

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TABAKALI KOMPOZİT MALZEMELERİN
BURKULMA DAVRANIŞINA ÇOKLU
SÜREKSİZLİK BÖLGESİNİN ETKİSİ

Galip İPEK

Mart, 2015
İZMİR

**TABAKALI KOMPOZİT MALZEMELERİN
BURKULMA DAVRANIŞINA ÇOKLU
SÜREKSİZLİK BÖLGESİNİN ETKİSİ**

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Mekanik Programı**

Galip İPEK

**Mart, 2015
İZMİR**

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

GALİP İPEK, tarafından **DOÇ. DR. YUSUF ARMAN** yönetiminde hazırlanan **“TABAKALI KOMPOZİT MALZEMELERİN BURKULMA DAVRANIŞINA ÇOKLU SÜREKSİZLİK BÖLGESİNİN ETKİSİ”** başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.



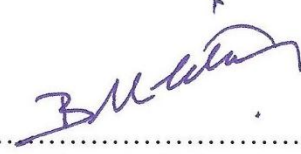
Doç. Dr. Yusuf ARMAN

Yönetici



Prof. Dr. Mustafa TOPARLI

Jüri Üyesi



Doç. Dr. Bülent Murat İÇTEN

Jüri Üyesi



Prof. Dr. Ayşe OKUR

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŐEKKÖR

Tez çalıőmam sırasında bana her konuda yardımcı olan, yol gösteren ve destek olan tez danıőmanım Sayın Doç. Dr. Yusuf ARMAN'a çok teőekkr ederim.

Ayrıca eğitim hayatım boyunca her zaman yanımda olan, bana maddi ve manevi destekte bulunan aileme de çok teőekkr ederim.

Galip İPEK

TABAKALI KOMPOZİT MALZEMELERİN BURKULMA DAVRANIŞINA ÇOKLU SÜREKSİZLİK BÖLGESİNİN ETKİSİ

ÖZ

Kompozit malzemeler endüstride çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Kompozit malzemelerin bir türü olan tabakalı kompozit malzemeler en yaygın olarak kullanılan türlerinden biridir. Tabakalı kompozit malzemeler çeşitli nedenlerden (tabakalar arası dirençlilik farklılıkları, darbeli yüklemeler, üretimden kaynaklanan hatalar, vb.) dolayı tabakalar arasında süreksizlikler (delaminasyonlar) meydana gelebilmektedir. Tabakalı kompozit malzemelerde süreksizliklerin oluşması tabakalı kompozit malzemelerin özelliklerini olumsuz olarak etkilemektedir. Süreksizliklerin (delaminasyonların) geometrisi, tabakalar arasındaki sayıları ve pozisyonlarının değişmesi malzemelerin mekanik davranışlarını her bir durum için farklı seviyelerde olsa da olumsuz olarak etkilemektedir. Bu nedenden dolayı bu çalışmada, tabakalı kompozit malzemelerin burkulma davranışları üzerine delaminasyonların boyutlarının, sayılarının ve pozisyonlarının değişimlerinin tabakalı kompozit malzemelerin mekanik özellikleri üzerine etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Burkulma deneyleri sonucu yük-deplasman grafikleri elde edilmiştir. Elde edilen yük-deplasman grafiklerinden kritik burkulma yükleri (P_{kr}) tespit edilmiştir. Ayrıca, uygulanan yükün etkisi ile, delaminasyon bölgesinin yapmış olduğu plaka kalınlığı yönündeki (transvers) deplasmanlar da tespit edilmiştir. Elde edilen (P_{kr}) kritik burkulma yüklerinin birbirleri ile karşılaştırılması ile çoklu delaminasyon bölgelerine sahip bir kompozit malzeme için optimum bir delaminasyon sayısı ve delaminasyon boyutu gibi özellikler tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Tabakalı kompozit malzeme, çoklu delaminasyon, mekanik davranış, burkulma, kritik burkulma yükü, transvers, kalınlık yönündeki deplasmanlar

EFFECT OF MULTIPLE DELAMINATIONS ON BUCKLING BEHAVIOR OF LAMINATED COMPOSITE MATERIALS

ABSTRACT

Composites are being user in many different fields. Layered composites are one of the most used composite kind in industry. There can be discontinuities due to various reasons (resistence differences between layers, pulsed loadings, defects in production etc.). These discontinuities effects to layered composites negatively. The geometry of discontinuities (delaminations), their amounts between layers and their positions effects to composite's mechanical properties in many levels but always negatively. So that, in this study; positioning, how numbering between layers and geomety of delaminations effects to layered composites' mechanical properties in buckling behaviour are inspected experimentally. As a result of buckling experiment, loading displacement graphic has obtained. Critic buckling load has calculated by loading displacement graph. Additionally, transverse displacements are obtained, which occured with the effect of applied load in delamination area in direction of plate thickness. Comparision of critic buckling loads and such properties like optimum amount and dimension of a delemination have obtained.

Keywords: Laminated composite, multiple delamination, mechanic behavior, buckling, critical buckling load, transvers, displacements in direction of plate thickness.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU Hata! tanımlanmamış.	Yer işareti
TEŞEKKÜR.....	ii
ABSTRACT.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
TABLolar LİSTESİ.....	xv
BÖLÜM BİR - GİRİŞ.....	1
BÖLÜM İKİ - KOMPOZİT MALZEMELER	3
2.1 Kompozit Malzemelerin Tanımı	3
2.2 Kompozitlerin Olumlu ve Olumsuz Özellikleri	5
2.2.1 Kompozit Malzemelerin Olumlu Özellikleri.....	6
2.2.2 Kompozit Malzemelerin Olumsuz Özellikleri;.....	10
2.3 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	11
2.3.1 Matris Malzemelerine Göre Sınıflandırmada	11
2.3.1.1 Metal Matrisli Kompozitler.....	11
2.3.1.2 Seramik Matrisli Kompozitler.....	12
2.3.1.3 Polimer Matrisli Kompozitler	13
2.3.1.3.1 Plastik - Plastik Kompozitler	13
2.3.1.3.2 Plastik - Cam Elyaf Kompozitler	14
2.3.1.3.3 Plastik - Metal Fiber Kompozitler	14
2.3.1.3.4 Plastik - Köpük Kompozitler	14
2.3.2 Takviye Elemanlarının Şekil ve Yerleştirilmesine Göre Sınıflandırılması	15

2.3.2.1 Elyaf Takviyeli Kompozitler.....	16
2.3.2.2 Parçacıklı Kompozitler.....	17
2.3.2.3 Karma (Hibrid) Kompozitler.....	17
2.3.2.4 Tabakalı Kompozitler.....	18
2.3.3 Kompozit Malzemelerin Yapım Metoduna Göre Sınıflandırılması	19
2.3.3.1 Karışık Malzeme ve Sinterleme	19
2.3.3.2 Yüzey Kaplamaları (Koruyucu Kaplamalar)	19
2.3.3.3 Lif Takviyesi	20
2.4 Kompozit Malzemeyi Oluşturan Elemanlar	20
2.4.1 Takviye Elemanları.....	20
2.5 Kompozit Malzeme Kullanım Alanları	24
2.5.1 Havacılık ve Uzay Sanayi.....	24
2.5.1.1 Havacılıkta Kullanılan Kompozit Bileşenleri	25
2.5.2 Denizcilik Sanayi	27
2.5.3 Spor Araçları.....	27
2.5.4 Korozyona Dayanıklı Ürünler	28
2.5.5 Ulaşım.....	29
2.5.6 Otomotiv	30
2.5.7 Yapı Sektörü	30
2.6 Kompozit Malzeme Üretim Yöntemleri.....	31
2.6.1 Elle Yatırma (hand lay-up)	31
2.6.2 Püskürtme (spray-up).....	32
2.6.3 Elyaf Sarma (filament winding)	32
2.6.4 Reçine Transfer Kalıplama (RTM / reçine enjeksiyonu).....	33
2.6.5 Profil Çekme (pultrüzyon).....	33
2.5.6 Hazır Kalıplama (compression molding).....	33

2.5.7 Vakum Torbası	34
2.5.8 Otoklav.....	34
BÖLÜM ÜÇ - TABAKALIKOMPOZİTMALZEMELER	36
3.1 Tabakalı Kompozitleri Sınıflandırılması.....	36
3.1.1 Simetrik Tabakalı Kompozit Malzemler	38
3.1.2 Antisimetrik Yapılı Tabakalı Kompozit Malzemeler	39
3.2 Tabakalı Kompozitlerde Kullanılan Dokumalar	40
BÖLÜM DÖRT - DELAMİNASYON	41
4.1 Delaminasyon Tanımı	41
4.2 Delaminasyon Oluşumunun Nedenleri	41
4.2.1 İmalat Kusurları	42
4.2.2 Darbe Hasarı	42
4.2.2.1 Yüksek Hız Darbesi (high velocity impact- HVI)	43
4.2.2.2 Düşük Hız Darbesi (low velocity impact-LVI).....	43
4.2.3 Üç Boyutlu İnterlaminer Gerilmeler.....	43
4.2.4 Kompresif Yükleme.....	44
4.3 Tabakalı Kompozit Malzemelerde Delaminasyon Hasarı.....	44
BÖLÜM BEŞ - BURKULMA	47
5.1 Burkulmaya Genel Bakış.....	47
5.2 Delaminasyona Sahip Kompozit Malzemelerin Burkulması	51

BÖLÜM ALTI - MALZEME VE YÖNTEM.....	53
6.1 Kompozit Plakaların Üretilmesi ve Deney Numunelerinin Hazırlanması	53
6.1.1 Vakum Torbalama ile Üretim	54
6.2 Burkulma Deneyleri	65
BÖLÜM YEDİ - DENEY SONUÇLARI	78
7.1 Kritik Burkulma Yüğü (P_{kr}) – Deplasman Karşılaştırılması	78
7.2 Kritik Burkulma Yüğü (P_{kr}) - Yanal Deplasman Karşılaştırılması	92
BÖLÜM SEKİZ - SONUÇLAR.....	106
KAYNAKLAR	109

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Kompozit malzemenin fazları	4
Şekil 2.2 Çelik, alüminyum ve kompozit malzemelerin farklı özellikleri	5
Şekil 2.3 Kompozit ve geleneksel malzemelerin mekanik özellikleri	9
Şekil 2.4 Malzemelerin özgül mukavemet değerlerinin zamanla gelişimi.....	9
Şekil 2.6 Tabakalı kompozit malzeme	18
Şekil 2.7 Matris ve takviye malzemeleri dayanım-kopma uzaması karşılaştırılması ..	22
Şekil 2.8 Karbon-epoksi ile yapılmış bir uydu gövdesi	31
Şekil 3.1 Laminelerin ana türleri	37
Şekil 3.2 Laminat yapısının ayrılmış görüntüsü	38
Şekil 3.3 İzotropik tabakalardan oluşan simetrik tabakalı kompozit.....	38
Şekil 3.4 Ortotropik tabakalardan oluşan simetrik tabakalı kompozit.....	39
Şekil 3.5 Antisimetrik tabakalar	40
Şekil 4.1 Delme işlemi sonucu oluşan delaminasyon	42
Şekil 4.2 a)Tüm alt yüzeyi ve b) Sadece kenarları destekli tabakalı kompozit.....	45
Şekil 4.3 Tersüçgen ve düz üçgen biçiminde oluşan delaminasyon	46
Şekil 5.1 Esnek burkulma.....	49
Şekil 5.2 Esnek burulma burkulması.....	49
Şekil 5.3 Yanal burkulma	50
Şekil 5.4 Yanal-burulma burkulması.....	50
Şekil 5.5 Delaminasyon modları	52
Şekil 6.1 Dokuma (woven) kumaş yapısı.....	54
Şekil 6.2 Üretim yapılan ısıtmalı masanın ısı ayarları	56
Şekil 6.3 Vakum destekli reçine infüzyon sistemi	56
Şekil 6.4 Vakum destekli reçine infüzyon sisteminin ısı yalıtımı yapılmış durumu....	56
Şekil 6.5 Vakum destekli reçine infüzyon sistemi ile üretim.....	57
Şekil 6.6 Vakum destekli reçine infüzyon sistemi ile üretim.....	57
Şekil 6.7 Vakum destekli reçine infüzyon sistemi ile üretim.....	57
Şekil 6.8 Torba içindeki kompozit yapının görünüşü	58
Şekil 6.9 Üretim sonrası elde edilen kompozit plaka	58
Şekil 6.10 Üretim sonrası elde edilen kompozit plaka.....	58
Şekil 6.11 Plakalardan kesilerek üretilen numuneler	59

Şekil 6.12 Plakalardan kesilerek üretilen numuneler	59
Şekil 6.13 Plakalardan kesilerek üretilen numuneler	59
Şekil 6.14 8 tabakalı tabakalı [(0/90) ₄] _s kompozit plaka	60
Şekil 6.15 8 tabakalı tabakalı [(0/90) ₄] _s kompozit plaka ve bir delaminasyonun yerleşimi	61
Şekil 6.16 8 tabakalı tabakalı [(0/90) ₄] _s kompozit plaka ve 3 delaminasyonun yerleşimi	61
Şekil 6.17 Burkulma test numunesi boyutları	61
Şekil 6.18 Deneylelerdeki numune noları, delaminasyon sayıları, delaminasyon boyutları ve konumları	63
Şekil 6.19 Belirtilen oranlarda 3 delaminasyonun yerleşiminin şematik olarak gösterimi	64
Şekil 6.20 Burkulma şematik gösterimi	65
Şekil 6.21 100 kN yük kapasiteli Shimadzu AG-X	66
Şekil 6.22 Shimadzu AG-X ve yanal deplasman tespit için datalogger	66
Şekil 6.23 Burkulma test düzeneği	67
Şekil 6.24 2 nolu numuneye ait kuvvet-deplasman ve kuvvet-yanal deplasman grafikleri	68
Şekil 6.25 3 nolu numunenin kuvvet-deplasman ve kuvvet-yanal deplasman grafikleri	68
Şekil 6.26 4 nolu numuneye ait kuvvet-deplasman ve kuvvet-yanal deplasman grafikleri	68
Şekil 6.27 5 nolu numuneye ait kuvvet-deplasman ve kuvvet-yanal deplasman grafikleri	68
Şekil 6.28 6 nolu numuneye ait kuvvet-deplasman ve kuvvet-yanal deplasman grafikleri	69
Şekil 6.29 7 nolu numuneye ait kuvvet-deplasman ve kuvvet-yanal deplasman grafikleri	69
Şekil 6.30 8 nolu numuneye ait kuvvet-deplasman ve kuvvet-yanal deplasman grafikleri	69
Şekil 6.31 9 nolu numuneye ait kuvvet-deplasman ve kuvvet-yanal deplasman grafikleri	69

Şekil 6.32	10 nolu numuneye ait kuvvet-deplasman ve kuvvet-yanal deplasman grafikleri	70
Şekil 6.33	11 nolu numuneye ait kuvvet-deplasman ve kuvvet-yanal deplasman grafikleri	70
Şekil 6.34	12 nolu numuneye ait kuvvet-deplasman ve kuvvet-yanal deplasman grafikleri	70
Şekil 6.35	13 nolu numuneye ait kuvvet-deplasman ve kuvvet-yanal deplasman grafikleri	70
Şekil 6.36	14 nolu numuneye ait kuvvet-deplasman ve kuvvet-yanal deplasman grafikleri	71
Şekil 6.37	15 nolu numuneye ait kuvvet-deplasman ve kuvvet-yanal deplasman grafikleri	71
Şekil 6.38	16 nolu numuneye ait kuvvet-deplasman ve kuvvet-yanal deplasman grafikleri	71
Şekil 6.39	17 nolu numuneye ait kuvvet-deplasman ve kuvvet-yanal deplasman grafikleri	71
Şekil 6.40	18 nolu numuneye ait kuvvet-deplasman ve kuvvet-yanal deplasman grafikleri	72
Şekil 6.41	19 nolu numuneye ait kuvvet-deplasman ve kuvvet-yanal deplasman grafikleri	72
Şekil 6.42	20 nolu numuneye ait kuvvet-deplasman ve kuvvet-yanal deplasman grafikleri	72
Şekil 6.43	21 nolu numuneye ait kuvvet-deplasman ve kuvvet-yanal deplasman grafikleri	72
Şekil 6.44	22 nolu numuneye ait kuvvet-deplasman ve kuvvet-yanal deplasman grafikleri	73
Şekil 6.45	23 nolu numuneye ait kuvvet-deplasman ve kuvvet-yanal deplasman grafikleri	73
Şekil 6.46	24 nolu numuneye ait kuvvet-deplasman ve kuvvet-yanal deplasman grafikleri	73
Şekil 6.47	25 nolu numuneye ait kuvvet-deplasman ve kuvvet-yanal deplasman grafikleri	73

Şekil 6.48 26 nolu numuneye ait kuvvet-deplasman ve kuvvet-yanal deplasman grafikleri	74
Şekil 6.49 27 nolu numuneye ait kuvvet-deplasman ve kuvvet-yanal deplasman grafikleri	74
Şekil 6.50 28 nolu numuneye ait kuvvet-deplasman ve kuvvet-yanal deplasman grafikleri	74
Şekil 6.51 29 nolu numuneye ait kuvvet-deplasman ve kuvvet-yanal deplasman grafikleri	74
Şekil 6.52 30 nolu numuneye ait kuvvet-deplasman ve kuvvet-yanal deplasman grafikleri	75
Şekil 6.53 31 nolu numuneye ait kuvvet-deplasman ve kuvvet-yanal deplasman grafikleri	75
Şekil 6.54 32 nolu numuneye ait kuvvet-deplasman ve kuvvet-yanal deplasman grafikleri	75
Şekil 6.55 Kritik burkulma yükünün (P_{kr}) belirlenmesi	76
Şekil 7.1 Tabakalar arası P_{kr} karşılaştırma ($a/L=0,3$)	78
Şekil 7.2 Tabakalar arası P_{kr} karşılaştırma ($a/L=0,5$)	79
Şekil 7.3 Tabakalar arası P_{kr} karşılaştırma ($a/L=0,7$)	80
Şekil 7.4 Delaminasyon boyut etkisinin karşılaştırılması (4.-5. tabakalar arası)	80
Şekil 7.5 Delaminasyon boyut etkisinin karşılaştırılması (5.-6. tabakalar arası)	81
Şekil 7.6 Delaminasyon boyut etkisinin karşılaştırılması (6.-7. tabakalar arası)	81
Şekil 7.7 Delaminasyon boyut etkisinin karşılaştırılması (7.-8. tabakalar arası)	82
Şekil 7.8 Delaminasyon sayılarının karşılaştırılması (4.-5. tabakadan itibaren)	82
Şekil 7.9 Delaminasyon sayılarının karşılaştırılması (5.-6. tabakadan itibaren)	83
Şekil 7.10 Delaminasyon sayılarının karşılaştırılması (6.-7. tabakadan itibaren)	84
Şekil 7.11 D 4-5 2li karşılaştırılması	85
Şekil 7.12 D 5-6 2li karşılaştırılması	85
Şekil 7.13 D 6-7 2li karşılaştırılması	86
Şekil 7.14 D 4-5 3lü karşılaştırılması	87
Şekil 7.15 D 4-5 3lü karşılaştırılması	87
Şekil 7.16 D 4-5 1,2,3 delaminasyon kuculmesi	88
Şekil 7.17 D 5-6 1,2,3 delaminasyon kuculmesi	89

Şekil 7.18 D 6-7 1,2 delaminasyon kuculmesi	90
Şekil 7.19 0,3 delaminasyon sayı artışı	91
Şekil 7.20 0,5 delaminasyon sayı artışı	91
Şekil 7.21 0,7 delaminasyon sayı artışı	92
Şekil 7.22 0,3 delamisayonun yer değişimde yan al deplasman	93
Şekil 7.23 0,5 delamisayonun yer değişimde yan al deplasman	93
Şekil 7.24 0,7 delamisayonun yer değişimde yan al deplasman	94
Şekil 7.25 4-5 arası delaminasyon boyuntunun büyümesinde yan al deplasman.....	94
Şekil 7.26 5-6 arası delaminasyon boyuntunun büyümesinde yan al deplasman.....	95
Şekil 7.27 6-7 arası delaminasyon boyuntunun büyümesinde yan al deplasman.....	96
Şekil 7.28 7-8 arası delaminasyon boyuntunun büyümesinde yan al deplasman.....	96
Şekil 7.29 D 4-5 delaminasyon sayı artışında yan al deplasman	97
Şekil 7.30 D 5-6 delaminasyon sayı artışında yan al deplasman	98
Şekil 7.31 D 4-5 2li karşılaştırılmasında yan al deplasman	98
Şekil 7.32 D 5-6 2li karşılaştırılmasında yan al deplasman	99
Şekil 7.33 D 6-7 2li karşılaştırılmasında yan al deplasman	100
Şekil 7.34 D 4-5 3lü karşılaştırılmasında yan al deplasman	100
Şekil 7.35 D 5-6 3lü karşılaştırılmasında yan al deplasman	101
Şekil 7.36 D 4-5 2,3 delaminasyon kuculmesinde yan al deplasman	102
Şekil 7.37 D 5-6 2,3 delaminasyon kuculmesinde yan al deplasman	102
Şekil 7.38 0,3 delaminasyon sayı artışında yan al deplasman.....	103
Şekil 7.39 0,5 delaminasyon sayı artışında yan al deplasman.....	104
Şekil 7.40 0,7 delaminasyon sayı artışında yan al deplasman.....	104

TABLolar LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 6.1 Araldite LY 564 epoksinin özellikleri.....	53
Tablo 6.2 DeneYlerdeki numune numaraları, delaminasyon sayıları, delaminasyon boyutları ve konumları	62
Tablo 6.3 Ortalama kritik burkulma yükleri.....	76
Tablo 6.4 Yanal deplasmanlar	77

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Fiber takviyeli kompozit malzemelerin yaygın olarak kullanılmalarının nedeni birçok geleneksel metalik malzeme ile karşılaştırıldığında yüksek mukavemet-ağırlık (strength-to-weight) ve direngenlik-ağırlık (stiffness-to-weight) oranlarına sahip olmasıdır. Bununla birlikte fiber takviyeli kompozitler, kompozit yapılarda karşılaşılan çeşitli hasar mekanizmalarına karşı hassastırlar. Tabakalar arası süreksizlik (delaminasyon), tabakalı kompozit malzemelerde en ciddi hasar şekillerinden biridir. Delaminasyon çeşitli nedenlerden dolayı ortaya çıkabilir. Bunlar, imalat nedeni ile oluşan kusurlar, darbe hasarları, tabakalar arası üç boyutlu gerilmeler ve basınçlı yüklemelerdir. Delaminasyonlar önemli ölçüde kompozit yapının dayanımını azaltabilir. Bir ya da daha fazla delaminasyonun varlığı, hasarlı yapının, yük taşıma kapasitesini düşürebilir ve buna ek olarak beklenmedik durumlarda yapının stabilitesi ile ilgili sorunlar (burkulma) meydana gelebilir. Delaminasyonların boyutlarının artması, yapının yük taşıma kapasitesini azaltabilir. Bir veya daha fazla hasar (delaminasyon) belirtisi ihtiva eden kompozit malzemeler basma yükü altında daha düşük bir seviyede burkulmaya maruz kalır. Bu burkulma yükünün seviyesi, tabakalı kompozit malzemenin sahip olduğu delaminasyonun boyut, konum ve şekline bağlıdır. Birçok araştırmacı deneysel, analitik veya sonlu elemanlar yöntemlerini kullanarak kompozit yapıların yük taşıma kapasitesine delaminasyonun etkisini incelemiştir.

Hwang ve Liu (2001), karbon-epoksi malzemelerin tek eksenli bası kuvveti altındaki burkulma davranışını sonlu elemanlar yöntemi kullanarak araştırmıştır. Aslan ve Şahin (2009), araştırmalarında darbeye maruz kalmış delaminasyonlu kare şeklindeki cam-lifi/epoksi kompozit tabakaların burkulma yüklerine darbe sonucu oluşmuş delaminasyon boyutlarının etkisini incelemiştirlerdir. Arman (2003), dairesel bir delik etrafındaki dairesel bir delaminasyonun dokuma kumaştan üretilmiş bir kompozit plakanın kritik burkulma yüküne etkisini nümerik ve deneysel olarak araştırmışlardır. Deneysel çalışmalarında delaminasyonsuz ve delaminasyonlu numuneler üretip burkulma testine tabi tutmuşlar ve nümerik analiz sonuçları ile

karşılaştırmışlardır. Cappello ve Tumino (2006), birden fazla delaminasyona sahip tek yönlü ve çapraz-katlı tabakalı kompozit plakaların burkulma ve burkulma sonrası (post-buckling) davranışını incelemişlerdir. Sonlu eleman yöntemi kullanılarak lineer olmayan burkulma analizi, Hyo-Jin ve Chang-Sun (1997), tarafından tek eksenli basınç altında delaminasyonlu tek yönlü kompozit malzemelerin burkulma ve ileri burkulma davranışlarını incelemek için kullanılmıştır.

Literatürde, delaminasyonun burkulma yükü üzerine etkisi konusundaki araştırmalar, çoğunlukla tek delaminasyonlu kompozit plakalar üzerinde yapılmıştır. Genellikle araştırmalarda delaminasyonların burkulma yüküne etkisi yani kritik burkulma yükleri (P_{kr}) incelenmiştir. Bununla birlikte, az sayıda çalışmada ise birden çok süreksizlik bölgesine (delaminasyona) sahip kompozit malzemelerin burkulma davranışları araştırılmıştır. Literatürdeki bu eksiklik nedeniyle, bu çalışmada tabakalı kompozit malzemelerin burkulma davranışları üzerine delaminasyonların boyutlarının, sayılarının ve pozisyonlarının değişimlerinin tabakalı kompozit malzemelerin mekanik özellikleri üzerine etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda, delaminasyonların farklı boyutları, tabakalar arasındaki pozisyonlarının ve sayılarının değişim durumuna uygun olarak çeşitlendirilmiş kompozit plakalar üretilmiştir. Kompozit plakalar 0,3, 0,5, 0,7 delaminasyon oranlarına sahip olarak üretilmiştir. Bu oranlardaki birden fazla delaminasyona sahip kompozit plakalar düzenli bir şekilde dizilerek numuneler üretilmiştir. Deneysel iki kenarı ankastre diğer iki kenarı serbest olarak numuneler test düzeneğine yerleştirilerek burkulma deneyleri uygulanmış yük-deplasman grafikleri elde edilmiştir. Elde edilen yük-deplasman grafiklerinden kritik burkulma yükleri (P_{kr}) tespit edilmiştir. Ayrıca, uygulanan yükün etkisi ile, delaminasyon bölgesinin yapmış olduğu plaka kalınlığı yönündeki (transvers) deplasmanlar da tespit edilmiştir. Elde edilen (P_{kr}) kritik burkulma yüklerinin birbirleri ile karşılaştırılması ile çoklu delaminasyon bölgelerine sahip bir kompozit malzemeler için optimum bir delaminasyon sayısı ve delaminasyon boyutu gibi özellikler tespit edilmiştir. Yapılacak olan uygulamalarda delaminasyonlardan dolayı mekanik özelliklerde meydana gelebilecek olumsuz yöndeki etkilerin çalışmalarda sonuçları ne kadar etkileyebileceği delaminasyon durumuna göre oransal olarak görülebilmektedir.

BÖLÜM İKİ

KOMPOZİT MALZEMELER

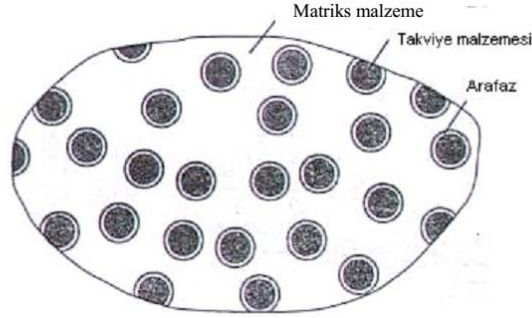
2.1 Kompozit Malzemelerin Tanımı

Kompozit malzemeler çok eski zamanlardan itibaren kullanılmıştır. M.Ö. 2800 yıllarda mısırlılar kompozit yapılar kullanmaya başlamıştır. Geçmişte yapılan binalar bilinen en yaygın ve tarihi kullanım alanlarıdır. Saman ile güçlendirilmiş çamurdan oluşturulan yapı bir kompozit örneğidir. Doğada bulunan kompozitlere örnek olarak çam ağacının gövde verilebilir. Çam ağaçları gövdelerinde yaz ve kış zamanlarında oluşan yaş halkaları bulunmaktadır. Oluşan bu yaş halkalarından kış halkaları sert ama gevrek, yaz halkaları yumuşak fakat sünektir. Bu yapı dolayısı ile çam ağaçları bu şekilde özelliğe sahip olmayan kavak ve kayın gibi ağaçlara göre daha iyi mekanik özelliklere sahiptir. Kompozit malzemelerin bugün günlük hayatta kullanılan en basit örnekleri ise bina yapımlarında kullanılan kum, kireç, çimento, taş ve demirden meydana gelen bina taşıyıcı yapılarında kullanılan kompozit yapılarıdır. Bir diğeri ise sıkça kullandığımız selüloz ve reçineden meydana getirilen kağıttır.

Çok eski zamanlardan itibaren kompozit malzemelerin kullanılmasına rağmen bu malzemelerin daha yeni yeni araştırılmaya başlanmış ve kullanım alanları zaman geçtikçe artmaktadır. Özellikle 2. Dünya Savaşı sırasında kullanılan konvensiyonel malzemeler tek olarak kullanılırken gereken ihtiyaçları karşılayamaması ile kompozit malzemeler üzerine yapılan araştırmalar ve kullanımları artmaya başlamıştır. Günümüzde kompozit malzemelerin üretimi ve bu malzemelerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi için yapılan çalışmalar artarak sürmektedir.

Çeşitli ve birbirinden ayrı malzeme özelliklerini birleştirilerek tek bir yapıda toplamak ve/ve ya bu malzemelerin birleşimi ile yeni bir malzeme özelliği elde etmek için, iki veya daha fazla malzemenin makro boyutlarda birleştirilmesi ile üretilen yeni malzemeler “Kompozit Malzeme” olarak isimlendirilirler. Kompozit malzemeler, mikroskobik olarak yapının değişik bölgelerinde değişen özelliklerde heterojen ve yöne bağlı olarak farklı özelliklere sahip anizotrop yapılarıdır.

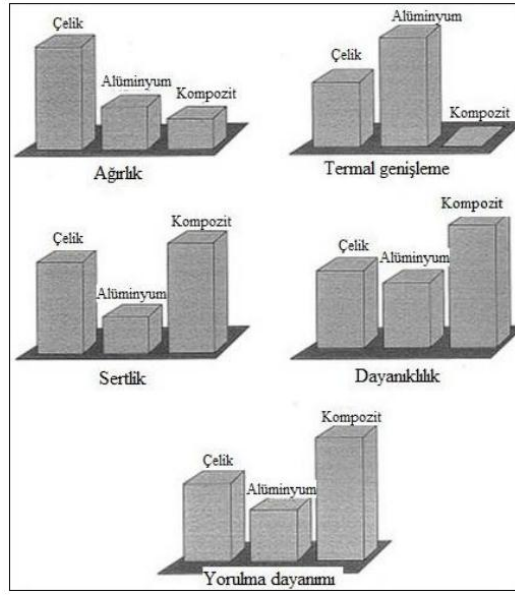
Molekülsel ve atomsal boyutlarda birleştirilen alaşımlar mikroskopik olarak homojen olduklarından kompozit malzeme olarak kabul edilmemektedirler. Kompozit malzemeler temel olarak matriks (ana yapı) ve takviye elemanından oluşmaktadır. Şekil 2.1’de kompozit malzemelerin ana yapısı görülmektedir.



Şekil 2.1 Kompozit malzemenin fazları (Şahin, 2008)

Kompozit malzemelerin oluşturulmasında, aşağıdaki özelliklerin bir veya bir kaçının oluşturulacak yeni malzemede iyileştirilmesi ve geliştirilmesi hedeflenmektedir. İyileştirilmesi gereken özellikler aşağıda belirtilmiştir. Bunun yanında Şekil 2.2’de geleneksel malzemeler ile kompozit malzemelerin çeşitli özellikler bakımından karşılaştırması görülmektedir.

- Mekanik dayanımı
- Yorulma dayanımını
- Aşınma dayanımını
- Korozyon dayanımı
- Kırılma tokluğunu
- Yüksek sıcaklıktaki zellikler
- Isıl iletkenlik
- Elektrik iletkenliğini
- Akustik zellik
- Rijitlik
- Ağırlık azalması
- Estetik



Şekil 2.2 Çelik, alüminyum ve kompozit malzemelerin farklı özellikleri (Karasu, 2014)

Yeni oluşturulan bir malzemenin kompozit olarak kabul edilmesi için;

- İnsan yapısı olmalıdır,
- En az iki veya daha fazla, mekaniksel özellikleri veya fiziksel yapısı ayrı olan malzemelerin birbirleri ile birleştirilmesi ve bu birleşime katılan malzemelerin her birinin farklı ara yüzeye sahip olmaları,
- Kullanılan her bir malzemelerin tek başına sahip olamayacağı mekanik özelliklerin elde edilmesi,
- En iyi özellikleri elde etmek için bir malzemenin diğer malzeme içine kontrollü şekilde karıştırılması iki ayrı malzemedan oluşan karma (kompozit) bir malzeme oluşturulmalı,
- Kullanılan malzemelerden, kompoziti oluşturan elemanların en iyi özelliklerin bir arada bulunması gereklidir.

2.2 Kompozitlerin Olumlu ve Olumsuz Özellikleri

Kompozit bir numune üretilirken maliyet, ham malzeme özellikleri, çevre koşullarının numuneye etkisi, imalat yöntemi, kalite kontrol metotları gibi özelliklerle beraber değerlendirilmelidir. Kompozit malzemelerin izotropik olmayan özellikler göstermesi kullanımlarının ve tasarımlarının dikkatli şekilde gerçekleştirilmesi

gereklidir. Kullanım yerine göre fiber açılarının numunelerin maruz kalacağı gerilmelere uygun şekilde uygulanması gereklidir.

2.2.1 Kompozit Malzemelerin Olumlu Özellikleri

Yüksek mukavemet: Kompozit malzemelerin çekme ve eğilme dayanımları sahip olduğu mekanik özelliklerindeki özgül elastisite modülü E/ρ ve özgül çekme dayanımı σ_c/ρ diğer yaygın kullanılan malzemelere göre yüksek olduğundan daha yüksek dayanıma sahiptirler. Bunun yanında kompozitler ihtiyaç duyulan yönde ve bölgede uygulanabildiğinden gerekli yerlerde dayanım artırılabilir. Bu sayede kullanılacak malzemenin miktarı azaltılarak, daha hafif ve ucuz numuneler ortaya çıkabilir.

Hafiflik: Kompozit malzemeler bir birim hacim ağırlığında aynı birim hacim ağırlığa sahip takviyesiz plastiklere ve metallere göre daha yüksek dayanım değerlerine sahiptir. Polimer matrisli kompozitlerin yoğunluğu $1,4 - 2,5 \text{ gr/cm}^3$ ve metal matrisli kompozitlerin yoğunluğu ise $2,4 - 5 \text{ gr/cm}^3$ civarındadır. Bu arada seramik kompozitlerin yoğunluk değerleri ise ikisi arasındadır. Bu değerlere sahip kompozit malzemelere karşı aynı dayanım özelliklerine sahip olacak diğer geleneksel malzemelerin hacim ve ağırlıkları çok daha yüksek değerlere sahiptir.

Kolay Şekillendirme: Kompozit malzeme tasarım esnekliği sağlayarak her ebatta ve kompleks parçalar, tek işlemle bir numune üretimine izin vermektedir. Tasarımcılara istedikleri her türlü esnekliği sağlamaktadır. Bu da üretimde kolaylık ve iş yoğunluğunu azaltmaktadır.

Boyutsal Stabilite: Değişik mekanik, fiziksel ve kimyasal etkiler altında kompozit malzemeler fiziksel özelliklerini ve işlevselliklerini korumaktadırlar.

Korozyona ve Kimyasal Etkilere Karşı Dayanıklılık: Kompozitler malzemeler sahip oldukları antikorozyon özelliği nedeni ile korozyona neden olabilecek hava etkileri, kimyasal etkilerden (asitler, alkaliler, çözücüler vs.) ve diğer korrozif

etkilerden zarar görmezler. Sahip oldukları bu özellikler nedeni ile kompozitler, kimyevi etkiye maruz yerlerde, su, tuzlu su ve hava nedeni ile korozyona maruz kalabilecek yerlerde özellikle kimyasal tanklar, borular, deniz ve hava araçları gövdeleri gibi yerlerde kullanılmaktadır.

Kalıplama Kolaylığı: Kompozit malzemeler, geleneksel malzemelerin üretilmesinde kullanılan parçaların ayrı ayrı üretilip daha sonra birleştirilmesi ve montajlanması ile üretilebilecek numunelerin, üretilmesinde tek parça halinde kalıplanmasına imkan tanıdığından imalatları kolaylaştırıp, gereksiz maliyet ve iş gücü kayıplarını önlemektedir.

Yüzey Uygulamaları: Kompozit malzemelerin yapımında kullanılan polyester reçinelerin sahip olduğu özellikler nedeni ile beton ile imal edilmiş yüzeylere, kompozit malzemeler iyi derecede yapışır. Yapının sahip olduğu betonun gözenekli yapıda olması nedeni ile, kompoziti yapımında kullanılan temel malzemelerden olan reçinelerin betonun sahip olduğu gözenekli yapıdan sızması ve reçinenin beton yapı içinde sertleşmesi nedeni ile iyi bir bağlantı sağlanmış olur. Kompozit malzemeler ahşap yüzeylere de yapışma yeteneğine sahiptir. Bunun yanında reçine uygulanacak ahşap yüzeyin kuru ve temiz olması gereklidir. Reçinenin ahşap ile iyi bir bağlantı sağlaması için ahşap yapıya iyi bir şekilde emdirilmesi gerekir. Demir yüzeylerdeki kir, pas ve yağ artıklarının iyi bir şekilde temizlendikten sonra bu yapılarda kolay bir şekilde kompozit malzemeler ile kaplanabilir. Metalik özelliğe sahip yapıların yüzeyleri, kompozit malzemeler ile kaplanarak dış çevre etkilerinden korunmaktadır.

Şeffaflık Özelliği: Kompozit malzemeler, cam gibi yapıların sahip olduğu ışık geçirgenliğine sahip olabilirler. Işık geçirgenlikleri yüksek olan ve ışığı yayma gibi özellikleri içinde barındıran kompozit malzeme türlerinin bulunması, ışık geçirgenliğinin ve dayanıklılığın önemli olduğu durumlarda, seralarda ve güneş kolektörü üretiminde önemli yer tutarlar.

Isıya ve Ateşe Dayanıklılık: Kompozit malzemeleri oluşturan temel elemanların ısı iletim katsayısı düşük malzemelerden seçilerek üretilen kompozit malzemelerin

ısıya karşı dayanım direnci, yüksek ısı ve sıcaklığa maruz alanlarda kullanılabilmesini sağlamaktadır. Kompozit malzemelerin alev dayanımı, yanma sıcaklığı vs. kullanılan malzemelerin ve reçinelerin özelliklerine bağlıdır. Isıya karşı dayanım özelliğinin gerekli olduğu durumlarda “aleve dayanıklı” reçineler kullanılmalıdır. Kompozit malzemeler, termoset plastik özelliklerine sahip polyester reçineler ile üretildiği durumlarda sıcaklık ile yumuşama göstermez ve şekil değiştirmezler.

Kompozitler İçine Farklı Malzemeler Gömülebilmesi: Kompozit malzemeler arasına metalik malzemeler, seramik malzemeler, plastik malzemeler, ahşap, köpükler gibi malzemeler eklenerek mekanik özellikleri farklılaştırılabilir sandviç kompozit yapılar oluşturulabilir.

Tamir Edilebilirlik Özelliği: Kompozit malzemelerin herhangi bir etki sonucu hasara uğramasından sonra numunenin geleneksel malzemelerde olduğu gibi tamamen değiştirmek yerine kompozit malzemeler kısmı olarak takviyeler ile eski numune kullanılmaya devam edilebilmektedir. Yapılan hasar onarımından sonra meydana gelen izlerinin giderilmesi için, onarım işleminin bir kalıp ile gerçekleştirilmesi, ya da onarımdan sonra zımpara veya boya uygulanması gerekebilir.

Kompozitler Kesilip Delinebilir: Kompozit malzemeler, geleneksel malzemeler gibi fiziksel değişim (kesilme, delinme, zımparalanma vs.) kolayca yapılabilir. Bu işlemlerin gerçekleştirilmesi sırasında aletlerin sertleştirilmiş çelik veya elmas uçlu olması durumunda daha iyi sonuç alınmaktadır.

Elektriksel Özellikler: Kompozit malzemelerin gerekli şekilde yapılandırılması ile elektriksel özelliklere sahip kompozit malzemeler üretilebilir. Seramik matrisli kompozit malzemelerin üretilmesi ile elektrik yalıtkan malzemeler elde edilirken, metal matrisli kompozit malzemeler ise üstün elektriksel iletkenliğe sahip olmaktadır. Günümüzde büyük enerji ve nakil hatlarında iletken ve yalıtkan özelliklere sahip kompozit malzemeler kullanılabilirler.

Titreşim Sönümlenme: Kompozit malzemeler sahip oldukları sünek yapı nedeni ile titreşim sönümlenme ve ani şokları absorbe edebilme özelliğine sahiptirler. Kompozit malzemelerde çatlak oluşumu ve çatlağın ilerleme hızı en düşük seviyededir.

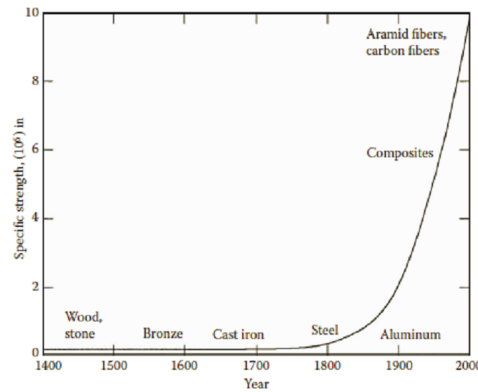
Kalıcı Renklendirme: Kompozit malzemelerin üretilmesi sırasından, kompozit malzeme yapısında kullanılan reçinelere istenilen renk maddelerinin eklenmesi ile istenilen renklerde kompozit ürünler elde edilebilmektedir. Geleneksel malzemeler gibi üretimden sonra tekrardan bir işleme tabi tutularak boya işlemi yapılması gerek duyulmaz. Bu nedenle ekstra masraf ve işçilik gerektirmez.

Amaca Özel Ürünler Üretilebilme: Çeşitli matriks-takviye değişimlerinin gerçekleştirilmesi ile çok fazla sayıda kombinasyon oluşturulabilir.

Üretimleri Kolaydır: Kompozit malzemeler üretilirken ekstra ara işlem gerçekleştirilmeden, tek bir seferde numune oluşturulabilir. Üretim sırasında kullanılan malzemeler ve ekipmanlar maliyetli değildirler (Alnak, 2007).

MALZEME	Yoğunluk g/cm ³	Çekme Dayanımı MPa	Elastiklik Modülü Gpa	Özgül Çekme Dayanımı σ_c / ρ	Özgül Elastik Modülü E/ ρ
Alaşımsız Çelik	7,9	459	203	58	26
Alüminyum	2,8	84	71	30	25
Al Alaşımı 2024	2,9	247	69	88	25
Pirinç	8,5	320	97	38	11
Ahşap (Kayın)	0,7	110	13	157	19
Kemik	1,8	138	26	75	14
Bor Epoksi KM	1,8	1600	224	889	124
Karbon Epoksi	1,6	1260	218	788	136
Kevlar Epoksi	1,4	1400	77	1000	55
Cam Epoksi	1,8	1400	56	824	33

Şekil 2.3 Kompozit ve geleneksel malzemelerin mekanik özellikleri (Baba, 2013)



Şekil 2.4 Malzemelerin özgül mukavemet değerlerinin zamanla gelişimi (Baba, 2013)

Şekil 2.3 ve 2.4'de kompozit ve geleneksel malzemelerin özelliklerinin karşılaştırılması ile kompozit yapıların avantajları daha net ortaya çıkmaktadır. Şekil 2.4'de kompozit yapıların zaman ile geliştirilmeleri sonucu bu yapıların dayanımlarının oldukça yükseldiği görülmektedir.

2.2.2 Kompozit Malzemelerin Olumsuz Özellikleri;

1. Kompozit malzemelerde delaminasyon olarak tanımlanan süreksiz bölgeler meydana gelebilir. Bu delaminasyonlar kompozit malzemenin mekanik özelliklerini olumsuz olarak etkilemektedir.
2. Kompozit malzemenin üretimi yapılırken kalıp içinde kalan hava malzemenin yorulma ve mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkiler.
3. Kompozit malzemeler, maruz kaldıkları kuvvetlere her doğrultularda farklı mekanik özellikler gösterirler. Bu nedenle kompozit malzemelerin kullanım yerlerinde maruz kalacakları kuvvet ve kuvvet doğrultusuna uygun olarak üretilmeleri gereklidir.
4. Aynı kompozit malzemelerin sahip oldukları çekme, basma, kesme ve eğilme mukavemet değerleri farklılıklar gösterebilir.
5. Kompozit malzemeler üzerinde delme, kesme benzeri işlemler sonrası kompozit malzemeyi oluşturan yapının lifler arasında açılmaya sebebiyet verebileceğinden kompozit malzemelerde hassas imalattan söz edilemez.
6. Kompozit malzemelerden yüksek dayanımlara cevap verebilmesi için kullanılan yapı elemanları matriks ve takviyeler genelde pahalı malzemelerdir.
7. Kompozit malzemelere geleneksel malzemelere ait mukavemet - mekanik formülleri uygulanamaz. Kompozit malzemeler farklı eksenlerinde değişik mukavemet gösterirler.
8. Kompozit yapımında kullanılan yapı elemanlarından matriksler çevre ve solunmaları durumunda insan sağlığını olumsuz olarak etkileyebilirler.
9. Yanmaları durumunda ortaya çıkan gazlar zehirleyici özelliğe sahiptirler.
10. Nem ve ısı ile çabuk yıpranırlar.
11. Genellikle kırılğan malzemelerdir.

12. Özel yapı elemanları kullanılarak üretilen kompozit malzemeler hariç yaygın olarak kullanılan kompozit malzemelerin ısıl dayanımı düşüktür.

13. Kompozitler malzemelerin yapımında kullanılan termoset özelliğe sahip reçineler nedeni ile kompozit malzemelerin çoğunluğu geri dönüşebilir malzeme grubunun bir parçası değildir. Bu nedenle bu durumdaki malzemeler doğa dostu değildir (Alnak, 2007).

2.3 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler genellikle üç farklı şekilde sınıflandırılmaktadırlar. Bunlar;

1. Matris malzeme türlerine göre
2. Takviye elemanlarına göre
3. Kompozit malzemelerin üretim yöntemlerine göre yapılan sınıflandırmalardır.

2.3.1 Matris Malzemelerine Göre Sınıflandırmada

1. Metal matrisli kompozitler,
2. Seramik matrisli kompozitler,
3. Polimer matrisli kompozitler olmak üzere üçer ayrılırlar.

Kompozitlerin sınıflandırılmasında matris malzemelerine göre yapılan gruplandırma en yaygın olarak kullanılan gruptur.

2.3.1.1 Metal Matrisli Kompozitler

Metal yapılı bir matris malzemesinin uygun takviye malzemeleri ile çeşitli yöntemler kullanılarak (vakum yolu ile nüfuz etme, sıcak pres yöntemi, ergitme, difüzyon kaynağı vs.) üretimleri yapılan kompozitler metal matrisli kompozitler olarak adlandırılırlar. Metal matrisli kompozit yapılar yaygın olarak hava ve uzay endüstrisinde kullanılmaktadırlar. Uydular, uzay araçları, hava araçlarında bulunan taşıyıcı parçalar için kullanılmaktadırlar.

Metal ve metal içerikli kompozit malzemeler, yüksek ısıya dayanım özellikleri gelişmiş olmasına rağmen bu sıcaklıklarda sertlikleri nedeni ile gevrek olabilmektedirler. Metal matris yapı ile meydana gelen kompozit yapılardaki takviye elemanları nedeni ile yüksek ısı seviyelerinde maruz kaldıkları yüksek gerilimlere karşı dayanımları yüksektir. Metal matris ile kompozit yapımında kullanılan takviye elemanları kesintisiz ve kırılmış olarak bu yapının içinde yer almaları olanaklıdır.

2.3.1.2 Seramik Matrisli Kompozitler

Seramik matrisli kompozit yapılarda kullanılan ileri seviye seramik malzemeler kullanılmaktadırlar. Kullanılan bu seramik malzemeler istenilen özelliklere göre seçilerek uygun yapılar oluşturulabilmektedir. Al_2O_3 , SiC, Si_3N_4 , B₄C, C₆N₄, TiC, TiB, TiN, AlN gibi seramik malzemeler genellikle en yaygın olarak kullanılan seramik malzemelerdir. Seramik malzemeler yüksek darbe dirençlerine, yüksek sıcaklıklara, elektriksel dirençler gibi sahip oldukları özellikler nedeni ile uzay teknolojilerinde, yüksek teknoloji zırhların yapımında vs. gibi alanlarda kullanılırlar.

Seramik malzemeler metalik veya metal özelliği taşımayan elemanların bir araya gelmesi ile üreilebilmektedirler. Bu malzemeler yüksek sıcaklıklara karşı yüksek dayanımın yanında, sert ve rijittirler. Elektriksel dirençlerinin yüksek olmasından dolayı yüksek gerilim çalışmalarında yalıtım amacı ile kullanılabilirler. Seramik kompozitler genellikle üç sınıftırlar.

1. *Seramik-Cam Kompozit Malzemeler:* Yaygın olarak günlük yaşamda kullanılan porselen, seramik matrisin cam takviye elemanı ile üretilen bir örneğidir. Cam yapısında bulunan kuartz fiberlerin seramik matris ile birleşimi ile üretilirler
2. *Seramik-Seramik Sistemi:* Birden fazla seramik malzemenin birbirleri ile birleşmesi ile elde edilen kompozit malzemelerdir.

3. *Seramik-Metal Sistemi*: Seramik ve metal birleşimi ile elde edilen kompozit yapılardan elde edilen çok çeşitli kompozit yapılar üretilebilmektedirler. Uygulamalarda sahip oldukları yüksek mukavemet ve sertlik nedeni ile genellikle talaşlı imalatlarda kesici takım yapılarında sıkça kullanılmaktadırlar. Örneğin kobalt ile tungstren malzemeleri ile üretilen karpitlerden meydana gelen bu kompozit yapı verilebilir.

2.3.1.3 Polimer Matrisli Kompozitler

Takviye elamanları olan lifler ile desteklenen polimer matrisli kompozitler uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Takviye elmanı olan cam, karbon kevlar ve boron lifleri polimer matrisli yapılarda yer alır. CTP (Cam Takviyeli Polyester-CTP) uygulamalarda en çok kullanılan polimer matrisli kompozit malzemelerdir.

2.3.1.3.1 Plastik - Plastik Kompozitler. İki farklı plastik malzemenin birinin matris diğeri ise takviye malzemesi olarak bir arada kullanılması ile üretilen kompozit malzemelerdir. Takviye malzemesi için seçilen plastik esaslı fiberler, genellikle maruz kalınan gerilimi dayanım görevini yerine getirirken, matris malzemesi için seçilen plastik, plastiklerin genel özelliklerinden (esneklik, darbe absorbe etme vs.) herhangi birinin kompozit yapıda da yer alması için kullanılmaktadırlar. Plastik-plastik kompozit malzemelerde kullanılan plastikler, termoplastikler ve termosetplastikler olarak iki grupturlar (Tanır, 1997).

Termoplastikler: Genel olarak kullanılan plastik malzemeler bu gruba aittir. Bu grupta bulunan malzemeler geri dönüşüm yapılarak tekrar kullanılabilirler. Termoplastikler yüksek sıcaklıklar ile karşılaştıklarında, ısının değerine göre yumuşar veya erirler. Bu sayede yeniden fiziksel olarak biçimlendirilebilir ve ısı kaybettiklerinde ergimiş veya yumuşamış plastik malzeme sertleşir ve kullanıma uygun duruma gelir. Plastiğin bu ısıya ve soğuma sonrasında temel yapılarında bir değişime neden olmaz. Kullanım yerlerindeki sıcaklık değerleri 5-50 arasında olması

gerekmektedir. Termoplastiklerin en yaygın şekilde kullanılan örnekleri ise naylonler, polietilenler, karbon florürler, akrilikler, selülozikler, vinillerdir.

Termoset Plastikler: Termoset plastikler ise yüksek sıcaklıklara maruz kaldıklarında termoplastiklerin aksine yumuşamaz veya erimezler. Isıl işlem sonrasında temel yapıları değişir ve aynı şekilde tekrar kullanılamazlar. Termoset plastiklerin en yaygın olarak kullanılan örnekleri ise; polyesterler, epoksiler, alkitler, aminlerdir.

2.3.1.3.2 Plastik - Cam Elyaf Kompozitler. Plastik-cam birleşimi kompozit yapılar içerisine termoplastik veya termoset türü plastik malzemelerden uygun olan matriks ve takviye malzemesi için kullanılacak olan cam liflerin uygun birleşimleri ile imal edilirler. Cam elyaflar sahip oldukları özellikler sayesinde diğer takviye malzemeler yerine kullanılmaktadırlar. Cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler, yüksek mukavemet değerlerine sahip olmasından dolayı cam yapının kırılma özelliği nedeni ile gevrek özellik gösterirler (Tanır, 1997).

2.3.1.3.3 Plastik - Metal Fiber Kompozitler. Uygulamalarda yaygın olarak yer alan metal fiber takviyeli plastik matrisli kompozit malzemeler yüksek dayanımlı ve buna karşılık ağırlıklarının az olmalarından dolayı kullanımları açısından avantaj teşkil etmektedirler. Takviye malzemesi olarak cam lifler kullanılan kompozit malzemeler yüksek dayanımlara sahip olmalarına karşın, bu dayanım değerlerinin sağlanması için fiber yerleşimlerinin düzenli bir şekilde uygulanması gerekmektedir. Plastik matris ile takviye elemanı olarak kullanılan metal fiberler üretimdeki bu zorluğu ortadan kaldırmaktadırlar. Plastik-metal kompozit malzemeler, metallerin polietilen ve polipropilen plastikleri ile birleştirilmesi ile üretilmektedirler (Tanır, 1997).

2.3.1.3.4 Plastik - Köpük Kompozitler. Plastik-köpük kompozitlerin yapısında bulunan plastikler yapıda fiber olarak yer almakta, köpükler ise matris olarak kullanılmaktadırlar. Köpükler, gözenekli yapıları, düşük ağırlıklara sahip olmaları, doğal olarak elde edilebilirken sentetik olarak yapay şekilde üretilebilen

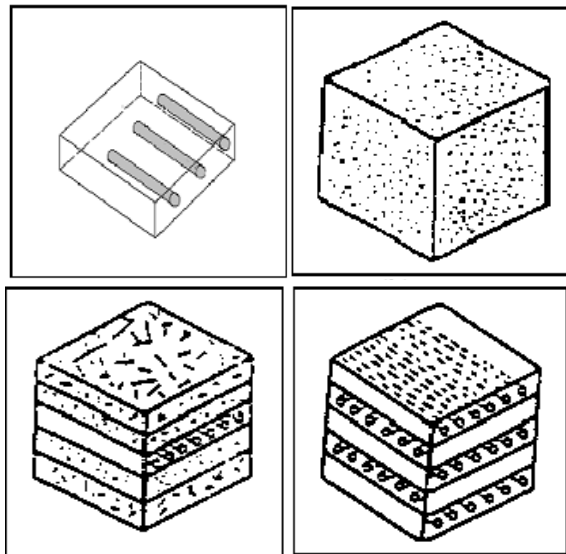
malzemelerdir. Köpükler, sahip oldukları yapıya göre sert, kırılğan, yumuşak veya elastik özelliklere sahip olabilirler (Tanır, 1997).

2.3.2 Takviye Elemanlarının Şekil ve Yerleştirilmesine Göre Sınıflandırılması

Yapılarında çok sayıda farklı malzeme kullanılabilen kompozitlerin gruplandırılmasında kesin sınırlar çizmek mümkün olmamakla birlikte, yapıdaki malzemelerinin formuna göre bir sınıflama yapmak mümkündür. Kompozit yapıların içerdikleri malzeme sayısında sınırlandırma olmamasına rağmen, kompozit yapılarda kullanılan takviye elemanlarına, bunların şekil ve yerleştirilmesine göre sınıflandırma yapılabilmektedirler.

Takviye elemanlarına göre kompozit malzemeler genellikle 4 ana grupta toplanmaktadır. Şekil 2.5’de yapıların takviye elemanlarının durumuna göre yapılan sınıflandırma görülmektedir. Bunlar;

1. Elyaflı Kompozitler
2. Parçacıklı Kompozitler
3. Karma (hibrid) Kompozitler
4. Tabakalı Kompozitler’dir.



Şekil 2.5 Kompozit malzemelerin malzeme formuna göre sınıflandırılması (Şahin, 2008)

2.3.2.1 Elyaf Takviyeli Kompozitler

Elyaf takviyeli kompozit malzemeler elyaf liflerinin uygun bir matris malzemelerinin birleştirilmesi ile elde edilirler. Elyaf liflerinin kompozit yapıdaki doğrultuları, yerleşimi ve liflerin boyutları kompozitlerin özelliklerini büyük ölçüde etkilemektedir. Kompozit malzemelere uygulanan gerilmeler matris içinde bulunan elyaf lifleri doğrultusunda ise kompozit malzemelerin dayanım değerleri yüksek iken uygulanan gerilmeler elyaf liflerinin yönü göz önüne alınarak dik doğrultuda gerçekleştirilirse dayanım değerleri azdır. Elyaf lifleri birbirine dik olarak 2 yönlü uygulandıklarında ise kompozit malzeme üzerine bu iki yönden gelecek gerilmelere karşı yüksek dayanım göstermektedir.

Kompozit yapı içerisinde kullanılan elyaf türü kompozitlerin özellikleri etkilemektedirler. Uygulamalarda kullanılan elyaf liflerinin uygulamasında hatalı yapı içermesi özellikleri olumsuz olarak etkilemektedir. Matris içinde bulunan elyaf liflerinin uzunluk/çap değerleri arttıkça matris malzemelerinin elyaf liflerine ilettikleri kuvvet artmaktadır. Elyaf ile matris malzemesi arasındaki bağın yapısı kompozit malzemenin yapısını etkilemektedir. Yapıda bulunabilecek hava gözenekleri yapının özelliklerini olumsuz olarak etkilemektedir.

Yaygın olarak kullanılan elyaf takviyeleri aşağıdaki gibidir;

1. Glass Fiberler
2. Karbon Fiberler
3. Bor Fiber
4. Yapay Organik Fiberler
 - 4.1 Aramid (kevlar) fiberler
 - 4.2 Polipropilen fiberler
 - 4.3 Polietilen fiberleri
 - 4.4 Naylon fiberler

2.3.2.2 Parçacıklı Kompozitler

Parçacıklı kompozitler, bir matris malzemesinin içinde takviye malzemelerinin parçacıklar halinde yer alması ile üretilen kompozit yapılardır. Matris içinde takviye malzemelerin aynı şekilde yer almasından dolayı izotropiktirler. Kompozit içerisinde bulunan parçacıkların dislokasyonlara engel olması nedeni ile dayanımları yüksektir.

Plastik matris yapıları kompozitler içine metal taneciklerin yer alması ile üretilenlerdir. Metal yapıları matris malzemelerin içine seramik takviye elemanlarının yerleştirilmesi ile yüksek aşınma direnci, yüksek sıcaklıklara dayanımlı kompozit malzemeler üretilmektedir.

Genel olarak bu sınıfta yer alan kompozit malzemeler;

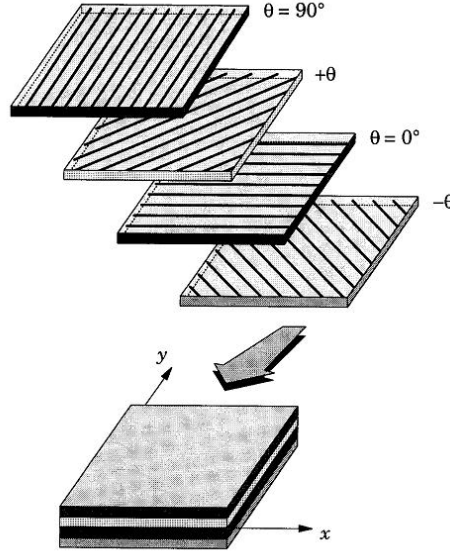
1. Semente karbürler
2. Abrazivler (Aşındırıcılar, SiC, Al₂O₃)
3. Elektrik kontakt malzemeleridir.

2.3.2.3 Karma (Hibrid) Kompozitler

Kompozit yapı içerisinde bulunan takviye elemanlarının aynı anda iki ya da daha fazla sayıda değişik malzemelerden oluşması ile elde edilen kompozit malzemelerdir. Bu yapıya sahip kompozit malzemeler karma (hibrid) olarak ifade edilmektedirler. Örneğin, kevlarlar tok yapıya sahip elyaflardır ama basma kuvvetlerine karşı dayanımları azdır.

Grafitler ise kevlarların tam tersi olarak az tokluk yanında, iyi basma dayanımına sahiptirler. Bu iki elyafların bir arada kompozit yapı içerisinde yer almaları ile yüksek tokluğa ve iyi basma dayanımına sahip kompozit yapılar üretilmektedir.

2.3.2.4 Tabakalı Kompozitler



Şekil 2.6 Tabakalı kompozit malzeme (Şahin, 2008)

Uygulamalarda en çok kullanılan kompozit türüdür. Tabakalı kompozit malzemeler iki veya daha fazla farklı tabakanın bir araya gelmesi ile elde edilen kompozit yapılarıdır. Şekil 2.6'da tabakalı kompozit yapının temel görünümü bulunmaktadır. Geleneksel malzemelere oranla yüksek mekanik özellikler nedeni ile kullanımları yüksektir. Tabakalı kompozit malzemeler üretimlerinin ucuz olması, yüksek mukavemet veya düşük ağırlık avantajlarını sağlarken, aşınma dayanımı, yüksek sıcaklıklara dayanım, korozyona dayanım özelliklerini içerdiği tabakaların özelliklerine göre tabakalı kompozit yapı içerisinde ulaşmak mümkündür.

1. Metal tabakalı kompozitler
2. Cam tabakalı kompozitler
3. Plastik esaslı tabakalı kompozitler
4. Ahşap tabakalı kompozitler
5. Tabakalı lifli kompozit malzemeler

Çeşitli yapılardan oluşan tabakalı kompozit yapılar oluşturmak mümkündür. Bunun yanında metal, cam, plastikler, ahşap gibi doğal malzemelerin hepsi veya

ihtiyaçlara cevap verecek özellikleri sağlayacak birkaçı bir arada uygun bir matris malzemesi ile birleştirilerek kullanılabilir.

2.3.3 Kompozit Malzemelerin Yapım Metoduna Göre Sınıflandırılması

2.3.3.1 Karışık Malzeme ve Sinterleme

Günümüzde uygulamalarda sıklıkla kullanılan malzemelerin karıştırılması ve sinterlenmesi ile üretilen kompozit malzemeler bulunmaktadır. Karışım yolu ile üretilen kompozitlere örnek olarak, betonlar, asfaltlar, kalıpcılıkta kullanılan ince kum ile plastik malzemelerden üretilen kalıp malzemeleri, cam ile reçine birleşiminden oluşan zımparalar verilebilir (Tanır, 1997).

Bu kompozit malzemelerin birleştirilmesinde sinterleme yolu da kullanılmaktadır. Sinterleme, malzemelerin ufak taneli halde (genellikle toz yapıda) karıştırılmasından sonra yüksek sıcaklık ve basınç ile birlikte birleştirilmesidir. Sinterleme sırasında matris malzemesi sıvı hale gelerek takviye elemanlarının tamamını kaplar, yüksek basınç nedeni ile kullanılan malzemeler arasında bir bağ oluşur. Bunun sonucunda rijit bir yapı oluşur. Matris malzemesi olarak reçine tercih edilirse sinterleme sonrasında reçine polimerize olur. Bunun sonucu olarak reçine akışkan özelliğini yitirir.

2.3.3.2 Yüzey Kaplamaları (Koruyucu Kaplamalar)

Numune yüzeylerinde bir aşınmaya, korozyona maruz kalıyorsa, bu yüzeylerin aşınmaya veya korozyona karşı dirençli malzemelerden üretilmesi gereklidir. Bu nedenle uygulama bu yüzeylerin aşınmaya karşı dirençli malzemeler ile kaplanması yapılmaktadır. Metaller üzerine kaplamalarda genellikle korozyona karşı boya, aşınmaya karşı ise seramik malzemeler ile yüzey kaplaması gerçekleştirilebilir. Yüzeye kaplama uygulaması yapabilmek için yüzeyler arasında devamlılık sağlamalıdır. Örneğin çelik yüzeyler üzerine yapılan galvaniz uygulaması iki metal arası oluşan metallik bağlar ile yapışır. Cam yüzey üzerine bir boya uygulaması

gerçekleştirmek için cam yüzeyi ilk olarak silikon ile kaplanır. Daha sonrasında boya uygulaması gerçekleştirilmektedir. Uygulanan silikonun özellikleri her iki malzeme grubuna benzerlik gösterdiğinden dolayı daha iyi bir birleşme sağlanmaktadır (Tanır, 1997).

2.3.3.3 Lif Takviyesi

Uygulamalarda ihtiyaç duyulan dayanım veya diğer özelliklerin sağlanması amacı ile matris içine ufak kırpıntılar veya sürekli lif takviyeleri ile üretimlerinin gerçekleştirilmesidir. Uygulamalarına örnek olarak, ferrit yapısının çekme yönündeki dayanımı 2800 [kg /cm²] iken, ferrit yapının içine takviye edilen karbür taneleri ile oluşan beyrit yapının çekme yönündeki dayanımı 14000 [kg /cm²]’dir. Araç lastikleri, demir ile üretilmiş beton bloklar en bilindik örneklerdendir (Tanır, 1997).

2.4 Kompozit Malzemeyi Oluşturan Elemanlar

2.4.1 Takviye Elemanları

Kompozit malzeme yapısının matriks malzemeleri ile birleşerek yapıyı tamamlayan takviye elemanları, kompozitlerin dayanım özellikleri karşılayan ana yapı birimidir. Elyafın öz ağırlıklarının az olması, yüksek dayanımlı olmaları ve korozyona karşı yüksek direnç göstermektedirler. Kompozit malzeme üretiminde kullanılan en yaygın ve en önemli takviye elemanıdır. Kompozit üretiminde sürekli yapı kompozitler sıklıkla kullanılmaktadırlar.

Cam yapı fiberlerin kullanılmakta olan en yaygın ve eski elyaflardır. Bunun yanında bor bazlı, karbon bazlı, silisyumkarbür, aramid fiberler günümüzde kullanılmaya başlanmış yüksek teknoloji kompozit malzeme takviye elemanlarıdır. Fiber takviye elemanlarının sahip oldukları küçük yapıları nedeni geleneksel malzemelerin büyük çaplı olmaları nedeniyle yapıların içinde oluşan hatanın neden olduğu dezavantajları ortadan kaldırmıştır. Böylece kompozit yapılarda elyafın yüksek dayanımlıdır.

Elyafklar, boy/en(ap) oranı çok kk olan elemanlar olarak adlandırılırlar. ASTM'nin yaptığı tanıma göre malzemenin fiber olarak adlandırılması için:

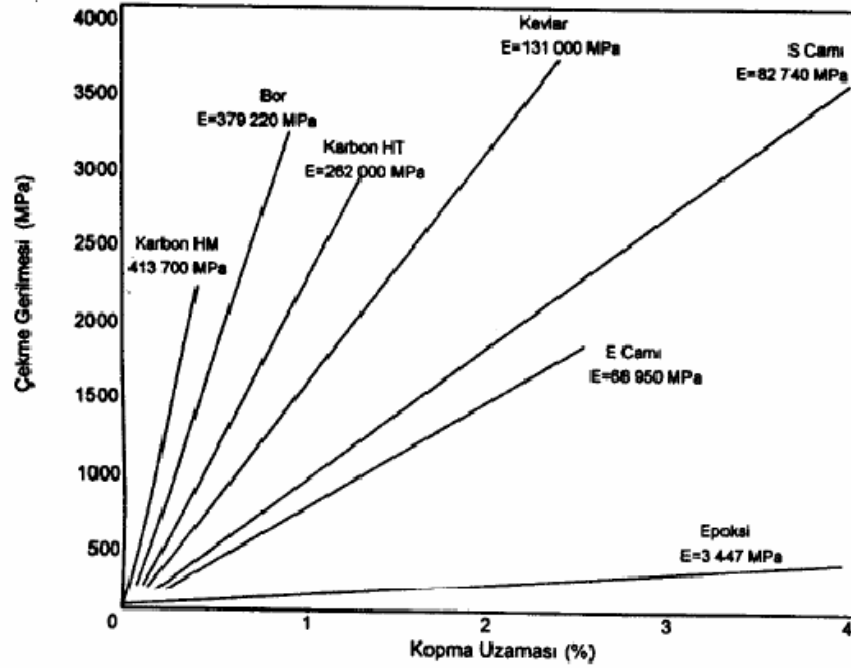
1. Uzunluk/kalınlık oranı en az 10/1 olmalıdır.
2. En büyük kesit alanı $\leq 0.05 \text{ mm}^2$
3. En büyük genişlik $\leq 0,25 \text{ mm}$ olmalıdır.

Bunun yanında elyafkların yüksek mekanik özellik göstermeleri ve tercih edilmeleri için;

1. Gelişmiş mikro yapıya sahip olmalı, tane boyutlarının kk olmalı ve kk boyutlarda (apta) retilmeleridir.
2. Boy/en(ap) oranı fazlaştıkk matris elemanının fiberlere iletilen gerilim artmaktadır.
3. Elastik modülünün çok yüksek olması gereklidir (Arıcan, 2003).

Uygulamalarda en çok karşılaşılan elyafklar ise;

1. Cam elyafklar
2. Bor elyafklar
3. Grafit (Karbon) elyafklar
4. Yapay organik fiberler
 - 4.1 Aramid fiberler(Kevlar)
 - 4.2 Polipropilen fiberler.
 - 4.3 Polietilen fiberler
 - 4.4 Naylon fiberler
5. Yüksek sıcaklık elyafkları (Al_2O_3 , SiC elyafkları)
6. Kılcal kristal (Whiskerler) elyafklardır.



Şekil 2.7 Matris ve takviye malzemeleri dayanım-kopma uzaması karşılaştırılması (Arıcan, 2003)

Şekil 2.7’de matris ve takviye elemanlarının sahip oldukları dayanım-kopma uzaması değerlerinin karşılaştırıldığı bir grafik bulunmaktadır. Bu grafikte takviye elemanlarının sahip oldukları dayanım-kopma uzaması değerleri matris malzemelerine oranla çok daha yüksek olduğu görülmektedir.

Kompozit malzemelerin yapısında bulunan matrisin üç ana işlevi bulunmaktadır.

1. Yapı içerisindeki fiberleri toplu olarak bir yapı içinde bulundurmaktır
2. Kompozit yapı üzerine uygulanan kuvveleri yapı içerisindeki fiberlere iletmektir
3. Fiber takviye elemanlarını dışardan gelebilecek etkilere karşı korumak olarak matris malzemelerin ana görevleri ifade edilebilir.

En uygun matris malzemesi olarak kullanılanlar ilk olarak yüksek akışkanlığa sahip iken, yapı içinde bulunan elyafların çevresinde homojen şekilde yayılması, takviye elemanlarına iyi şekilde yapışması ve daha sonra katı hale gelmelidir. Kompozit malzemelerde bulunan matris malzemelerinin özellikleri kompozit yapının

özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Matris elemanları üstüne uygulanan kuvveti fiberlere homojen şekilde yaymalıdır. Uygulanan kesme kuvvetlerine karşı dayanımları yüksek olmalıdır. Matris malzemeleri kompozit yapının içerisinde yer alan temel elemanlardır ve şu görevleri yerine getirir.

1. Matrisler, fiberleri bir arada tutar ve üzerine gelen kuvvetleri fiberlere iletir. Kompozit malzemenin rijit özellik göstermesini sağlar.
2. Matris, fiberleri toplu olarak bir yapı olarak tutar, fiberlerin birbirinden farklı şekilde hareket etmelerine engel olur ve yapıda oluşan çatlakların büyümesini yavaşlatır.
3. Matris malzemesi kompozit yapının yüzeyinin kaliteli olmasına neden olur.
4. Matris malzemesi, takviye malzemelerini harici olarak kompozit yapıya etki eden dış etkenden etkilenmesini önler.
5. Matrisler yapıyı darbelere karşı korur.

Polimer yapılı matrisleri içeren kompozit malzemeler, günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Matris malzemelerin mekanik özellikleri nedeni ile endüstriyel uygulamalarda kullanımları yaygındır. Dinamik yükler etki eden yapılarda, yüksek hızlı darbelere maruz kalınan uygulamalarda yaygın olarak yer almaktadırlar.

Matris malzemelerin kesme kuvvetlerine karşı dayanımı ve matris malzemesi ile takviye elemanları arasındaki bağ yapısı kuvvetli ise kompozit yapıda meydana gelebilecek bir çatlak başladığı doğrultusunda büyümesi sonucu yapı gevrek özellik göstererek ani kopma sonucu parlak ve temiz bir yüzey yapısı görülür. Bağ kuvvetleri zayıfsa kompozit yapının dayanımı azalır. Bağ kuvvetleri çok yüksek değilse kompozit malzemedeki meydana gelebilecek bir çatlak nedeni ile koparsa, kompozit yapı sünek özelliğe sahip olan bir yapının kopmasına benzer lifli bir yüzeye sahip olur. Genel olarak kullanılan matris malzemeleri;

1. Plastik Matrisler
2. Epoksi Reçine Matrisler
3. Polyester Reçine Matrisler

4. Vinylester Reçine Matriksler
5. Fenolik Reçine Matriksler
6. Metal Matrisli Kompozitler
7. Seramik Matriksler'dir.

2.5 Kompozit Malzeme Kullanım Alanları

Kompozit malzemeler günümüzde artan miktarlarda ve her geçen gün yeni sektörlerde kullanım alanları artmıştır. Yoğun olarak uçak sanayinde kullanımından sonra kompozit malzemelerdeki gelişimlerin ardından çok çeşitli alanlarda ve farklı amaçlarda kullanımları bulunmaktadır.

2.5.1 Havacılık ve Uzay Sanayi

Özel üretim olan ileri kompozit ürünler havacılık sektöründe çok yaygın bir kullanım alanı bulunmaktadır. Kompozit malzemelerin sahip oldukları ağırlık-dayanım oranlarının yüksek olması, mekanik özelliklerinin üstün özelliklere sahip olması hava araçlarında içyapılarının yanında yoğun olarak ana yapısını oluşturan parçalarının üretiminde önemli bir yer almalarını sağlamaktadırlar. Polimer esaslı kompozit malzemeler havacılık sanayinde sıkça kullanılmaktadır.

Hava araçları tasarımlarından gövde ağırlıkları, uzun hizmet ömrü, sistem tasarımının ana hatları, maliyet etkinliği, mesafe, seyir sürati, uçuş tavan yüksekliği gibi yüksek tasarım ihtiyaçlarını karşılayacak biçimde geliştirilirler. Bu nedenlerle dolayı tüm koşulların benzer olduğu durumlarda uzun kullanım ömrü, düşük işletme maliyetleri gibi avantajlar nedeni ile ağırlığın en az olacağı şekilde tasarımları ve üretimleri gerçekleştirilmektedir. Bu nedenlerden dolayı titanyum vs. gibi hafif metallerin yanında üstün özellikleri nedeni ile kompozit malzemelerde havacılık sanayinde kullanılan yangın bir ürün sınıfını oluşturmaktadır. Hava araçları tasarımında emniyet, ekonomiklik, işletme süreleri şartlarının en iyi şekilde optimizasyonu ile gerçekleştirilmektedir. Kompozit malzemelerin sahip oldukları özgül mukavemet ve rijitliklerindeki avantajlardan dolayı diğer geleneksel

malzemelere oranla havacılık sanayinde kullanım oranları gün geçtikçe artmaktadır (Arıcasoy, 2006).

Uzay sanayinde ise kompozit malzemelerin uygulamalarda yer almasının nedeni hafiflik avantajı, atmosfer dışı zor şartlardaki yüksek dayanımları ve termal stabiliteleridir. Bunun dışında kompozit malzemeler füze, roket gövde ve kanat yapılarında bu avantajlardan dolayı tercih edilmektedirler.

2.5.1.1 Havacılıkta Kullanılan Kompozit Bileşenleri

2.5.1.1.1 Matris Malzemeleri. Havacılık sanayinde kullanılmakta olan kompozit malzemelerin matrisini oluşturan polimer bazlı reçineler;

1. Epoksi reçineler
2. Polyester reçineler
3. Polyamidler–naylonlar olarak gruplandırılırlar (Arıcasoy, 2006).

Epoksi Reçineleri: Epoksilerin adlandırılmaları içerdikleri lineer polimerlerdeki epoksil grupları ile yapılır. Epoksi reçineleri; havacılık, roket, füze ve uzay sanayinde kullanılan kompozit yapıların imalatında, çeşitli takviyelere (karbon, cam, bor vs.) matris malzemesi kullanılmasının nedeni;

- Her sıcaklıkta ve sıcaklık aralığında katılaşıp sertleşebilmesi
- Yüksek aşınma dayanımı
- Uygulanan yüzeylere iyi yapışabilme
- Yüksek kimyasal dayanımdır.

Polyesterler: Alkol ve asitlerin birleşimi ile üretilen polyester reçineleri; etkileşime giren maddelerle çeşitli gruplara ayrılırlar. Polyesterlerin çeşitlerinden olan alkidler; kaplama amacı ile üretilen malzemelerde, doymuş polyesterler ise tekstil sanayi, elektrik-elektronik sanayi, fotoğraf ve film endüstrisinde ve otomotiv

sanayinde sıklıkla yer alırlar. Hava araçlarının iç döşeme kısımlarında kullanımları fazla olan polyesterler doymamış polyester olarak gruplandırılan malzemelerdendir.

Polyamidler –Naylonlar: Sert ve dayanımların yüksek olan polyamidlerin bir çok türü bulunmaktadır. Naylon6 ve Naylon66 ürün çeşitleri kompozit malzemelerin yapısında bulunan polyamidlerin sık kullanılanlarındandır.

2.5.1.1.1 Fiber Takviyeler

Cam Fiberler: Fiber olarak nitelendirilen malzemelerin üretiminde camlar çok çeşitli ve fazla miktarlarda kullanılırlar. Fazla miktarlarda kullanımda olan camlardan içerisinde kalsiyum, bor, sodyum, demir ve alüminyum oksitlerini bulunduran silis olarak isimlendirilen cam türüdür. E cam sınıfında bulunan kompozit malzemeler yüksek dayanım, sertlik, elektriksel direnç özelliklerine sahiptir. C cam sınıfında bulunanların ise korozyona dayanımları fazladır. S cam olarak isimlendirilenler ise yüksek young modülü, yüksek sıcaklara dayanıma sahiptirler.

Karbon Fiberler: Karbon fiberler yapımında kullanılan ürünlere bağlı olarak iki sınıfta toplanırlar. Petrol ürünlerinden üretimleri yapılan fiberler genellikle yüksek mukavemet gerektirmeyen alanlarda yer alırlar. Takviye olarak çoğunlukla polyacrylonitril (PAN) yapılmış fiberler ile birlikte kullanılmaktadırlar. Karbon fiberler genellikle çok yüksek mukavemet gerektiren uygulamalarda yer almaktadırlar. Karbon fiberler, grafit malzemesinde bulunan karbon atomları birbirine bağlayan güçlü kimyasal bağlara sahiptirler ve bundan dolayı yüksek elastisite modülü ve çekme mukavemet özellikleri bulunmaktadır.

Organik Fiberler: Organik fiber malzemeler yüksek dayanım ve yüksek rijitlik özellikleri barındıran ve yüksek seviyede düzene sahip polimerlerdir. Organik fiberler, izotropik olmayan davranışa sahiptirler. Karbon fibere benzer olarak anizotropik özelliklidirler. Kevlar 29 ve Kevlar 49 organik fiberlerin bilinen

çeşitlerindedir. Yer aldıkları havacılık uygulamalarına aşağıdaki gibi örnekler verilebilir;

- A380'in kanatlarında kullanılan paneller ve flapleri karbon fiber ve epoksiden oluşan kompozit malzemeler,
- A380'nde radar üstü burun kaplamasında (radome) CTP olarak bilinen cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler,
- A380'in dikey stabilizerlerinde aramid fiber ve epoksi birleşimi kompozit malzemeler,
- Uyduların temel yapılarında kompozit malzemeler kullanılmaktadırlar (Arıcasoy, 2006).

2.5.2 Denizcilik Sanayi

Denizcilik sanayinde özellikle korozyona dayanım ve yüksek mukavemete rağmen sağlanan hafiflikten dolayı kompozit malzemeler genellikle tekne gövdelerinde yoğun olarak kullanılmaya başlanmıştır. Yelkenli gövdeleri, yatların gövdesinde, yelken direklerinde çok sık şekilde kompozit malzemeler kullanılmaktadırlar. Klasik ağaç veya çelik gövdelerin yerine ağaç ve çelikle bir arada kullanılan kompozit yapılar çok sık kullanılmaya başlanmıştır. Ağaç gövdeler için dayanımların yükseltilmesi, çelik gövdeli tekneler açısından ise korozyona karşı dayanımlarının artırılması ile kullanım ömürlerinde ve işletme maliyetlerinde önemli avantajlar elde edilmiştir.

2.5.3 Spor Araçları

Kompozit malzemelerin spor malzemelerinde, araç ve gereçlerinde kullanımları artmaktadır. Kullanılan spor aletlerinin hafiflemesi nedeni ile hareket kabiliyetinin yükselmesini ve daha çok dayanımına gerek duyulan alanlarda kullanılmasını ürettikleri kompozit malzemelerden dolayı sağlamıştır. Genellikle cam ve karbon elyaf takviyeli kompozit malzemeler spor malzemelerinin üretiminde kullanılmaktadırlar.

Kompozit malzemeler ile yapılan kano, sörf ve yatlara sağladığı korozyon direncinin artmasından dolayı daha uzun süre kullanılmaktadırlar ve kompozit malzemelerden dolayı sahip olunan hafifleme ve dayanımdan dolayı daha hızlı, uzun mesafeler alınmasına ve daha çok ekipmanları zorlayacak faaliyetlerde bulunmasına olanak sağlamıştır. Dağ bisikletleri olarak ifade edilen sınıftaki bisikletlerde kullanım yerlerinden dolayı ihtiyaç duydukları hafiflik ve dayanım artışları kompozit malzemeler sayesinde kazandırılmıştır. Bu özellikleri sahip olmaları için karbon elyaf takviyeli kompozit malzemeler kullanılarak üretilmektedir. Kompozit malzemeler nedeni ile ani olarak oluşan şokları emme ve bu sayede de yüksek dayanım kazanmaktadırlar. Golf sopalar, tenis racketleri, yüksek atlamada kullanılan çubuk vs. gibi spor malzemelerinde hafiflik sağlaması için karbon elyafı takviyeli kompozitler kullanılmaktadır. Kompozit uygulamaları ile üretilen spor malzemeleri örnekleri;

- Su kayağı; Termoplastik prepreg
- Kar kayağı; Ahşap üzerine sarılmış karbon, aramid, cam elyafı karışımı ile epoksi
- Kano küreği; (%33 Cam ile Poliftalamid)
- Su kaydırakları; CTP
- Sörf Tahtaları; CTP
- Bisiklet; (Karbon ile Poliamid 6)
- Spor Ayakkabı; termoplastik poliüretan, petek (honeycomb)
- Golf Sopası; Karbon Fiber ile epoksi
- Tenis Raketleri; Aramid (Kevlar) ile epoksi
- Zıpkın Gövdesi; Karbon Fiber ile epoksi
- Palet; Karbon fiber ile epoksi kullanılarak üretilmiştir (Arıcasoy, 2006).

2.5.4 Korozyona Dayanıklı Ürünler

Korozyona karşı sağladıkları yüksek dayanımdan dolayı kompozit malzemeler sıklıkla bu etkilere maruz alanlarda kullanılmaktadırlar. Kompozit malzemeler hava ve su nedeniyle karşılaşılan korozyonların yanında kimyasal etkiler nedeni ile

oluşabilecek korozyonlara karşıda dirençleri yüksektir. Bu nedenle kullanıldıkları yerlere örnek olarak;

- Su tankı; CTP
- Mazgal Olukları; CTP
- Yeraltı Boruları;
- Marketlerde Dondurulmuş Gıda Reyonu Kaplaması; CTP
- Rasathane Kubbesi; CTP
- Açık Saha Dolapları: CTP
- Çit; CTP
- İlan Panoları; CTP kullanılarak üretilmektedirler (Arıcasoy, 2006).

2.5.5 Ulaşım

Kompozit malzemeler kolay kalıplama özellikleri nedeni ile özel nakliye araçlarının sahip oldukları tank ve kasaların rahat üretilmesini, hafiflik nedeni ile işletme maliyetlerinin düşürülmesini, yüksek ısıya karşı dayanımlı olmasını, dışarıdan gelebilecek darbelere karşı yüksek koruma sağlaması nedeni ile tercih edilmektedirler.

- Traktör Kaporta
- Kabin
- Oturma Birimi; SMC
- Toplu Taşıma Araçları Oturma Birimi; SMC
- Konteynır Tabanı; GMT
- Otobüs Havalandırma Kanalları
- Port Bagaj Parçaları
- Gösterge Paneli; CTP
- Açık Alan Servis (Golf Arabası) araçları kaporta, tavan; CTP
- Teleferik; CTP, Maçka teleferiği
- Tren; Kompozit prepreg ve dokuma malzemeler (Arıcasoy, 2006).

2.5.6 Otomotiv

Kompozit malzemeler özellikle bu üç sanayi kolunda çok yoğun bir şekilde kullanılmaktadırlar. Otomotiv sanayinde sağladığı dayanımın yanında neden olduğu hafiflik nedeni ile aracın sahip olduğu sürtünme kuvvetinin azalması ile düşük yakıt tüketimi sağlamaktadır. Güvenlik açısından ise özellikle üretilen spor araçlarında sıklıkla kompozit malzemeler kullanılmaktadır.

- Cam Sileceği; %30 Cam ile PBT
- Filtre Kutusu; Mercedes, %35 Cam ile Poliamid 66
- Pedallar; %40 Cam ile Poliamid 6
- Dikiz Aynası; %30 Cam ile ABS
- Far Gövdesi; BMW, %30 Cam ile PBT
- Hava Giriş Manifoldu; BMW, Ford, Mercedes, %30 Cam ile Poliamid 6
- Otomobil Gösterge Paneli; GMT
- Otomobil Spoiler; CTP
- Otomobil Yan Gövde İskeleti; Ford, CTP
- Otomobil kaporta; Corvette, SMC CTP (Arıcasoy, 2006).

2.6.7 Yapı Sektörü

Yapı sektöründe seri imalata uygun olmasından dolayı üretim sürelerinin kısılması, yüksek dayanım, hafiflik ve ısı yalıtımı gibi uygulamaların olduğu alanlarda sıklıkla kullanılmaktadırlar.

- Köprü Tabanı; CTP
- Tırabzanı; CTP
- Yürüme yolları; CTP
- Taşıyıcı Konstrüksiyon; CTP
- Bina Balkon Korkuluğu; CTP
- Kapı; CTP
- Taşıyıcı Konstrüksiyon, Yüzme Havuzu, Kapı Saçağı, Yer karoları; SMC

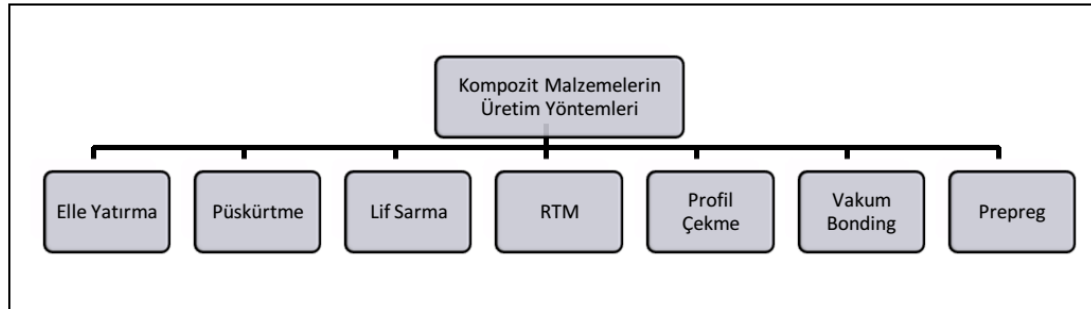
- Bina Kaplama Panelleri; CTP
- Kvet; CTP
- Lavabo; CTP
- Sokak Lambası; CTP (Arıcasoy, 2006).

Kompozit malzemelerin kullanıldığı diğer sektörler ise;

- Talaşlı imalat sektörü
- Rüzgar Türbin enerji sektörü
- Basınçlı kaplar endüstrisi
- Tarım sektörü
- Sağlık sektörü
- Müzik sektörü vs.

2.6 Kompozit Malzeme retim Yöntemleri

Genel olarak kompozit üretim yöntemleri Şekil 2.8'deki gibi belirtilen yöntemlerden oluşmaktadır. Şekil 2.8'de kompozit malzemelerin üretimlerinde en çok kullanılan yöntemler görülmektedir.



Şekil 2.8 Karbon-epoksi ile yapılmış bir uydu gövdesi (Karasu, 2014)

2.6.1 Elle Yatırma (*hand lay-up*)

Fiber takviye elemanlarından yapılmış olan dokuma şeklinde veya kırılmış kumaşların önceden hazırlanmış olan kalıba elle yerleştirildikten sonra reÇine uygulaması ile işlem gerĐekleřtirilir. Hazırlanmış olan kumaş yerleştirilmeden,

üretim için uygun olarak hazırlanmış kalıba jelkot ile uygulama yapılır. Jelkot uygulamasından sonra jelkotun katılması beklenir. Jelkot katıldıktan sonra hazırlanmış olan takviye elemanları kalıba yerleştirilir. En son olarak takviye elemanı ile uyumlu olan matris malzemesi yani reçine uygulaması gerçekleştirilir. Reçine genellikle bir rulo fırça yardımı ile sürülerek elyaflara iyice yedirilir. Uygulamada reçine ve elyaf yoğunluğunun homojenliğinin tüm kalıp parçasında aynı olacak şekilde olmasına dikkat edilir. Polyester, epoksi, vinilester, fenolik reçineler bu uygulamada sıklıkla kullanılır. Bu uygulama genellikle düşük sayıdaki üretimlerde, büyük çaplı kalıplarda (tekne gövdesi vs.) kullanılmaktadır. Uygulamada makineler kullanılmadığından fazla işçilik ihtiyacı vardır.

2.6.2 Püskürtme (spray-up)

Püskürtme sistemi elle üretim sisteminin makineleşmiş hali olarak ifade edilebilir. Püskürtme spray aparatına sürekli olarak gelen fiber burada kırılıp reçine ile birlikte hazırlanmış olan kalıp üstüne püskürtülerek uygulama gerçekleştirilir. Kullanılan reçine içine hızlı katılması için katılaştırıcı bir malzeme katılarak uygulamada kullanılır. Püskürtme işlemi yapıldıktan sonra kalıp üzerine tam olarak yerleşmesi için bir rulo fırça yardımı ile düzeltilir.

2.6.3 Elyaf Sarma (filament winding)

Elyaf sarma sistemi kendine özgü kalıplara sahiptir bu yöntem seri imalata uyarlanabilir. Devamlı fiber liflerinin dönmekte olan bir kalıba gelirken reçine ile temas ettirilir. Matris malzemesi ile ıslatılmış olan fiber lifleri dönmekte olan özel kalıp üzerine belirli bir sistemle sarılır. Sarılma işlemi yapılırken tasarıma uygun olarak istenilen açılar ile sarılma işlemi gerçekleştirilebilir. Uygulamanın ihtiyacına göre uygun sayıda katman sarılması ile uygulama sona erdirilir. Daha sonra reçinenin katılması ile kompozit yapı kalıptan çıkarılır. Uygulamalarda sıklıkla dönel eksene sahip olan borular, şaftlar, direkler, yüksek basınç tankları gibi üretimlerde sıklıkla kullanılırlar.

2.6.4 Reçine Transfer Kalıplama (RTM / reçine enjeksiyonu)

Reçine transfer kalıplama sisteminden iki parçadan oluşan bir kalıp yapısı ile üretim yapılmaktadır. Önceden ısıtılmış kalıp içerisine fiber malzemeleri yerleştirilerek ön şekil verilir. Bu yöntem ile genellikle karmaşık şekillere sahip parçalar üretilebilir. Üretimden sonra elde edilen parçanın yüzeyleri düzgündür. Kalıba yerleştirilen fiberlerden sonra kalıp kapatılır. Daha sonra reçine bir pompa yardımı ile basınçlı şekilde kalıba gönderilir. Kalıp içindeki havanın alınması için vakum sistemi kullanılabilir. Reçinenin katılaşmasından sonra parçanın kalıptan ayrılması sonucu parça hazırlanmış olunur. Üretimin basınç altında yapılması ve üretim sırasında kalıp içindeki havanın vakumla emilmesi ile hava gözenekleri sahip olmayan homojen dağılıma sahip bir kompozit yapı elde edilebilmektedir.

2.6.5 Profil Çekme (pultrüzyon)

Profil çekme yöntemi sürekli fiber malzemelerin reçine ile ıslatılarak belirli bir kesite sahip önceden ısıtılmış bir kalıptan geçirilmesi ile gerçekleştirilen üretim yöntemidir. Kalıp önceden 150 civarında bir sıcaklıkta olup kalıp içinden geçen reçine ile ıslatılmış sürekli elyafların kalıptan geçirilirken reçinenin katılaşmasını sağlar. Kalıp çıkışından kalıp kesitini almış olan numune hazırlanmış olur. Üretimde kullanılan devamlı lifler nedeni ile kullanılan parçalar lif doğrultularında gelen gerilimlere karşı yüksek dayanım gösterirler. Diğer doğrultularda gelebilecek kuvvete maruz kalabilecek parçalar için özel dokuma kumaşlar kullanılarak üretim gerçekleştirilir.

2.5.6 Hazır Kalıplama (compression molding)

Hazır kalıplamada içerisinde cam elyafı, reçine, katkı ve dolgu malzemeleri içeren kalıplanmaya uygun, hazır kalıplama bileşimleri olan kompozit malzemelerin sıcak pres kalıplar ile basılarak ürünün üretilmesi yöntemidir. Karmaşık şekillerin üretilebilmesi, metallerin numune içine yerleştirilmesi, farklı kenar kalınlıkları ile üretilebilmeleri gibi avantajlara sahiptirler. Ayrıca numunenin iki yüzü de kalıp ile

şekillenmektedir. Diğer kompozit malzemelerin üretim yöntemlerinin uygun olmadığı delik gibi komplike şekiller üretilebilmektedirler. Üretim sonrası kayıp oranı azdır. Bu yöntemin dezavantajı ise kalıplama bileşimlerinin buzdolaplarında saklanmaları gerekmektedir. Kalıpların metal olması ve üretimde pres kullanılması nedeni ile bu yöntem maliyetlidir.

2.5.7 Vakum Torbası

Tezimizde de kullandığımız bu yöntemde üretilecek yapının eğer gerekiyorsa bir kalıp ile veya levha halinde üretim yapılacaksa bir düz zemin üzerinde üretim gerçekleştirilebilir. Zemine veya kalıba öncelikle yapışmasını önleyici bir film uygulanır. Daha sonra uygun boyutlarda kesilmiş elyaf kumaşlar istenilen tabaka kadar yerleştirilir. Üzeri vakum torbası ile kapatılarak sistem vakuma alınır. Torba içinde kalan hava vakum pompası ile çekilerek yapı üzerinde basınç oluşturulur. Vakum torbası içindeki hava boşaltılır. Vakum işlemi devam ederken sisteme reçine verilir ve tamamen yayılması beklenir. Reçine verme işleminin bitmesi ile vakum kapatılıp reçinenin sertleşmesi beklenir. Üretim sırasında kalıp veya zemin ısıtılabilceği gibi daha sonrasında reçinenin tam olarak katılaşmasından sonra özel fırınlarda kürlendirilebilir.

2.5.8 Otoklav

Kompozit malzeme üretimde ihtiyaç duyulan homojenliğin en iyi şekilde sağlanması amacı ile vakum torbalama yöntemindeki gibi sistem vakuma tabi tutulur. Vakum torbasının sahip olduğu 1 atm civarındaki basınç değerine oranla daha yüksek değerlerde basınç uygulanabilir. Daha sonra yüksek basınç ve sıcaklıkla üretim gerçekleştirir. Yapı içerisindeki hava kabarcıkları tamamen sistemden uzaklaştırılır. Otoklav basınçlı ve ısıtılabilen bir kaptır. Yüksek seviyeli kompozitlerin üretimine imkan vermektedir. Yapının sahip olduğu fiber/reçine yüzdesini arttırarak daha kaliteli kompozit malzemelerin üretilmesine sağlar. Uygulanan basınç, vakum ve ısıtma miktarı sürekli istenilen değerlerde tutulabilir. Bu değerler üreticilerin verdiği bilgilere göre (kürleşme eğrilerine) ayarlanmaktadır.

Bu üretim yöntemlerinin yanında santrifüj kalıplama, yüksek hızlı reçine transferi de kullanılmaktadır.

Metal matriksli kompozitlerin üretiminde ise sıcak presleme, toz metalürjisi, sıvı metal emdirme, elektrolitik yöntem, buhar çöktürme, birlikte ekstrüzyon gibi yöntemler kullanılmaktadır.

BÖLÜM ÜÇ

TABAKALI KOMPOZİT MALZEMELER

3.1 Tabakalı Kompozitleri Sınıflandırılması

Tabakalı kompozit malzemeler, sürekli veya süreksiz takviye malzemeleri olan lifler ile oluşturulan ince yapıdaki tabaka, katman veya plak olarak isimlendirilen yapıların bir araya gelmesi ile elde edilirler. Plaklar takviye için kullanılan liflerin doğrultusuna, içeriğine ve türüne göre sınıflandırılabilirler. Tabakalar tek yönlü, birden çok yöne ve açığa sahip olacak şekilde, örgü biçiminde ve yönsüz yani kırılmış liflerden oluşacak şekilde üretilirler. Tabakalı kompozit malzemeler ihtiyaç duyulan dayanım, dayanımın yüksek olması gereken yön gibi özelliklere göre istenilen kalınlıklarda oluşacak şekilde yeterli katman sayısının üst üste dizilip uygun olan matriks malzemeleri birleştirilmeleri sonucu elde edilirler.

Takviye malzemesi olarak elyaf kullanılan kompozit malzemeler, sahip oldukları çeşitli özellikler nedeni ile tek ve çok katmanlı olarak üretilip bu şekilde sınıflandırılabilirler. Tek katlı olarak üretilen kompozitler birbirinden farklı birden fazla plakanın birleştirilmesi ile üretilirler. Kullanılan plakaların hepsi aynı doğrultu açısına ve önüne sahiptir ve bu nedenle tüm kompozit yapının tamamı aynı özelliklere sahip olacağından tek katlı bir yapı olarak ifade edilebilir. Kırık elyaf takviyesine sahip olan kompozit yapılar, kompozit yapının her yerinde aynı dağılımı, yön ve açıları sağlayamayacağından kompozit malzemeler tek katmandan oluşmasından dolayı bu kompozit malzemelerde tek katlı kompozit yapı sınıfında bulunurlar.

Genel olarak kullanılan kompozitlerin büyük bir bölümü tabakalı kompozit malzemelerdir. Tabakalı kompozit malzemelerin yapısında bulunan bütün katmanların her biri ihtiyaç duyulan özelliklere göre şekillenip kompozit yapısında yer alırlar. Tabakaların her biri Şekil 3.1'de ki gibi tek bir yön veya farklı yön, farklı takviye malzemeler içerebilirler. Katmanların üretilmeleri sonucu ince yapıya sahip olmaları nedeni ile tek başlarına kullanılmaları zordur. Bu yüzden birden fazla

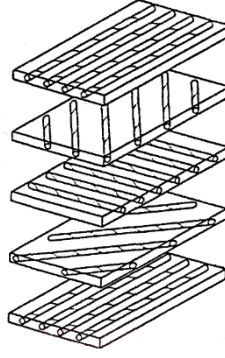
katman birleştirilerek tabakalı bir yapı oluşturulur ve uygun özellikler elde edilmesi ile istenilen yerlerde kullanılır. Kompozit yapısında bulunan tabakaların özellikleri (yön, takviye elemanları, doğrultuları, açıları vs.) aynı ise bu yapı izotropik olarak ifade edilir. Eğer her tabaka farklı özelliklerden meydana geliyor ise bunlar ortotropik (karma) olarak ifade edilirler. Tabakalı kompozit malzemeler genellikle simetrik veya asimetrik diye ikiye ayrılırlar.

Tabaka; tabakanın diğer bir isimlendirilmesinde laminedir. Lamine, bir matris içinde tek yönlü elyaflar ya da dokunmamış liflerin düz bir şekilde (bazen bir kabuk gibi kavisli) bir düzenlenmesidir. Lifler, veya filamentler temel takviye veya yük taşıyıcı elemanıdır. Bu lifler genellikle dayanımlı ve serttirler. Matris, organik olan, seramik veya metalik olabilir. Matrislerin temel fonksiyonu liflerin korunması ve desteklenmesi, lifler arasında yük dağıtma ve elyaflar arasındaki yükü iletmek için bir aracı temin etmek üzeredir.



Şekil 3.1 Laminelerin ana türleri (Arman, 2003)

Tabakalar; Bir laminat Şekil 3.2'deki gibi başlıca malzeme yönünde çeşitli yönelimleri ile laminaların bir yığın oluşturmasıdır. Laminat yapımında genellikle laminelerin oluşumunda kullanılan matris malzemeleri kullanılmaktadır. Laminatlar birbirinden farklı yönelimlere sahip fiberlerden oluşturulmuş lamineler içerebilirler.

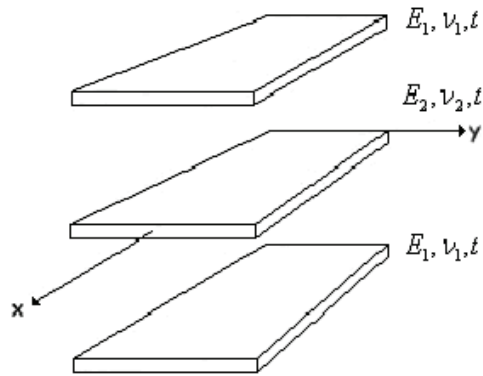


Şekil 3.2 Laminat yapısının ayrılmış görüntüsü (Arman, 2003)

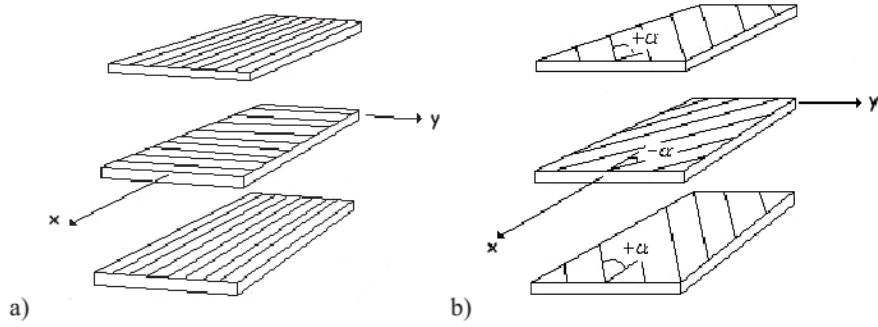
3.1.1 Simetrik Tabakalı Kompozit Malzemeler

Yapıyı oluşturan katmanlar orta ara yüzey başlangıç olacak şekilde tüm özellikleri (lif doğrultuları, takviye malzemeleri vs. tüm malzeme ve fiziki özellikleri) aynı olacak şekilde simetrik olarak dizilmesi ile oluşan tabakalı kompozit yapılarıdır. Kendisini oluşturan yapıların izotropi veya ortotropik yapıya sahip tabakalardan oluşmasına göre bu kompozit yapılarda kendi içinde ikiye ayrılırlar.

İzotropik yapı simetrik tabakalı kompozit malzemeler: tabakalı kompozit malzemelerin orta ara yüzeyinden başlayarak birbirleri ile izotropik olan tabakaların simetrik olarak karşılıklı olarak yerleştirilmesi oluşan yapılarıdır. Şekil 3.3'de birbirinden farklı kalınlıklardaki üç izotropik tabakanın simetrik olarak yerleştirilmesi ile oluşan izotropik yapı simetrik tabakalı kompozit malzemedir.



Şekil 3.3 İzotropik tabakalardan oluşan simetrik tabakalı kompozit (Jones, 1998)

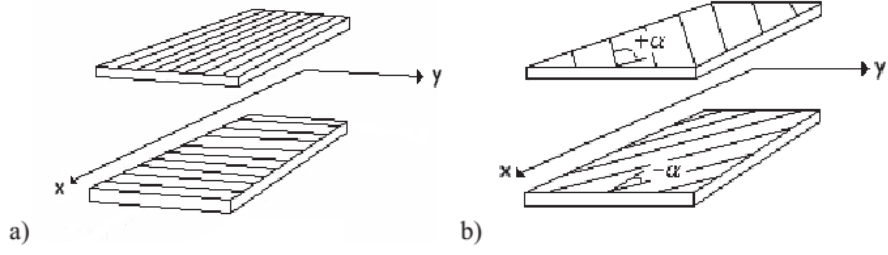


Şekil 3.4 Ortotropik tabakalardan oluşan simetrik tabakalı kompozit (Jones, 1998)

Ortotropik yapıya sahip simetrik tabakalı kompozit malzemeler: Ortotropik yapıdaki katmanlar orta ara yüzeyden başlayarak karşılıklı olarak simetrik yerleştirilmeleri ile oluşan tabakalı kompozit malzemelerdir. Şekil 3.4 a'da üç katmanlı farklı fiber yönlerine sahip orta ara yüzeye göre yerleştirilmiş $0,90,0$ açı yönlerine sahip ortotropik yapıya sahip bir simetrik tabakalı kompozit malzemeye aittir. Yine Şekil 3.4 b'de farklı açılara sahip (α açısı) üç katmanlı bir ortotropik yapıya sahip bir simetrik tabakalı kompozit malzemedir.

3.1.2 Antisimetrik (asimetrik) Yapılı Tabakalı Kompozit Malzemeler

Uygulamalarda istenilen özelliklerin sağlanmasına yönelik kompozit yapılar tasarlanırken farklı özelliklere sahip kompozit tabakaların farklı şekillerde yerleştirilmesi ile oluşturulan asimetrik yapıya sahip tabakalı kompozit malzemelere gerek duyulmaktadır. Yapının içinde bulunan tabakaların bazılarında belirli bir yönde dayanım sağlanması isteniyorken diğer farklı tabakalardan da diğer başka özellikleri sağlanması ve farklı yönlerde ve özelliklerde olması gerekebilir. Şekil 3.5a'da fiber yönlenme doğrultuları $0,90$ olan iki katmana sahip ve iki yönde gereken özelliklerin sağlanması amaçlanmış bir asimetrik yapıya sahip kompozit malzemedir. Şekil 3.5b'de de yine farklı açılara sahip asimetrik yapıya sahip bir asimetrik yapıya sahip kompozit malzeme yapısıdır.



Şekil 3.5 Antisimetrik tabakalar (Jones, 1998)

3.2 Tabakalı Kompozitlerde Kullanılan Dokumalar

Tabakalı kompozit malzemeler genellikle farklı yönlere sahip kumaşların üst üste yerleştirilmesi ile üretilmektedirler. Bunun yerine wovnen olarak isimlendirilen dokuma kumaşlar, liflerin belirli açılarla birbirine dokunarak oluşturulurlar. Dokuma kumaşlar istenilen yönde ve açıda ip şeklindeki takviye elemanlarının birbirleri ile düzenli ve bir plan içerisinde birbirleri ile kumaş şeklinde üretilmeleri ile oluşturulurlar. Tezimizde de (0,90) açısı ile üretilmiş cam elyaf takviye malzemesinden üretilmiş dokuma kumaşlar kullanılmıştır.

BÖLÜM DÖRT

DELAMİNASYON

4.1 Delaminasyon Tanımı

Tabakalı kompozit malzemeler, özellikle fiber takviyeli kompozit malzemeler çeşitli yapısal uygulama tasarımların yapımında artan bir oranda kullanılmaktadır. Bu malzemelerin çoğunlukla kullanılan sıradan mühendislik malzemelere oranla ağırlık dayanım oranının yüksek olması en yüksek avantajlarından biridir. Çok sayıda avantajları olmasına rağmen en büyük dezavantajlarından biri tabaka kalınlığı doğrultusunda tabakalar arasında düşük kohezyon kuvveti nedeniyle dayanım kuvvetlerinin az olmasıdır.

Eğer tabakalı kompozit malzeme delaminasyon içeriyorsa dayanım kuvveti bu kusur yüzünden daha olumsuz olarak etkilenir. Kompozit malzemelerdeki delaminasyonlar, üretim sırasındaki kusurlar ve/veya hatalı üretim prosedürleri, kullanım sırasındaki olumsuzluklar ve dışarıdan gelebilecek bir etki ile meydana gelebilmektedir. Bu durum kompozit malzemeye düşük bir basma kuvveti etki ettiğinde kritik burkulma yükünün azaltmakta ve böylece kompozit malzemenin basma dayanımını ve rijitliğini azaltmakta ve delaminasyon bölgesinin büyümesine neden olmaktadır.

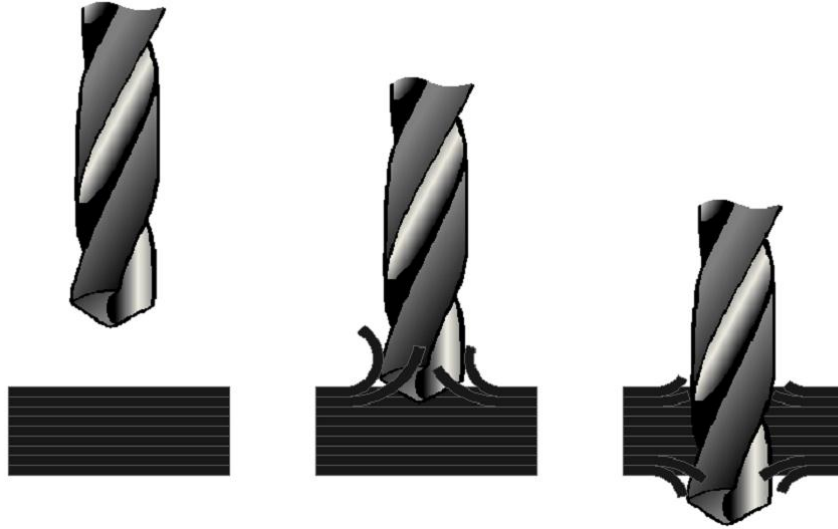
4.2 Delaminasyon Oluşumunun Nedenleri

Kompozit yapıların oluşturulmasında temel olarak kompozit yapı parçalarının laminasyonunun en çok kullanılan imalat tekniklerinden biri olarak yaygın halde kullanılmaktadır. Laminasyon yolu ile üretilen lamine yapılarda en çok karşılaşılan hatalardan biri delaminasyon olarak adlandırılan süreksiz bölgelerin oluşmasıdır. Tabakalı kompozit malzemelerde en yaygın oluşan delaminasyon türü tabakalı yapıların sahip oldukları katmanlı yapılarda, katmanların tek tek ayrılması ile meydana gelmektedir. Tabakalı kompozitlerde meydana gelen süreksizlikler (delaminasyonlar) çeşitli nedenlerden dolayı meydana gelebilir.

4.2.1 İmalat Kusurları

Uygun olmayan üretim teknikleri, yabancı maddeler, safsızlıklar, imalat hataları laminatların ardışık tabakalar arasında zayıf bir bağ oluşması ile sonuçlanabilir. Özellikle üretimdeki sıcaklıklardan dolayı tabakalar arası termal genleşmelerin farklı olması, tabakalar arası farklı gerilmelere neden olmaktadır. Buda tabakalar arası bağların zayıflamasına neden olmaktadır.

Örneğin Şekil 4.1’de olduğu gibi üretim sırasında yapılacak olan delme işlemi sırasında meydana gelen interlaminar gerilmeler nedeni ile delaminasyonlar meydana gelmektedir. Matkap ucunun kompozit yapıya giriş ve çıkış sırasında en üst tabakalar yukarı doğru zorlanırken ve alttaki tabakalar ise aşağı yönde zorlanmaktadır. Nüfuz ettikten sonra, malzeme ve yakın katların arka yüzeyi genellikle ön yüzeyden daha fazla hasarlı olduğu gözlenmektedir.



Şekil 4.1 Delme işlemi sonucu oluşan delaminasyon (Sezer, 2011)

4.2.2 Darbe Hasarı

Kompozit darbe hasarı kompozit yapılarının temel tasarım sınırlamalarından biridir. Darbe hasarı iki şekilde sınıflandırılabilir. Bunlar yüksek hız darbesi (high velocity impact- HVI) veya düşük hız darbesi (low velocity impact-LVI) olarak ifade

edilir. Bazı yayınlarda da orta hız darbesi adı altında bir sınıf olduğu ifade edilsede, bu grup yüksek hızlı darbe sınıfına dahil edilmiştir.

4.2.2.1 Yüksek Hız Darbesi (high velocity impact- HVI)

Yüksek hız etkisi önemli yüzey hasarlarına neden olur ve bu nedenle, kolaylık ile tanımlanabilir ve ayırt edilebilir. Darbe kalınlık boyunca penetrasyona neden olabilir. Hasarlı olan çıkış bölgesi alanı bileşenin kalınlığı ile doğrusal şekilde arttığı gösterilmiştir. Yüzey hasarına ek olarak, aynı zamanda darbe yeri etrafında önemli delaminasyon bölgelerine neden olabilir.

4.2.2.2 Düşük Hız Darbesi (low velocity impact-LVI)

İç delaminasyonlar düşük hız darbesi nedeni ile meydana gelebilmektedirler. Bu hasar sınıfında, önemli bir yüzey hasarı işareti olmaması olasıdır. Delaminasyonların ve yapısal bütünlük kayıplarının daha sonrada tespit edilmemiş olarak kalabilir. Bu nedenle kompozit malzemelerin tasarım gerilmeleri normalde mutlak/kesin tasarım gerilmelerin yaklaşık % 0.4 ile sınırlıdır.

4.2.3 Üç Boyutlu İnterlaminer Gerilmeler

Kompozitler çok yüksek yönel gerilme özellikleri sergilerler. Bu avantajlı durum, mühendislerin yığınları yük doğrultusunda kasten yerleştirmelerini sağlar fakat uygulanan yükün yüzey dışında olduğu yerlerde veya yükün komşu yığınlara çeşitli katmanlar doğrultusunda aktarıldığı yerlerde interlaminer gerilmeler delaminasyona sebep olabilir. Kompozit yapılar fiberlerin gücü ile destek kuvvetlerine bağlıdır, genelde matris uygulanan kuvvetin çok az miktarını taşır. Eğer gerilme katman yönüne dik (z doğrultusunda) uygulanırsa, matris tüm yükü ve aynı zamanda delaminasyonları taşımak zorundadır. Benzer şekilde, tek başına matris xy ve yz düzlemlerinde oluşan kayma gerilmelerini taşımak zorunda kalabilir.

4.2.4 Kompresif Yükleme

İnterlaminer gerilmeler aynı zamanda kompresif yüklerle de açıklanabilir. Yığınların burkulması art arda gelen delaminasyonlar ortaya çıkabilir. Kompozit lamineler döngüsel çekme gerilmesine karşı iyi dayanırlar fakat kompozitin yorulma ömrü kompozit içerisindeki sapsmış yüklerden dolayı olumsuz etkilenir. Bu başladığında, yorulma koşulları altında delaminasyon çatlak büyümesi normale göre daha hızlı olur.

4.3 Tabakalı Kompozit Malzemelerde Delaminasyon Hasarı

Yaptığımız çalışmada tabakalı kompozit malzemelerin kullanılması üretimleri, kullanımları sırasında delaminasyon kusurunun oluşma olasılığının yüksek olmasıdır. Delaminasyon hasarlarının tabakalı kompozit malzemelerde üretim sırasındaki vakumlanmış yapının hava alması, vakum sisteminin içinde kalabilecek ekstra malzemeler ve safsızlıklar, vakum sırasında vakum içine gönderilen reçinenin tam olarak homojen olarak yayılmaması, kompozit yapının üretiminden yeterli sıcaklığın her tarafta homojen olarak sağlanamaması, bu neden ile kürlenmenin her tarafta eşit olmaması üretimimiz sırasında karşılaşılabileceğimiz delaminasyon kusuruna sebebiyet verebilecek nedenler olarak karşımıza çıkmaktadır.

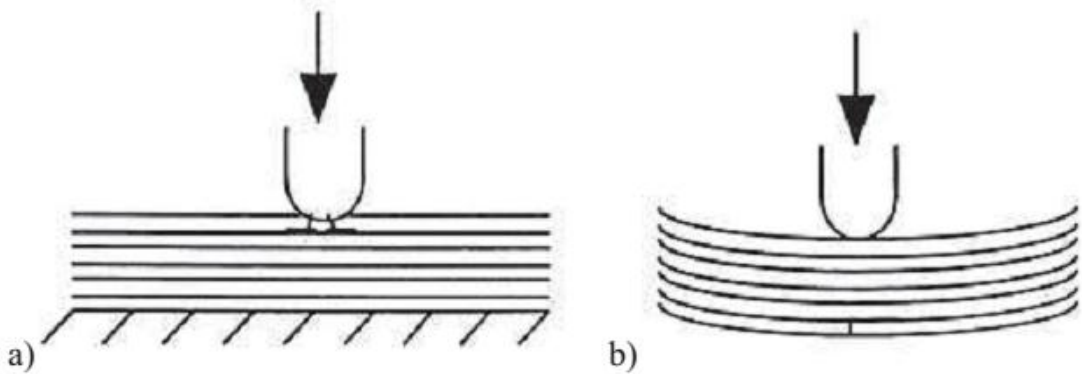
Kompozit malzemenin üretiminden sonra malzemelere etki edebilecek her hangi dış bir etki, numunelerin hazırlanması sırasında yanlış fiziksel üretime maruz kalmaları kompozit malzemelerde delaminasyon hasarına neden olabilmektedir. Delaminasyon hasarının çok sık karşılaşma olasılığı yüksek olduğundan dolayı malzemelerin üretilmesi ve hazırlanması sırasında uygun yöntemler kullanılması ve üretime özen gösterilmesine gerek duymaktadır.

Tabakalı kompozit malzemelerde hasara neden olan en önemli dış etkenlerden biri kompozit numunelere etki eden düzlem dışı darbelerdir. Üretimlerde sıkça kullanılan tabakalı kompozit malzemelerin yapısında kalınlık yönü boyunca takviye elemanına sahip olmadığından dolayı bu kompozit malzeme sınıfının darbelerle karşı dirençleri

azdır ve 1 – 2 J civarındaki darbe enerjisine ile meydana gelen düşük hızlı darbeler (low velocity impact-LVI) malzeme üzerinde kalıcı hasarlar oluşturur (Zhou, 1997). Darbe nedeni ile meydana gelen kusurlardan en çok karşılaşılan tabakalı kompoziti oluşturan laminelerinin yapışık durumdaki yüzeylerinin birbirinden ayrılması ile meydana gelen süreksizlik kusurudur.

Tabakalı kompozit malzemelerin sahip olduğu her tabakanın kendisine ait ortotropik yapısı ve eğilme rijitliği delaminasyon hasarına sebebiyet verebilir. Bunun nedeni ise tabakalı kompoziti malzemeleri yapısında bulunan her lamine farklı fiber takviye açısına sahiptir ve farklı fiber açısına sahip olmaları nedeni ile tabakaların ara yüzlerinde meydana gelen kayma gerilmelerinin yönleri ve şiddetleri de birbirinden farklıdır. Tabakalı kompozit malzemelerin yapısından dolayı dışarıdan gelen herhangi bir darbeye karşı tüm tabakalar aynı şekilde etkilenmez. Darbe sonucu oluşan matriks çatlakları delaminasyon kusuruna neden olur (Daracık, 2011).

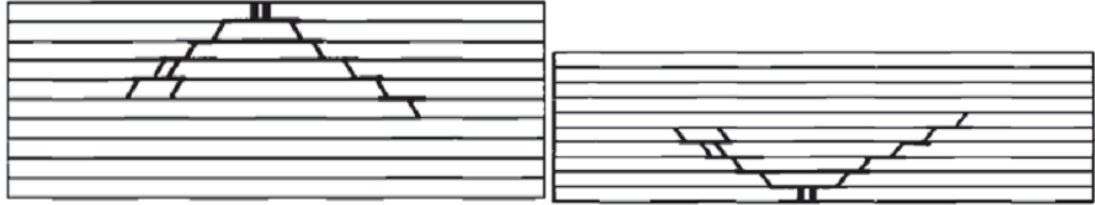
Tabakalı kompozit malzemelerde delaminasyon kusurunun büyüklüğü ve kalınlık yönünde ki durumunu darbenin şekli, neden olan yapının boyutları, darbenin büyüklüğü, hızı ile kompozit malzemelerin bulunduğu ortamın sınır şartları, kompozit malzemelerin kalınlığı ve tabakaların takviye liflerinin diziliş açıları önem teşkil etmektedir. Alt tarafından tamamen desteklenen tabakalı kompozitte oluşan delaminasyon kusurunun kalınlık yönündeki durumu ile kenarlarından sabitlenmiş aynı ebat, tabaka sayısı ve kalınlıktaki tabakalı kompozitte meydana gelen delaminasyon kusurunun durumu birbirinden farklıdır (Daracık, 2011).



Şekil 4.2 a) Tüm alt yüzeyi destekli ve b) Sadece kenarları destekli tabakalı kompozit (Daracık, 2011)

Şekil 4.2’de görüldüğü gibi kompozit yapının sahip olduğu destek ve üzerine gelen kuvvet nedeni ile yapılarında, farklı desteklenmelerinden dolayı oluşan delaminasyonlar şematik olarak görülmektedir. Tabakalı kompozit malzemelerin kalınlığı meydana gelen delaminasyon kusurunu kalınlık yönündeki durumunda etkilemektedir. Şekil 4.3’de bulunan kalın yapıya sahip tabakalı kompozit malzemelerde darbe nedeni ile üst tabakalarda meydana gelen büyük ve sık temas gerilmeleri matriks çatlaklarına neden olur. Üst tabakalarda oluşan matriks çatlakları alt tabakalara inildikçe kalınlık yönünde üçgene benzer delaminasyon kusuru oluşturur. İnce tabakalı kompozit malzemelerde meydana gelen hasar ise eğilme gerilmelerinin alt katmanlarda daha çok etki göstermesi ve büyümesi nedeni ile ters üçgene benzer delaminasyon kusuru oluşur (Daracık, 2011).

Çalışmamızda yukarıda belirttiğimiz şekilde çeşitli nedenlerden dolayı meydana gelmiş farklı şekilde delaminasyonların oluşturup incelenmeye çalışılmıştır.



Şekil 4.3 Tersüçgen ve düz üçgen biçiminde oluşan delaminasyon (Daracık, 2011)

BÖLÜM BEŞ

BURKULMA

5.1 Burkulmaya Genel Bakış

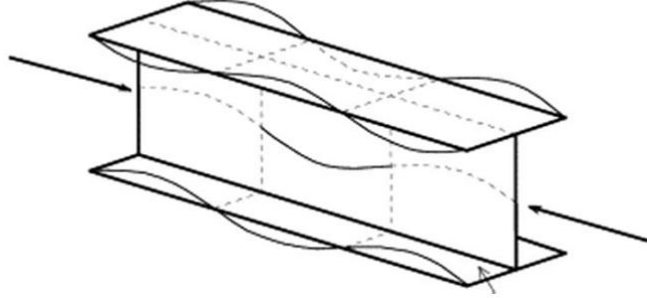
Dayanım, sertlik ve stabil olma; yapısal elemanların tasarımındaki temel üç karakteristik özelliktir. Malzeme biliminde, bir malzemenin dayanımı uygulanan gerilime karşı hasara uğramadan gösterdiği direnç kabiliyetidir. Uygulanan bu gerilme çekme, basma veya kayma şeklinde olabilir. Başka bir deyişle, mukavemetin yük taşıma kapasitesi olduğunu söyleyebiliriz. Sertlik, elastik bir kütlenin, uygulanan bir kuvvet tarafından deforme olmaya karşı gösterdiği dirençtir. Sertlik, young modülü veya elastisite modülü ile yakından ilişkilidir. Deformasyonun beklenmediği zamanda elastisite modülünün yüksek olması istenirken, esneklik gerektiren durumlarda düşük elastisite modülü aranır. Yapı tasarımında gerekli olan stabil olma durumu basitçe çeşitli yükler altında malzemenin orijinal durumunu sürdürme özelliğidir. Hafif yapısal elemanlar birçok endüstriyel alanda oldukça fazla kullanılmaktadır. Bu sebepten dolayı bazı yapısal elemanların stabil olma sorunları gittikçe önem kazanmaktadır.

Yapı mühendisliğinde, kolon bası yolu ile iletimi sağlayan düşey yapısal elemanlardır. Düşey yük elastik malzeme özellikleri gösteren ince bir kolonda arttığında, kolon; denge, nötral denge ve instabil durumlarına maruz kalır. Eğer düşey olarak uygulanan kuvvet, kaldırıldığında kolonu eski haline yani denge formu nötral dengeye dönüşüyorsa küçük bir eğilme kuvveti oluşturursa, yük altındaki kolon stabil denge konumundadır ve kaybolan küçük bir eğilme deformasyonu oluşturur ve küçük olan bir kuvvet, yük kaldırıldığında kolonu çok az bir şekilde bükülmüş hale getiriyorsa kaybolmayan bir deformasyon oluşturacaktır. Kolonun nötral dengesinin sınıra geldiği yüke kritik burkulma yükü adı verilir. Stabil olmama durumu, tamamen çökmeye sebebiyet verecek olan kolon yükünün ufak artışı sonucu sınır seviyeye ulaşır. Kolonlar genellikle duvarların üst bölümlerini veya tavanları oluşturan kirişleri desteklerler.

Kirişler, burkulmaya dayanarak gelen yüke karşı direnç gösterme özelliğine sahip olan yapısal elemanlardır. Kirişler genel olarak inşaat mühendisliği yapı elemanlarında veya binalar için tanımlanırlar, fakat araç çerçeveleri, makine çerçeveleri tırlar ve diğer mekanik veya yapısal sistemler gibi daha ufak yapılar da benzer şekilde tasarlanıp analizi yapılan kirişlerden oluşurlar. Kirişler bası, çeki ve kayma gerilmelerine üzerlerine gelen yük sonucunda maruz kalırlar. Zaman içinde, kirişler yer çekimi yükü altında orijinal uzunluklarını yitirirler ve kenarlardan başlayarak yay formunda kirişin ortasına kadar uzanan bir eğilme deformasyonu meydana gelir. Bir kaç burkulmanın sonucu olarak kirişin üst tarafı çekiye maruz kalırken alt taraf ise bası gerilmesine maruz kalır. Bir başka durum olan kirişler için bükülme kuvvet etkisi altındadır. İnce bir yapısal kiriş eksenine dik şekilde yüklendiği zaman burkulma sayesinde yüklü kirişin hasara uğraması eğilimi söz konusu olur. Burkulma yapı içerisindeki fazla yer değiştirmeden kaynaklanabilir. Bunun sonucu olarak, yapı kendi dengesini kaybeder ve hasara uğrar.

Geçtiğimiz yıllarda, burkulma yüksek malzeme gereksinimleri kuvvet destek yapıları için düşük malzeme istemesi ve yapıların daha ince haline gelmesinden dolayı daha önemli bir sorun haline gelmeye başladı. Burkulma hasarları aniden ve feci bir şekilde olabilir. Er ya da geç daha güvenli destek yüklerinin taşınması sebebiyle öncelikli olarak kirişin tasarımına önem verilmesi gerekecektir. Bilimde, burkulma matematiksel instabil bir problem ve hasar fazına yönlendiren bir kuvvet etkisidir. Teorik olarak burkulma statik dengenin çözümünde oluşan çatallaşma (kollara ayrılmadan) sebebiyle meydana gelir. Artan yük altında belirli aşamalarda, sonraki yükler bir ya da iki durumda devam ettirilebilir haldedir; deforme olmamış durum veya yana doğru deforme olmuş durum. Pratikte, burkulma yorulma noktasındaki gerçek basma gerilmesinin malzemenin dayanabileceği maksimum basma gerilmesinin altında olduğu yerdeki yüksek gerilmeye maruz kalan yapısal elemanın ani hasarı şeklinde karakterize edilir. Burkulmanın matematiksel analizi elemanın maruz kaldığı birincil kuvvetler sebebiyle oluşmayan momente sebebiyet veren eksenel kuvvet eksantrikliğinin kullanımını sağlar. Kuvvet ne zaman ani olarak kolon gibi bir elemana uygulanırsa, o eleman en sonunda instabil olmasına yetecek kadar geniş olacaktır. Sonraki yükler kayda değer ve bir şekilde tahmin edilemeyen

ve muhtemelen tümünden kuvvet taşıma kapasitesini yok etmeye yönelik deformasyonlara neden olacaktır. Bu elemana bükülmüş, deforme olmuş eleman denir (Balcıoğlu, 2012).



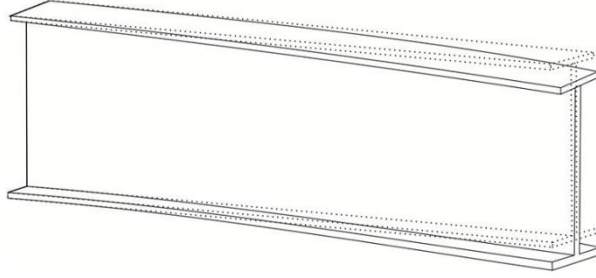
Şekil 5.1 Esnek burkulma (Balcıoğlu, 2012)



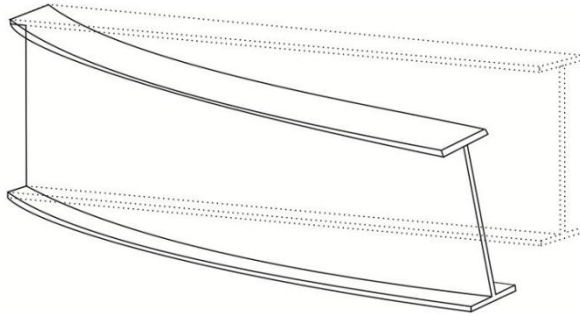
Şekil 5.2 Esnek burulma burkulması (Balcıoğlu, 2012)

Esnek burkulma (Şekil 5.1), esnek burulma burkulması (Şekil 5.2), yanal burkulma (Şekil 5.3), yanal-burulma burkulması (Şekil 5.4), plastik burkulma ve dinamik burkulma olarak farklı burkulma türleri vardır. Kolonlar gibi yapısal elemanlarda; esnek burkulma eksen etrafında ve bu oluşum içinde gerçekleşir; Sütunların narinlik oranı bu burkulma türünde önemli bir yere sahiptir. Braketler esnek burkulmalardan dolayı meydana gelen burkulma sıkıştırmalarına karşı sınırlıdır. Kiriş burkulma durumunda yüklendiğinde, yük taşıma tarafı (genellikle üst) sıkıştırma yükünü taşır. Sıkıştırma elemanları simetri bir eksenini ile simetrik olmayan bir enine kesiti varsa, ya da yapısal eleman yük simetri eksenini üzerinde değilse, esnek burulmalı burkulma oluşur (Şekil 5.2). Esnek-burulma burkulma aynı anda eğilme ve bükülmeyi içerir. Bu, çoğunlukla kanallarda, yapısal dirseklerde, çift açılı şekillerde meydana gelmektedir. Kirişlerde burkulma eksenine dik yönde

desteklenmez ise burkulmaya neden olabilecek bir yüke maruz kalındığında kiriş yanal olarak burkulur. Böylece kiriş yanal burkulmaya Şekil 5.3'deki gibi maruz kalmaktadır. Burkulma sırasında Şekil 5.4'deki gibi eğer kiriş dikey eksenine bükülmesi ile yanal-burulma burkulma adlı gerilme kırışlarında oluşur (Balcıoğlu, 2012).



Şekil 5.3 Yanal burkulma (Balcıoğlu, 2012)



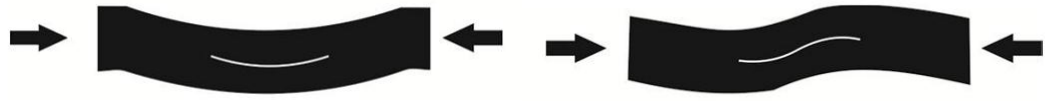
Şekil 5.4 Yanal-burulma burkulması (Balcıoğlu, 2012)

Genellikle malzemenin plastisitesi nedeniyle bir yapının teorik burkulma gücünden biraz önce burkulma oluşacaktır. Burkulma yüküne yakın bir basma kuvveti uygulandığında yapı önemli ölçüde eğilecek ve akmaya yaklaşacaktır. Burkulmaya neden olan basma kuvveti kaldırıldığı zaman kiriş bütünleşir. Bu davranış, plastik burkulma olarak adlandırılan prematüre burkulmasını meydana getirir. Kiriş üzerinde yük aniden uygulanır ve daha sonra kaldırılır ise, kiriş statik burkulma yükünden daha yüksek bir yüke dayanabilir. Bu döngüsel mekik kırışının alt tarafından, kırışın üst tarafına doğru stres dalgası oluşturur. Bu gerilim dalgası kırışi dinamik olarak zorlar ve bu durum nedeni ile kırışte dinamik burkulma görülür (Balcıoğlu, 2012).

5.2 Delaminasyona Sahip Kompozit Malzemelerin Burkulması

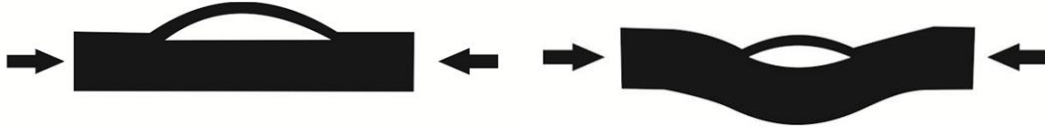
Burkulmanın sonucu olarak matrisin çatlaması, fiberlerin zarar görmesi gibi tipik hataların meydana gelmesi ile fiber-matris yapısı ayrılabilir ve delaminasyon kompozit yapılarda meydana gelmektedirler. Tabakalı kompozit malzemelerde burkulma yükü nedeni ile tabakalar ayrılabilir ve yapı içerisinde devamsızlığa sahip bölgeler oluşabilmektedir. Bu oluşan süreksiz bölgeye delaminasyon adı verilir. Delaminasyon genellikle iki sınır lamina arasında oluşan interlaminar stres olarak ifade edilebilir. Laminatların mukavemeti meydana gelen hasar moduna bağlı olarak azalmaktadır. Tabakalı kompozit malzemelerde meydana gelen delaminasyonlar kalıcı olarak basma dayanımını azaltır.

Delaminasyona sahip tabakalı kompozit malzemelerde meydana gelen burkulma model şekillerinin değişik tiplerinde meydana gelebilir. Şekil 5.5 de gösterildiği gibi, kritik yük seviyesinde, tek delaminasyona sahip olan sıkıştırılmış kiriş dört farklı instabil modda tepki verebilir. Delaminasyon uzunluğu ve kalınlık boyunca bulunduğu yeri, bu modların şeklinin kontrolünde önemli olan iki parametredir. Eğer tüm kiriş herhangi diğer bir bel verme modunun oluşmasından önce bükülürse, verilen tepki “global” bükülme modu olarak adlandırılır. Bu genellikle kısa ve kalın delaminasyon kirişlerinde meydana gelir. Global burkulma modunda, eğer burkulma şekli kirişteki orta açıklığa bağlı olacak şekilde simetrik ise, global simetrik olarak adlandırılır (Şekil 5.5a). Öte yandan, eğer global burkulma modu büküm şeklinde bir deformasyon oluşturma eğilimindeyse, burkulma şekli; global asimetrik modu olarak adlandırılır (Şekil 5.5b). Delaminasyon ince olduğunda, burkulma ilk bölge delamine olmuş bölgedir. Bu tarz burkulmalara “bölgesel burkulma modu (Şekil 5.5c) denir. Son olarak, aksel sıkıştırılmış bir kirişte, eğer global ve bölgesel burkulma aynı anda oluyorsa, buna karışık (Şekil 5.5d) burkulma modu adı verilir. Birden çok delamine olmuş kirişler için oluşan durum tek delaminasyonu olan kirişlerde olanın oldukça benzeridir (Arman, 2003).



a) A glabol mode

b) global asimetrik mod



c) bölgesel burkulma modu

d) karışık mode

Şekil 5.5 Delaminasyon modları (Arman, 2003)

BÖLÜM ALTI

MALZEME VE YÖNTEM

6.1 Kompozit Plakaların Üretilmesi ve Deney Numunelerinin Hazırlanması

Kompozit üretimi sırasında matris malzemesi olarak da epoksi reçine (Huntsman (Araldite Iy 564) epoksi ve sertleştiricisi 100:34 oranında karıştırılarak) kullanılmıştır. Kullanılan epoksi reçinenin özellikleri tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 6.1 Araldite LY 564 epoksinin özellikleri

Görsellik	Berrak Sıvı
25 ° C’de (ISO 12058-1) Viskozitesi	1200 – 1400 [mPa s]
25 ° C’de (1675 ISO) Yoğunluğu	1,1 – 1,2 [g/cm ³]
Epoksi İndeksi (ISO 3001)	5,8 – 6,05 [Eq/kg]
Sertleştirici XB 3487 34	100:34 karışım oranı
Çekme Mukavemeti(ISO 527)8s/80 °C	72 - 76 [Mpa]
Gerilme Modülü (ISO 527) 8s/80 °C	2940 - 3100 [Mpa]

Deneylerde kullanılan numuneler aşağıdaki gibi üretim işlemleri gerçekleştirilir;

- Malzeme hazırlığı
- Kompozit üretimi
- Kür
- Kesme
- İşaretleme
- Ölçme yapılarak numuneler hazırlanır.

Tabakalı kompozit plakaların üretiminde, fiber (takviye) malzemesi olarak Şekil 6.1’de görülen 300 gr/m²’lik (0/90) dokuma (woven) E-cam lifi kumaş, kullanılmıştır. Birden fazla numune ölçülerine uygun olarak delaminasyonların elyaflar üzerine yerleştirilmesi ile büyük bir plakada üzerinde tek seferde üretilmiştir. Karşılaştırmada üretimden kaynaklanacak farklılıkların bu şekilde önlenmesi amaçlanmıştır.



Şekil 6.1 Dokuma (woven) kumaş yapısı

6.1.1 Vakum Torbalama ile Üretim

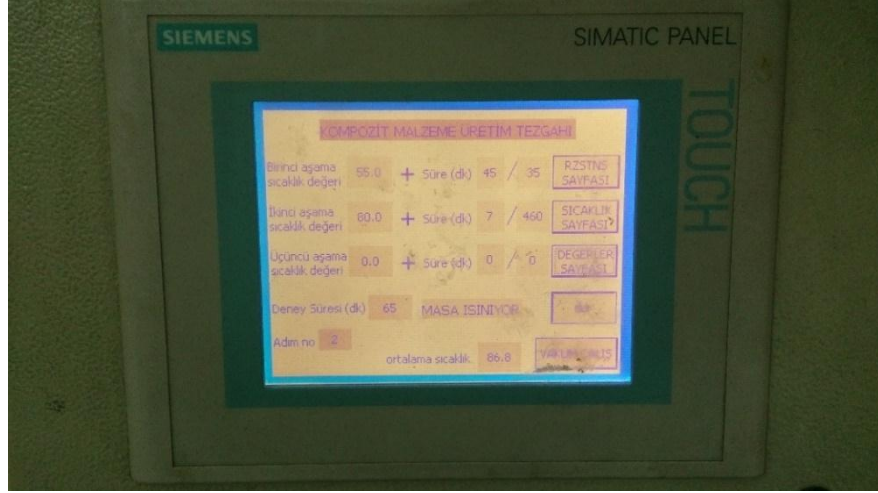
Kompozit plaka üretimi vakum destekli reçine infüzyon yöntemi ile gerçekleştirilmiştir.

Vakum torbalama üretim sırası ile aşağıdaki sıralama ile gerçekleştirilmiştir;

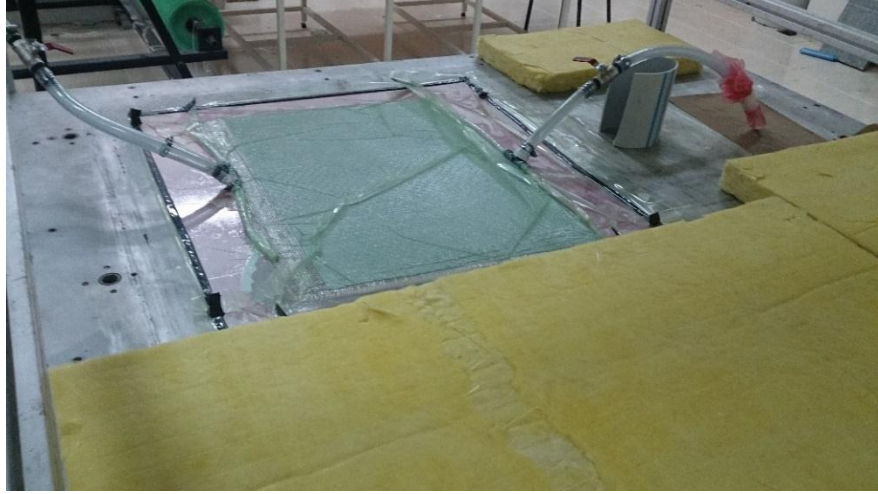
Altta ısıtmalı olan özel üretim masası kullanım için hazırlanmıştır. Masa üzerindeki çizikler, kirlilikler, daha önceden yapılan üretimlerden kalan vakum macunları vs. gibi kalıntılar temizlenir. Masa üzerine yapılacak çalışmada kullanılacak olan reçine yüzünden yapışma olmaması için en alta teflon yapılı üretim boyutlarına göre film serilir. Ayrım torbasının kenarlarından yarısı teflon film üzerinde yarısı da masa üzerine gelecek şekilde vakum macunu ile 4 tarafına macun uygulaması gerçekleştirilir. Teflon filmin ufak bir kenarına gelecek olan macunun tamamı masa üzerine gelecek şekilde ayarlanır. Nedeni ise film altında kalacak hava nedeni ile vakum sırasında sıkıntılar oluşmamasını sağlamaktır. Böylece vakum sırasında teflon film ile masa arasında kalan havada vakumlanmış olur. Kullanılan takviye malzemeleri (dokuma e-cam elyafı kumaş) üretim yapılacak boyutlarda kesilerek hazırlanır. Elyaf kumaşlar daha sonra ayırıcı film üzerine ortalanacak şekilde yerleştirilir. Yerleştirme sırasında ilk 4 tabaka üst üste konulduktan sonra üretilecek numunenin sahip olduğu delaminasyonları sağlamak amacı ile yine önceden belirlenmiş ölçülerde teflon ptfе filmden hazırlanmış şeritler belli aralıklarla yerleştirilir. Ptfе filmlerin kaymaması için kenarlarından yapıştırılır. Daha sonra bir üstteki tabaka dokuma kumaş yerleştirilir. 8 tabaka tamamlanana kadar uygulama

devam eder. Tabakalar yerleştirildikten sonra yüzey pürüzlülüğünü sağlayan tabaka (Peel ply) yerleştirilir. Bu katman daha sonra kompozit yapıdan vakum torbası vs. ayrılmasını sağlamaktadır. Epoksi reçinenin daha iyi yayılması amacı ile en üste gözenekli yayıcı file koyulur. Vakum torbası yapının üstünü tam olarak kapatacak şekilde ayarlanarak kesilir. Kesim boyutları ayarlanırken vakum sırasında vakum torbasının gerilmesi nedeni ile ayrılıp hava almasına karşı, bırakılacak kulakçıklarda hesaba katılarak ayarlanır. Yapı üzerine gelecek basınç içinde derinlik de hesaba katılarak kesilir. Torba üzerinde giriş ve çıkışta reçine ve vakum için gerekli hatlar ayarlanır. Bu hatlar üzerine açma kapama vanası da koyulur. Bu hatlardan vakum çıkışı üzerinde vakum göstergesi olan pompaya bağlanır. Sistem vakuma alınır. Vakum işlemini bittikten sonra sistem kapatılır ve sitemde kaçak olup olmadığı belirlenir. Bir süre beklenerek kaçak kontrolü daha kesin olarak belirlenir. Reçine ve sertleştirici gereken miktarlarda ve uygun oranlarda karıştırlar. Karışım hava kabarcıkları olmayacak şekilde tam olarak karıştırlır. Hava kabarcıkları meydana gelirse kabarcıkların karışımdan ayrılması için beklenir. Reçine miktarı hazırlanırken reçine çeken hortumda kalacak reçine miktarı da hesaplanır. Reçine, sistem vakumda iken reçine besleme hortumundan sisteme verilir. Reçine akışı kontrollü şekilde sağlanır. Sistemde bulunan takviye elamanlarının tamamı ıslanması beklenir. Yapının tamamı ıslandıktan sonra en sonra sistemin vakum yapılan hat çıkışına yakın kısımlarda ıslandıktan sonra ilk olarak reçine girişi daha sonrada vakum tarafındaki hat üzerinde bulunan vanalar kapatılır. Sistem herhangi bir hava alma gibi durum için sertleşene kadar kontrol edilir.

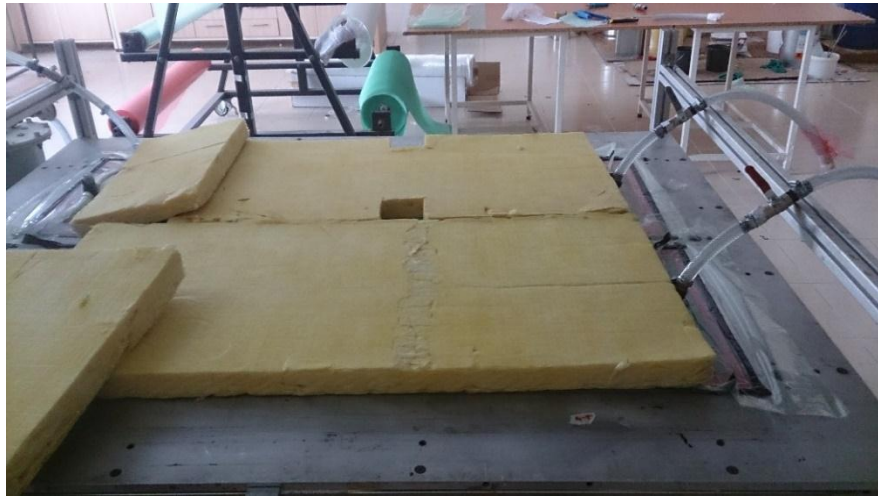
Sistemimiz Şekil 6.2’de görüldüğü gibi 80 ° C sıcaklıkta 8 saat kürlenmeye bırakılır. Üzeri ısı kaybı yaşanmaması için ve homojen şekilde kürlenmesi için Şekil 6.3 ve 6.4’de olduğu gibi cam yünü ile üzeri kapatılır. Şekil 6.5-6.8’de reçine verilmiş üretimi devam eden plakalar görülmektedir. Kürlenme bittikten sonra masayı ısıtılan sistem kapatılır ve vakum torbası, ayırıcı katman vs. temizlenerek kompozit yapı üretimi tamamlanmış olur. Şekil 6.9 ve 6.10’da üretim sonrası elde edilen plakalar görülmektedirler.



Şekil 6.2 Üretim yapılan ısıtmalı masanın ısı ayarları



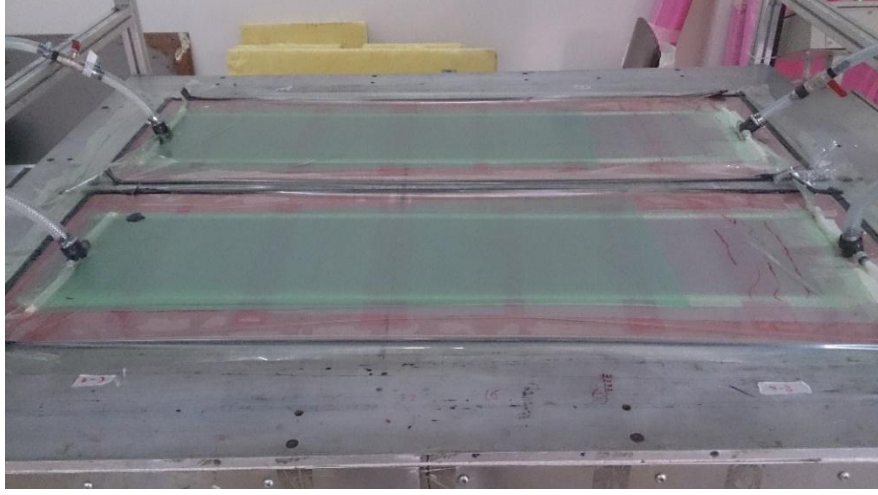
Şekil 6.3 Vakum destekli reçine infüzyon sistemi



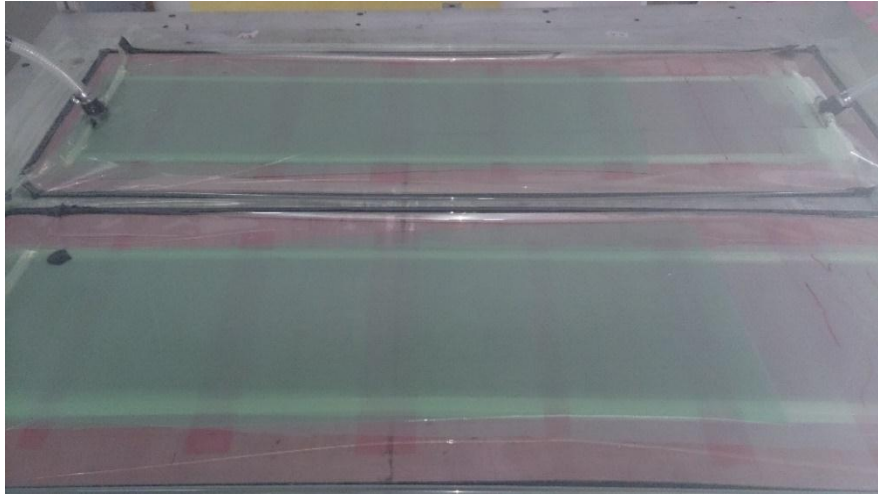
Şekil 6.4 Vakum destekli reçine infüzyon sisteminin ısı yalıtımı yapılmış durumu



Şekil 6.5 Vakum destekli reçine infüzyon sistemi ile üretim



Şekil 6.6 Vakum destekli reçine infüzyon sistemi ile üretim



Şekil 6.7 Vakum destekli reçine infüzyon sistemi ile üretim



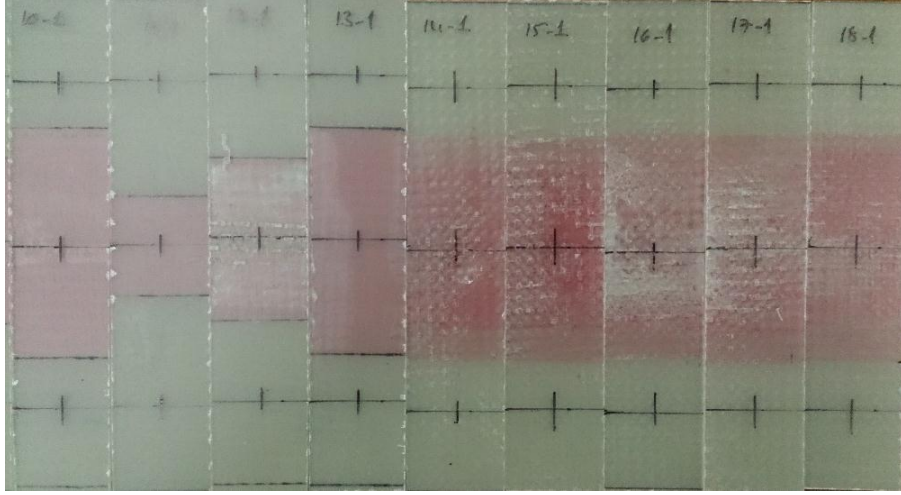
Şekil 6.8 Torba içindeki kompozit yapının görünüşü



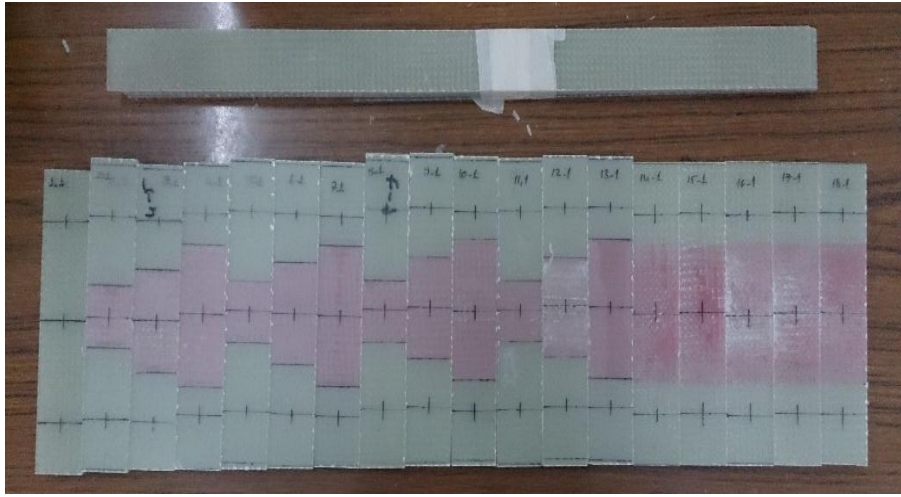
Şekil 6.9 Üretim sonrası elde edilen kompozit plaka



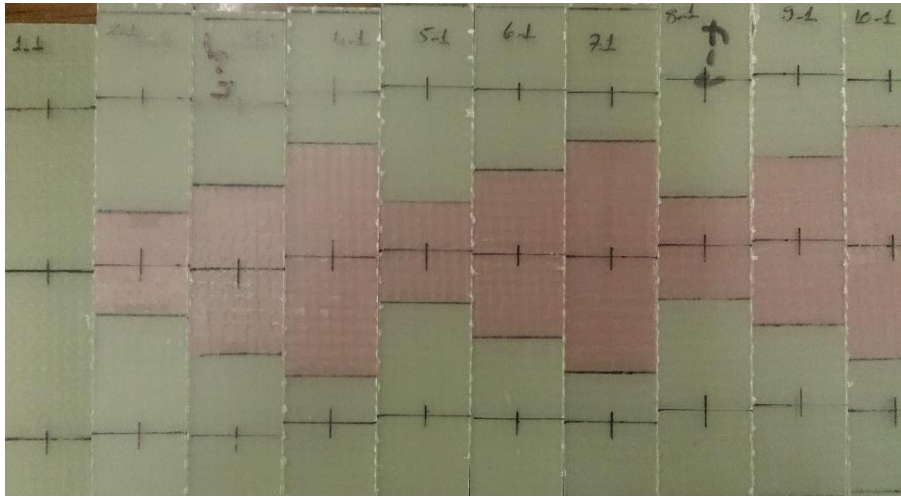
Şekil 6.10 Üretim sonrası elde edilen kompozit plaka



Şekil 6.11 Plakalardan kesilerek üretilen numuneler

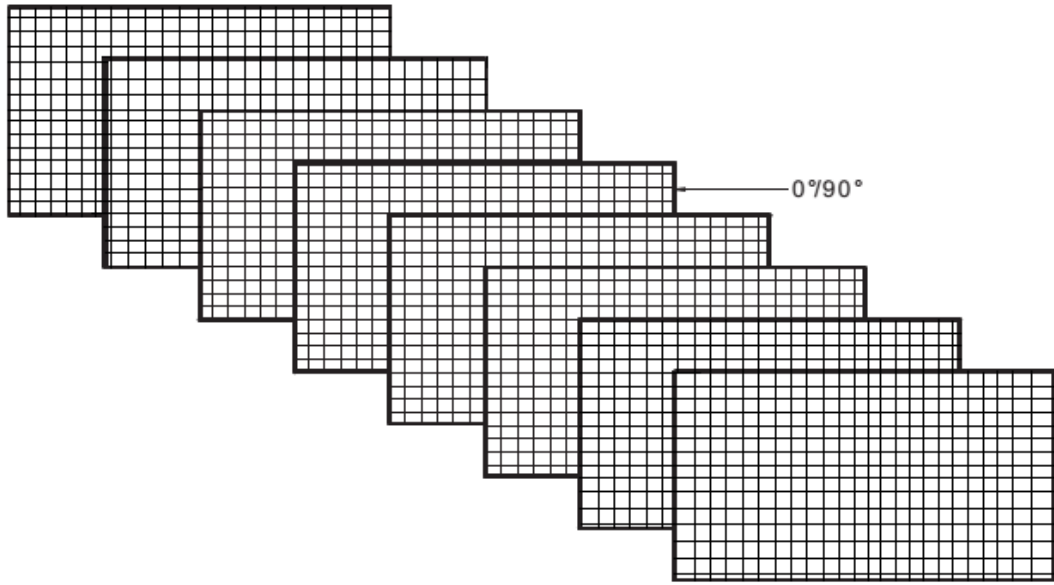


Şekil 6.12 Plakalardan kesilerek üretilen numuneler



Şekil 6.13 Plakalardan kesilerek üretilen numuneler

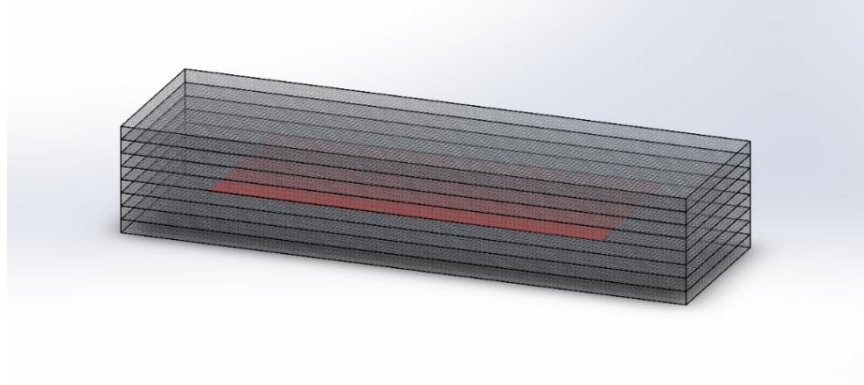
Kompozit plakalar Şekil 6.14’de gösterildiği gibi 8 tabaka e-cam dokuma kumaş kullanılarak $[(0/90)_4]_s$ yapısında üretilmişlerdir ve tabakalar arasındaki delaminasyonlar 100 micron kalınlığındaki politetrafloroetilen (PTFE) filmin tabakalar arasına yerleştirilmesi ile Şekil 6.16’da görüldüğü gibi elde edilmiştir. Kompozitlerin üretimi sonrasında elde edilen kompozit plakaların kalınlığı, ortalama olarak, 2.3 mm olarak ölçülmüştür.



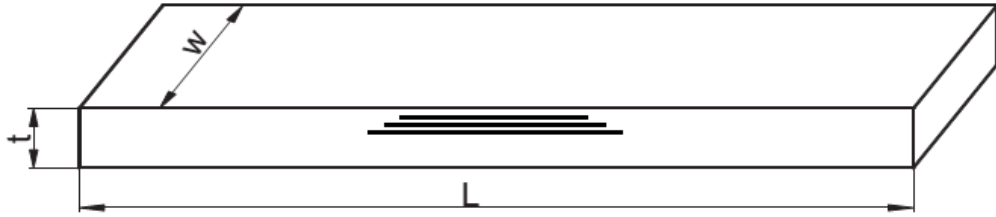
Şekil 6.14 8 tabakalı tabakalı $[(0/90)_4]_s$ kompozit plaka

Üretimden elde edilen birden fazla numuneye sahip büyük tabakalı kompozit plakalar önce işaretlenip kesim masasında Şekil 6.11, 6.12 ve 6.13’de görüldüğü gibi ilk olarak her bir numuneye ait içerisinde 5 adetten fazla numune elde edilebilecek büyüklükteki parçalar kesilerek çıkarılmıştır. Bu parçalar daha sonra tekrar son numune boyutlarında işaretlenerek düzgün bir kesim yapılmıştır. Her duruma ait en az 5 adet numune çıkarılmış deneylerde oluşabilecek hatalara karşı birden fazla daha numune çıkabilecek kadar kalan kısımlar ayrılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılacak numuneler üretilen plakalardan kesilerek son ölçülerinde hazırlanmıştır. Kullanılacak numune boyutları, literatürdeki diğer çalışmalar, ASTM standartları ve ayrıca kullanılacak deney düzeneği de dikkate alınarak, 150mm x 30mm x 2.3mm olarak belirlenmiştir. Şekil 6.17’de “Clamped Area” olarak ifade edilen bölgeler (her

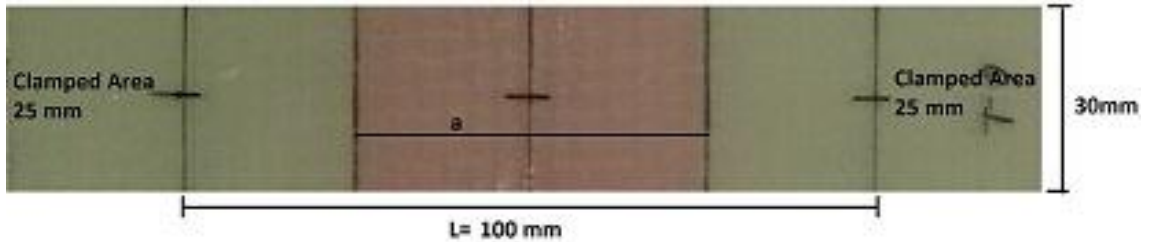
iki taraftan 25mm), ankastre sınır şartı için ayrılmıştır. Bu ölçüler çıkarıldıktan sonra, burkulma testi için kalan numune boyutları 100mm x 30mm x 2.3mm olarak elde edilmiştir.



Şekil 6.15 8 tabakalı tabakalı $[(0/90)_4]_s$ kompozit plaka ve bir delaminasyonun yerleşimi



Şekil 6.16 8 tabakalı tabakalı $[(0/90)_4]_s$ kompozit plaka ve 3 delaminasyonun yerleşimi



Şekil 6.17 Burkulma test numunesi boyutları

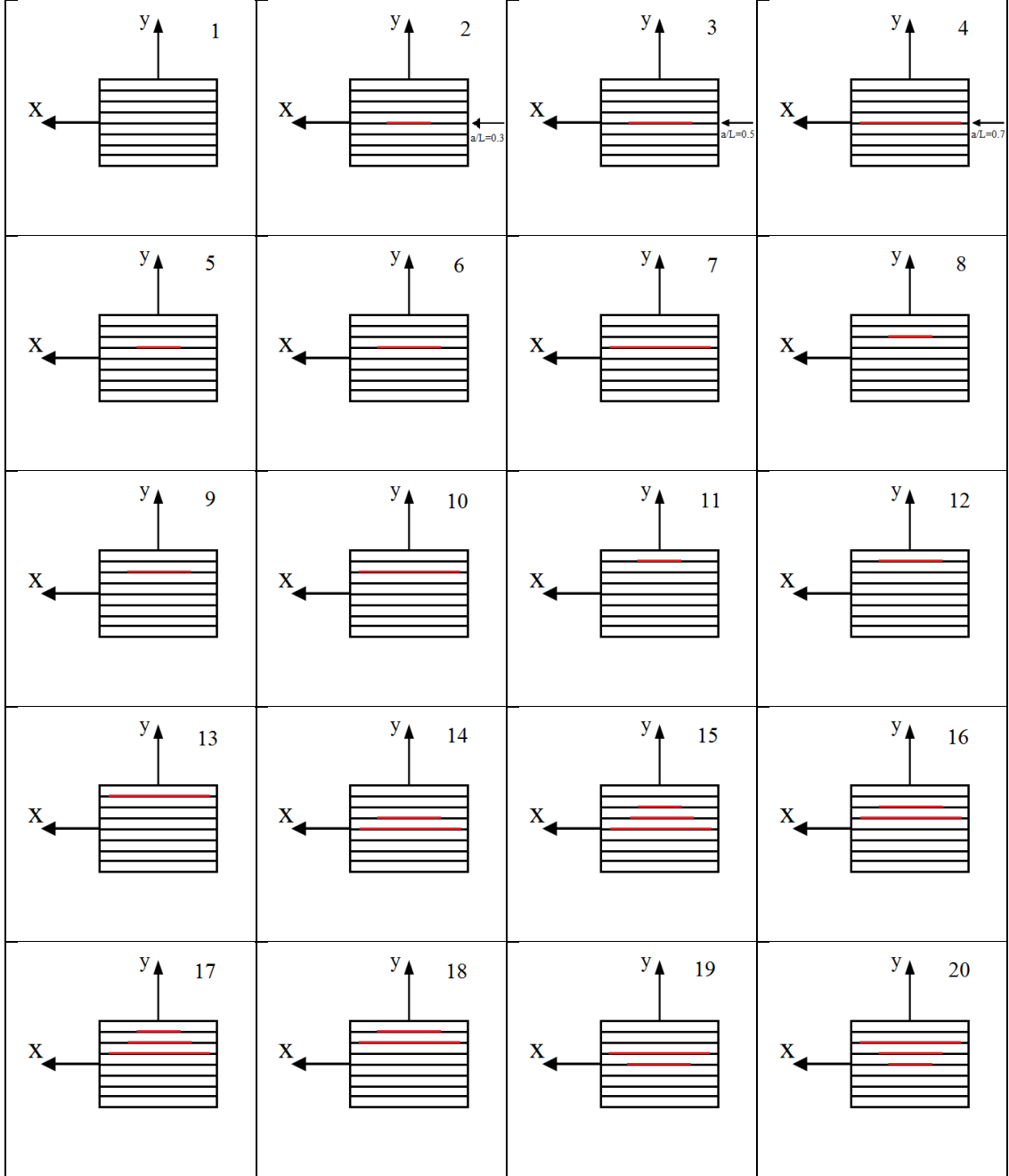
Deneysel çalışmalar için delaminasyonsuz, tek delaminasyonlu ve çoklu delaminasyonlu olmak üzere değişik parametrelere sahip numuneler üretilmiştir. Şekil 6.15’de gözükten kırmızı renkli alan ptfе film ile oluşturulmuş delaminasyon bölgesi görülmektedir. Delaminasyon boyutlarının seçiminde (a ; delaminasyon genişliği ve L ; burkulma boyu olmak üzere) a/L oranı 0,3, 0,5 ve 0,7 olan delaminasyon boyutları tercih edilmiştir. Buna göre üretilmiş olan numunelere ait

sınıflandırmalar (Deneylerde kullanılan numune numarası, delaminasyon sayıları ve delaminasyonun konumu) Tablo 6.2’de verilmiştir.

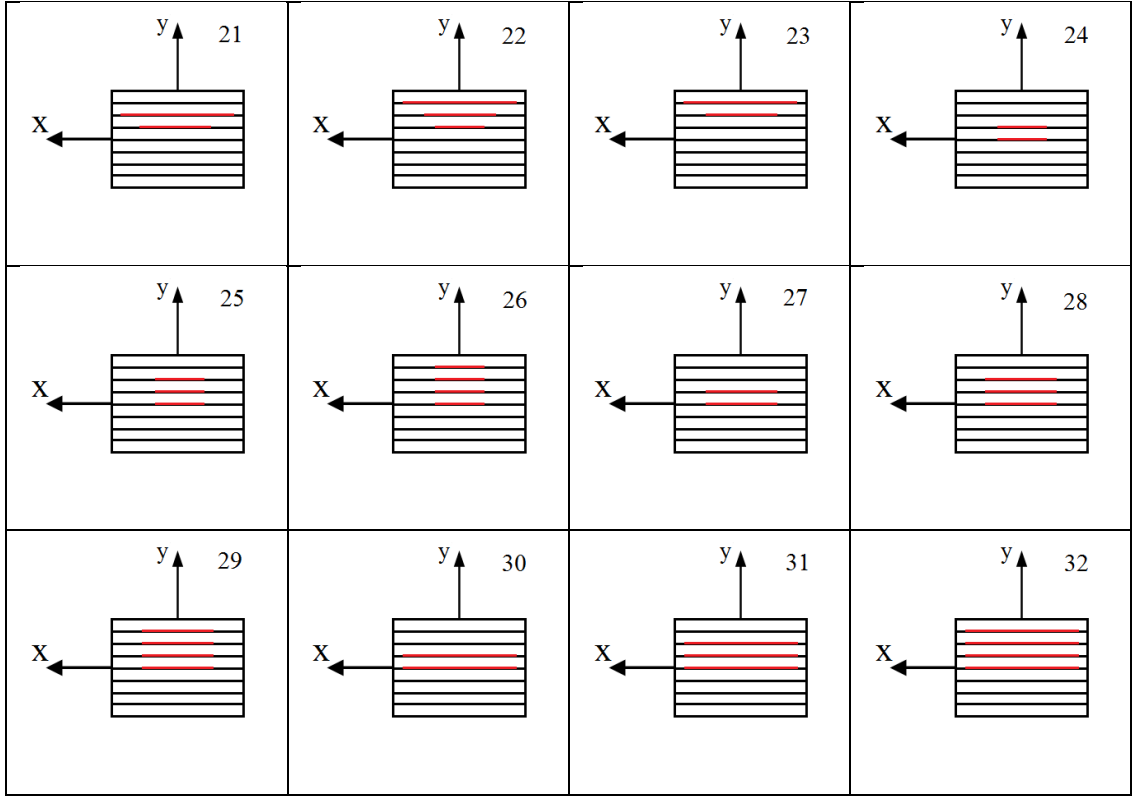
Tablo 6.2 Deneylerdeki numune numaraları, delaminasyon sayıları, delaminasyon boyutları ve konumları

Numune No	Delaminasyon Sayısı	4. - 5. arası(a/L)	5. - 6. arası(a/L)	6. - 7. arası(a/L)	7. - 8. arası(a/L)
1	0	-	-	-	-
2	1	0,3	-	-	-
3	1	0,5	-	-	-
4	1	0,7	-	-	-
5	1	-	0,3	-	-
6	1	-	0,5	-	-
7	1	-	0,7	-	-
8	1	-	-	0,3	-
9	1	-	-	0,5	-
10	1	-	-	0,7	-
11	1	-	-	-	0,3
12	1	-	-	-	0,5
13	1	-	-	-	0,7
14	2	0,7	0,5	-	-
15	3	0,7	0,5	0,3	-
16	2	-	0,7	0,5	-
17	3	-	0,7	0,5	0,3
18	2	-	-	0,7	0,5
19	2	0,5	0,7	-	-
20	3	0,3	0,5	0,7	-
21	2	-	0,5	0,7	-
22	3	-	0,3	0,5	0,7
23	2	-	-	0,5	0,7
24	2	0,3	0,3	-	-
25	3	0,3	0,3	0,3	-
26	4	0,3	0,3	0,3	0,3
27	2	0,5	0,5	-	-
28	3	0,5	0,5	0,5	-
29	4	0,5	0,5	0,5	0,5
30	2	0,7	0,7	-	-
31	3	0,7	0,7	0,7	-
32	4	0,7	0,7	0,7	0,7

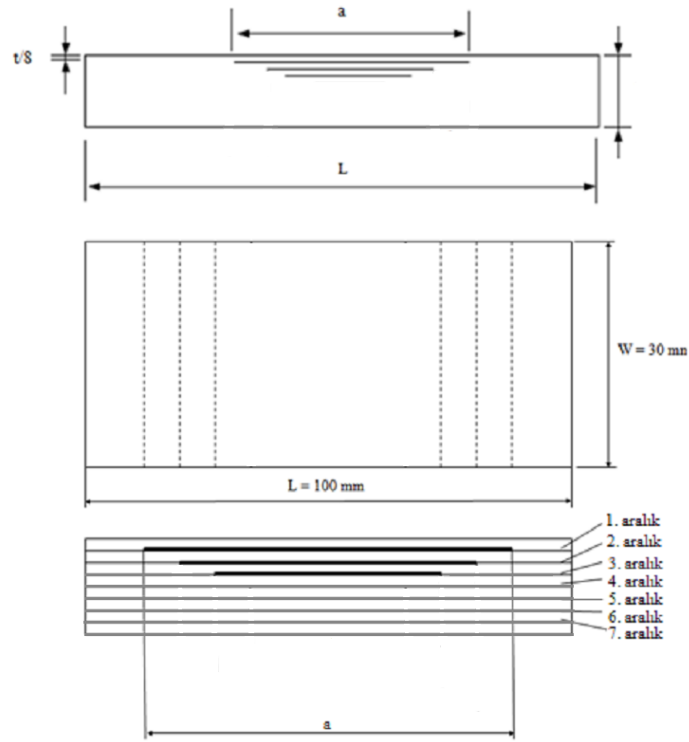
Tablo 6.2 de yer alan numunelerin şematik halde gösterimleri aşağıda Şekil 6.18'de delaminasyonların yerleşimi ile birlikte verilmiştir.



Şekil 6.18 Deneylerdeki numune noları, delaminasyon sayıları, delaminasyon boyutları ve konumları



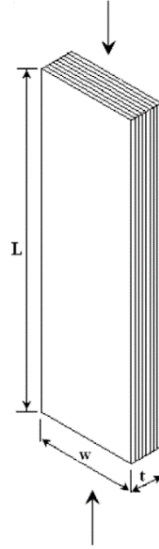
Şekil 6.18 Deney numune noları, delaminasyon sayısı, delaminasyon boyutları ve konumları (devamı)



Şekil 6.19 Belirtilen oranlarda 3 delaminasyonun yerleşiminin şematik olarak gösterimi

6.2 Burkulma Deneyleri

Burkulma deneyleri 100 kN yük kapasiteli Shimadzu AG-X çekme-basma üniversal test cihazında yapılmıştır. Burkulma deneyi olduğu için cihazın basma modülü kullanılmış ve 1 mm/dk basma hızı ile Şekil 6.20'deki gibi deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler için, cihaza ait, standart çekme-basma çenelerinden faydalanılmıştır (Şekil 6.21). Deneylerde, incelenecek her bir duruma özel olarak hazırlanmış, 5'er numune kullanılmıştır. Her bir numune için yapılan burkulma deneyleri sonucunda elde edilen yük-deplasman grafikleri üzerinden kritik burkulma yükleri tespit edilmiştir.



Şekil 6.20 Burkulma şematik gösterimi

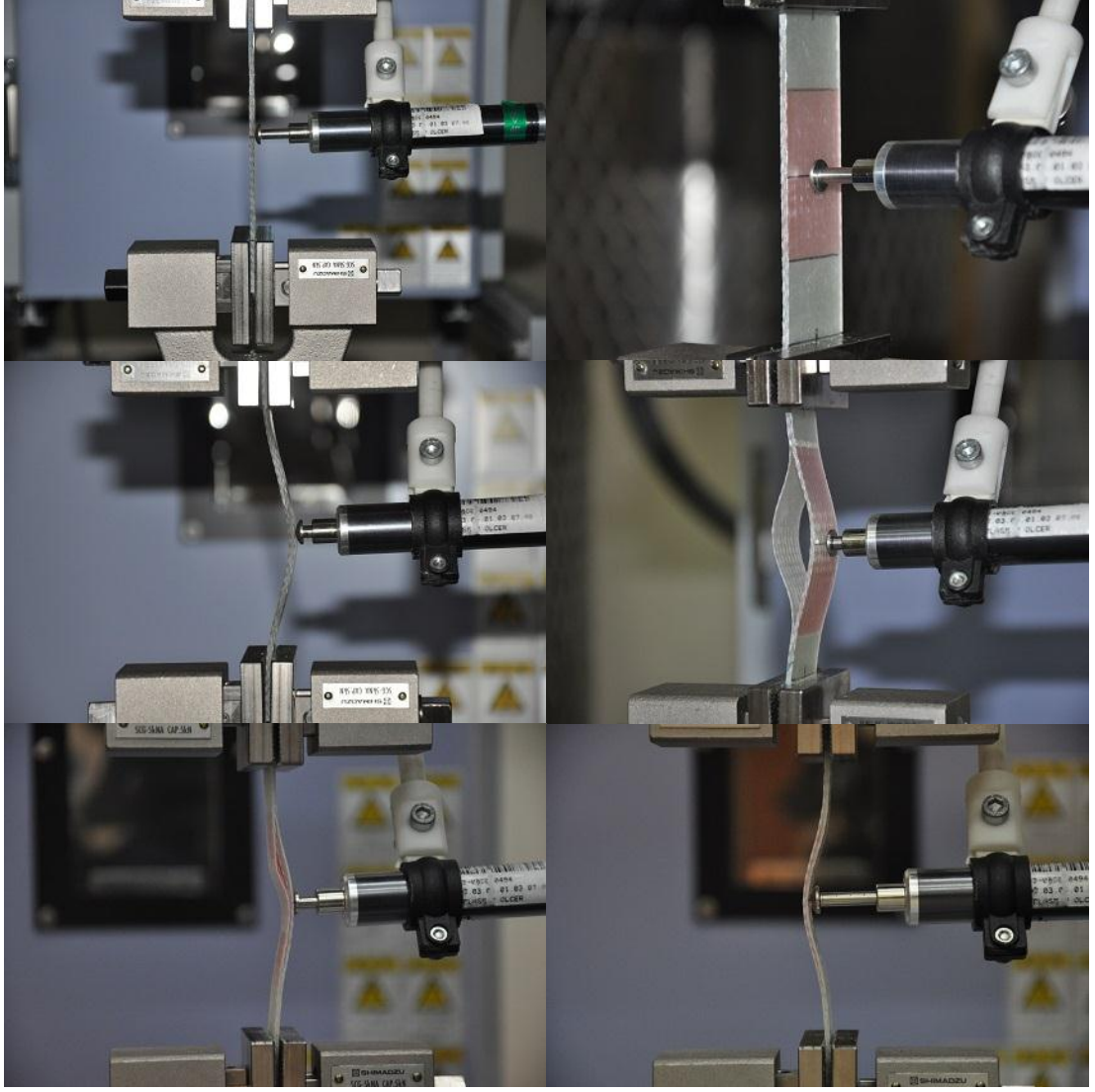
Şekil 6.22'de görüldüğü üzere yanal deplasmanları tespit için kullanılan datalogger ve çekme cihazının hareketli kısmı olan üst çeneye bağlı olarak duran aparat gözükmemektedir. Bu aparat numunelerin ne tarafa burkulacağı fark etmeksizin ölçüm yapabilecek şekilde ayarlanmıştır. İncelenecek olan parametreler arasında karşılaştırma yapabilmek için, her bir parametreye ait 5'er adet numunenin kritik burkulma yüklerinin ortalaması alınmış ve elde edilen kritik burkulma yükleri (P_{kr}) Tablo 6.3'de verilmiştir



Şekil 6.21 100 kN yük kapasiteli Shimadzu AG-X

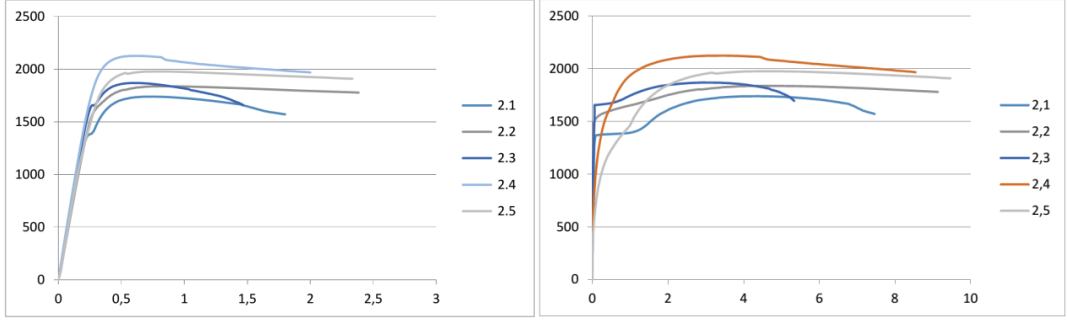


Şekil 6.22 Shimadzu AG-X ve yanıl deplasman tespit için datalogger

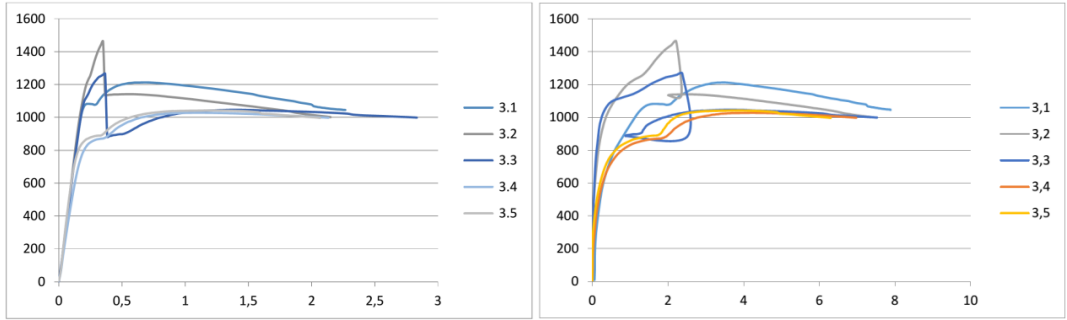


Şekil 6.23 Burkulma test düzeneği

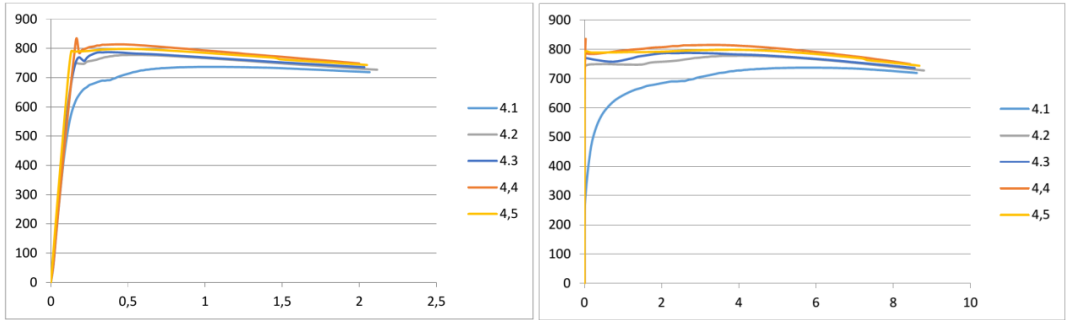
Şekil 6.23’de numunelerin tes cihazına bağlantı durumu görülmektedir. Yanal deplasman ölçümü için ölçüm cihazının numunelerin tam ortasında gelecek şekilde yerleşimi ve bu yerleşimi de deneyler sırasında koruması gerekmektedir. Yapılan testler sırasında numunelerin farklı şekillerde burkulması da görülebilmektedir. Burkulma deneyleri sırasında elde edilen kuvvet-yer değişimi grafiklerinin yanı sıra kuvvet-yanal yer değişimi grafikleri elde edilmiştir. Aşağıda numunelerin hem kuvvet-yer değişimi hem de kuvvet-yanal yer değişimi yan yana verilerek numunelerin iki yöndeki yani dikey ve yatay yer değişimleri gözlenmiştir.



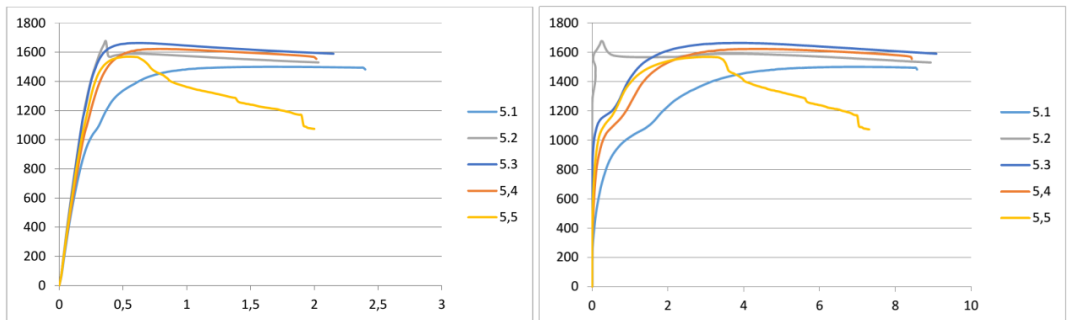
Şekil 6.24 2 nolu numuneye ait kuvvet-deplasman ve kuvvet-yanal deplasman grafikleri



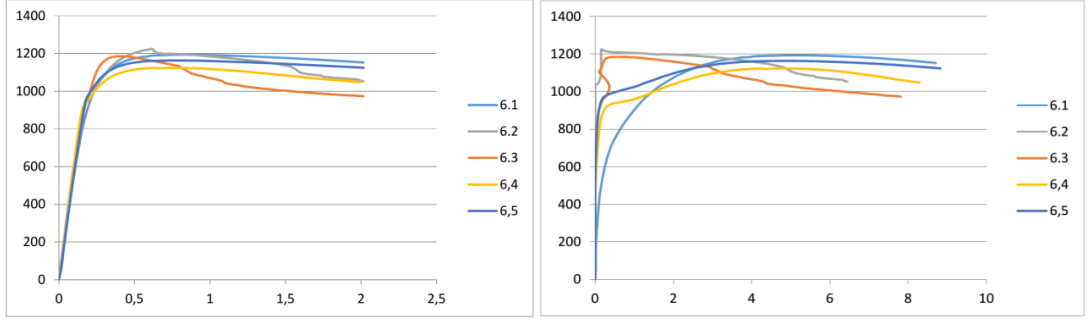
Şekil 6.25 3 nolu numunenin kuvvet-deplasman ve kuvvet-yanal deplasman grafikleri



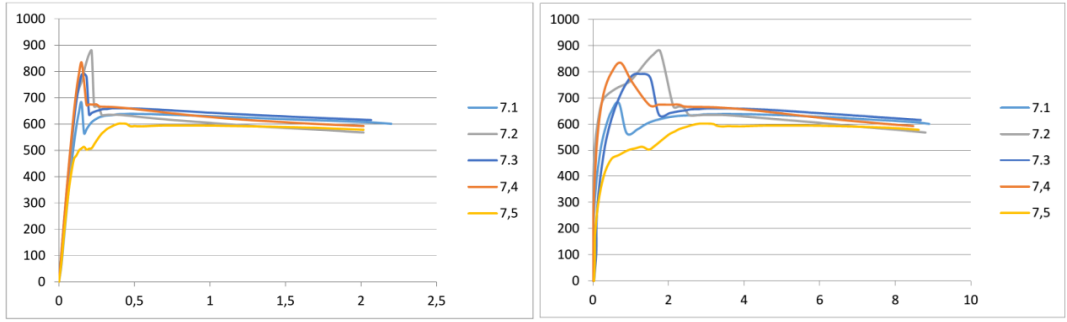
Şekil 6.26 4 nolu numuneye ait kuvvet-deplasman ve kuvvet-yanal deplasman grafikleri



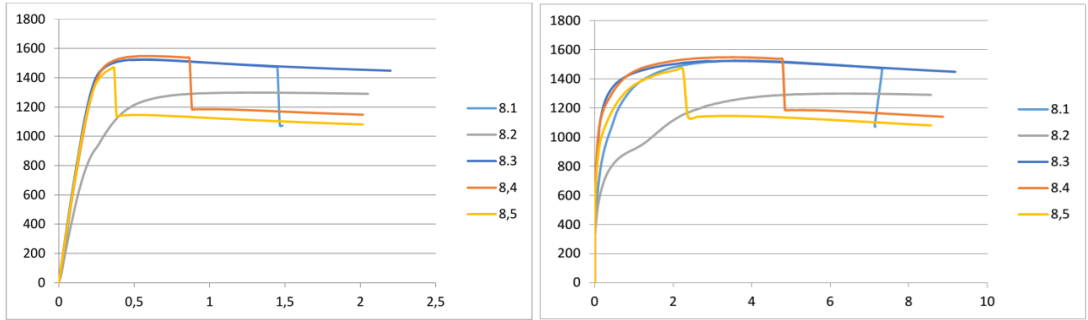
Şekil 6.27 5 nolu numuneye ait kuvvet-deplasman ve kuvvet-yanal deplasman grafikleri



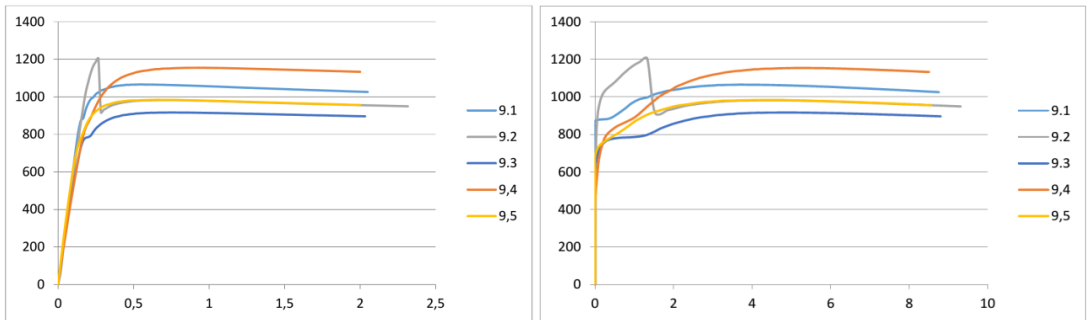
Şekil 6.28 6 nolu numuneye ait kuvvet-deplasman ve kuvvet-yanal deplasman grafikleri



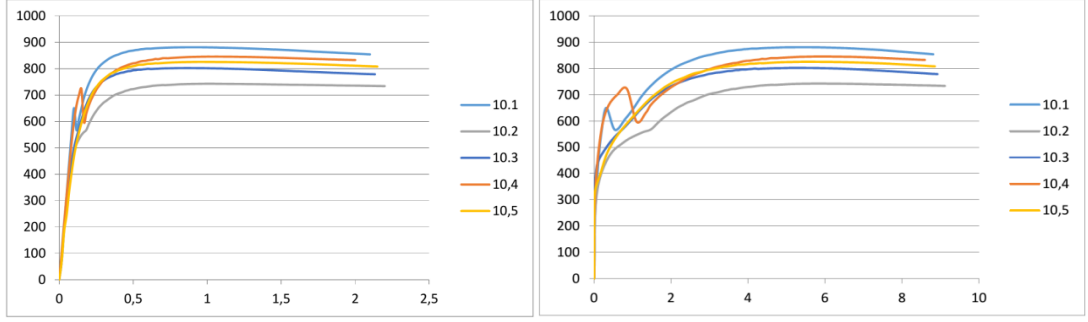
Şekil 6.29 7 nolu numuneye ait kuvvet-deplasman ve kuvvet-yanal deplasman grafikleri



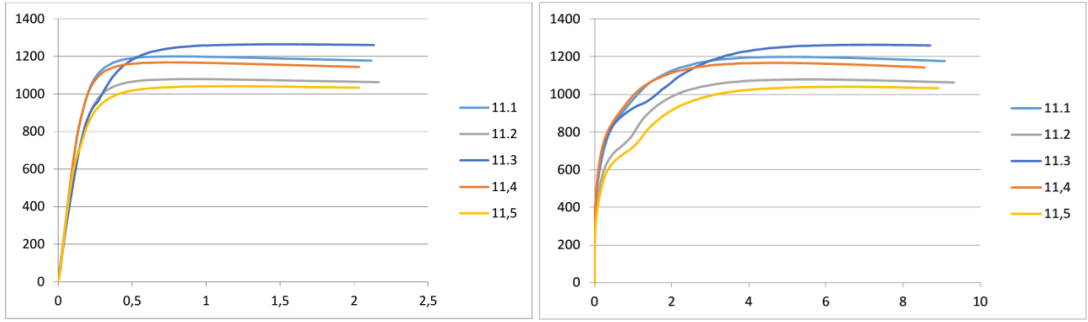
Şekil 6.30 8 nolu numuneye ait kuvvet-deplasman ve kuvvet-yanal deplasman grafikleri



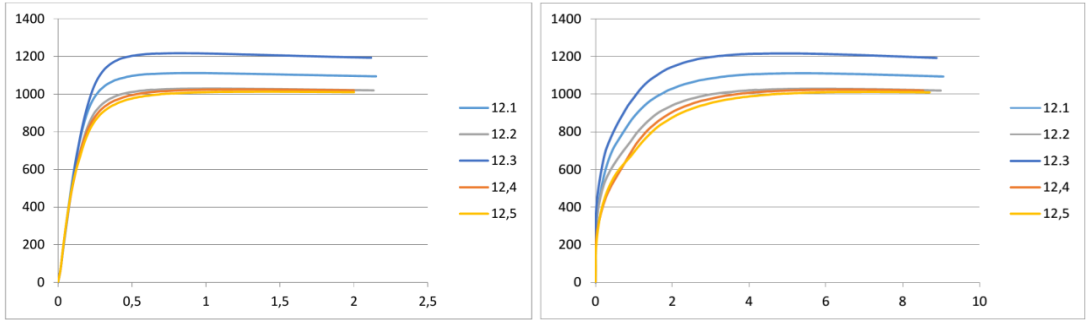
Şekil 6.31 9 nolu numuneye ait kuvvet-deplasman ve kuvvet-yanal deplasman grafikleri



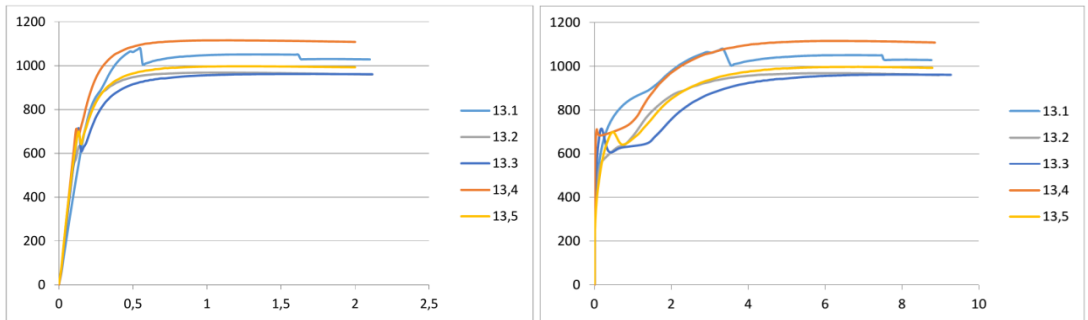
Şekil 6.32 10 nolu numuneye ait kuvvet-deplasman ve kuvvet-yanal deplasman grafikleri



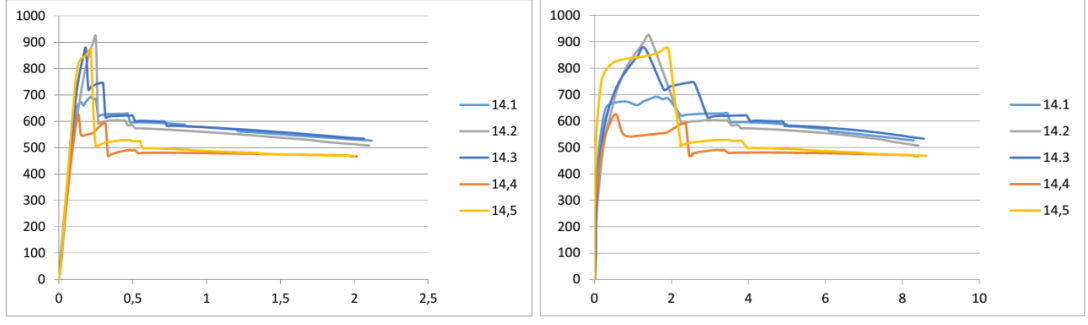
Şekil 6.33 11 nolu numuneye ait kuvvet-deplasman ve kuvvet-yanal deplasman grafikleri



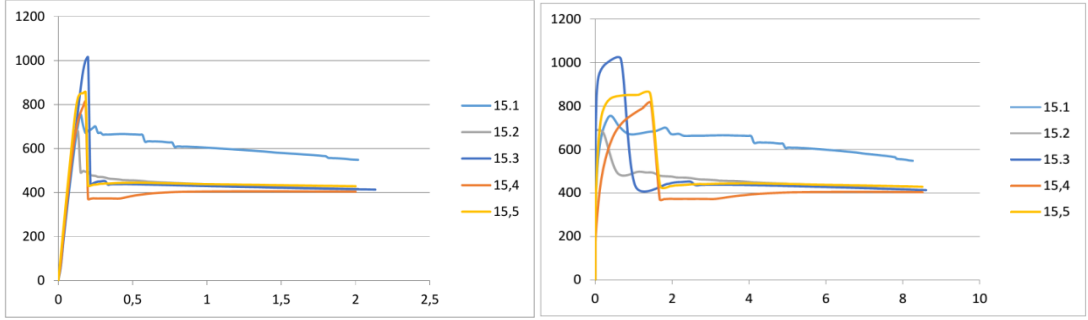
Şekil 6.34 12 nolu numuneye ait kuvvet-deplasman ve kuvvet-yanal deplasman grafikleri



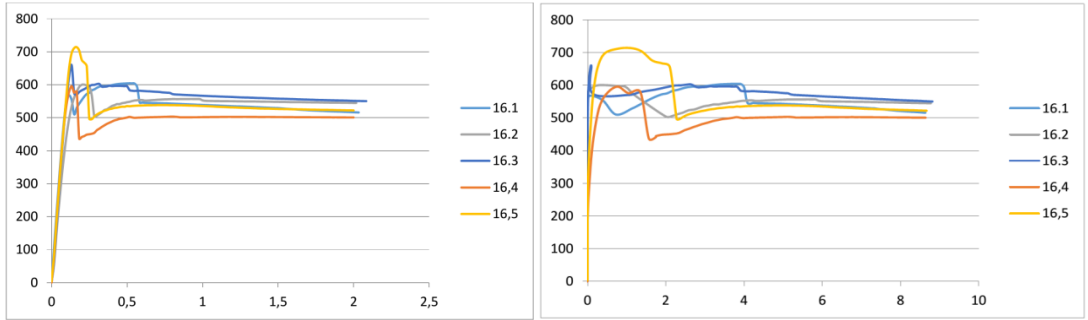
Şekil 6.35 13 nolu numuneye ait kuvvet-deplasman ve kuvvet-yanal deplasman grafikleri



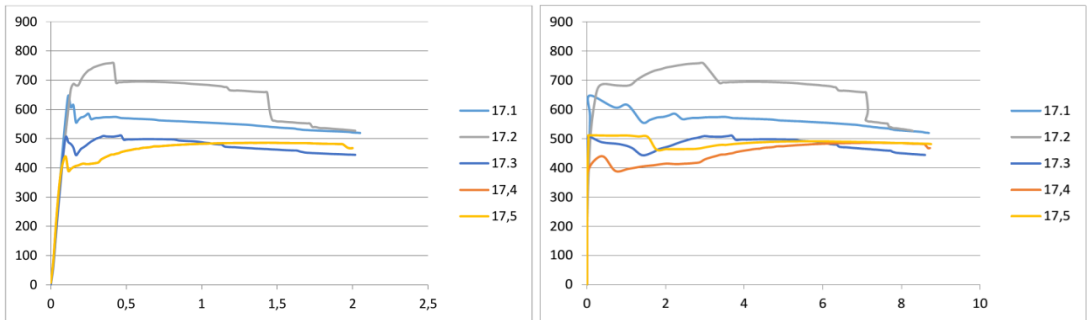
Şekil 6.36 14 nolu numuneye ait kuvvet-deplasman ve kuvvet-yanal deplasman grafikleri



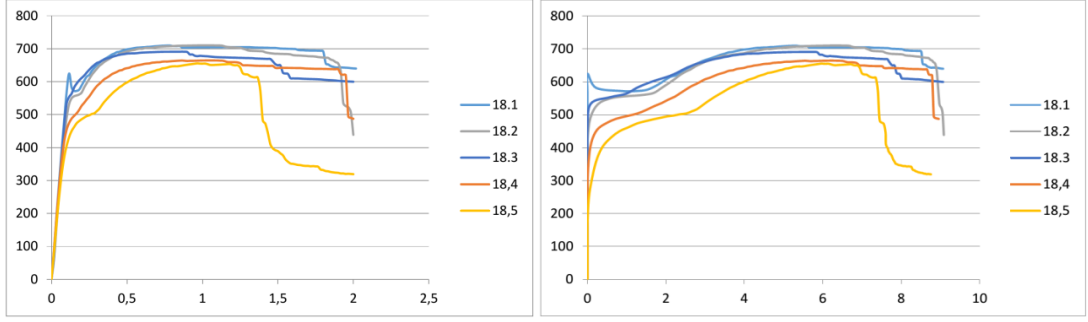
Şekil 6.37 15 nolu numuneye ait kuvvet-deplasman ve kuvvet-yanal deplasman grafikleri



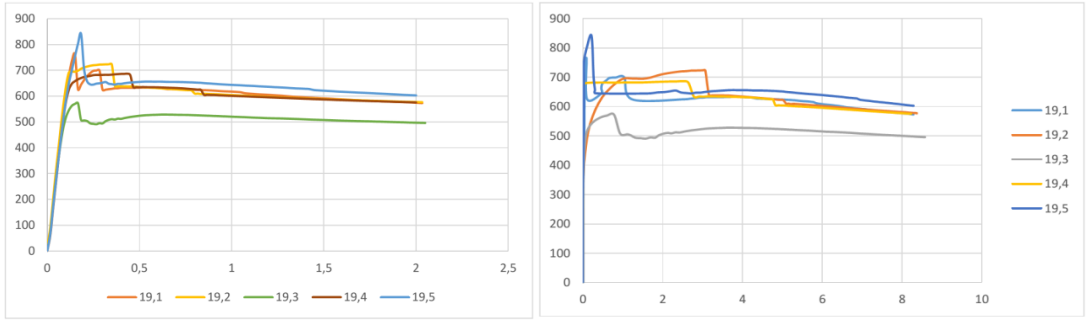
Şekil 6.38 16 nolu numuneye ait kuvvet-deplasman ve kuvvet-yanal deplasman grafikleri



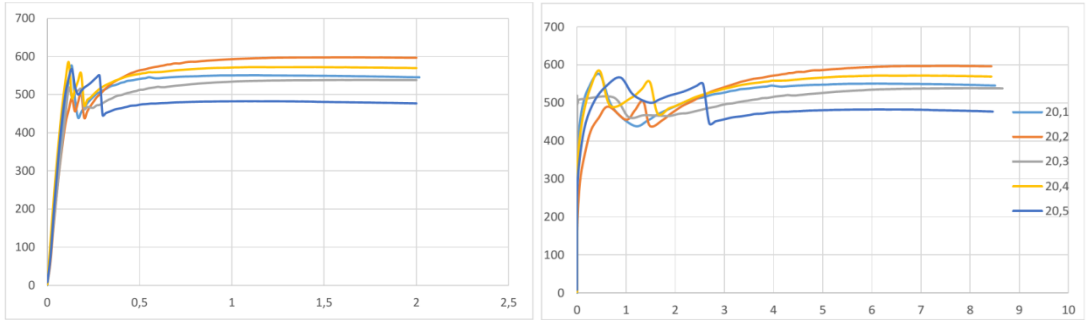
Şekil 6.39 17 nolu numuneye ait kuvvet-deplasman ve kuvvet-yanal deplasman grafikleri



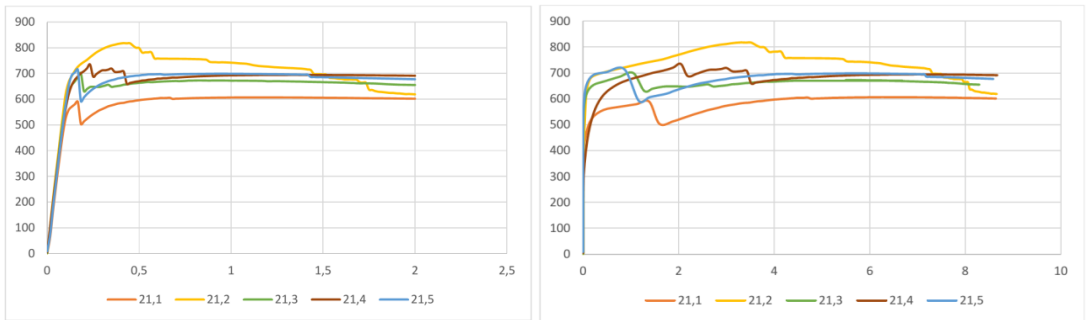
Şekil 6.40 18 nolu numuneye ait kuvvet-deplasman ve kuvvet-yanal deplasman grafikleri



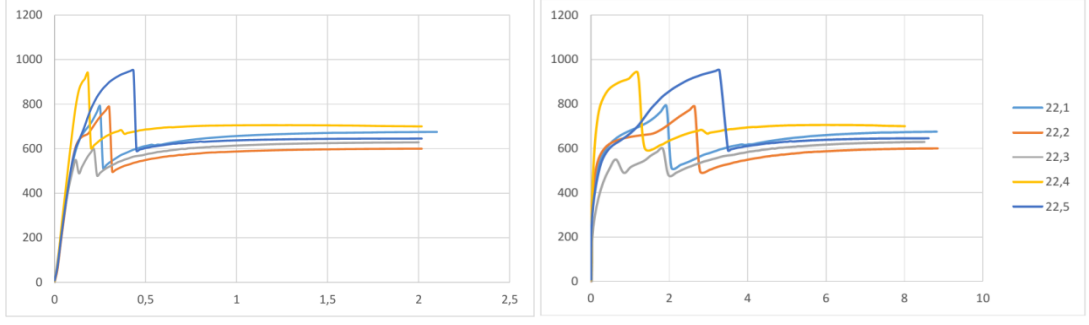
Şekil 6.41 19 nolu numuneye ait kuvvet-deplasman ve kuvvet-yanal deplasman grafikleri



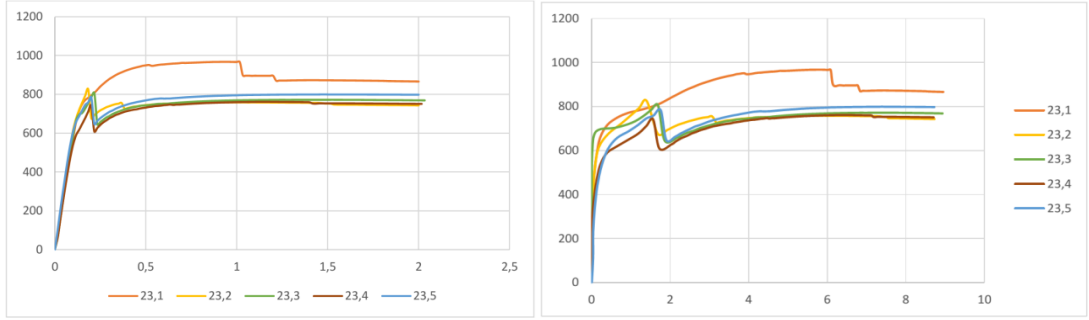
Şekil 6.42 20 nolu numuneye ait kuvvet-deplasman ve kuvvet-yanal deplasman grafikleri



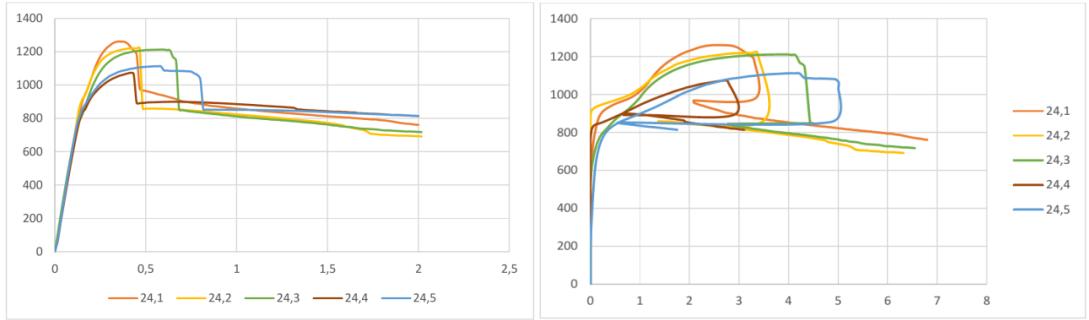
Şekil 6.43 21 nolu numuneye ait kuvvet-deplasman ve kuvvet-yanal deplasman grafikleri



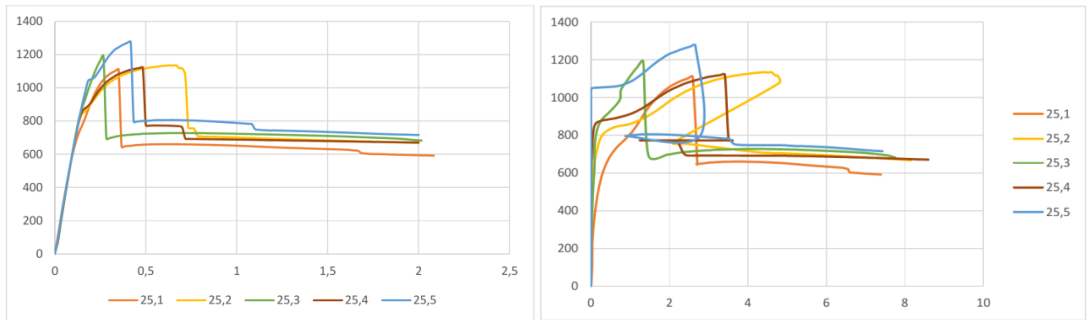
Şekil 6.44 22 nolu numuneye ait kuvvet-deplasman ve kuvvet-yanal deplasman grafikleri



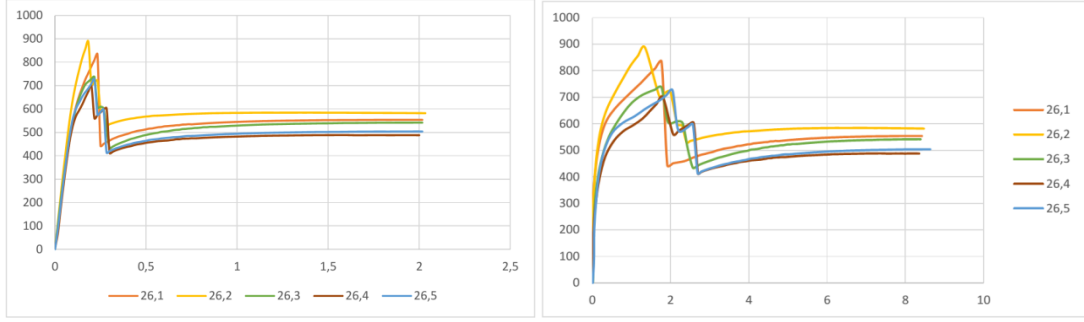
Şekil 6.45 23 nolu numuneye ait kuvvet-deplasman ve kuvvet-yanal deplasman grafikleri



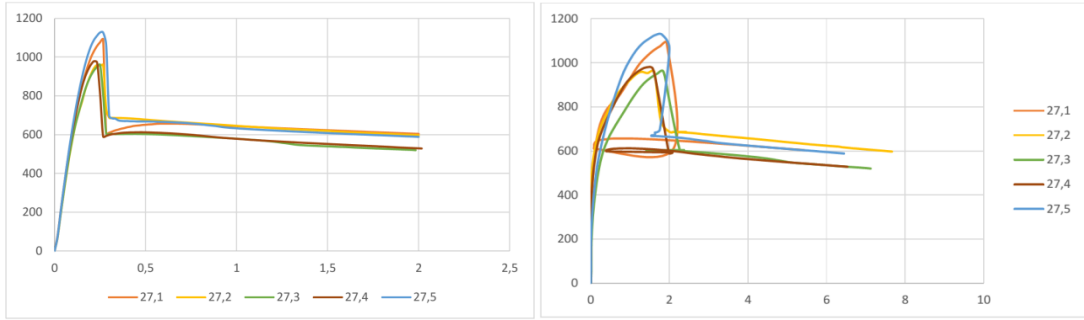
Şekil 6.46 24 nolu numuneye ait kuvvet-deplasman ve kuvvet-yanal deplasman grafikleri



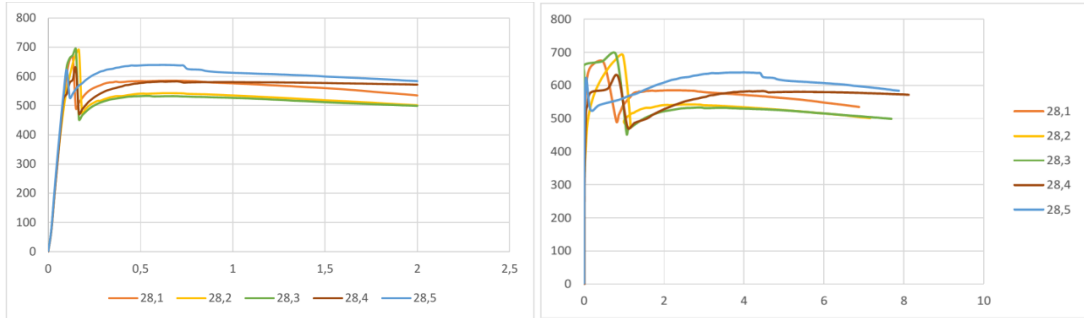
Şekil 6.47 25 nolu numuneye ait kuvvet-deplasman ve kuvvet-yanal deplasman grafikleri



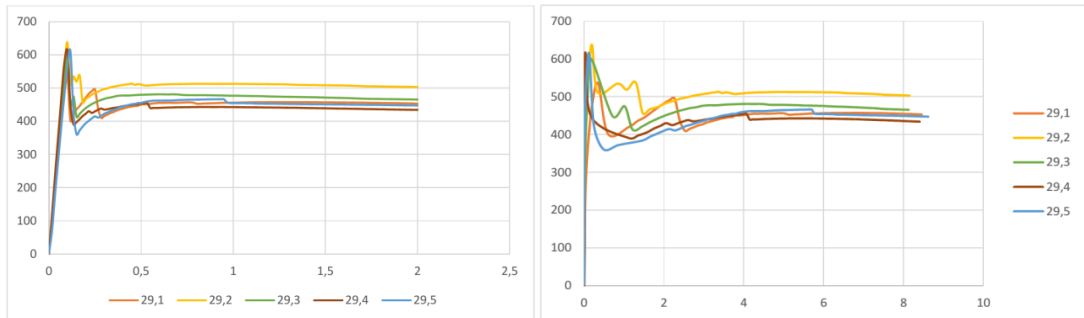
Şekil 6.48 26 nolu numuneye ait kuvvet-deplasman ve kuvvet-yanal deplasman grafikleri



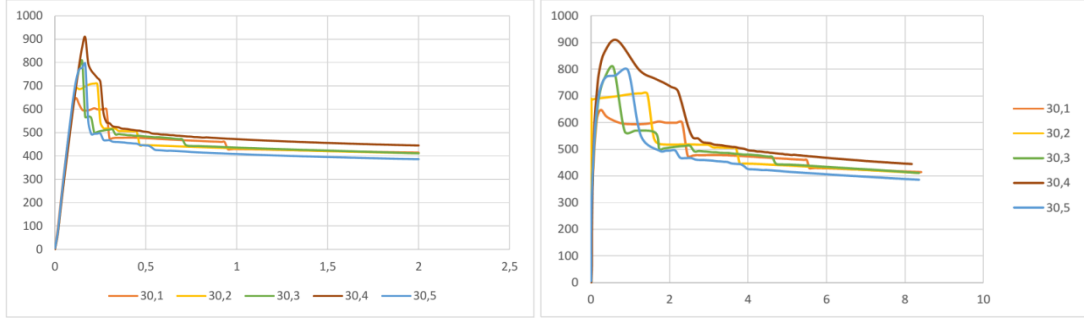
Şekil 6.49 27 nolu numuneye ait kuvvet-deplasman ve kuvvet-yanal deplasman grafikleri



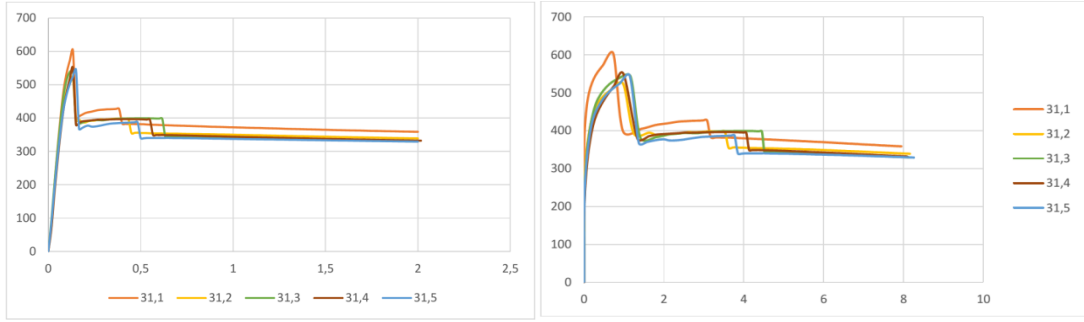
Şekil 6.50 28 nolu numuneye ait kuvvet-deplasman ve kuvvet-yanal deplasman grafikleri



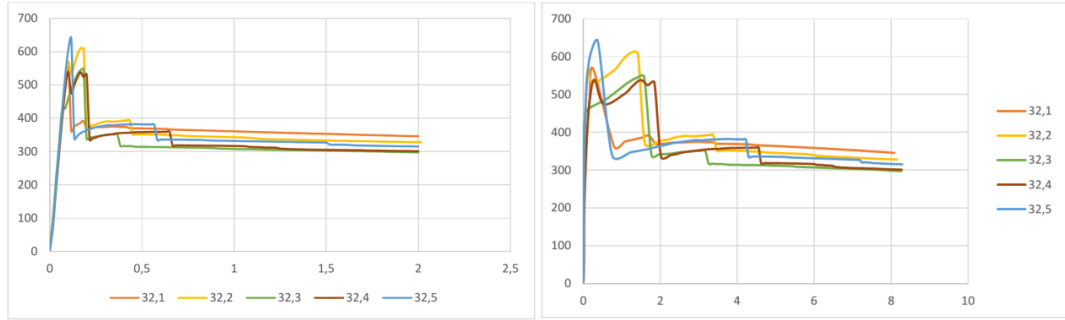
Şekil 6.51 29 nolu numuneye ait kuvvet-deplasman ve kuvvet-yanal deplasman grafikleri



Şekil 6.52 30 nolu numuneye ait kuvvet-deplasman ve kuvvet-yanal deplasman grafikleri



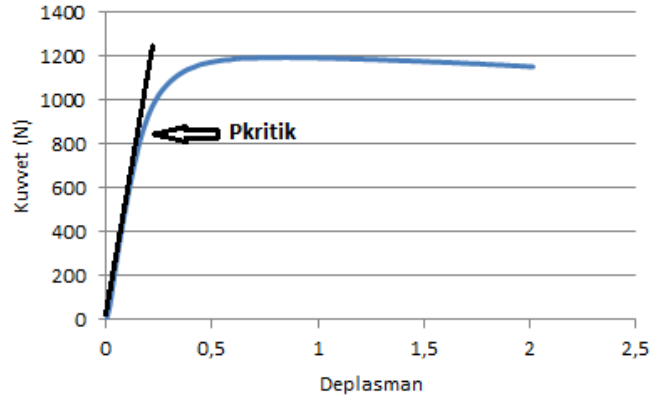
Şekil 6.53 31 nolu numuneye ait kuvvet-deplasman ve kuvvet-yanal deplasman grafikleri



Şekil 6.54 32 nolu numuneye ait kuvvet-deplasman ve kuvvet-yanal deplasman grafikleri

Şekil 6.24-6.54 arasında bulunan şekiller yapılan deneylere ait kuvvet-deplasman ve kuvvet yanal deplasman grafiklerini içermektedir. Yukarıdaki kuvvet-yer değişimi grafikleri kullanılarak Şekil 6.55’de görüldüğü gibi kuvvet-yer değişiminin grafiğindeki eğrinin sahip olduğu lineerlikten ayrıldığı noktaya karşılık gelen kuvvet değeri olan pkratik değerleri belirlenmiştir. Her durum için 5 adet numune test edilmiş ve bu numunelerin her birinin pkratik değeri bulunmuştur. Daha sonra her durum için bulunan 5 kritik burkulma yükünün ortalaması alınarak o duruma ait kritik burkulma yükü elde edilmiştir. Deneyler sonrasında numunelere ait kırık burulma yükleri tespitinden sonra bulunan beş değer arasında aşırı olarak pozitif

veya negatif farka sahip değerler ortalama hesaplamasına katılmamıştır. Ortalama hesaplarının çoğunda 5 numuneye ait değer kullanılırken çok az kısmında bu fark nedeni ile en az 3 değer kullanılarak kritik burkulma yükleri belirlenmiştir. Bulunan kritik burkulma yükleri tablo 6.3’de gösterilmiştir.



Şekil 6.55 Kritik burkulma yükünün (P_{kr}) belirlenmesi

Tablo 6.3 Ortalama kritik burkulma yükleri

Numune No	P_{kr} (N)	Numune No	P_{kr} (N)	Numune No	P_{kr} (N)	Numune No	P_{kr} (N)
1	2030	9	889	17	668	25	722
2	1524	10	590	18	542	26	556
3	1120	11	892	19	660	27	647
4	735	12	786	20	522	28	628
5	1279	13	720	21	585	29	609
6	936	14	663	22	536	30	706
7	677	15	721	23	637	31	478
8	1133	16	552	24	848	32	550

Deneyler sonucu elde edilen kritik burkulma yükü-yanal deplasman grafiklerinden yararlanılarak, her duruma karşılık deneyleri yapılan 5 numunenin kritik burkulma yüklerine karşılık gelen yanal deplasmanlar bulunmuştur. Bu değerlerin ortalamasının alınması ile o numuneye ait yanal deplasmanlar belirlenmiştir. Bu değerler Tablo 6.4’de gösterilmektedir.

Tablo 6.4 Yanal deplasmanlar

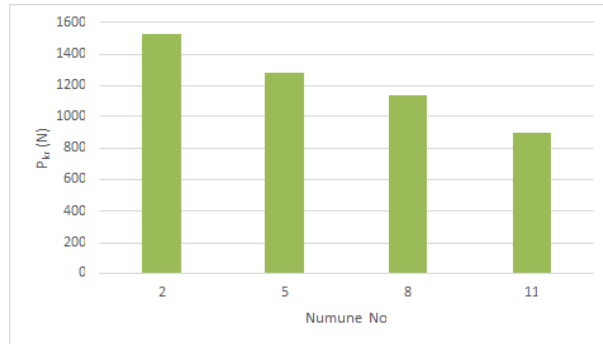
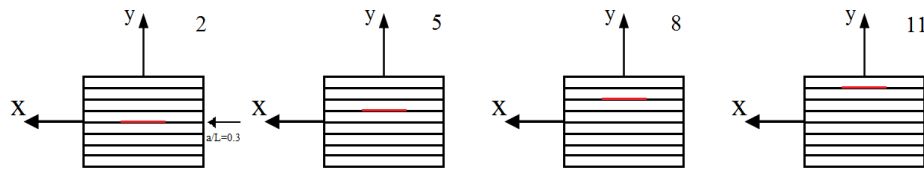
Numune No	Yanal D.(mm)	Numune No	Yanal D.(mm)	Numune No	Yanal D.(mm)	Numune No	Yanal D.(mm)
		9	0,346	17	0,3874	25	0,327
2	0,1495	10	0,33	18	0,2425	26	0,5414
3	0,96	11	0,7465	19	0,236	27	0,264
4	0,847	12	0,7424	20	0,263	28	0,0615
5	0,548	13	0,35	21	0,2152	29	0,1584
6	0,192	14	0,4595	22	0,24	30	0,2265
7	0,654	15	0,366	23	0,2164	31	0,4374
8	0,739	16	0,349	24	0,26	32	0,267

BÖLÜM YEDİ

DENEY SONUÇLARI

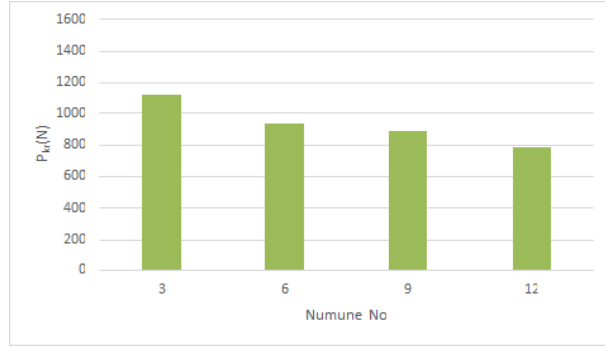
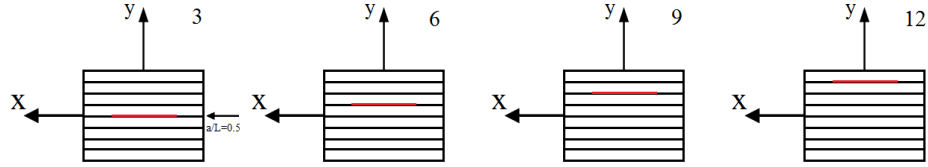
7.1 Kritik Burkulma Yüğü (P_{kr}) – Deplasman Karşılaştırılması

Kritik burkulma yükleri-deplasman karşılaştırılmasında Tablo 6.3’de verilmiş olan kritik burkulma yükleri üzerinden yapılmıştır. Bu değerler birbirleri ile uygun olacak şekilde eşleştirilerek karşılaştırılmalar gerçekleştirilmiştir. Şekil 7.1, 7.2 ve 7.3’de aynı boyuta sahip delaminasyonların, konumlarının orta ara yüzeyden üst ara yüzeye doğru değiştirildiği durum gösterilmiştir. Şekil 7.1’de 4.-5. tabakalar arası delaminasyonlu numunelerde ($a/L=0,3$) kritik burkulma yükü (P_{kr}) 1524N olarak tespit edilmiştir. Aynı delaminasyonun 5.-6. tabakalar arasında olması durumunda 1279N, 6.-7. tabakalar arasında olması durumunda 1133N ve 7.-8. tabakalar arasında olması durumunda da 892N olduğu görülmüştür. Delaminasyonun tabakalar arasındaki her değişimi sonrası numunenin kritik burkulma yükünde %12-%22 arasında değişim meydana gelmiştir. $a/L=0,3$ olan delaminasyonlu numunelerde, 4.-5. tabakalar arasındaki delaminasyonlu numunelerin kritik burkulma yükü ile 7.-8. tabakalar arasındaki delaminasyonlu numunelerin kritik burkulma yükü arasında yaklaşık %42 oranında bir azalma meydana geldiği tespit edilmiştir.



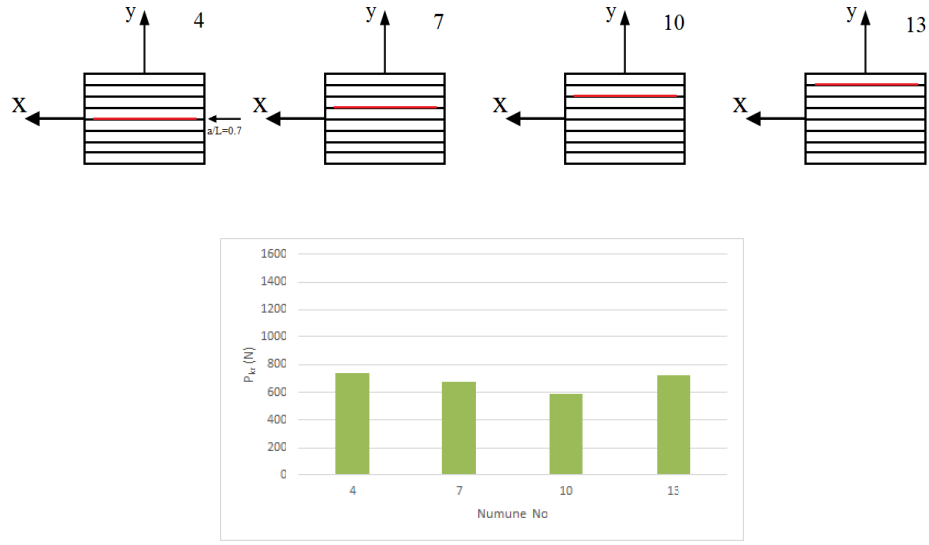
Şekil 7.1 Tabakalar arası P_{kr} karşılaştırma ($a/L=0,3$)

Şekil 7.2'e göre $a/L=0,5$ olan delaminasyonun tabakalar arası yer değiştirmesinde, 4.-5. tabakalar arasındaki durum ile 7.-8. tabakalar arasındaki durum karşılaştırıldığında, kritik burkulma yükünde yaklaşık %30'luk azalmanın olduğu görülmüştür.



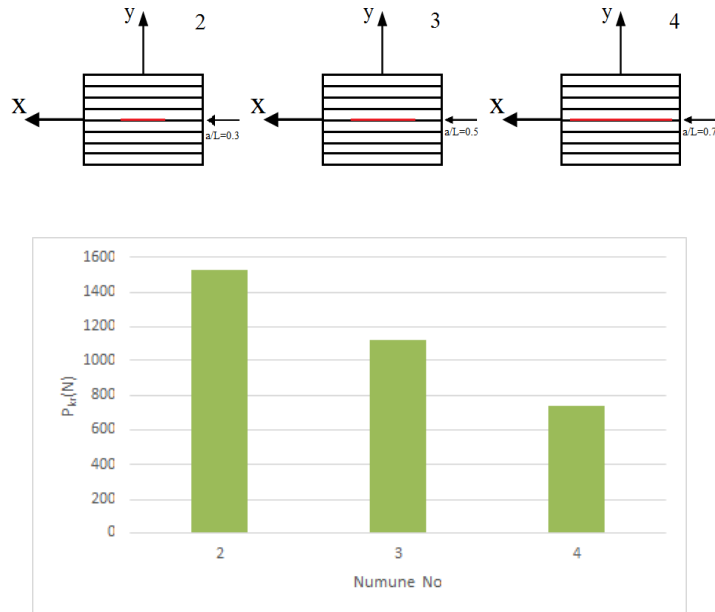
Şekil 7.2 Tabakalar arası P_{kr} karşılaştırma ($a/L=0,5$)

Şekil 7.3'e bakıldığında da Şekil 7.1 ve 7.2'de olduğu gibi benzer bir durum görülmüştür. Delaminasyonun büyümesi nedeni ile kritik burkulma yükleri arasında fark Şekil 7.1 ve 7.2'ye göre az olduğu görülmektedir. 4 nolu numunenin $P_{kr}=735N$, 7 nolu numunenin $P_{kr}=677N$, 10 nolu numunenin $P_{kr}=590N$ ve 13 nolu numunenin $P_{kr}=720N$ olarak bulunmuştur. $a/L=0,7$ olan delaminasyon için 4.-5. ve 6.-7. tabakalar arasındaki durumların kritik burkulma yükünde yaklaşık %20'lik bir azalma meydana gelmiştir. Ancak 7.-8. tabakalar arasındaki durum ile 4.-5. tabakalar arasındaki durum karşılaştırıldığında kritik burkulma yükleri arasındaki farkın azaldığı tespit edilmiştir.



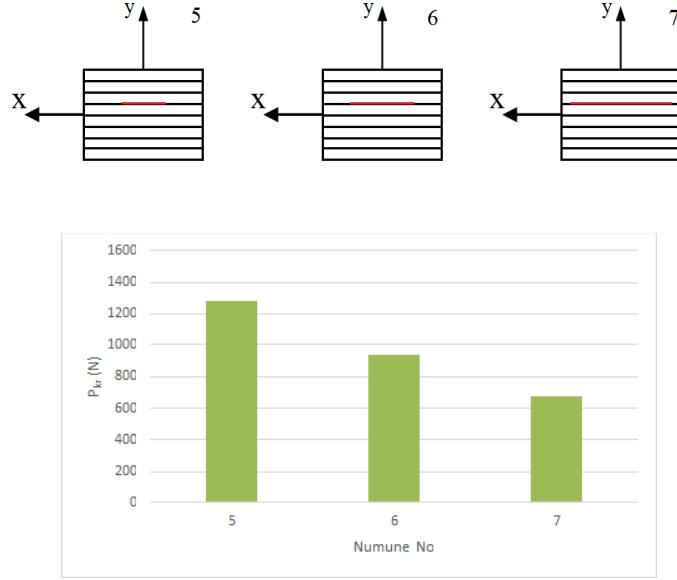
Şekil 7.3 Tabakalar arası P_{kr} karşılaştırma ($a/L=0,7$)

Şekil 7.4-7.7’de aynı tabakalar arasındaki delaminasyonların boyutlarının değişiminin ($a/L= 0,3, 0,5$ ve $0,7$) kritik burkulma yüküne etkisi gösterilmiştir. Şekil 7.4’da 4.-5. tabakalar arasında delaminasyon boyutu $a/L=0,3$ iken $P_{kr}=1524N$, $a/L=0,5$ iken $P_{kr}=1120N$ ve $a/L=0,7$ iken $P_{kr}=735N$ olarak bulunmuştur. Delaminasyonun $a/L=0,3$ ’den $a/L=0,5$ ’e büyümesi, kritik burkulma yükünde yaklaşık %26’lık bir azalmaya, $a/L=0,5$ ’den $0,7$ ’ye büyümesi ise kritik burkulma yükünde yaklaşık %34’lük bir azalmaya sebep olmuştur.



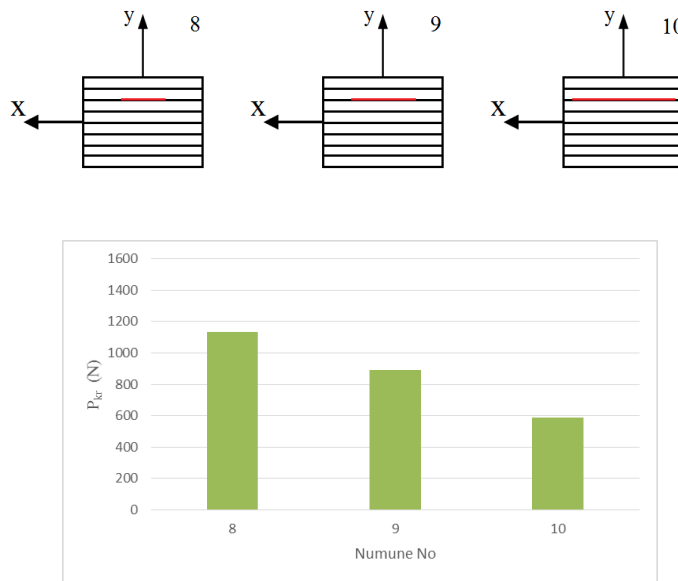
Şekil 7.4 Delaminasyon boyut etkisinin karşılaştırılması (4.-5. tabakalar arası)

Şekil 7.5’de 5.-6. tabakalar arasında a/L ’nin değişiminde, delaminasyon boyutunun 0,3’den 0,7’ye büyümesinin kritik burkulma yükünde %47 azalmaya neden olduğu tespit edilmiştir.

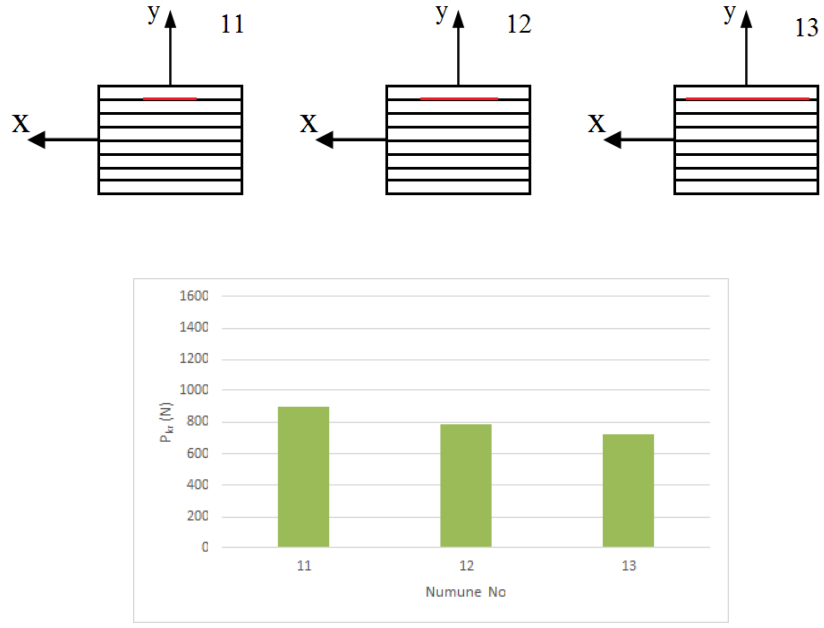


Şekil 7.5 Delaminasyon boyut etkisinin karşılaştırılması (5.-6. tabakalar arası)

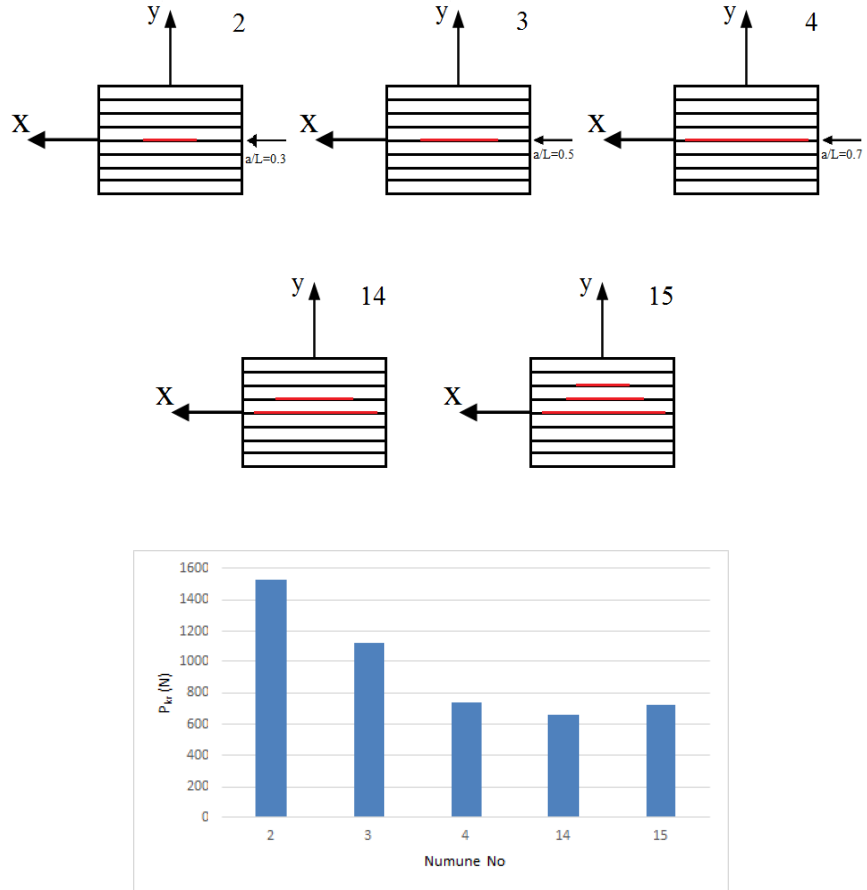
Şekil 7.5’e benzer şekilde, 6.-7. tabakalar arasındaki delaminasyon büyümesi %48 (Şekil 7.6), 7.-8. tabakalar arasındaki delaminasyon büyümesi ise %19 (Şekil 7.7) oranlarında kritik burkulma yükünü azaltmıştır.



Şekil 7.6 Delaminasyon boyut etkisinin karşılaştırılması (6.-7. tabakalar arası)

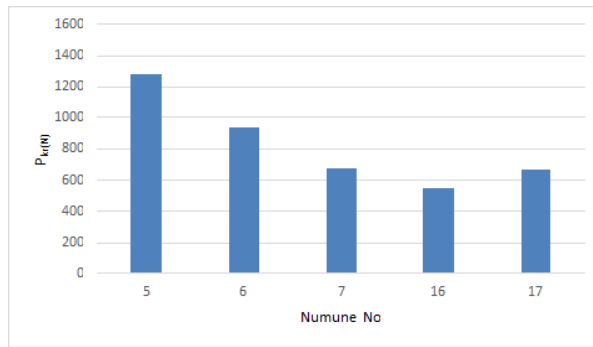
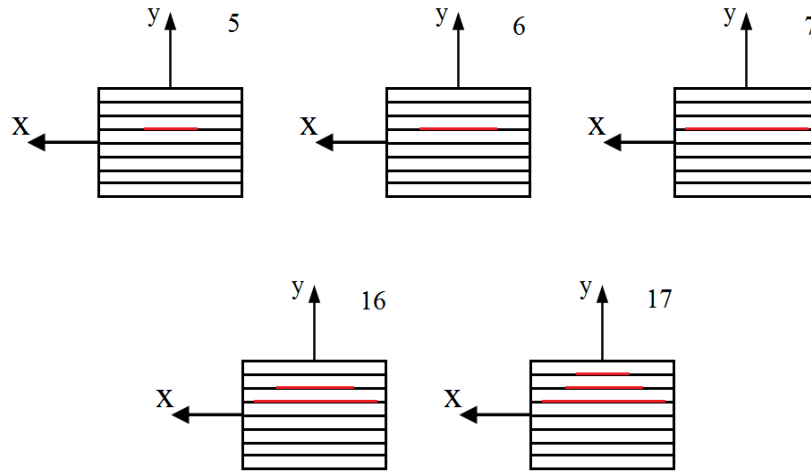


Şekil 7.7 Delaminasyon boyut etkisinin karşılaştırılması (7.-8. tabakalar arası)



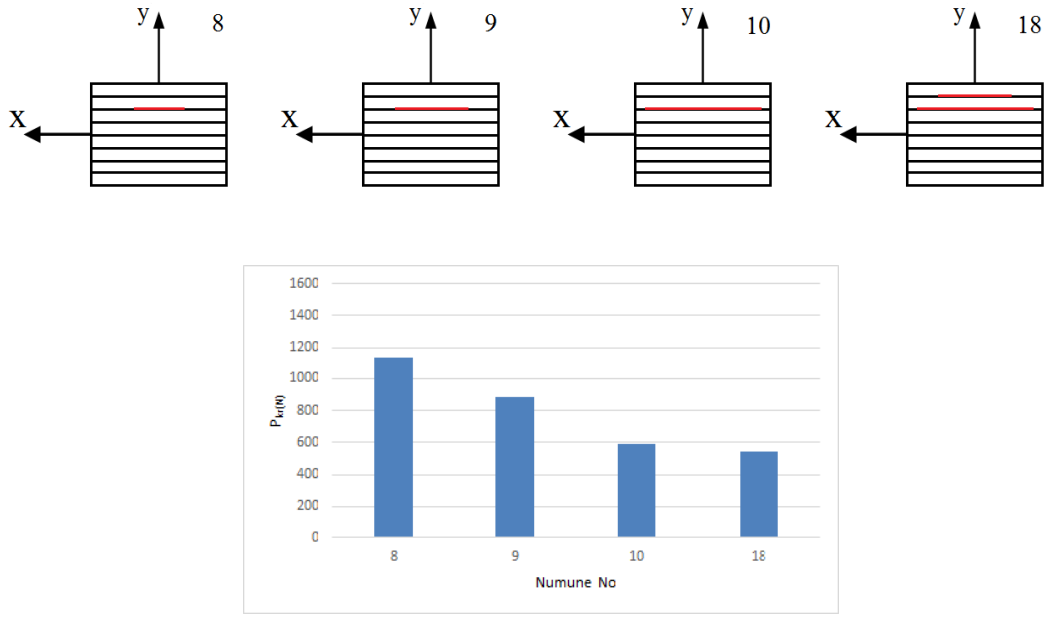
Şekil 7.8 Delaminasyon sayılarının karşılaştırılması (4.-5. tabakadan itibaren)

Şekil 7.8-7.10'da tek delaminasyonlu numuneler ile iki ve/veya üç delaminasyonlu numunelerin karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir. Örneğin Şekil 7.8'e bakıldığında 2, 3 ve 4 nolu numuneler 4.-5. tabakalar arasında yerleştirilmiş tek delaminasyonlu (sırasıyla $a/L=0,3$, $0,5$, $0,7$ olmak üzere) numunelere ait sonuçları gösterirken, 14 numaralı numune 4.-5. tabakalar arasında $a/L=0,7$ ve 5.-6 tabakalar arasında $a/L=0,5$ olan iki delaminasyonlu numuneye ait sonuçları ifade etmektedir. Benzer şekilde 15 numaralı numune de 4.-5. tabakalar arasında $a/L=0,7$, 5.-6. tabakalar arasında $a/L=0,5$ ve 6.-7. tabakalar arasında $a/L=0,3$ olan üç delaminasyonlu numuneye ait sonuçları göstermektedir. $a/L=0,7$ için, tek delaminasyonlu numune ile iki ve üç delaminasyona sahip numuneler karşılaştırıldığında, delaminasyon sayısı ikiye çıktığında kritik burkulma yükünde yaklaşık %10'luk bir azalmanın meydana geldiği, ancak bu azalmanın delaminasyon sayısı üç olduğunda yaklaşık %2 kadar olduğu tespit edilmiştir.



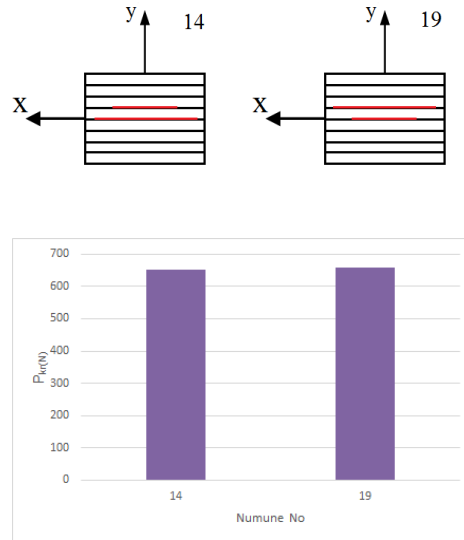
Şekil 7.9 Delaminasyon sayılarının karşılaştırılması (5.-6. tabakadan itibaren)

Şekil 7.8'e benzer durumlar Şekil 7.9 ve 7.10'daki sonuçlar için de gözlemlenmiştir. Şekil 7.9'da görüldüğü gibi delaminasyon sayısının ikiden üçe çıkması sonucu kritik burkulma dayanımında bir artış olduğu gözlenmiştir. Delaminasyondan sayısı birden ikiye çıktığında kritik burkulma yükünde azalış meydana gelirken, ikiden üçe çıktığında ise kritik burkulma yükünde bir miktar artış olduğu gözlenmiştir.



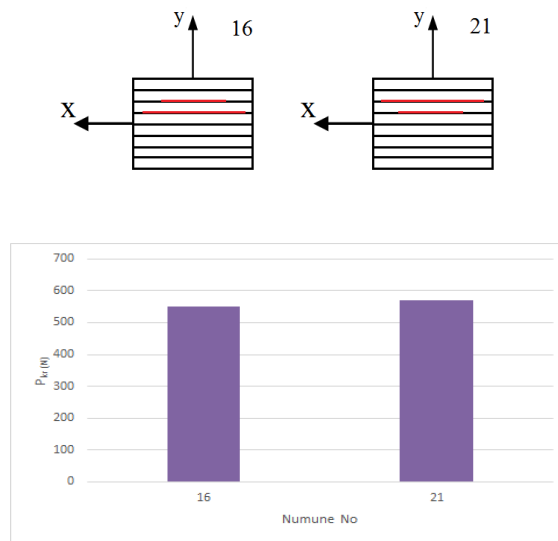
Şekil 7.10 Delaminasyon sayılarının karşılaştırılması (6.-7. tabakadan itibaren)

Şekil 7.11-7.13'de 2 adet delaminasyon içeren numunelerde $a/L=0,5$ ile $a/L=0,7$ boyutlarındaki delaminasyonların birbiri ile yer değiştirmesinin sonucu incelenmiştir. İlk olarak $a/L=0,7$ boyutundaki delaminasyon altta $a/L=0,5$ delaminasyon üste olacak şekilde 4.-5., 5.-6., 6.-7. katmanlar arasında sırası ile konumlandırılarak üretim yapılmıştır. Daha sonra yine aynı katmanlar arasında olacak şekilde $a/L=0,5$ boyutlarındaki delaminasyon altta $a/L=0,7$ boyutundaki delaminasyon üstte olacak şekilde üretim yapılmıştır. Bu numunelerin deneysel olarak burkulması sonucu elde edilen P_{kr} karşılaştırılmıştır.



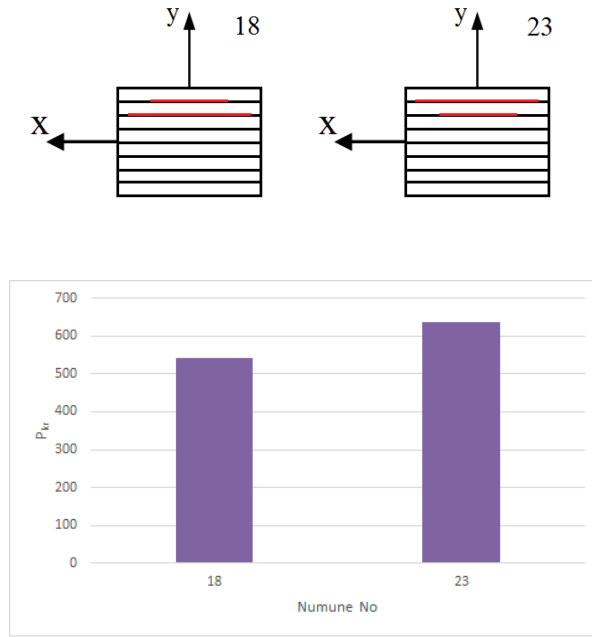
Şekil 7.11 D 4-5 2li karşılaştırılması

Şekil 7.11 de 4.-5. tabakalar arası $a/L=0,7$ ve 5.-6. tabakalar arası $a/L=0,5$ delaminasyon içeren 14 nolu numune ile 4.-5. tabakalar arası $a/L=0,5$ ile 5.-6. tabakalar arası $a/L=0,7$ delaminasyon içeren 19 nolu numunelerin deneyler sonucu elde edilen P_{kr} değerleri karşılaştırılmıştır. Şekil 7.11-7.13’de katmanlar arasındaki büyük delaminasyonların üstte geçmesi ile kritik burkulma yüklerinde artış gözlemlenmiştir. Şekil 7.11’de 14 nolu numunenin $P_{kr}=653N$, 19 numaralı numunenin $P_{kr}=660N$ olarak bulunmuştur. Delaminasyonların yer değiştirmesi sonucu Şekil 7.11’de kritik burkulma yükünde %1.07 oranında arttığı belirlenmiştir.



Şekil 7.12 D 5-6 2li karşılaştırılması

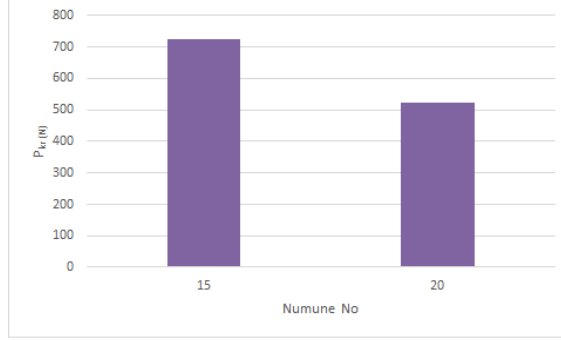
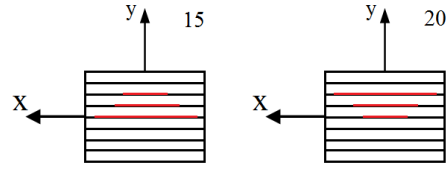
Şekil 7.12 de 5.-6. tabakalar arası $a/L=0,7$ ve 6.-7. tabakalar arası $a/L=0,5$ delaminasyon içeren 16 nolu numune ile 5.-6. tabakalar arası $a/L=0,5$ ile 6.-7. tabakalar arası $a/L=0,7$ delaminasyon içeren 21 nolu numunelerin deneyler sonucu elde edilen P_{kr} değerleri karşılaştırılmıştır. Şekil 7.12’de 16 nolu numunenin $P_{kr}=549N$, 21 nolu numunenin $P_{kr}=570N$ olduğu gözlenmiştir. Bu durumda delaminasyonların yer değiştirmesi sonucu P_{kr} değerlerinde %3.8 bir artış olduğu belirlenmiştir.



Şekil 7.13 D 6-7 2li karşılaştırılması

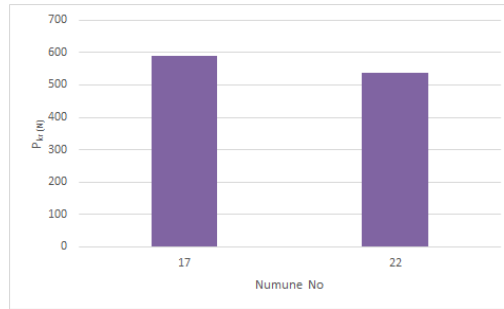
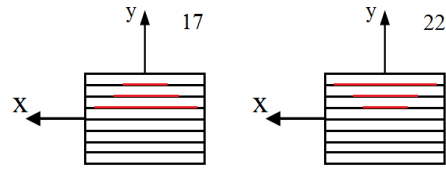
Şekil 7.13 de 6.-7. tabakalar arası $a/L=0,7$ ve 7.-8. tabakalar arası $a/L=0,5$ delaminasyon içeren 18 nolu numune ile 6.-7. tabakalar arası $a/L=0,5$ ile 7.-8. tabakalar arası $a/L=0,7$ delaminasyon içeren 23 nolu numunelerin deneyler sonucu elde edilen P_{kr} değerleri karşılaştırılmıştır. Şekil 7.13’de ise 18 nolu numunenin $P_{kr}=542N$, 23 nolu numunenin ise $P_{kr}=637N$ olarak gözlenmiştir. Delaminasyonların yer değiştirmesi sonucu P_{kr} %17.5 bir artış olduğu belirlenmiştir.

Şekil 7.14 ve 7.15’de numuneler $a/L=0,3$, $a/L=0,5$ ve $a/L=0,7$ boyutunda 3’er adet delaminasyon içermektedirler.



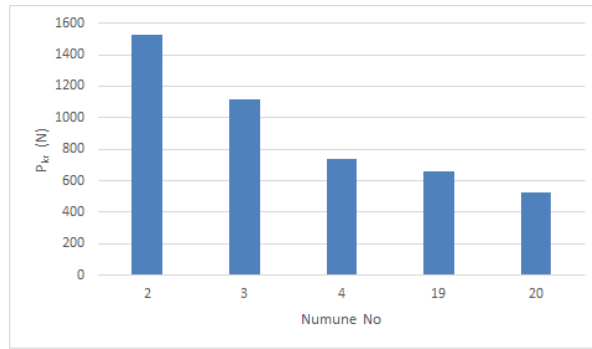
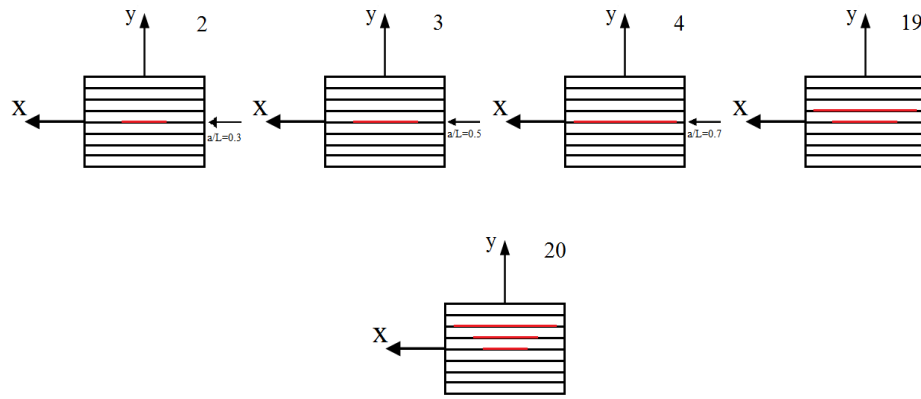
Şekil 7.14 D 4-5 3lü karşılaştırılması

15 nolu numune sırası ile 4.-5. katman arasında $a/L=0,7$, 5.-6. katman arasında $a/L=0,5$, 6.-7. katman arasında ise $a/L=0,3$ boyutlarında delaminasyon içermektedir. 20 nolu numune ise 15 nolu numunelerden tam ters olarak $a/L=0,3$ dan $a/L=0,7$ alttan üste doğru sıralanması ile oluşturulmuştur. 15 nolu numunenin $P_{kr}=723N$, 20 nolu numunenin ise $P_{kr}=522N$ olarak deneyler sonucu belirlenmiştir. Şekil 7.14 de görüldüğü gibi delaminasyon boyutuna bağlı olarak 3 delaminasyon içeren numunelerde delaminasyonların yerlerinin değişmesi sonucu kritik burkulma yükünde %27.8 dolayında bir azalma meydana gelmiştir.



Şekil 7.15 D 4-5 3lü karşılaştırılması

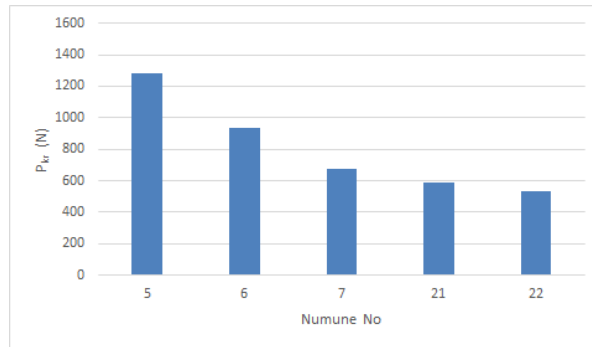
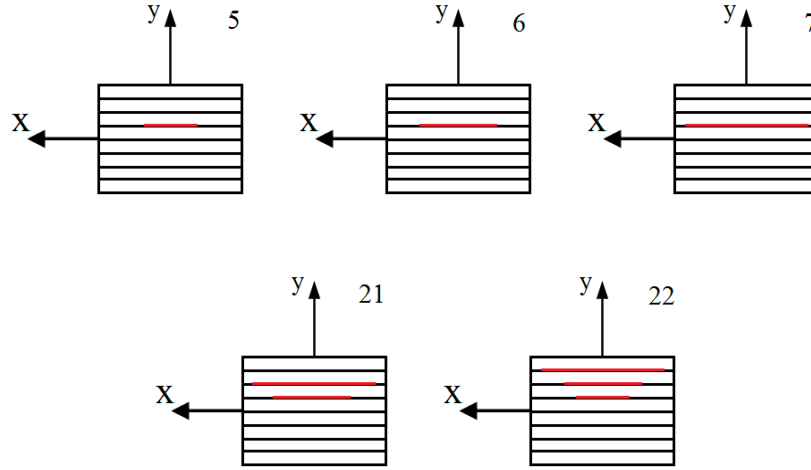
Şekil 7.15’de ise 17 nolu numune 5.-6. katman arasında $a/L=0,7$, 6.-7. katman arasında $a/L=0,5$, 7.-8. katman arasında ise $a/L=0,3$ boyutlarında delaminasyon içermektedir. 22 nolu numune ise 17 nolu numulardan tam ters olarak $a/L=0,3$ dan $a/L=0,7$ alttan üste doğru sıralanması ile oluşturulmuştur. 17 nolu numunenin $P_{kr}=588N$, 22 nolu numunenin ise $P_{kr}=536N$ olarak bulunmuştur. Numunelerdeki delaminasyonların yer değiştirmesi sonucu P_{kr} değerinde yaklaşık %9’luk bir azalmaya neden olmuştur. Şekil 7.16-7.18’de tek delaminasyonlu numuneler ile iki ve/veya üç delaminasyonlu numunelerin karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir.



Şekil 7.16 D 4-5 1,2,3 delaminasyon kuculmesi

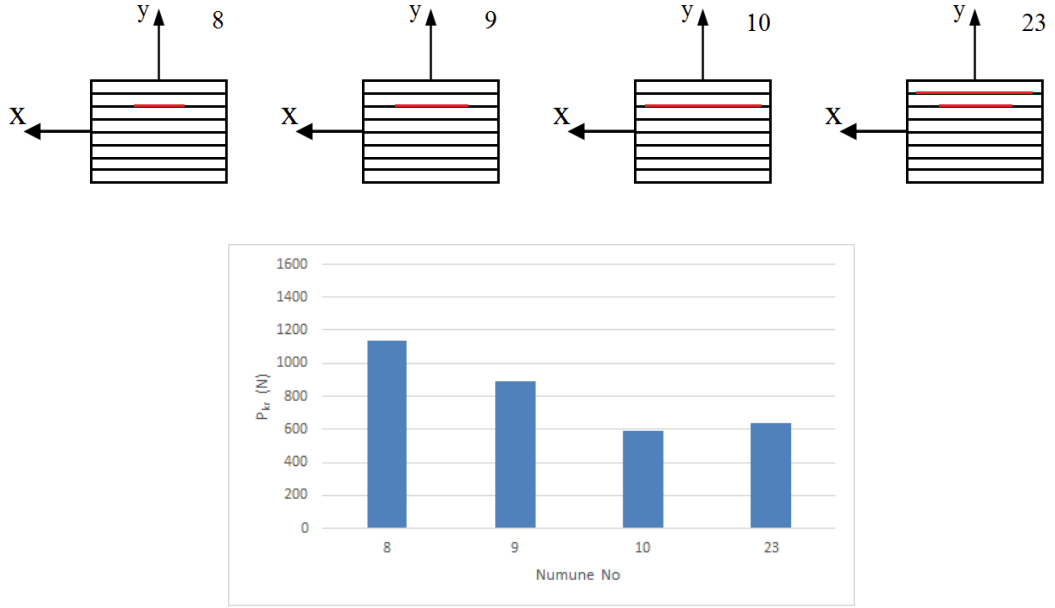
Şekil 7.16’ya bakıldığında 2, 3 ve 4 nolu numuneler 4.-5. tabakalar arasında yerleştirilmiş tek delaminasyonlu (sırasıyla $a/L=0,3$, $0,5$, $0,7$ olmak üzere) numunelere ait sonuçları gösterir. 19 numaralı numune 4.-5. tabakalar arasında $a/L=0,5$ ve 5.-6. tabakalar arasında $a/L=0,7$ olan iki delaminasyonlu numuneye ait sonuçları ifade etmektedir. Benzer şekilde 20 numaralı numune de 4.-5. tabakalar arasında $a/L=0,3$, 5.-6. tabakalar arasında $a/L=0,5$ ve 6.-7. tabakalar arasında $a/L=0,7$

olan üç delaminasyonlu numuneye ait sonuçları göstermektedir. $a/L=0,7$ için, tek delaminasyonlu numune ile iki ve üç delaminasyona sahip numuneler karşılaştırıldığında, delaminasyon sayısı ikiye çıktığında kritik burkulma yükünde yaklaşık %10'luk bir azalmanın meydana geldiği, ancak bu azalmanın delaminasyon sayısı üç olduğunda yaklaşık %29 kadar olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 7.17 D 5-6 1,2,3 delaminasyon kuculmesi

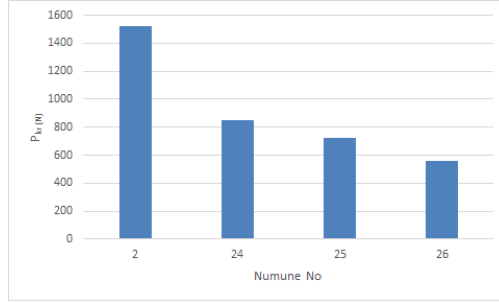
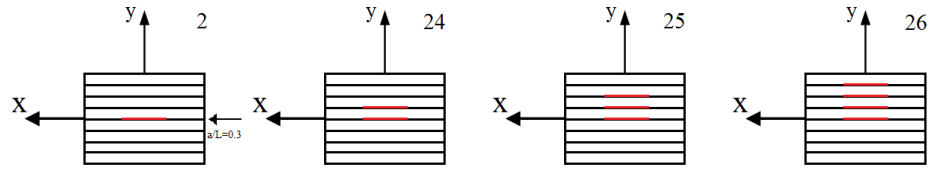
Şekil 7.16 daki benzer durumlar Şekil 7.17'deki sonuçlar için de gözlemlenmiştir. Şekil 7.17'de küçükten büyüğe doğru sıralanmış olan delaminasyonların sayısının ikiden üçe çıkması kritik burkulma yükünde $P_{kr}=585N$ 'dan $P_{kr}=536N$ gibi bir değere azalmasına neden olmuştur. Şekil 7.18 de ise 1 delaminasyondan 2 delaminasyona geçildiğinde ise %8 civarında P_{kr} artış göstermiştir.



Şekil 7.18 D 6-7 1,2 delaminasyon kuculmesi

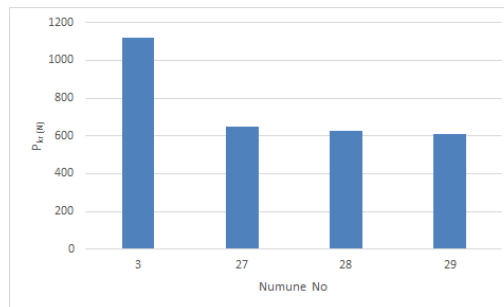
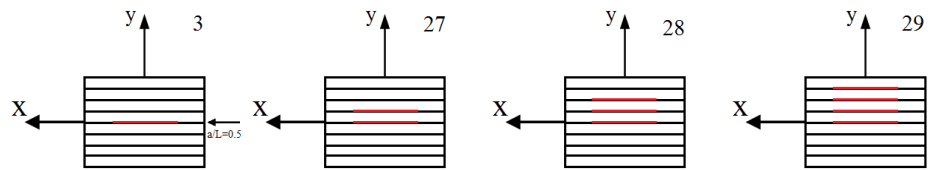
Şekil 7.19-7.21’de aynı delaminasyon boyutlarına sahip numunelerin tek delaminasyondan, 4 delaminasyona kadar üretilip karşılaştırılmıştır. Şekil 7.19’da $a/L=0,3$ delaminasyon boyutuna sahip 4.-5. tabakadan başlayarak tek delaminasyondan 4 delaminasyona kadar olan numuneler üretilip deneyler gerçekleştirilmiştir. 4.-5. tabakalar arası tek delaminasyona sahip olan 2 nolu numune $P_{kr}=1524N$, 2 delaminasyona sahip 24 nolu numunenin $P_{kr}=848N$, 3 delaminasyona sahip 25 nolu numunenin $P_{kr}=722N$, 4 delaminasyona sahip 26 nolu numunenin $P_{kr}=556N$ olarak gözlenmiştir.

Delaminasyon sayısının 1’den 2 ye yükselmesi kritik burkulma yükünü %44, 2’den 3 yükselmesi ile P_{kr} % 15, 3’den 4 delaminasyona yükselmesi ile kritik burkulma yükünde %22 azalma meydana gelmiştir.

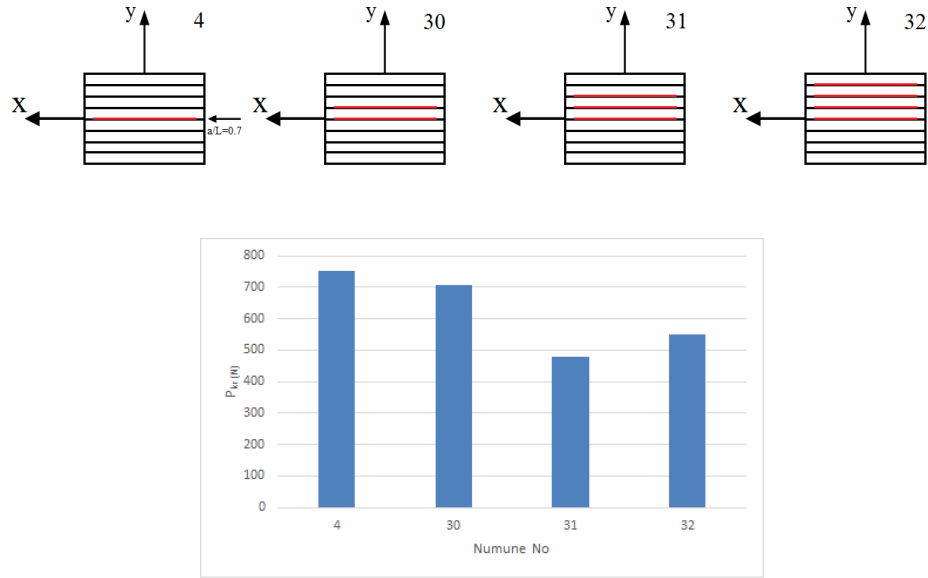


Şekil 7.19 0,3 delaminasyon sayı artışı

Şekil 7.20’da $a/L=0,5$ delaminasyon boyutuna sahip 4.-5. tabakadan başlayarak 1,2,3 ve 4 delaminasyona sahip olan numuneler üretilip deneyler gerçekleştirilmiştir. 4.-5. tabakalar arası tek delaminasyona sahip olan 3 nolu numune $P_{kr}=1120N$, 2 delaminasyona sahip 27 nolu numunenin $P_{kr}=647N$, 3 delaminasyona sahip 28 nolu numunenin $P_{kr}=628N$, 4 delaminasyona sahip 29 nolu numunenin $P_{kr}=608N$ olarak gözlenmiştir. Delaminasyon sayısının 1’den 2 ye yükselmesi kritik burkulma yükünü %42, 2’den 3 yükselmesi ile P_{kr} % 3, 3’den 4 delaminasyona yükselmesi ile P_{kr} %3 azalma meydana gelmiştir.



Şekil 7.20 0,5 delaminasyon sayı artışı

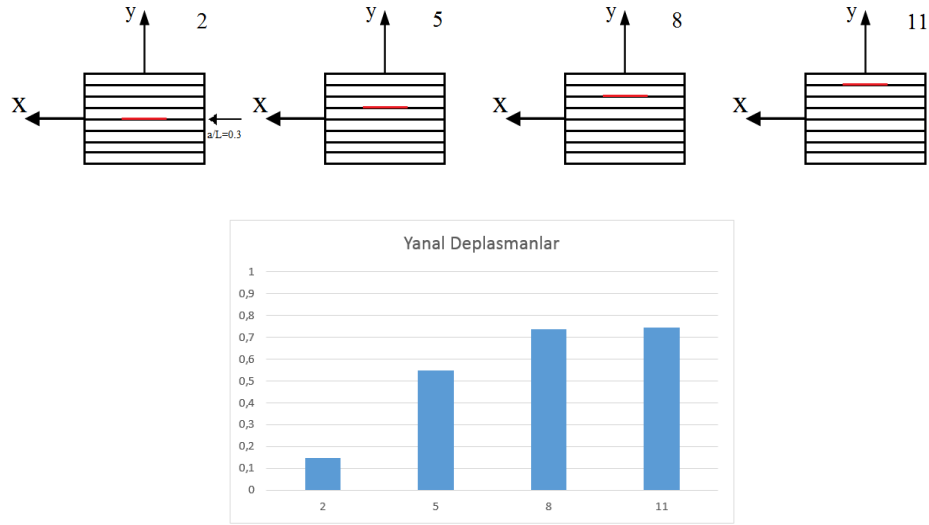


Şekil 7.21 0,7 delaminasyon sayı artışı

Şekil 7.21’de $a/L= 0,7$ delaminasyon boyutuna sahip tek delaminasyondan başlayarak 4 delaminasyona kadar olan numuneler üretilip deneyler gerçekleştirilmiştir. 4.-5. tabakalar arası tek delaminasyona sahip olan 4 nolu numune $P_{kr}=753N$, 2 delaminasyona sahip 30 nolu numunenin $P_{kr}=706N$, 3 delaminasyona sahip 31 nolu numunenin $P_{kr}=478N$, 4 delaminasyona sahip 32 nolu numunenin $P_{kr}=550N$ olarak gözlenmiştir. Delaminasyon sayısının 1’den 2 ye yükselmesi kritik burkulma yükünü %6, 2’den 3 yükselmesi ile P_{kr} % 32 azalırken, 3’den 4 delaminasyona yükselmesi ile P_{kr} % 15 artış meydana gelmiştir.

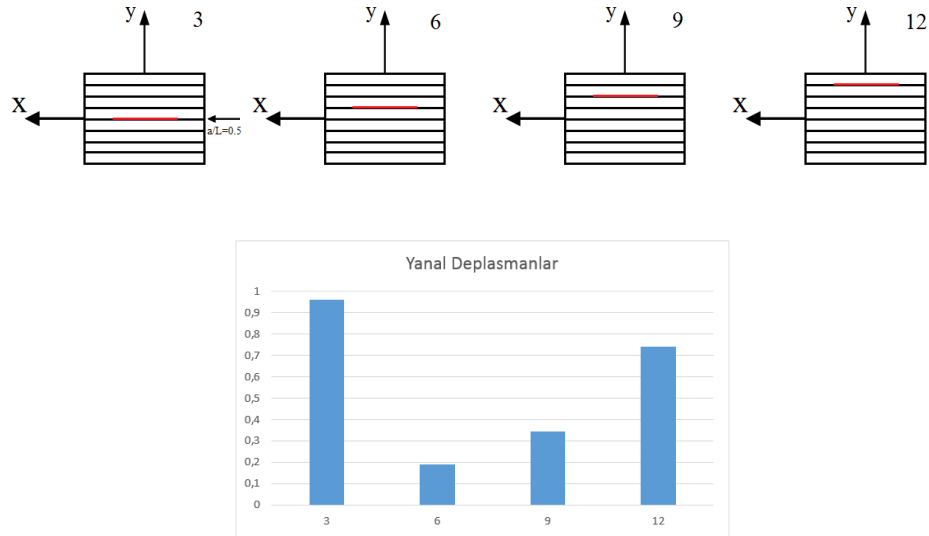
7.2 Kritik Burkulma Yüğü (P_{kr}) - Yanal Deplasman Karşılaştırılması

Kritik burkulma yükleri-yanal deplasman karşılaştırılmasında Tablo 6.4’de verilmiş olan kritik burkulma yüklerine karşılık gelen mm cinsinden olan yanal deplasmanlar üzerinden yapılmıştır. Bu değerler birbirleri ile uygun olacak şekilde eşleştirilerek karşılaştırılmalar gerçekleştirilmiştir.



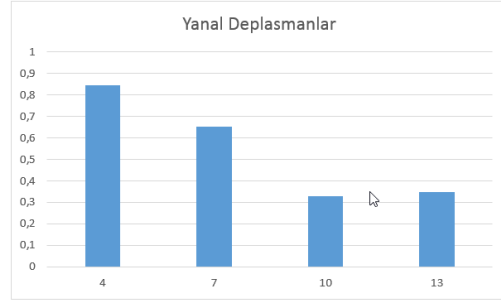
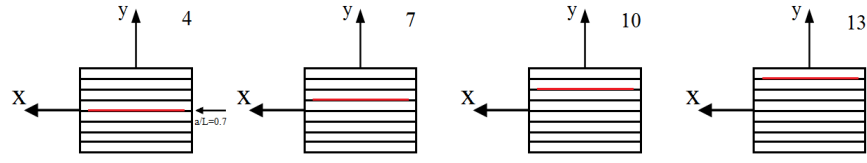
Şekil 7.22 0,3 delamisasyonun yer değişikinde yanal deplasman

Delaminasyon oranı $a/L=0,3$ iken orta ara yüzeyden üst ara yüzeye doğru delaminasyonun yerinin değişmesi sonucu yanal deplasmanların 0,1495mm ‘den 0,7465mm’ye doğru arttığı gözlenmiştir.



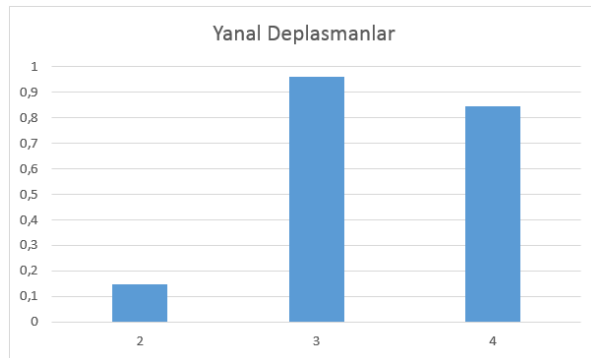
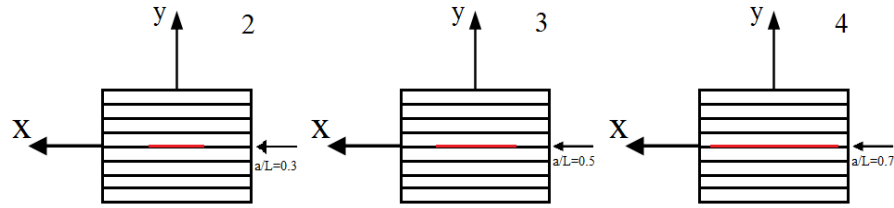
Şekil 7.23 0,5 delamisasyonun yer değişikinde yanal deplasman

Delaminasyon oranı $a/L=0,5$ iken orta ara yüzeyde yeni 4.-5. Tabakalar arasında bulunması sonucu yanal deplasmanın 0,96mm olarak bulunurken, orta ara yüzeyden üst ara yüzeye doğru delaminasyonun yerinin değişmesi ile 5.-6. tabaka arası yanal deplasman 0,192mm iken üst ara yüzeye doğru yanal deplasmanların 0,192mm ‘den 0,7424mm’ye doğru arttığı gözlenmiştir.



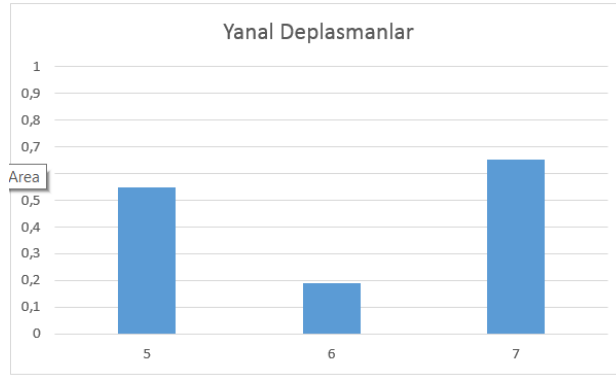
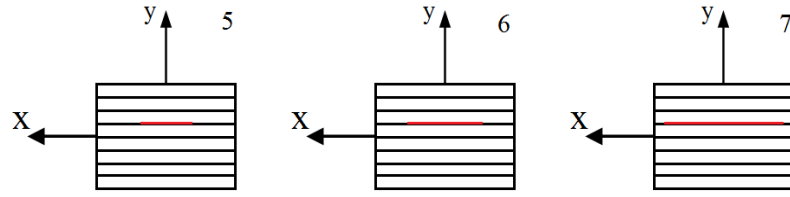
Şekil 7.24 0,7 delaminasyonun yer değişikliğinde yanıl deplasman

Delaminasyon oranı $a/L=0,7$ olduğunda delaminasyon 4.-5. tabakaları arasında iken yanıl deplasman 0,847mm, 5.-6. Tabakalar arasında olduğunda yanıl deplasman 0,654mm, 6.-7. Tabakalar arasında iken yanıl deplasmanlar 0,33mm ve delaminasyon 7.-8. Tabakalar arasında olduğunda yanıl deplasman 0,35mm olarak belirlenmiştir. Delaminasyonların yerdeğişimesi sonucu yanıl deplasman değerleri azaltmaktayken 0,7 deplasmanın son tabaka arasına gelmesi ile yanıl deplasman değerleri bir miktar artış göstermişlerdir.



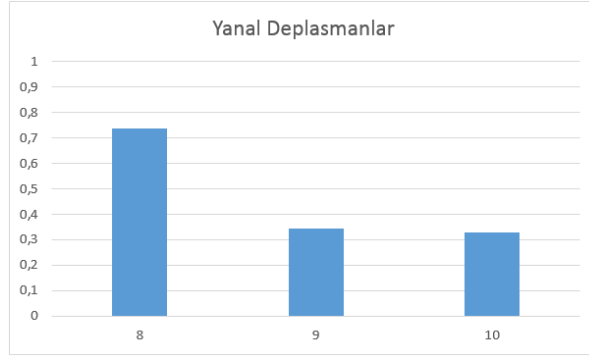
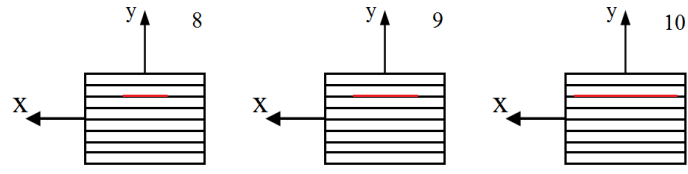
Şekil 7.25 4-5 arası delaminasyon boyuntunun büyümesinde yanıl deplasman

Delaminasyonun 4.-5. Tabakalar arasında bulunduğu durumda delaminasyon boyutunun $a/L=0,3$ 'den $a/L=0,7$ 'ye doğru büyümektedir. $a/L=0,3$ olduğunda yanal delaminasyon $0,1495\text{mm}$, $a/L=0,5$ olduğunda yanal deplasman $0,96\text{mm}$, $a/L=0,7$ olduğunda ise yanal delaminasyon $0,847\text{mm}$ olduğu belirlenmiştir. $a/L=0,3$ iken $a/L=0,5$ olması ile yanal deplasman boyutu artmış, $a/L=0,5$ 'den $a/L=0,7$ 'ye büyümesi sonucu yanal deplasman azalmıştır.



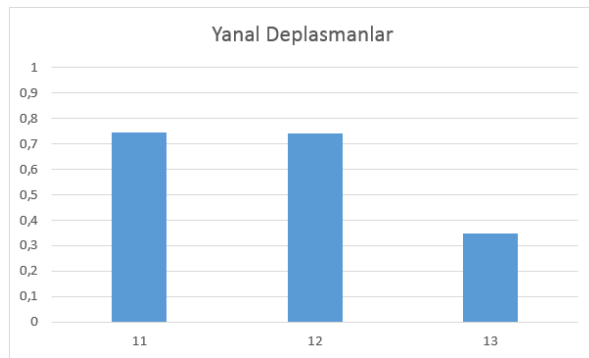
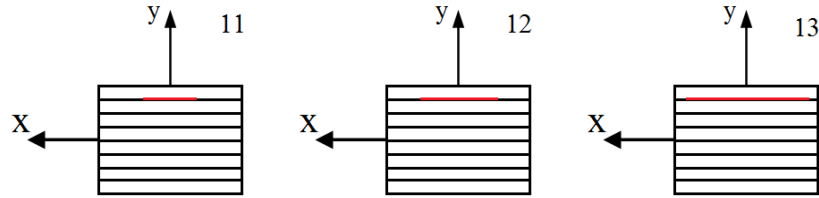
Şekil 7.26 5-6 arası delaminasyon boyutunun büyümesinde yanal deplasman

Delaminasyonun 5.-6. tabakalar arasında bulunduğu durumda delaminasyon boyutunun $a/L=0,3$ 'den $a/L=0,7$ 'ye doğru büyümesi görülmektedir. $a/L=0,3$ olduğunda yanal delaminasyon $0,548\text{mm}$, $a/L=0,5$ olduğunda yanal deplasman $0,192\text{mm}$, $a/L=0,7$ olduğunda ise yanal delaminasyon $0,654\text{mm}$ olduğu belirlenmiştir. $a/L=0,3$ iken $a/L=0,5$ olması ile yanal deplasman boyutu azalmış, $a/L=0,5$ 'den $a/L=0,7$ 'ye büyümesi sonucu yanal deplasman artmıştır.



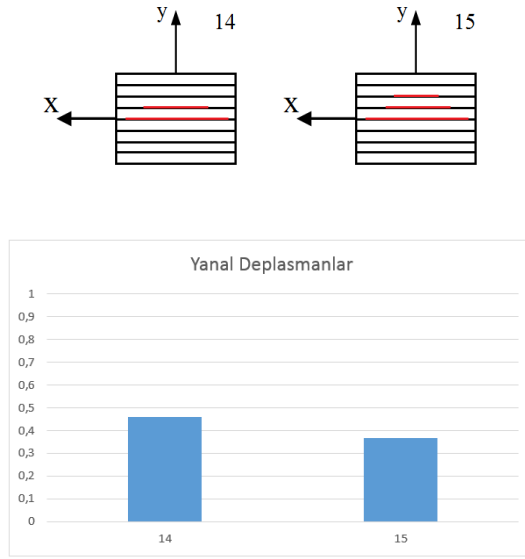
Şekil 7.27 6-7 arası delaminasyon boyuntunun büyümesinde yanıl deplasman

Delaminasyonun 6.-7. tabakalar arasında bulunduğu durumda delaminasyon boyutunun $a/L=0,3$ 'den $a/L=0,7$ 'ye doğru büyümesi görülmektedir. Delaminasyon boyutunun $a/L=0,3$ olduğu durumda yanıl deplasman 0,739mm, $a/L=0,5$ olduğuında 0,346mm, $a/L=0,7$ olduğuında ise 0,33mm olarak belirlenmiştir. Delaminasyon boyutunun artması sonucu yanıl deplasmanlar azalmıştır.



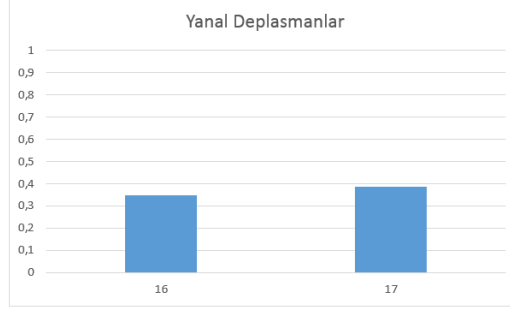
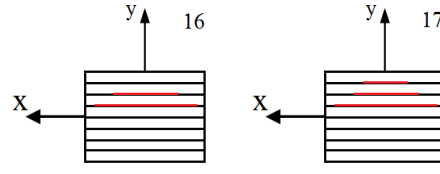
Şekil 7.28 7-8 arası delaminasyon boyuntunun büyümesinde yanıl deplasman

Delaminasyonun 7.-8. tabakalar arasında bulunduğu durumda delaminasyon boyutunun $a/L=0,3$ 'den $a/L=0,7$ 'ye doğru büyümesi görülmektedir. Delaminasyon boyutunun $a/L=0,3$ olduğu durumda yanıl deplasman $0,7465\text{mm}$, $a/L=0,5$ olduğunda $0,7424\text{mm}$, $a/L=0,7$ olduğunda ise $0,35\text{mm}$ olarak belirlenmiştir. Delaminasyon boyutunun artması sonucu yanıl deplasmanlar $0,3$ ile $0,5$ arasında çok az bir miktar azalırken delaminasyon boyutunun $a/L=0,7$ olduğunda yanıl deplasman değeri önemli bir miktar düşüş göstermiştir.



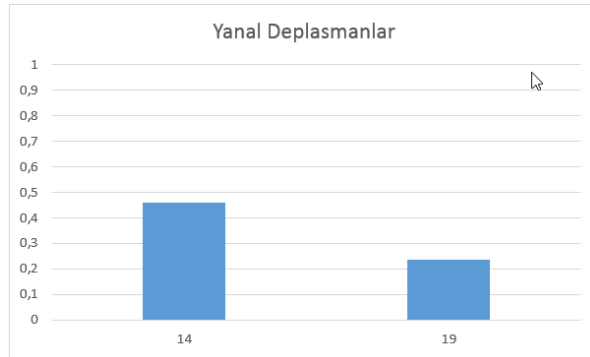
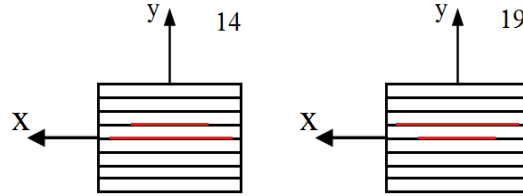
Şekil 7.29 D 4-5 delaminasyon sayı artışında yanıl deplasman

14 numaralı numune 4.-5. tabakalar arasında $a/L=0,7$ ve 5.-6 tabakalar arasında $a/L=0,5$ olan iki delaminasyonlu numuneye ait sonuçları ifade etmektedir. Benzer şekilde 15 numaralı numune de 4.-5. tabakalar arasında $a/L=0,7$, 5.-6. tabakalar arasında $a/L=0,5$ ve 6.-7. tabakalar arasında $a/L=0,3$ olan üç delaminasyonlu numuneye ait sonuçları göstermektedir. Delaminasyon sayısının iki olduğu durumda yanıl deplasman $0,4595\text{mm}$, delaminasyon sayısının üç olduğu durumda ise yanıl deplasman $0,366\text{mm}$ olarak belirlenmiştir. Delaminasyon sayısının ikiden üçe çıkması sonucu yanıl deplasman boyutu azalmıştır.



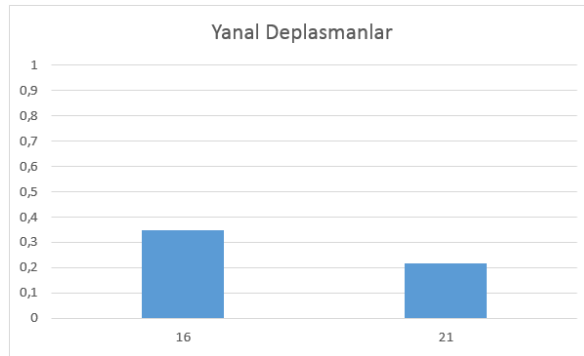
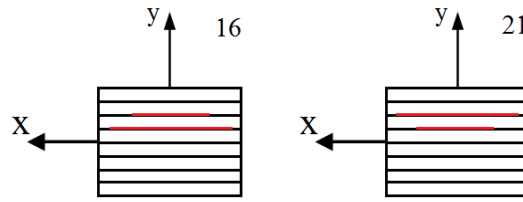
Şekil 7.30 D 5-6 delaminasyon sayı artışında yanıl deplasman

Delaminasyonların 5.-6. tabakalar arasından başladığı ve delaminasyon sayısının iki olduğu durumda yanıl deplasman 0,349mm, delaminasyon sayısının üç olduğu durumda ise yanıl deplasman 0,3874mm olarak belirlenmiştir. Delaminasyon sayısının aynı tabaka arasından başlayıp sayısının ikiden üçe çıkması sonucu yanıl deplasman boyutu artmıştır.



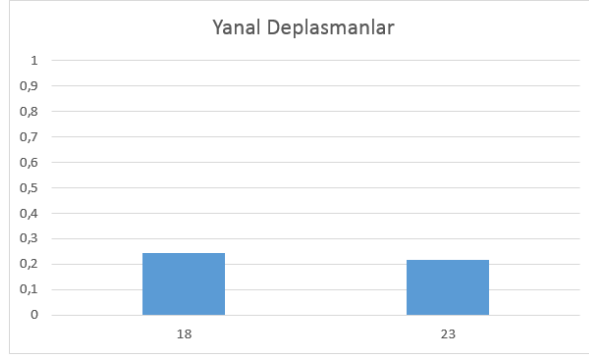
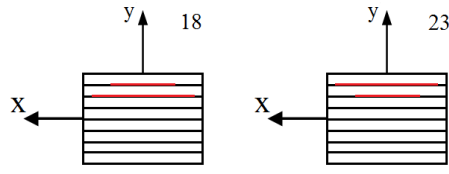
Şekil 7.31 D 4-5 2li karşılaştırılmasında yanıl deplasman

4.-5. tabakalar arası $a/L=0,7$ ve 5.-6. tabakalar arası $a/L= 0,5$ delaminasyon içeren 14 nolu numune ile 4.-5. tabakalar arası $a/L= 0,5$ ile 5.-6. tabakalar arası $a/L= 0,7$ delaminasyon içeren 19 nolu numunelerin deneyler sonucunda 14 nolu numunenin yanıl deplasmanı 0,4595mm, 19 nolu numunenin ise yanıl deplasmanı 0,236mm olarak bulunmuştur. Delaminasyonların 4.-5. Tabakadan itibaren sıralandığı durumda büyük ve küçük boyutlu delaminasyonların yer değiştirmesi sonucu yanıl deplasman azalmıştır.



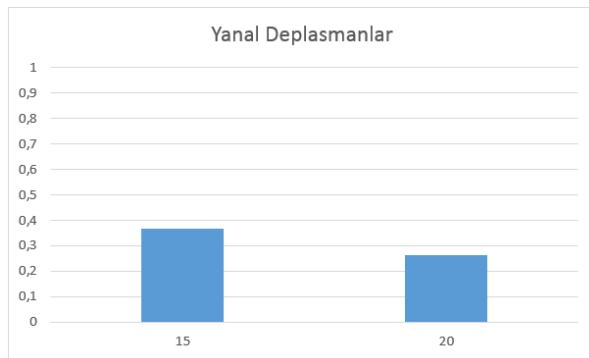
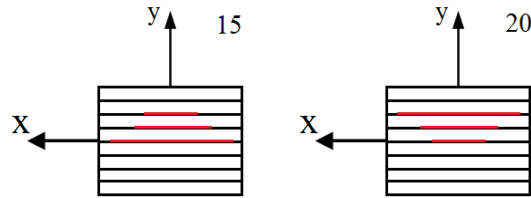
Şekil 7.32 D 5-6 2li karşılaştırılmasında yanıl deplasman

5.-6. tabakalar arası $a/L=0,7$ ve 6.-7. tabakalar arası $a/L= 0,5$ delaminasyon içeren 16 nolu numune ile 5.-6. tabakalar arası $a/L= 0,5$ ile 6.-7. tabakalar arası $a/L= 0,7$ delaminasyon içeren 21 nolu numuneler karşılaştırılmıştır. 16 nolu numunenin yanıl deplasmanı 0,349mm, 21 nolu numunenin yanıl delaminasyonu 0,2152mm olarak bulunmuştur. Delaminasyonların yer değiştirmesi sonucu yanıl deplasman azalmıştır.



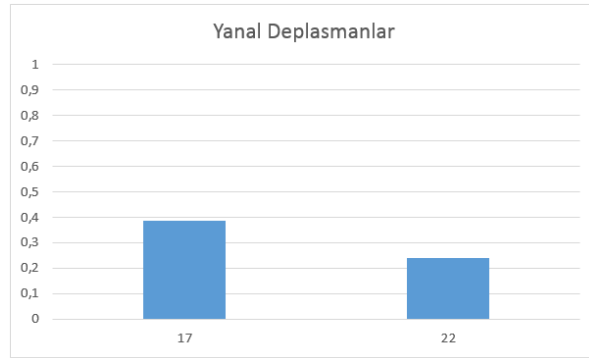
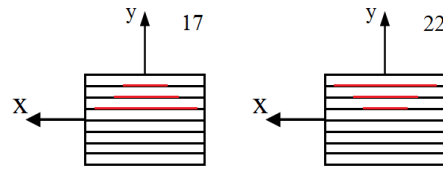
Şekil 7.33 D 6-7 2li karşılaştırılmasında yanal deplasman

6.-7. tabakalar arası $a/L=0,7$ ve 7.-8. tabakalar arası $a/L= 0,5$ delaminasyon içeren 18 nolu numunenin yanal deplasmanı $0,2425\text{mm}$, 6.-7. tabakalar arası $a/L= 0,5$ ile 7.-8. tabakalar arası $a/L= 0,7$ delaminasyon içeren 23 nolu numunenin $0,2164\text{mm}$ olarak bulunmuştur. Delaminasyonların sıralamasının yer değiştirmesi sonucu yanal deplasman azalmıştır.



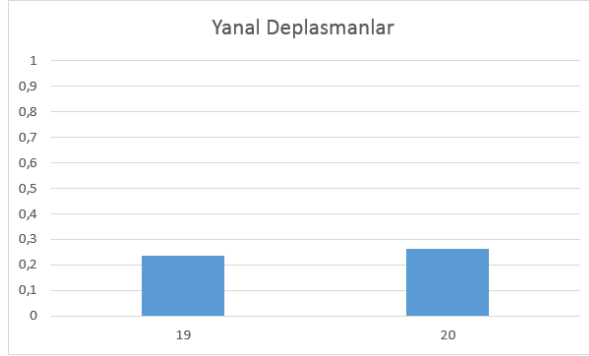
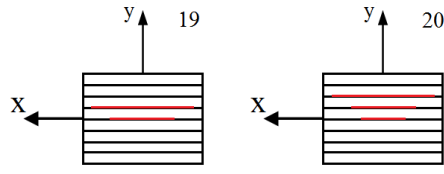
Şekil 7.34 D 4-5 3lü karşılaştırılmasında yanal deplasman

15 nolu numune sırası ile 4.-5. katman arasında $a/L= 0,7$, 5.-6. katman arasında $a/L= 0,5$, 6.-7. katman arasında ise $a/L= 0,3$ boyutlarında delaminasyon içermektedir. 20 nolu numune ise 15 nolu numulardan tam ters olarak $a/L= 0,3$ dan $a/L= 0,7$ alttan üste doğru sıralanması ile oluşturulmuştur. 15 nolu numunenin yanal delaminasyonu $0,366\text{mm}$, 20 nolu numunenini ise $0,263\text{mm}$ olarak bulunmuştur. Delaminasyonların büyükten küçüğe doğru tabakalar arasında delaminasyonların sıralanışının, küçükten büyüğe doğru sıralamalarının yer değiştirmesinin sonucu olarak yanal deplasmanlar azalmıştır.



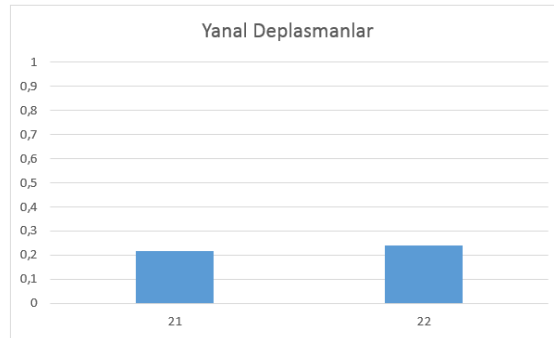
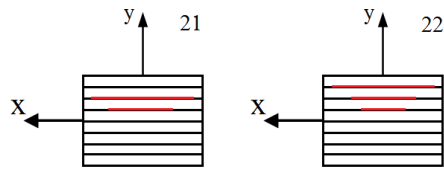
şekil 7.35 D 5-6 3lü karşılaştırılmasında yanal deplasman

17 nolu numune 5.-6. katman arasında $a/L= 0,7$, 6.-7. katman arasında $a/L= 0,5$, 7.-8. katman arasında ise $a/L= 0,3$ boyutlarında delaminasyon içermektedir. 22 nolu numune ise 17 nolu numulardan tam ters olarak $a/L= 0,3$ dan $a/L= 0,7$ alttan üste doğru sıralanması ile oluşturulmuştur. 17 nolu numunenin yanal delaminasyonu $0,3874\text{mm}$, 22 nolu numunenini ise $0,24\text{mm}$ olarak bulunmuştur. Delaminasyonların sıralanışının yer değiştirmesi sonucu yanal deplasmanlar azalmıştır.



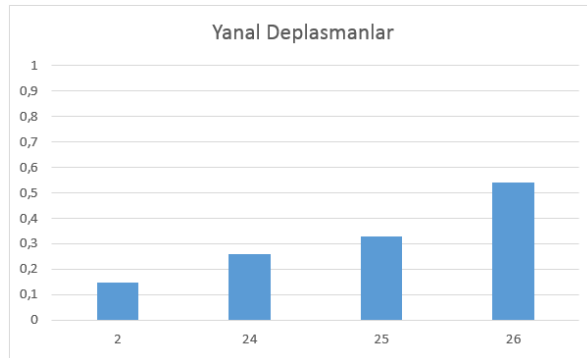
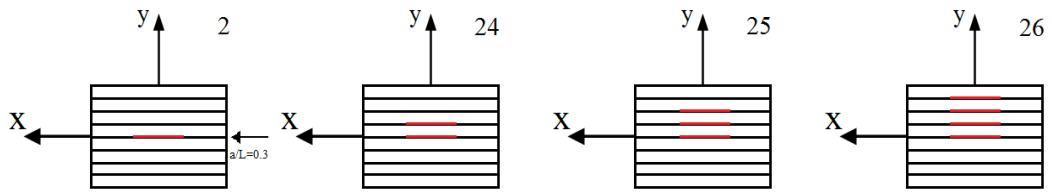
Şekil 7.36 D 4-5 2,3 delaminasyon kuculmesinde yanıl deplasman

19 numaralı numune 4.-5. tabakalar arasında $a/L=0,5$ ve 5.-6 tabakalar arasında $a/L=0,7$ olan iki delaminasyonlu numuneye ait sonuçları ifade etmektedir. Benzer şekilde 20 numaralı numune de 4.-5. tabakalar arasında $a/L=0,3$, 5.-6. tabakalar arasında $a/L=0,5$ ve 6.-7. tabakalar arasında $a/L=0,7$ olan üç delaminasyonlu numuneye ait sonuçları göstermektedir. 19 nolu numunenin yanıl delaminasyonu 0,236mm, 20 nolu numunenin ise 0,263mm olarak bulunmuştur. Delaminasyonların sıralanışının yer değiştirmesi sonucu yanıl deplasmanlar artmıştır.



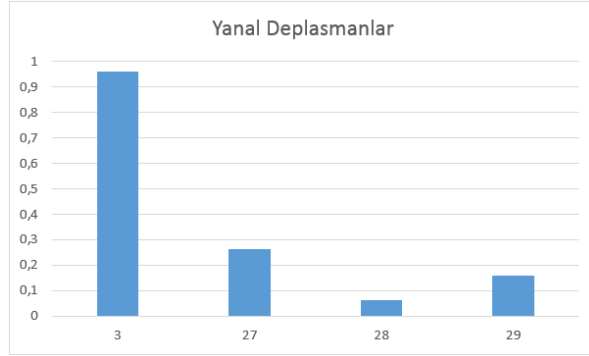
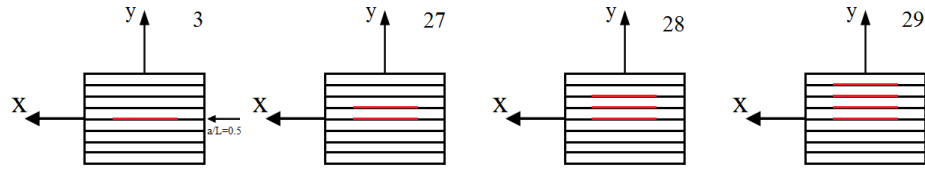
Şekil 7.37 D 5-6 2,3 delaminasyon kuculmesinde yanıl deplasman

21 numaralı numune 5.-6. tabakalar arasında $a/L=0,5$ ve 6.-7. tabakalar arasında $a/L=0,7$ olan iki delaminasyonlu numuneye ait sonuçları ifade etmektedir. Benzer şekilde 22 numaralı numune de 5.-6. tabakalar arasında $a/L=0,3$, 6.-7. tabakalar arasında $a/L=0,5$ ve 7.-8. tabakalar arasında $a/L=0,7$ olan üç delaminasyonlu numuneye ait sonuçları göstermektedir. 21 nolu numunenin yanal deplasmanı 0,2152mm, 22 nolu numunenin ise 0,24mm olarak bulunmuştur. Delaminasyonların durumunun küçükten büyüğe doğru sıralandığı durumda delaminasyon sayısının artması ile yanal deplasmanda artmıştır.



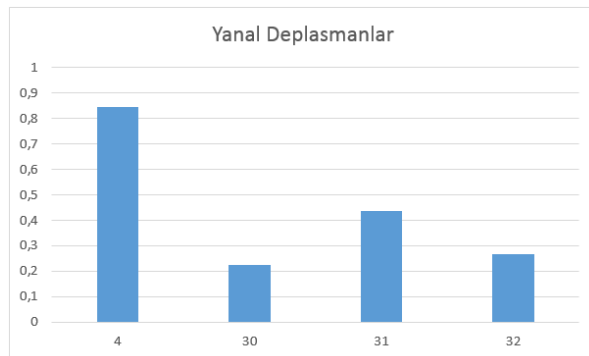
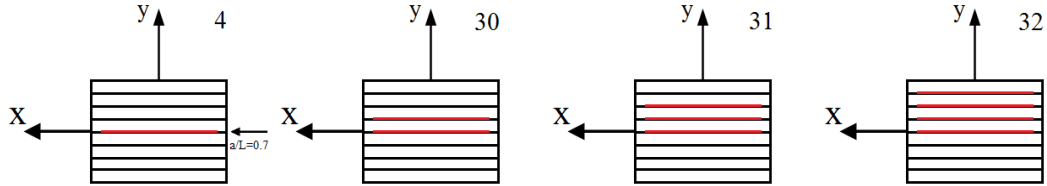
Şekil 7.38 0,3 delaminasyon sayı artısında yanal deplasman

$a/L= 0,3$ delaminasyon boyutuna sahip 4.-5. tabakadan başlayarak tek delaminasyondan 4 delaminasyona kadar olan numuneleri ifade etmektedir. 2 nolu numunenin yanal deplasmanı 0,1495mm, 24 nolu numunenin 0,26mm, 25 nolu numunenin 0,327mm, 26 numunenin ise 0,5414mm olarak bulunmuştur. Aynı boyutlu delaminasyona sahip numunelerde delaminasyon sayısının artması sonucu yanal deplasmanlarda artmıştır.



Şekil 7.39 0,5 delaminasyon sayı artısında yanıl deplasman

$a/L= 0,5$ delaminasyon boyutuna sahip 4.-5. tabakadan başlayarak tek delaminasyondan 4 delaminasyona kadar olan numuneleri belirtmektedir. 3 nolu numunenin yanıl deplasmanı 0,96mm, 27 nolu numunenin 0,264mm, 28 nolu numunenin 0,0615mm, 29 numunenin ise 0,1584mm olarak bulunmuştur.



Şekil 7.40 0,7 delaminasyon sayı artısında yanıl deplasman

$a/L = 0,7$ delaminasyon boyutuna sahip 4.-5. tabakadan başlayarak tek delaminasyondan 4 delaminasyona kadar olan numuneler karşılaştırılmıştır. 4 nolu numunenin yanal deplasmanı 0,847mm, 30 nolu numunenin 0,2265mm, 31 nolu numunenin 0,4374mm, 32 numunenin ise 0,267mm olarak bulunmuştur.

BÖLÜM SEKİZ

SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında tabakalar arası süreksizliğe (delaminasyona) sahip kompozit malzemelerin kritik burkulma yükü (P_{kr}) davranışına delaminasyonların büyüklüğünün, konumunun ve sayılarının etkileri incelenmiştir.

Kritik burkulma yükü-deplasman sonuçlarına göre;

1. Delaminasyon sayısının artmasının, malzemenin burkulma yüklerine karşı dayanımını azalttığı ve bu azalmanın büyük delaminasyonlar için daha önemli düzeyler çıktığı tespit edilmiştir.
2. Aynı boyutlu delaminasyonların farklı tabakalar arasında bulunması, orta ara yüzeyden üst ara yüzeye doğru yaklaştıkça, burkulma yükünün azalmasına sebep olduğu gözlemlenmiştir. Buna karşın, en üst ara yüzeyler arasında delaminasyon bulunması durumunda kritik burkulma yükünün, delaminasyonun orta ara yüzeyler arasında bulunduğu durumdaki davranışına yakın bir değer aldığı gözlemlenmiştir.
3. İncelenen numunelerde, delaminasyon sayısının tek delaminasyondan iki delaminasyona çıkmasıyla kritik burkulma yükünün azaldığı, ancak iki delaminasyondan sonra (üç delaminasyon) burkulma davranışının tek delaminasyonlu numunelerin davranışına yakın olduğu tespit edilmiştir.
4. İki delaminasyona sahip numunelerin boyutsal olarak büyük ve küçük delaminasyonların yer değiştirmesi sonucu yani büyük boyutlu delaminasyonun üst ara yüzey tarafında olduğu durumlarda kritik burkulma yükü artış göstermiştir. Aynı şekilde delaminasyon sayısının üç olduğunda delaminasyon sıralamasının orta ara yüzeyden üst ara düzeye doğru büyükten küçüğe olan sıralamasının küçükten büyüğe doğru değişmesi kritik burkulma yükünde azalmaya neden olmuştur.
5. Delaminasyon sıralamasının küçükten büyüğe doğru olduğu durumlarda, delaminasyon sayısının ikiden üçe artması sonucu kritik burkulma yükünde düşüş gözlenmiştir.

6. Delaminasyon boyutunun aynı olduğu ve sadece sayısının arttığı durumlarda kritik burkulma yükünde azalmaya neden olurken, delaminasyon boyutunun 0,7 olduğunda üç delaminasyondan dört delaminasyona geçişinde kritik burkulma yükünde artışa neden olmuştur.

Kritik burkulma yükü-yanal deplasman sonuçlarına göre;

1. Delaminasyon sayısının 1 olduğu ve sadece tabakalar arası yeri değiştiği durumda $a/L=0,3$ ve $0,5$ olduğu durumlarda delaminasyonun orta ara yüzeyden üst ara yüzeye doğru gittikçe yanal deplasman artmaktadır. Delaminasyon boyutu $0,7$ olduğunda ise yanal deplasman azalmıştır.
2. Delaminasyon sayısının 1 olduğu ve aynı tabakalar arasında bulunduğu durumlarda ise delaminasyon boyutunun büyümesi, 4.-5. ve 5.-6. tabakalar arasında yanal deplasmanlarda artış eğilimi görülmektedir. Delaminasyonların 6.-7. Ve 7.-8. tabakalar arasında olduğu durumlarda ise yanal deplasmanlar azalmaktadır.
3. Delaminasyonların 4.-5. tabaka arasından başladığı ve sayısının ikiden üçe çıktığı durumda yanal deplasmanlar azalmaktadır. Eğer delaminasyonlar 5.-6. tabaka arasından başlıyor ise yanal deplasman artış göstermektedir.
4. Delaminasyonların orta ara yüzeyden başlayarak üst ara yüzeye doğru sıralandığı ve yer değiştirdiği durumda delaminasyon sayısının 2 olduğu ve büyük boyutlu delaminasyon ile küçük boyutlu delaminasyonun yer değiştirmesi ile yanal deplasmanlar azalış göstermektedir. Aynı şekilde delaminasyon sayısının 3 olduğu durumlarda büyükten küçüğe doğru olan delaminasyon yerleşiminin küçükten büyüğe doğru değişmesi ve delaminasyon başlangıç yerlerinin orta ara yüzeyden üst ara yüzeye doğru değişmesi sonucu yanal deplasmanlar azalmıştır.
5. Delaminasyonların orta ara yüzeyden başlayarak küçükten büyüğe doğru sıralandığı durumlarda delaminasyon sayısının ikiden üçe çıkması sonucu yanal deplasmanlarda artış olmaktadır.
6. Delaminasyon boyutlarının sabit olduğu ve orta ara yüzeyden başlayarak üst ara yüzeye doğru bir delaminasyondan dört delaminasyona kadar arttığı

durumlarda delaminasyon boyutu 0,3 iken yanal deplasmanlar artarken delaminasyon boyutların 0,5 ve 0,7 olduğu durumlarda ise yanal deplasmanlarda azalma olmaktadır.

KAYNAKLAR

- Alnak, Y., (2007). *Fiber takviyeli kompozit malzemelerde interlaminar kayma gerilmelerinin nümerik analizi ve dört noktadan eğme testi ile interlaminar kayma mukavemetinin belirlenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas.
- Arıcan, M. L., (2003). *Uçak sanayiinde kullanılan kompozit malzemeler*. Bitirme Projesi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli.
- Arman, Y., (2003). *Determination of critical delamination diameter of laminated composite plates under buckling loads*. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Aslan, Z. ve Şahin, M., (2009). Buckling behavior and compressive failure of composite laminates containing multiple large delaminations. *Composite Structures*, 89: 382-390.
- Arıcasoy, O., (2006). *Kompozit sektör raporu*. 01 Ocak 2015, <http://www.ito.org.tr/Dokuman/Sektor/1-57.pdf>.
- Baba, A., (2013). *Delaminasyonlu tabakalı kompozit plakaların burkulma analizi*. Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Balcıoğlu, H. E., (2012). *Lateral buckling of laminated composites with delamination*. Yüksek Lisans Tezi, Uşak Üniversitesi, Uşak.
- Cappello, F. ve Tumino, D., (2006). Numerical analysis of composite plates with multiple delaminations subjected to uniaxial buckling load. *Composites Science and Technology*, 66: 264-72.
- Daraacık, F., (2011). *Delaminasyon hasarının tabakalı kompozit malzemelerin mekanik davranışına etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas.

Hyo-Jin, K. ve Chang-Sun, H., (1997). Buckling and post buckling behavior of composite laminates with a delamination. *Composites Science and Technology*, 57: 557-564.

Hwang, S. ve Liu, G., (2001). Buckling behavior of composite laminates with multiple delaminations under uniaxial compression. *Composite Structures*, 53: 235-243.

Jones, R. M., (1998). *Mechanics of composite materials*. Tokyo, McGraw-Hill.

Karasu, H., (2014). *Kompozit disk yayların tasarımı ve analizi*. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.

Sezer, İ., (2011). *Determination of mode 2 delamination resistance of carbon-epoxy laminated composites*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Şahin, M., (2008). *Burkulmaya maruz tabakalı kompozit plakaların deneysel ve nümerik analizi*. Yüksek Lisans Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas.

Tanır, O., (1997). *Termoplastik kompozitlerin imali ve mekanik özelliklerinin bulunması*. Bitirme Projesi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.

Zhou, G., (1997). Compressive Behaviour of Large Undamaged and Damaged Thick Laminated Panels. *Composite Structures*, 38, 589-597.

Araldite LY 564. (b.t). 01 Ocak 2015
<http://www.silmid.com/getattachment/821df273-767c-4f98-a599-e4741794510c/Araldite-LY-564.aspx>