

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PULTRUZYON METODU İLE ÜRETİLEN LİFLİ POLİMER
PROFİLLER İÇİN YARI RİJİT BİRLEŞİMLER**

YÜKSEK LİSANS

İnşaat Müh. Umut AKINCI

**Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği
Danışman: Doç. Dr. Şevket Özden**

KOCAELİ, 2010

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PULTRUZYON METODU İLE ÜRETİLEN LİFLİ POLİMER PROFİLLER
İÇİN YARI RİJİT BİRLEŞİMLER**

YÜKSEK LİSANS

İnşaat Müh. Umut AKINCI

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 28 Aralık 2009
Tezin Savunulduğu Tarih: 18.Şubat.2010**



**Tez Danışmanı
Doç. Dr.
Şevket ÖZDEN**



**Üye
Prof. Dr.
Sinan ALTIN**



**Üye
Yrd. Doç. Dr.
Fuad OKAY**

KOCAELİ, 2010

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Pultruzyon yöntemi ile üretilen yapısal polimer profiller 1950’li yıllardan buyana var olsalar da betonarme ve çelik gibi geleneksel yapı malzemeleri ile karşılaştırıldığında oldukça yenidirler ve günümüzde kullanım alanları oldukça kısıtlıdır. Ancak gelişime son derece açık olan yapıları sayesinde teknolojinin ilerlemesi ve modern yapı gereksinimlerinin değişmesiyle bu malzemelere olan ilgi giderek artmaktadır.

Bu konuyu seçmem için bana kılavuzluk eden ve her konuda yardımını esirgemeyen tez danışmanım Doç. Dr. Şevket Özden’e, gösterdikleri sabır ve iyi niyetlerinden dolayı anneme, babama ve eşime sonsuz minnet duygularımı sunarım. Ayrıca verdikleri destekten ötürü Fibrotek’ten Ömer Beye ve Armaplast’tan Bülent Beye teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ	iv
TABLolar DİZİNİ	viii
SİMGELER.....	x
ÖZET.....	xii
İNGİLİZCE ÖZET.....	xiii
1. GİRİŞ	1
2. UYGULAMALAR	2
3. BİLEŞENLER.....	12
3.1 Donatı lifleri	13
3.1.1 Cam lifleri	18
3.1.2 Karbon lifleri	22
3.1.3 Aramid lifleri	26
3.1.4 Uzatılmış zincirli polietilen lifler.....	29
3.1.5 Doğal lifler	29
3.1.6 Boron lifleri	30
3.1.7 Seramik lifleri	31
3.2 Polimer Reçineler	33
3.2.1 Doymamış poliester reçine	41
3.2.2 Epoksi reçineleri	43
3.2.3 Vinilester reçineleri	45
3.2.4 Fenolik Reçineler	46
3.2.5 Poliüretan reçineler	47
3.2.6 Diğer polimer reçineler	47
4. PULTRUZYON YÖNTEMİ	49
4.1 Pultruzyon için Lif Sistemi	52
4.2 Cam Lifinden Fitiller	54
4.3 Cam Lifinden Keçeler	56
4.4 Cam Lifinden Kumaşlar	57
4.5 Karbon Lifli Halatlar	59
4.6 Karbon Lifli Kumaşlar	60
4.7 Hibrit Kumaşlar	61
4.8 Yüzey Maskeleri	61
4.9 Pultruzyon için Reçine Sistemi	61
4.10 Polimerizasyon Ajanları	62
4.11 Dolgular	63
4.12 Katkılar	64
5. LİFLİ POLİMER KOMPOZİTLERİN ÖZELLİKLERİ.....	65
5.1 Özelliklerin Deneyler ile Belirlenmesi.....	66
5.1.1 Lif seviyesi.....	66
5.1.2 Lamina seviyesi	67

5.1.3 Laminant seviyesi.....	69
5.1.4 Tam-kesit seviyesi	69
5.2 Lifli Polimer Pultruzyon Profillerin Özellikleri.....	73
6. LİFLİ POLİMER PULTRUZYON PROFİLLER İÇİN YARI-RİJİT BİRLEŞİMLER.....	76
6.1 Eksenel Basit Birleşimler.....	76
6.2 Moment Aktaran Yarı-rijit Birleşimler	84
6.2.1 Turvey'in yarı-rijit birleşim performans analizleri	85
6.2.2 Turvey'in yarı-rijit birleşim deneyleri	88
6.2.3 Mottram'ın gövde klipsli yarı-rijit birleşim deneyleri	94
6.2.4 Mottram'ın flanş klipsli yarı-rijit birleşim deneyleri	106
6.2.5 Smith'in kutu kesitler için yarı-rijit birleşim deneyleri	113
6.2.6 Nagaraj'ın yorulma deneyleri	123
6.2.7 Sarıbyık'ın kelepçe deneyi	126
6.2.8 Singamsethi'nin kelepçe birleşimi.....	134
7. TEORİK ANALİZLER.....	135
7.1 Turvey'in Üç Nokta Kiriş Eğilme Deneyleri.....	144
7.2 Örnek Çerçeve.....	146
8. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	158
9. KAYNAKLAR	160
10. ÖZGEÇMİŞ	162

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1: İnşaat halinde bir lifli polimer beşik çerçeve yapı.....	2
Şekil 2.2: Lifli polimer soğutma kulesi.....	3
Şekil 2.3: İnşaat halinde çubuk çerçeve soğutma kulesi.....	3
Şekil 2.4: Eyecatcher binası.....	4
Şekil 2.5: Hafif-makas yaya köprüsü pultrüzyon yapısı.....	5
Şekil 2.6: Kolding, Danimarka'daki Fiberline yaya köprüsü.....	6
Şekil 2.7: Daniel Boon National Forest yaya köprüsü.....	6
Şekil 2.8: Dickey Creek köprüsündeki çift gövdeli lifli polimer kirişleri.....	7
Şekil 2.9: İsviçre'deki Storchen köprüsünde kullanılan karbon lifli kablolar.....	8
Şekil 2.10: Aerial Tren İstasyonu çatısı.....	9
Şekil 2.11: İskoçya Darvel'deki su deposu çatısının makasları.....	10
Şekil 2.12: İskoçya Darvel'deki çatı makaslarının bulonlu birleşim detayı.....	10
Şekil 2.13: Fort Story'deki merdiven kulesi yapısı.....	11
Şekil 3.1: Burulmamış lif yığını.....	14
Şekil 3.2: Burulmuş lif yığını.....	14
Şekil 3.3: Bireysel lif deneyi için askı halkası.....	15
Şekil 3.4: Farklı donatı lifleri için stres-deformasyon diyagramları.....	16
Şekil 3.5: (a) Modmor I karbon lifleri ve (b) GY-70 karbon lifleri için histogramlar.....	17
Şekil 3.6: 3000 bireysel lifli burulmamış E-cam lif yığınının çekme stres-deformasyon eğrisi.....	18
Şekil 3.7: Cam liflerin genel formları.....	21
Şekil 3.8: Zamanın bir fonksiyonu olarak farklı sıcaklıklar altında E-cam liflerin çekme dayanım azalması.....	22
Şekil 3.9: Karbon liflerinin elastisite modülü ve çekme dayanımlarının üretim ısılarına bağlı değişimi.....	24
Şekil 3.10: Grafit kristalindeki karbon atomlarının dizilişi.....	25
Şekil 3.11: Lif eksenine ters yönde grafit kristallerinin dizilimi (a) dairesel, (b) radyal, (c) gelişigüzel, (d) radyal-dairesel ve (e) gelişigüzel-dairesel.....	26
Şekil 3.12: Kevlar 49 lifinin moleküler yapısı.....	27
Şekil 3.13: Polimer moleküllerindeki tekrarlanan ünitelere örnekler. (a) Bir polipropilen molekülü (b) Bir naylon 6,6 molekülü.....	34
Şekil 3.14: Polimerlerdeki molekül düzeni (a) amorf polimerler ve (b) yarı-kristalit polimerler.....	34
Şekil 3.15: Şematik gösterim (a) termoplastik polimer ve (b) termoset polimer.....	37
Şekil 3.16: Üç farklı tipteki polimer için çekme modülünün sıcaklıkla değişimi (a) amorf termoplastik, (b) yarı-kristalit termoplastik ve (b) termoset.....	37
Şekil 3.17: Yükleme oranı ve sıcaklığın katı polimerlerin stres-deformasyon davranışına etkileri.....	38
Şekil 3.18: Katı polimerlerin (a) sünme ve (b) stres-gevşeme davranışları.....	39

Şekil 3.19: Termoset polimeri epoksi ile termoplastik polimeri polisülfonun çekme stres-deformasyon diyagramları.....	40
Şekil 4.1: Pultruzyon metodu ile üretilmiş lifli polimer profiller.....	50
Şekil 4.2: Pultruzyon hattı.....	51
Şekil 4.3: Pultruzyon kutu profil, keçe ve fitil katmanları.....	53
Şekil 4.4: 113 randıman cam fitil.....	55
Şekil 4.5: Çift gövdeli hibrit lifli pultruzyon kesit.....	58
Şekil 4.6: Cam fitilli örgü-keçe kombine kumaş.....	58
Şekil 4.7: Dikişli cam lifli kumaş.....	59
Şekil 4.8: Karbon lifli halat makarası.....	60
Şekil 4.9: Pultruzyon yöntemi ile üretilmiş lifli polimer profilin kesiti.....	62
Şekil 6.1: Tipik bindirmeli bulonlu aksel birleşim.....	76
Şekil 6.2: Basit birleşim tipleri.....	77
Şekil 6.3: Point Bonita köprüsündeki birleşim detayları.....	78
Şekil 6.4: Fiberline köprüsündeki birleşim detayları.....	78
Şekil 6.5: Tek bulonlu aksel bindirme birleşimlerin düzlem içi göçme tipleri.....	81
Şekil 6.6: Tek ve çok bulonlu bindirme mesnetler için geometrik parametreler.....	82
Şekil 6.7: Bazı geleneksel yarı-rijit çelik birleşimlerin moment-eğrilik ilişkileri.....	85
Şekil 6.8: 102mm ve 203mm derinlikli yarı-rijit birleşimlerin detayları.....	87
Şekil 6.9: Deney düzeneğinin şematik gösterimi.....	88
Şekil 6.10: Klipsli yarı-rijit birleşim detayları.....	89
Şekil 6.11: UC yarı-rijit birleşim detayları.....	90
Şekil 6.12: Deney düzeneği.....	94
Şekil 6.13: Birleşim detayları.....	95
Şekil 6.14: W_{mj_bt} 'nin moment-eğrilik diyagramı.....	96
Şekil 6.15: W_{mj_bt2} 'nin moment-eğrilik diyagramı.....	96
Şekil 6.16: W_{mj_bt+bd} 'nin moment-eğrilik diyagramı.....	97
Şekil 6.17: W_{mj_bd} 'nin moment-eğrilik diyagramı.....	97
Şekil 6.18: W_{mn_bt} 'nin moment-eğrilik diyagramı.....	98
Şekil 6.19: Deney düzeneği.....	99
Şekil 6.20: Şematik olarak deney düzeneği.....	99
Şekil 6.21: Ana aks birleşim detayı.....	100
Şekil 6.22: İkincil aks birleşim detayı.....	100
Şekil 6.23: W_{mj10_bt} 'nin moment-eğrilik ilişkisi.....	101
Şekil 6.24: W_{mj10_bt+bd} 'nin moment-eğrilik ilişkisi.....	102
Şekil 6.25: W_{mn10_bt} 'nin moment-eğrilik ilişkisi.....	102
Şekil 6.26: W_{mj10_bt} 'nin modifiye edilmiş moment-eğrilik ilişkisi (sıyrılmasız)..	103
Şekil 6.27: W_{mn10_bt} 'nin modifiye edilmiş moment-eğrilik ilişkisi (sıyrılmasız)..	103
Şekil 6.28: 254mm derinlikli yarı-rijit birleşimlerin yumuşatılmış moment-dönme diyagramları.....	104
Şekil 6.29: Birleşim W_{mj10_bl+bd} 'in göçmesi (ayrılma etkisi).....	105
Şekil 6.30: Deney düzeneği.....	106
Şekil 6.31: Çelik klipsli yarı-rijit birleşimlerin detayları.....	107
Şekil 6.32: Prefabrik kompozit klipsli yarı-rijit birleşimlerin detayları.....	108
Şekil 6.33: Çelik klipsli birleşimlerin moment-eğrilik ilişkileri.....	110
Şekil 6.34: Prefabrik kompozit klipsli T_{mj} birleşim için moment-eğrilik ilişkisi....	110
Şekil 6.35: Prefabrik kompozit klipsli TL_{mj} birleşim için moment-eğrilik ilişkisi..	111
Şekil 6.36: TL_{mj} 'nin yivli pultruzyon çubuğun yiv sıyırması sonucu göçmesi.....	112
Şekil 6.37: ST_{mn} 'nin flanş üzerindeki bulon delikleri yırtılması sonucu göçmesi..	112

Şekil 6.38: Kesit ölçüleri.....	113
Şekil 6.39: Deney düzeneği.....	114
Şekil 6.40: Standart I profil yarı-rijit birleşim detayı.....	115
Şekil 6.41: Boyunca bulonlu I profil birleşim detayı.....	115
Şekil 6.42: C2 numunesinin birleşim detayı.....	116
Şekil 6.43: D numunesinin birleşim detayı.....	116
Şekil 6.44: Mosallam'ın UC birleşimi.....	117
Şekil 6.45: (a) Geleneksel gövde-flanş klipsli, (b) Kolon flanş destekli, (c) Guse plakalı klipsli, (d) Sargılı klipsli.....	118
Şekil 6.46: Gövde-flanş birleşim göçmesi.....	119
Şekil 6.47: İdeal kelepçe birleşim elemanı.....	120
Şekil 6.48: Guseli kutu kesit birleşim konfigürasyonu.....	121
Şekil 6.49: Kutu kelepçe birleşim konfigürasyonu.....	121
Şekil 6.50: Kutu çelik birleşim konfigürasyonu.....	122
Şekil 6.51: Deney düzeneği.....	124
Şekil 6.52: Bulon sıklığına bağlı birleşim rijitliği.....	125
Şekil 6.53: Kutu kesitlerde bulonlarla birlikte yapışkanın etkisi.....	125
Şekil 6.54: Geniş flanşlı kesitlerde bulonlarla birlikte yapışkanın etkisi.....	126
Şekil 6.55: Kelepçe birleşimin detayları, iç panel kesik çizgilerle gösterilmiştir.....	127
Şekil 6.56: Deney düzeneği.....	128
Şekil 6.57: Kesme numunelerinin (a)yatay (b)düşey panelli (c) tekrarlanır yük-deformasyon eğrileri.....	129
Şekil 6.58: Yarıлма göçmesi.....	130
Şekil 6.59: Yarıлма-kesme göçmesi.....	130
Şekil 6.60: Kilitli ve yapışkanlı numunelerin yük-deplasman eğrileri.....	131
Şekil 6.61: Sadece iç kilitli numunenin göçme tipi.....	131
Şekil 6.62: Eğilme dominant numunelerin yük-deformasyon eğrileri (a) yatay panel (b) düşey panel (c) tekrarlanır yük.....	132
Şekil 6.63: Eğilme dominant numunenin göçmesi.....	133
Şekil 6.64: (a) Silikon lastik kalıp dökülmeden önce tapaları içinde dış kasa, (b) kürlendikten sonra nihai silikon lastik kalıbın bir yarısı, (c) tapa üstündeki lif sargısı, (d) bitmiş kelepçe birleşim.....	135
Şekil 6.65: (a), (b), (c) birinci katman, (d), (e), (f), (g) ikinci katman ve (h), (i), (j) üçüncü katman.....	137
Şekil 6.66: (a) Numunenin yük çerçevesindeki resmi, (b) deney düzenek ölçüleri.....	138
Şekil 6.67: Numunelerin tipik yük-deformasyon ve moment-dönme eğrileri.....	139
Şekil 6.68: Kelepçe birleşim göçmeleri.....	139
Şekil 7.1: 12.7 ve 6.35mm kalınlıklı profil kuponlarının basınç-deformasyon davranışı.....	142
Şekil 7.2: 12.7 ve 6.35mm kalınlıklı profil kuponlarının çekme-deformasyon davranışı.....	143
Şekil 7.3: Birleşim detayları.....	145
Şekil 7.4: Örnek çerçeve ve uygulanan yükler.....	147
Şekil 7.5: EXTREN WF 203.2 profilleri için bazı yarı-rijit birleşim konfigürasyonlarının moment-dönme eğrileri.....	149
Şekil 7.6: Gövde klipsli konfigürasyonu için moment-dönme eğrisi.....	149
Şekil 7.7: Flanş klips konfigürasyonları için moment-dönme eğrileri.....	150

Şekil 7.8: Extren 500 için gerilme-deformasyon ilişkisi.....	151
Şekil 7.9: 5 farklı birleşim tipi için itme analiz sonuçları.....	151
Şekil 7.10: Gövde klipsli ve çelik flanş klipsli yarı-rijit birleşim konfigürasyonları için itme analiz sonuçları.....	152
Şekil 7.11: Prefabrik kompozit ve duble pultruzyon flanş klipsli yarı-rijit birleşim konfigürasyonları için itme analiz sonuçları.....	153
Şekil 7.12: Mükemmel rijit birleşim konfigürasyonu için itme analiz sonucu.....	154
Şekil 7.13: Azaltılmış ölü yükler altında itme analiz sonuç eğrileri.....	156
Şekil 7.14: 10cm derinlikli kutu çaprazlar eklenmiş çerçeve.....	157

TABLolar DİZİNİ

Tablo 3.1: Bazı donatı liflerinin basınç dayanımları.....	18
Tablo 3.2: Cam liflerinin tipik bileşenleri (ağırlıkça %)......	19
Tablo 3.3: Genel cam lifi sınıflarının yaklaşık özellikleri.....	22
Tablo 3.4: Genel karbon lifi sınıflarının yaklaşık özellikleri.....	23
Tablo 3.5: Bazı doğal liflerin özellikleri.....	30
Tablo 3.6: Bazı ticari donatı liflerinin özellikleri.....	32
Tablo 3.7: Bazı polimer reçineleri için maksimum servis sıcaklıkları.....	41
Tablo 3.8: Termoset poliester reçinelerin oda sıcaklığındaki bazı özellikleri.....	42
Tablo 3.9: Poliester reçinelerin genel özellikleri.....	43
Tablo 3.10: Epoksi reçinelerin oda sıcaklığındaki bazı özellikleri.....	45
Tablo 3.11: Epoksi reçinelerin genel özellikleri.....	45
Tablo 3.12: Vinilester reçinelerin oda sıcaklığındaki bazı özellikleri.....	46
Tablo 3.13: Vinilester reçinelerin genel özellikleri.....	46
Tablo 3.14: Termoset polimer reçinelerin yaklaşık özellikleri.....	48
Tablo 4.1: Farklı yöntemlerle üretilmiş cam lifli kompozitlerin tipik çekme özellikleri.....	49
Tablo 4.2: Pultruzyon E-cam-poliester tabakaların mekanik özellikleri.....	53
Tablo 4.3: Farklı tipteki liflere sahip epoksi reçineli kompozitlerin tipik mekanik özellikleri.....	54
Tablo 5.1: Lamina ve laminant seviyesindeki lifli polimer kompozitler için tavsiye edilen ASTM deney metotları.....	68
Tablo 5.2: EN 13706’da tanımlanan lifli polimer pultruzyon profillerin özelliklerinin belirlenmesinde kullanılacak deney metotları.....	72
Tablo 5.3: EN 13706 pultruzyon profil isim tanımlamaları için 1. veri bloğu.....	74
Tablo 5.4: EN 13706 pultruzyon profil isim tanımlamaları için 2. veri bloğu.....	74
Tablo 5.5: EN 13706 pultruzyon profil sınıfları için minimum özellikler.....	74
Tablo 5.6: Bazı pultruzyon üreticilerin yapısal profilleri için sağladıkları özellikler ve ilgili deney metotları.....	75
Tablo 6.1: Bindirme mesnet birleşimler için geometrik tavsiyeler.....	82
Tablo 6.2: Çok sıralı bindirme mesnetlerde sıralar arası yük dağılımı.....	84
Tablo 6.3: Yarı-rijit birleşimlerin dönme rijitlik değerleri.....	86
Tablo 6.4: Yarı rijit birleşimlerin deneysel dönme rijitlik değerleri.....	91
Tablo 6.5: 3.4m açıklıklı deneyler için deneysel veriler ve teorik öngörümmler.....	92
Tablo 6.6: 3m açıklıklı deneyler için deneysel veriler ve teorik öngörümmler.....	93
Tablo 6.7: Birleşim varyasyonlarının etiketleri.....	94
Tablo 6.8: Gövde klipsli yarı-rijit birleşimlerin özellikleri.....	95
Tablo 6.9: Birleşim tip etiketleri.....	100
Tablo 6.10: Gövde klipsli yarı-rijit birleşimlerin özellikleri.....	104
Tablo 6.11: Birleşim tiplerinin etiketleri.....	106
Tablo 6.12: Flanş klipsli yarı-rijit birleşimlerin özellikleri.....	109
Tablo 6.13: Yarı-rijit birleşim deneyi sonuçları.....	114
Tablo 6.14: Kutu ve I profil yarı-rijit birleşim deney sonuçları.....	122

Tablo 6.15: Ek yeri birleşimlerinin rijitlikleri.....	126
Tablo 6.16: Deneysel sonuçlar.....	140
Tablo 7.1: Deney kirişinin geometrik, mekanik ve fiziksel özellikleri ile mesnet ve açıklık koşulları.....	144
Tablo 7.2: Deney sonuçlarının teorik analizlerle karşılaştırılması.....	145
Tablo 7.3: Modelleme girdi verileri.....	146
Tablo 7.4: Extren 500 Geniş flanşlı 203.2mm derinlikli kirişler için bazı yarı-rijit birleşim konfigürasyonlarının moment dönme karakteristik değerleri.....	148

SEMBOLLER

A,a	: Kesit Alanı
d	: Çap
E	: Modül
e	: Uç Mesafesi
G	: Düzlem içi Kesme Modülü
g	: Tersine Aralık
I	: Atalet Momenti
L	: Uzunluk
M	: Moment
N	: Normal Stres
p	: Boyuna Aralık
s	: Kenar Mesafesi
T	: Sıcaklık
t	: Kalınlık
w	: Genişlik
σ	: Stres, Dayanım
\emptyset	: Eğrilik

Alt indisler

b	: Bulon
g	: Geçiş
l	: Lif
m	: Erime
p	: Pul
pk	: Plaka
s	: Kesme
t	: Çekme

Kısaltmalar

ACI	: American Concrete Institute
ASTM	: American Society for Testing and Materials
CEN	: European Committee for Standardization
CSA	: Canadian Standards Association
HM	: Yüksek Modül
HS	: Yüksek Dayanım
IM	: Standart Modül
ISO	: International Organization for Standardization
JSCE	: Japan Society for Civil Engineers
RTK	: Reçine Transfer Kalıplama
SMC	: Sheet Molding Compound

UC : Universal Connector
UHM : Ultra Yüksek Modül
VRTK : Vakumlu Reçine Transfer Kalıplama

PULTRUZYON METODU İLE ÜRETİLEN LİFLİ POLİMER PROFİLLER İÇİN YARI RİJİT BİRLEŞİMLER

Umut AKINCI

Anahtar Kelimeler: Pultruzyon, Lifli Polimer

Özet: Bu tezin ana konusu pultruzyon yöntemi ile üretilmiş lifli polimer kompozit profiller için yarı-rijit birleşimlerdir. Yarı-rijit birleşimlerin dışında, polimer profillerin yapısal uygulamaları, bileşenleri, pultruzyon yöntemi, profillerin fiziksel ve mekanik özellikleri ve elde edilmiş yöntemleri de incelenmiştir. Asıl konu yarı-rijit birleşimler olduğu için, pultruzyon eleman birleşimleri üzerine yapılan geçmiş çalışmalar, birleşim geometrileri, detaylı tanımlamalar ve deney sonuçları ile birlikte detaylı olarak incelenmiştir.

SEMI RIGID CONNECTIONS FOR PULTRUDED FIBER REINFORCED POLYMER PROFILES

Umut AKINCI

Keywords: Pultrusion, Fiber Reinforced Polymer

Abstract: This dissertation is focused on semi-rigid connections for pultruded fiber reinforced polymer composite profiles. Apart from semi-rigid connections, structural application of polymer profiles, their components, pultrusion method, the physical and mechanic properties of profiles and their determination methods are also reviewed. As the main concern is semi-rigid connections, the previous research on pultruded member connections, including connection geometries, detailed descriptions and test results have reviewed in detail.

1. GİRİŞ

Pultruzyon yöntemi ile üretilen liflerle güçlendirilmiş polimer profiller yaklaşık 20 yıldır inşaat endüstrisinde çeşitli alanlarda ve çeşitli formlarda kullanılmaktadır. Pultruzyon yöntemi, yapı ve köprülerde geleneksel kolon ve kiriş elemanların yerini alması düşünülerek 1950'li yıllarda Amerika Birleşik Devletlerinde geliştirilmiştir. Bu yöntem profillerin verimliliğini oldukça arttırmıştır.

Yapısal profiller kabaca iki bileşenden oluşur. Bunlar donatı lifleri ve polimer reçinesidir. Endüstride çoğunlukla cam lifli pultruzyon profiller kullanılmaktadır ancak karbon, aramid ve hibrit (karbon-cam) lifli pultruzyon profillere olan ilgi özellikle Japonya'da ve Amerika Birleşik Devletleri'nde artmaktadır.

Lifli polimer pultruzyon profillerin en önemli özellikleri hafiflik, yalıtkanlık, yüksek korozyon direnci ve yüksek dayanımlarıdır. Yapı sektöründe deniz aşırı platformlar ya da kimyasal fabrikalar gibi çok sert ortamlarda servis verecek hafif elemanlara ihtiyaç duyulduğu durumlarda lifli polimer pultruzyon profiller oldukça güçlü adaylardır. Deniz aşırı platformlarda, sanayi tesislerinde lifli polimerlerin yürüyüş yolu ve destek çerçeveleri olarak kullanımları gittikçe artmaktadır.

Ancak hiçbir ülkenin resmi tasarım yönetmeliklerinde yer almayışları, geleneksel yapı malzemelerine oranla yüksek maliyetleri, düşük modülleri dolayısıyla yüksek deformasyon oranları, düşük ısılarda bozunmaya uğramaları, yük-deformasyon karakterlerinin mühendisler tarafından yeterince bilinmemesi ve henüz etkili ve basit bir birleşim sisteminin geliştirilememiş olması lifli polimer pultruzyon profillerin inşaat sanayine girişini yavaşlatan etkenlerden en önemlileridir.

2. UYGULAMALAR

Lifli polimer pultrüzyon profillerle yapılan ilk büyük yapılar bilgisayar ve elektronik endüstrisi için yapılan tek katlı, beşik çerçeve elektromanyetik engelleme test laboratuvarlarıdır (Şekil 2.1). Lifli polimer pultrüzyon profillerin elektromanyetik saydamlığı temel seviyesi üzerinde elektromanyetizmanın istenmediği bu yapılar için çok uygundur. Composites Technology Inc. tarafından 1985 yılında Apple Computer için bir elektromanyetik engelleme test laboratuvarları tasarlanıp inşa edilmiştir. Buna benzer yapılar Strongwell şirketi tarafından yine lifli polimer pultrüzyon profillerle 1980'li yıllarda IBM ve diğer şirketler için Virginia'da inşa edilmiştir.



Şekil 2.1: İnşaat halinde bir lifli polimer beşik çerçeve yapı.

Lifli polimer profiller için ikinci büyük gelişim, hala günümüzde büyük pultrüzyon yapı elemanları için ikinci büyük pazar payını oluşturan soğutma kulesi endüstrisidir (Şekil 2.2). 1980'li yıllarda Composites Technology Inc. tarafından seramik soğutma kuleleri için Unilite sistem adı verilen bir yapı sistemi geliştirilmiştir. Unilite sistem lifli polimer pultrüzyon parçalardan oluşan bir dizi özel şekilli kiriş, kolon ve panelden oluşmaktadır. Bugün birçok pultrüzyon şirketi lifli polimer soğutma kulesi sistemleri için özel parçalar üretmektedir.



Şekil 2.2: Lifli polimer soğutma kulesi.

Özel soğutma kulesi yapılarına ek olarak, lifli polimer pultrüzyon profiller 1980'lerden beri çubuk çerçeve soğutma kulelerinde de kullanılmaktadır (Şekil 2.3). Bu sistemler genellikle 50x50mm ve 75x75mm boru kesitler kullanılarak yapılırlar ve lifli polimer ya da donatısız polimer giydirme sistemi ile kaplanırlar.



Şekil 2.3: İnşaat halinde çubuk çerçeve soğutma kulesi.

1999 yılında İsviçre'nin Basel kentinde Fiberline Composites şirketi tarafından Eyecatcher isimli bir prototip çok katlı yapı inşa edilmiştir (Şekil 2.4). Bu yapının amacı Swissbau Fuarı'nda lifli polimer profillerin potansiyeline dikkat çekmektir.



Şekil 2.4: Eyecatcher binası.

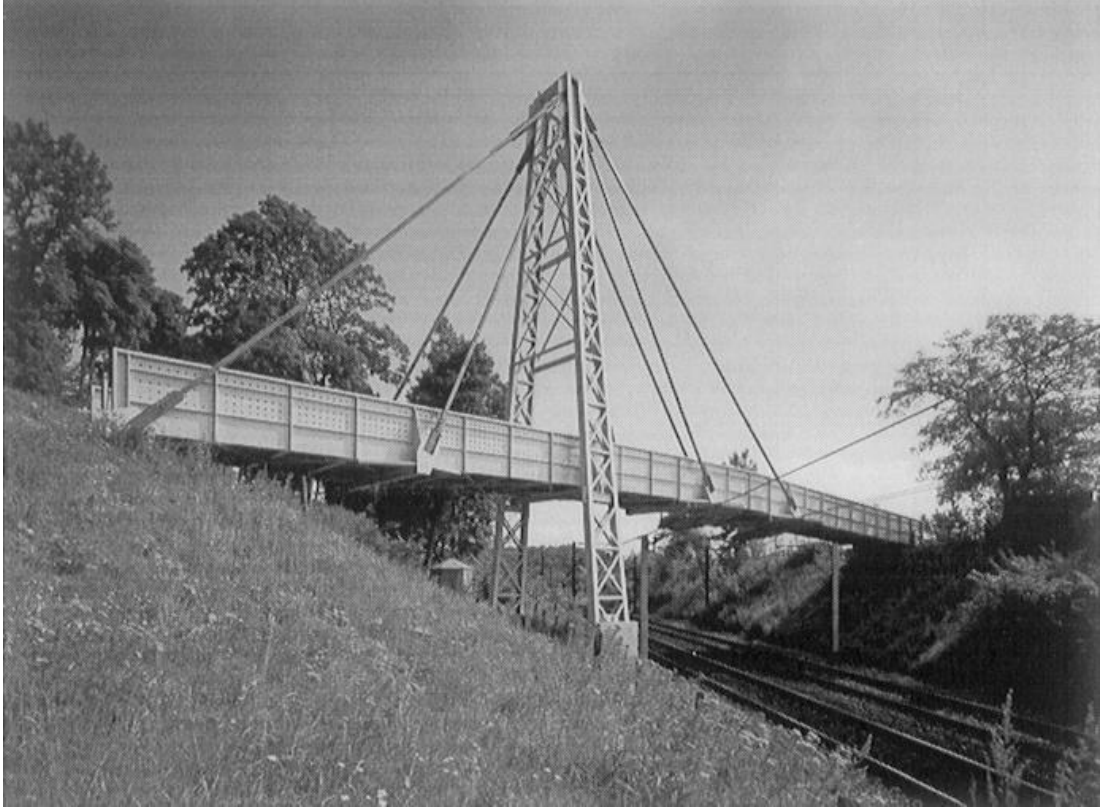
Köprü mühendisliği alanında ise lifli polimer pultrüzyon profillerin kullanımı 1970'lerin ortalarından bu yana uygulamada artış göstermektedir. Lifli polimer pultrüzyon bileşenlerin hafif ve anti korozif özellikleri onların köprü güverte panelleri ve yapı elemanı olarak kullanımlarını çekici kılmaktadır. Dünyanın çeşitli yerlerinde küçük lifli polimer pultrüzyon profiller kullanılarak 9 ila 27m arası açıklıklarda yüzlerce yaya köprüsü tasarlanıp inşa edilmiştir. Şekil 2.5, ET Techtonics şirketi tarafından tasarlanıp inşa edilen yaya köprüsüne aittir (Bank, 2006).



Şekil 2.5: Hafif-makas yaya köprüsü pultruzyon yapısı.

1992'de Aberfeldy İskoçya'da 131m uzunluğunda 63m açıklıklı asma yaya köprüsü gelişmiş kompozit yapı sistemi kullanılarak inşa edilmiştir. Maunsell Yapısal Plastikleri tarafından tasarlanan lifli polimer payanda sisteminde kablolarda parafil adı verilen bir lif kullanılmıştır. Sistem orijinalinde köprülerin altını kapatmak böylece korozyona karşı direnç sağlamak ve köprü denetimini kolaylaştırmak adına geliştirilmiştir. Özel kesitli lifli polimer pultruzyon profillerle yapılan yapıların en meşhurdur.

1997'de Kolding Danimarka'da tren yolu hattının üzerine lifli polimer profiller kullanılarak 38m açıklıklı asma bir yaya köprüsü inşa edilmiştir (Şekil 2.6). Bu yapıda geleneksel bulonlu birleşimler kullanılmıştır ve sadece standart yapısal lifli polimer pultruzyon profiller ile üretilen yapıların en güzel örneklerinden bir tanesidir. Standart lifli polimer pultruzyon profil kesitleri ile üretilen yaya köprülerinin diğer örnekleri Amerika Birleşik Devletleri'nde bulunan 15m açıklıklı Devils Pool ve 24m açıklıklı Olympic National Park köprüleri ile Hawaii'de bulunan 12m ve 24m açıklıklı Haleakala National Park yaya köprüleridir. Diğer iki kayda değer yaya köprüsü ise Amerika Birleşik Devletleri'ndeki Daniel Boon National Forest köprüsü (Şekil 2.7) ve Japonya'da Public Works Research enstitüsünde test edilen 11m açıklıklı asma köprüdür. Bunlardan ilki 610mm derinlikli hibrit (karbon-cam) lifli polimer pultruzyon profiller ile üretilmiştir, ikincisinde ise standart yapısal boru profiller bulonlar ile birleştirilmiştir (Turvey, 2000).

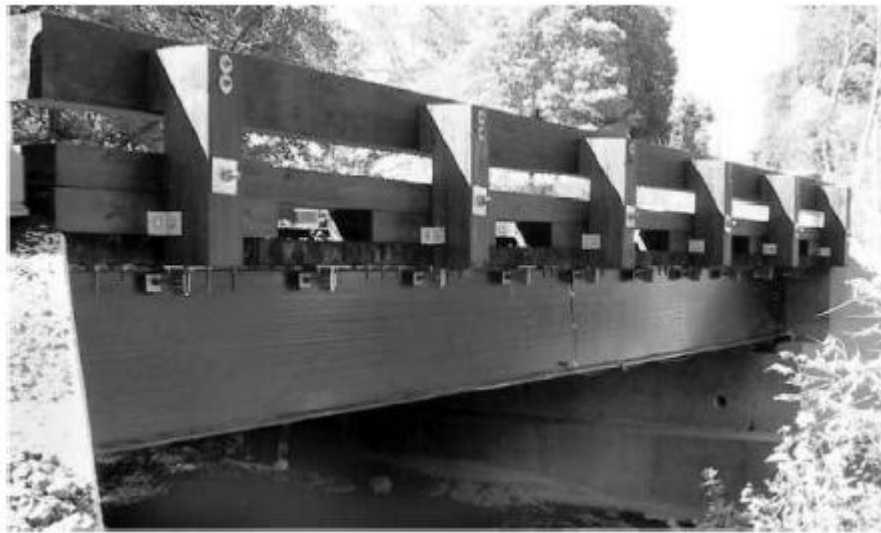


Şekil 2.6: Kolding, Danimarka'daki Fiberline yaya köprüsü.



Şekil 2.7: Daniel Boone National Forest yaya köprüsü.

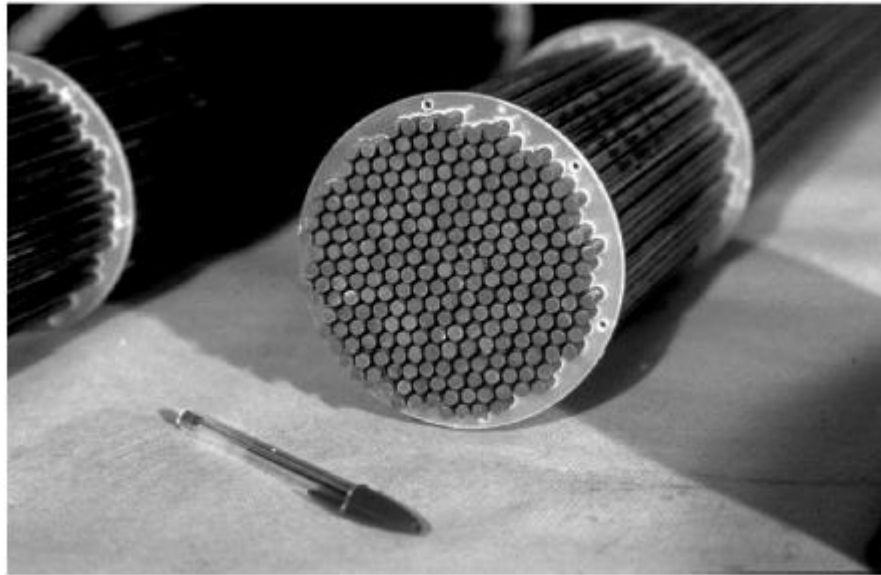
1990'lar da bir grup lifli polimer imalatçısı, geleneksel çelik ya da betonarme kiriş üzerinde kullanılabilecek bir lifli polimer köprü güverte sistemi geliştirmek için bir araya gelmiştir. Zamanla bozulan betonarme köprü güverteleri yerine yüksek korozyon dirençli, yüksek dayanımlı, hafif ve uygulaması kolay lifli polimer köprü güvertesi kullanmak oldukça avantajlı gözükmemektedir. Yapının ölü yükünün azalması ile güvertesi yenilenen köprünün canlı yük taşıma kapasitesi de artmaktadır. Bir lifli polimer köprü güvertesi beton güverteye göre %80 daha hafiftir (Vyas, 2009). Köprü güverte sistemleri Creative Pultrusions, Martin Marietta Composites, Atlantic Research Corp., Hardcore Composites ve diğer şirketler tarafından geliştirilip pazarlanmaktadır. Lifli polimer çerçeve sistemlerde olduğu gibi, prefabrike lifli polimer panellerin birleşimleri ve lifli polimer güverte ile köprü taşıyıcı sistemi arasındaki birleşimler bu teknolojinin realizasyonundaki en büyük zorluktur. Geleneksel betonarme güverteye göre cam lifli polimer güvertenin yüksek maliyeti, ağırlığın büyük önem kazandığı hareketli köprülerin dışında ağırlık ve imalat kolaylığından sağlanan kazancı dengelemekten uzak gözükmemektedir. Lifli polimer güverte sistemleri için onaylanmış bir köprü korkuluğu sistemi de tam olarak çözülebilmemiş değildir. 2001 yılında Strongwell tarafından köprü kirişi olarak kullanılmak amacıyla 915mm yüksekliğinde 457mm genişliğinde çift gövdeli kiriş olarak bilinen cam-karbon lifli polimer pultruzyon profiller üretilmiştir (Şekil 2.8) (Bank, 2006).



Şekil 2.8: Dickey Creek köprüsündeki çift gövdeli lifli polimer kirişleri.

Lifli polimer çubuklar, kulelerde gergi teli ve köprülerde süspansiyon kablosu olarak kullanılmak için üretilmektedir. Lifli polimer çubuklar 1970'lerin ortalarından bu yana Amerika Birleşik Devletlerinde anten kulelerinde gergi teli ve destek kablosu olarak sayısız uygulamada kullanılmıştır.

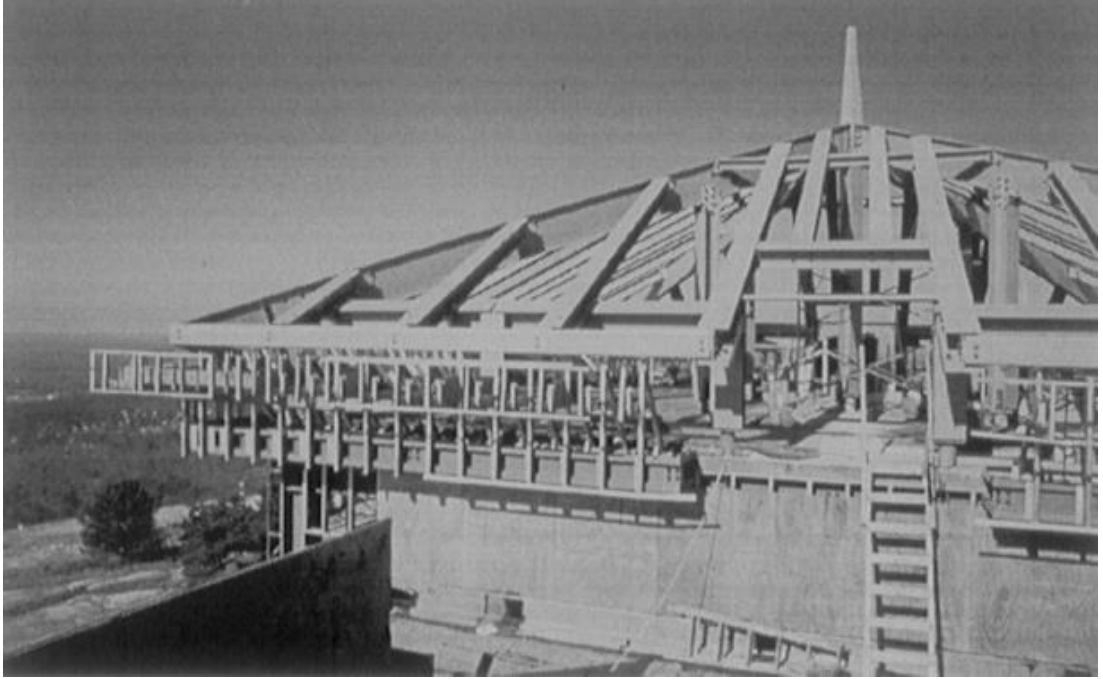
Kablonun kendi ağırlının sınırlayıcı bir faktör haline geldiği çok büyük açıklıklı çelik kablolu asma köprülerde karbon lifli polimer kablolar kullanılması fikri ilk defa 1980'lerin başında Dubendorf, İsviçre'de İsviçre Malzeme Testi ve Araştırma Federal Laboratuvarları'dan Urs Meier tarafından ortaya atılmıştır. 1997'de İsviçre Winterthur'daki Storchen asma köprüsünde 241 adet 5mm çaplı karbon lifli epoksi çubuk kablo kullanılmıştır (Şekil 2.9).



Şekil 2.9: İsviçre'deki Storchen köprüsünde kullanılan karbon lifli kablolar.

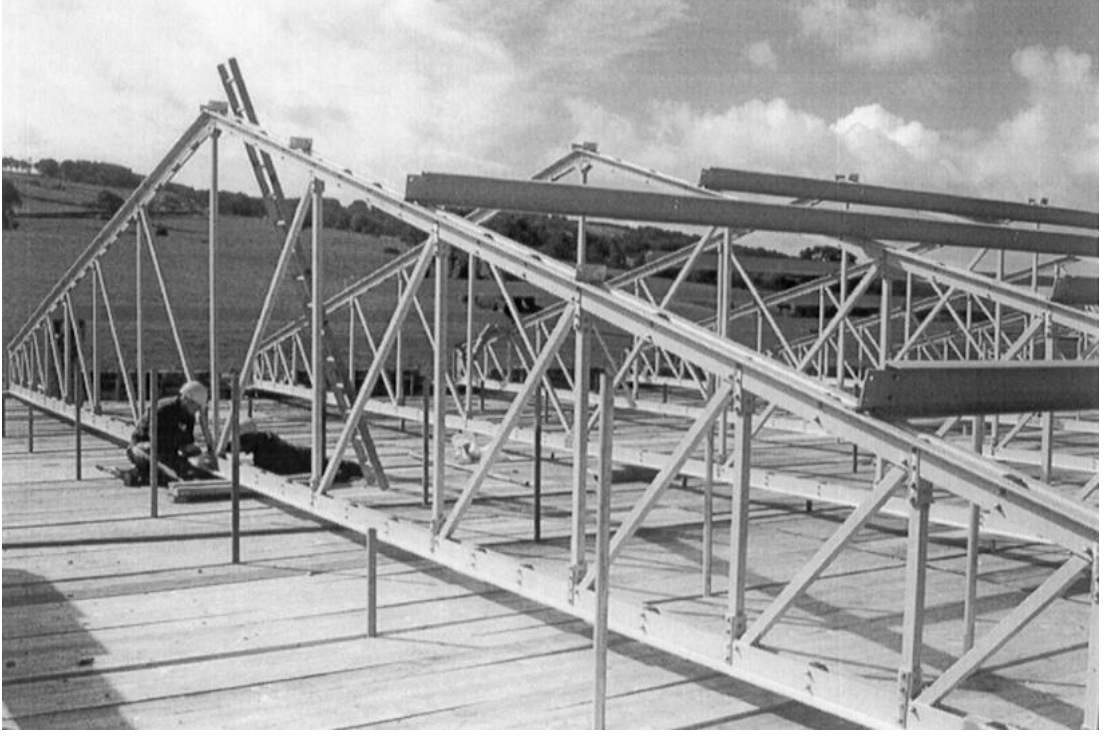
Standart lifli polimer pultrüzyon profillerin çatı ya da bina gibi çerçeve sistemlerde kullanımı kısa açıklıklı köprülere oranla daha düşüktür. Bunun başlıca sebebi birçok kısa açıklıklı köprüde birleşimlerin ikincil öneme sahip olmasıdır. Bu köprüler basitleştirildiklerinde bir dizi basit mesnetli kirişten ibarettirler. Diğer taraftan çerçeve yapılarda neredeyse bütün elemanların uç noktalarında birleşimler vardır. Birleşimlerin davranışı konusundaki mevcut bilgi eksikliği mühendisleri tasarımda tutucu bir yaklaşım benimsemeye itmiş bu da çerçeve yapıların gelişimi yavaşlatmıştır. Lifli polimer pultrüzyon profiller ile yapılan çerçeve yapıların bazıları; Amerika Birleşik Devletleri Atalanta'daki C&S binasının çatısında 11m

uzunluğundaki kule, İtalya Rimini'deki A Casa Mia otelinin çatı terasındaki çerçeve yapı ve yine Amerika Birleşik Devletleri Georgia'daki Aerial Tren İstasyonunun çatısıdır (Şekil 2.10). Bu yapıda standart yapısal lifli polimer pultrüzyon profilleri birleştirmek için bulonlar kullanılmıştır (Turvey, 2000).



Şekil 2.10: Aerial Tren İstasyonu çatısı.

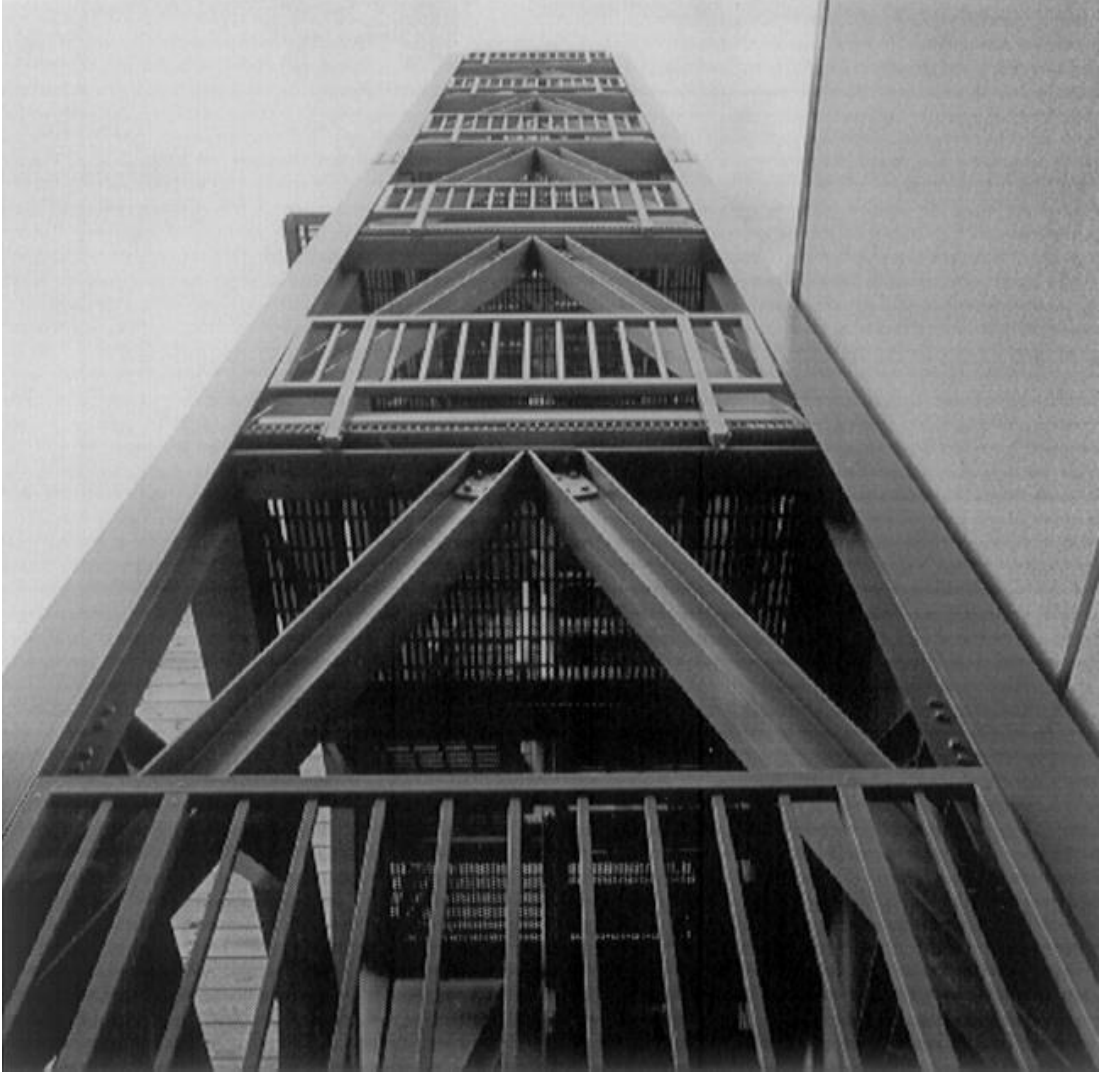
Standart yapısal lifli polimer pultrüzyon profilleri bulonlu birleşimler ile kullanan diğer yapılara örnek olarak Amerika Birleşik Devletlerinde California Hueneme limanındaki kompozit güverte, Minnesota'daki metro atık su arıtma tesisinin boru destek çerçeveleri, Japonya'da Mujakojima ve Matsuame Oshima adalarındaki helikopter pistleri, İskoçya Darvel'de 19m açıklıklı su deposu çatısı (Şekil 2.11 ve 2.12) ve son olarak Amerika Birleşik Devletleri Fort Story'deki paraşüt eğitim tesisinin 19m yükseklikli merdiven kulesi çerçevesi gösterilebilir (Şekil 2.13).



Şekil 2.11: İskoçya Darvel'deki su deposu çatısının makasları.



Şekil 2.12: İskoçya Darvel'deki çatı makaslarının bulonlu birleşim detayı.



Şekil 2.13: Fort Story'deki merdiven kulesi yapısı.

3. BİLEŞENLER

Pultruzyon yöntemi ile üretilen lifli polimer yapısal profiller iki ana bileşenden oluşur. Bunlar profile taşıyıcı özelliklerini kazandıran donatı lifleri ile bu liflerin bir arada durmasını sağlayan dolayısıyla gerilimin bir liften diğerine aktarılmasını sağlayarak sağlam bir yapı oluşturan matris adı da verilen reçine sistemidir. Lifli polimer pultruzyon profiller bu ana bileşenlerden başka yüzey kaplamaları, dolgular, katalizörler, priz hızlandırıcıları, sertleştiriciler, renklendiriciler, ultraviyole stabilizatörleri, tutuşma geciktiricileri vs. gibi birçok bileşen içerebilir. Lifler üzerine uygulanan yüzey kaplamaları imalat sürecinde liflerin reçine emmesini iyileştirdikleri gibi nihai üründe lifler ile reçine arasındaki aderansı dolayısıyla reçine ile lifler arasındaki yük transferini artırır. Bu sebepten kullanılacak reçine sistemine uygun kaplamalı liflerin seçilmesi çok önemlidir. Dolgular ise genellikle maliyeti düşürmek ve profilin boyutsal stabilizesini arttırmak için kullanılırlar (Mallick, 2008).

Pultruzyon yöntemi ile üretilmiş yapısal polimer profiller gibi gelişmiş ya da yüksek performanslı kompozitlerde, yüksek dayanım ve rijitliğe sahip lifler göreceli olarak yüksek oranlarda kullanılırlar. Liflerin yönü yüksek mekanik gerilmelerin güvenli taşınmasını sağlayacak şekilde düzenlenir. Bu malzemelerin asıl avantajları anizotropik yapılarında saklıdır. Bileşendeki donatının gerilim şablonlarını izleyecek şekilde düzenlenebilmesi geleneksel izotropik malzemeler ile ulaşılamayacak bir tasarım ekonomisinin elde edilmesini sağlar. Donatılar sürekli lif, halat ya da kumaş formundaki tipik olarak cam, karbon ya da aramid lifleridir. Korozyon ya da ısı direnci gibi kendine özgü özellikler sunan reçineler geniş bir termoset ya da termoplastik sentetik malzeme spektrumundan seçilebilir. En yaygın kullanılanları poliesterler, epoksiler ve fenolik reçinelerdir. Vinilesterler gibi daha gelişmiş ısı direnç özelliğine sahip tiplerin yüksek performans uygulamalarında ve gelişmiş karbon lifli termoplastik kompozitler olarak kullanımı artmaktadır (Hollaway, 2008).

3.1 Donatı Lifleri

Lifli polimer kompozit malzemenin lif kısmı binlerce adet mikrometre çaplı bireysel iplikten oluşur. Bu ipliklerin uzunlukları belirsizdir ve sürekli lifler olarak adlandırılırlar. Bu özellikleri onları tekne imalatında kullanılan spreyleme sürecindeki ya da cam lifleriyle güçlendirilmiş çimentodaki gibi uzunluğu 10 ila 50mm arasında değişen kısa liflerden ayırır. Sürekli lifler polimer reçinesini güçlendirmek için göreceli olarak yüksek oranda kullanılırlar (%20 ~ 60). Liflerin mekanik özellikleri tipik olarak güçlendirdikleri reçineninkilerden büyüktür, ancak malzemenin doğası gereği tek başlarına yapı malzemesi olarak kullanılamazlar (Bank, 2006).

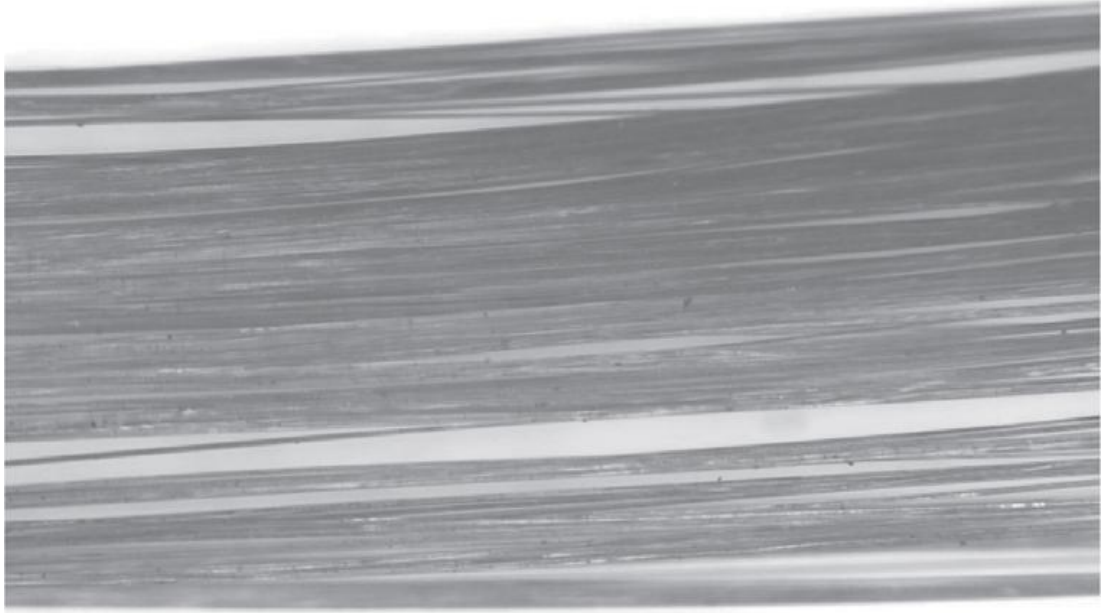
Yapısal lifli polimer pultruzyon profillerde yaygın olarak kullanılan lifler cam, karbon ve aramid lifleridir. Piyasada sentetik lifler gibi belirli koşullarda kullanılan birçok lif türü vardır. Bunlara poliolefin ailesinden olan polietilen, poliester ve polamid lifleri dahil edilebilir. Bu lifler çevresel sıcaklıklarda geoteknik mühendisliği uygulamalarında geosentetik malzemeler üretmek için kimyasal, fiziksel ve mekanik olarak düzenlenebilir. Piyasadan temin edilebilecek çeşitli donatı liflerinin belirgin özellikler Tablo 3.6'da verilmiştir. (Hollaway, 2008).

Lifler, lifli polimer kompozit malzemenin temel bileşenleridir. Genellikle en yüksek hacim oranına sahiptirler ve kompozit yapının yük taşımasında ana rolü üstlenirler. Lif tipi, lif hacim oranı ve lif yönü seçimi aşağıdaki sebeplerden ötürü çok önemlidir;

1. Yoğunluk
2. Çekme dayanımı ve modülü
3. Basınç dayanımı ve modülü
4. Yorulma dayanımı ve yorulma göçme mekanizmaları
5. Elektrik ve termal iletkenlik
6. Maliyet

Bireysel liflerin çapları çok küçük olduğundan ticari liflerler birçok bireysel lifin bir arada bulunduğu burulmuş ya da burulmamış formda yığınlar halinde temin edilir.

Burulmamış formdaki cam ve aramid lif yığınları tel, karbon lifleri ise halat adını alır (Şekil 3.1). Burulmuş formdaki yığın ise iplik adını alır (Şekil 3.2).



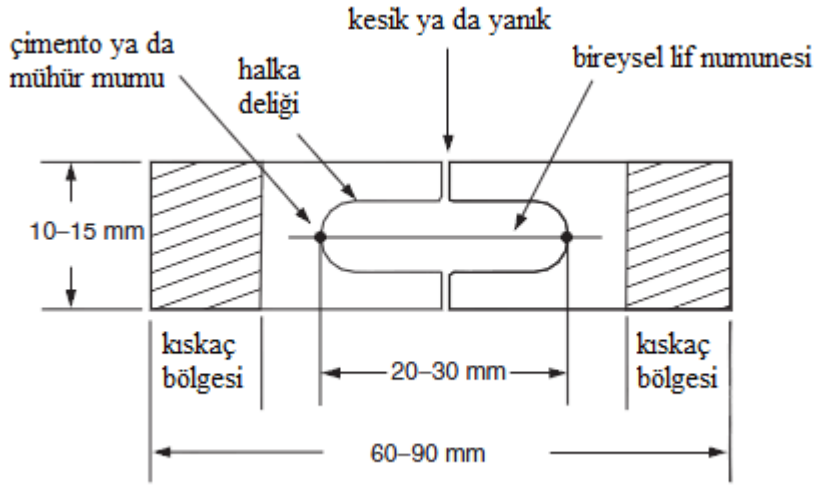
Şekil 3.1: Burulmamış lif yığını.



Şekil 3.2: Burulmuş lif yığını.

Donatı liflerinin özellikleri deneyler ile belirlenir. Çekme özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan deney metotlarından bir tanesi bireysel lif deneyidir. ASTM D3379'de (American Society for Testing and Materials) tanımlanan bu deneyde bireysel lif delikli bir halkanın merkezine uygun bir yapıştırıcı ile yerleştirilir (Şekil 3.3). Halka çekme deney makinesinin kıskaçlarına tutturulduktan

sonra orta kısmı kesilir ya da yakılır. Lif kırılana kadar çekme deneyi sabit yükleme oranı ile devam eder.



Şekil 3.3: Bireysel lif deneyi için askı halkası.

Deneyin yükleme-zaman kayıtlarından çekme dayanımı (σ_{tl}) ve çekme modülü (E_{tl}) belirlenir;

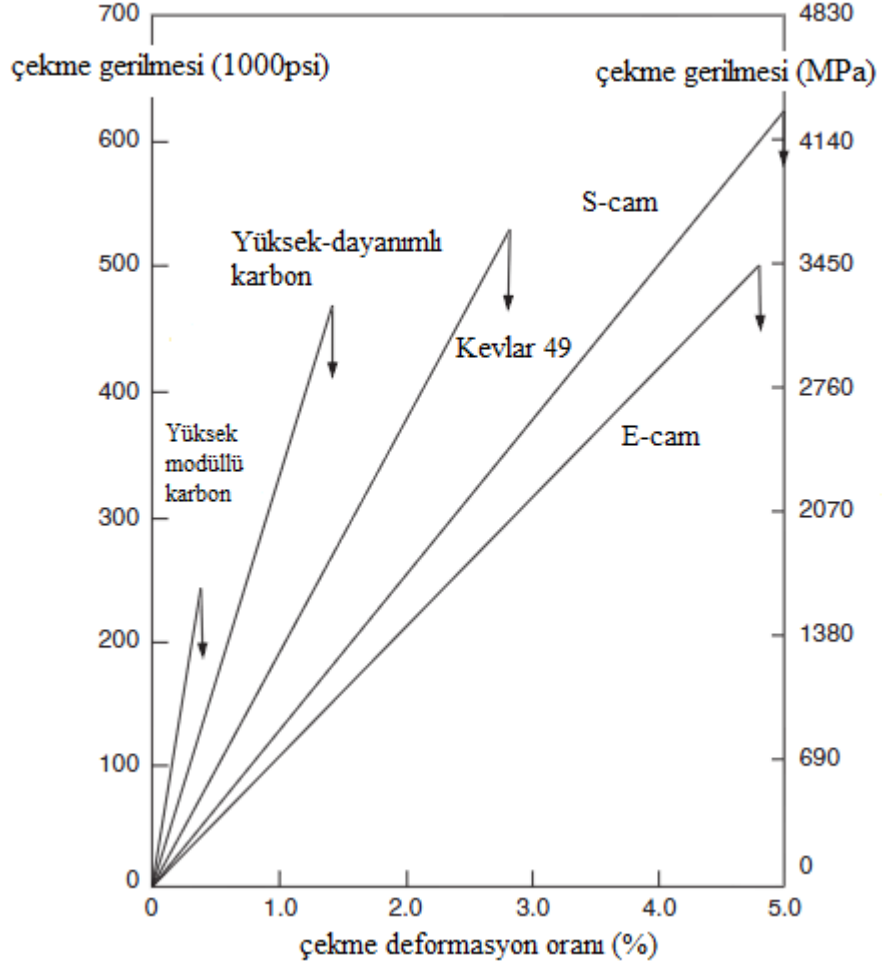
$$\sigma_{tl} = \frac{N_{göçme}}{A_l} \quad (3.1a)$$

$$E_{tl} = \frac{L_l}{CA_l} \quad (3.1b)$$

$N_{göçme}$, göçme anındaki kuvvet, A_l , lif ucu fotomikrograflarının bir planimetre ile ölçülmesi ile hesaplanan ortalama lif kesit alanı, L_l , lif uzunluğu (net açıklık), C ise sistem uyumluluğuna, yükleme oranına ve grafik hızına bağlı uyum sabitidir. Bireysel donatı lifi deneylerinden elde edilen çekme gerilim-deformasyon verileri göçme noktasına kadar hemen hemen doğrusaldır (Şekil 3.4). Aynı zamanda gevrek göçme modları sergilemektedirler. Ancak akmanın yokluğu liflerin yük taşıma kapasitelerini düşürmez, bu onları işleme ve diğer yüzeyler ile temas etme durumlarında hasar almaya yatkın kılar. Pultruzyon gibi sürekli imalat süreçlerinde bu tür hasarlardan oluşan lif kopmaları üretim hızını düşürebilir.

Donatı liflerinin yüksek çekme dayanımları istatistiksel olarak yığın formuna göre daha az yüzey kusuruna sahip olan bireysel formlarına aittir. Ancak diğer gevrek

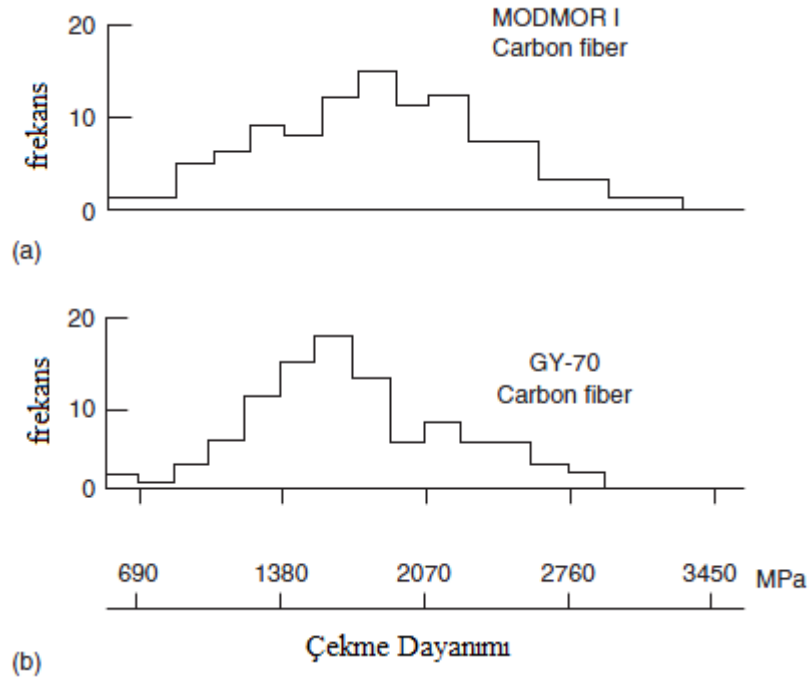
malzemelerde olduğu gibi çekme dayanım verileri yüksek sapmalar göstermektedir (Şekil 3.5).



Şekil 3.4: Farklı donatı lifleri için gerilim-deformasyon diyagramları.

Liflerin çekme özellikleri lif yığınları kullanılarak da elde edilebilir. Lif yığını deney metodu bireysel lif deney metoduna benzerdir. Lif yığını kuru ya da reçine emdirilmiş durumda test edilebilir. Genellikle lif yığınlarının ortalama çekme dayanımı ve modülü bireysel liflerden ölçülen değerlerden düşüktür. Şekil 3.6'da 3000 bireysel liften oluşan bir kuru cam lif yığınının gerilim-deformasyon eğrisi gösterilmektedir. Bireysel cam lifi göçme noktasına kadar doğrusal bir çekme gerilim-deformasyon davranışı göstermesine rağmen cam lifi yığını maksimum gerilime ulaşıncaya kadar sadece doğrusal olmayan bir gerilim-deformasyon eğrisi göstermekle kalmayıp aynı zamanda maksimum gerilime ulaştıktan sonra aşamalı bir göçme davranışı sergilemektedir. Ancak doğrusal olmayan davranış ve aşamalı

göçme bireysel liflerin dayanımının istatistiksel dağılımına bağlı olarak gerçekleşmektedir. Yığındaki zayıf bireyler daha düşük gerilimlerde göçerken sağ kalan bireyler çekme yükünü taşımaya devam etmektedir. Ancak böylelikle her sağ kalan bireyin üzerindeki gerilim artar. Bazıları yük seviyesi azaldıkça göçer. Maksimum gerilime ulaşıldığında sağ kalan bireyler daha da yüksek gerilimlere maruz kalır ve hepsi aynı anda olmamak şartıyla göçmeye başlamalarıyla Şekil 3.6'daki aşamalı göçme tipini sergilerler. Benzer çekme gerilim-deformasyon davranışları karbon ve diğer lif yığını deneylerinde de gözlemlenmiştir.



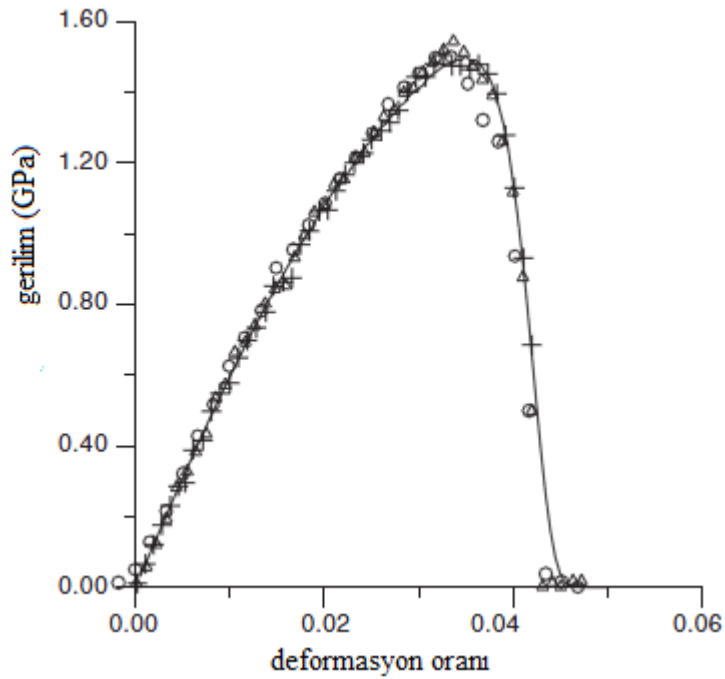
Şekil 3.5: (a) Modmor I karbon lifleri ve (b) GY-70 karbon lifleri için histogramlar.

Çekme özelliklerine ek olarak liflerin basınç özellikleri de birçok uygulamada ilgi çekmektedir. Çekme özelliklerinin aksine basınç özellikleri bireysel ya da yığın lifler üzerinde yapılan doğrudan basit basınç deneyleri ile elde edilemez. Liflerin basınç özelliklerinin belirlenmesi için bir dizi dolaylı metotlar kullanılır. Bunlardan bir tanesi döngü deneyidir, bireysel lif göçene kadar bir ilmik formunda bükülür. Lifin basınç dayanımı lif yüzeyindeki basınç deformasyon oranından elde edilir. Genel olarak liflerin basınç dayanımları çekme dayanımlarından düşüktür (Tablo 3.1). Boron liflerin basınç dayanımı karbon ve cam liflere oranlar daha yüksektir. Bütün

organik lifler düşük basınç dayanımına sahiptir. Buna basınç dayanımı çekme dayanımından neredeyse 10 kat küçük olan Kevlar 49'da dahildir (Mallick, 2008).

Tablo 3.1: Bazı donatı liflerinin basınç dayanımları.

Lif	Çekme Dayanımı (GPa)	Basınç Dayanımı (GPa)
E-cam lif	3.4	4.2
T-300 karbon lif	3.2	2.7-3.2
AS 4 karbon lif	3.6	2.7
GY-70 karbon lif	1.86	1.06
P100 karbon lif	2.2	0.5
Kevlar 49 lif	3.5	0.35-0.45
Boron	3.5	5



Şekil 3.6: 3000 bireysel lifli burulmamış E-cam lif yığınının çekme gerilim-deformasyon eğrisi.

3.1.1 Cam lifleri

Cam lifleri polimerik reçineli kompozit ürünlerde en yaygın kullanılan donatı lifleridir. Lifli polimer donatı çubukları, lifli polimer güçlendirme kumaşları ve lifli polimer yapısal profiller gibi birçok üründe kullanılırlar. Cam lifi kullanımının temel avantajları düşük maliyet, yüksek korozyon direnci, yüksek çekme dayanımı ve mükemmel yalıtım özellikleridir. Dezavantajları ise diğer lifler ile kıyaslandıklarında

düşük çekme modülü, yüksek yoğunluk, işlenirken aşınmaya yatkın oluşları, yorulma dirençlerinin düşük oluşu ve yüksek sertliklerinden dolayı kesme ve şekillendiricilerde sorunlara sebebiyet vermeleridir.

Lifli polimer endüstrisinde yaygın olarak iki tip cam lifi kullanılır; E-cam ve S-cam. C-cam olarak da bilinen bir diğer tip asitlere karşı yüksek korozyon direncinin gerektiği E-cam'ın yetersiz olduğu durumlar içindir. A-cam pencere camıdır. E-cam ticari liflerin arasındaki en ucuz liftir ve bu sebepten lifli polimer endüstrisinde bu kadar yaygın olarak kullanılmaktadır. S-cam ise orijinalinde uçak parçaları ve füze kasaları için geliştirilmiştir ve çekme dayanımı bazı karbon liflerinkinden bile yüksektir ancak E-cam'dan farklı yapısı dolayısıyla imalat farklılıkları yüzünden daha pahalıdır. S-cam'ın daha ucuz bir versiyonu S-2-cam olarak adlandırılır. Daha ucuz olmasına karşın çekme dayanım ve modülü S-cam'a benzerdir.

E- ve S-cam liflerin kimyasal bileşenleri Tablo 3.2'de verilmiştir. Soda-kireç camında olduğu gibi (pencere camı) bütün cam liflerinin temel bileşeni silikadır (SiO_2). B_2O_3 ve Al_2O_3 gibi diğer oksitler işlenebilirliği iyileştirmek ve silikanın ağ yapısını modifiye etmek için eklenir. Suyu karşı daha iyi korozyon direnci ve daha yüksek yüzey direnci kazandıran Na_2O ve K_2O oranları E- ve S-cam liflerinde soda-kireç camının aksine düşüktür. Cam liflerinin içyapısı rastgele dizilmiş üç boyutlu uzun bir silikon, oksijen ve diğer atomlardan oluşan bir ağ şeklindedir. Cam lifleri amorf yapıda (kristal olmayan) ve izotropiktir.

Tablo 3.2: Cam liflerinin tipik bileşenleri (ağırlıkça %).

Tip	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	B_2O_3	Na_2O
E-cam	54.5	14.5	17	4.5	8.5	0.5
S-cam	64	26	-	10	-	-

Sürekli cam liflerinin temel ticari formu 204 ya da daha fazla bireysel paralel lif içeren tellerdir. Diğer yaygın cam lifi formları Şekil 3.7'de gösterilmiştir. Fitiller silindirik formda duran bir grup burulmamış paralel telden oluşur. Pultrüzyon sürecinde kullanılan ana taşıyıcı donatı lifleri bu formdadır. Kırılmış teller sürekli tellerin kısa uzunluklarda kesilmesiyle oluşur. 3.2 ila 12.7mm arasında olanlar enjeksiyon kalıplama sürecinde kullanılırlar, daha uzun olanları bir reçine ile

birleştirilerek kırılmış tel keçe yapımında kullanılır. Bu keçeler elle yatırma operasyonlarında kullanılırlar ve yapıya düzlem içinde hemen hemen her yönde eşit özellikler kazandırılırlar. Cam lifleri aynı zamandan dokunmuş fitil ya da dokunmuş bez gibi dokunmuş formlarda bulunabilir. Dokunmuş fitiller iki birbirine dik yönde örölmüş kumaşlardır. Dokunmuş bezler ise burulmuş teller ile örölür. Dokunmuş fitil ve bezler dokuma sitiline, boyuna ve tersine yönlerdeki lif sayısına bağlı olarak iki yönlü özellikler sağlarlar. Taze çekilmiş cam liflerinin ortalama çekme dayanımları 3.45GPa'ı geçebilir. Ancak işlem sırasında ya da birbirlerine temas sonucu oluşan yüzey hasarları bu değeri 1.72 ila 2.07GPa'a kadar düşürebilir. Dayanım azalması tekrarlanır yükler altında yüzeysel kusurların artmasıyla artış gösterir. Cam liflerini yorulmaya tabi uygulamalarda kullanmanın ana dezavantajların birisi budur. Yüzey kusurlarının kimyasal uygulamalarla giderilmesi mümkündür ancak böyle bir modifikasyona sahip ticari ürün bulunmamaktadır.

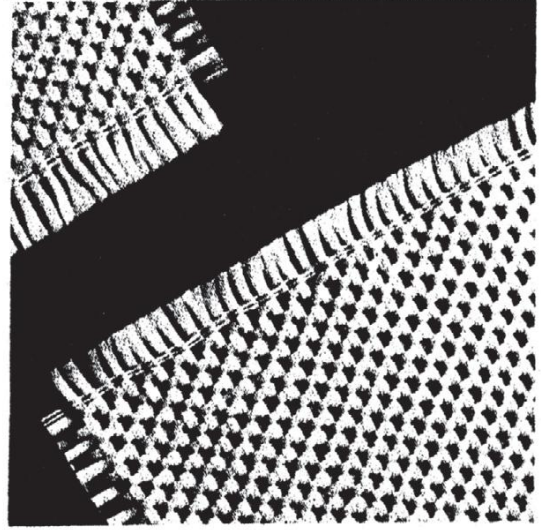
Cam liflerinin çekme dayanımları suyun varlığında ya da sabit yükler altında da (statik yorulma) azalır. Su, lif yüzeyinden alkali çıkartır ve zaten mevcut olan yüzey kusurlarını derinleştirir. Kalıcı yükler altında yüzey kusurlarının büyümesi hızlanır. Sonuç olarak yükün uygulandığı zaman arttıkça cam liflerinin çekme dayanımları düşer (şekil 3.8) (Mallick, 2008).

Bireysel cam lifinin çapı yaklaşık 0.03mm ile 0.24mm arasında değişir. 0.17mm kalınlığındaki lif yapısal ürünlerde en çok kullanılan tiptir. Çıplak gözle bakıldığında cam lifi belirgin parlak beyaz renkte gözükr. Yaygın kullanılan cam sınıflarının yaklaşık özellikleri Tablo 3.3'de verilmiştir.

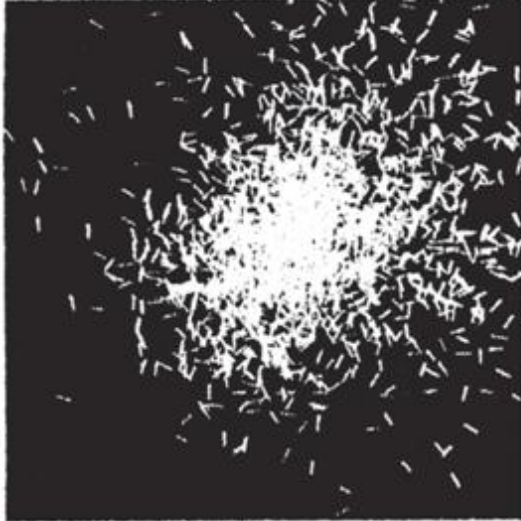
Cam lifleri 1400 °C civarı erime sıcaklıklarında üretilir. Bireysel lifler kaplama adı verilen bir süreçte bağ ya da halat formuna getirilirken lifleri koruyan bir tabaka ile kaplanır. Bu kaplama aynı zamanda polimer reçine ile cam lifi arasındaki aderansı artırıcı özel formüle edilmiş bağlayıcı maddeler de içerir. Günümüzde en yaygın cam lifler, yapılarda kullanılan üç büyük termoset reçine sistemine uygun (epoksi, poliester, vinilester) kaplamalarla temin edilebilir. Cam lifleri mükemmel ısı ve elektrik yalıtkanlarıdır ve en ucuz yüksek performanslı lif olma özelliğini taşır (Bank, 2006).



Sürekli tel fitil



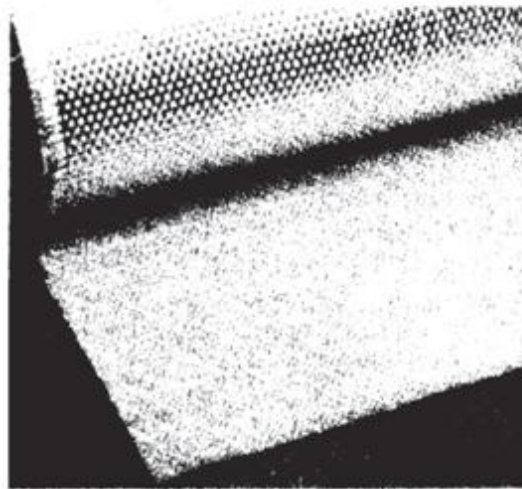
Dokunmuş fitil



kırılmış tel

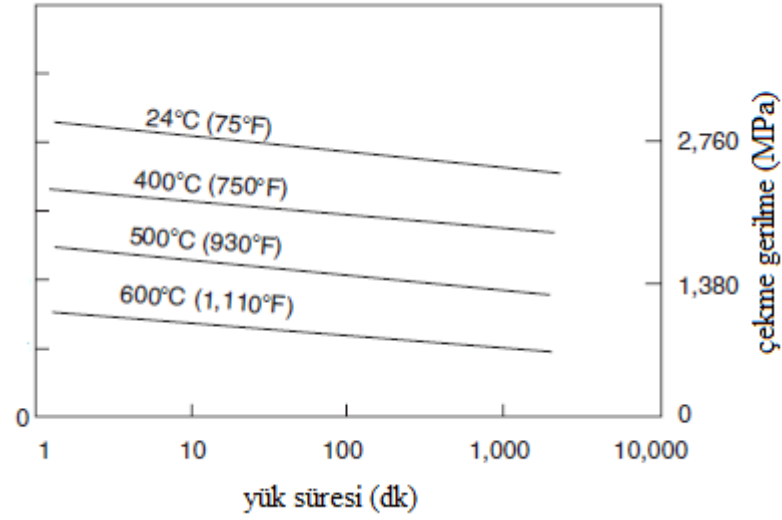


kırılmış tel keçe



Dokunmuş fitil keçe

Şekil 3.7: Cam liflerin genel formları.



Şekil 3.8: Zamanın bir fonksiyonu olarak farklı sıcaklıklar altında E-cam liflerin çekme dayanım azalması.

Tablo 3.3: Genel cam lifi sınıflarının yaklaşık özellikleri.

Cam Lifi Sınıfı	Yoğunluk (g/cm ³)	Çekme Modülü (GPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Maks. Uzama (%)
E	2.57	73	2400~3400	2.5~4.8
A	2.46	73	2760~3030	2.5~3.5
C	2.46	74	2350	2.5
S	2.47	88	4300~4600	3.0~5.7
S-2	2.47	88	4300~4600	3.0~5.7

3.1.2. Karbon lifleri

Karbon lifleri bugün yapı uygulamalarında lifli polimer güçlendirme tabakaları ve kumaşları, lifli polimer güçlendirme şeritleri ve lifli polimer öngerilme tendonları olarak kullanılır. Karbon lifi sağlam çok kristalli organik malzemedir, atomik seviyede düzlemsel iki-boyutlu sıralanmış karbon atomları barındırır. İki-boyutlu çarşafımsı diziliş grafitik form olarak anılır, bu nedenle lifler grafit lifleri olarak da bilinir (üç-boyutlu diziliş elmas formudur).

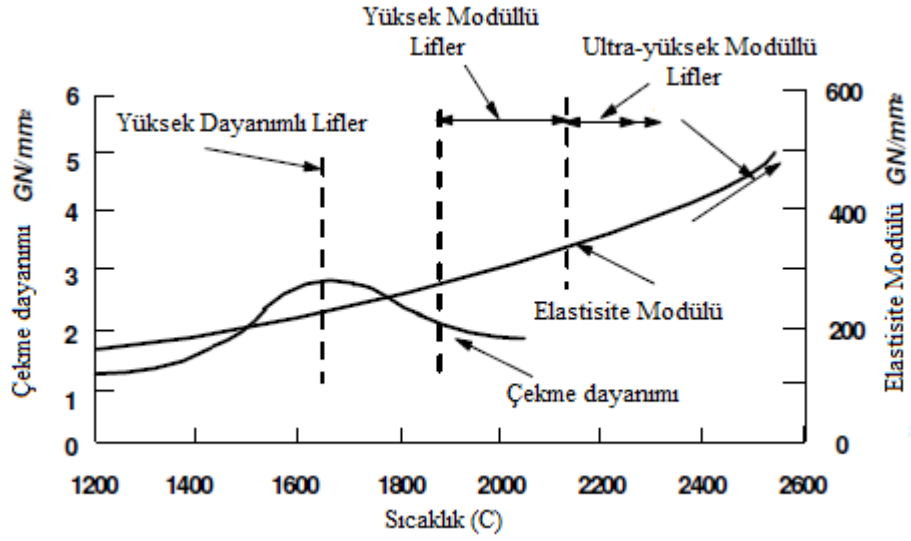
Karbon lifleri, standart modül, yüksek dayanım, yüksek modül ve ultra yüksek modül olarak bilinen sınıflarda üretilir (IM, HS, HM, UHM). Ticari olarak 207GPa'dan 1035GPa'ya kadar değişen aralıkta çekme modüllerinde temin edilebilir. Genel olarak düşük modüllü lifler yüksek modüllülere göre düşük yoğunluklu, düşük maliyetli, yüksek çekme ve basınç dayanımlı ve daha yüksek göçme deformasyon oranlıdır.

Karbon liflerinin çapları 0.05mm ile 0.1mm arasında değişir. Karbon lifinin karakteristik kömür-siyahı rengi vardır. İki-boyutlu atomik yapıları yüzünden karbon lifleri tersine izotropiktir, atomik dizilişe paralel yöndeki özellikleri, diğer yöndekinden farklıdır. Lifin boyuna eksenini grafitik düzlemlere paraleldir, böylece yüksek boyuna eksenel modül ve dayanım elde edilir. Yaygın sınıftaki karbon liflerin yaklaşık değerleri Tablo 3.4'de verilmiştir.

Tablo 3.4 Genel karbon lifi sınıflarının yaklaşık özellikleri.

Karbon Lifi Sınıfı	Yoğ. (g/cm³)	Çekme Modülü (GPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Maks. Uzama (%)
Standart Modül (IM)	1.7	250~300	3700~5200	1.2~1.73
Yüksek Dayanım (HS)	1.8	250~260	4800~5020	1.4~1.93
Yüksek Modül (HM)	1.9	450~500	3000~3500	0.5~0.8
Ultra Yük. Modül (UHM)	2.1	800	2400	0.2

Karbon lifi yüksek sıcaklıklarda (1200 ~ 2400°C), üç öncül malzemedenden birisi kullanılarak üretilir; doğal selülozik rayon tekstil lifi, sentetik polyacrilonitrile (PAN) tekstil lifi veya zift (kömür katranı). Zift-bazlı lifler petrol sürecinden yan ürün olarak üretilir ve genelde PAN ve rayon bazlı liflere göre daha ucuzdur. Karbon lifi üretimi sırasında ısı yükseltirilirse atomik yapıda daha çok çarşafımsı düzlemsel grafitik dizilim oluşturur ve lif daha yüksek boyuna eksenel modül kazanır. Bu sebepten ilk karbon lifleri grafit lifleri olarak adlandırılmışlardır. 2000°C'nin üzerindeki üretim sıcaklıklarında karbon kristallerinin boyutlarının büyümesi ile dizilişleri iyileşir böylece modül değerleri yükselir. Ancak 1600°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda çekme dayanımı düşer (Şekil 3.9). Sonuç olarak yüksek dayanımlı lif üretmek için 1600°C'lik sıcaklık gereklidir (Hollaway, 2008).



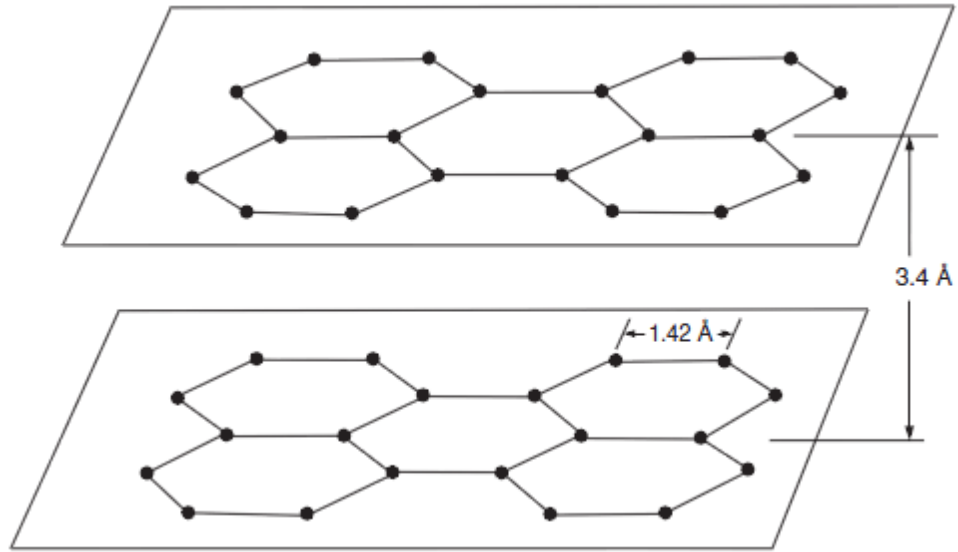
Şekil 3.9: Karbon liflerinin elastisite modülü ve çekme dayanımlarının üretim ısılarına bağlı değişimi.

Karbon lifi tanımı yapılarında kullanılan karbon liflerinin tamamı için kullanılır. Grafit lifi tanımı hala uzay endüstrisinde kullanılmaktadır ancak bu terim yok olmaktadır. Cam liflerdeki gibi karbon lifleri de reçine sistemiyle uyumlu olacak şekilde kaplanmalıdır. Geçmişte karbon lifleri epoksi reçine sistemleri ile kullanıldı ve bu sistemler için kaplamalar hali hazırda mevcuttur. Bugünlerde karbon lifleri vinilester ve harmanlanmış vinilester-poliester reçineleri ile lifli polimer profil ve güçlendirme şeritlerinde kullanılmaktadır. Karbon liflerinin poliester ve vinilester reçineleri için kaplanması yaygın değildir. Epoksi olmayan bir reçine sistemi ile karbon lifi kullanılırken lifin kullanılacak reçine için doğru kaplandığından emin olunması gerekir (Bank, 2006).

Karbon liflerinin avantajları arasında çok yüksek çekme dayanımı-ağırlık oranları ve çekme modülü-ağırlık oranları, çok düşük doğrusal termal uzama katsayıları (örneğin uzay antenleri gibi uygulamalarda boyutsal stabilite sağlar), yüksek ısıl iletkenlik (bakırınkinden bile yüksektir) sayılabilir. Sıcak ve nemli ortamlarda ve yorucu yüklere maruz kaldıklarında çok dayanıklıdır ve iyi performans verir. Nemi emmezler. Başlıca dezavantajları ise düşük göçme deformasyon oranları, düşük darbe dirençleri ve kısa devreye sebebiyet verebilecek yüksek elektrik iletkenlikleridir. Metalik malzemeler ile temas halinde kullanılırken dikkat etmek

gerekir, karbon lifleri ile birçok metal arasındaki elektro potansiyel uyumsuzluk yüzünden bir galvaniz hücresi oluşabilir. Bazı araştırmalar bu durumun lifli polimer kompozit malzemede özellikle metalik malzemenin korozyona uğradığı durumda polimer reçinenin bozulmasına sebep olduğunu ortaya koymuştur. Yüksek maliyetleri onları yaygın olan ticari uygulamaların dışında bırakmıştır. Ağırlık faktörünün maliyetten daha önemli olduğu uzay ve yarış otomobilleri endüstrisinde yaygın olarak kullanılırlar.

Yüksek çekme modülleri karbon atomlarının paralel düzlemlerde kristalografik yapıda dizildiği grafitik formlarının bir sonucudur. Her düzlemdeki karbon atomları birleşen altıgenlerin köşelerinde yer alır (Şekil 3.10). Düzlemler arasındaki mesafe komşu atomlar arasındaki mesafeden fazladır. Her düzlemdeki karbon atomları arasında güçlü kovalent bağları vardır ancak düzlemler arasındaki bağ van der Waals tipi kuvvetler olduğu için düşüktür. Bu durum karbon lifinin yüksek anizotropik fiziksel ve mekanik özelliklerini ortaya çıkarır.

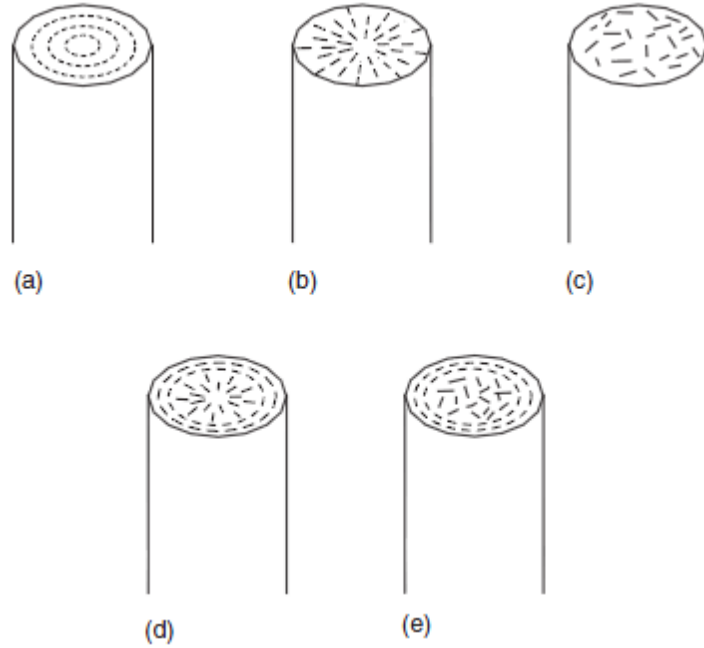


Şekil 3.10: Grafit kristalindeki karbon atomlarının dizilişi.

Grafit kristallerindeki düzlemler lif eksenine boyunca dizilirler. Ancak tersine yönde bu dizilim dairesel, radyal, gelişigüzel ya da bu tiplerin bir kombinasyonu olabilir (Şekil 3.11). Bu dizilimin durumuna göre modül ve termal uzama katsayısı gibi termoelastik özellikler, radyal ve aksel yönlerde aksel yöndekinden farklı olabilir. Örneğin eğer dizilim dairesel ise aksel ve dairesel modül birbirine eşit ve

radyal modülden büyük olur ve lif radyal ortotropik olarak adlandırılır. Gelişigüzel dizilim olduğunda radyal ve dairesel modül birbirine eşit ve eksenel modülden küçük olurlar, bu duruma tersine izotropik denir. Ticari liflerde genel olarak yüzeyde iki bölge dairesel çekirdekte ise ya radyal ya da gelişigüzel dizilimlere rastlanır.

Karbon lifleri ticari olarak üç temel formda bulunur; uzun ve sürekli halat, kırılmış (6~50mm) ve öğütülmüş (30~3000 μm). Uzun ve sürekli halat 1000 ila 160,000 paralel burulmamış lif yığınınından oluşur. Karbon lifli halatın fiyatı lif sayısının artması ile düşer. Pultrüzyon gibi yöntemlerde yüksek lif sayısı üretimi iyileştirmek adına arzu edilse de, reçine ile ıslatılmaları daha zorlaşır. Karbon lifleri farklı sitalerde iki boyutlu kumaşlar olacak şekilde de dokunabilir. Hibrit kumaşlar bünyesinde karbon ile birlikte E-cam, Kevlar gibi diğer lifleri de barındırabilir. Kalınlık boyunca dokunan üç boyutlu kumaşlarda geliştirilmiştir (Mallick, 2008).



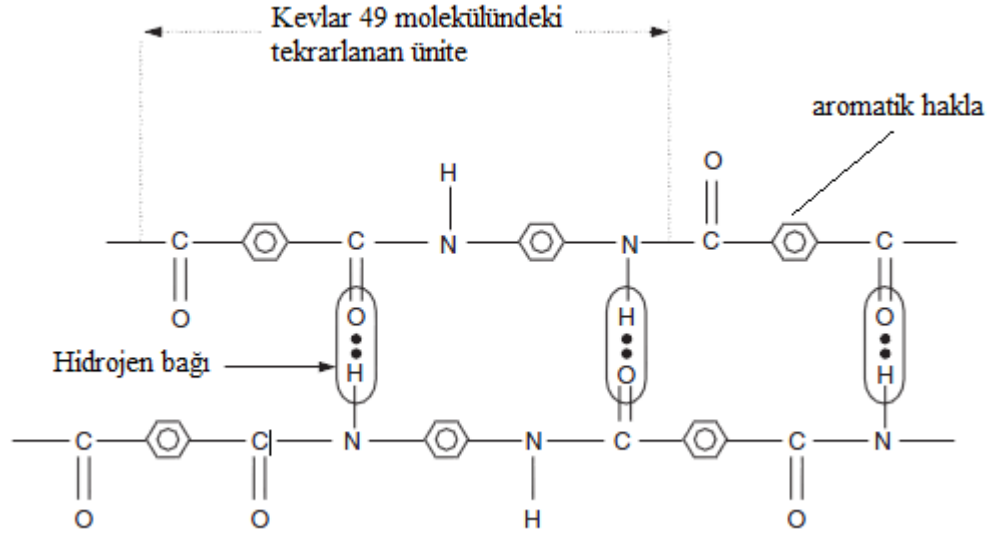
Şekil 3.11: Lif eksenine ters yönde grafit kristallerinin dizilimi (a) dairesel, (b) radyal, (c) gelişigüzel, (d) radyal-dairesel ve (e) gelişigüzel-dairesel.

3.1.3. Aramid lifleri

Aramid lifleri yüksek kristalli aromatik poliamid lifleridir ve mevcut donatı lifleri arasında en düşük yoğunluklu ve en yüksek çekme dayanımı-ağırlık oranlı olanıdır.

İlk defa 1965 yılında DuPont tarafından geliştirilip Kevlar ticari markası altında patentleşmiştir. Donatı lifleri olarak aramid lifleri hafiflik, yüksek çekme dayanımı ve darbe direnci gerektiren (örn., bir aletin kaza ile düşürülmesinden oluşabilecek hasar) birçok deniz ve uzay uygulamasında kullanılmıştır. 1980'lerde ilk jenerasyon lifli polimer öngerilmeli tendonlarda aramid lifleri kullanılmıştır. Karbon lifleri gibi boyuna yönde negatif termal uzama katsayıları vardır. Düşük termal uzamalı kompozit panel imalatına uygundur. Ancak çok az üretici günümüzde aramid lifinden lifli polimer donatı çubuğu ve tendon üretmektedir. Aramid kumaşları azda olsa lifli polimer güçlendirme uygulamalarında kullanılmıştır (Bank, 2006).

Aramid liflerinden Kevlar 49'un moleküler yapısı Şekil 3.12'de gösterilmiştir. Molekülündeki tekrarlanan üniteler bir amid (-NH) grubu birde aromatik yüzük içerir. Moleküldeki aromatik yüzük naylon gibi diğer ticari liflere kıyasla daha yüksek kimyasal ve termal stabilite ile birlikte daha yüksek modül sağlar.



Şekil 3.12: Kevlar 49 lifinin moleküler yapısı.

Kevlar 49'un çekme gerilim-deformasyon davranışı doğrusal olsa da, lif göçmesi kademeli olur. Eğilme durumunda, Kevlar 49 lifleri basınç tarafında yüksek dereceli bir akma davranışı sergilerler. Böyle sünek bir göçme tipi cam ve karbon liflerinde gözlenmez, bu davranış Kevlar 49 kompozitlerine darbe ve diğer dinamik yüklere karşı mükemmel hasar toleransı özelliği kazandırır. Kevlar 49 liflerinin bu

karakteristik özelliğinden faydalanan uygulamaların bazıları polis ve askeri personelin kullandığı yumuşak ve hafif kurşungeçirmez yelekler ve miğferlerdir.

Kevlar 49 lifleri yanmaz ya da erimez ancak 427°C sıcaklıkta bozunur. Kevlar 49 için tavsiye edilen uzun vade maksimum kullanım sıcaklığı 160°C'dir. Çok düşük bir termal iletkenlikleri ancak çok yüksek bir vibrasyon sönümlenme katsayıları vardır. Birkaç güçlü asit ve alkaliler dışında kimyasal dirençleri iyidir. Ancak ultraviyole ışınlarına karşı hassastırlar. Güneş ışığına uzun süreli maruz kalma durumunda rengi solar ve ciddi çekme dayanımı kaybı olur. Lifli polimer kompozitlerde bu sorundan bahsedilmez çünkü lifler reçine ile kaplıdır. Reçinede ultraviyole ışığı emen katkıları kullanılarak sorun daha da indirgenebilir.

Kevlar 49 lifleri 23°C ve %100 nemli ortamda %6'ya kadar su emebilir. Emilen suyun liflerin çekme özellikleri üzerinde çok az etkisi olduğu gözlenmiştir ancak yapısındaki mikro boşluklardan kırılma eğilimi göstererek boyuna ayrılmalar oluşturur.

Kevlar liflerinin ikinci jenerasyonu olan Kevlar 149 ticari aramid liflerinin en yüksek çekme modülüne sahip olanıdır. Kevlar 149'un çekme modülü Kevlar 49'dan %40 daha yüksektir ancak göçme deformasyon oranı daha düşüktür. Kevlar 49'a göre benzer koşullarda %70 daha az su emilimi yapar. Kevlar 149 aynı zamanda daha düşük sünme oranına sahiptir (Mallick, 2008).

Nispeten yüksek fiyatları, işleme güçlükleri, yüksek nem emme potansiyelleri, bozunma sıcaklıklarının düşük oluşu ve nispeten kötü basınç dayanımları aramid liflerini yapı uygulamalarında kullanılan lifli polimer ürünler için çekici kılmamaktadır. Buna karşın aramid lifleri yüksek performans liflerinin en hafifidir (yaklaşık 1.4 g/cm³) ve özgün sünek göçme tipleri sayesinde enerji sönümlenmenin ve hafifliğin gerektiği, kurşungeçirmez yelekler, miğferler, otomotiv kaza sönümleyicileri gibi birçok endüstriyel üründe kullanılmışlardır. Belirgin sarı renktedir ve karbon liflerine kıyasla benzer maliyettedir. Aramid lifin tipine bağlı olarak boyuna çekme dayanımı 2750 ila 3450MPa arasındadır, boyuna çekme modülü ise 70 ile 179GPa aralığındadır.

3.1.4 Uzatılmış zincirli polietilen lifler

Uzatılmış zincirli polietilen lifler Spectra ticari adı altında temin edilebilir. Yüksek moleküler ağırlıklı polietilenin jel döndürülmesiyle üretilir. Jel döndürme geleneksel polietilen liflerde kullanılan eriyik döndürmeye göre çok yüksek kristalli ve sıralı lif yapısına yol açar.

Spectra polietilen lifleri bütün ticari donatı lifleri arasında en yüksek dayanım-ağırlık oranına sahip olan liflerdir. Spectra liflerinin diğer iki üstün özellikleri düşük su emilimleri (%1) yüksek aşınma dirençleridir. Bu onları deniz endüstrisinde tekne omurgası ya da su kayağı gibi uygulamalarda çok kullanışlı kılar.

Spectra liflerinin erime sıcaklıkları 147°C'dir ancak 100°C'nin üzerinde çok yüksek bir sünme davranışı sergilediklerinden 80 ila 90°C'nin üzerinde kullanılmazlar. Spectra liflerinin bir diğer sorunu ise reçinelerle olan düşük aderanslarıdır. Bu gaz plazma tedavisi adı verilen yüzey modifikasyonu ile kısmen iyileştirilebilir.

Spectra lifleri kompozitlere düşük sıcaklıklarda bile yüksek darbe direnci kazandırmaktadır ve bu sebepten zırh, miğfer gibi balistik kompozitlerde uygulamaları artış göstermektedir. Ancak yüksek performanslı uzay kompozitlerinde kullanımları sınırlıdır, sadece daha rijit karbon lifleri ile birlikte hibrit formda kompozitin hasar toleransını arttırmak için kullanılırlar. (Mallick, 2008).

3.1.5 Doğal lifler

Doğal liflere örnek olarak hint keneviri, keten, kenevir, **remi**, **sisal**, hindistan cevizi lifi ve muz lifi verilebilir. Bütün bu lifler dünyanın çeşitli yerlerinde tarımsal bitkiler olarak yetiştirilirler ve genellikle ip, halı ve sepet yapımında kullanılırlar. Doğal liflerin yapısı lignin reçinesi ile kaplanmış selüloz mikro lifleridir. Doğal lifin tipine bağlı olarak selüloz oranı %60 ila 80 (ağırlıkça) oranında ve lignin oranı %5 ila 20 arasında değişir. Ek olarak doğal liflerin içerisindeki su oranı %20'leri bulabilir. Bazı doğal liflerin özellikleri Tablo 3.5'te verilmiştir.

Tablo 3.5: Bazı doğal liflerin özellikleri.

Özellik	Kenevir	Keten	Sisal	Hint Keneviri
Yoğunluk (g/cm ³)	1.48	1.4	1.33	1.46
Modül (GPa)	70	60~80	38	10~30
Çekme dayanımı (MPa)	550~900	800~1500	600~700	400~800
Göçme deformasyon oranı (%)	1.6	1.2~1.6	2~3	1.8

Yakın zamanda aşağıda sıralanan sebeplerden dolayı doğal lifli polimerler otomotiv endüstrisinin ilgisini çekmiştir. Doğal lifli kompozitlerin uygulamaları kapı iç panelleri, koltuk arkası, çatı iç paneli şeklinde sıralanmaktadır.

1. Çevre dostu ve geri dönüştürülebilirlerdir, cam ve karbon liflerin aksine üretimleri için gereken enerji miktarının çok azdır.
2. Yoğunluğu 2.54g/cm³ olan E-cam lifleri ve 1.8~2.1g/cm³ olan karbon lifleri ile karşılaştırıldıklarında doğal liflerin yoğunluğu 1.25~1.5g/cm³'tür.
3. Bazı doğal liflerin modül-ağırlık oranları E-cam liflerinden yüksektir, bu da onların rijitlik kritik tasarımlarda E-cam liflerine karşı oldukça rekabetçi olabilecekleri anlamına gelir.
4. Doğal lifli kompozitler cam ya da karbon liflere göre daha yüksek akustik sönümle sağlarlar, bu sebepten gürültüyü azaltma uygulamaları için daha müsaitlerdir (otomotiv içi uygulamaları için gittikçe artan gereklilik).
5. Doğal lifler cam ve karbon liflere oranla oldukça daha düşük maliyetlidir.

Ancak doğal lifler için bazı sınırlamalar söz konusudur. Doğal liflerin çekme dayanımlara nispeten düşüktür. Düşük erime sıcaklıkları ve su emme yetkinlikleri diğer problemleridir. 200°C'nin üzerinde doğal lifler bozunmaya başlar (Mallick, 2008).

3.1.6 Boron lifleri

Boron liflerinin en göze çarpan özelliği 379 ila 414GPa arasında değişen aşırı yüksek modülleridir. Nispeten büyük çapları da göz önünde bulundurulduğunda burkulmaya karşı mükemmel direnç sağlarlar. Bu durum boron lifli kompozitler için yüksek basınç direnci anlamına gelir. Boron liflerinin başlıca dezavantajı birçok formdaki

karbon liflerinden bile yüksek olan maliyetleridir. Bu sebepten kullanımları şimdilik birkaç uzay uygulaması ile sınırlı kalmıştır (Mallick, 2008).

3.1.7 Seramik lifleri

Silikon karbid (SiC) ve alüminyum oksit (Al_2O_3) lifleri metal ve seramik kompozitlerdeki yüksek sıcaklık uygulamalarıyla dikkat çeken seramik liflerdir. Erime noktaları sırasıyla $2830^{\circ}C$ ve $2045^{\circ}C$ 'dir. Silikon karbid $650^{\circ}C$ üzerinde bile dayanımını korur, alüminyum oksit ise $1370^{\circ}C$ 'lere kadar dayanım gösterir. Karbon ve boron liflerin elverişsiz olduğu metal güçlendirme uygulamaları için uygundur. Silikon karbid liflere göre alüminyum oksit lifler daha düşük termal ve elektrik iletkenliğine ve daha yüksek termal uzama katsayılarına sahiptirler.

Yıllar boyunca birçok farklı alüminyum oksit geliştirilmiştir ancak çoğu günümüzde ticari olarak bulunmamaktadır. 3M tarafından üretilen Nextel 610 ve Nextel 720 piyasada bulunan alüminyum oksit lifleridir. Nextel 610 oda sıcaklığında yüksek çekme dayanımı sergiler, ancak sıcaklık $1100^{\circ}C$ 'nin üzerine çıktığında dayanımı hızla düşer. Nextel 720 ise daha düşük çekme dayanımına sahiptir, ancak $1400^{\circ}C$ 'de bile dayanımının %85'ini korur. Nextel 720 aynı zamanda Nextel 610'a ve diğer oksit liflere göre $1000^{\circ}C$ 'nin üzerindeki sıcaklıklarda çok daha düşük sünme oranına sahiptir. Fiberfrax olarak adlandırılan bir diğer seramik lifi kısa ve süreksiz formda temin edilebilir

Piyasadan temin edilebilecek çeşitli donatı liflerinin belirgin özellikleri Tablo3.6'da verilmiştir (Mallick, 2008).

Tablo 3.6: Bazı ticari donatı liflerinin özellikleri.

Lif	Çekme Modülü (GPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Göçme Deformasyon Oranı (%)
Cam			
E-cam	73	2400~3400	2.5~4.8
A-cam	73	2760~3030	2.5~3.5
C-cam	74	2350	2.5
S-cam	88	4300~4600	3.0~5.7
S-2-cam	88	4300~4600	3.0~5.7
Aramid			
Kevlar 29	83	2750	4.0
Kevlar 49	125	2760~3620	2.4~2.8
Kevlar 149	179	3450	1.9
Technora	70	3000	4.6
PAN karbon			
IM	300	5200	1.73
HM	450	3500	0.8
HS	260	5020	1.93
UHM	800	2400	0.2
T-300	234	3530~3650	1.4~1.51
AS-1	228	3100	1.32
AS-4	248	4070	1.65
T-40	290	5650	1.8
IM-7	301	5310	1.81
HMS-4	345	2480	0.7
GY-70	483	1520	0.38
GY-80	572	1860	0.33
G-40-700	300	4960	1.62
Zift Karbon			
P55-S	380	1900	0.5
P55-W	160	1400	0.9
P75-S	520	2100	0.4
P100	724~758	2200~2410	0.31~0.32
P120	827	2200	0.27
Polietilen			
Spectra 900	117	2590	3.5
Spectra 1000	172	3000	2.7
Baron	393	3100	0.79
SiC			
Monofilament	400	3440	0.86
Nicalon	196	2750	1.4
Al₂O₃			
Nextel 610	380	3100	
Nextel 720	260	2100	
Al₂O₃ – SiO₂			
Fiberfrax	103	1030~1720	
Yumuşak çelik (karşılaştırma için)	210	370~700	2.5

3.2 Polimer Reçineler

Lifli polimer kompozit ürünlerin matris adı da verilen polimer reçine kısmı monomer adı verilen aynı molekülün tekrarlanmasıyla oluşan moleküllerden meydana gelen organik bir malzemedir (Şekil 3.13). Ticari ürünlerde kullanıldığında polimer bazlı malzeme plastik olarak da adlandırılır. Polimer reçine kısmı aşağıdaki işlevleri yerine getirmelidir;

1. Lifleri bir arada tutmalı ve yüzeylerini aşınmaya ve çevresel etkilere karşı korumalıdır.
2. Liflerin pozisyonlarını koruyarak aderans ve sürtünme yolu ile gerilimleri liflere aktarmalıdır. Liflerle olan aderans yeterli reçine kesme dayanımı ile birlikte olmalıdır.

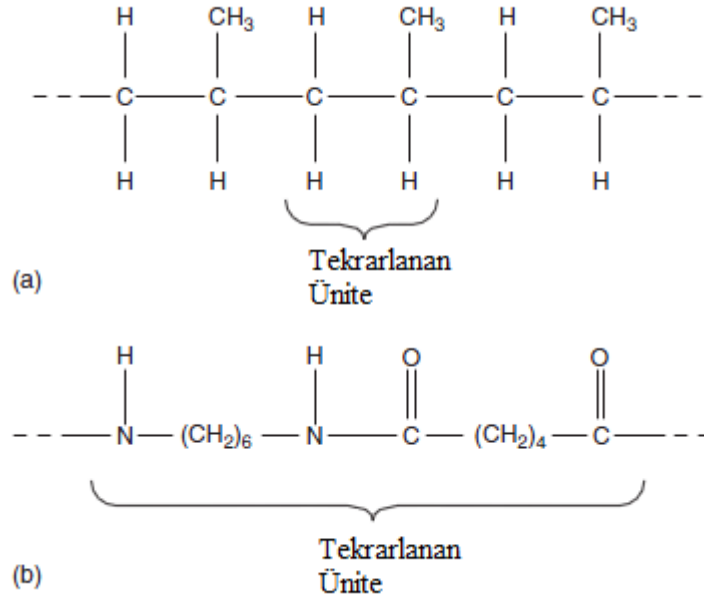
Ek olarak aşağıdaki şartlar reçine tarafından sağlanmalıdır;

1. Kompozitin servis ömrü boyunca liflerle kimyasal ve termal uyumluluğu korumalıdır.
2. İmalat sürecinde lifi tamamen kaplayabilmelidir.
3. Mimari elemanlar için renk ve yüzey teşkil etmelidir.

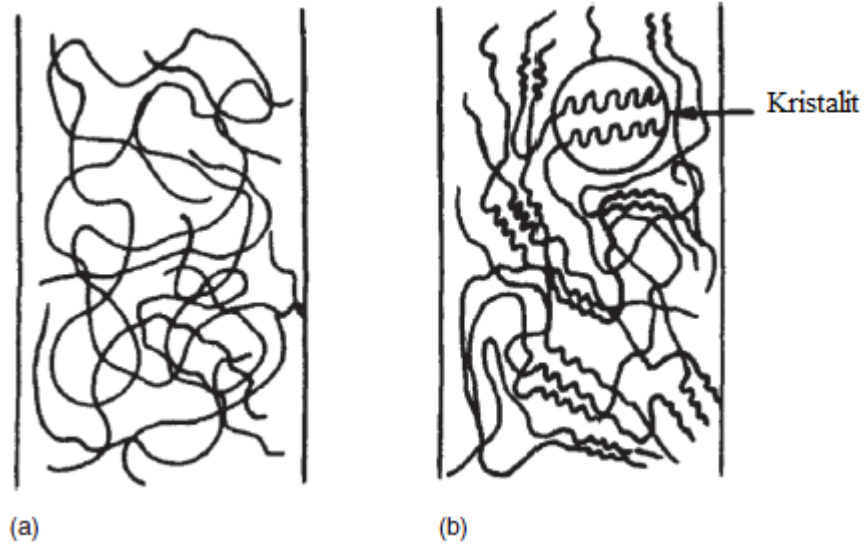
Kompozit ailesi içerisinde yapılarda kullanılan iki ana tipte polimer bulunmaktadır. Termoset ve termoplastik adı verilen bu polimerlerin özellikleri ve üretim süreçleri farklıdır. İki polimer tipide küçük moleküllerin bir araya geldiği uzun molekül zincirlerinden oluşur. Katı halde bu donmuş moleküller ya amorf adı verilen yüksek konsantrasyonda karışık moleküller içeren gelişigüzel yapıda ya da yarı-kristalit adı verilen (Şekil 3.14) dizilmiş moleküllerle gelişigüzel moleküllerin karışımını içeren yapıdadır (Hollaway, 2008).

Kompozit yapının çekme yükü taşıma kapasitesinde reçinenin rolü küçüktür. Ancak, reçine seçiminin kompozit malzemenin basınç, tabaka içi kesme ve düzlem içi kesme özellikleri üzerine büyük etkisi vardır. Reçine, basınç yüklemesi altında lif burkulmasına karşı yanal destek sağlar, bu da kompozit malzemenin basınç

dayanımına doğrudan etki eder. Tabaka içi kesme dayanımı eğilme yüklerine maruz kalan yapılar için önemli bir tasarım kriteridir. Düzlem içi kesme dayanımı ise burulma yükleri altında önemlidir. Hasar toleranslı yapılar tasarlarken lifler ve reçineler arasındaki etkileşim de önemlidir (Mallick, 2008).



Şekil 3.13: Polimer moleküllerindeki tekrarlanan ünitelere örnekler. (a) Bir polipropilen molekülü (b) Bir naylon 6,6 molekülü.



Şekil 3.14: Polimerlerdeki molekül düzeni (a) amorf polimerler ve (b) yarı-kristalit polimerler.

Termoplastik polimerlerde bireysel moleküller birbirlerine kimyasal olarak bağlı değildirler (Şekil 3.15). Bunun yerine zayıf van der Waals bağları ya da hidrojen bağları gibi ikincil bağlar ya da molekül içi kuvvetler ile bir arada dururlar. Isının uygulanması ile katı termoplastik polimerdeki bu ikincil bağlar geçici olarak koparılabilir. Bu durumda moleküller hareket edebilir hale gelir, üzerlerine basınç uygulanırsa konfigürasyon değiştirebilirler. Soğuma ile birlikte ikincil bağlar geri gelir ve moleküller yeni konfigürasyonlarını korurlar böylece yeni katı bir şekil ortaya çıkmış olur. Bu sebepten bir termoplastik polimer ısıtılarak yumuşatılabilir, eritilebilir ve yeniden şekillendirilebilir. Bu işlem arzu edildiği miktarda tekrarlanabilir.

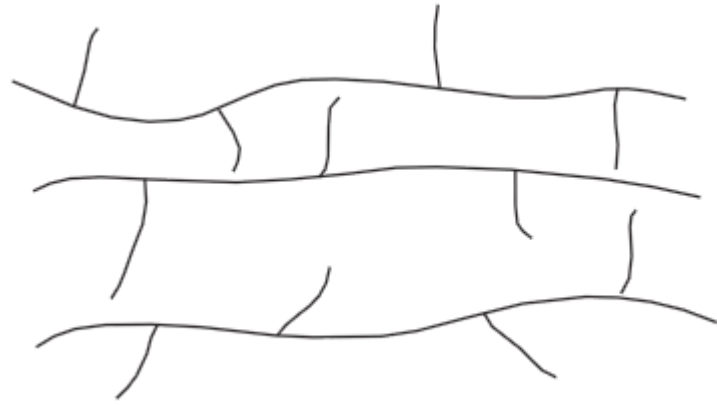
Diğer yandan termoset polimerlerde moleküller birbirleri ile kimyasal çapraz bağlar ile bağlanarak, rijit üç-boyutlu bir yapı oluşturur. Kürleme reaksiyonu olarak da bilinen polimerizasyon reaksiyonu sırasında bu çapraz bağlar bir kez oluştuktan sonra ısı uygulaması ile eritilemezler. Ancak eğer çapraz bağ sayısı az ise yüksek sıcaklıklarda yumuşama ihtimali vardır (Mallick, 2008).

Katı polimerlerin mekanik özellikleri sıcaklığa ve yükleme hızına doğrudan bağlıdır (Şekil 3.16, 3.17). Düşük sıcaklıklarda gerilim-deformasyon davranışı gevrektrir, akma gözlenmez. Sıcaklık arttıkça akma gerçekleşebilir ancak akma direnci sıcaklık artışıyla düşer. Düşük yükleme oranları ve uzun yüklemelerde polimer düktil davranırken tersi durum için tersi söz konusudur. Polimerlerin termal tepkileri işlenmelerinde, özelliklerinde ve davranışlarında büyük rol oynar. Metaller gibi saf kristal katılar, erime sıcaklığı (T_m) adı verilen geçiş sıcaklığında katıdan sıvı hale dönüşürler. Erime sıcaklığı saf kristal bir katıda mümkün olan tek geçiş sıcaklığıdır. Polimerler kristal olmayan amorf bölgeler içeren yarı kristal yapıda katılar olduklarından erime sıcaklığından daha düşük sıcaklıklarda termal geçişler meydana gelebilir. Cam geçiş sıcaklığı olarak da bilinen (T_g) bu geçiş sıcaklığı erime sıcaklığının altında polimerin amorf bölgelerinde meydana gelir. Cam geçiş sıcaklığında polimerin fiziksel (yoğunluk, ısı kapasitesi) ve mekanik (rijitlik, sönümleme) özellikleri değişime uğrar. Sıcaklık düşük bir seviyeden cam geçiş sıcaklığına ulaştığında polimer rijit formdan (camsı olarak bilinir) viskoz forma

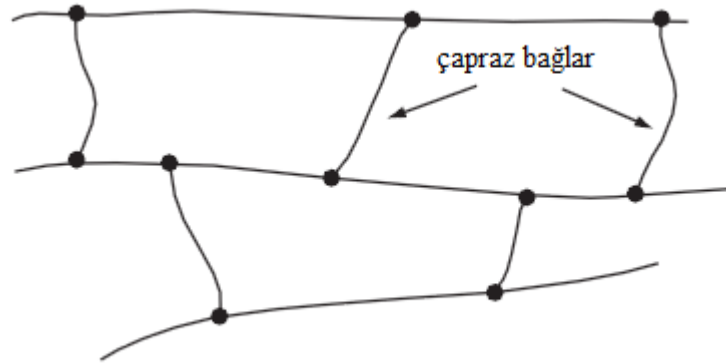
(lastiksi) dönüşür, tersi durumda ise tersi olur. Cam geçiş sıcaklığı, polimer üreticilerinin literatüründeki ısı bozunma sıcaklığı ya da ısı sapma sıcaklığına benzetilebilir. Tam aynı olmasa da bu üç sıcaklık 10°C 'lik bir fark içerisindedir ve aynı fiziksel fenomeni tanımlamada kullanılır. Hem termoplastik hem de termoset polimerlerin cam geçiş sıcaklıkları vardır. Bir termoplastik polimer erime sıcaklığında sıvılaştırken termoset polimer erime sıcaklığında ayrışır. Erime sıcaklığının üzerinde ise termoset ve termoplastik polimer oksijen-zengin atmosferde pirolize olur.

Yapılarda lifli polimer kompozitler cam geçiş sıcaklıklarının altında rijit durumlarında kullanılmak zorundadırlar. Cam geçiş sıcaklıklarının üzerinde reçinenin modülü dolayısıyla da lifli polimer kompozitin modülü düşer. Deformasyon kriteri yapısal mühendislik tasarımında rutin olarak kullanıldığından, lifli polimer parça cam geçiş sıcaklığına yakın sıcaklıklarda servis dışı hale gelebilir. Ek olarak lifli polimer parçanın cam geçiş sıcaklığının üzerinde dayanımı da düşer. Diğer yandan, asfalt bağlayıcılarında kullanılan elastomerik polimerler cam geçiş sıcaklıklarının üzerinde viskoz durumlarında kullanılır. Bu polimerler cam geçiş sıcaklıklarının altında gevrek hale gelirler ve kırılırlar.

Polimer reçineleri iyi yalıtıkcıdır, ısı ve elektriği iletmezler, düşük boşluk oranlarına sahiptirler. Polimer kompozitin boşluklarındaki su elektriği iletmesini sağlayabilir. Elektrik endüstrisinde kullanılan cam lifli polimer parçalarda boşluk oranları konusunda katı limitler vardır (%1'den az). Polimer reçineleri izotropik viskoelastik olarak kabul edilir. Sürekli yük ve gerilim altında sünerler ve sabit deformasyonlar altında gevşerler. Polimer reçinelerin çoğu ultraviyole ışıktan bozunmaya müsaittir. Termoset polimer reçineleri 180°C üzerindeki sıcaklıklarda ve eğer çelik yapı elemanlarındakilere benzer bir koruma uygulanmamışsa yangında kullanıma elverişli değildir. Yangına karşı koruyucu katkıları kullanıldığında polimer malzemelerin kabul edilebilir tutuşma oranlarında kaldığı görülmüştür. Termoplastik polimerleri 450°C 'ye kadar yüksek sıcaklıklar için geliştirilmiştir. Çoğu sıvı polimer reçinelerinin 6 ila 12 ay raf ömrü vardır ve 10 ile 15°C gibi soğuk sıcaklıklarda saklanmaları gerekir (Bank, 2006).

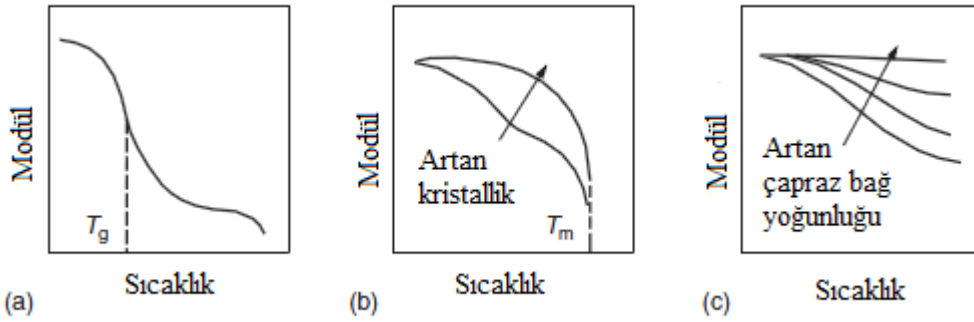


(a)

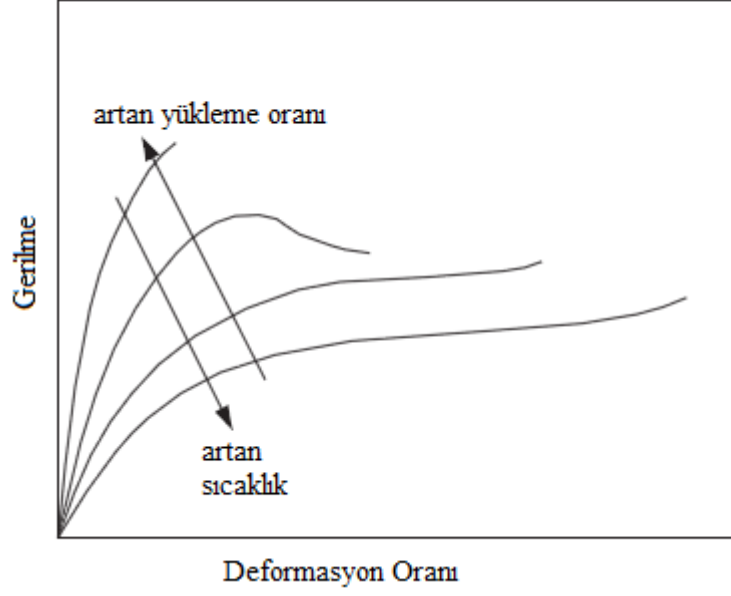


(b)

Şekil 3.15: Şematik gösterim (a) termoplastik polimer ve (b) termoset polimer.



Şekil 3.16: Üç farklı tipteki polimer için çekme modülünün sıcaklıkla değişimi (a) amorf termoplastik, (b) yarı-kristalit termoplastik ve (b) termoset.

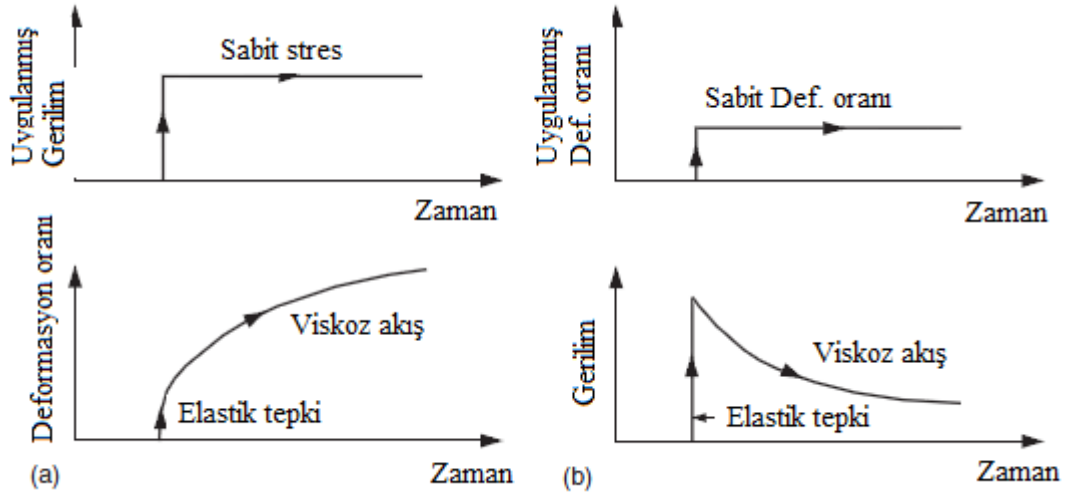


Şekil 3.17: Yükleme oranı ve sıcaklığın katı polimerlerin gerilim-deformasyon davranışına etkileri.

Katı polimerlerin viskoelastik karakterleri en iyi şekilde sünme ve gerilim-gevşeme deneyleri ile gösterilir. Sünme deneylerinde numuneye sabit bir gerilim uygulanırken deformasyon oranı zamana bağlı bir fonksiyon olarak gözlemlenir. Polimer sündükçe deformasyon oranı zamanla artar. Gerilim-gevşeme deneyinde ise numuneye sabit bir deformasyon oranı uygulanırken zamanın bir fonksiyonu olarak gerilim gözlemlenir. Gerilim-gevşeme deneyinde gerilim zamanla düşer. Bu deneyler arzu edilen sıcaklıklar altında yapılır. Tipik sünme ve gerilim-gevşeme diyagramları Şekil 3.18'de verilmiştir. Genel olarak termoset polimerler termoplastiklere göre daha düşük sünme ve gerilim-gevşeme davranışları gösterirler.

Reçine seçiminde öncelikli olarak göz önünde bulundurulanan konu mekanik özelliklerdir. Yüksek performanslı kompozitler için en çok arzu edilen reçine mekanik özellikleri aşağıda sıralanmıştır.

1. Yüksek çekme modülü, kompozitin basınç dayanımı doğrudan etkiler.
2. Yüksek çekme dayanımı, kompozit tabakasının çatlamasını kontrol eder.
3. Yüksek çatlama sertliği, katmanların ayrışmasını ve çatlak büyümesini kontrol eder.



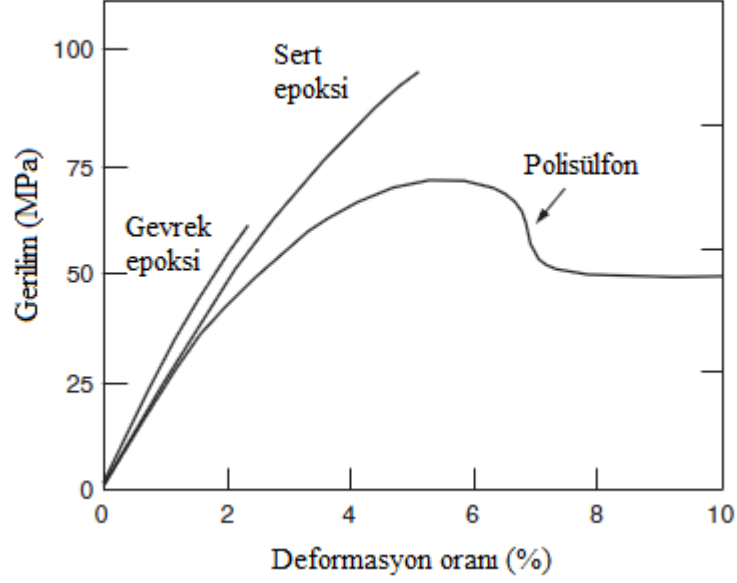
Şekil 3.18: Katı polimerlerin (a) sünme ve (b) gerilim-gevşeme davranışları.

Yüksek sıcaklıklarda boyutsal stabilite ile neme ve kimyasallara karşı direnç gibi özelliklerde göz önünde bulundurulur. Yüksek sıcaklıklarda boyutsal stabilite, polimerin yüksek cam geçiş sıcaklığına sahip olmasını gerektirir. Uygulamada cam geçiş sıcaklığının kompozitin servis vereceği maksimum sıcaklıktan yüksek olması gerekir. Nem ve kimyasallara olan direnç ise polimerin sıcak ve nemli ortamlarda ya da kimyasallar ile temas ettiğinde çatlamamasına ve bozulmamasına bağlıdır.

Lifli polimer profillerde geleneksel olarak matris seçimi termoset polimerlerden yana yapılır. Termoset polimerlerin kürlenmesinde kullanılan başlangıç malzemeleri düşük viskoziteli düşük moleküler ağırlıklı sıvı kimyasal malzemelerdir. Kürlenme reaksiyonu başlamadan önce lifler reçinenin içerisinde çekilir ya da reçineye batırılır. Kürlenme sırasında reçinenin viskozitesi düşük olduğu için ısı ve basınç takviyesi kullanmaya gerek kalmadan liflerin iyice ıslanması mümkün olur. Lif yüzeyinin yeterli şekilde ıslanması nihai kompozitin mekanik özellikleri açısından aşırı derece önemlidir. Termoset reçineleri kullanmanın diğer avantajları arasında onların termal stabiliteleri ve kimyasal dirençleri vardır. Termoplastik reçinelere göre aynı zamanda daha az sünme ve gerilim-gevşemesi sergilerler. Dezavantajları ise aşağıda sıralanmıştır.

1. Oda sıcaklığında sınırlı stok ömrü (nihai şekilden önce).
2. Kürlenme süresinin uzunluğu (sıvıdan katıya geçiş süreci).

3. Düşük göçme deformasyon oranı (Şekil 3.19), bu durum aynı zamanda termoset reçinelerin darbe dayanımını düşürür.



Şekil 3.19: Termoset polimeri epoksi ile termoplastik polimeri polisülfonun çekme gerilim-deformasyon diyagramları.

Termoplastik polimerlerin termoset polimerlere göre en büyük avantajı darbe dayanımları ve çatlama dirençleridir. Buda kullanıldıkları kompozit malzemeye mükemmel hasar toleransı kazandırmalarını sağlar. Genel olarak termoplastik polimerler daha yüksek göçme deformasyon oranlarını sahiptirler, buldukları kompozit malzemenin mikro çatlaklara olan direncini artırırlar. Termoplastik polimerlerin diğer avantajları aşağıda sıralanmıştır.

1. Oda sıcaklığında sınırsız depolama ömrü (rafta).
2. Daha kısa imalat süresi.
3. Sonradan şekillendirilebilme.
4. Kaynatma ve kimyasal yapıştırma gibi birçok yöntemle daha kolay birleştirilebilme ve tamir edilebilme.
5. Kolay tutulma (pürüzsüzlük).
6. Geri dönüştürülebilme ve tekrar işlenebilme.

Bu denli ciddi avantajlara rağmen sürekli lifli termoplastik reçineli kompozitlerin gelişimi termosetlere oranla daha yavaş ilerlemektedir. Yüksek viskoziteleri yüzünden sürekli liflerin termoplastik reçine ile kaplanması zordur. Naylon ve polikarbonat gibi ticari mühendislik termoplastik polimerleri düşük sünme dirençleri ve termal stabiliteleri yüzünden yapısal uygulamalarda ilgi çekmemektedir. Yakın zamanda yüksek ısı direnci gösteren bir dizi termoplastik polimer geliştirilmiştir (Tablo 3.7) ve bunlar uzay uygulamalarının ilgisini çekmeyi başarmışlardır (Mallick, 2008).

Tablo 3.7: Bazı polimer reçineleri için maksimum servis sıcaklıkları.

Polimer	T_g (°C)	Maksimum servis sıcaklığı (°C)
<i>Termosetler</i>		
DGEBA epoksi	180	125
TGDDM epoksi	240-260	190
BMI	230-290	232
ACTP	320	280
PMR-15	340	316
<i>Termoplastikler</i>		
PEEK	143	250
PPS	85	240
Polisülfon	185	160
PEI	217	267
PAI	280	230
K-III polimid	250	225
LARC-TPI polimid	265	300

3.2.1 Doymamış poliester reçine

Poliester reçine yapılarında kullanılmak üzere lifli polimer profillerde yaygın olarak kullanılır, bir termoset reçinedir. Lifli polimer parçalarda daha yüksek korozyon direnci istendiğinde yüksek fiyatlı vinilester reçineleri tavsiye edilir, ancak bazı poliester reçinelerin korozyon direnci vinilester reçineler kadar iyi olabilir. Poliester reçineleri yapıların lifli polimer güçlendirmelerinde de kullanılabilir. Ancak, lifli polimer güçlendirme uygulamalarında günümüzde yapışkan özellikleri, düşük büzülme ve dış etkilere olan dayanıklılıkları dolayısıyla epoksi reçineleri tercih edilmektedir.

Doymamış poliester reçinesi, imalat endüstrisinde ve ticari lifli polimer kompozit parçalarda en yaygın kullanılan reçine sistemidir. Doymamış olarak tanımlanmasının sebebi polimer zincirlerinde çift-kovalent bağlarının hidrojen atomlarıyla doyurulmamasından kaynaklanır. İlk doymamış poliester reçine 1940 yılında Eliis ve Rust tarafından üretilmiştir.

Poliester reçineleri çok yönlüdür, kolaylıkla renklendirilebilir. Farklı üretim süreçlerine ve son kullanım koşullarına uygun özelliklere sahip olacak şekilde yüzlerce farklı şekilde formüle edilebilirler. Kullanılan formüle ve katalizöre göre poliester reçineler oda sıcaklığında ya da daha yüksek sıcaklıklarda uygulanabilir, bu durumda 40 ila 110°C cam geçiş sıcaklıklarına sahip olabilirler. Poliester reçineleri genelde şeffaf ve yeşilimsi renktedir (Bank, 2006).

Poliester reçineleri sertten gevreğe, yumuşaktan esneğe birçok farklı özellik gösterecek şekilde formüle edilebilirler. Avantajları düşük viskoziteleri, hızlı kürlenme süreleri ve düşük maliyetleridir. Özellikleri ise (Tablo 3.8) genellikle epoksilerden düşüktür. Epoksilere göre başlıca dezavantajları yüksek hacimsel büzüşme oranlarıdır, reçine ve lifler arasındaki büzüşme farklılıkları yüzünden yüzeyde istenmeyen gerilmeler ortaya çıkar (çukur izleri). Otomobil gövde panelleri gibi mükemmel yüzey istenen uygulamalarda çukur izleri sorun yaratır. Bu yüzey kusurlarını iyileştirmenin bir yolu termoplastik içerikli düşük büzüşmeli bir poliester reçine kullanmaktır (Mallick, 2008).

Tablo 3.8 Termoset poliester reçinelerin oda sıcaklığındaki bazı özellikleri.

Yoğunluk (g/cm³)	1.1~1.43
Çekme dayanımı (MPa)	34.5~103.5
Çekme modülü (GPa)	2.1~3.45
Uzama (%)	1~5
Kürleme büzüşmesi (%)	5~12

Günümüzde inşaat endüstrisindeki yerini yavaş yavaş vinilester reçinelerle bırakmaktadır. Yaygın olarak kullanılan iki tip poliester reçine vardır; bunlar ortopitalik ve izopitalik reçinelerdir. İlki en yaygın kullanılanıdır ancak termal stabilitesi ve kimyasal direnci düşüktür. İzopitalik reçineler ise çok yüksek kalitede ve daha yüksek termal stabilite ve kimyasal dirence sahiptir. Üçüncü bir poliester tipi

olan bisfenol A, otopilatik ve izopilatik reçineden daha kalitelidir. Daha serttir, daha yüksek termal ve kimyasal dirence sahiptir ve bir seviyeye kadar tutuşma direnci gösterir. Tablo 3.9’da poliester reçinelerin genel özellikleri verilmiştir (Hollaway, 2008).

Tablo 3.9: Poliester reçinelerin genel özellikleri.

Genel Özellikler	Genel Fiziksel Özellikler
Vinilester ve epoksiye göre daha ucuzdur.	Oda sıcaklıklarında kürlenebilir.
Genellikle düşük lif hacim oranlı kompozitlerde kullanılır.	Kürleme reaksiyonu ayarlanabilir.
En yaygın olarak cam lifleri ile kullanılır.	Büyük ve kompleks yapıların imalatında kullanılabilir.
Kürlemeyi başlatmak için katalizör ve hızlandırıcı eklenir.	Kürleme sırasında yüksek oranda büzüşür (%7-8).
Kürleme sırasında sitren yayar.	Bir miktar kimyasal direnci vardır ancak vinilester kadar iyi değildir.
Yayıdığı emisyonlar yüzünden reçineye karşı çevresel kanunlar sıkılaşımaktadır.	
Daha düşük emisyonlu reçineler geliştirilmiştir ancak bunlarla çalışması daha zordur.	

3.2.2. Epoksi reçineleri

Epoksi reçineleri birçok yapısal lifli polimer üründe kullanılmaktadır. Çoğu yapısal lifli polimer şerit epoksi reçineleri ile yapılır. Ek olarak güçlendirme sürecinde bu şeritlerin betona yapıştırılmasında kullanılır. Ayrıca güçlendirme uygulamalarının bazılarında kuru lifli kumaşa uygulamak suretiyle hem şeridin matrisini oluşturur hem de güçlendirilecek bölge ile olan aderansı sağlar. Epoksi reçineleri aynı zamanda önerilmeli beton için lifli polimer tendon imalatında ve asma köprülerdeki taşıyıcı lifli polimer kablolarda kullanılır. Büyük lifli polimer pultrüzyon parçaların imalat süreçlerine dahil edilmelerindeki zorluk ve yüksek fiyatları yüzünden büyük profillerde nadiren kullanılır.

Bir epoksi reçinesi hidroksil gruplarıyla etkileşen bir veya daha fazla epoksit gurubu içerir. Epoksi, reçine ve sertleştirici katkısı olarak iki parçadan oluşur ve bu ikisi

belirli oranlarda karıştırılır (genelde 1 parçaya 2 ila 3 parça). İlk epoksi reçinesi 1939'da Schlack tarafından üretilmiştir.

Epoksi reçineleri çok yönlüdür, lifli polimer kompozit malzemelere matris olacak şekilde ya da yapıştırıcı olacak şekilde formüle edilebilirler. Yapısal lifli polimer parçalarda reçine olarak kullanılan epoksiler, beton çatlak enjeksiyonlarında, ankraj uygulamalarında ya da prefabrik beton elemanların yapışmasında kullanılanlar ile aynı ailedendir. Epoksi reçineleri mükemmel korozyon direncine sahiptir ve uygulandıklarında poliestere ve vinilestere göre daha az büzülürler. Termal yükler altında çatlamaya daha az müsaitlerdir. Epoksi reçineleri 180°C ve üstü gibi yüksek sıcaklık uygulamaları için geliştirilmiştir ve 50 yıldır uzay endüstrisinin termoset reçine tercihidir. Epoksi reçinesi oda sıcaklığında ya da yüksek sıcaklıkta sertleşebilir. Birçok uzay uygulamasında, cam geçiş sıcaklıklarının yükselmesi ve fiziksel ve mekanik özelliklerinin iyileşmesi için yüksek sıcaklıklarda uygulanır. Epoksi reçinesinin cam geçiş sıcaklığı formülüne ve uygulama sıcaklığına bağlıdır ve 40 ila 300°C arasında değişebilir. Epoksi reçineleri genellikle sarımsı renktedir (Bank, 2006).

Epoksi reçinesinin diğer termoset reçinelere göre avantajları aşağıda sıralanmıştır.

1. Birçok sayıda başlangıç malzemesi, kütleme ajanı ve modifiye ediciler kullanılabilirdiğinden nihai özelliklerde geniş ölçekte çeşitlilik.
2. Kütleme sırasında uçucu yanıcı madde açığa çıkmaması.
3. Kütleme sırasında düşük büzülme.
4. Kimyasallara karşı mükemmel, ısıya karşı yüksek direnç.
5. Birçok lifle ve birçok diğer malzeme ile mükemmel aderans.
6. Yüksek dayanım ve boyutsal stabilite.

Epoksi reçinelerinin başlıca dezavantajları nispeten yüksek maliyetleri ve uzun kürlenme süreleridir. Epoksi reçinelerinin bazı özellikleri Tablo 3.10 ve 3.11'de verilmiştir (Hollaway, 2008).

Tablo 3.10. Epoksi reçinelerin oda sıcaklığındaki bazı özellikleri.

Yoğunluk (g/cm³)	1.2~1.3
Çekme dayanımı (MPa)	55~130
Çekme modülü (GPa)	2.75~4.10
Poisson oranı	0.2~0.33
Kürleme büzüşmesi (%)	1~5

Tablo 3.11. Epoksi reçinelerin genel özellikleri.

Genel Bilgiler	Genel fiziksel özellikler
Yapısal uygulamalarda en yaygın kullanılan reçinedir. Genellikle temel reçine ve sertleştirici olarak iki kısma ayrılır. Karışım oranları üreticilere göre değişir ve dikkatle uygulanmalıdır.	Formülasyon çeşidi çoktur. Özel uygulama ve kürleme koşullarına adapte edilebilir. Daha yüksek performans için yüksek sıcaklıklarda art-kürleme gerekir. Diğer reçinelere göre mükemmel mekanik özelliklere ve kimyasal dirence sahiptir. Yüksek sıcaklıklardaki performansın diğer reçinelere göre mükemmeldir. Kürleme sırasında düşük büzüşme oranına sahiptir (%2~3).

3.2.3. Vinilester reçineleri

Son 20 yılda geliştirilmiştir, özellikle kolay imal edilebilmeleri ve korozyon dirençleri gibi iyi özellikleri ile yapısal lifli polimer ürün piyasasında popüler olmuştur. Bugün, vinilester reçineleri lifli polimer donatı çubuklarında çoğunlukla ve lifli polimer pultrüzyon profillerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Çoğu pultrüzyon profil üreticisi profil serileri için hem poliester hem de vinilester seçenekleri sunmaktadır. Vinilester reçineleri lifli polimer güçlendirme şeritleri ve yüzey aplikasyonları için lifli polimer çubuk imalatında da kullanılmaktadır. Yapısal lifli polimer ürünlerde alkali ortamlardaki olumsuz etkilere karşı olan dayanımlarıyla poliester reçinelerin yerini almaktadırlar. Vinilester reçinelerin genel özellikleri Tablo 3.13’de verilmiştir.

Vinilester reçineleri renklendirilebilir. Cam geçiş sıcaklıkları 40 ila 120°C arasındadır. Oda sıcaklığında ya da daha üst sıcaklıklarda uygulanabilir. Vinilester reçineleri poliester gibi şeffaf ve yeşilimsi renktedir (Bank, 2006).

Vinilester reçinesi epoksi ile doymamış poliester reçinesinin karışımıdır ve bazen epoksi vinilester reçinesi ya da modifiye epoksi reçinesi olarak da anılır. Epoksi ve akrilik ester monomerden üretilen doymamış bir polimerdir. Epoksi reçinesinin arzu edilen fiziksel özelliklerine ve poliester reçinesinin arzu edilen işleme özelliklerine sahiptir. Epoksi reçinesinin mükemmel kimyasal direnç ve çekme dayanımını, doymamış poliester reçinenin ise düşük viskozite ve hızlı kürlenme özelliklerini almıştır. Ancak hacimsel büzüşme değerleri (%5~10) epoksiye göre yüksektir (Tablo 3.12). Ayrıca epoksi reçineleri ile kıyaslandıklarında orta derece aderans sergilerler (Hollaway, 2008).

Tablo 3.12: Vinilester reçinelerin oda sıcaklığındaki bazı özellikleri.

Yoğunluk (g/cm³)	1.12~1.32
Çekme dayanımı (MPa)	73~81
Çekme modülü (GPa)	3~3.5
Uzama (%)	3.5~5.5
Kürleme büzüşmesi (%)	5.4~10.3

Tablo 3.13: Vinilester reçinelerin genel özellikleri.

Genel Bilgiler	Genel Fiziksel Özellikler
Epoksi temellidir ancak kürlenmesi poliester gibidir.	Bütün polimer kompozitlerde olduğu gibi art kürlenme yapılmalıdır.
Poliesterlere göre gelişmiş mekanik özelliklere sahiptir.	Yüksek sitren içeriklidir ve kürlenme sırasında verir.
Mükemmel kimyasal dirence sahiptir.	Poliesterlerden pahalıdır.
Kürlenme sırasında yüksek seviyede büzüşür.	Yaygın olarak zor ve kimyasal koşullarda servis verecek lifli polimer bileşenlerde kullanılır.

3.2.4. Fenolik reçineler

Fenolik reçineler en eski ve en yaygın kullanılmış termoset reçinelerdir, ancak yapısal lifli polimer ürünlerde donatılabilirlik gibi bazı zorluklar yüzünden yeni yeni kullanılmaya başlanmıştır. Leo Baekeland tarafından 1900'lerin başında bulunmuştur. Ahşap tozu ile birleştirildiğinde bakalit adı verilir. 1980'lere kadar 150 ila 300°C gibi yüksek sıcaklıklarda uygulanmak zorundaydı. Plywood ve diğer ahşap yapı ürünlerinde geniş çapta kullanılmaktadır. Yapısal lifli polimer ürünlerde kullanımları mükemmel yangın dirençleri yüzündendir. Donatılabilirlik ancak zor renklendirilir, karakteristik kahverengimsi renktedir. Yoğunlukları 1.5 ila 2g/cm³

arasındadır. Cam geçiş sıcaklıkları 220 ila 250°C arasındadır. Şimdilik sınırlı sayıda lifli polimer üründe kullanılmaktadır. Denizaşırı platformlarda korkuluk ve ahşap yapılar için güçlendirme şeritleri kullanım alanlarının bazılarıdır.

3.2.5 Poliüretan reçineler

Termoset poliüretan reçineler yapısal reçine pazarına yakın zamanda sunulmuştur. İlk defa 1930'larda Otto Bayer tarafından üretilmiştir. Uzun üretan molekülleri içerir. Termoplastik formüle edilmiş formları izolasyon ve yapısal polimer köpük ürünlerde yıllardır kullanılmaktadır. Yakın zamanda reçine kalıplama ve pultrüzyon operasyonları için yüksek yoğunluklu formları üretilmiştir. Poliüretan reçineleri çok serttir ve cam lifleri ile kullanıldıklarında liflere dik yönde yüksek çekme dayanımı ayrıca darbe dayanımı ortaya çıkar.

2.2.6 Diğer polimer reçineler

Poliyeten, polipropilen ve naylon yapısal lifli polimer parça üretiminde çok sınırlı ölçüde kullanılmaktadır. PEEK, PPS ve PI termoplastik reçine tabanlı reçinelerdir, yüksek-sıcaklıklı uzay kompozitleri pazarında kullanılmaktadır. Yapısal mühendislikte termoplastik reçine sistemleri kullanımına olan ilgi, ısıtılıp yumuşatılıp tekrar şekillendirilebilme yetenekleri sonucunda parçalara lokal ısıtma ile birleşme potansiyeli kazandırmasından kaynaklanır (metallerin kaynaklanması gibi). Ek olarak termoset reçinelere göre daha ucuz ve geri dönüşümlüdürler. Ancak işlenmesi daha zordur ve termosetlere göre genelde daha düşük dayanım ve rijitlik gösterirler. Buna karşın olarak termosetlere göre daha büyük uzama kapasiteleri vardır, dolayısıyla daha düktildirler (%20'ye kadar). Lifli polimer ürünlerde kullanılan termoset reçinelerin özellik karşılaştırması Tablo 3.14'de verilmiştir.

Yapısal LP ürünler asıl bileşenleri olan lif ve reçineden başka bileşenler de içerebilirler. Lifler yüzey kaplamaları ile üretilirler. Reçineler; dolgu, katalizör, priz hızlandırıcı, sertleştirici, renklendirici, ultraviyole stabilizatörleri, tutuşma geciktiricileri vs. gibi birçok katkı içerebilir (Bank, 2006).

Tablo 3.14 Termoset polimer reçinelerin yaklaşık özellikleri.

Termoset Reçine	Yoğunluk (g/cm³)	Çekme Modülü (GPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Maks. Uzama (%)
Poliester	1.2	4	65	2.5
Epoksi	1.2	3	90	8
Vinilester	1.12	3.5	82	6
Fenolik	1.24	2.5	40	1.8
Poliüretan	değişken	2.9	71	5.9

4. PULTRUZYON YÖNTEMİ

Lifli polimer yapısal kompozit malzemeler birçok yöntemle üretilmektedir. Sabit kesitli, uzun yapısal elemanların üretildiği sürekli bir kalıplama süreci olan pultruzyon yöntemi yapısal profillerin üretimi için kullanılan verimli bir yöntemdir. 1950’li yılların başında geliştirilmiştir. Pultruzyon yöntemi aynı zamanda lifli polimer donatı çubukları ve güçlendirme şeritleri üretiminde de kullanılır. Yüksek kaliteli lifli polimer parça üretiminde maliyet açısından en rekabetçi üretim yöntemidir. Tablo 4.1’de farklı yöntemler ile üretilmiş cam lifli kompozitlerin tipik çekme özellikleri verilmiştir (Hollaway, 2008).

Tablo 4.1: Farklı yöntemlerle üretilmiş cam lifli kompozitlerin tipik çekme özellikleri.

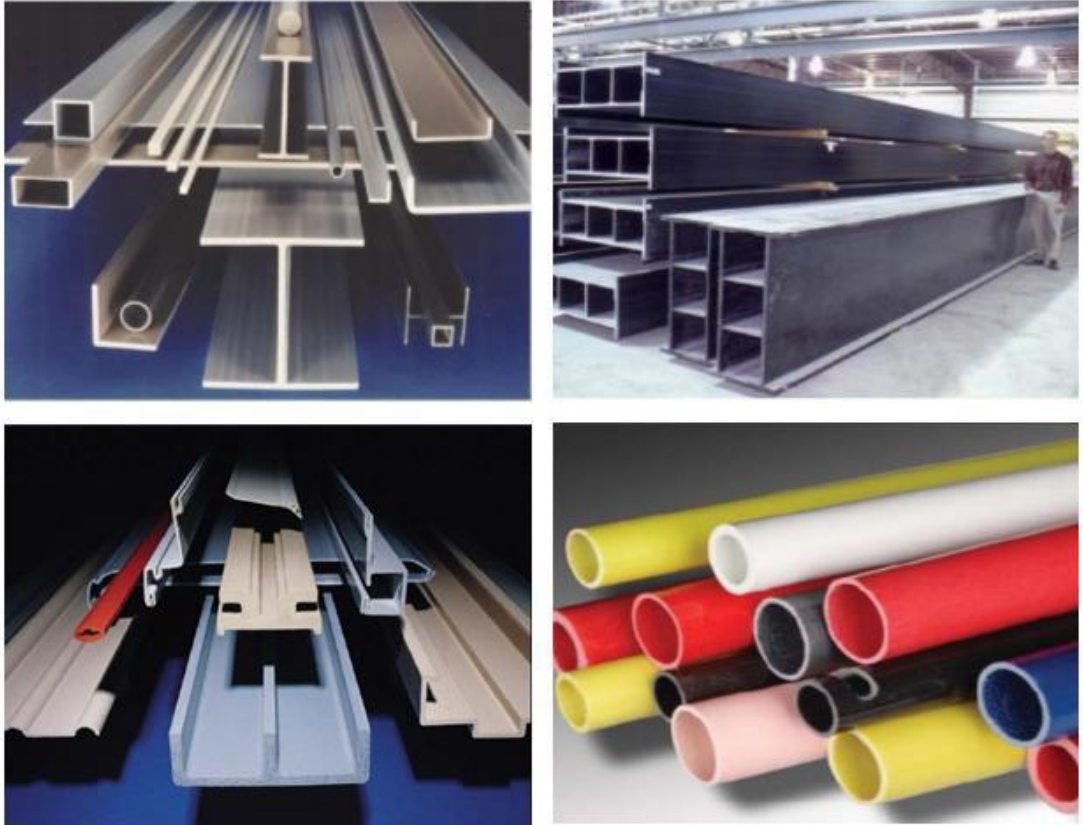
Üretim Metodu	Çekme Dayanımı (MPa)	Çekme Modülü (GPa)	Eğilme Dayanımı (MPa)	Eğilme Modülü (MPa)
Elle yatırma	62~344	4~31	110~550	6~28
Spreyleme	35~124	6~12	83~190	5~9
Reçine Transfer Kalıplama	138~193	3~10	207~310	8~15
İplik dolama	550~1380	30~50	690~1725	34~48
Pultruzyon	275~1240	21~41	517~1448	21~41

Bu yöntem ile yaygın olarak I, H (geniş flanşlı), kutu, boru, çubuk, plaka, köşebent ve kanal kesitli profiller üretilmektedir. Standart kesitli profillerin yanı sıra özel kesitli profillerde üretilir (Şekil 4.1). Kesitler geniş flanşlı ve köşebentte olduğu gibi açık, boruda ve kutuda olduğu gibi kapalı, çubukta olduğu gibi dolu ve çok gövdeli panelde olduğu gibi çok hücreli olabilir (Sarıbıyık, 2007).

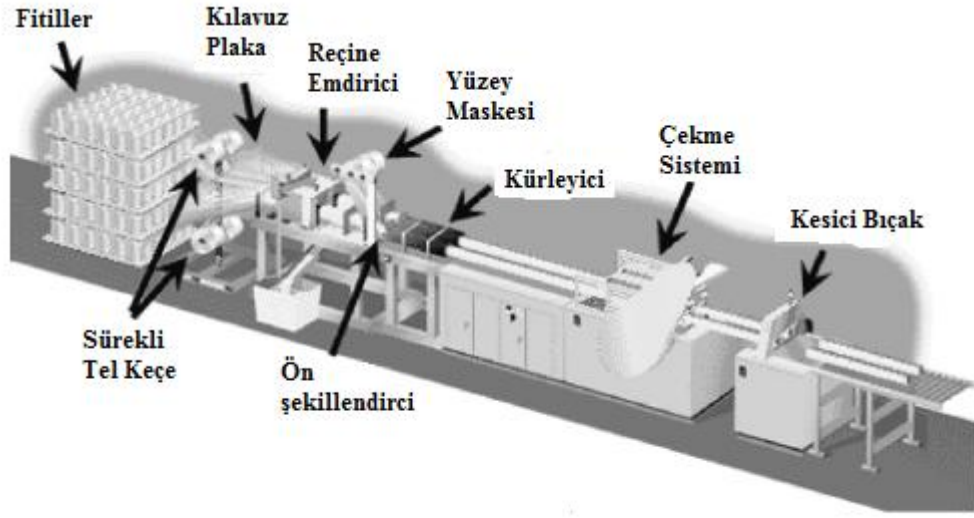
Kesitin sabit kalınlıkta olması gerekmemektedir. Kesitin şekli, kalınlık değişkenliği ve büyüklüğü konusunda büyük esneklik olmasına rağmen kesit, parça uzunluğu boyunca sabit kalmak zorundadır. Ek olarak parça düz olmak zorundadır, eğri şekil verilemez. Pultruzyon parça istenilen uzunlukta imal edilebilir ve nakliye sırasında kangal şeklini alabilecek kadar esnektir. Pultruzyon metoduna sabit olmayan kesitler

ve eğri parçalar üretebilmek için modifikasyonlar geliştirilmiştir ancak bunlar süreç için rutin olmayan değişkenlerdir. Bir başka yöntemde hücresel parçalarda boşluğu bir başka çekirdek malzemesi ile doldurmaktır.

Pultrüzyon parçayı üretmek için bir pultrüzyon hattı ya da makinesi kullanılır. Glastruder diye adlandırılan ilk pultrüzyon makinesi 1950'li yılların başında Brandt Goldsworthy tarafından geliştirilmiştir. 1959 yılında pultrüzyon makinesi ve pultrüzyon parça üretim yöntemi için Goldsworthy and Landgraf Amerika Birleşik Devletleri'nde patent aldı. Bugün pultrüzyon makineleri birçok üreticiden temin edilebilir ya da piyasada mevcut ürün ve malzemeler ile imal edilebilir. Tecrübeli pultrüzyon şirketleri kendi pultrüzyon makinelerini üretme yoluna gitmişlerdir. Tipik bir pultrüzyon makinesinin şeması Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.1: Pultrüzyon metodu ile üretilmiş lifli polimer profiller.



Şekil 4.2: Pultruzyon hattı.

Yapısal lifli polimer parçaları üretmek için düşük viskoziteli sıvı termoset polimer reçineye emdirilmiş kuru lifler, ısıtılmış krom kaplama çelik şekillendiriciye yönlendirilir. Burada istenilen lifli polimer parçayı oluşturmak için kürlenirler. Parça şekillendiricinin içinden çekme aparatı ile çekildikçe kürlenir. Ana işlemin birçok varyasyonu vardır. Şekillendiriciden geçip çekicilerden geçtikten sonra parça istenilen uzunlukta elmas bıçaklarla kesilir. Pultruzyon parçanın üretim hızı parçanın büyüklüğüne bağlıdır. 6mm çapında pultruzyon çubuklar 150mm/dk gibi bir hızla üretilebilirken çok hücreli kompleks parçaların üretim hızları dakikada birkaç santimetreyi bulabilir. Kesitin yüzey alanı büyüdükçe parçayı şekillendiriciden geçirmek için gereken çekme kuvveti artar. Tipik pultruzyon makinelerinin 50, 100 ve 200kN çekme kapasiteleri vardır.

Lifli polimer parçayı üretmek için kullanılan ısıtılmış çelik şekillendiricinin uzunluğu 500 ila 1000mm arasındadır. Elektrik dirençleri ile ya da yağ ısıyla ısıtılan şekillendirici genellikle uzunluğu boyunca iki veya üç farklı bölgede 90 ila 180°C arasında ısıtılır. Bu işlemin amacı kullanılan reçine sistemi için en iyi kürlenmenin sağlanmasıdır. Şekillendiricinin girişi erken kürlenmenin önlenmesi için soğutulur. Parçanın yüzeyinin pürüzsüz olmasının gerekmediği durumlarda (donatı çubuğu gibi) uzun bir şekillendirici kullanılmaz. Bunun yerine reçineye emdirilmiş lifler bir yüzükten geçirilerek uzun silindirik fırınlarda kürlenir. Çekme aparatı ve kesme

bıçağı fırınlardan sonradır. Kalın parçalar üretilirken, kürtleme sürecine yardımcı olsun diye parçalara şekillendiriciye girmeden önce periyodik olarak radyo-frekanslı ısınma uygulanır.

Kuru lifler rulo ve bobin gibi çeşitli formlarda tedarik edilir ve sürekli bir kaynak elde etmek için uç uca eklenir. Kuru lifler reçine banyosunda emdirilir, bu havuzlar açıktır ve sürekli doldurulur. Çoğu pultruzyon üreticisi planlanan ürün miktarı üretilene kadar makinelerine 24 saatlik sürekli devirler yaptırırlar. Sürecin doğru işleyip işlemediğini gözlemlemek için bir operatör yeterlidir. Pultruzyon hattını belirli bir parçaya göre ayarlamak, parçanın kompleksliğine göre birkaç saat ile birkaç gün arasında değişebilir, bu işlem için iki veya üç operatör yeterlidir. Hattın temizlenmesi genelde birkaç saat alır. Polimer reçinesine maruz kalan parçalar aseton ile temizlenir.

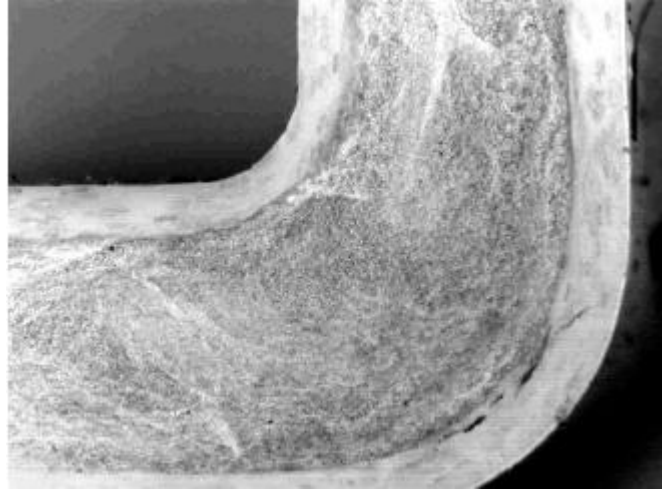
Pultruzyon sürecinde kullanılan iki temel sistem lif ve reçine sistemidir. Lif sistemi, reçine sistemi içerisine çekilen bütün kuru donatılardır. Reçine sistemi ise lifleri doyuran maddelerin karışımıdır. Reçine sistemi genelde pultruzyon hattındaki havuzlara pompalanmadan önce yaklaşık 200 litrelik kaplarda önceden karıştırılır (Bank, 2006).

4.1 Pultruzyon İçin Lif Sistemi

Pultruzyon ürünün ana bileşeni parça uzunluğu boyunca yönlendirilmiş sürekli tel fitillerdir. Tersine dayanımını arttırmak için yüzeye ya da yüzeye yakın bölgelere birkaç katman keçe ya da dokunmuş fitiller eklenir (Şekil 4.3). Bir pultruzyon elemandaki toplam lif içeriği ağırlıkça %70 kadar fazla olabilir. Ancak keçe ve dokunmuş fitillerin varlığı söz konusu olduğunda sadece tek yönlü lif tellerinden oluşan sisteme göre daha düşük boyuna dayanım ve modüle sahip olur. Sürekli tel fitillerin keçe ya da dokunmuş fitillere olan oranı parçanın mekanik özelliklerini belirler. Tablo 4.2'de pultruzyon yöntemi ile üretilmiş farklı lif oranlarına sahip poliester reçineli E-cam lifli tabakaların mekanik özellikleri verilmiştir (Mallik, 2008).

Tablo 4.2: Pultruziyon E-cam-poliester tabakaların mekanik özellikleri.

Lif oranı (% ağırlık)	70	60	50	40	30
Sürekli fitil oranı (% ağırlık)	38.8	28.8	18.8	18.8	16.1
Keçe oranı (% ağırlık)	31.2	31.2	31.2	20.8	13.9
Fitil-keçe oranı	1.24	0.92	0.60	0.90	1.16
Fitil ucu sayısı	79	58	38	29	33
Keçe katman sayısı	2	3	3	3	2
Keçe ağırlığı (oz)	1.5	1.5	1.5	1.5	1
Çekme Dayanımı (MPa)					
Boyuna	373.1	332.4	282.1	265.5	217.2
Tersine	86.9	93.1	94.5	84.8	67.6
Çekme Modülü (GPa)					
Boyuna	28.8	23.6	18.4	17.1	15.4
Tersine	8.34	9.31	8.55	7.1	5.24
Eğilme dayanımı (MPa)					
Boyuna	412.4	375.9	325.5	338.6	180.7
Tersine	204.1	199.3	220	181.4	169



Şekil 4.3: Pultruziyon kutu profil, keçe ve fitil katmanları.

Kuru lifler, pultruziyon şekillendiricisine belli bir düzende girerler. Yüksek yoğunluklu polietilen veya teflon ile kaplı delikli veya yarıklı plakalar ya da vinil borular liflere reçine banyosuna oradan da şekillendiriciye doğru kılavuzluk ederler. Kılavuzlar aynı zamanda şekillendiriciye girmeden önce liflerden fazla emilmiş reçinenin alınmasını da sağlarlar. Profil ya da tabaka yapısında keçeler ya da kumaşlar simetrik alternatif tabakalar oluşturacak şekilde serilirler, böylece malzeme lamina mimarisine kavuşur. Şekil 4.3, 6.3mm kalınlığındaki bir pultruziyon kutu profilin köşesini göstermektedir. Dış kısımlarda keçe iç kısımda ise fitiller vardır.

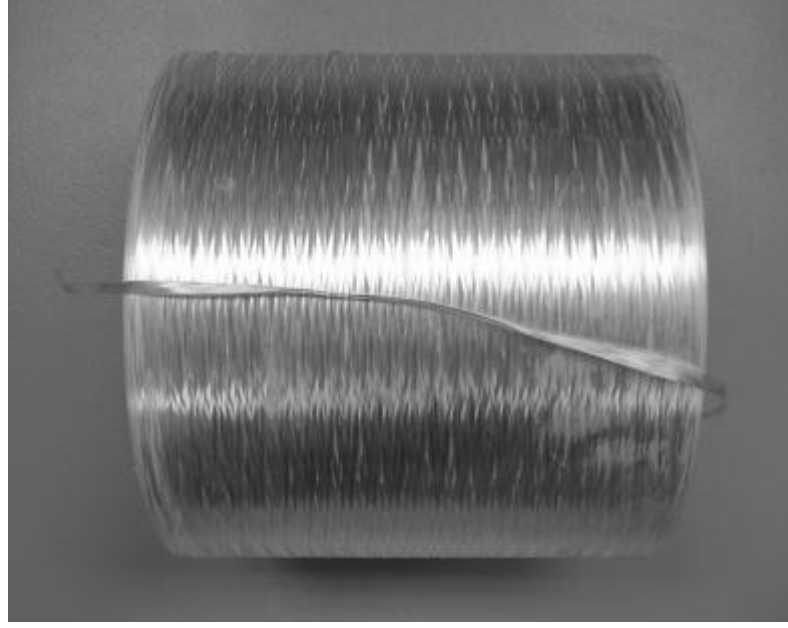
Çoğu lifli polimer pultruzyon parçada cam ve karbon lifler kullanılır. Pultruzyon parçalarda aramid lif kullanımı oldukça azdır. Cam lifleri pultruzyon profillerde düşük maliyetleri yüzünden yaygın olarak tercih edilir. Karbon lifleri güçlendirme şeritlerinde yüksek modülleri için kullanılır. Mekanik özellikleri ve fiyatları optimize etmek adına az sayıda da olsa karbon ve cam liflerinin bir arada olduğu profil ve şeritler üretilmiştir. Bu parçalara hibrit adı verilir. Tablo 4.3'te %65 boyuna lif oranlı epoksi reçineli farklı tipteki liflere sahip kompozitlerin tipik mekanik özellikleri verilmiştir. Parçaya dayanım ve rijitlik kazandıran güçlendirme liflerine ek olarak, parçanın yüzeyinde pürüzsüz bir yüzey oluşturmak için cam lifli yüzey maskeleri de kullanılır (Bank, 2006).

Tablo 4.3: Farklı tipteki liflere sahip epoksi reçineli kompozitlerin tipik mekanik özellikleri.

Lif Tipi	Spesifik Ağırlık	Çekme Dayanımı (MPa)	Çekme Modülü (GPa)
E-cam	1.9	760~1030	41
S-2-cam	1.8	1690	52
Aramid 58	1.45	1150~1380	70~107
Karbon (PAN)	1.6	2689~1930	130~172
Karbon (Zift)	1.8	1380~1480	331~440

4.2 Cam Lifinden Fitiller

Bireysel sürekli cam lifleri genelde burulmadan bir araya getirilir, fitil adı verilen bu lif yığınları pultruzyon sürecinde kullanılır. Amerika Birleşik Devletleri'nde fitiller randıman (yield) değerlerine göre tanımlanır. Fitilleri 56, 62, 113, 225, 250, 450, 495, 650 ve 675 randıman değerleri ile temin etmek mümkündür. Bir bireysel fitildeki lif sayısı kullanılan lifin çapına göre değişir. Pultruzyon parçalarda en çok kullanılan 113 randıman fitilde 2.4mm kalınlığında yaklaşık 4000 lif vardır. Şekil 4.4'de 113 randıman cam lifinden fitil gözükmektedir.



Şekil 4.4: 113 randıman cam fitil

Metrik sistemde ise fitiller TEX (g/km) değerlerine göre ayrılır. 113 randıman bir fitil 4390 TEX fitile eşdeğerdir. Bir lifin kesit alanı 1.729 mm²'dir. Denklem 4.1'den dönüşüm yapılabilir.

$$TEX(g/km) = \frac{496.238}{randıman (yd/lb)} \quad (4.1)$$

Makaralarda satılan fitiller yaklaşık 22kg gelir. Tipik olarak pultrüzyon sürecinde parçaya 10 ila 100 ayrı fitil çekilir. Bu fitiller makine yönü ya da boyuna yön diye de adlandırılan parçanın uzunluğu doğrultusunda kullanılır. Yapısal tasarımda bu yön, parçanın uzun eksenine doğrultusundadır. Fitiller parçanın aksenal ve eğilme dayanım ve rijitliğinin asıl kaynağıdır. Lifli polimer donatı çubuğu ya da güçlendirme şeridi gibi sadece boyuna dayanım ve rijitliğe ihtiyaç duyulan parçalarda %50 ila 60 gibi yüksek oranlarda fitil kullanılır. Ancak bu parçalar düşük tersine dayanım ve rijitliğe sahiptir. Tersine dayanım ve rijitlik elde etmek için pultrüzyon parçalarda fitillere ilave olarak keçe ve kumaşlar kullanılır. Polimer reçinesi pultrüzyon parçaya düzlem dışı kesme dayanımı kazandırır. Borumsu parçalar üretirken, cam lifli fitiller borunun çevresine etriye donatısı oluşturması için sarılabilir. Normal pultrüzyon parçalarda, düzlem dışı (parçanın kalınlığı boyunca) dayanım ve rijitlik veren üç boyutlu cam

donatılandırılması kullanılmaz. Tipik pultruzyon parçanın kalınlığı boyunca fitil ve keçe ya da kumaşlardan oluşan tabakamsı katmanlı yapısı vardır.

Pultruzyon süreci sırasında fitil makaraları elektrostatik yüklemeyi engellemek için topraklanmış metal askılara takılır. Fitiller makaralardan reçine banyosuna çekilir. Fitol genelde banyoya giren ilk donatı lifidir. Banyoda fitillerin birbirine temas etmemesine özen gösterilir. Temas halinde fitil tamamıyla reçine emmeyebilir.

4.3 Cam Lifinden Keçeler

Sürekli lif keçeleri pultruzyon sanayisinin kullandığı ikinci büyük cam lifi ürünüdür. Tabakamsı parçalarda tersine dayanım ve rijitlik kazandırır. Gelişi güzel yönlere bakan belirsiz uzunlukta sürekli cam liflerinin polimerik reçine ile bağlanmasından oluşur. 25 ila 50mm uzunluklu kısa liflerden oluşan kırılmış keçelerden farklıdır. Uygulanan çekme kuvvetleri yüzünden bir kumaş sistemi ile birlikte kullanıldıkları durum dışında kırılmış keçelerin pultruzyon sürecinde kullanımı uygun değildir. Sürekli lif keçeleri aynı zamanda fitillerin istenilen pozisyonda kalmasına yardımcı olur. Yapısındaki liflerin gelişi güzel yönlere bakması sebebiyle bulunduğu katman kendi düzleminde izotropik kabul edilebilir.

Sürekli lif keçeleri bugün birçok üretici tarafından üretilmektedir. Pultruzyonda E- ve A-cam keçeler kullanılır. A-cam keçeler daha düzgün yüzey için tercih edilir. Dayanım ve rijitlik içinse E-cam'lar kullanılır. E-cam keçeler 300 ila 900g/m² arasında değişir. A-cam keçeler ise 150 ila 450g/m² arasında tedarik edilebilir. Lifli keçeler genelde 7.5cm çapında 2m 'ye kadar uzunlukta karton tüpler içerisinde satılır. Keçeyi pultruzyonda kullanmak için geniş keçe rulosu parça için gerekli olan genişliklerde kesilir.

Pultruzyon operasyonunda keçeler fitillerden sonra reçine ile ıslatılır. Doymuş keçe ve fitiller şekillendiriciye girdiğinde sıkılırlar. Sıkma işlemi 550kPa civarında bir iç basınç oluşturur. Bu basınç keçe katmanlarını sıkıştırır. 300g/m² sürekli E-cam lif keçesi bitmiş pultruzyon parçada 0.5mm kalınlığında, 150g/m² A-cam ise 0.41mm

kalınlığında olur. E-cam keçenin yapısı itibariyle pultruzyon parçanın bulunduğu katmanında %20 ila 25 oranında lif içerir.

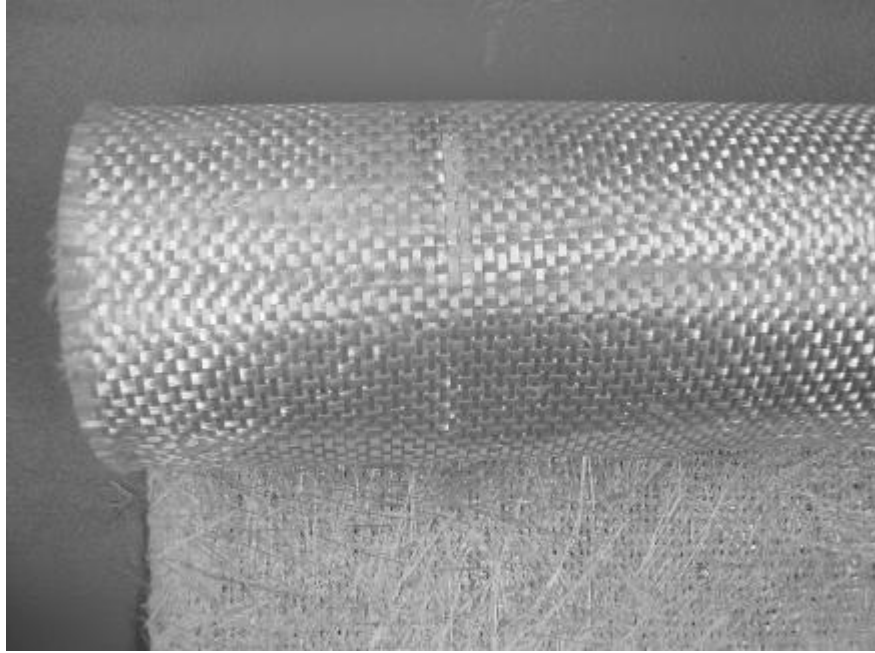
4.4 Cam Lifinden Kumaşlar

Tek yönlü fitiller pultruzyon kompozit malzemeye boyuna yönde donatılma, sürekli lif keçesi ise düzlem içerisinde her yönde eşit donatılma (izotropik) sağladığından sadece fitiller ve keçelerden oluşan pultruzyon kompozit malzemenin mekanik özellikleri sınırlıdır. Daha fazla özellik elde etmek için pultruzyon eksenli boyunca belirli yönlerde ve oranlarda kumaş donatılma uygulanabilir. Çok eksenli katmanların uygulandığı bu tasarım yaklaşımı elle yatırma yönteminde yaygındır, ancak son birkaç yıldır çok eksenli kumaşlar pultruzyon sürecine dahil edilebilmiştir. Eksen dışı bir tabaka çekmek (örn. pultruzyon yönüne 45°) ciddi bir meseledir ve lif yönlendirmesi bozulmadan bu işlemin yapılabilmesi için özel kumaşlara ihtiyaç vardır. Günümüzde mevcut olmasına rağmen çok eksenli kumaşlar çok özel pultruzyon parçalarda kullanılır. Maliyetleri keçelere göre yüksektir. Reçine ile doyurulmaları kolay değildir ve fitil ve keçeler kadar kolay çekilemezler. Ancak yeni nesil pultruzyon profillerin özelliklerini optimize etmek için çok eksenli kumaşların muhtemelen hibrit liflerle kullanılması ve karmaşık kesitlerin gerekliliği kompozit endüstrisi tarafından farkına varılmıştır. Strongwell tarafından köprü kirişleri için üretilen çift gövdeli hibrit profil buna bir örnektir (Şekil 4.5).

Pultruzyon için uygun olan cam lifli kumaş malzemeler iki tiptedir. Birincisi örgü diğeri dikişlidir. Örgü kumaşlar yaygın olarak tekne imalatı gibi elle yatırma uygulamalarında kullanılır, 200 ila 1600g/m² aralığında yoğunluklarda tedarik edilebilir. Lif yönleri 0° ve 90°'dir. 0° ve 90° liflerin oranı örgü modeline göre değişir. Pultruzyonda kullanılmak için üretilen birçok örgü kumaş iki yönde de yaklaşık aynı yüzdeye sahip olan düz veya kare modelidir. Pultruzyon işleminde örgü kumaş kullanırken çekildiğinde bozulmasını önlemek için cam keçeye tutturulmalıdır. Tuturma için tozla yapıştırma, poliester ile tuturma veya dikiş kullanılabilir. Örgü kumaş ve keçe ağırlığı kombinasyonu çok çeşitlidir. En çok kullanılan tipler 600g/m² örgü kumaş ile 300g/m² keçedir. Şekil 4.5'de örgü kumaş-keçe kombinasyonu görülmektedir.



Şekil 4.5: Çift gövdeli hibrit lifli pultruziyon kesit.



Şekil 4.6: Cam fitilli örgü-keçe kombine kumaş.

Pultruziyon için kullanılan diğer tip kumaş dikişli olanıdır. Tek yönlü fitiller kırılmış keçe ile veya keçesiz olarak farklı yönlerde birbirine dikilir. Popüler tipleri biekstenel (eşit oranlarda 0° ve 90° veya $+45^\circ$ ve -45° lif yönlü) ve trikseneldir (0° , $+45^\circ$ ve -45° yönlerde). $+45^\circ$ ve -45° lif doğrultuları pultruziyon parçaya yüksek düzlemsel kesme dayanımı ve rijitliği sağlar. Tek yönlü liflerin keçeye dikildiği kumaşlarda

temin edilebilir. Bunlar pultruzyon parçaya yüksek tersine dayanım ve rijitlik verilmesinin istendiği 90° lif yönlendirmesinin gerektiği durumlar için faydalıdır. Özel uygulamalar için dengesiz dikilmiş kumaşlar elde edilebilir. Şekil 4.7 dikişli kumaşa aittir.



Şekil 4.7: Dikişli cam lifli kumaş.

4.5 Karbon Lifli Halatlar

Karbon lifli halatlar pultruzyon sürecinde kullanılabilir. 1970'lerden bu yana oklar ve çubuklar gibi bazı özel ürünlerde kullanılmışlardır. Ancak yapısal pultruzyon profillerde kullanımları cam fitillerine göre pahalı olduklarından yaygın değildir. Geçtiğimiz yıllarda karbon lifle güçlendirilmiş epoksili pultruzyon lifli polimer güçlendirme şeritlerindeki kullanımları artmıştır. Halattaki karbon lifi sayısı için TEX değerlerine bakılır. Lif sayısı halatta 1000 ila 48,000 arasında değişir, ancak son yıllarda 300,000'e kadar lif barındıran halatlar üretilmiştir. TEX değeri, kesit alanı ve lif yoğunluğu arasındaki bağıntı denklem 4.2 ve 4.3 deki gibidir.

$$TEX(g/km) = \text{halat boyutu}(K) \times A_l(\mu m^2) \times \rho_l(g/cm^3) \quad (4.2)$$

$$A_l(cm^2) = \frac{TEX(g/km)}{\rho_l(g/cm^3) \times 10^5} \quad (4.3)$$

Karbon lifleri cam liflerine göre ciddi oranda yüksek modüllü ve düşük yoğunluktur. Bu da onları yapısal ürünler için oldukça çekici kılmaktadır. Şekil 4.8'de 12,000 lifli bir karbon halat makarası görünmektedir.



Şekil 4.8: Karbon lifli halat makarası.

Karbon lifleri pultrüzyon sürecine dahil edileceği zaman pultrüzyon hattı fiziksel olarak izole edilir. Karbon lifleri iletkenidir ve karbon lifi tozu kısa devreye sebep olabilir. Ek olarak, elektrik izolasyonunda kullanılan cam lifli pultrüzyon parçaların üretildiği bir üretim hattında karbon lifleri ile üretim yapılırsa, karbon lifi tozunun cam liflerine bulaşma ve iletkenlik sorunlarına yol açma riski vardır. Dolayısıyla karbon lifi üretim tesisleri pultrüzyon tesisinden ayrı bir yere konuşlandırılır.

4.6 Karbon Lifli Kumaşlar

Karbon lifli kumaşlar cam liflerinde olduğu gibi örgülü ve dikişli olarak temin edilebilir. Ağırlıkları 200 ila 1050g/m² arasında değişir, genellikle 0/90 ve ±45 bieksenel üretilirler. Üreticisi sayısı azdır ve çoğunlukla özel sipariş üzerine özel

pultruzyon uygulamaları için üretilirler. Günümüzde çok az sayıda yapısal lifli polimer pultruzyon ürün karbon lifli kumaşlar kullanılarak üretilir. Karbon lifli kumaşlar cam lifli kumaşlara göre oldukça pahalıdır. Özel imalatçılardan sürekli cam lifli keçeler gibi sürekli karbon lifli keçe temin edilebilir.

4.7 Hibrit Kumaşlar

Çok özel kumaş imalatçıları karbon, cam hatta aramid içeren değişik yönde ve ağırlıkta özel hibrit kumaşlar üretmektedir. Ancak bunlar normal yapısal lifli polimer pultruzyon parçalarda kullanılmazlar. Fiyatları oldukça yüksektir ve elle yatırma ve reçine transfer kalıplama gibi operasyonlar ile sörf tahtaları, kayaklar ve raketler gibi özel endüstriyel ürünler için üretilirler.

4.8 Yüzey Maskeleri

Lifli polimer pultruzyon parçanın önemli karakteristik özelliklerinden biriside yüzey kalitesidir. Kumaş ya da fitil yüzünden deforme olmamış düzgün bir yüzey istenir. Donatı çubukları gibi bazı ürünlerde bu önemli değildir, çünkü yüzeyin pürüzlü olması istenir. Düzgün bir yüzey elde etmek için maske veya doku adı verilen çok hafif bir kumaş kullanılır. Maskeler genellikle dokunmamış reçine dolgularından veya C ve E-cam lifli keçelerden olur. Maskeler normal sürekli lifli keçelerden çok daha hafiftir (yaklaşık 30 ila 60g/m²). Yüzey maskelerinin fitil ve keçelere göre daha yüksek reçine oranları vardır, böylece parçaya reçine zengin bir yüzey kazandırır (Şekil 4.9).

4.9 Pultruzyon için Reçine Sistemi

Pultruzyon sürecinde kullanılan üç ana termoset reçine; doymamış poliester, doymamış vinilester ve epoksilerdir. Bu üç ana reçineye polimerizasyon reaksiyonunun gerçekleşmesi, süreç varyasyonlarını modifiye etmek ve lifli polimer pultruzyon parçanın nihai özelliklerini değiştirmek için katkılar ilave edilebilir. Bu katkılar üç ana gruba sokulabilir; polimerizasyon ajanları, dolgular ve katkılar. Polimerizasyon ajanları katalizörler ve sertleştiriciler olarak da bilinir. Katkılar,

modifikatörler ve işlem yardımcıları olarak da bilinir. Çoğu pultrüzyon şirketi karışımlarını sahiplenir ve genelde reçine sistemlerinin detaylarını açıklamazlar. Reçine sistemleri reçine şirketleri tarafından pultrüzyon şirketleri ile işbirliği içerisinde geliştirilir.



Şekil 4.9: Pultrüzyon yöntemi ile üretilmiş lifli polimer profilin kesiti.

4.10 Polimerizasyon Ajanları

Sitren monomer ile reaksiyona giren doymamış poliester ve vinilester reçineleri organik peroksitlerle katalize olurlar. Peroksit polimerizasyon işlemini başlatmak için kullanılır ve şekillendiricide ısı ile aktive edilir. Böylece reçinenin banyodayken jel haline gelmesi engellenir. Polimerizasyonun istenen sürede oluşması için değişik katalizörler kullanılır. Peroksitler reçineye ağırlık olarak %0.25 ila 1.5 oranında eklenir. Reçineye ilave sitren monomer eklemek alışılmadık bir durum değildir. Ağırlıkça %10 ila 15 oranında eklenir, böylece hem maliyet düşürülür hem de reçinenin viskozitesi artırılır. Ancak reçine içerisindeki sitren miktarı iyi kontrol edilmelidir. Katılmış parçadaki yüksek sitren oranı parçayı dış etkilere karşı zayıflatır. Pultrüzyonda rendelenmiş poliester ve vinilester reçineleri de her iki reçinenin karakteristik özelliklerinden faydalanmak için kullanılır.

Pultruzyonda kullanılan epoksi reçinelerinde amin tipi ajanlar kullanılır. Kürleme ajanı ya da sertleştirici B kısmı, epoksi ise A kısmı adı alır. Kürleme ajanları genelde ağırlıkça %25 ila 50 oranında kullanılır. Kürleme ajanı hızlandırıcıları da ağırlıkça %1 gibi çok küçük oranlarda kullanılabilir. Epoksi reçineleri, poliester ve vinilester reçinesine göre düşük büzüşmeleri, yüksek viskoziteleri ve uzun jel süreleri ile çekimi daha zor reçinelerdir. Bu sebepten epoksi reçinesi kullanıldığında pultruzyon hattı yavaşlar ve daha büyük çekim kuvvetlerine ihtiyaç duyulur. Yüksek sıcaklıklarda kürlenmiş özel epoksi formüllerine ihtiyaç vardır. Pultruzyonda sınırlı sayıda epoksi formülü kullanılır. Epoksiler özel fiziksel ve mekanik özelliklerin ihtiyaç duyulduğu durumlarda kullanılır. Günümüzde standart lifli polimer profiller epoksi reçine sistemleri ile üretilmemektedir, ancak çoğu pultruzyon güçlendirme şeridi epoksi ile üretilmektedir.

4.11 Dolgular

İnorganik özellik dolguları üç sebepten ötürü temel polimer reçine sistemine ilave edilir; süreç dinamiklerini geliştirmek, maliyeti düşürmek ve kürlenmiş parçanın özelliklerini değiştirmek. İnorganik dolguların 0.005 ile 0.08mm arasında değişen parçacık ebatları ve küresel veya tabakamsı geometrileri vardır. Pultruzyonda kullanılan üç ana inorganik dolgu; alüminyum silikat, kalsiyum karbonat ve alümina trihidrat'dır. Reçine karışımında tipik poliester ve vinilester lifli polimer pultruzyon profillerin ve donatı çubuklarının ağırlıkça %10 ila 30'u arasında dolgu kullanılır. Tek yönlü fitil donatısı ağırlıklı olan küçük pultruzyon parçalarda %0 ila %5 gibi düşük dolgu oranları kullanılır. Pultruzyonda kullanılan epoksi reçinelerinde de dolgu kullanılabilir. Lifli polimer güçlendirme şeritleri gibi küçük parçalarda genellikle dolgu kullanılmaz. İnorganik dolguların yoğunlukları 2.4 ila 2.6g/cm³ arasındadır (cam lif ile aynı, reçinenin ise iki katı). Dolgular, reçine ve liflere göre oldukça daha ucuzdurlar. Ayrıca bir dolgu malzemesi olan alümina trihidrat, yangın-geciktirici olarak ikinci bir rol de oynar. Dolgular genellikle lifli polimer pultruzyon parçanın boyuna anahtar mekanik özelliklerini ve korozyon dirençlerini düşürürler. Ancak dolgular özelliklerin geliştirilmesinde de kullanılabilirler, özellikle liflere ters yönde pultruzyon parçanın fiziksel özelliklerinin modifiye etmek için kullanılabilirler. Yakın zamanda pultruzyoncular nano büyüklükte dolguları

denemeye başladılar ve sonuçlar lifli polimer parçanın korozyon direncinin arttığını göstermektedir.

4.12 Katkılar

Reçine karışımına eklenen üçüncü grup imalat sürecine yardımcı olması ve kurlenmiş lifli polimer parçanın özelliklerinin modifiye etmesi için kullanılır. Metalik stearatlar, yağlı asitler ve mumlar gibi kimyasal ajanlar lifli polimer parçanın şekillendiriciye yapışmasını engeller. Bir köpükendirme ajanı reçine içinde hapsolan havanın çıkarılmasını sağlar. Pigmentler ve renklendiriciler nihai parçaya renk vermek için kullanılır. Kurlenmiş parçadaki reçineyi güneşin olumsuz etkilerinden korumak için ultraviyole stabilizatörleri eklenir. Antimoni trioksit gibi katkılar kurlenmiş parçada alevin yayılmasını geciktirirler. Ek olarak reçine karışımının karakteristik özelliklerini modifiye etmek için kalınlaştırıcı, sağlamlaştırıcı ve viskozite kontrol ajanları da kullanılabilir. Bu katkılar genelde ağırlıkça %1'in altında oranlarda kullanılır. Yüksek oranda eklenen tek katkı büzüşme katkılarıdır. Büzüşme katkıları genellikle termoplastik polimer malzemelerdir ve kalın parçalarda iç kısımlarda ince parçalarda ise yüzeyde oluşan büzüşme çatlaklarını önlerler. Silan bağlama ajanları lifler ve reçine arasındaki aderansı arttırmak için eklenebilir, ancak bu ajanlar genelde liflerdeki kaplamalarının içerisinde bulunur. Unutulmamalıdır ki bütün bu katkılar reçinenin kimyasını değiştireceğinden lifli polimer parçanın fiziksel ve mekanik özelliklerini etkileyebilirler. En masum gözükten renklendirici pigment katkısının bile özellikler üzerinde ciddi etkisi olabilir (Bank,2006).

5. LİFLİ POLİMER KOMPOZİTLERİN ÖZELLİKLERİ

Lifli polimer kompozit malzemeler ile yapı tasarımı yapabilmek için, malzemenin fiziksel ve özellikle mekanik özelliklerinin bilinmesi gerekir. Lifli polimer malzemenin özellikleri genellikle üreticisi tarafından sağlanır. Ancak üreticiler tarafından sağlanan mekanik ve fiziksel veriler arasında bir standart yoktur. Çoğunlukla yetersiz veri sağlanır, birçok durumda ise sağlanan verinin gerçek deney verisi mi yoksa güvenlik katsayıları ile türetilmiş tasarım verisi mi olduğu anlaşılmaz. Bu sebepten tasarımcının üretici tarafından sağlanan bu özelliklerinin nasıl belirlendiğini bilmesi, dolayısıyla bağımsız deneylerle bu verileri kontrol edebilmesi önemlidir.

Lifli polimer kompozit malzemenin tasarım özelliklerini elde etmenin iki yolu vardır. Birincisi teorik hesaplamalar, ikincisi ise deneysel ölçümler yapmaktır. Lifli polimer kompozit malzeme homojen olmadığı için birçok seviyede veya ölçekte teorik ya da deneysel olarak karakterize edilebilir. Deney uygulanırken ya da nümerik modelleme yapılırken bu farklı karakterizasyon seviyeleri anlaşılmalıdır. Bu seviyeler sırasıyla lif seviyesi, lamina seviyesi, laminant seviyesi ve tam-kesit seviyesidir.

Lifli polimer kompozit malzemelerde kullanılan polimer reçinelerin moleküler yapıları modifikasyona çok müsaittir. Bazı pultrüzyon malzeme üreticileri ürünlerinde kendi geliştirdikleri ve sahiplendikleri reçineleri kullanırlar. Pultrüzyon malzeme içerisinde kullanılan ticari donatı lifleri çok çeşitlidir. Bu lifler malzemenin içinde birçok formda (fitil, keçe, kumaş) ve kombinasyonda kullanılabilir. En yaygın kullanılan cam liflerinin özellikleri bile üreticiden üreticiye değişiklik gösterebilir. Reçine sistemine dahil edilen katkılar reçinenin kimyasını değiştirir. En masum renklendirici bile nihai malzemenin fiziksel ve mekanik özelliklerini etkileyebilir. Pultrüzyon üreticileri tarafından üretilen ürünlerin kesit ölçüleri arasında da bir standart olmadığı düşünülürse lifli polimer pultrüzyon malzemenin fiziksel ve

mekanik özelliklerinin belirlenmesinde teorik analizler yerine deneysel ölçümler yapılmasının önemi ortaya çıkmaktadır.

Dünya genelinde birçok standart organizasyonu lifli polimer kompozit malzemeler için standart deney metotları yayımlamışlardır, örneğin ASTM ve International Organization for Standardization (ISO). Liflerin, reçinelerin ve katkıların, lif, lamina ve laminant seviyesinde test edilmesi için binlerce deney metodu mevcuttur. Ancak yapısal mühendislik uygulamalarına uygun olan lifli polimer kompozitlerin tam-kesit seviyesinde test edilmesi için çok fazla standart yoktur. Yakın zamanda bu konuyla ilgili olarak bir dizi organizasyon deney metotları geliştirmiştir. Bu organizasyonlar; American Concrete Institute (ACI), European Committee for Standardization (CEN), Japan Society for Civil Engineers (JSCE), ve Canadian Standards Association'dır (CSA).

Hangi deney metotlarının kullanılması gerektiği konusunda malzeme tedarikçileri, parça üreticileri, yapı mühendisleri ve diğer pay sahipleri arasında bir fikir birliği yoktur. Ancak, tasarımda hangi fiziksel ve mekanik özelliklerin önemli olduğu konusunda herkes hemfikirdir. Deney sonuçları seçilen metodun gereksinimlerine göre rapor edilir, tasarım ile ilgisi yoruma açık hale gelebilir.

5.1 Özelliklerin Deneyler ile Belirlenmesi

5.1.1 Lif seviyesi

Lifli polimer kompozit malzemelerin yapısal uygulamalarında lif seviyesinde çok az deney son kullanıcı tarafından yapılır (örn., pultrüzyon üreticisi, yapı mühendisi). Bu kompozitler ile ilgili çoğu tanımlama, kompozitin imal edildikten sonraki özellikleri ile ilgilidir (örn., lamina, laminant ya da tam-kesit seviyesi). Ham lif, polimer reçinesi ve katkı üreticileri standart deneyler yaparak sonuçlarını rapor ederler.

Polimer reçinelerin sıvı ve katı hallerindeki mekanik, fiziksel ve kimyasal özelliklerini elde etmek için birçok standart deney metodu ASTM ve diğer standart organizasyonlarında bulunabilir. Bunlar geçtiğimiz 50 yıl içerisinde plastik endüstrisi

tarafından geliştirilmiştir. Polimerin özellikleri genelde yüksek sıcaklıklarda art-kürlenen reçine örneklerinden elde edilir.

Lifli polimer kompozitlerde kullanılacak donatı liflerinin özelliklerini elde etmek için, fitillerden ya da halatlardan alınacak bireysel lifler üzerinde ASTM C1557 ya da D3379'daki gibi tek-lif deneyi uygulanabilir (Bölüm 3.1). Ancak tek-lif deneyi yapmak zordur ve deneylerden elde edilen veriler lifin polimer kompozit içerisindeki durumunu temsil etmeyebilir. Bu sebepten lif üreticileri genellikle ürünlerinin mekanik özelliklerini yaygın kullanılan bir reçine ile kompozit formunda rapor ederler. Cam lifi üreticileri tarafından kullanılan doyurulmuş lif deney metodu ASTM D2343, karbon lifi üreticileri tarafından kullanılan ise ASTM D4018'dir.

5.1.2 Lamina seviyesi

Bugüne kadar yapısal uygulamalarda kullanılan lifli polimer kompozitler üzerinde gerçekleştirilen deneylerin büyük çoğunluğu, kompozit parçalardan kesilen kuponlar üzerinde yapılmıştır. Kompozitten kesilen numune sadece tek yönlü lifler içeriyorsa (donatı çubukları, güçlendirme şeritleri) bunlar üzerinde yapılan deneyler tek yönlü katman deneyleridir (lamina seviyesi). Kupon, çok yönlü katmanlar içeren lifli polimer kompozitten kesildiyse (profil) deney çok yönlü tabaka üzerinde yapılır (laminant seviyesi). Deney numunesinin kullanılacak üründen kesilmesi ve ürünün kullanılacağı kalınlığına eşit olması için çaba gösterilmelidir. Sahada kullanılacak eleman aynı tekyönlü kompozitten oluşan çok katmanlı formda ise tekyönlü bir katman üzerinde deney yapıp, özelliklerin buradan elde edilecek değerlerden türetilmesi kabul edilebilir (örn., çok katmanlı güçlendirme sistemi). Çok yönlü katmanlar lifli polimer güçlendirme kumaşında kullanılmışsa, tasarım özelliklerinin belirlenmesi için tam kalınlıklı numune üzerinde deney yapılmalıdır.

Lifli polimer kompozitlerin özellikleri belirlenirken ister lamina seviyesi isterse laminant seviyesi olsun, aynı ASTM deney yöntemleri kullanılmıştır. Deneyler makroskopik seviyede yapılır ve kupon numunenin homojen malzemeden olduğu kabulüne dayanır. Lifli polimer kompozitin lamina ve laminant seviyesi için yaygın olarak kullanılan ASTM deneyleri Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1 Lamina ve laminant seviyesindeki lifli polimer kompozitler için tavsiye edilen ASTM deney metotları.

Katman ya da Laminant Özelliği	ASTM Deney Metodu	Deney Numunesi
Mekanik Özellikler		
Dayanım Özellikleri		
Boyuna çekme dayanımı	D 3039, D 5083, D 638, D 3916	
Boyuna basınç dayanımı	D 3410, D 695	Tek yönlü katman ve
Boyuna yatak dayanımı	D 953, D 5961	çok yönlü laminant
Boyuna kısa kiriş kesme dayanımı	D 2344, D 4475	
Düzlem içi kesme dayanımı	D 5379, D 3846	
Darbe direnci	D 256	
Tersine çekme dayanımı	D 3039, D 5083, D638	
Tersine basınç dayanımı	D 3410, D 695	Çok yönlü laminant
Tersine kısa kiriş kesme dayanımı	D 2344	
Tersine yatak dayanımı	D 953, D 5961	
Rijitlik Özellikleri		
Boyuna çekme modülü	D 3039, D 5083, D 638, D 3916	Tek yönlü katman ve
Boyuna basınç modülü	D 3410, D 695	çok yönlü laminant
Boyuna Poisson oranı	D 3039, D 5083, D 638	
Düzlem içi kesme modülü	D 5379	Çok yönlü laminant
Tersine çekme modülü	D 3039, D 5083, D 638	
Tersine basınç modülü	D 3410, D 695	
Fiziksel Özellikler		
Lif hacim oranı	D 3171, D 2584	
Yoğunluk	D 792	
Barcol sertliği	D 2583	Tek yönlü katman ve
Cam geçiş sıcaklığı	E 1356, E 1640, D 648, E 2092	çok yönlü laminant
Doyurulduğunda su emmesi	D 570	
Boyuna termal uzama katsayısı	E 831, D 696	
Tersine termal uzama katsayısı	E 831, D 696	
Dielektrik dayanımı	D 149	
Tutuşma ısısı	D 1929	
Yanma ve duman çıkarma	E 84, D 635, E 662	

Eğer lifli polimer kompozitte kullanılacak reçine sisteminde deney yapılacaksa, tek başına reçineden alınacak numuneler üzerinde deney yapmaktansa kompozitten alınacak lifli numuneleri kullanmak daha sağlıklı olabilir. Cam geçiş sıcaklığı ve tutuşma ısısı gibi sadece reçineye bağlı olduğu kabul edilen özellikler üzerinde bile lif varlığının etkisi olabilir.

5.1.3 Laminant Seviyesi

Tablo 5.1’de belirtildiği gibi çok yönlü laminant için olan deney yöntemleri ile tek yönlü katmanlı teknik olarak aynıdır. Ancak bu yöntemler çok yönlü kompozitlere uygulandığında iki noktaya dikkat edilmelidir. Birincisi sadece boyuna mekanik deneyler tek yönlü katmana uygulanabilir, boyuna ve tersine deneyler sadece çok yönlü laminant içindir. İkincisi ASTM deneylerindeki gereklilikler yapısal uygulamalarda kullanılan lifli polimer parçaların kalınlıkları ve kumaş ve keçe katmanlara sahip olabilmeleri yüzünden her zaman karşılanamayabilir. ASTM D6856 kumaş kompozitler kullanıldığında standart deney yöntemlerinde yapılması gereken değişiklikleri içermektedir.

5.1.4 Tam-Kesit seviyesi

Çelik gibi homojen izotropik malzemelerde, malzeme dayanımları ve rijitlikleri kesitin içerisindeki konumlarından bağımsızdır ve yük taşıma kapasiteleri göreceli olarak kolay hesaplanır. Ancak lifli polimer elemanlarda rijitlik ve dayanım özellikleri malzemenin homojen olmaması ve anizotropisi yüzünden lif, lamina ve laminant seviyelerinde kesit içerisindeki konumlarına göre değişir. Bu tasarım sürecini karmaşılaştırır, tam-kesit rijitliklerini ve yük taşıma kapasitelerini basit gerilim-sonuç ilişkileri cinsinden yazmak daha zordur. Parçaların analizinde sayısız basitleştirici kabul yapılabilir, bu da tasarım sürecini önemli ölçüde basitleştirir.

Genel kabullerden bir tanesi belirli hesaplar için tam-kesit seviyesinde lifli polimer parçanın homojen olduğu kabulüdür. Bu durumda imal edilmiş parça için gerekli olan tam-kesit eleman özellikleri parçanın tam kesitinde yapılacak deneylerden (hatta çoğu zaman tam boyundan) elde edilebilir. Tam-kesit deneyleri olarak bilinen bu

deneyler parçanın servis performansını baz alan etkili özelliklerini belirlemede kullanılır.

Yapısal lifli polimer parçalar tipik olarak büyük (profil ve donatı uzunlukları 3m'den büyük, şerit ve sargı alanları 5m²'den büyük) ve göreceli olarak kalın (> 6mm) olabilir. Bu yüzden malzemenin küçük kupon numuneleri halinde lamina ve laminant seviyelerinde test edilmesi ile karşılaştırıldığında tam-kesit deneyleri özel düzenek ve prosedürler gerektirebilir. Bir dizi organizasyon tarafından geliştirilen yapısal lifli polimer parçaların tam-kesit deneyleri üç kategoride toplanır; lifli polimer donatı çubuklarının tam-kesit deneyleri, lifli polimer ön-kürlemeli şeritlerin ve elle yatırılmış tabaka ve kumaşların tam-kesit deneyleri, lifli polimer profillerin tam-kesit deneyleri.

Yapısal uygulamalarda kullanılan lifli polimer pultrüzyon profil kesitleri genellikle I, H-geniş flanşlı, U-kanal, L-köşebent, kare ve dikdörtgen tüp şekillerindedir. Kanallar ve köşebentler genelde sırt sırta kombinasyonlarda kesişen merkezli ve kesme merkezli olan çift-kanal ve çift-köşebent konfigürasyonlarında kullanılır. Bu pultrüzyon profillerde kullanılan malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri kesitlerden kesilen (laminant seviyesi) kuponlar üzerinde yapılan deneyler ile ya da profil ile aynı özelliklere sahip deney panelleri üzerinde yapılan deneylerden elde edilir. Fital ve keçe katmanları farklı olsa bile birçok pultrüzyon üreticisi farklı kesitler ve reçine sistemlerinden oluşan bütün bir ticari sınıf profilleri için aynı özellikleri rapor ederler. İnce pultrüzyon malzemelerin özellikleri (<6mm) tasarımda düşük değer seçeneği sunabilmek adına kalın malzemelere göre (>6mm) küçük tutulur. Tasarımcı, üretiminin sağladığı değerler yerine belirli bir parça için deney verilerini kullanmak isteyebilir. Genelde, çerçeve ve makas girişler için üretilen profiller kupon deneylerinden elde edilen özellikler ve uygun teorik metotlar kullanılarak tasarlanır. Ancak, bazı durumlarda tasarımda kullanmak için tam-kesit özellikleri ve kapasiteleri bireysel profiller üzerinde ya da profili oluşturan alt parçalar üzerinde yapılan tam-kesit deneylerinden elde edilir. Bunun sebebi bazı durumlarda tam-kesit özelliklerin tasarımda kullanılmasının getirdiği kolaylık ya da kuponlardan elde edilen özelliklerin bütün profilin performansını belirlemede güven vermemesidir.

Pultruzyon profillerin tasarımı genellikle servis ve burkulma kriterleri (buna eğilme/Euler burkulması, burulma burkulması, yanal ve lokal burkulma dahildir) tarafından kontrol edildiğinden, tam kesitin eğilme, tersine kesme ve burulma rijitliklerine (EI , GA , ve GJ) ihtiyaç vardır. Bu özellikleri kupon verilerinden öngören teorik metotlar olsa da, bu durum tasarımcının profilin geometrisine, homojenliğine ve anizotropisine bağlı olarak bir dizi basitleştirme kabulleri yapmasını gerektirir. Tam-kesit deneyleri ile profil için bir gerilim-sonuç teorisinde kullanılabilecek etkili özellikler elde edilebilir (Bank, 2006).

En çok kullanılan tam-kesit deneyi; tam-kesit modülü ya da birçok üreticinin andığı şekliyle E-modülüdür. Bu deneyde lifli polimer profil üç veya dört noktalı eğilmeye tabi tutulur, etkili boyuna modülü yük ve açıklık ortası deformasyon verisinden elde edilir (CEN, 2002). Ancak, pultruzyon profillerdeki yüksek boyuna/kesme modül oranlarına bağlı olarak (cam lifli profillerde 4 ila 6 oranında) kesme deformasyon etkilerinin varlığı yüzünden ve pultruzyon profiller genelde çelik kirişlere göre daha kısa açıklıklarda kullanıldığından tam-kesit eğilme deneylerinin sonuçları dikkatli yorumlanmalıdır. CEN deney metodunda belirtildiği gibi kesme deformasyonlarının etkileri yüzünden etkili eğilme modülü açıklığa bağımlı bir özelliktir. Kesme deformasyonlarının etkilerini minimize etmek için CEN deney metodu profilin en az 20 açıklık/derinlik oranı ile denenmesini şart koşar. Ek olarak, deneylerden elde edilen tam-kesit modül değeri kesme deformasyon etkilerini yaklaşık olarak telafi etmek için 1.05 ile çarpılır. Ancak bu deneyden, deformasyonları öngörmek için kesme deformasyonlu kiriş teorisinin kullanıldığı bir tasarımda ihtiyaç duyulan tam-kesit tersine kesme rijitliğine (GA_s) gidilemez.

EN 13706-2 Ek-G bir profil kesitinin eğilme rijitliğini (EI) ve kesme rijitliğini (GA_s) ölçmeye yarayan, üst üste farklı açıklıklarla test eden ve veri analizi yaptıran bir metot içerir. Bu metot tasarımda kullanılmak üzere bir dizi araştırmacı ve üretici tarafından kullanılmıştır ve yayımlanması ile birlikte standart haline gelmiştir. EK-G aynı zamanda lifli polimer profile düzgün yayılı burulma momenti uygulayan bir düzenekle dönmeyi ölçerek tam-kesit burulma rijitliğini de belirlemeye yarayan bir metot içerir. Elde edilen burulma rijitliği mesnetsiz ya da eğilmeyen mesnetli burulma rijitliğidir (Saint-Venant burulma rijitliği olarak da bilinir). Birçok yapısal

uygulamada yapı elemanlarının sonları eğilmeye karşı mesnetlidir ve tasarım için eğrilen burulma sabitine (EC_w) ihtiyaç vardır. Bu yayılı düzgün olmayan burulma deneyi ile dolaylı olarak ölçülebilir. Tek başına simetrik açık kesitli lifli polimer profiller çok az burulma rijitliğine sahiptir ve önemli ölçüde burulma momenti taşıma direncinin gerektiği durumlarda kullanılmamalıdır. Kiriş ya da kolon olarak kullanıldıklarında lifli polimer profiller eğilme ve eksenel yükler altında burulma kararsızlığını engellemek için yanal olarak mesnetlenmelidir. EN 13706'da lifli polimer pultruzyon profillerin özelliklerini elde etmek için kullanılan deney metotları Tablo 5.2'de verilmiştir.

Tablo 5.2. EN 13706'da tanımlanan lifli polimer pultruzyon profillerin özelliklerinin belirlenmesinde kullanılacak deney metotları.

Özellik	Deney Metodu
Tam kesit	EN 13706-2, Ek-D
Çekme modülü (boyuna)	EN ISO 527-4
Çekme modülü (tersine)	EN ISO 527-4
Çekme dayanımı (boyuna)	EN ISO 527-4
Çekme dayanımı (tersine)	EN ISO 527-4
Bulon-yatak dayanımı (boyuna)	EN 13706-2, Ek-E
Bulon-yatak dayanımı (tersine)	EN 13706-2, Ek-E
Eğilme dayanımı (boyuna)	EN ISO 14125
Eğilme dayanımı (tersine)	EN ISO 14125
Lamina içi kesme dayanımı (boyuna)	EN ISO 14130
Basınç dayanımı (boyuna)	EN ISO 14126
Basınç dayanımı (tersine)	EN ISO 14126
Lif içeriği (ağırlıkça)	ISO 1172
Yoğunluk	ISO 1183
Poisson oranı (boyuna)	EN ISO 527-4
Poisson oranı (tersine)	EN ISO 527-4
Termal uzama (boyuna)	ISO 11359-2
Termal uzama (tersine)	ISO 11359-2
Düzlem içi kesme modülü	ISO 15310

Günümüzde birleşimlerin dayanım ve rijitliklerinin belirlenmesi için standart tam-kesit deneyleri yoktur. Çoğu pultruzyon profil üreticisi basit çerçeve bağlantıları için yük tabloları sağlamaktadır. Bu tablolar açıklanmayan yöntemler ile bir araya getirilmiş profil parçalarının tam-kesit deneylerine dayanmaktadır. Veriler genellikle göçme tipleri ve deformasyonlarını içermez, yatak deneylerinden elde edilen kupon özellikleri ile de ilişkisizdir. Yarı rijit birleşimli çerçevelerin analizinde kullanılmak üzere bu birleşimlerin dayanım ve moment-dönme karakteristiklerini elde edilmesinde kullanılacak pultruzyon çerçeve yapılarda yarı rijit birleşimlerin

tam-kesit deneyleri için standart bir prosedür yoktur. Literatürde öne sürülen tek ve çift kiriş yöntemleri (Mottram ve diğ., 1999a, 1999b) bir dizi araştırmada kullanılmıştır.

5.2 Lifli Polimer Pultruzyon Profillerin Özellikleri

Lifli polimer pultruzyon profillerin kesit boyutları, bileşenlerinde kullanılan donatı lifleri ve reçineler ve bunların kullanıldıkları formlar ve varyasyonları konusunda üreticiler arasında bir standart yoktur. Bu profillere bir standart getirmek adına 2002 yılında CEN lifli polimer pultruzyon profiller için ilk standart şartnamelerini yayımlamıştır (CEN, 2002). EN 13706 numaralı bu şartnameler üç bölümden oluşmaktadır.

Birinci bölüm; kesit geometrisi, içerdiği donatı lifi, reçine sistemi, katkı maddeleri ve temel mekanik özellikleri farklılıklar gösteren lifli polimer pultruzyon profillerin isimlendirilmesi ile ilgili tanımlamaları içerir. Örneğin kesit geometrisi kutu, donatı lifi cam olan, üretim sürecinde yüzey maskesi kullanılmış, yangın geciktiricili izopitalik poliester reçineli 23GPa etkili eğilme modülüne sahip bir pultruzyon profil “Pultruzyon EN 13706-BGV, IF, E23” olarak adlandırılır. EN 13706’nın üçüncü bölümdeki minimum özellikleri sağlayan profiller için geçerli olan bu isimlendirme sistemi temel olarak üç veri bloğundan oluşur. Birinci blokta pultruzyon profilin kesit geometrisi ve donatı sistemi (Tablo 5.3), ikinci blokta reçine sistemi (Tablo 5.4), üçüncü blokta ise şartnamenin üçüncü kısmına istinaden minimum mekanik özellikler tanımlanır (Tablo 5.5).

Şartnamenin üçüncü kısmında pultruzyon profiller mekanik özelliklerine göre E23 ve E17 olarak ikiye ayrılır. Buradaki E ibaresi profilin minimum boyuna çekme modülünü, hemen ardından gelen sayı ise GPa cinsinden bu modülün değerini belirtir. Şartnamenin bu bölümünde her sınıf için sağlanması gereken minimum mekanik özellikler belirtildiği gibi rapor edilmesi üreticinin tercihine bırakılmış fiziksel özelliklerde belirtilmiştir (Tablo 5.5). EN 13706’nın ikinci bölümü ise üçüncü bölümde belirtilen fiziksel ve mekanik özelliklerin hangi deney metotları ile elde edileceğini tanımlar (Tablo 5.2).

Tablo 5.3: EN 13706 pultruzyon profil isim tanımlamaları için 1. veri bloğu.

Profil Şekli		Donatı Lifi		Ek İşlem	
B	Kutu kesit	A	Aramid	V	Yüzey maskesi
I	I kesit	C	Karbon	C	Yüzey mantolaması
L	Köşebent	G	Cam	P	Yüzey kumaşı
O	Yuvarlak Tüp	P	Polietilen	Z	Diğer
T	T kesit	Z	Diğer		
U	Kanal				
W	Geniş Flanş				
Z	Diğer				

Tablo 5.4: EN 13706 pultruzyon profil isim tanımlamaları için 2. veri bloğu.

Polimer Tipi		Polimer Özelliği	
O	Ortopitalik poliester	F	Ateş geciktiricili
I	İzopitalik poliester	U	Ultraviyole stabilitesi
V	Vinilester	Z	Diğer
E	Epoksi		
P	Fenolik		
A	Akrilik		
D	DCPD		
T	Termoplastik		
Z	Diğer		

Tablo 5.5: EN 13706 pultruzyon profil sınıfları için minimum özellikler.

Özellik	Birim	E23	E17
<i>Sağlanması zorunlu özellikler</i>			
Tam kesit	GPa	23	17
Çekme modülü (boyuna)	GPa	23	17
Çekme modülü (tersine)	GPa	7	5
Çekme dayanımı (boyuna)	MPa	240	170
Çekme dayanımı (tersine)	MPa	50	30
Bulon-yatak dayanımı (boyuna)	MPa	150	90
Bulon-yatak dayanımı (tersine)	MPa	70	50
Eğilme dayanımı (boyuna)	MPa	240	170
Eğilme dayanımı (tersine)	MPa	100	70
Lamina içi kesme dayanımı (boyuna)	MPa	25	15
<i>Tercihen rapor edilebilecek özellikler</i>			
Basınç dayanımı (boyuna)	MPa		
Basınç dayanımı (tersine)	MPa		
Lif içeriği (ağırlıkça)	%		
Yoğunluk	kg/m ³		
Poisson oranı (boyuna)	mm/mm		
Poisson oranı (tersine)	mm/mm		
Termal uzama (boyuna)	10 ⁻⁶ /°C		
Termal uzama (tersine)	10 ⁻⁶ /°C		
Düzlem içi kesme modülü	GPa		

Tablo 5.6'da bazı lifli polimer pultruzyon profil üreticilerinin profilleri için sağladıkları özellikler ve bu özellikleri elde ederken kullandıkları deney metotları verilmiştir.

Tablo 5.6: Bazı pultruzyon üreticilerin yapısal profilleri için sağladıkları özellikler ve ilgili deney metotları.

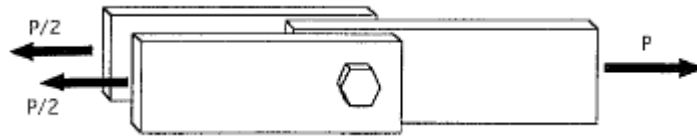
Özellik	Fiberline	Strongwell	Armaplast
Tam kesit (GPa)	23~28 (EN13706D)	17.9 (tam-kesit)	25~40 (DIN53457)
Çekme modülü (boyuna) (GPa)	23~28 (EN527-4)	17.2 (ASTM-D638)	25~40 (DIN53457)
Çekme modülü (tersine) (GPa)	8.5 (EN527-4)	5.5 (ASTM-D638)	-
Çekme dayanımı (boyuna) (MPa)	240 (EN527-4)	207 (ASTM-D638)	250~1050 (DIN53455)
Çekme dayanımı (tersine) (MPa)	50 (EN527-4)	48 (ASTM-D638)	-
Bulon-yatak dayanımı (boyuna) (MPa)	150 (EN13706E)	207 (ASTM-953)	-
Bulon-yatak dayanımı (tersine) (MPa)	70 (EN13706E)	-	-
Eğilme dayanımı (boyuna) (MPa)	240 (EN14125)	207 (ASTM-D790)	-
Eğilme dayanımı (tersine) (MPa)	100 (EN14125)	69 (ASTM-D790)	200~950 (DIN53452)
Lamina içi kesme dayanımı (boyuna) (MPa)	25 (EN14130)	20.7 (ASTM-D3846)	-
Basınç modülü (boyuna) (GPa)	-	17.2 (ASTM-D695)	-
Basınç modülü (tersine) (GPa)	-	6.89 (ASTM-D695)	-
Basınç dayanımı (boyuna) (MPa)	240 (EN14126)	207 (ASTM-D695)	100~500 (DIN53454)
Basınç dayanımı (tersine) (MPa)	70 (EN14126)	103 (ASTM-D695)	-
Lif içeriği (ağırlıkça) (%)	-	50	-
Yoğunluk (kg/m ³)	-	0.0017 (ASTM-D792)	0.0018 (DIN53479)
Poisson oranı (boyuna) (mm/mm)	0.23 (EN527-4)	0.33 (ASTM-D3039)	-
Poisson oranı (tersine) (mm/mm)	0.09 (EN527-4)	-	-
Termal uzama (boyuna) (10 ⁻⁶ /°C)	-	7 (ASTM-D696)	-
Termal uzama (tersine) (10 ⁻⁶ /°C)	-	-	-
Düzlem içi kesme modülü (MPa)	-	2.9	-
Tam kesit kesme modülü (GPa)	3	2.9	-

6. LİFLİ POLİMER PULTRUZYON PROFİLLER İÇİN YARI-RİJİT BİRLEŞİMLER

Günümüzde standart lifli polimer profiller, ticari ya da konut çok katlı çerçeve yapı sistemlerinde pek kullanılmamaktadır. Çok katlı çerçeve sistemlerde lifli polimer profil kullanılmasının ana zorluklarından bir tanesi çerçeve elemanlarının ekonomik ve etkili şekilde birleştirilememesidir. Lifli polimer birleşimler konusu üzerine araştırmalar 1990'ların başından beri yapılmaktadır, ancak basit ve etkili bir birleşim sistemi henüz geliştirilmemiş ya da ticarileştirilmemiştir. Lifli polimer pultruzyon profiller için birleşimler kabaca ikiye ayrılır. Teoride moment aktarmayan sadece aksenal yük aktaran basit bindirme birleşimler ve moment aktaran yarı-rijit birleşimler.

6.1 Aksenal Basit Birleşimler

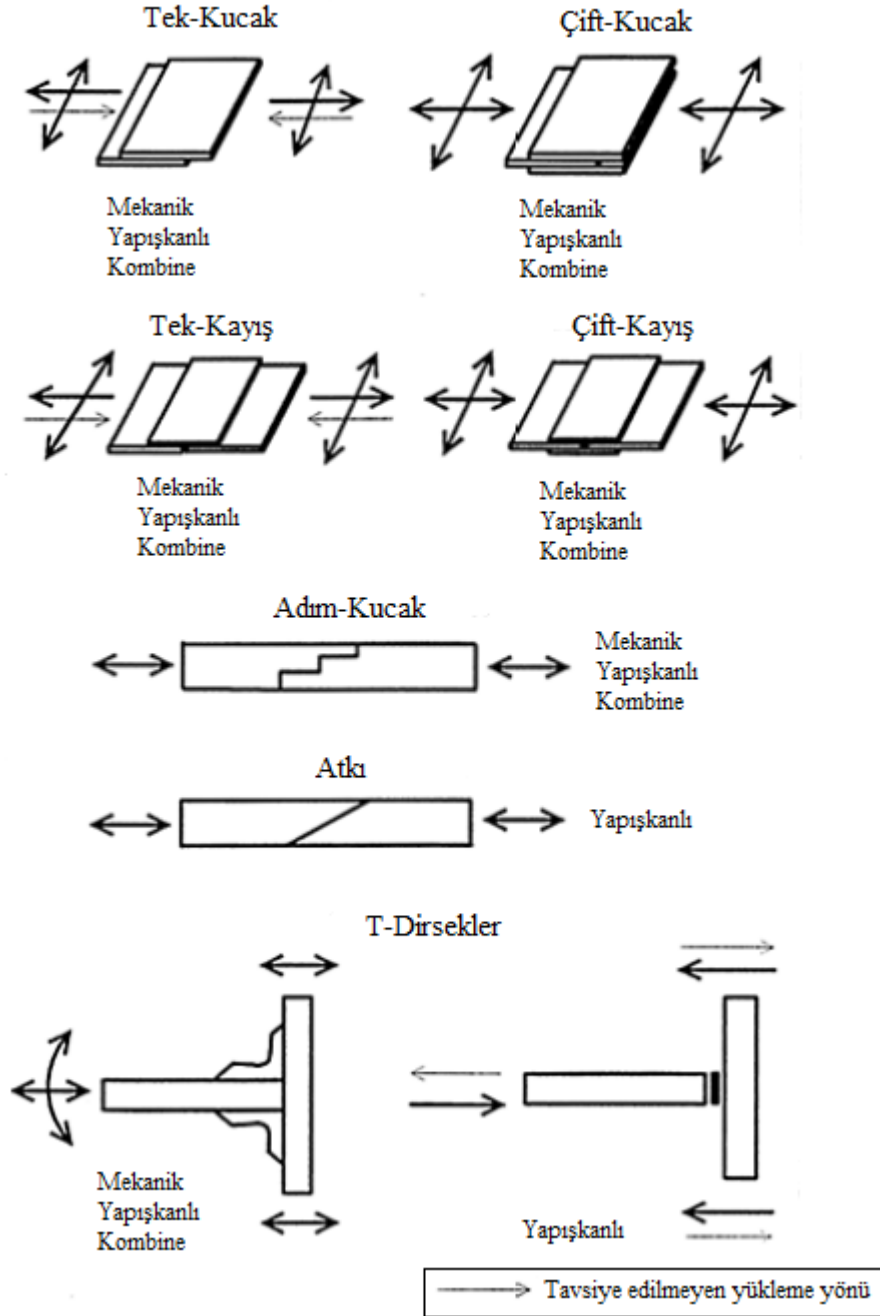
Basit bindirme birleşimlerin yalnızca aksenal yük aktardıkları kabul edilir ve eğer birleşim bulonlu ise bulonlar tipik olarak elemanların merkez aksları boyunca konumlandırılır (Şekil 6.3, 6.4). Şekil 6.1'de tipik çift-kucak bindirmeli bulonlu birleşim şematik olarak gösterilmiştir (Turvey, 2000).



Şekil 6.1: Tipik bindirmeli bulonlu aksenal birleşim.

Basit bindirme birleşimler mekanik ya da kimyasal yapıştırıcılı ya da bunların kombinasyonu şeklinde olabilir. Yapıştırıcılar her türden kompozit yapı imalatında artan ve önemli bir rol oynasalar da, pultruzyon yapılarında kullanımları sınırlıdır. Bir çerçeve yapıda tüm tasarım yüklerinin aktarılması için sadece yapıştırıcılara

güvenildiği durumlar çok nadirdir (Bank, 2006). Şekil 6.2’de basit bindirme birleşim tipleri şematik olarak gösterilmiştir (Eurocomp, 2006).

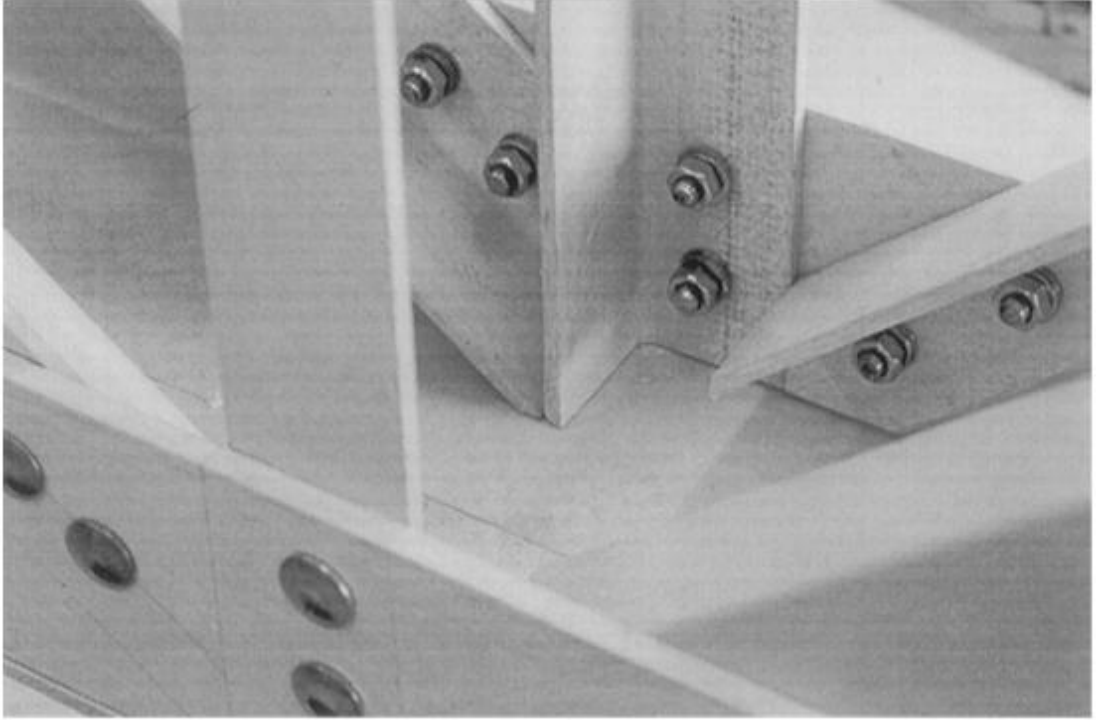


Şekil 6.2: Basit birleşim tipleri.

Sadece aksenal yüklere direnç gösteren bulonlu basit bindirme birleşimlerin kullanımı boşluklu kafes kiriş şeklinde özellikle köprü ve çatı uygulamalarında kendisini göstermektedir. Örneğin Şekil 6.3’deki Point Bonita köprüsü ve 6.4’deki Fiberline köprüsü birleşimleri basit bulonlu bindirme mesnet birleşimlerdir.



Şekil 6.3: Point Bonita köprüsündeki birleşim detayları.



Şekil 6.4: Fiberline köprüsündeki birleşim detayları.

Literatürde 2000 yılına kadar olan basit bulonlu aksel birleşimler üzerine yapılan araştırmaların geniş bir incelemesi Turvey tarafından yayımlanmıştır (Turvey, 2000). Basit aksel bulonlu birleşimlerle tasarım için Strongwell ve Creative Pultrusions gibi bazı pultrüzyon üreticisi firmaların tasarım kılavuzlarından ya da polimer kompozitlerin yapısal tasarımını konu alan bağımsız bir grup araştırmacı tarafından hazırlanan ve 1996 yılında yayımlanan Eurocomp'dan yararlanılabilir (Eurocomp, 2000).

Basit aksel ya da moment aktaran birleşimlerde çelik ya da lifli polimer pultrüzyon bulonlar bazen de yivlenmiş lifli polimer pultrüzyon çubuklar kullanılabilir. Pultrüzyon yapılarda bulonlu birleşimlerin kullanılmasının başlıca sebepleri aşağıda sıralanmıştır.

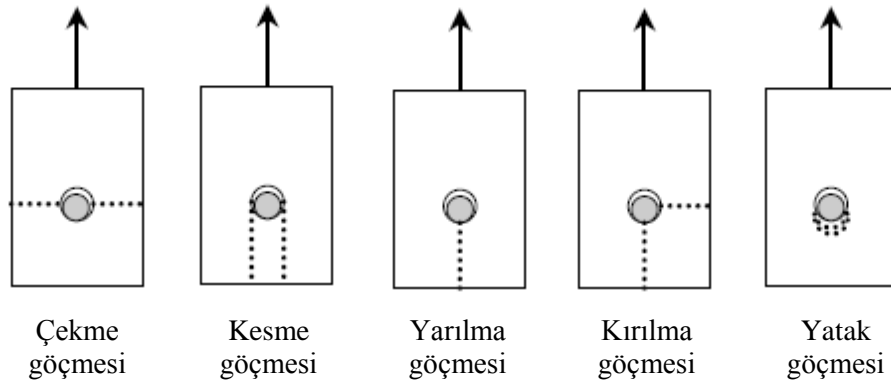
1. Birleştirilecek profillerin ve birleşim parçalarının ayrı ayrı üretilmesi daha kolaydır ve çelik ve ahşap imalatında uzmanlaşmış işçiler için tanıdaktır.
2. Birleşimin sahada montajı kolaydır, yapıştırma uygulamasında olduğu gibi malzemelere yüzeysel hazırlık yapılmasını gerektirmez.
3. Montajdan sonra birleşimlerin kontrol edilmesi kolaydır.
4. Birleşim çabucak monte edilebilir ve dayanım ve rijitliğine hemen kavuşur (yapıştırma uygulamasında olduğunun aksine).
5. Eğer bulonlamaya ilave olarak yapıştırma uygulaması yapılmazsa demontajı kolaydır.
6. İşçilik maliyetleri göz önünde bulundurulursa bulonlu birleşimler ekonomiktir.
7. Birleşim elemanları yerinde uygulandığından profillerin birbirine uydurulmasına yardımcı olur.
8. Bulon deliği ya da konumu ile ilgili hatalar basit el gereçleri kullanılarak düzeltilebilir.

Ancak pultrüzyon yapılarda bulonlu birleşimler kullanırken göz önünde bulundurulması gereken konular da vardır. Bunlar aşağıda sıralanmıştır.

1. Bulon delikleri gerilim birikmesine sebep olurlar ve pultruzyon malzemenin net kesit alanını azaltırlar dolayısıyla birleşimin verimliliği düşer. Ek olarak bulon gruplarındaki yükler çelik bulonlu birleşimlerdeki gibi eşit olarak dağılmazlar.
2. Birleşimde kullanılan pultruzyon parçalar ortotropik olduğundan, birleşimdeki bireysel parçaların yönü kritiktir. Çelik bulonlu birleşimlerde ise malzeme izotropik olduğundan yönden bağımsızdır. Bu, kolon-kiriş birleşimlerinde pultruzyon köşebentlerin kullanıldığı durumda barizdir, ana lif yönü genellikle ana yük yönüne dik kalır.
3. Geleneksel cam pultruzyon malzemeler kalınlıkları boyunca düşük rijitlik ve dayanım özelliklerine sahiptir, dolayısıyla yüksek torklar uygulandığında bulonlar tarafından ezilebilirler. Temel malzeme sünebileceği için bulon gerilimi zamanla düşebilir. Eğer lifli polimer bulonlar kullanılırsa, bulonların kendilerinde de gerilim-gevşemesi olacağından gerilim düşebilir. Ek olarak eğer küçük somunlar kullanılırsa (pulsuz olarak) birleşim yüklendiğinde bütün bulon malzemeyi delip geçebilir. Bu sebepten pultruzyon bulon birleşimlerinde sadece yatak birleşimleri kullanılır.
4. Lifli polimer somun ve bulon ya da yivlenmiş çubukların ölçü çeşitliliği sınırlıdır. Lifli polimer yivli çubuklarda ve bulonlarda yivler sonradan makine ile açıldığından lifli polimer bulonun çekme kapasitesi oldukça sınırlıdır.
5. Tipik kolon-kiriş birleşimlerinde kullanılan pultruzyon köşebent kalınlıkları ve ölçüleri sınırlıdır. Bu da tasarımcıyı birleşim çeşitliliği konusunda sınırlar.
6. Birleşimlerde kullanılan pultruzyon plakalar profillere nazaran düşük mekanik özelliklere sahiptir.
7. Pultruzyon malzemeye açılan delikler pultruzyon malzemenin özelliklerini düşürebilecek nem ve korozif kimyasal malzemelere geçit verebilir. Bu sebepten pultruzyon malzemelere açılan deliklerin hepsi ince bir epoksi tabakası ile mühürlenmelidir.
8. Pultruzyon malzemedeki delikler özel elmas uçlu matkaplarla açılmalıdır. Çelik parçalarda olduğu gibi delikler darbe ile açılmamalıdır.
9. Bulonlu pultruzyon birleşimler çelik birleşimlere kıyasla birleşim geometrisi aynı gözükse bile çok farklı biçimlerde geçebilirler. Pultruzyon birleşimler, birleşen pultruzyon elemanların göçmesinden, pultruzyon birleşim

parçalarının göçmesinden (köşebentler) ya da mekanik bulonların göçmesinden dolayı göçebilirler. Lifli polimer bulonlar ya da yivlenmiş çubuklar tersine kesmeden, boyuna kesmeden yiv sıyırması ile ve boyuna çekme ve basınçtan göçebilir. Lifli polimer somunlar boyuna yiv kesmesinden göçebilir. Pultruzyon birleşimin tipine bağlı olarak birleşimdeki pultruzyon elemanlar ya da parçalar düzlem içi ya da dışı ya da ikisinin kombinasyonu yüzünden göçebilir.

Tek bulonlu aksenal bindirme birleşimlerin göçme tipleri; çekme göçmesi, kesme göçmesi, yarıлма göçmesi, kırılma göçmesi ve yatak göçmesi olarak tanımlanır. Bu tiplerin şematik gösterimi Şekil 6.5’de gösterilmiştir.



Şekil 6.5: Tek bulonlu aksenal bindirme birleşimlerin düzlem içi göçme tipleri.

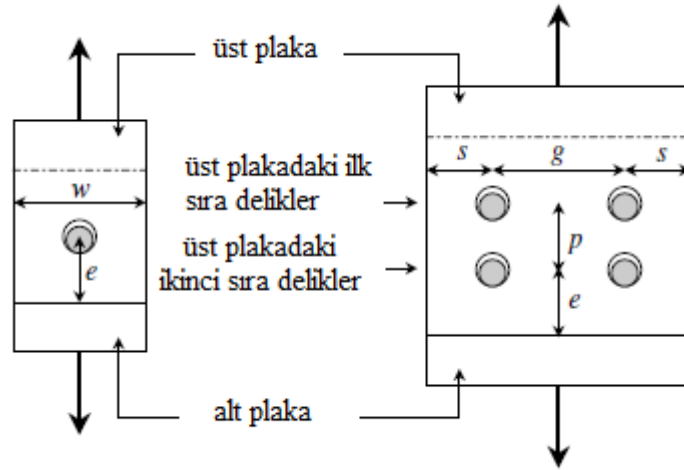
Şekil 6.5’te gösterilen göçme tiplerinin tek yönlü, çift yönlü ya da quasi-izotropik yatırmalı lifli polimer plakalarda ortaya çıkması beklenir. Geleneksel pultruzyon malzemeler 0^0 ya da 90^0 yüklendikleri sürece bu göçme tipleri oluşmayabilir. Eğer bir pultruzyon malzeme eksen dışı yönde yüklenirse göçme tipi tipik olarak fitil yönüne paralel düzlemde kesme ve çekme kombinesi şeklinde ortaya çıkacaktır. Bu durumda Tablo 6.1’de verilen detaylandırma tavsiyeleri uygun olmaz. Birleşimde kullanılacak pultruzyon parçanın boyuna yönü yük yönüne paralel ya da dik olarak yerleştirmelidir. Aksi durum için pultruzyon malzeme üzerinde uygulama yönüne uygun deneyler yapılmalıdır (Bank, 2006).

Pultruzyon malzemeler üzerinde yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen bilgiler ışığında düzlem içi çekme yükü altındaki geleneksel cam lifli polimer pultruzyon

plakalı bindirme mesnet birleşimlerin bulon boşlukları ve kenar mesafeleri için aşağıdaki tavsiyeler çıkarılmıştır (Mottram ve Turvey, 2003). Bu tavsiyeler oda sıcaklığı ve nemindeki ortamlarda servis veren yapılar içindir.

Tablo 6.1: Bindirme mesnet birleşimler için geometrik tavsiyeler.

	Deney Verisi		Üretici Tavsiyesi	
	Tavsiye Edilen	Min.	Tavsiye Edilen	Min.
Uç mesafesi / bulon çapı (e/d_b)	≥ 3	2	≥ 3	2
Plaka genişliği / bulon çapı (w/d_b)	≥ 5	3	≥ 4	3
Kenar mesafesi / bulon çapı (s/d_b)	≥ 2	1.5	≥ 2	1.5
Boyuna aralık / bulon çapı (p/d_b)	≥ 4	3	≥ 5	4
Tersine aralık / bulon çapı (g/d_b)	≥ 4	3	≥ 5	4
Bulon çapı / plaka kalınlığı (d_b/t_{pk})	≥ 1	0.5	2	1
Pul çapı / bulon çapı (d_p/d_b)	≥ 2	2	-	-
Delik aralığı ($d_d - d_b$)	$0.05d_b$	1.6mm	1.6mm	-



Şekil 6.6: Tek ve çok bulonlu bindirme mesnetler için geometrik parametreler.

Bu tavsiyelerin, özellikleri geleneksel pultruzyon profillere göre farklı olan pultruzyon tabakalar üzerinde yapılan deneylerden çıkarıldığı unutulmamalıdır. Pultruzyon profillerin tabakalara göre daha yüksek derecede ortotropileri ve boyuna dayanım ve rijitlik özellikleri vardır, ancak tersine özellikleri plakalara benzerdir. Bu sebepten plakalar için verilen tavsiyeler profiller için boyuna yönde yüklemelerde tutucu, tersine yönde yüklemelerde ise kabul edilebilirdir. Literatürdeki araştırma verileri temel alınarak Tablo 6.1’de verilen geometrik tavsiyeler aksenal yük

altındaki bindirme mesnetli pultruzyon malzemeler içindir. Bu tabloda verilen üretici tavsiye değerleri genellikle Structural Plastics Design Manual'da yayımlanan değerlere yakındır. Üretici tavsiyeleri hem plakalar hem de profiller için verilmektedir. Tablo 6.1'deki geometrik tavsiyeler malzeme boyuna yönde yüklendiğinde gevrek olan çekme ve kırılma göçme tiplerinin aksine bulonların etrafında yatak göçme tipi oluşması doğrudur. Ancak bu durum genellikle sadece tek bulonlu birleşimler için geçerlidir.

Yatak göçme tipi düktil bir göçme tipi olarak kabul edilir, pultruzyon malzemenin bulon ile doğrudan teması sonucu ezilmesidir. Bindirme birleşim boyuna yönde deplasman yapmaya devam ettikçe yatak göçmesi kesme göçmesine dönüşebilir. Kesme göçmesi bulon ile parça ucu arasında olabileceği gibi, yük yönüne paralel olarak bir dizi bulon arasında da gerçekleşebilir. Eğer uç mesafesi (ya da boyuna aralık) yeterince büyükse (örn., $e/d_b > 5$), bu göçme aşamalı olarak düktil olabilir (Bank, 2006).

Bir sıraya birden fazla bulon yerleştirildiğinde (yük yönüne dik yönde) tavsiye edilen aralık mesafelerine uyulsa da çekme göçmelerinin oluştuğu gözlenir. Çok sıralı mesnetlerde, çekme yüklerinin uygulandığı malzeme ucuna en yakın bulon ya da bulon sırası arkadakilere oranla daha fazla yük taşır. Bu çelik birleşimlerdeki durumun tersidir, çelik birleşimlerdeki en yüksek sınır durumda oluşan lokal akma yükün bütün bulon sıra ve sütunları boyunca eşit dağıldığını gösterir.

Bulon sıraları arasındaki yük dağılımı güncel bir araştırma konusudur (Mottram ve Turvey, 2003). Tablo 6.2'de çok sıralı bulon gurupları arasındaki yük dağılım tavsiyeleri verilmiştir. Tavsiyeler hem lifli polimer parçalı lifli polimer profiller için hem de çelik parçalı lifli polimer profiller için verilmiştir. Bulonlu pultruzyon birleşimlerde bir sırada en az iki en fazla dört bulon kullanılması tavsiye edilmiştir (Eurocomp, 1996).

İmalat kolaylığı açısından çelik birleşimlerde olduğu gibi delikler genellikle bulon çapından 1.6mm daha geniş açılır. Ancak eğer mümkünse delikler bulonlar ile aynı çapta açılmalı, değilse 1.6mm geçmemek koşuluyla bulon çapının %5'i kadar daha

açılmalıdır (Eurocomp, 1996). Pultruzyon birleşimler yatak birleşimlerdir, bulon deliklerindeki fazlalıklar bulonların yükü ana malzemeye aktarmadan önce kaymasına sebep olabilir. Bu durum ise pultruzyon yapıda yükleme yapıldıktan sonra istenmeyen deformasyon ve dönmelere sebebiyet verebilir. Delikleri büyütmeden birleşimi bir araya getirmek, delikler doğru açıldığında mümkündür. Pultruzyon malzeme göreceli olarak yumuşaktır ve bulonlar plastik çekiç ile hafifçe çakılarak yerleştirilebilir (Bank, 2006).

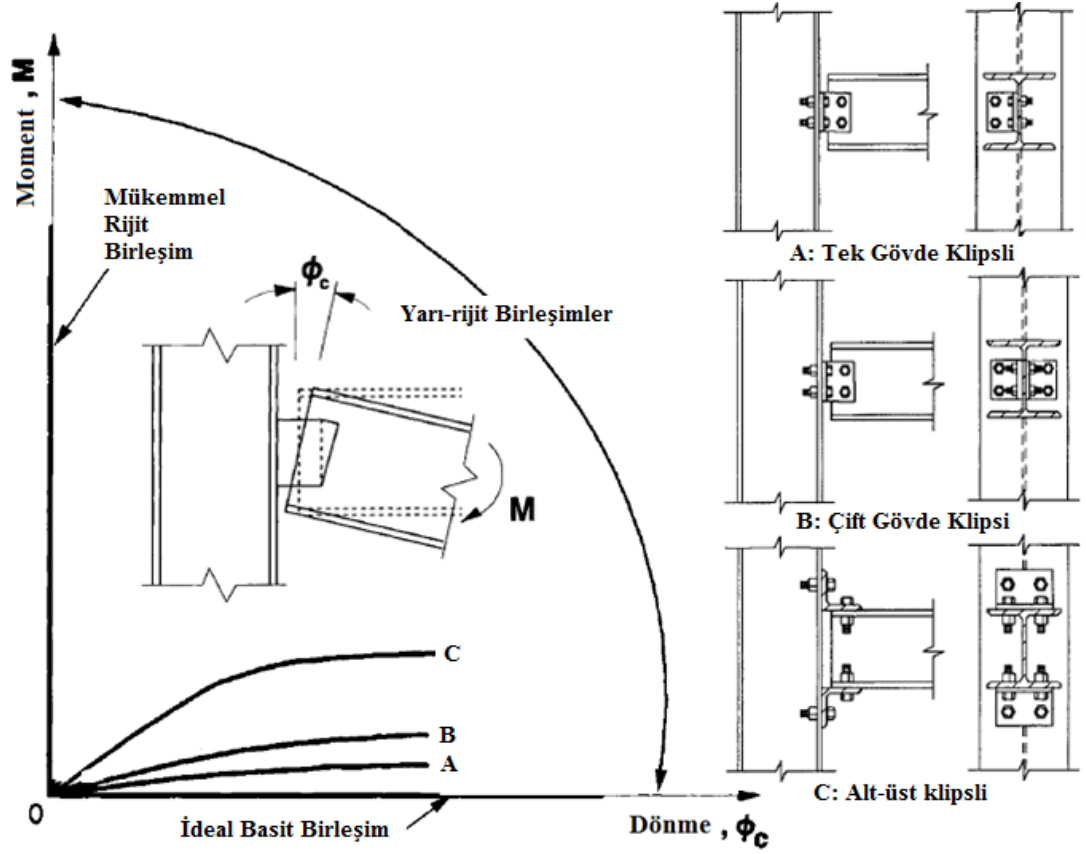
Tablo 6.2 Çok sıralı bindirme birleşimlerde sıralar arası yük dağılımı.

Sıra Sayısı	Malzeme	Sıra 1	Sıra 2	Sıra 3	Sıra 4
1	Lifli polimer-Lifli polimer	1			
2	Lifli polimer-Lifli polimer	1	1		
3	Lifli polimer-Lifli polimer	1.1	0.8	1.1	
4	Lifli polimer-Lifli polimer	1.2	0.8	0.8	1.2
1	Lifli polimer-Çelik	1			
2	Lifli polimer-Çelik	1.15	0.85		
3	Lifli polimer-Çelik	1.5	0.85	0.65	
4	Lifli polimer-Çelik	1.7	1	0.7	0.6

6.2. Moment Aktaran Yarı-Rijit Birleşimler

Pratikte bütün birleşimler yarı-rijittir. Ancak yapısal analizlerde moment aktaran birleşimlerin dönme rijitlikleri hesap kolaylığı olması açısından genelde sonsuz kabul edilir. Yarı-rijit terimi birleşimin davranışını tanımlayan moment-eğrilik ($M - \phi_c$) ilişkisinden gelir. Şekil 6.7’de lifli polimer pultruzyon profillerin birleşimlerinde de kullanılan bazı geleneksel çelik birleşim tiplerinin moment-eğrilik davranışları şematik olarak gösterilmiştir (Chan ve Chui, 2000).

Lifli polimer pultruzyon profiller kesit geometrileri itibariyle çelik profillere benzerler. Tasarımcılar bu profillere uyguladıkları ilk moment aktaran birleşim denemelerinde geleneksel çelik birleşimleri taklit etmişlerdir.



Şekil 6.7: Bazı geleneksel yarı-rijit çelik birleşimlerin moment-eğrilik ilişkileri.

6.2.1 Turvey'in yar-rijit birleşim performans analizleri

Turvey 1997 yılında lifli polimer pultruzyon profillerin moment aktarmayan aksel basit bindirme birleşimler yerine moment aktaran yarı-rijit birleşimler ile kullanıldığında kapasitelerindeki iyileşmeyi göstermek için bir dizi teorik analiz gerçekleştirmiştir. Teorik analizlerinde kullandığı pultruzyon profiller Strongwell firmasının ürettiği EXTREN serisinin 102mm ve 203mm derinlikli geniş flanşlı ve I kesitleridir. Analizlerinde üreticinin sağladığı mekanik özellikleri kullanmıştır. 102mm derinlikli kirişlerin boyuna elastisite modülü 17.24 kN/mm^2 , 203mm derinlikli kirişlerin ise 17.93 kN/mm^2 iken her iki tip içinde kesme modülü 2.93 kN/mm^2 alınmıştır. Analizlerde kesme modülünün kullanılmasının sebebi kesme deformasyonlarının dikkate alınmasıdır. Analizin gerçekleştirildiği yapı bir ucu ankastre (mükemmel rijit) diğer ucu yarı-rijit birleşimli tek açıklıklı, açıklık ortasından tekil yüke ve açıklık boyunca yayılı yüke maruz kalan kiriştir. Analizde modellenen yarı-rijit birleşimlerin ise doğrusal elastik olduğu kabul edilmiş ve

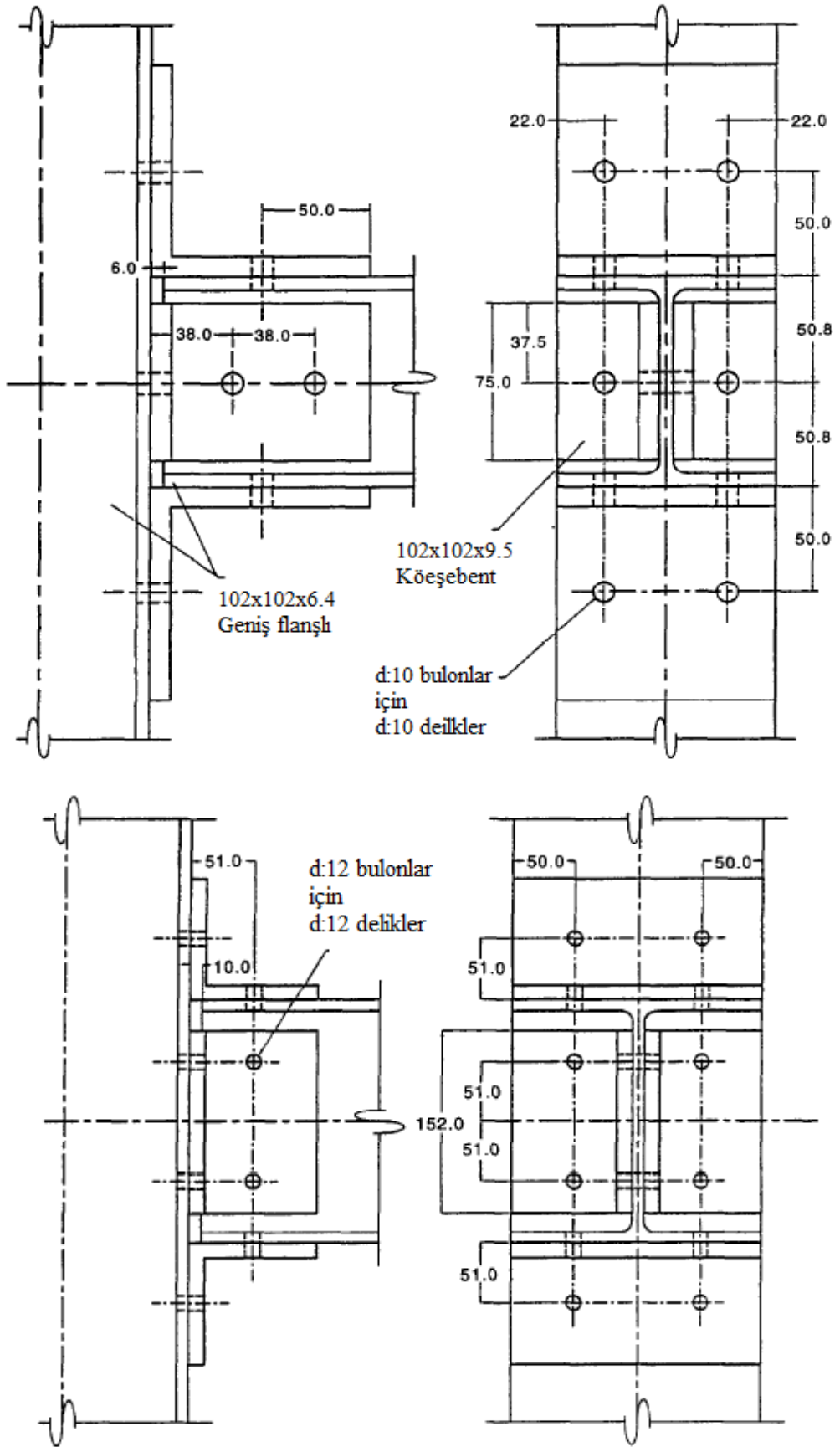
dönme rijitlikleri deneysel verilerle saptanmıştır. 102mm ve 203mm derinlikli pultruzyon profiller için olan gövde ve gövde-flanş klipsli yarı-rijit birleşim detayları sırasıyla Şekil 6.8’te verilmiştir. Yarı-rijit birleşimlere ait deneysel verilerden elde edilen dönme rijitlikleri ise Tablo 6.3’de verilmiştir.

Tablo 6.3: Yarı-rijit birleşimlerin dönme rijitlik değerleri.

Yarı rijit birleşim tipi	Kesit derinliği (mm)	Dönme rijitliği (kNm/rad)
Gövde klipsli	102	14
Gövde-flanş klipsli	102	85
Gövde klipsli	203	100
Gövde-flanş klipsli	203	500

Sonuçlar, basit eksenel birleşimler kullanmak yerine yarı-rijit özellikle de gövde-flanş klipsli birleşimler kullanarak kirişlerin yük taşıma kapasitelerinde ya da aynı yük altında geçebilecekleri açıklıklarda ciddi anlamda iyileşmeler olabileceğini ortaya koymuştur.

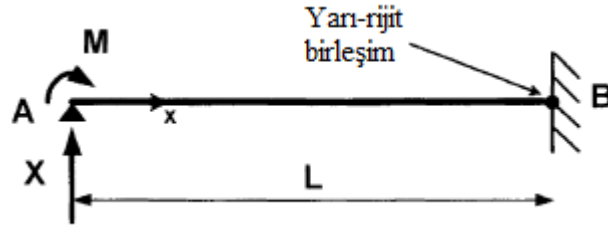
Örneğin 203mm derinlikli geniş flanşlı kirişin açıklık/derinlik oranının yaklaşık 10 olduğu durumda gövde klipsleri ile kullanıldığında yaklaşık %7~10, gövde-flanş klipsleri kullanıldığında ise %28~45 oranında daha fazla yük taşıyabildiği hesaplarla doğrulanmıştır. Bu durum aynı derinlikteki I kiriş için sırasıyla %14~18 ile %51~72’dir. Bunun sebebi ise I kirişlerin kesme deformasyonundan kesit geometrileri sayesinde geniş flanşlı kirişlere oranla daha az etkileniyor olmalarıdır (Turvey, 1997).



Şekil 6.8: 102mm ve 203mm derinlikli yarı-rijit birleşimlerin detayları.

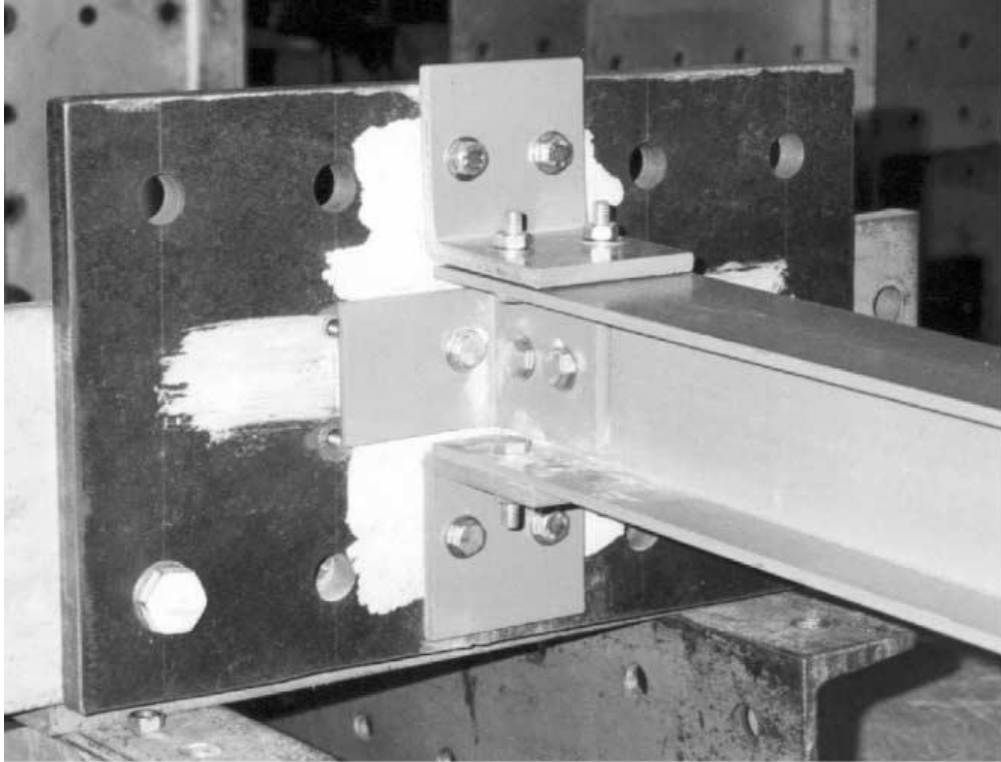
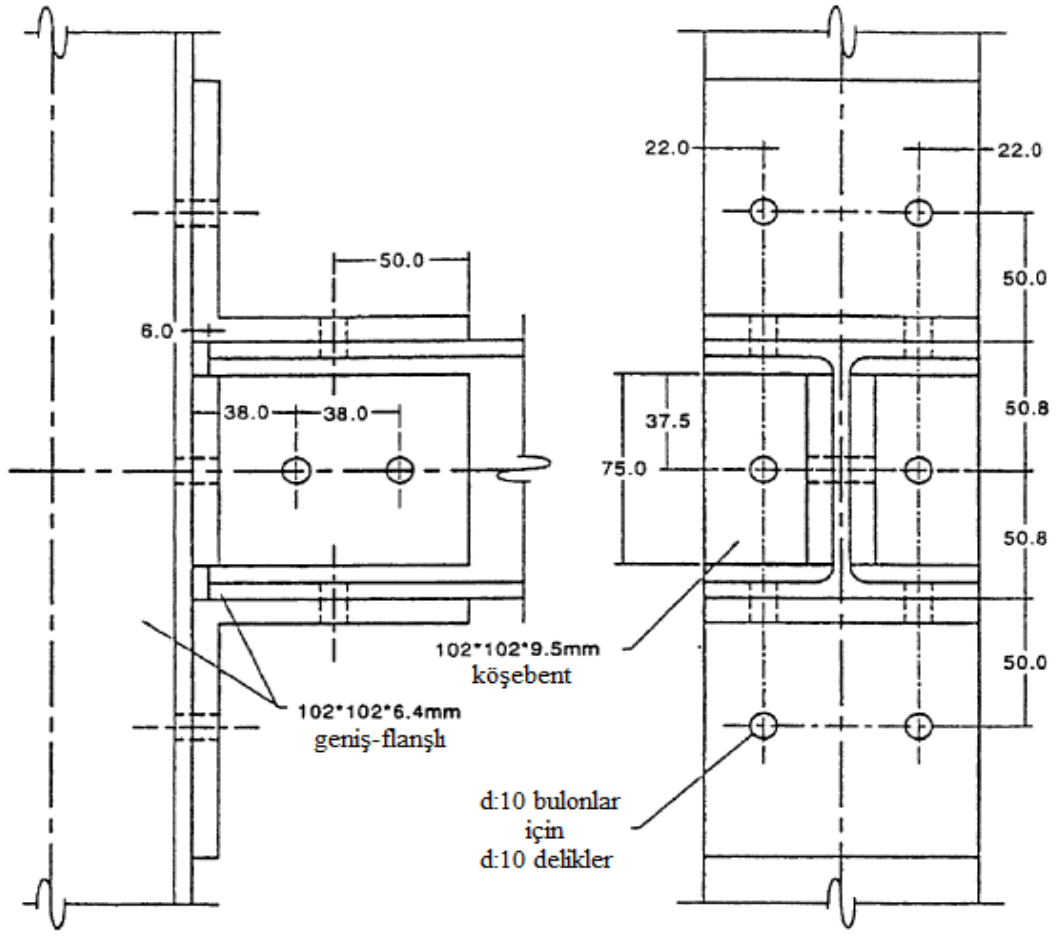
6.2.2 Turvey'in yarı-rijit birleşim deneyleri

Turvey 2002 yılında lifli polimer pultruzyon profillerle yarı-rijit moment aktaran birleşimler kullanarak 59 set deney gerçekleştirmiştir. Deneyde bir ucu yarı-rijit birleşimli lifli polimer pultruzyon kirişin diğer ucu basit mesnetlenmiş ve bir dış moment yüküne tabi tutulmuştur (Şekil 6.9). Deneyde kullanılan lifli polimer pultruzyon kirişler Strongwell'in EXTREN 500 serisi 102x102x6.4 mm geniş flanşlı profilleridir. Kirişin lif oranı %40, reçine sistemi poliester ve lif sistemi tek yönlü fitiller ve sürekli lif keçelerden oluşmaktadır.

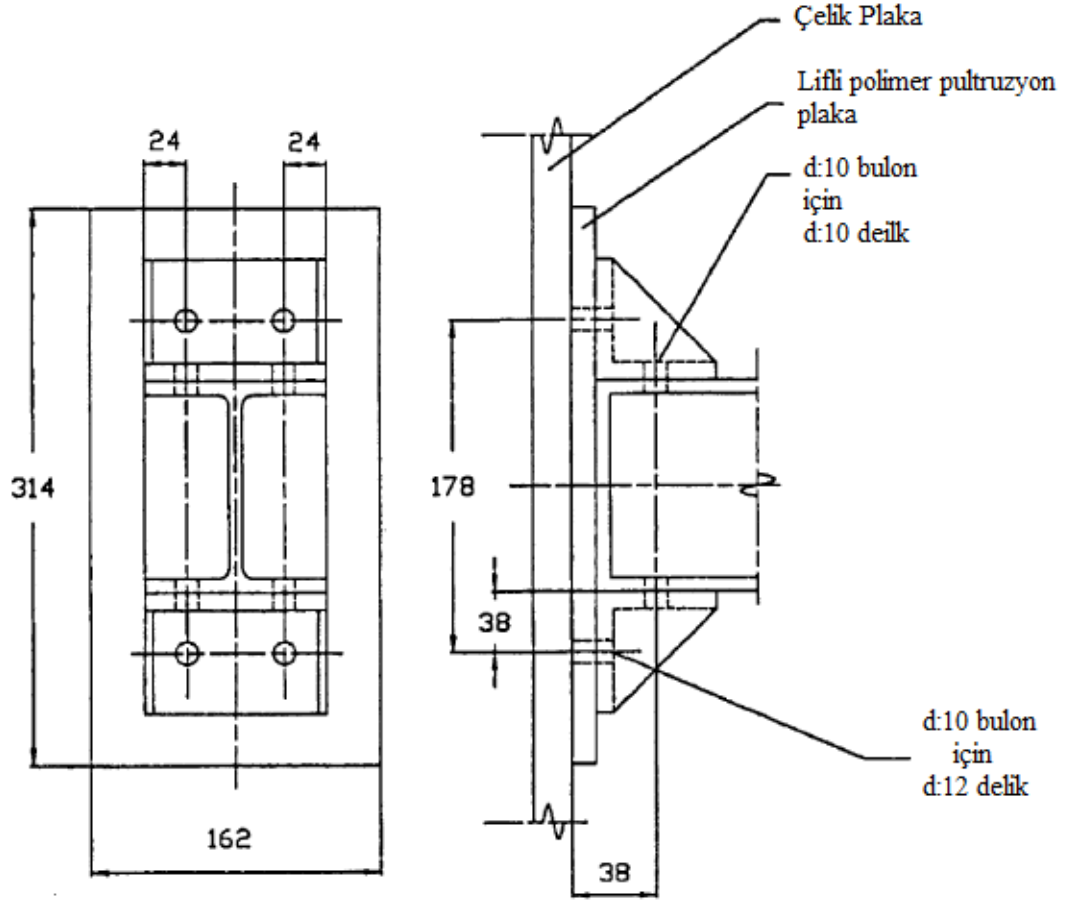


Şekil 6.9: Deney düzeneğinin şematik gösterimi.

Deney 3.4m ve 3m olmak üzere iki farklı açıklıkta gerçekleştirilmiştir. Pultruzyon profille gövde klipsli, flanş klipsli, gövde-flanş klipsli ve UC birleşimli (Universal Connector) olmak üzere dört farklı tipte yarı-rijit birleşim kullanılmıştır. Klipsli birleşimlerde kullanılan klipsler yine aynı üreticiye ait lifli polimer pultruzyon 102x102x9.5mm köşebent profillerden kesilmiş parçalardır. UC birleşim normal köşebentlerden farklı olarak reçine enjeksiyon yöntemiyle üretilmiş üçgen kenar plakalı köşebent kesitlerden oluşur. Klipsli birleşimin detayları Şekil 6.10'de, UC birleşim detayları Şekil 6.11'de verilmiştir. Birleşimde kullanılan bulonlar 10mm çaplı yüksek dayanımlı çeliktir ve 20Nm'lik torkla sıkılmıştır. Teorik analizlerde kullanılmak üzere kirişin boyuna elastisite modülü için üretici verisi olan 17.24kN/mm² yerine deneyde elde edilen 22kN/mm², kesme modülü için ise üretici verisi olan 2.93 kN/mm² alınmıştır. Deneylerde kirişe 1.1 ve 2.2 kNm'lik iki farklı moment uygulanmıştır.



Şekil 6.10: Klipsli yarı-rijit birleşim detayları.



Şekil 6.11: UC yarı-rijit birleşim detayları.

Bu deneyde kiriş servis deformasyon sınırı olan $L/200$ deformasyonuna kadar test edildiğinden birleşimlerin göçme sınırı ya da göçme davranışı hakkında bilgi verilmemektedir. Yapılan deneyde kirişin açıklık ortasındaki deney sonucu kaydedilen deformasyon değerleri, yarı-rijit birleşimlerin dönme rijitlik değerlerinin kullanıldığı ve kesme deformasyonunun göz önünde bulundurulduğu teorik öngörüler ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca deney sonucu elde edilen açıklık ortası deformasyonlardan yarı-rijit birleşimlerin dönme rijitlik değerleri çıkartılarak analizde kullanılan değerler ile de karşılaştırılmıştır. Teorik hesaplamalarda kullanılan yarı-rijit birleşim dönme rijitlikleri iki tip yarı-rijit birleşim karakterizasyon deneyinden alınmıştır. Bunlar; kolon-kiriş birleşimin deneyleri ve rijit plakaya bağlanmış konsol kiriş deneyleridir (Tablo 6.4). Yapılan deneyler sonucunda Tablo 6.4'den alınan yarı-rijit birleşim dönme rijitlikleri kullanılarak öngörülen deformasyon değerleri gerçek deney değerlerinden %10 sapma göstermiştir. Ek olarak Tablo 6.4'deki gövde klipsli yarı-rijit birleşimin dönme

rijitlik değerinin düşük hesaplandığını ortaya konmuştur. Ayrıca deneyler, rijit çelik plakaya bağlanmış konsol kiriş deneyinden elde edilen yarı-rijit birleşim dönme rijitlik değerlerinin kolon-kiriş birleşim deneyinden elde edilenlere göre daha sağlıklı olduğunu ortaya koymuştur. Bunun sebebi kolon-kiriş deneyinde kolonun dönmesinin etkisidir.

Tablo 6.4: Yarı rijit birleşimlerin deneysel dönme rijitlik değerleri.

Yarı-rijit bulonlu birleşim tipi	Kısa kolon-çift konsol kiriş deneyinden elde edilen dönme rijitlikleri (kNm/rad)	Rijit çelik plaka-tek konsol kiriş deneyinden elde edilen dönme rijitlikleri (kNm/rad)
Gövde klipsli	14	21
Flanş klipsli	53	79
Gövde-flanş klipsli	85	127.5
UC	105	-

Tablo 6.5 ve Tablo 6.6’da sırasıyla 3.4m ve 3m açıklıklı deney düzenekleri için açıklık ortası deformasyon değerleri ile bu değerlerin Tablo 6.4’deki yarı-rijit birleşim dönme rijitlikleri kullanılarak teorik öngörümüleri karşılaştırılmıştır. Teorik analizler kesme deformasyonlu kiriş için yapıldığından analizlerde kesme rijitliği göz önünde bulundurulmuştur. Kesme rijitliği hesabında hem kirişin bütün kesit alanı hem de sadece gövde alanı kullanılmıştır. “*” işaretli değerler kesme alanı olarak sadece kesitin gövde alanının kullanıldığı durumlar içindir (Turvey ve Brooks, 2002).

Tablo 6.5: 3.4m açıklıklı deneyler için deneysel veriler ve teorik öngörümlemler.

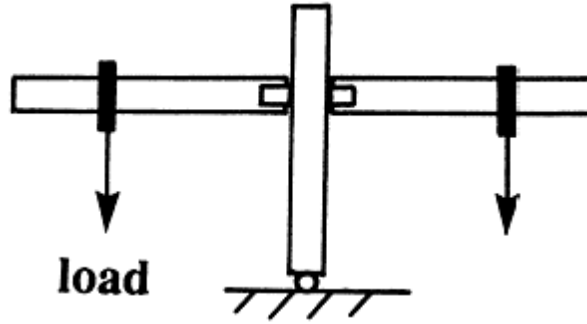
Açıklama	Moment (kNm)	Deformasyon (mm)	Dönme Rijitliği (kNm/rad)
<i>L:3.4m gövde klipsli</i>			
9 deneyin ortalaması	1.1	8.86	
9 deneyin ortalaması	2.2	18.00	
Teorik analiz	1.1	9.96	14
Teorik analiz*	1.1	9.98	14
Teorik analiz	2.2	19.92	14
Teorik analiz*	2.2	19.95	14
Teorik analiz	1.1	9.59	21
Teorik analiz*	1.1	9.62	21
Teorik analiz	2.2	19.19	21
Teorik analiz*	2.2	19.23	21
<i>L:3.4m flanş klipsli</i>			
13 deneyin ortalaması	1.1	7.73	
13 deneyin ortalaması	2.2	16.25	
Teorik analiz	1.1	8.48	53
Teorik analiz*	1.1	8.53	53
Teorik analiz	2.2	16.96	53
Teorik analiz*	2.2	17.05	53
Teorik analiz	1.1	7.94	79
Teorik analiz*	1.1	8.00	79
Teorik analiz	2.2	15.88	79
Teorik analiz*	2.2	16.00	79
<i>L:3.4m gövde-flanş klipsli</i>			
8 deneyin ortalaması	1.1	7.16	
8 deneyin ortalaması	2.2	14.73	
Teorik analiz	1.1	7.84	85
Teorik analiz*	1.1	7.91	85
Teorik analiz	2.2	15.69	85
Teorik analiz*	2.2	15.81	85
Teorik analiz	1.1	7.33	127.5
Teorik analiz*	1.1	7.40	127.5
Teorik analiz	2.2	14.66	127.5
Teorik analiz*	2.2	14.81	127.5
<i>L:3.4m UC birleşimli</i>			
4 deneyin ortalaması	1.1	7.06	
4 deneyin ortalaması	2.2	14.81	
Teorik analiz	1.1	7.57	105
Teorik analiz*	1.1	7.64	105
Teorik analiz	2.2	15.14	105
Teorik analiz*	2.2	15.28	105

Tablo 6.6: 3m açıklıklı deneyler için deneysel veriler ve teorik öngörüler.

Açıklama	Moment (kNm)	Deformasyon (mm)	Dönme Rijitliği (kNm/rad)
<i>L:3m gövde klipsli</i>			
4 deneyin ortalaması	1.1	7.04	
4 deneyin ortalaması	2.2	14.46	
Teorik analiz	1.1	7.83	14
Teorik analiz*	1.1	7.84	14
Teorik analiz	2.2	15.66	14
Teorik analiz*	2.2	15.69	14
Teorik analiz	1.1	7.57	21
Teorik analiz*	1.1	7.59	21
Teorik analiz	2.2	15.13	21
Teorik analiz*	2.2	15.17	21
<i>L:3m flanş klipsli</i>			
8 deneyin ortalaması	1.1	6.19	
8 deneyin ortalaması	2.2	13.20	
Teorik analiz	1.1	6.74	53
Teorik analiz*	1.1	6.78	53
Teorik analiz	2.2	13.47	53
Teorik analiz*	2.2	13.56	53
Teorik analiz	1.1	6.32	79
Teorik analiz*	1.1	6.38	79
Teorik analiz	2.2	12.64	79
Teorik analiz*	2.2	12.75	79
<i>L:3m gövde-flanş klipsli</i>			
9 deneyin ortalaması	1.1	5.70	
9 deneyin ortalaması	2.2	11.97	
Teorik analiz	1.1	6.24	85
Teorik analiz*	1.1	6.30	85
Teorik analiz	2.2	12.49	85
Teorik analiz*	2.2	12.60	85
Teorik analiz	1.1	5.83	127.5
Teorik analiz*	1.1	5.90	127.5
Teorik analiz	2.2	11.66	127.5
Teorik analiz*	2.2	11.81	127.5
<i>L:3m UC birleşimli</i>			
4 deneyin ortalaması	1.1	5.58	
4 deneyin ortalaması	2.2	11.91	
Teorik analiz	1.1	6.03	105
Teorik analiz*	1.1	6.09	105
Teorik analiz	2.2	12.05	105
Teorik analiz*	2.2	12.18	105

6.2.3 Mottram'ın gövde klipsli yarı-rijit birleşim deneyleri

Mottram 1996 yılında Eurocomp polimer kompozitler tasarım kılavuzu için yaptığı çalışmada gövde klipsli yarı-rijit lifli polimer pultrüzyon profil kolon-kiriş birleşimlerini test etmiştir. Deneyde kullanılan kolon ve kirişler Strongwell şirketinin ürettiği EXTREN serisi 203x203x9.5mm geniş flanşlı cam lifli polimer pultrüzyon profillerdir. 5 farklı gövde klipsli yarı-rijit kompozit birleşim denenmiştir. Klipsler 152x152x12.7mm köşebent profillerden kesilmiştir. Birleşim düzeneklerinde kolon ve kiriş profiller arasında boşluk bırakılmamıştır. Deney düzeneği Şekil 6.12'de birleşim detayları Şekil 6.13'te gösterilmiştir. Tablo 6.7'de birleşimlerin isimlendirilme sistemi verilmiştir.



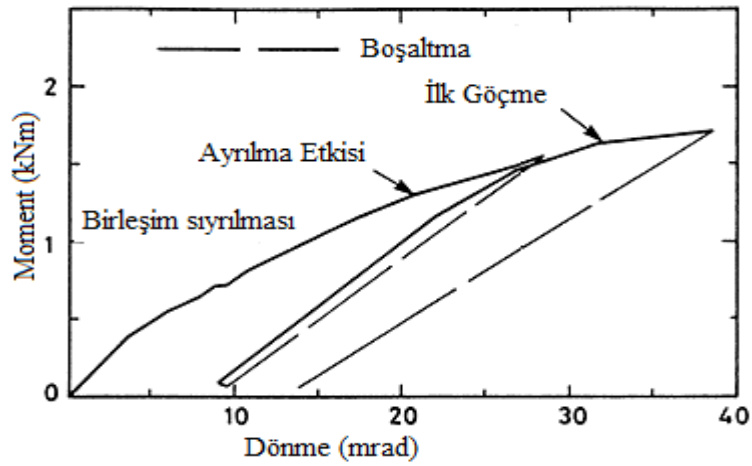
Şekil 6.12: Deney düzeneği.

Tablo 6.7: Birleşim varyasyonlarının etiketleri.

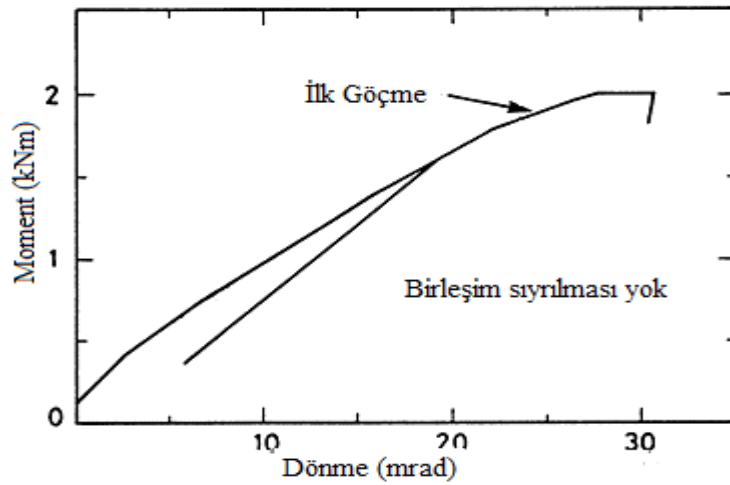
Etiket	Birleşim Tipi	Kolon Aksı	Birleşim Detayı
Wmj_bt	Gövde klipsli	Ana	Bulonlu (16mm)
Wmj_bt2	Gövde klipsli	Ana	Bulonlu (20mm)
Wmj_bt+bd	Gövde klipsli	Ana	Bulonlu (16mm) + Yapışkanlı
Wmj_bd	Gövde klipsli	Ana	Yapışkanlı
Wmn_bt	Gövde klipsli	İkincil	Bulonlu (16mm)

Yapışkanlı birleşimlerde Araldite 2015 ticari markalı epoksi reçinesi kullanılmıştır. Bulonlarla 30mm çaplı pullar kullanılmıştır. 16mm bulonlu birleşimlerde bulon delikleri 2mm geniş açılmıştır. Ancak Wmj_bt2 ve Wmn_bt'nin bulon deliklerinde tolerans yoktur. Bulonlar 23.8Nm'lik torkla sıkılmıştır. Birleşimlere ait karakteristik moment-eğrilik verileri Tablo 6.8'de verilmiştir. Şekil 6.14'ten Şekil 6.19'a birleşimlerin moment-eğrilik diyagramları verilmiştir.

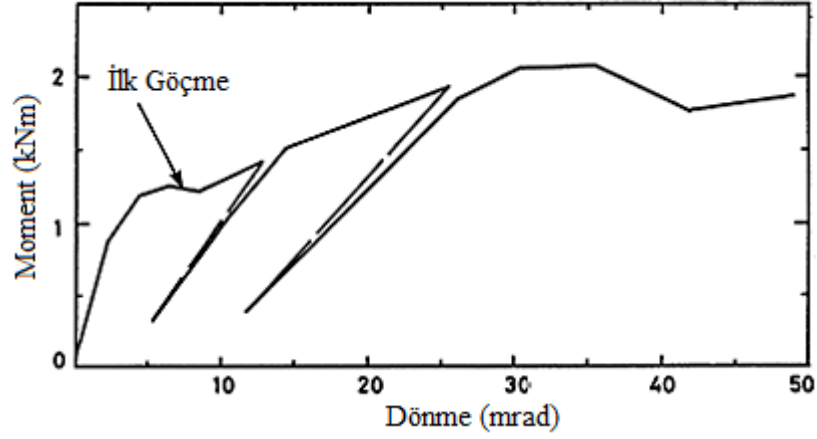
Mottram ilk defa yarı-rijit pultruzyon birleşimler için “ilk göçme” terimini kullanmıştır. Buna göre ilk göçme birleşim elemanlarının donatı lifleri açığa çıkacak kadar hasar aldığı andaki durumdur. Sınır göçmesinde ise moment ve dönme değerleri ilk göçmeye göre daha yüksektir. İlk göçmenin çelik birleşimlerde doğrudan bir karşılığı yoktur. Elastik sınır ya da akma başlangıcına benzetilebilir. Pultruzyon birleşimin ilk göçmesindeki dönme değerini bilmek önemlidir. Çünkü yaygın olarak E-cam lifleri ile üretilen ve korozif ortamlarda kullanılan lifli polimer pultruzyon profillerin açığa çıkan lifleri korozyona maruz kalır ve ömrü kısalmır. Fiziksel deneylerde ilk göçme gözlem yolu ile belirlenir. İlk göçmedeki dönme değeri tasarım açısından da çok önemlidir. Örneğin birleşimin ilk göçme dönme değeri kirişin servis deformasyon oranını karşılamıyorsa kiriş kesiti derinleştirilmelidir.



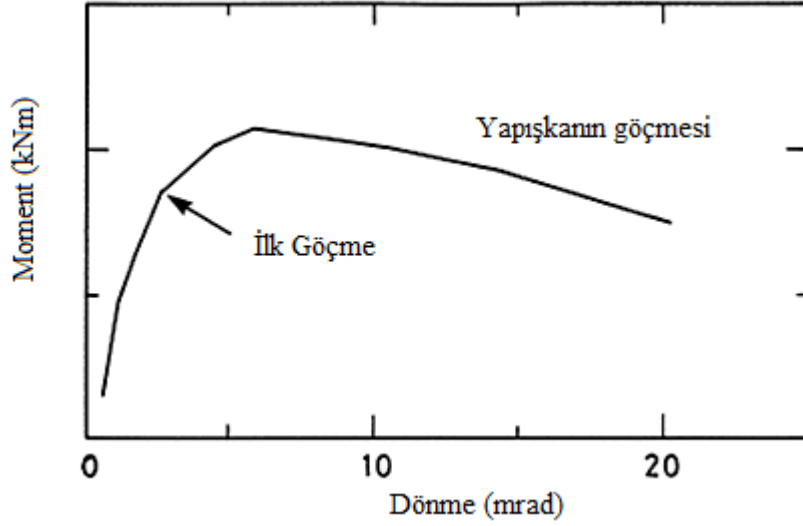
Şekil 6.14: Wmj_bt'nin moment-eğrilik diyagramı.



Şekil 6.15: Wmj_bt2'nin moment-eğrilik diyagramı.

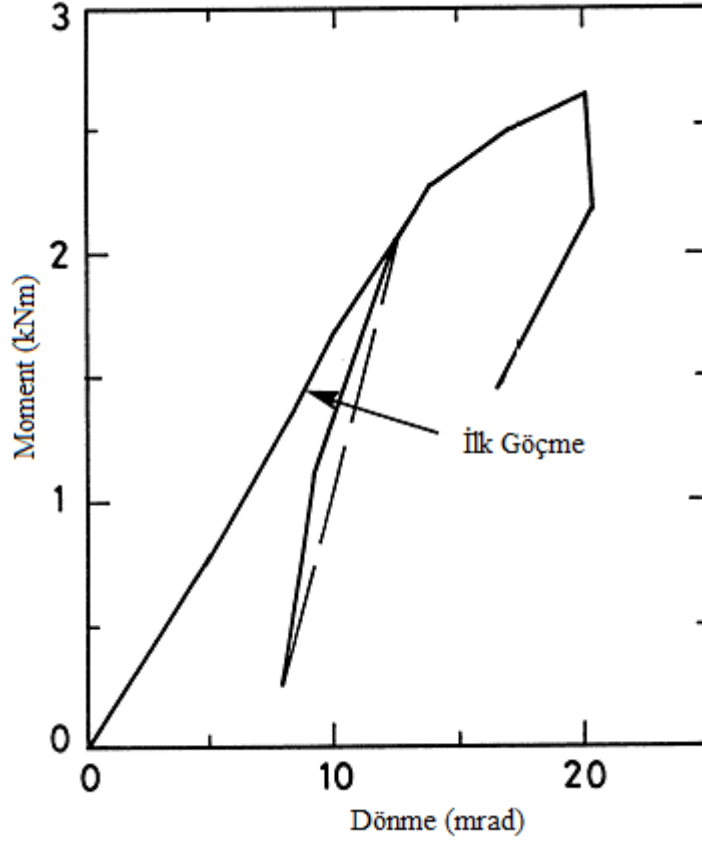


Şekil 6.16: Wmj_bt+bd'nin moment-eğrilik diyagramı.



Şekil 6.17: Wmj_bd'nin moment-eğrilik diyagramı.

Deney sonuçlarından bulunlu birleşimlerin daha esnek, yapışkanlı birleşimlerin ise daha rijit oldukları gözükmemektedir. Yayıllı yüklü rijit kolonlara bağlanmış bir kirişin servis deformasyon sınırının $L/250$ olduğu düşünülürse buna karşılık gelen mesnet dönmesi 13mrad 'dir. Buna göre bulunlu ikincil aks ve sadece yapışkanlı ana aks birleşimleri bu yeterliliği sağlamamıştır. Bulonlu yapışkanlı birleşimde ise 13mrad sınırı yapışkan göçmesi gerçekleşmeden önce sağlanamamıştır. Üretici tarafından belirlenen profiller için $L/100$ 'lük deformasyon limiti ise hiçbir birleşim tarafından sağlanamamıştır. Bütün sonuçların kısa dönem yüklemeye ait olduğu ve malzemenin sünme davranışı unutulmamalıdır (Mottram, 1996).



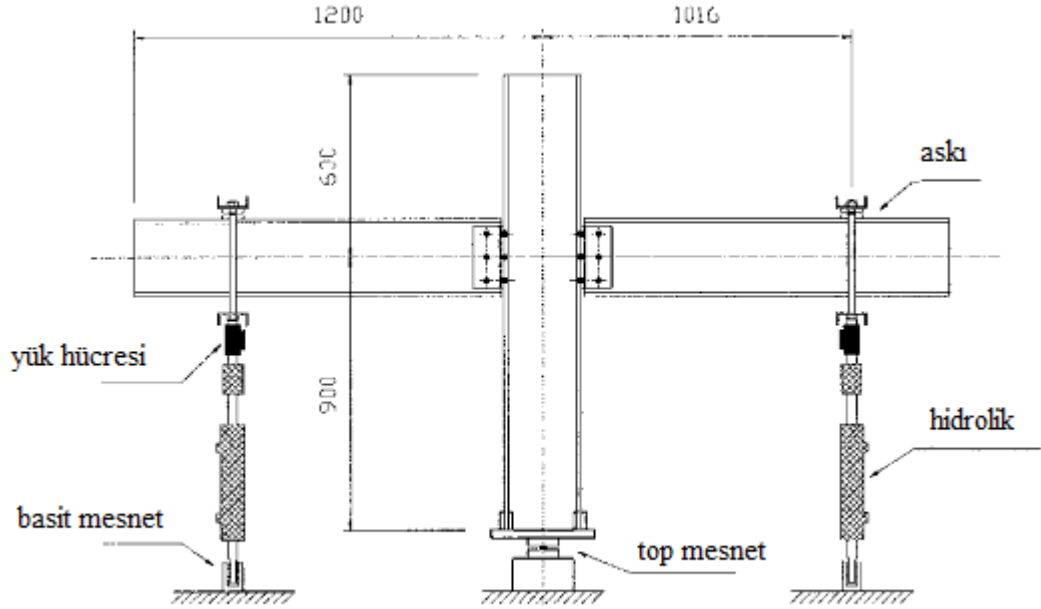
Şekil 6.18: Wmn_bt'nin moment-eğrilik diyagramı.

Mottram, Eurocomp için gerçekleştirdiği ve 203mm derinlikli profiller ile kısıtlı olan bu çalışmasını 1999 yılında genişletmiştir. Bu sefer üç adet 254x254x12.7mm geniş flanşlı lifli polimer pultruzyon profil test etmiştir. Profiller yine Strongwell şirketinin EXTREN serisidir. Yine gövde klipsli yarı-rijit birleşimle bulonlu yapışkanlı kombinasyonlar denenmiştir. Deney düzeneği Şekil 6.19'de ve şematik olarak Şekil 6.20'de gösterilmiştir. Ana aks ile ikincil aks birleşim detayları ise Şekil 6.21 ve 6.22'de verilmiştir. 203mm uzunluğundaki klipsler 152x152x12.7mm yine EXTREN serisi köşebentlerden kesilmiştir.

Birleşimlerde M16 sınıfı 8.8 çelik bulonlar 30mm çaplı pullarla kullanılmış ve lifli polimer pultruzyon profiller için yüksek bir değer olan 100Nm'lik bir tork ile sıkılmıştır. Wmj10_bt+bd birleşimlerde köşebentler Araldite 2015 ticari isimli epoksi ile yapıştırılmıştır. Üç farklı tipteki birleşimlerin isimlendirilme sistemi Tablo 6.9'de verilmiştir.



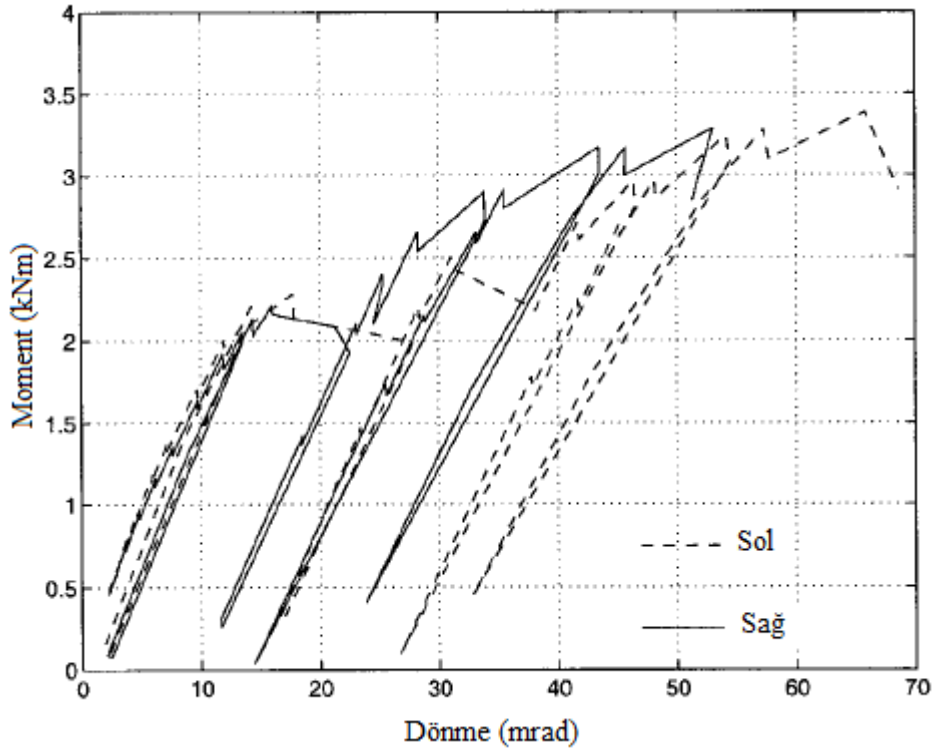
Şekil 6.19: Deney düzeneği.



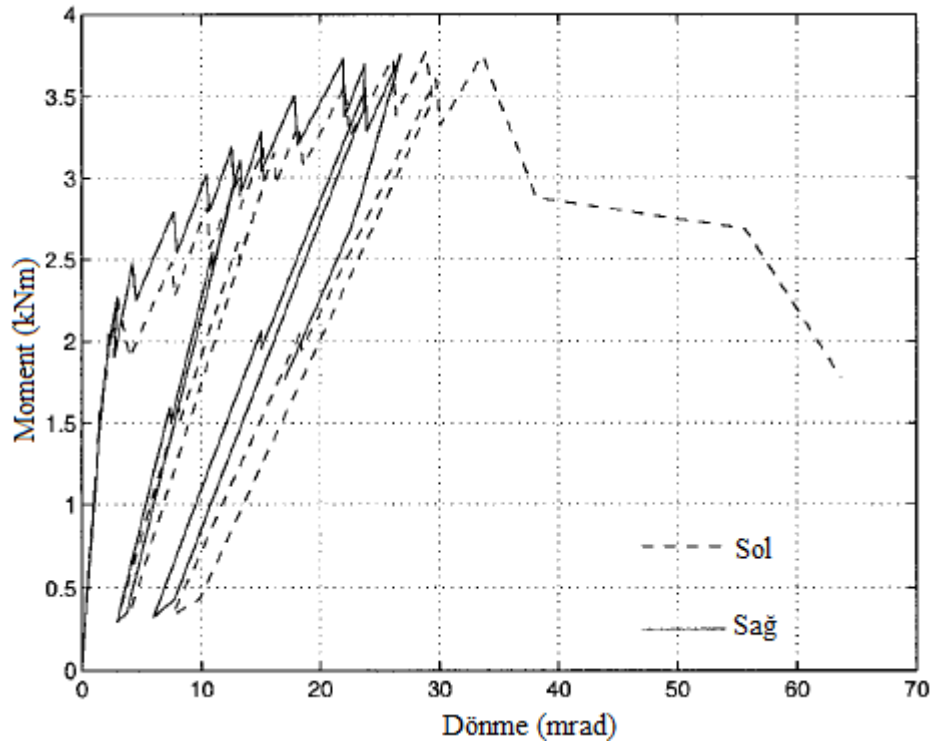
Şekil 6.20: Şematik olarak deney düzeneği.

Birleşimlerin moment-eğrilik ilişkileri Şekil 6.23'dan 6.25'e verilmiştir. Birleşimin sol tarafı kesik çizgiler ile sağ tarafı ise sürekli çizgilerle gösterilmiştir. Wmj10_bt ve Wmn10_bt gibi sadece bulonlu olan birleşimlerin moment-eğrilik davranışları, sıyrılma göz ardı edilerek Şekil 6.26 ve 6.27'de verilmiştir. Bu iki birleşim tipinde de sıyrılma yatay hareketten dolayı olmuştur. Yapıştırıcılı birleşimlerde bu sıyrılma gerçekleşmemiştir. Şekil 6.28'de bütün birleşim tipleri için moment-dönme diyagramları ilk göçme noktaları ile birlikte yumuşatılarak verilmiştir.

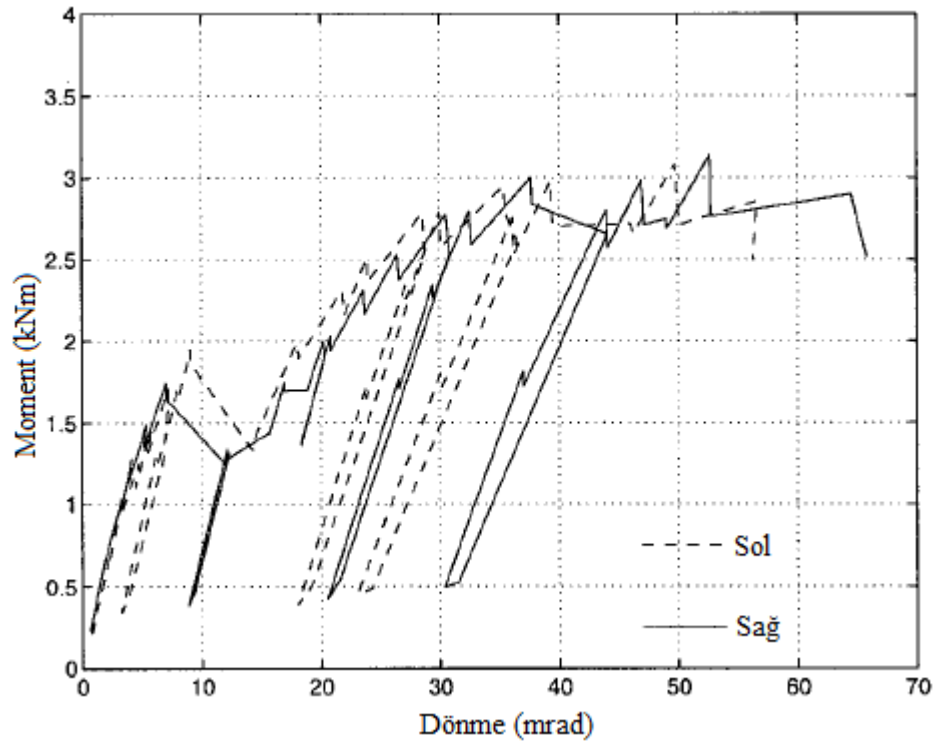
Mottram test ettiği birleşimler için hem başlangıç dönme rijitliklerini hem de ilk göçme dönme rijitliklerini yayımlamıştır. Göçme durumuna kadar test edilen birleşimlerin maksimum moment ve dönme kapasiteleri de ayrıca sunulmuştur (Tablo 6.10).



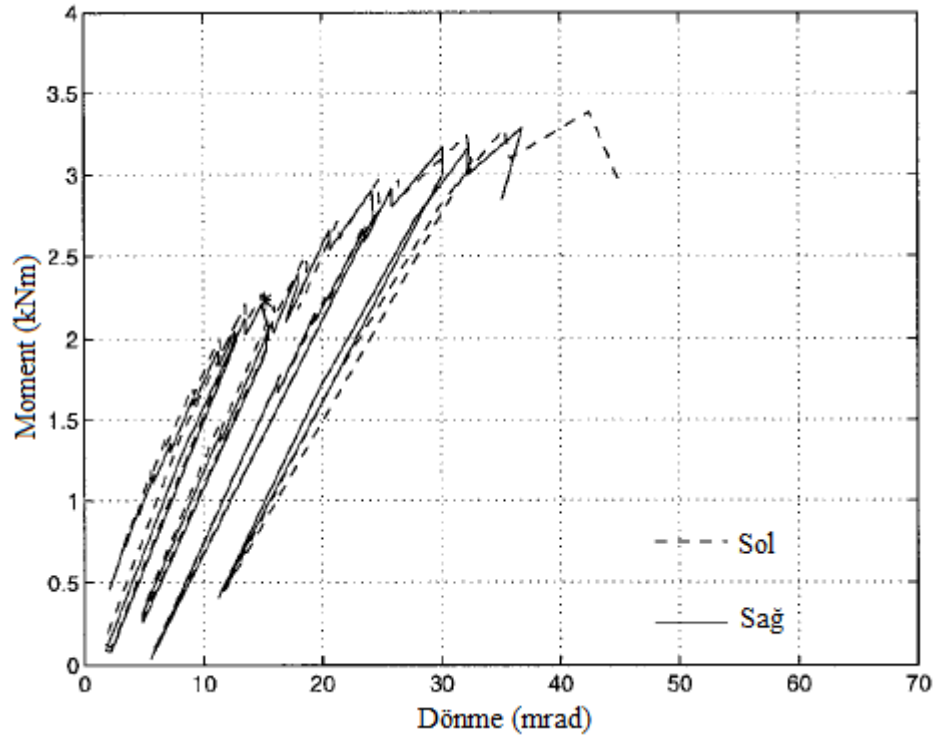
Şekil 6.23: Wmj10_bt'nin moment-eğrilik ilişkisi.



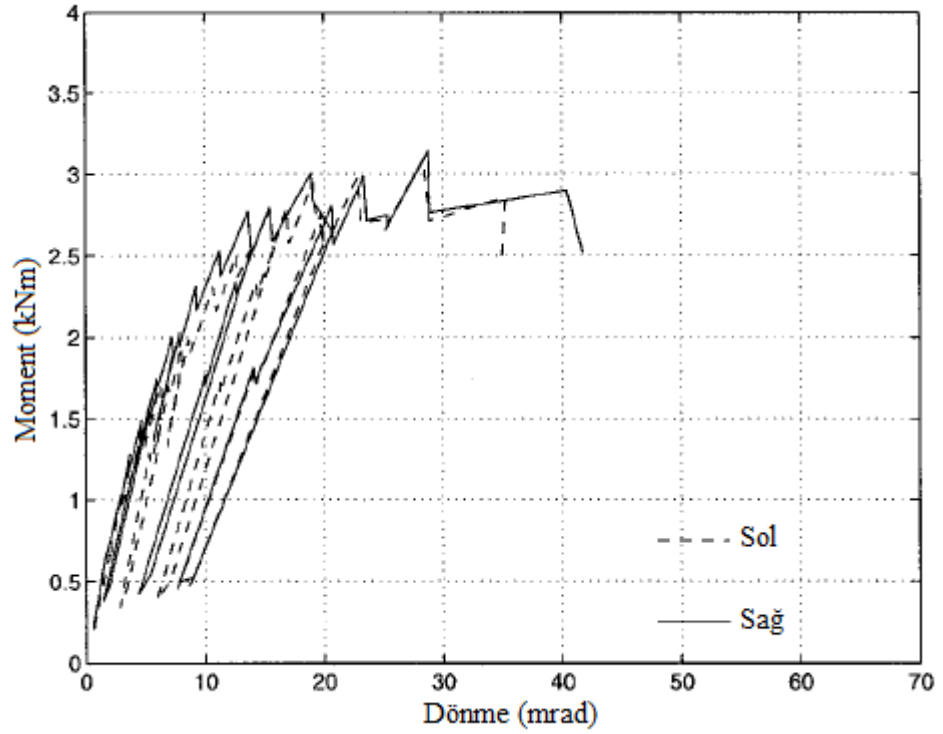
Şekil 6.24: Wmj10_bt+bd'nin moment-eğrilik ilişkisi.



Şekil 6.25: Wmn10_bt'nin moment-eğrilik ilişkisi.



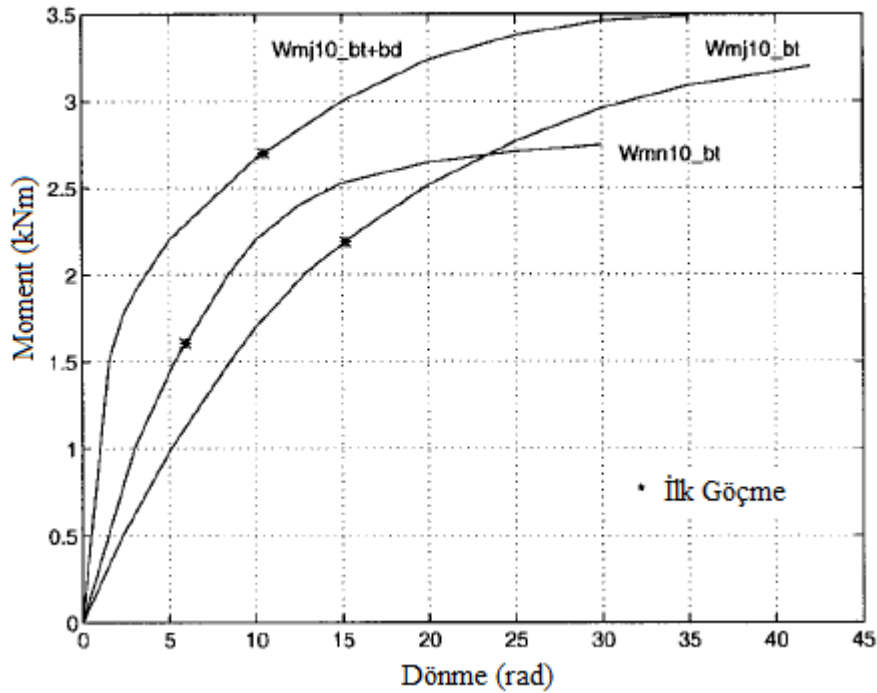
Şekil 6.26: Wmj10_bt'nin modifiye edilmiş moment-eğrilik ilişkisi (sıyrılmaz).



Şekil 6.27: Wmn10_bt'nin modifiye edilmiş moment-eğrilik ilişkisi (sıyrılmaz).

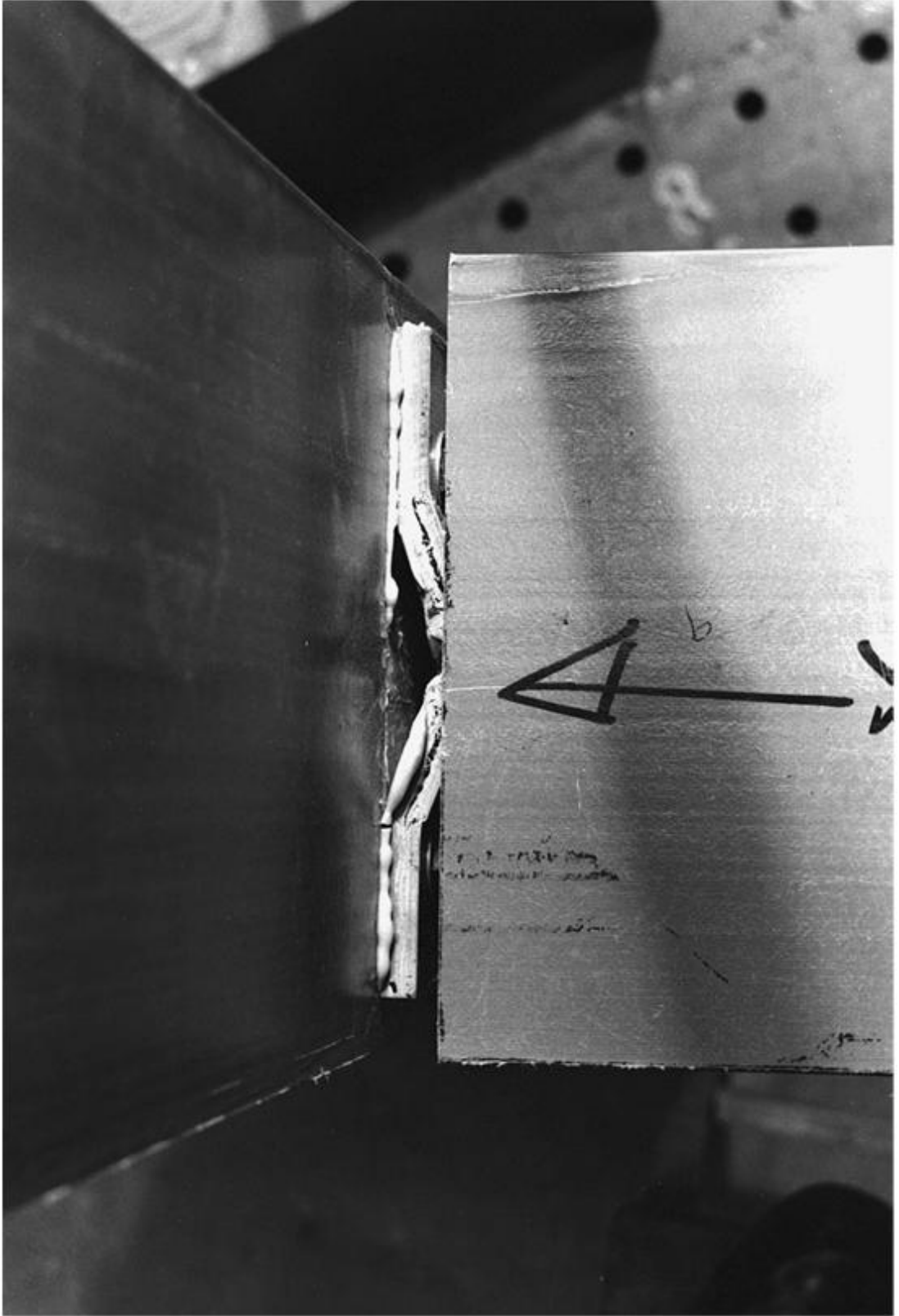
Tablo 6.10: Gövde klipsli yarı-rijit birleşimlerin özellikleri

Özellik	Wmj10_bt	Wmj10_bt+bd	Wmn10_bt
Başlangıç Momenti (kNm)	0.5	1.5	1
Başlangıç Dönmesi (mrad)	2.3	1.5	3.0
Başlangıç Rijitliği (kNm/rad)	220	990	340
İlk Göçme Momenti (kNm)	2.2	2.8	1.6
İlk Göçme Dönmesi (mrad)	15	10.4	6
İlk Göçme Rijitliği (kNm/rad)	150	270	250
Maksimum Moment (kNm)	3.2	3.5	2.8
Maksimum Dönme (mrad)	42	35	30



Şekil 6.28: 254mm derinlikli yarı-rijit birleşimlerin yumuşatılmış moment-dönme diyagramları.

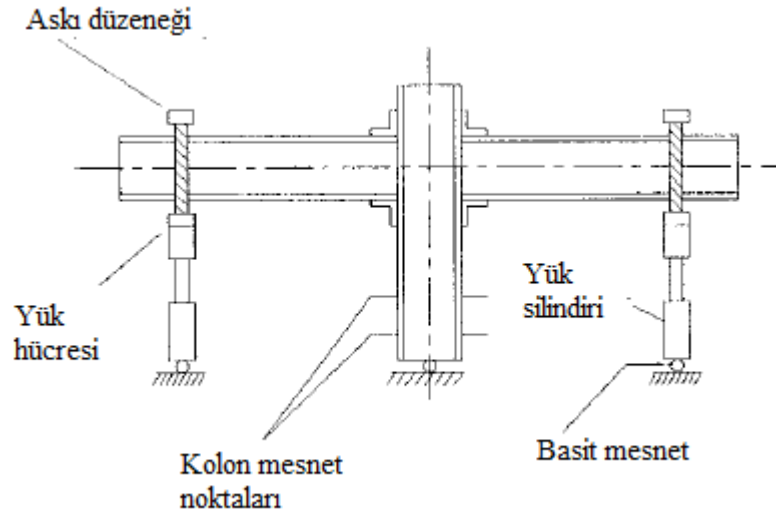
Şekil 6.28'deki her diyagram doğrusal ve doğrusal olmayan kısım şeklinde ikiye ayrılabilir. Birleşimlerin ilk rijitlikleri doğrusala yakındır, ilk göçmeden sonra ise hasarın aşamalı olarak büyüdüğü doğrusal olmayan elastik malzeme kısmı görülmektedir. Bu kısım malzemenin elastik davranışı ile birleşim parçalarının artan hasarının bir araya gelmesiyle oluşur (Şekil 6.29). Ayrıca 254mm derinlikli birleşimlerde 3 bulon kullanma imkanı bulunmasına rağmen fazladan kullanılan 1 bulonun birleşimin maksimum dönmesini azaltmadığı da görülmüştür (Mottram ve Zheng, 1999a).



Şekil 6.29: Birleşim $Wmj10_bl+bd$ 'ın göçmesi (ayrılma etkisi).

6.2.4 Mottram'ın flanş klipsli yarı-rijit birleşim deneyleri

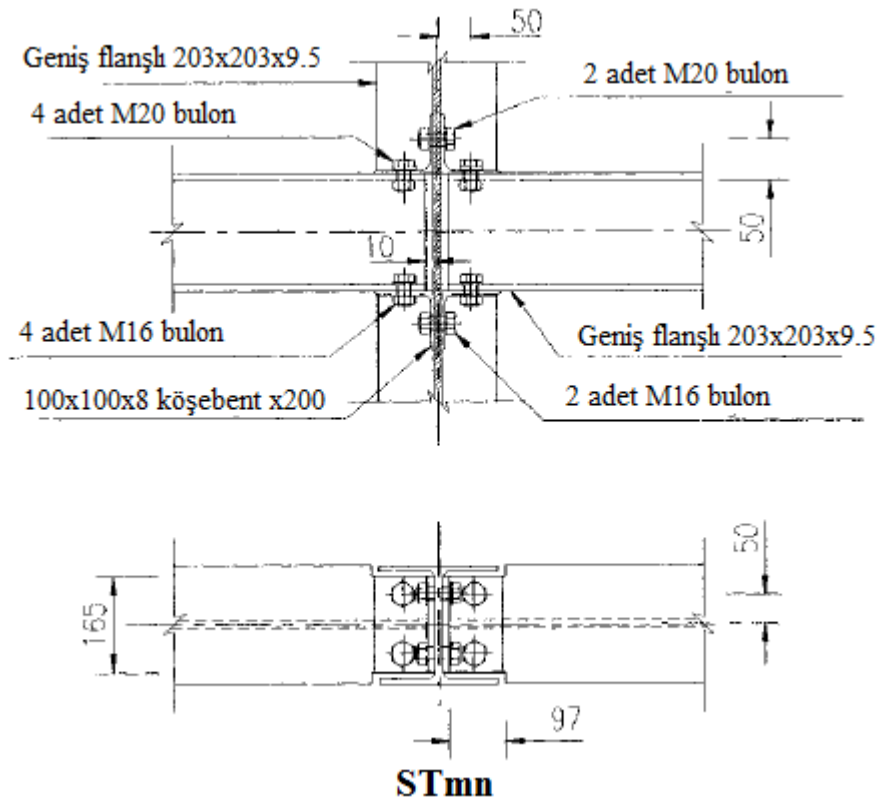
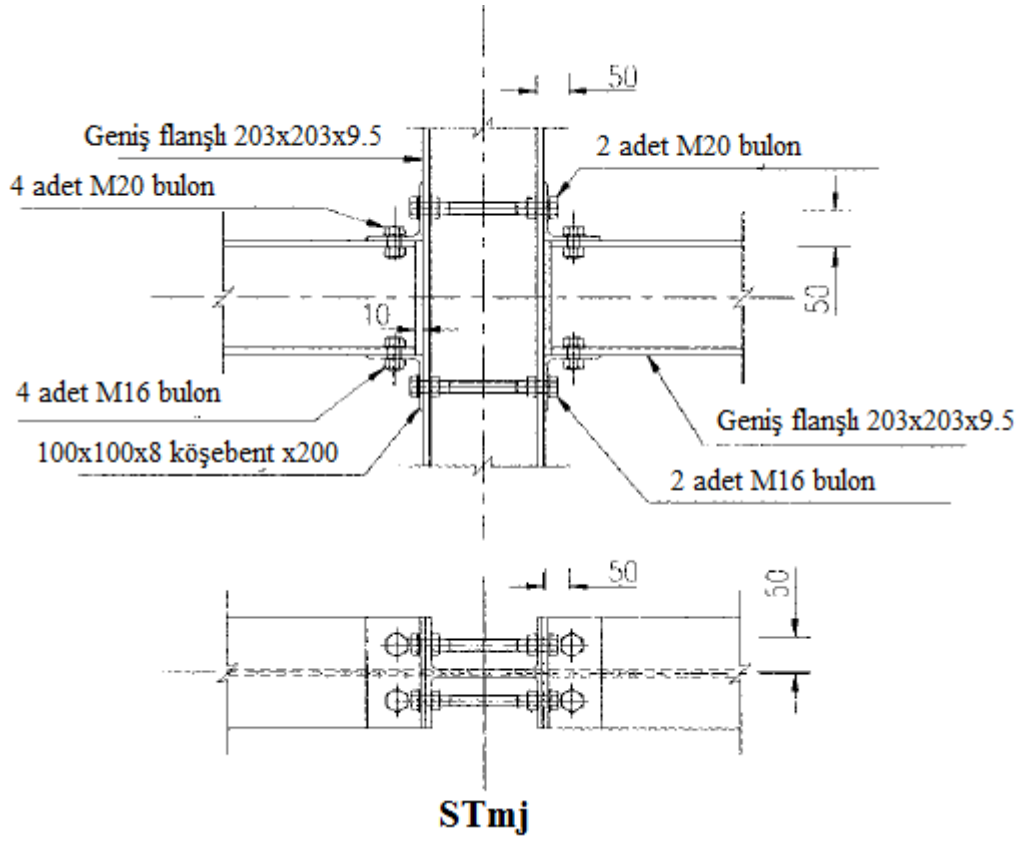
Mottram lifli polimer pultrüzyon köşebent profilden kesilmiş gövde klipsli yarı-rijit birleşimlerde yaptığı deneysel çalışmanın benzerini bu defa flanş klipsleri ile tekrarlamıştır. Ancak bu sefer flanş klipslerinde kesilmiş köşebent profiller kullanmak yerine çelik klipsler ve basınç kalıplama yöntemi ile üretilmiş prefabrik kompozit klipsler kullanmıştır. Prefabrik kompozit klipsler cam lifli ve epoksi reçinelerdir. Tek yönlü cam lifleri yük doğrultusunda düzenlenmiştir (pultrüzyon köşebent klipslerin aksine). Deneyde kullanılan lifli polimer pultrüzyon profillerin derinliği 203mm kalınlığı 9.53mm'dir. Deney düzeneği şematik olarak Şekil 6.30'da gösterilmiştir. Birleşimlerde kullanılan isimlendirme sistemi Tablo 6.11'da verilmiştir. Birleşim tiplerine ait detaylar ise Şekil 6.31 ve 6.32'te verilmiştir.



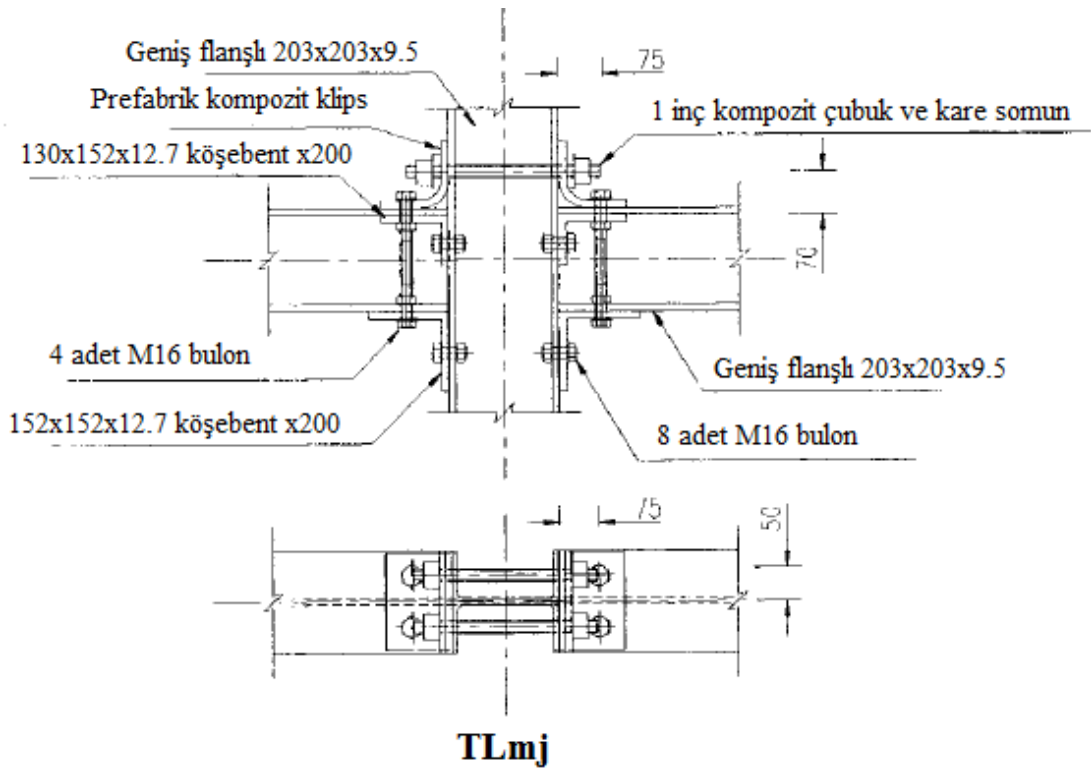
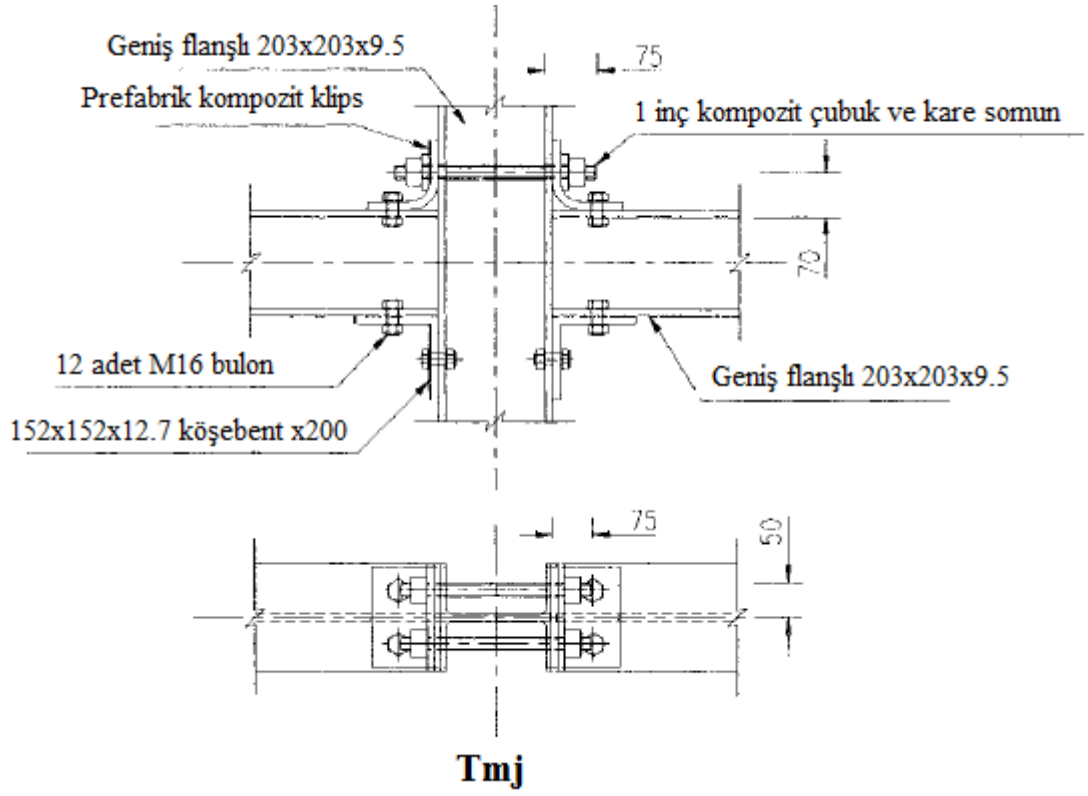
Şekil 6.30: Deney düzeneği.

Tablo 6.11: Birleşim tiplerinin etiketleri.

Etiket	Birleşim Detayı	Kolon Ekseni	Notlar
STmj	Çelik flanş klipsli	Ana	Bulonlu
STmn	Çelik flanş klipsli	İkincil	Bulonlu
Tmj	Prefabrik flanş klipsli	Ana	Kolon sabitleyicili
TLmj	Prefabrik flanş klipsli	Ana	Kolon ve giriş sabitleyicili



Şekil 6.31: Çelik klipsli yarı-rijit birleşimlerin detayları.



Şekil 6.32: Prefabrik kompozit klipsli yarı-rijit birleşimlerin detayları.

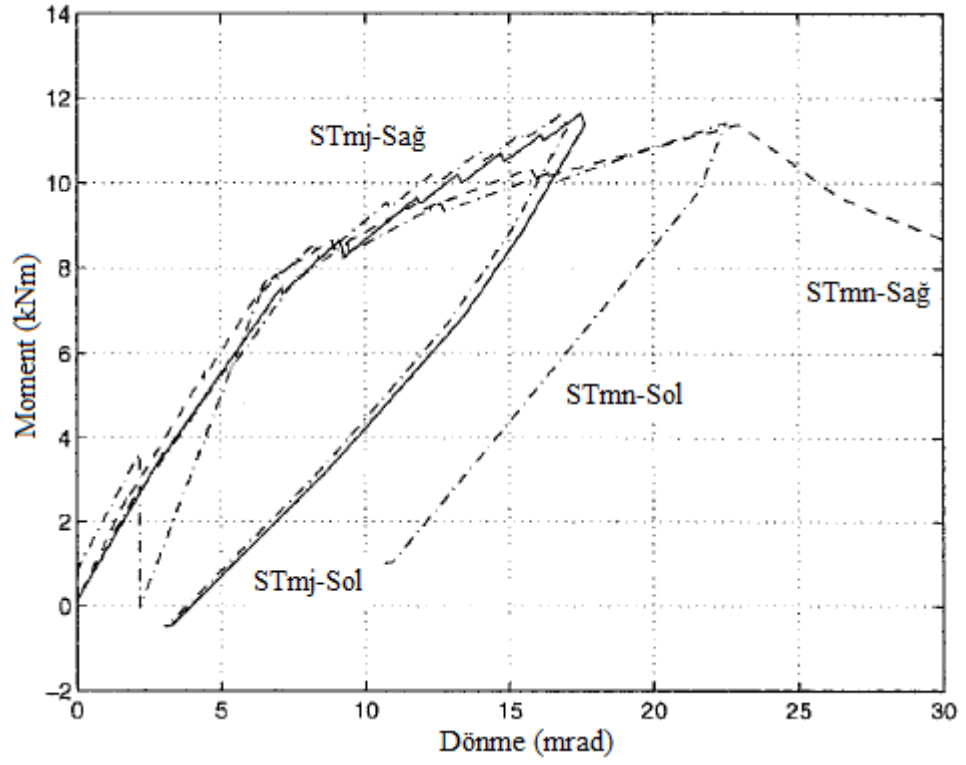
Birleşimde kullanılan bütün bulon delikleri 2mm geniş açılmıştır ve bulonlarla 30mm pullar kullanılmıştır. Bulon torkları çelik birleşimlerde 100Nm, kompozitlerde ise 23.8 Nm'dir. STmj, STmn ve Tmj deneylerinde yatay sıyrılma gerçekleştirmiştir. Birleşimlerin moment-eğrilik ilişkilerinden bu sıyrılma etkisi çıkartılmıştır. Diyagramlarda oluşan küçük kademeler her yüklemeden sonra anında okunan ve 5~10dk sonra okunan iki veri arasındaki farklılıklardan kaynaklanmaktadır. Bu farklılığın sebebi kompozit malzemedeki gerilim-gevşemesidir. Büyük moment değerlerinde bu fark daha da büyümektedir. Birleşimler için moment-eğrilik diyagramları Şekil 6.33, 6.34 ve 6.35'de, dönme karakteristik verileri ise Tablo 6.12'da verilmiştir.

Tablo 6.12: Flanş klipsli yarı-rijit birleşimlerin özellikleri.

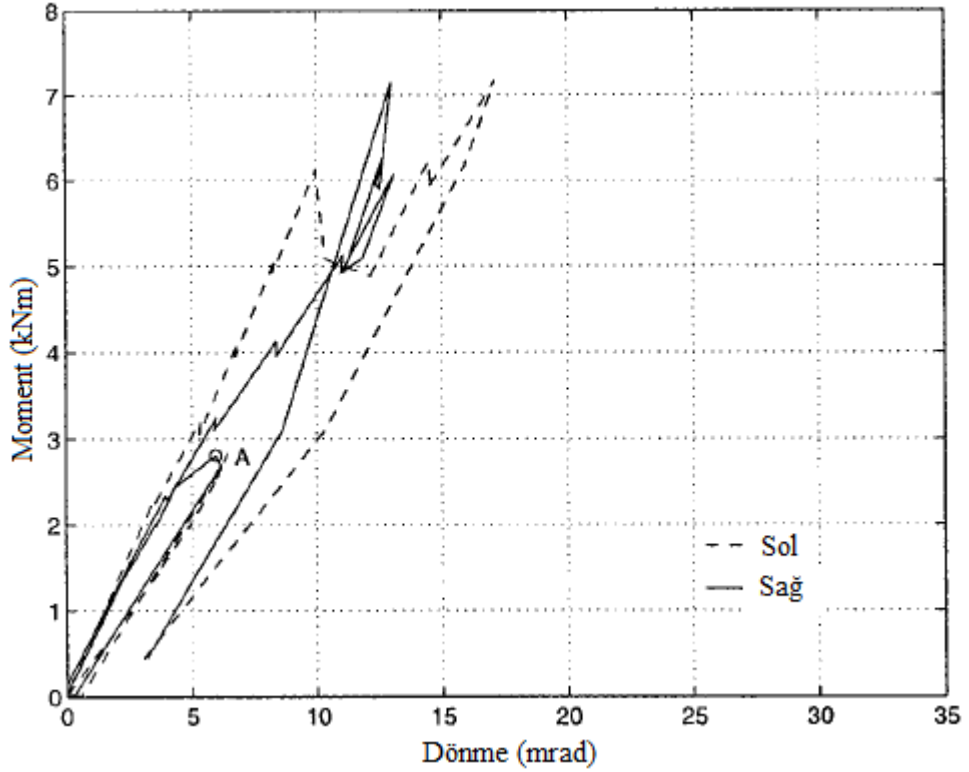
Özellik	STmj	STmn	Tmj	TLmj	DTLmj
Başlangıç Momenti (kNm)	5.5	5.5	3	9	2.5
Başlangıç Dönmesi (mrad)	5	5	5	6.8	1.9
Başlangıç Rijitliği (kNm/rad)	1100	1100	600	1330	1320
İlk Göçme Momenti (kNm)	10	8	2.7	15	7.5
İlk Göçme Dönmesi (mrad)	13.5	7	4.5	17.5	6.3
İlk Göçme Rijitliği (kNm/rad)	740	1140	600	860	1190
Maksimum Moment (kNm)	>12	12	-	16	14.9
Maksimum Dönme (mrad)	>18	>23	-	30	33

Tablo 6.12'da verilen DTLmj etiketli birleşim karşılaştırma yapılması açısından eklenmiştir. DTLmj Mottram'ın 1994 test ettiği flanş klipsli bir yarı-rijit birleşimdir. Bu birleşimin tepe klipslerinde iki adet birbirine yapışık olarak üretilmiş 12.7mm kalınlıklı lifli polimer pultruzyon köşebent parçası kullanılmıştır.

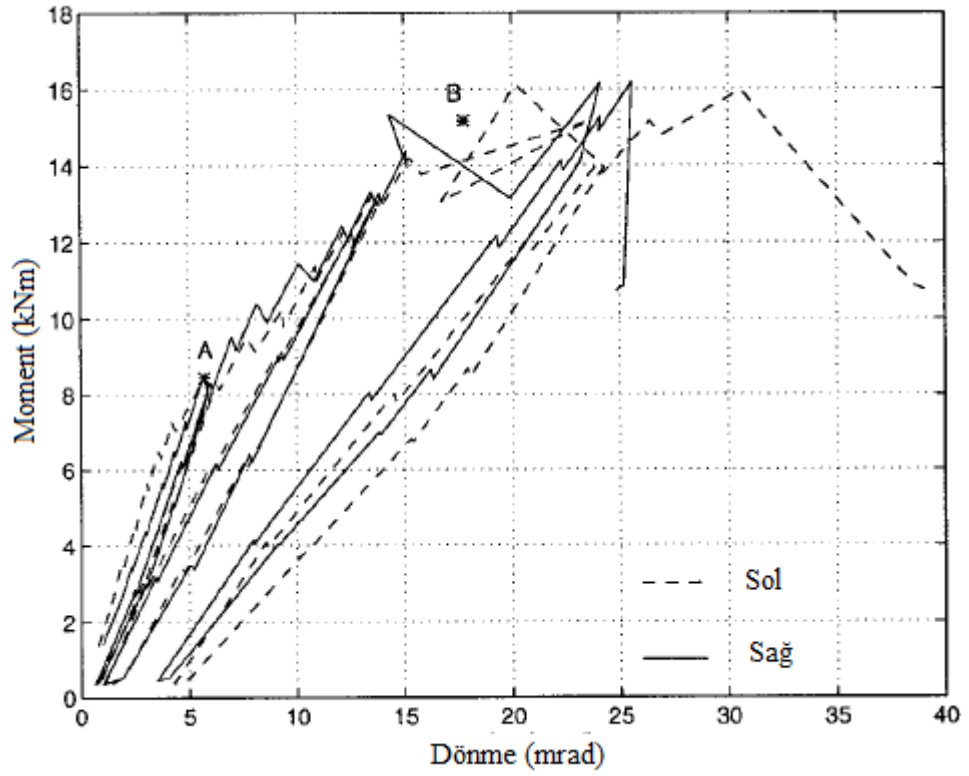
Deney sonuçları lifli polimer kompozit profillerde, flanş klipslerinde pultruzyon köşebent parçaları kullanmak yerine çelik köşebentler ya da prefabrik klipsler kullanıldığında birleşim kapasitesinin arttığını ortaya koymuştur. Çelik birleşim parçalarının kullanımı, genel yapısal performansta sadece birleşim elemanlarının zayıf halka olmadığını göstermiştir. Çelik birleşim parçalarının rijitliği göçmenin kırıšte olmasına yol açmıştır. Bu durum dönme kapasitesini minimum gereklilik olan 30mrad'ın altına çekmiştir.



Şekil 6.33: Çelik klipsli birleşimlerin moment-eğrilik ilişkileri.

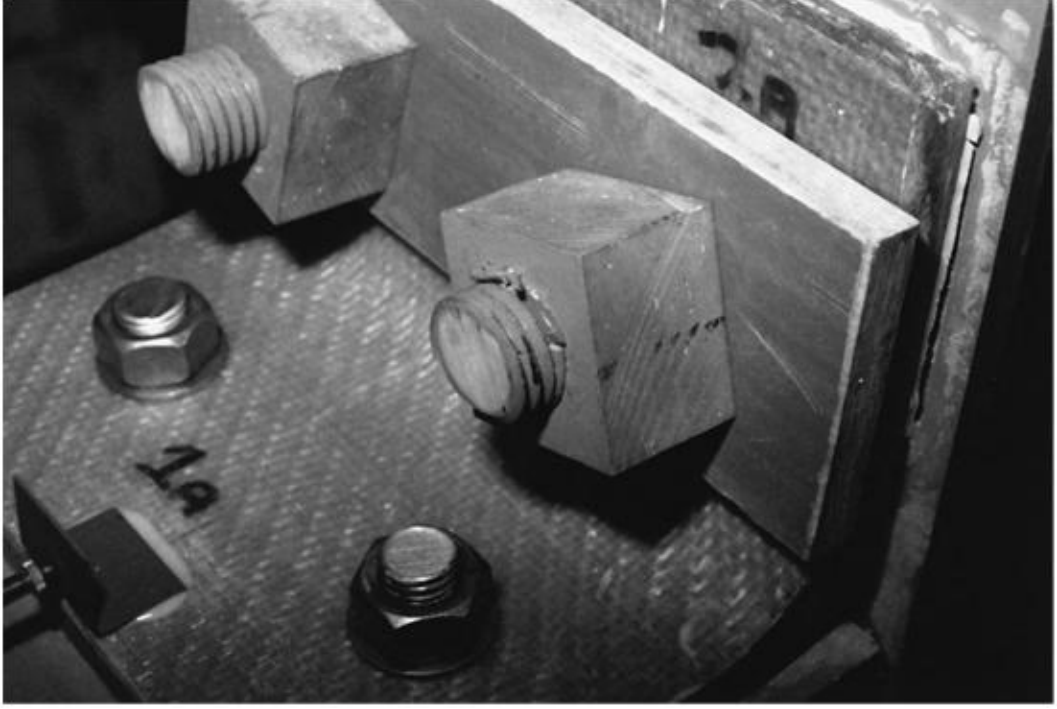


Şekil 6.34: Prefabrik kompozit klipsli Tmj birleşim için moment-eğrilik ilişkisi.

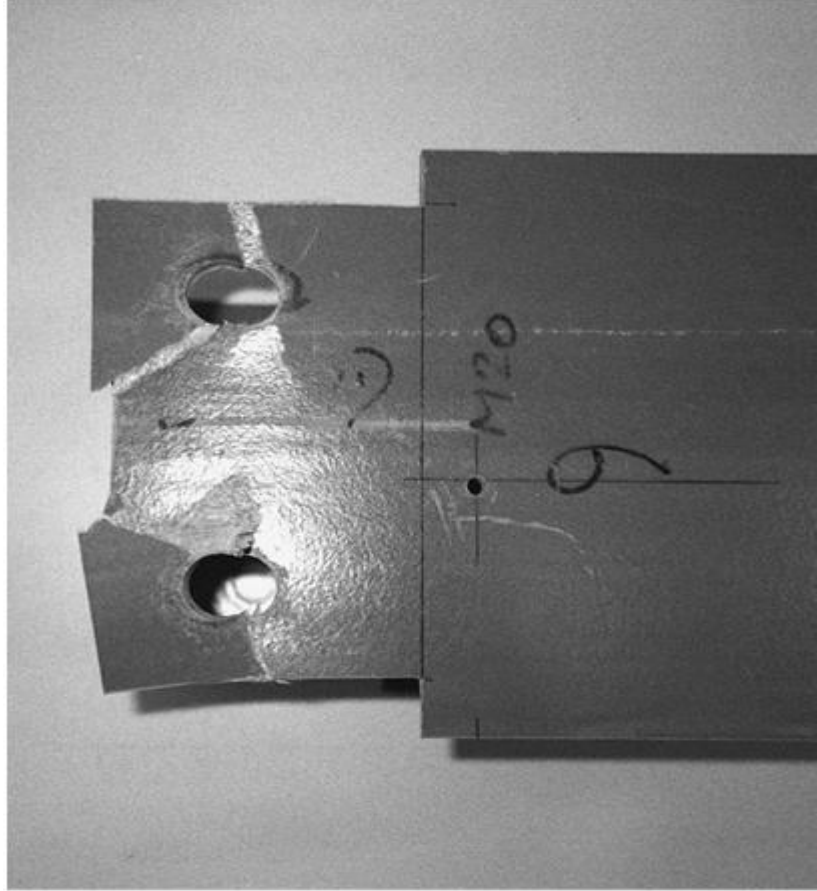


Şekil 6.35: Prefabrik kompozit klipsli TŁmj birleşim için moment-eğrilik ilişkisi.

Prefabrik kompozit klipsli birleşimlerden TŁmj, üst ve alt klipsleri yapışkanlı olmasına rağmen deneyin başında sıyrılmıştır. Bunun üzerine TŁmj'de üst prefabrik klipslerin altına ilave köşebent klipsleri eklenmiş ve üst ve alt klipsler M16 bulonlar ile birbirine bağlanmıştır. TKŁmj'nin performansı tatmin edici olsa da birleşim detaylarının kompleksliği yüzünden pratik olmaktan uzaktır. TŁmj'nin sınır göçmesi üst prefabrik klipsleri birbirine bağlayan yivli kompozit çubuğun yiv sıyırması ile olmuştur (Şekil 6.36). Şekil 6.37'da STŁmj'nin üst flanştaki bulon deliklerinin yırtılması sonucu göçmesi gösterilmiştir (Mottram ve Zheng, 1999b).



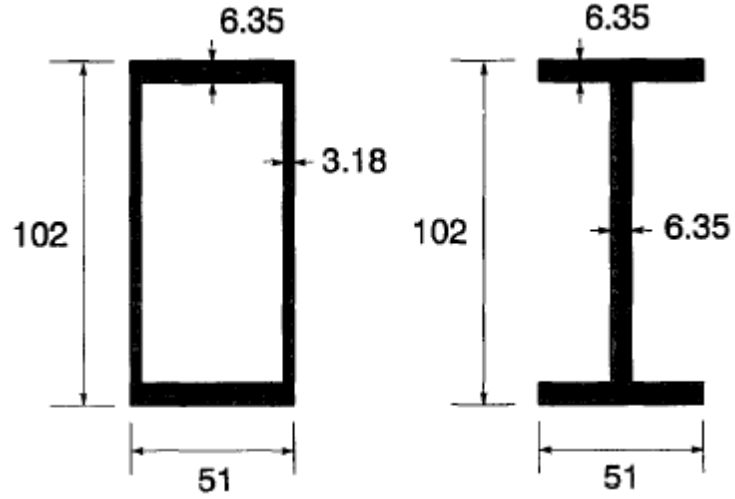
Şekil 6.36: TLMj'nin yivli pultruzyon çubuğun yiv sıyrması sonucu göçmesi.



Şekil 6.37: STmn'nin flanş üzerindeki bulon delikleri yırtılması sonucu göçmesi.

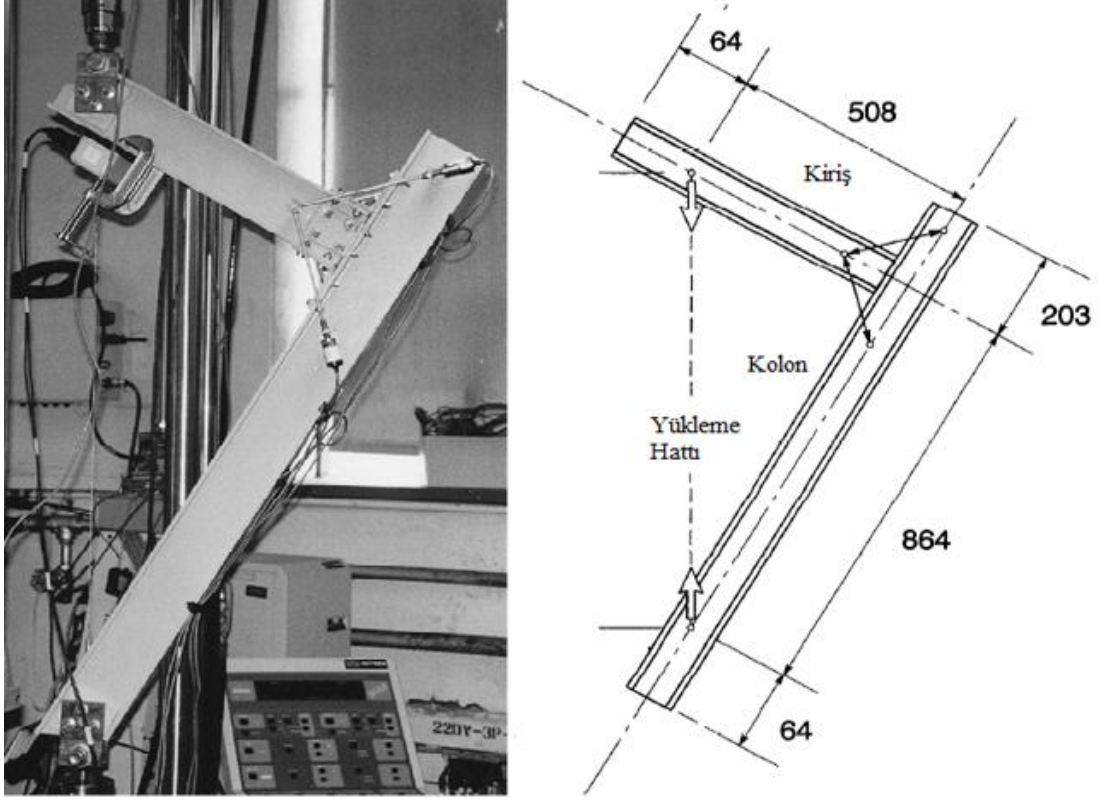
6.2.5 Smith'in kutu kesitler için yarı-rijit birleşim deneyleri

Geleneksel yapısal çelik uygulamalarındaki durumun aksine lifli polimer pultrüzyon profillerde kapalı kutu kesitlerin I kesitlere göre daha iyi olan (lokal flanş burkulması, burulma rijitliği ve nispeten düşük kesme deformasyonları gibi) mekanik özelliklerine dikkat çekmek isteyen Smith 1998 yılında bir dizi yarı-rijit birleşim deneyi gerçekleştirmiştir. Karşılaştırma yapmak adına 3 adet I kesit ve 3 adet kutu kesit lifli polimer pultrüzyon profil yarı-rijit deneyi yapılmıştır. Deneyde kullanılan profiller Strogwell şirketinin 102x51mm kutu ve I kesitleridir. Kesit detayları Şekil 6.38'de verilmiştir.



Şekil 6.38: Kesit ölçüleri.

I kesitler için seçilen yarı-rijit birleşimin düzeneği gövde-flanş klipsleridir. Bu klipsler aynı üreticinin 76x76x6.35mm'lik köşebent profillerinden kesilmiştir. Kutu kesitin yarı-rijit konfigürasyonunda 6.35mm kalınlığındaki pultrüzyon plakalar kullanılmıştır. Deney düzeneği Şekil 6.39'da şematik olarak gösterilmiştir. Deney sonucunda kaydedilen birleşim rijitlikleri deney numune etiketleri ile birlikte Tablo 6.13'de verilmiştir. Birleşimler Strongwell'in tasarım kılavuzunda verilen tavsiyeler doğrultusunda boyutlandırılmış, ayrıca bütün klips ve plaka yüzeyleri yüzey maske tabakası geçilene kadar kumlanıp Shell 828 ticari markalı epoksi reçinesi ile yapıştırılmış ve 7 gün kürlenmeye bırakılmıştır.

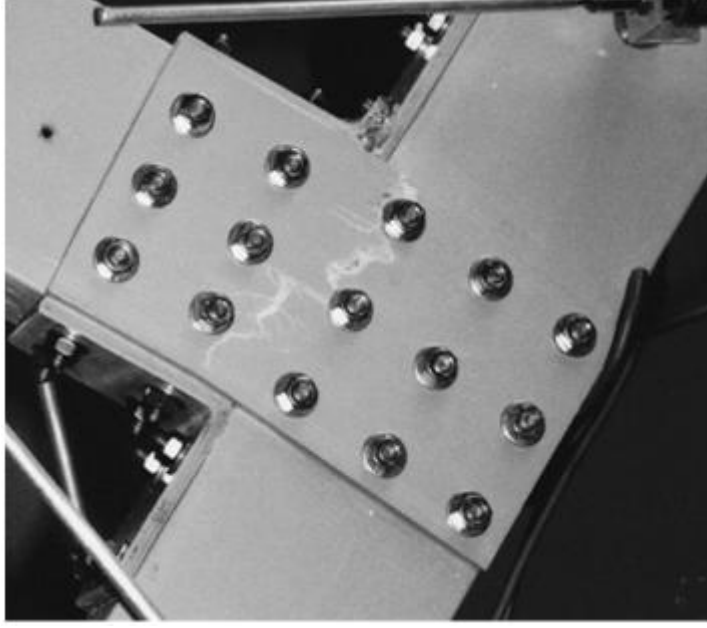


Şekil 6.39: Deney düzeneği.

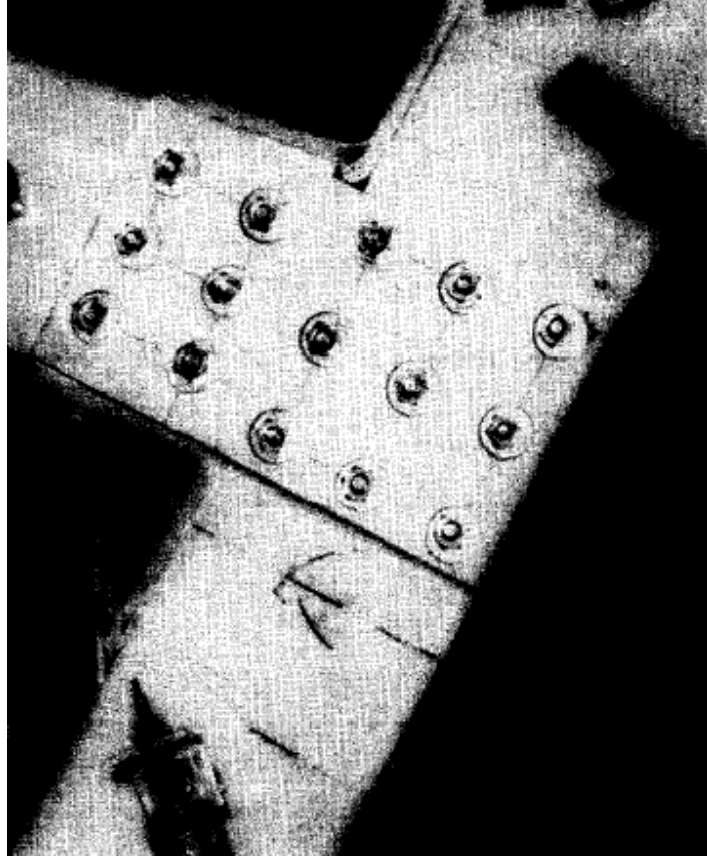
Tablo 6.13: Yarı-rijit birleşim deneyi sonuçları.

Birleşim	Etiket	Dönme Rijitliği (kNmrad)	Maksimum Moment (kNm)
I (standart)	A1	253	1.27
I (standart)	A2	279	1.02
I (boyunca bulonlu)	B	267	1.00
Kutu (standart)	C1	322	4.81
Kutu (standart)	C2	347	3.92
Kutu (boyunca bulonlu)	D	358	3.13

I kesit birleşim düzeneklerinde kolon flanş klipslerinde 5mm diğer bölgelerde 6.35mm bulonlar kullanılmıştır. B etiketli I kesit birleşiminde ek olarak kiriş flanş klipslerinin bulonları bağlandıkları kolonun arka flanşına kadar uzatılmıştır. Bu kolon flanşları boyunca uzanan bulonlar iki taraftan da somunla sıkıştırılmıştır. A2 etiketli I kesit birleşim düzeneği Şekil 6.40'da, B etiketli düzenek ise Şekil 6.41'de verilmiştir.



Şekil 6.42: C2 numunesinin birleşim detayı.

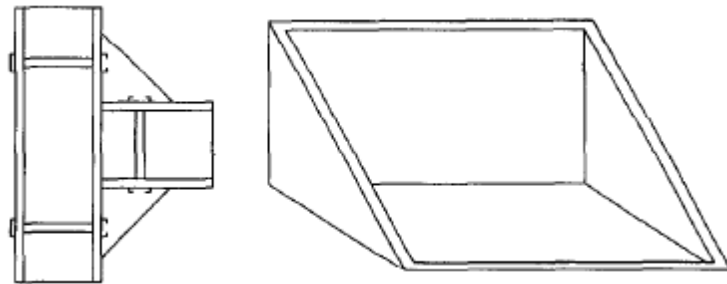


Şekil 6.43: D numunesinin birleşim detayı.

I kesit flanş ve gövde klipsli yarı-rijit birleşimlerin dönme rijitlikleri üst ve alt klipslerin açılma ve kapanmaya karşı gösterdikleri dirençle ilgilidir. Ana donatı yönü yükleme yönüne ters kalan ortotropik köşebent profillerden kesilmiş pultruzyon klipslerin bu görev için uygun olmadıkları ortadadır. Donatı yönleri yük yönünde düzenlenmiş olsa bile geometrileri yüzünden bu klipsler birleşimde bir ana rijitlik bileşeni olarak oldukça esnek kalmaya devam edeceklerdir. Deneylede özellikle üst flanş klipslerinde ciddi deformasyonlar oluşmuştur. Asıl görevleri kesme kuvvetini aktarmak olan gövde klipsleri de eğilme yüklerinden bir kısmını taşımak durumunda kalmışlardır. I kesit düzeneklerinde bulonların kolon flanşları boyunca geçirilmesi, kolon flanş-gövde birleşimlerinde oluşan çatlakları azaltmış ancak birleşim rijitliğine katkı sağlamamıştır. Bu düzenekte göçme gövde klipslerinde gerçekleşmiştir.

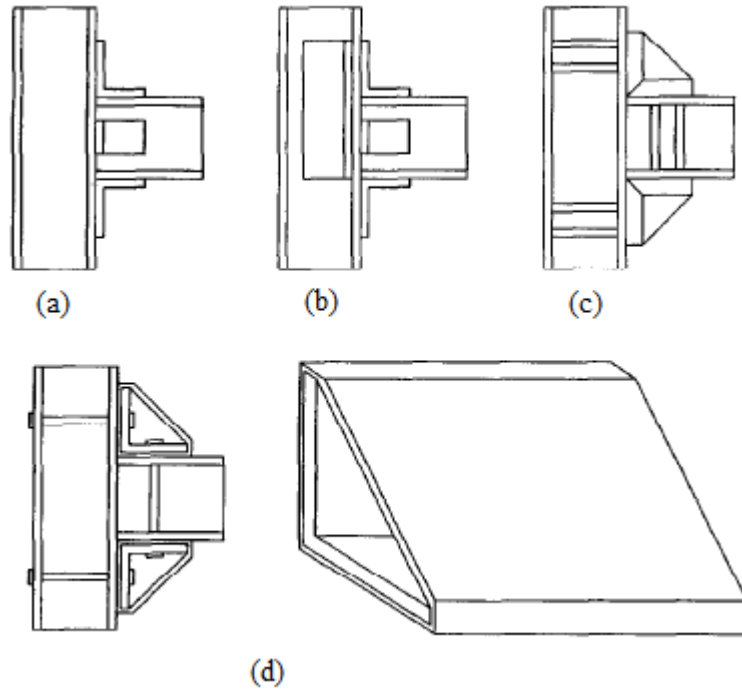
Kutu yarı-rijit birleşim düzeneklerindeki performansın I kesitlere göre daha yüksek oluşu profillerin geometrisi sayesinde gövde klipsleri yerine plaka kullanımına izin vermesinden kaynaklanmaktadır. Bu plakalar klipslere göre daha rijit ve güçlüdür. Plakaların donatı liflerinin yönü de klipslerdeki duruma göre daha uygundur. Bu birleşimde göçmeler kiriş profilin yan duvarlarında gerçekleşmiştir. Bunun sebebi de bu duvarların kalınlıklarının nispeten ince olmasına bağlanmıştır. Bulonların kolon flanşı boyunca devam ettirilmesi kutu kesitlerde bir etki yaratmamıştır.

Sonuç olarak kutu kesit yarı-rijit birleşim konfigürasyonları I kesitlere göre %25 daha fazla dönme rijitliği sağlamıştır. Buna karşın maksimum moment değerinde %280'lik bir artış olmuştur. Karşılaştırma yapmak gerekirse standart gövde ve flanş klipsli birleşim konfigürasyonuna kıyasla %280'lik bir dayanım artışını Mosallam UC birleşimi ile I kesitlerde gerçekleştirmiştir (Şekil 6.44).



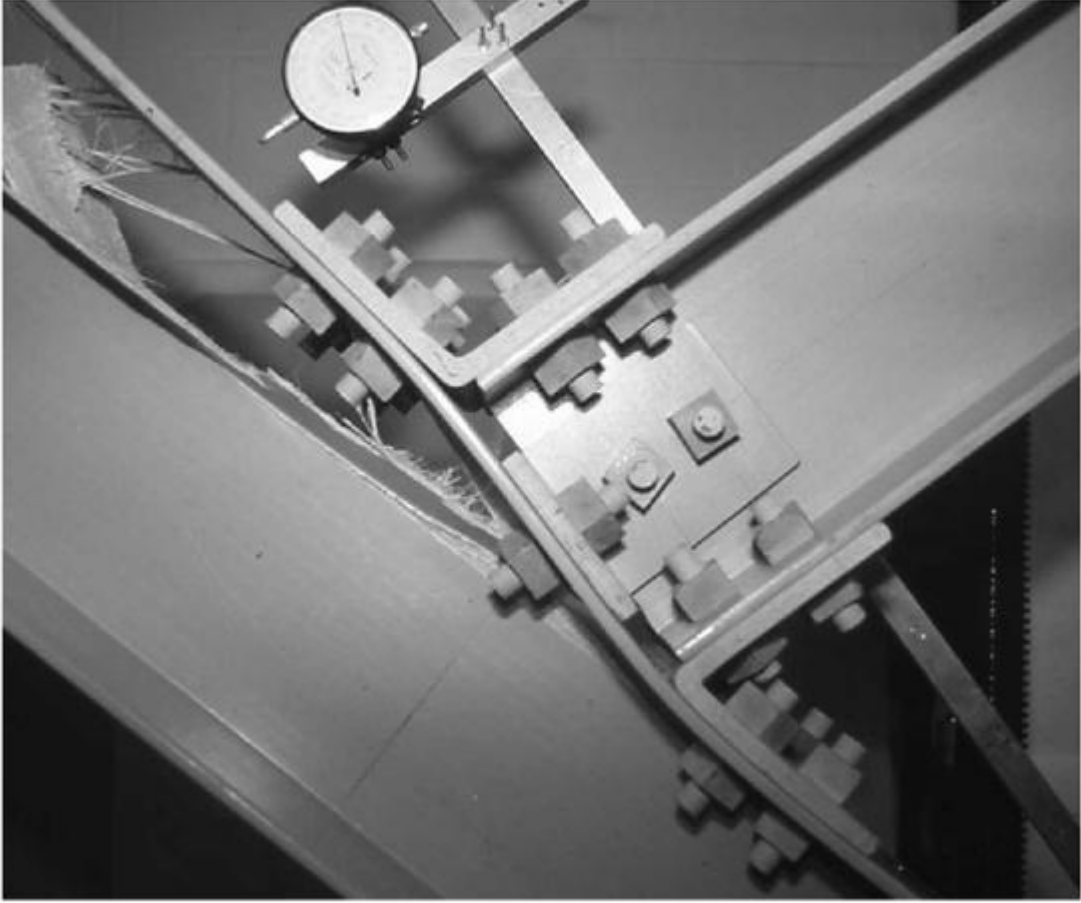
Şekil 6.44: Mosallam'ın UC birleşimi.

Bank ise guse plakalı köşebentlerle geleneksel gövde-flanş klipsli birleşim tipine göre dayanımda %200, dönme rijitliğinde ise %270'lik artış sağlamıştır. Guseli klipslerden sonra denediği sargılı klipsler ilk dönme rijitliklerinin üçte birinde geleneksel gövde-flanş klipsli birleşimin dayanımının iki katını yakalamıştır (Smith ve diğ., 1998).



Şekil 6.45: (a) Geleneksel gövde-flanş klipsli, (b) Kolon flanşı destekli, (c) Guse plakalı klipsli, (d) Sargılı klipsli.

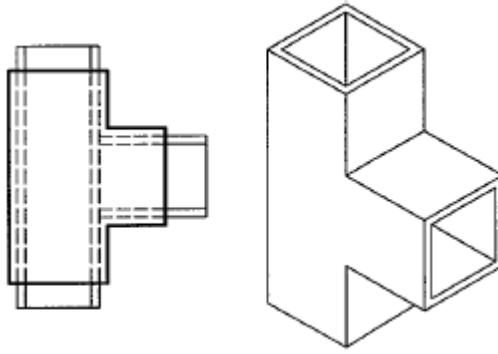
Smith birçok diğer araştırmacı gibi geleneksel çelik birleşimlerin taklit edildiği gövde ve flanş klipsli konfigürasyonların lifli polimer pultrüzyon profillerin birleştirilmesi için ideal bir metot olmadığına hemfikirdir. Kompozit malzemenin kalınlığı boyunca yerleştirilen bulonlardaki çekme yükü çoğunlukla reçine tarafından karşılanmaktadır ve bu durum bulonun kesiti zımbalaması gibi lokal göçmelere sebebiyet vermektedir (Şekil 6.37). Kolon-kiriş birleşimlerinde klipslerin kolonun sadece bir flanşına bağlanması sonucu kolonun lif eksenine dik yönde dayanımı zayıf olan flanş-gövde birleşimleri birbirinden ayrılmaktadır. Bu durum çelik uygulamalarında rastlanmayan ince duvarlı lifli polimer pultrüzyon profillere özel bir göçme tipidir (Şekil 6.46).



Şekil 6.46: Gövde-flanş birleşim göçmesi.

Yarı-rijit klipsli birleşimlerde gövde-flanş ayrılmasının önüne geçmek için bulonların arka flanşa kadar uzatıldığı uygulamalar denenmiştir. Ancak bu imalat açısından bakıldığında pratik değildir, ayrıca arka flanş gövde üzerinden eğilme eğilimi göstererek kayda değer bir direnç göstermez. Birleşim elemanları olarak gövde ve flanş klipsleri ve guseli plakalar kullanmak lif doğrultularını kısıtlar. Temel lifli malzemedede olduğu gibi birleşim elemanları da ortotropik yapıları yüzünden bulon zımbalamasına karşı hassastır. Guseli klipslerde, klips ayakları guselerin üzerine eğildiklerinde kalınlıkları boyunca ezilirler. Bu da kompozit malzemenin kalınlığı boyunca olan zafiyetinin bir sonucudur. Çoğu kompozit malzeme plastik deformasyon yapamadığından yük paylaşma kapasiteleri yok ya da çok azdır. Bu durum birçok birleşim elemanı kullanarak daha da kötüleştirilmektedir. Bunun sebebi birleşim elemanı sayısı arttıkça bulon sayısının da artmasıdır. Bulonlar bağımsız çalışma eğilimindedir. Bu ve bunun gibi birçok sebepten monolitik bir birleşim elemanı lifli polimer ortotropik pultruzyon profiller için ideal

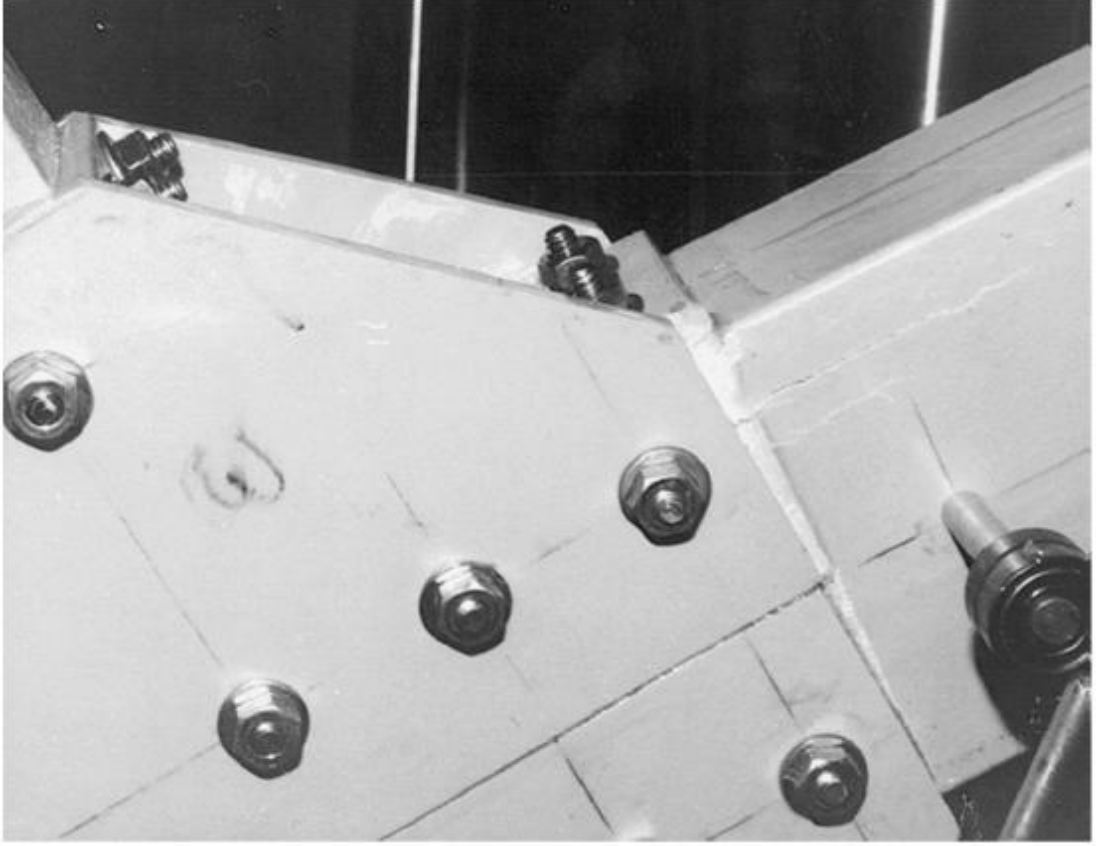
gözükmektedir. Bu sebepler Smith'i kelepçe (cuff) birleşim konseptine itmiştir (Şekil 6.47). Birbirine bağlanacak olan kolon ve kiriş profil, kelepçe elemanın oyuklarına oturtulur ve yerlerinden çıkmamaları için sadece epoksi yapıştırıcıya ihtiyaç vardır. Kelepçe birleşim, kolon profilin kesitinden tam anlamıyla faydalanan tek parça bir bileşendir. Duvarlarındaki lif yönü düzenlemesi sayesinde makul seviyede esneklik sağlayabilir. Basit geometrisi sayesinde kutu ya da daire kesitli profillere uygulanması kolaydır. Kapalı kesitlere bulon uygulamadaki zorluklar da ortadan kalkmaktadır.



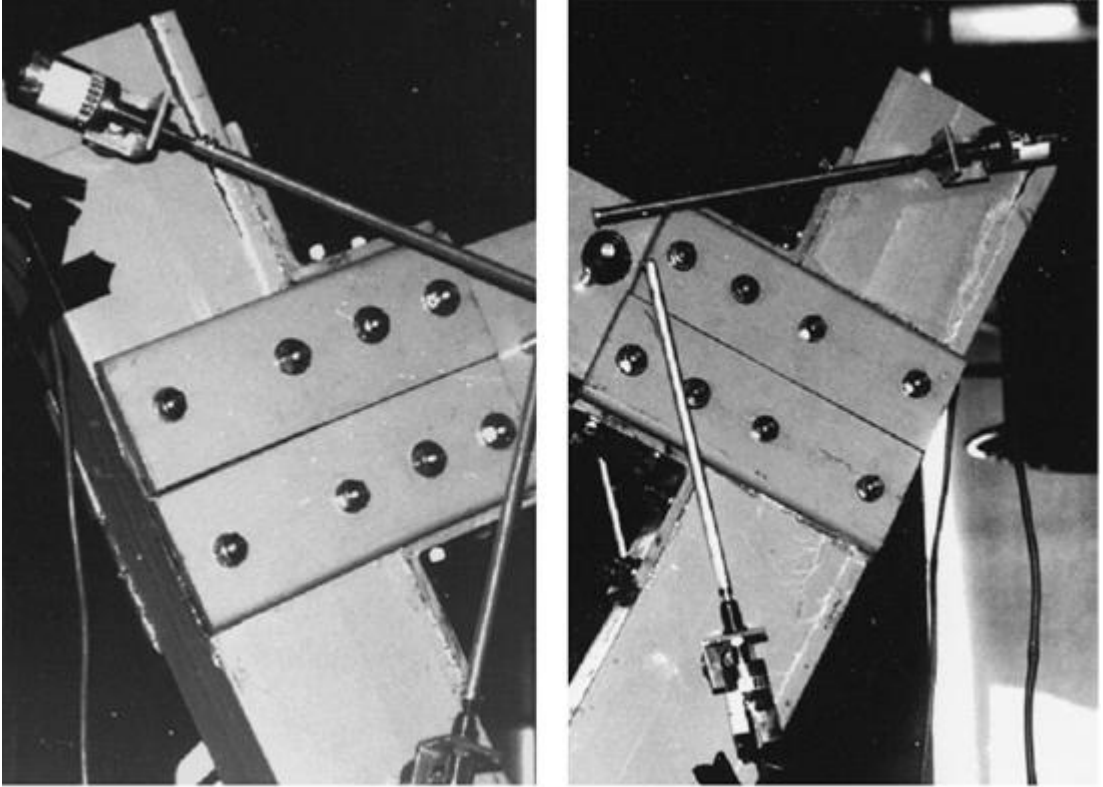
Şekil 6.47: İdeal kelepçe birleşim elemanı.

Smith 1998 yılında gerçekleştirdiği lifli polimer pultruzyon profiller için kolon-kiriş yarı rijit birleşim deneylerini bir yıl sonra genişletmiştir. I kesitleri ile yaptığı kompozit klipsli deneylere ek olarak, çelik ve kalın kompozit klipsli numuneleri denemiştir. Kutu kesitleri ile yaptığı deneylere ek olarak guse, çelik ve kelepçe konfigürasyonlarını denemiştir.

Yeni kalın kompozit klipsli I kesit birleşiminde klips kalınlığı 6.35mm'den 9.5mm'ye çıkartılmıştır. Çelik klipsli I kesit konfigürasyonunda ise kompozit klipsler çelik klipsler ile değiştirilmiştir. Guseli kutu konfigürasyonunda kompozit klipslere dokunulmazken gövde plakaları guseli plakalarla değiştirilmiştir (Şekil 6.48). Guse plakalarının lif yönü kolon ve kiriş profillerin lif yönüne 45° açı yapacak şekilde ayarlanmıştır. Kutu kelepçe konfigürasyonunda ise öne sürülen konseptte yakın bir birleşim tasarlanmaya çalışılmıştır. Köşebentler kirişin etrafını sarması ve daha sonra kolon yan duvarlarına bağlanması için kesilmiştir. Bunların üzerlerine tekrardan klipsler bulonlanmıştır.

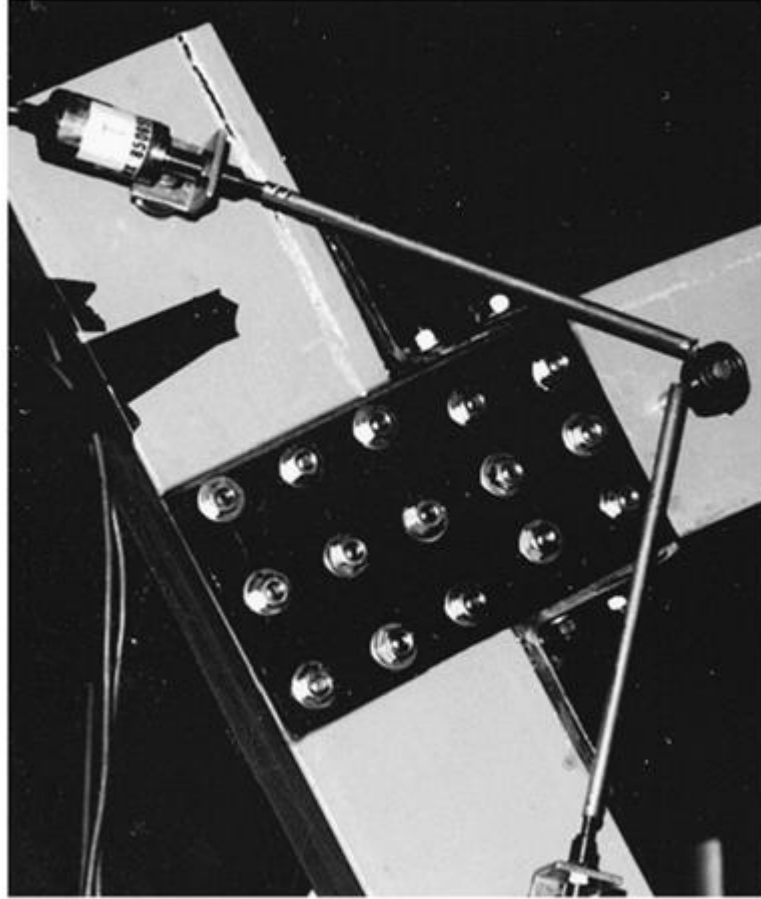


Şekil 6.48: Guseli kutu kesit birleşim konfigürasyonu.



Şekil 6.49: Kutu kelepçe birleşim konfigürasyonu.

Çelik konfigürasyonlu kutu birleşimde yan duvar plakaları ve klipsler kompozit yerine A36 sınıfı çelik ile değiştirilmiştir (Şekil 6.50).



Şekil 6.50: Kutu çelik birleşim konfigürasyonu.

Birleşimlerin deney sonuçları Tablo 6.14’de eski deney sonuçları ile birlikte verilmiştir.

Tablo 6.14: Kutu ve I profil yarı-rijit birleşim deney sonuçları

Birleşim	Dönme Rijitliği (kNm/rad)	Maksimum Moment (kNm)
I (standart)	253	1.27
I (standart)	279	1.02
I (boyunca bulonlu)	267	1.00
I (kalın klipsli)	320	1.4
I (çelik klipsli)	490	2.3
Kutu (standart)	322	4.81
Kutu (standart)	347	3.92
Kutu (boyunca bulonlu)	358	3.13
Kutu (guseli)	780	5.8
Kutu (kelepçe)	600	6.2
Kutu (çelik)	1300	4.6

Sonuçlar kutu guse ve kutu kelepçe konfigürasyonlarının rijitlik ve kapasiteyi arttırdığını göstermiştir. Guseli birleşim kelepçeye oranla daha rijittir ancak dayanımı düşüktür. Bu iki birleşiminde dayanımının I ve kutu çelik birleşimlerden yüksek oluşu dikkat çekicidir. Birleşim dayanımı büyük oranda alt ve üst flanş klipslerinin dayanımına bağlı olduğundan kalın klipsli I birleşimin özelliklerinde iyileşme görülmüştür. Çelik klipsli kutu birleşim ise geleneksel gövde-flanş klipsli konfigürasyonun kutu kesitle ulaşabileceği tavan değeri temsil etmektedir.

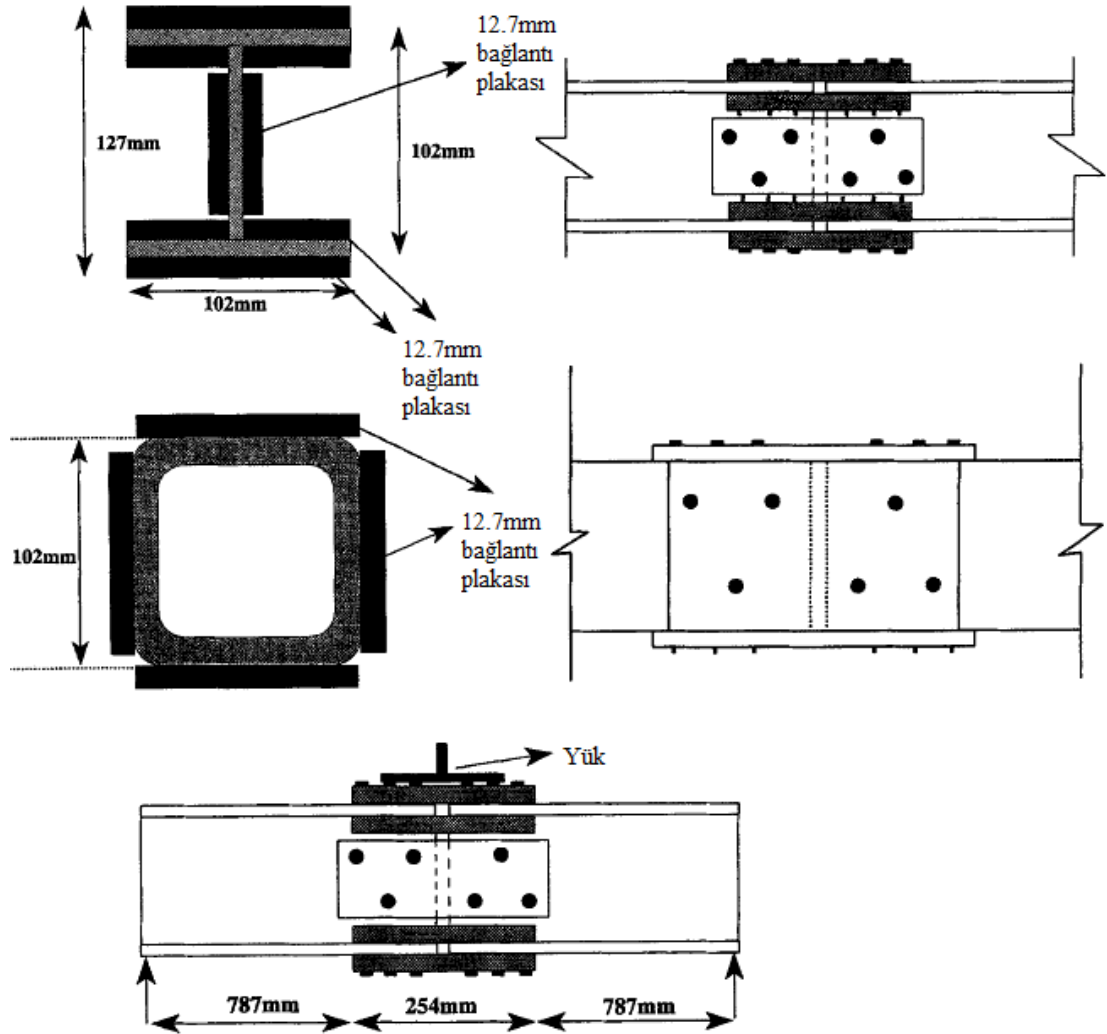
Standart I kesit konfigürasyonlarında göçme üst flanş klipsinde gerçekleşmiştir. Kolonun gövde-flanş birleşiminde de bir miktar çatlama gözlenmiştir. Kalın klipsli I kesit konfigürasyonunda ise kolondaki gövde-flanş birleşim hasarı daha ciddi olmuştur ancak göçme yine üst flanş klipsinde gerçekleşmiştir. Çelik klipsli I kesit konfigürasyonunda ise göçme kolonun kirişe bakan flanşının gövdesinden ayrılması sonucu gerçekleşmiştir.

Standart kutu kesit konfigürasyonlu birleşimin bir tanesinde göçme yan duvar plakalarının bulonlarından kolon flanşına en yakın olanının çatlaması (çekme göçmesi) ve bu çatlakın bütün plaka boyunca yayılması ile olmuştur. Diğer numunede ise göçme kiriş gövde duvarında gerçekleşmiştir. Yan duvar plakalarına bağlı olan kiriş yan duvarı, kirişten tamamen ayrılmıştır. Guseli kutu konfigürasyonunda da bu durum gözlenmiştir. Kelepçeli kutu kesit konfigürasyonunda ise yan duvar köşebentlerinin kolona bağlanan kısımları kolondan ayrılmıştır. Çelik kutu kesit konfigürasyonunda ise hem kiriş göçmüş hem de kolonun kirişe bakan flanş gövdesinden ayrılmıştır (Smith ve diğ., 1999).

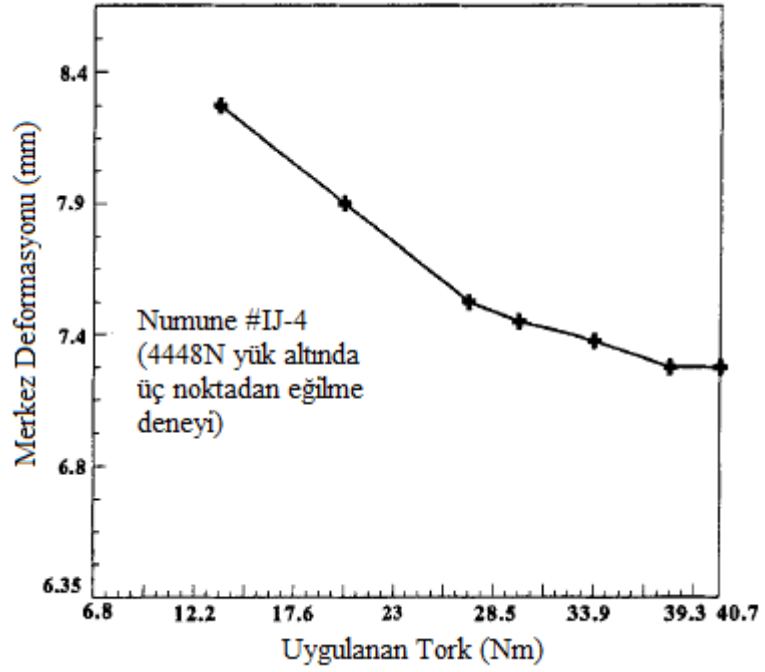
6.2.6 Nagaraj'ın yorulma deneyleri

Nagaraj lifli polimer pultruzyon profillerin yorulması üzerine 51 deney gerçekleştirmiştir. Bu deneylerden 35'i ek yeri yarı-rijit birleşimlidir. Deneyde kullandığı kesitler 102x102x6mm boyutlarındaki geniş flanşlı ve kutu kesitlerdir. Profiller vinilester reçineli ve cam liflidir. Lif oranları kutu için %28, geniş flanşlı içinse %35'dir. Profil kirişleri birbirine bağlamak için kullanılan kompozit plakaların

kalınlığı 12.7mm'dir. Birleşim plakaları kirişlere 9.5mm çaplı çelik bulonlarla bağlanmıştır. Kesitler ve deney düzeneği Şekil 6.50'de gösterilmiştir. Bulon delikleri uç mesafeleri dört bulon deliği kadardır. Bulonlar 27.12Nm'lik bir torkla sıkılmıştır. Yüksek tork seviyelerinin birleşim rijitliğine ciddi bir katkısı olmadığı gözlenmiştir (Şekil 6.51). Birleşimlerde sadece bulonlarla birlikte bulon+yapıştırıcı uygulaması da denenmiştir. Yapıştırıcı olarak epoksi reçinesi kullanılmıştır. Yapıştırıcı birleşime mükemmel kesme direnci kazandırmaktadır. Deneyler 1828mm açıklıklı üç noktadan eğilme konfigürasyonu ile gerçekleştirilmiştir. Numunelerin aşırı ısınmasını engellemek için yükleme frekansları düşük tutulmuştur (1~5 Hz). Yorulma deneyleri malzeme göçene kadar ya da 1,000,000 devir olacak şekilde gerçekleştirilmiştir.

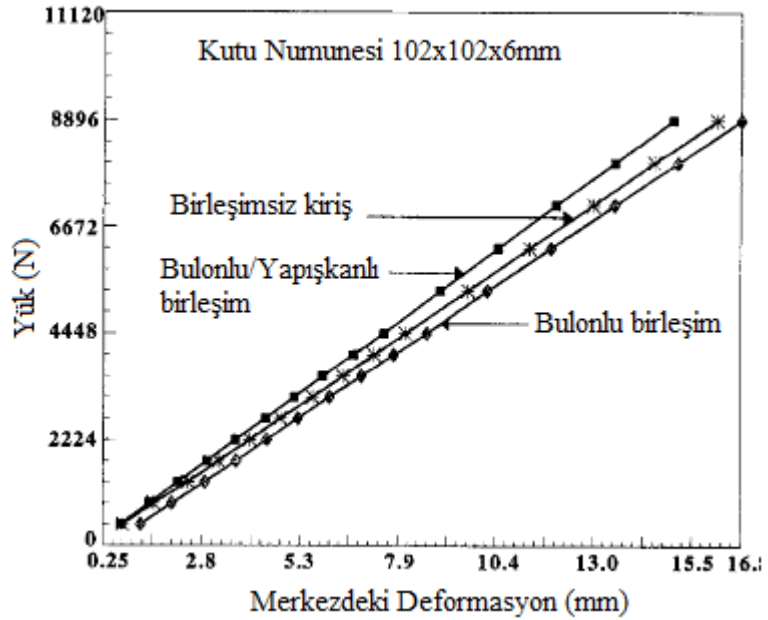


Şekil 6.51: Deney düzeneği.

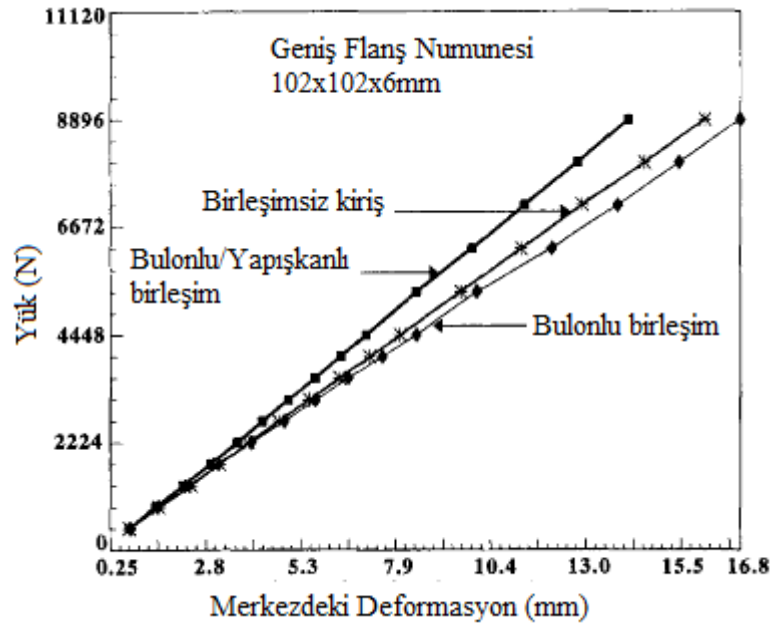


Şekil 6.52: Bulon sıklığına bağlı birleşim rijitliği.

Deneysel sonuçlarda statik yükler altında yapıştırıcının bulon verimliliğini %12~18 oranında arttırdığı görülmüştür (Şekil 6.52, 6.53).



Şekil 6.53: Kutu kesitlerde bulonlarla birlikte yapışkanın etkisi.



Şekil 6.54: Geniş flanşlı kesitlerde bulonlarla birlikte yapışkanın etkisi.

Kirişin ek yeri birleşimli kısmının rijitliği, kirişin rijitliğinin (EI) bir k katsayısı ile çarpılması ile tanımlanır. Buna göre ek yeri birleşim rijitlikleri Tablo 6.15’de verilmiştir (Nagaraj ve Gangarao, 1998).

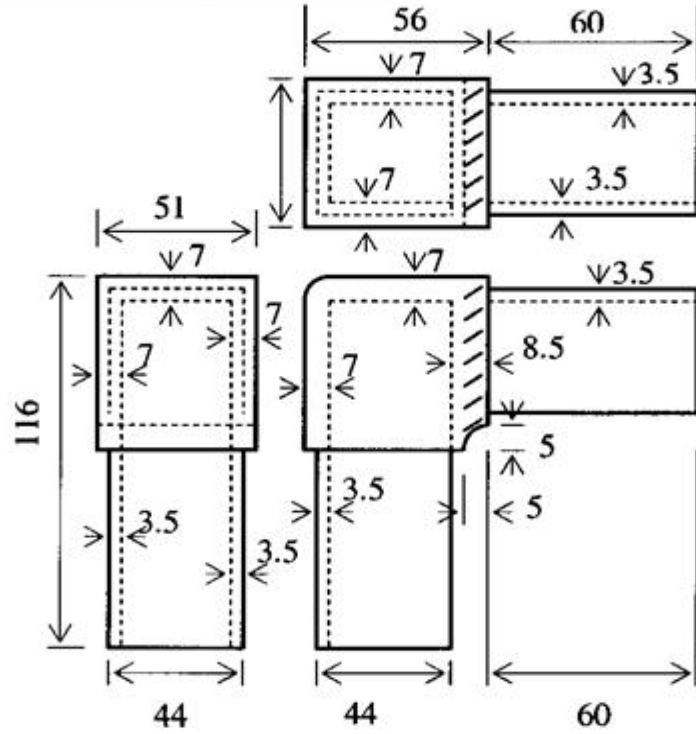
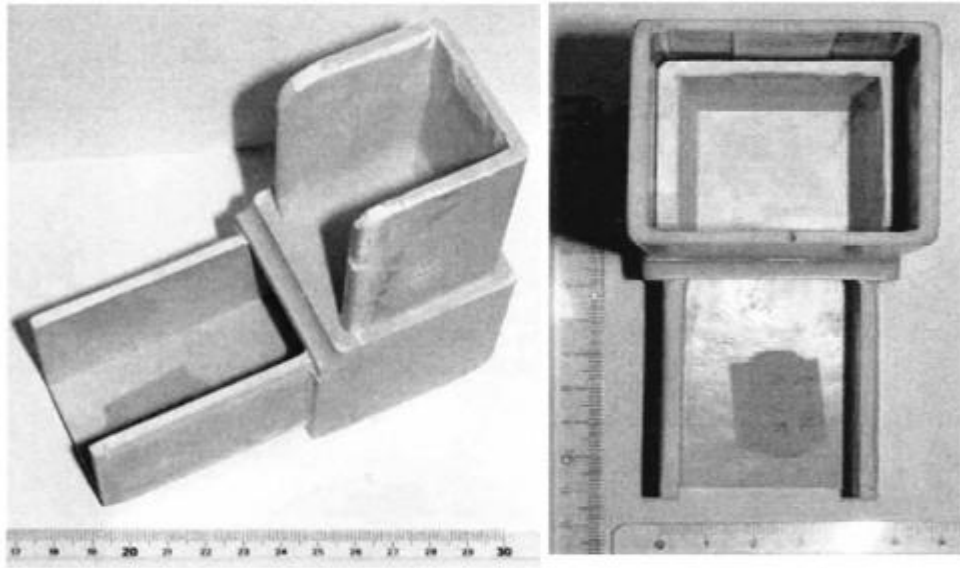
Tablo 6.15: Ek yeri birleşimlerinin rijitlikleri

Ek yeri birleşim tipi	k katsayısı
Kutu kesit	1.41
Geniş flanşlı kesit	1.55

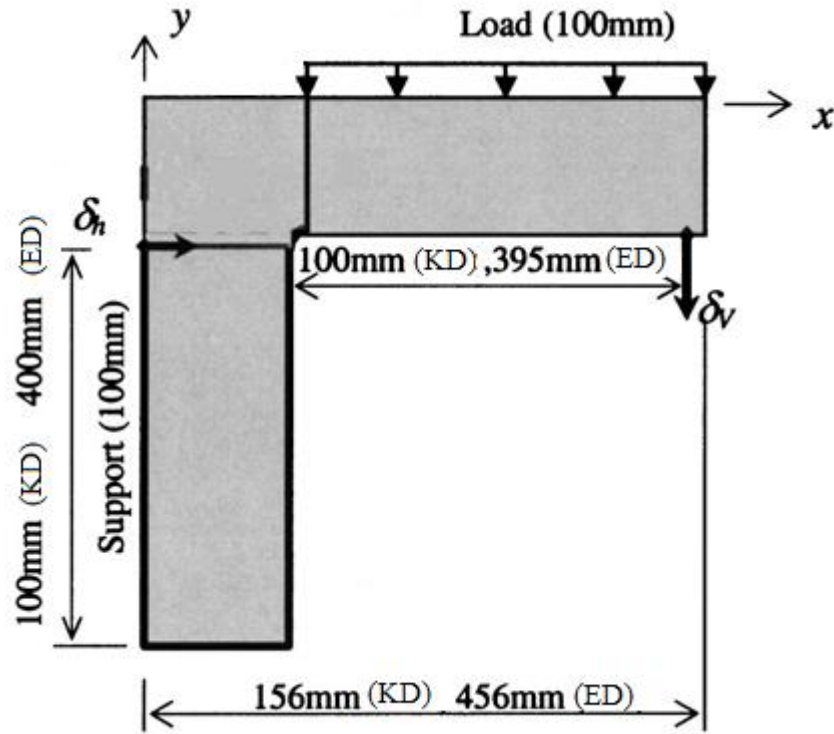
6.2.7 Sarıbyık’ın kelepçe deneyi

Sarıbyık, Smith’in kelepçe konseptini takip ederek kendi kelepçe birleşimi ile hazırladığı 36 deney numunesini test etmiştir. Deneylerde kullanılan pultrüzyon profiller Fiberforce 800 serisi 51x3.1mm kutu kesitleridir. Bunlar kelepçe birleşim elemanına düşük viskoziteli Araldite GY250 reçinesi ile yapıştırılmıştır. Birleşim elemanı ve profiller W. L. Cunliffe şirketi tarafından üretilmiştir ve ticari olarak mevcuttur. Birleşim elemanı Flowmat 47-5670 isimli bir kumaş kalıp bileşeni (SMC) kullanılarak üretilmiştir. %18 oranında kırılmış ve gelişigüzel dağılmış cam lifli

poliester reçine içermektedir. Kelepçenin detayları Şekil 6.54’de verilmiştir. Deney düzeneği ise şematik olarak Şekil 6.55’de verilmiştir. Profiller kesme yükü dominant olacak şekilde (KD) 100mm ve eğilme yükü dominant olacak şekilde (ED) 400mm iki farklı konfigürasyonda denenmiştir. Test edilen numunelerin 4 tanesinde karşılaştırma yapmak için yapıştırıcı kullanılmamıştır. Kelepçenin iç paneli onu asimetrik kılmaktadır. Deneyler panelin hem dikey (PV) hem de yatay (PH) durumu için yapılmıştır.

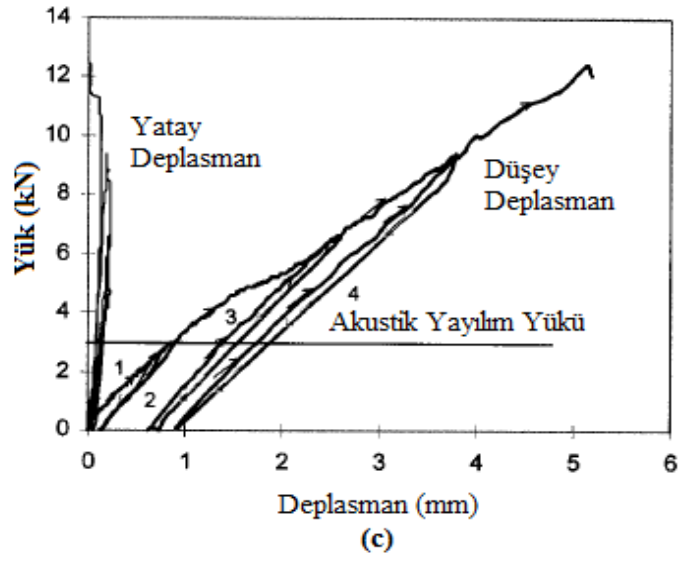
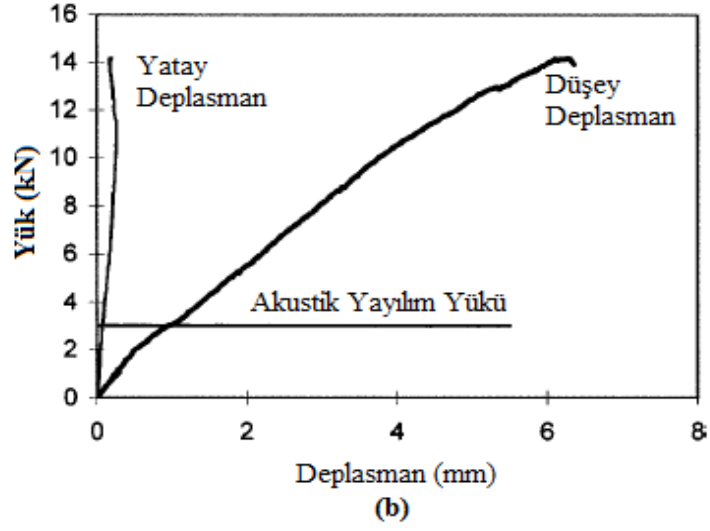
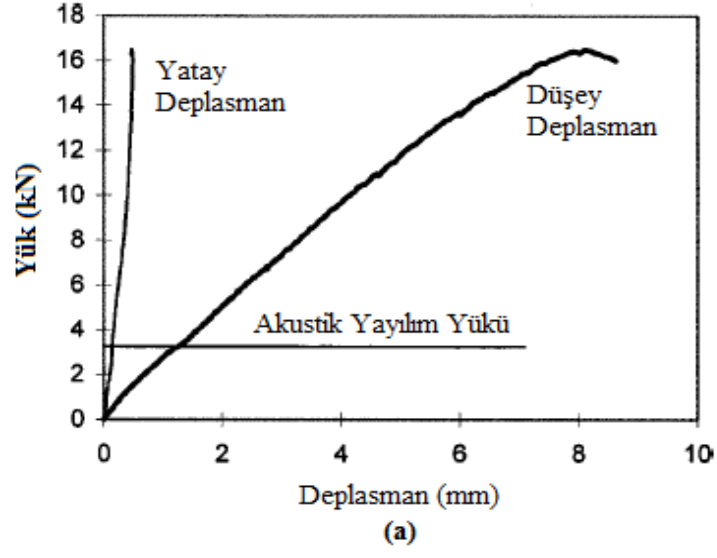


Şekil 6.55: Kelepçe birleşimin detayları, iç panel kesik çizgilerle gösterilmiştir.

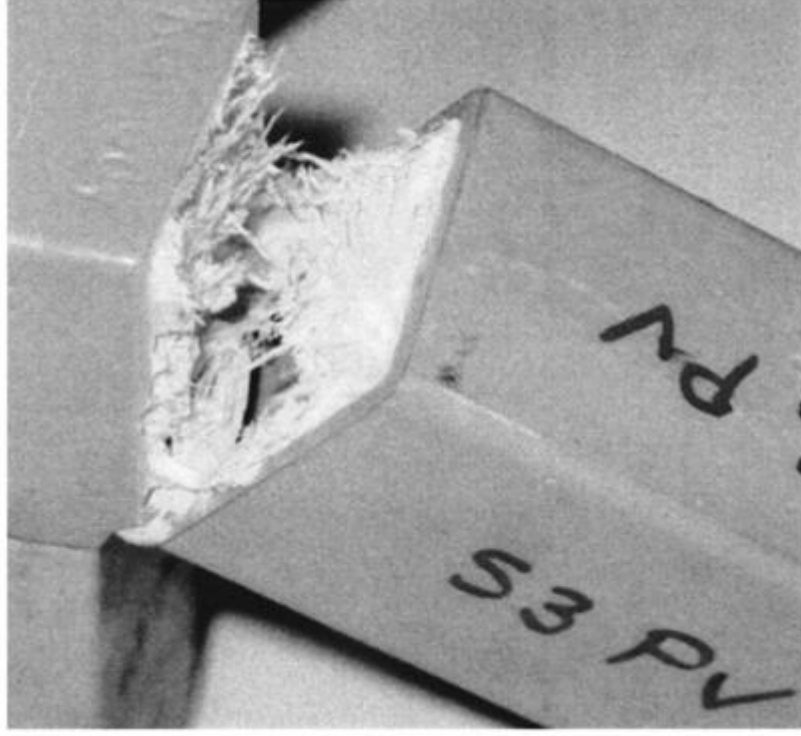


Şekil 6.56: Deney düzeneği.

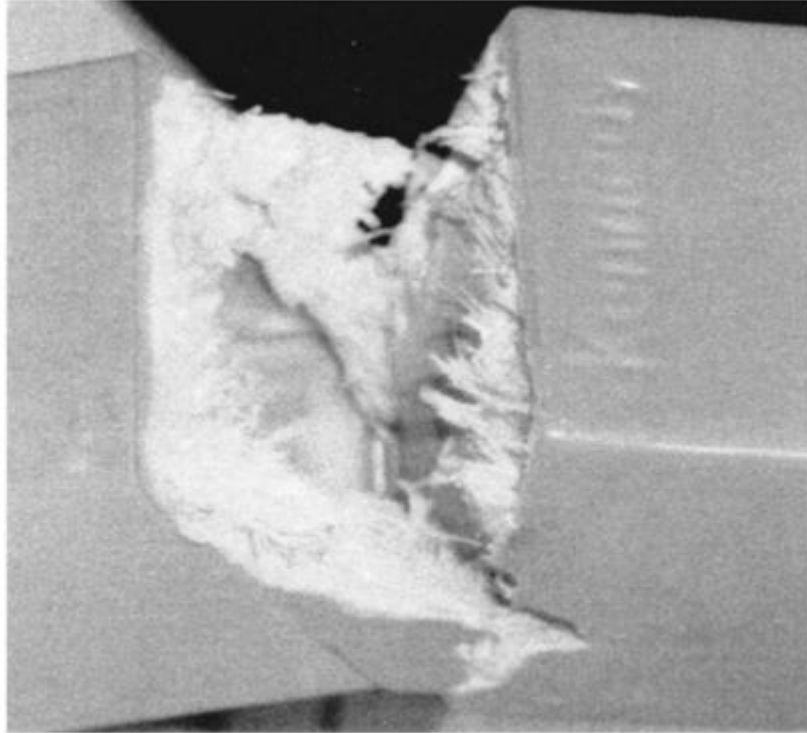
Deney numuneleri etiketlendirilirken kesme dominant numuneler “S” eğilme dominant numuneler ise “B” ön takısını almıştır. Kesme numuneleri deneyleri sonucunda maksimum yükün %85’ine kadar doğrusal bir yük-deplasman eğrisi kaydedilmiştir (Şekil 6.56). Bu seviyeden sonra kelepçenin rijitliği eğrisele dönmüştür. Birkaç kelepçe numunesinin rijitliği ise ilk akustik yayılımdan sonra düşmüştür. Düşey panelli kesme numunesinin üzerinde yapılan tekrarlanır yükleme sonucu rijitliğin her yüklemede %6 azaldığı görülmüştür. Bu durum akustik yayılım sonrası oluşan hasarın kritik bölgede olmadığını ya da hasarın yük tekrarları sırasında ilerlemediğini göstermektedir. Maksimum yükün %75’i gibi yüksek yüklerde tekrarlar yapıldığında ise rijitlik düşmesi %22’leri bulmaktadır. Deney sonrası incelenen numunelerde hiçbir deneyde kesmeye bağlı yapışkan göçmesi olmadığı tespit edilmiştir. Numunelerde oluşan göçme iki türdür; yarıma (yanal çekme kopması) ve yarıma-kesme (yanal çekme kopması ile birlikte kelepçe gövdesinin yırtılması) göçmesi (Şekil 6.57 ve 6.58). Bu tiplere sebebiyet veren durumlar ise reçine kırılması, lif-reçine aderansının kaybolması ve iç panelde lif kırılmasıdır. Kesme numunelerinde ulaşılan maksimum yükler yatay panel pozisyonu için 7.3~17.4kN iken düşey panel pozisyonları için 14.3~19.4kN olarak kaydedilmiştir.



Şekil 6.57: Kesme numunelerinin (a)yatay (b)düşey panelli (c) tekrarlanır yük-deformasyon eğrileri.



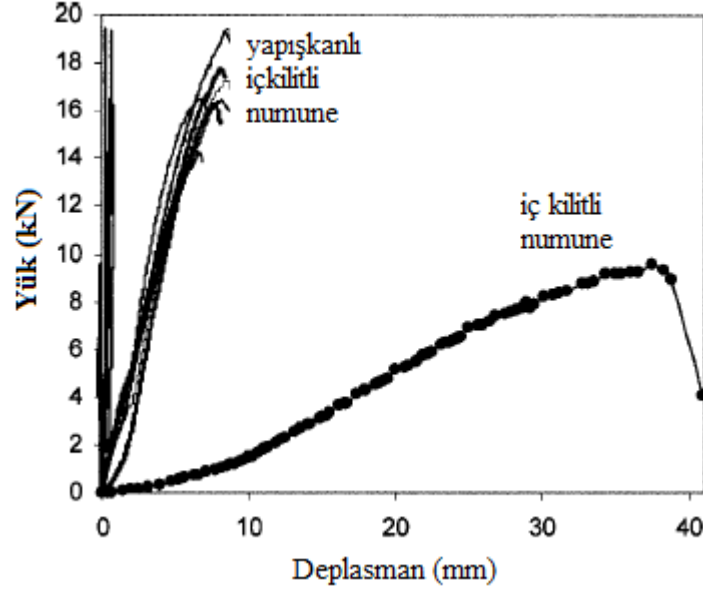
Şekil 6.58: Yarılma göçmesi.



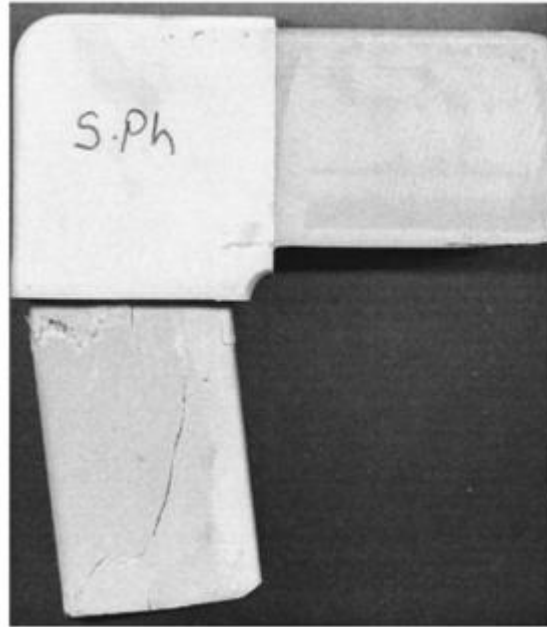
Şekil 6.59: Yarılma-kesme göçmesi.

Numunelerin yük dayanımları arasındaki ciddi varyasyonları açıklayacak görsel bir kanıt bulunamamıştır ancak kelepçe malzemenin yapısındaki liflerin homojen

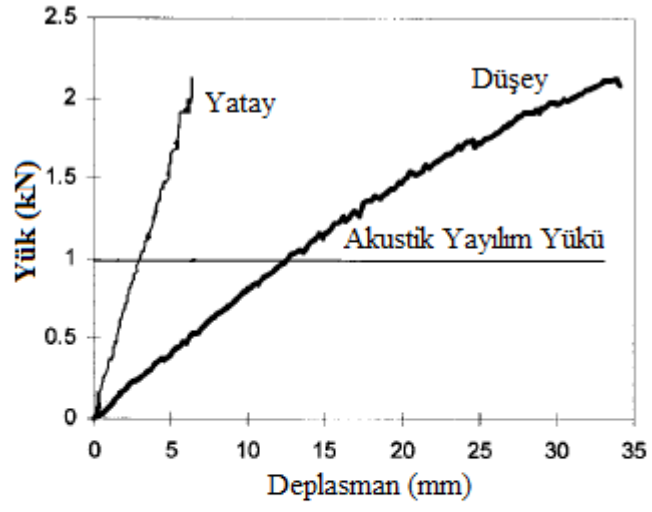
olmaması bu durumun sebebi olabilir. Yapışkansız sadece iç kilitli numunelerin yük-deplasman eğrilerinin yapışkanlı numuneler ile karşılaştırılması ise Şekil 6.59'da verilmiştir. Yapışkansız numunenin göçme tipi ise şekil 6.60'da verilmiştir.



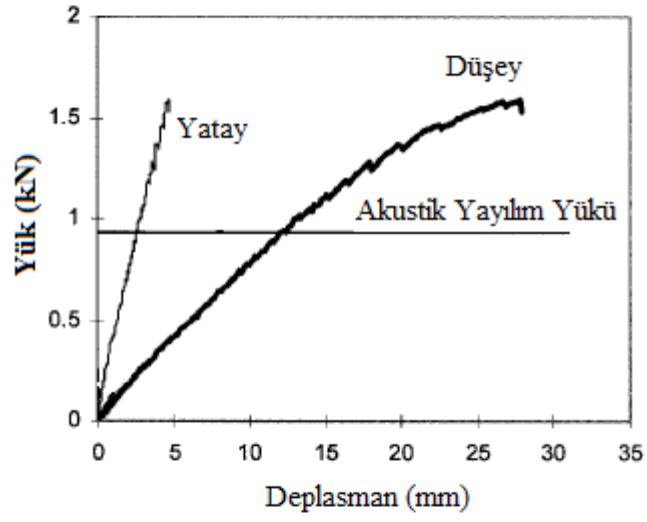
Şekil 6.60: Kilitli ve yapışkanlı numunelerin yük-deplasman eğrileri.



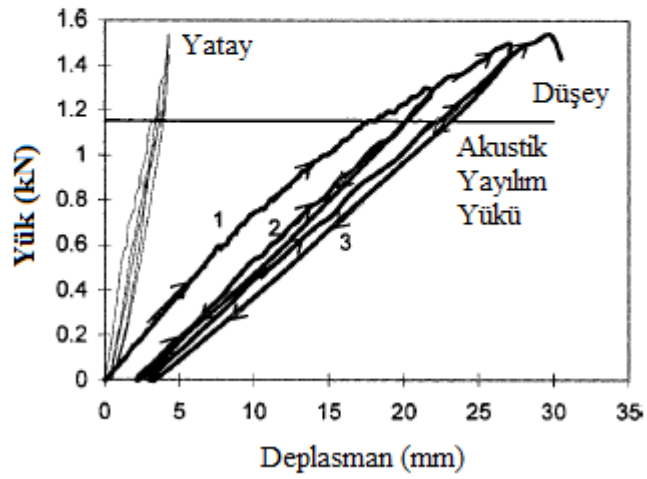
Şekil 6.61: Sadece iç kilitli numunenin göçme tipi.



(a)



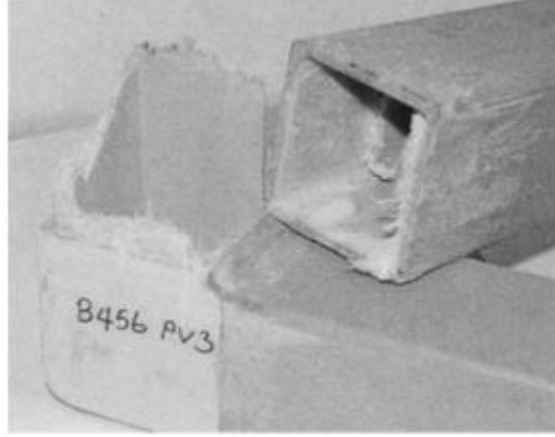
(b)



(c)

Şekil 6.62: Eğilme dominant numunelerin yük-deformasyon eğrileri (a) yatay panel (b) düşey panel (c) tekrarlanır yük.

Eğilme dominant numunelerin düşey ve yatay panel konfigürasyonu yük-deplasman eğrileri ve tekrarlanır yükleme davranışları Şekil 6.61’de verilmiştir. Kesme dominant numuneler ile karşılaştırıldığında akustik yayılım yükü daha yüksek seviyelerde gerçekleşmiş ve bu noktada görsel hasar tespit edilmemiştir. Tekrarlı yükler altında rijitlik düşmeleri yatay panellide %13~22 iken düşey panellide %5~11 arasında gerçekleşmiştir. Eğilme dominant numunelerinde sadece iç panelde ve kutu kesit yüzünde yarılma göçme modlarını açığa çıkarmıştır. Yapışkanlı eğilme numunelerine özel olarak üç numunede göçme kutu kesit girişinde olmuştur (Şekil 6.62). Kesme dominant numunelerdeki durumun aksine yatay panelli konfigürasyonların dayanımları düşeylere göre %14 fazladır.



Şekil 6.63: Eğilme dominant numunenin göçmesi.

Hem kesme hem de eğilme dominant numunelerin eğilme rijitlikleri maksimum yükün %80’ine kadar doğrusaldır. Bu durum akustik yayılımın gerçekleştiği anda hasarın kritik noktalarda olmadığını göstermektedir. %80 seviyesinden sonra rijitlik eğrisi hafif bükülmektedir. Göçmeler ise beklendiği üzere ani olmaktadır. Genel olarak hiçbir numunede kutu kesitin ya da yapışkanın kesme göçmesi olmamıştır. Bulonlu birleşimler için %10~15 değerinin normal kabul edildiği durumda kelepçe birleşim bağladığı kirişin moment dayanımınının %26’sını aktarmayı başarmıştır (Sarıbyık ve Gosling, 2004).

6.2.7 Singamsethi'nin kelepçe birleşimi

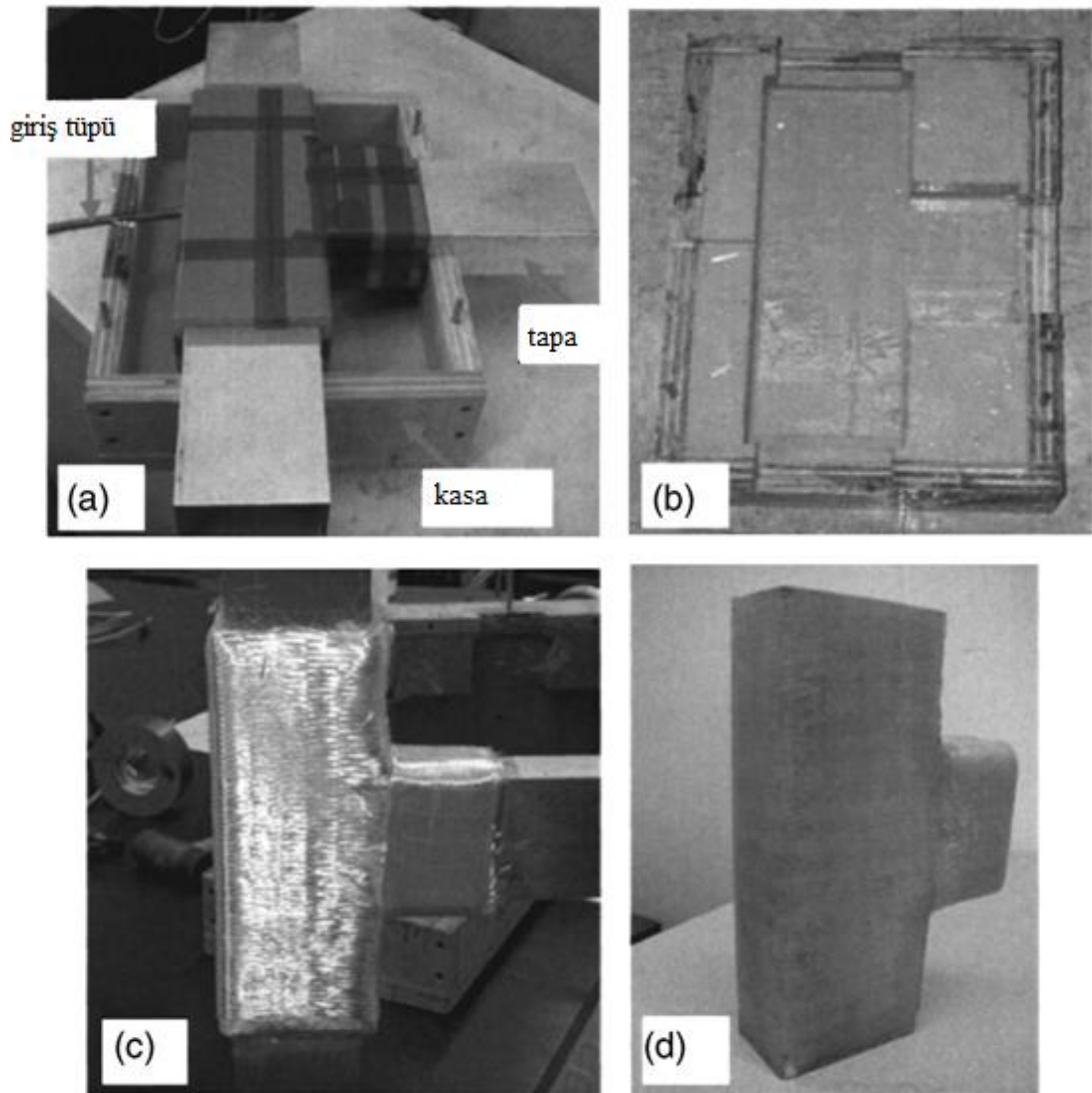
Singamsethi, Smith'in kutu profiller üzerinde yaptığı deneyleri ve ideal kelepçe birleşim konseptini temel alarak vakumlu reçine transfer kalıplaması (RTK) metoduyla tek parçadan oluşan bir kelepçe elemanı tasarlayıp imal etmiştir. Bireysel numuneler moment dirençli bir çerçevenin davranışına referans olması için tekrarlanır statik yükler altında test edilmiştir. Singamsethi'nin tek-parça kelepçe birleşimi literatürde o tarihe kadar yapılmış yarı-rijit birleşim konfigürasyonlarından çok daha iyi sonuçlar vermiştir.

Geometrik özellikleri gereği tek parça olan ideal kelepçe birleşimi pultruzyon yöntemi ile üretmek mümkün gözükmemektedir. Birleşimi üretmek için seçilecek yöntemin yüksek kaliteli sonuçlar vermesi ve tekrarlanabilir olması gerekmektedir. Birleşimi üretmek için seçilen vakumlu reçine transfer kalıplama yöntemi (VRTK), RTK yönteminin bir türevidir. Enjeksiyon kalıplama, basınç kalıplama ve RTK gibi sıvı kalıplama teknikleri son 20 yıl içerisinde gelişmiştir. Bütün bu yöntemler endüstride kullanılsa da yapısal uygulamalar için büyük, kompleks ve kalın kesitli elemanlar üretmede RTK ve varyasyonları öne çıkmaktadır. Bu yöntem daha hızlı, daha ucuz ve daha az emek gerektirmektedir. Ayrıca, RTK yöntemi kapalı bir kalıpta gerçekleştiği için kimyasal emisyonlar minimize olur, boyutsal toleranslar daralır ve parçanın her iki yüzü de pürüzsüz bir yüzeye sahip olur. RTK yönteminin bir diğer avantajı ise boşlukların doldurulması sırasında basınçlar düşük olduğundan imalat sürecindeki gerekli ekipmanlar açısından düşünüldüğünde ucuzdur.

RTK yöntemi önceden yerleştirilmiş kumaş donatılı kalıba katalizör eklenmiş reçinenin enjeksiyonudur. Reçine, kumaşın gözeneklerinden sızar, kalıbı doldurur ve rijit kompozit parçanın matrisini oluşturur. Kelepçe birleşim gibi kompleks bir birleşim için kalıbın dikkatli planlanması gerekir. Kullanılacak reçine sistemi, kalıp ölçüleri, kalıp imalatı ve enjeksiyon sisteminin tasarımı çok önemlidir.

Kalıbı tutması için tasarlanan dış kasa iki simetrik parçadan oluşmaktadır. Plywood ile yapılmış ve standart ağaç vidaları ile tutturulmuştur. İki parçadan oluşan dış kasa 4 çelik tapa yardımıyla birbirine oturup sağlam bir mesnet oluşturacak şekilde

tasarlanmıştır. Kasa monte edilip kenetlendikten sonra reçine girişi ve çıkışı için 10mm çapında (giriş çıkış tüplerinin dış çapı) delikler açılmıştır (Şekil 6.64). Kelepçenin içi boş olan geometrisi, tapa kullanımını zorunlu kılmaktadır. Alüminyum tapa dış ölçülerini Smith'in deneyinde kullandığı kutu pultrüzyon profilden almıştır (100x50mm). Bu tapa iki adet içi boş kolon parçası ve bir adet içi boş kiriş parçasından oluşmaktadır. Kolon parçalarının birbirinin içine geçmesi için tekinin içine ilave bir alüminyum parça eklenmiştir. Kiriş parçanın da bu birleşime içeriden uyacak bir plakası vardır, bu plaka vasıtası ile kolon parçaya vidalanır.



Şekil 6.64: (a) Silikon lastik kalıp dökülmeden önce tapaları içinde dış kasa, (b) kürlendikten sonra nihai silikon lastik kalıbın bir yarısı, (c) tapa üstündeki lif sargısı, (d) bitmiş kelepçe birleşim.

Kalıp, silikon kalıp bileşeni RTV664 ticari ürününden yapılmıştır. Bu bileşen oda sıcaklıklarındaki kürlenmelerde hiç büzüşmez, böylece mükemmel boyutsal stabilite sağlar, ayrıca aşınmaya karşı yüksek dirençlidir ve birazda esnektir. Biten parça kalıptan ayrılırken bu özellikler oldukça faydalıdır.

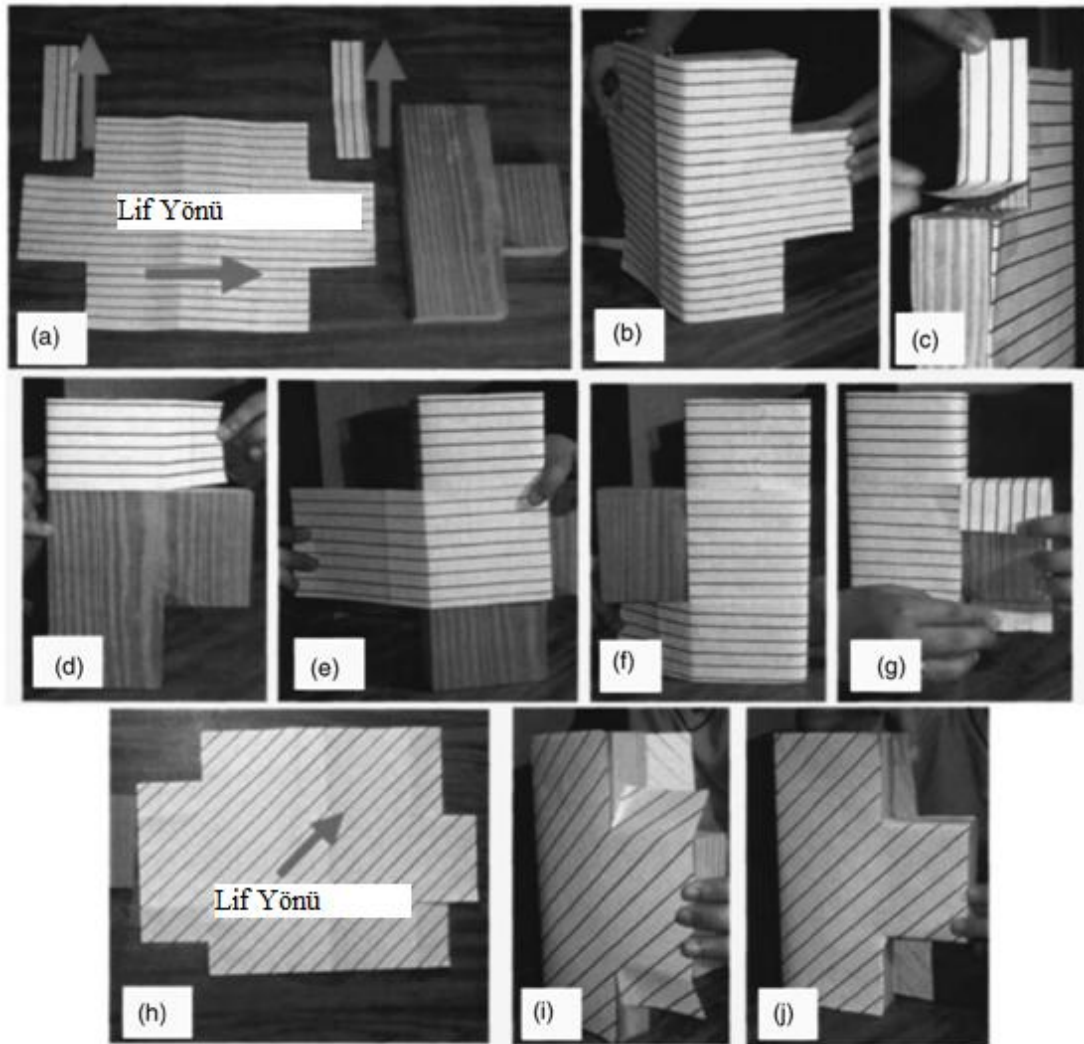
Tapalar ve reçine giriş tüpü dış kasanın bir yarısına yerleştirilmiştir (Şekil 6.64a). Tapa öncelikle üç katman yapışkan teflon filimle sarılmıştır. Böylece daha sonradan kelepçe birleşime yerleştirilecek olan pultruzyon kutu kesitlerin boyutsal toleranslarına yer sağlanmıştır. Ayrıca, yapılacak deneylerde pultruzyon profilleri birleşime yapıştırmak için kullanılacak epoksi reçineye de yer açılmıştır. Teflon filmin, kürlenmiş kelepçeden tapalar çekilirken işe yarayan parlak bir yüzeyi ve yüksek yırtılma direnci vardır. 75x75x10mm pultruzyon profiller nihai kelepçe birleşimin boyutlarını göstermesi için tapanın etrafına yerleştirilmiştir (Şekil 6.64a). Boyutlar karşılaştırma yapma imkanı vermesi için Smith'in deneylerinden alınmıştır.

Silikon bazlı bileşen karıştırıldıktan sonra bir vakum çemberinde havası alınır. Daha sonra kalıbın bir yarısına dökülür ve iki gün boyunca kürlenmeye bırakılır. Tapalar ve giriş çıkış tüpleri yeniden yerleştirilerek kalıbın ikinci yarısı dökülür. Şekil 6.64b, dökülmüş kalıbın kürendikten sonraki halidir.

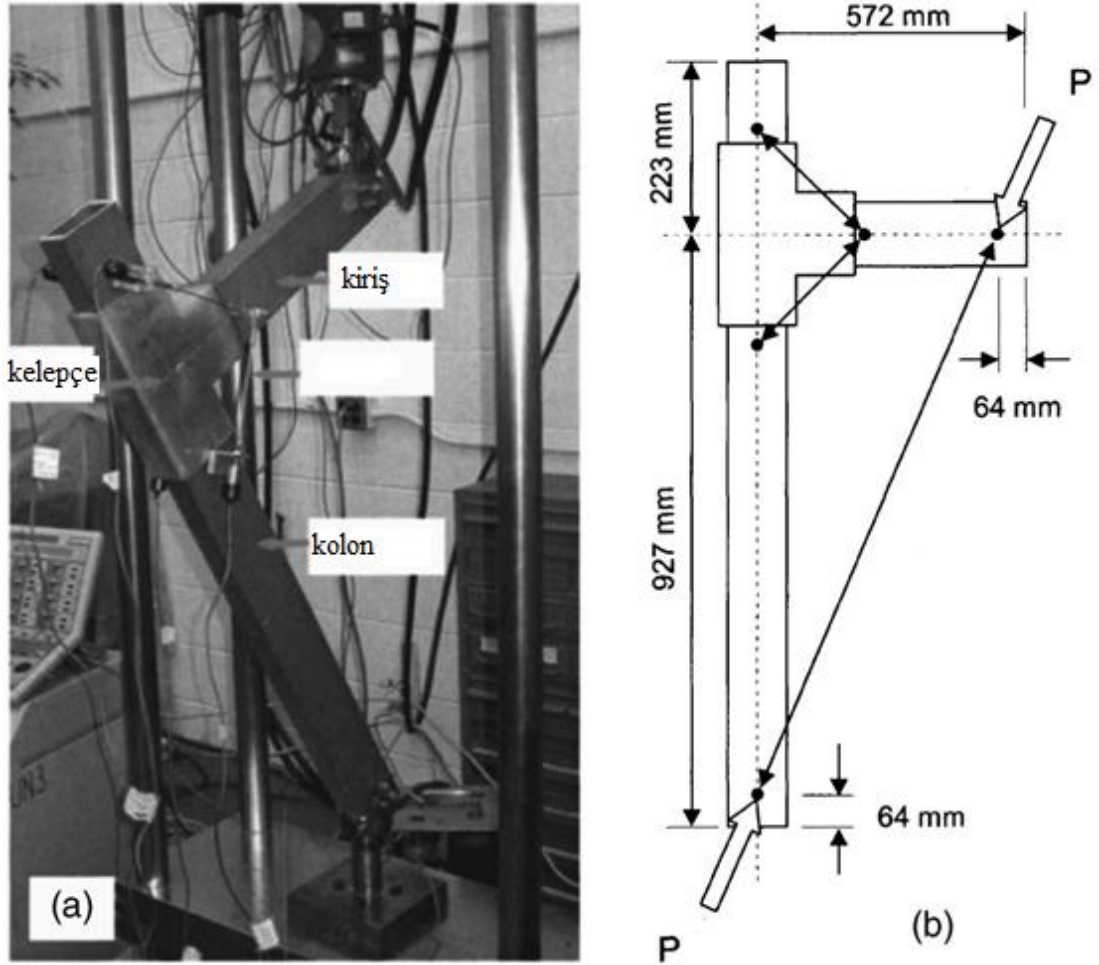
Donatı kumaşı lifsiz reçine kanallarının oluşmasını önlemek için kalıbın her köşesiyle tam temas etmelidir. Tapanın sargısı iki tip dikilmiş E-cam kumaştan oluşur; tek yönlü ve $\pm 45^\circ$. Birkaç denemeden sonra verilmesi istenilen kalınlık için (10mm) tapaya 15 katmandan daha fazla sarılamayacağı anlaşılmıştır (Şekil 6.64c). Sargı; her biri üç katmandan oluşan (iki tek yönlü bir adet $\pm 45^\circ$) beş setten oluşur. Her katman kumaş bir spreyci yapıştırıcı ile tutturulur. Üç katmanın sarılması Şekil 6.65'de gösterilmiştir. Reçine sistemi olarak Epon 828 ticari markalı 63MPa çekme dayanımlı epoksi seçilmiştir.

Smith'in deney sonuçları ile karşılaştırma yapabilmek adına deney düzeneği de taklit edilmiştir (Şekil 6.66). 13 tabakalı (no.5) ve 15 tabakalı (no.6) olmak üzere iki kelepçe birleşim numunesi test edilmiştir. 100x50mm kutu profillerin yüzeyi aderansı epoksi yapıştırıcı aderansını artırmak için yüzey maskesi tabakasına kadar

kumlanmıştır. Kelepçenin iç yüzeyi ise sadece 5 numaralı numunede elle, 6 numaralı numunede ise aletle kumlanmıştır. Birleşimde kullanılan yapıştırıcı epoksi imalatçı firmanın tavsiye ettiği (Strongwell) E-502 ve E-504 ticari markalarıdır. Montajdan önce yapıştırıcı epoksi hem profilin dış yüzüne hem de kelepçenin iç yüzüne uygulanmıştır. Yapışkan yüzeyin nihai kalınlığı yaklaşık 1mm'dir. Her iki numunenin yapışması için gereken minimum 24 saatlik kurlenme süresi sağlanmıştır. Yük uygulama noktalarında lokal göçmenin önüne geçmek için profil dışına donatı plakaları içine ise ahşap kesitler yerleştirilmiştir.

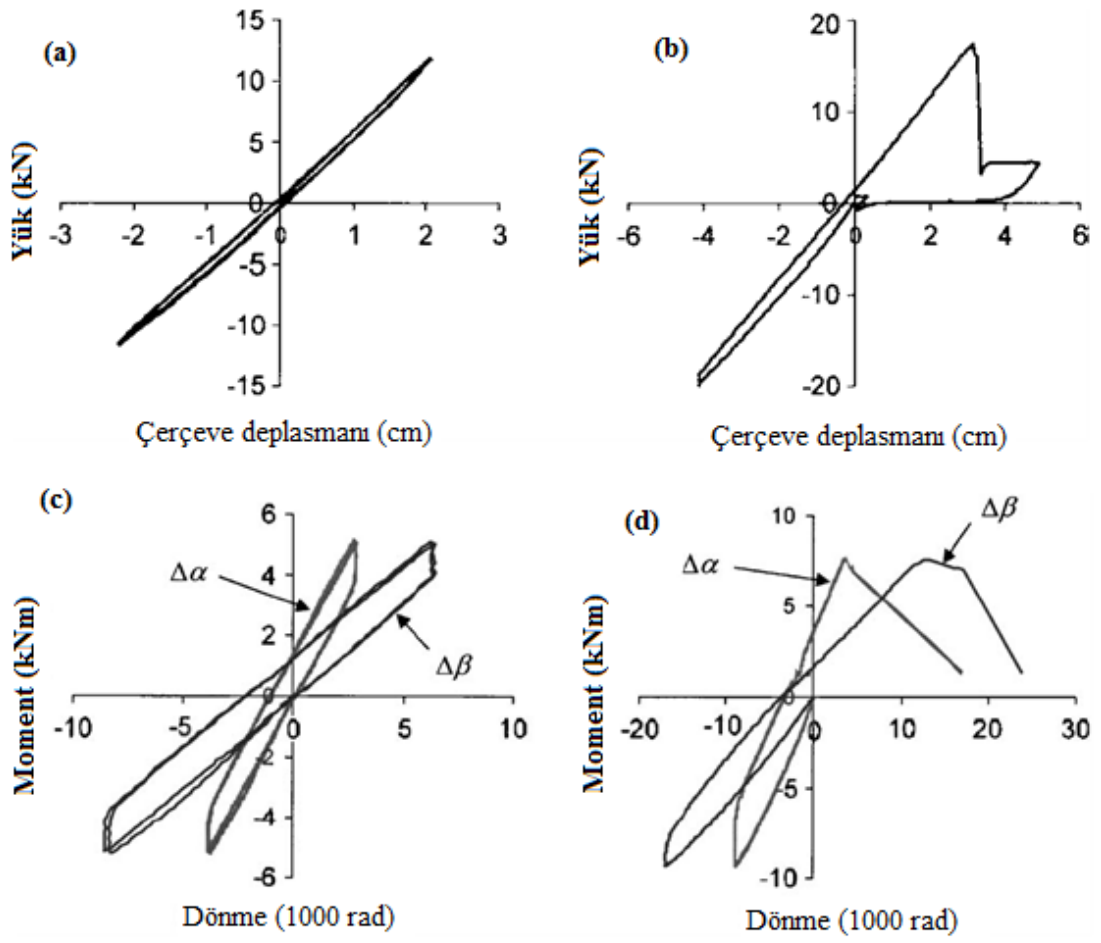


Şekil 6.65: (a), (b), (c) birinci katman, (d), (e), (f), (g) ikinci katman ve (h), (i), (j) üçüncü katman.

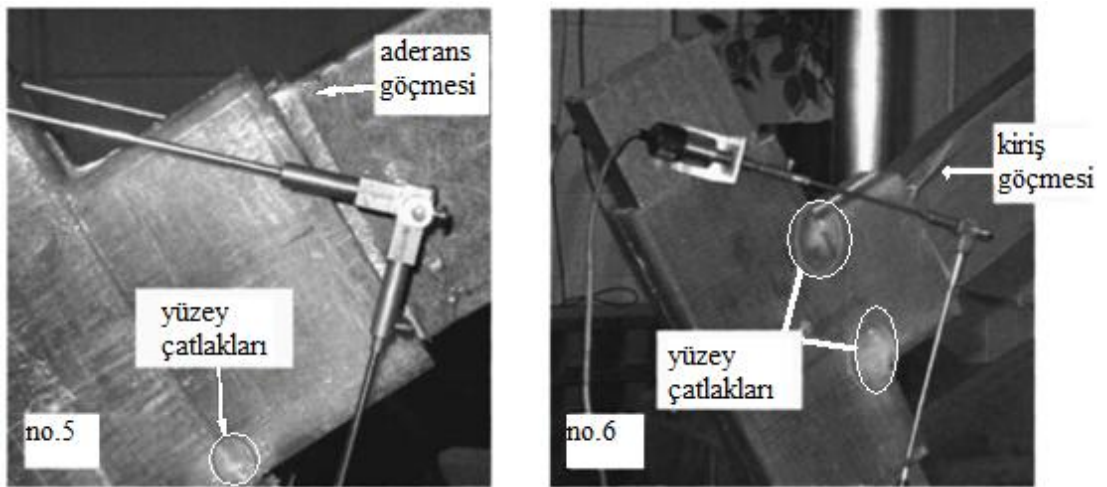


Şekil 6.66: (a) Numunenin yük çerçevesindeki resmi , (b) deney düzenek ölçüleri.

Şekil 6.67’de numunelerin tipik yük-deformasyon ve moment-dönme eğrileri verilmiştir. 5 numaralı numune deneyinde 38mm’lik deplasman çekme yüklemesi sırasında sıyrılma göçmesi gerçekleşmiştir. Göçme ani olmuştur ve numune daha fazla yük taşıyamamıştır (Şekil 6.68). Birkaç yüzey çatlakları dışında kelepçe numunede hasar gerçekleşmemiştir. 6 numaralı numunede ise 32mm’lik deplasman yükü sırasında yüzey çatlakları belirmeye başlamıştır. Numunenin göçmesi çekem yüklemesi esnasında kiriş üzerinde gerçekleşmiştir. Kelepçe ise yüzeysel birkaç çatlaktan başka hasar almamıştır. 6 numaralı numunede aderans göçmesi olduğuna dair görsel ya da duysal bir kanıt yoktur. Kelepçeler Smith’in numunesine göre dayanım ve rijitlik iyileştirmesi göstermiştir (Tablo 6.16). Yaklaşık %10 daha rijit ve %50 daha yüksektir (Singamsethi ve diğ., 2005).



Şekil 6.67: Numunelerin tipik yük-deformasyon ve moment-dönme eğrileri.



Şekil 6.68: Kelepçe birleşim göçmeleri.

Tablo 6.16: Deneysel sonuçlar.

Numune	Rijitlik (kNm/rad)	Maksimum Yük (kN)	Rijitlik (kNm/rad)	Maksimum Yük (kN)
	<i>Basınç</i>		<i>Çekme</i>	
No.5	680	6.45	690	7.15
	670	6.35	690	7.10
	630	11.0	650	12.5
	580	13.2	590	15.0
	-	3.10	570	17.8
	800	12.3	710	13.8
No.6	760	16.1	670	16.0
	690	18.1	630	20.1
	640	20.4	580	23.2
	570	22.2	490	16.5
Smith No.1	1050	14.0	-	-
Smith No.2	600	14.1	-	-

7. TEORİK ANALİZLER

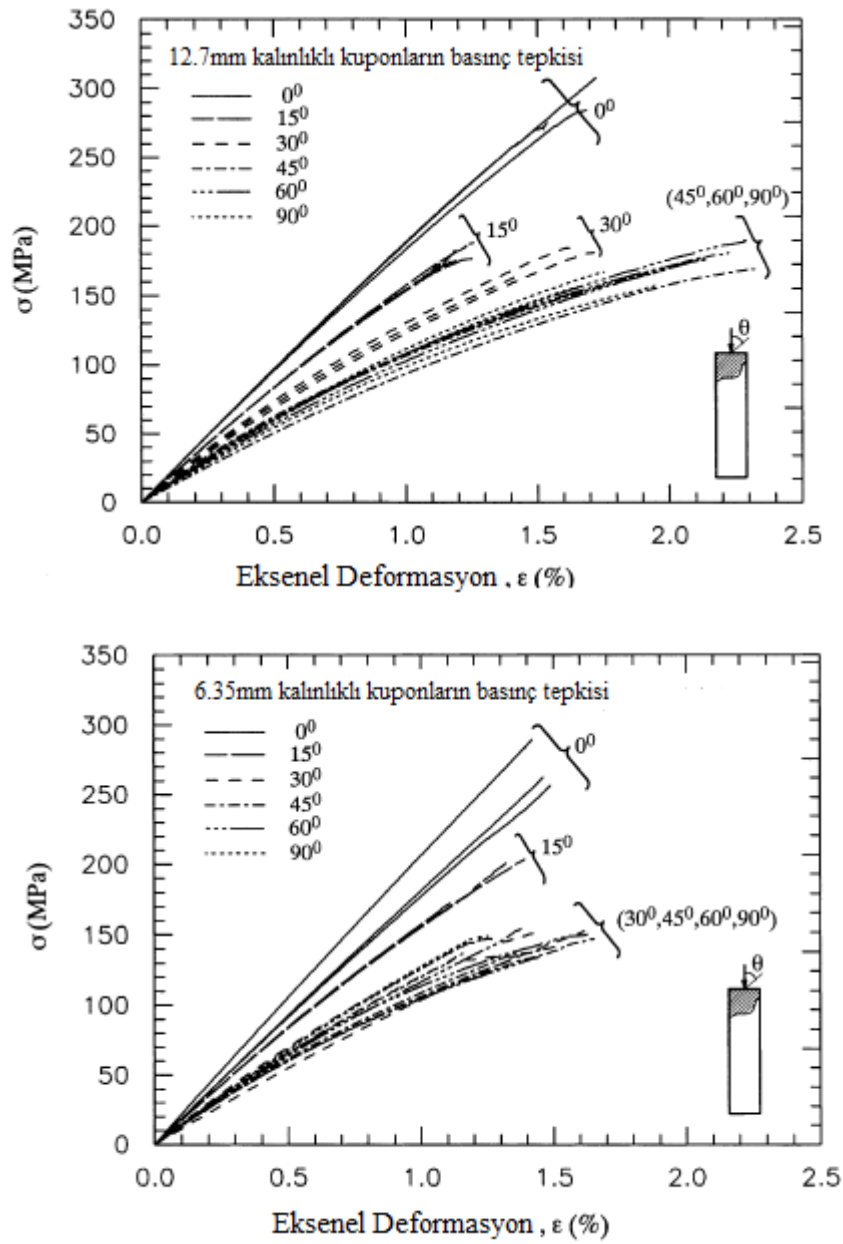
Lifli polimer pultruzyon profillerle oluşturulacak bir taşıyıcı sistemin davranışını teorik analizlerle öngörebilmek için profillerin ilgili fiziksel ve mekanik özelliklerinin ve kullanılacak birleşim konfigürasyonunun ilgili yükler altındaki davranışının belirlenmesi gerekir. Bunun için üretici verilerine başvurulabileceği gibi bağımsız deneyler de gerçekleştirilebilir. Kullanılacak birleşim konfigürasyonunun ilgili yükler altındaki davranışını belirlemek için de deneyler yapılabileceği gibi literatürden uygun deneyler referans alınabilir.

Ülkemiz Anadolu fay hattı üzerinde bulunduğu için birinci derece yük taşıyan yapıların tasarımında deprem yüklerinin etkisi göz ardı edilemez. Deprem yüklerinin yapının ölü ağırlığı ile doğrudan ilişkili olduğu düşünüldüğünde dayanım/ağırlık oranları betonarme ve çelik gibi geleneksel yapı malzemelerine kıyasla çok yüksek olan lifli polimer pultruzyon profiller ilk bakışta avantajlı gibi gözükmemektedir.

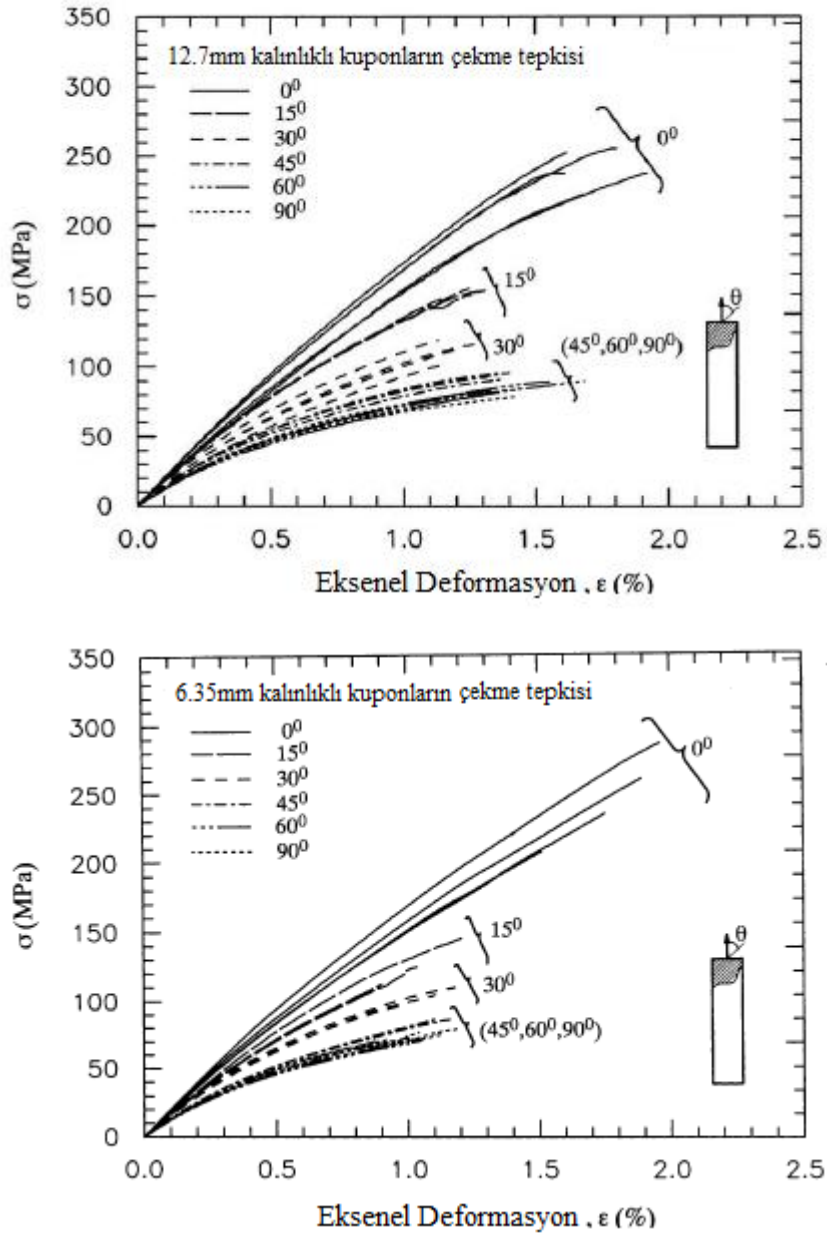
Taşıyıcı sistemlerde kullanılacak olan malzemelerin yük altındaki deformasyon davranışı tasarımcılar için çok önemli bir karakteristik özelliktir. Kabul edilebilir dayanım ve rijitlik azalmaları altında gerçekleşen plastik deformasyon kabiliyeti duktilite (sünek davranış) olarak tanımlanır. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Yönetmeliği (2007) yapılara aktarılan deprem enerjisinin yapının sünek davranışı ile tüketilen kısmını göz önünde bulundurmak için taşıyıcı sistem davranış katsayıları tanımlamıştır. Buna göre yapıya etkitilen deprem yükleri yapının süneklilik derecesine bağlı olarak taşıyıcı sistem davranış katsayısına bölünerek azaltılmaktadır.

Yapının sünekliliği yapıyı oluşturan malzemenin ve birleşim yerlerinin sünekliliğine bağlıdır. Ancak lifli polimer pultruzyon profillerin çekme ve basınç yükleri altındaki davranışı çelik ve çelik donatılı beton gibi geleneksel malzemelerin aksine doğrusal elastiktir. Gerilme-deformasyon eğrilerinde göçme noktasından önce bir akma bölgesi gözlenmez. Bu gevrek davranışın sorumlusu polimer reçine içerisinde

kullanılan donatı liflerinin gerilme-deformasyon karakteristikleridir. Pultruzyon polimer profillerde tipik olarak kullanılan cam ve karbon liflerinin gerilme-deformasyon karakteristikleri çeliğin aksine gevrektrir. Vinilester reçineli tek yönlü boyuna ve çok yönlü sürekli keçe formundaki cam lifleriyle güçlendirilmiş farklı kalınlıklardaki pultruzyon profillerden kesilen kuponların basınç ve çekme altındaki gerilme-deformasyon grafikleri Şekil 7.1 ve 7.2’de verilmiştir (Haj-Ali ve Kılıç, 2002).



Şekil 7.1: 12.7 ve 6.35mm kalınlıklı profil kuponlarının basınç-deformasyon davranışı.



Şekil 7.2: 12.7 ve 6.35mm kalınlıklı profil kuponlarının çekme-deformasyon davranışı.

Literatürde lifli polimer profiller ile kullanılan ve moment aktaran gövde klipsli, flanş klipsli, gövde-flanş klipsli ve kelepçeli gibi yarı-rijit birleşim konfigürasyonlarının davranışı da doğrusal elastiktir. Dolayısıyla lifli polimer pultruzyon profiller ve bahsi geçen birleşimlerle oluşturulacak bir taşıyıcı sistemin davranışının da doğrusal elastik olması beklenir. Bu davranışı belirlemek ve olası analizlerde kullanılmak üzere sistem davranış katsayısını belirlemek için örnek bir çerçeve üzerinde doğrusal olmayan itme analizleri gerçekleştirilmiştir. Ancak öncesinde pultruzyon profillerin ve bunlarla oluşturulan yarı rijit birleşimlerin analiz

sonuçlarını doğrulamak için literatürde deneysel karşılığı olan dört farklı mesnet tipine sahip basit kirişler modellenmiştir.

7.1 Turvey'in Üç Nokta Kiriş Eğilme Deneyleri

Lifli polimer pultruzyon profiller ve bunlar ile oluşturulan farklı konfigürasyonlardaki yarı rijit birleşimlerin analiz sonuçlarını doğrulamak için Turvey'in (1999) üç nokta kiriş eğilme deneyleri kullanılmıştır. Turvey, 101.6mm derinlikli geniş flanşlı lifli polimer pultruzyon profiller üzerinde dört farklı açıklıkta dört farklı mesnet koşulu ile üç nokta eğilme deneyi gerçekleştirmiştir. Deneylerde kullanılan yarı-rijit birleşim konfigürasyonları sırasıyla mükemmel rijit, köşebent pultruzyon profillerden kesilmiş klipslerle gövde-flanş konfigürasyonu (GFK), aynı şekilde gövde klips konfigürasyonu (GK) ve dönme direnci olmayan basit mesnettir. Deneylerde kullanılan pultruzyon kirişler Strongwell firmasının EXTREN 500 serisidir. Profillerin analizlerde kullanılan özellikleri Tablo 7.1'de verilmiştir. Yapılan analiz sonuçları ile deney sonucu kaydedilen kiriş ortası deformasyon değerleri ve Turvey'in doğrusal analitik öngörülerinin karşılaştırmaları Tablo 7.2'de, birleşim detayı Şekil 7.3'de verilmiştir.

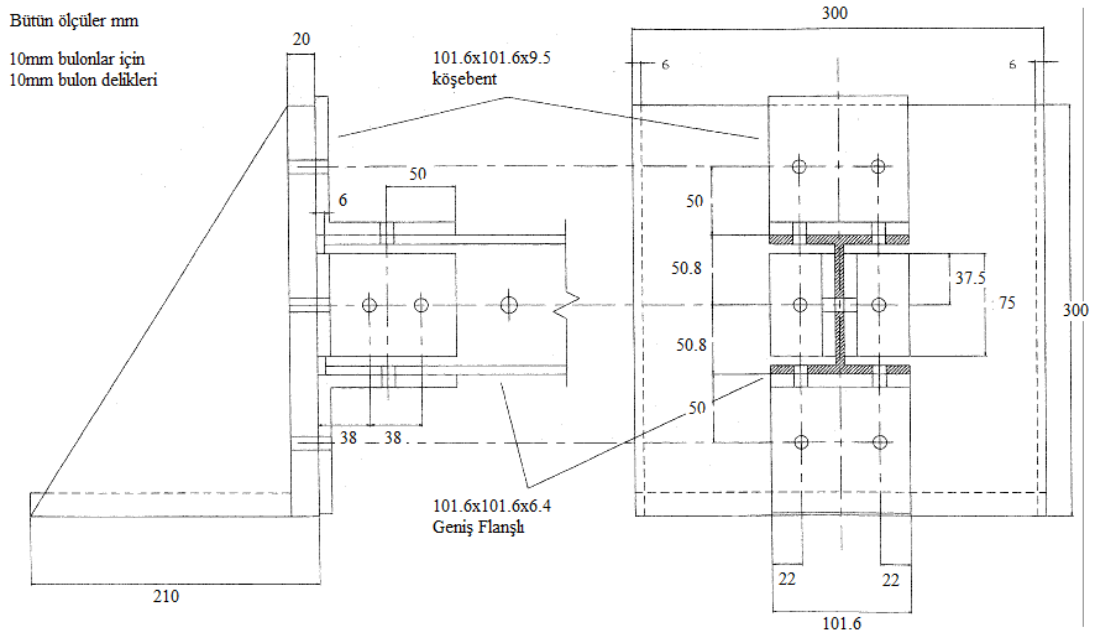
Tablo 7.1: Deney kirişinin geometrik, mekanik ve fiziksel özellikleri ile mesnet ve açıklık koşulları.

Pultruzyon Profil	EXTREN 500 WF 4x4x1/4
Kiriş Geometrisi	Geniş Flanş 101.6x101.6x6.4
Boyuna Elastisite Modülü	19.4 GPa (deneysel veri)
Düzlem İçi Kesme Modülü	2.93 GPa (üretici verisi)
Atalet Momenti x-x	131.95 cm ⁴
Boyuna Poisson Oranı	0.33 (üretici verisi)
Kesit Alanı	18.55 cm ²
Gövde Kesit Alanı	5.68 cm ²
Yoğunluk	1.72~1.94 t/m ³ (üretici verisi)
Açıklıklar	4570, 3756, 2950, 2135
Mesnet Koşulları	Rijit, Gövde-flanş klipsli, Gövde klipsli, Basit
Yükleme	4kN açıklık ortası
Gövde Flanş Klips Rijitliği	127.5 kNm/rad (Turvey, 2002)
Gövde Klips Rijitliği	21 kNm/rad (Turvey, 2002)

Tablo 7.2: Deney sonuçlarının teorik analizlerle karşılaştırılması.

Açıklık (mm)	Mesnet	Deney (mm)	Turvey (mm)	Analiz (mm)
4570	Rijit	~50	32	34
4570	GFK	~51	55~56	51
4570	GK	80	88	88
4570	Basit	108	128	129
3746	Rijit	24	19	19
3746	GFK	32	33	30
3746	GK	46	53	52
3746	Basit	60	70	72
2950	Rijit	12.5	10	10
2950	GFK	16	16	16
2950	GK	24	27	27
2950	Basit	30	35	35
2135	Rijit	6	4	4
2135	GFK	7	7	7
2135	GK	10	11	11
2135	Basit	12	13	14

Analizlerde yarı-rijit birleşimleri modellemek için kullanılan yarı-rijit birleşim doğrusal elastik karakteristik rijitlikleri yine Turvey'in (2002) deneylerinden alınmıştır. Rijit birleşim değerlerinin teorik öngörüler ile örtüşmemesinin sebebi Turvey'in beton bloklarla oluşturmaya çalıştığı ideal rijit birleşimin başarısız olmasıdır. Diğer sonuçlardaki ufak farklılıklar ise profillerin boyuna elastisite modüllerinin 22GPa kadar yüksek olabileceğini gösteriyor.



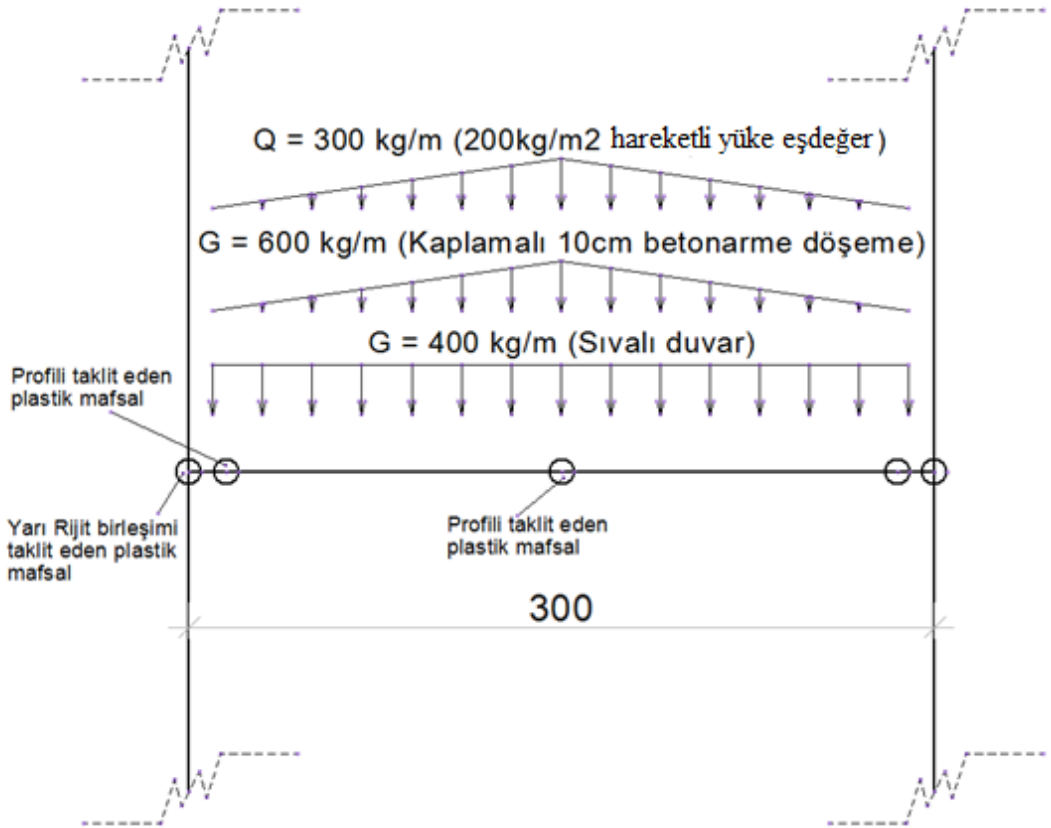
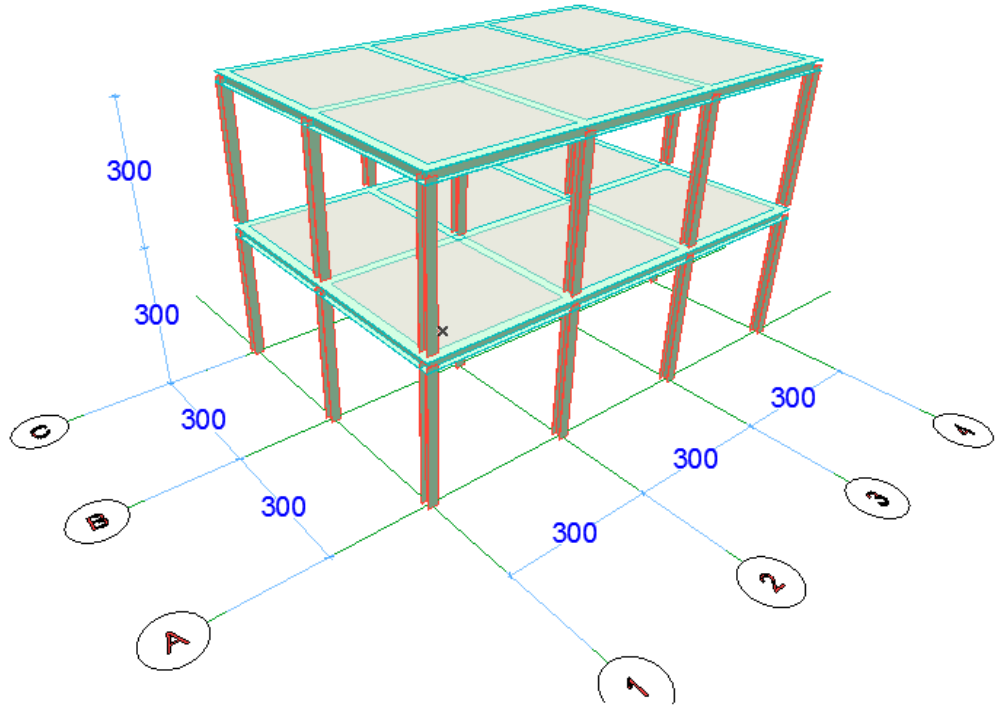
Şekil 7.3: Birleşim detayları.

7.2 Örnek Çerçeve

Lifli polimer pultruzyon profillerle ve literatürdeki yarı-rijit birleşimleri ile oluşturulacak sistemlerin deprem gibi yanal yükler altındaki performansı hakkında fikir sahibi olmak adına bir örnek çerçeve modellenip bu çerçevenin bir X aksı üzerinde doğrusal olmayan itme analizleri gerçekleştirilmiştir. Buna göre seçilen çerçeve 3m açıklıklı 3m yükseklikli iki katlı basit bir çerçevedir. Çerçeve şekli ve uygulanan ölü ve hareketli yükler Şekil 7.3'te modelleme ile ilgili diğer bilgiler ise Tablo 7.3'te verilmiştir.

Tablo 7.3: Modelleme girdi verileri.

Açıklama	Veri
<i>Yapı Geometrisi</i>	
Kat sayısı ve yükseklikleri	2x3m
X yönünde açıklık sayısı ve miktarı	3x3m
Y yönünde açıklık sayısı ve miktarı	2x3m
Kiriş ve kolon kesit ölçüleri	203.2x203.2x9.5mm
Kolon-kiriş kesit geometrileri	Geniş Flaş
Betonarme döşeme kalınlığı	100mm
<i>Malzeme Özellikleri</i>	
Kolon-kiriş malzemesi	EXTREN 500
Elastisite modülü (boyuna)	17.2GPa
Elastisite modülü (tersine)	5.52GPa
Kesme modülü	2.93GPa
Kesme dayanımı	31MPa
<i>Yapısal Yükler</i>	
EXTREN 500 yoğunluğu	1.72ton/m ³
Donatılı beton yoğunluğu	2.5ton/m ³
<i>Ölü Yükler</i>	
Döşeme kaplamaları	150kg/m ²
Sıvalı kalın tuğla duvarlar	400kg/m ²
<i>Hareketli Yükler</i>	
Döşeme hareketli yükleri	200kg/m ²
<i>Deprem Yükleri</i>	
İvme spektrumu için zemin sınıfı	Z3
Bina önem katsayısı	1
Deprem yükü azaltma katsayısı	1
Deprem yükü hesabında kullanılan düşey yük kombinasyonu	1G+0.3Q



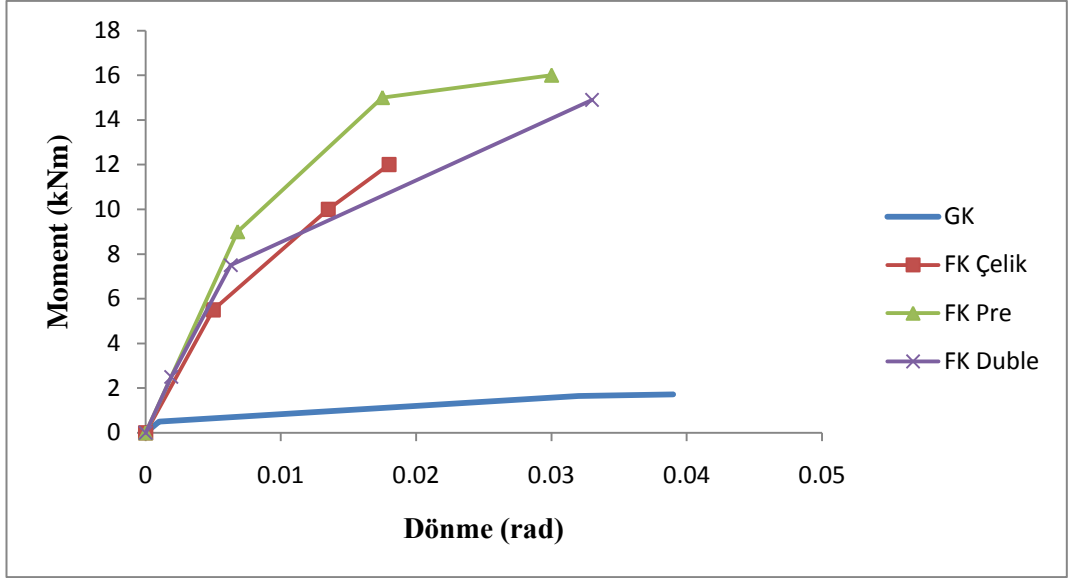
Şekil 7.4: Örnek çerçeve ve uygulanan yükler.

Model çerçevenin X eksenindeki bir aksı üzerinde yapılan doğrusal olmayan itme analizlerinde tepe düğüm noktası çerçeve yüksekliğinin %4'ü olan 24cm'ye kadar ittirilmiştir. Analiz sırasında çerçeve 1G+0.3Q kombinasyonu ile yüklenmiştir. Analizler 5 farklı birleşim konfigürasyonu için gerçekleştirilmiştir. Bunlar sırasıyla mükemmel rijit (MR), pultrüzyon köşebent gövde klipsli (GK), çelik köşebent flanş klipsli (FK çelik), prefabrik kompozit flanş klipsli (FK pre) ve double pultrüzyon köşebent flanş klipsli (FK double). Bu yarı-rijit birleşim konfigürasyonlarının seçim nedeni modellenen profil tipi için literatürde detaylı birleşim deneysel sonuç karşılıklarının olmasıdır. Mottram'ın (1996 ve 1999b) deneylerinden alınan birleşimler için moment-dönme karakteristik verileri Tablo 7.4'te verilmiştir. Bu yarı-rijit birleşimlere ait karşılaştırmalı moment-dönme eğrilikleri Şekil 7.4'te, her bir birleşimin moment-dönme eğrilikleri ise sırasıyla Şekil 7.5 ve 7.6'da verilmiştir.

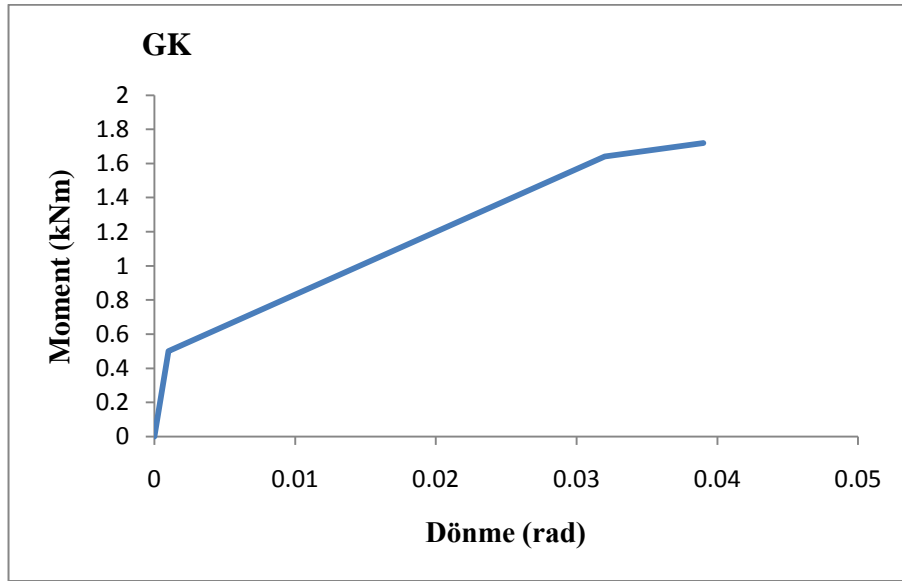
Tablo 7.4 : Extren 500 Geniş flanşlı 203.2mm derinlikli kirişler için bazı yarı-rijit birleşim konfigürasyonlarının moment dönme karakteristik değerleri.

Başlangıç Momenti (kNm)	Başlangıç Dönmesi (rad)	İlk Göçme Momenti (kNm)	İlk Göçme Dönmesi (rad)	Göçme Momenti (kNm)	Göçme Dönmesi (rad)
<i>Pultrüzyon Köşebent Gövde Klipsli</i>					
0.5	0.001	1.64	0.032	1.72	0.039
<i>Çelik Köşebent Flanş Klipsli</i>					
5.5	0.005	10	0.0135	12	0.018
<i>Prefabrik Kompozit Flanş Klipsli</i>					
9	0.0068	15	0.0175	16	0.03
<i>Double Pultrüzyon Köşebent Flanş Klipsli</i>					
2.5	0.0019	7.5	0.0063	14.9	0.033

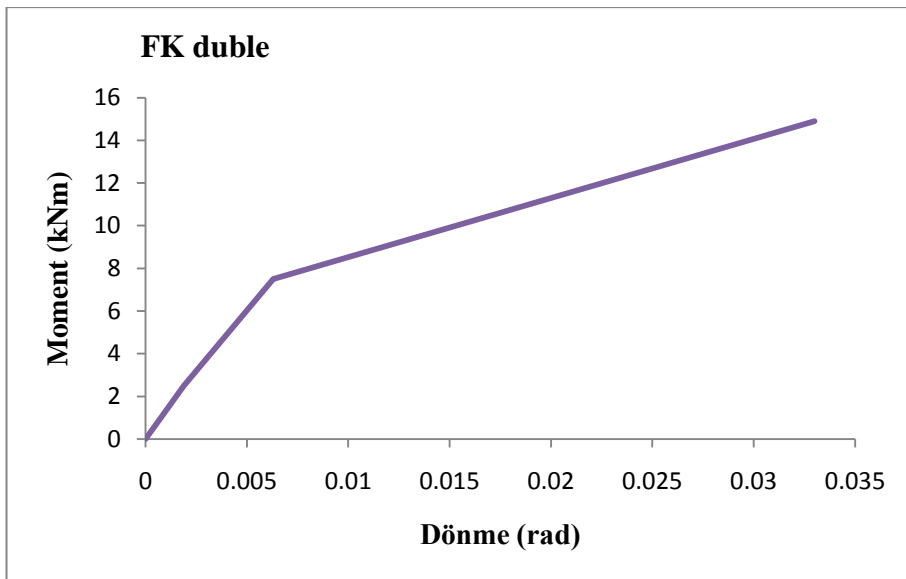
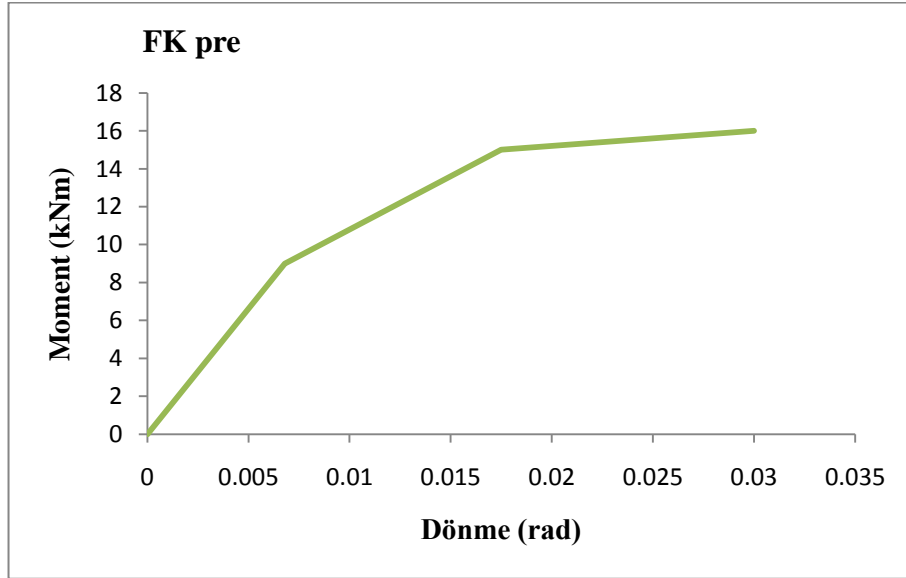
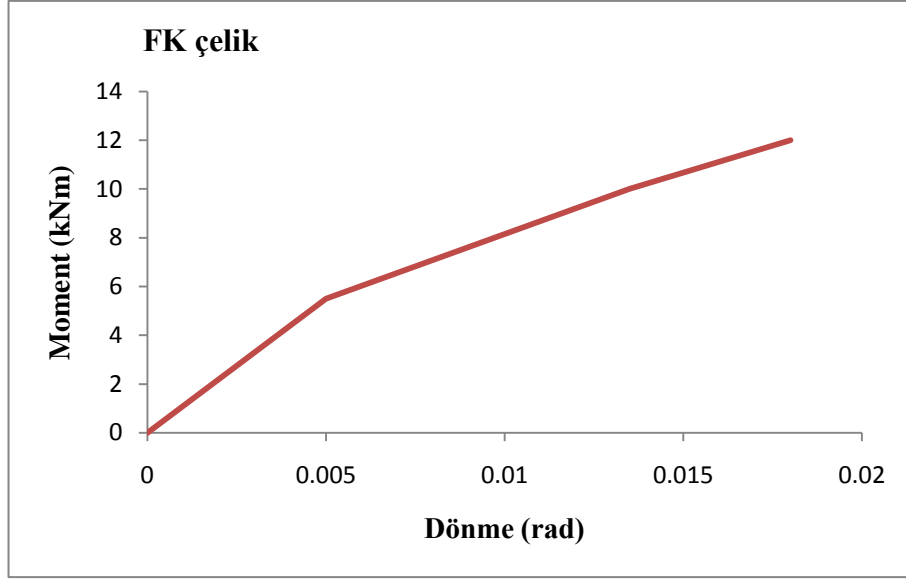
Analizlerde yarı rijit birleşimlerin davranışı Tablo7.4'de verilen verilerle modellenen plastik mafsallar tanımlanarak taklit edilmiştir. Pultrüzyon profillerin ise üretici tarafından sağlanan %1'lik emniyet deformasyon oranı yerine göçmeden önce %1.5 oranına kadar deformasyon yaptığı kabul edilmiştir (Şekil 7.7).



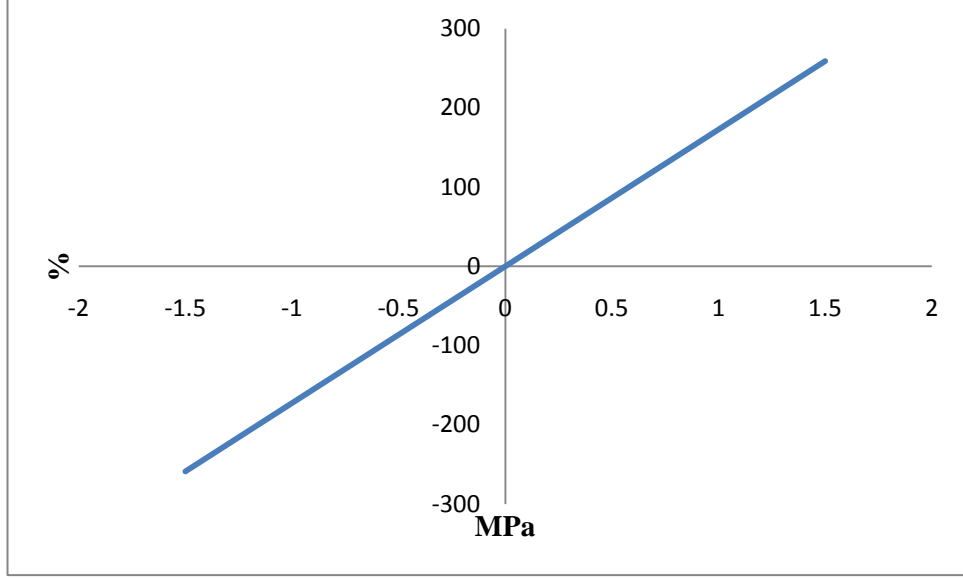
Şekil 7.5: EXTREN WF 203.2 profilleri için bazı yarı-rijit birleşim konfigürasyonlarının moment-dönme eğrileri.



Şekil 7.6: Gövde klipsli konfigürasyonu için moment-dönme eğrisi.

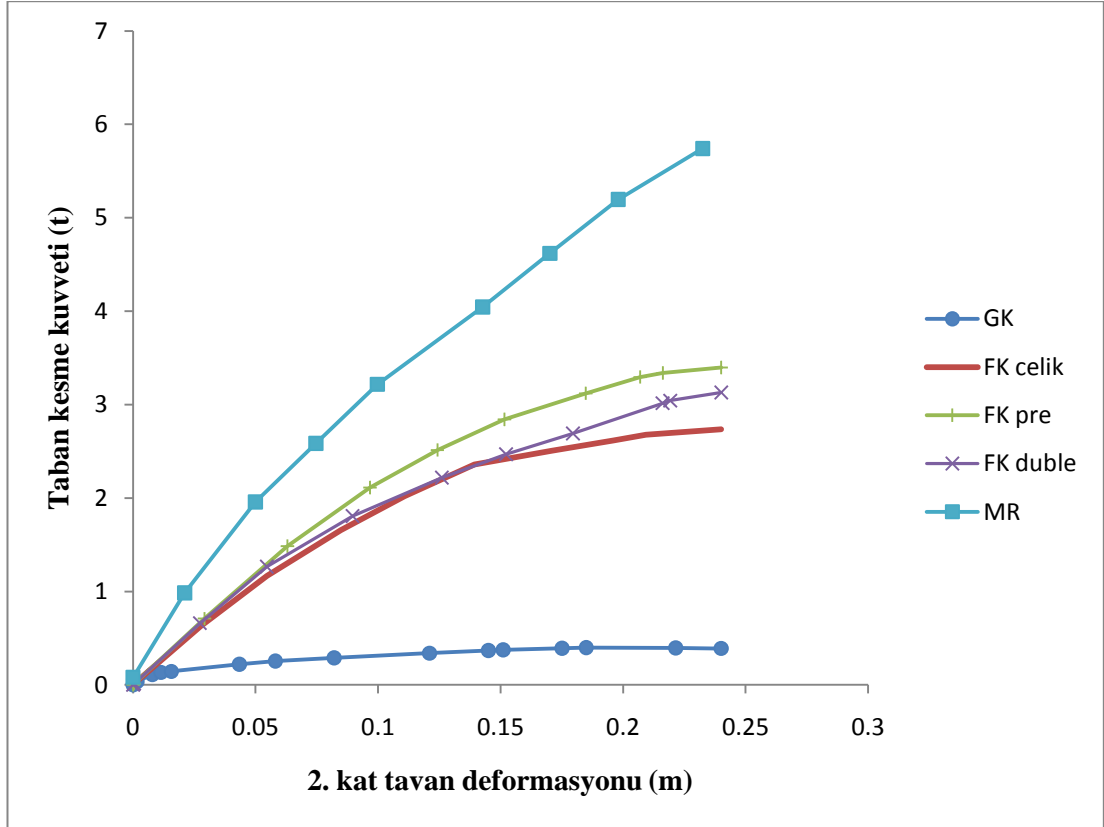


Şekil 7.7: Flanş klips konfigürasyonları için moment-dönme eğrileri.

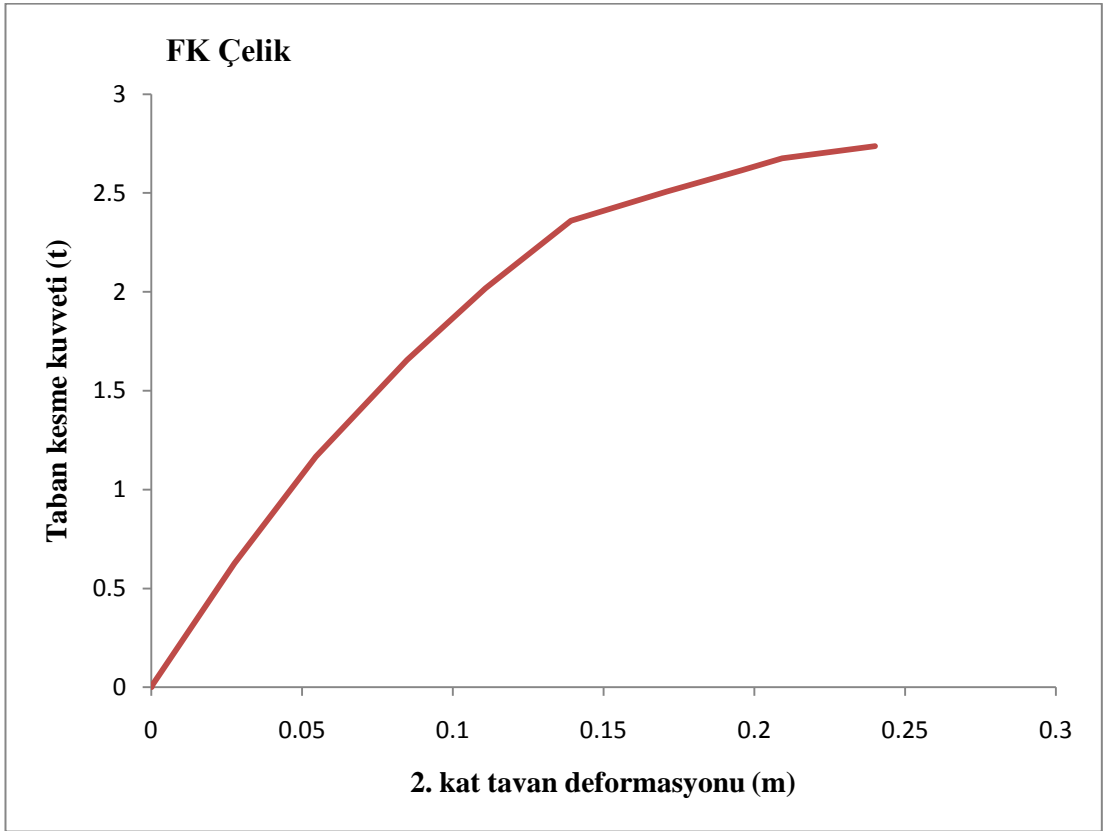
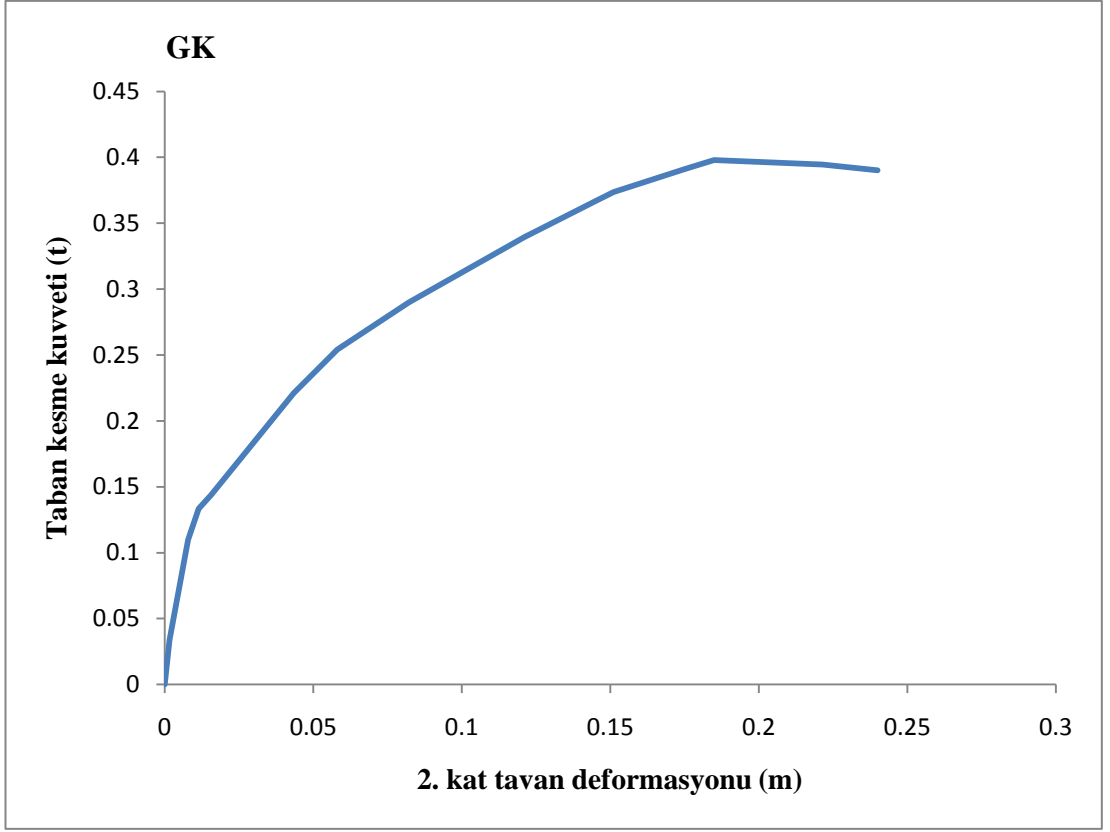


Şekil 7.8: Extren 500 için gerilme-deformasyon ilişkisi.

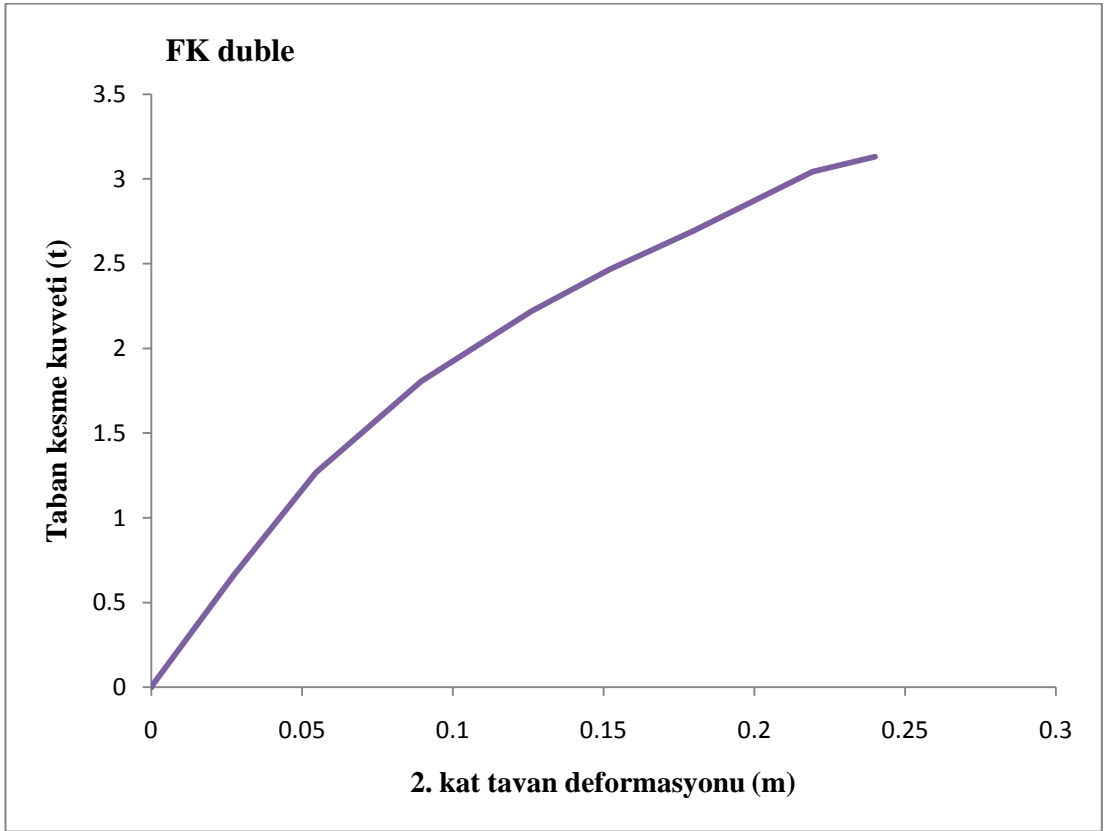
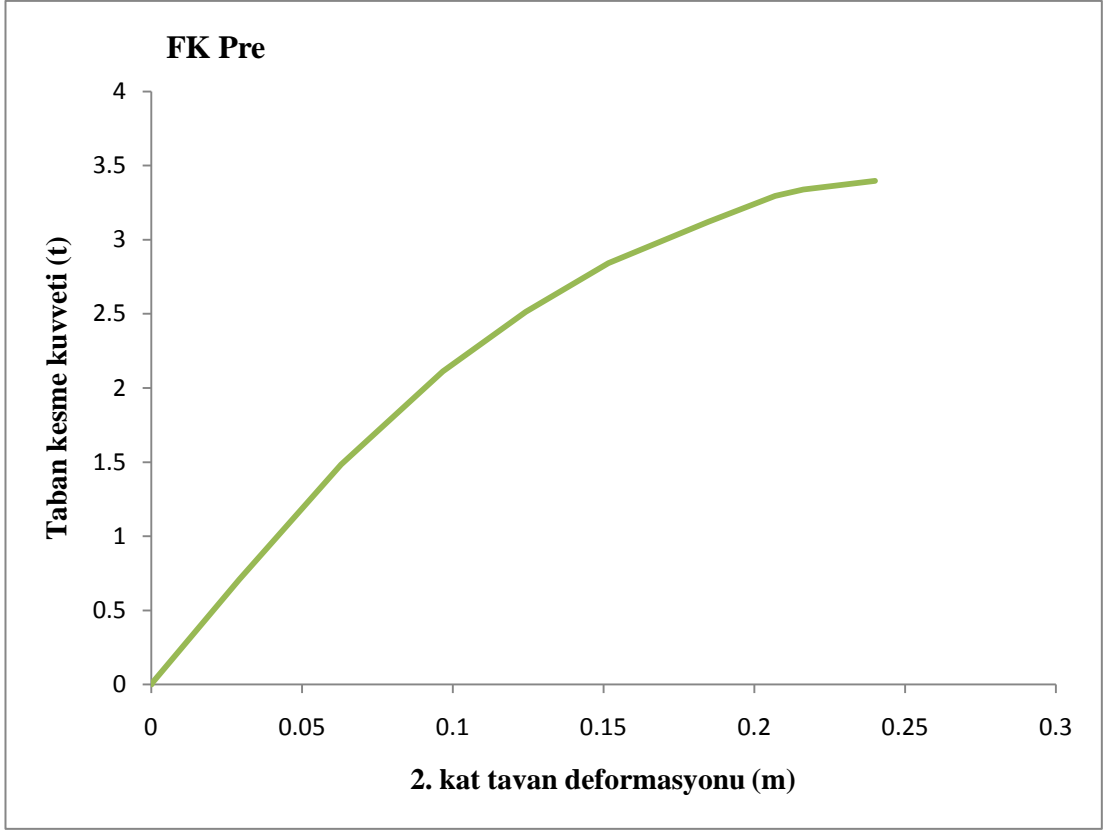
P- Δ etkilerinin başladığı sınır olan kat yüksekliğinin %4'üne tekabül eden 24cm2lik tepe düğüm noktası deformasyonu için taban kesme kuvvetleri 5 farklı birleşim tipi için Şekil 7.8'de, bireysel olarak sırasıyla Şekil 7.9, 7.10 ve 7.11'de verilmiştir.



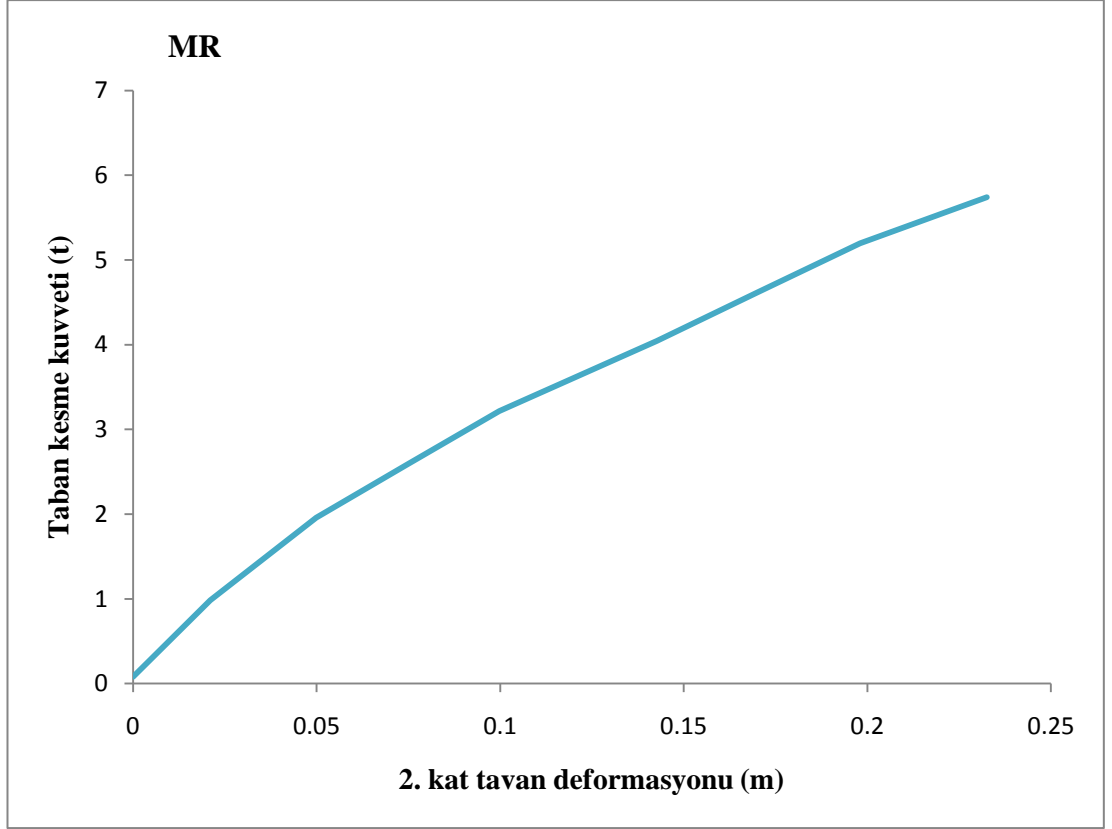
Şekil 7.9: 5 farklı birleşim tipi için itme analiz sonuçları.



Şekil 7.10: Gövde klipsli ve çelik flanş klipsli yarı-rijit birleşim konfigürasyonları için itme analiz sonuçları.



Şekil 7.11: Prefabrik kompozit ve duble pultrüzyon flanş klipsli yarı-rijit birleşim konfigürasyonları için itme analiz sonuçları.



Şekil 7.12: Mükemmel rijit birleşim konfigurasyonu için itme analiz sonucu.

Afet bölgelerinde yapılacak yapılar hakkındaki yönetmelikten deprem durumunda toplam taban kesme kuvveti;

$$V_t = \frac{WA(T_1)}{R_d(T_1)} \geq 0.1 A_0 I W$$

Modellenen çerçeve için pultrüzyon profillerin ağırlığı 0.42 ton, ölü yükler toplamı 12.6 ton, canlı yükler toplamı ise 2.7 tondur.

$$W = 1G + 0.3Q = 13.83 \text{ ton}$$

$$T_1 > T_B \rightarrow S(T_1) = 2.5 \left(\frac{T_B}{T_1} \right)^{0.8} = 1.56$$

$$A(T_1) = A_0 I S(T_1) = 0.624$$

Deprem azaltma katsayısı R=1 alınacağına göre;

$$V_t = 8.63ton > 0.55ton$$

Buna göre 8.63 ton taban kesme kuvveti P-Δ etkilerinin başladığı %4'lük anlık deplasman limiti için mükemmel rijit birleşim de dahil olmak üzere hiçbir birleşim tarafından modellenen çerçeve için sağlanamamıştır. Deprem yönetmeliğinde anlık deplasman limitinin %2 olduğu düşünüldüğünde bu çerçevenin yukarıda belirtilen şartlar altında deprem yüklerini güvenle karşılayacağı söylenemez.

Deprem kuvvetleri yapının ağırlığı ile doğru orantılıdır. Pultruzyon profil kullanımı ile taşıyıcı sistem ölü ağırlığında çok büyük oranda tasarruf edilmiş olsa da (çeliğe göre %78), bu tasarrufun geleneksel yapı malzemeleri ile kullanılan ağır duvar dolgu ve döşeme sistemleri ile bertaraf edildiği görülmektedir. Duvar dolgularında sıvalı tuğla dolgu duvarlar yerine tali pultruzyon profiller üzerine monte edilmiş kompozit giydirme sistemleri, döşemelerde ise betonarme yerine yine tali pultruzyon profiller üzerine döşenmiş kompozit plakalar kullanıldığı durumda yapının ölü ağırlığı örnek çerçeve için 12.6 ton'dan, 2.62 ton'a düşmektedir. Böylece duvar ve döşeme ölü yüklerinde de %80'lik bir tasarruf sağlanmış olur. Yapının deprem hesabında kullanılan ağırlığı 13.83 tondan 3.85 tona düşmüş olur. Böylece genel ağırlıkta %72'lik tasarruf edilmiş olunmaktadır.

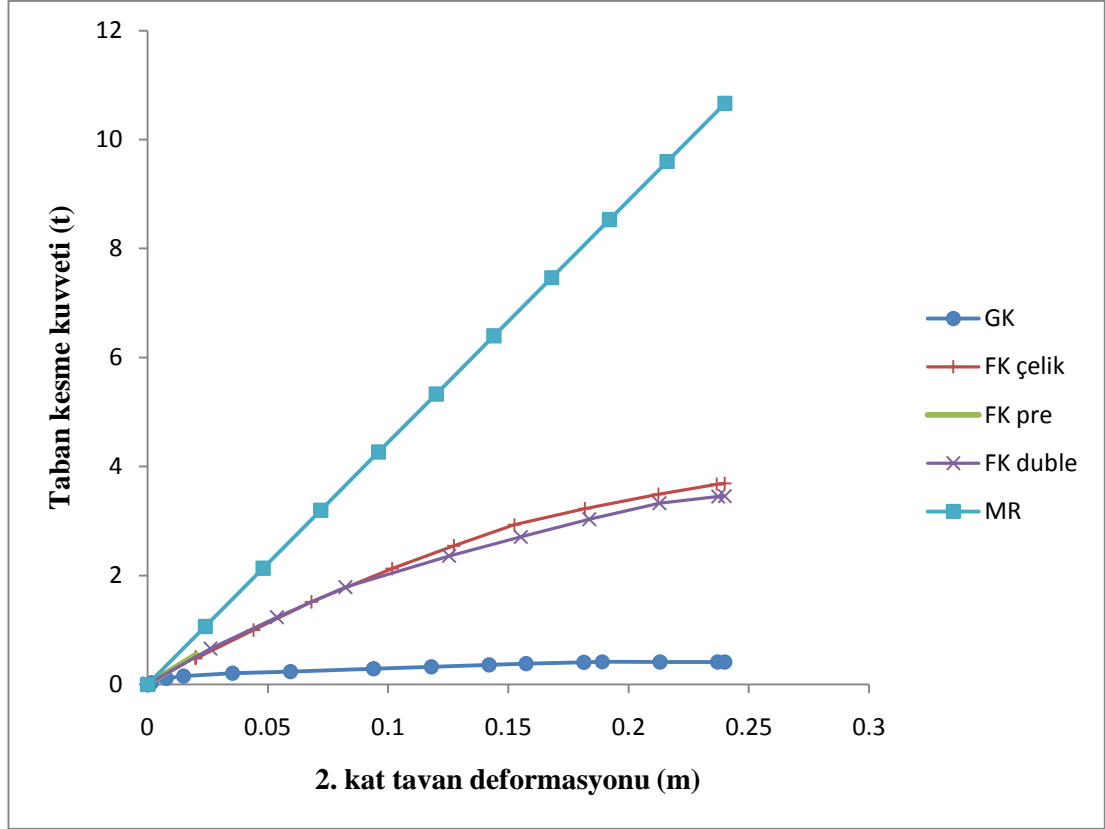
$$W = 1G + 0.3Q = 3.85ton$$

Yeni yük koşulları için çerçevenin 1. hakim titreşim periyodu 0.60 sn hesaplanmıştır,

$$T_1 = T_B \rightarrow S(T_1) = 2.5sn$$

$$A(T_1) = A_0 I S(T_1) = 1$$

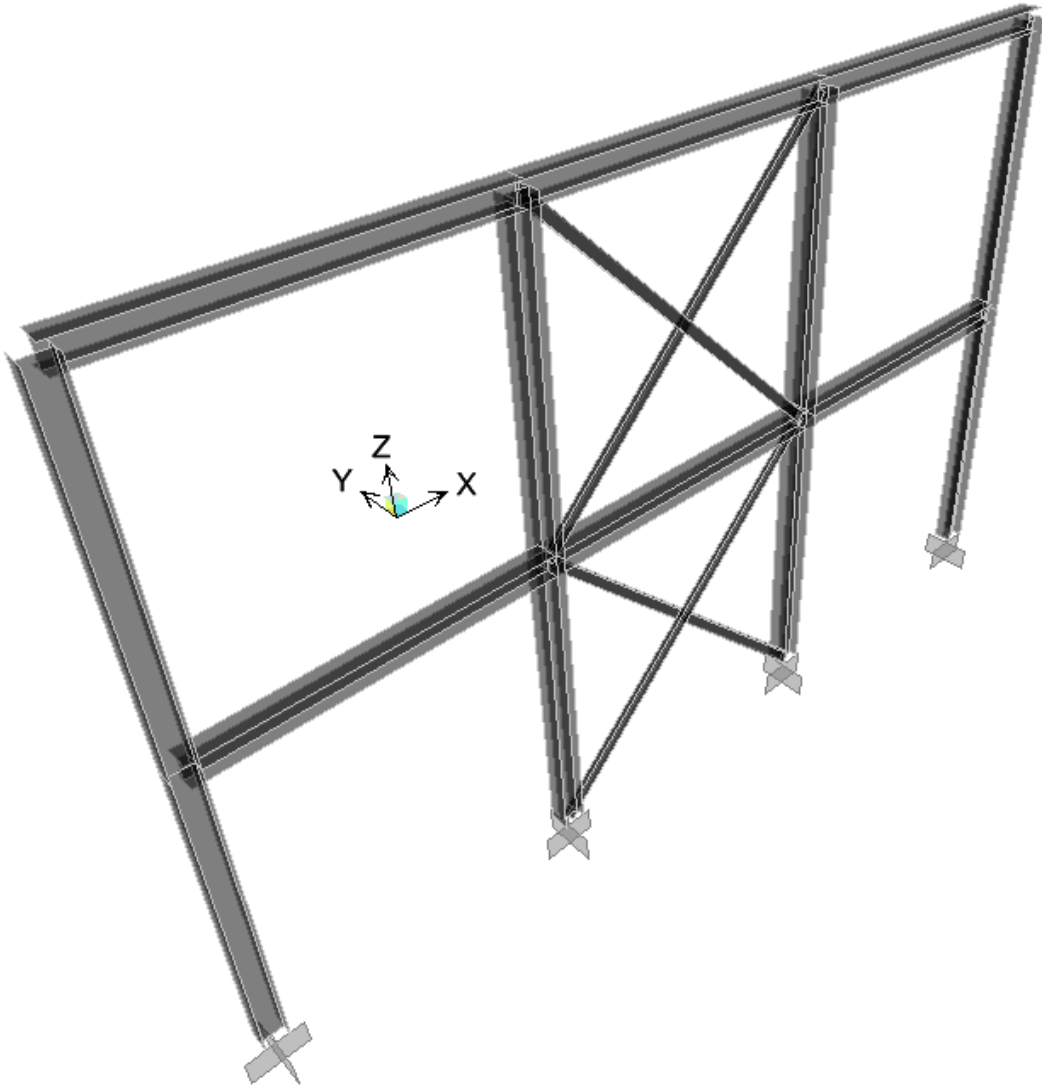
$$V_t = 3.85ton > 0.154ton$$



Şekil 7.13: Azaltılmış ölü yükler altında itme analiz sonuç eğrileri.

Yeni durum için hesaplanan toplam taban kesme kuvvetini olan 3.85 tonu mükemmel rijit birleşimli çerçeve %1.6'lık anlık deplasmanla karşılayabilirken çelik flanş klipsli çerçeve %4 anlık deplasmanda 3.70 tona ancak ulaşabilmiştir.

Yanal yük direncini arttırmak için çerçevenin orta iki aksı arasına moment aktarmayan basit birleşimli 101.6x50.8x6.4x3.2mm kesit ölçülerine sahip dikdörtgen kutu profiller eklenmiştir (Şekil 7.12). Yeni durumda çerçevenin birinci hakim periyodu 0.22sn'ye düşmektedir. Yeni periyot Z3 için 0.15 olan T_A değerinden yine büyük olduğundan yapıya etkileyen taban kesme kuvveti yine 3.85 tondur. Bu yeni durum için en zayıf birleşim olan pultruzyon köşebent gövde klipsli konfigürasyonda bile 3.85 tonluk taban kesme kuvveti %0.2'lik anlık deplasman limitinde sağlanmaktadır. Yeni çerçeve %2'lik anlık deplasman için 32ton taban kesme kuvveti direncine sahiptir.



Şekil 7.14: 10cm derinlikli kutu çaprazlar eklenmiş çerçeve.

Sonuçlar lifli polimer pultrüzyon profillerle yapılmış yarı-rijit birleşimli çerçevelerin doğru tasarlandıklarında afet yönetmeliğinde tanımlanan şiddetli depremleri hasar almadan sönümleyebileceklerini göstermektedir. Temel malzemenin düktil olmayan doğrusal elastik davranış karakteristiğine rağmen düktil birleşimler geliştirilerek yapıya düktilite kazandırılabilir. Bu sayede deprem yüklerinin bir kısmının plastik bölgede sönümlenmesi sağlanarak profillerin kullanımı ekonomik açıdan da cazip hale gelebilir.

8. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Birinci jenerasyon lifli polimer yapısal pultrüzyon profiller yaygın olarak poliester reçine sistemi ve boyuna sürekli fitil ve sürekli lifli keçe formlarındaki E-cam lifi donatı sistemi ile üretilmektedir. Nihai ürünün çekme dayanımı oldukça tatminkar olmasına karşın modülünün düşük olması yüzünden kabul edilebilir servis deformasyon oranlarında bu yüksek çekme dayanımından faydalanılamamaktadır. Bir diğer deyişle profiller verimli olarak kullanılamamaktadır.

Ek olarak, geleneksel yapı malzemeleri ile karşılaştırıldıklarında daha düşük sıcaklıklarda bozunmaya uğramaları, kalıcı yükler altında uzun vadede modüllerinin daha da düşmesi ve en önemlisi henüz etkili ve pratik bir birleşim sisteminin geliştirilememesi ya da ticarileştirilememesi gibi sebepler bu profillerin birinci derecede yük taşıyan yapısal uygulamalarda kullanımını engellemektedir.

Ancak, yine geleneksel yapı malzemelerine kıyasla çok yüksek korozyon dirençleri ve dayanım/ağırlık oranları bu profilleri yapı endüstrisi için çekici kılmaktadır. Köprü, çatı, merdiven, tek katlı çerçeve yapılar gibi ikinci derece yük taşıyan yapılarda kullanımları gittikçe artmaktadır.

Birinci jenerasyon profillerdeki sorunların farkına varan üreticiler, ikinci jenerasyon yüksek modüllü karbon ya da hibrit lifli ve vinilester ya da epoksi reçineli profillerini piyasa sürmeye başlamışlardır. Bu profiller çok yüksek rijitlik/ağırlık, dayanım/ağırlık ve korozyon direnci özelliklerine sahiptir ve birinci derecede yük taşıyan yapısal uygulamalar hedeflenmektedir. Ancak bu hedef, yüksek rijitliğe sahip düktil bir birleşim sistemi ihtiyacını da beraberinde getirmektedir.

Lifli polimer profiller ile kullanılan moment aktaran yarı-rijit birleşimler üzerine yapılan çalışmalar 1990'lar da başlamıştır. Geleneksel çelik birleşimleri taklit eden bulonlu/klipsli konfigürasyonlar birinci jenerasyon profiller için servis deformasyon oranları altında yeterli gözükmemektedir ve verimliliklerini arttırmaktadır. Ancak bu konfigürasyonların davranışı gevrekli ve birinci derece yük taşıyan yapısal uygulamalar için ideal değildir.

Korozyon dirençleri ve ağırlık/dayanım oranları söz konusu olduğunda rakipsiz olan bu profiller için geliştirilecek düktil ve pratik birleşimler malzemenin ekonomik açıdan daha cazip hale gelmesini sağlayacağı gibi deprem yüklerine dirençli yapıların tasarımında kullanılmalarının önünü açacaktır.

KAYNAKLAR

Bank, L. C., “Composites for Construction: Structural Design with FRP Materials”, *John Wiley & Sons, Inc.*, (2006)

CEN: EN 13706, “Reinforced Plastics Composites: Specifications for Pultruded Profiles, Part 1: Designation; Part 2: Method of Test and General Requirements; Part 3: Specific Requirements”, *Comite' Europe'en de Normalisation, Brussels, Belgium*, (2002)

Chan, S.L., Chui, P.P.T., “Non-Linear Static & Dynamic Analysis of Steel Frames with Semi Rigid Connections” *Elsevier*, (2000)

Eurocomp, “Structural design of polymer composites, Eurocomp Design Code and Handbook”, *The European Structural Polymeric Composites Group*, (1996)

Haj-Ali, R., Kılıç, H., “Nonlinear behaviour of pultruded FRP composites”, *Composites: Part B*, pp.173-191 (2002)

Hollaway, L. C., “Advanced Fiber Reinforced Polymer Composites” *World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.*, (2008)

Mallick, P. K., “Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design” *CRC Press*, (2008)

Mottram, J. T., “Tests on nominally pinned connections for pultruded frames”, In: Clarke JL (ed) *Structural design of polymer composites: EUROCOMP design code and handboo.*, pp. 603-616 (1996)

Mottram, J. T., and Zheng, Y., “Further tests on beam-to-column connections for pultruded frames: web-cleated”, *Journal of Composites for Construction*, Vol. 3, pp. 3–11 (1999a)

Mottram, J. T., and Zheng, Y., “Further tests on beam-to-column connections for pultruded frames: flange-cleated”, *Journal of Composites for Construction*, Vol. 3, pp. 108–116 (1999b)

Mottram, J. T., and Turvey, G. J., “Physical test data for the appraisal of the design procedures for bolted connections in pultruded FRP structural shapes and systems”, *Progress in Structural Engineering and Materials*, Vol. 5, pp. 195–222 (2003)

Nagaraj, V., and Gangarao, H. V. C., “Fatigue behavior and connection efficiency of pultruded GFRP beams”, *Journal Of Composites For Construction*, February, 57–65 (1998)

- Sarıbıyık, M., Gosling, P. D., “Experimental Study of a Bonded Plastic Fiber Reinforced Polymer Connector Assembly”, *Journal Of Composites For Construction*, November/December, pp. 549-559 (2004)
- Sarıbıyık, M., “Hafif Yapı Tasarımında Pultrüzyon Metodu ile Üretilen Cam Elyaf Takviyeli Plastiklerin Kullanılması”, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, Cilt 22, No:1, (2007)
- Singamsethi, S. K., LaFave, J. M., Hjelmstad, K. D., “Fabrication and Testing of Cuff Connections for GFRP Box Sections”, *Journal Of Composites For Construction*, November/December, pp.536–544 (2005)
- Smith, S. J., Parsons, I. D., Hjelmstad, K. D., “An experimental study of the behavior of connections for pultruded GFRP I-beams and rectangular tubes”, *Composite Structures*, 42: pp. 281-290 (1998)
- Smith, S. J., Parsons, I. D., Hjelmstad, K. D., “Experimental Comparisons Of Connections For GFRP Pultruded Frames”, *Journal of Composites for Construction*, February pp. 20-26 (1999)
- Turvey, G. J., “Analysis of pultruded glass reinforced plastic beams with semi-rigid end connections”, *Composite Structures*, Vol. 38, No. 1-4, pp. 3-16 (1997)
- Turvey, G. J., “Flexure of pultruded GRP beams with semi-rigid end connections”, *Composite Structures*, Vol. 47, pp. 571-580 (1999)
- Turvey, G. J., “Bolted connections in PFRP structures”, *Prog. Struct. Engng Mater.*, pp. 146-156 (2000)
- Turvey, G. J., Brooks, R. J., “Semi-rigid simply supported shear deformable pultruded GRP beams subjected to end moment loading: comparison of measured and predicted deflections”, *Composite Structures*, Vol.57, pp. 263-277 (2002)
- Vyas, J. S., “Characterization of a Low-Profile Fiber-Reinforced Polymer Deck System for Moveable Bridges”, *Journal of Bridge Engineering*, January/February pp. 55-65 (2009)

ÖZGEÇMİŞ

1978 yılında Kocaeli’de doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Kocaeli’de tamamladı. 1996 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünü 2000 yılında İnşaat Mühendisi olarak mezun oldu. 2001 yılından beri Kocaeli il sınırlarında proje müellifi olarak görev yapmaktadır.