I^e} \{q\}^T [N]^T [T] dS_I \end{aligned} \quad (3.16)$$

Yapıya ait toplam potansiyel enerjisi her bir elemanın enerjisinin toplamına eşittir.

$$\Pi = \sum_{e=1}^E \Pi^e - \{Q\}^T \{F_c\} \quad (3.17)$$

Burada,  $\{Q\}$  yapının yer değiştirme vektörünü tanımlamaktadır.

$$\begin{aligned} \Pi^e = \frac{1}{2} \{Q\}^T \sum_{e=1}^E \left[ \int_V [B]^T [D] [B] dV \right] \{Q\} \\ - \{Q\}^T \sum_{e=1}^E \left[ \int_V [B]^T [D] [\varepsilon_0] dV \right. \\ \left. + \int_V [N]^T [b] dV + \int_V [N]^T [T] dS \right] - \{Q\}^T \{F_c\} \end{aligned} \quad (3.18)$$

$$[k] = \int_V [B]^T [D] [B] dV \quad : \text{ eleman katılık matrisi}$$

$$\{f_i\} = \int_V [B]^T [D] [\varepsilon_0] dV \quad : \text{ eleman sıcaklık kuvvet vektörü}$$

$$\{f_b\} = \int_V [N]^T [b] dV \quad : \text{ eleman cisim kuvvet vektörü}$$

$$\{f_s\} = \int_S [N]^T [T] dS \quad : \text{ eleman yüzey kuvvet vektörü}$$

Minimum potansiyel enerji teorisi yukarıdaki ifadelerden sonra aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \{Q\}} = \{0\} \quad (3.20)$$

Yukarıdaki ifade kullanılarak,

$$[K]\{Q\} = \{F\} \quad (3.21)$$

eşitliği elde edilir. Bu eşitlik kullanılarak düğüm noktalarındaki deplasman değerleri ve reaksiyon kuvvetleri elde edilir. İki boyutlu üç düğüm noktasına sahip üçgen eleman için şekil fonksiyonu aşağıda belirtildiği gibi ifade edilmektedir.  $u$ ,  $v$  deplasmanlarının eleman içerisinde doğrusal fonksiyon oldukları varsayılarak bunlar aşağıdaki gibi gösterilebilir [12, 84, 85]:

$$u = b_1 + b_2x + b_3y, \quad v = b_4 + b_5x + b_6y \quad (3.22)$$

Burada  $b_i$  ( $i=1,2,\dots,6$ ) sabittir. Her bir düğüm noktasına ait deplasmanlar ise;

$$\begin{aligned} u_1 &= b_1 + b_2x_1 + b_3y_1 \\ u_2 &= b_1 + b_2x_2 + b_3y_2 \\ u_3 &= b_1 + b_2x_3 + b_3y_3 \\ v_1 &= b_4 + b_5x_1 + b_6y_1 \\ v_2 &= b_4 + b_5x_2 + b_6y_2 \\ v_3 &= b_4 + b_5x_3 + b_6y_3 \end{aligned} \quad (3.23)$$

Bu ifadeler tekrar düzenlenirse;

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ u_3 \\ v_3 \end{Bmatrix} \quad (3.24)$$

$N_i$ ,  $x$  ve  $y$  'nin fonksiyonu olarak;

$$\begin{aligned} N_1 &= (1/2A)\{(x_2y_3 - x_3y_2) + (y_2 - y_3)x + (x_3 - x_2)y\} \\ N_2 &= (1/2A)\{(x_3y_1 - x_1y_3) + (y_3 - y_1)x + (x_1 - x_3)y\} \\ N_3 &= (1/2A)\{(x_1y_2 - x_2y_1) + (y_1 - y_2)x + (x_2 - x_1)y\} \end{aligned} \quad (3.25)$$

$A$  üçgenin alanını ifade etmektedir. Şekil değiştirme-deplasman bağıntısı;

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = [B]\{q\} = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} y_{23} & 0 & y_{31} & 0 & y_{12} & 0 \\ 0 & x_{32} & 0 & x_{13} & 0 & x_{21} \\ x_{32} & y_{23} & x_{13} & y_{31} & x_{21} & y_{12} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ u_3 \\ v_3 \end{Bmatrix} \quad (3.26)$$

olur.

Yukarıda belirtilen şekil değiştirme fonksiyonunun farklı bir şekilde gösterimi mevcut olup, üçgen eleman üzerinde doğal koordinatlar tanımlanarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$N_1 = \xi, N_2 = \eta, N_3 = 1 - \xi - \eta \quad (3.27)$$

Buradaki ifadenin tanımlanabilmesinde  $N_1+N_2+N_3=1$  özelliğinden faydalanılmıştır. Bu takdirde;

$$\begin{aligned} x &= x_{13}\xi + x_{23}\eta + x_3 \\ y &= y_{13}\xi + y_{23}\eta + y_3 \end{aligned} \quad (3.28)$$

Burada  $x_{ij}=x_i-x_j$  ve  $y_{ij}=y_i-y_j$  ( $i,j=1,2,3$ )

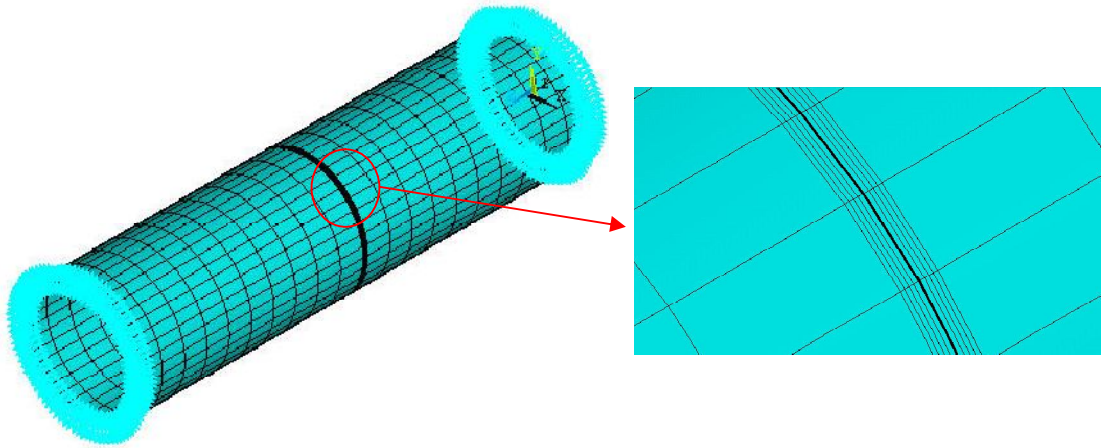
$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial \xi} \\ \frac{\partial u}{\partial \eta} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial u}{\partial y} \end{Bmatrix} = J \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial u}{\partial y} \end{Bmatrix} \quad (3.29)$$

Yukarıdaki ifade de  $J$ , Jacobian matrisidir [12, 84, 85].

### 3.6.1. Sonlu elemanlar modeli

Nümerik analizler ANSYS 14.5 paket programında yapılmıştır. Modelde eleman tipi SOLID186 kullanılmıştır ve model üç boyutlu (3D) olarak modellenmiştir. İç basınç yüklemeleri iç yüzeye uygulanmıştır. Model üzerinde meshlerin düzgün bir şekilde oluşturulması için model üzerindeki bütün çizgiler uygun sayılara bölünerek mesh oluşturma kontrol altına alınmıştır. Şekil 3.8' de görüldüğü gibi sınır şartları verilmiştir. Kompozit borular için Tsai-wu hasar kriteri ve yapıştırıcıların hasar tespiti içinde Von-mises hasar kriteri dikkate alınmıştır. ANSYS 14.5 paket programında çözüm yapıldıktan sonra General Postproc alt menüsü içinde bulunan analiz komutları kullanılmıştır. 4, 6 ve 8 tabakalı kompozit boruların modellenmesinde her bir tabaka bir hacim olarak modellenmiş ve bu şekilde tüm kompozit boruların tüm tabakaları aynı özellikte modellenme imkânı

sağlanmıştır. Bu durumda, 4 tabakalı kompozit borular için kullanılan model parametreleri (her bir tabaka için eleman sayısı, eleman boyutu, mesh yoğunluğu) 6 ve 8 tabakalı kompozit borular içinde aynıdır. Bunlarla birlikte birleştirme işlemlerinde kullanılan yapıştırıcılarda boyutsal ve kompozit boruların modeline uygun bir şekilde modellenmiştir. Birleşme yüzeylerinin eleman sayıları, eleman boyutları ve mesh yoğunluğu uygun bir şekilde oluşturulması sağlanmıştır. Şekil 3.8’ de görüldüğü gibi, birleştirme işleminin yapıldığı yüzeylere yakın bölgelerde ve yapıştırıcı üzerinde elde edilecek gerilme dağılımlarının hassasiyetini arttırmak için mesh yoğunluğu artırılmıştır. Nümerik analizlerde, sonlu elemanlar yöntemini kullanırken mesh yoğunluğu ve meshin düzgünlüğü sonuçları önemli ölçüde etkilemektedir. Bu sebepten, nümerik ve deneysel çalışmaların sonuçları karşılaştırıldığında elde edilen sonuçlara göre, değerlerin yakın olduğu mesh yoğunluğunda ve eleman boyutlarında analizler gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 3.8.** Kompozit borunun alın-alına birleştirme yöntemindeki sonlu elemanlar modeli

### 3.7. Deneysel ve Nümerik Çalışmalar

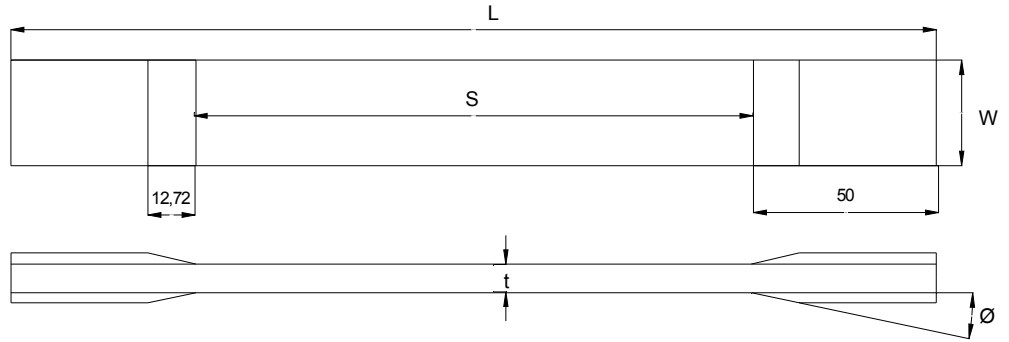
Yapılan çalışma deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Yapıştırılan bazı kompozit borularda Şekil 3.9’ da gösterilmiştir. Nümerik çalışmalarda, sonlu elemanlar analizleri yapmak için kullanılan cam elyaftan üretilmiş kompozit boruların mekaniksel özelliklerini belirlemek için cam elyaftan üretilmiş kompozit borularla aynı özellikte olan 4, 6 ve 8 tabakalı kompozit levhalar alınarak çekme için

ASTMD3039-76 [86-87] (Şekil 3.10(a)) standardına, basma içinde ASTMD3410 [86-87] (Şekil 3.10 (b)) standardına ve kayma testi içinde ASTMD7078 [87] (Şekil 3.10 (c)) standardına uygun boyutsal değerlerde elmas uçlu testere ile kesilerek numuneler hazırlanmıştır ve bu numuneler Şekil 3.11-3.16' da görülmektedir. Nümerik analizler içinde sonlu elemanlar temelli ANSYS 14.5 yapısal analiz paket programı kullanılmıştır. Yapıştırıcı malzemeler içinde ISO 527-2 [88] (Şekil 3.10 (d)) standartlarına uygun numuneler hazırlanmıştır ve hazırlanan numuneler Şekil 3.18 ve Şekil 3.19' da görülmektedir. Bu numunelerin dökümü için 1040 çelik malzemeden Taksan model CNC tezgâhında aynı anda dokuz numunenin dökülebileceği bir kalıp üretilmiştir (Şekil 3.17).

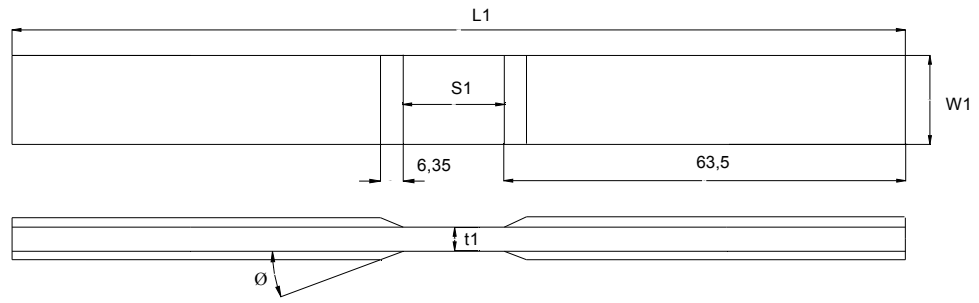


**Şekil 3.9.** Deneysel çalışmalar için hazırlanmış 4 tabakalı kompozit boruların yapıştırıcı malzemeleri kullanarak birleştirilmesi

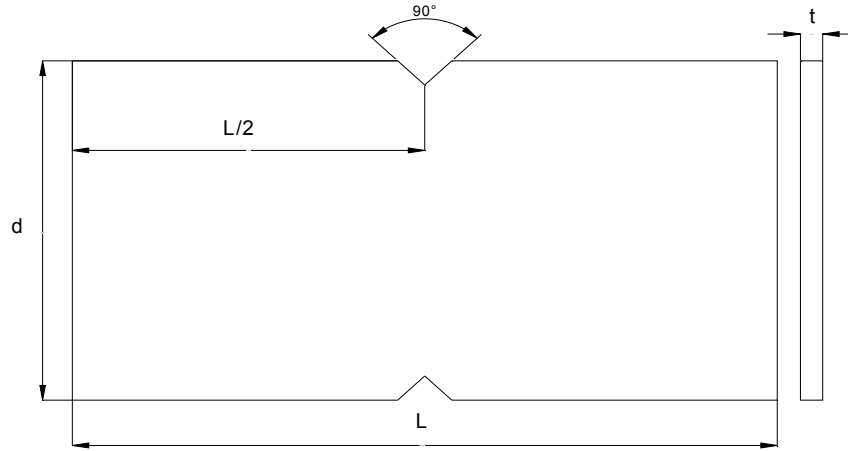
Çalışmalarda, kompozit malzemelerin yüzeylerinin parlak olmasından dolayı sağlıklı bir yapıştırma işlemi yapmak zordur. Bu sebepten, kompozit malzemelerin yapıştırılacak bölgeleri ince zımpara ile zımparalanarak yüzeylerde pürüzlülük oluşturulmuştur. Yapıştırma işleminin sağlıklı olması için yüzeyler aseton ile temizlenmiştir. Yüzey temizliğinde asetonun tercih edilmesinin sebebi, asetonun uçucu olup temizlenen yüzeylerden kısa süre içinde ayrılarak yüzeylerde ıslaklık kalmamasındandır. Yüzeylerin temizliği bittikten sonra, yapıştırıcılar kullanılarak birleştirme işlemleri yapılmıştır. Yapılan yapıştırma işlemlerinde, yapıştırılan tüm yüzeylere yapıştırıcının sürülmesine dikkat edilmiştir. Çünkü nümerik çalışmalarda kusursuz bir model oluşturulmuştur. Bu sebepten, nümerik ve deneysel çalışmalarda yakın değerler elde etmek için yapıştırma işlemlerine gereğinden fazla önem verilmiştir. Yapıştırma işlemi bittikten sonra numuneler oda sıcaklığında kürleşmeye bırakılmıştır.



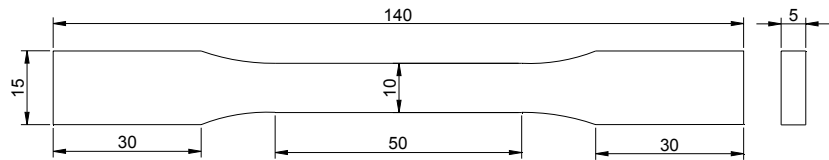
(a)



(b)

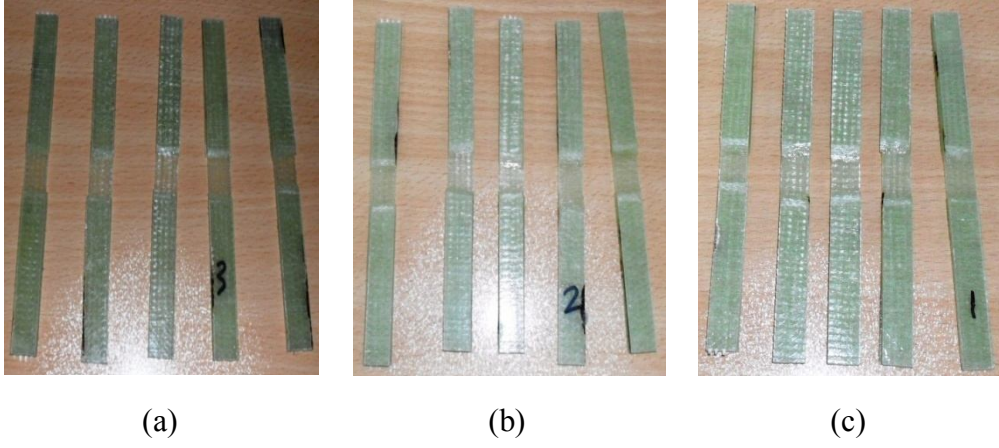


(c)

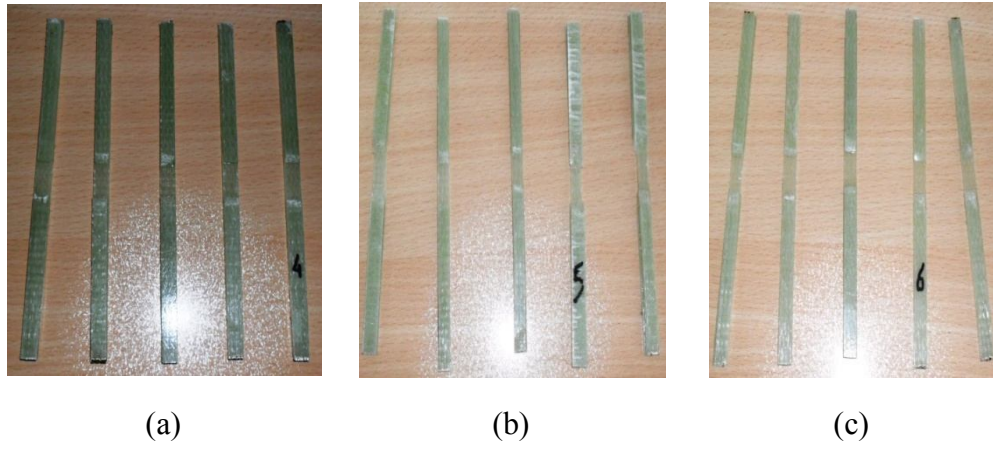


(d)

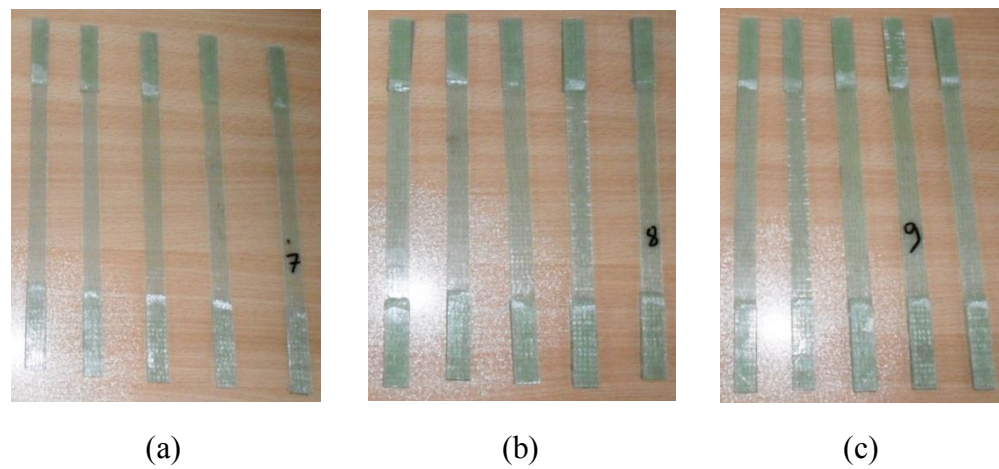
**Şekil 3.10.** Standartlara göre numune ölçülerinin gösterimi [86-87]; (a) ASTMD3039-76, (b) ASTMD3410, (c) ASTMD7078 [87], (d) ISO 527-2 [88]



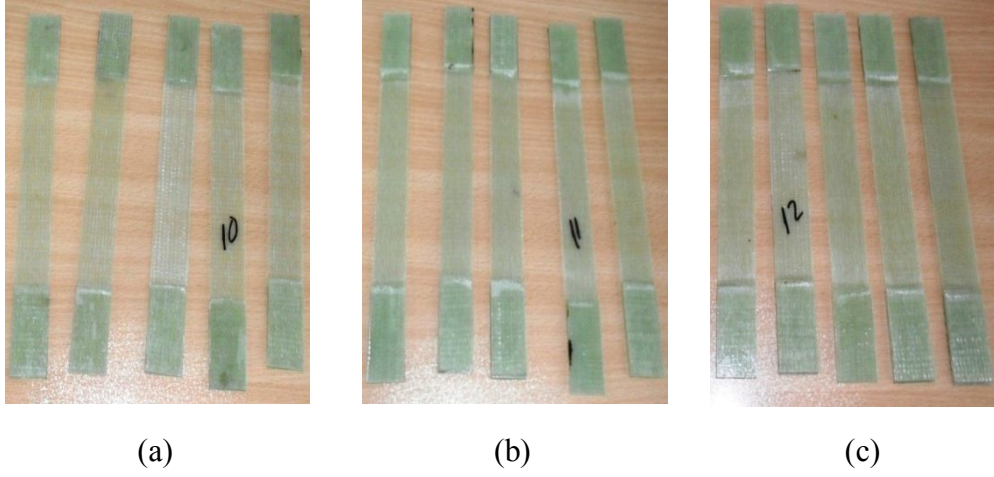
**Şekil 3.11.** ASTM D3410 standardına göre hazırlanmış  $90^\circ$  elyaf yönlü basma numuneleri, (a) 4 tabaka, (b) 6 tabaka, (c) 8 tabaka.



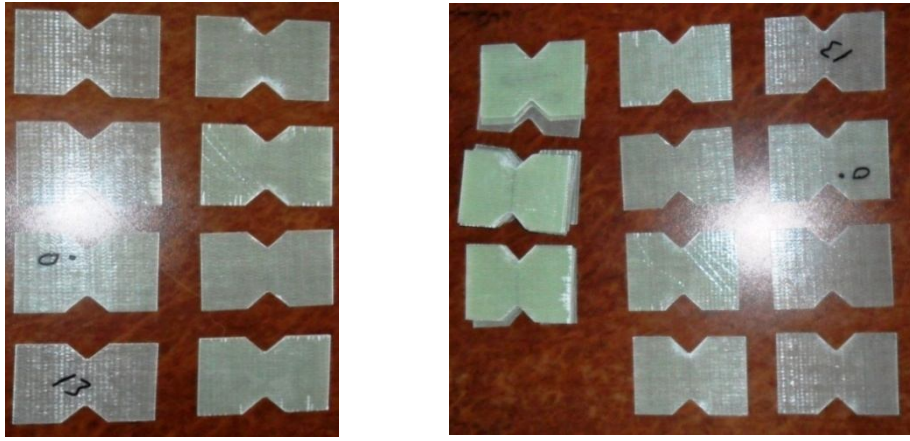
**Şekil 3.12.** ASTM D3410 standardına göre hazırlanmış  $0^\circ$  elyaf yönlü basma numuneleri, (a) 4 tabaka, (b) 6 tabaka, (c) 8 tabaka.



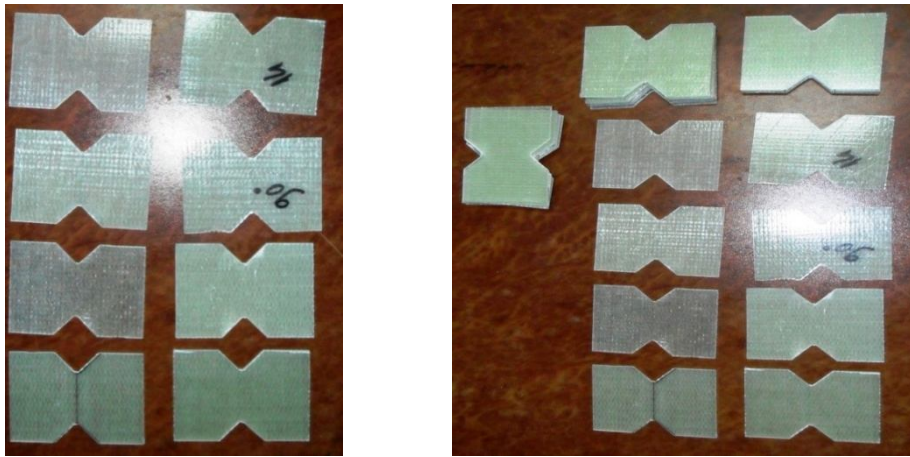
**Şekil 3.13.** ASTM D3039-76 standardına göre hazırlanmış  $0^\circ$  elyaf yönlü çekme numuneleri, (a) 4 tabaka, (b) 6 tabaka, (c) 8 tabaka.



**Şekil 3.14.** ASTM D3039-76 standardına göre hazırlanmış  $90^{\circ}$  elyaf yönlü çekme numuneleri, (a) 4 tabaka, (b) 6 tabaka, (c) 8 tabaka

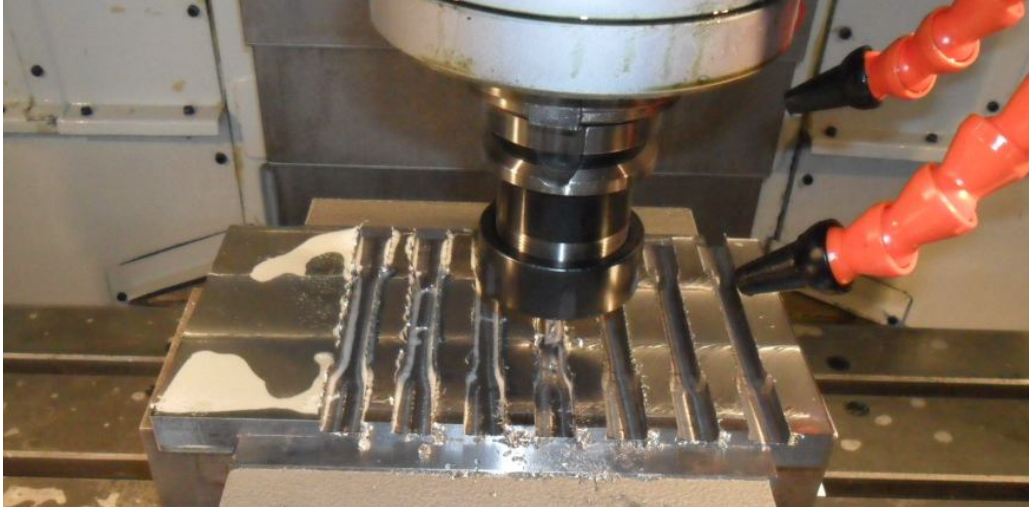


**Şekil 3.15.** ASTM D7078 standardına göre hazırlanmış  $0^{\circ}$  elyaf yönlü 4 tabakalı, 6 tabakalı ve 8 tabakalı kayma numuneleri



**Şekil 3.16.** ASTM D7078 standardına göre hazırlanmış  $90^{\circ}$  elyaf yönlü 4 tabakalı, 6 tabakalı ve 8 tabakalı kayma numuneleri



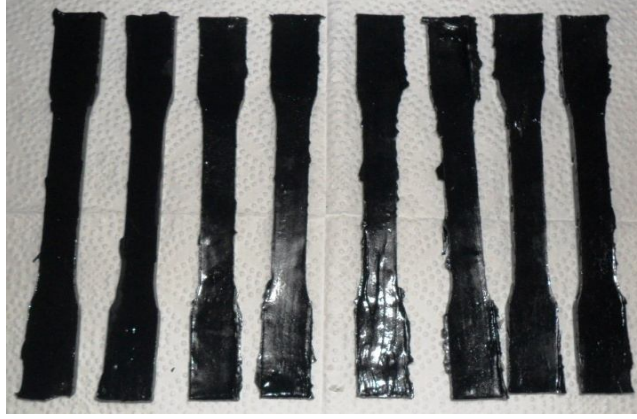


**Şekil 3.17.** Yapıştırıcı malzemelerin bulk model olarak dökümünün yapıldığı kalıp üretimi

Yapıştırıcılardan test numunesi elde etmek için Şekil 3.17’ de görülen kalıp ürettirilmiştir. Numune dökümüne geçmeden önce kalıp asetonla iyice temizlenmiştir. Döküm işleminden sonra numunelerin kalıptan rahat çıkartılabilmesi ve kalıba yapışmaması için kalıp yüzeyine çok ince bir takaka kalıp ayırıcı sprey sıkılmıştır ve kalıp ayırıcının kuruması beklenilmiştir. Daha sonra, yapıştırıcının bulunduğu tüpler yapıştırıcı tabancasına takılmıştır ve tüpün çıkış ucunda karıştırıcı nozul takılmıştır. Döküm kalıbı üzerine yapıştırıcı hassas bir şekilde dökülmüştür. Dökülen yapıştırıcının içinde hava kabarcığı ve boşluk kalmaması için kalıp içinde yapıştırıcı karıştırılmıştır ve yapıştırıcının kalıp içine tamamen yerleşmesi için temiz bir plaka ile baskı yapılmıştır. Daha sonra, kürleşen numuneler döküm kalıbından çıkartılmıştır (Şekil 3.18 ve Şekil 3.19).



**Şekil 3.18.** DP 410 yapısal yapıştırıcı malzemelerin ISO 527-2 standardına uygun bulk model olarak dökülmüş numuneleri



**Şekil 3.19.** DP 490 yapısal yapıştırıcı malzemelerin ISO 527-2 standardına uygun bulk model olarak dökülmüş numuneleri

Kompozit ve yapıştırıcı malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için Batman Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Mekanik atölyesinde bulunan 250 kN yük kapasiteli Shimadzu marka test cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.20).

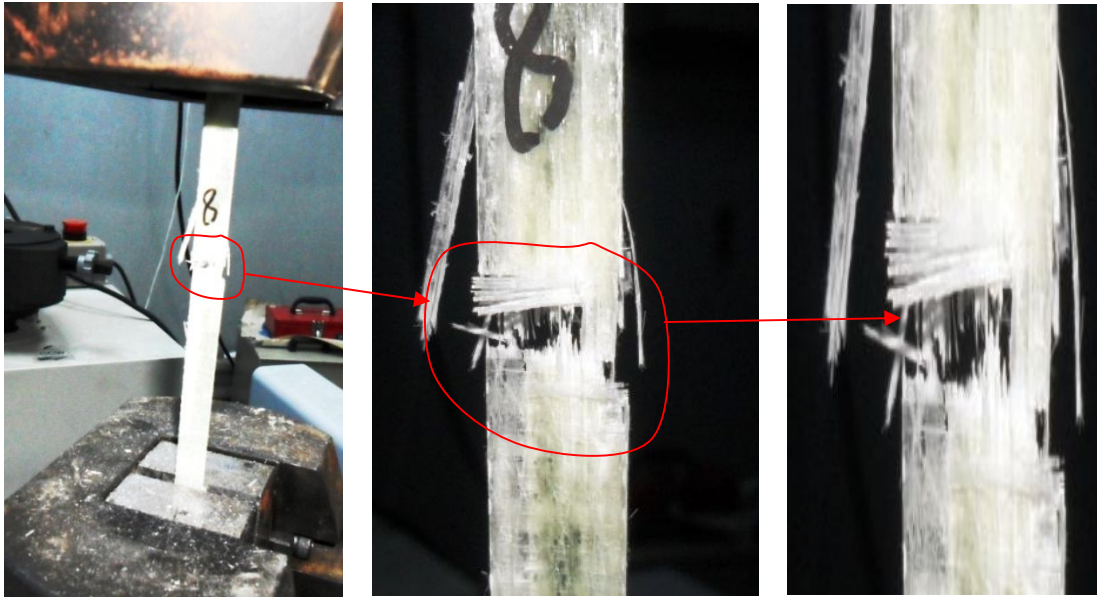


**Şekil 3.20.** Çeki-bası testlerinin yapıldığı Shimadzu marka test cihazı

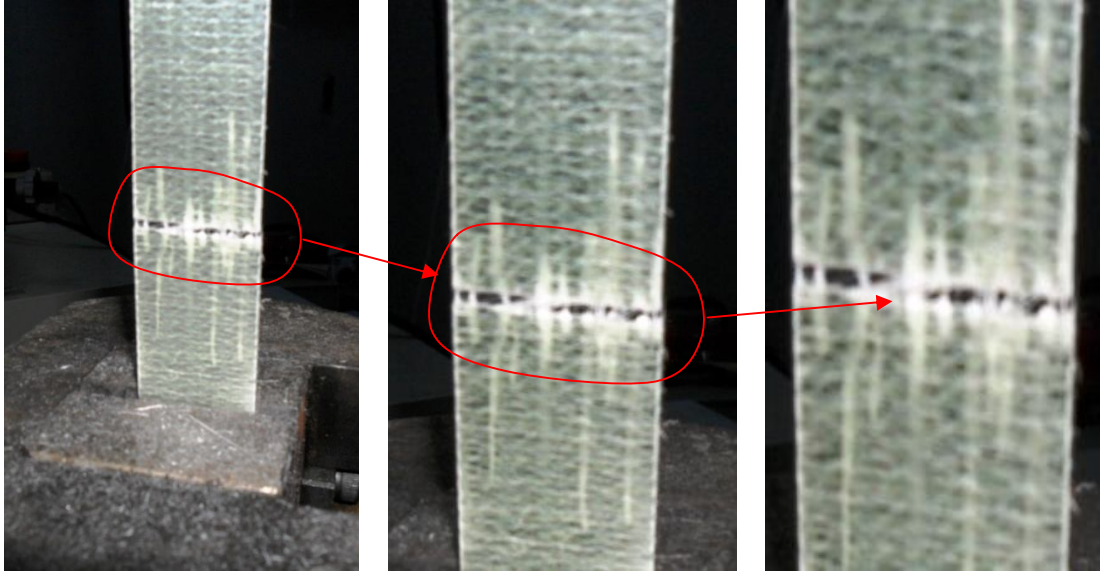
## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

### 4.1. Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin Tespiti

Çalışmalarda kullanılan kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek için çekme, basma ve kayma testleri yapılmıştır. Yapılan test numuneleri boru malzemesi ile aynı özelliklere sahip 4, 6 ve 8 tabakalı kompozit plakalardan kesilerek hazırlanmıştır. Yapılan testlerle kompozit malzemelerin çekme dayanımları, basma dayanımları, kayma dayanımları, elastisite modülleri, poisson oranları, kayma modülleri ve numunelerdeki elyaf matris oranları belirlenmiştir. Her bir durum için testler dört kez tekrarlanıp, aynı durum için elde edilen değerlerin ortalaması alınmıştır. Kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek için yapılan testlerle ilgili resimler aşağıda verilen Şekil 4.1-4.9' da görülmektedir. Bununla birlikte her bir numune için dört defa yapılan testlerin ortalama değerlerinden elde edilen kompozit malzemelerin mekaniksel özellikleri Çizelge 4.1' de görülmektedir.



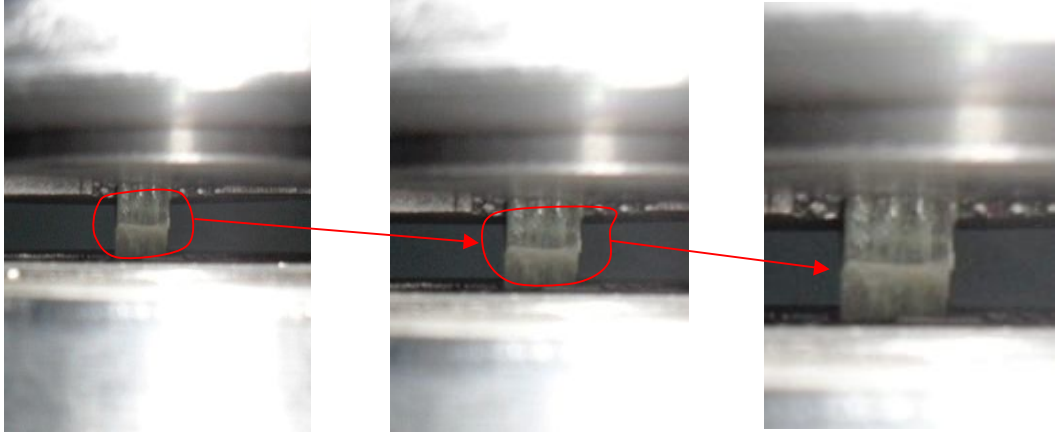
Şekil 4.1. 0° elyaf doğrultulu 8 tabakalı kompozit çekme numunesinin çekme testi sonrası görünümü



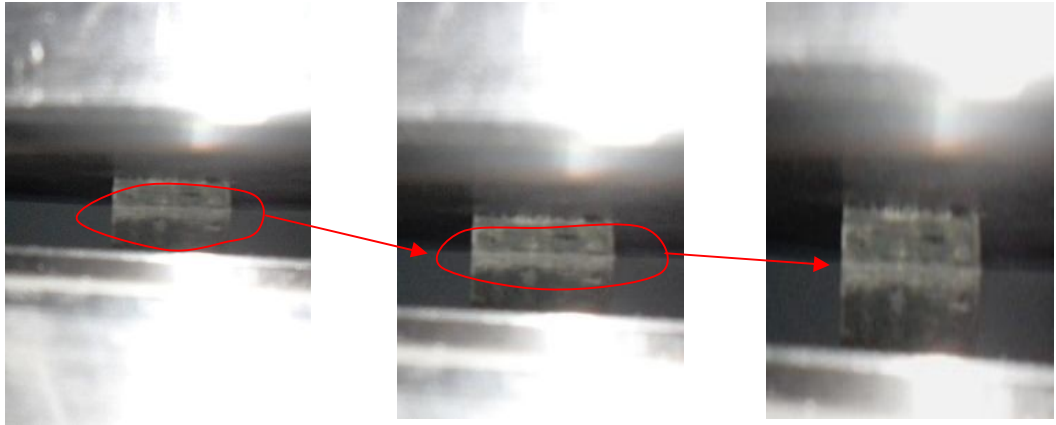
**Şekil 4.2.**  $90^{\circ}$  elyaf doğrultulu 4 tabakalı kompozit çekme numunesinin çekme testi sonrası görünümü

**Çizelge 4.1.** E-glass fiber takviyeli tabakalı kompozit malzemelerin mekaniksel özellikleri

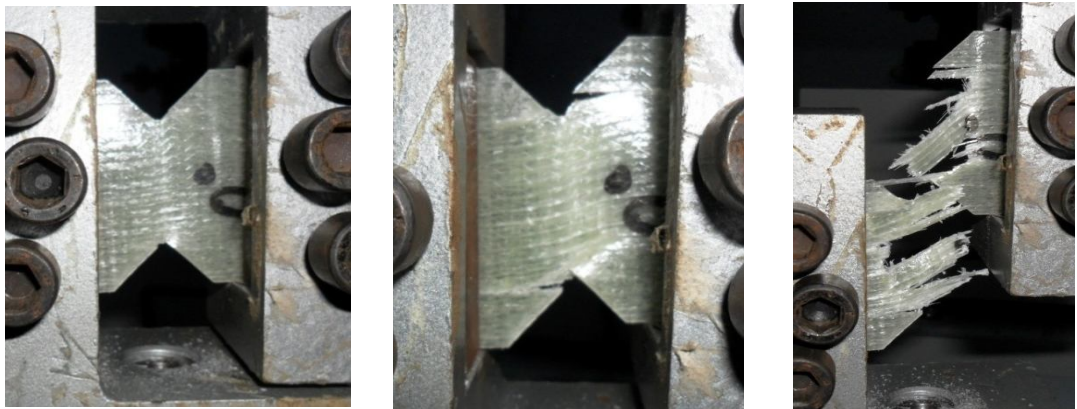
Özellikler	4 tabaka	6 tabaka	8 tabaka
$E_{11}$ (MPa)	25760	24115	23130
$E_{22}$ (MPa)	8824	9687	9383
$G_{12}$ (MPa)	4965	4965	4965
$G_{23}$ (MPa)	3472	3472	3472
$G_{13}$ (MPa)	4965	4965	4965
$\nu_{12}$	0.14	0.14	0.14
$\nu_{23}$	0.22	0.22	0.22
$\nu_{13}$	0.14	0.14	0.14
$X_T$ (MPa)	699.98	770.57	859.80
$Y_T$ (MPa)	78.29	78.10	87.00
$Z_T$ (MPa)	78.29	78.10	87.00
$X_C$ (MPa)	382.63	446.85	653.47
$Y_C$ (MPa)	119.91	186.91	177.65
$Z_C$ (MPa)	119.91	186.91	177.65
$S$ (MPa)	85.92	81.73	84.27



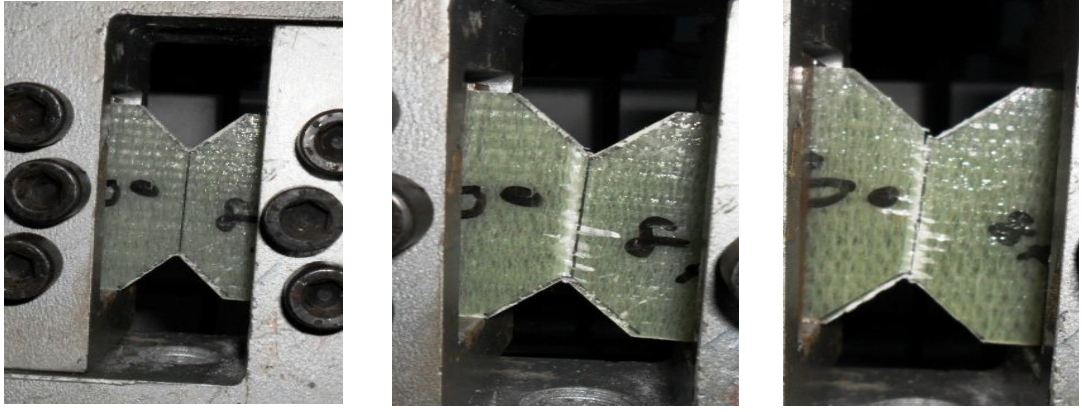
**Şekil 4.3.**  $0^0$  elyaf doğrultulu 4 tabakalı kompozit basma numunesinin basma testi sonrası görünümü



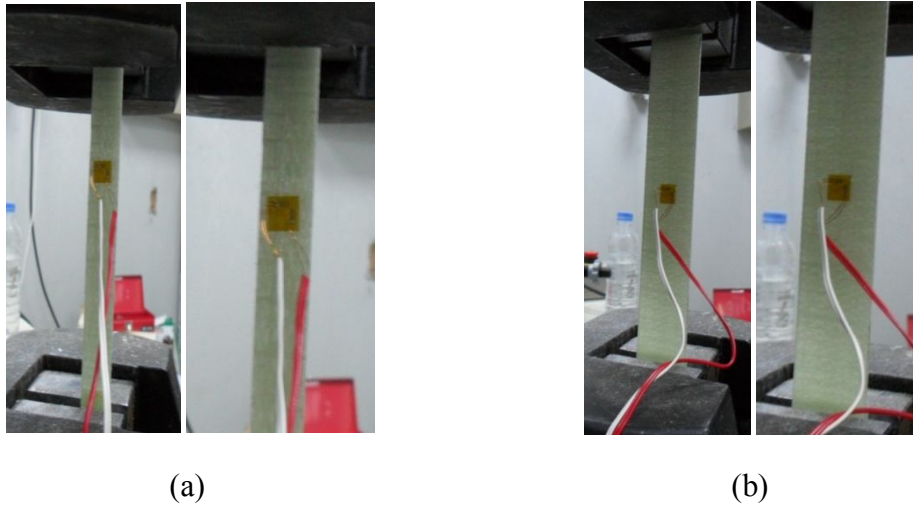
**Şekil 4.4.**  $90^0$  elyaf doğrultulu 4 tabakalı kompozit basma numunesinin basma testi sonrası görünümü



**Şekil 4.5.**  $0^0$  elyaf doğrultulu 4 tabakalı kompozit kayma numunesinin kayma testinin adım adım görünümü



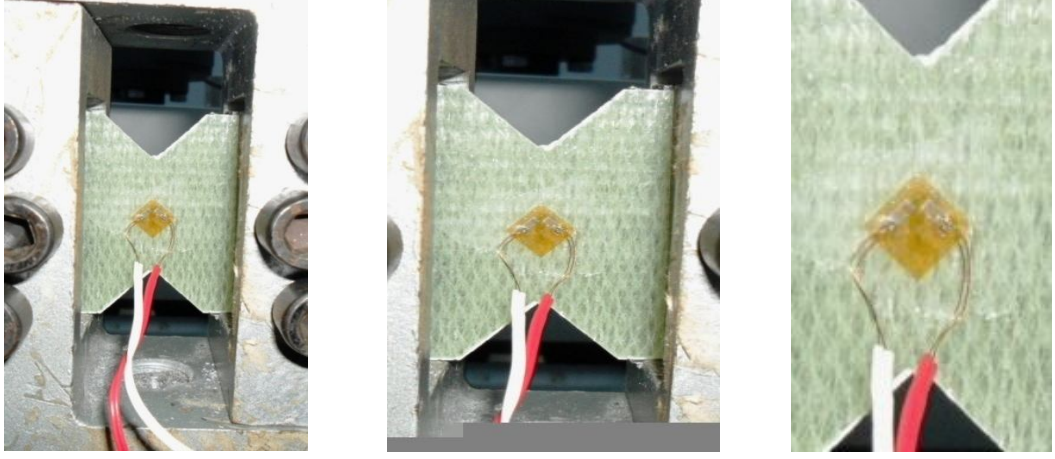
**Şekil 4.6.**  $90^0$  elyaf doğrultulu 8 tabakalı kompozit kayma numunesinin kayma testinin adım adım görünümü



**Şekil 4.7.** (a)  $0^0$  ve (b)  $90^0$  elyaf doğrultulu 4 tabakalı kompozit numunelerinin poisson oranı tespiti



**Şekil 4.8.**  $0^0$  elyaf doğrultulu 4 tabakalı kompozit numunelerinin kayma modülü tespiti



**Şekil 4.9.** 90<sup>0</sup> elyaf doğrultulu 4 tabakalı kompozit numunelerinin kayma modülü tespiti

Şekil 4.7-4.9’ da görüldüğü gibi, kompozit malzemelerin poisson oranlarını ve kayma modüllerini elde etmek için Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd. firmasının satmış olduğu BFCA-2-3-3L tip strain gauges kullanılmıştır. Strain gauge malzeme üzerine yapıştırılmadan önce malzeme yüzeyi asetonla temizlenmiştir.

**Çizelge 4.2.** Tabakalı kompozit numunelerin fiber ve matriks yüzdesi sonuçları

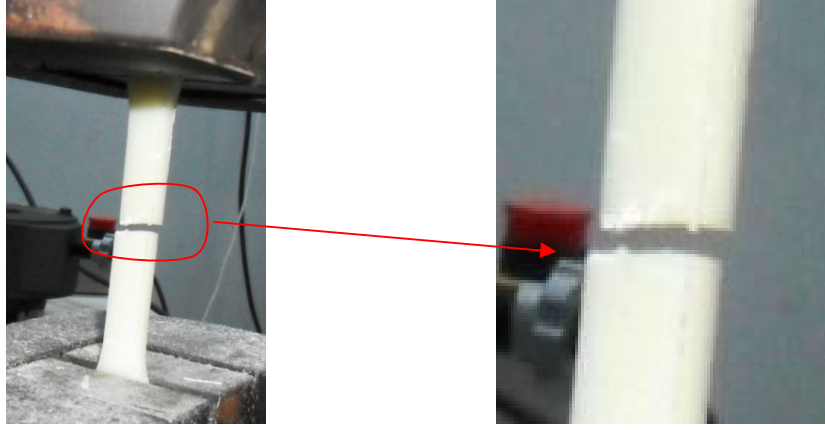
Tabaka sayısı	% Elyaf	% Matriks
4	68.15	31.85
6	68.52	31.48
8	69.41	30.59

Fiber matriks oranını belirlemek için Reçine Yakma Metodu kullanılmıştır. Hacmi ve ağırlığı bilinen cam elyaf takviyeli kompozit parça yakılarak matriksin tamamen yanması sonucu kalan elyafın ağırlığından faydalanılarak yapılan bir yöntemdir. Bu yöntem 4, 6 ve 8 tabakalı kompozit parçalar için yapılmış olup, bulunan oranlar Çizelge 4.2’ de gösterilmiştir.

#### 4.2. Yapıştırıcı Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin Tespiti

Çalışmalarımızda DP 410 ve DP 490 model yapıştırıcılar kullanılmıştır. Bu yapıştırıcıların mekanik özelliklerini belirlemek için ISO 527-2 standardına uygun bulk numuneler yapıştırıcılar kullanılarak dökülmüştür. Her bir test durumu dört defa tekrarlanıp, her test için elde edilen değerlerin ortalaması alınmıştır. Yapılan testlerin sonucunda yapıştırıcıların mekanik özellikleri belirlenmiştir. Yapıştırıcıların mekanik

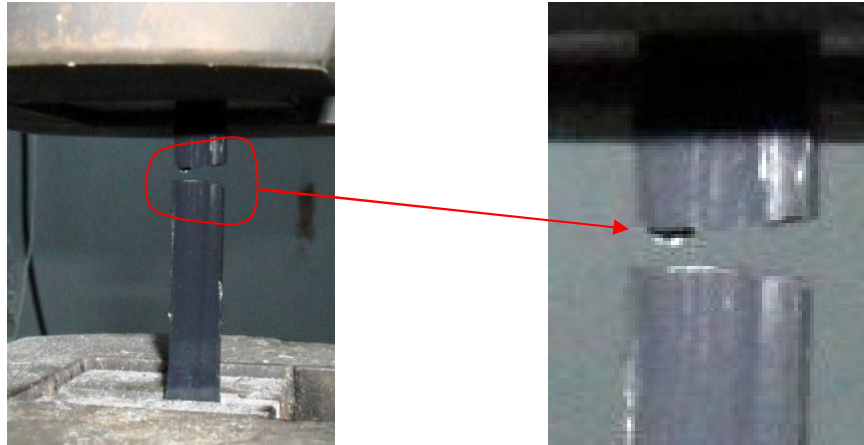
özelliklerini belirlemek için yapılan testlerle ilgili resimler aşağıda verilen Şekil 4.10-4.12’ de görülmektedir. Bununla birlikte her bir numune için tekrarlanan testlerin sonuçları ve ortalama değerleride Çizelge 4.3’ de görülmektedir.



**Şekil 4.10.** DP 410 yapısal yapıştırıcı bulk modelin çekme testi sonrası görünümü

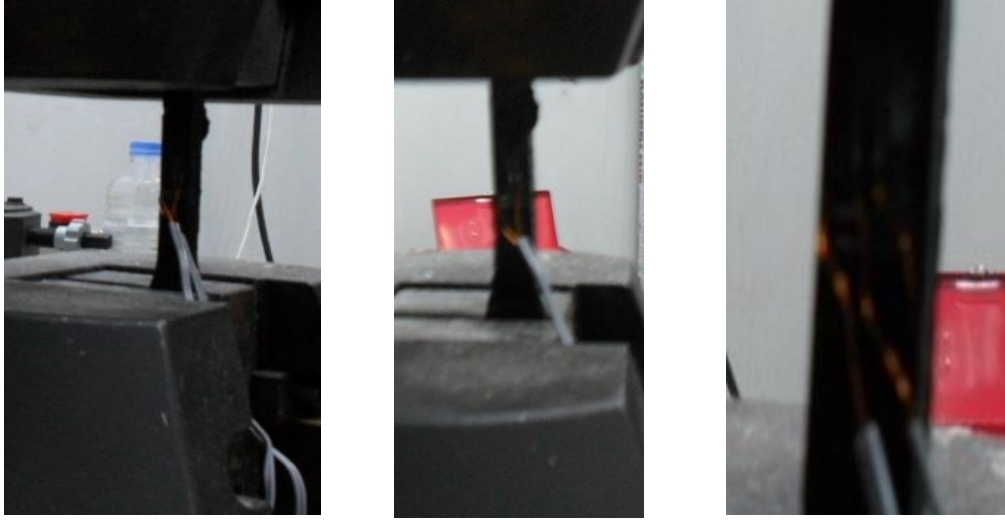
**Çizelge 4.3.** Yapıştırıcıların mekaniksel özellikleri

Özellikler	DP 410	DP 490
E (MPa)	2567.45	1528.87
v	0.31	0.35

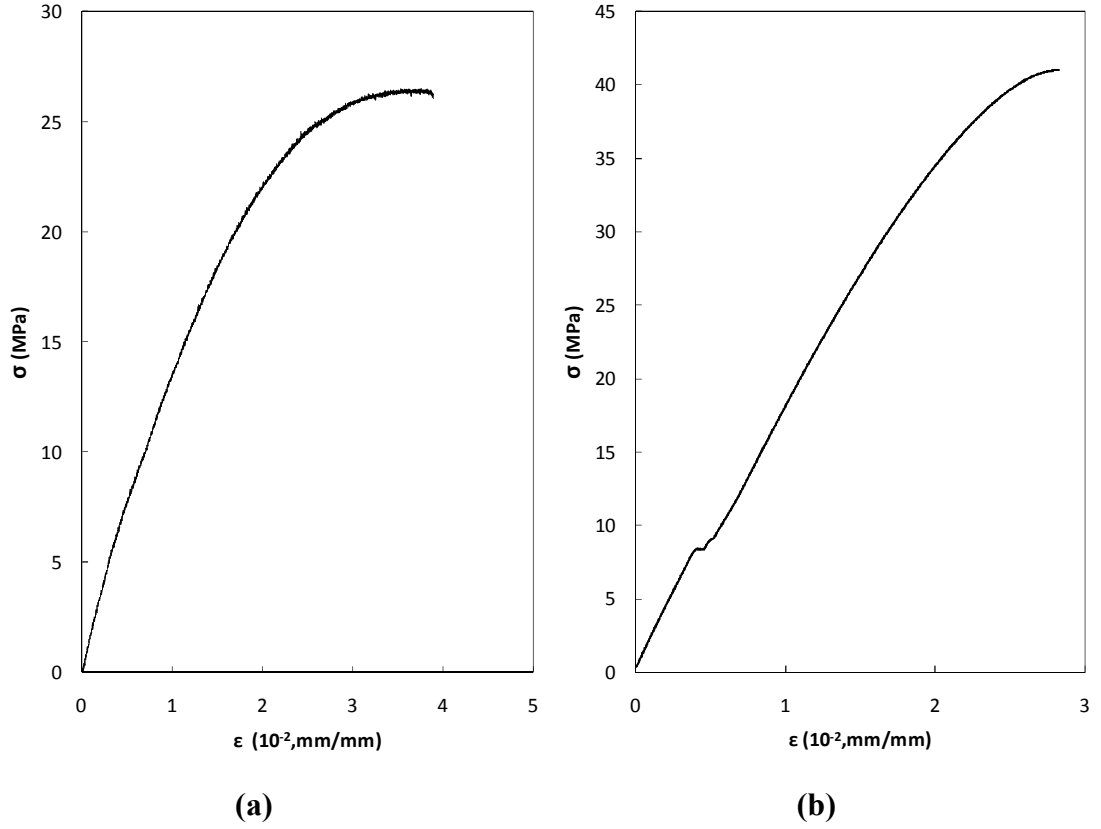


**Şekil 4.11.** DP 490 yapısal yapıştırıcı bulk modelin çekme testi sonrası görünümü





**Şekil 4.12.** DP 490 yapısal yapıştırıcı bulk modelin poisson oranı tespiti



**Şekil 4.13.** Yapıştırıcıların gerilme-şekil değiştirme grafikleri: (a) DP 490; (b) DP 410

Şekil 4.13' de görüldüğü gibi, yapıştırıcıların gerilme-şekil değiştirme grafikleri verilmiştir. Şekil 4.12' de görüldüğü gibi, yapıştırıcı malzelerin poisson oranlarını elde etmek için Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd. firmasının satmış olduğu

GFLA-3-50-3L tip strain gauges kullanılmıştır. Strain gauge malzeme üzerine yapıştırılmadan önce malzeme yüzeyi asetonla temizlenmiştir.

### 4.3. Deneysel Çalışmalar

Çalışmalarda kullanılan tabakalı kompozit boruların ve bu kompozit boruların DP 410 ve DP 490 yapıştırıcılar ile farklı türlerde birleştirilmesi sonucu tamamen kürleşmeleri bittikten sonra deneysel çalışmaları yapılmıştır. Deneysel testlerle numunelerin hasar iç basınçları belirlenmiştir. Her deneysel durum üç kez tekrarlanmıştır. Ayrıca hasar anında hasarın nasıl olduğu da resimlerle gösterilmiştir. Her bir test türü için yapılan çalışmaların hasar iç basınçları ve hasar durumları aşağıda anlatılmaktadır.

#### 4.3.1. Kompozit boruların deneysel çalışması

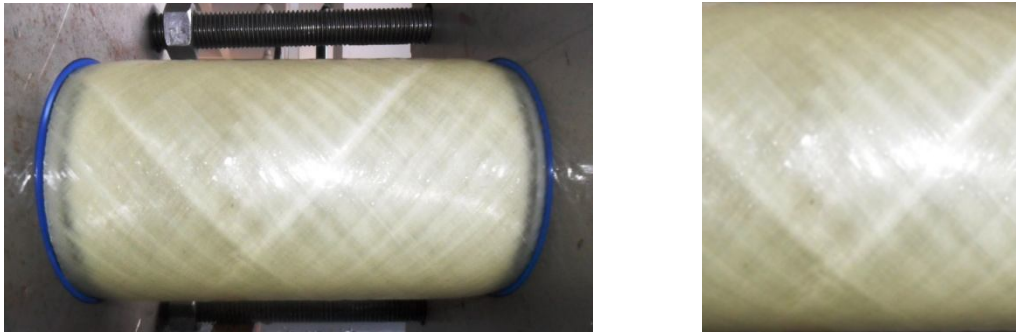
Farklı oryantasyon açılarındaki tabakalı kompozit boruların deneysel hasar testlerinin sonuçları aşağıdaki çizelgelerde belirtilmiştir;

**Çizelge 4.4.** Farklı oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların deneysel ortalama hasar iç basınçları

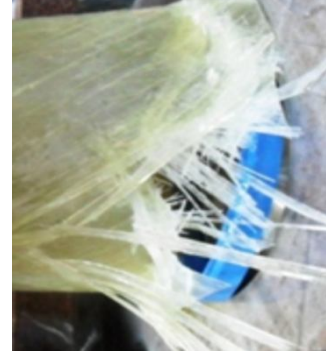
Numune No	Yükleme durumu	Oryantasyon açısı	Ortalama Hasar İç Basıncı (MPa)
1	Basınç	45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup>	7.500
2	Basınç	55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup>	7.667
3	Basınç	55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup>	9.667

Hasarlar açılara göre farklılık göstermektedir. 55<sup>0</sup>/-55<sup>0</sup>/55<sup>0</sup>/-55<sup>0</sup> ve 55<sup>0</sup>/-55<sup>0</sup> /30<sup>0</sup>/-30<sup>0</sup> açılı borularda hasarlar, borularda yırtılmalar şeklinde oluşurken 45<sup>0</sup>/-45<sup>0</sup> /45<sup>0</sup>/-45<sup>0</sup> açılı borularda hasar tamamen boruların beyazlaşması ve boru dış çapının 105 mm' den 110-115 mm civarına kadar genişlemesi gibi şekil değiştirmeler şeklinde oluşmaktadır. Bu şekil değiştirmeler boru çapının genişlemesine sebep olduğundan boruda yağ sızıntıları meydana gelmiştir. Boru üzerindeki sarım iplikçiklerinin belirginliğini net olarak ortaya çıkaran beyazlaşmalar da hasarın oluştuğunun göstergesidir. Deneyler her bir boru için üç defa tekrarlandığından her oryantasyon açısı için yapılan deney sonuçlarının ortalaması alınarak, her bir durum için ortalama hasar iç basıncı bulunmuştur. Yapılan deneylerden elde edilen hasar iç

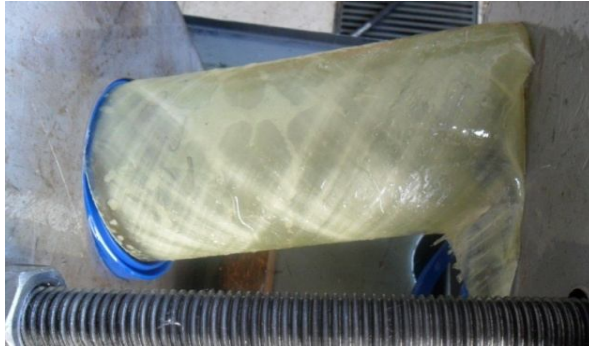
basıncı sonuçları Çizelge 4.4' de gösterilmektedir. Deney sonrası boruların hasar durumları da Şekil 4.14-16' da görülmektedir. Bu hasar iç basıncı ve hasar şekillerinin farklı olması kompozit boruların tabaka açılarının önemini ortaya koymaktadır. Aynı zamanda, pozitif ve negatif yönde birbirini takip eden tabakalarda aynı açı değerleri kullanılarak ve farklı iki açı kullanılarak üretilen tabakalı kompozit borularda hasar iç basınçlarının nasıl değiştiği de Çizelge 4.4' de görülmektedir. Yapılan deneysel testlerde, dayanıklılık yönünden en büyük hasar iç basıncına sahip olan  $55^0/-55^0/55^0/-55^0$  oryantasyon açılı boruların olduğu söylenebilir. Tabakalı kompozit borular farklı açılar kullanılarak üretildiğinde istenilen dayanıma sahip boruların üretimi sağlanabilmektedir. Bu durum en açık bir şekilde bu çalışmada kullanılan  $55^0/-55^0/30^0/-30^0$  oryantasyon açılı borular için de söylenebilir. Çizelge 4.4' de bakıldığında  $55^0/-55^0/30^0/-30^0$  ve  $45^0/-45^0/45^0/-45^0$  oryantasyonlu boruların hasar iç basınçlarının yakın olduğu görülmektedir.  $55^0/-55^0/55^0/-55^0$  oryantasyon açılı borular en büyük dayanıma sahip olmasına rağmen,  $55^0/-55^0/30^0/-30^0$  oryantasyon açılı borularda  $\pm 30^0$  açılarının olduğu tabakalardan dolayı hasar iç basıncının düştüğü görülmektedir. Burada  $\pm 30^0$  oryantasyon açılarla üretilen tabakalı kompozit boruların dayanımının daha düşük olduğunu söyleyebiliriz. Düşük dayanıma sahip oryantasyon açılı tabakalarla yüksek dayanıma sahip oryantasyon açılı tabakalar birlikte kullanıldığında, istenilen dayanıma sahip boruları elde etme imkanı olduğu da söylenebilir.



**Şekil 4.14.**  $45^0/-45^0/45^0/-45^0$  oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar deneyleri



**Şekil 4.15.**  $55^0/-55^0/30^0/-30^0$  oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar deneyleri



**Şekil 4.16.**  $55^0/-55^0/55^0/-55^0$  oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar deneyleri

#### **4.3.2. Alın alına yapıştırılarak birleştirilen kompozit boruların deneysel çalışması**

Farklı oryantasyon açılarda ürettirilmiş tabakalı kompozit borular DP 410 ve DP 490 yapıştırıcılar ile alın alına birleştirilmiştir. Bu birleştirme aynı oryantasyon açılı boruların birbirleri ile birleştirilerek yapılmıştır ve yapıştırılan bölgeler kürleşene (tamamen kuruması) kadar beklenmiştir. Daha sonra, bu birleştirilen boruların deneysel testleri yapılmıştır ve her bir durum için testler üç kez tekrarlanmıştır. Elde edilen test değerlerinden aynı durum için yapılan test sonuçlarının ortalaması alınarak, ortalama hasar iç basınçları belirlenmiş ve sonuçlar Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6’ da verilmiştir. Hasar tespit deney fotoğrafları Şekil 4.17-4.22’de verilmiştir.

**Çizelge 4.5.** DP 410 yapıştırıcı ile alın alına yapıştırılmış farklı oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların deneysel ortalama hasar iç basınçları

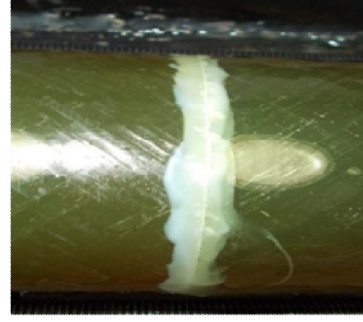
Numune No	Yükleme durumu	Oryantasyon açısı	Ortalama Hasar İç Basıncı (MPa)
1	İç Basınç	45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup>	7.167
2		55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup>	6.833
3		55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup>	8.167

**Çizelge 4.6.** DP 490 yapıştırıcı ile alın alına yapıştırılmış farklı oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların deneysel ortalama hasar iç basınçları

Numune No	Yükleme durumu	Oryantasyon açısı	Ortalama Hasar İç Basıncı (MPa)
1	İç Basınç	45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup>	5.500
2		55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup>	5.333
3		55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup>	7.167

Çalışmalarda, DP 410 yapıştırıcı ile yapılan birleştirme işlemlerinin DP 490 yapıştırıcı ile yapılan birleştirme işlemlerine göre daha dayanıklı oldukları deneysel çalışmalarda elde edilen test sonuçları ile tespit edilmiştir. Her bir oryantasyon açısı ve yapıştırıcı türüne göre üç adet hazırlanmış deney numuneleri için deneyler üç defa tekrarlanmıştır ve bu çalışmalar sonucu elde edilen değerlerin ortalaması alınarak her bir durum için hasar iç basınçları elde edilmiştir. Ayrıca her iki çalışma incelendiğinde en yüksek hasar değerleri 55<sup>0</sup>/-55<sup>0</sup>/55<sup>0</sup>/-55<sup>0</sup> oryantasyon açılı boruların kullanıldığı testler olduğu Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6’ da görülmektedir. Hasarların oluştuğu bölgeler Şekil 4.17-4.22’ de gösterilmiştir. Kompozit borunun hasara uğrama basıncının yapıştırılan bölgeye etkisi büyüktür. Çünkü yapıştırma işleminde yapıştırıcı ve kompozit boru arasında bir uyum oluşmaktadır. Eğer kullanılan borunun hasar basınç dayanımı düşükse, yapıştırılan bölgede de hasar düşük basınçlarda görülmektedir. Çizelge 4.4’ de kompozit boruların hasar dayanımları incelendiğinde 55<sup>0</sup>/-55<sup>0</sup>/55<sup>0</sup>/-55<sup>0</sup> oryantasyon açılı kompozit borunun en büyük hasar iç basıncına sahip olduğu görülmektedir. Üç farklı oryantasyon açıları kullanarak üretilen kompozit boruların iki farklı türdeki yapıştırıcılar ile alın alına birleştirilmesi işlemleri bittikten sonra yapılan deneysel çalışmalar sonucunda her iki tür yapıştırıcı için elde edilen hasar iç basınçlarının da birbirlerinden farklı olduğu gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, alın alına birleştirme işleminde hasar değerlerinin kompozit boruların hasar iç basınç değerlerine yakın olduğu görülmektedir. Bunun sebebi, yapıştırılan bölgelerin kompozit borularla tamamen

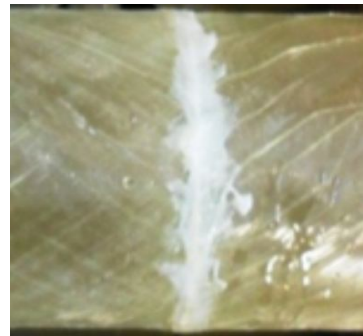
bütünleştiği ve birleştirilen iki borunun tek bir boru gibi davrandığı söylenebilir. Çünkü birleştirilen bölgede borunun ve yapıştırıcının hareket kabiliyetini sınırlayacak herhangi bir durum ve sınır şartı bulunmamaktadır. Bu sebeple, boru ve yapıştırıcı arasında mükemmel bir uyumluluk meydana gelmiştir.



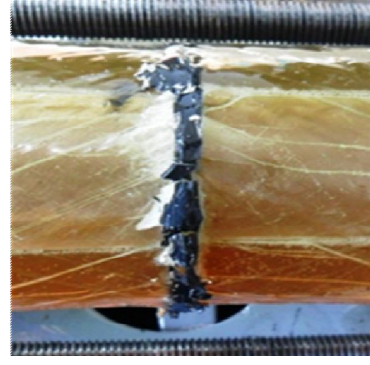
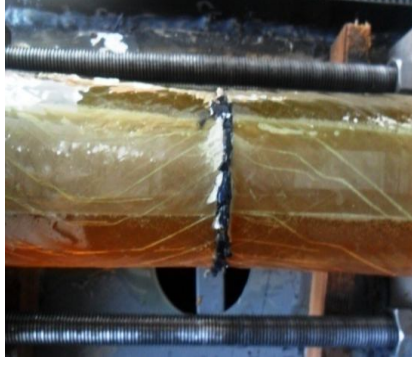
**Şekil 4.17.** DP 410 yapıştırıcı ile alın altına birleştirilmiş  $45^{\circ}/-45^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}$  oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları



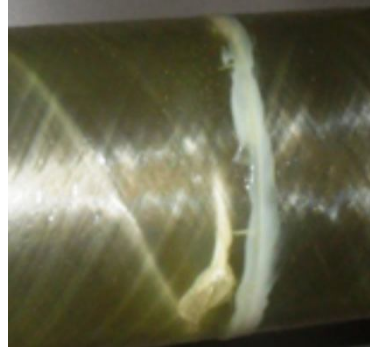
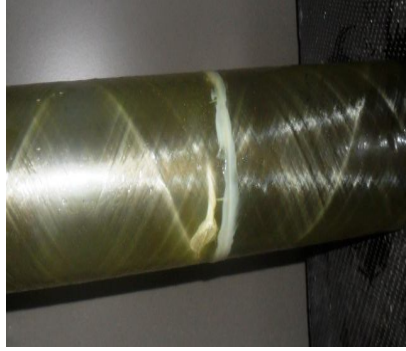
**Şekil 4.18.** DP 490 yapıştırıcı ile alın altına birleştirilmiş  $45^{\circ}/-45^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}$  oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları



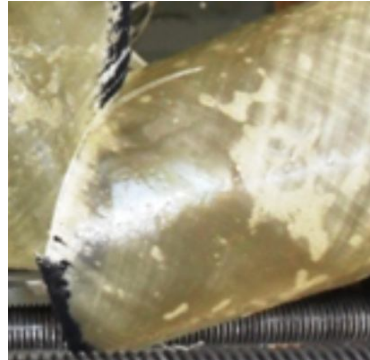
**Şekil 4.19.** DP 410 türü yapıştırıcı ile alın altına birleştirilmiş  $55^{\circ}/-55^{\circ}/30^{\circ}/-30^{\circ}$  oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları



**Şekil 4.20.** DP 490 türü yapıştırıcı ile alın altına birleştirilmiş  $55^{\circ}/-55^{\circ}/30^{\circ}/-30^{\circ}$  oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları



**Şekil 4.21.** DP 410 türü yapıştırıcı ile alın altına birleştirilmiş  $55^{\circ}/-55^{\circ}/55^{\circ}/-55^{\circ}$  oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları



**Şekil 4.22.** DP 490 türü yapıştırıcı ile alın altına birleştirilmiş  $55^{\circ}/-55^{\circ}/55^{\circ}/-55^{\circ}$  oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları

#### 4.3.3. Yama kullanılarak birleştirilen kompozit boruların deneysel çalışması

Yama kullanılarak birleştirilen farklı oryantasyon açılarındaki boruların hasar değerleri Çizelge 4.7 ve Çizelge 4.8’ de gösterilmiştir. Çizelge 4.7 ve Çizelge 4.8’ deki hasar iç basınçları incelendiğinde iki yapıştırıcı arasından en dayanıklı DP 410 model yapıştırıcı olduğu görülmektedir. Oryantasyon açıları incelendiğinde ise,  $55^0/-55^0/55^0/-55^0$  oryantasyon açılarına sahip borulardan elde edilen deney numunelerinin tüm yama uzunluklarında en yüksek hasar iç basıncına sahip olduğu görülmektedir.

DP 410 yapıştırıcı kullanılarak hazırlanan numunelerdeki tüm yama boylarında belirlenen hasar iç basınçları karşılaştırıldığında, daha önceden de bahsedildiği gibi en yüksek hasar iç basınçları  $55^0/-55^0/55^0/-55^0$  oryantasyon açılı numunelerde oluşmuştur ve bunu takip eden bir sonraki yüksek hasar iç basıncına sahip numuneler,  $55^0/-55^0/30^0/-30^0$  oryantasyon açılı numunelerdir.  $45^0/-45^0/45^0/-45^0$  oryantasyon açısına sahip numunelerde en düşük hasar iç basıncına sahiptirler.

**Çizelge 4.7.** DP 410 yapıştırıcı ile yama kullanılarak yapıştırılmış farklı oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların deneysel ortalama hasar iç basınçları

Numune No	Yükleme durumu	Yama Boyu (mm)	Oryantasyon açısı	Ortalama Hasar İç Basıncı (MPa)
1	İç Basınç	20	$45^0/-45^0/45^0/-45^0$	4.833
2			$55^0/-55^0/30^0/-30^0$	6.000
3			$55^0/-55^0/55^0/-55^0$	6.333
4		30	$45^0/-45^0/45^0/-45^0$	5.833
5			$55^0/-55^0/30^0/-30^0$	6.667
6			$55^0/-55^0/55^0/-55^0$	7.667
7		40	$45^0/-45^0/45^0/-45^0$	7.333
8			$55^0/-55^0/30^0/-30^0$	7.667
9			$55^0/-55^0/55^0/-55^0$	8.833

DP 490 yapıştırıcı kullanılarak hazırlanan numunelerde ise, tüm yama boylarında belirlenen hasar iç basınçları karşılaştırıldığında,  $55^0/-55^0/55^0/-55^0$  oryantasyon açılı numuneler en yüksek hasar iç basıncına sahip olup, bunu takip eden bir sonraki yüksek hasar iç basıncına sahip  $45^0/-45^0/45^0/-45^0$  oryantasyon açılı numunelerdir. En düşük hasar iç basıncına sahip olan numunelerde  $55^0/-55^0/30^0/-30^0$  oryantasyon açısına sahiptir. Fakat 40 mm boyunda yama kullanıldığında ise hasar iç basıncı sıralamasında,  $55^0/-55^0/55^0/-55^0$  oryantasyon açılı numuneler en yüksek hasar iç basıncına sahip olup, bunu takip eden bir sonraki yüksek hasar iç basıncına sahip  $55^0/-55^0/30^0/-30^0$  oryantasyon açılı numunelerdir. En düşük hasar iç basıncına



sahip olan numunelerde  $45^0/-45^0/45^0/-45^0$  oryantasyon açısına sahiptirler. Burada yama, boru ve yapıştırılan bölgeler için bir sınırlayıcı etki oluşturmaktadır. Genel olarak  $55^0/-55^0/30^0/-30^0$  oryantasyon açılı borularda hasar, yüzeyde çatlamlar oluşarak meydana gelmektedir. Buna karşın  $45^0/-45^0/45^0/-45^0$  oryantasyon açılı borularda hasar, borunun çapı genişleyerek oluşmaktadır. Yama, boruların genişlemesinde etkin bir sınırlama getirdiğinden ve 40 mm yama kullanıldığında bu sınırlama etkisi artmaktadır. Bununla birlikte yapıştırıcının dayanımı ve yapısı da hasarın oluşma durumunu etkileyebilmektedir. Bu sebepten dolayı 40 mm yama uzunluğunda hasar iç basıncı sıralamasının değiştiği söylenebilir.

**Çizelge 4.8.** DP 490 yapıştırıcı ile yama kullanılarak yapıştırılmış farklı oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların deneysel ortalama hasar iç basınçları

Numune No	Yükleme durumu	Yama Boyu (mm)	Oryantasyon açısı	Ortalama Hasar İç Basıncı (MPa)
1	İç Basıncı	20	$45^0/-45^0/45^0/-45^0$	3.750
2			$55^0/-55^0/30^0/-30^0$	3.583
3			$55^0/-55^0/55^0/-55^0$	4.083
4		30	$45^0/-45^0/45^0/-45^0$	4.500
5			$55^0/-55^0/30^0/-30^0$	4.333
6			$55^0/-55^0/55^0/-55^0$	5.500
7		40	$45^0/-45^0/45^0/-45^0$	5.333
8			$55^0/-55^0/30^0/-30^0$	5.667
9			$55^0/-55^0/55^0/-55^0$	6.500

Bu çalışmada iki farklı yapıştırıcı kullanılarak yapılan deneysel testlerin sonuçlarının farklı olmasının sebebi, DP 410 yapıştırıcının DP 490 yapıştırıcıya göre daha iyi bir birleşme sağladığı, kürleşmeden sonra fiziksel dayanımının daha iyi olduğu ve kompozit borular ile uyumlu olduğu söylenebilir. Deneyler için hazırlanan numunelerin test sonrası hasar durumları Şekil 4.23-4.40' da görülmektedir



**Şekil 4.23.** DP 410 yapıştırıcı ile 20 mm yama kullanarak yapıştırılan  $45^{\circ}/-45^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}$  oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları



**Şekil 4.24.** DP 490 yapıştırıcı ile 20 mm yama kullanarak yapıştırılan  $45^{\circ}/-45^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}$  oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları



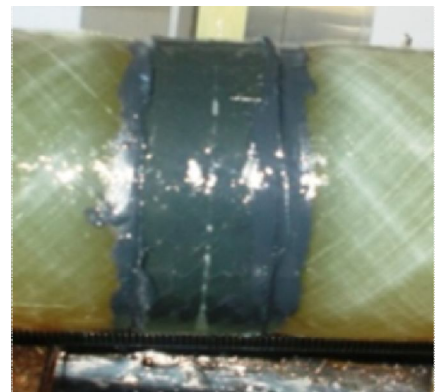
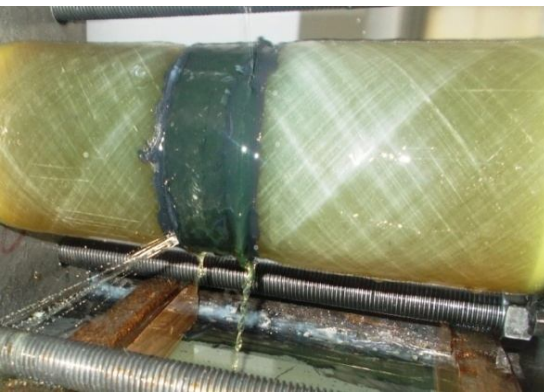
**Şekil 4.25.** DP 410 yapıştırıcı ile 30 mm yama kullanarak yapıştırılan  $45^{\circ}/-45^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}$  oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları



**Şekil 4.26.** DP 490 yapıştırıcı ile 30 mm yama kullanılarak yapıştırılan  $45^{\circ}/-45^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}$  oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları



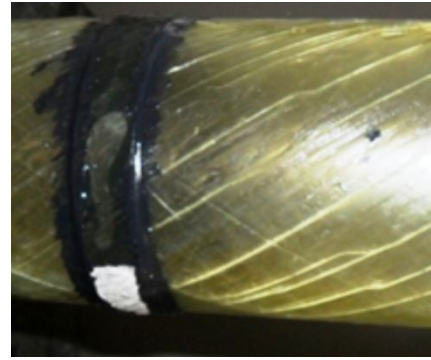
**Şekil 4.27.** DP 410 yapıştırıcı ile 40 mm yama kullanılarak yapıştırılan  $45^{\circ}/-45^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}$  oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları



**Şekil 4.28.** DP 490 yapıştırıcı ile 40 mm yama kullanılarak yapıştırılan  $45^{\circ}/-45^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}$  oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları



**Şekil 4.29.** DP 410 yapıştırıcı ile 20 mm yama kullanarak yapıştırılan  $55^{\circ}/-55^{\circ}/30^{\circ}/-30^{\circ}$  oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları



**Şekil 4.30.** DP 490 yapıştırıcı ile 20 mm yama kullanarak yapıştırılan  $55^{\circ}/-55^{\circ}/30^{\circ}/-30^{\circ}$  oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları



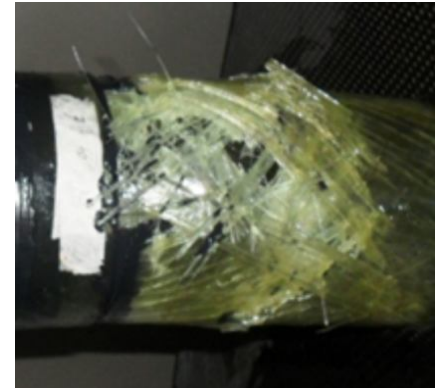
**Şekil 4.31.** DP 410 yapıştırıcı ile 30 mm yama kullanarak yapıştırılan  $55^{\circ}/-55^{\circ}/30^{\circ}/-30^{\circ}$  oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları



**Şekil 4.32.** DP 490 yapıştırıcı ile 30 mm yama kullanılarak yapıştırılan  $55^{\circ}/-55^{\circ}/30^{\circ}$  / $-30^{\circ}$  oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları



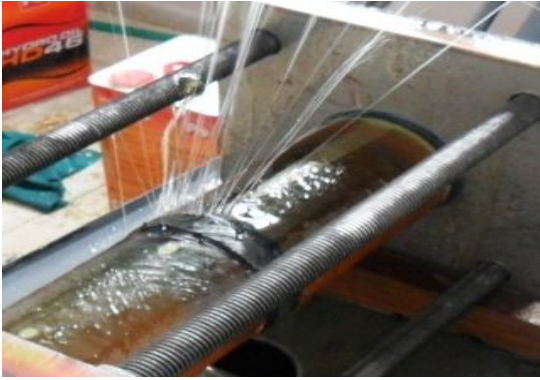
**Şekil 4.33.** DP 410 yapıştırıcı ile 40 mm yama kullanılarak yapıştırılan  $55^{\circ}/-55^{\circ}/30^{\circ}$  / $-30^{\circ}$  oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları



**Şekil 4.34.** DP 490 yapıştırıcı ile 40 mm yama kullanılarak yapıştırılan  $55^{\circ}/-55^{\circ}/30^{\circ}$  / $-30^{\circ}$  oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları



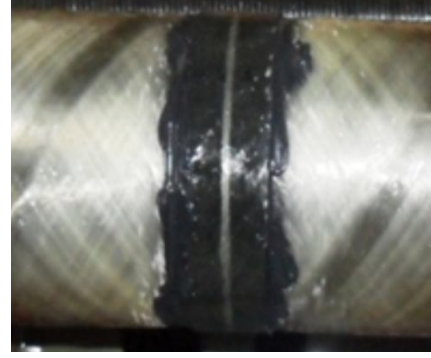
**Şekil 4.35.** DP 410 yapıştırıcı ile 20 mm yama kullanılarak yapıştırılan  $55^{\circ}/-55^{\circ}/55^{\circ}/-55^{\circ}$  oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları



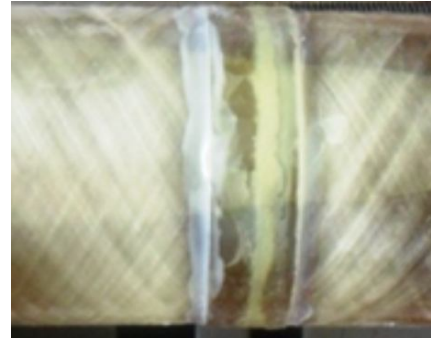
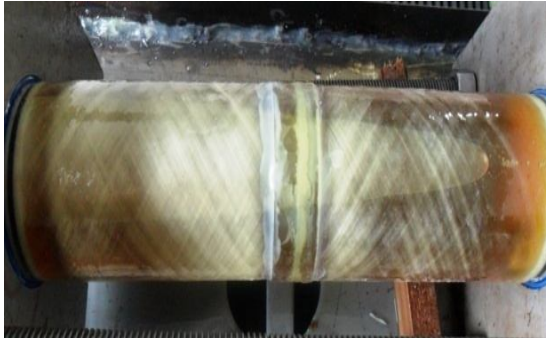
**Şekil 4.36.** DP 490 yapıştırıcı ile 20 mm yama kullanılarak yapıştırılan  $55^{\circ}/-55^{\circ}/55^{\circ}/-55^{\circ}$  oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları



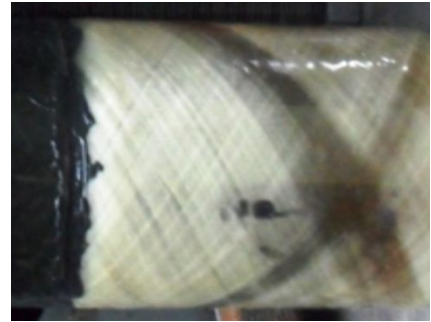
**Şekil 4.37.** DP 410 yapıştırıcı ile 30 mm yama kullanılarak yapıştırılan  $55^{\circ}/-55^{\circ}/55^{\circ}/-55^{\circ}$  oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları



**Şekil 4.38.** DP 490 yapıştırıcı ile 30 mm yama kullanılarak yapıştırılan  $55^{\circ}/-55^{\circ}/55^{\circ}/-55^{\circ}$  oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları



**Şekil 4.39.** DP 410 yapıştırıcı ile 40 mm yama kullanılarak yapıştırılan  $55^{\circ}/-55^{\circ}/55^{\circ}/-55^{\circ}$  oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları



**Şekil 4.40.** DP 490 yapıştırıcı ile 40 mm yama kullanılarak yapıştırılan  $55^{\circ}/-55^{\circ}/55^{\circ}/-55^{\circ}$  oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları

#### 4.3.4. Kademeli olarak birleştirilen kompozit boruların deneysel çalışması

Kademeli olarak farklı iki yapıştırıcı kullanılarak birleştirilen farklı oryantasyon açılarına sahip kompozit boruların hasar değerleri Çizelge 4.9 ve Çizelge 4.10' da gösterilmiştir. Çizelge 4.9 ve Çizelge 4.10' daki hasar iç basınçları incelendiğinde, iki yapıştırıcı arasından en dayanıklı DP 410 yapıştırıcı olduğu görülmektedir. Oryantasyon açıları incelendiğinde,  $55^0/-55^0/55^0/-55^0$  oryantasyon açılarına sahip boruların, kademeli olarak birleştirilen deney test numuneleri arasından ve genel olarak tüm kademeli birleştirme uzunluklarında en yüksek hasar iç basıncına sahip olduğu görülmektedir.

DP 410 yapıştırıcı ile 15 mm bindirme uzunluğunda kademeli olarak birleştirilen  $55^0/-55^0/30^0/-30^0$  ve  $55^0/-55^0/55^0/-55^0$  oryantasyon açılı numuneler için elde edilen hasar iç basınçları aynı bulunmuştur. Bununla birlikte, kademeli olarak 20 mm bindirme uzunluğunda yapıştırılmış  $55^0/-55^0/30^0/-30^0$  ile  $45^0/-45^0/45^0/-45^0$  oryantasyon açılı numunelerden elde edilen ortalama hasar iç basınçlarının aynı bulunduğu Çizelge 4.9' da görülmektedir. Bu farklılıklar, yapıştırma şekli, boru yüzeyi, yapıştırılan yüzeyin temizliği ve yapışma durumu gibi birçok sebepten oluşabilmektedir. Ayrıca her numunede iki farklı çapa sahip borular birleştirildiğinden, boru çapının da hasar iç basınçlarına etkisi olmaktadır. Ayrıca bu tür yapıştırma işlemlerinde boruların iç içe geçirilerek yapıştırılması sonucu, birleştirmenin yapıldığı kısımda iki boru iç içe geçtiğinden bu bölgedeki dayanım, boruların diğer kısımlarına göre daha fazladır. Fakat bu bölgenin dayanımının artması, numunelerin iç basınca maruz bırakıldığında borunun yapıştırılan bölgesinin rahat bir şekilde genişlemesini önlemektedir. Bu durumda da hasar iç basınç değerleri farklılıklar gösterebilmektedir.

DP 490 yapıştırıcı kullanılarak hazırlanan numunelerde ise, tüm kademeli olarak birleştirme uzunluklarında belirlenen hasar iç basınçları karşılaştırıldığında,  $55^0/-55^0/55^0/-55^0$  oryantasyon açılı numunelerin en yüksek hasar iç basıncına sahip olduğu Çizelge 4.10' da görülmektedir. Bunu takip eden bir sonraki yüksek hasar iç basıncına sahip numune,  $55^0/-55^0/30^0/-30^0$  oryantasyon açılı numunelerdir. En düşük hasar iç basıncına sahip olan numunelerde  $45^0/-45^0/45^0/-45^0$  oryantasyon açısına sahiptirler. Fakat 20 mm boyunda kademeli olarak birleştirme uzunluğunda  $55^0/-55^0/30^0/-30^0$  ile  $45^0/-45^0/45^0/-45^0$  oryantasyon açılı numunelerden elde edilen ortalama hasar iç basınçları aynı bulunmuştur.



**Çizelge 4.9.** DP 410 yapıştırıcı ile kademeli olarak yapıştırılmış farklı oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların deneysel ortalama hasar iç basınçları

Numune No	Yükleme durumu	Yama Boyu (mm)	Oryantasyon açısı	Ortalama Hasar İç Basıncı (MPa)
1	İç Basınç	10	45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup>	5.667
2			55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup>	6.000
3			55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup>	6.833
4		15	45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup>	6.500
5			55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup>	7.333
6			55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup>	7.333
7		20	45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup>	7.500
8			55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup>	7.500
9			55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup>	8.333

**Çizelge 4.10.** DP 490 yapıştırıcı ile kademeli olarak yapıştırılmış farklı oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların deneysel ortalama hasar iç basınçları

Numune No	Yükleme durumu	Yama Boyu (mm)	Oryantasyon açısı	Ortalama Hasar İç Basıncı (MPa)
1	İç Basınç	10	45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup>	4.333
2			55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup>	4.667
3			55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup>	5.000
4		15	45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup>	4.833
5			55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup>	5.000
6			55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup>	6.000
7		20	45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup>	5.667
8			55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup>	5.667
9			55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup>	6.500

DP 410 ve DP 490 yapıştırıcılar ile iki farklı iç ve dış çaplara sahip kompozit borular kademeli olarak birleştirilip, deneyler yapılması sonucu ortalama hasar iç basınçları tespit edilmiştir. Çalışmalarda, yapılan testlerin ve hazırlanan numunelerin mümkün olduğunca aynı şartlarda hazırlanmasına çalışılmıştır. Fakat yukarıda da yapılan açıklamalarda belirtilen durumlar boruların üretimine, kullanılan yapıştırıcı türüne, yapıştırılan bindirme uzunluğuna, yapıştırma şekline, ortam sıcaklığına, yapışma yüzeylerinin durumuna bağlı olarak farklılıklar ortaya çıkmış olabilir. Yapılan deneysel çalışmada, üç farklı oryantasyon açısındaki kompozit boruların farklı kademeli birleştirme uzunluğunda yapılan testlerde DP 410 yapıştırıcı ile yapıştırılan numuneler DP 490 yapıştırıcı ile yapıştırılan numunelere göre daha yüksek hasar iç basıncına dayandığı Çizelge 4.9 ve Çizelge 4.10’ da görülmektedir.

Ayrıca testler sonrası oluşan hasarlar da aşağıdaki şekillerde (Şekil 4.41 - 4.58) görülmektedir.



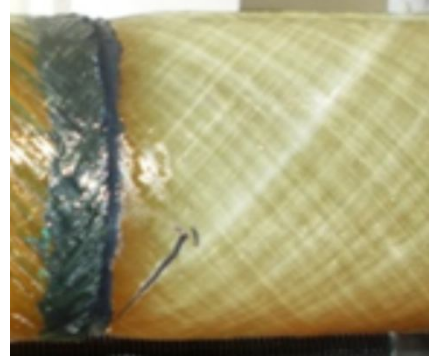
**Şekil 4.41.** DP 410 yapıştırıcı ile 10 mm bindirme uzunluğunda kademeli olarak yapıştırılan  $45^{\circ}/-45^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}$  oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları



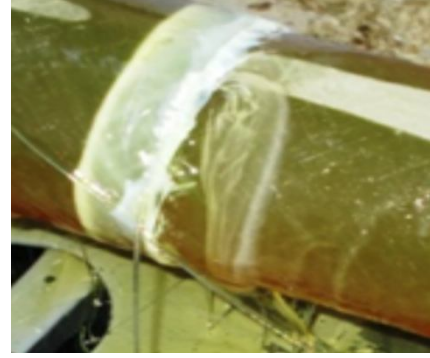
**Şekil 4.42.** DP 490 yapıştırıcı ile 10 mm bindirme uzunluğunda kademeli olarak yapıştırılan  $45^{\circ}/-45^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}$  oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları



**Şekil 4.43.** DP 410 yapıştırıcı ile 15 mm bindirme uzunluğunda kademeli olarak yapıştırılan  $45^{\circ}/-45^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}$  oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları



**Şekil 4.44.** DP 490 yapıştırıcı ile 15 mm bindirme uzunluğunda kademeli olarak yapıştırılan  $45^0/-45^0/45^0/-45^0$  oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları



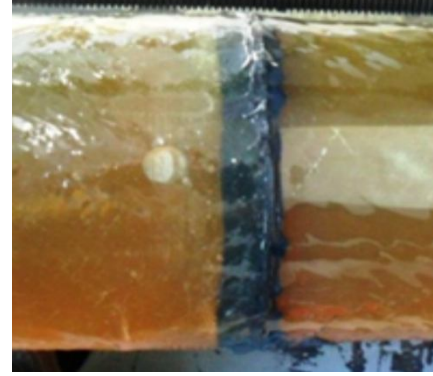
**Şekil 4.45.** DP 410 yapıştırıcı ile 20 mm bindirme uzunluğunda kademeli olarak yapıştırılan  $45^0/-45^0/45^0/-45^0$  oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları



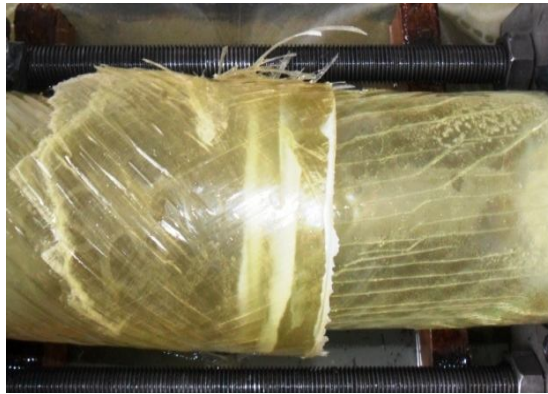
**Şekil 4.46.** DP 490 yapıştırıcı ile 20 mm bindirme uzunluğunda kademeli olarak yapıştırılan  $45^0/-45^0/45^0/-45^0$  oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları



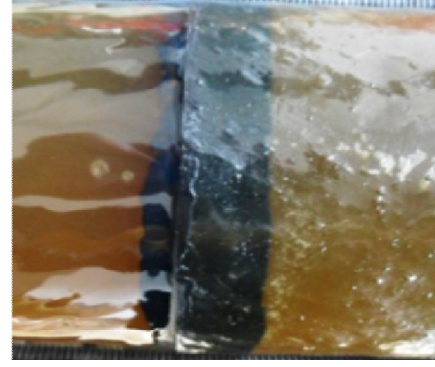
**Şekil 4.47.** DP 410 yapıştırıcı ile 10 mm bindirme uzunluğunda kademeli olarak yapıştırılan  $55^{\circ}/-55^{\circ}/30^{\circ}/-30^{\circ}$  oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları



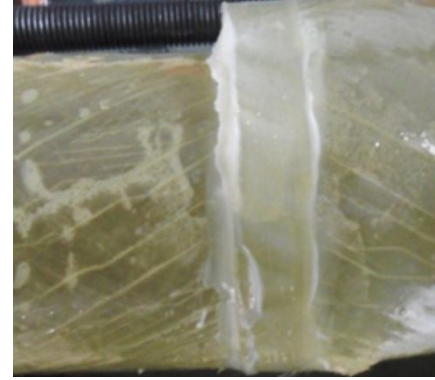
**Şekil 4.48.** DP 490 yapıştırıcı ile 10 mm bindirme uzunluğunda kademeli olarak yapıştırılan  $55^{\circ}/-55^{\circ}/30^{\circ}/-30^{\circ}$  oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları



**Şekil 4.49.** DP 410 yapıştırıcı ile 15 mm bindirme uzunluğunda kademeli olarak yapıştırılan  $55^{\circ}/-55^{\circ}/30^{\circ}/-30^{\circ}$  oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları



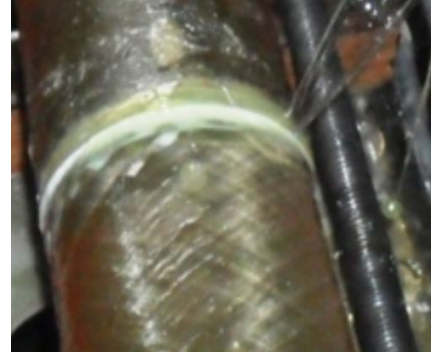
**Şekil 4.50.** DP 490 yapıştırıcı ile 15 mm bindirme uzunluğunda kademeli olarak yapıştırılan  $55^0/-55^0/30^0/-30^0$  oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları



**Şekil 4.51.** DP 410 yapıştırıcı ile 20 mm bindirme uzunluğunda kademeli olarak yapıştırılan  $55^0/-55^0/30^0/-30^0$  oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları



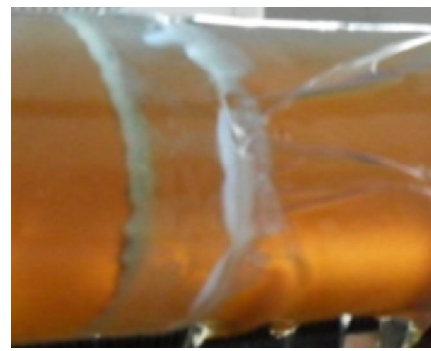
**Şekil 4.52.** DP 490 yapıştırıcı ile 20 mm bindirme uzunluğunda kademeli olarak yapıştırılan  $55^0/-55^0/30^0/-30^0$  oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları



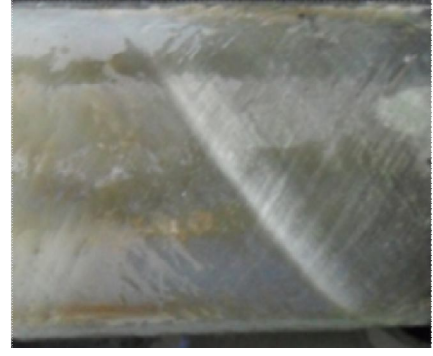
**Şekil 4.53.** DP 410 yapıştırıcı ile 10 mm bindirme uzunluğunda kademeli olarak yapıştırılan  $55^0/-55^0/55^0/-55^0$  oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları



**Şekil 4.54.** DP 490 yapıştırıcı ile 10 mm bindirme uzunluğunda kademeli olarak yapıştırılan  $55^0/-55^0/55^0/-55^0$  oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları



**Şekil 4.55.** DP 410 yapıştırıcı ile 15 mm bindirme uzunluğunda kademeli olarak yapıştırılan  $55^0/-55^0/55^0/-55^0$  oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları



**Şekil 4.56.** DP 490 yapıştırıcı ile 15 mm bindirme uzunluğunda kademeli olarak yapıştırılan  $55^0/-55^0/55^0/-55^0$  oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları



**Şekil 4.57.** DP 410 yapıştırıcı ile 20 mm bindirme uzunluğunda kademeli olarak yapıştırılan  $55^0/-55^0/55^0/-55^0$  oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları



**Şekil 4.58.** DP 490 yapıştırıcı ile 20 mm bindirme uzunluğunda kademeli olarak yapıştırılan  $55^0/-55^0/55^0/-55^0$  oryantasyon açılı tabakalı kompozit boruların hasar durumları

#### 4.4. Nümerik Çalışmalar

Deneysel olarak yapılan çalışmaların ardından nümerik çalışmalar yapılmıştır. Nümerik çalışmalarda ve deneysel çalışmalarda aynı oryantasyon açıları kullanılmıştır. Ayrıca kompozit borular için ANSYS 14.5 paket programında oluşturulan nümerik model deneysel çalışmalarla doğrulanmıştır. Yapılan deneysel çalışmaların maliyetli olması ve bazı tehlikeleri arz etmesinden dolayı dört tabakalı kompozit boruların deneysel çalışmaları yapılmıştır ve ANSYS programında üretilen model kodlarındaki aynı karakteristik özellikler (mesh yoğunluğu, elemanların boyutları v.b. ) kullanılarak altı ve sekiz tabakalı kompozit borularda modellenip nümerik analizleri yapılmıştır. Nümerik çalışmalarda, Denklem 4.1 kullanılarak kompozit boruların her bir tabakasında oluşan tabaka gerilmeleri belirlenmiştir.

$$\text{Yarı Çap Oranı} = \frac{r_j - r_{iç}}{r_{dış} - r_{iç}} \quad (4.1)$$

Burada  $r_j$  tabaka yarıçapı olup 4 tabakalı kompozit borular için  $j=1,2,3,4$ , 6 tabakalı kompozit borular için  $j=1,2,3,4,5,6$ , ve 8 tabakalı kompozit borular için  $j=1,2,3,4,5,6,7,8$ ,  $r_{iç}$  kompozit borunun iç yarıçapı ve  $r_{dış}$  kompozit borunun dış yarı çapıdır.

Modeller üzerinde bindirme uzunlukları, yama boyları ve boru et kalınlıkları farklı olmasından dolayı, bu bölgelerde oluşan gerilmeleri aynı grafikte göstermek için uzunlukları boyutsuz hale getirmede aşağıdaki formül kullanılmıştır;

$$\bar{L} = \frac{L_i}{L_0} \quad (4.2)$$

Burada  $\bar{L}$  boyutsuzlaştırılmış uzunluktur,  $L_i$  gerilmenin ölçüleceği hat üzerindeki iki nokta arası mesafedir ve  $i=1, \dots, n$  olmaktadır.  $n$  bölündüğü nokta sayısıdır.  $L_0$  gerilmenin ölçüleceği bölgenin toplam uzunluğudur.

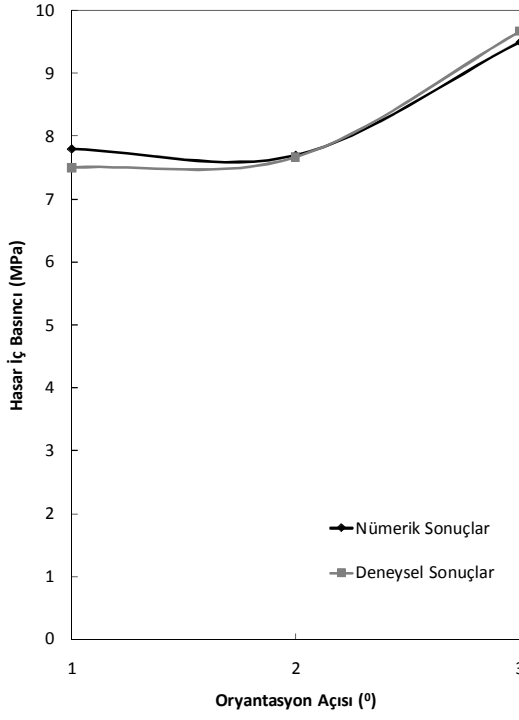
Yapılan deneysel ve nümerik çalışmaların kıyaslanması yapıldığında (Şekil 4.59 ve Şekil 4.60), deneysel ve nümerik hasar iç basınç değerlerinin birbirlerine yakın olduğu görülmektedir. Grafiklerde, yatay ekseninde;

- 1,  $45^0/-45^0/45^0/-45^0$  oryantasyon açısını göstermektedir,
- 2,  $55^0/-55^0/30^0/-30^0$  oryantasyon açısını göstermektedir,
- 3,  $55^0/-55^0/55^0/-55^0$  oryantasyon açısını göstermektedir.

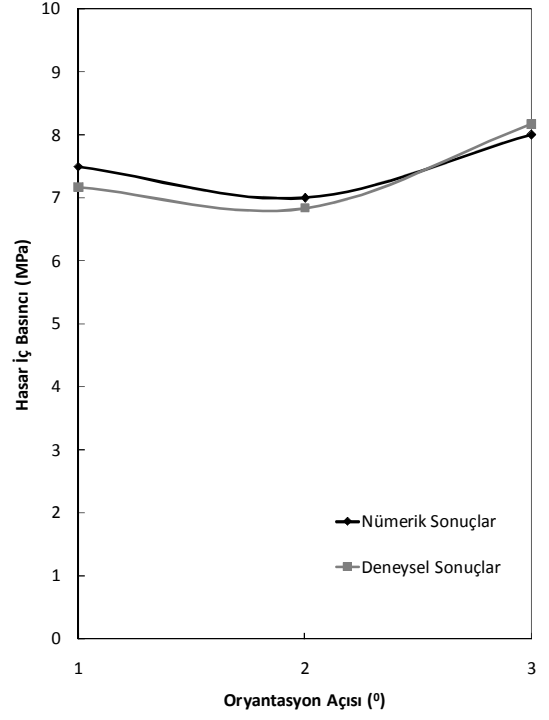


Şekil 4.59 ve Şekil 4.60' da gösterildiği gibi bazı oryantasyon açılı kompozit boruların hasar iç basınçlarının çakıştığı görülmektedir. Kompozit borularda ve kompozit boruların alın alına yapıştırılması durumlarında genel olarak hasar iç basınçları çok yakın olduğu görülmektedir. DP 410 ve DP 490 türü yapıştırıcı ile birleştirmelerin deneysel ve nümerik sonuçları arasındaki farklar çok yakın olduğu Şekil 4.59 (b) ve Şekil 4.60 (a)' da gösterilmiştir. Yama kullanılarak birleştirmede DP 410 türü yapıştırıcı ile birleştirmelerin deneysel ve nümerik sonuçları incelendiğinde, 20 mm yama uzunluğunda sonuçlar arasındaki değişim diğer yama uzunluklarına göre fazla olduğu görülmektedir. Fakat DP 490 türü yapıştırıcı ile birleştirmelerin deneysel ve nümerik sonuçları incelendiğinde, hemen hemen tüm yama uzunluklarındaki sonuçların farkı çok küçük olduğu gözlenmektedir. Kademeli olarak birleştirmede DP 410 türü yapıştırıcı ile birleştirmelerin deneysel ve nümerik sonuçları incelendiğinde, 10 mm bindirme uzunluğunda sonuçlar arasındaki değişim diğer bindirme uzunluklarına göre çok küçük olduğu görülmektedir. Ama DP 490 türü yapıştırıcı ile birleştirmelerin deneysel ve nümerik sonuçları incelendiğinde, hemen hemen tüm bindirme uzunluklarındaki sonuçların farkı çok küçük olduğu gözlenmektedir.

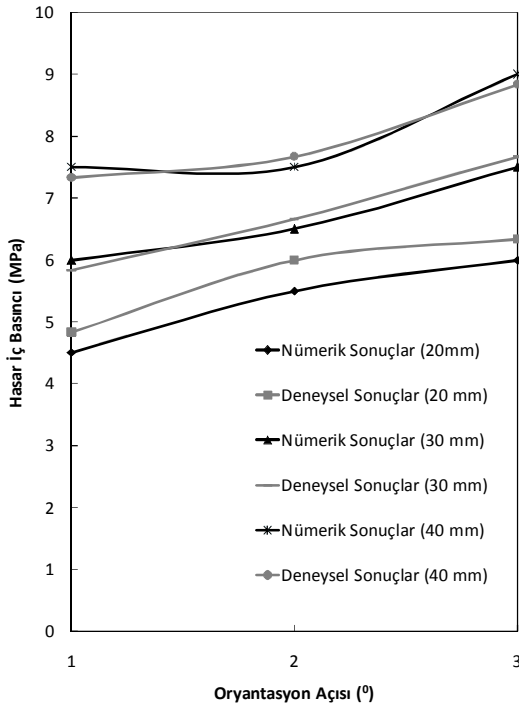
4 tabakalı kompozit borular kullanılarak yapılan deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçların, 4 tabakalı kompozit borularla modellenerek yapılan nümerik analiz sonuçlarıyla kıyaslandığında bir birlerine yakın olduğu Şekil 4.59 ve Şekil 4.60' da gösterilmiştir ve nümerik analizler için oluşturulan modeller deneysel çalışmalarla doğrulanmıştır. Nümerik çalışmalarda, ANSYS programında üretilen 4 tabakalı model kodlarında kullanılan karakteristik özellikler, 6 ve 8 tabakalı model kodlarında kullanılan karakteristik özelliklerle aynıdır.



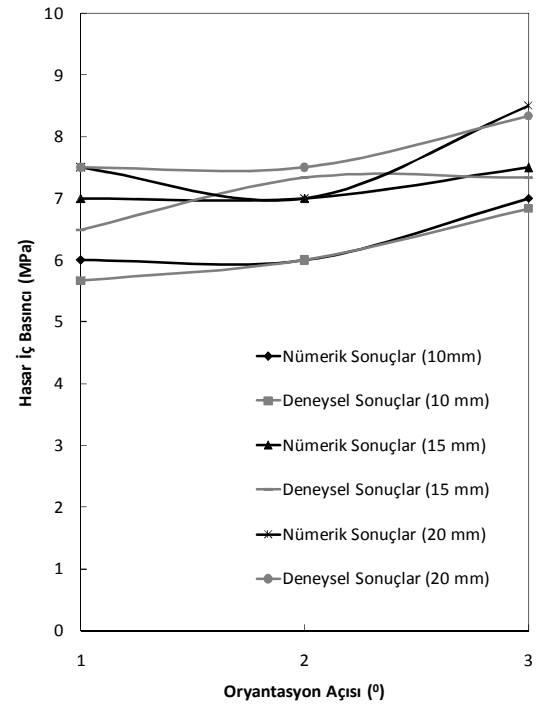
(a)



(b)

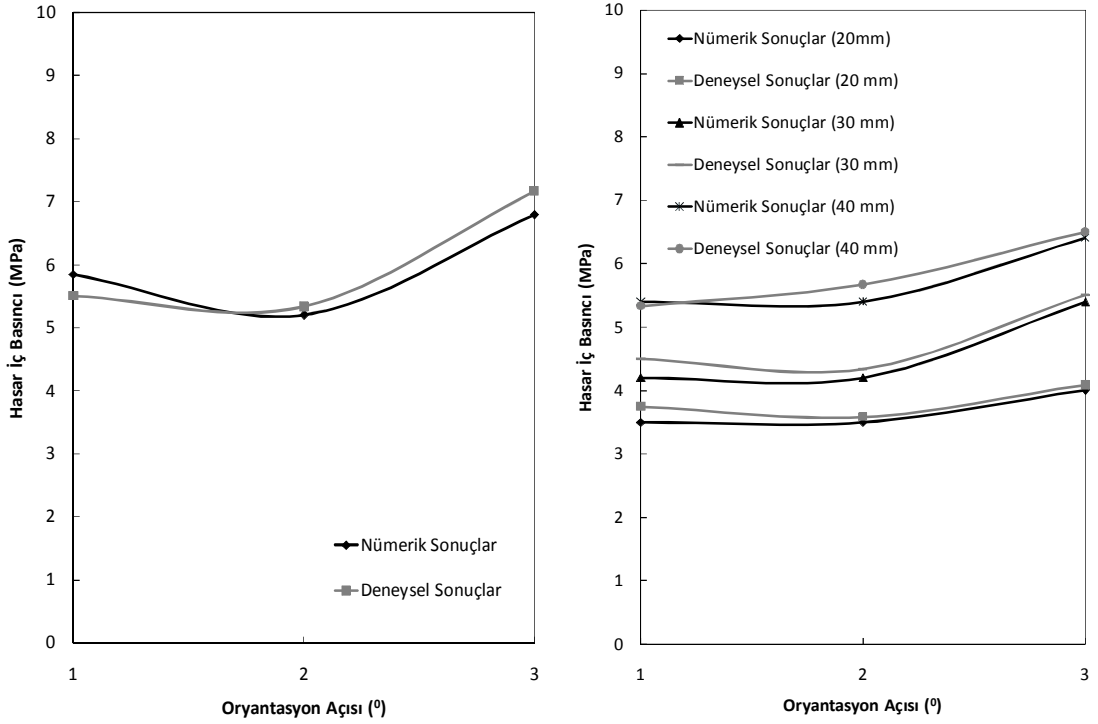


(c)



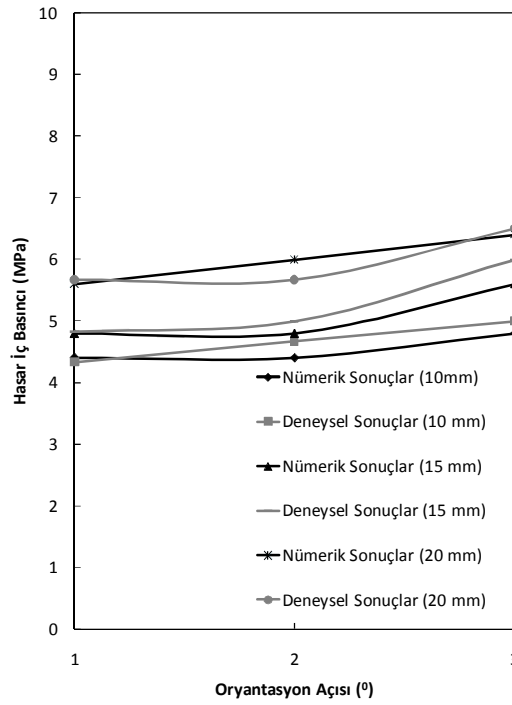
(d)

**Şekil 4.59.** Nümerik ve deneysel hasar iç basınçlarının karşılaştırılması; (a) kompozit boru, (b) alın altına birleştirme (DP 410), (c) yama ile birleştirme (DP 410), (d) kademeli olarak birleştirme (DP 410)



(a)

(b)



(c)

**Şekil 4.60.** Nümerik ve deneysel hasar iç basınçlarının karşılaştırılması; (a) alın altına birleştirme (DP 490), (b) yama ile birleştirme (DP 490), (c) kademeli olarak birleştirme (DP 490)

#### 4.4.1. Kompozit boruların nümerik sonuçları

200 mm uzunluğunda farklı oryantasyon açılı kompozit boruların nümerik analizleri yapılarak hasar iç basınçları ve oluşan gerilmeler incelenmiştir. Daha önceden de bahsedilen borulara, uygun sınır şartları ve yüklemeler yapılarak ANSYS 14.5 paket programında hasar ve gerilme analizleri yapılmıştır. Bu analizler sonucunda belirlenen parametrelerin etkileri incelenmiştir.

##### 4.4.1.1. İç basınç altında kompozit boruların nümerik sonuçları

Kompozit boruların nümerik çalışmaları 4, 6 ve 8 tabakalı olarak incelenmiştir. Tabaka sayısı arttıkça doğal olarak dayanımda artmaktadır. Her tabakanın kalınlığı aynı olup, sadece tabaka sayısı arttıkça boru et kalınlığı değişmektedir. Çizelge 4.11 incelendiğinde, 4 tabakalı borularda  $55^0/-55^0/55^0/-55^0$ , 6 tabakalı borularda  $55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$ , 8 tabakalı borularda ise  $55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$  oryantasyon açılı borular en yüksek hasar iç basıncına sahip kompozit borular olduğu görülmektedir. Nümerik çalışmalarda, kompozit borular iç basınca maruz bırakıldığında oluşan kayma gerilmelerinin durumu incelenmiş, değişimin küçük olduğu ve parametrelerden fazla etkilenmeyen kayma gerilmeleri daha sonraki çalışmalarda dikkate alınmamıştır. Şekil 4.61'de görüldüğü gibi,  $\sigma_{\theta z}$  kayma gerilmesindeki değişim diğer kayma gerilmelerinden daha büyüktür. Bu sebepten dolayı daha sonraki çalışmalarda  $\sigma_{\theta z}$  kayma gerilmesi dikkate alınmıştır.

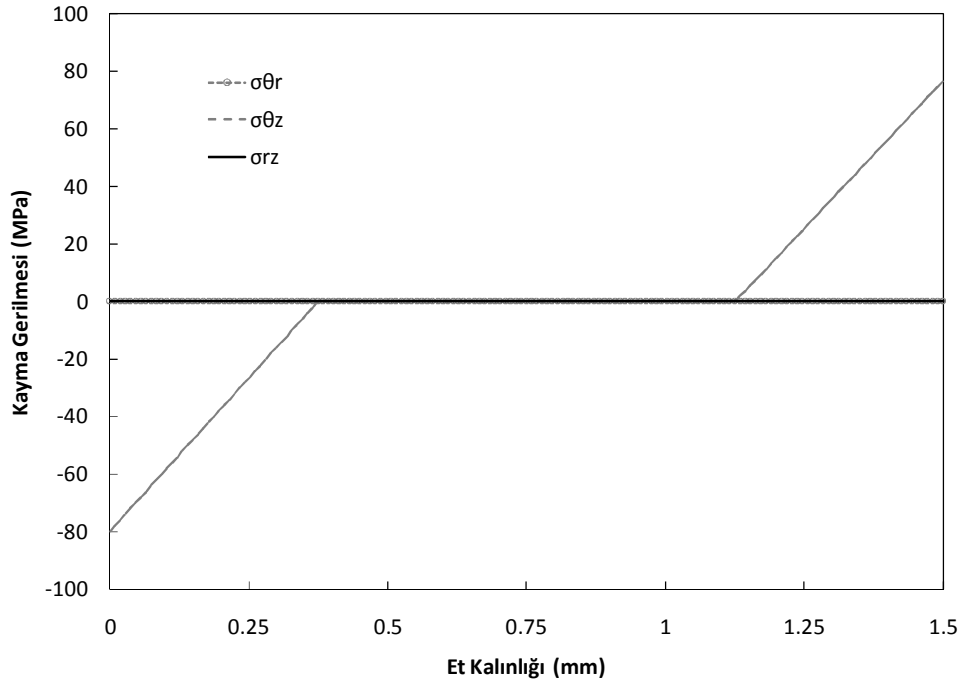
Şekil 4.62-4.65 incelendiğinde tabaka sayısı arttıkça gerilmelerin değiştiği görülmektedir. Tüm tabakalarda  $\sigma_{\theta}$  gerilmeleri diğer gerilmelerden büyüktür. Kompozit borularda tabaka sayısı arttıkça,  $\sigma_{\theta}$  gerilmesi düşmektedir. Aynı durumun diğer gerilmeler için de geçerli olduğu söylenebilir ve bu durumlar Şekil 4.62-4.65'de görülmektedir.  $\sigma_{\theta}$  gerilmesi  $55^0$  oryantasyonlar açılı tabakalar için maksimumdur.  $30^0$  oryantasyon açılı tabakalar için minimum değerdedir. Tüm tabakalar için  $\sigma_{\theta}$  gerilmesi benzer bir şekildedir.  $\pm 55^0$  ve  $\pm 45^0$  oryantasyon açılı boruların gerilmeleri et kalınlığı boyunca bir birine paralel ve  $55^0/-55^0/30^0/-30^0$  oryantasyon açılı boruların gerilmeleri daha büyüktür.  $\sigma_r$  gerilmelerinin değişimi boru et kalınlığı boyunca tüm tabakalar için benzer şekildedir ve  $\pm 55^0$  oryantasyon açılı kompozit borular için maksimumdur.  $\sigma_r$  gerilmeleri boru iç yüzeyinde maksimum değerdedir ve borunun dış yüzeyinde sıfır ya da sıfıra yakın bir değere ulaşmaktadır.  $\sigma_z$  gerilmesinin

dağılımı da boru et kalınlığı boyunca tüm tabakalar da benzer şekildedir. Grafiklerin görünümleri benzer olmasına rağmen gerilme değerleri farklıdır.  $\sigma_{\theta Z}$  gerilmesi  $\pm 55^0$  ve  $\pm 45^0$  tabakalı borular için et kalınlığı boyunca benzer bir dağılım göstermiştir. Ama  $\pm 55^0$  ve  $\pm 30^0$  oryantasyon açılı tabakalardan oluşan borulardan 4 ve 8 tabakalı boruların et kalınlığı boyunca gerilme dağılımları benzer olmasına rağmen 6 tabakalı kompozit borularda orta bölgede grafikler de farklı bir görüntü oluşmuştur. Bunun sebebi,  $\pm 55^0$  ve  $\pm 30^0$  oryantasyon açılı tabakalardan oluşan kompozit boruların 4 ve 8 tabakalılarında aynı açılı tabakalar çift olarak bulunmaktadır. Diğer bir ifadeyle 4 tabakalı kompozit borularda, kompozit borunun ilk iki tabakasının oryantasyon açıları  $\pm 55^0$  ve son iki tabakasının oryantasyon açısı  $\pm 30^0$  ve bu durum 8 tabakalı kompozit borularda da görülmektedir. Ama 6 tabakalı kompozit borularda, ilk üç tabaka  $55^0$  son üç tabaka  $30^0$  açılardan oluşarak boruda tabakaların bir birini dengeleyeceği bir durum oluşmadığından böyle bir durum meydana gelmiştir.

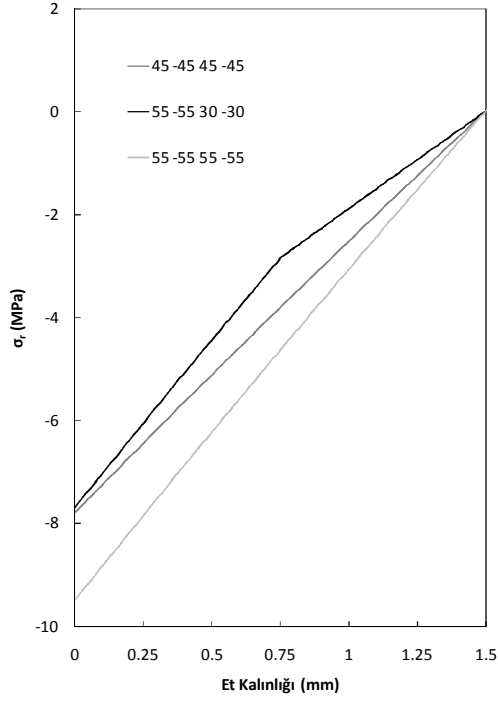
Şekil 4.63' de görüldüğü gibi, 4 tabakalı kompozit boruların her bir tabakasın da meydana gelen gerilmeler gösterilmiştir. Tabakalar tek tek seçilerek üzerlerinde medya gelen maksimum gerilmeler incelenmiştir. Tabakaların her biri dairesel durumda incelendiğinde, tabakalar üzerinde dairesel tabaka gerilmesi, tabakalardaki kayma ve eksenel gerilmeler oluşmaktadır. Maksimum gerilmeler pozitif yönde olduğu gibi negatif yönde de oluşmaktadır. Her bir tabakanın bir yüzeyinde pozitif gerilme oluşurken diğer yüzeyinde negatif bir tabaka gerilmesi oluşarak bir denge oluşması sağlanmıştır. Şekil 4.63 incelendiğinde,  $55^0/-55^0/30^0/-30^0$  oryantasyon açılı kompozit boruların diğer borulara göre farklı gerilme durumları oluşturduğu görülmektedir. Bunun sebebi, yüksek dayanıma sahip oryantasyon açılı tabakalar ile düşük dayanıma sahip oryantasyon açılı tabakaları bir araya getirerek yeni özellikli bir kompozit boru oluşturmaktan kaynaklanmaktadır. Bu oryantasyon açılı kompozit boru üzerindeki gerilmeleri incelediğimizde,  $55^0$  oryantasyon açılı tabakaların hemen hemen aynı gerilme değerlerine sahip olduğu görülmektedir.

**Çizelge 4.11.** Farklı oryantasyon açılı 4, 6 ve 8 tabakalı kompozit boruların iç basınç yüklemeleri altındaki nümerik hasar iç basınçları

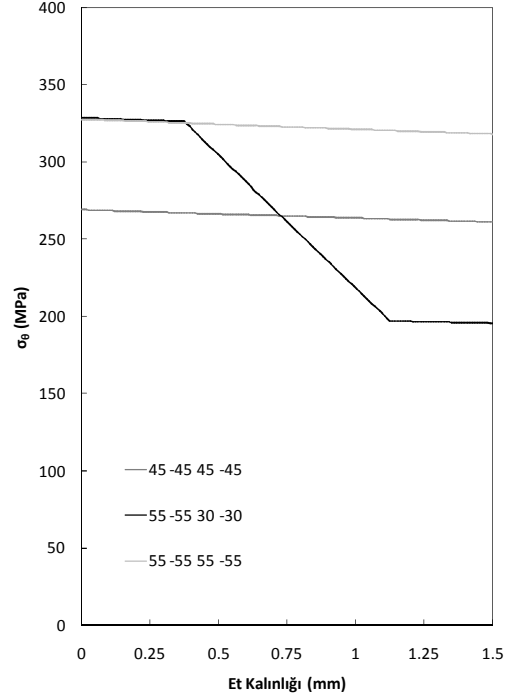
Tabaka Sayısı	Oryantasyon açısı	Hasar İç Basıncı (MPa)
4	$45^0/-45^0/45^0/-45^0$	7.8
	$55^0/-55^0/30^0/-30^0$	7.7
	$55^0/-55^0/55^0/-55^0$	9.5
6	$45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0$	11.5
	$55^0/-55^0/55^0/-30^0/30^0/-30^0$	11.5
	$55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$	14.0
8	$45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0$	15.0
	$55^0/-55^0/55^0/-55^0/30^0/-30^0/30^0/-30^0$	15.0
	$55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$	17.5



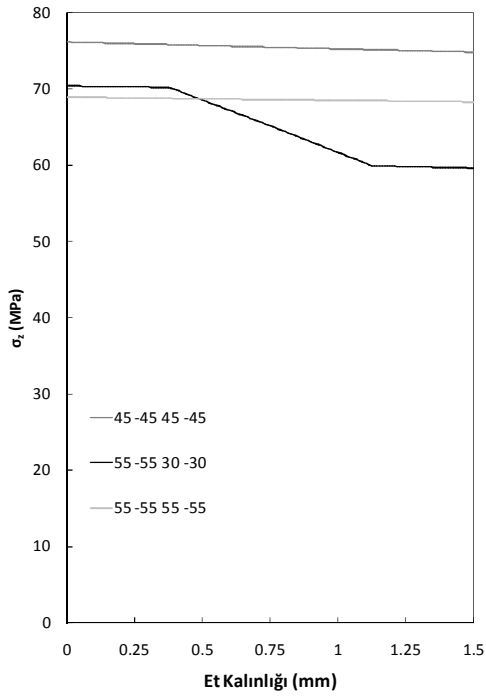
**Şekil 4.61.**  $45^0/-45^0/45^0/-45^0$  oryantasyon açılı 4 tabakalı kompozit boruların kayma gerilmelerinin karşılaştırılması (7.8 MPa)



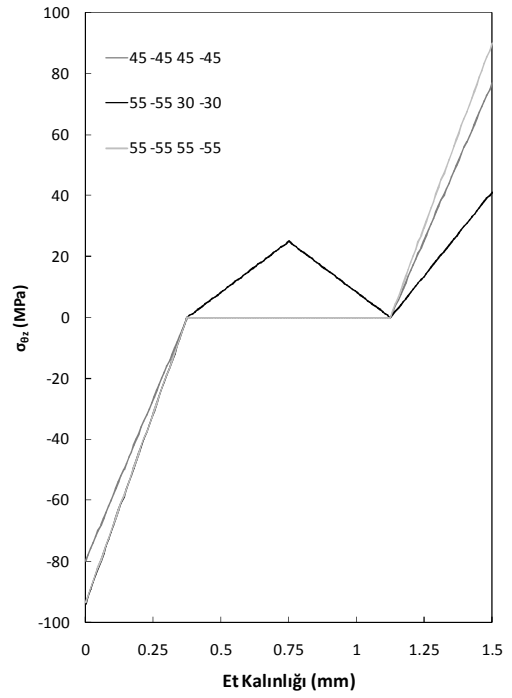
(a)



(b)

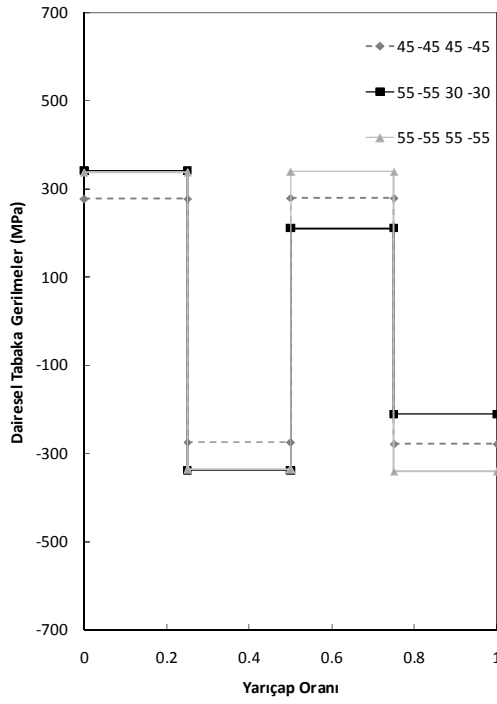


(c)

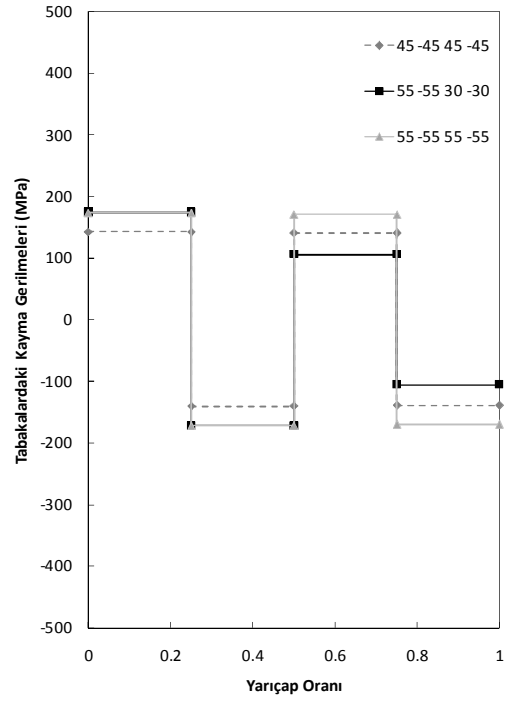


(d)

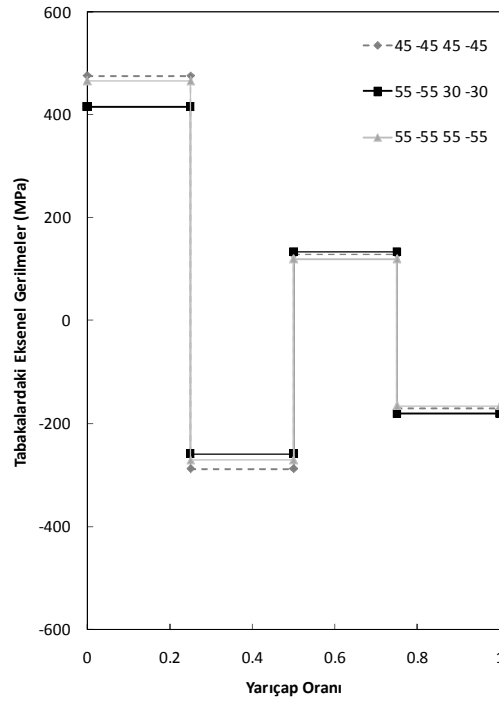
**Şekil 4.62.** Farklı oryantasyon açılı 4 tabakalı kompozit boruların; (a) radyal, (b) teğetsel, (c) eksenel ve (d) kayma gerilmelerinin karşılaştırılması ( $45^0/-45^0/45^0/-45^0$  için 7.8 MPa,  $55^0/-55^0/30^0/-30^0$  için 7.7 MPa,  $55^0/-55^0/55^0/-55^0$  için 9.5 MPa)



(a)



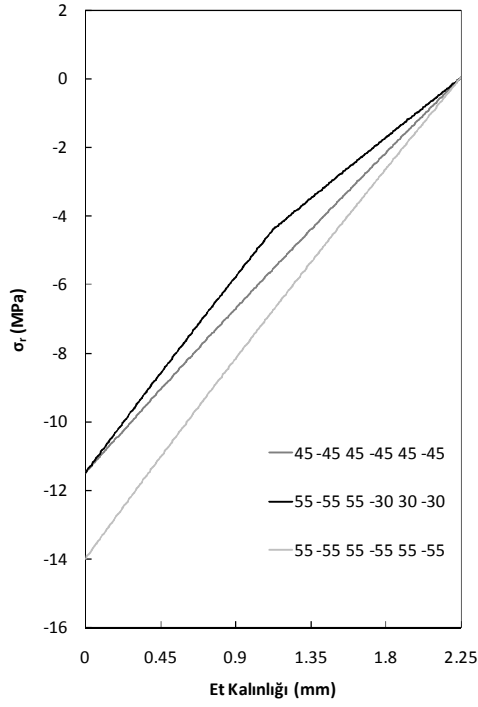
(b)



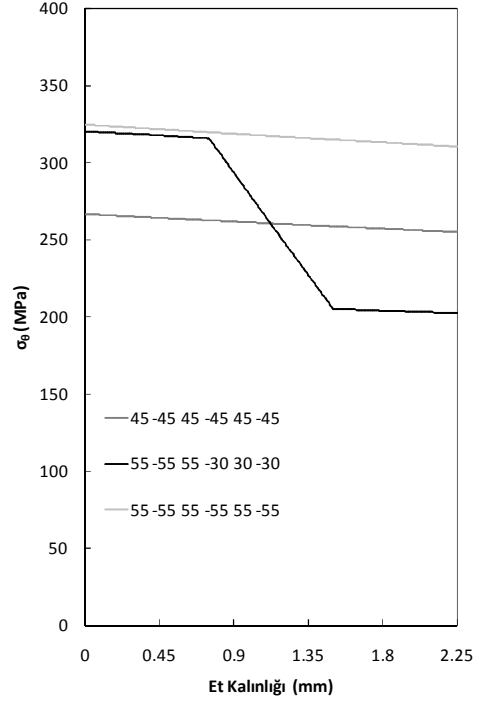
(c)

**Şekil 4.63.** Farklı oryantasyon açılı 4 tabakalı kompozit boruların tabakalarında oluşan; (a) dairesel, (b) kayma ve (c) eksenel gerilmelerinin karşılaştırılması ( $45^{\circ}/-45^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}$  için 7.8 MPa,  $55^{\circ}/-55^{\circ}/30^{\circ}/-30^{\circ}$  için 7.7 MPa,  $55^{\circ}/-55^{\circ}/55^{\circ}/-55^{\circ}$  için 9.5 MPa)

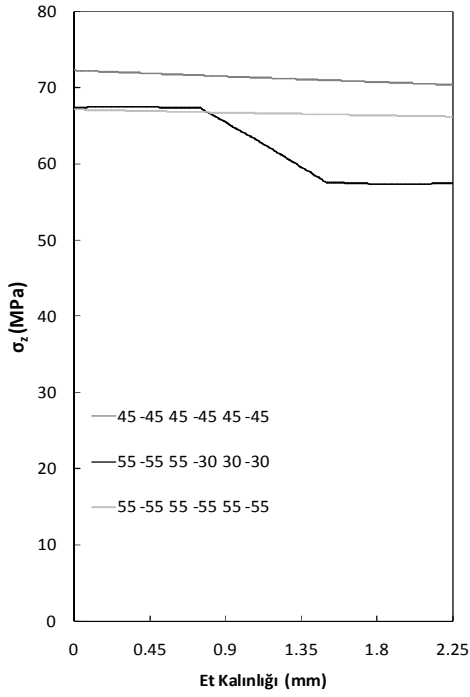




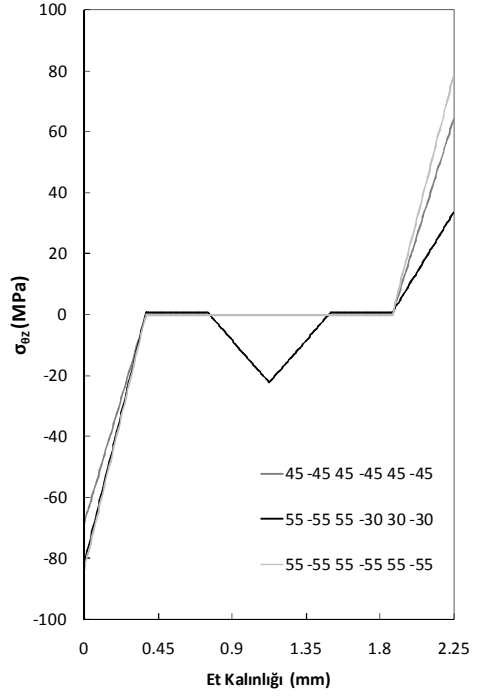
(a)



(b)

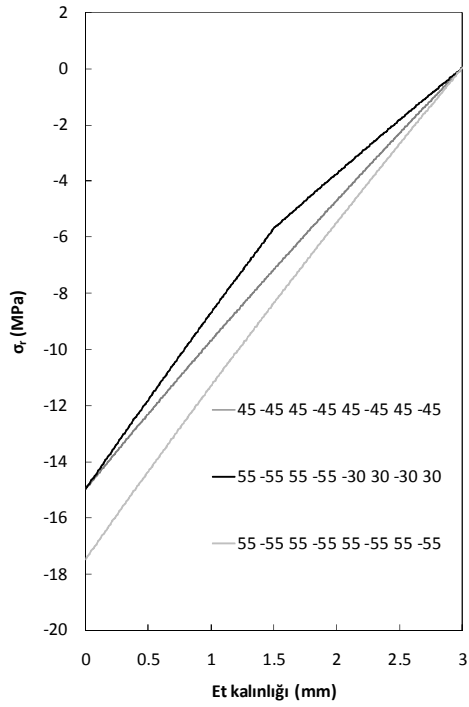


(c)

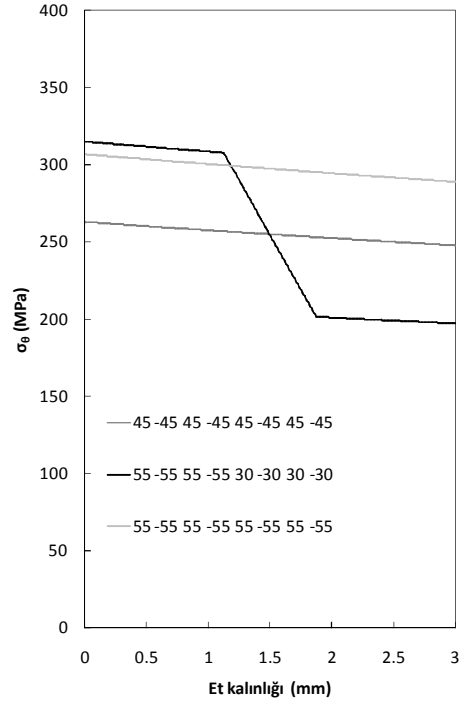


(d)

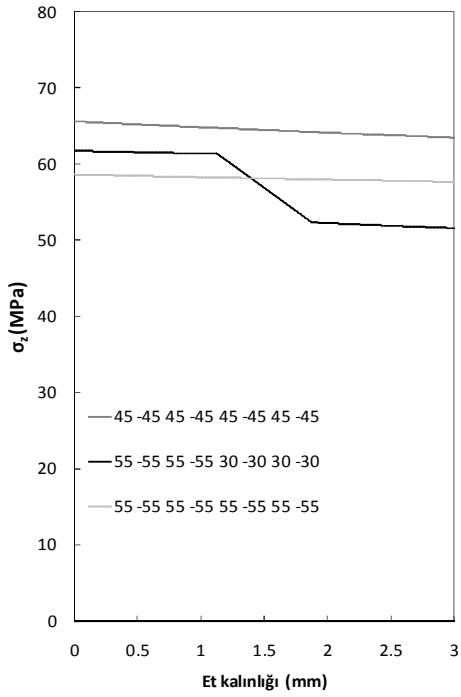
**Şekil 4.64.** Farklı oryantasyon açılı 6 tabakalı kompozit boruların; (a) radyal, (b) teğetsel, (c) eksenel ve (d) kayma gerilmelerinin karşılaştırılması (45<sup>0</sup>/-45<sup>0</sup>/45<sup>0</sup>/-45<sup>0</sup>/45<sup>0</sup>/-45<sup>0</sup> için 11.5 MPa, 55<sup>0</sup>/-55<sup>0</sup>/55<sup>0</sup>/-30<sup>0</sup>/30<sup>0</sup>/-30<sup>0</sup> için 11.5 MPa, 55<sup>0</sup>/-55<sup>0</sup>/55<sup>0</sup>/-55<sup>0</sup>/55<sup>0</sup>/-55<sup>0</sup> için 14 MPa)



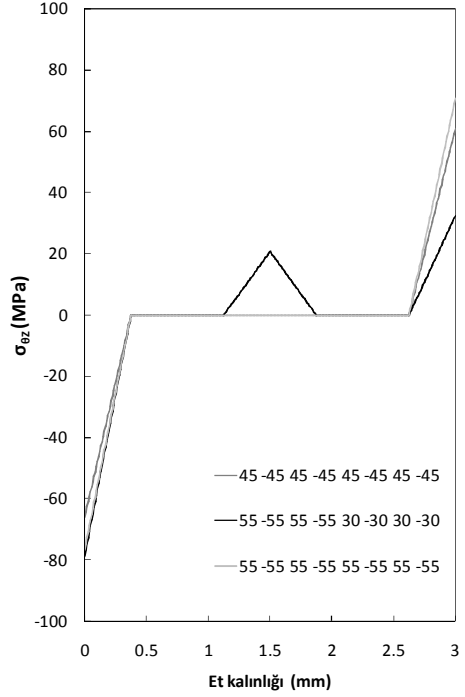
(a)



(b)



(c)

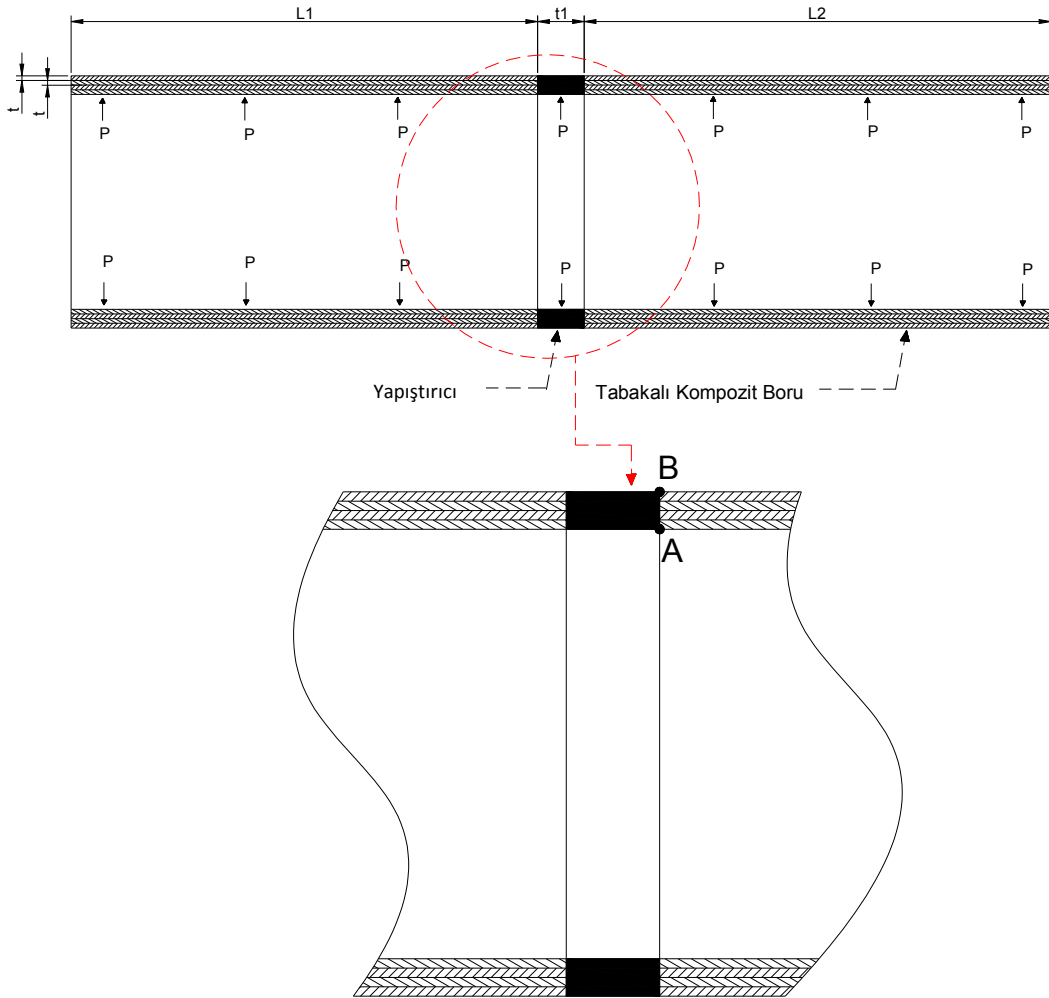


(d)

**Şekil 4.65.** Farklı oryantasyon açılı 8 tabakalı kompozit boruların; (a) radyal, (b) teğetsel, (c) eksenel ve (d) kayma gerilmelerinin karşılaştırılması (45<sup>0</sup>/-45<sup>0</sup>/45<sup>0</sup>/-45<sup>0</sup>/45<sup>0</sup>/-45<sup>0</sup>/45<sup>0</sup>/-45<sup>0</sup> için 15 MPa, 55<sup>0</sup>/-55<sup>0</sup>/55<sup>0</sup>/-55<sup>0</sup>/30<sup>0</sup>/-30<sup>0</sup>/30<sup>0</sup>/-30<sup>0</sup> için 15 MPa, 55<sup>0</sup>/-55<sup>0</sup>/55<sup>0</sup>/-55<sup>0</sup>/55<sup>0</sup>/-55<sup>0</sup>/55<sup>0</sup>/-55<sup>0</sup> için 17.5 MPa)

#### 4.4.2. Alın altına yapıştırılan kompozit boruların nümerik sonuçları

200 mm uzunluğunda farklı oryantasyon açılı kompozit boruların alın altına birleştirilmiş olarak nümerik analizleri yapılarak hasar iç basınçları ve oluşan gerilmeler incelenmiştir. Çalışmalarda dikkate alınan borular birleştirilmiş ve uygun sınır şartları ve yüklemeler yapılarak ANSYS 14.5 paket programında hasar ve gerilme analizleri yapılmıştır. Bu analizler sonucunda belirlenen parametrelerin etkileri incelenmiştir. Nümerik analizler sonunda gerilmelerin ölçümleri için Şekil 4.66’ da gösterilen yapıştırıcı ve borunun birleşme yüzeyi olan A-B hattı dikkate alınmıştır.



Şekil 4.66. Yapıştırıcı ile alın altına birleştirme durumunda gerilme ölçüm hattı

#### 4.4.2.1. İç basınç altında DP 490 yapıştırıcı ile alın alına yapıştırılan kompozit boruların nümerik sonuçları

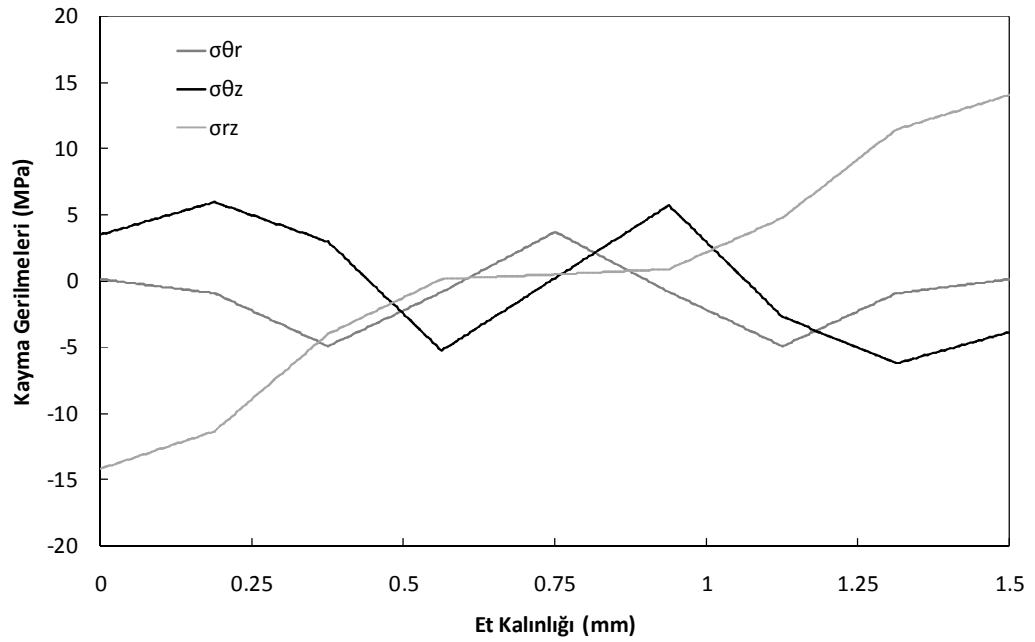
İç basınç altında DP 490 yapıştırıcı ile alın alına yapıştırılan 4, 6 ve 8 tabakalı kompozit boruların nümerik çalışmaları incelenmiştir. Tabaka sayısı arttıkça doğal olarak dayanımda artmaktadır. Her tabakanın kalınlığı aynı olup, sadece tabaka sayısı arttıkça boru et kalınlığı değişmektedir. Çizelge 4.12 incelendiğinde, alın alına birleştirilen 4 tabakalı borularda  $55^0/-55^0/55^0/-55^0$ , 6 tabakalı borularda  $55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$ , 8 tabakalı borularda ise  $55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$  oryantasyon açılı borular en yüksek hasar iç basıncına sahip kompozit borular olduğu görülmektedir. Nümerik analizler sonunda gerilmelerin ölçümleri için Şekil 4.66' da gösterilen yapıştırıcı ve borunun birleşme yüzeyi olan A-B hattı dikkate alınmıştır. Nümerik çalışmalarda, kompozit borular iç basınca maruz bırakıldığında yapıştırıcı üzerinde oluşan kayma gerilmelerinin durumu incelenmiş, değişimin küçük olduğu ve parametrelerden fazla etkilenmeyen kayma gerilmeleri daha sonraki çalışmalarda dikkate alınmamıştır. Şekil 4.67' de görüldüğü gibi, yapıştırıcılar üzerinde oluşan  $\sigma_{rz}$  ve  $\sigma_{\theta z}$  kayma gerilmelerindeki değişim  $\sigma_{\theta r}$  gerilmesinden daha büyüktür. Bu sebepten dolayı, daha sonraki çalışmalarda  $\sigma_{rz}$  ve  $\sigma_{\theta z}$  kayma gerilmeleri dikkate alınmıştır. Şekil 4.68-4.72 incelendiğinde tabaka sayısı arttıkça gerilmelerin değiştiği görülmektedir. Tüm kompozit borularda ve yapıştırıcıda  $\sigma_{\theta}$  gerilmeleri diğer gerilmelere göre parametre değişikliklerinden en fazla etkilenmektedir. Kompozit borularda tabaka sayısı arttıkça ve bununla birlikte yapıştırıcının radyal yöndeki kalınlığı da arttıkça,  $\sigma_{\theta}$  gerilmesi düşmektedir. Aynı durumun diğer gerilmeler için de geçerli olduğu söylenebilir ve bu durumlar Şekil 4.68-4.72' de görülmektedir.

$\sigma_{\theta}$  gerilmesi,  $55^0$  oryantasyon açılı tabakalar için maksimumdur ve  $30^0$  oryantasyon açılı tabakalar için minimum değerdedir. Fakat Von-Mises gerilmelerinde ise tabaka kalınlığı arttıkça birleştirilen kompozit boruların oryantasyon açılarına göre maksimum ve minimum gerilme değerleri  $\sigma_{\theta}$  gibi belirli bir düzende değildir.  $45^0/-45^0/45^0/-45^0$  oryantasyon açılı 4 tabakalı boruları birleştirdiğimizde yapıştırıcı üzerinde oluşan Von-Mises gerilmesi maksimum değerde iken,  $55^0/-55^0/55^0/-30^0/30^0/-30^0$  oryantasyon açılı 6 tabakalı kompozit boruları birleştirdiğimizde yapıştırıcı üzerinde radyal yönde bazı bölgelerde Von-Mises gerilmesinin maksimum gerilme olduğu aşağıdaki şekiller de görülmektedir. Ama genel olarak  $45^0$  oryantasyon açılı kompozit boruların birleştirilmesindeki

yapıştırıcı üzerinde Von-Mises gerilmeleri maksimum değerde olduğu aşağıdaki grafikler de görülmektedir.

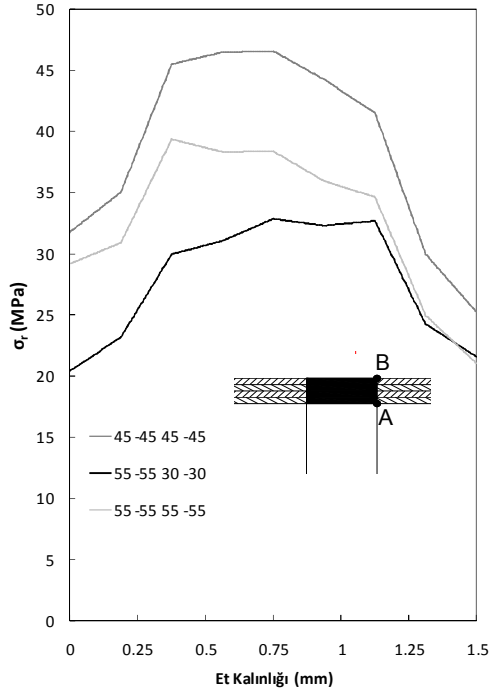
**Çizelge 4.12.** Farklı oryantasyon açılı 4, 6 ve 8 tabakalı kompozit boruların DP 490 yapıştırıcı ile alın altına yapıştırılarak iç basınç yüklemeleri altındaki nümerik hasar iç basınçları

Tabaka Sayısı	Oryantasyon açısı	Hasar İç Basıncı (MPa)
4	$45^0/-45^0 /45^0/-45^0$	5.85
	$55^0/-55^0/30^0/-30^0$	5.2
	$55^0/-55^0/55^0/-55^0$	6.8
6	$45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0$	9.0
	$55^0/-55^0/55^0/-30^0/30^0/-30^0$	9.5
	$55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$	12.0
8	$45^0/-45^0 /45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0$	12.5
	$55^0/-55^0/55^0/-55^0/30^0/-30^0/30^0/-30^0$	12.5
	$55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$	15.0

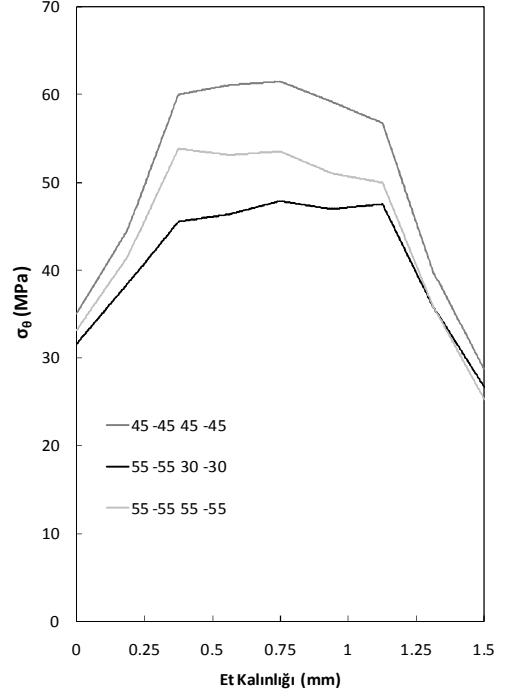


**Şekil 4.67.**  $45^0/-45^0/45^0/-45^0$  oryantasyon açılı 4 tabakalı kompozit boruların alın altına birleştirmede kullanılan DP 490 yapıştırıcının A-B gerilme hattı üzerindeki kayma gerilmelerinin karşılaştırılması (5.85 MPa)

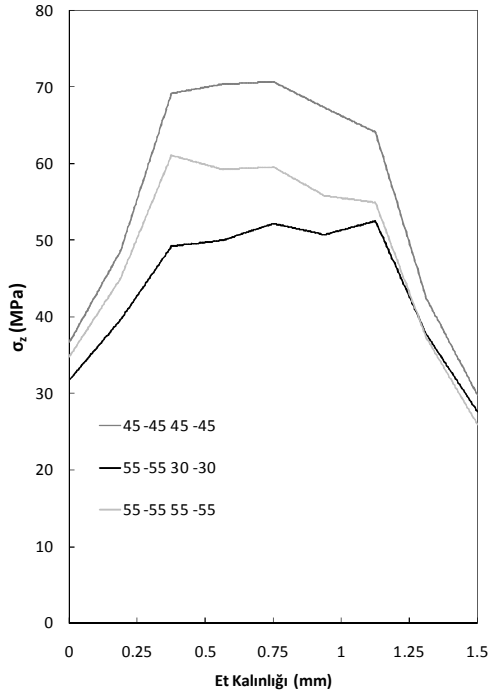
Yapıştırıcı üzerinde oluşan gerilme durumları kompozit boru üzerinde oluşan gerilme durumlarından farklıdır. Bu durum Şekil 4.68-4.72' de görülmektedir. Yapıştırıcı üzerinde oluşan  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$  ve  $\sigma_z$  gerilmelerinin dağılım şekli grafik üzerinde aynı görünmesine rağmen gerilme değerleri farklıdır.



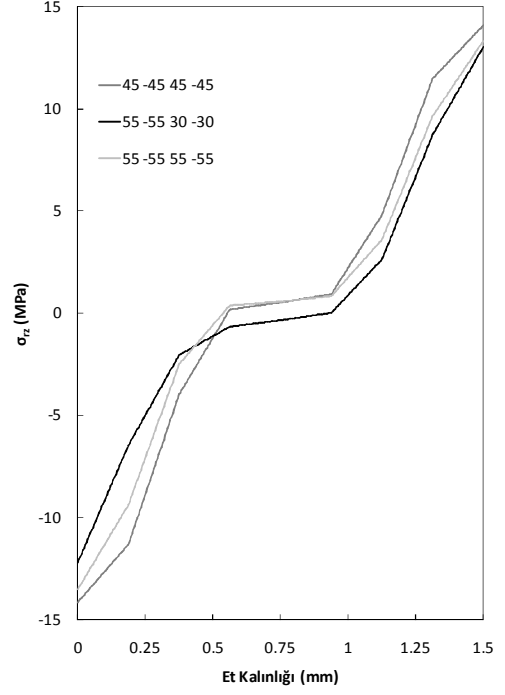
(a)



(b)

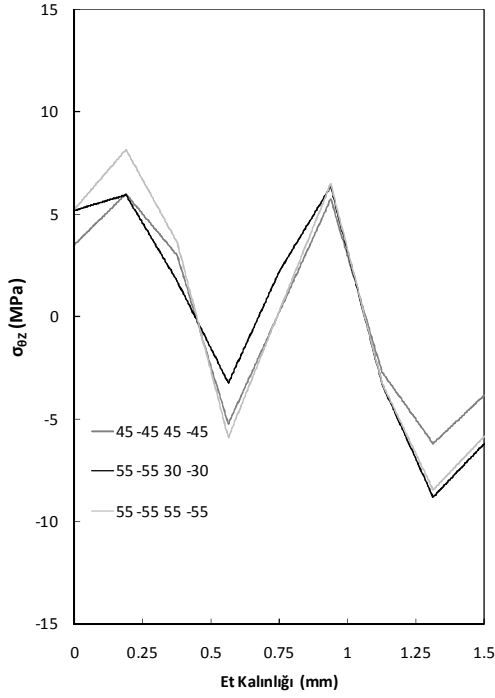


(c)

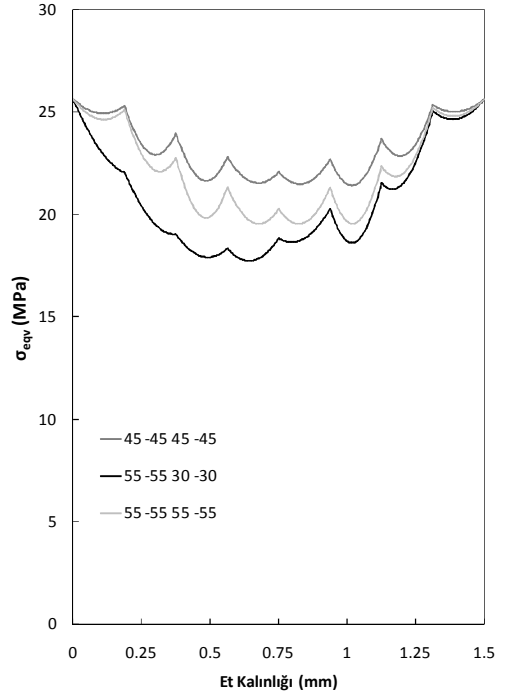


(d)

**Şekil 4.68.** Farklı oryantasyon açılı 4 tabakalı kompozit boruların alın altına birleştirilmede kullanılan DP 490 yapıştırıcının A-B gerilme hattı üzerindeki; (a) radyal, (b) teğetsel, (c) eksenel ve (d) kayma gerilmelerinin karşılaştırılması ( $45^0/45^0/45^0/45^0$  için 5.85 MPa,  $55^0/55^0/30^0/30^0$  için 5.2 MPa,  $55^0/55^0/55^0/55^0$  için 6.8 MPa)



(a)

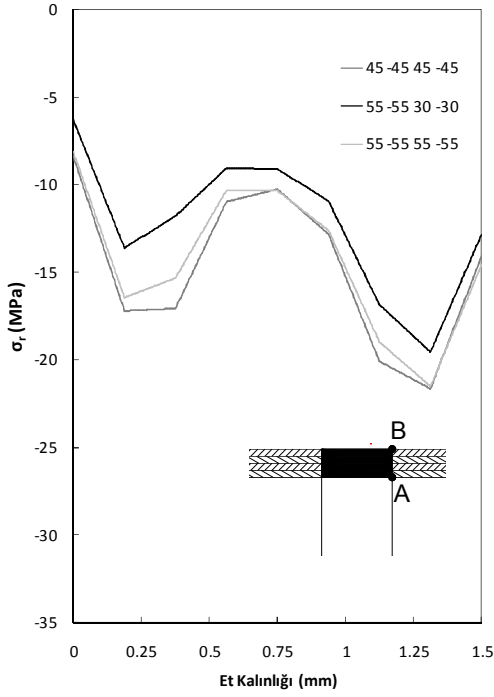


(b)

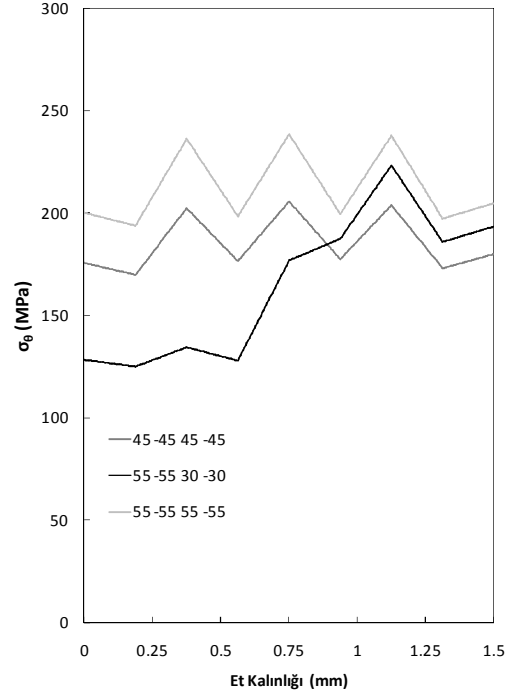
**Şekil 4.69.** Farklı oryantasyon açılı 4 tabakalı kompozit boruların alın alına birleştirmede kullanılan DP 490 yapıştırıcının A-B gerilme hattı üzerindeki; (a) kayma, (b) Von-Mises gerilmelerinin karşılaştırılması ( $45^0/-45^0/45^0/-45^0$  için 5.85 MPa,  $55^0/-55^0/30^0/-30^0$  için 5.2 MPa,  $55^0/-55^0/55^0/-55^0$  için 6.8 MPa)

Şekil 4.70 incelendiğinde, kompozit borular üzerinde oluşan gerilmeler, A-B hattı üzerinde belirlendiği için tabakaların etkileri açık bir şekilde görülmektedir.  $\sigma_\theta$  gerilmesi, gerilmeler arasında en yüksek değere sahiptir. Kompozit boru üzerinde oluşan A-B hattı üzerinde gösterilen diğer gerilmelerin, tabakalar arası geçişte ve tabakaların üzerinde oluşan değişimleri Şekil 4.70' de görülmektedir.

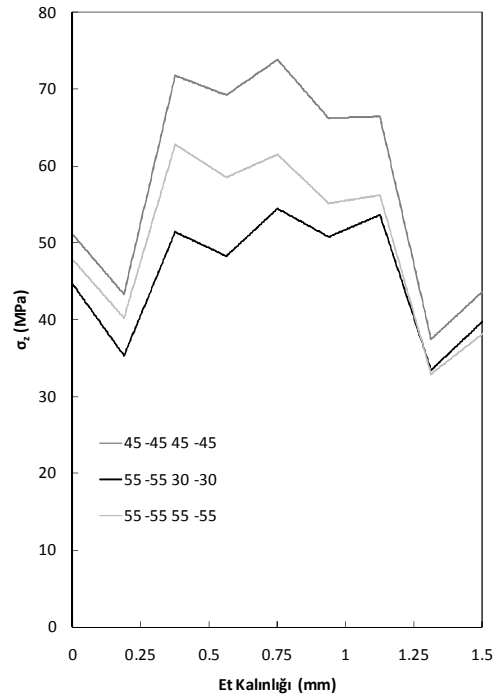
Yapıştırıcı üzerinde oluşan parametrelerden en çok etkilenenler ve oluşan farklılıkları en belirgin görülebildiği gerilmeler  $\sigma_\theta$ ,  $\sigma_{\theta Z}$ ,  $\sigma_{eqv}$  ve kompozit borularda ise  $\sigma_\theta$  gerilmesidir. Bu sebepten, iç basınca maruz bırakılan 6 ve 8 tabakalı kompozit boruların alın alına birleştirilmesi sonucu oluşan gerilmelerde, yapıştırıcılar için  $\sigma_\theta$ ,  $\sigma_{\theta Z}$ ,  $\sigma_{eqv}$  ve kompozit borular için  $\sigma_\theta$  gerilmeleri incelenmiştir (Şekil 4.71 ve Şekil 4.72). Bu grafikler de görüldüğü gibi, tabaka sayısı değiştikçe grafiklerde oluşan üçgen şeklini anımsatan artış ve azalış şekillerinin sayısı da değişmektedir.



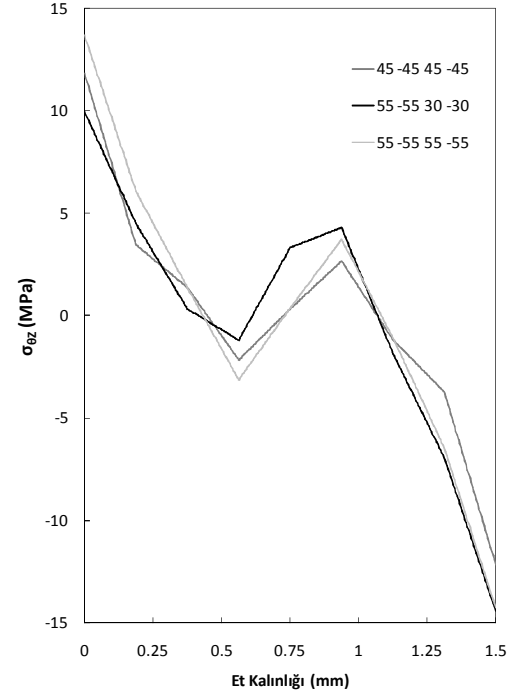
(a)



(b)



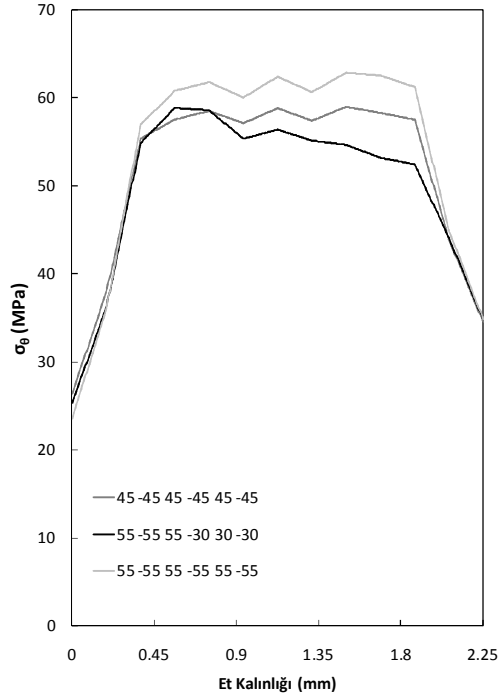
(c)



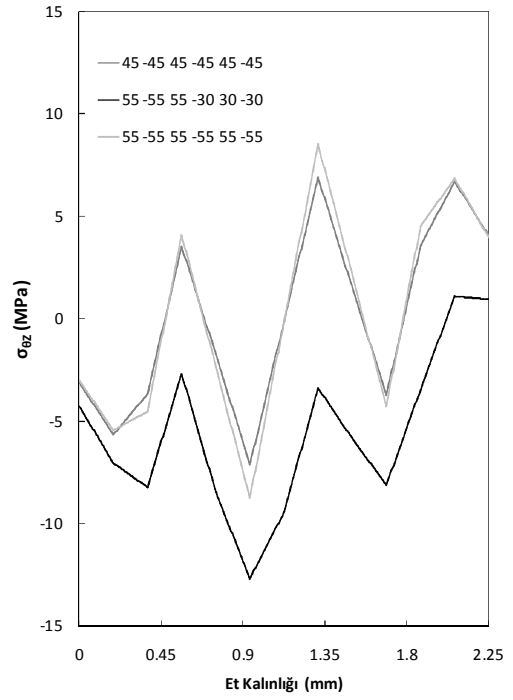
(d)

**Şekil 4.70.** DP 490 yapıştırıcı kullanarak alın altına birleştirilen farklı oryantasyon açılı 4 tabakalı kompozit boruların A-B gerilme hattı üzerindeki; (a) radyal, (b) teğetsel, (c) eksenel ve (d) kayma gerilmelerinin karşılaştırılması (45<sup>0</sup>/-45<sup>0</sup>/45<sup>0</sup>/-45<sup>0</sup> için 5.85 MPa, 55<sup>0</sup>/-55<sup>0</sup>/30<sup>0</sup>/-30<sup>0</sup> için 5.2 MPa, 55<sup>0</sup>/-55<sup>0</sup>/55<sup>0</sup>/-55<sup>0</sup> için 6.8 MPa)

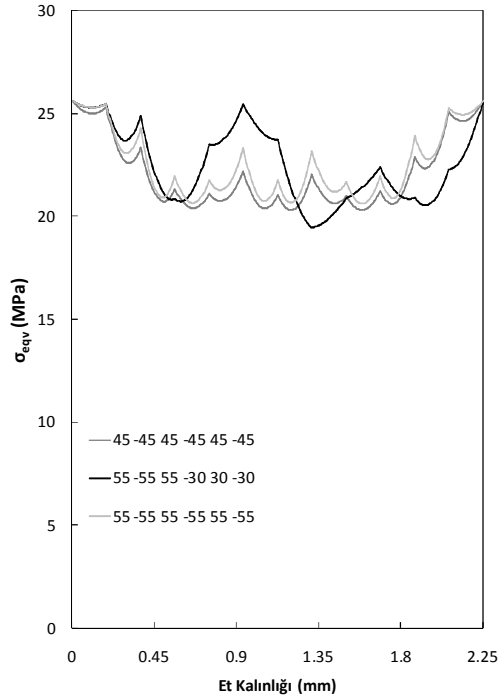




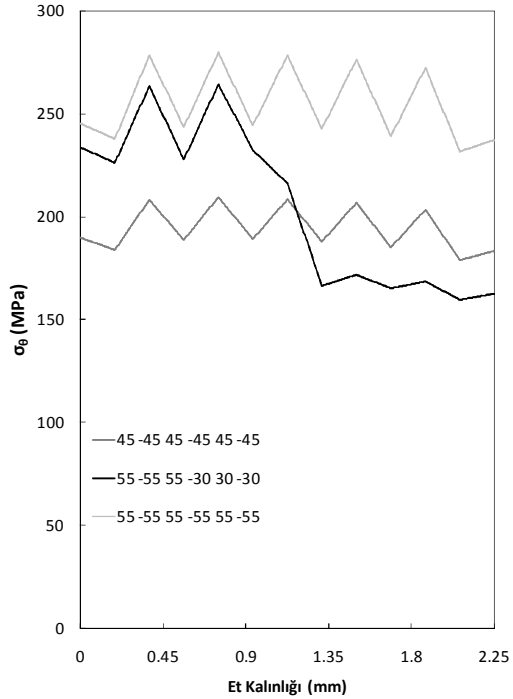
(a)



(b)

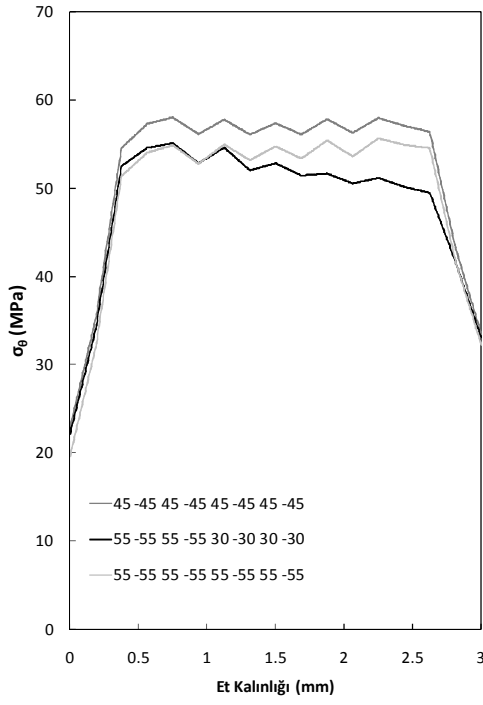


(c)

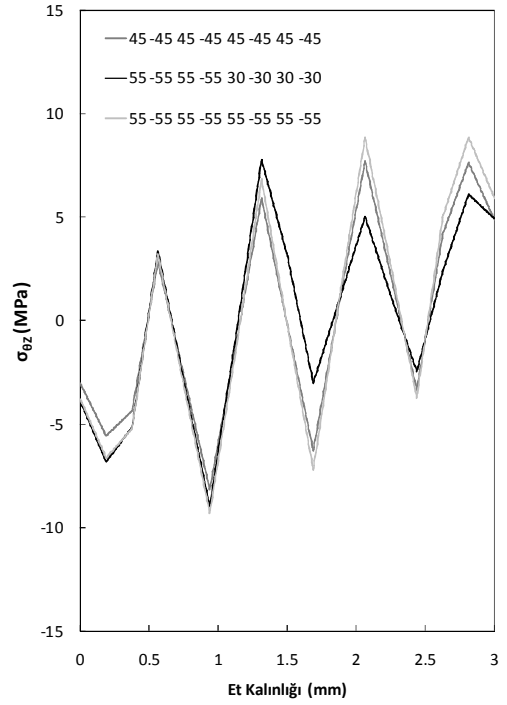


(d)

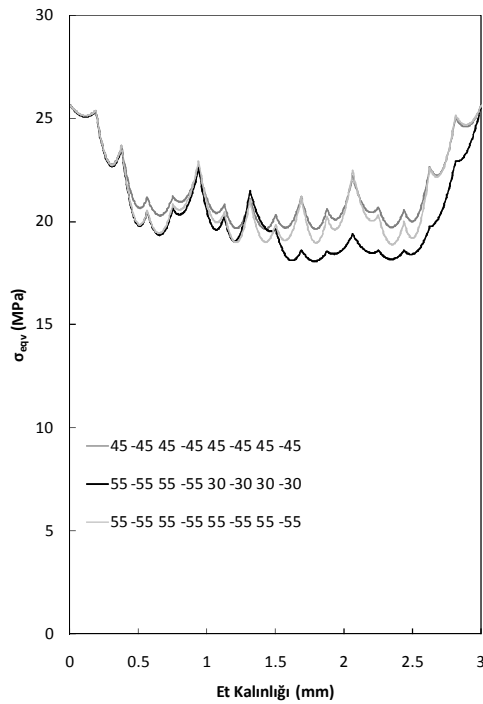
**Şekil 4.71.** Farklı oryantasyon açılı 6 tabakalı kompozit boruların alın altına birleştirmede kullanılan DP 490 yapıştırıcının A-B gerilme hattı üzerindeki; (a) teğetsel, (b) kayma, (c) Von-Mises ve (d) kompozit borunun teğetsel gerilmelerinin karşılaştırılması ( $45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0$  için 9 MPa,  $55^0/-55^0/55^0/-30^0/30^0/-30^0$  için 9.5 MPa,  $55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$  için 12 MPa)



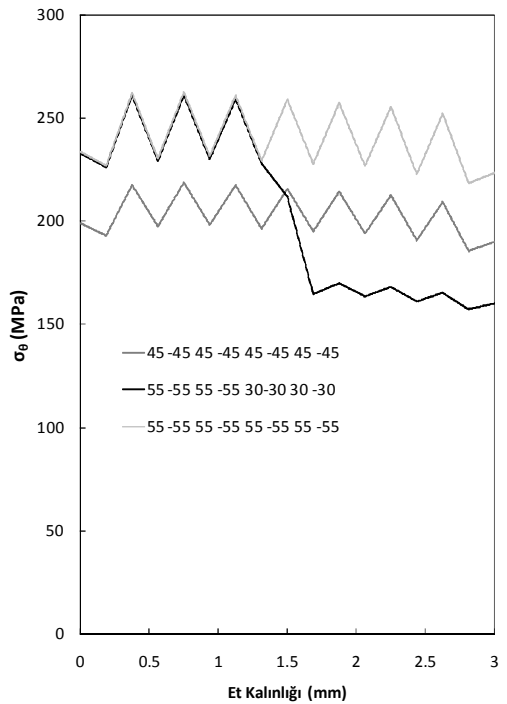
(a)



(b)



(c)



(d)

**Şekil 4.72.** Farklı oryantasyon açılı 8 tabakalı kompozit boruların alın alına birleştirmede kullanılan DP 490 yapıştırıcının A-B gerilme hattı üzerindeki; (a) teğetsel, (b) kayma, (c) Von-Mises ve (d) kompozit borunun teğetsel gerilmelerinin karşılaştırılması ( $45^{\circ}/-45^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}$  için 12.5 MPa,  $55^{\circ}/-55^{\circ}/55^{\circ}/-55^{\circ}/30^{\circ}/-30^{\circ}/30^{\circ}/-30^{\circ}$  için 12.5 MPa,  $55^{\circ}/-55^{\circ}/55^{\circ}/-55^{\circ}/55^{\circ}/-55^{\circ}/55^{\circ}/-55^{\circ}$  için 15 MPa)

#### 4.4.2.2. İç basınç altında DP 410 yapıştırıcı ile alın alına yapıştırılan kompozit boruların nümerik sonuçları

İç basınç altında DP 410 yapıştırıcı ile alın alına yapıştırılan 4, 6 ve 8 tabakalı kompozit boruların nümerik çalışmaları incelenmiştir. Tabaka sayısı arttıkça doğal olarak dayanımda artmaktadır. Her tabakanın kalınlığı aynı olup, sadece tabaka sayısı arttıkça boru et kalınlığı değişmektedir. Çizelge 4.13 incelendiğinde, alın alına birleştirilen 4 tabakalı borularda  $55^0/-55^0/55^0/-55^0$ , 6 tabakalı borularda  $55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$ , 8 tabakalı borularda ise  $55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$  oryantasyon açılı borular en yüksek hasar iç basıncına sahip kompozit borular olduğu görülmektedir. Şekil 4.73-4.77 incelendiğinde, tabaka sayısı arttıkça gerilmelerin değiştiği görülmektedir. Tüm kompozit borularda ve yapıştırıcıda  $\sigma_\theta$  gerilmeleri diğer gerilmelere göre parametre değişikliklerinde en fazla etkilenmektedir. Kompozit borularda tabaka sayısı arttıkça ve bununla birlikte yapıştırıcının radyal yöndeki kalınlığı da arttıkça,  $\sigma_\theta$  gerilmesi düşmektedir. Aynı durumu diğer gerilmeler içinde geçerli olduğunu söyleyebiliriz ve bu durumlar Şekil 4.73-4.77' de görülmektedir.

**Çizelge 4.13.** Farklı oryantasyon açılı 4, 6 ve 8 tabakalı kompozit boruların DP 410 yapıştırıcı alın alına yapıştırılarak iç basınç yüklemeleri altındaki nümerik hasar iç basınçları

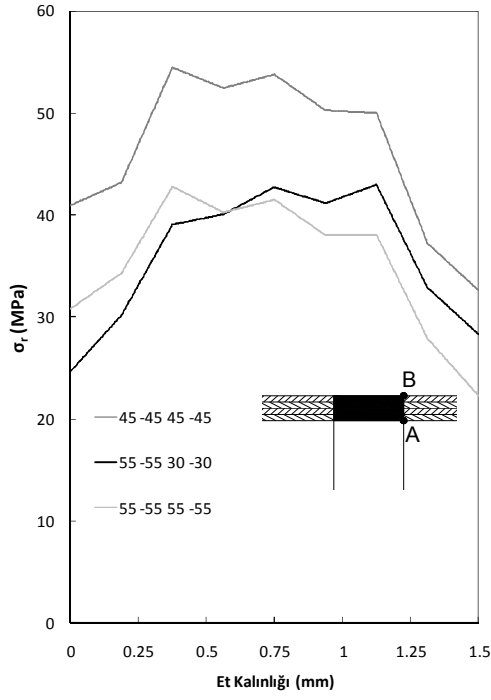
Tabaka Sayısı	Oryantasyon açısı	Hasar İç Basıncı (MPa)
4	$45^0/-45^0/45^0/-45^0$	7.5
	$55^0/-55^0/30^0/-30^0$	7.0
	$55^0/-55^0/55^0/-55^0$	8.0
6	$45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0$	11.0
	$55^0/-55^0/55^0/-30^0/30^0/-30^0$	11.0
	$55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$	13.0
8	$45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0$	14.5
	$55^0/-55^0/55^0/-55^0/30^0/-30^0/30^0/-30^0$	14.5
	$55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$	17.5

Kompozit borularda  $\sigma_\theta$  gerilmesi,  $55^0$  oryantasyon açılı tabakalar da maksimumdur ve  $30^0$  oryantasyon açılı tabakalar da minimum değerdedir. Fakat  $55^0/-55^0/30^0/-30^0$  oryantasyon açılı 4 tabakalı kompozit borularda oluşan gerilme durumu, 6 ve 8 tabakalı kompozit borularda oluşan gerilme durumlarından farklı olduğu Şekil 4.75 (b)' de görülmektedir. Bunun sebebi, tabaka sayısının artmasının gerilme davranışı üzerine etkisi olduğundandır.

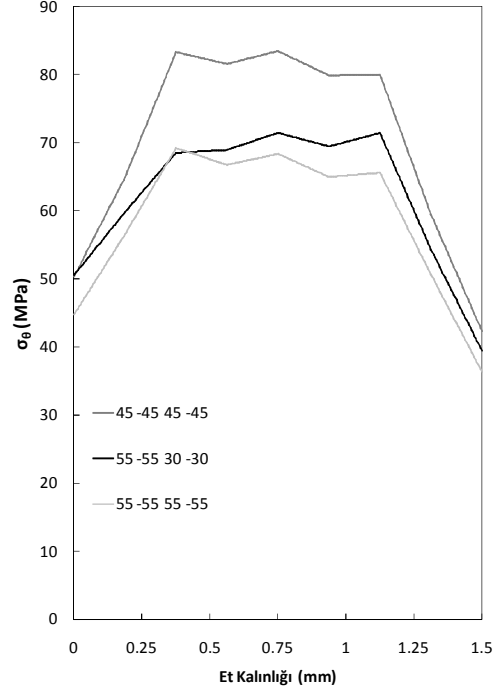
Nümerik analizler sonunda gerilmelerin ölçümleri için Şekil 4.66' da gösterilen yapıştırıcı ve borunun birleşme yüzeyi olan A-B hattı dikkate alınmıştır. Yapıştırıcı üzerinde oluşan  $\sigma_{\theta}$  gerilmesi tabaka sayısı arttıkça düşmektedir. Ayrıca Von-Mises gerilmelerinde ise tabaka kalınlığı arttıkça birleştirilen kompozit boruların oryantasyon açılarına göre maksimum ve minimum gerilme değerleri  $\sigma_{\theta}$  gibi belirli bir düzende değildir.  $45^{\circ}/-45^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}$  oryantasyon açılı 4 tabakalı boruları birleştirdiğimizde yapıştırıcı üzerinde oluşan Von-Mises gerilmesinin maksimum değerinde iken,  $55^{\circ}/-55^{\circ}/55^{\circ}/-30^{\circ}/30^{\circ}/-30^{\circ}$  oryantasyon açılı 6 tabakalı kompozit boruları birleştirdiğimizde yapıştırıcı üzerinde radyal yönde bazı bölgelerde Von-Mises gerilmesinin maksimum gerilme olduğu aşağıdaki şekillerde görülmektedir. Ama genel olarak  $\pm 45^{\circ}$  oryantasyon açılı kompozit boruların birleştirilmesinde deki yapıştırıcı üzerinde Von-Mises gerilmeleri maksimum değerinde olduğu aşağıdaki şekillerde görülmektedir.

Şekil 4.73 ve Şekil 4.74 incelendiğinde  $\sigma_{\theta}$  ve  $\sigma_z$  gerilmelerinin yüksek olduğu görülmektedir. Gerilmelerin tabakalar arası ve tabakalardaki etkileri de görülmektedir. Radyal ve kayma gerilmelerinin teğetsel ve aksel gerilmeye göre düşük değerlerde olmasına rağmen, bu gerilmelerde önemlidir. Fakat çalışmalarda kritik olan gerilmeler üzerinde durulmuştur.

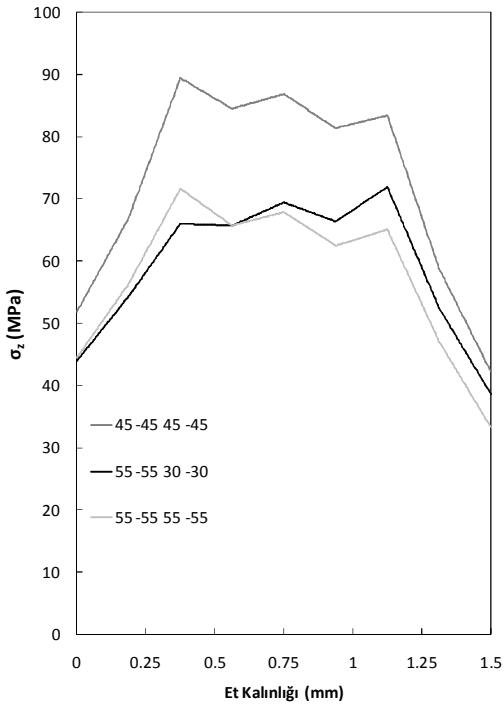
Şekil 4.75' de görüldüğü gibi, kompozit boru üzerinde oluşan gerilmeler görülmektedir. Gerilmeler içinde  $\sigma_{\theta}$  en büyük gerilme değerlerine sahiptir. En büyük gerilme değerlerine sahip olduğundan çalışmalarda en çok dikkat edilmesi gerekli gerilme olmuştur. Bu sebepten, 6 ve 8 tabakalı kompozit boruların incelenmesinde en tehlikeli gerilme olduğu için  $\sigma_{\theta}$  gerilmesi incelenmiştir. Diğer gerilmelerde, tabaka sayısının artması ile çok farklı bir durum ortaya çıkmadığından, 6 ve 8 tabakalı durumlar için aşağıdaki şekillerde bu gerilmelerin dağılımları gösterilmemiştir.



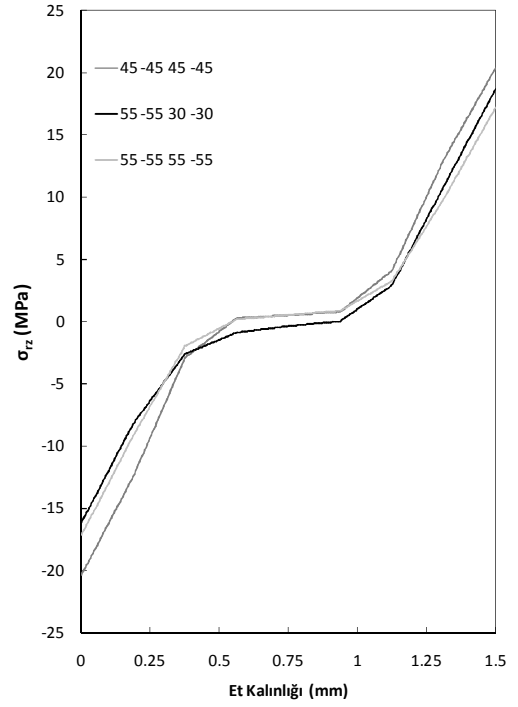
(a)



(b)

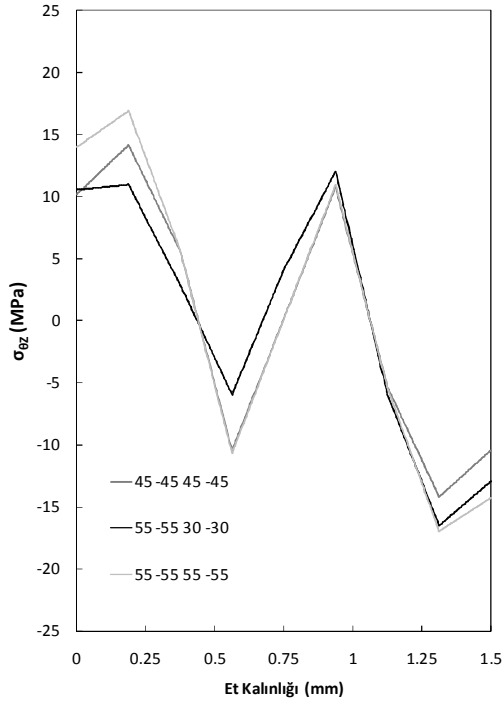


(c)

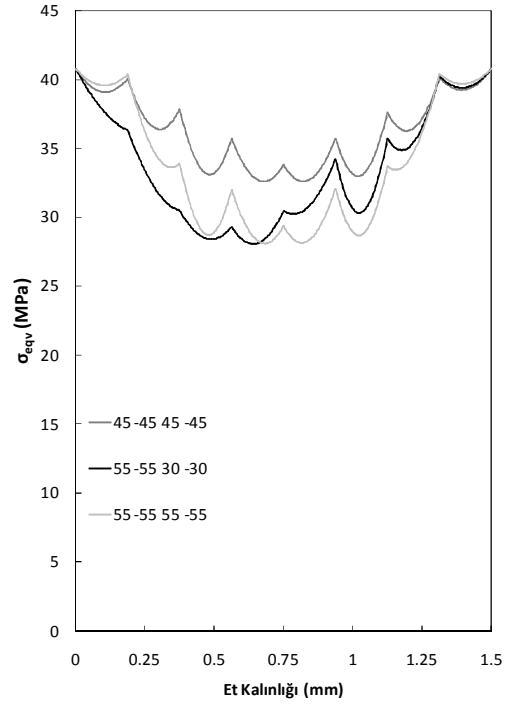


(d)

**Şekil 4.73.** Farklı oryantasyon açılı 4 tabakalı kompozit boruların alın altına birleştirmede kullanılan DP 410 yapıştırıcının A-B gerilme hattı üzerindeki; (a) radyal, (b) teğetsel, (c) eksenel ve (d) kayma gerilmelerinin karşılaştırılması ( $45^0/45^0/45^0/45^0$  için 7.5 MPa,  $55^0/55^0/30^0/30^0$  için 7 MPa,  $55^0/55^0/55^0/55^0$  için 8 MPa)



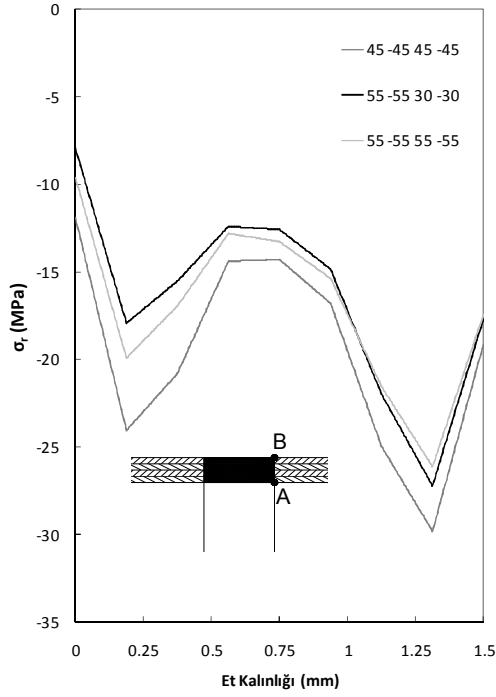
(a)



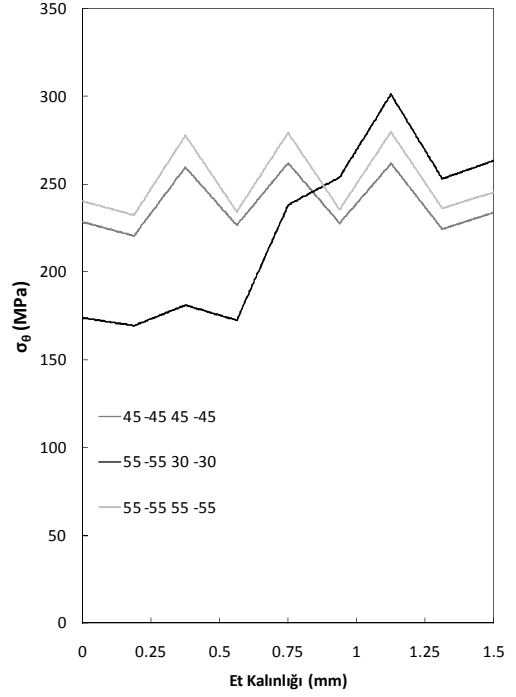
(b)

**Şekil 4.74.** Farklı oryantasyon açılı 4 tabakalı kompozit boruların alın altına birleştirmede kullanılan DP 410 yapıştırıcının A-B gerilme hattı üzerindeki; (a) kayma, (b) Von-Mises gerilmelerinin karşılaştırılması ( $45^0/-45^0/45^0/-45^0$  için 7.5 MPa,  $55^0/-55^0/30^0/-30^0$  için 7 MPa,  $55^0/-55^0/55^0/-55^0$  için 8 MPa)

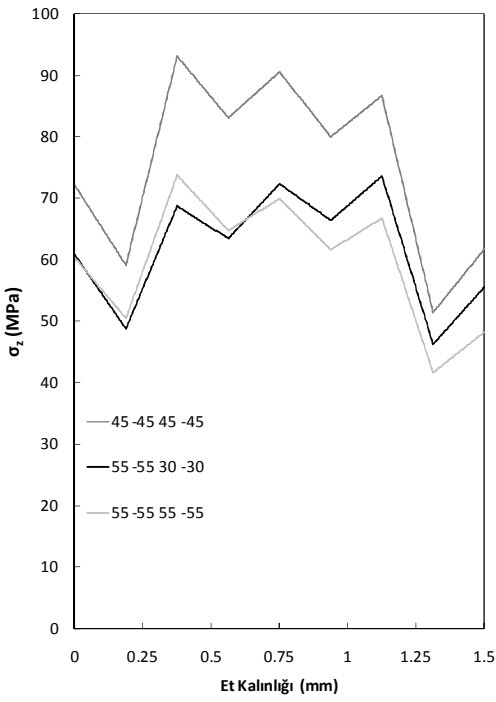
Şekil 4.76 ve Şekil 4.77 incelendiğinde, tabaka sayısının artması ile kritik gerilmeler üzerinde oluşan değişimler grafiksel olarak üçgen şeklini anımsatan artış ve azalışlar olarak görülmektedir. Tabaka sayısının artışı ve oryantasyon açılı tabakaların sıralanışının etkisiyle gerilmeler üzerlerinde farklılıklar görülmektedir. Tabakaların sıralanmasında, gerilmeleri etkileyen diğer bir parametre olduğunu bu şekilleri incelediğimizde görülmektedir. Kompozit borunun parametreleri, yapıştırıcı üzerinde oluşan gerilmeleri de etkilemektedir. 6 ve 8 tabakalı kompozit boruları birleştirmede kullanılan yapıştırıcı üzerinde oluşan kayma ve Von-Mises gerilmelerindeki farklılıklar, bu etkileri göstermektedir.



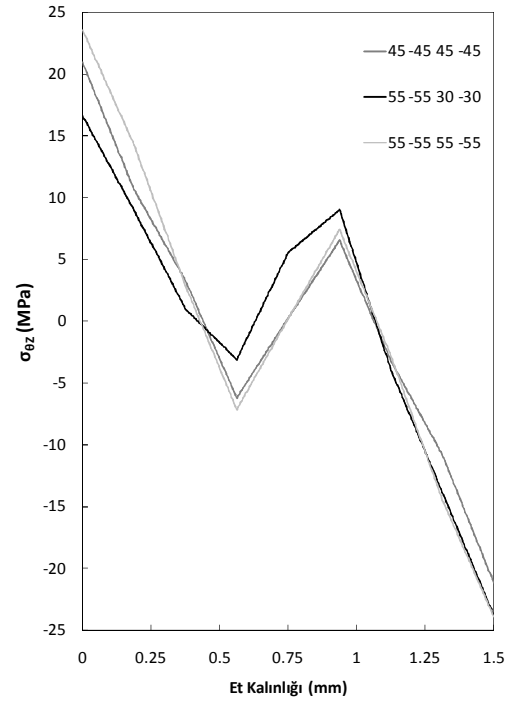
(a)



(b)

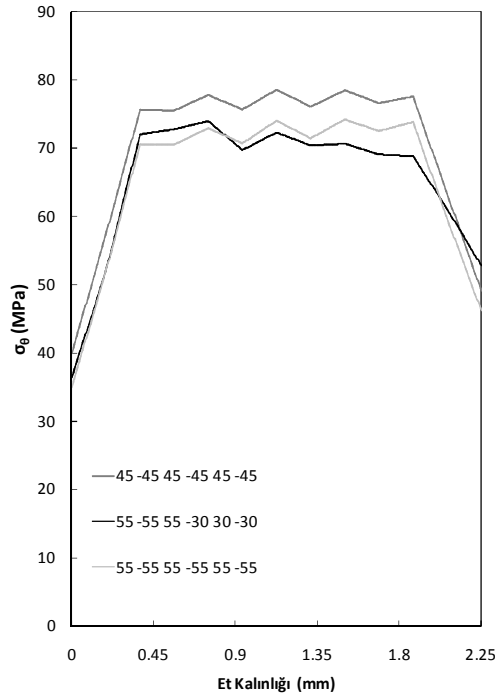


(c)

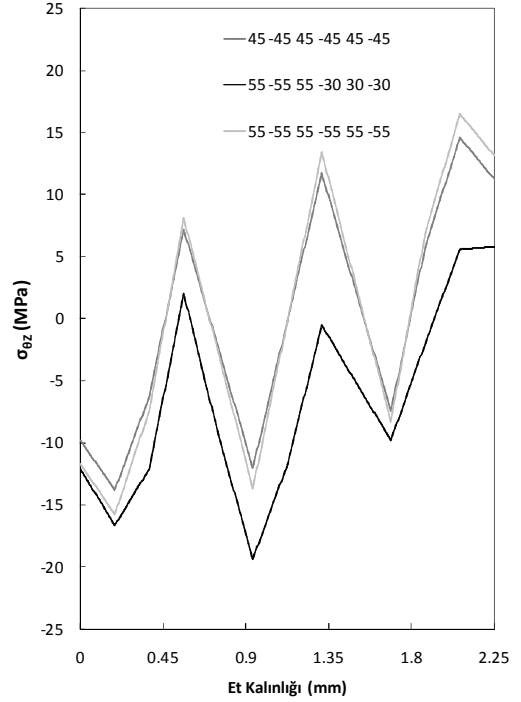


(d)

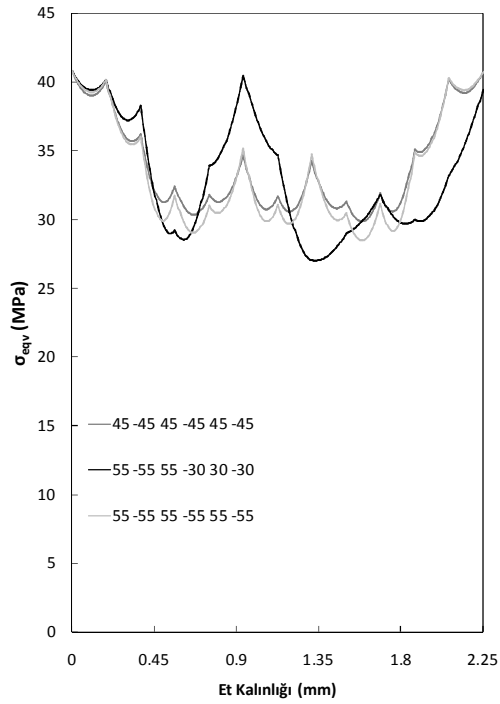
**Şekil 4.75.** DP 410 yapıştırıcı kullanarak alin alına birleştirilen farklı oryantasyon açılı 4 tabakalı kompozit boruların A-B gerilme hattı üzerindeki; (a) radyal, (b) teğetsel, (c) eksenel ve (d) kayma gerilmelerinin karşılaştırılması ( $45^0/-45^0/45^0/-45^0$  için 7.5 MPa,  $55^0/-55^0/30^0/-30^0$  için 7 MPa,  $55^0/-55^0/55^0/-55^0$  için 8 MPa)



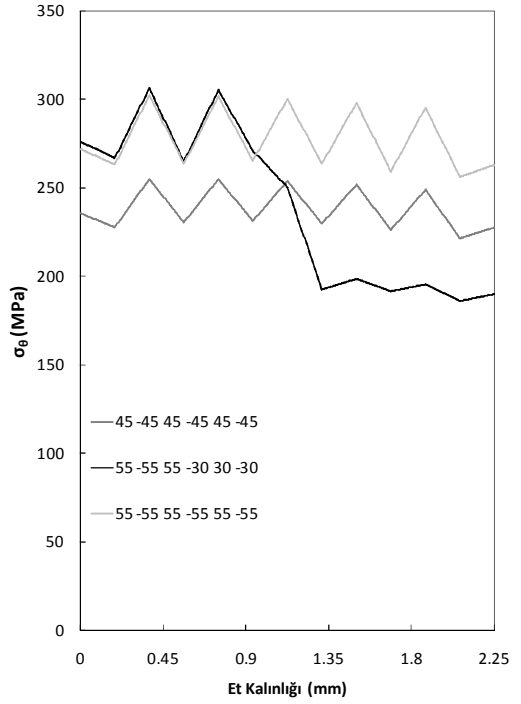
(a)



(b)



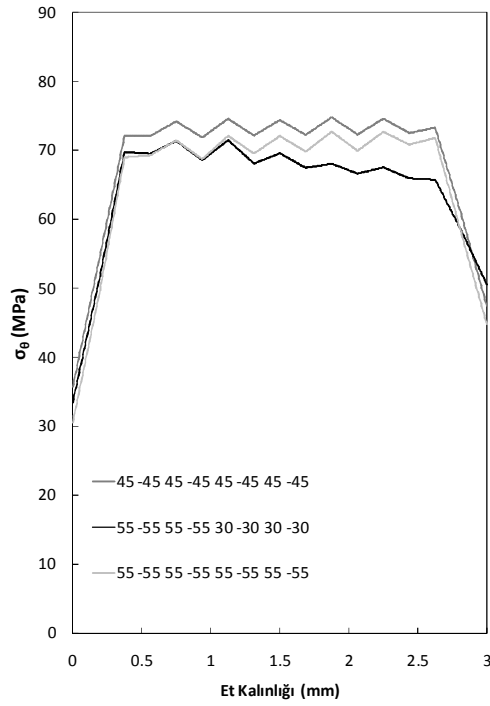
(c)



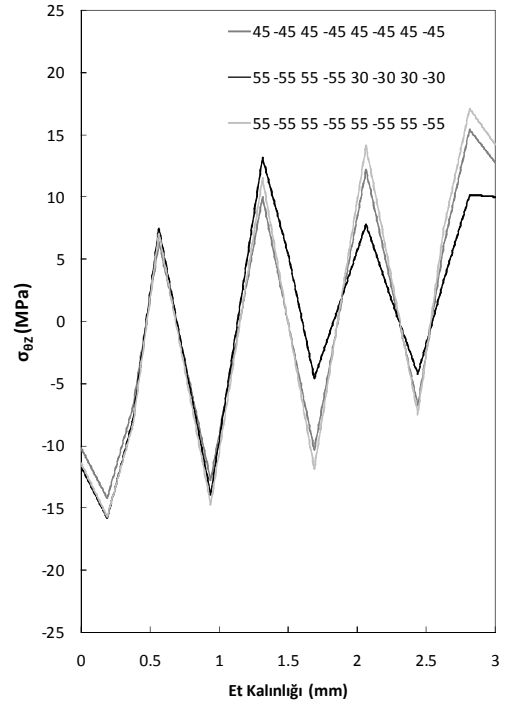
(d)

**Şekil 4.76.** Farklı oryantasyon açılı 6 tabakalı kompozit boruların alın altına birleştirmede kullanılan DP 410 yapıştırıcının A-B gerilme hattı üzerindeki; (a) teğetsel, (b) kayma, (c) Von-Mises ve (d) kompozit borunun teğetsel gerilmelerinin karşılaştırılması ( $45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0$  için 11 MPa,  $55^0/-55^0/55^0/-30^0/30^0/-30^0$  için 11 MPa,  $55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$  için 13 MPa)

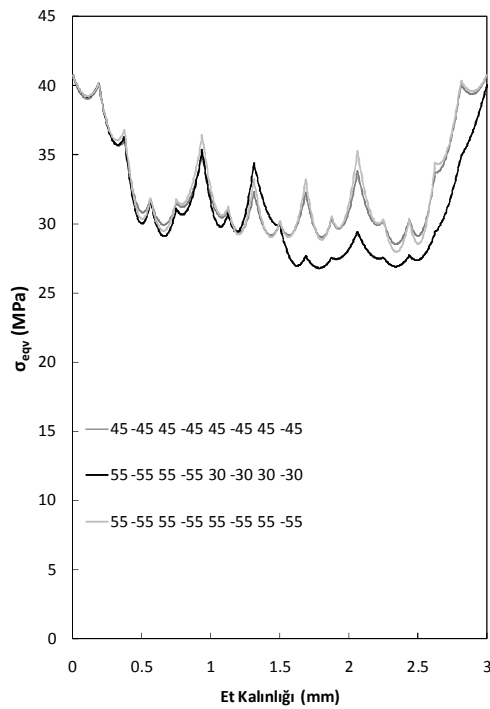




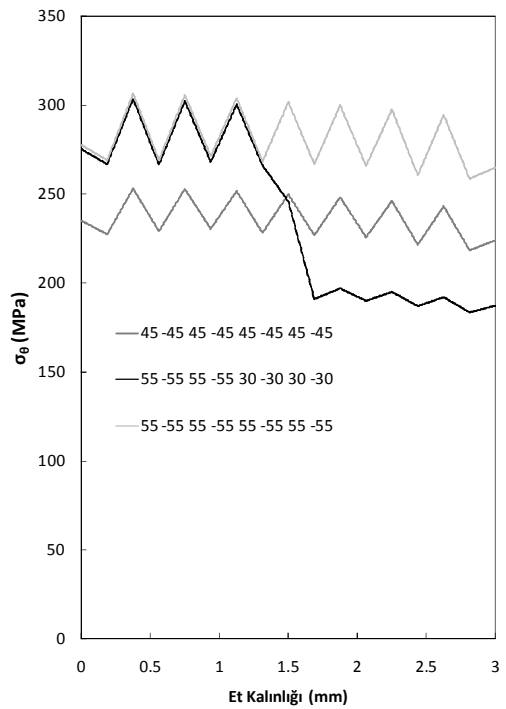
(a)



(b)



(c)

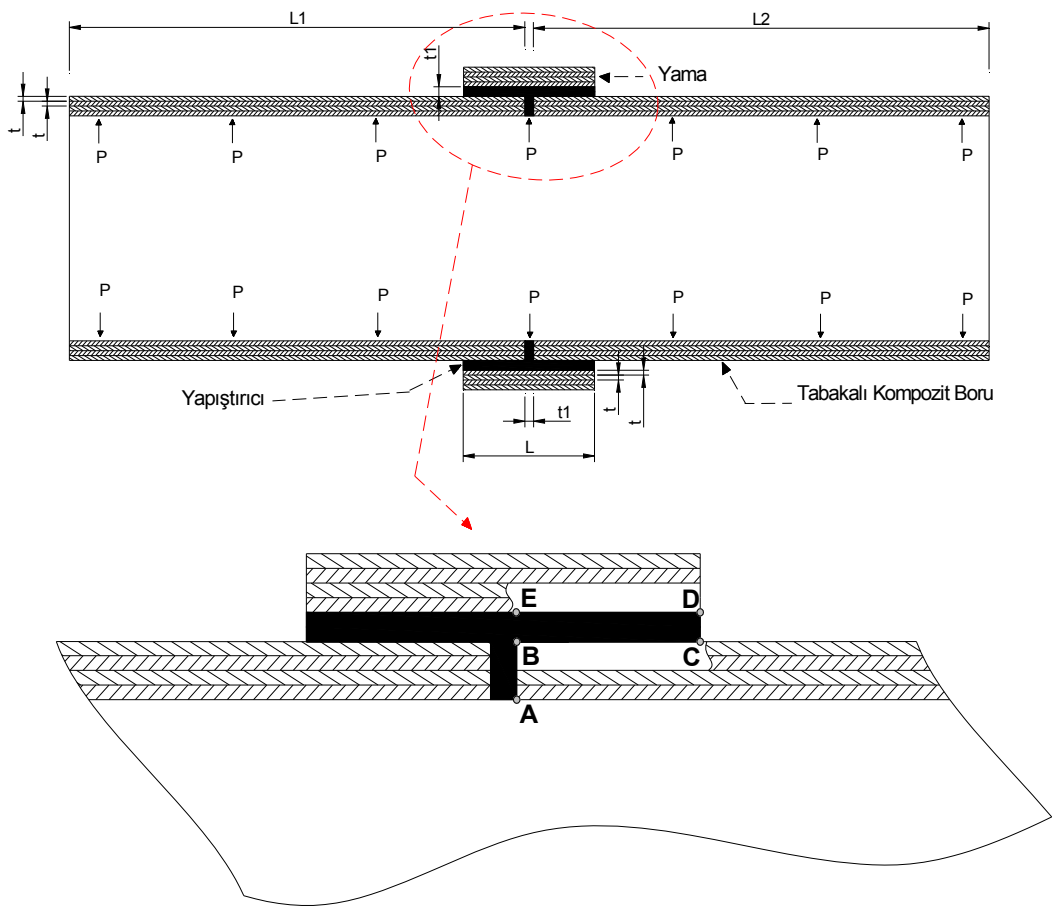


(d)

**Şekil 4.77.** Farklı oryantasyon açılı 8 tabakalı kompozit boruların alın alına birleştirmede kullanılan DP 410 yapıştırıcının A-B gerilme hattı üzerindeki; (a) teğetsel, (b) kayma, (c) Von-Mises ve (d) kompozit borunun teğetsel gerilmelerinin karşılaştırılması ( $45^{\circ}/-45^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}$  için 14.5 MPa,  $55^{\circ}/-55^{\circ}/55^{\circ}/-55^{\circ}/30^{\circ}/30^{\circ}/30^{\circ}/-30^{\circ}$  için 14.5 MPa,  $55^{\circ}/-55^{\circ}/55^{\circ}/-55^{\circ}/55^{\circ}/-55^{\circ}/55^{\circ}/-55^{\circ}$  için 17.5 MPa)

#### 4.4.3. Yama kullanılarak yapıştırılan kompozit boruların nümerik sonuçları

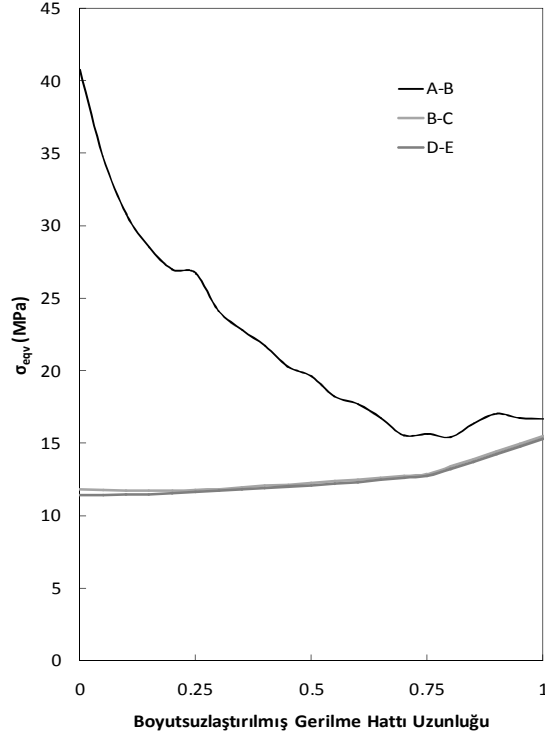
200 mm uzunluğunda farklı oryantasyon açılı ve farklı tabaka sayısına sahip kompozit boruların kendileriyle aynı oryantasyon açısına sahip 4 tabakalı sırasıyla 20 mm, 30 mm, 40 mm yama kullanılarak birleştirilme işleminden sonra nümerik analizleri yapılarak hasar iç basınçları ve oluşan gerilmeler incelenmiştir. Yama kullanılarak birleştirilen borulara, uygun sınır şartları ve yüklemeler yapılarak ANSYS 14.5 paket programında hasar ve gerilme analizleri yapılmıştır. Bu analizler sonucunda belirlenen parametrelerin etkileri incelenmiştir.



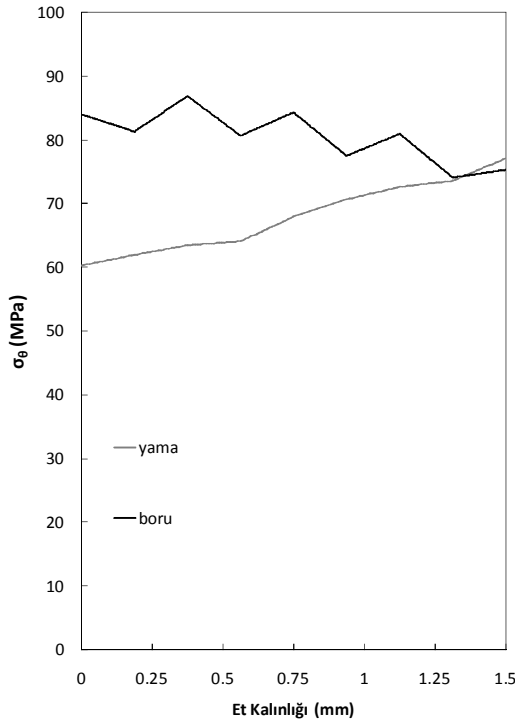
Şekil 4.78. Yama kullanarak birleştirilme durumunda gerilme ölçüm hatları

Şekil 4.78’ de görüldüğü gibi, gerilme ölçümlerinin yapılacağı hatlar belirlenmiştir. A-B gerilme hattının uzunluğu, B-C ve D-E gerilme hattı uzunluklarından farklı olduğu için Denklem 4.2’ yi kullanarak gerilme hattı uzunlukları boyutsuz hale getirilmiştir ve tüm gerilme hatları üzerlerinde oluşan

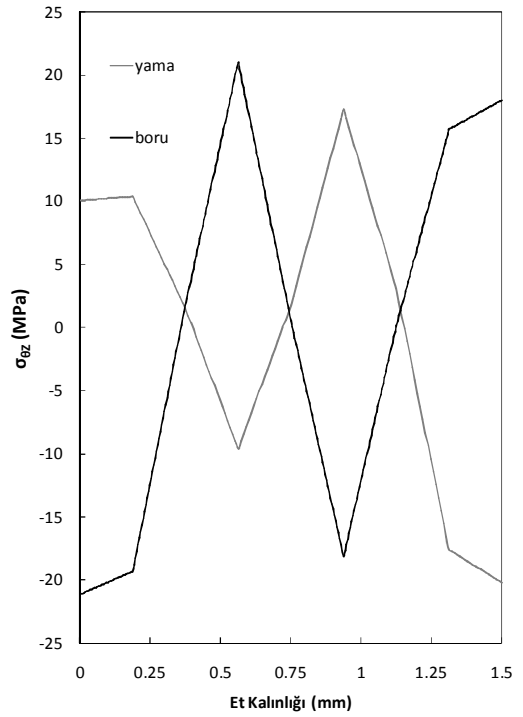
Von-Mises gerilmeleri Şekil 4.79' da gösterilmiştir. Bu hatlar üzerinde Von-Mises gerilmeleri incelendiğinde, A-B gerilme ölçüm hattı üzerinde oluşan gerilmelerin kritik gerilmeler olduğu Şekil 4.79' da görülmektedir. Bu sebepten, yama kullanılarak yapıştırılan kompozit boru problemlerinde gerilme ölçümleri A-B hattı üzerinde incelenmiştir.



**Şekil 4.79.**  $45^0/-45^0/45^0/-45^0$  oryantasyon açılı yama kullanılarak (20 mm) 4 tabakalı kompozit boruların yapıştırmada kullanılan DP 410 yapıştırıcının gerilme hatları üzerinde oluşan Von-Mises gerilmelerinin karşılaştırılması (4.5 MPa)



(a)



(b)

**Şekil 4.80.** DP 410 yapıştırıcı kullanarak birleştirilen  $45^0/-45^0/45^0/-45^0$  oryantasyon açılı yama (20 mm) ve 4 tabakalı kompozit boruların; (a) radyal ve (b) kayma gerilmelerinin karşılaştırılması (4.5 MPa)

Yama kullanılarak birleştirilen kompozit boruların üzerinde kritik gerilmeleri belirlemek için kompozit boru ve yama üzerinde oluşan gerilmeler incelenmiştir. Şekil 4.80' de görüldüğü gibi, kompozit borular ve yama üzerinde oluşan teğetsel ve kayma gerilmeleri incelenmiştir. Kullanılan yamalar, kompozit boru şeklinde ürettirildikten sonra belirtilen yama boylarında kesilerek hazırlanmıştır ve 4 tabakalı borularla, yarıçap ölçüsü dışında tüm özellikleri aynıdır. Şekil 4.80 incelendiğinde, kompozit boru üzerinde oluşan gerilmelerin yama üzerinde oluşan gerilmelerden daha büyük olduğu tespit edilmiştir. Bundan sonraki yapılacak çalışmalarda yama üzerinde oluşan gerilmeler incelenmemiştir.

#### 4.4.3.1. İç basınç altında DP 410 yapıştırıcı ile yama kullanılarak yapıştırılan kompozit boruların nümerik sonuçları

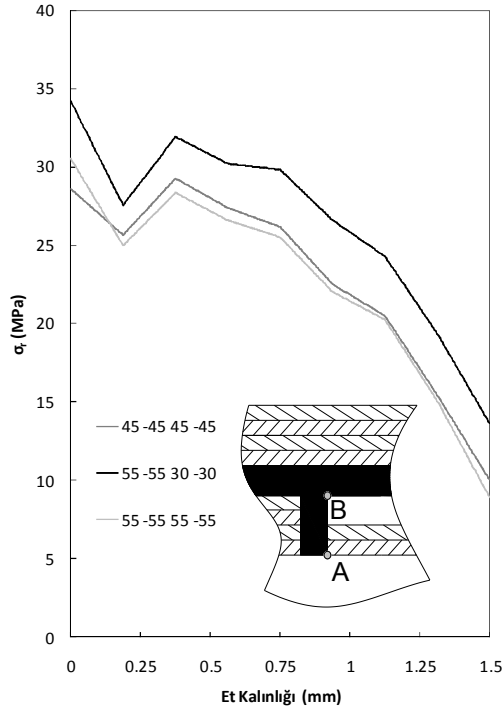
İç basınç altında DP 410 yapıştırıcı ile 4 tabakalı sırasıyla 20 mm, 30 mm ve 40 mm yama kullanılarak yapıştırılan 4, 6 ve 8 tabakalı kompozit boruların nümerik çalışmaları incelenmiştir. Tabaka sayısı arttıkça doğal olarak dayanımda artmaktadır. Her tabakanın kalınlığı aynı olup, sadece tabaka sayısı arttıkça boru et kalınlığı değişmektedir. Çizelge 4.14 incelendiğinde, üç farklı uzunluktaki yamalar kullanılarak birleştirilen 4 tabakalı borularda  $55^0/-55^0/55^0/-55^0$ , 6 tabakalı borularda  $55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$ , 8 tabakalı borularda ise  $55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$  oryantasyon açılı borular en yüksek hasar iç basıncına sahip kompozit borular olduğu görülmektedir. Şekil 4.81-4.92 incelendiğinde, tabaka sayısı arttıkça gerilmelerin değiştiği görülmektedir. Yama kullanılarak yapıştırılan kompozit boru problemlerin de en yüksek gerilmelerin olduğu A-B hattı (Şekil 4.78) üzerinde gerilme ölçümleri yapılmıştır ve gerilmeler incelenmiştir. Tüm kompozit borularda ve yapıştırıcıda  $\sigma_\theta$  gerilmeleri diğer gerilmelere göre parametre değişikliklerinden en fazla etkilenmektedir. Kompozit borularda tabaka sayısı arttıkça ve bununla birlikte yapıştırıcının radyal yöndeki kalınlığıda arttıkça, tüm oryantasyon açıları için  $\sigma_\theta$  gerilmesi değişmektedir. Bununla birlikte farklı yama uzunlukları, yapıştırıcı ve kompozit boru üzerinde oluşan gerilmelerde farklı bir davranış sergilemesine etki ettikleri aşağıdaki şekillerde görülmektedir. Aynı durum diğer gerilmeler içinde geçerli olduğunu söyleyebiliriz ve bu durumlar Şekil 4.81-4.92' de görülmektedir.

$\sigma_\theta$  gerilmesi,  $55^0$  oryantasyonlar açılı tabakalar için maksimumdur ve  $30^0$  oryantasyon açılı tabakalar için minimum değerdedir. Fakat Von-Mises gerilmelerinde ise tabaka kalınlığı arttıkça birleştirilen kompozit boruların oryantasyon açılarına göre maksimum ve minimum gerilme değerleri  $\sigma_\theta$  gibi belirli bir düzende değildir.  $45^0/-45^0/45^0/-45^0$  oryantasyon açılı 4 tabakalı boruları birleştirdiğimizde yapıştırıcı üzerinde oluşan Von-Mises gerilmesinin maksimum değerinde iken,  $55^0/-55^0/55^0/-30^0/30^0/-30^0$  oryantasyon açılı 6 tabakalı kompozit boruları birleştirdiğimizde yapıştırıcı üzerinde radyal yönde bazı bölgelerde Von-Mises gerilmesinin maksimum gerilme olduğu aşağıdaki şekillerde görülmektedir. Ama genel olarak  $45^0$  oryantasyon açılı kompozit boruların birleştirilmesindeki yapıştırıcı üzerinde Von-Mises gerilmeleri maksimum değerinde olduğu aşağıdaki şekillerde görülmektedir.

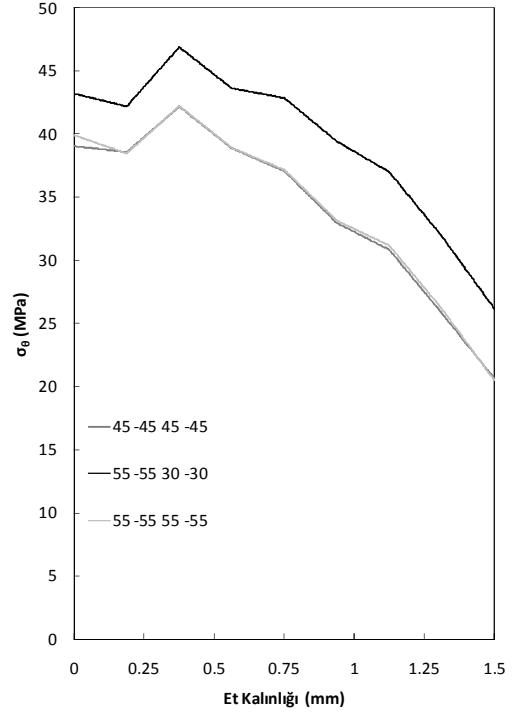
**Çizelge 4.14.** DP 410 yapıştırıcı kullanılarak farklı uzunlukta yama ile birleştirilen farklı oryantasyon açılı 4, 6 ve 8 tabakalı kompozit boruların iç basınç yüklemesi altındaki nümerik hasar iç basınçları

Tabaka Sayısı	Yama Uzunluğu (mm)	Oryantasyon açısı	Hasar İç Basıncı (MPa)	
4	20	45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup>	4.5	
		55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup>	5.5	
		55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup>	6.0	
6		45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup>	7.0	
		55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup>	8.0	
		55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup>	9.0	
8		45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup>	10.0	
		55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup>	10.5	
		55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup>	11.5	
4		30	45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup>	6.0
			55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup>	6.5
			55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup>	7.5
6	45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup>		9.0	
	55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup>		9.5	
	55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup>		10.5	
8	45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup>		11.5	
	55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup>		12.5	
	55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup>		13.5	
4	40		45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup>	7.5
			55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup>	7.5
			55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup>	9.0
6		45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup>	10.5	
		55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup>	11.0	
		55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup>	11.5	
8		45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup>	13.5	
		55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup>	14.0	
		55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup>	15.0	

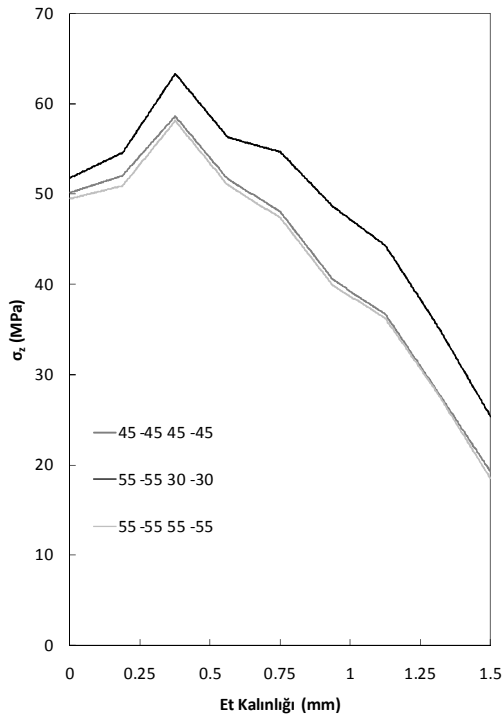
Şekil 4.81 ve Şekil 4.82 incelendiğinde, yapıştırıcı tabakanın iç yüzeyinde oluşan gerilmelerin yüksek olduğu ve tabakanın dışına doğru gerilmelerin azaldığı görülmektedir. Bunun sebebi, yamanın bu bölgeye vermiş olduğu destekten kaynaklanmaktadır. Radyal, teğetsel ve eksenel gerilmeler incelendiğinde, tabakanın iç kısmında belirli bir yere kadar gerilmelerde artış ve daha sonra azalışlar görülmektedir. Bu durumun oluşma sebebi olarak yamanın sağladığı desteğin etkisinin iç kısımlarda fazla olmadığını söyleyebiliriz.



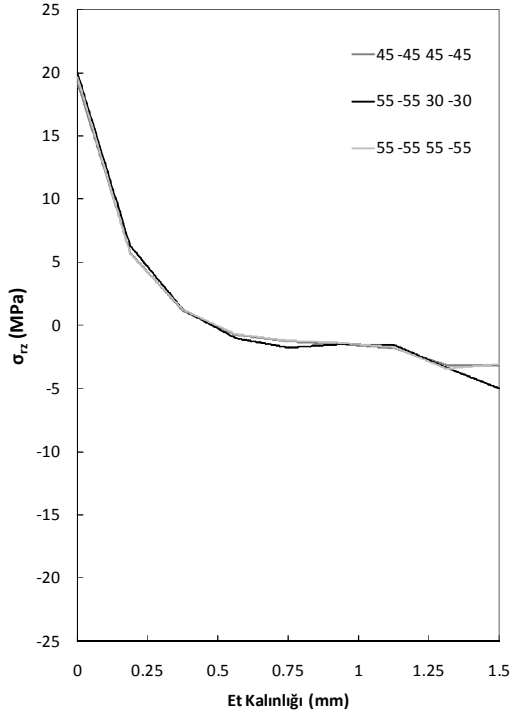
(a)



(b)

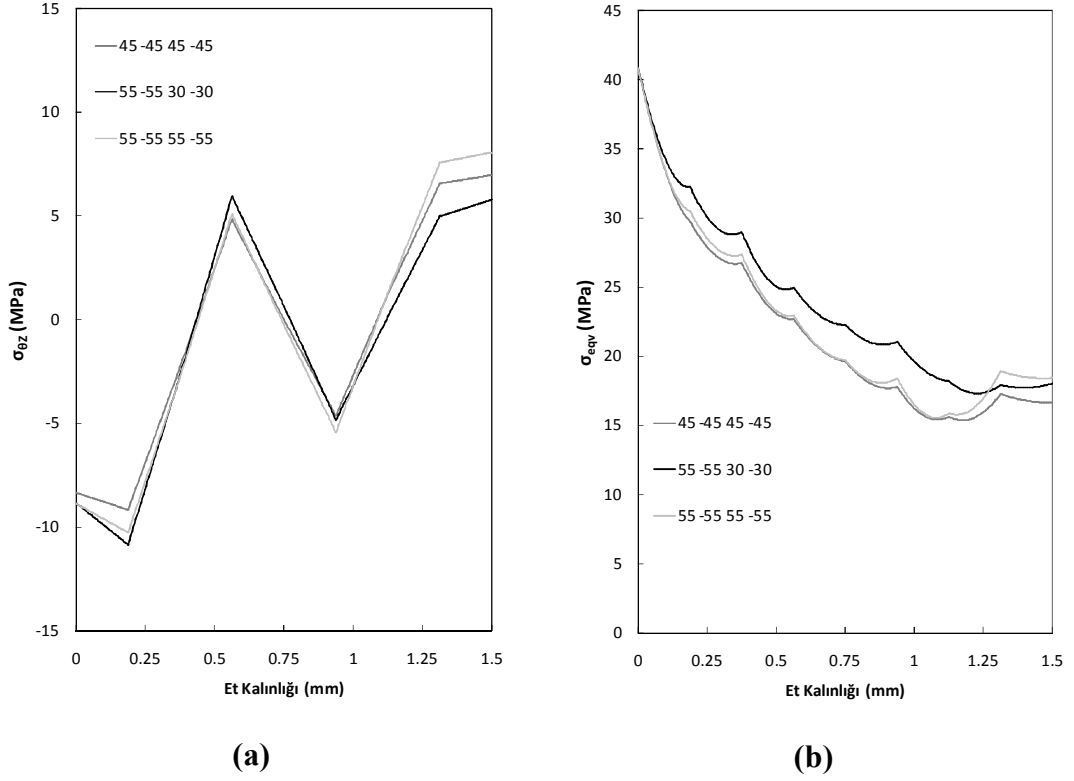


(c)



(d)

**Şekil 4.81.** Farklı oryantasyon açılı yama kullanılarak (20 mm) 4 tabakalı kompozit boruların birleştirmede kullanılan DP 410 yapıştırıcının A-B gerilme hattı üzerindeki; (a) radyal, (b) teğetsel, (c) eksenel, (d) kayma gerilmelerinin karşılaştırılması (  $45^0/-45^0/45^0/-45^0$  için 4.5 MPa,  $55^0/-55^0/30^0/-30^0$  için 5.5 MPa,  $55^0/-55^0/55^0/-55^0$  için 6 MPa)

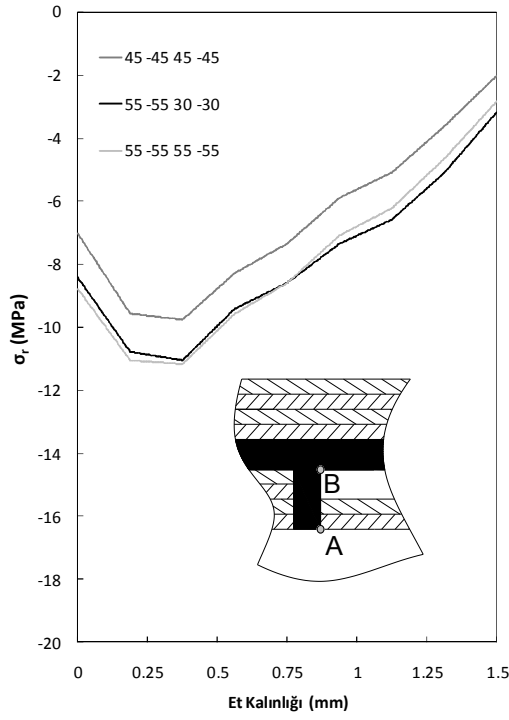


**Şekil 4.82.** Farklı oryantasyon açılı yama kullanılarak (20 mm) 4 tabakalı kompozit boruların birleştirmede kullanılan DP 410 yapıştırıcının A-B gerilme hattı üzerindeki; (a) kayma, (b) Von-Mises gerilmelerinin karşılaştırılması ( $45^{\circ}/-45^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}$  için 4.5 MPa,  $55^{\circ}/-55^{\circ}/30^{\circ}/-30^{\circ}$  için 5.5 MPa,  $55^{\circ}/-55^{\circ}/55^{\circ}/-55^{\circ}$  için 6 MPa)

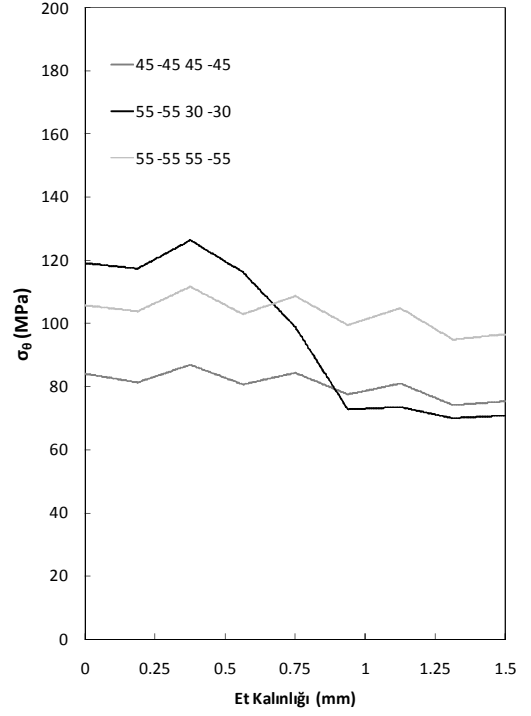
Şekil 4.83' de gösterildiği gibi, kompozit borular üzerinde oluşan gerilmeler, yapıştırıcı üzerinde oluşan gerilme dağılımlarından farklıdır. Teğetsel gerilmenin, gerilmeler arasında en yüksek değerlerde olduğu görülmektedir. Gerilme dağılımlarında oryantasyon açılarının etkileride görülmektedir. Teğetsel ve kayma gerilmelerinin, tabakalar arası geçişte ve tabalar üzerindeki dağılımları üçgen şeklini anımsatan artış ve azalışlar şeklinde olduğu da görülmektedir.

Şekil 4.84 incelendiğinde, aynı tabaka kalınlığında farklı yama uzunluklarında yapıştırıcı üzerinde oluşan gerilme dağılımlarının etkileri görülmektedir. Yama uzunluğu arttıkça, yapıştırıcı tabakanın iç ve dış yüzeyleri arasındaki gerilme farkı azalmaktadır. Bunun sebebi, yapıştırılan bölgede yama boyunun etkisinin olduğunu söyleyebiliriz.

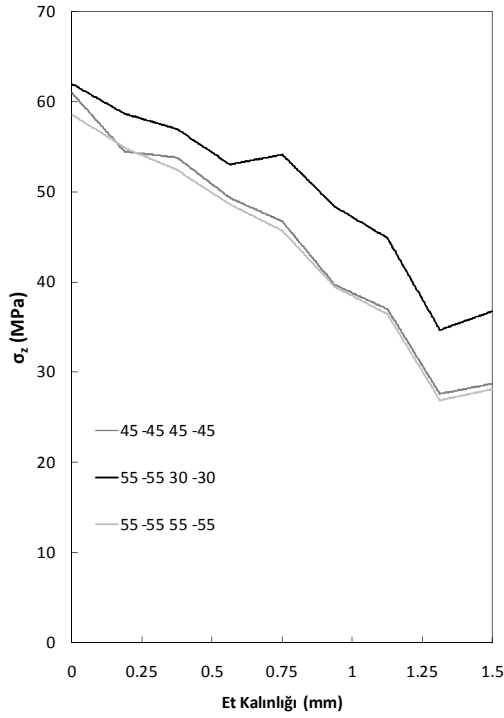




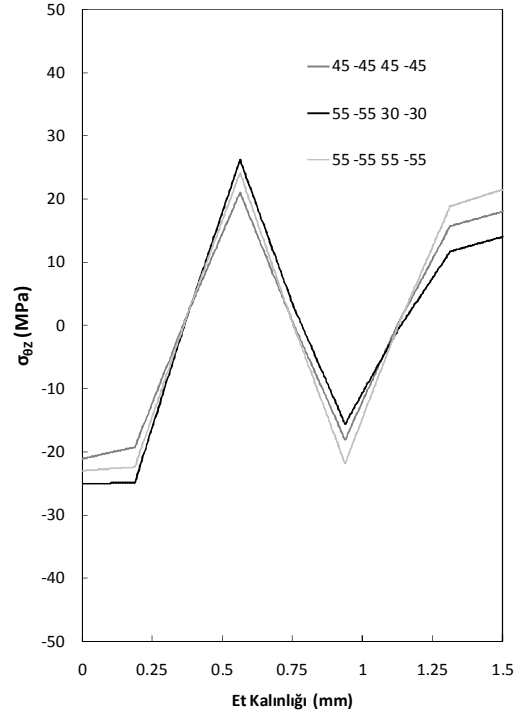
(a)



(b)

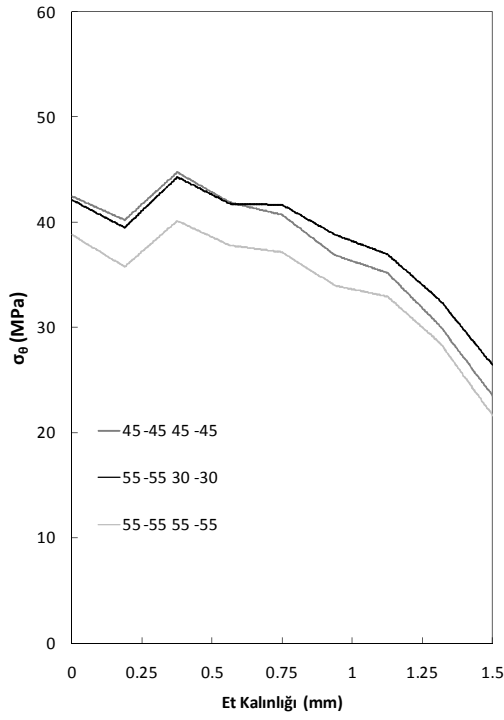


(c)

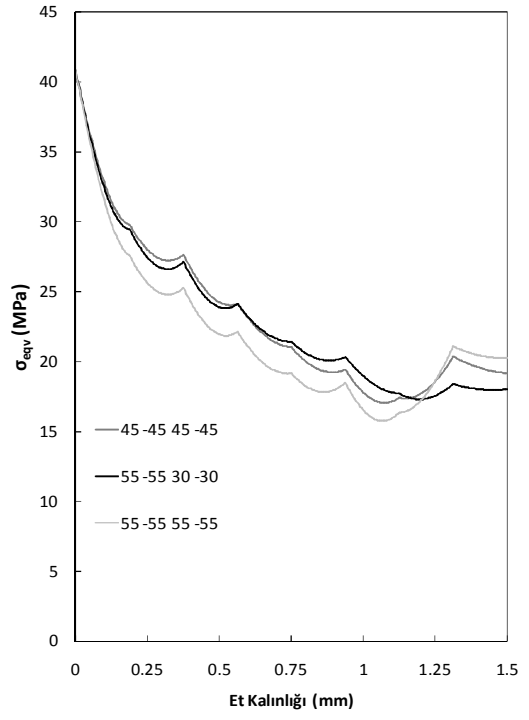


(d)

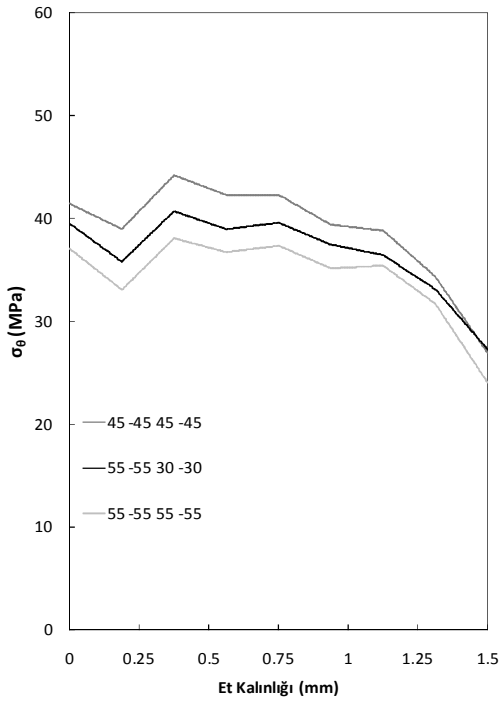
**Şekil 4.83.** DP 410 yapıştırıcı kullanarak yama (20 mm) kullanarak birleştirilen farklı oryantasyon açılı 4 tabakalı kompozit boruların A-B gerilme hattı üzerindeki; (a) radyal, (b) teğetsel, (c) eksenel, (d) kayma gerilmelerinin karşılaştırılması ( $45^\circ/45^\circ/45^\circ/45^\circ$  için 4.5 MPa,  $55^\circ/55^\circ/30^\circ/30^\circ$  için 5.5 MPa,  $55^\circ/55^\circ/55^\circ/55^\circ$  için 6 MPa)



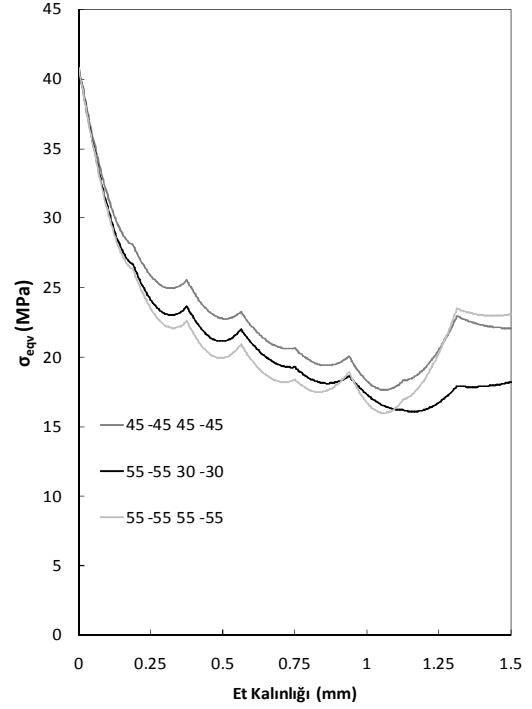
(a)



(b)

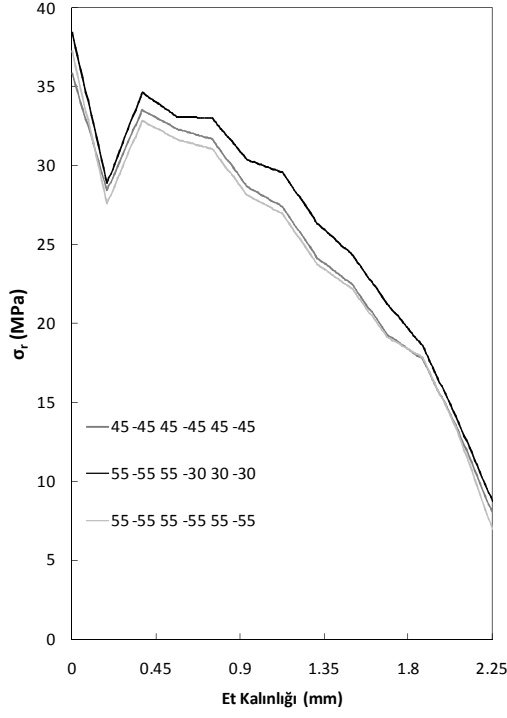


(c)

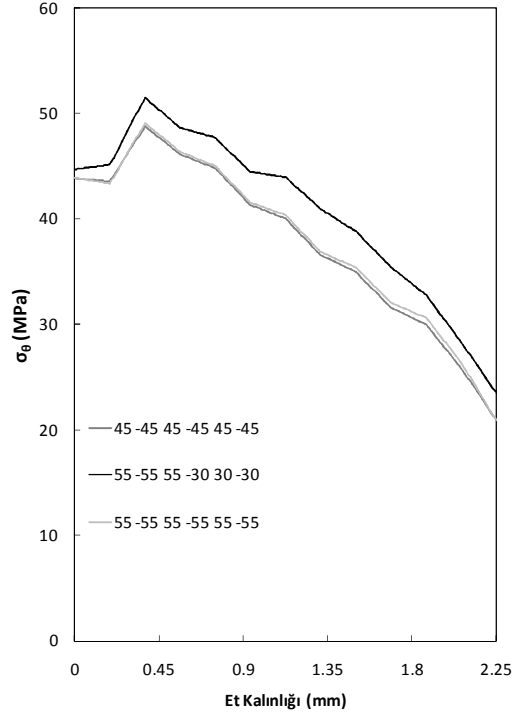


(d)

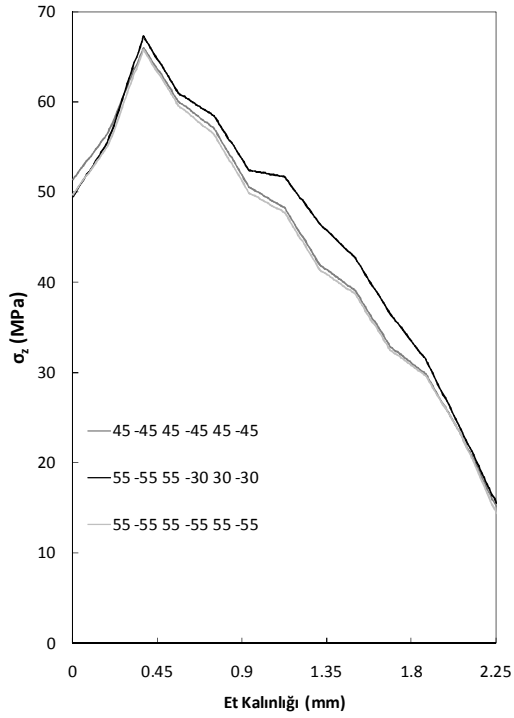
**Şekil 4.84.** Farklı oryantasyon açılı 4 tabakalı kompozit boruları yama kullanılarak birleştirmede kullanılan DP 410 yapıştırıcının A-B gerilme hattı üzerindeki; 30mm yama boyunda (a) teğetsel, (b) Von-Mises (  $45^{\circ}/45^{\circ}/45^{\circ}/45^{\circ}$  için 6 MPa,  $55^{\circ}/55^{\circ}/30^{\circ}/30^{\circ}$  için 6.5 MPa,  $55^{\circ}/55^{\circ}/55^{\circ}/55^{\circ}$  için 7.5 MPa) ve 40 mm yama boyunda (c) teğetsel, (d) Von-Mises gerilmelerinin karşılaştırılması (  $45^{\circ}/45^{\circ}/45^{\circ}/45^{\circ}$  için 7.5 MPa,  $55^{\circ}/55^{\circ}/30^{\circ}/30^{\circ}$  için 7.5 MPa,  $55^{\circ}/55^{\circ}/55^{\circ}/55^{\circ}$  için 9 MPa)



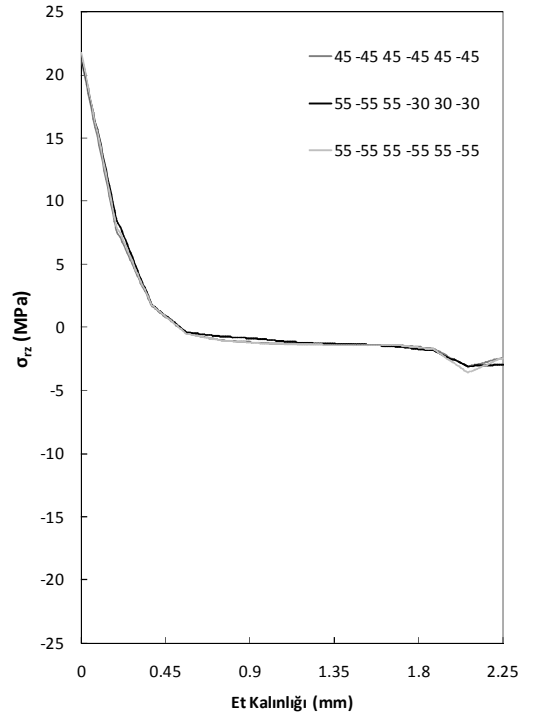
(a)



(b)

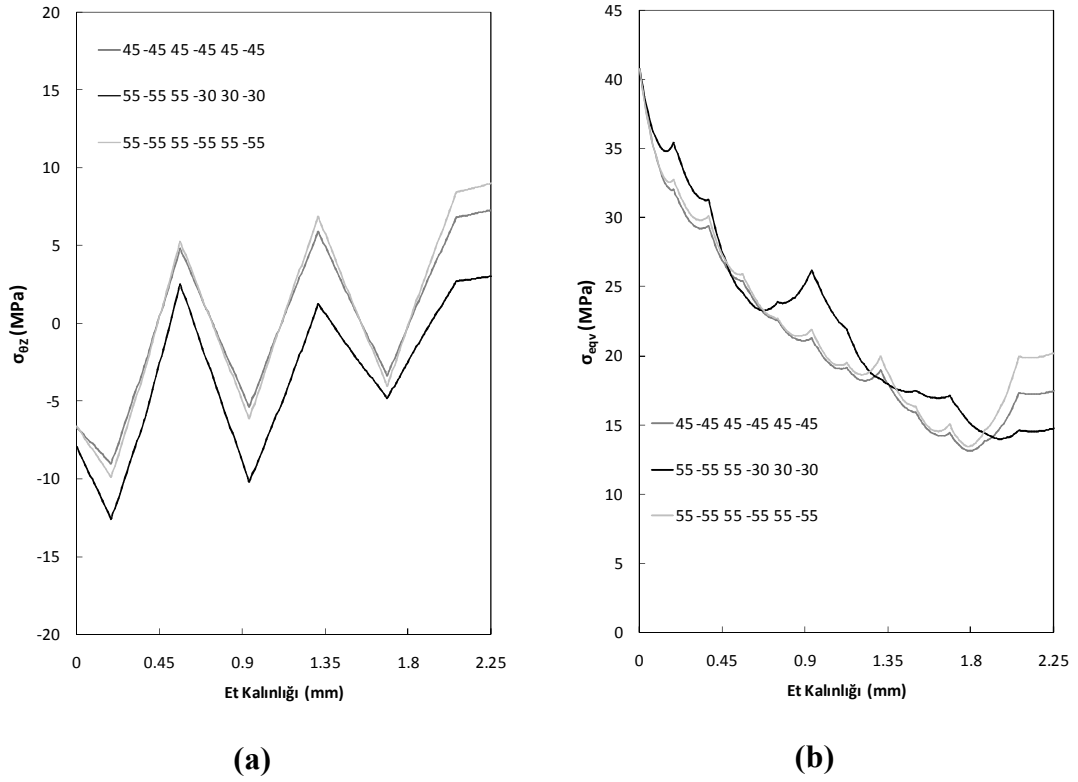


(c)



(d)

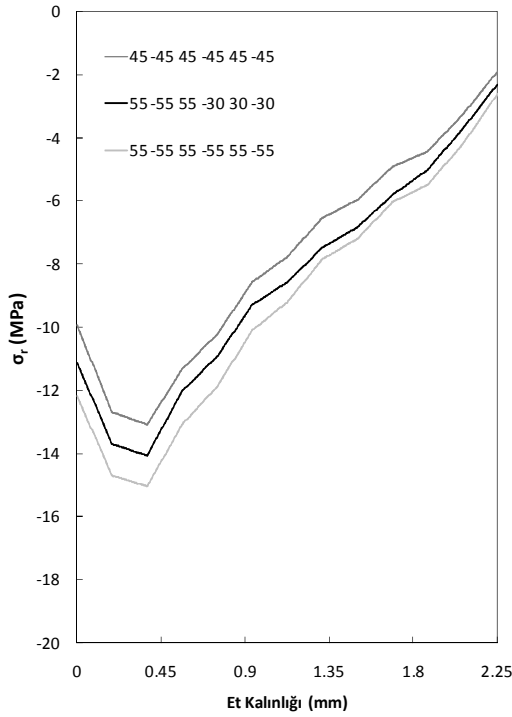
**Şekil 4.85.** Farklı oryantasyon açılı yama kullanılarak (20 mm) 6 tabakalı kompozit boruların birleştirmede kullanılan DP 410 yapıştırıcının A-B gerilme hattı üzerindeki; (a) radyal, (b) teğetsel, (c) eksenel, (d) kayma gerilmelerinin karşılaştırılması ( $45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0$  için 7 MPa,  $55^0/-55^0/55^0/-30^0/30^0/-30^0$  için 8 MPa,  $55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$  için 9 MPa)



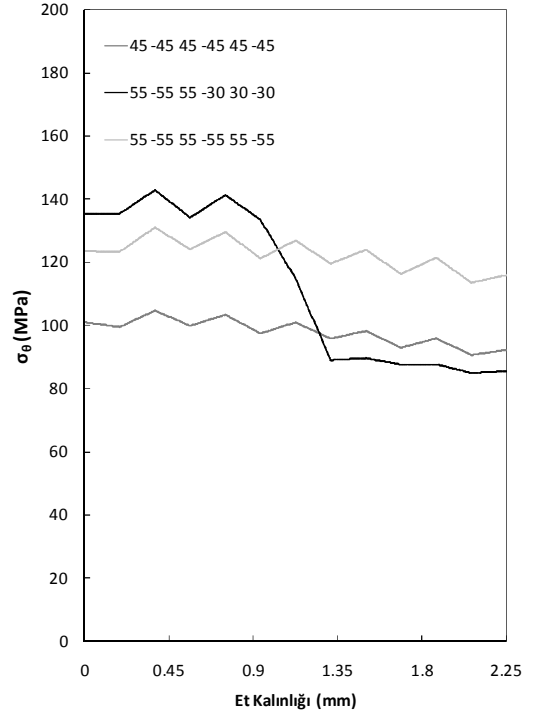
**Şekil 4.86.** Farklı oryantasyon açılı yama kullanılarak (20 mm) 6 tabakalı kompozit boruların birleştirmede kullanılan DP 410 yapıştırıcının A-B gerilme hattı üzerindeki; (a) kayma, (b) Von-Mises gerilmelerinin karşılaştırılması (45°/-45°/45°/-45°/45°/-45° için 7 MPa, 55°/-55°/55°/-30°/30°/-30° için 8 MPa, 55°/-55°/55°/-55°/55° için 9 MPa)

Şekil 4.85 ve Şekil 4.86 incelendiğinde, yapıştırıcı tabakanın iç yüzeyinde oluşan gerilmelerin yüksek olduğu ve tabakanın dışına doğru gerilmelerin azaldığı görülmektedir. Tabaka sayısının artmasıyla, gerilmeler üzerinde azalış ve artışların miktarları da artmaktadır. Bunun sebebi, yamanın bu bölgeye vermiş olduğu destek ile birlikte yapıştırıcı tabaka kalınlığı ve kompozit boru tabaka sayısının artmasının etkili olduğunu söyleyebiliriz.

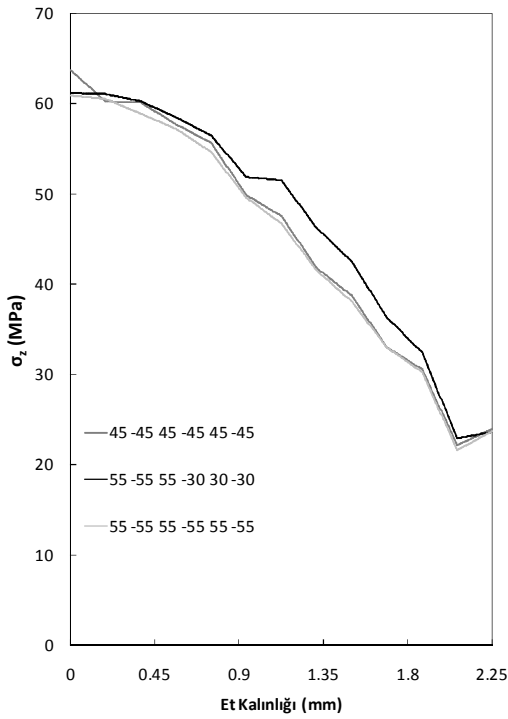
Şekil 4.87' de görüldüğü gibi, kompozit boruların tabaka sayılarının artması gerilme dağılımlarını etkilemektedir. Tabaka sayısının artması ile birlikte gerilme dağılımlarının da artış ve azalış şeklinde dalgalanma miktarlarının arttığı Şekil 4.87' de görülmektedir.



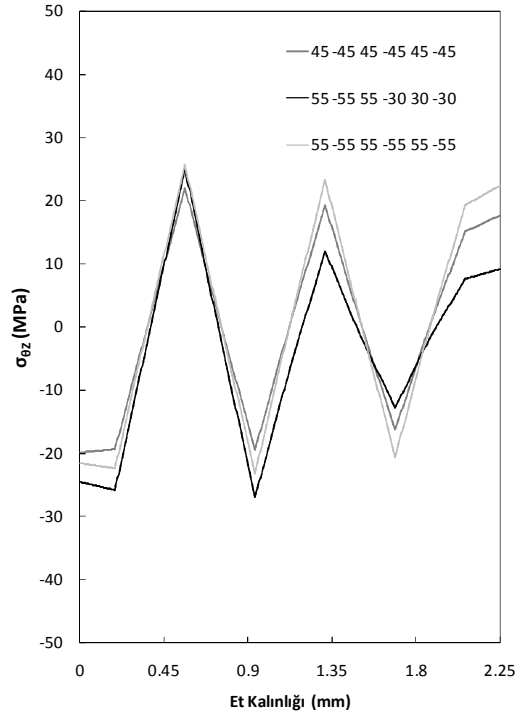
(a)



(b)

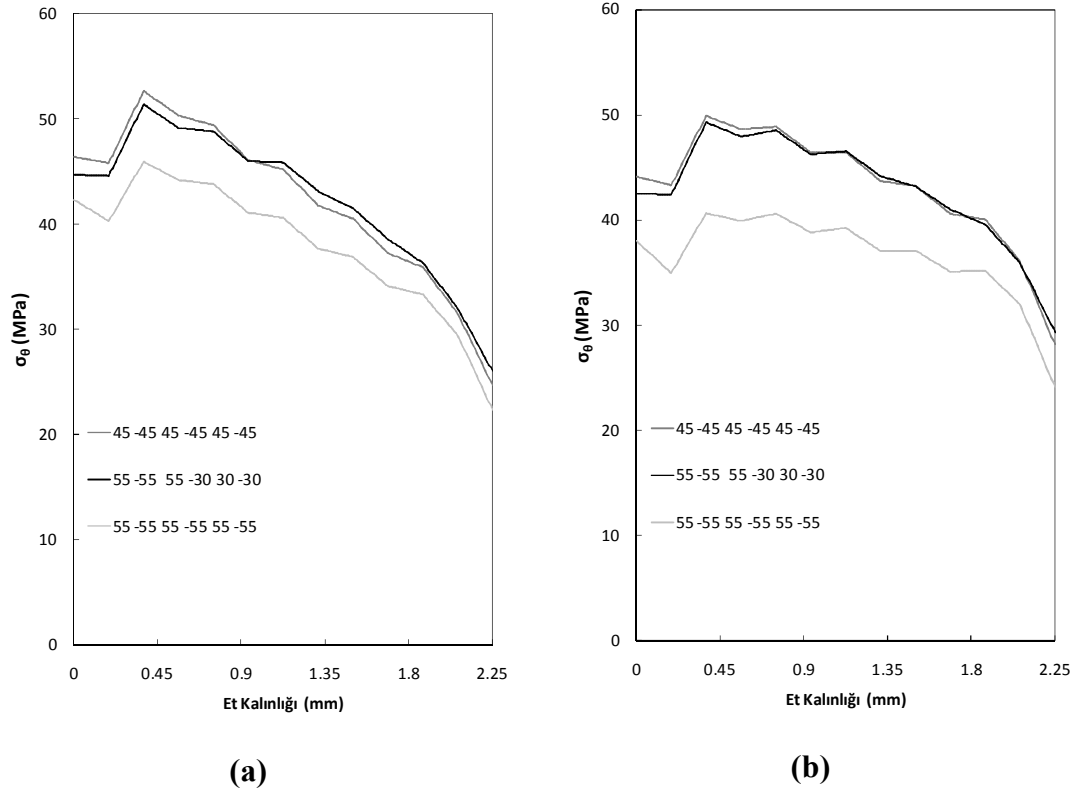


(c)



(d)

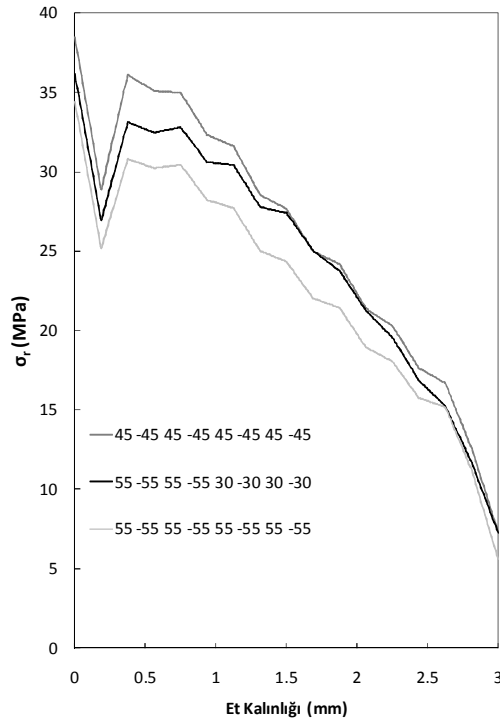
**Şekil 4.87.** DP 410 yapıştırıcı kullanarak yama (20 mm) kullanarak birleştirilen farklı oryantasyon açılı 6 tabakalı kompozit boruların A-B gerilme hattı üzerindeki; (a) radyal, (b) teğetsel, (c) eksenel, (d) kayma gerilmelerinin karşılaştırılması ( $45^\circ/45^\circ/45^\circ/45^\circ/45^\circ/45^\circ$  için 7 MPa,  $55^\circ/55^\circ/55^\circ/30^\circ/30^\circ/30^\circ$  için 8 MPa,  $55^\circ/55^\circ/55^\circ/55^\circ/55^\circ/55^\circ$  için 9 MPa)



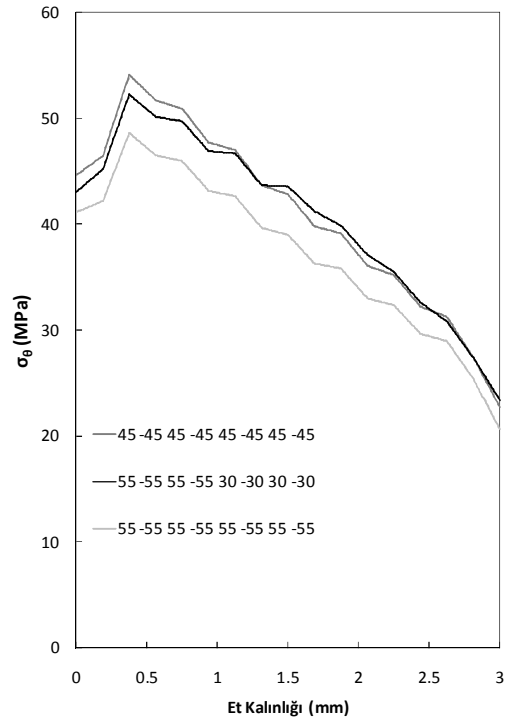
**Şekil 4.88.** Farklı oryantasyon açılı 6 tabakalı kompozit boruları yama kullanılarak birleştirmede kullanılan DP 410 yapıştırıcının A-B gerilme hattı üzerindeki; 30mm yama boyunda (a) teğetsel ( $45^{\circ}/-45^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}$  için 9 MPa,  $55^{\circ}/-55^{\circ}/55^{\circ}/-30^{\circ}/30^{\circ}/-30^{\circ}$  için 9.5 MPa,  $55^{\circ}/-55^{\circ}/55^{\circ}/-55^{\circ}/55^{\circ}/-55^{\circ}$  için 10.5 MPa) ve 40 mm yama boyunda (b) teğetsel ( $45^{\circ}/-45^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}$  için 10.5 MPa,  $55^{\circ}/-55^{\circ}/55^{\circ}/-30^{\circ}/30^{\circ}/-30^{\circ}$  için 11 MPa,  $55^{\circ}/-55^{\circ}/55^{\circ}/-55^{\circ}/55^{\circ}/-55^{\circ}$  için 11.5 MPa) gerilmelerinin karşılaştırılması

Şekil 4.88’ de görüldüğü gibi, yama boyunun artması ile teğetsel gerilme değerlerinin değiştiği ve bu değişimin sebebinin yama boyundan kaynaklandığını söyleyebiliriz.

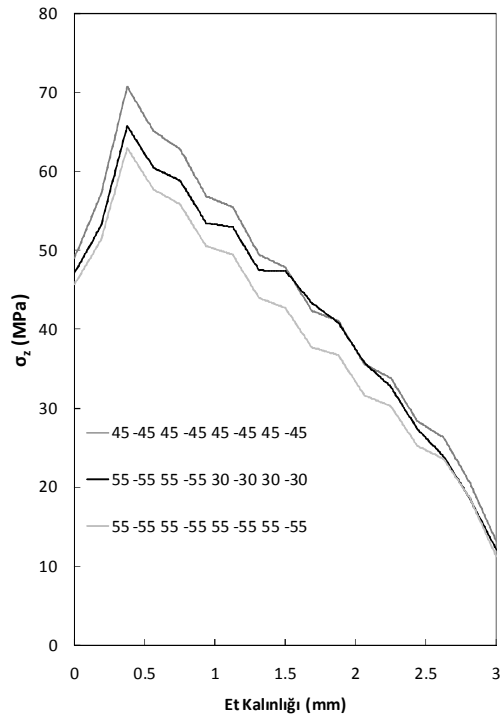
Şekil 4.89 ve Şekil 4.90 incelendiğinde, yapıştırıcı tabakanın iç yüzeyinde oluşan gerilmelerin yüksek olduğu ve tabakanın dışına doğru gerilmelerin azaldığı görülmektedir. Tabaka sayısının artmasıyla, gerilmeler üzerinde azalış ve artışların miktarları da artmaktadır ve gerilmelerin tabakalar arası geçişinde oluşan artış ve azalış şeklindeki dalgalanmalar daha belirgin görülmektedir. Yamanın vermiş olduğu destek ile birlikte yapıştırıcı tabaka kalınlığı ve kompozit boru tabaka sayısının artışı, gerilmelerin dağılımlarını etkilediğini söyleyebiliriz.



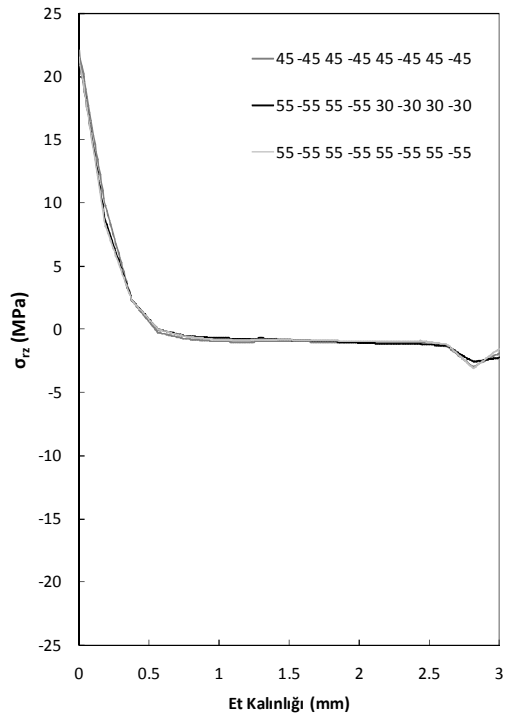
(a)



(b)

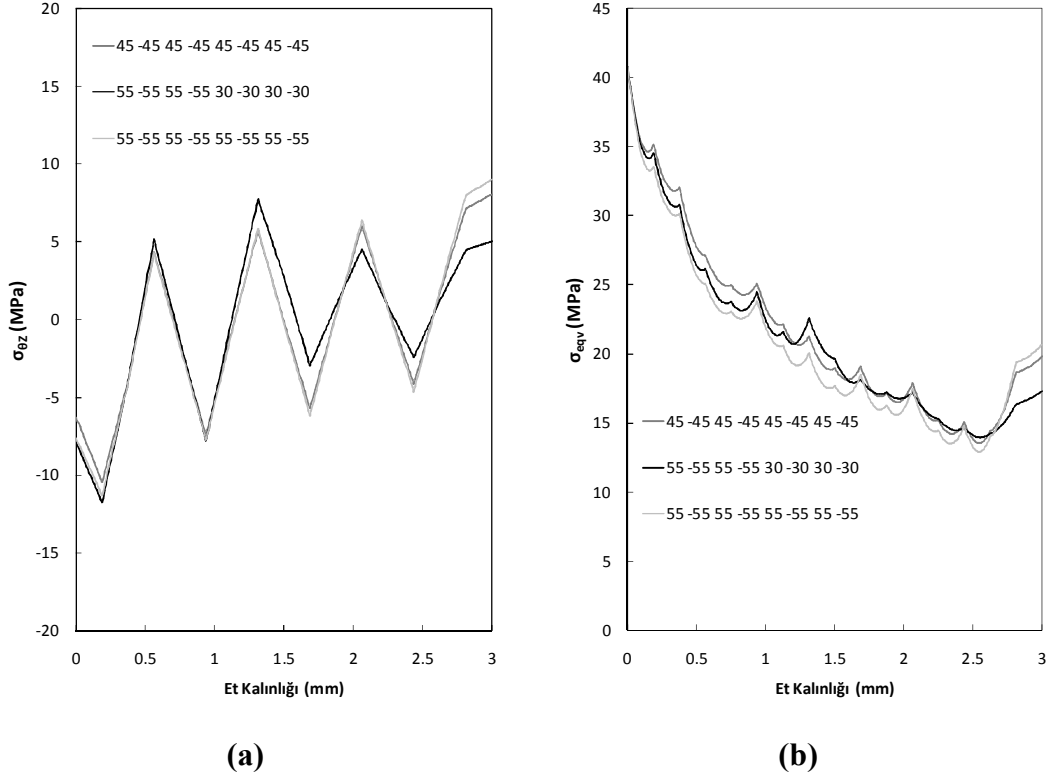


(c)



(d)

**Şekil 4.89.** Farklı oryantasyon açılı yama kullanılarak (20 mm) 8 tabakalı kompozit boruların birleştirmede kullanılan DP 410 yapıştırıcının A-B gerilme hattı üzerindeki; (a) radyal, (b) teğetsel, (c) eksenel, (d) kayma gerilmelerinin karşılaştırılması (  $45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0$  için 10 MPa,  $55^0/-55^0/55^0/-55^0/30^0/-30^0/30^0/-30^0$  için 10.5 MPa,  $55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$  için 11.5 MPa)

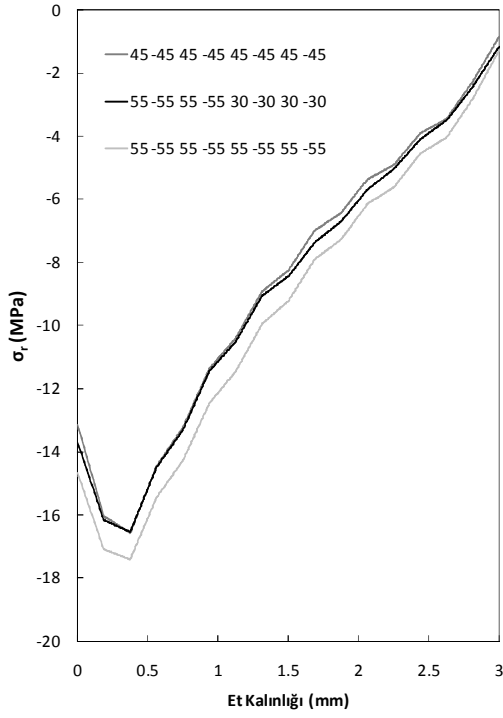


**Şekil 4.90.** Farklı oryantasyon açılı yama kullanılarak (20 mm) 8 tabakalı kompozit boruların birleştirmede kullanılan DP 410 yapıştırıcının A-B gerilme hattı üzerindeki; (a) kayma, (b) Von-Mises gerilmelerinin karşılaştırılması ( $45^{\circ}/-45^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}/-45^{\circ}/-45^{\circ}$  için 10 MPa,  $55^{\circ}/-55^{\circ}/55^{\circ}/-55^{\circ}/30^{\circ}/-30^{\circ}/30^{\circ}/-30^{\circ}$  için 10.5 MPa,  $55^{\circ}/-55^{\circ}/55^{\circ}/-55^{\circ}/55^{\circ}/-55^{\circ}/55^{\circ}/-55^{\circ}$  için 11.5 MPa)

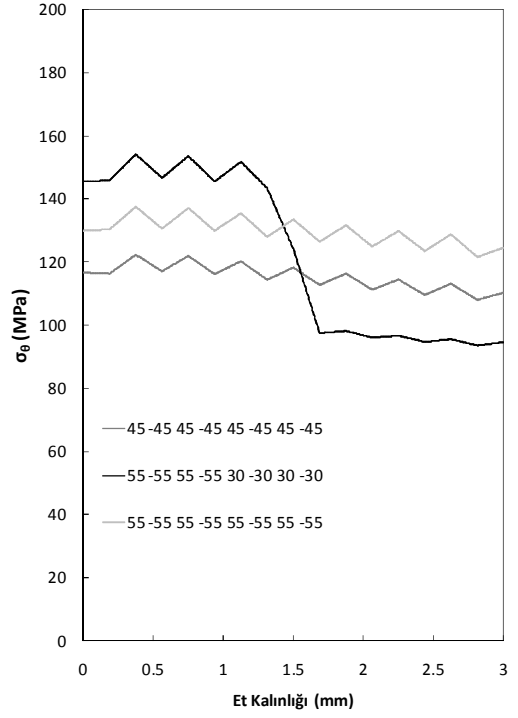
Şekil 4.91’ de görüldüğü gibi, kompozit boruların tabaka sayılarının artması gerilme dağılımlarını etkilemektedir. Özellikle teğetsel ve kayma gerilmelerinde tabaka sayısının artması ile birlikte gerilme dağılımların da üçgen şeklini anımsatan artış ve azalış şeklinde dalgalanmaların miktarının arttığı Şekil 4.91’ de görülmektedir.

Şekil 4.92 incelendiğinde, yapıştırıcı tabakanın kalınlığının artması ile gerilme dağılımları değişmektedir. Bu değişimleri yapıştırıcı üzerinde oluşan teğetsel gerilme dağılımları ile gösterilmiştir. Gerilme dağılımlarında meydana gelen değişimlerin oluşmasında, tabaka kalınlıklarının etkisinin yanı sıra kompozit boruların oryantasyon açılarının da etkisinin olduğunu söyleyebiliriz.

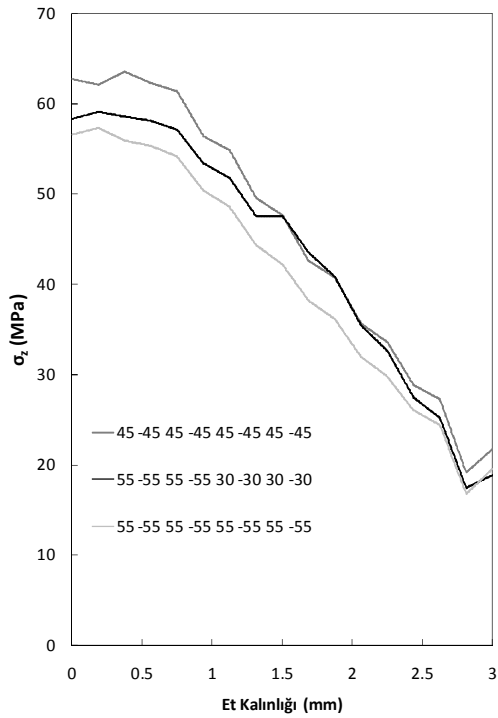




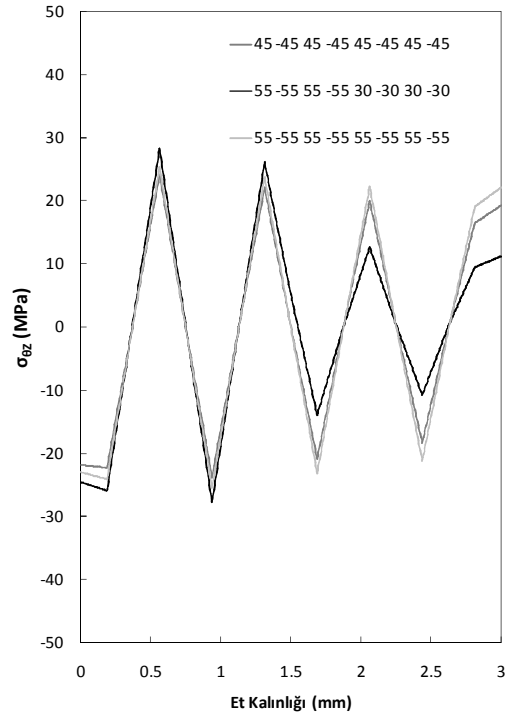
(a)



(b)

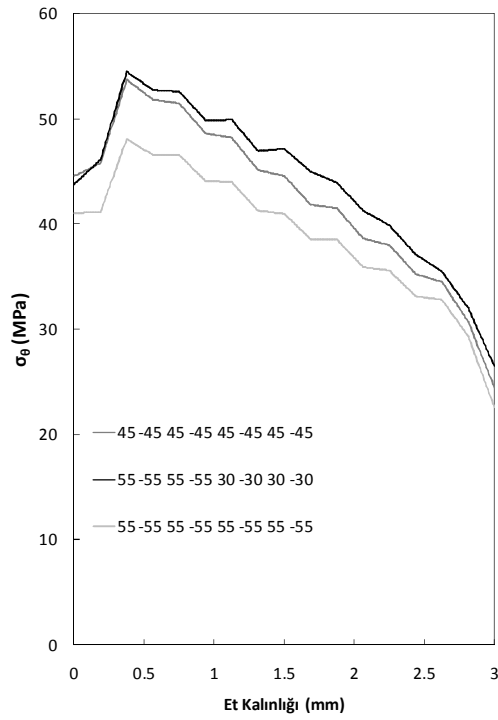


(c)

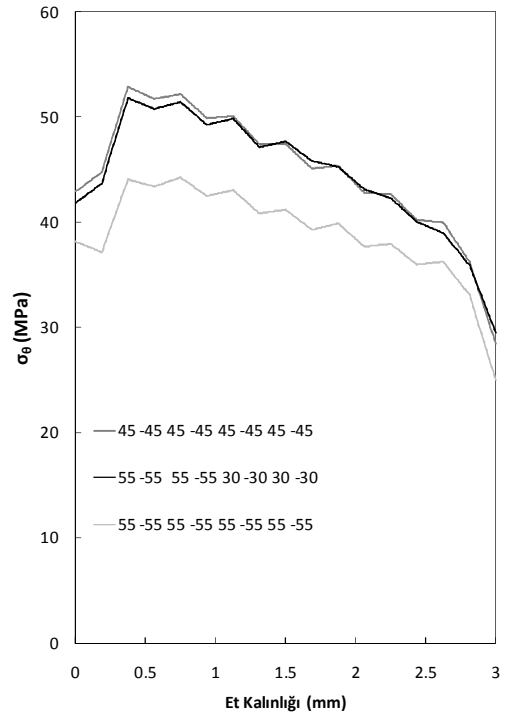


(d)

**Şekil 4.91.** DP 410 yapıştırıcı kullanarak yama (20 mm) kullanarak birleştirilen farklı oryantasyon açılı 8 tabakalı kompozit boruların A-B gerilme hattı üzerindeki; (a) radyal, (b) teğetsel, (c) eksenel, (d) kayma gerilmelerinin karşılaştırılması  $45^{\circ}/45^{\circ}/45^{\circ}/45^{\circ}/45^{\circ}/45^{\circ}/45^{\circ}/45^{\circ}$  için 10 MPa,  $55^{\circ}/55^{\circ}/55^{\circ}/55^{\circ}/30^{\circ}/30^{\circ}/30^{\circ}/30^{\circ}$  için 10.5 MPa,  $55^{\circ}/55^{\circ}/55^{\circ}/55^{\circ}/55^{\circ}/55^{\circ}/55^{\circ}/55^{\circ}$  için 11.5 MPa)



(a)



(b)

**Şekil 4.92.** Farklı oryantasyon açılı 8 tabakalı kompozit boruları yama kullanılarak birleştirmede kullanılan DP 410 yapıştırıcının A-B gerilme hattı üzerindeki; 30mm yama boyunda (a) teğetsel ( $45^{\circ}/-45^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}$  için 11.5 MPa,  $55^{\circ}/-55^{\circ}/55^{\circ}/-55^{\circ}/30^{\circ}/-30^{\circ}/30^{\circ}/-30^{\circ}$  için 12.5 MPa,  $55^{\circ}/-55^{\circ}/55^{\circ}/-55^{\circ}/55^{\circ}/-55^{\circ}/55^{\circ}/-55^{\circ}$  için 13.5 MPa) ve 40 mm yama boyunda (b) teğetsel ( $45^{\circ}/-45^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}$  için 13.5 MPa,  $55^{\circ}/-55^{\circ}/55^{\circ}/-55^{\circ}/30^{\circ}/-30^{\circ}/30^{\circ}/-30^{\circ}$  için 14 MPa,  $55^{\circ}/-55^{\circ}/55^{\circ}/-55^{\circ}/55^{\circ}/-55^{\circ}/55^{\circ}/-55^{\circ}$  için 15 MPa) gerilmelerinin karşılaştırılması

#### 4.4.3.2. İç basınç altında DP 490 yapıştırıcı ile yama kullanılarak yapıştırılan kompozit boruların nümerik sonuçları

İç basınç altında DP 490 yapıştırıcı ile 4 tabakalı sırasıyla 20 mm, 30 mm ve 40 mm yama kullanılarak yapıştırılan 4, 6 ve 8 tabakalı kompozit boruların nümerik çalışmaları incelenmiştir. Tabaka sayısı arttıkça doğal olarak dayanımda artmaktadır. Her tabakanın kalınlığı aynı olup, sadece tabaka sayısı arttıkça boru et kalınlığı değişmektedir. Çizelge 4.15 incelendiğinde, üç farklı uzunluktaki yamalar kullanılarak birleştirilen 4 tabakalı borularda  $55^0/-55^0/55^0/-55^0$ , 6 tabakalı borularda  $55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$ , 8 tabakalı borularda ise  $55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$  oryantasyon açılı borular en yüksek hasar iç basıncına sahip kompozit borular olduğu görülmektedir. Şekil 4.93-4.104 incelendiğinde, tabaka sayısı arttıkça gerilmelerin değiştiği görülmektedir. Tüm kompozit borularda ve yapıştırıcıda  $\sigma_{\theta}$  gerilmeleri diğer gerilmelere göre parametre değişikliklerinden en fazla etkilenmektedir. Yama kullanarak yapıştırılan kompozit boru problemlerinde en yüksek gerilmelerin olduğu A-B hattı (Şekil 4.78) üzerinde gerilme ölçümleri yapılmıştır ve incelenmiştir. Kompozit borularda tabaka sayısı arttıkça ve bununla birlikte yapıştırıcının radyal yöndeki kalınlığıda arttıkça, tüm oryantasyon açıları için  $\sigma_{\theta}$  gerilmesi değişmektedir. Ayrıca farklı yama uzunlukları, yapıştırıcı ve kompozit boru üzerinde oluşan gerilmelerde farklı bir davranış sergilemesine etki ettikleri aşağıdaki şekillerde görülmektedir. Aynı durum diğer gerilmeler içinde geçerli olduğunu söyleyebiliriz ve bu durumlar Şekil 4.93-4.104' de görülmektedir.

Çizelge 4.15 incelendiğinde, tabaka sayısı arttıkça hasar iç basınçlarında artışlar görülmektedir. 4 tabakalı kompozit borularda  $45^0/-45^0/45^0/-45^0$  ve  $55^0/-55^0/30^0/-30^0$  oryantasyon açıları için hasar iç basınçlarının artışı aynı yama uzunluklarında aynı olmasına rağmen, 6 ve 8 tabakalı kompozit borularda her oryantasyon açısının hasar iç basıncı bir birinden farklı olduğu görülmektedir. Bu durumda, 4 tabakalı kompozit boruların  $45^0/-45^0/45^0/-45^0$  ve  $55^0/-55^0/30^0/-30^0$  oryantasyon açılarında birbirine yakın bir özelliğe sahip olduğu söylenebilir. Fakat 6 ve 8 tabakalı durumlarda, kompozit boruların tabaka sayısının artışı nedeniyle bir birinden farklı bir özelliğe sahip olduklarını ve bu sebepten dolayı hasar iç basınçlarının farklı olduğunu söyleyebiliriz.

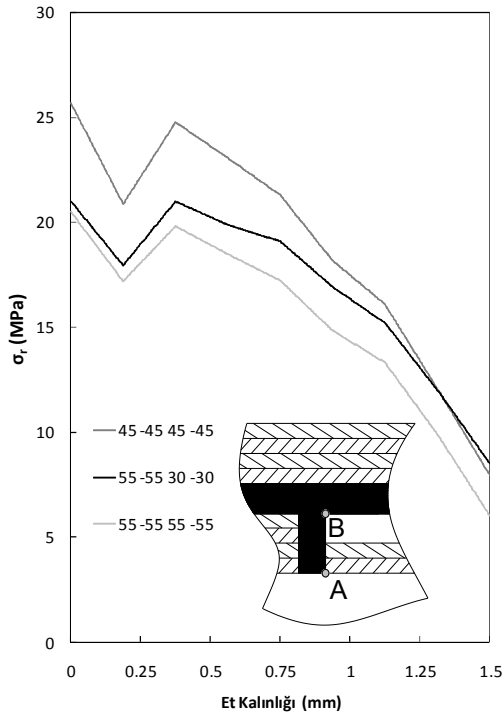
**Çizelge 4.15.** DP 490 yapıştırıcı kullanılarak farklı uzunlukta yama ile birleştirilen farklı oryantasyon açılı 4, 6 ve 8 tabakalı kompozit boruların iç basınç yüklemesi altındaki nümerik hasar iç basınçları

Tabaka Sayısı	Yama Uzunluğu (mm)	Oryantasyon açısı	Hasar İç Basıncı (MPa)
4	20	45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup>	3.5
		55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup>	3.5
		55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup>	4.0
6		45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup>	4.2
		55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup>	5.2
		55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup>	5.5
8		45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup>	7.0
		55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup>	7.5
		55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup>	8.5
4	30	45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup>	4.2
		55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup>	4.2
		55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup>	5.4
6		45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup>	5.0
		55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup>	6.0
		55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup>	6.5
8		45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup>	8.0
		55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup>	8.5
		55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup>	9.5
4	40	45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup>	5.4
		55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup>	5.4
		55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup>	6.4
6		45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup>	5.9
		55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup>	6.8
		55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup>	7.6
8		45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup>	8.0
		55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup>	9.0
		55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup>	10.0

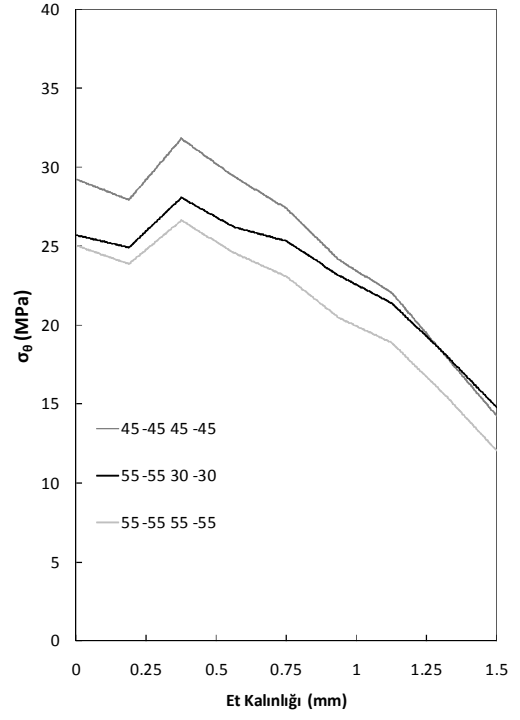
$\sigma_0$  gerilmesi, 55<sup>0</sup> oryantasyon açılı tabakalar için maksimumdur ve 30<sup>0</sup> oryantasyon açılı tabakalar için minimum değerdedir. Fakat Von-Mises gerilmelerinde ise tabaka kalınlığı arttıkça birleştirilen kompozit boruların oryantasyon açılına göre maksimum ve minimum gerilme değerleri  $\sigma_0$  gibi belirli bir düzende değildir. 45<sup>0</sup>/-45<sup>0</sup>/45<sup>0</sup>/-45<sup>0</sup> oryantasyon açılı 4 tabakalı boruları birleştirdiğimizde yapıştırıcı üzerinde oluşan Von-Mises gerilmesinin maksimum değerinde iken, 55<sup>0</sup>/-55<sup>0</sup>/55<sup>0</sup>/-30<sup>0</sup>/30<sup>0</sup>/-30<sup>0</sup> oryantasyon açılı 6 tabakalı kompozit boruları birleştirdiğimizde yapıştırıcı üzerinde Von-Mises gerilmesinin maksimum gerilme olduğu aşağıdaki şekillerde görülmektedir. 8 tabakalı kompozit boruların

birleştirilmesi sonucunda, Von-Mises gerilmesinin her oryantasyon açısında radyal yöndeki bazı farklı bölgelerde maksimum değerlere ulaştığı görülmektedir. Ama genel olarak 45<sup>0</sup> oryantasyon açılı kompozit boruların birleştirilmesindeki yapıştırıcı üzerinde oluşan çoğu gerilmelerin maksimum olduğu aşağıdaki Şekil 4.93-4.104 ‘de gösterilen grafiklerde görülmektedir.

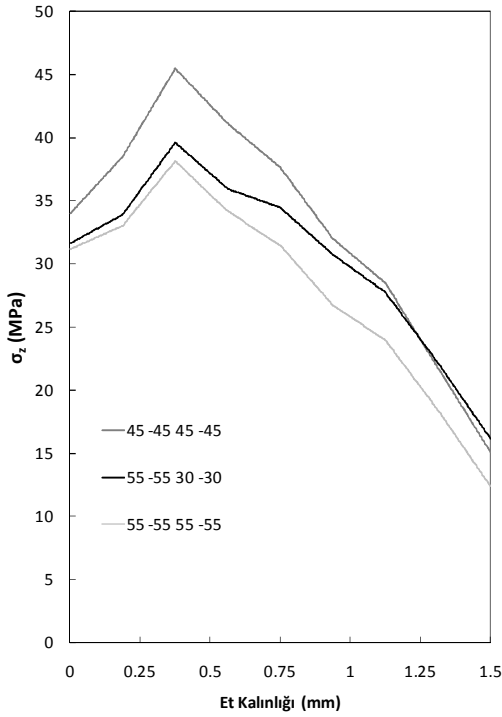
Şekil 4.93 ve Şekil 4.94 incelendiğinde, yapıştırıcı tabakanın i yüzeyinde gerilmelerin yüksek değerde olduğu ve dış yüzeye doğru gerilme değerlerinin düştüğü görülmektedir. Fakat Şekil 4.94 (a)’ da gösterilen kayma gerilmesi, tabakanın dış yüzeyine doğru artmaktadır. Oluşan bu gerilme dağılımları, yamanın ve yapıştırıcının genel karakteristik davranışlarından kaynaklanmaktadır. Tabakanın i yüzeyleri doğrudan yüke maruz kaldığı için i bölgelerde gerilme dağılımları artış ve azalış Őeklinindedir. Fakat dış yüzeye doğru yükün etkisi azaldığından, gerilme dağılımı düzenli bir hale gelmektedir.



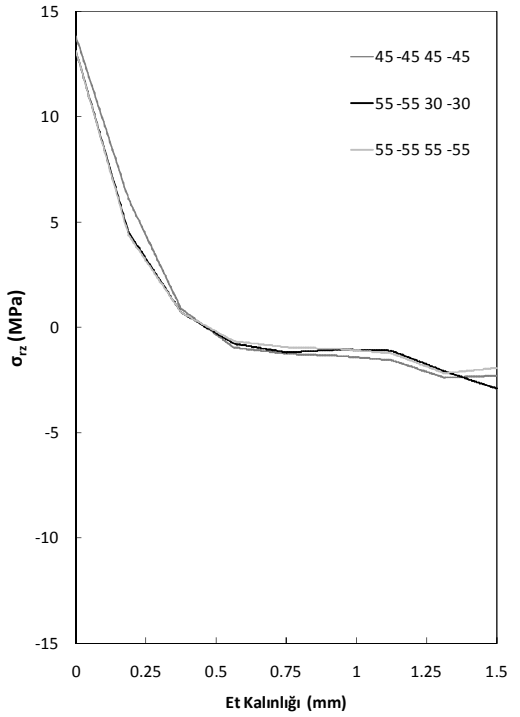
(a)



(b)

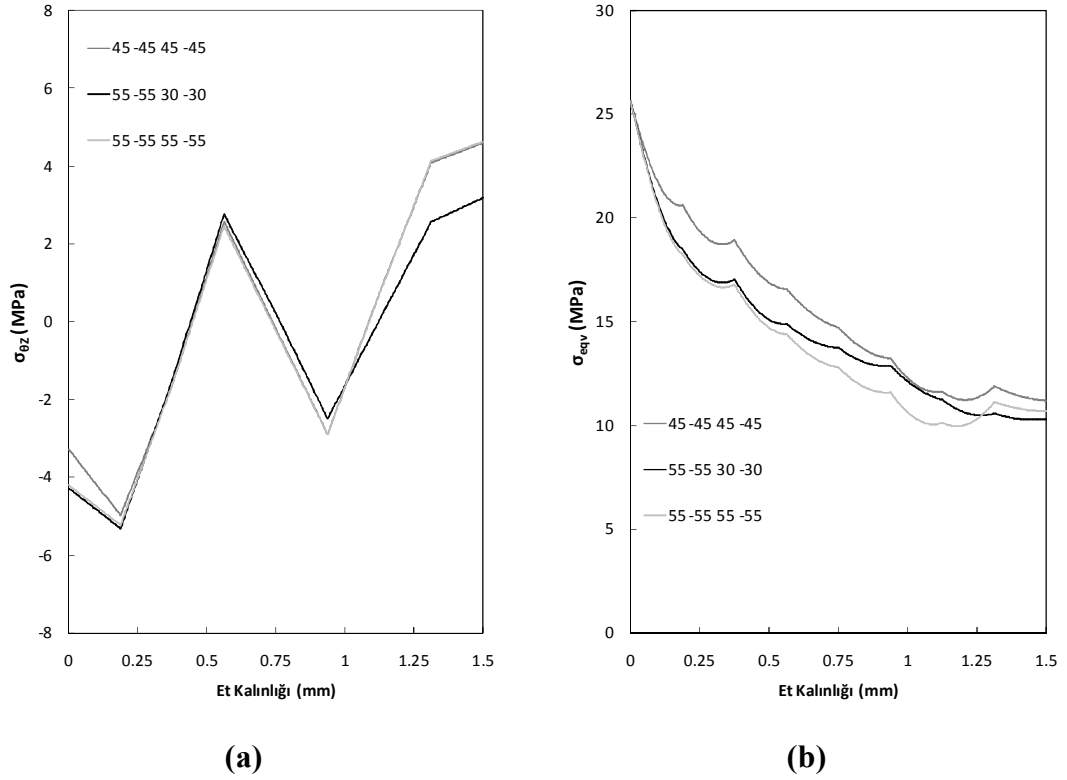


(c)



(d)

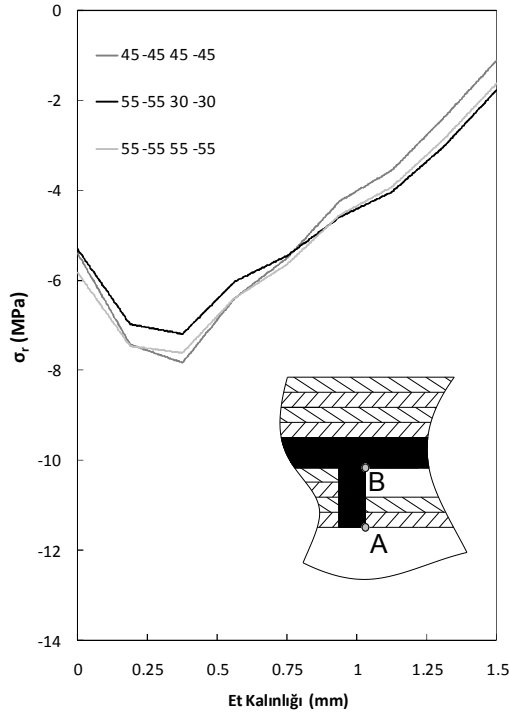
**Şekil 4.93.** Farklı oryantasyon açılı yama kullanılarak (20 mm) 4 tabakalı kompozit boruların birleştirmede kullanılan DP 490 yapıştırıcının A-B gerilme hattı üzerindeki; (a) radyal, (b) teğetsel, (c) eksenel, (d) kayma gerilmelerinin karşılaştırılması (  $45^0/-45^0/45^0/-45^0$  için 3.5 MPa,  $55^0/-55^0/30^0/-30^0$  için 3.5 MPa,  $55^0/-55^0/55^0/-55^0$  için 4 MPa)



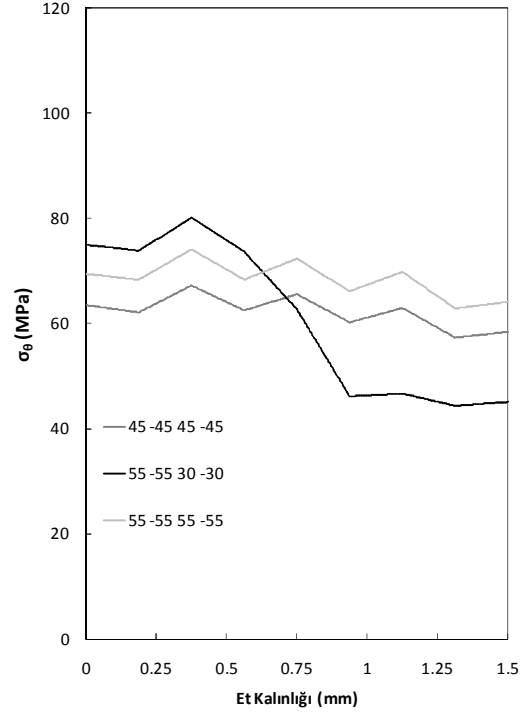
**Şekil 4.94.** Farklı oryantasyon açılı yama kullanılarak (20 mm) 4 tabakalı kompozit boruların birleştirmede kullanılan DP 490 yapıştırıcının A-B gerilme hattı üzerindeki; (a) kayma, (b) Von-Mises gerilmelerinin karşılaştırılması (45°/-45°/45°/-45° için 3.5 MPa, 55°/-55°/30°/-30° için 3.5 MPa, 55°/-55°/55°/-55° için 4 MPa)

Şekil 4.95’ de görüldüğü gibi, kompozit boru üzerinde oluşan gerilme dağılımları yapıştırıcı tabaka üzerinde oluşan gerilme dağılımlarından farklıdır. Bunun sebebi, kompozit yapılarla yapıştırıcıların farklı malzeme özelliklerine sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Kompozit borular üzerinde oluşan gerilmeler arasında teğetsel gerilmelerin maksimum değerinde olduğu görülmektedir. Şekil 4.95’ de teğetsel ve kayma gerilmelerinin tabakalar arası geçişlerde ve tabakalar üzerinde oluşan gerilme dağılımları açık bir şekilde görülmektedir.

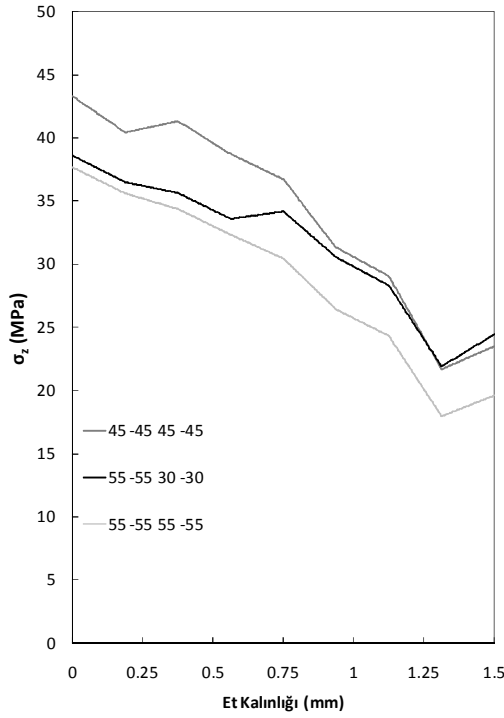
Şekil 4.96 incelendiğinde, yama uzunluklarının gerilme dağılımları üzerine etkileri görülmektedir. Yama uzunluğunun değişmesi, gerilme değerlerinin artmasına ve azalmasına sebep olmaktadır.



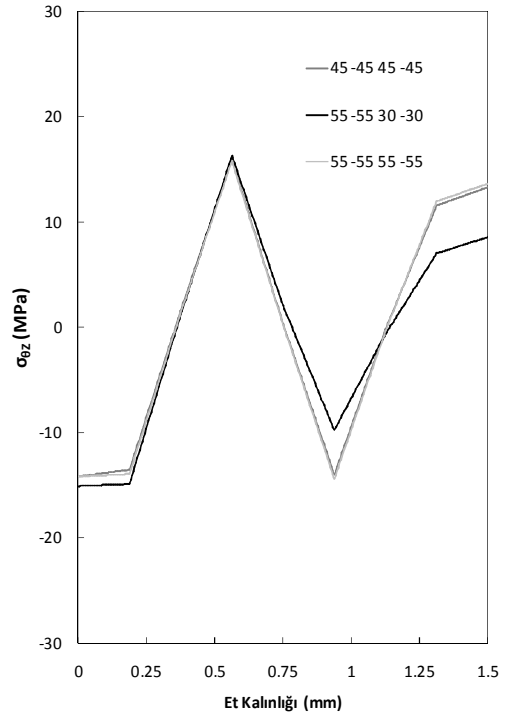
(a)



(b)



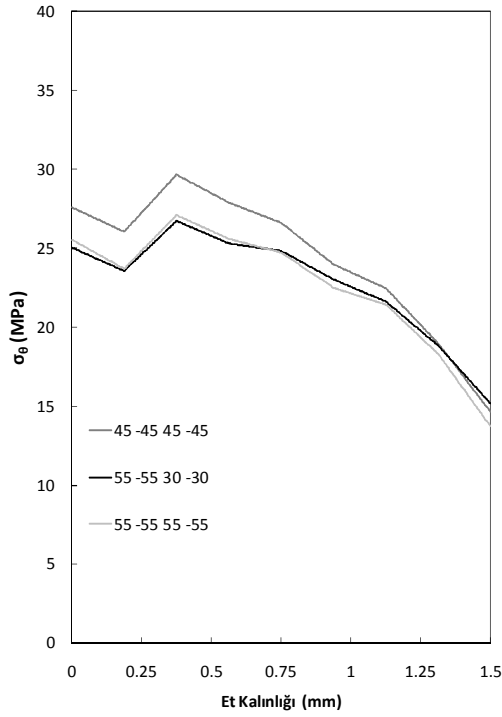
(c)



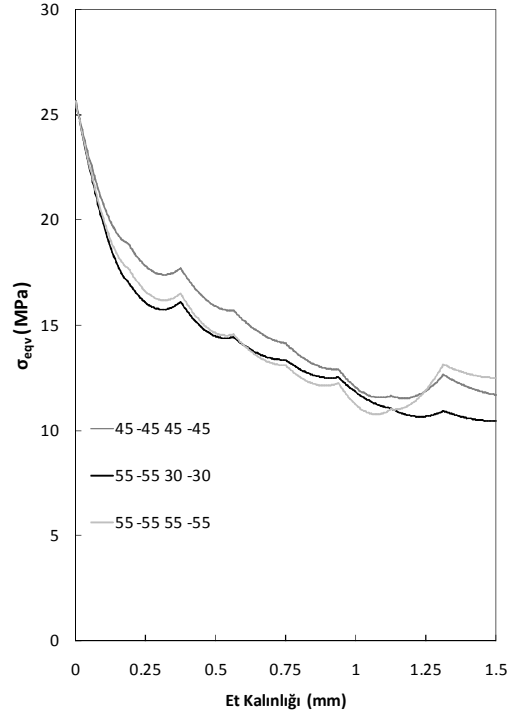
(d)

**Şekil 4.95.** DP 490 yapıştırıcı kullanarak yama (20 mm) kullanarak birleştirilen farklı oryantasyon açılı 4 tabakalı kompozit boruların A-B gerilme hattı üzerindeki; (a) radyal, (b) teğetsel, (c) eksenel, (d) kayma gerilmelerinin karşılaştırılması ( $45^{\circ}/45^{\circ}/45^{\circ}/45^{\circ}$  için 3.5 MPa,  $55^{\circ}/55^{\circ}/30^{\circ}/30^{\circ}$  için 3.5 MPa,  $55^{\circ}/55^{\circ}/55^{\circ}/55^{\circ}$  için 4 MPa)

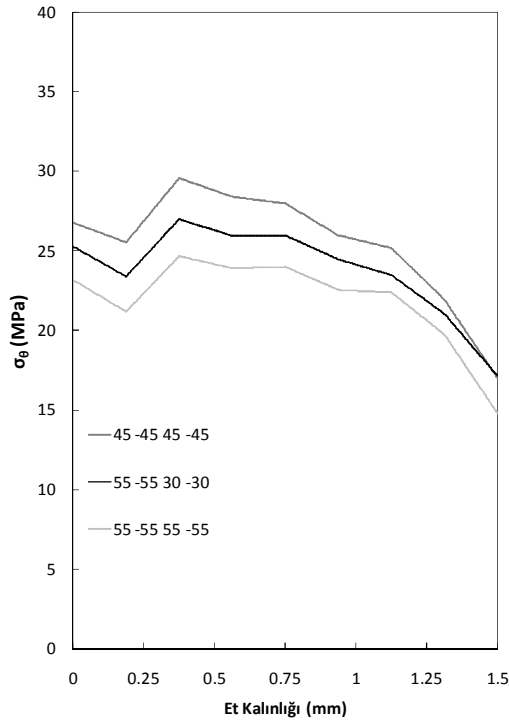




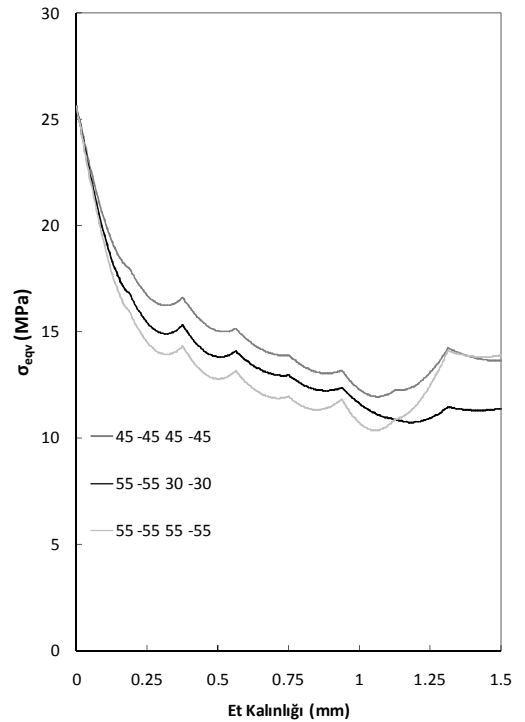
(a)



(b)

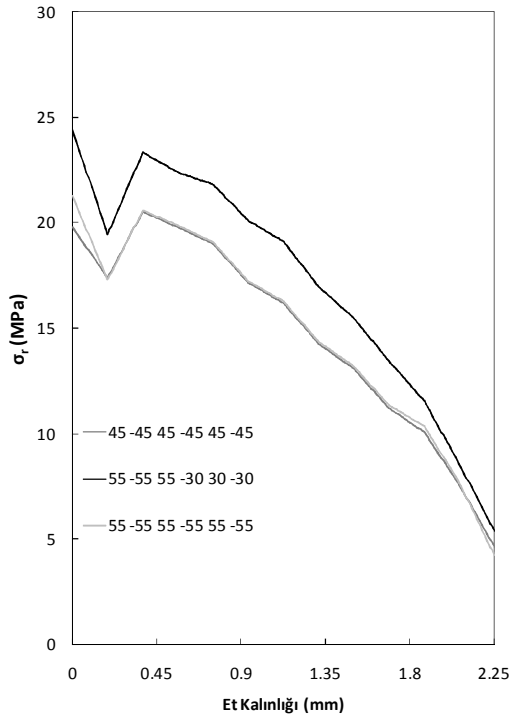


(c)

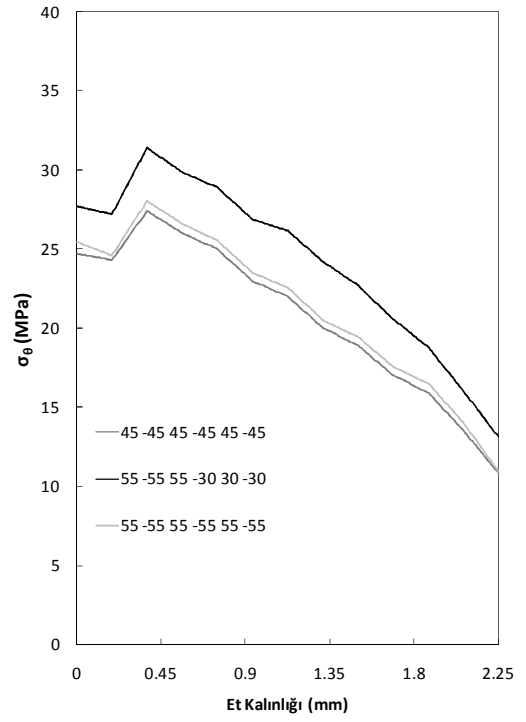


(d)

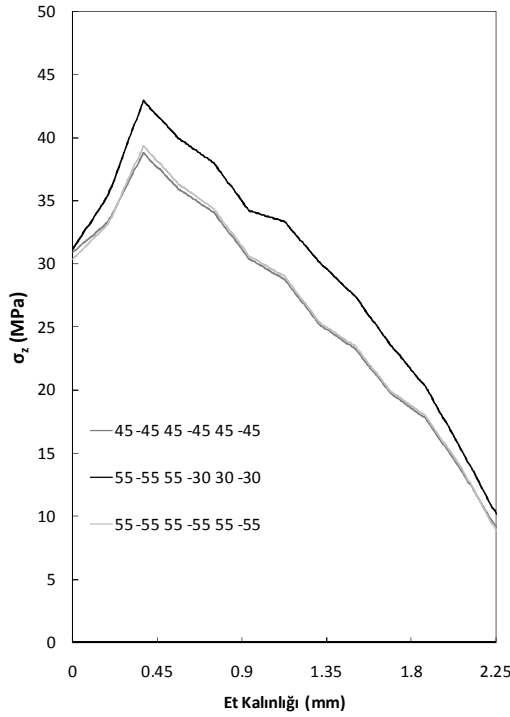
**Şekil 4.96.** Farklı oryantasyon açılı 4 tabakalı kompozit boruları yama kullanılarak birleştirmede kullanılan DP 490 yapıştırıcının A-B gerilme hattı üzerindeki; 30mm yama boyunda (a) teğetsel, (b) Von-Mises (  $45^{\circ}/45^{\circ}/45^{\circ}/45^{\circ}$  için 4.2 MPa,  $55^{\circ}/55^{\circ}/30^{\circ}/30^{\circ}$  için 4.2 MPa,  $55^{\circ}/55^{\circ}/55^{\circ}/55^{\circ}$  için 5.4 MPa) ve 40 mm yama boyunda (c) teğetsel, (d) Von-Mises gerilmelerinin karşılaştırılması (  $45^{\circ}/45^{\circ}/45^{\circ}/45^{\circ}$  için 5.4 MPa,  $55^{\circ}/55^{\circ}/30^{\circ}/30^{\circ}$  için 5.4 MPa,  $55^{\circ}/55^{\circ}/55^{\circ}/55^{\circ}$  için 6.4 MPa)



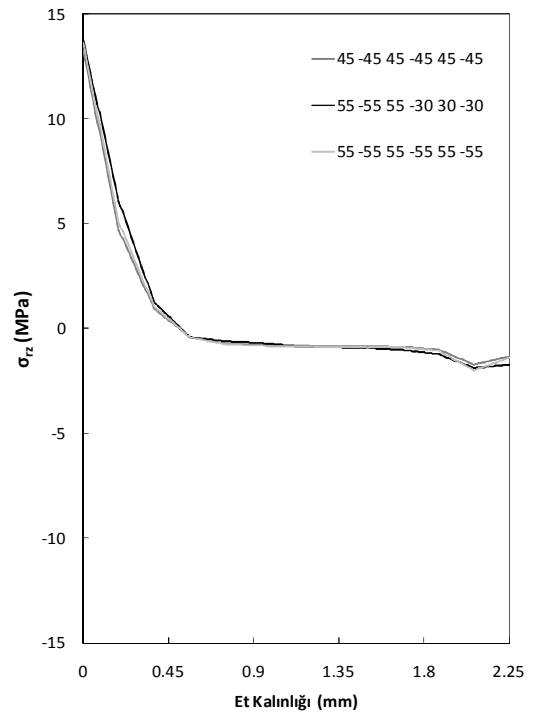
(a)



(b)

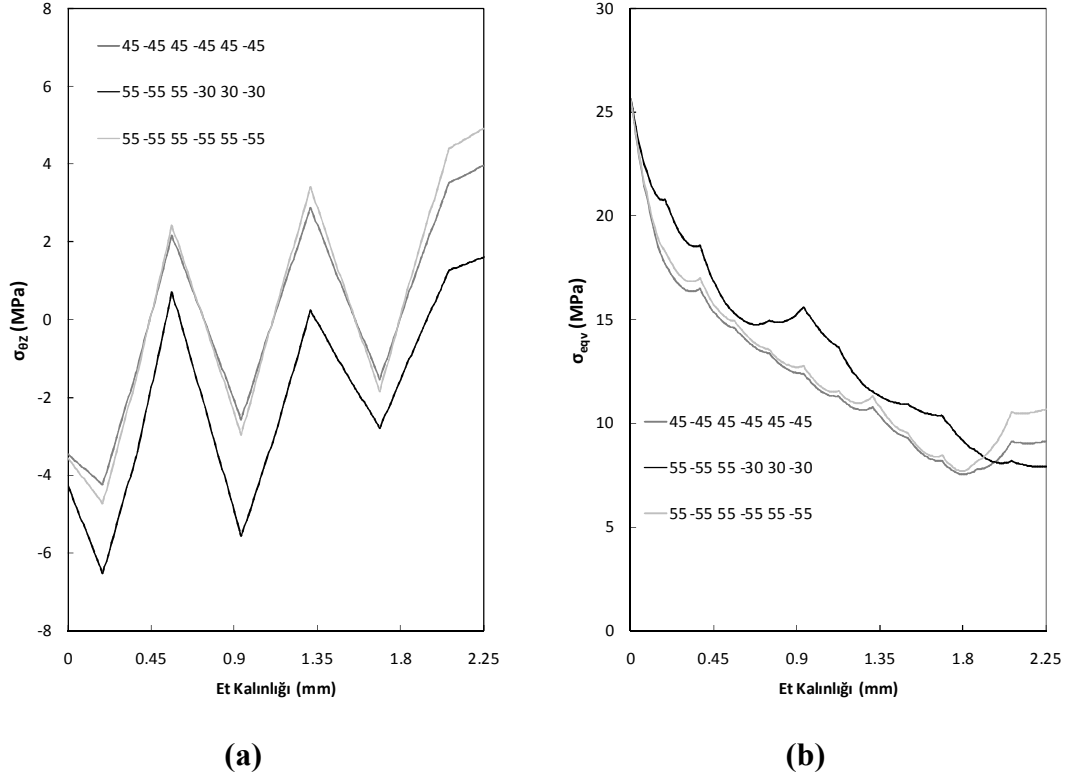


(c)



(d)

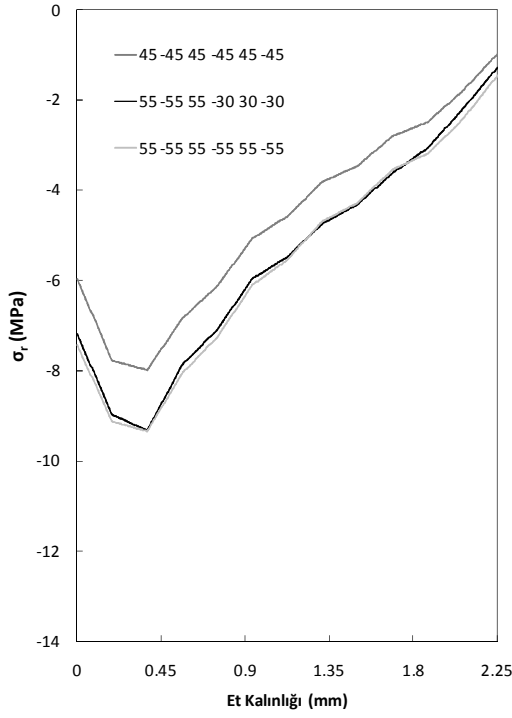
**Şekil 4.97.** Farklı oryantasyon açılı yama kullanılarak (20 mm) 6 tabakalı kompozit boruların birleştirmede kullanılan DP 490 yapıştırıcının A-B gerilme hattı üzerindeki; (a) radyal, (b) teğetsel, (c) eksenel, (d) kayma gerilmelerinin karşılaştırılması (  $45^{\circ}/-45^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}$  için 4.2 MPa,  $55^{\circ}/-55^{\circ}/55^{\circ}/-30^{\circ}/30^{\circ}/-30^{\circ}$  için 5.2 MPa,  $55^{\circ}/-55^{\circ}/55^{\circ}/-55^{\circ}/55^{\circ}/-55^{\circ}$  için 5.5 MPa)



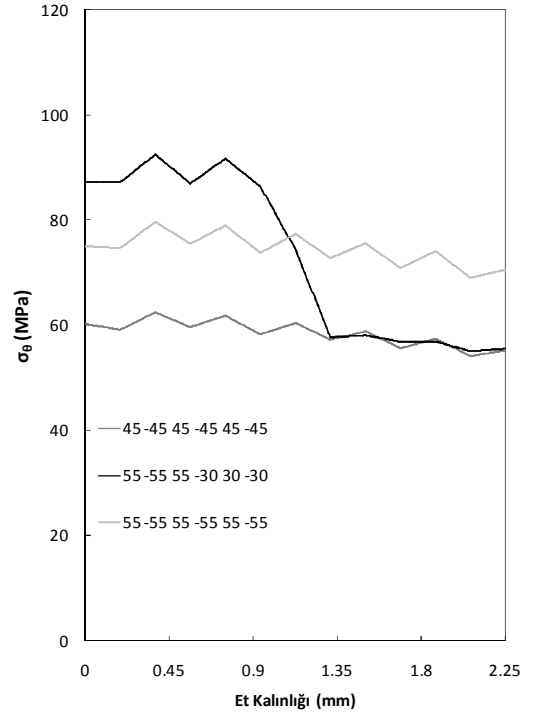
**Şekil 4.98.** Farklı oryantasyon açılı yama kullanılarak (20 mm) 6 tabakalı kompozit boruların birleştirmede kullanılan DP 490 yapıştırıcının A-B gerilme hattı üzerindeki; (a) kayma, (b) Von-Mises gerilmelerinin karşılaştırılması (45<sup>0</sup>/-45<sup>0</sup>/45<sup>0</sup>/-45<sup>0</sup>/45<sup>0</sup>/-45<sup>0</sup> için 4.2 MPa, 55<sup>0</sup>/-55<sup>0</sup>/55<sup>0</sup>/-30<sup>0</sup>/30<sup>0</sup>/-30<sup>0</sup> için 5.2 MPa, 55<sup>0</sup>/-55<sup>0</sup>/55<sup>0</sup>/-55<sup>0</sup>/55<sup>0</sup>/-55<sup>0</sup> için 5.5 MPa)

Şekil 4.97 ve Şekil 4.98 incelendiğinde, yapıştırıcı tabakanın iç yüzeyinde gerilme değerlerinin düştüğü ve tabakanın dış yüzeyine doğru gerilme değerlerinin de düştüğü görülmektedir. Fakat Şekil 4.98 (a)' da gösterilen kayma gerilmesi, tabakanın dış yüzeyine doğru artmaktadır. Gerilme dağılımlarında oluşan bu farklılıklar, yamanın ve yapıştırıcının genel karakteristik davranışlarından kaynaklanmaktadır. Tabakanın iç yüzeyleri doğrudan yüke maruz kaldığı için iç bölgeler de gerilme dağılımları artış ve azalış şeklindedir. Fakat dış yüzeye doğru yükün etkisi azaldığından, gerilme dağılımı düzenli bir hale gelmektedir.

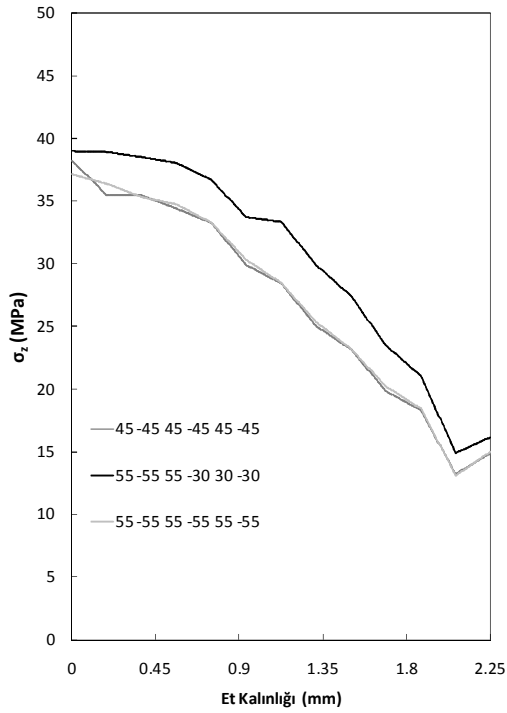
Şekil 4.99' da görüldüğü gibi, tabaka sayısının artmasıyla kompozit boru üzerinde oluşan gerilme dağılımları yapıştırıcı tabaka üzerinde oluşan gerilme dağılımlarından farklıdır. Bunun sebebi, kompozit yapılarla yapıştırıcıların farklı malzeme özelliklerine sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Kompozit borular üzerinde oluşan gerilmeler arasında teğetsel gerilmelerin maksimum değerde olduğu görülmektedir.



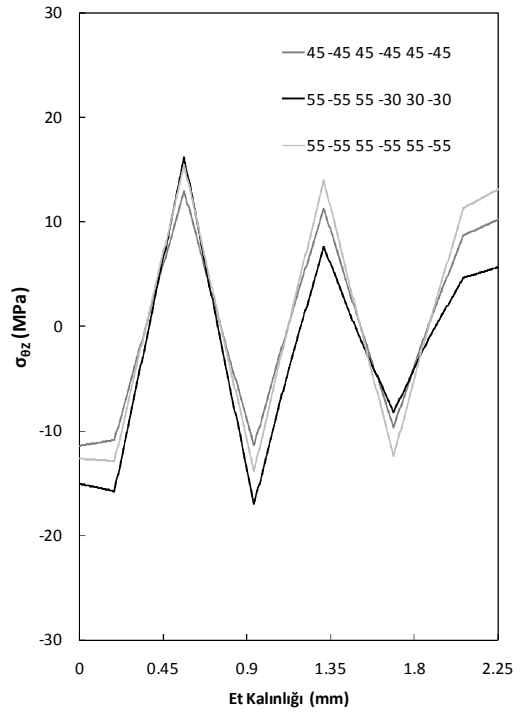
(a)



(b)

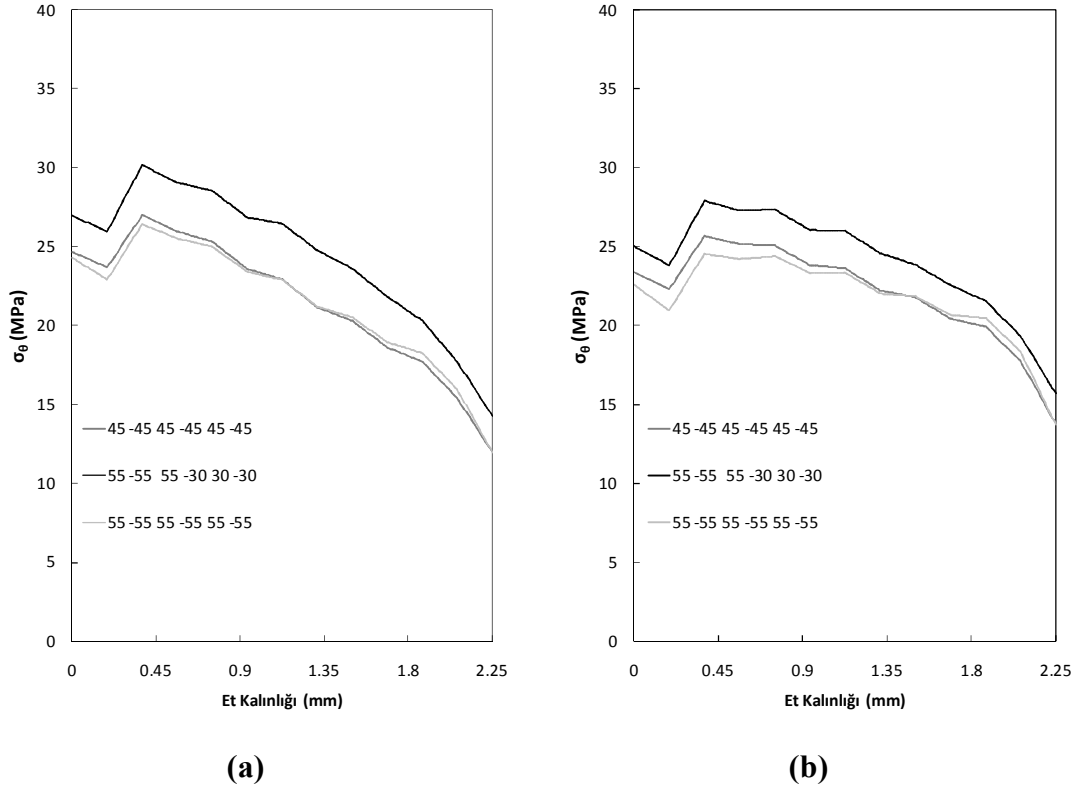


(c)



(d)

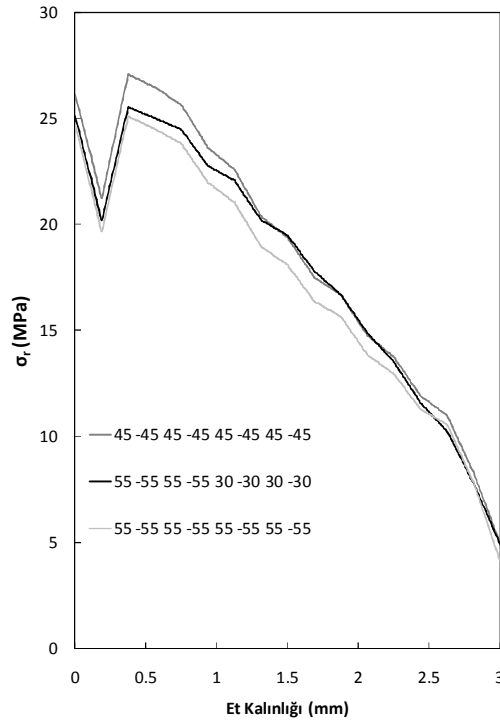
**Şekil 4.99.** DP 490 yapıştırıcı kullanarak yama (20 mm) kullanarak birleştirilen farklı oryantasyon açılı 6 tabakalı kompozit boruların A-B gerilme hattı üzerindeki; (a) radyal, (b) teğetsel, (c) eksenel, (d) kayma gerilmelerinin karşılaştırılması ( $45^{\circ}/45^{\circ}/45^{\circ}/45^{\circ}/45^{\circ}/45^{\circ}$  için 4.2 MPa,  $55^{\circ}/55^{\circ}/55^{\circ}/30^{\circ}/30^{\circ}/30^{\circ}$  için 5.2 MPa,  $55^{\circ}/55^{\circ}/55^{\circ}/55^{\circ}/55^{\circ}/55^{\circ}$  için 5.5 MPa)



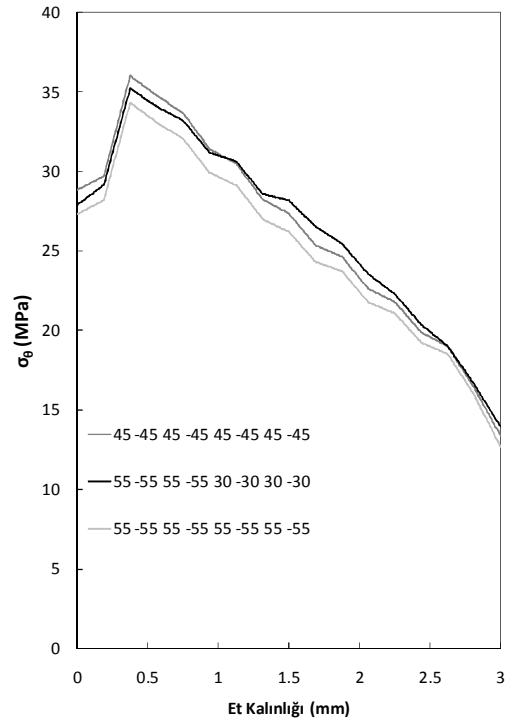
**Şekil 4.100.** Farklı oryantasyon açılı 6 tabakalı kompozit boruları yama kullanılarak birleştirmede kullanılan DP 490 yapıştırıcının A-B gerilme hattı üzerindeki; 30mm yama boyunda (a) teğetsel ( $45^{\circ}/-45^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}$  için 5 MPa,  $55^{\circ}/-55^{\circ}/55^{\circ}/-30^{\circ}/30^{\circ}/-30^{\circ}$  için 6 MPa,  $55^{\circ}/-55^{\circ}/55^{\circ}/-55^{\circ}/55^{\circ}/-55^{\circ}$  için 6.5 MPa) ve 40 mm yama boyunda (b) teğetsel ( $45^{\circ}/-45^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}$  için 5.9 MPa,  $55^{\circ}/-55^{\circ}/55^{\circ}/-30^{\circ}/30^{\circ}/-30^{\circ}$  için 6.8 MPa,  $55^{\circ}/-55^{\circ}/55^{\circ}/-55^{\circ}/55^{\circ}/-55^{\circ}$  için 7.6 MPa) gerilmelerinin karşılaştırılması

Şekil 4.100' de yama uzunluğunun artmasıyla gerilme değerlerinin düştüğü görülmektedir. Yama uzunluğu yapıştırılan bölgede destek görevi görmekte ve bu bölgenin daha sağlam olmasını sağlamaktadır. Bu sebepten dolayı, yama uzunluğunun artmasıyla gerilme değerleri düşmektedir.

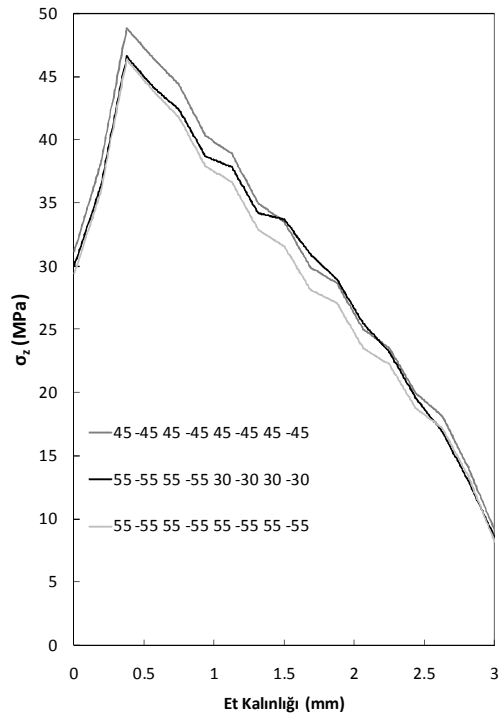
Şekil 4.101 ve Şekil 4.102 'de tabaka sayısının artmasıyla gerilme değerlerinin yükseldiği görülmektedir. Bunun sebebi, tabaka sayısı ve yapıştırıcı tabaka kalınlığının artmasıyla hasar yüksek basınçlar da meydana gelmektedir. Hasar iç basınçlarının büyük değerler de olması, gerilmelerinde artmasına sebep olmaktadır.



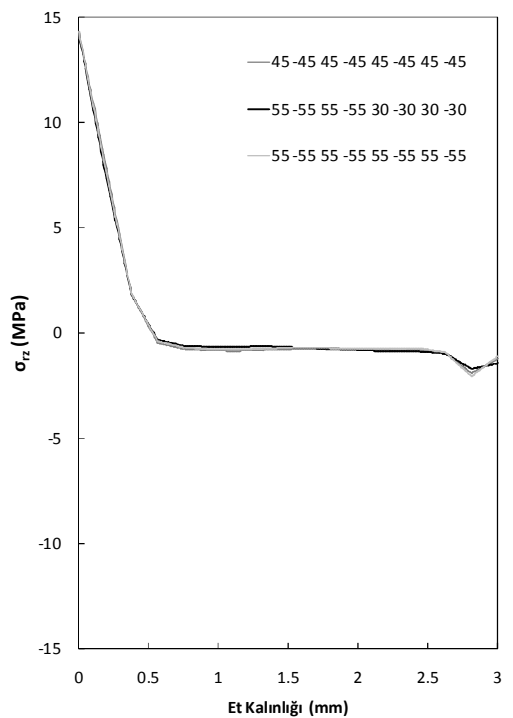
(a)



(b)

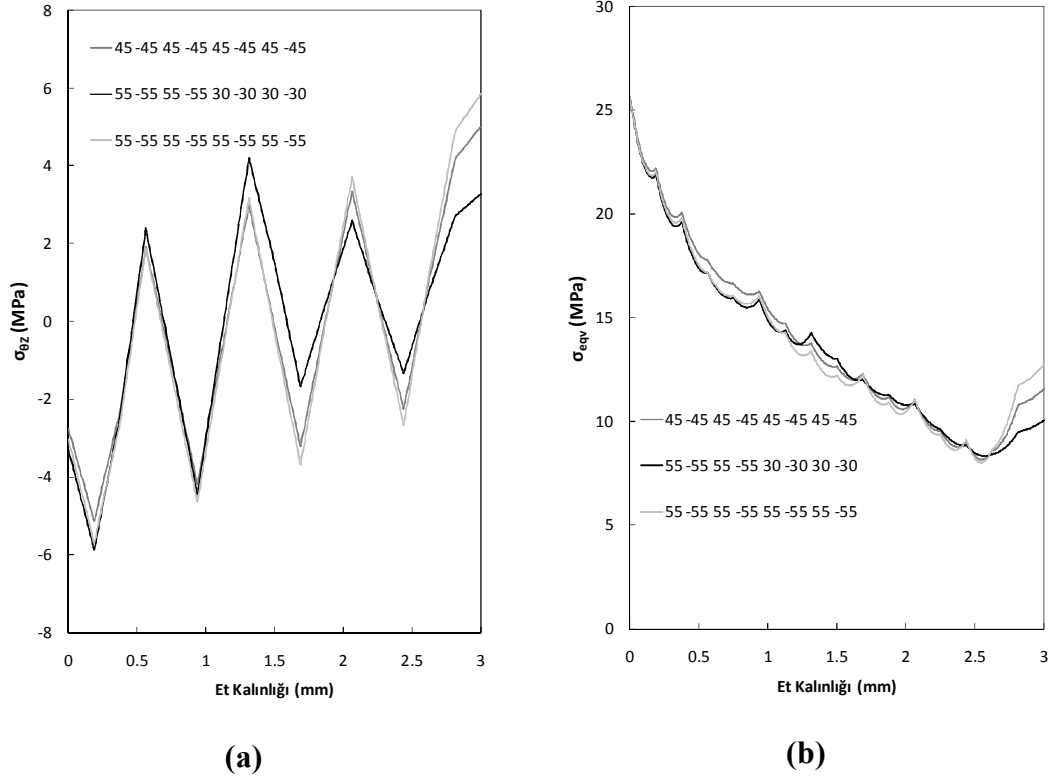


(c)



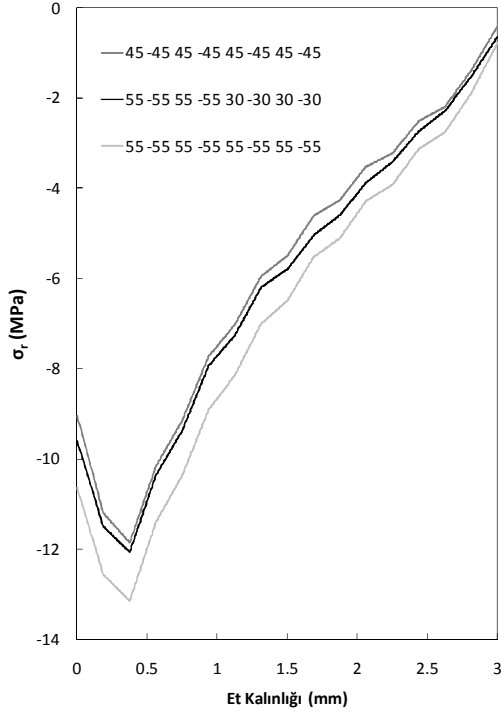
(d)

**Şekil 4.101.** Farklı oryantasyon açılı yama kullanılarak (20 mm) 8 tabakalı kompozit boruların birleştirmede kullanılan DP 490 yapıştırıcının A-B gerilme hattı üzerindeki; (a) radyal, (b) teğetsel, (c) eksenel, (d) kayma gerilmelerinin karşılaştırılması (  $45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0$  için 7 MPa,  $55^0/-55^0/55^0/-55^0/30^0/30^0/30^0/-30^0$  için 7.5 MPa,  $55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$  için 8.5 MPa)

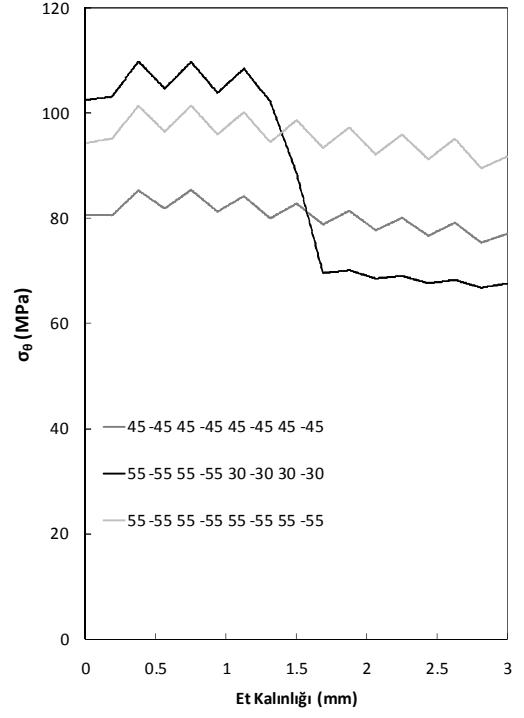


**Şekil 4.102.** Farklı oryantasyon açılı yama kullanılarak (20 mm) 8 tabakalı kompozit boruların birleştirmede kullanılan DP 490 yapıştırıcının A-B gerilme hattı üzerindeki; (a) kayma, (b) Von-Mises gerilmelerinin karşılaştırılması (45°/-45°/45°/-45°/45°/-45°/45°/-45° için 7 MPa, 55°/-55°/55°/-55°/30°/-30°/30°/-30° için 7.5 MPa, 55°/-55°/55°/-55°/55°/-55°/55°/-55° için 8.5 MPa)

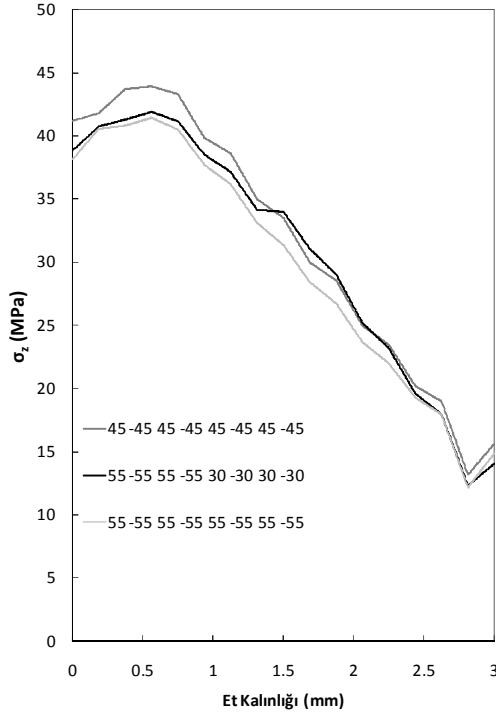
Şekil 4.103 ve Şekil 4.104 incelendiğinde, tabaka sayısının artmasıyla gerilme değerlerinin de arttığı görülmektedir. Fakat yama uzunluğunun artmasıyla gerilme değerlerinin düştüğü görülmektedir. Ayrıca tabaka sayısının artması durumunda, yama uzunluklarının diğer tabakalara göre etkilerinin büyük olduğu grafiklerde açık bir şekilde görülmektedir. Çünkü tabaka sayısının mukavemete olan etkisi büyüktür. Ayrıca yama uzunluğu yapıştırılan bölgede destek görevi görmekte ve bu bölgenin daha sağlam olmasını sağlamaktadır. Bu sebepten dolayı yama uzunluğunun artmasıyla gerilme değerleri düşmektedir.



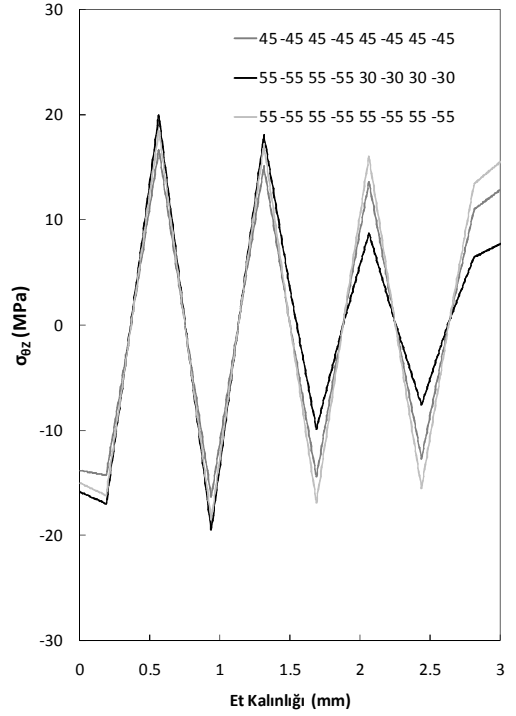
(a)



(b)



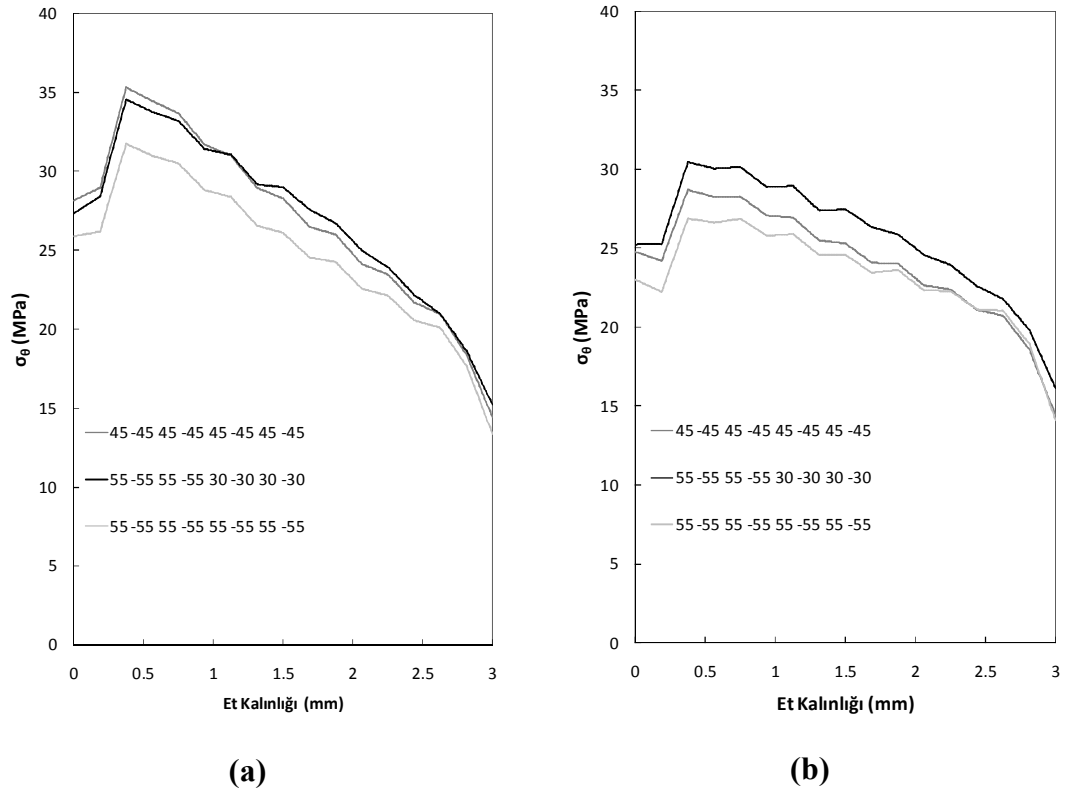
(c)



(d)

**Şekil 4.103.** DP 490 yapıştırıcı kullanarak yama (20 mm) kullanarak birleştirilen farklı oryantasyon açılı 8 tabakalı kompozit boruların A-B gerilme hattı üzerindeki; (a) radyal, (b) teğetsel, (c) eksenel, (d) kayma gerilmelerinin karşılaştırılması (45°/45°/45°/45°/45°/45°/45°/45° için 7 MPa, 55°/55°/55°/55°/30°/30°/30°/30° için 7.5 MPa, 55°/55°/55°/55°/55°/55°/55°/55° için 8.5 MPa)

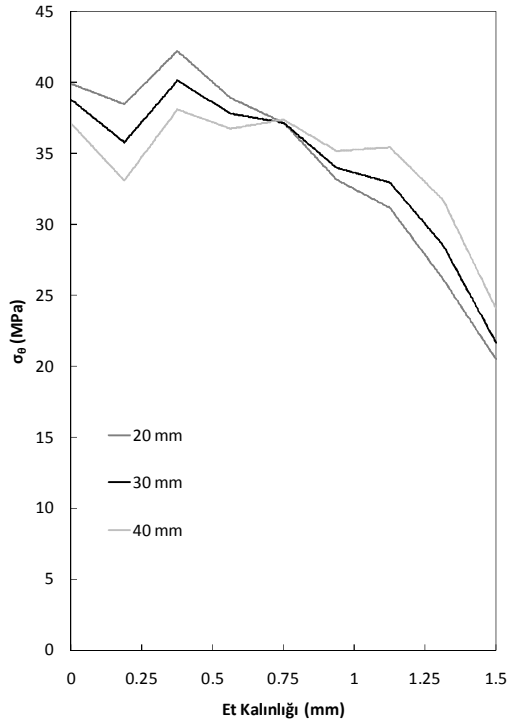




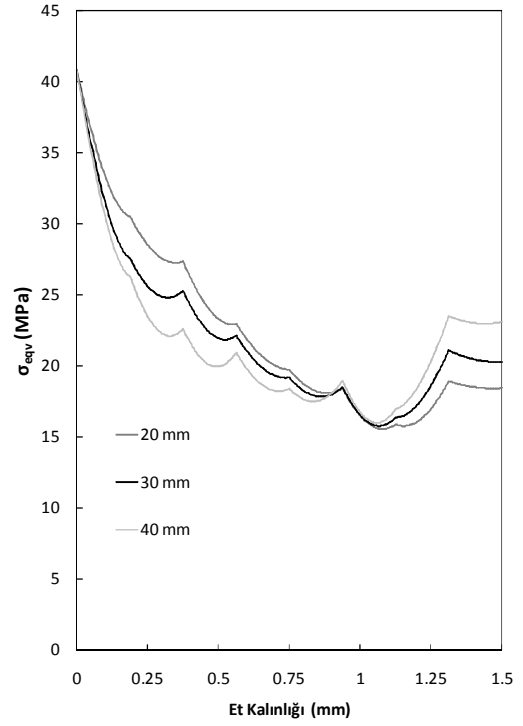
**Şekil 4.104.** Farklı oryantasyon açılı 8 tabakalı kompozit boruları yama kullanılarak birleştirmede kullanılan DP 490 yapıştırıcının A-B gerilme hattı üzerindeki; 30mm yama boyunda (a) teğetsel ( $45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0$  için 8 MPa,  $55^0/-55^0/55^0/-55^0/30^0/-30^0/30^0/-30^0$  için 8.5 MPa,  $55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$  için 9.5 MPa) ve 40 mm yama boyunda (b) teğetsel ( $45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0$  için 8 MPa,  $55^0/-55^0/55^0/-55^0/30^0/-30^0/30^0/-30^0$  için 9 MPa,  $55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$  için 10 MPa) gerilmelerinin karşılaştırılması

#### **4.4.3.3. Bindirme uzunluğunun yama kullanılarak yapıştırılan kompozit borular üzerinde etkisi**

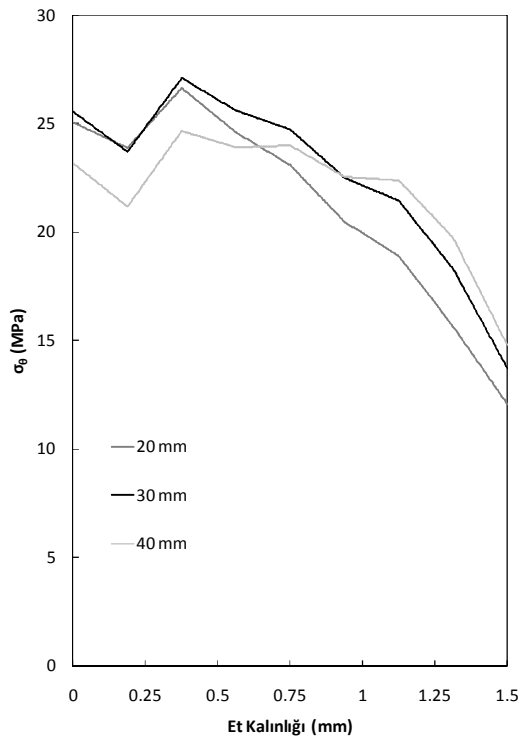
Yama kullanılarak yapıştırılan kompozit borular üzerinde oluşan gerilmeler farklı yama boyları durumlarında incelenmiştir. Şekil 4.105 incelendiğinde, iç basınç yüklemesi altında yama boyunun etkileri görülmektedir. Yama boyunun değişimi her iki yapıştırıcı üzerinde oluşan gerilme dağılımlarını etkilemektedir. Yama boylarına ve yapıştırıcı türüne bağlı olarak gerilme dağılımlarının farklı olduğu Şekil 4.105’ de görülmektedir. Oluşan farklılıkların sebebi yama boylarının olduğu görülse de, yapıştırıcı malzemelerin sahip olduğu malzeme özellikleri göz ardı edilmemelidir. Genel olarak yama boyu arttıkça, oluşan gerilme değerleri de düşmektedir. Kompozit boruların oluşturulduğu oryantasyon açılarının da yapıştırıcılar üzerine etkilerini Şekil 4.105’ de görebiliriz. Bu farklılığın sebeplerinden bir tanesi yapıştırıcıların malzeme özelliğinin farklı olması söylenebilir. Diğer bir sebep ise yapıştırıcıların kompozit borular ile olan uyumudur. Ayrıca her bir oryantasyon açısında ve yapıştırıcı türünde hasar iç basınçlarının da farklı olması bir etkidir. Çünkü farklı yama uzunlukların da bulunan hasar iç basınçlarının birbirlerinden farklı olması, hem yapıştırıcılar üzerinde hem de kompozit borular üzerinde farklı gerilme dağılımlarının oluşmasına neden olmaktadır.



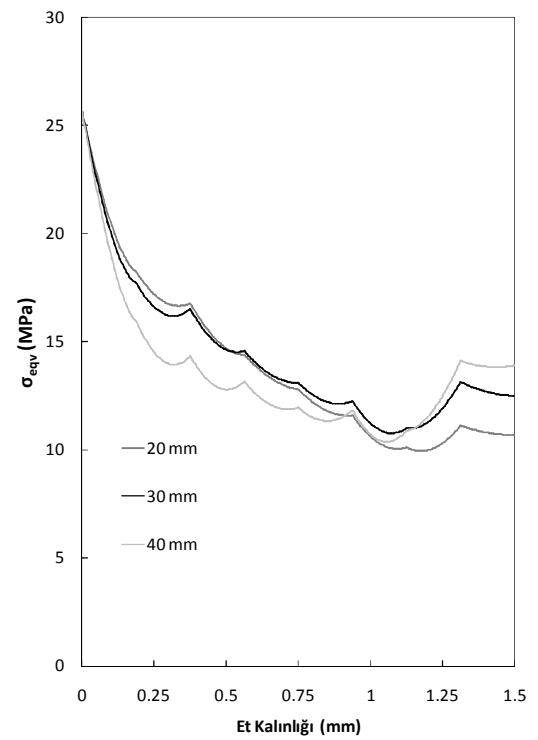
(a)



(b)



(c)



(d)

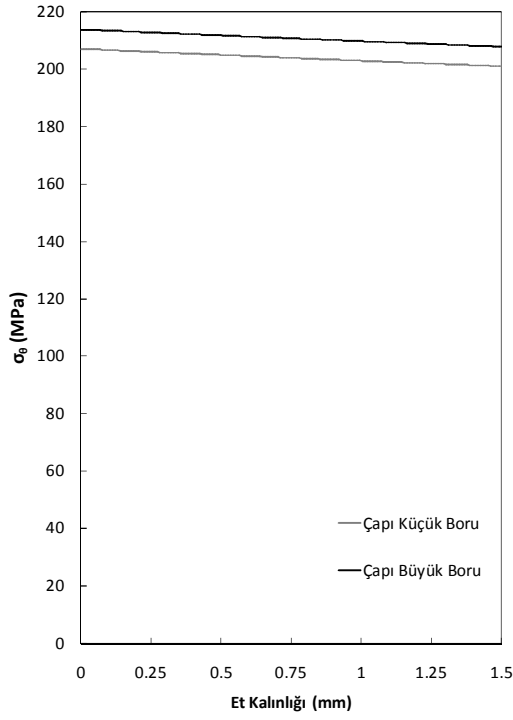
**Şekil 4.105.**  $55^0$ - $55^0/55^0/55^0$  oryantasyon açılı 4 tabakalı kompozit boruların A-B gerilme hattı üzerindeki yama kullanarak birleştirmede kullanılan; DP 410 yapıştırıcının 20 mm (6 MPa), 30 mm (7.5 MPa) ve 40 mm (9 MPa) yama boylarında (a) teğetsel, (b) Von-Mises ve DP 490 yapıştırıcının 20 mm (4 MPa), 30 mm (5.4 MPa) ve 40 mm (6.4 MPa) yama boylarında (c) teğetsel, (d) Von-Mises gerilmelerinin karşılaştırılması

#### 4.4.4. Kademeli olarak yapıştırılan kompozit boruların nümerik sonuçları

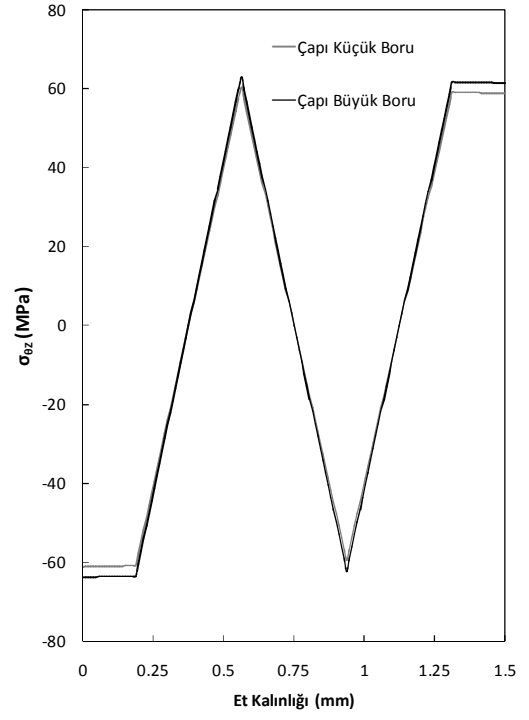
200 mm uzunluğun da farklı oryantasyon açılı ve iki farklı yarı çapa sahip kompozit borular kullanılmıştır. Aynı oryantasyon açısına sahip borulardan küçük çaplı boru büyük çaplı borunun içine geçirilerek kademeli olarak yapıştırıcı ile birleştirilmiştir. Yapıştırma daki bindirme uzunluğu sırasıyla 10 mm, 15 mm, 20 mm olarak kademeli birleştirme işleminden sonra nümerik analizleri yapılarak hasar iç basınçları ve oluşan gerilmeler incelenmiştir. Kademeli olarak birleştirilen boruların, uygun sınır şartları ve yüklemeler yapılarak ANSYS 14.5 paket programında hasar ve gerilme analizleri yapılmıştır. Bu analizler sonucun da belirlenen parametrelerin etkileri incelenmiştir.

Nümerik çalışmalarda, büyük çaplı ve küçük çaplı boruların kademeli olarak birleştirme işleminden sonra iç basınca maruz bırakıldığında, bu borular da oluşan gerilmelerin durumu incelenmiş ve çapı küçük olan boru üzerinde oluşan gerilmelerin düşük olduğu Şekil 4.107 (a) ve Şekil 4.107 (b)' de görülmektedir. Küçük çaplı boru üzerinde oluşan gerilmelerin düşük olması sebebiyle devam edilecek sonraki çalışmalarda küçük çaplı boru üzerindeki gerilmeler dikkate alınmamıştır. Çünkü hasarlar gerilmelerin büyük olduğu bölgelerde oluşmaktadır. Büyük boru üzerindeki gerilmeler küçük boru üzerinde oluşan gerilmelerden büyük olduğundan büyük çaplı boru üzerinde oluşan gerilmeler incelenmiştir. Ayrıca gerilmenin kritik olduğu hatlar belirlenmiş ve bu hatlar üzerinde oluşan gerilmeler incelenmiştir. Şekil 4.106 incelendiğinde, boruların birleştirildiği bölgede A-B ve C-D gerilme hatları dikkate alınmıştır. Bununla birlikte kompozit borular üzerinde oluşan gerilmelerde incelenmiştir. Şekil 4.107 (c)' de gerilmelerin, C-D gerilme hattı üzerinde büyük olduğu görülmektedir. Bu sebepten, kritik gerilme hattı C-D olarak belirlenmiştir (Şekil 4.106) ve yapılacak çalışmalar da bu hat üzerinde oluşan gerilmeler incelenmiştir.

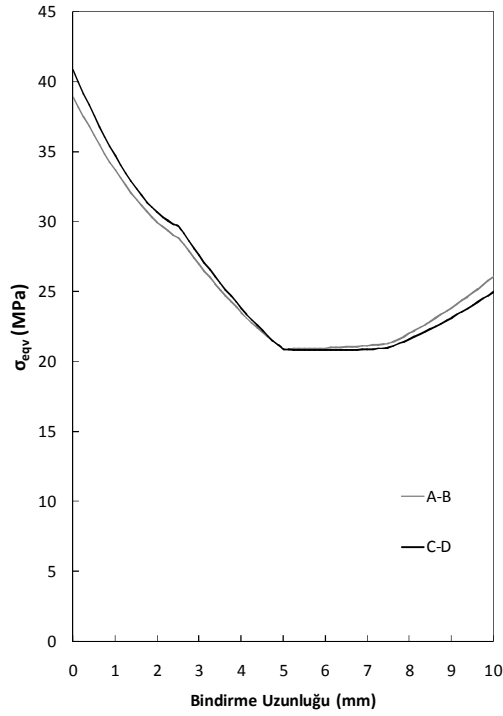




(a)



(b)



(c)

**Şekil 4.107.**  $45^0/-45^0/45^0/-45^0$  oryantasyon açılı kademeli (10 mm) olarak yapıştırılan 4 tabakalı kompozit boruların; (a) teğetsel, (b) kayma ve DP 410 yapıştırıcının (c) Von-Mises gerilmelerinin karşılaştırılması (6 MPa)

#### 4.4.4.1. İç basınç altında DP 410 yapıştırıcı kullanılarak kademeli olarak yapıştırılan kompozit boruların nümerik sonuçları

İç basınç altında DP 410 yapıştırıcı ile kademeli olarak belirlenen yapıştırma uzunlukları sırasıyla 10 mm, 15 mm ve 20 mm olarak yapıştırılan 4, 6 ve 8 tabakalı kompozit boruların nümerik çalışmaları incelenmiştir. Tabaka sayısı arttıkça doğal olarak dayanımda artmaktadır. Her tabakanın kalınlığı aynı olup, sadece tabaka sayısı arttıkça boru et kalınlığı değişmektedir. Çizelge 4.16 incelendiğinde, üç farklı bindirme uzunluğunda birleştirilen 4 tabakalı borularda  $55^0/-55^0/55^0/-55^0$ , 6 tabakalı borularda  $55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$ , 8 tabakalı borularda ise  $55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$  oryantasyon açılı borular en yüksek hasar iç basıncına sahip kompozit borular olduğu görülmektedir. Fakat 4 tabakalı kompozit borular da 15 mm yapıştırma uzunluğunda  $55^0/-55^0/30^0/-30^0$  ve  $55^0/-55^0/55^0/-55^0$  oryantasyon açılı boruların hasar iç basınçları aynı bulunmuştur. Bununla birlikte 8 tabakalı 20 mm yapıştırma uzunluğunda  $55^0/-55^0/55^0/-55^0/30^0/-30^0/30^0/-30^0$  ve  $55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$  oryantasyon açılı kompozit borularında hasar iç basınçları aynı bulunmuştur.

Şekil 4.108-4.119 incelendiğinde, tabaka sayısı arttıkça gerilmelerin değiştiği görülmektedir. Tüm kompozit borularda ve yapıştırıcıda  $\sigma_\theta$  gerilmeleri diğer gerilmelere göre parametre değişikliklerinden en fazla etkilenmektedir. Kompozit borularda tabaka sayısı arttıkça ve bununla birlikte yapıştırıcının radyal yöndeki kalınlığıda arttıkça, tüm oryantasyon açıları için  $\sigma_\theta$  gerilmesi değişmektedir. Bununla birlikte, farklı bindirme uzunluklarında, yapıştırıcı ve kompozit boru üzerinde oluşan gerilmelerin farklı bir davranış sergilemesine etki ettikleri aşağıdaki şekillerde görülmektedir. Aynı durum diğer gerilmeler içinde geçerli olduğunu söyleyebiliriz ve bu durumlar Şekil 4.108-4.119' da görülmektedir.

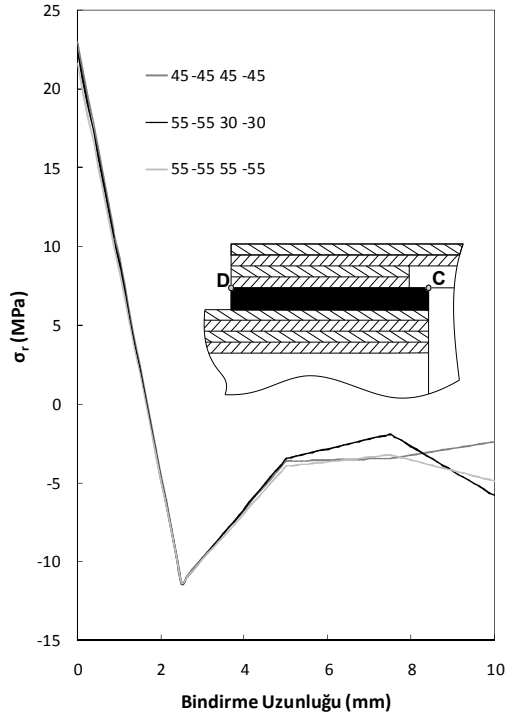
Birleştirilen bölgede C-D gerilme hattı üzerindeki gerilme değerlerinin yüksek olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.106) ve yapılacak çalışmalar da bu hat üzerinde oluşan gerilmeler incelenmiştir.  $\sigma_\theta$  gerilmesi, kompozit boruların 4 tabakalıları için  $55^0/-55^0/30^0/-30^0$ , 6 tabakalıları için  $55^0/-55^0/55^0/-30^0/30^0/-30^0$  ve 8 tabakalıları için  $55^0/-55^0/55^0/-55^0/30^0/-30^0/30^0/-30^0$  oryantasyonlar açıları için maksimumdur. Fakat Von-Mises gerilmelerinde ise tabaka kalınlığı arttıkça birleştirilen kompozit boruların oryantasyon açılarına göre maksimum ve minimum gerilme değerleri  $\sigma_\theta$  gibi belirli bir düzende değildir.  $45^0/-45^0/45^0/-45^0$  oryantasyon

açılı 4 tabakalı boruları birleştirdiğimizde yapıştırıcı üzerinde oluşan Von-Mises gerilmesinin maksimum değerde iken, 6 tabakalı kompozit borular için  $55^0/-55^0/55^0/-30^0/30^0/-30^0$  ve  $45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0$  oryantasyon açılı kompozit borulardaki Von-Mises gerilmeleri hemen hemen birbirlerine yakın ve maksimum değerdedir. Aynı şekilde 8 tabakalı kompozit borular için  $55^0/-55^0/55^0/-55^0/30^0/-30^0/30^0/-30^0$  ve  $45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0$  oryantasyon açılı kompozit borular daki Von-Mises gerilmeleri bir birlerine yakın ve maksimumdur.

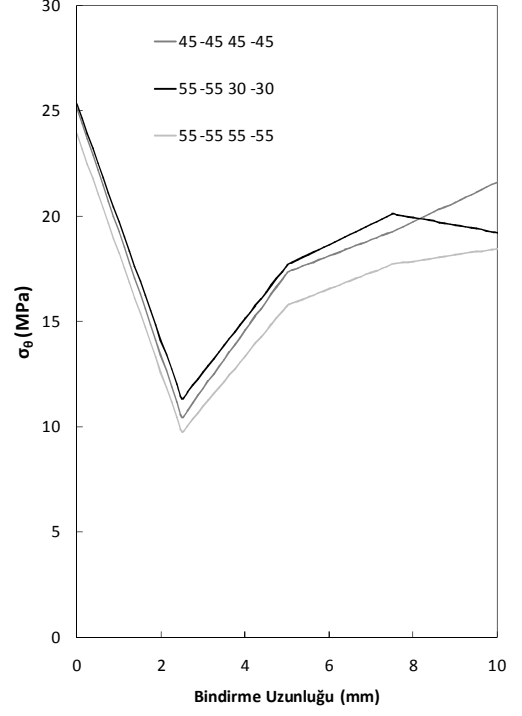
**Çizelge 4.16.** DP 410 yapıştırıcı kullanılarak farklı uzunlukta kademeli olarak birleştirilen farklı oryantasyon açılı 4, 6 ve 8 tabakalı kompozit boruların iç basınç yüklemesi altındaki nümerik hasar iç basınçları

Tabaka Sayısı	Bindirme Uzunluğu (mm)	Oryantasyon açısı	Hasar İç Basıncı (MPa)
4	10	$45^0/-45^0/45^0/-45^0$	6.0
		$55^0/-55^0/30^0/-30^0$	6.0
		$55^0/-55^0/55^0/-55^0$	7.0
6		$45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0$	5.5
		$55^0/-55^0/55^0/-30^0/30^0/-30^0$	6.0
		$55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$	6.5
8		$45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0$	6.0
		$55^0/-55^0/55^0/-55^0/30^0/-30^0/30^0/-30^0$	6.5
		$55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$	7.0
4	15	$45^0/-45^0/45^0/-45^0$	7.0
		$55^0/-55^0/30^0/-30^0$	7.5
		$55^0/-55^0/55^0/-55^0$	7.5
6		$45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0$	7.0
		$55^0/-55^0/55^0/-30^0/30^0/-30^0$	7.5
		$55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$	8.0
8		$45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0$	7.5
		$55^0/-55^0/55^0/-55^0/30^0/-30^0/30^0/-30^0$	8.0
		$55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$	8.5
4	20	$45^0/-45^0/45^0/-45^0$	8.0
		$55^0/-55^0/30^0/-30^0$	8.0
		$55^0/-55^0/55^0/-55^0$	9.0
6		$45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0$	8.5
		$55^0/-55^0/55^0/-30^0/30^0/-30^0$	8.0
		$55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$	9.0
8		$45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0$	9.0
		$55^0/-55^0/55^0/-55^0/30^0/-30^0/30^0/-30^0$	9.5
		$55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$	9.5

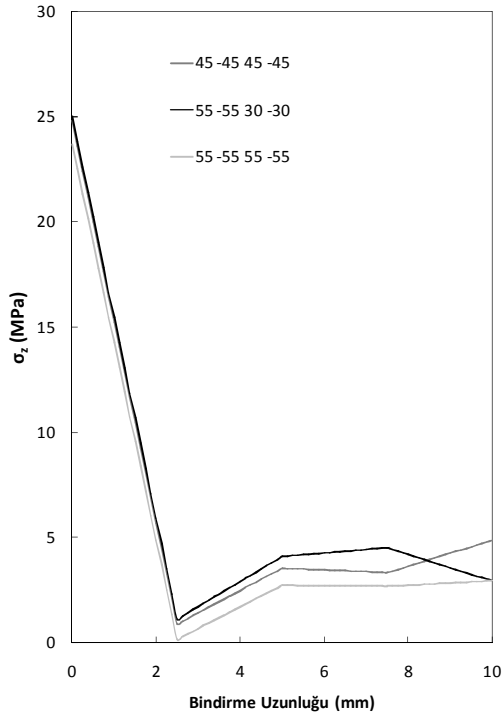




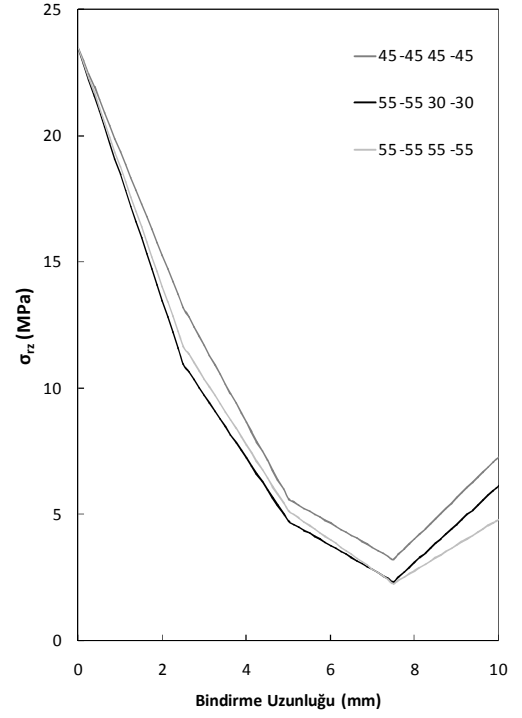
(a)



(b)

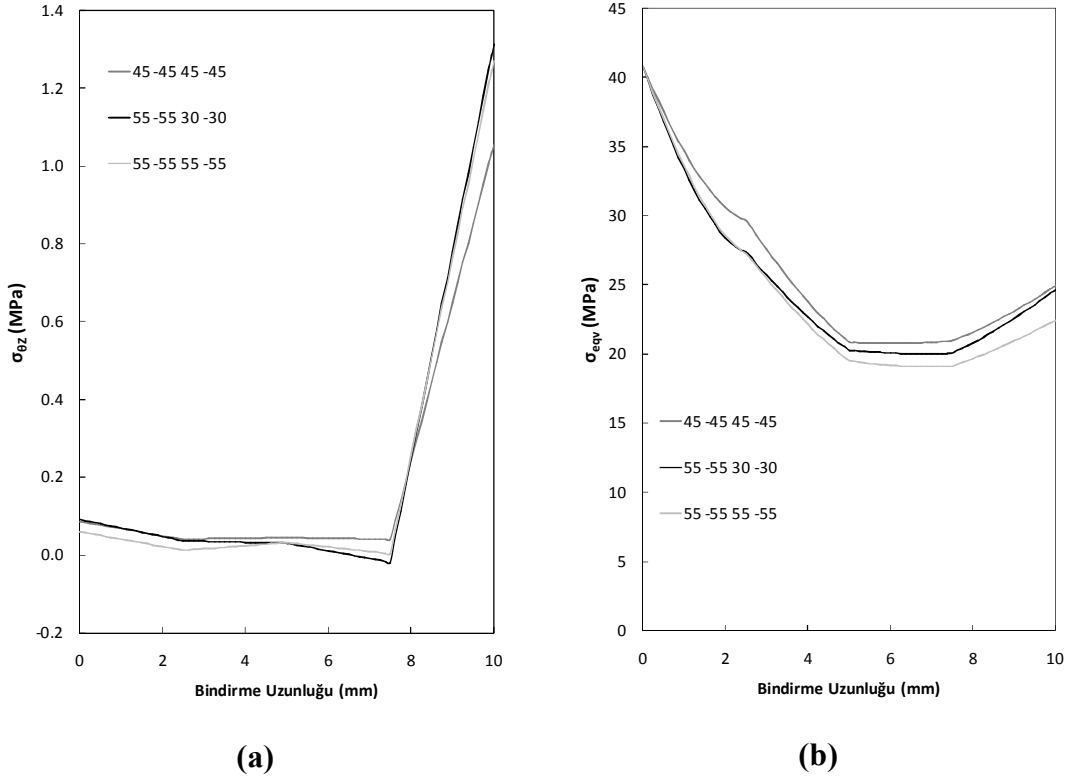


(c)



(d)

**Şekil 4.108.** Farklı oryantasyon açılı kademeli (10 mm) olarak 4 tabakalı kompozit boruların birleştirmede kullanılan DP 410 yapıştırıcının C-D gerilme hattı üzerinde; (a) radyal, (b) teğetsel, (c) eksenel, (d) kayma gerilmelerinin karşılaştırılması (  $45^{\circ}/-45^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}$  için 6 MPa,  $55^{\circ}/-55^{\circ}/30^{\circ}/-30^{\circ}$  için 6 MPa,  $55^{\circ}/-55^{\circ}/55^{\circ}/-55^{\circ}$  için 7 MPa)

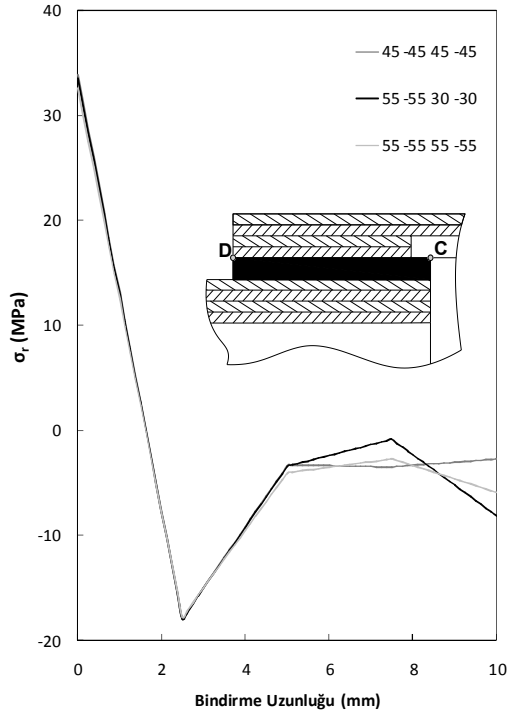


**Şekil 4.109.** Farklı oryantasyon açılı kademeli (10 mm) olarak 4 tabakalı kompozit boruların birleştirmede kullanılan DP 410 yapıştırıcının C-D gerilme hattı üzerinde; (a) kayma, (b) Von-Mises gerilmelerinin karşılaştırılması ( $45^0/-45^0 /45^0/-45^0$  için 6 MPa,  $55^0/-55^0/30^0/-30^0$  için 6 MPa,  $55^0/-55^0/55^0/-55^0$  için 7 MPa)

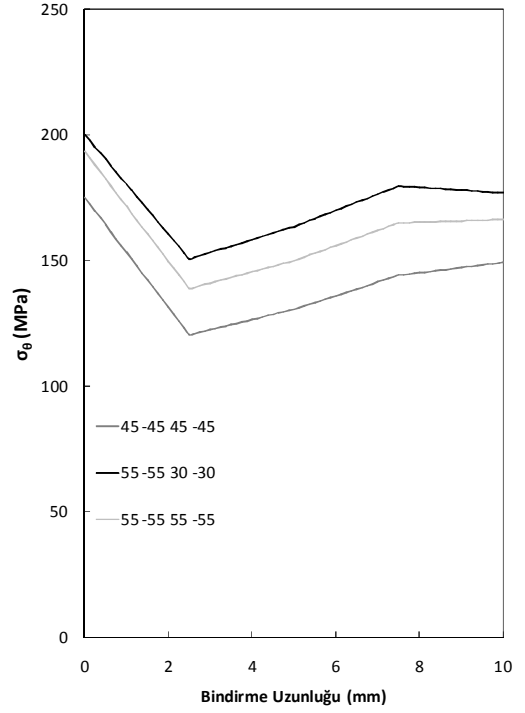
Şekil 4.108 incelendiğinde, yapıştırıcı üzerinde oluşan gerilmelerin iç yüzeyde maksimum olduğu görülmektedir. Yapıştırıcı tabakanın orta bölgelerine doğru gerilme değerlerinin azaldığı ve minimum seviyeye düştükten sonra tekrar arttığı görülmektedir. Şekil 4.109 (a)' da gerilmenin iç yüzeyde minimum dış yüzeye doğru arttığı ve Şekil 4.109 (b) ise gerilmelerin iç yüzeyde maksimum olduğu görülmektedir. Bunun sebebi, bindirme uzunluğu boyunca yapıştırılan yüzeylerin başlangıç kısımlarının doğrudan basınca maruz kalması ve borunun radyal doğrultuda genişleyerek hasara uğramasından kaynaklanmaktadır.

Şekil 4.110' da kompozit boru üzerinde gerilme dağılımları yapıştırıcı üzerindeki gerilme dağılımlarına benzemektedir. Fakat boru ve yapıştırıcı üzerinde oluşan kayma gerilmesi dağılımları farklıdır. Bunun sebebi, malzemelerin farklı yapılarına ve farklı malzeme özelliklerine sahip olmasıdır.

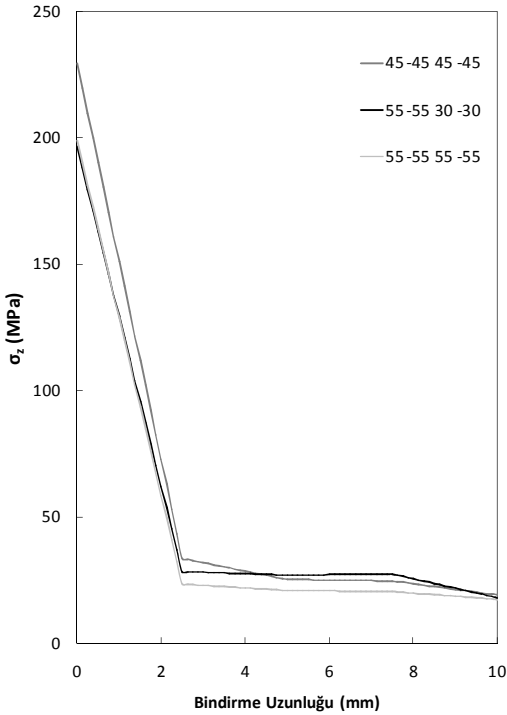
Farklı bindirme uzunluklarında, gerilme dağılımlarının farklı davranışlar sergilediği Şekil 4.111' de görülmektedir. Bunun sebebi, her oryantasyon açısında ve bindirme uzunluklarında hasar iç basınçlarının farklı değerlerde olmasıdır.



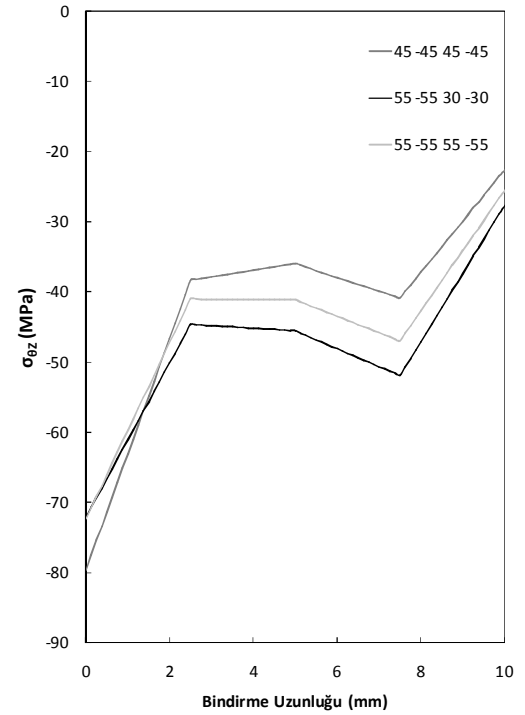
(a)



(b)

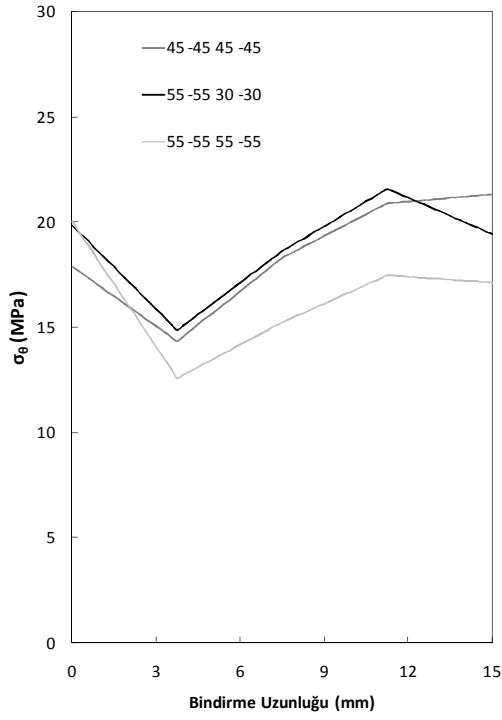


(c)

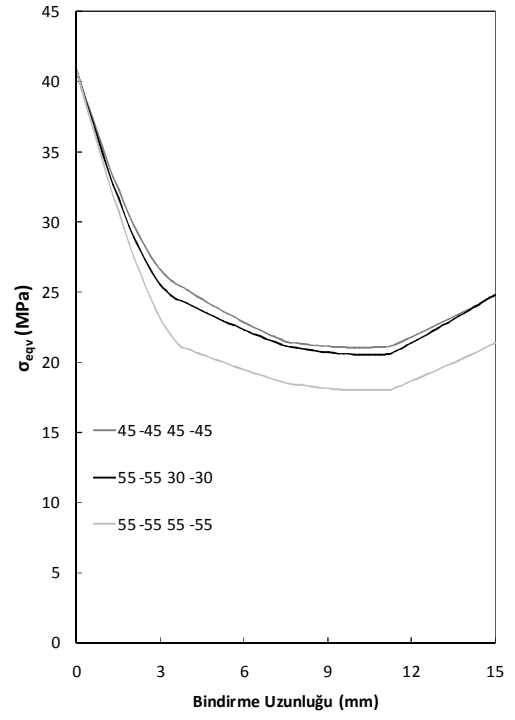


(d)

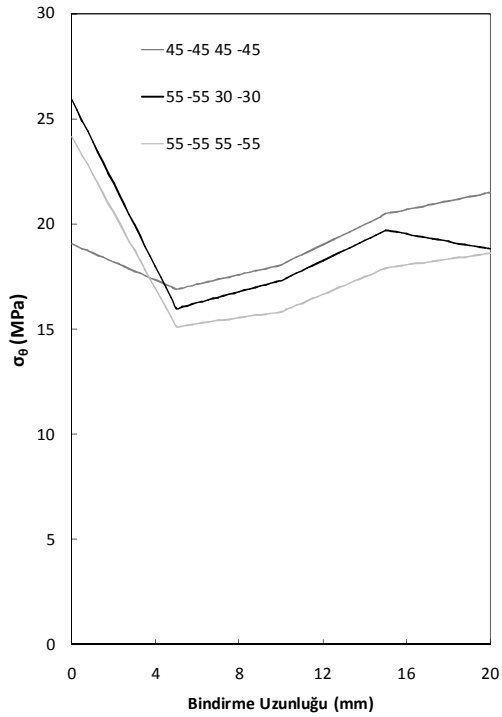
**Şekil 4.110.** DP 410 yapıştırıcı kullanarak kademeli (10 mm) olarak birleştirilen farklı oryantasyon açılı 4 tabakalı kompozit boruların C-D gerilme hattı üzerinde; (a) radyal, (b) teğetsel, (c) eksenel, (d) kayma gerilmelerinin karşılaştırılması (45<sup>0</sup>/-45<sup>0</sup>/45<sup>0</sup>/-45<sup>0</sup> için 6 MPa, 55<sup>0</sup>/-55<sup>0</sup>/30<sup>0</sup>/-30<sup>0</sup> için 6 MPa, 55<sup>0</sup>/-55<sup>0</sup>/55<sup>0</sup>/-55<sup>0</sup> için 7 MPa)



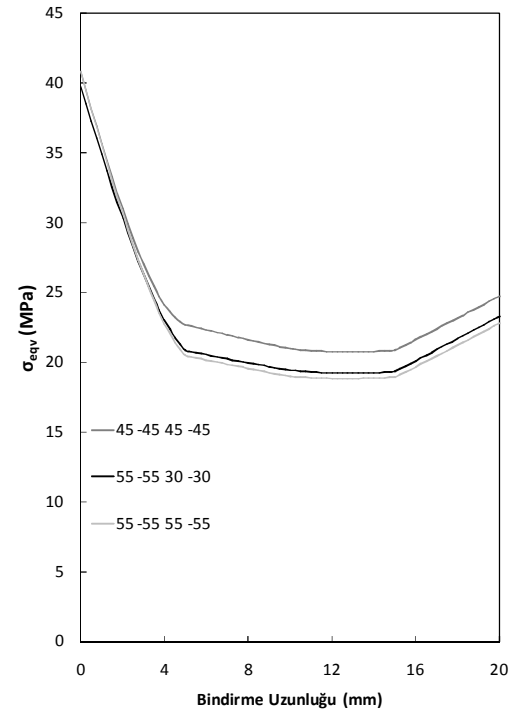
(a)



(b)

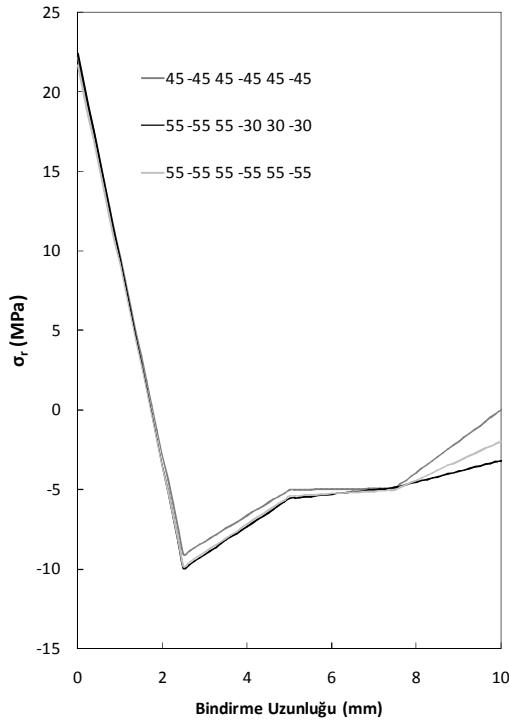


(c)

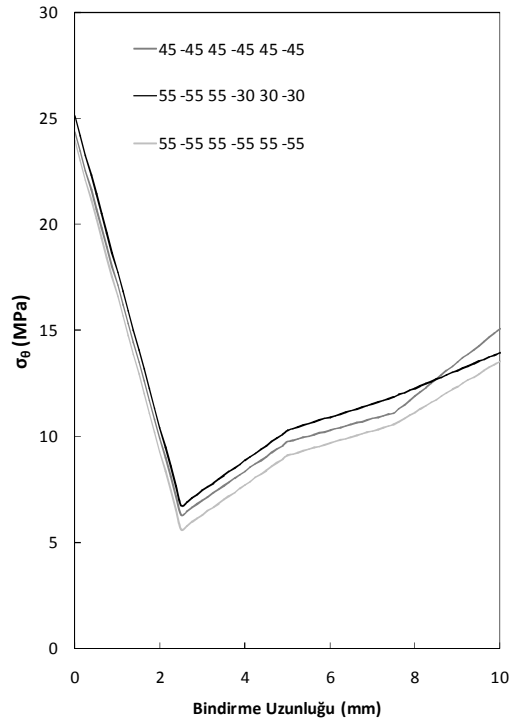


(d)

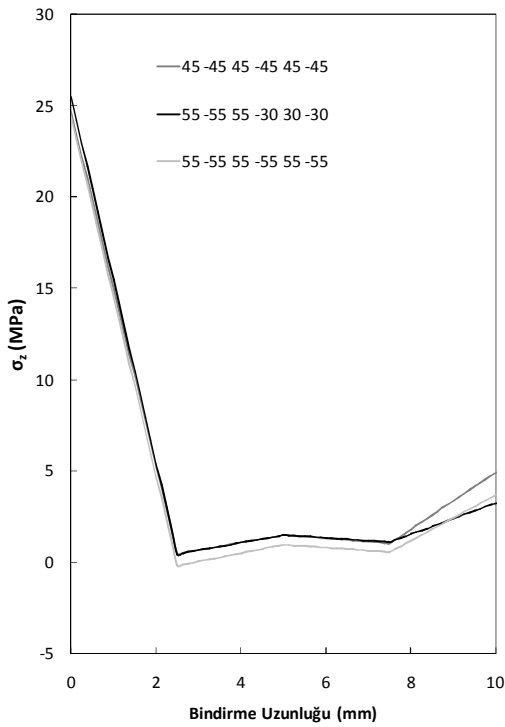
**Şekil 4.111.** Farklı oryantasyon açılı 4 tabakalı kompozit boruları kademeli olarak birleştirmede kullanılan DP 410 yapıştırıcının C-D gerilme hattı üzerinde; 15 mm yama boyunda (a) teğetsel, (b) Von-Mises (  $45^{\circ}/-45^{\circ} /45^{\circ}/-45^{\circ}$  için 7 MPa,  $55^{\circ}/-55^{\circ}/30^{\circ}/-30^{\circ}$  için 7.5 MPa,  $55^{\circ}/-55^{\circ}/55^{\circ}/-55^{\circ}$  için 7.5 MPa) ve 20 mm yama boyunda (c) teğetsel, (d) Von-Mises gerilmelerinin karşılaştırılması (  $45^{\circ}/-45^{\circ} /45^{\circ}/-45^{\circ}$  için 8 MPa,  $55^{\circ}/-55^{\circ}/30^{\circ}/-30^{\circ}$  için 8 MPa,  $55^{\circ}/-55^{\circ}/55^{\circ}/-55^{\circ}$  için 9 MPa)



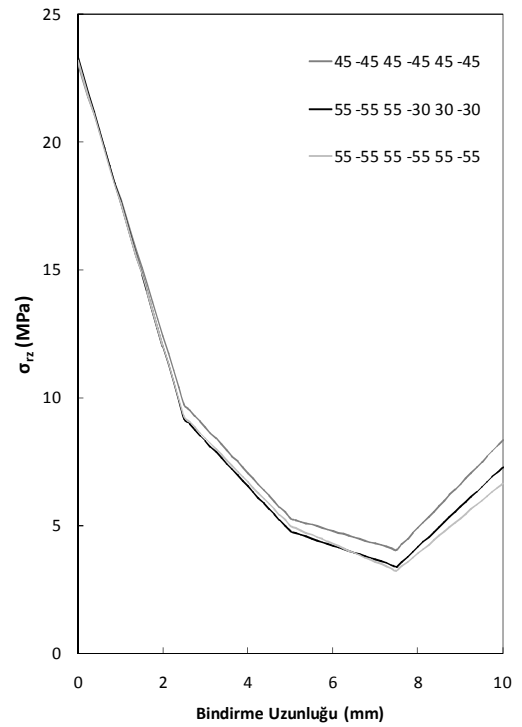
(a)



(b)

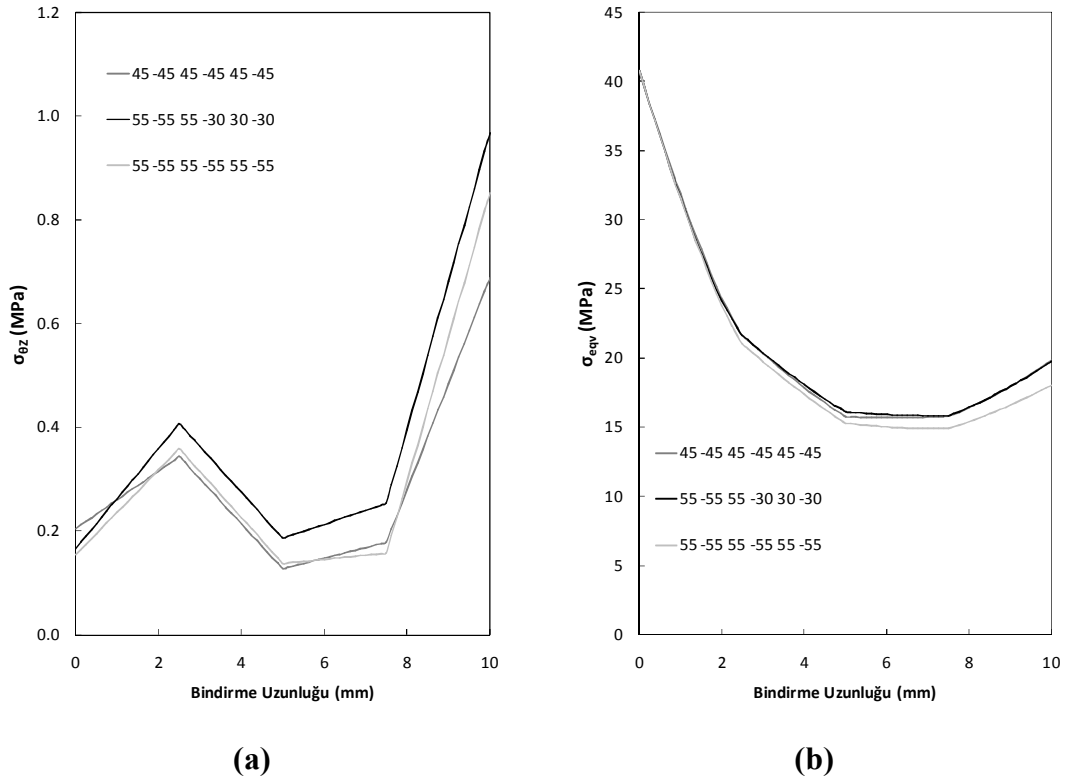


(c)



(d)

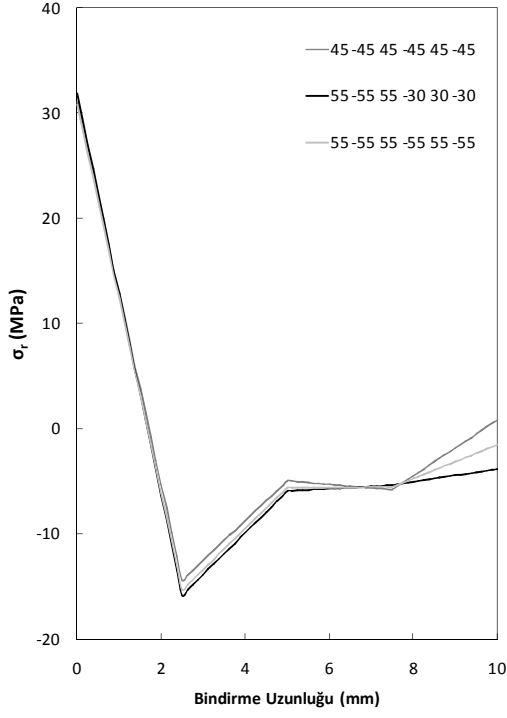
**Şekil 4.112.** Farklı oryantasyon açılı kademeli (10 mm) olarak 6 tabakalı kompozit boruların birleştirmede kullanılan DP 410 yapıştırıcının C-D gerilme hattı üzerinde; (a) radyal, (b) teğetsel, (c) eksenel, (d) kayma gerilmelerinin karşılaştırılması (  $45^{\circ}/45^{\circ}/45^{\circ}/45^{\circ}/45^{\circ}/45^{\circ}$  için 5.5 MPa,  $55^{\circ}/55^{\circ}/55^{\circ}/30^{\circ}/30^{\circ}/30^{\circ}$  için 6 MPa,  $55^{\circ}/55^{\circ}/55^{\circ}/55^{\circ}/55^{\circ}/55^{\circ}$  için 6.5 MPa)



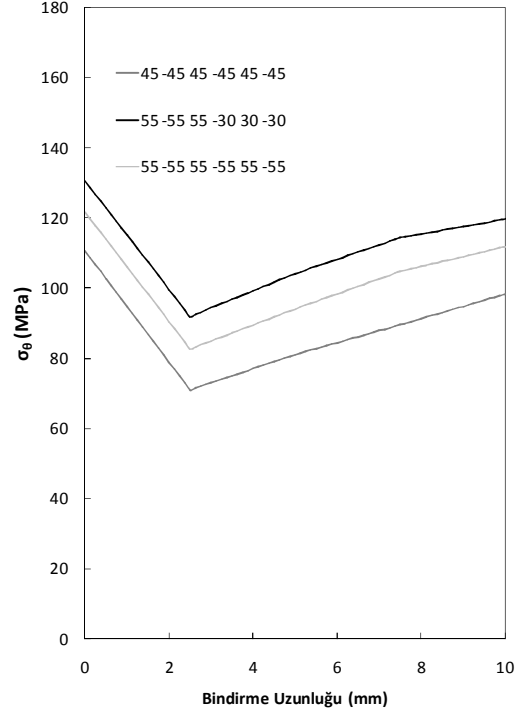
**Şekil 4.113.** Farklı oryantasyon açılı kademeli (10 mm) olarak 6 tabakalı kompozit boruların birleştirmede kullanılan DP 410 yapıştırıcının C-D gerilme hattı üzerinde; (a) kayma, (b) Von-Mises gerilmelerinin karşılaştırılması ( $45^{\circ}/-45^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}$  için 5.5 MPa,  $55^{\circ}/-55^{\circ}/55^{\circ}/-30^{\circ}/30^{\circ}/-30^{\circ}$  için 6 MPa,  $55^{\circ}/-55^{\circ}/55^{\circ}/-55^{\circ}/55^{\circ}/-55^{\circ}$  için 6.5 MPa)

Şekil 4.112 ve Şekil 4.113 incelendiğinde, tabaka sayısının artması, yapıştırıcı tabakanın başlangıç yüzeylerin de oluşan gerilme değerlerini fazla etkilemediği görülse de, bindirme uzunluğu boyunca gerilme davranışlarını etkilediği görülmektedir. Gerilme davranışlarını etkileyen bir çok parametre vardır ve bunları malzemelerin bir birleriyle olan uyumu, kompozit borunun oryantasyon açıları ve tabaka sıralanışı, tabaka sayısının değişmesi ve hasar yüklerinin farklı olması şeklinde sıralayabiliriz.

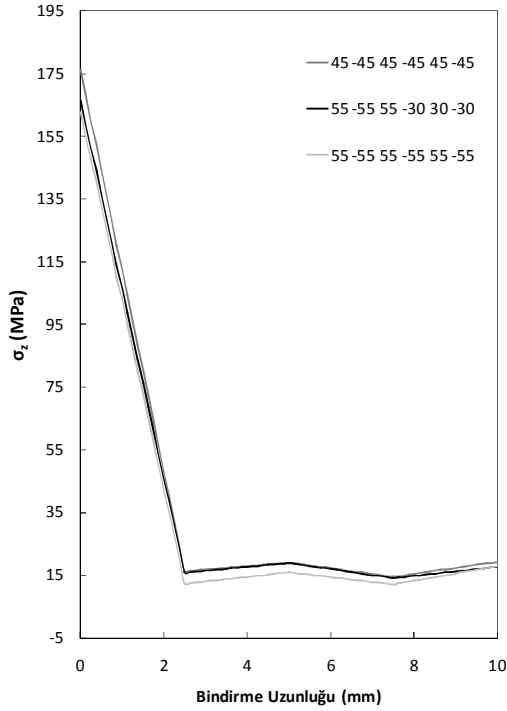
Şekil 4.114' de tabaka sayısının artmasıyla gerilme değerlerinin düştüğü görülmektedir. Tabaka sayısı değişiminin gerilme dağılımı için önemli bir parametre olduğunu söyleyebiliriz.



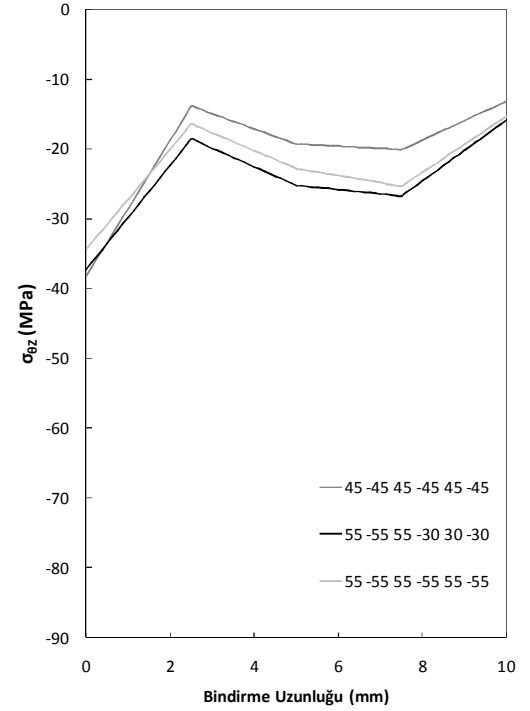
(a)



(b)

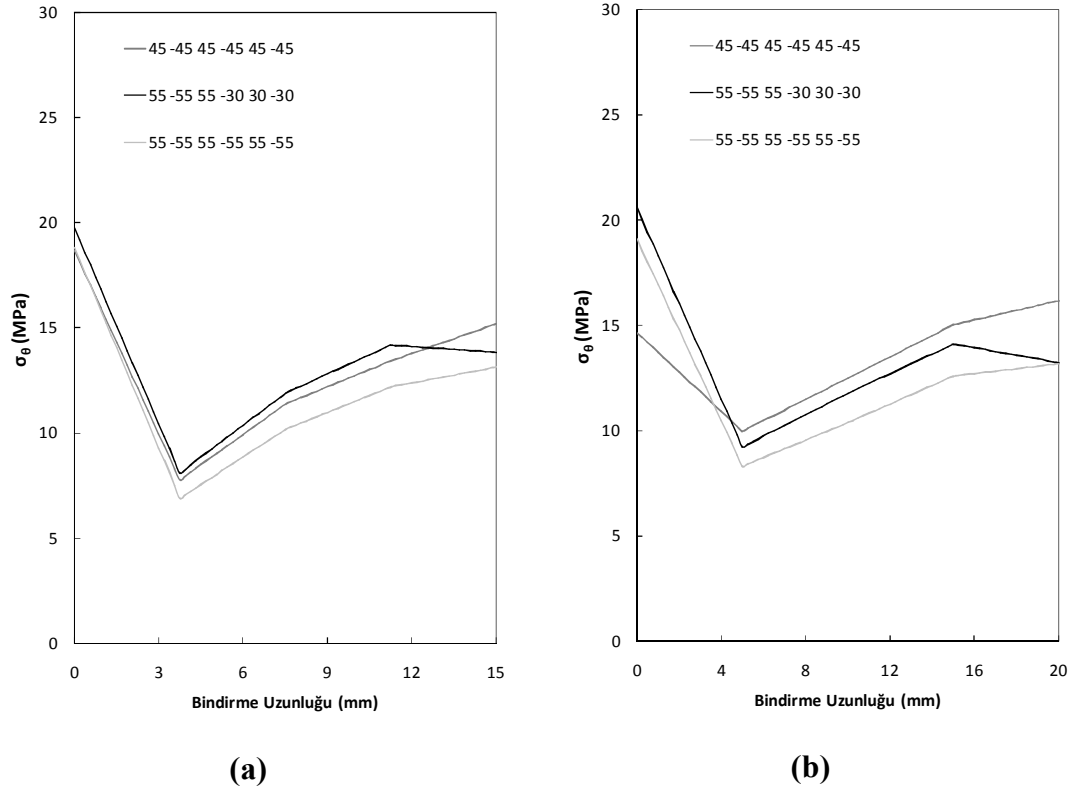


(c)



(d)

**Şekil 4.114.** DP 410 yapıştırıcı kullanarak kademeli (10 mm) olarak birleştirilen farklı oryantasyon açılı 6 tabakalı kompozit boruların C-D gerilme hattı üzerinde; (a) radyal, (b) teğetsel, (c) eksenel, (d) kayma gerilmelerinin karşılaştırılması ( $45^0/45^0/45^0/45^0/45^0/45^0$  için 5.5 MPa,  $55^0/55^0/55^0/30^0/30^0/30^0$  için 6 MPa,  $55^0/55^0/55^0/55^0/55^0/55^0$  için 6.5 MPa)

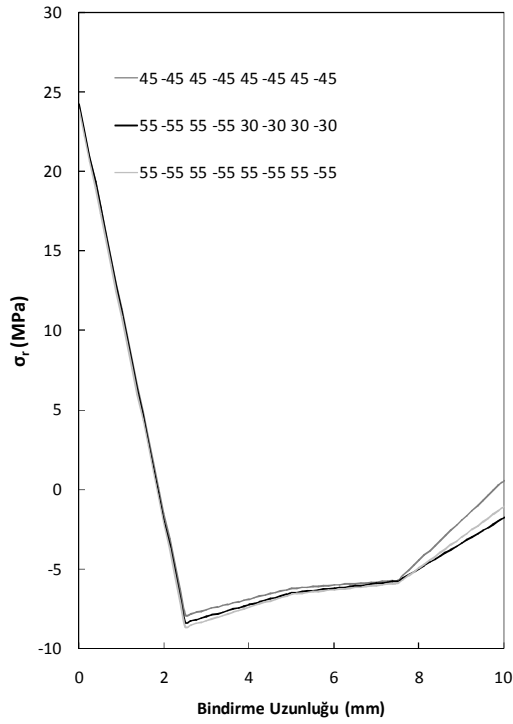


**Şekil 4.115.** Farklı oryantasyon açılı 6 tabakalı kompozit boruları kademeli olarak birleştirmede kullanılan DP 410 yapıştırıcının C-D gerilme hattı üzerinde; 15 mm yama boyunda (a) teğetsel ( $45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0$  için 7 MPa,  $55^0/-55^0/55^0/-30^0/30^0/-30^0$  için 7.5 MPa,  $55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$  için 8 MPa) ve 20 mm yama boyunda (b) teğetsel ( $45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0$  için 8.5 MPa,  $55^0/-55^0/55^0/-30^0/30^0/-30^0$  için 8 MPa,  $55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$  için 9 MPa) gerilmelerinin karşılaştırılması

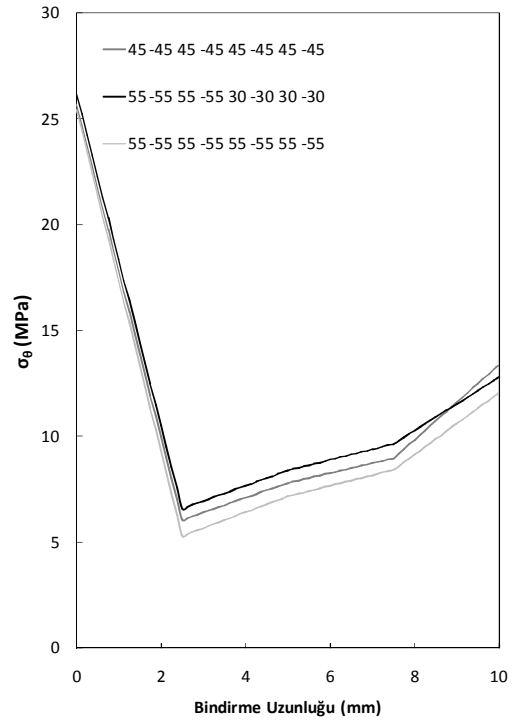
Şekil 4.115’ de görüldüğü gibi, bindirme uzunluğunun değişmesi, her bir oryantasyon açısında farklı gerilme dağılımı oluşmasına sebep olmaktadır. Bindirme uzunluklarının artmasıyla hasar iç basınçlarının arttığını söyleyebiliriz.

Şekil 4.116 ve Şekil 4.117 incelendiğinde, tabaka sayısının artmasıyla gerilme değerlerinde küçük de olsa farklılıklar meydana gelmektedir. Yapıştırıcıda, başlangıç yüzeyinde gerilme değerlerinin arttığı ve bindirme uzunluğu boyunca gerilme dağılımlarının değiştiği görülmektedir.

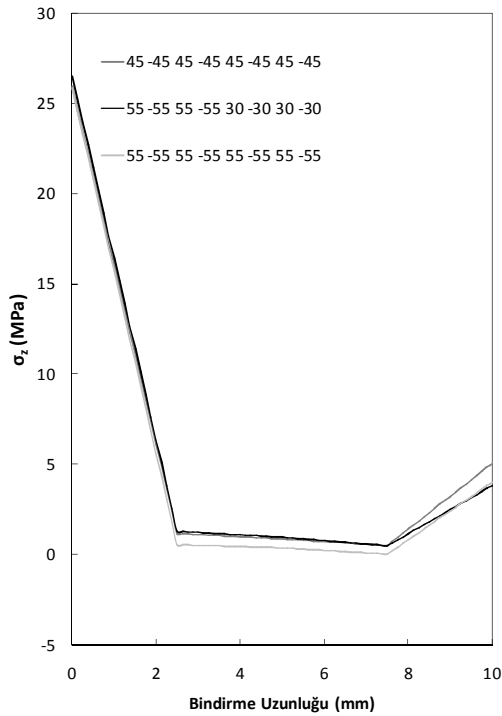




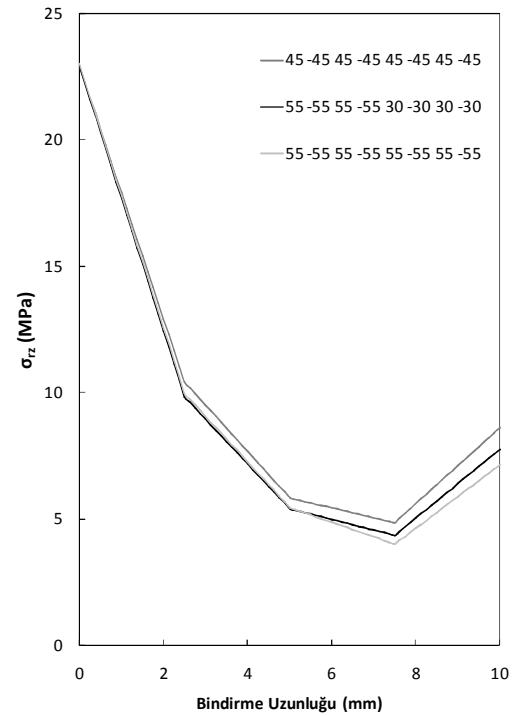
(a)



(b)

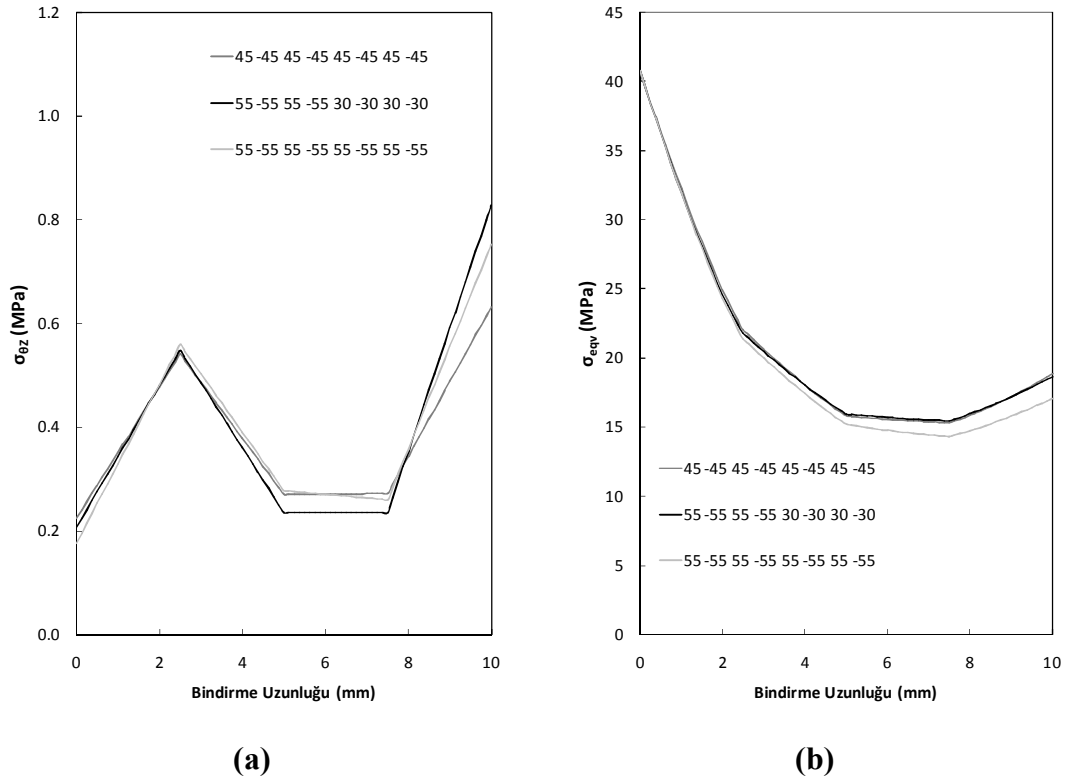


(c)



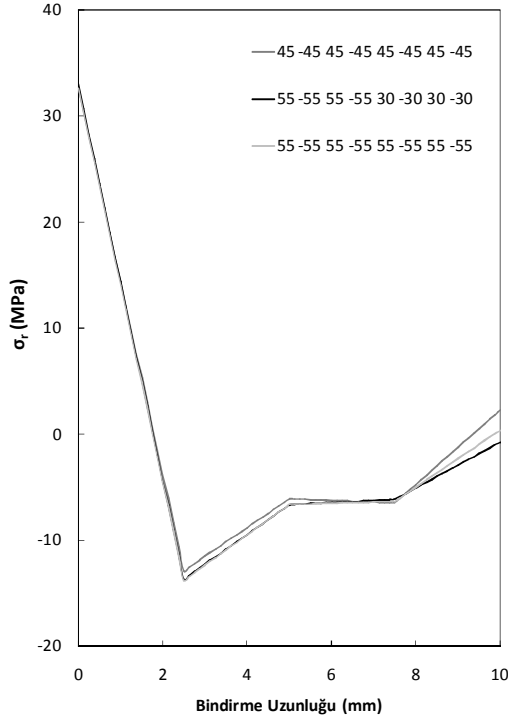
(d)

**Şekil 4.116.** Farklı oryantasyon açılı kademeli olarak (10 mm) 8 tabakalı kompozit boruların birleştirmede kullanılan DP 410 yapıştırıcının C-D gerilme hattı üzerinde; (a) radyal, (b) teğetsel, (c) eksenel, (d) kayma gerilmelerinin karşılaştırılması (  $45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/45^0/-45^0/45^0$  için 6 MPa,  $55^0/-55^0/55^0/-55^0/30^0/-30^0/30^0/-30^0$  için 6.5 MPa,  $55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$  için 7 MPa)

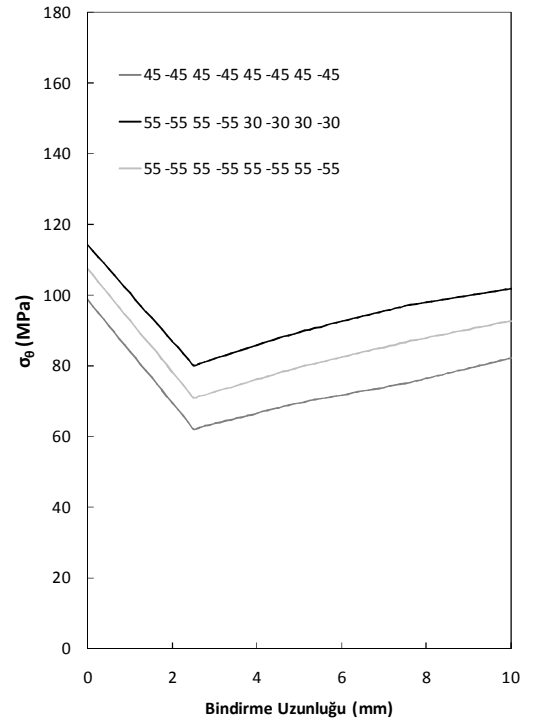


**Şekil 4.117.** Farklı oryantasyon açılı kademeli olarak (10 mm) 8 tabakalı kompozit boruların birleştirmede kullanılan DP 410 yapıştırıcının C-D gerilme hattı üzerinde; (a) kayma, (b) Von-Mises gerilmelerinin karşılaştırılması ( $45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0/-45^0$  için 6 MPa,  $55^0/-55^0/55^0/-55^0/30^0/-30^0/30^0/-30^0$  için 6.5 MPa,  $55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$  için 7 MPa)

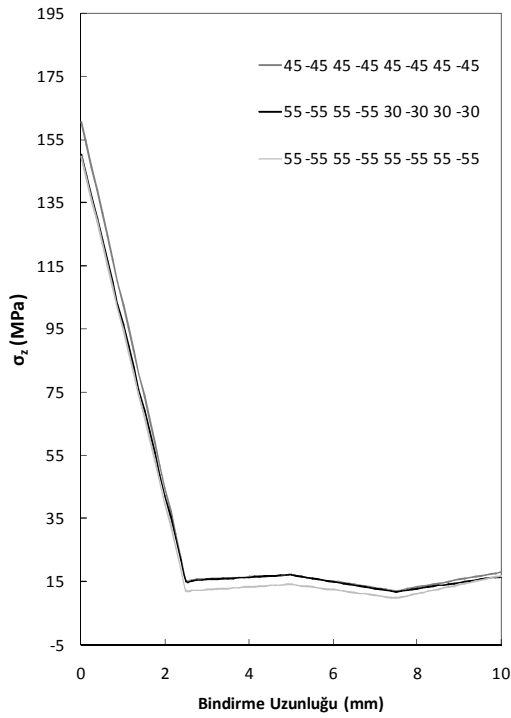
Şekil 4.118' de tabaka sayısının artmasıyla gerilme değerlerinin düştüğü görülmektedir. Tabaka sayısının değişimi, gerilme dağılımına etkisi olduğundan gerilme dağılımı için önemli bir parametre olduğunu söyleyebiliriz. Bindirme uzunluğunun da gerilme dağılımına etkisi vardır. Şekil 4.119' da görüldüğü gibi, bindirme uzunluğunun artmasıyla gerilme değerleri düşmektedir. Ayrıca bindirme uzunluğu, hasar iç basıncı değerlerinin de değişmesine sebep olduğundan gerilme dağılımlarında farklılıklar oluştuğunu söyleyebiliriz.



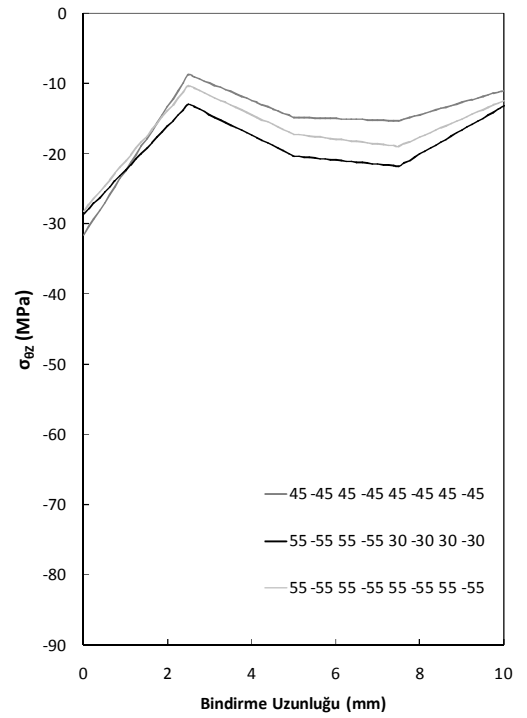
(a)



(b)

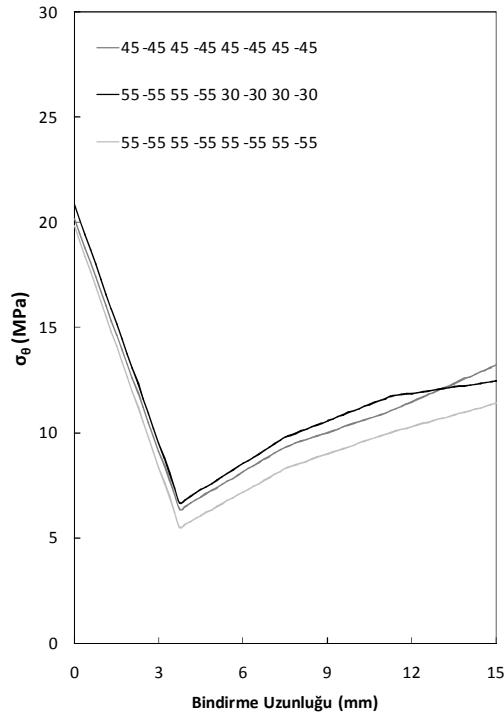


(c)

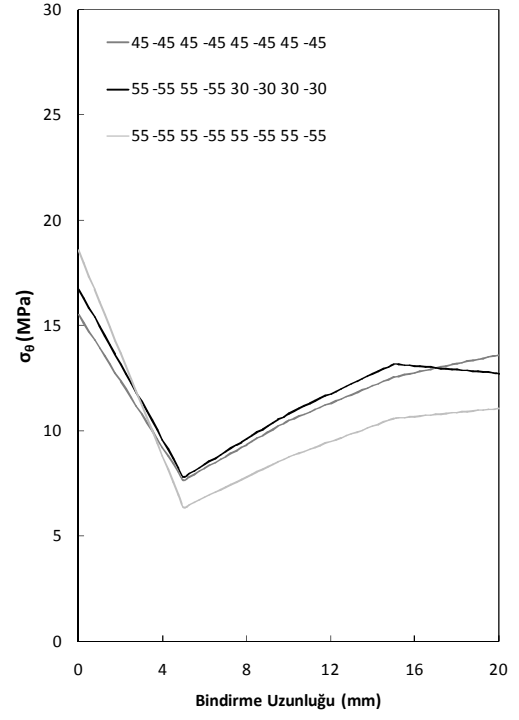


(d)

**Şekil 4.118.** DP 410 yapıştırıcı kullanarak kademeli (10 mm) olarak birleştirilen farklı oryantasyon açılı 8 tabakalı kompozit boruların C-D gerilme hattı üzerinde; (a) radyal, (b) teğetsel, (c) eksenel, (d) kayma gerilmelerinin karşılaştırılması ( $45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/45^0/-45^0/45^0$  için 6 MPa,  $55^0/-55^0/55^0/-55^0/30^0/-30^0/30^0/-30^0$  için 6.5 MPa,  $55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$  için 7 MPa)



(a)



(b)

**Şekil 4.119.** Farklı oryantasyon açılı 8 tabakalı kompozit boruları kademeli olarak birleştirmede kullanılan DP 410 yapıştırıcının C-D gerilme hattı üzerinde; 15 mm yama boyunda (a) teğetsel ( $45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0$  için 7.5 MPa,  $55^0/-55^0/55^0/-55^0/30^0/-30^0/30^0/-30^0$  için 8 MPa,  $55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$  için 8.5 MPa) ve 20 mm yama boyunda (b) teğetsel ( $45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0$  için 9 MPa,  $55^0/-55^0/55^0/-55^0/30^0/-30^0/30^0/-30^0$  için 9.5 MPa,  $55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$  için 9.5 MPa) gerilmelerinin karşılaştırılması

#### 4.4.4.2. İç basınç altında DP 490 yapıştırıcı kullanılarak kademeli olarak yapıştırılan kompozit boruların nümerik sonuçları

İç basınç altında DP 490 yapıştırıcı ile kademeli olarak belirlenen bindirme uzunlukları sırasıyla 10 mm, 15 mm ve 20 mm olarak yapıştırılan 4, 6 ve 8 tabakalı kompozit boruların nümerik çalışmaları incelenmiştir. Tabaka sayısı arttıkça doğal olarak dayanımda artmaktadır. Her tabakanın kalınlığı aynı olup, sadece tabaka sayısı arttıkça boru et kalınlığı değişmektedir. Çizelge 4.17 incelendiğinde, üç farklı bindirme uzunluğunda birleştirilen 4 tabakalı borularda  $55^0/-55^0/55^0/-55^0$ , 6 tabakalı borularda  $55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$ , 8 tabakalı borularda ise  $55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$  oryantasyon açılı borular en yüksek hasar iç basıncına sahip kompozit borular olduğu görülmektedir. Fakat 8 tabakalı kompozit borularda 10 mm bindirme uzunluğunda tüm oryantasyon açılı boruların hasar iç basınçları aynı bulunmuştur. Bununla birlikte 6 tabakalı 20 mm yapıştırma uzunluğunda  $55^0/-55^0/55^0/-30^0/30^0/-30^0$  oryantasyon açılı kompozit borunun hasar iç basıncı maksimumdur. Bu gibi istisnai durumlar bindirme uzunluğu, oryantasyon açısı ve kompozit tabaka sayısı gibi etmenlerden oluşabilmektedir.

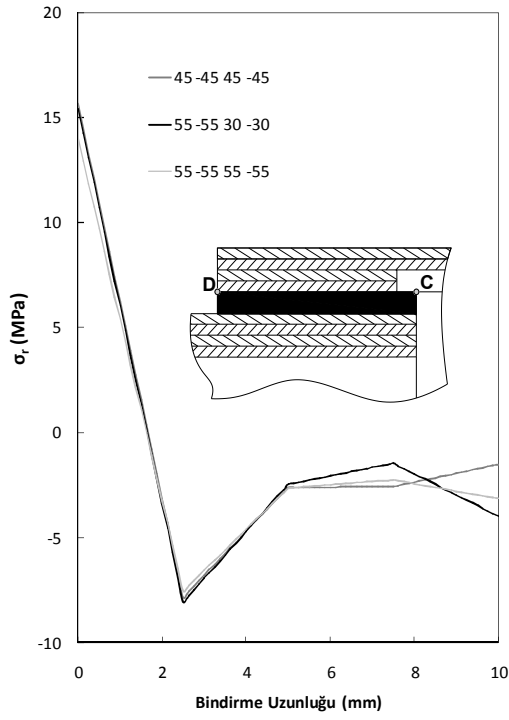
Şekil 4.120-4.131 incelendiğinde, tabaka sayısı arttıkça gerilmelerin değiştiği görülmektedir. Tüm kompozit borularda ve yapıştırıcıda  $\sigma_\theta$  gerilmeleri diğer gerilmelere göre parametre değişikliklerinden en fazla etkilenmektedir. Kompozit borularda tabaka sayısı arttıkça ve bununla birlikte yapıştırıcının radyal yöndeki kalınlığıda arttıkça, tüm oryantasyon açıları için  $\sigma_\theta$  gerilmesi değişmektedir. Aynı zamanda, kademeli olarak farklı bindirme uzunluklarında yapıştırıcı ve kompozit boru üzerinde oluşan gerilmelerin farklı bir davranış sergilemesine etki ettikleri aşağıdaki şekillerde görülmektedir. Aynı durum diğer gerilmeler içinde geçerli olduğunu söyleyebiliriz ve bu durumlar Şekil 4.120-4.131' de görülmektedir.

Birleştirilen bölgede C-D gerilme hattı üzerindeki gerilme değerlerinin yüksek olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.106) ve yapılacak çalışmalarda bu hat üzerinde oluşan gerilmeler incelenmiştir.  $\sigma_\theta$  gerilmesi, kompozit boruların 4 tabakalıları için  $55^0/-55^0/30^0/-30^0$ , 6 tabakalıları için  $55^0/-55^0/55^0/-30^0/30^0/-30^0$  ve 8 tabakalıları için  $55^0/-55^0/55^0/-55^0/30^0/-30^0/30^0/-30^0$  oryantasyonlar açıları için maksimumdur. Fakat Von-Mises gerilmelerinde ise tabaka kalınlığı arttıkça birleştirilen kompozit boruların oryantasyon açılarına göre maksimum ve minimum gerilme değerleri  $\sigma_\theta$  gibi belirli bir düzende değildir.  $45^0/-45^0/45^0/-45^0$  oryantasyon

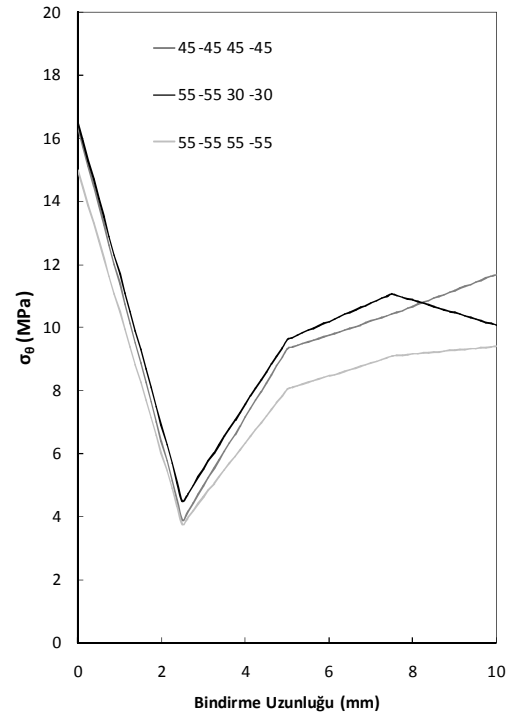
açılı kompozit borular üzerinde oluşan Von-Mises gerilmesi maksimum değerdedir. Fakat bazen bindirme uzunlukları ve oryantasyon açılarının etkisiyle küçük farklılıklar aşağıdaki şekillerde görülmektedir. Çizelge 4.17 incelendiğinde, kompozit boruların tabaka sayıları ve yapıştırılan yüzeylerin bindirme uzunlukları hasar iç basınçlarını değiştirdikleri görülmektedir.

**Çizelge 4.17.** DP 490 yapıştırıcı kullanılarak farklı uzunlukta kademeli olarak birleştirilen farklı oryantasyon açılı 4, 6 ve 8 tabakalı kompozit boruların iç basınç yüklemesi altındaki nümerik hasar iç basınçları

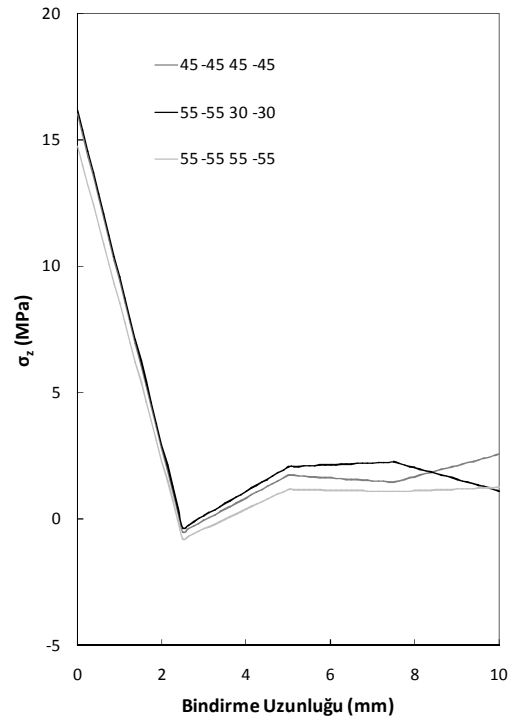
Tabaka Sayısı	Bindirme Uzunluğu (mm)	Oryantasyon açısı	Hasar İç Basıncı (MPa)
4	10	45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup>	4.4
		55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup>	4.4
		55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup>	4.8
6		45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup>	3.9
		55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup>	4.2
		55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup>	4.5
8		45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup>	4.8
		55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup>	4.8
		55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup>	4.8
4	15	45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup>	4.8
		55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup>	4.8
		55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup>	5.6
6		45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup>	4.5
		55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup>	5.4
		55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup>	6.0
8		45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup>	5.2
		55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup>	5.6
		55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup>	6.0
4	20	45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup>	5.6
		55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup>	6.0
		55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup>	6.4
6		45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup>	6.0
		55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup>	6.8
		55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup>	6.4
8		45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup> /45 <sup>0</sup> /-45 <sup>0</sup>	6.4
		55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup> /30 <sup>0</sup> /-30 <sup>0</sup>	6.8
		55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup> /55 <sup>0</sup> /-55 <sup>0</sup>	7.2



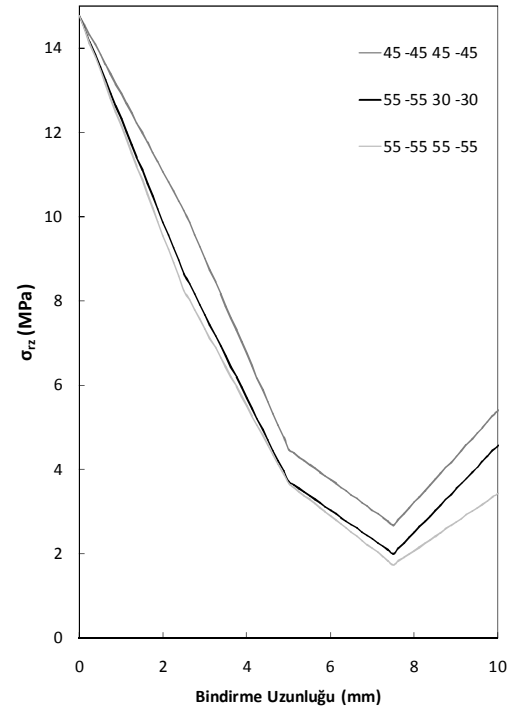
(a)



(b)

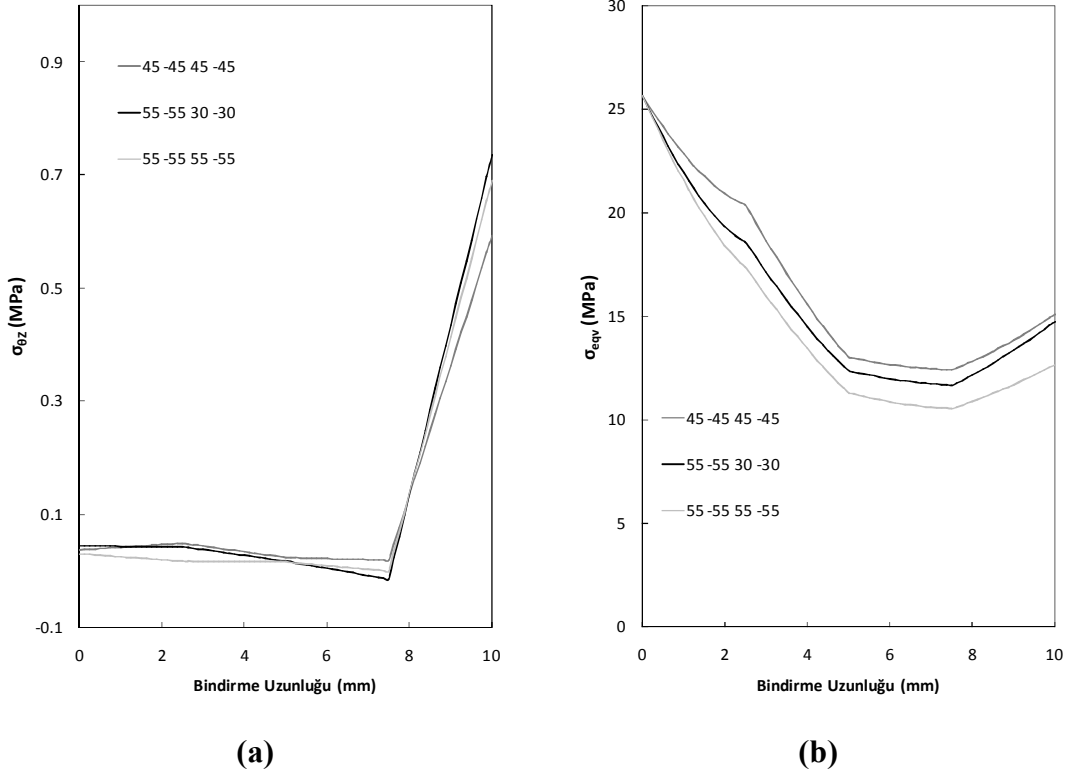


(c)



(d)

**Şekil 4.120.** Farklı oryantasyon açılı kademeli (10 mm) olarak 4 tabakalı kompozit boruların birleştirmede kullanılan DP 490 yapıştırıcının C-D gerilme hattı üzerinde; (a) radyal, (b) teğetsel, (c) eksenel, (d) kayma gerilmelerinin karşılaştırılması (  $45^{\circ}/45^{\circ}/45^{\circ}/45^{\circ}$  için 4.4 MPa,  $55^{\circ}/55^{\circ}/30^{\circ}/30^{\circ}$  için 4.4 MPa,  $55^{\circ}/55^{\circ}/55^{\circ}/55^{\circ}$  için 4.8 MPa)



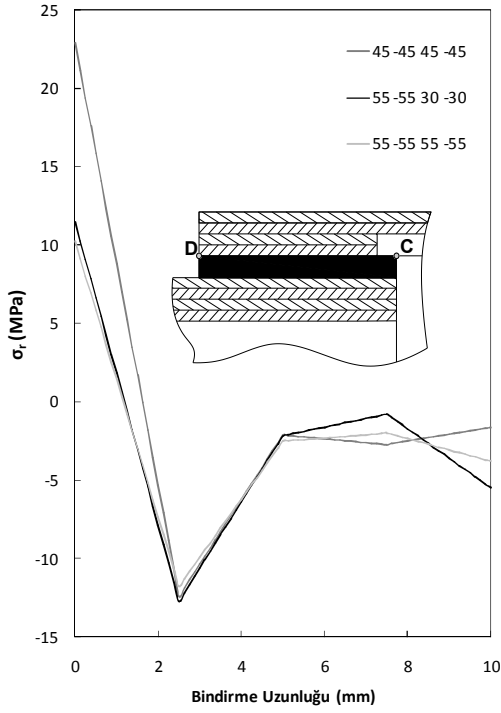
**Şekil 4.121.** Farklı oryantasyon açılı kademeli (10 mm) olarak 4 tabakalı kompozit boruların birleştirmede kullanılan DP 490 yapıştırıcının C-D gerilme hattı üzerinde; (a) kayma, (b) Von-Mises gerilmelerinin karşılaştırılması (45°/45°/45°/45° için 4.4 MPa, 55°/55°/30°/30° için 4.4 MPa, 55°/55°/55°/55° için 4.8 MPa)

Şekil 4.120 ve Şekil 4.121 incelendiğinde, yapıştırıcı üzerinde oluşan gerilme dağılımlarının nasıl değiştiği görülmektedir. Şekil 4.120’ de gerilmelerin bindirme uzunluğunun başlangıç noktalarında maksimum olduğu görülmektedir. Çünkü iç basınç bu kısımda doğrudan yapıştırıcı yüzeyine etkimektedir. Şekil 4.121’ de ise kayma gerilmesinin bindirme uzunluğu boyunca diğer gerilmelerden farklı davranış sergilediği görülmektedir.

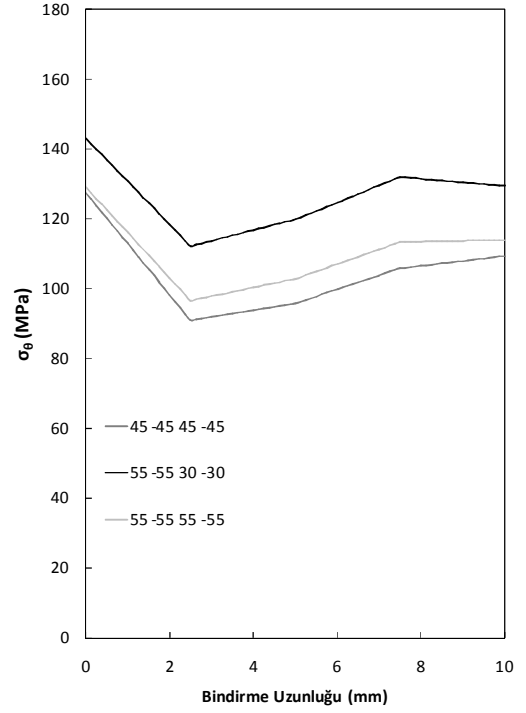
Şekil 4.122’ de kompozit boru üzerinde oluşan gerilmeler incelenmiştir. Her bir oryantasyon açısında gerilme dağılımlarının farklı olduğu görülmektedir. Özellikle kayma gerilmesinin gerilme dağılımı, diğer gerilme dağılımlarından farklı bir şekildedir. Bunun sebebi, malzemelerin mekaniksel davranışları ve malzeme özellikleridir.

Şekil 4.123’ de bindirme uzunluklarının artmasıyla gerilmelerin düştüğü görülmektedir. Bunun sebebi, bindirme uzunluğunun artması ile boruların bir birine daha sağlam birleştirilmesini sağlamaktadır ve bağlantının sağlam olması gerilme değerlerinin düşmesini sağlamıştır.

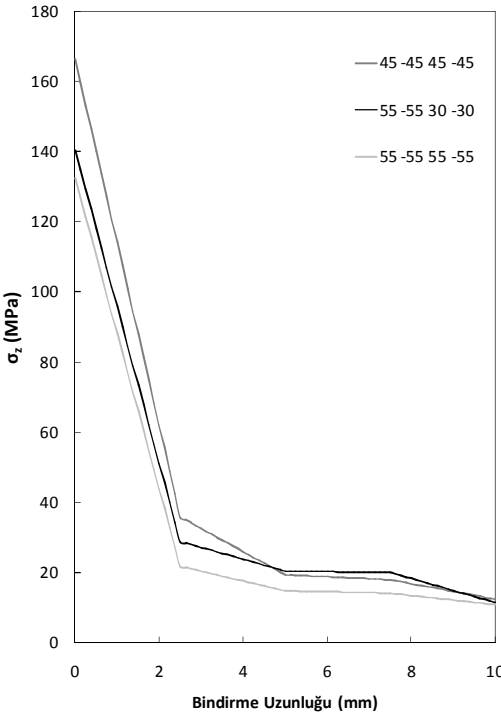




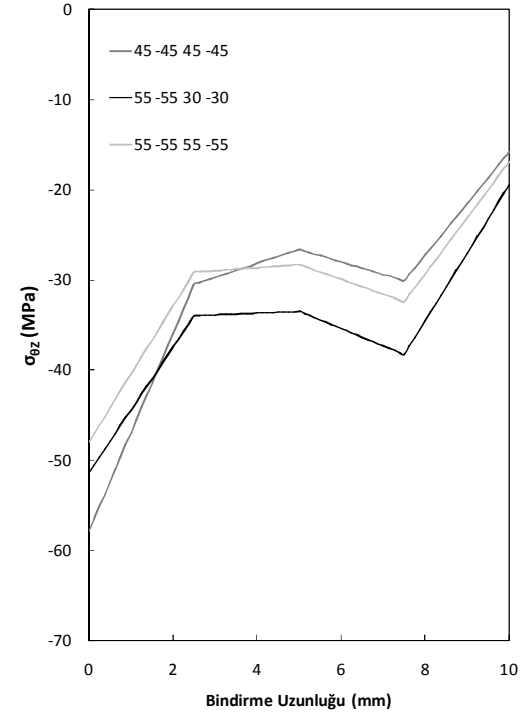
(a)



(b)

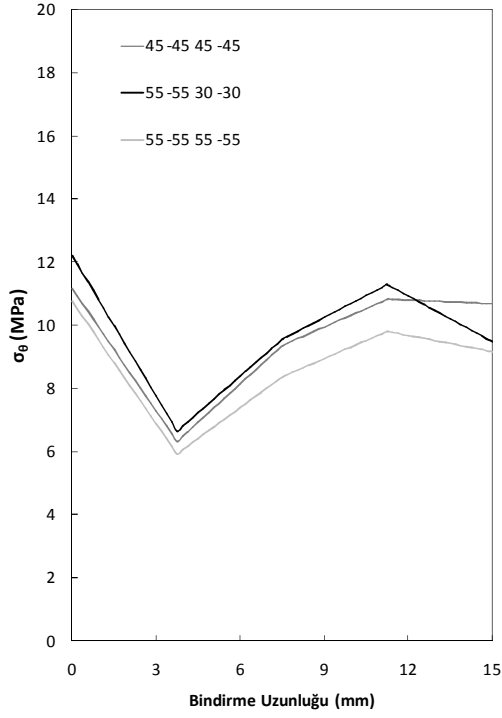


(c)

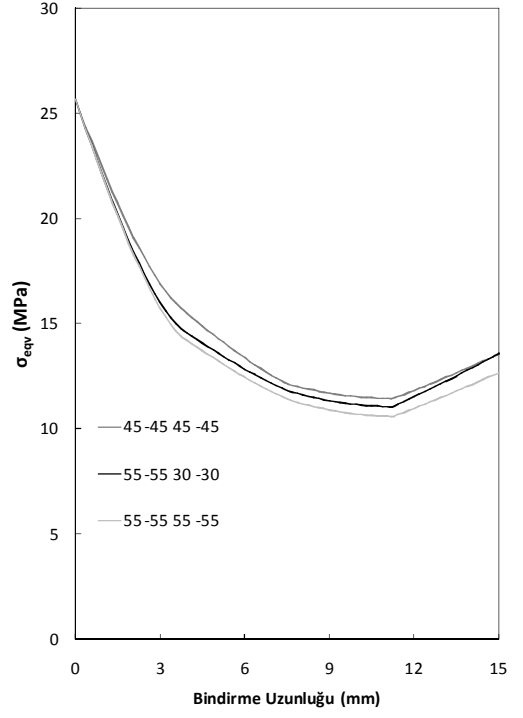


(d)

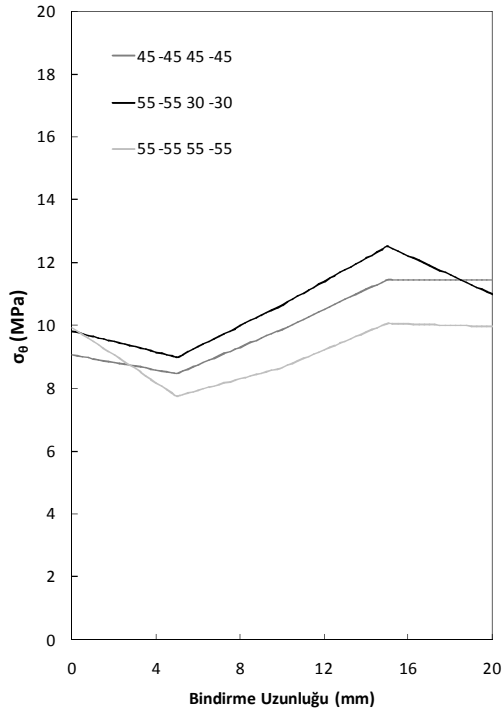
**Şekil 4.122.** DP 490 yapıştırıcı kullanarak kademeli (10 mm) olarak birleştirilen farklı oryantasyon açılı 4 tabakalı kompozit boruların C-D gerilme hattı üzerinde; (a) radyal, (b) teğetsel, (c) aksenal, (d) kayma gerilmelerinin karşılaştırılması ( $45^0/45^0/45^0/45^0$  için 4.4 MPa,  $55^0/55^0/30^0/30^0$  için 4.4 MPa,  $55^0/55^0/55^0/55^0$  için 4.8 MPa)



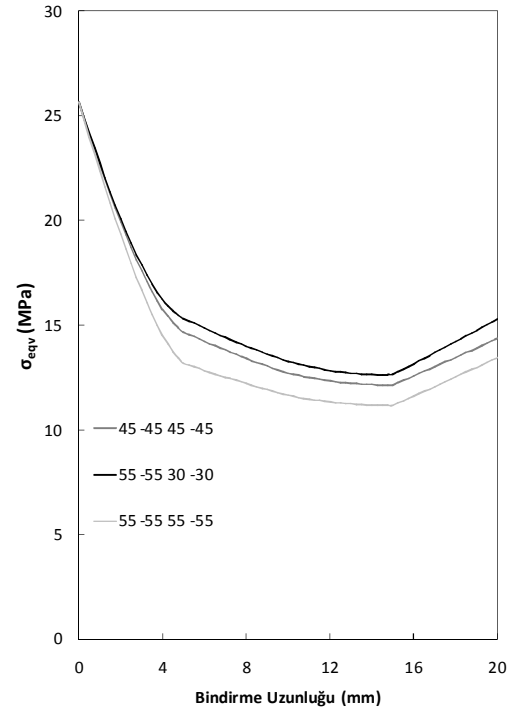
(a)



(b)

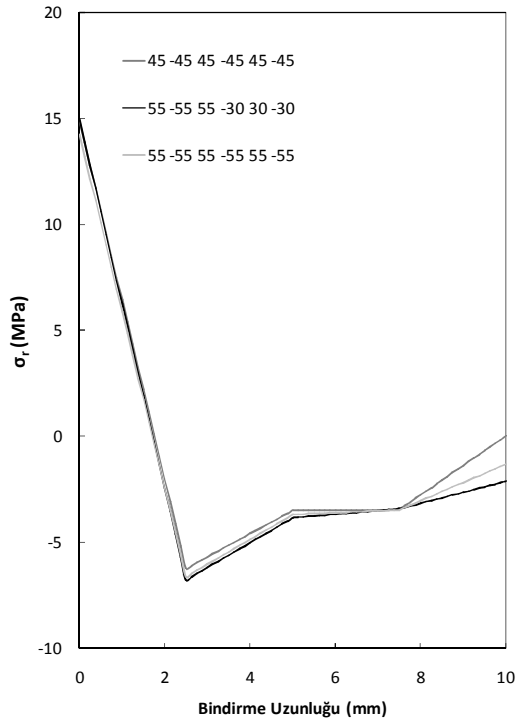


(c)

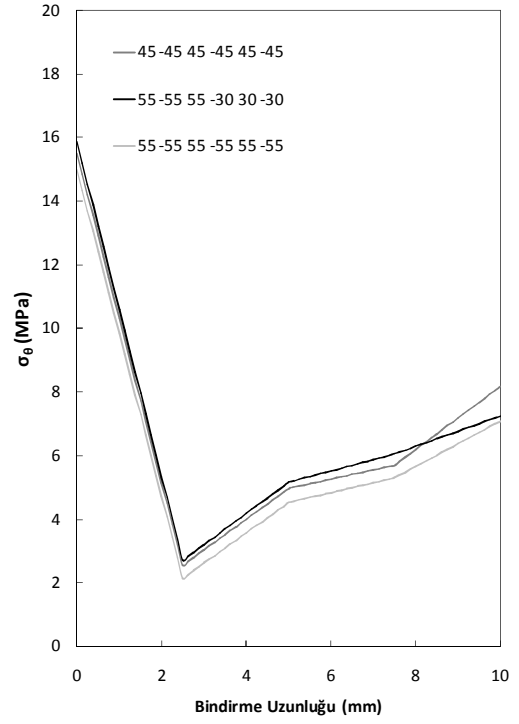


(d)

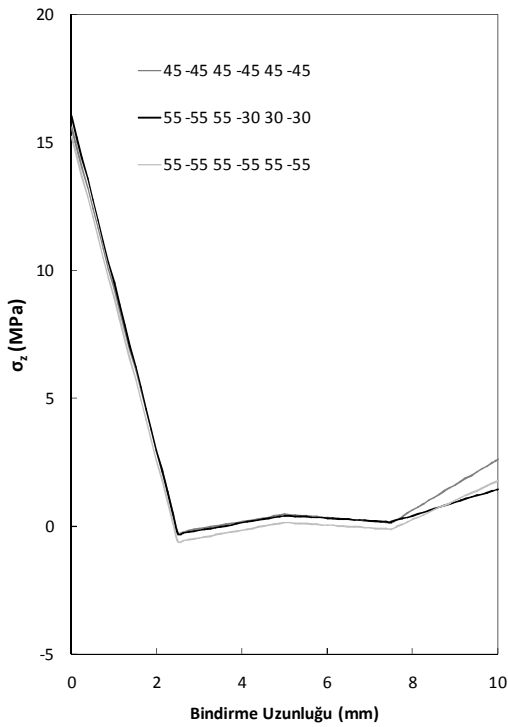
**Şekil 4.123.** Farklı oryantasyon açılı 4 tabakalı kompozit boruları kademeli olarak birleştirmede kullanılan DP 490 yapıştırıcının C-D gerilme hattı üzerinde; 15 mm yama boyunda (a) teğetsel, (b) Von-Mises (  $45^0/45^0/45^0/45^0$  için 4.8 MPa,  $55^0/55^0/30^0/30^0$  için 4.8 MPa,  $55^0/55^0/55^0/55^0$  için 5.6 MPa) ve 20 mm yama boyunda (c) teğetsel, (d) Von-Mises gerilmelerinin karşılaştırılması (  $45^0/45^0/45^0/45^0$  için 5.6 MPa,  $55^0/55^0/30^0/30^0$  için 6 MPa,  $55^0/55^0/55^0/55^0$  için 6.4 MPa)



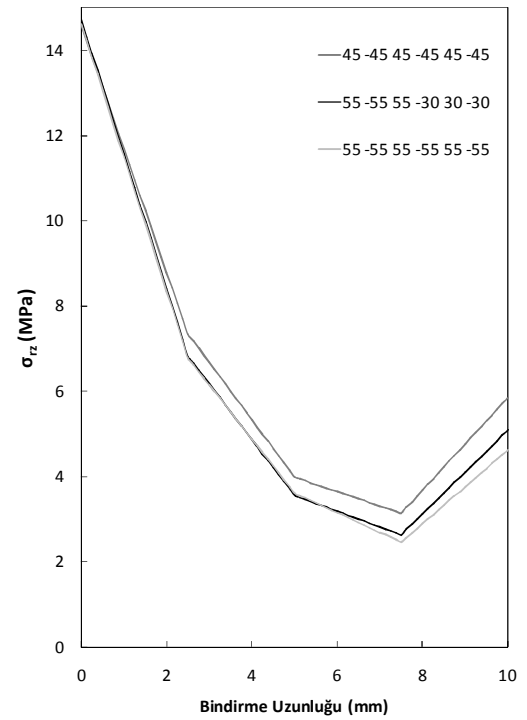
(a)



(b)

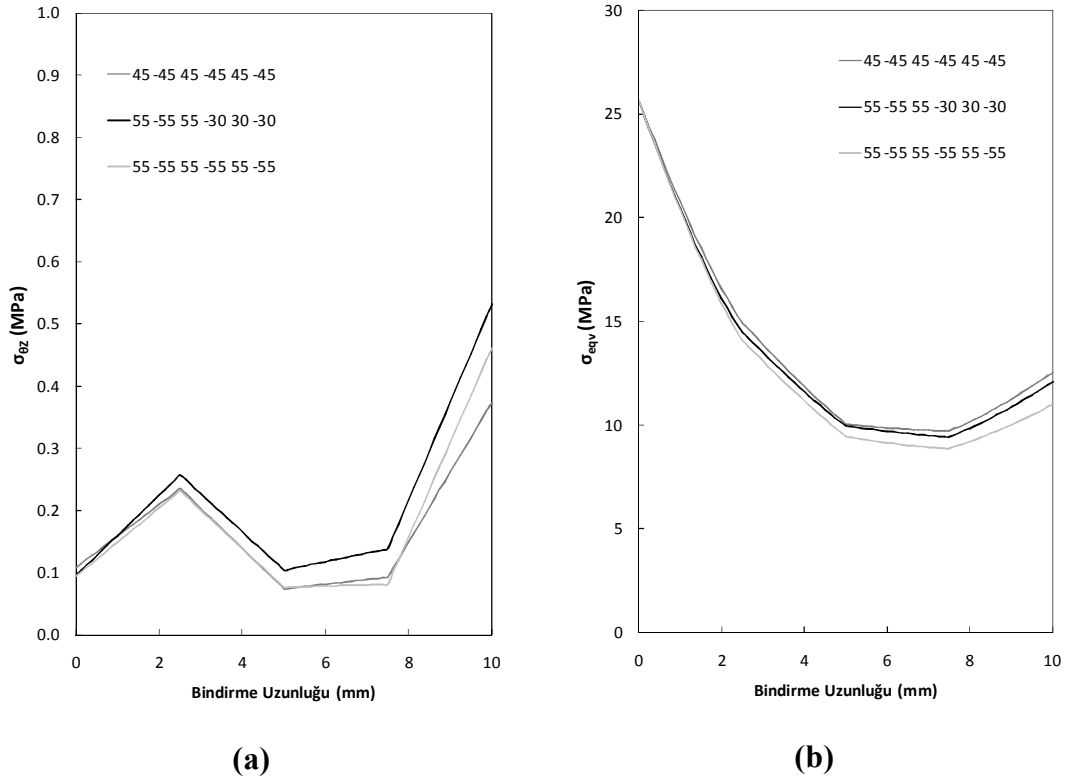


(c)



(d)

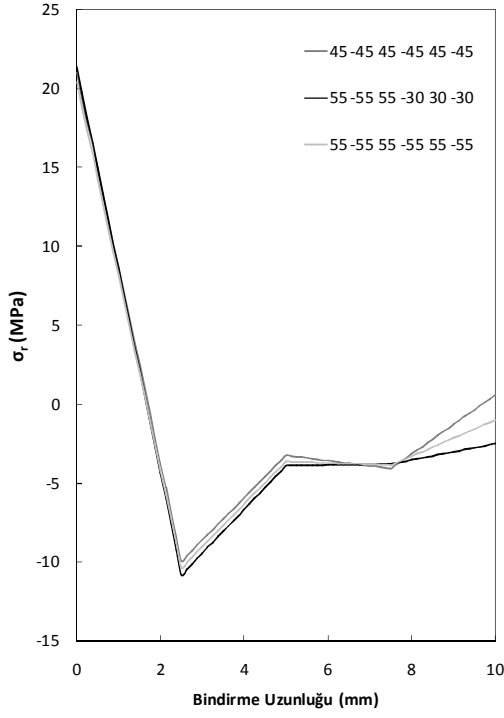
**Şekil 4.124.** Farklı oryantasyon açılı kademeli (10 mm) olarak 6 tabakalı kompozit boruların birleştirmede kullanılan DP 490 yapıştırıcının C-D gerilme hattı üzerinde; (a) radyal, (b) teğetsel, (c) eksenel, (d) kayma gerilmelerinin karşılaştırılması (45°/-45°/45°/-45°/45°/-45° için 3.9 MPa, 55°/-55°/55°/-30°/30°/-30° için 4.2 MPa, 55°/-55°/55°/-55°/55°/-55° için 4.5 MPa)



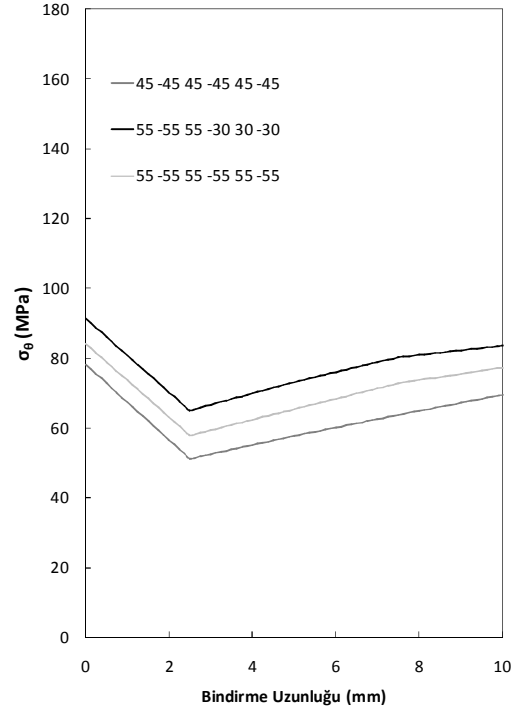
**Şekil 4.125.** Farklı oryantasyon açılı kademeli (10 mm) olarak 6 tabakalı kompozit boruların birleştirmede kullanılan DP 490 yapıştırıcının C-D gerilme hattı üzerinde; (a) kayma, (b) Von-Mises gerilmelerinin karşılaştırılması ( $45^{\circ}/45^{\circ}/45^{\circ}/45^{\circ}/45^{\circ}/45^{\circ}$  için 3.9 MPa,  $55^{\circ}/55^{\circ}/55^{\circ}/30^{\circ}/30^{\circ}/30^{\circ}$  için 4.2 MPa,  $55^{\circ}/55^{\circ}/55^{\circ}/55^{\circ}/55^{\circ}/55^{\circ}$  için 4.5 MPa)

Şekil 4.124 ve Şekil 4.125’ de tabaka sayısının artmasıyla yapıştırıcı üzerinde oluşan gerilme dağılımlarının da değiştiği görülmektedir. Tabaka sayısının etkisi gerilme üzerinde olduğu kadar hasar iç basıncı üzerinde de olmaktadır.

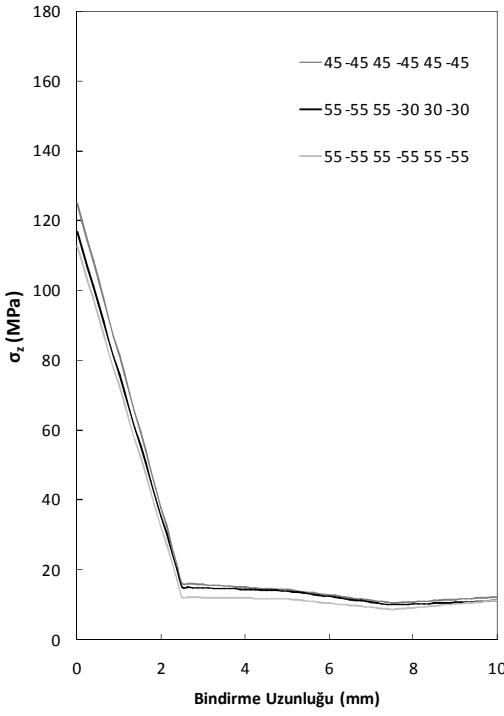
Şekil 4.126 incelendiğinde, tabaka sayısının artmasıyla gerilme değerlerinin değiştiği görülmektedir. Bununla birlikte radyal gerilmeler de istikrarlı bir gerilme dağılımını ve teğetsel, aksenal ve kayma gerilme değerlerinin düşmesini sağlamaktadır.



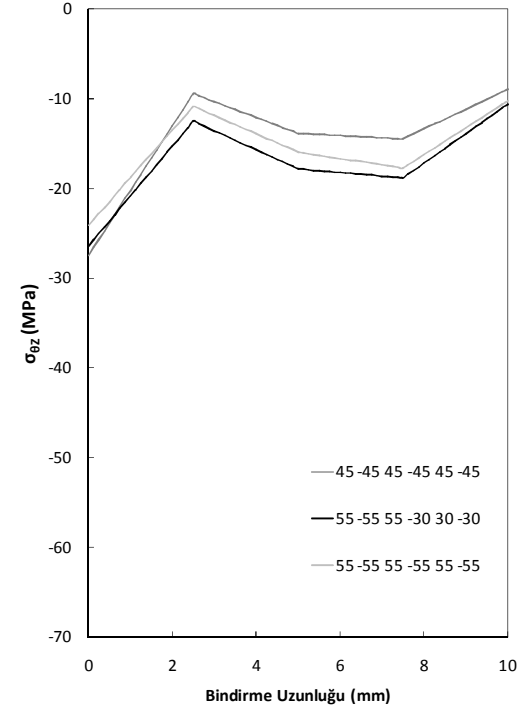
(a)



(b)

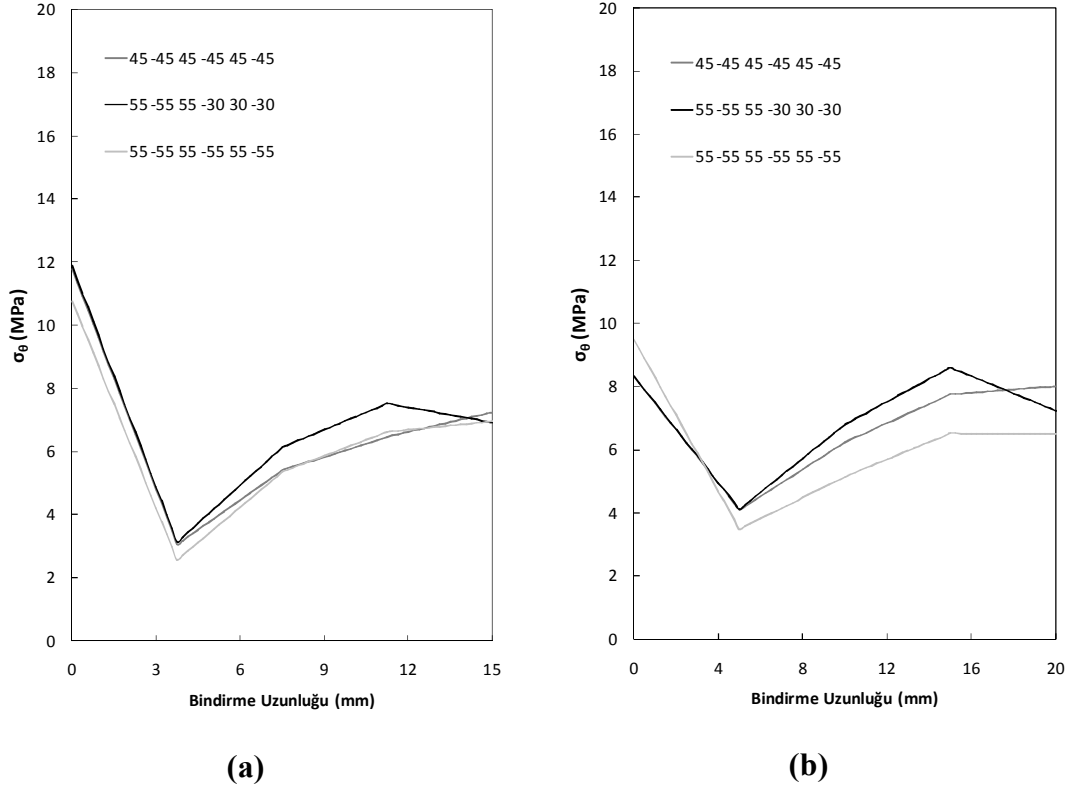


(c)



(d)

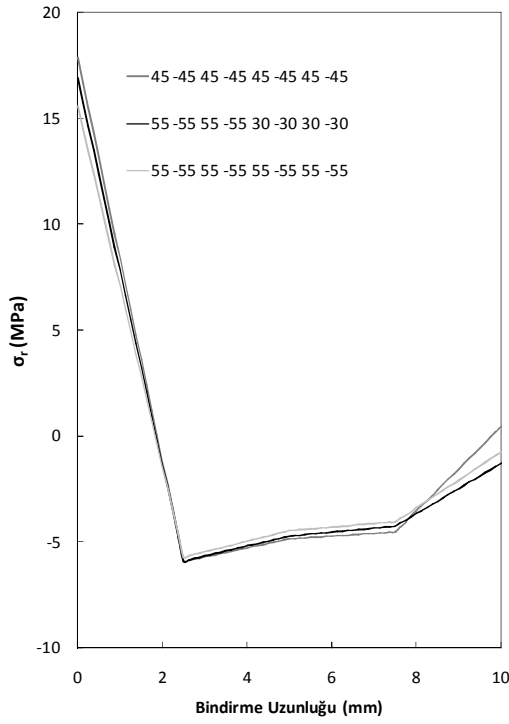
**Şekil 4.126.** DP 490 yapıştırıcı kullanarak kademeli (10 mm) olarak birleştirilen farklı oryantasyon açılı 6 tabakalı kompozit boruların C-D gerilme hattı üzerinde; (a) radyal, (b) teğetsel, (c) eksenel, (d) kayma gerilmelerinin karşılaştırılması (45<sup>0</sup>/-45<sup>0</sup>/45<sup>0</sup>/-45<sup>0</sup>/45<sup>0</sup>/-45<sup>0</sup> için 3.9 MPa, 55<sup>0</sup>/-55<sup>0</sup>/55<sup>0</sup>/-30<sup>0</sup>/30<sup>0</sup>/-30<sup>0</sup> için 4.2 MPa, 55<sup>0</sup>/-55<sup>0</sup>/55<sup>0</sup>/-55<sup>0</sup>/55<sup>0</sup>/-55<sup>0</sup> için 4.5 MPa)



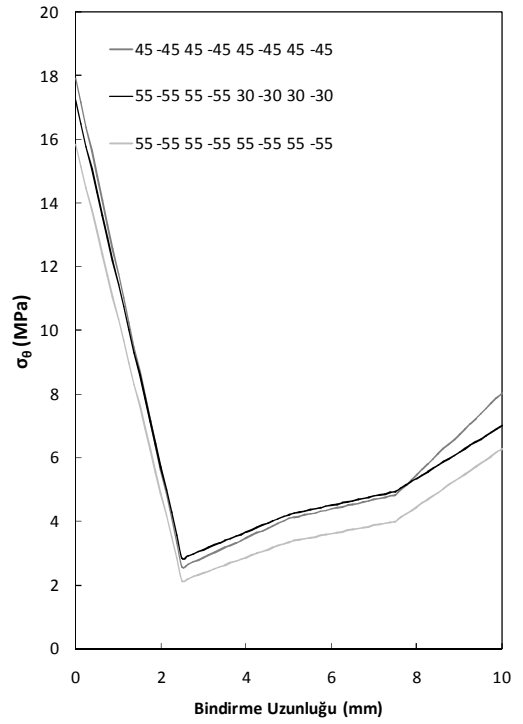
**Şekil 4.127.** Farklı oryantasyon açılı 6 tabakalı kompozit boruları kademeli olarak birleştirmede kullanılan DP 490 yapıştırıcının C-D gerilme hattı üzerinde; 15 mm yama boyunda (a) teğetsel ( $45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0$  için 4.5 MPa,  $55^0/-55^0/55^0/-30^0/30^0/-30^0$  için 5.4 MPa,  $55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$  için 6 MPa) ve 20 mm yama boyunda (b) teğetsel ( $45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0$  için 6 MPa,  $55^0/-55^0/55^0/-30^0/30^0/-30^0$  için 6.8 MPa,  $55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$  için 6.4 MPa) gerilmelerinin karşılaştırılması

Şekil 4.127’ de bindirme uzunluklarının artmasıyla gerilmelerin düştüğü görülmektedir. Bunun sebebi, bindirme uzunluğunun ve tabaka sayısının artması ile birbirlerine birleştirilen boruların ve yapıştırıcı ile sağlanan bağlantının sağlam olması, gerilme değerlerinin düşmesini sağlamıştır.

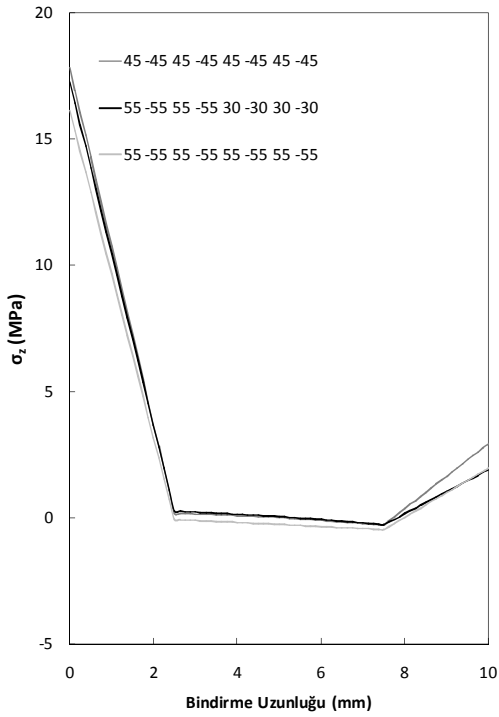
Şekil 4.128’ de tabaka sayısının artmasıyla her bir oryantasyon açısının farklı gerilme davranışları sergilediği görülmektedir. Genel olarak tabaka sayısının artmasıyla birlikte hasar iç basıncının da arttığı ve bu durumda gerilme değerlerinin de arttığı görülmektedir.



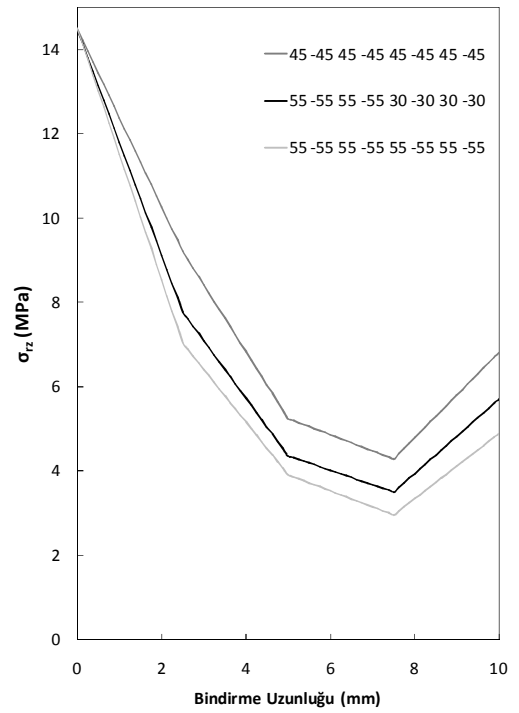
(a)



(b)

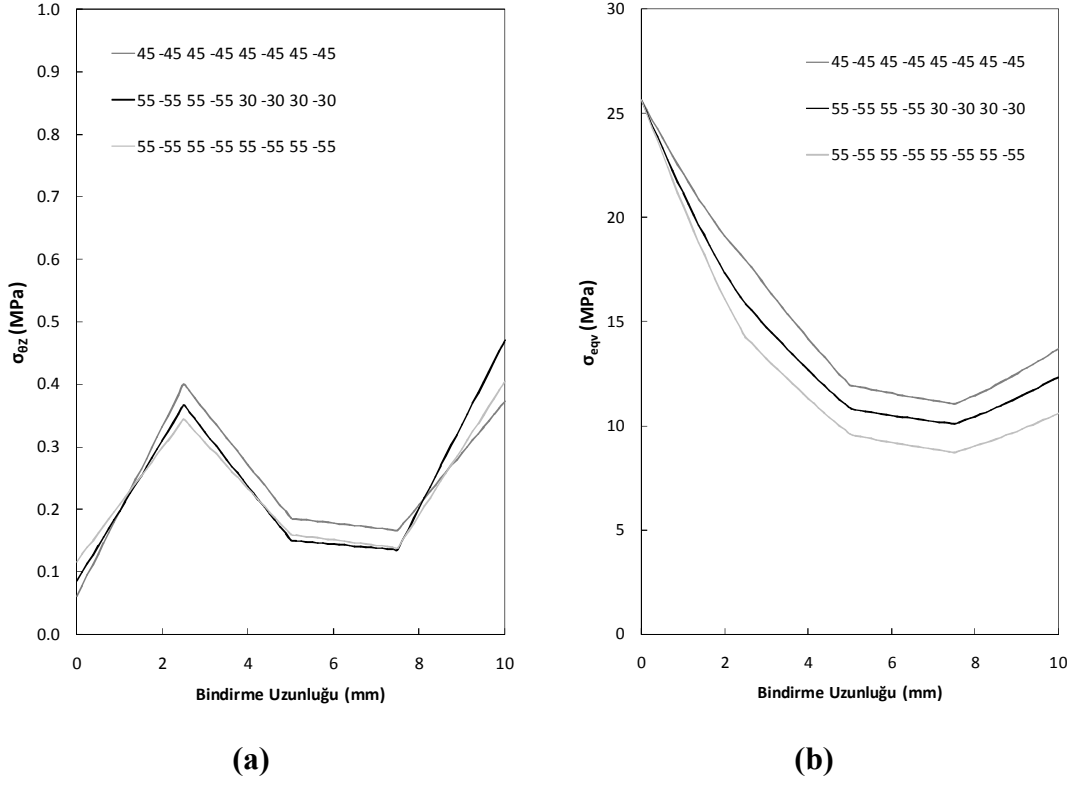


(c)



(d)

**Şekil 4.128.** Farklı oryantasyon açılı kademeli olarak (10 mm) 8 tabakalı kompozit boruların birleştirmede kullanılan DP 490 yapıştırıcının C-D gerilme hattı üzerinde; (a) radyal, (b) teğetsel, (c) eksenel, (d) kayma gerilmelerinin karşılaştırılması ( $45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0$  için 4.8 MPa,  $55^0/-55^0/55^0/-55^0/30^0/-30^0/30^0/-30^0$  için 4.8 MPa,  $55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$  için 4.8 MPa)

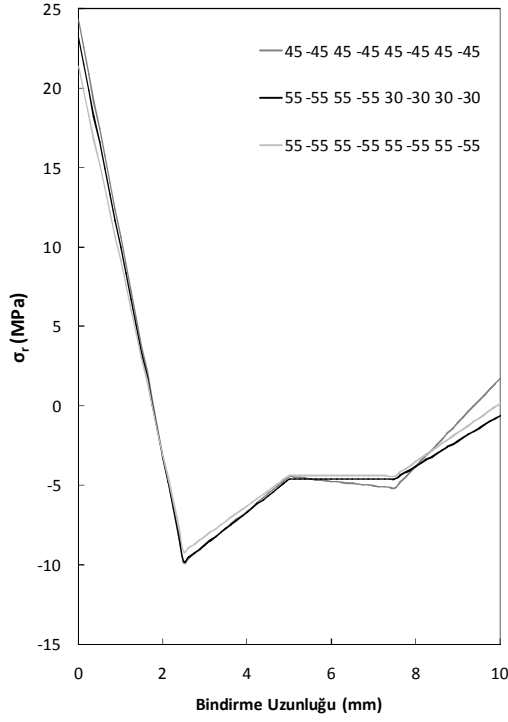


**Şekil 4.129.** Farklı oryantasyon açılı kademeli olarak (10 mm) 8 tabakalı kompozit boruların birleştirmede kullanılan DP 490 yapıştırıcının C-D gerilme hattı üzerinde; (a) kayma, (b) Von-Mises gerilmelerinin karşılaştırılması ( $45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0$  için 4.8 MPa,  $55^0/-55^0/55^0/-55^0/30^0/-30^0/30^0/-30^0$  için 4.8 MPa,  $55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$  için 4.8 MPa)

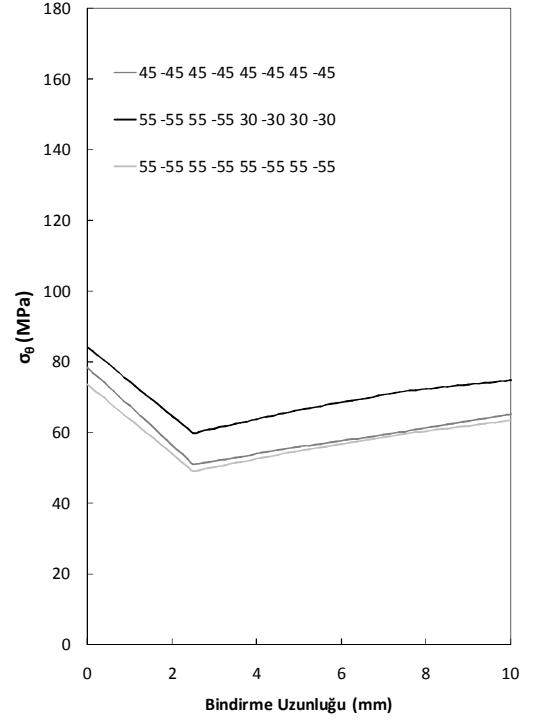
Şekil 4.129' da tabaka sayısının artmasıyla gerilme dağılımlarında farklılıklar oluşmuştur. Kayma gerilmesinin, yapıştırıcı iç yüzeyinde küçük de olsa gerilme değerinin düştüğü görülmektedir.

Şekil 4.130' da tabaka sayısının artmasıyla kompozit boru üzerinde oluşan gerilme değerleri genel olarak azalmaktadır. Fakat radyal gerilme dağılımının, diğer gerilmelerden farklı bir davranış sergilediği görülmektedir. Bu durumun oluşmasında tabaka sayısının artması ile hasar iç basıncının artmasının, gerilme ölçüm hattının seçiminin, oryantasyon açılarının ve tabaka sıralanışının sebep olduğunu söyleyebiliriz.

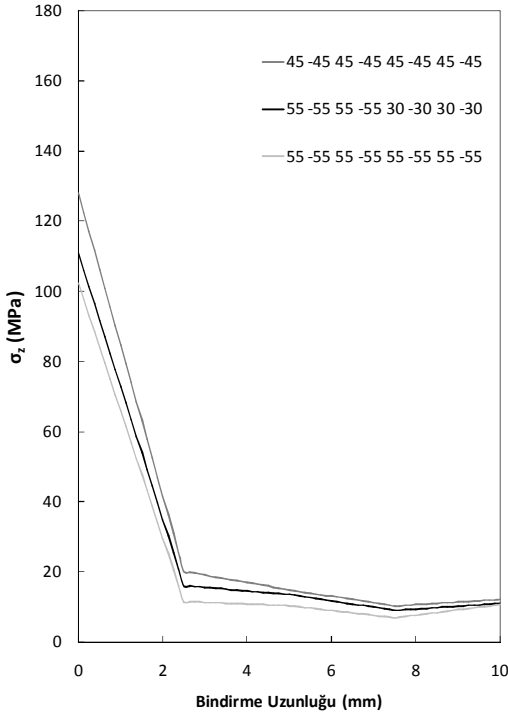




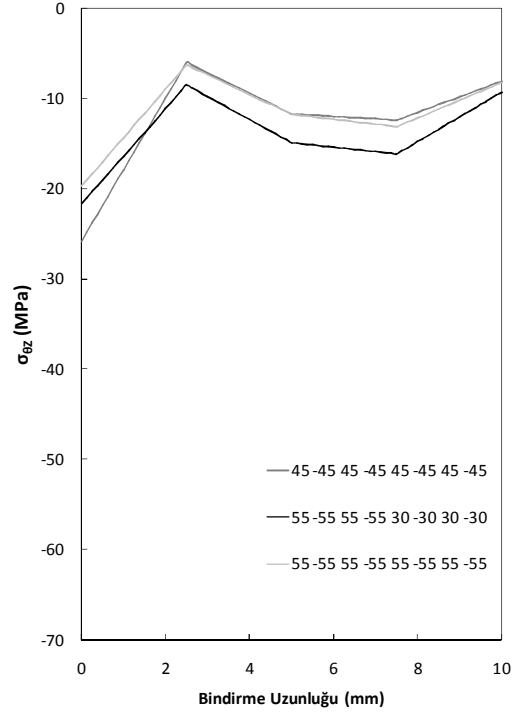
(a)



(b)

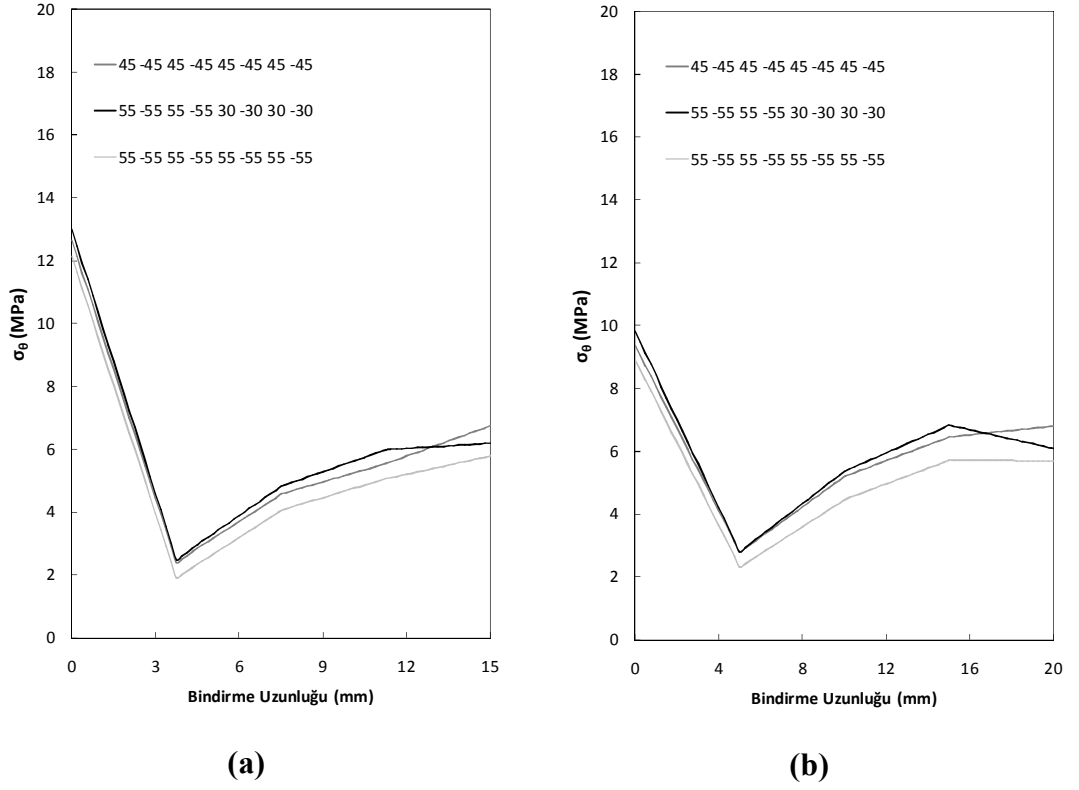


(c)



(d)

**Şekil 4.130.** DP 490 yapıştırıcısı kullanarak kademeli (10 mm) olarak birleştirilen farklı oryantasyon açılı 8 tabakalı kompozit boruların C-D gerilme hattı üzerinde; (a) radyal, (b) teğetsel, (c) eksenel, (d) kayma gerilmelerinin karşılaştırılması ( $45^{\circ}/45^{\circ}/45^{\circ}/45^{\circ}/45^{\circ}/45^{\circ}/45^{\circ}/45^{\circ}$  için 4.8 MPa,  $55^{\circ}/55^{\circ}/55^{\circ}/55^{\circ}/30^{\circ}/30^{\circ}/30^{\circ}/30^{\circ}$  için 4.8 MPa,  $55^{\circ}/55^{\circ}/55^{\circ}/55^{\circ}/55^{\circ}/55^{\circ}/55^{\circ}/55^{\circ}$  için 4.8 MPa)

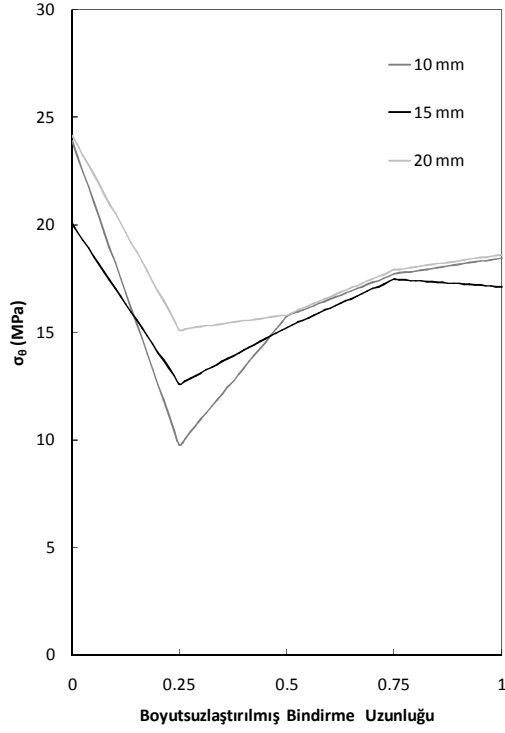


**Şekil 4.131.** Farklı oryantasyon açılı 8 tabakalı kompozit boruları kademeli olarak birleştirmede kullanılan DP 490 yapıştırıcının C-D gerilme hattı üzerinde; 15 mm yama boyunda (a) teğetsel ( $45^{\circ}/-45^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}$  için 5.2 MPa,  $55^{\circ}/-55^{\circ}/55^{\circ}/-55^{\circ}/30^{\circ}/-30^{\circ}/30^{\circ}/-30^{\circ}$  için 5.6 MPa,  $55^{\circ}/-55^{\circ}/55^{\circ}/-55^{\circ}/55^{\circ}/-55^{\circ}/55^{\circ}/-55^{\circ}$  için 6 MPa) ve 20 mm yama boyunda (b) teğetsel ( $45^{\circ}/-45^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}$  için 6.4 MPa,  $55^{\circ}/-55^{\circ}/55^{\circ}/-55^{\circ}/30^{\circ}/-30^{\circ}/30^{\circ}/-30^{\circ}$  için 6.8 MPa,  $55^{\circ}/-55^{\circ}/55^{\circ}/-55^{\circ}/55^{\circ}/-55^{\circ}/55^{\circ}/-55^{\circ}$  için 7.2 MPa) gerilmelerinin karşılaştırılması

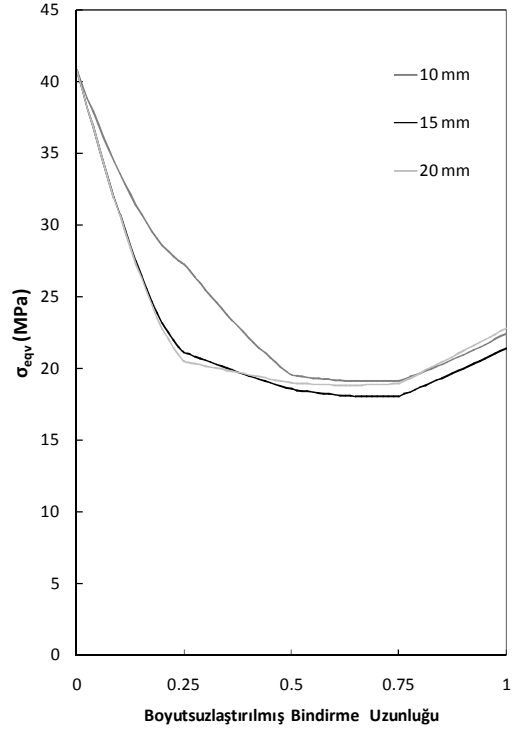
Şekil 4.131’ de bindirme uzunluklarının artmasıyla gerilme değerlerinin düştüğü görülmektedir. Bunun sebebi, bindirme uzunluğunun ve tabaka sayısının artması ile birbirlerine birleştirilen boruların ve yapıştırıcı ile sağlanan bağlantının mukavemetli olmasından, gerilme değerlerinin düştüğünü söyleyebiliriz.

#### **4.4.4.3. Bindirme uzunluğunun kademeli olarak yapıştırılan kompozit borular üzerinde etkisi**

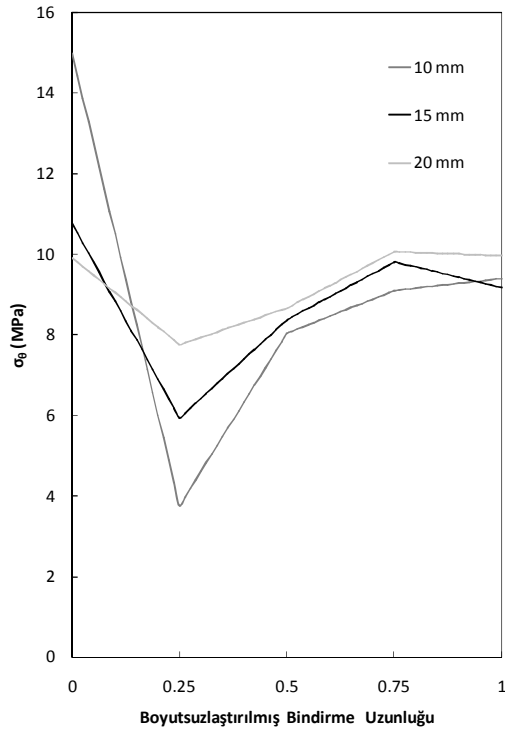
Kademeli olarak yapıştırılan kompozit borular üzerinde oluşan gerilme durumları farklı bindirme uzunluklarında incelenmiştir. Bindirme uzunluğunun her iki yapıştırıcı üzerinde etkili olduğu Şekil 4.132' de görülmektedir. Bindirme uzunluğunun artmasıyla her iki yapıştırıcı üzerinde oluşan gerilme değerlerinin düştüğü görülmektedir. Bunun sebebi, bindirme uzunluğunun artmasıyla birleştirilen bölgenin mukavemetinin artmasıdır. Şekil 4.132' de görüldüğü gibi, DP 410 yapıştırıcının DP 490 yapıştırıcıdan daha dayanıklı olduğu görülmektedir. Bindirme uzunluğunun değişimi, her iki yapıştırıcı üzerinde oluşan gerilme dağılımlarını etkilemektedir. Oluşan farklılıkların sebebi bindirme uzunluğu olduğu görülse de, yapıştırıcı malzemelerin sahip olduğu malzeme özellikleri göz ardı edilmemelidir. Yapıştırıcıların malzeme özelliklerinin farklı olmasının yanında, yapıştırıcıların kompozit borularla uyumu da önemlidir. Ayrıca oryantasyon açılarının da birleştirme işlemleri üzerinde etkileri aşağıdaki şekillerde görülmektedir. Oluşan farklılıkların diğer bir sebebi, hasar iç basınçlarının farklı olmasıdır. Çünkü farklı bindirme uzunluklarında bulunan hasar yüklerinin bir birlerinden farklı olması, hem yapıştırıcılar üzerinde hem de kompozit borular üzerinde farklı gerilme dağılımlarının oluşmasına neden olmaktadır.



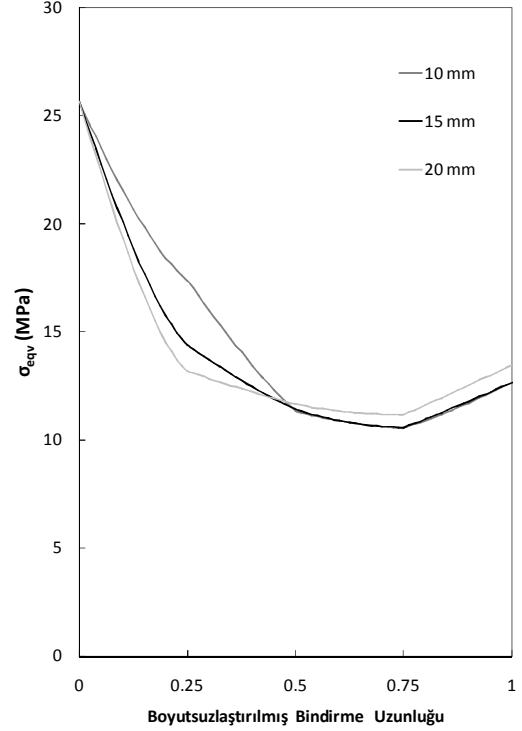
(a)



(b)



(c)



(d)

**Şekil 4.132.**  $55^0/-55^0/55^0/-55^0$  oryantasyon açılı 4 tabakalı kompozit boruların C-D gerilme hattı üzerinde kademeli olarak birleştirmede kullanılan; DP 410 yapıştırıcının 10 mm (7 MPa), 15 mm (7.5 MPa) ve 20 mm (9 MPa) yama boylarında (a) teğetsel, (b) Von-Mises ve DP 490 yapıştırıcının 10 mm (4.8 MPa), 15 mm (5.6 MPa) ve 20 mm (6.4 MPa) yama boylarında (c) teğetsel, (d) Von-Mises gerilmelerinin karşılaştırılması

## 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Yapılan çalışmalarda, iç basınç yüklemesine maruz bırakılmış kompozit borular ve bu boruların farklı birleştirme teknikleriyle yapıştırılması durumlarının analizleri yapılmıştır. Deneysel çalışmaların maliyeti yüksek olması, kompozit boruların tabaka sayısı arttıkça hasar basıncının artması ve tehlike boyutunun da bununla birlikte artması sebebiyle deneysel çalışmalarda sadece 4 tabakalı kompozit borular kullanılmıştır. Ama nümerik analizlerde kullanılmak için 4, 6 ve 8 tabakalı kompozit boruların deneysel olarak mekanik özellikleri belirlenmiştir. Bulunan bu değerler, nümerik analizlerde malzeme özellikleri için kullanılmıştır.

Deneysel çalışmalarda, 4 tabakalı kompozit borular kullanılarak bu tabaka sayısında belirlenen farklı oryantasyon açılara sahip kompozit borular ve bu borular kullanılarak yapıştırıcılar ile birleştirilen numuneler incelenmiştir. Teste tabi tutulan numunelerin hasar iç basınçları belirlenmiştir. Her bir durum için yapılan testler üçer defa tekrarlanmıştır.

Deneysel testlerde tüm parametre değerlerinde bulunan sonuçlara göre  $55^0/-55^0/55^0/-55^0$  oryantasyon açılı kompozit borular ve bu oryantasyon açısına sahip borular kullanılarak yapıştırıcı ile birleştirilen numunelerin en yüksek hasar iç basıncına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Diğer iki oryantasyon açısına sahip kompozit borularda ve bu boruların farklı birleştirme teknikleri kullanılarak oluşturulan test numunelerinde ise, yapıştırıcı türüne ve birleştirme türüne göre kendi aralarında hasar iç basınçlarının değiştiği gözlemlenmiştir. Bu durumların oluşmasında, yapıştırıcının türü, oryantasyon açısı, yapıştırılan yüzeylerin pürüzlülüğü, yüzeylerin temizliliği, yapıştırma tekniklerinde kullanılan bindirme uzunluğu, kompozit boruların üretimi esnasında fark edilemeyen kusurlar, değişen ortam sıcaklığı ve birçok çevresel etmen olduğu söylenebilir.

Nümerik çalışmalarda, 4, 6 ve 8 tabakalı kompozit borular kullanılarak bu tabaka sayılarının da belirlenen farklı oryantasyon açılara sahip kompozit borular ve bu borular kullanılarak yapıştırıcılar ile birleştirilen numuneler incelenmiştir. Nümerik analizler için modellenen 4, 6 ve 8 tabakalı kompozit borular ve bu boruların yapıştırıcılar ile birleştirilerek oluşturulan tüm modellerinin tabaka özellikleri aynıdır. Daha detaylı açıklama yaptığımızda, 4 tabakalı her bir model için kullandığımız tabakalardaki mesh yoğunluğu, eleman boyutları, tabaka kalınlıkları, eleman tipi, sabit katsayılar ve kullanılan birçok özellik, 6 ve 8 tabaka için

kullanılmıştır. Deneysel olarak yaptığımız 4 tabakalı kompozit boru ve bu boruların birleştirilmesiyle oluşturulmuş test numunelerinden elde ettiğimiz hasar iç basınçlarının, nümerik olarak elde ettiğimiz hasar iç basınçları ile yakın olduğu doğrulanmıştır. Nümerik analizler de, 6 ve 8 tabakalı kompozit borular için oluşturulan modellerde, 4 tabakalı kompozit borular için oluşturulan model üzerine aynı özelliklere sahip tabakalar eklenerek elde edilmiştir. Bu sayede bizim nümerik modellerimizin oluşturma teknikleri doğrulanmış olup 6 ve 8 tabakalarda yaptığımız nümerik modellerin de doğruluğu bu şekilde gösterilmiştir.

Yapılan nümerik analizlerde, tüm durumlar için genel olarak 4 tabakalı borularda  $55^0/-55^0/55^0/-55^0$ , 6 tabakalı borularda  $55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$ , 8 tabakalı borularda ise  $55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0/55^0/-55^0$  oryantasyon açılı borular ve bu borular kullanılarak yapıştırıcılar ile birleştirilerek oluşturulan numuneler en yüksek hasar iç basıncına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Diğer iki oryantasyon açısına sahip 4, 6 ve 8 tabakalı kompozit borularda ve bu boruların farklı birleştirme teknikleri kullanılarak oluşturulan test numunelerinde, yapıştırıcı türünün ve kompozit boruların mekaniksel özelliklerine, yükün uygulama durumuna, nümerik modelin yapıldığı paket programın oluşturduğu etkilere ve birleştirme türüne göre kendi aralarında hasar iç basınçlarının değiştiği gözlemlenmiştir.

Kompozit borular kullanılarak yapılan nümerik çalışmaların sonuçları incelendiğinde, tabaka sayısı arttıkça, hasar iç basıncı değerlerinin de arttığı gözlemlenmiştir. Deneysel ve nümerik sonuçlar karşılaştırıldığında, sonuçların birbirlerine yakın olduğu görülmüştür. Oryantasyon açılarının hasar iç basınçlarına etkisinin olduğu gösterilmiştir.

Alın altına birleştirmede kullanılan yapıştırıcı etkileri incelendiğinde, DP 410 yapıştırıcı ile yapılan birleştirmelerin DP 490 yapıştırıcı ile yapılan birleştirmelerden daha sağlam olduğu gösterilmiştir. Ayrıca deneysel ve nümerik sonuçlar karşılaştırıldığında, DP 410 yapıştırıcının kullanıldığı modellerden elde edilen sonuçlarının daha yakın olduğu gösterilmiştir. DP 410 yapıştırıcılar ile yapılan birleştirmelerde, hasar iç basınçlarının kompozit borularla yakın değerlerde olduğu gösterilmiştir.

Yama ile birleştirmede, DP 410 ve DP 490 yapıştırıcılar kullanılarak birleştirme işlemlerinde deneysel ve nümerik sonuçlar incelendiğinde, hemen hemen tüm yama uzunluklarındaki sonuçların farkı çok küçük olduğu gözlenmektedir.

Hasar yükleri incelendiğinde, DP 410 yapıştırıcının hasar iç basıncının DP 490 yapıştırıcının hasar iç basıncından daha büyük olduğu gösterilmiştir.

Kademeli olarak birleştirmede, DP 410 ve DP 490 yapıştırıcılar ile birleştirmelerin deneysel ve nümerik sonuçları incelendiğinde, tüm bindirme uzunluklarındaki sonuçların yakın olduğu gözlemlenmiştir. DP 410 yapıştırıcının mekaniksel dayanımının daha iyi olduğu gösterilmiştir.

Kompozit boruların tabaka sayılarının değişiminin, hasar iç basıncına ve gerilme dağılımları üzerine etkileri gösterilmiştir. Tüm yapıştırma tekniklerinde kullanılan kompozit boruların oryantasyon açılarının sıralanışının, birbirini takip eden tabakaların açılı yönlerinin ve açılı değerlerinin tabaka sayısının artması ile gerilme dağılımları üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Genel olarak özetleyecek olursak, bu çalışmada farklı oryantasyon açılı kompozit boruların ve bu borular kullanılarak iki farklı yapıştırıcılar ile farklı birleştirme teknikleri kullanılarak birleştirilen numuneler incelenmiştir. Deneysel çalışmalar yapılarak nümerik çalışmalar doğrulanmıştır. Yapılan çalışmaların sonunda elde edilen sonuçların gösterdiği gibi,  $\pm 55^0$  oryantasyon açılı kompozit boruların ve bu boruların farklı birleştirme teknikleri kullanılarak yapıştırma işlemlerinin yapıldığı DP 410 yapıştırıcının en yüksek hasar iç basıncına dayanabildiği gösterilmiştir. Tabaka sayısının, oryantasyon açısının ve bindirme uzunluğunun sonuçları değiştiren en büyük parametreler olduğu gösterilmiştir.

## KAYNAKLAR

- [1] E.M. Knox, M.J. Cowling, S.A. Hashim, *Creep analysis of adhesively bonded connections in GRE pipes including the effect of defects*, **Composites**, Part A 31 (2000) 583–590.
- [2] E.M. Knox, S. Lafferty, M.J. Cowling, S.A. Hashim, *Design guidance and structural integrity of bonded connections in GRE pipes*, **Composites**, Part A 32 (2001) 231–241.
- [3] Tezcan Sekercioglu, Cemal Meran, *The effects of adherend on the strength of adhesively bonded cylindrical components*, **Materials and Design**, 25 (2004) 171–175.
- [4] Jinqian Cheng, Guoqiang Li, *Stress analyses of a smart composite pipe joint integrated with piezoelectric composite layers under torsion loading*, **International Journal of Solids and Structures**, 45 (2008) 1153–1178.
- [5] Zhenyu Ouyang, Guoqiang Li, *Cohesive zone model based analytical solutions for adhesively bonded pipe joints under torsional loading*, **International Journal of Solids and Structures**, 46 (2009) 1205–1217.
- [6] Wei Xu, Guoqiang Li, *Finite difference three-dimensional solution of stresses in adhesively bonded composite tubular joint subjected to torsion*, **International Journal of Adhesion & Adhesives**, 30 (2010) 191–199.
- [7] R.R. Das, B. Pradhan, *Adhesion failure analyses of bonded tubular single lap joints in laminated fibre reinforced plastic composites*, **International Journal of Adhesion & Adhesives**, 30 (2010) 425–438.
- [8] Ramadan A. Esmaeel, Farid Taheri, *Influence of adherend's delamination on the response of single lap and socket tubular adhesively bonded joints subjected to torsion*, **Composite Structures**, 93 (2011) 1765–1774.
- [9] Avinash Parashar, Pierre Mertiny, *Adhesively bonded composite tubular joints: Review*, **International Journal of Adhesion & Adhesives**, 38 (2012) 58–68.
- [10] Dario Croccolo, Massimiliano De Agostinis, Nicolo Vincenzi, *Design of hybrid steel-composite interference fitted and adhesively bonded connections*, **International Journal of Adhesion & Adhesives**, 37 (2012) 19–25.
- [11] Steve Labbe, Jean-Marc Drouetn, *A multi-objective optimization procedure for bonded tubular-lap joints subjected to axial loading*, **International Journal of Adhesion & Adhesives**, 33 (2012) 26–35.
- [12] Tolga Dursun, *Civata bağlantılı tabakali kompozit levhalarda hasar analizi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Türkiye, 2006.
- [13] Daniel, I.M., Ishai, O., “Engineering Mechanics of Composite Materials”, Oxford University Press, New York, 1994, 37-187.
- [14] A. K. Kaw, “Mechanics of Composite Materials”, CRC Press LLC, New York, 1997, 71-128.
- [15] K. I. Tserpes, G. Labeas, P. Papanikos, Th. Kermanidis, *Strength prediction of bolted joints in graphite/epoxy composite laminates*, **Composites: Part B**, 33 (2002), 521-529.
- [16] Z. Hashin, A. Rotem, *Failure criteria for unidirectional fiber composites*, **Journal of Applied Mechanics**, 47 (1980), 329-334.
- [17] R. Kitching, D. R. Hose, *Experimental and theoretical stress analysis of multi-mitred lined glass reinforced plastic pipe bends*, **Int. J. Mech. Sci.**, Vol. 37 (1995), No. 2, pp. 97-119.



- [18] D. E. Alman, C. P. Doğan, J. A. Hawk, J. C. Rawers, *Processing, structure and properties of metal-intermetallic layered composites*, **Materials Science and Engineering**, A1 92/1 93 (1995) 624-632.
- [19] Makoto Imanaka, Hideaki Nakayama, Katsuyoshi Morikawa, Minoru Nakamura, *Evaluation of fatigue life of adhesively bonded CFRP pipe/steel rod joints*, **Composite Structures**, 31 (1995), 235-241.
- [20] C. Gargiulo, M. Marchetti, A. Rizzo, *Prediction of failure envelopes of composite tubes subjected to biaxial loadings*, **Acta Astronautica**, Vol. 39 (1996), No. 5, pp. 355-368.
- [21] S. A. Matemilola, W. J. Stronge, *Impact response of composite cylinders*, **Int. J. Solids Structures**, Vol. 34 (1997), No. 21, pp. 2669-2684.
- [22] Sarp Adali, Viktor E. Verijenko, *Minimum cost design of hybrid composite cylinders with temperature dependent properties*, **Composite Structures**, Vol. 38 (1997), No. 1-4, pp. 623-630.
- [23] Reaz A. Chaudhuri, Deokjoo Kim, *On propagation of shear crippling (Kinkband) instability in a long imperfect laminated composite cylindrical shell under external pressure*, **Int. J. Solids Structures**, Vol. 34 (1997), No. 26, pp. 3455-3486.
- [24] Gert Huysmans, Jeanne-Françoise Marsol, Ignaas Verpoest, Guido De Roeck, Lucrèce De Ridder, Jan Vansant, *A field-friendly rigid composite coupler for GRP pipes*, **Composite Structures**, 37 (1997), 155-164.
- [25] J. T. Tzeng, *Dynamic response and fracture of composite cylinders*, **Composites Science and Technology**, 58 (1998) 1443-1451.
- [26] G. Huysmans, I. Verpoest, G. De Roeck, *Structural analysis of GRP pipe couplers by using a fracture mechanical approach*, **Composites Part B**, 29B (1998), 477-487.
- [27] Michael W. Hyer, Jennifer M. McMurray, *Internally pressurized elliptical composite cylinders*, **Composite Structures**, 46 (1999), 17-31.
- [28] X.-K. Sun, S.-Y. Du, G.-D. Wang, *Bursting problem of filament wound composite pressure vessels*, **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, 76 (1999), 55-59.
- [29] E. M. Knox, M. J. Cowling, S. A. Hashim, *Fatigue performance of adhesively bonded connections in GRE pipes*, **International Journal of Fatigue**, 22 (2000), 513-519.
- [30] J. H. Zhao, X. Chen, L. R. Dharani, F. S. Ji, *Stress analysis of a multilayered composite cylinder with defects*, **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, 34 (2000), 143-153.
- [31] J. H. Zhao, X. N. Jing, W. P. Howson, F. W. Williams, *Stress analysis of a multilayered composite cylinder with broken fibres over a finite region*, **Composites Science and Technology**, 61 (2001), 2361-2370.
- [32] Viktor E. Verijenko, Sarp Adali, Pavel Y. Tabakov, *Stress distribution in continuously heterogeneous thick laminated pressure vessels*, **Composite Structures**, 54 (2001), 371-377.
- [33] M. Xia, H. Takayanagi, K. Kemmochi, *Analysis of multi-layered filament-wound composite pipes under internal pressure*, **Composite structures**, 53 (2001), 483-491.
- [34] M. Xia, H. Takayanagi, K. Kemmochi, *Bending behavior of filament-wound fiber-reinforced sandwich pipes*, **Composite structures**, 56 (2002), 201-210.
- Levend Parnas, Nuran Katırcı, *Design of fiber-reinforced composite pressure*

- [35] *vessels under various loading conditions*, **Composite Structures**, 58 (2002), 83–95.
- [36] Hiroyuki Matsunaga, *Interlaminar stress analysis of laminated composite and sandwich circular arches subjected to thermal/mechanical loading*, **Composite Structures**, 60 (2003), 345–358.
- [37] Zheng-Ming Huang, *Flexural strength of a composite cylinder incorporated with thermal residual stresses*, **Materials Science and Engineering**, A366 (2004), 367–380.
- [38] Fujun Liu, Jinyang Zheng, Ping Xu, Mingze Xu, Guohui Zhu, *Forming mechanism of double-layered tubes by internal hydraulic expansion*, **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, 81 (2004), 625–633.
- [39] Necmettin Tarakçioğlu, Lokman Gemi, Ahmet Yapici, *Fatigue failure behavior of glass/epoxy ± 55 filament wound pipes under internal pressure*, **Composites Science and Technology**, 65 (2005), 703–708.
- [40] M. Farshad, *Determination of the long-term hydrostatic strength of multilayer pipes*, **Polymer Testing**, 24 (2005), 1041–1048.
- [41] Onur Sayman, *Analysis of multi-layered composite cylinders under hygrothermal loading*, **Composites: Part A**, 36 (2005), 923–933.
- [42] M. P. Kruijer, L. L. Warnet, R. Akkerman, *Analysis of the mechanical properties of a reinforced thermoplastic pipe (RTP)*, **Composites: Part A**, 36 (2005), 291–300.
- [43] G.P. Zou, F. Taheri, *Stress analysis of adhesively bonded sandwich pipe joints subjected to torsional loading*, **International Journal of Solids and Structures**, 43 (2006), 5953–5968.
- [44] Gerson Marinucci, Arnaldo H. P. de Andrade, *Microstructural analysis in asymmetric and un-balanced composite cylinders damaged by internal pressure*, **Composite Structures**, 72 (2006), 86–90.
- [45] F. M. Chen, M. H. Shen, S. N. Chen, *An exact thermopiezoelectricity solution for a three-phase composite cylinder*, **International Journal of Engineering Science**, 44 (2006), 1482–1497.
- [46] P. Casari, F. Jacquemin, P. Davies, *Characterization of residual stresses in wound composite tubes*, **Composites: Part A**, 37 (2006), 337–343.
- [47] E. E. Theotokoglou, *Behaviour of thick composite tubes considering of delamination*, **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, 46 (2006), 276–285.
- [48] P. Y. Tabakov, E. B. Summers, *Lay-up optimization of multilayered anisotropic cylinders based on a 3-D elasticity solution*, **Computers and Structures**, 84 (2006), 374–384.
- [49] J.M. Lees, *Behaviour of GFRP adhesive pipe joints subjected to pressure and axial loadings*, **Composites: Part A**, 37 (2006), 1171–1179.
- [50] Jinqian Cheng, Xiaoxia Wu, Guoqiang Li, Farid Taheri, Su-Seng Pang, *Development of a smart composite pipe joint integrated with piezoelectric layers under tensile loading*, **International Journal of Solids and Structures**, 43 (2006), 5370–5385.
- [51] M. P. Kruijer, L. L. Warnet, R. Akkerman, *Modelling of the viscoelastic behaviour of steel reinforced thermoplastic pipes*, **Composites: Part A**, 37 (2006), 356–367.
- [52] X. Castello, S.F. Estefen, *Limit strength and reeling effects of sandwich pipes*

- with bonded layers, **International Journal of Mechanical Sciences**, 49 (2007), 577–588.
- [53] E. N. Buarque, J. R. M. d'Almeida, *The effect of cylindrical defects on the tensile strength of glass fiber/vinyl-ester matrix reinforced composite pipes*, **Composite Structures**, 79 (2007), 270–279.
- [54] Jinquan Cheng, Xiaoxia Wu, Guoqiang Li, Su-Seng Pang, Farid Taheri, *Design and analysis of a smart composite pipe joint system integrated with piezoelectric layers under bending*, **International Journal of Solids and Structures**, 44 (2007), 298–319.
- [55] P. Mertiny, K. Ursinus, *A methodology for assessing fatigue degradation of joined fibre-reinforced polymer composite tubes*, **Polymer Testing**, 26 (2007), 751–760.
- [56] Jerry Alan Peck, Randy A. Jones, Su-Seng Pang, Guoqiang Li, Brett H. Smith, *UV-cured FRP joint thickness effect on coupled composite pipes*, **Composite Structures**, 80 (2007), 290–297.
- [57] Nils Petter Vedvik, Claes-Göran Gustafson, *Analysis of thick walled composite pipes with metal liner subjected to simultaneous matrix cracking and plastic flow*, **Composites Science and Technology**, 68 (2008), 2705–2716.
- [58] J. Hu, K. Chandrashekhara, *Fracture analysis of hydrogen storage composite cylinders with liner crack accounting for autofrettage effect*, **International Journal of Hydrogen Energy**, 34 (2009), 3425–3435.
- [59] Aziz Onder, Onur Sayman, Tolga Dogan, Necmettin Tarakcioglu, *Burst failure load of composite pressure vessels*, **Composite Structures**, 89 (2009), 159–166.
- [60] Lokman Gemi, Necmettin Tarakçıoğlu, Ahmet Akdemir, Ömer Sinan Şahin, *Progressive fatigue failure behavior of glass/epoxy ( $\pm 75$ )<sub>2</sub> filament-wound pipes under pure internal pressure*, **Materials and Design**, 30 (2009), 4293–4298.
- [61] H. Bakaiyan, H. Hosseini, E. Ameri, *Analysis of multi-layered filament-wound composite pipes under combined internal pressure and thermomechanical loading with thermal variations*, **Composite Structures**, 88 (2009), 532–541.
- [62] P. Hutar, L. Sestakova, Z. Knesl, E. Nezbedova, L. Nahlík, *Special fracture mechanics specimens for multilayer plastic pipes testing*, **Polymer Testing**, 28 (2009), 785–792.
- [63] Igor Tsukrov, Borys Drach, *Elastic deformation of composite cylinders with cylindrically orthotropic layers*, **International Journal of Solids and Structures**, 47 (2010), 25–33.
- [64] P. Hutař, L. Nahlík, L. Šestáková, M. Ševčík, Z. Knésl, E. Nezbedová, *A fracture mechanics assessment of surface cracks existing in protective layers of multi-layer composite pipes*, **Composite Structures**, 92 (2010), 1120–1125.
- [65] B. Haghpanah Jahromi, A. Ajdari, H. Nayeb-Hashemi, A. Vaziri, *Autofrettage of layered and functionally graded metal–ceramic composite vessels*, **Composite Structures**, 92 (2010), 1813–1822.
- [66] M. Torres Arellano, L. Crouzeix, B. Douchin, F. Collombet, H. Hernández Moreno, J. González Velázquez, *Strain field measurement of filament-wound composites at  $\pm 55^\circ$  using digital image correlation: An approach for unit cells employing flat specimens*, **Composite Structures**, 92 (2010), 2457–

2464.

- [67] R. Ansari, F. Alisafaei, P. Ghaedi, *Dynamic analysis of multi-layered filament-wound composite pipes subjected to cyclic internal pressure and cyclic temperature*, **Composite Structures**, 92 (2010), 1100–1109.
- [68] Ren Jiu-sheng, Zhou Jin-wen, Yuan Xuegang, *Instability analysis in pressurized three-layered fiber-reinforced anisotropic rubber tubes in torsion*, **International Journal of Engineering Science**, 49 (2011), 342–353.
- [69] Avinash Parashar, Pierre Mertiny, *Impact of scaling on fracture strength of adhesively bonded fibre-reinforced polymer piping*, **Procedia Engineering**, 10 (2011), 455–459.
- [70] Kaveh Arjomandi, Farid Taheri, *Bending capacity of sandwich pipes*, **Ocean Engineering**, 48 (2012), 17–31.
- [71] M. Bouhafs, Z. Sereir, A. Chateaneuf, *Probabilistic analysis of the mechanical response of thick composite pipes under internal pressure*, **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, 95 (2012), 7-15.
- [72] Chongxin Yuan, N. Bert Roozen, Otto Bergsma, Adriaan Beukers, *Experimental-numerical study and optimization of sound insulation of a finite composite cylinder*, **Engineering Analysis with Boundary Elements**, 37 (2013), 250–259.
- [73] Md Shamsuddoha, Md Mainul Islam, Thiru Aravinthan, Allan Manalo, Kintak Lau, *Effectiveness of using fibre-reinforced polymer composites for underwater steel pipeline repairs*, **Composite Structures**, 100 (2013), 40–54.
- [74] P. Hutař, M. Zouhar, L. Náhlík b, M. Ševčík, B. Máša, *Multilayer polymer pipes failure assessment based on a fracture mechanics approach*, **Engineering Failure Analysis**, 33 (2013), 151–162.
- [75] Song Lin, Xiaolong Jia, Hongjie Sun, Hongwei Sun, David Hui, Xiaoping Yang, *Thermo-mechanical properties of filament wound CFRP vessel under hydraulic and atmospheric fatigue cycling*, **Composites: Part B**, 46 (2013), 227–233.
- [76] Roham Rafiee, *Experimental and theoretical investigations on the failure of filament wound GRP pipes*, **Composites: Part B**, 45 (2013), 257–267.
- [77] Mehmet Emin Deniz, Mustafa Ozen, Okan Ozdemir, Ramazan Karakuzu, Bulent Murat Icten, *Environmental effect on fatigue life of glass–epoxy composite pipes subjected to impact loading*, **Composites: Part B**, 44 (2013), 304–312.
- [78] Avinash Parashar, Pierre Mertiny, *Failure mechanism in adhesively bonded FRP pipe sections with different fibre architecture*, **Composites: Part B**, 47 (2013), 102–106.
- [79] L.L. Aguiar, C.A. Almeida, G.H. Paulino, *A three-dimensional multilayered pipe beam element: Nonlinear Analysis*, **Computers and Structures**, 138 (2014), 142–161.
- [80] Chen An, Menglan Duan, Romildo D. Toledo Filho, Segen F. Estefen, *Collapse of sandwich pipes with PVA fiber reinforced cementitious composites core under external pressure*, **Ocean Engineering**, 82 (2014), 1–13.
- [81] G. R. Liu and S. S. Quek, “The Finite Element Method A Practical Course”, Elsevier Science Ltd., Burlington, 2003, 1-2.
- [82] Erdogan Madenci, Ibrahim Guven, “The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS”, Springer Science+Business

- Media, LLC, New York, 2006, 1-14.
- [83] M. J. Turner, R. W. Clough, H. C. Martin and L. J. Topp, *Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structures*, **Journal of the Aeronautical Sciences**, Vol. 23(1956), pp. 805-823.
- [84] M. J. Fagan, "Finite Element Analysis Theory and Practice", Longman, New York, 1992, 61-201.
- [85] R. D. Cook, "Finite Element Modeling for Stress Analysis", John Wiley & Sons Ltd., New York, 1995, 1-144.
- [86] P. Joyce. 2003. [http://www.usna.edu/Users/mecheng/pjoyce/composites/Short\\_Course\\_2003/12\\_PAX\\_Short\\_Course\\_Mechanical-Testing](http://www.usna.edu/Users/mecheng/pjoyce/composites/Short_Course_2003/12_PAX_Short_Course_Mechanical-Testing).
- [87] Dan Adams. 2010. [https://www.niar.wichita.edu/niarworkshops/Portals/0/Composite%20Materials%20Test%20Methods\\_DanAdams.pdf](https://www.niar.wichita.edu/niarworkshops/Portals/0/Composite%20Materials%20Test%20Methods_DanAdams.pdf).
- [88] S. Aydın, M.Y. Solmaz, A. Turgut, Epoksi ve Akrilik Bazlı Yapıştırıcıların Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi, 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), Elazığ, Turkey, 16-18 May (2011), pp.383-388.

## ÖZGEÇMİŞ

**Adı Soyadı:** İsmail Yasin SÜLÜ

**Doğum Yeri ve Tarihi:** Doğanşehir-1984

**Adres:** İnönü Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği  
Bölümü, 44280, Malatya

**E-Posta:** ismail.sulu@inonu.edu.tr

**Lisans:** İnönü Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği

**Yüksek Lisans:** Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine  
Mühendisliği Bölümü

**Mesleki Deneyim ve Ödüller:** 2006 yılında İnönü Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden bölüm üçüncüsü olarak mezun oldu. 2010 yılında Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans eğitimini tamamladı. 2008-2009 yıllarında yüksek lisans eğitimi sırasında proje asistanı olarak tübitak projesinde görev aldı. 2009 yılında İnönü Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak çalışmaya başladı. 2010 yılında İnönü Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak doktora eğitimine başladı. Temmuz 2012-Eylül 2012 tarihleri arasında DAAD bursu ile Alamanya'nın Marburg şehrinde bulunan Speak&Write dil okulunda almanca dil eğitimi aldı. Hala İnönü Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır. Kendisi ileri düzeyde ingilizce ve orta seviyede almanca bilmektedir.

## **Yayın Listesi:**

### **SCI kapsamındaki hakemli dergilerde yayınlanan yayınlar**

1. Eray Arslan, **Ismail Y. Sulu,**” Yielding of a Two-Layer Curved Bar under Pure Bending”, *Zamm- Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 94, No. 9, 713 – 720, (2014).
2. **Ismail Y. Sulu**, A. O. Ayhan, “Sensitivities of Two-Dimensional Fracture Problems to the Near-tip Mesh Parameters”, *International Journal of Fracture*, Volume 177, Issue 2, pp 207-214, (2012).

### **Ulusal hakemli dergilerde yayımlanan makaleler:**

3. **İsmail Yasin SÜLÜ**, Ali Osman AYHAN, “Mesh Sensitivity Studies For Mixed-Mode Two Dimensional Fracture Problems Using Displacement Correlation Technique,” *Ç.Ü Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27-3,94-103, (2012).

### **Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitabında basılan bildiriler:**

4. **Ismail Y. Sulu**, Ali O. Ayhan, “Mesh Sensitivity Studies for Two-Dimensional Mixed-Mode Fracture Problems Using Displacement Correlation Technique,” *Proceedings of 13th International Materials Symposium*, Denizli, 929-937, (2010).
5. **Sülü İ. Y.**, Arslan E, "Elastic-Plastic States of Two-layer Curved Bar Under Pure Bending”, *83rd Annual Meeting of the International Association of Applied Mathematics and Mechanics (GAMM)*, 12, 229-230, Darmstadt, Almanya, (2012).

### **Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitabında basılan bildiriler:**

6. Eray Arslan, **İsmail Yasin Sülü**, “Basit Eğilme Altında Eğri Eksenli İki Katmanlı Kompozit Kirişin Akması”, XVII. Ulusal Mekanik Kongresi, 126-132, Elazığ, (2011).