

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİMDALI
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**SANDVIÇ KOMPOZİT YAPILARDA BALPETEĞİ
ÖZELLİKLERİNİN ve FARKLI YAPIŐTİRİCİ TABAKALARIN
MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ**

HAZIRLAYAN

KEZBAN EŞER

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ANKARA-2021

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİMDALI
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**SANDVIÇ KOMPOZİT YAPILARDA BALPETEĞİ
ÖZELLİKLERİNİN ve FARKLI YAPIŐTİRİCİ TABAKALARIN
MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ**

HAZIRLAYAN

KEZBAN EŞER

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEZ DANIŐMANI

DOÇ. DR. EBRU SARALOĞLU GÜLER

ANKARA-2021

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Makine Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı çerçevesinde Kezban EŞER tarafından hazırlanan bu çalışma, aşağıdaki jüri tarafından Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Savunma Tarihi: 15/ 06 /2021

Tez Adı: Sandviç Kompozit Yapılarda Balpeteği Özelliklerinin ve Farklı Yapıştırıcı Tabakaların Mekanik Özelliklere Etkisi

Tez Jüri Üyeleri (Unvanı, Adı - Soyadı, Kurumu)

İmza

Dr. Öğr. Üyesi Bedi Cenk BALÇIK- Başkent Üniversitesi

.....

Doç. Dr. Ebru SARALOĞLU GÜLER- Başkent Üniversitesi

.....

Doç. Dr. Batur ERCAN- Orta Doğu Teknik Üniversitesi

.....

ONAY

Prof. Dr. Faruk ELALDI
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Tarih: ... / ... /

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

Tarih: 02 / 06 / 2021

Öğrencinin Adı, Soyadı : Kezban EŞER
Öğrencinin Numarası : 21820134
Anabilim Dalı : Makine Mühendisliği
Programı : Tezli Yüksek Lisans
Danışmanın Unvanı/Adı, Soyadı : Doç. Dr. Ebru Saraloğlu GÜLER
Tez Başlığı : Sandviç Kompozit Yapılarda Balpeteği Özelliklerinin
ve Farklı Yapıştırıcı Tabakaların Mekanik Özelliklere Etkisi

Yukarıda başlığı belirtilen Yüksek Lisans tez çalışmamın; Giriş, Ana Bölümler ve Sonuç Bölümünden oluşan, toplam 85 sayfalık kısmına ilişkin, 01 / 06 / 2021 tarihinde tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 16'dır.

Uygulanan filtrelemeler:

1. Kaynakça hariç
2. Alıntılar hariç
3. Beş (5) kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

“Başkent Üniversitesi Enstitüleri Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Usul ve Esaslarını” inceledim ve bu uygulama esaslarında belirtilen azami benzerlik oranlarına tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Öğrenci İmzası:.....

ONAY

Tarih: ... / ... /

Doç. Dr. Ebru SARALOĞLU GÜLER

AÍLEME...

TEŞEKKÜR

İlk olarak Türkiye Cumhuriyeti'nin kurucusu, bana ve çalıőmalarına ilham veren Mustafa Kemal ATATÜRK'e teőekkürü bir borç bilirim.

Çalıőmam süresince destekleri ve yönlendirmeleri ile katkıda bulunan değerli danıőman hocam Doç. Dr. Ebru SARALOğLU GÜLER'e,

Tez çalıőmam boyunca parça üretiminde ve testlerinde yardım ve desteklerini esirgemeyen Hamdi YURDAKUL'a Yüksel Kompozit Teknolojileri A.ő. firmasından Oğuz AğLAYIK, Yavuz ATLI, Doğuhan DOğDU ve Ahmet AVCIOğLU'na

Yüksek lisans eğitimim boyunca gösterdikleri anlayıő için Erkunt Traktör Sanayii A.ő. Ürün Geliőtirme Müdür Yardımcısı Mehmet İL ve çalışma arkadaşlarıma,

Son olarak beni bugünlere kadar yetiőtiren, eğitim sürecimde ve hayatımın her aşamasında maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, her zaman yol gösteren ve yanımda olan aileme,

İçtenlikle teőekkürlerimi sunarım...

ÖZET

Kezban EŞER

SANDVIÇ KOMPOZİT YAPILARDA BALPETEĞİ ÖZELLİKLERİNİN ve FARKLI YAPIŞTIRICI TABAKALARIN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİLERİ

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

2021

Günümüzde hafif, yüksek mukavemetli ve gelişmiş performans özelliklerine sahip malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun sonucu olarak birçok mühendislik alanında kullanılan kompozit malzemeler geliştirilmiştir. Kompozit malzemelerin bir alt sınıfı olan tabakalı kompozitlerden sandviç yapıları kompozitlerin yalıtım, sönümleme kapasitesi, hafiflik, yüksek mukavemet ve düşük ağırlık gibi özelliklerinden dolayı savunma, otomotiv ve sağlık alanlarında oldukça yaygın kullanımı vardır. Özellikle, sandviç balpeteği yapıları düşük ağırlık- eğilme oranı özelliğinden dolayı başta savunma sanayii olmak üzere havacılık, savunma, denizcilik, spor aletleri, otomotiv endüstrisi alanında da önemli bir role sahiptir.

Bu tez çalışmasında; sandviç yapıların üretiminde kullanılan parametrelerin mekanik özelliklere etkileri incelenmiştir. Sandviç kompozitler, farklı balpeteği kalınlığı, hücre genişlik ve geometride balpeteği ile, aynı kütleme sıcaklığına sahip iki farklı yapıştırıcı tabaka kullanılarak otoklav yöntemi ile üretimi yapılmıştır. Balpeteğinin kalınlığı, hücre genişliği, hücre geometrisinin ve iki farklı yapışkan tabakanın dört nokta eğme, çekme ve soyma test sonuçlarına olan etkileri incelenmiştir. Sandviç kompozit yapının kalınlığı arttıkça çekme ve eğilme mukavemetlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca balpeteğin hücre genişliği küçüldükçe kuvvet değerlerinde artma görülmüştür. Balpeteği geometrisi ve hücre genişliğinin balpeteği kalınlığından daha etkili olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Sandviç Kompozit, Dört Nokta Eğme Testi, Çekme Testi, Soyma Testi, Yapıştırıcı Tabaka, Balpeteği Kalınlığı, Balpeteği Hücre Genişliği, Balpeteği Geometrisi

ABSTRACT

Kezban EŞER

THE EFFECT OF HONEYCOMB PROPERTIES AND DIFFERENT ADHESIVE LAYERS ON MECHANICAL PROPERTIES OF SANDWICH COMPOSITE STRUCTURES

Baskent University, Institute Science and Engineering

Department of Mechanical Engineering

2021

Nowadays, materials with lightweight, high strength and improved performance are needed. Therefore, composite materials used in many engineering fields have been developed. Sandwich composites made of laminated composites, which are a sub-class of composite materials, are widely used in defense, automotive and health fields due to their properties such as insulation, damping capacity, lightness, high strength and low weight. Especially, the honeycomb sandwich structures have an important role in aviation, defense, marine, sports equipment, automotive and defense industries due to their low weight-bending ratio.

In this thesis; the effects of parameters used in manufacturing of sandwich structures on the mechanical properties were examined. The sandwich composites were manufactured by autoclave method with two different adhesive layers at the same curing temperature. The effects of honeycomb height, width, geometry and two different adhesive layers on four point bending, tensile and peel test results were investigated. It was observed that the tensile and bending strengths increased as the thickness of the sandwich composite structure increased. It was also determined that the strength values increased when the cell width of the honeycomb was small. Honeycomb geometry and cell size were found to be more effective than the thickness of the honeycomb.

Keywords: Sandwich Composite, Four Point Bendig Test, Flatwise Tensile Test, Peeling Test, Adhesive Layer, Honeycomb Height, Honeycomb Cell Size, Honeycomb Geometry

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
TABLOLAR LİSTESİ	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	xi
1. GİRİŞ	1
2. Tabakalı Kompozitlerde Kullanılan Malzemeler ve Üretim Yöntemleri.....	5
2.1 Sandviç Yapılı Kompozit Malzemeler	5
2.2 Balpeteği Üretim Yöntemleri.....	10
2.3 Sandviç Yapılı Kompozit Malzemelerin Hata Türleri	11
2.4 Sandviç Yapılı Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri.....	13
2.4.1 Otoklav Üretim Yöntemi	13
2.4.2 Vakum Torbası Yöntemi	15
2.4.3 Sıcak Presleme Yöntemi	15
2.5 Sandviç Yapılı Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları.....	16
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	20
3.1 Balpeteği Sandviç Yapılı Kompozitlerde Üretim Parametreleri ve Mekanik Özelliklere Etkisi	20
3.2 Balpeteği Kalınlığının Mekanik Özelliklere Etkisi	20
3.3 Hücre Genişliğinin Mekanik Özelliklere Etkisi	22
3.4 Hücre Geometrisinin Mekanik Özelliklere Etkisi	27
3.5 Yapıştırıcı Tabakanın (Adhesive) Mekanik Özelliklere Etkisi.....	27
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR ve UYGULANAN TESTLER.....	32
4.1 Kullanılan Malzemeler	32

4.2	Sandviç Kompozit Üretimi.....	33
4.3	Çekme (Flatwise Tensile) Testi.....	46
4.4	Dört Nokta Eğme (Four Point Bending) Testi	48
4.5	Soyma (Peeling) Testi	50
5.	BULGULAR ve TARTIŞMA.....	52
5.1	Dört Nokta Eğme Test Sonuçları	52
5.1.1	Balpeteği Kalınlık Etkisi.....	53
5.1.2	Balpeteği Kalınlığı ve Hücre Genişliği Etkisi	57
5.1.3	Geometri Etkisi.....	60
5.2	Çekme (Flatwise Tensile) Test Sonuçları.....	63
5.2.1	Balpeteği Kalınlık Etkisi.....	65
5.2.2	Balpeteği Kalınlık ve Hücre Genişliği Etkisi	70
5.2.3	Geometri Etkisi.....	72
5.3	Soyma Testi	74
5.3.1	Hücre Genişliği Etkisi	76
5.3.2	Geometri Etkisi.....	76
5.3.3	Yapıştırıcı Etkisi.....	77
6.	SONUÇ.....	78
	KAYNAKLAR.....	79

TABLolar LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 4.1 Balpeteği Mekanik Özellikleri	32
Tablo 4.2. Karbon Prepreg Mekanik Özellikleri	33
Tablo 4.3. Yapıştırıcı Film Mekanik Özellikleri	33
Tablo 4.4. Numune Boyutları	38
Tablo 4.5. Test Numuneleri Numaralandırılması	39
Tablo 4.6. Test Numune Ağırlıkları	46
Tablo 4.7. Etki Parametresi- Numune Eşleştirilmesi	46
Tablo 5.1. Dört Nokta Eğme Test Sonuçları	52
Tablo 5.2. Çekme Test Sonuçları	64
Tablo 5.3 Soyma (Peeling) Test Sonuçları	75

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 Kompozit Malzeme Modeli	3
Şekil 2.1 Tabakalı Kompozitlerin Farklı Açılarda Yerleşimi	5
Şekil 2.2. Sandviç Yapılı Kompozitlerin Tabakaları	6
Şekil 2.3. Balpeteği Çekirdeğinin Şekil Yapısı (a. Altıgen), (b. OX), (c. Dikdörtgen), (d. Takviye Edilmiş Altıgen), (e. Kare Petek Yapılı), (f. Flex Petek Yapılı)	7
Şekil 2.4. Malzeme Yapısına Göre Balpeteği Çeşitleri (a. Poliüretan) (b. Alüminyum) (c. Nomex)	8
Şekil 2.5. Balpeteği L,W, T Yönleri	8
Şekil 2.6. Sandviç Yapıların Çekirdek Kalınlığına Göre Mekanik Özellikleri	9
Şekil 2.7. Balpeteği Çekirdek Özellikleri	9
Şekil 2.8. Balpeteği Kompozit- I Kiriş Yapı Benzerliği	10
Şekil 2.9. Uzatarak Şekil Verme Metodu	10
Şekil 2.10. Kıvrırma Metodu Proses Adımları	11
Şekil 2.11.Yüzey Gerilme Hatası	12
Şekil 2.12.Enine Kesme Gerilimi	12
Şekil 2.13. Bölgesel Basınç	12
Şekil 2.14. Panel Burkulması	12
Şekil 2.15. Kesme Kıvrırması	13
Şekil 2.16. Yüzey Ezilmesi	13
Şekil 2.17. Yüzey Kıvrılması	13
Şekil 2.18. Otoklav Yönteminde Kullanılan Yardımcı Elemanlar	14
Şekil 2.19. Otoklav Yöntemi	14
Şekil 2.20. Vakum Torbası Yöntemi	15
Şekil 2.21. Sıcak Presleme Yöntemi	15
Şekil 2.22. Sandviç Yapılı Kompozitlerin Uçaklarda Kullanımı	16
Şekil 2.23. Sandviç Yapılı Kompozitlerin Jet Motorlarında Kullanımı	16
Şekil 2.24. Sandviç Yapılı Kompozitlerin Helikopterlerde Kullanımı	17
Şekil 2.25. Sandviç Yapılı Kompozitlerin Roketatarlarda Kullanımı	17
Şekil 2.26. Sandviç Yapılı Kompozitlerin Uydularda Kullanımı	18
Şekil 2.27. Sandviç Yapılı Kompozitlerin Otomobillerde Kullanımı	18
Şekil 2.28. Sandviç Yapılı Kompozitlerin Trenlerde Kullanımı	19

Şekil 2.29. Sandviç Yapılı Kompozitlerin Yelkenlilerde Kullanımı.....	19
Şekil 4.1. Hücre Şekilleri (a. Altıgen) (b. OX).....	32
Şekil 4.2. Ayırıcı Film Tabaka Katmanı	34
Şekil 4.3. Prepreg Tabaka Serimi	35
Şekil 4.4. Yapıştırıcı Film Tabaka Serimi	35
Şekil 4.5. Balpeteği Serimi.....	35
Şekil 4.6. Yapıştırıcı Film Tabaka Serimi	36
Şekil 4.7. Vakumlama İşlemi (a. Hava Alma Bezi Serimi b. Vakumlama İşlemi)	36
Şekil 4.8. Üst Tabaka Prepreg Tabaka Serimi.....	36
Şekil 4.9. Destek Sabitlenmesi	37
Şekil 4.10. Hava Alma Bezi Serilmesi ve Isılçift (Termokapl) Montajı	37
Şekil 4.11. Vakumlama İşlemi	37
Şekil 4.12. Otoklav İşlemi Tamamlanmış Numune	38
Şekil 4.13. Numune Kesim İşlemleri (a. Numune Kesme İşlemi ve b. Belirlenen Ölçülere göre Kesilen Numuneler).....	38
Şekil 4.14. Yapıştırıcı Hazırlanması (a. Part A Loctite EA 9394, b. Loctite PartB EA 9394)	40
Şekil 4.15. Numune Kenarlarının Bantlanması	41
Şekil 4.16. Numunelere Yapıştırıcıların Sürülmesi ve Birleştirilmesi	41
Şekil 4.17. Test Numunelerinin Aparat ile Birleştirilmesi	41
Şekil 4.18. Kürleme	41
Şekil 4.19. Yapışkan ve Yapıştırıcı Hata Modları	42
Şekil 4.20 Soyma Test Düzeneği	43
Şekil 4.21. Soyma Testi Hazırlığı.....	43
Şekil 4.22. Soyma Test Numunesi	43
Şekil 4.23. Dört Nokta Eğme Testi Hata Türleri	44
Şekil 4.24. Dört Nokta Eğme Testindeki Noktalar.....	44
Şekil 4.25. Numunelerin Dört Nokta Eğme Test Cihazına Yerleştirilmesi.....	45
Şekil 4.26. Çekme Numunesinin Test Cihazına Bağlantısı.....	47
Şekil 4.27. Çekme Testi Sonlandırılması	48
Şekil 4.28. Dört Nokta Eğme Test Cihazı ve Test Numunesi	49
Şekil 4.29. Dört Nokta Eğme Testi.....	49
Şekil 4.30 Soyma (Peeling) Test Düzeneği	51
Şekil 4.31 Soyma Test Aşamaları	51

Şekil 5.1 Etki Parametrelerinin Gerilim Değerleri Etkileri	53
Şekil 5.2.Dört Nokta Eğme Numune 1 Yük- Uzama Grafiği.....	54
Şekil 5.3. Dört Nokta Eğme Numune 2 Yük- Uzama Grafiği.....	54
Şekil 5.4.Dört Nokta Eğme Numune 7 Yük-Uzama Grafiği.....	55
Şekil 5.5. Dört Nokta Eğme Numune 8 Yük-Uzama Grafiği.....	55
Şekil 5.6 Dört Nokta Eğme Numune 1 Gerilim- Gerinim Grafiği	56
Şekil 5.7 Dört Nokta Eğme Numune 2 Gerilim- Gerinim Grafiği	56
Şekil 5.8 Dört Nokta Eğme Numune 7 Gerilim- Gerinim Grafiği	57
Şekil 5.9 Dört Nokta Eğme Numune 8 Gerilim- Gerinim Grafiği	57
Şekil 5.10. Dört Nokta Eğme Numune 5 Yük- Uzama Grafiği.....	59
Şekil 5.11. Dört Nokta Eğme Numune 6 Yük- Uzama Grafiği.....	59
Şekil 5.12 Dört Nokta Eğme Numune 5 Gerilim- Gerinim Grafiği	60
Şekil 5.13 Dört Nokta Eğme Numune 6 Gerilim- Gerinim Grafiği	60
Şekil 5.14 Dört Nokta Eğme Numune 3 Yük-Uzama Grafiği.....	61
Şekil 5.15 Dört Nokta Eğme Numune 4 Yük-Uzama Grafiği.....	62
Şekil 5.16 Dört Nokta Eğme Numune 3 Gerilim- Gerinim Grafiği	62
Şekil 5.17 Dört Nokta Eğme Numune 4 Gerilim- Gerinim Grafiği	63
Şekil 5.18. Çekme Test Numuneleri.....	65
Şekil 5.19 Etki Parametrelerine Göre Çekme Gerilmesi.....	65
Şekil 5.20 Çekme Numune 1 Yük- Uzama Grafiği.....	66
Şekil 5.21 Çekme Numune 2 Yük- Uzama Grafiği.....	67
Şekil 5.22 Çekme Numune 7 Yük- Uzama Grafiği.....	67
Şekil 5.23 Çekme Numune 8 Yük- Uzama Grafiği.....	68
Şekil 5.24 Çekme Numune 1 Gerilim- Gerinim Grafiği	68
Şekil 5.25 Çekme Numune 2 Gerilim- Gerinim Grafiği	69
Şekil 5.26 Çekme Numune 7 Gerilim- Gerinim Grafiği	69
Şekil 5.27 Çekme Numune 8 Gerilim- Gerinim Grafiği	69
Şekil 5.28 Çekme Numune 5 Yük- Uzama Grafiği.....	71
Şekil 5.29 Çekme Numune 6 Yük- Uzama Grafiği.....	71
Şekil 5.30 Çekme Numune 5 Gerilim- Gerinim Grafiği	72
Şekil 5.31 Çekme Numune 6 Gerilim- Gerinim Grafiği	72
Şekil 5.32 Çekme Numune 3 Yük- Uzama Grafiği.....	73
Şekil 5.33 Çekme Numune 4 Yük- Uzama Grafiği.....	73
Şekil 5.34 Çekme Numune 3 Gerilim- Gerinim Grafiği	73

Şekil 5.35 Çekme Numune 4 Gerilim- Gerinim Grafiği	74
Şekil 5.36 Soyma (Peeling) Test Numuneleri	74
Şekil 5.37 Etki Parametrelerinin Soyma Torku Değerine Ait Grafikler	75
Şekil 5.38. Soyma Testi Numune Grafikleri	76

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Hc	balpeteği kalınlığı
L yönü	çekirdek ayrılma yönü
Lc	hücre genişliği
OX	genişletilmiş hücre
T yönü	hücre açıklıklarına paralel yön
Tc	hücre kalınlığı
W yönü	çekirdek genişleme yönü
σ_c	balpeteği akma gerilimi
τ_c	balpeteği kayma mukavemeti
ASTM	American Society for Testing and Materials
MWCNT	Multi Wall Carbon Nanotube

1. GİRİŞ

Tasarım amacına uygun olarak istenilen bir veya daha fazla özelliği bir araya toplamak ya da yeni bir özellik oluşturmak için bileşenlerin bir araya getirilmesi ile oluşturulan malzemelere kompozit malzeme denir [1]. Başka bir tanımda ise kompozit malzemeler birbirlerinin zayıf yönünü düzelterek üstün özellikler elde etmek amacı ile bir araya getirilmiş değişik tür malzemelerden veya fazlardan oluşan malzemelerdir [2]. Kompozit malzemelerin üç boyutlu olarak bir araya getirilme amacı bileşenlerde tek başına mevcut olmayan özelliklerin elde edilmesidir [3]. Kompozit malzemeleri konvansiyonel malzemelerden ayıran en önemli özellik; kompozit malzemelerdeki malzeme kombinasyonunun sonsuz sayıda olmasıdır [4]. Bu özellik elde edilmek istenen malzeme özelliklerinin istenildiği gibi değiştirilmesini sağlar[4].

Kompozit malzemelerin avantajları aşağıda listelenmiştir [3],[4], [5], [6], [7];

- Özgül dayanç (çekme dayancı/yoğunluk) ve özgül modül (elastik modül/yoğunluk) oranının diğer mühendislik malzemelerine göre yüksek olması.
- Darbe ve çentik dayanımının yüksek olması.
- Aynı ağırlıktaki metallere göre mukavemetlerinin daha fazla olması
- Yorulma ve korozyona karşı yüksek direnç göstermesi
- Bağlantı elemanlarının az kullanılması sebebiyle yapısal zayıflıkların en az seviyeye düşürülmesi
- Fiberlerin yükleri verimli bir şekilde taşıyabilmesi için yönlerinin ayarlanabilmesi
- Havacılık alanında sürüklenme azalması için pürüzsüz yüzeylerin elde edilmesi. Tek bir imalat aşamasında pürüzsüz karmaşık çift eğimli parçaların oluşturulabilmesi.
- Havacılık yapılarında kullanılan malzemeler yüksek mukavemetli olmalıdır. Örnek olarak uçak kanatlarının rüzgar değişimi ve transit kuvvetlerden dolayı aşırı kuvvetlere direnç göstermelidir.
- İşleme olmadan istenilen toleranslar elde edilebilir.
- Kompozitlerin mükemmel ısı emici özellikleri, özellikle de karbon-karbon hafiflikleri bulunmaktadır.

- Gelişmiş sürtünme ve aşınma özellikleri bulunmaktadır.
- Kalıcı renklendirme
- Elektriksel direnç
- Kalıplama kolaylığı
- Bio uyumluluk ve besin uyumluluğu

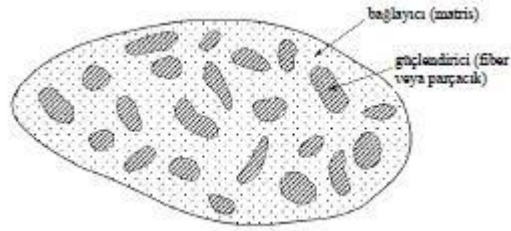
Ancak kompozitlerin genel anlamda bazı olumsuz tarafları da vardır. Bunlar, üretim zorluğu, yüksek maliyet, geri dönüşümün olmaması veya kısıtlı olması, kırılabilirlik, raf ömründen dolayı depolama koşullarının önemi, tasarım analizlerinin zorluğu ve parçaların hasar aldıktan sonra revizyon işlemlerinin zor olmasıdır. [6], [8];

Kompozit malzemelerin özelliklerini belirleyen bazı unsurlar bulunmaktadır. Bunlar;

- Fiber malzemenin özellikleri
- Matris malzemenin özellikleri
- Fiber-matris arasındaki yapışma kabiliyeti
- Fiber/matris oranı
- Fiber elemanın geometrisi ve matris içindeki yerleşimi

Kompozit malzemeler matris ve fiber olmak üzere iki ana bileşenden oluşmaktadır. Matris kompozit malzemelerin birinci ana bileşenidir [2]. Kompozit yapılarda matrislerin üç temel amacı vardır. Bunlar; fiberleri bir arada tutmak [11], kimyasal etkenlerden, mekanik hasar ve nem gibi diğer çevresel etkenlere karşı koruma [11] ve yükü elyaflara eşit şekilde dağıtmaktır [9].

Şekil 1.1'de kompozit malzemelerin kesit yapısı gösterilmiştir. İnsanoğlu ilk çağlardan beri kırılabilir malzemelerin içine bitkisel veya hayvansal lifler koyarak kırılabilirlik özelliğinin giderilmesine çalışmıştır [10]. Bu konuda en iyi örnek kerpiçtir [10]. Kerpiç üretiminde killi çamur içine katılan saman, sarmaşık dalları gibi sap ve lifler, kerpicin gerek üretim, gerek kullanım sırasındaki dayanımını artırmaktadır [10]. İlk kerpiç yapılar bu duruma örnek olarak gösterilebilir [3].



Şekil 1.1 Kompozit Malzeme Modeli [5]

Matrisler termoset ve termoplastikler olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır [6]. Termoplastikler; ısıtıldıklarında yumuşarlar ve ısıtılmış yarı sıvı haldeyken şekillendirilebilirler [9]. En sık kullanılan termoplastikler; naylon (PA), polifinilen sülfür (PPS), sıvı kristal, polimerler (LCP), polyetheretherketone (PEEK), polipropilen (PP), polietilen (PE), polyetherimid (PEI), fluoropolimerlerdir [9]. Termosetler ise termoplastiklerin aksine ilk hallerinde genellikle sıvıdır ya da düşük erime noktasına sahip katı halindedirler [9]. En sık kullanılan termosetler ise doymamış polyesterler, epoksiler, vinilester, poliüretanlar, fenolikler, melamin ve üreformaldehid, poliimidler, silikonlardır [9]

Matris seçimi oluşturulmak istenen kompozit yapının mekanik özelliklerini belirlemede önemli rol oynamaktadır. Matrisin yoğunluk, termal ve elektriksel iletkenlik, termal genleşme, erime ve yumuşama sıcaklığı, saydamlık ve opaklık gibi özellikleri için seçilebilir. Ayrıca fiber ve matris arasındaki yapışma seviyesi kompozit malzemenin genel özelliklerini belirler [11].

Kompozitlerin yapısında takviye elemanı olarak değişik morfolojiye sahip kısa ve uzun elyaflar, whiskerler (kılcal kristaller), kırılmış veya parçacıklı seramikler kullanılmaktadır [12]. Bunların temel fonksiyonu gelen yükü taşımak ve matrisin dayanımını artırmaktır [12].

Kompozitler; polimer, metal ve seramik olmak üzere matris malzemelerine göre üçe ayrılır [13]. Ayrıca yapılarına göre fiber takviyeli, parçacık takviyeli ve tabakalı (lamine) kompozitler olmak üzere üç grupta incelenebilir.

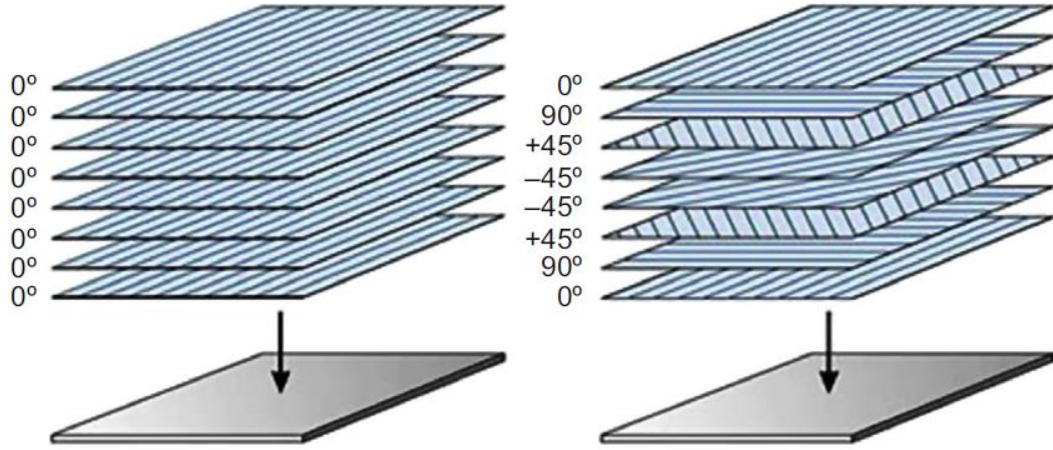
Yapılan bu tez çalışmasında günümüzde tasarım mühendislerinin en önemli kriterlerinden olan özgül dayanım, ağırlık ve mukavemet gibi özelliklerin yanı sıra sandviç kompozit özelinde soyma direnci, eğime mukavemeti gibi önemli mekanik özellikler üzerinde etkisi olan parametreler incelenmiştir. Bu parametrelerden hücre yüksekliğinin mekanik özellikler üzerinde hücre geometrisi ve hücre genişliği kadar etkili olmayacağı

hipotezi de kanıtlanmıştır. Bu kapsamda farklı parametrelerde üretilen sandviç kompozitlere dört nokta eğme, çekme ve soyma testleri uygulanmıştır.

2. Tabakalı Kompozitlerde Kullanılan Malzemeler ve Üretim Yöntemleri

Tabakalı kompozit yapı en eski ve en yaygın kullanım alanına sahip olan yapıdır. Temel malzeme eksenini doğrultusunda farklı yöndeki tabaka ve katmanların üst üste koyularak oluşturulduğunda yapıya tabakalı kompozit denir [3]. Matris ve fiber malzemenin cinsi veya örgü şekline göre isimlendirilmektedir. Şekil 2.1’de görüldüğü gibi fiber tabakalar kompozit eksenine göre çeşitli yönlerde düzenlenebilir ve bu özellikle düzlem içi özellikler farklı yönlerde uyarlanabilir [7]. Mukavemet, sertlik, düşük ağırlık, korozyon ve aşınma direnci gibi özellikler tabakaların sağladığı en önemli özelliktir [14]. Metallerle göre hafif ve mukavemetli olmaları nedeniyle birçok alanda tercih edilmektedir. Bu özelliklerin yanı sıra tabakalı kompozitlerin bazı dezavantajları bulunmaktadır. Yükleme koşullarında farklı katmanların delaminasyonu, lamine kompozitlerin ana arıza modlarından biridir bu delaminasyonları azaltmak için fiber tabakalar farklı açılarla yerleştirilir [7]. Katmanlar arasındaki malzemelerin uyumsuzluğu delaminasyona neden olabilir. Benzer şekilde matris ve fiber arasında da uyumsuzluk nedeniyle lif bağlarının ayrılması meydana gelebilir [14].

Tabakalı kompozit yapıların en çok kullanılan çeşitlerinden biri de sandviç yapılı kompozitlerdir.

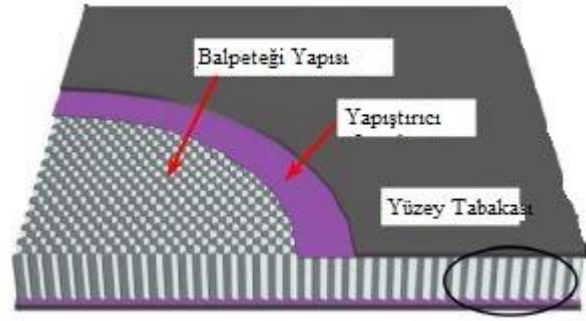


Şekil 2.1 Tabakalı Kompozitlerin Farklı Açılarda Yerleşimi [7]

2.1 Sandviç Yapılı Kompozit Malzemeler

Uçak ve uzay endüstrilerindeki tasarım mühendislerinin en önemli tasarım parametrelerinden olan düşük ağırlık genellikle yüksek sertlik-ağırlık ya da yüksek dayanım-ağırlık oranı olarak değerlendirmeye alınır. Bu yüzden, sandviç yapılı kompozitler, özellikle

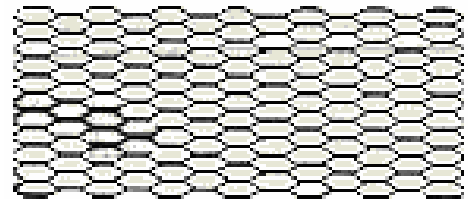
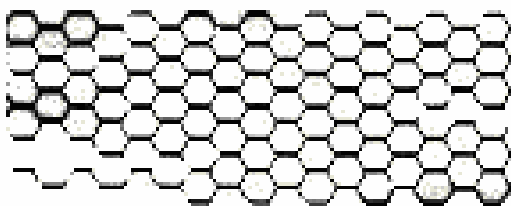
havacılık ve otomotiv başta olmak üzere çeşitli teknik alanlarda en çok tercih edilen kompozit yapılardandır [7][15]. Sandviç yapı, petek panelin alt ve üst bölgesine yüzey yapıştırıcı kullanarak metal yada kompozit yüzey örtüsünün yapıştırılması ile oluşturulan kompozit malzemelerdir [16]. Şekil 2.2’de görüldüğü gibi sandviç yapı kompozitler yüzey tabakası, yapıştırıcı tabaka ve çekirdek olmak üzere üç katmandan oluşmaktadır [17].

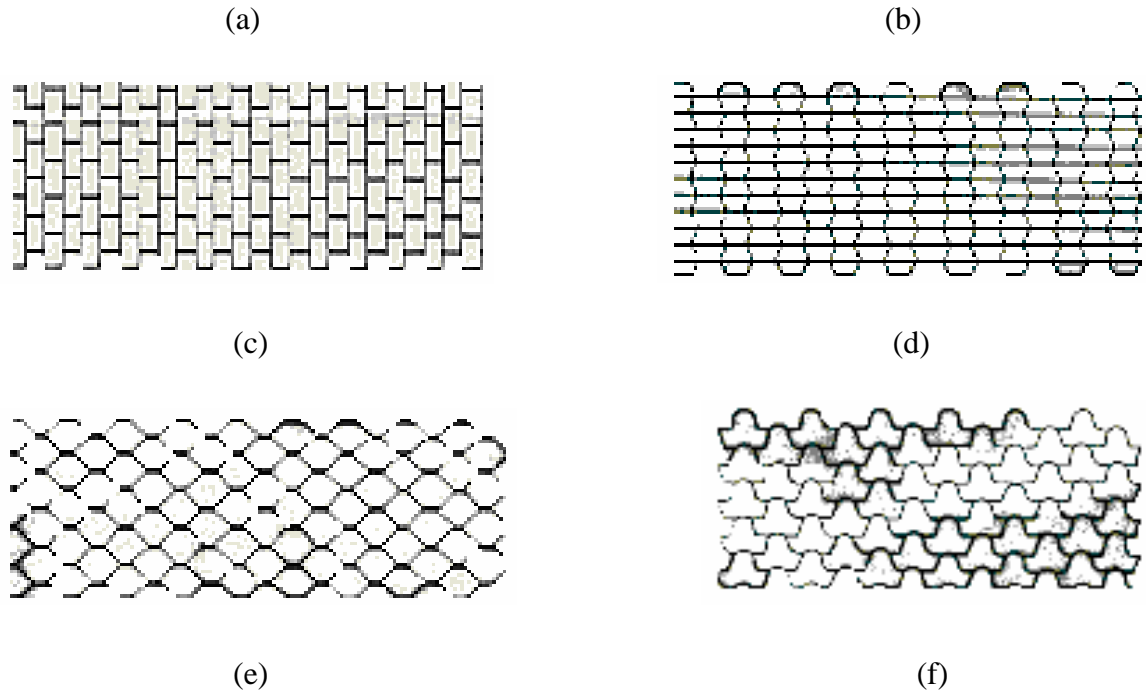


Şekil 2.2. Sandviç Yapılı Kompozitlerin Tabakaları [17]

Yüzey tabakalarının birincil fonksiyonları, aksenel, eğilme ve düzlem içi kesme yükünü taşımak için gerekli eğilme ve düzlem içi kesme sertliğini sağlamaktır [17]. Yüzey tabakası olarak genellikle alüminyum, karbon/ epoksi, fiberglas/ epoksi ve aramid/ epoksi kullanılmaktadır [17].

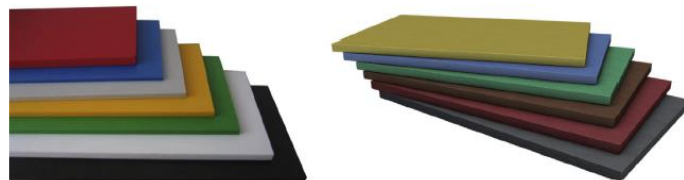
Balpeteği oluşturulacak olan kompozit yapı için önemli bir etkidir. Bunlar; panellere dik yönde uygulanacak olan yüklere ve çekirdek üzerindeki yüzey tabakalarını stabilize edecek kadar sert olmalıdır [17]. Uygulamalarda en sık görülen altıgen (hexagonal), OX (over expanded), bükümlü (flex), dikdörtgen, kare, takviye edilmiş altıgen yapıları Şekil 2.3’de görülmektedir [18]. Altıgen balpeteği üretimi kolay ve verimlidir. Ayrıca katmanlarına destek eklenerek elde edilerek güçlendirilen balpeteklerinin ise mekanik özellikleri arttırılmıştır [19]. OX hücre geometrisi ise altıgen geometriye sahip balpeteği hücrelerinin kesme özelliklerini iyileştirmek için W yada T yönünde hücrelerin genişletilmiş halidir[19]. Bükümlü geometriler ise eşdeğer yoğunluktaki altıgen balpeteğinden daha yüksek kesme mukavemetine sahiptirler [19].



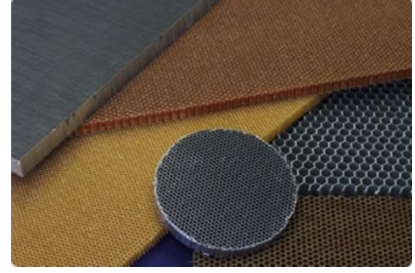
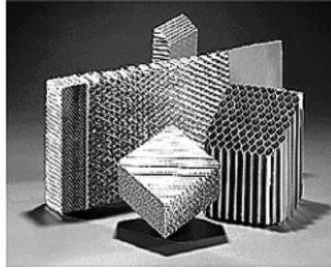
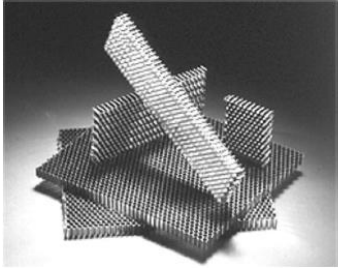


Şekil 2.3. Balpeteği Çekirdeğinin Şekil Yapısı (a. Altıgen), (b. OX), (c. Dikdörtgen), (d. Takviye Edilmiş Altıgen), (e. Kare Petek Yapılı), (f. Flex Petek Yapılı) [18]

Çekirdek tabaka malzemeleri metalik ve metalik olmayan malzemeler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır [19]. Kraft, termoplastik, aramid fiber, camyünü, karbon, seramik malzemeler metalik olmayan malzemelerdir [19]. Alüminyum ve çelik ise metalik malzemeler sınıflandırmasına girmektedir [19]. Şekil 2.4 de malzeme yapısına göre çekirdek çeşitleri bulunmaktadır. Çekirdek yapıların L, W, T yönleri olmak üzere Şekil 2.5 de belirtilmiştir [19]. L yönü çekirdek ayrılma yönü, W yönü çekirdek genişleme yönü ve T yönü ise hücre açıklıklarına paralel olan yöndür [20].



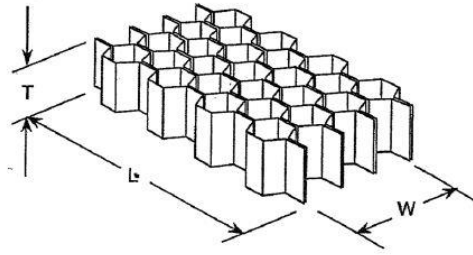
(a)



(b)

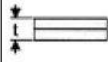
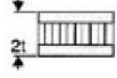
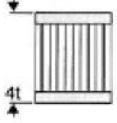
(c)

Şekil 2.4. Malzeme Yapısına Göre Balpeteği Çeşitleri (a. Poliüretan) (b. Alüminyum) (c. Nomex)[7]

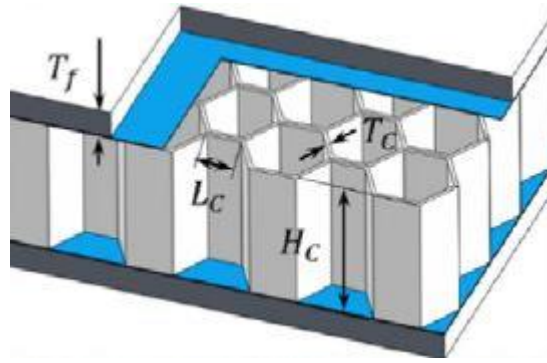


Şekil 2.5. Balpeteği L,W, T Yönleri [19]

Yapıştırıcılar ise yüzey tabaka ve çekirdek arasındaki kesme kuvvetini aktarmakta, kesme ve çekme gerilmelerini taşıyabilmektedir [18]. Bunların dışında tasarımcının istediği özelliklere göre yapı oluşturulabilir. Sandviç yapılı malzemeler yüksek bükülme sertliği ve yüksek mukavemet-ağırlık oranı sebebiyle havacılık, uzay, otomobil ve yapı sektöründe yaygın olarak kullanılarak maliyet etkin bir alternatif olarak karşımıza çıkmaktadır [7], [21]. Çekirdek yapının %90-98 i havadır [22]. Şekil 2.6'da çekirdek kalınlığına göre kompozit yapıların karşılaştırılması yapılmıştır [15]. Oluşturulan kompozit yapının balpeteği kalınlığı (H_c), hücre genişliği (L_c), hücre kalınlığı (T_c), hücre geometrisi, malzemesi ve yüzey tabakası özellikleri değiştirilerek istenilen mekanik özelliklerde kompozit tasarımı elde edilebilir [23]. Şekil 2.7'de balpeteği yapısının balpeteği kalınlığı, hücre genişliği ve kalınlıkları gösterilmiştir[24].

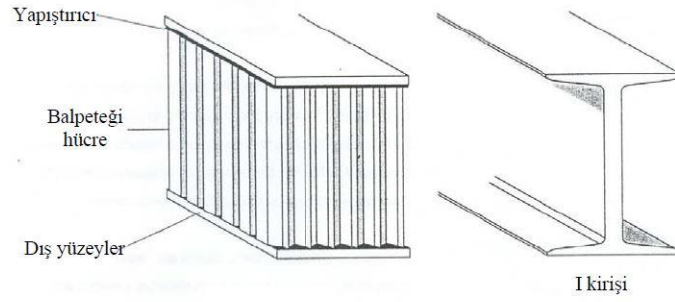
	Metal Malzeme	Çekirdek Kalınlığı (t)	Çekirdek Kalınlığı (3t)
			
Sertlik	1.0	7.0	37.0
Eğilme Mukavemeti	1.0	3.5	9.2
Ağırlık	1.0	1.03	1.06

Şekil 2.6. Sandviç Yapıların Çekirdek Kalınlığına Göre Mekanik Özellikleri [15]



Şekil 2.7. Balpeteği Çekirdek Özellikleri [24]

Balpeteği kompozit yapılar I kirişi modeli ile benzerlik göstermektedir. I kirişine kuvvet uygulandığında bir yüzey basma gerilmesi, diğer yüzey çekme gerilmesi altındadır [25]. Aynı şekilde balpeteği hücreleri de I kirişinin gövdesi gibi davranır [25]. Petek hücresi yüzeylerin dışında kesme kuvvetlerine karşı koyar ve yapının sağlamlığını I kirişine nazaran daha fazla artırır [25]. Petek hücreleri sandviç panel yüzeylerine düzenli ve kuvvetlendirilmiş destek verir [25]. Petek-yüzey tabakalar arası kullanılan yapıştırıcı, her iki elemanı kuvvetli bir şekilde bağlayarak bir bütün olarak hareket etmesini sağlar [25]. Sonuçta yüksek burulma ve eğilme dayancı oluşur [25]. Şekil 2.8' de balpeteği kompozit yapı ve I kiriş benzerliği gösterilmiştir.

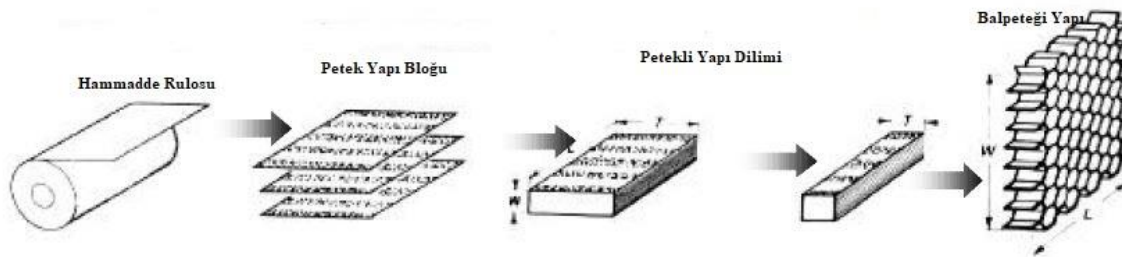


Şekil 2.8. Balpeteği Kompozit- I Kiriş Yapı Benzerliği [25]

Çekirdek yapıda birim alana düşen hücre sayısı, bağlantı kalınlığı arttıkça çekirdek yapıların eğme, basma, soyma, kesme ve darbe kuvvetlerine karşı mukavemetleri artmaktadır [25]. Çekirdek yapıların kesme gerilmelerine karşı davranışları zayıftır [25]. Kesme gerilmesine dayanım hücre sayısı ve alt üst katmanlar değiştirilerek artırılmaktadır [25].

2.2 Balpeteği Üretim Yöntemleri

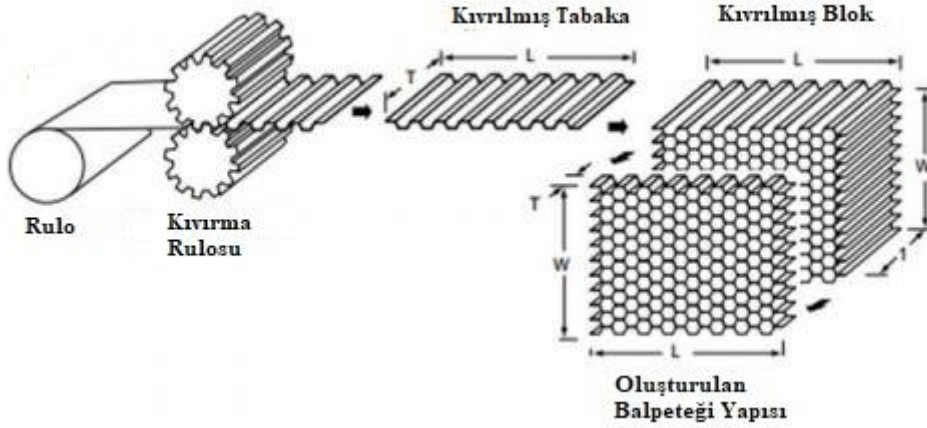
Balpeteği yapısının üretiminde iki temel teknik kullanılmaktadır. Bunlar; uzatma ve kıvrarak şekil verme yöntemleridir. Uzatarak şekil verme yönteminde ilk adımda levhalar şerit halinde kesilir ve yapıştırıcı uygulanır. İkinci adımda yapıştırıcıların kurlenme işlemi tamamlanır. Üçüncü adımda üst üste istiflenmiş olan katmanın kesim işlemi yapılır, son olarak petekli yapının pres içinde işlenmesi ile bal peteği yapısı elde edilmektedir [26]. Prosesin adımları Şekil 2.9’da gösterilmiştir [26].



Şekil 2.9. Uzatarak Şekil Verme Metodu [26]

Yaygın yöntemlerden bir diğeri ise kıvrırma metodudur. Bu işlem genellikle uzatma metodu ile yapılanlardan daha küçük hücre genişliği istendiğinden, et kalınlığı fazla ve

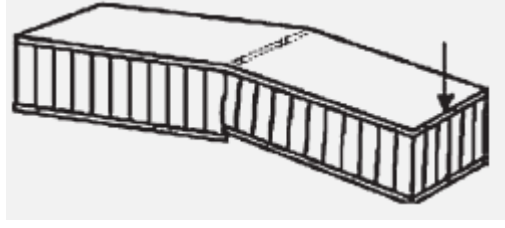
yoğunluğu yüksek olan ham maddelere uygulanır [27]. Bu üretim yönteminde; istenilen balpeteği şekline göre kıvrımlı bir rulo üzerinden ham madde beslenir ve şekil yapısı elde edilir. İkinci adımda ise oluşturulan tabakanın düz kısmına yapıştırıcı uygulanır ve şekil verilmiş tabakalar üst üste konularak kürlenme işlemine yapılırlar [27]. Oluşturulan şeritlerden istenilen kalınlıkta blok kesimleri yapılır. Kıvrırma metodunun proses adımları Şekil 2.10'da gösterilmiştir [27].



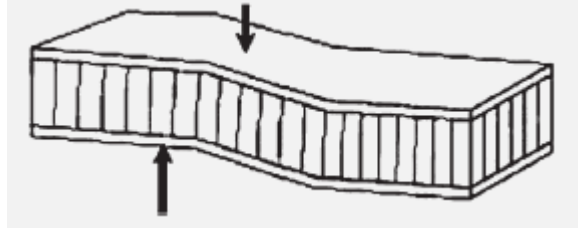
Şekil 2.10. Kıvrırma Metodu Proses Adımları [27]

2.3 Sandviç Yapılı Kompozit Malzemelerin Hata Türleri

Sandviç yapılar öncelikli olarak bükülmeye maruz kalan yapısal kirişler ve yük koşullarında deformasyonları önlemek için gerekli sertliği elde etmede kullanılır [7]. Yük koşullarında sandviç yapının bükülme ve kayma sertliğine bağlı olarak tasarımlar yapılmalıdır [7]. Tasarım sırasında dikkat edilmesi gereken bir diğer konu ise sandviç yapı üzerinde bulunan yüzey tabakasının çekme, sıkıştırma ve kesme gerilmelerine karşı gösterdiği direncin uygun olmasıdır. Ayrıca yüzey tabaka ile balpeteği tabakanın yapışmasının kayma gerilmesini aktarması gereklidir. Bazı durumlarda, yetersiz panel kalınlığı, yüzey kalınlığı veya yüzey mukavemetinin basınç ve kesme yüküne karşı direnç gösterememesi nedeniyle oluşmaktadır Şekil 2.11'de yüzey gerilme hatası görülmektedir [7]. Bunun dışında, Çekirdeğin kayma mukavemeti yada panel kalınlığının yetersiz olmasından kaynaklanmaktadır [7]. Şekil 2.12'de enine kesme gerilimi yer almaktadır [7].

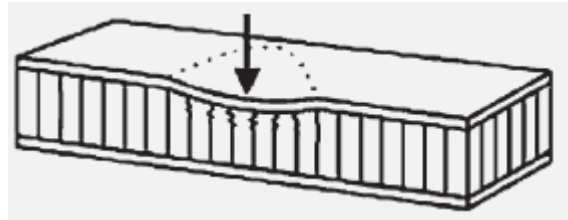


Şekil 2.11.Yüzey Gerilme Hatası[7]

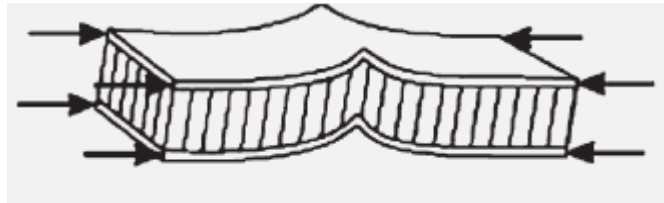


Şekil 2.12.Enine Kesme Gerilimi[7]

Ayrıca çekirdek malzemenin mukavemetinin düşük olmasından dolayı bölgesel basınç oluşabilmektedir [7]. Şekil 2.13’de bölgesel basınç hatası görülmektedir [7]. Bir diğer hata ise panel kalınlığı yada çekirdek kayma sertliğinin düşük olmasından kaynaklanan panel burkulmasıdır [7]. Şekil 2.14’de panel burkulma hatası görülmektedir.



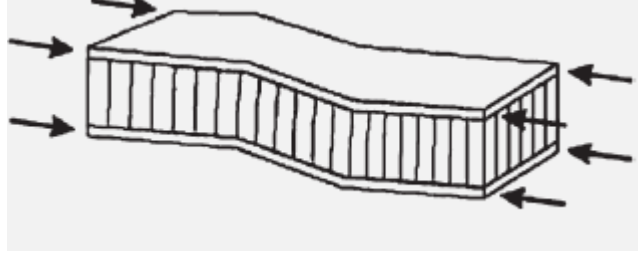
Şekil 2.13. Bölgesel Basınç [7]



Şekil 2.14. Panel Burkulması[7]

Yine kesme kıvrımı, yüzey ezilmesi ve hücre arası kırılma gibi hatalar da sırasıyla Şekil 2.15, Şekil 2.16, Şekil 2.17’de gösterilmiştir. Kesme kıvrımı, çekirdek malzemenin kesme modülünün veya yapıştırıcının kesme kuvvetinin düşük olmasından dolayı meydana

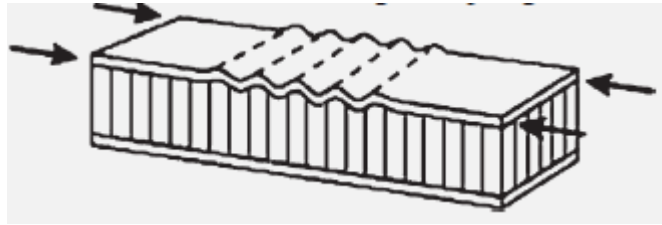
gelir [7]. Yüzey ezilmesi ise çekirdeğin baskı altındaki gücünün ve yüzey tabakanın çekme altındaki gücünün yetersiz olmasından dolayı meydana gelir [7]. Yüzey tabakanın ince ve çekirdek yapı hücre genişliklerinin büyük olmasından kaynaklı da hücresel arası kıvrılma olabilmektedir [7].



Şekil 2.15. Kesme Kıvrımı [7]



Şekil 2.16. Yüzey Ezilmesi [7]



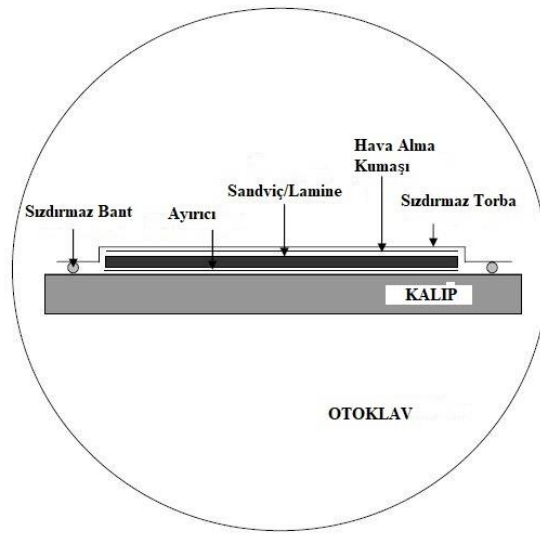
Şekil 2.17. Yüzey Kıvrılması [7]

2.4 Sandviç Yapılı Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri

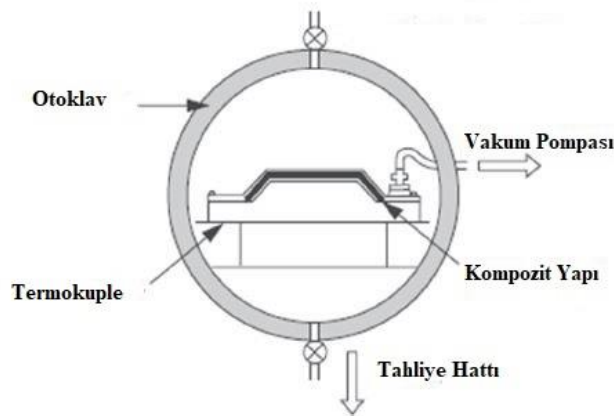
2.4.1 Otoklav Üretim Yöntemi

Otoklav yöntemi genellikle birden fazla büküme sahip olan büyük boyuttaki parçaların, yüksek kalitede lamine veya balpeteği kompozitlerin üretiminde kullanılır[28]. Otoklav genel anlamda atmosfer basıncı oluşturabilen basınçlı bir kap olarak düşünülebilir [28]. Otoklav içine yerleştirilen hava geçirmez bir ekipmanla solvent ve buhar gibi uçucu maddeler uzaklaştırılabilir[28]. Otoklavda ısıtma, dirençli elektrikli ısıtıcılar ile kontrol

edilir[28]. Kalıplama sırasında bir takım yardımcı malzemeler gereklidir. Bunlar yüzeye uygulanan ayırıcı, hava almaması için kullanılan elyaf kumaş tabakası, sızdırmaz yapıştırıcı, sızdırmaz kumaştır[28]. Kalıp yüzeyine ayırıcı uygulanır. Sandviç ya da lamine kompozit yapısı kalıp üzerine serilir ve üzerine hava almaması için kullanılan elyaf kumaş kapatılır[28][9]. Bunlara ek olarak vakum torbası sızdırmaz bant ile kalıp üzerine yapıştırıldıktan sonra vakum işlemi başlar. Otoklav, reçine için uygun olan sıcaklık ve basınca ayarlanır ve reçine kürlenme süresince bekletilir[28]. İşlem sonunda ısıtma kapatılır ve oda sıcaklığında soğuma için beklenir[28]. Şekil 2.18’de otoklav yönteminde kullanılan yardımcı elemanlar ve Şekil 2.19’da otoklav yöntemi gösterilmiştir [28].



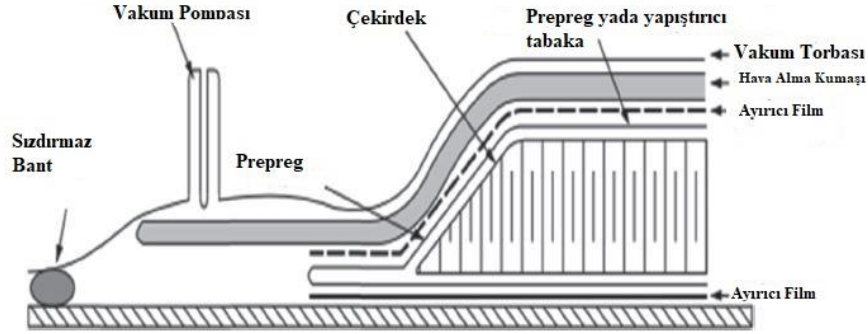
Şekil 2.18. Otoklav Yönteminde Kullanılan Yardımcı Elemanlar [28]



Şekil 2.19. Otoklav Yöntemi [28]

2.4.2 Vakum Torbası Yöntemi

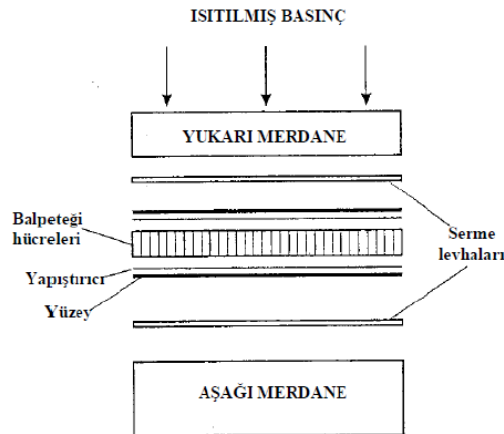
Vakum torbası yönteminde kalıp yüzeyi ile kalıp arasında kalan hava vakumlanır. Islak sistemlerde reçine emdirilir daha sonra sertleşme tamamlanana kadar vakum uygulanarak plastik filmin atmosfer basınç altında kalması sağlanır [9]. Sertleşme sürecini hızlandırmak için ısı uygulanır [9]. Şekil 2.20’de vakum torbası yöntemi gösterilmiştir [7].



Şekil 2.20. Vakum Torbası Yöntemi [7]

2.4.3 Sıcak Presleme Yöntemi

Şekil 2.21’de gösterilen bu yöntemde genelde üretilmiş parça tek seferde netice alınacak şekilde hazırlanır. Sıcak presleme, metal ve prepreg yüzeylerde yaygın olarak kullanılır[3]. Bu metotla yapılan üretimde diğer bir seçenek de prepreg kullanmaktır [3]. Prepreg, yüzey tabakaları basınç altında önceden ısıtılarak yapıştırıcı ile birleştirilmesidir [3].



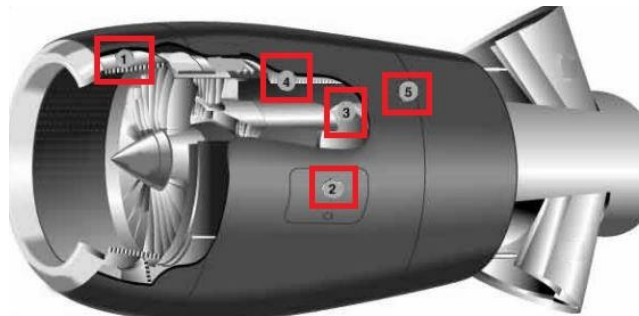
Şekil 2.21. Sıcak Presleme Yöntemi [3]

2.5 Sandviç Yapılı Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları

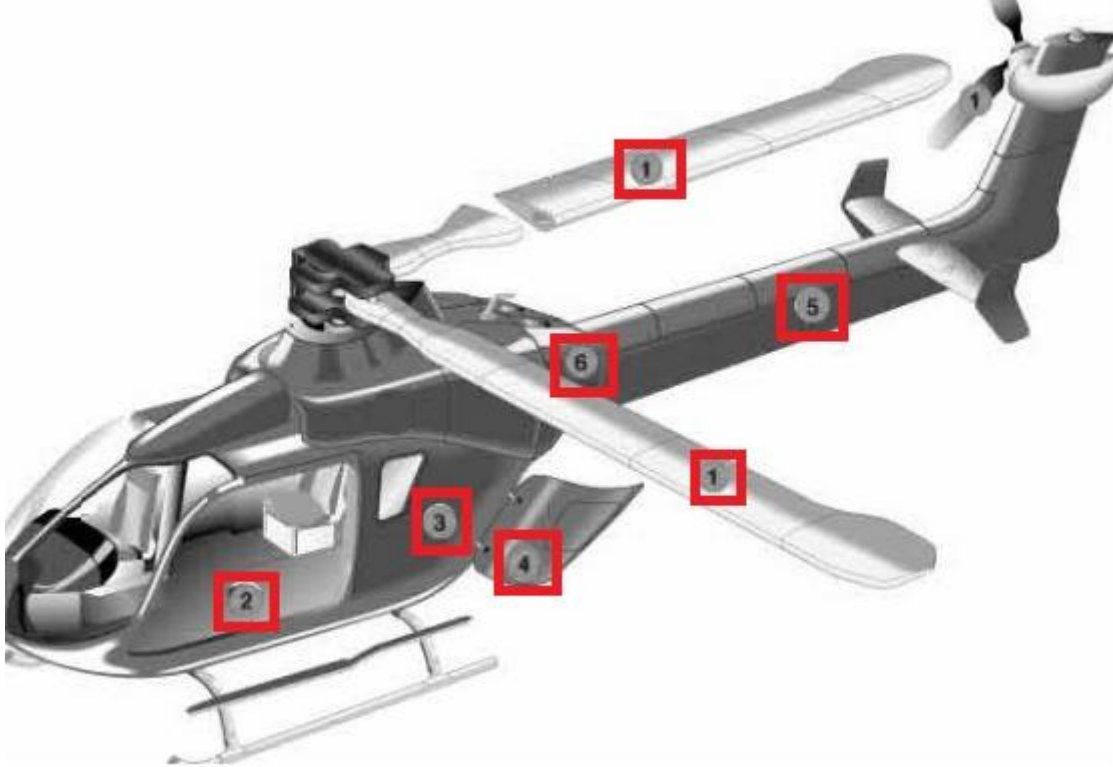
Sandviç yapılı kompozitler, büyük entegre kompozit yapıları tasarlamak için ekonomik ve yapısal olarak avantajlıdır [29]. Sandviç yapılı kompozit yapılar; yüksek mukavemet-ağırlık oranı, ısı direnci, ses yalıtımı ve kolay montajlanabilirlik nedeniyle havacılık, otomobil, yapı endüstrisinde ve spor malzemelerinde sıklıkla kullanılmaktadır [21]. Günümüzde askeri ve sivil uçak endüstrisinde kompozit malzemelerin hafifliklerinin yanında üstün mekanik özelliklerinden dolayı uçaklarda ve helikopterlerde hem iç mekan hem de yapısal parçalarda sandviç yapılı kompozitler kullanılmaktadır [10]. Şekil 2.22’de bir uçakta kullanılan sandviç yapılı kompozitler gösterilmiştir [10]. Yine jet motorlarında kullanılan sandviç yapılar Şekil 2.23’de görülmektedir [17]. Ayrıca helikopterlerde, roketatarlarda ve uydularda kullanımı da sırasıyla Şekil 2.24, Şekil 2.25, Şekil 2.26’da gösterilmiştir [17].



Şekil 2.22. Sandviç Yapılı Kompozitlerin Uçaklarda Kullanımı [10]



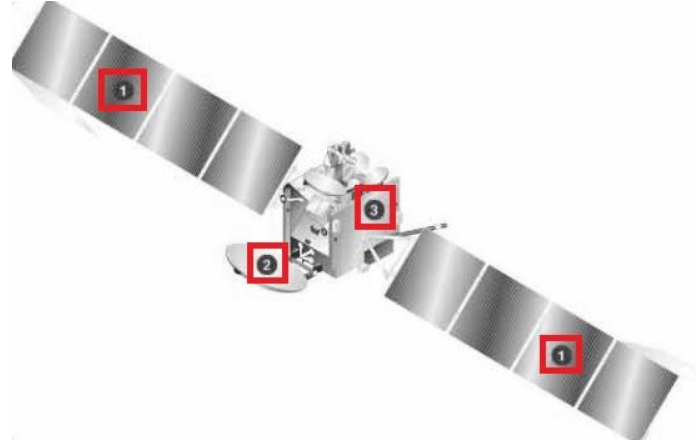
Şekil 2.23. Sandviç Yapılı Kompozitlerin Jet Motorlarında Kullanımı [17]



Şekil 2.24. Sandviç Yapılı Kompozitlerin Helikopterlerde Kullanımı [17]

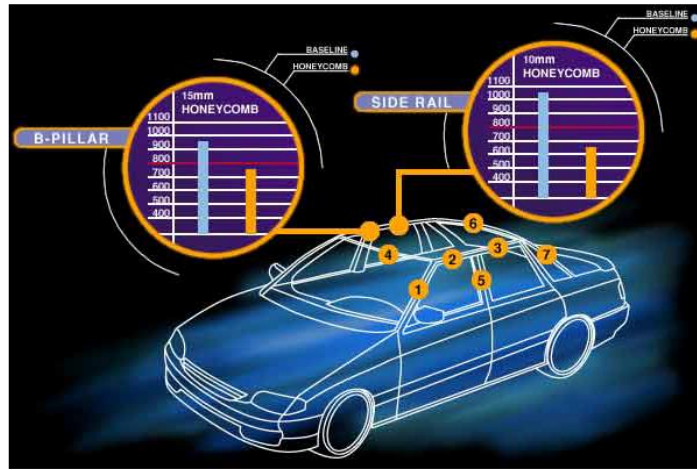


Şekil 2.25. Sandviç Yapılı Kompozitlerin Roketatarlarda Kullanımı [17]



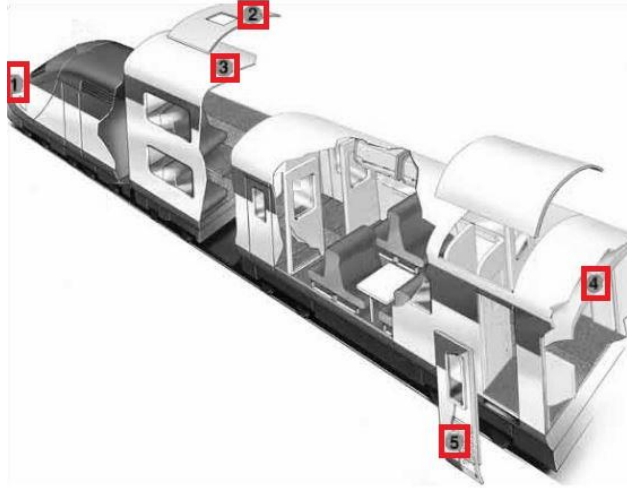
Şekil 2.26. Sandviç Yapılı Kompozitlerin Uydularda Kullanımı [17]

Sandviç yapılı kompozitlerin uygulama alanları bunlarla da sınırlı değildir. Son yıllarda otomobil firmalarının müşteri ihtiyaçlarına karşılık vermesi için hafif otomobil üretimi dikkat çekmektedir. Hafif otomobiller küçük motor hacminde daha çabuk hızlanıp, daha çabuk durabilmektedir[10]. Şekil 2.27’de otomobillerde kullanılan sandviç yapılı kompozitler belirtilmektedir [17].

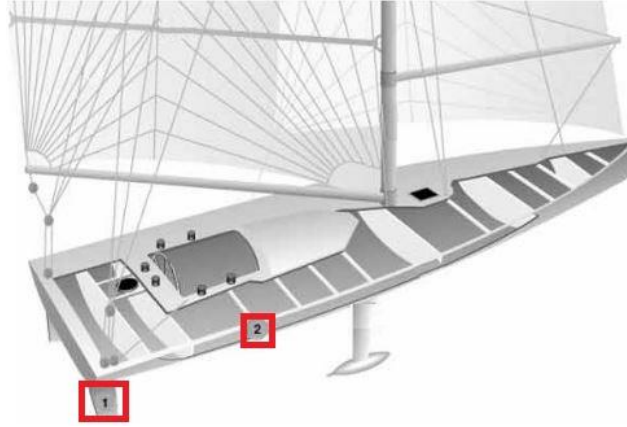


Şekil 2.27. Sandviç Yapılı Kompozitlerin Otomobillerde Kullanımı [17]

Ayrıca, kompozit prepreg ve dokuma malzemeler türleri artan oranlarda tren konstrüksiyonunda maliyet ve ağırlık düşürmek amacıyla kullanılmaktadır[10]. İskelette ağırlığın düşürülmesi enerji tasarrufu sağlamakla beraber daha hızlı araçların geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır [10]. Şekil 2.28’de trenler de kullanılan sandviç yapılı kompozitler gösterilmektedir [10]. Bunlara ek olarak Şekil 2.29’da gösterildiği üzere yelkenlilerde de kullanılmaktadır [17].



Şekil 2.28. Sandviç Yapılı Kompozitlerin Trenlerde Kullanımı [10]



Şekil 2.29. Sandviç Yapılı Kompozitlerin Yelkenlilerde Kullanımı[17]

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

3.1 Balpeteği Sandviç Yapılı Kompozitlerde Üretim Parametreleri ve Mekanik Özelliklere Etkisi

Balpeteği sandviç yapılı kompozitler yüksek mukavemet, düşük ağırlık, yüksek darbe sönümlenme kabiliyetleri, korozyon etkisi, yüksek yorulma dayanımları özellikleri ile havacılık ve savunma sanayii başta olmak üzere birçok alanda kullanılmaktadır. Kompozitlerin bu özelliklerini belirleyen birçok faktör bulunmaktadır. Kullanılan balpeteği tabakanın malzemesi, kalınlığı, hücre genişliği, geometrisi ve kalınlığı; sandviç yapıda kullanılan fiber yapının malzemesi, açısı, uzunluğu; balpeteği ile fiber tabaka arasında kullanılan yapıştırıcının malzemesi, kalınlığı elde edilen sandviç yapılı kompozit tabakanın mekanik özelliklerini önemli derecede etkilemektedir.

3.2 Balpeteği Kalınlığının Mekanik Özelliklere Etkisi

Balpeteği kompozit yapıların tasarım aşamasında balpeteği kalınlığının farklı mekanik özellikler üzerinde etkisi olmaktadır. Tasarım aşamasında elde edilmek istenilen numunelerdeki özelliklerden biri uygulanan yük miktarıdır. Literatürde Shen ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada farklı yoğunluk ve kalınlıkta köpük çekirdek malzemeler kullanılarak çekme, basma ve dört nokta eğme testleri yapılmıştır [30]. ASTM C393'e göre yapılan test sonuçları incelendiğinde 75 mm lik numune ile 25 mm lik numune karşılaştırıldığında test sırasında uygulanan maksimum kuvvet 3,6; 50 mm lik numune ile karşılaştırıldığında ise 2,7 kat daha fazladır [30]. Çekme test sonuçlarında ise köpük kalınlığı arttıkça elastite modülün de artış görülmüştür [30]. Basma testlerinde köpük kalınlığının artışı ile daha uzun bir plastik bölge elde edilmiştir fakat köpük kalınlığının artışı yüksek bir mukavemet oluşturmamıştır [30]. Ayrıca köpük içinde bulunan hava miktarı; basma, çekme ve kayma mukavemeti üzerinde etkilidir [30]. Yapılan diğer çalışmalardan biri ise Skawinski ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmadır. Bu çalışmada üç farklı kalınlıkta 15, 20, 25 mm kalınlığında olup iki farklı yoğunluktaki (40 ve 80 kg/m³) kompozit yapıya ASTM C393 ve ASTM C297 e göre testler yapılmıştır [31]. ASTM C393'e göre yapılan test sonuçlarına göre; yoğunluğun ve köpük kalınlığının artışı ile uygulanan yükte artış görülmüştür [31]. ASTM C297'e göre yapılan çekme test sonucuna göre kalınlığın uygulanan yük ile bağlantısı olmadığı saptanmıştır [31]. Kalınlık artışı ile ilgili Du ve arkadaşlarının yapmış

olduğu çalışmada farklı kalınlık ve farklı hücre genişliğindeki sandviç panellerin eğilme özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir [32]. ASTM C393'e göre kalınlık arttıkça numuneye uygulanan yükte artış olduğu ve eğilme modülünün arttığı görülmüştür [32]. Xie ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada ise farklı kalınlık, hücre genişliği, yüzey tabaka kalınlığı, hücre kalınlık etkileri üç nokta eğme testi yapılarak balpeteği ve yüzey tabaka kalınlığının eğilme özellikleri ve enerji emme kapasitesini önemli derecede etkilediği görülmüştür [33]. Balpeteğinin ve yüzey kalınlığının artması ile uygulanan kuvvetin arttığı; yoğunluğun azalması ve hücre genişliğinin büyümesi ile uygulanan kuvvetin azaldığı görülmüştür [33]. Balpeteği kalınlık etkisi ile ilgili yapılan bir diğer çalışma ise Wang ve ekibinin yapmış olduğu çalışmadır. Çekirdek yoğunluğu ve kalınlığının lamine kompozit tabakası üzerindeki etkisi incelenmiştir [34]. Üç nokta eğme test sonuçlarına göre yoğunluk artınca mukavemetin arttığı, kalınlık ile birlikte de bükülme sertliğinin arttığı gözlemlenmiştir[34]. Akkuşun yapmış olduğu doktora tez çalışmasında ise dört farklı hücre genişlikleri, iki farklı balpeteği kalınlığındaki çekirdek ve iki farklı yapıştırıcı; saf epoksi-%1 MWCNT (Multi Wall Carbon Nanotube) takviyeli epoksi; ile alüminyum bal peteği yapıların üretimi gerçekleştirilmiş [25]. ASTM C365'e göre yapılan basma testinde hücre genişliği sabit tutulup balpeteği arttırıldığında basma kuvvetinde bir azalma meydana geldiği tersi durumda artış olduğu sonucuna varılmaktadır [25]. Hücre kalınlığı arttığında iç yapıda burkulma ve buna bağlı olarak çekirdeklerde yığılma ve yırtılma meydana gelmektedir [25].Düşük hızlı darbe testleri incelendiğinde hücre genişliği sabit tutulup balpeteği kalınlığı arttırıldığında darbe kuvvetinde bir artış meydana geldiği tersi durumda azalma olduğu sonucuna varılmaktadır [25]. Burada balpeteği yapı kalınlığından dolayı batma şeklinde gelen darbeyi absorbe ettiği için daha fazla darbe kuvvetine dayanabilmektedir [25]. Kalınlığın haddinden fazla artması ise burkulmaları arttırarak çekirdek direncini azaltmaktadır[25]. ASTM E1556-08'e göre yapılan üç nokta eğme testine göre hücre genişliği sabit tutulup balpeteği kalınlığı arttıkça eğme kuvvetlerinde bir artış olduğu görülmektedir [25]. Yapılan çalışmalardan diğeri ise Paik ve ekibinin yapmış olduğu çalışmadır. Balpeteği kalınlığı ve hücre genişliğinin üç nokta eğme testi üzerindeki etkisi incelenmiştir [35]. İnceleme sonucunda balpeteği kalınlığı arttıkça ve hücre genişliği küçüldükçe numune üzerinde etki eden maksimum kuvvette artış görülmüştür[35]. Gpoiachand ve ekibinin yapmış olduğu çalışma sonuçları da diğer çalışmalar ile benzerlik göstermektedir. Gpoiachand ve ekibinin yapmış olduğu çalışmada 3 farklı balpeteği kalınlığı kullanılarak oluşturulan numunelere üç nokta eğme testi yapılmıştır [36]. Elde edilen sonuçlara göre kalınlık artışı ile numuneler üzerine uygulanan eğme kuvvetinde artış görülmüştür.

Tasarımcıların balpeteği kompozit yapı tasarımını yaparken dikkat ettikleri bir diğer konu ise enerji emme özelliğidir. Bu konuda literatürde yapılan çalışmalardan biri Sun ve ekibinin yapmış olduğu çalışmadır. Bu çalışmada balpeteği kalınlık artışının kompozit yapıda elde edilen kuvvet-uzama grafiğini önemli derecede arttırdığı gözlemlenirken spesifik enerji emme oranında azalma görülmüştür [37]. Ayrıca, balpeteği kalınlığının artışı ile yük-uzama grafiği ters orantılıdır [37]. Bunlara ek olarak, enerji emme grafiğinde çok az bir değişim ortaya çıkmıştır bu da kütlelerin artışı nedeniyle spesifik enerji emmenin azalmasıdır [37]. Fakat He ve ekibinin yapmış olduğu çalışmada ise balpeteği kalınlık artışının oluşturulan kompozit yapının başlangıç rijitliği ve enerji emme üzerinde etkisinin olmadığı görülmüştür [16]. Yapılan diğer çalışmalarda biri ise Wangın yapmış olduğu çalışmada balpeteği kalınlığı, hücre kalınlığı ve hücre genişliğinin serbest düşme tekniği ve şok emme prensibi ile yapılan tamponlama (cushioning) testi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Test sonuçlarına göre; balpeteği kalınlığının artmasıyla, tamponlama etkisi azalmaktadır[38]. Bu nedenle, kalınlıklarının uygun şekilde seçilmesi yastıklama özelliklerini optimize etmek için yararlıdır, ancak sadece balpeteği kalınlığının artırılması yastıklama özelliklerini her zaman arttırmayacağı yorumu yapılmıştır [38].

Tasarım aşamasındaki bir diğer önemli kriter ise numunelerde oluşan yüzey hatalarıdır. Styles ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada ise farklı balpetek kalınlıklarının dört nokta eğme testi yaparak oluşan defomasyonları incelenmiştir [39]. Test sonuçlarına göre; balpeteği kalınlığı düşük olan numunelerde yüzey tabaka hatası meydana gelirken, daha kalın balpetek yapıya sahip numunelerde çekirdek deformasyonu meydana gelmiştir [39]. Kalın bir balpetek yapı üzerinde kalın bir yüzey tabakasında ise herhangi bir çentik bile görülmemiştir [39]. Chen ve arkadaşları farklı balpeteği, balpeteği kalınlığı, geometri ve malzemeler kullanılarak oluşturulan numunelerin eğilme davranışının incelenmesi için üç nokta eğme testi yapılmıştır [40]. Balpeteği kalınlığı arttıkça sürünme oranının (creep rate) arttırdığı ve bunun oluşturulan numunenin sertliğini de arttırdığı ortaya çıkmıştır [40]. Ayrıca; balpeteği kalınlığı arttıkça sürünme hatası süresinin azaldığı görülmüştür [40].

3.3 Hücre Genişliğinin Mekanik Özelliklere Etkisi

Yapılan çalışmalara göre balpeteği kompozit yapılar oluşturulurken hücre genişliğinin birçok mekanik özellik üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Hücre genişliğinin etkilerinden biri; oluşturulan yapının enerji emme oranıdır. Sun ve ekibinin yapmış olduğu çalışmada daha küçük hücre genişliği ile oluşturulan kompozit yapının kuvvet-uzama grafiğinde

önemli derecede artış gözlemlenirken spesifik enerji emme oranında azalma görülmüştür [37]. Bunlara ek olarak hücre genişliğinin artışı ise sertliğin azalmasına neden olmuştur [37]. Sahu ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada farklı hücre genişliklerine sahip kompozit numunelerin elastik özellikleri ve enerji emme özellikleri incelenmiştir[41]. ASTM C365 test sonuçlarına göre 10 mm hücre genişliğine sahip olan numunenin basma stresi 3.74 MPa iken 12, 15, 21, 27 ve 36 mm hücre genişliğine sahip olan numunelerde sırasıyla %11, %37, %85, %101 ve %167 oranında azalma görülmüştür [41]. Ayrıca spesifik enerji emme miktarı 10 mm hücre genişliğine sahip olan numune de 1.15 kJ/kg iken 12, 15, 21, 27 ve 36 mm hücre genişliğine sahip olan numunelerde sırasıyla %4, %14, %43, %49 ve %69 oranında azalma görülmüştür[41]. Danacıoğlunun yapmış olduğu yüksek lisans tez çalışmasında; Ø8, Ø10 ve Ø12 mm çaplarında ki borulardan 6 cm uzunluğunda kesilen parçalar metal yapıştırıcı ile birleştirilmiş, alt ve üst yüzeyine 1 mm lik alüminyum tabaka yapıştırılarak oluşturulan numunelerin düşük hızlı darbe testleri yapılarak sonuçları irdelenmiştir [3]. Her bir çapta numuneler 2m/s, 3m/s ve 5m/s vurucu hızlarında yüklemelere maruz bırakılmış ve elde edilen sonuçlara göre; farklı çaplardaki boruların darbelere karşı farklı mukavemet özellikleri gösterdiği, boru çapındaki artışla beraber yüzey ve malzeme hasarının arttığı, aynı vurucu hızlarında; küçük boru çaplarında imal edilen sandviç kompozitlerin darbe dayanımının geniş boru çaplarında imal edilen sandviç kompozitlere kıyasla rijitliğinin daha yüksek olduğu ve darbeyi daha çok absorbe ederek hasarın daha az oluştuğu görülmüştür [3]. He ve ekibinin çalışmasında ise hücre genişliğinin enerji emilimi üzerinde etkili olmadığı görülmüştür. He ve ekibinin çalışmasında alüminyum balpeteği kalınlığının, hücre ve yüzey tabaka kalınlığının düşük hızdaki darbe tepkisini ve bunun sonucunda ortaya çıkan hasar davranışının sayısal ve deneysel yöntemleri birleştirerek çalışma yapılmıştır[16]. Deneysel çalışması ASTM D7136 ya göre 5J, 10J ve 40J luk kuvvetler uygulanarak yapılmıştır [16]. Balpeteği hücre kalınlığı ve hücre duvar uzunluğunun darbe yükü ve enerji emiliminde kayda değer bir rol oynamadığı görülmüştür [16].

Hücre genişliğinin bir diğer etkisi ise numune üzerine uygulanan yük, kuvvet ve eğilme mukavemeti üzerindeki etkileridir. Du ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada farklı kalınlık ve farklı hücre genişliğindeki sandviç panellerin eğilme özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir [32]. Aynı kalınlıkta daha küçük hücre genişliğine sahip olan numunelerde ise etki eden yükte artış görülmüştür [32]. Yapılan bir diğer çalışma ise Crupi ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmadır. Bu çalışmada farklı hücre genişliğine sahip alüminyum balpetekleri ile oluşturulan numunelerin üç nokta eğme ve darbe deneyleri uygulanarak tipolojisi incelenmiştir [42]. Elde edilen test sonuçlarına göre Mode I

hesaplamasında kullanılan formüle göre destek noktasının artmasından ve 3 mm hücre genişliğine sahip olan balpeteği σ_{yc} ve τ_{yc} değerlerinin artışından dolayı; destek noktasının büyümesi ve hücre genişliğinin küçülmesi ile numune üzerine uygulanan maksimum yükte artış olmuştur [42]. Bianchinin yapmış olduğu çalışmada Du ve Crupinin çalışmalarını desteklemektedir. Bu çalışmada farklı hücre genişliğinin balpeteklerinin kayma ve yorulma davranışları üzerindeki etkileri incelenmiştir [43]. Çalışmada farklı hücre genişliklerine sahip balpeteği kompozitler ASTM C273'e göre testleri yapılmıştır [43]. Yapılan test sonucunda hücre genişliği küçük olan numuneye uygulanan yükün daha yüksek olduğu görülmüştür[43]. Ayrıca ilk denemelerde çekirdek ile yüzey tabakası ile arasındaki ayrışmanın erken meydana geldiği gözlemlenmiştir bunun nedeni yapışkan tabakanın çekirdeğin gücüne dayanacak kadar uyumlu olmaması olarak açıklanmıştır [43]. Dutra ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada ise farklı malzemeler, geometri ve kalınlık kullanılarak ASTM C393'e göre yapılan eğme test sonuçları incelenmiştir[44]. Daha kalın çekirdek ve hücre sayısının artışı atalet performansına katkıda bulunmaktadır [44]. Yapılan bir diğer çalışma ise Akkuşun yapmış olduğu doktora tez çalışmasında dört farklı hücre genişlikleri, iki farklı balpeteği kalınlığı ve iki farklı yapıstırıcı; saf epoksi-%1 MWCNT (Multi Wall Carbon Nanotube) takviyeli epoksi; ile alüminyum bal peteği yapıların üretimi gerçekleştirilmiş [25]. ASTM C365'e göre yapılan basma testinde balpeteği kalınlığı sabit tutulup hücre genişliği arttıkça basma kuvvet değerlerinde bir azalma tersi durumda ise bir artış olduğu görülmektedir [25]. Bunun sebebi hücre genişliği arttıkça yapıda meydana gelen boşluk miktarının artması ve buna bağlı olarak havanın çekirdek içerisini terk etmek istemesi ve basınçlı bir şekilde çekirdek duvarlarını ayırması olarak açıklanmıştır [25]. ASTM-D2584'e göre yapılan düşük hızlı darbe deney sonuçlarına göre balpeteği kalınlığı için bakıldığında hücre genişliği küçüldükçe kuvvet değerinde bir artma tersi durumda azalma olduğu görülmektedir [25]. Küçülen hücre genişliği malzemenin birim alanda artış göstermesi anlamına geldiği için oluşan yapıda deformasyon oluşturabilmek için daha fazla kuvvet uygulanması gerektiğini göstermektedir [25]. ASTM E1556-08'e göre yapılan üç nokta eğme testine göre balpeteği kalınlığı sabit tutulup hücre genişliği arttıkça eğme kuvvetlerinde bir azalma olduğu görülmektedir [25]. Bu azalma malzemedeki boşluk miktarının artması sonucu eğme kuvvetine karşı direnç oluşturacak malzeme eksikliğinden kaynaklanmaktadır [25]. Artan hücre genişliği yapıda boşluklar meydana getirdiğinden eğme kuvvetleri azalmaktadır[25]. Balpeteği kalınlığı sabit tutulup hücre genişliği arttıkça eğme kuvvetlerinde bir azalma olduğu görülmektedir [25]. Artan hücre genişliği yapıda boşluklar meydana getirdiğinden eğme kuvvetleri azalmaktadır [25]. Paik ve ekibinin

yapmış olduğu çalışmada balpeteği kalınlığı ve hücre genişliğinin üç nokta eğme testi üzerindeki etkisi incelenmiştir [35]. İnceleme sonucunda balpeteği kalınlığı arttıkça ve hücre genişliği küçüldükçe numune üzerinde etki eden maksimum kuvvette artış görülmüştür[35]. Hücre genişliği ile ilgili yapılan bir diğer çalışma ise Butukuri ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada farklı hücre genişliğinin alüminyum ve Nomex balpetekleri ile farklı kalınlıklardaki yapıştırıcı tabakanın ASTM C297'e göre yapılan çekme testinde değişkenlerin etkileri incelenmiştir [45] Test sonuçlarına göre düşük hücre genişliğindeki numunenin çekme mukavemetinin geniş hücre genişliğine göre daha fazla olduğu görülmüştür. Diğer yandan 0,254 mm lik yapıştırıcı tabaka kullanılan numunelerde ise hücre genişliği büyük olan numuneye göre %6 artış görülmektedir [45]. Eğilme mukavemeti ile ilgili yapılan çalışmada Wang ve arkadaşlarının yapmış olduğu çekirdek içine yerleştirilen destek kalınlığı, aralığı ve yüksekliğinin hata modu ve eğilme dayanımı üzerindeki etkileri test edilmiştir [46]. Elde edilen sonuçlara göre eklenen destekler eğilme mukavemetinde artış göstermiştir [46]. Daha kalın ve yüksek destekler eğilme mukavemetinin başlangıcını ve eğilme sertliğinin önemli derecede etkilemiştir [46]. Enerji emme özellik etkisini incelemek için Sahu ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada farklı hücre genişliklerine sahip kompozit numuneler incelenmiştir [41]. Çalışmada 10, 12, 15, 21,27 ve 36 mm lik hücre genişliğine sahip balpetekleri ASTM C365, ASTM D790, ASTM D3164'e göre test edilmiştir [41]. ASTM D790'a göre yapılan eğilme testinde ise 10 mm hücre genişliğine sahip olan numune de 4.4 Mpa eğilme stresi görülürken 12, 15, 21, 27 ve 36 mm hücre genişliğine sahip olan numunelerde sırasıyla %13, %14, %42, %86 ve %133 oranında azalma görülmüştür [41]. Çalışmada 5, 15, 25 mm kalınlıklarında Nomex ve alüminyum balpetekleri kullanılmıştır [47]. Elde edilen test sonuçlarına göre Nomex levhaların eğilme dayanımlarının alüminyum hücrelilere göre daha yüksek olduğu bulunmuştur[47]. Alüminyum hücreli levhalarda yük uygulanan bölge civarında bölgesel hücre ezilmesi ve kayma hasarları, kâğıt hücreli levhalarda ise bu hasarlara ek olarak bölgesel çatlaklar ve kısmen yüzey tabaka ayrılması gözlemlenmiştir [47]. Ayrıca petek yapı hücre yoğunluğunun artmasıyla levhaların eğilme dayanımları ve hücrelerin kayma rijitlikleri artmıştır[47].

Hücre genişliğinin etkilerini incelemek için yapılan diğer çalışma ise kritik burkulma yükü üzerindeki etkisidir. Bu konu ile ilgili Solmaz ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada dört farklı hücre genişliği ve dört farklı hücre duvarının kalınlığı, balpeteğinin köpüklü ve köpüksüz olmasının sandviç kompozit yapının kritik burkulma yüküne etkisi incelenmiştir [48]. Çalışma sonuçlarına göre; hücre boşluklarına köpük ilavesi tüm numunelerde kritik burkulma yükünü artırmıştır[48]. Ayrıca hücre duvarı kalınlığının

artmasının kritik burkulma yükü üzerinde önemi kayda değerdir [48]. Köpüksüz ve köpüklü numunelerin tamamında hücre genişliğinin artmasıyla kritik burkulma yükü azalırken hücre duvarı kalınlığının artması ile kritik burkulma yükünün arttığı tespit edilmiştir [48]. Yapılan bir diğer çalışma ise yorulma dayanımının incelenmesidir. Yorulma dayanımı ile ilgili Belouettar ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada ise farklı bir sonuç elde edilmiştir. Farklı yoğunluk ve hücre genişliğine sahip balpeteklerine dört nokta eğme testi uygulanarak statik ve yorulma davranışları incelenmiştir [49]. Hücre genişliğinin artışı ile yoğunluğun arttığı sandviç kompozit yapı numuneleri elde edilmiştir [49]. Yoğunluk artışı ile sertliğinin arttığı ve kopma için gerekli kuvvetin arttığını göstermektedir [49]. Düşük yoğunluklu numunelerde maksimum yükler L yönünde W yönüne göre daha yüksek ve maksimum sapma daha fazladır [49]. Aramid fiberler ve alüminyum balpetekleri karşılaştırıldığında, aramid fiberlerin daha sünek olmasından dolayı kopma aniden ortaya çıkmaktadır [49]. Jen ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada ise farklı yoğunluklardaki alüminyum balpeteklerine yorulma testi uygulanarak yorulma dayanımı incelenmiştir [50]. Yapılan yorulma testi sonucunda elde edilen verilere göre; yoğunluk arttıkça yorulma dayanımı artmıştır [50].

Hücre genişliğinin eğilme oranı üzerindeki etkilerini incelemek için Chen ve arkadaşları farklı çekirdek, balpeteği kalınlığı, geometri ve malzemeler kullanılarak oluşturulan numunelerin eğilme davranışının incelenmesi için üç nokta eğme testi yapılmıştır [40]. Numunelerde hücre genişliği arttıkça eğilme oranının arttığı görülmüştür [40].

Hücre genişliğinin etkilerinden biri ise soyma testlerinde etkisini göstermektedir. Bu konu ile ilgili Burton ve Noorun yapmış olduğu çalışmada balpeteği hücre genişliği yüzey tabaka ve yapışkan kalınlığının; yapıştırıcının bağlantı karakteristikleri sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir [51]. Yapılan çalışmada yapıştırıcı tabakanın kayma gerilmesi, yapıştırıcı boşluk kalınlığı, yüzey tabakası kalınlığı, hücre genişliği ve kalınlığı değişken değerler olarak alınmıştır [51]. Yapılmış olan soyma testine göre; eşdeğer yoğunluklu petek çekirdekleri için hücre genişliğindeki artışlar genellikle bağ hattı yapışkanı daha yüksek bir ortalama gerinim enerji yoğunluğu ile sonuçlanır [51]. Suresh ve ekibinin soyma testi ile ilgili yaptığı çalışmada farklı yoğunluk ve hücre genişliğine sahip olan köpükler ile oluşturulan kompozit yapının soyma ve üç nokta eğme testleri üzerindeki etkileri incelenmiştir [52]. İncelenmiş olan çalışmada köpük yoğunluğu arttıkça hücre genişliği küçülmektedir ve elde edilen test sonuçlarında hücre genişliği küçüldükçe yapışmanın arttığı ve mekanik yapının soyma mukavemetinin arttığı görülmektedir [52]. Akkuşun yapmış

olduğu doktora çalışmasında 6,78 mm hücre genişliğine sahip numunede maksimum değer elde edilmesi, 17,32 mm hücre genişliğine doğru soyma kuvvet değerlerinin azalması birim alana düşen malzeme miktarının azalmasındandır sonucu elde edilmiştir [25].

3.4 Hücre Geometrisinin Mekanik zelliklere Etkisi

Hücre geometrisi de balpeteği kalınlığı ve hücre genişliğinin etkilemiş olduğu mekanik özellik üzerinde etkileri bulunmaktadır. Enerji emme ve kritik yük üzerindeki etkilerini incelemek için Shi ve arkadaşları 3 farklı balpeteği yapısı kullanarak oluşan kompozit yapıya üç nokta eğme testi uygulanmıştır [53]. Testlerden elde edilen sonuçlara göre alüminyum balpeteği, ortogrid çekirdek ve alüminyum balpeteği ile ortogrid çekirdeğin birleştirilmesi ile elde edilen yapıların ortalama kritik yükleri sırasıyla 1.13, 2.15 ve 5.26 kN dur[53]. Enerji emme kapasitesi ise balpeteği ile doldurulmuş ortogrid yapıda 175.7J iken alüminyum balpeteğinde 35J ve ortogrid yapıda 137.7J olarak bulunmuştur [53]. Testlerden elde edilen sonuçlara göre alüminyum balpeteği ile desteklenen yapının enerji emme ve kritik yük açısından diğer yapılardan daha mukavemetli olduğu sonucuna ulaşılmıştır [53]. Hou ve arkadaşları ise çekirdek geometrisinin yapıların mekanik üzerindeki etkileri deneysel ve sayısal yöntemlerle incelenmiştir [54]. ASTM C393'e göre 0.1 mm/dk hız ile test edilmiş ve elde edilen sonuçlara göre yüksek aı/gradyan oranı ile en yüksek spesifik yk, kesilme modülü ve eğilme sertliği sağlamaktadır [54]. Dutra ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada farklı malzemeler, geometri ve kalınlık kullanılarak ASTM C393'e göre yapılan eğme test sonuçları incelenmiştir[44]. Dikdörtgen ve altıgen balpetekleri arasında yapılan karşılaştırmada ise dikdörtgen balpeteklerinin daha yüksek eğilme mukavemeti ve yüzey-çekirdek gerilmesine sebep olmuştur [44]. Ayrıca altıgen numunelerde delaminasyon görülmezken dikdörtgen numunelerde delaminasyona rastlanmıştır [44].

3.5 Yapıştırıcı Tabakanın (Adhesive) Mekanik zelliklere Etkisi

Yapıştırıcı tabakanın kalınlığı, yapıştırma yöntemi, yapıştırıcı tabakanın içeriğinin mekanik özellikler üzerinde etkili olmaktadır. Yapıştırıcı tabaka ve kalınlığının etkilerini incelemek için Butukuri ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmada farklı hücre genişliğindeki alüminyum ve Nomex balpetekleri ile farklı kalınlıklardaki yapıştırıcı tabakanın ASTM C297'e göre yapılan çekme testinde değişkenlerin etkileri incelenmiştir [45]. Numuneler oluşturulurken yapıştırıcı tabakaya retikülasyon (belli basınç ve sıcaklıkta yapıştırıcı tabakanın eritilmesi) işleminin uygulanıp

uygulanmamasına bağılı olarak numuneler sınıflandırılmıştır [45]. Aynı hücre genişliğine sahip alüminyum balpeteklerinde ve aynı kalınlıktaki yapıştırıcı tabakalı numuneler incelendiğinde retikülasyon işlemi maksimum mukavemette %16 artış sağlarken Nomex balpeteklerinde bu işlemin etkisi görülmemiştir [45]. 0,127 mm kalınlığında yapıştırıcı tabaka kullanılan alüminyum balpeteklerinde 3,17 mm hücre genişliğine sahip olan numunelerde uygulanan maksimum kuvvette 4,76 mm lik numunelere göre %5 artış görülmüştür [45]. Aynı hücre genişliğine sahip olan numunelerde; 0,254 mm lik yapıştırıcı tabaka kullanılan numunelere 0,127 mm kalınlığında tabaka kullanılanlara göre %48 daha fazla kuvvet uygulanmıştır [45]. Yapışkan kalınlığının etkisini incelemek için Burton ve Noorun yapmış olduğu çalışmada; yapıştırıcı tabaka kalınlığı arttıkça toplam gerilme enerjisinde artış görülmüştür[51]. Yapıştırıcının yapışkan modülünün artmasıyla toplam gerinim enerjisi azalmıştır [51]. Kalın yüzey tabakalarına sahip sandviç paneller, yapışkan gerilme enerjisinde yaklaşık % 60 artış göstermiştir [51]. Yapıştırıcı tabaka kalınlığının etkisi ile ilgili yapılan bir diğer çalışmada ise Khashaba ve Najjar'a aittir. Yaptıkları çalışmada 0,17 mm ve 0,25 mm kalınlığa sahip yapıştırıcı tabaka ve karbon ilave edilmiş yapıştırıcı tabakanın 5° ve 10° lik açılarla çekme ve yorulma testleri yapılarak test sonuçları karşılaştırılmıştır [55]. İki farklı yapıştırıcı kullanılarak üretilen numunelerin mekanik özellikleri incelendiğinde karbon ilave edilmiş olan yapıştırıcının; çekme mukavemeti, elastite modülü, Poisson oranı, kayma mukavemeti ve kayma modülü daha yüksektir. Çekme testine göre gerilim- gerinim (stress-strain) grafiği incelendiğinde karbon ekli yapıştırıcının değerlerinin daha yüksek çıktığı görülmüştür [55]. 0,17 mm ve 0,25 mm lik numuneler karşılaştırıldığında; 0,25 mm kalınlığındaki numunenin yığılma ve süreksizlikten dolayı daha düşük çekme mukavemetine sahip olduğu görülmüştür [55]. Karbon ilaveli yapıştırıcının daha yüksek değerlere sahip olma sebebi karbonların nano ölçekte arayüzey mekanizmalarını aktive etmesi ve sertliğin artırılmasında önemli bir etken oluşturmasıdır [55]. Karbon ilaveli yapıştırıcıların yorulma dayanımını arttırdığı görülmüştür [55].

Balpeteği yapısında kullanılan çekirdeğin soyma testi üzerinde etkisi bulunmaktadır. Wang ve ekibinin yapmış olduğu çalışmada çekirdek yoğunluğu ve kalınlığının lamine kompozit tabakası üzerindeki etkisi incelenmiştir [34]. Soyma testinde ise alüminyum panel üzerinde yapışkan tabaka kaldığı gözlemlenmiştir [34]. Bu bağlantıda yapışkan kalitesi artırılabilir yada başka bir fiber yapı eklenebilir yorumu yapılmıştır [34]. Khan'ın yapmış olduğu çalışmada ise farklı balpetekleri kullanılarak oluşturulan numunelerin yapışma mukavemeti karşılaştırılmıştır [22]. Farklı sertliğe sahip çekirdekler karşılaştırıldığında çekirdek ve yüzey tabakaları arasındaki bağılı bağ kalitesinin çok etkili olmadığı görülmüştür

[22]. Yüksek sertlikteki çekirdekler; çekirdek / yüzey tabakası ara yüzeyinde daha yüksek stres konsantrasyonu göstermişlerdir [22]. Dolayısıyla, sert bir çekirdeğin soyma değeri, bağ kalitesinden bağımsız olarak esnek bir çekirdeğin soyma değerinden daha düşük olabilir [22]. Ayrıca bir sandviç yapının yük taşıma kapasitesi balpeteği ile yüzey arasındaki yapışma kalitesine bağlıdır [22]. Çekirdek tabakasının etkilerini incelemek için yapılan bir diğer çalışma ise Oh ve ekibinin yapmış olduğu çalışmadır. Bu çalışmada yapışkan tabakanın yüzeye yapışmasının, yüzey işlemi ile ilgisi incelenmiştir [15]. ASTM D1781 e göre yapılan test sonuçlarına göre kumlama ve fosforik asit uygulanarak yüzey pürüzlülüğünün artırıldığı ve buna bağlı olarak soyma direncinin arttığı görülmüştür [15]. Balpeteği çekirdek ve köpük çekirdek yapının karşılaştırması için Hron ve ekibinin yapmış olduğu çalışmada ASTM D1781 e göre soyma testleri yapılmıştır [56]. Balpeteği çekirdek ile kullanılan üç numaralı yapıştırıcının referans yapıştırıcı ile oluşturulan numuneye göre üç kat daha fazla soyma mukavemeti gösterdiği ortaya çıkmıştır [56]. Buna ek olarak, köpük çekirdek ile kullanılan bir numaralı yapıştırıcının referans yapıştırıcıdan 1,5 kat daha fazla soyma mukavemeti gösterdiği, köpük çekirdeklerin balpeteği çekirdeklerine göre soyma mukavemetinin 1,2 kat daha fazla olduğu görülmüştür [56].

Yapıştırıcı tabakanın içeriğinin ve kürlenme sıcaklığının etkilerini incelemek için Freitas ve Sinkenin yapmış olduğu çalışmada kompozit numunelere soyma testi yapılarak yüzey yapışması değerlendirilmiştir [57]. Numunelerde dokuz farklı epoksi bazlı yapıştırıcı tabaka ve testlerde iki farklı sıcaklığı kullanılmıştır. Her bir yapıştırıcı tabaka; alüminyum-yapıştırıcı tabaka-alüminyum ve kompozit- yapıştırıcı tabaka- kompozit şeklinde kullanılarak 2 farklı numune türü oluşturulmuştur [57]. Elde edilen test sonuçlarına göre; sıcaklığın artırılmasıyla, kohezyon hatasının yüzdesinin ve ardından soyma mukavemeti artmıştır [57]. Alüminyum numuneler için sadece iki kırılma modu olduğundan yapıştırıcıdaki kırılmanın artması ara yüzey ayrılmasının azalması anlamına gelmektedir [57]. Bu, alüminyum ile yapıştırıcı arasında sıcaklık ile yapışma performansının arttığını gösterir [57]. Sonuçta kompozit yapılarda yüksek sıcaklıklarda kompozit reçine matrisi ve fiber / reçine ara yüzeyi daha esnek hale gelmektedir. Ayrıca yapıdaki kırılmalardan önce daha büyük deformasyona olanak tanınır, bu nedenle tabakalar arası ayrılmadan ziyade kohezif hata daha olası hale gelmektedir [57]. Farklı yapışkan tabakaları soyarken soyma yükleri önemli ölçüde farklılık gösterebilir ve zayıf bir ara yüzey yapışması anlamına gelmez ve soyma yükleri yapışma özelliklerinin bir göstergesi olarak kullanılabilir [57]. Akkuşun yapmış olduğu doktora tez çalışmasında saf epoksi ve %1 MWCNT (Multi Wall Carbon Nanotube) takviyeli epoksi; ile alüminyum bal peteği yapıların üretimi gerçekleştirilmiştir

[25]. ASTM D1781'e göre yapılan soyma testine göre yapıştırıcı içerisine yapılan MWCNT takviyesinin kuvvet değerlerini arttırdığı sonucuna varılmıştır [25]. Takeda ve Naritanın yapmış olduğu çalışmada ise karbon nanotüp (CNT) bazlı polimer yapışkan tabakasıyla bağlanmış karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) kompozit bağlantıların Mod I kırılma davranışı ve çatlak izlenmesi incelenmiştir [58]. Elde edilen test sonuçlarına göre artan nanotüp oranı ile yapıştırıcıların elektrik direnci artmaktadır. Kırılma tokluğu %0,32 karbon nanotüp eklenmesi ile iyileştirilmiştir [58]. Kırılma testleri sırasında nanotüp/epoksi yapıştırıcı numunelerinin elektriksel direnç davranışının kırık mekanizmalarına bakılmaksızın olumlu yönde etkilemektedir [58]. Başlangıç direnciyle normalize edilen numune direncindeki değişiklik, çatlak uzatma miktarının bir fonksiyonudur ve CNT bazlı polimerlerin elektriksel iletim mekanizması ile orantılıdır [58]. Khalili ve ekibi ise yapıştırıcı tabakanın içine kırık fiber eklenerek soyma testi yapılmıştır. Yapılan çalışmada yapışkan tabaka 0°, 45°, 90° lik fiberler, %30 oranında kırık fiber, %20, %30, %40 oranlarında toz cam fiber eklenen yapıştırıcılar ile oluşturulan numunelerin eğme, çekme, darbe ve yorulma test sonuçları incelenmiştir [59]. Elde edilen test sonuçlarına göre; yapıştırıcının içine eklenen fiberlerin bağlantıyı güçlendirdiği, fiberlerin oryantasyonunun mukavemet, gerinim ve bağlantının tokluğunda önemli bir etkiye sahip olduğu, fiberlerin yükleme yönüne göre yönlendirilmesinin bağlantı mukavemetinde önemli bir etkiye sahip olduğu ortaya çıkmıştır [59]. Ayrıca toz cam fiberin mukavemet ve sertlikte önemli bir role sahip olduğu fakat yorulma geriniminde etkili olmadığı sonucuna varılmıştır [59]. Kim ve ekibinin yapmış olduğu çalışmada ise epoksi ve poliüretan yapıştırıcı ile oluşturulan kompozit yapının ASTM D1781 ve ASTM D3176 ya göre yapılan testler sonucunda soyma-kayma mukavemetleri (peel-shear strength) karşılaştırılmıştır [60]. Elde edilen test sonuçlarına göre; poliüretan yapıştırıcının kayma ve soyma mukavemetinin daha fazla olduğu görülmüştür bunun sebebi ise içinde bulunan maleik anhidritin metaller ile tepkimeye girerek daha güçlü kimyasal bağlanma oluşturmasındandır fakat epoksi yapıştırıcının içinde kimyasal bağlantıyı güçlendirecek bir yapı olmadığı için kimyasal yapışması kuvvetli değildir [60]. Poliüretan yapıştırıcı soyma testi sonrası yüzeyde plastik deformasyon oluştururken, epoksi yapıştırıcı kullanılan yüzeyde böyle sonuçla karşılaşmamıştır [60]. Kompozit yapının fiber oranı soyma mukavemetini büyük ölçüde etkilemektedir [60].

Shen ve ekibinin yapmış olduğu çalışmada fiber takviyeli köpük kompozit yapıların soyma mukavemeti test edilmiştir [61]. Oluşturulan numunelerde fiber takviye oranı arttırıldıkça soyma mukavemetinde önemli derecede artış görülmüştür [61]. Ayrıca, fiber yükünün ve fiber uzunluğunun arttırılması genellikle dayanıklılığı arttırmış ve aramid

fiberler, eşdeğer yüklemeler ve fiber uzunlukları için soyma mukavemetinin artırılmasında cam fiberlerinden daha etkili olduğu sonucuna varılmıştır [61].

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR ve UYGULANAN TESTLER

4.1 Kullanılan Malzemeler

Bu çalışmada farklı balpeteği kalınlığı, hücre genişliği, geometrisi ve iki farklı termoset yapıştırıcı kullanılarak üretilen numunelerin mekanik özellikleri incelenmiştir. Çalışmada kullanılan balpeteği hücre geometrileri; altıgen, OX balpeteği geometrileridir ve Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Ayrıca balpeteği özellikleri Tablo 4.1’de listelenmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.1. Hücre Şekilleri (a. Altıgen) (b. OX)

Tablo 4.1 Balpeteği Mekanik Özellikleri

Yüksel Kompozit Kodu	Balpeteği Kalınlığı (mm)	Hücre Genişliği (mm)	Yoğunluk (kg/m ³)	Hücre Geometrisi	L Yönünde		W Yönünde	
					Kayma Mukavemeti (MPa)	Kayma Modülü (MPa)	Kayma Mukavemeti (MPa)	Kayma Modülü (MPa)
B1	19,05	4,8	35,12	HX	1,07	52,5	0,45	20,62
B2	3,18	4,8	50,7	OX	0,91	21,78	1,08	41,54
B3	6,25	3,2	50,13	HX	1,26	45,82	0,72	30,6
B4	12,7	4,8	32	HX	0,88	35,42	0,41	14

Numune üretiminde alt ve üst yüzeylerde 0° karbon prepeg, malzemeler kullanılmıştır. Numune üretiminde kullanılan prepeg malzemenin mekanik özellikleri Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2. Karbon Prepreg Mekanik Özellikleri

Yoğunluk (kg/m ³)	Çekme Mukavemeti (Mpa)	Çekme Modülü (Gpa)
1,76x10 ⁻⁶	4426,4	234,4

Yapıştırıcı filmin üretilen mekanik özellikler üzerindeki etkisi incelemek için iki farklı film kullanılmıştır. Bu filmlerin mekanik özellikleri Tablo 4.3’de verilmiştir.

Tablo 4.3. Yapıştırıcı Film Mekanik Özellikleri

Yapıştırıcı Kodu	Sandviç Peel @23°C Nm/m)	90 Deg M/M Peel @23°C (N/mm)
Y1	137	13,8
Y2	108,9	15,6

4.2 Sandviç Kompozit Üretimi

Numunelerin hazırlanması sırasında otoklav yöntemi kullanılmıştır. Numunelerin üretime hazırlık aşamasında ayırıcı madde (release agent), ayırıcı film (release film), havalandırma bezi, vakumlu torba filmi (vacuum bagging film) ve sızdırmazlık bandıdır.

Ayırıcı Madde (Release Agent): Laminatın kalıp yüzeyine yapışmasını engellemek için kullanılan kimyasal maddedir [62].

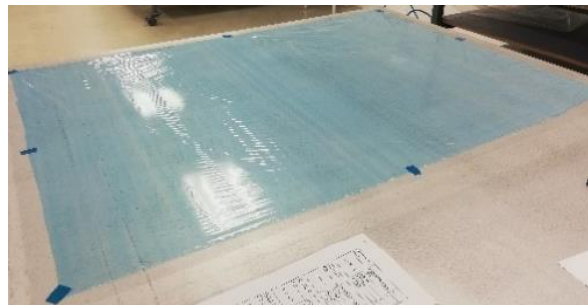
Ayırıcı Film (Release Film): Laminatla birleşmeyecek şekilde işlenmiş ince bir plastiktir. Üzerinde matris malzemesinin geçmesine izin veren küçük delikler vardır [62].

Havalandırma Bezi (Breather): Soyma katından ve ayırma filminden geçen laminattan fazla reçineyi toplamak için kullanılan kalın bir kumaş tabakasıdır. Sıkışmış uçucu gazları azaltır. Aynı zamanda düzgün vakum dağılımı sağlar [62].

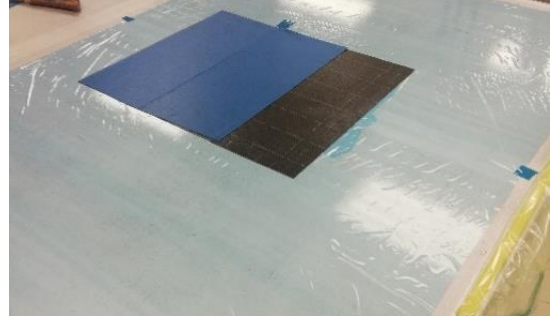
Vakumlu Torbalama Filmi (Vacuum Bagging Film): Laminatı izole etmek için kullanılan nispeten kalın bir plastik tabakadır. Gerekli vakum ortamını sağlar [62].

Sızdırmazlık Bandı: Macun benzeri yapışkan bir malzemedir. Vakumlu torbalama filmini kalıp yüzeyine yapıştırmak için kullanılır ve hava sızıntısını önler [62].

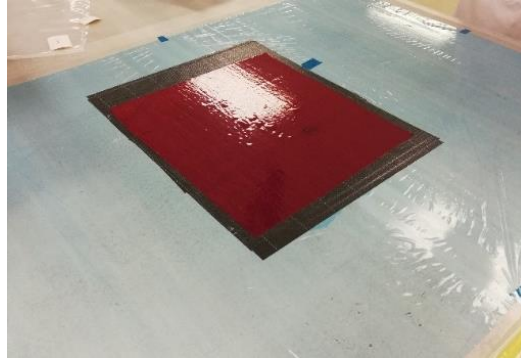
Üretilen numenelerde alt ve üst tabakada üç kat 0° karbon prepreg tabaka, prepreg ve balpeteği tabakası arasında yapıştırıcı film tabaka kullanılarak sandviç numuneler oluşturulmuştur. Numune hazırlığında ilk olarak numunenin üretileceği tablanın yüzey temizliği yapılır. Ardından tablanın üzerine Şekil 4.2’de görüldüğü gibi ayırıcı film tabaka ve sızdırmazlık bantları yapıştırılarak işlemlere başlanır. Film tabaka üzerine Şekil 4.3 ve Şekil 4.4 ’de görüldüğü gibi numune de kullanılacak olan prepreg tabakalar ve yapıştırıcı film tabaka eklenerek numunenin taban kısmı tamamlanmış olur. Bu kısmın üzerine Şekil 4.5’de görüldüğü gibi balpeteği çekirdeğin ayrılma yönü (ribbon direction) belirlenerek yapıştırıcı film üzerine yapıştırılır. Bu aşamadan sonra numunenin üst tabakası hazırlanmaya başlanır. Üst tabaka için balpeteği çekirdek üzerine Şekil 4.6’da görüldüğü gibi tekrar yapıştırıcı film tabaka yapıştırılır. Bu aşamadan sonra Şekil 4.7’deki gibi hava alma bezi serilerek numuneye 6 barda 10 dk boyunca vakumlama işlemi yapılır. Bu işlem sırasında sistemde hava kaçağı olup olmadığı belli aralıklarla kontrol edilir. Vakumlama işlemi tamamlandıktan sonra Şekil 4.8’deki gibi tekrar karbon prepreg tabakaların serim işlemi yapılır. Serim işlemi tamamlandıktan sonra numunelerin her kenarına Şekil 4.9’daki gibi otoklav işlemi sırasında kenarlarda çökme olmaması için destek lamaları sabitlenir, bu lamaların vakum torba filmini kesmemesi için Şekil 4.10’da görüldüğü gibi hava alma bezi ile tüm kenarları kapatılır ve tabla üzerine termokapl yerleştirilir. Numune tablası vakum torbası ile kapatılarak Şekil 4.11’de görüldüğü gibi 8 bar da 10 dk boyunca vakumlama işlemi yapılır. Belirli aralıklarla sistem içindeki hava basıncı ölçülür. 200 °C’de 8 saat boyunca otoklav işlemi yapılır. Otoklav işlemi tamamlana numune Şekil 4.12’de görülmektedir.



Şekil 4.2. Ayırıcı Film Tabaka Katmanı



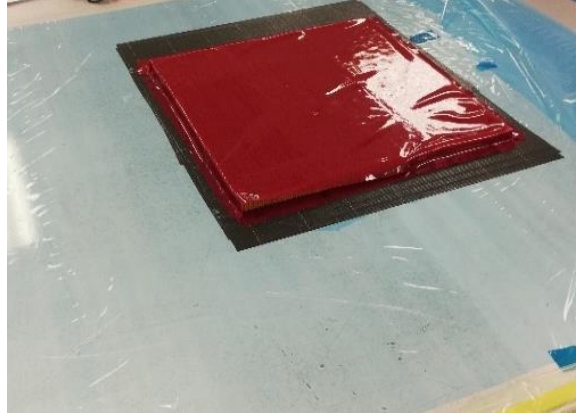
Şekil 4.3. Prepreg Tabaka Serimi



Şekil 4.4. Yapıştırıcı Film Tabaka Serimi



Şekil 4.5. Balpeteği Serimi



Şekil 4.6. Yapıştırıcı Film Tabaka Serimi

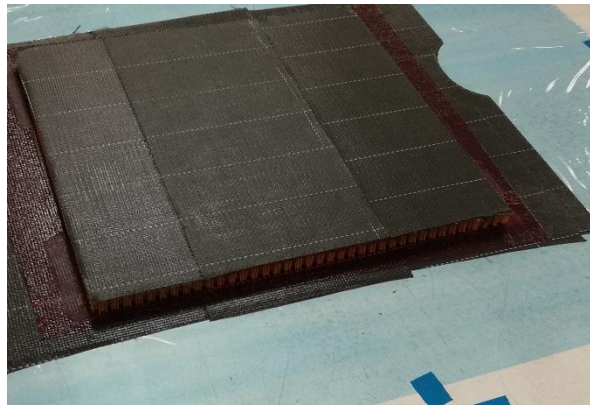


a.

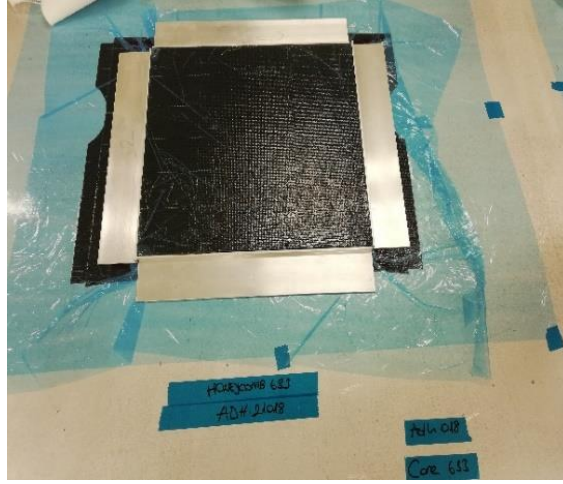


b.

Şekil 4.7. Vakumlama İşlemi (a. Hava Alma Bezi Serimi b. Vakumlama İşlemi)



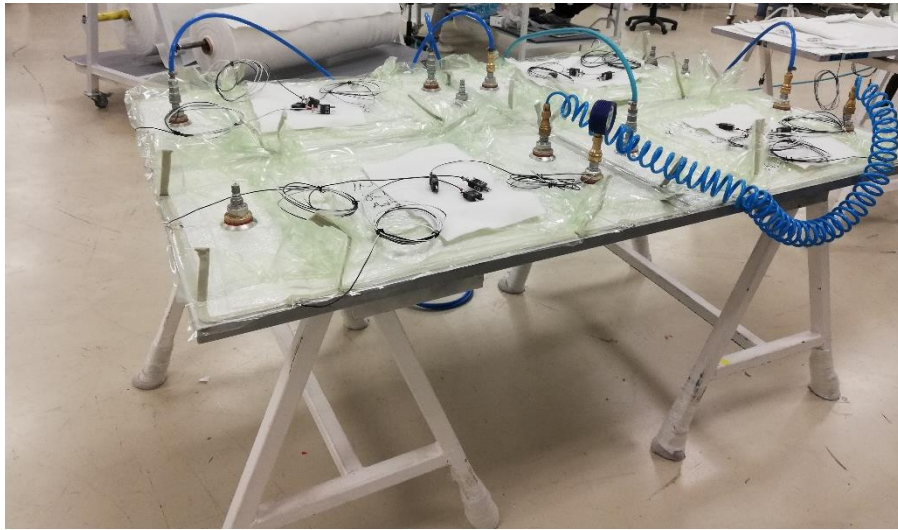
Şekil 4.8. Üst Tabaka Prepreg Tabaka Serimi



Şekil 4.9. Destek Sabitlemesi



Şekil 4.10. Hava Alma Bezi Serilmesi ve Isılçift (Termokapl) Montajı

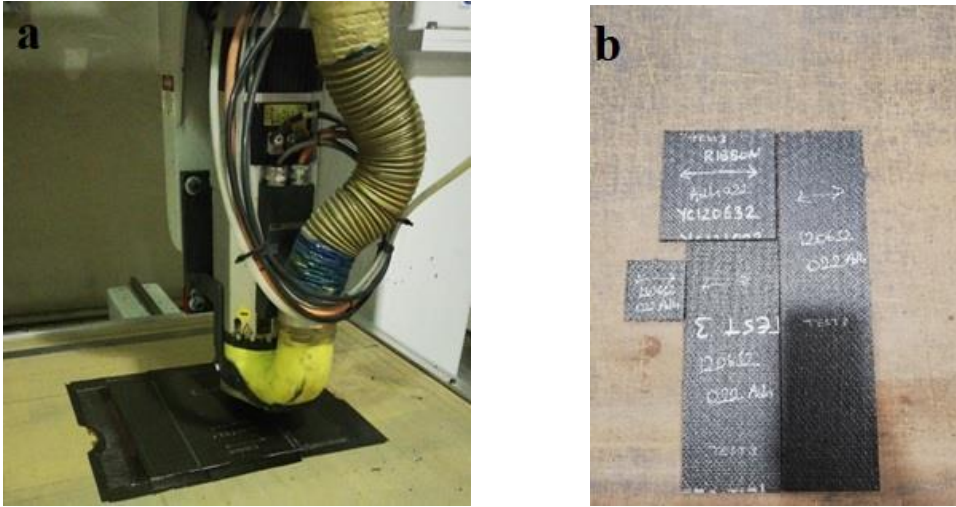


Şekil 4.11. Vakumlama İşlemi



Şekil 4.12. Otoklav İşlemi Tamamlanmış Numune

Otoklav işleminden sonra numuneler CNC de belirlenen boyutlara göre kesme programı oluşturularak kesim işlemi yapılır. Kesim işlemleri Şekil 4.13’de görülmektedir. Tablo 4.4’de görüldüğü gibi yapılacak her testte kullanılan numune boyutlarına göre kesim işlemi yapılmıştır. Numune özellikleri ve kodları Tablo 4.1 ve Tablo 4.5 ‘de verilmiştir



Şekil 4.13. Numune Kesim İşlemleri (a. Numune Kesme İşlemi ve b. Belirlenen Ölçülere göre Kesilen Numuneler)

Tablo 4.4. Numune Boyutları

	En (mm)	Boy (mm)
Dört Nokta Eğme	80	205
Çekme	50	50
Soyma	80	305

Tablo 4.5. Test Numuneleri Numaralandırılması

Numune No.	Balpet eği Kodu	Yapıştırıcı Kodu	Balpete eği Kalınlığı	Hücre Genişliği	Hücre Geometrisi
1	B1	Y2	19,05	4,8	HX
2	B1	Y1	19,05	4,8	HX
3	B2	Y2	3,18	4,8	OX
4	B2	Y1	3,18	4,8	OX
5	B3	Y2	6,25	3,2	HX
6	B3	Y1	6,25	3,2	HX
7	B4	Y2	12,7	4,8	HX
8	B4	Y1	12,7	4,8	HX

Çekme testi çekirdeğin yada oluşturulan sandviç panelin çekirdek ile yapıştırıcı arasındaki gerilim kuvveti değerini belirlemektedir [63]. ASTM C297'ye göre çekirdek hatası, yapıştırıcı kaynaklı hata, yapıştırıcının yapışma hatası ve yüzey hatası olmak üzere dört çeşittir [63]. Test, bir sandviç yapının düzlemine çekme yükü uygulanması ile oluşur [63]. ASTM C297 ye göre çekme testlerinde dört tür hata çeşidi bulunmaktadır [63]. Çekirdek hatası; test sonucunda çekirdek parçalarının yapıştırıcıda yada blokta kaldığı hata türüdür [63]. Yapıştırıcı kaynaklı hata; yüzeyi çekirdeğe veya bloğu çekirdeğe bağlamak için kullanılan yapışkan tabakadaki hata türüdür [63]. Bu hata türünde yapıştırıcı çekirdek üzerinde ve yüzeyde kalmaktadır [63]. Yapıştırıcının yapışma hatası; yapıştırıcının çekirdekten, yüzeyden ya da bloktan ayrılmaması hatasıdır [63]. Yapıştırıcının çekirdek ya da yüzey üzerinde kalmamasıdır [63]. Yüzey hatası ise kompozit yüzey tabaka katmanlarının ayrılma hatasıdır [63].

Çekme testi için ASTM C297 de belirtildiği gibi 50x50 mm boyutunda numuneler hazırlanmıştır. Bu numuneler test aparatlarına bağlanmadan önce test aparatlarının yüzeyleri temizlenmiştir. Yapıştırma işlemine başlamadan önce numunelerin alt ve üst yüzeylerine zımparalama işlemi yapılmıştır, zımpara tozlarının temizlenmesi için yüzey aktivatör ile silinmiştir. Ardından Şekil 4.14'de görüldüğü gibi 50 gr Part A Loctite EA 9394 ve 8,5 gr Loctite Part B tartılmıştır ve tartılan yapıştırıcılara karıştırılarak yapıştırıcı hazırlığı

tamamlanmıştır. Bu yapıştırıcılar oda sıcaklığında kürlenmiş ve yüksek mukavemete sahip yapıştırıcılardır. Genellikle boşluk doldurma ve yapıştırma işlemlerinde kullanılır. Yapıştırma işlemine başlamadan önce numunelerin dış kenarlarına

Şekil 4.15’de görüldüğü gibi ayırıcı film yapıştırılmıştır. Ayırıcı film taşan yapıştırıcının fiber ve çekirdek tabakaya yapışmaması sağlamaktadır. Şekil 4.16’daki gibi numunelere hazırlanan yapıştırıcılar uygulanmıştır ve test aparatları ile birleştirilmiştir. Hazırlanan numunelerin kaymaması için, numuneler Şekil 4.17’de görüldüğü gibi ayırıcı film ile sıkıştırılır ve bantlama işlemi yapılarak Şekil 4.18’de görüldüğü gibi 65 °C fırında 90 dk. kürlenme işlemine tabi tutulur.

ASTM C297’ye göre testte elde edilen maksimum kuvvet değeri 3-6 dk arasında elde edilmelidir [63]. ASTM C297’ye göre önerilen test değeri 0,5 mm/ dk’dır[63].

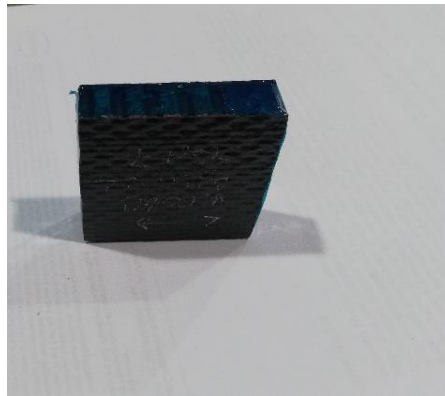


a.

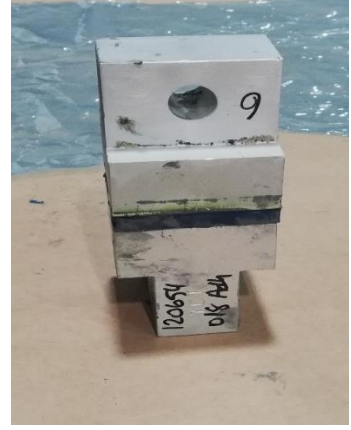
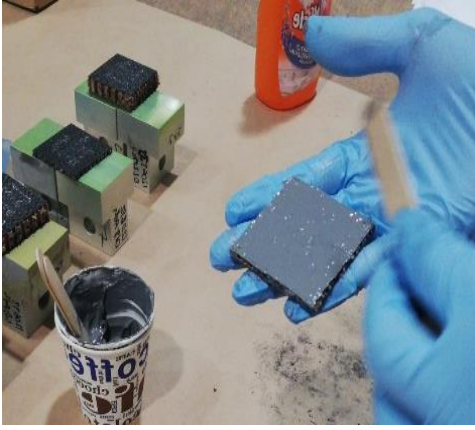


b.

Şekil 4.14. Yapıştırıcı Hazırlanması (a. Part A Loctite EA 9394, b. Loctite PartB EA 9394)



Şekil 4.15. Numune Kenarlarının Bantlanması



Şekil 4.16. Numunelere Yapıştırıcıların Sürülmesi ve Birleştirilmesi



Şekil 4.17. Test Numunelerinin Aparat ile Birleştirilmesi

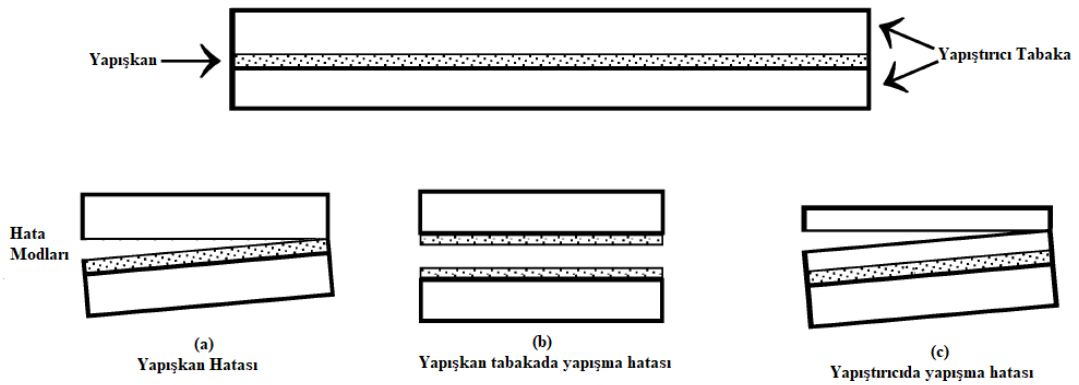


Şekil 4.18. Kürleme

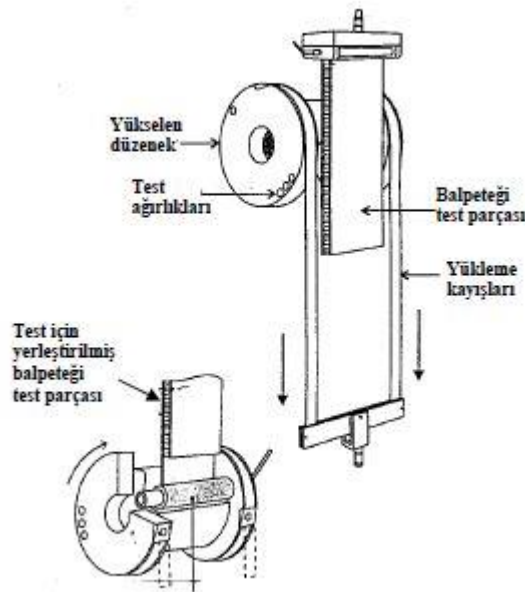
Soyma testi; yapışkan bağların soyma direncinin belirlenmesinde kullanılır [64]. Yapılan araştırmalara göre soyma testinin üç hata modu bulunmaktadır. Bunlar yapışkan

hatası, yapıştırıcı tabaka hatası ve kompozit tabakadaki hatadır [57]. Yapışkan hatası; yapışkan tabaka ve yapıştırıcılardan biri arasında oluşan yapışma hatasıdır [65]. Yapıştırıcı tabaka hatası; arayüzeyde değil yapışkan katmanında görülen bir hatadır, yapışkan o kadar kuvvetlidir ki hata yapıştırılan katmanlarda meydana gelir [57] [65]. Şekil 4.19’da yapışkan ve yapıştırıcı hata modları görülmektedir. Kompozitin laminat içi başarısızlığında da yapışkan iyi yapışma gösterir, çünkü başarısızlık arayüzeyde değil kompozit yapıştırıcı içinde yapışıktır. Ayrıca, bu tip bir hata, kompozit yapıştırıcının laminat içi mukavemetinin yapıştırıcının mukavemetinden daha düşük olduğunu da gösterir.

Yapılacak olan soyma testi için numuneler ASTM D1781’de belirtildiği gibi numunenin alt ve üst kısmından 25 mm kesme işlemi yapılır [64]. Şekil 4.20 ve Şekil 4.21’de numunenin soyma test cihazına bağlantısı gösterilmiştir. Şekil 4.22 da kullanılacak olan test numunesi ve test için gerekli olan kesim yer almaktadır.



Şekil 4.19. Yapışkan ve Yapıştırıcı Hata Modları [65]



Şekil 4.20 Soyma Test Düzenegi [5]



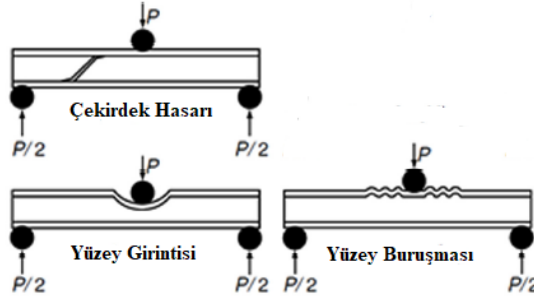
Şekil 4.21. Soyma Testi Hazırlığı



Şekil 4.22. Soyma Test Numunesi

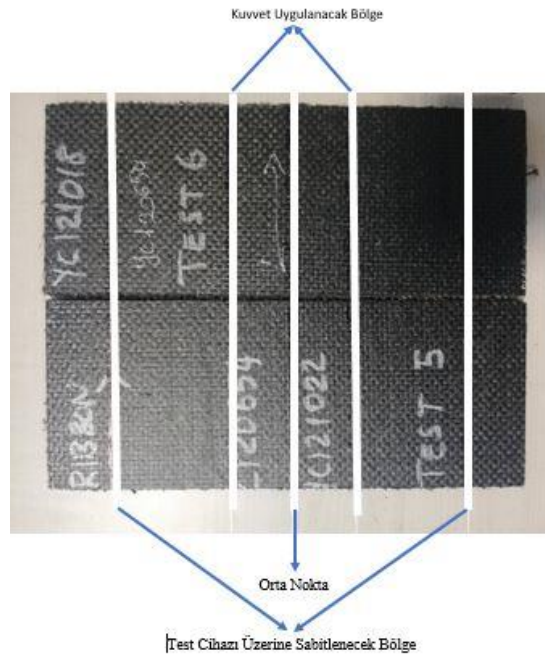
Eğme testleri malzemelerin mukavemet değerlerini belirlemek için kullanılmaktadır [66]. Yapılan araştırmalara göre üç hata modu görülmektedir[67]. Bunlar; yüzey buruşması, çekirdek hasarı, yüzey girintisidir [67]. Yüzey buruşması; sıkıştırma yüzeyinde değişiklik görülür bu değişiklik ise eğme testlerinde içe ve dışarı doğru buruşmayı gösterir [67]. Buruşma, elastik bir süreklilik olan çekirdek tarafından desteklenen sıkıştırma yüzünün burkulması olarak görülebilir [67]. Çekirdek hasarı; maksimum kesme gerilimi çekirdek malzemenin kritik değerine (kesme mukavemeti) ulaştığında hata oluşur [67]. Ayrıca çekirdek öncelikle uygulanan kesme yükünü taşır [67]. Yüzey girinti hatası; uygulanan yükün küçük bir alana dağıtıldığı durumlarda, sandviç yapının baskın bir hata modudur [68]. Bu koşullar altında, sandviç konstrüksiyonun çekirdeğine yüklenen kaplamada önemli lokal

deformasyon meydana gelir ve bu da yüksek lokal stres konsantrasyonlarına neden olur[68]. Yüzey buruşması, çekirdek hasarı ve yüzey girintisi hataları Şekil 4.23’de gösterilmiştir [69].

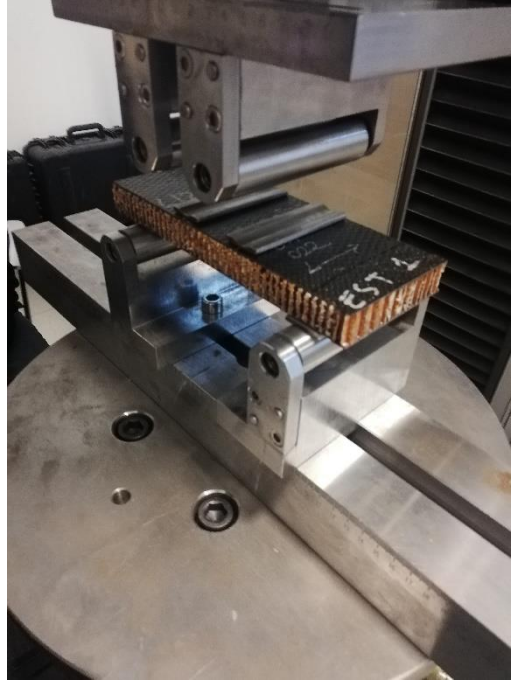


Şekil 4.23. Dört Nokta Eğme Testi Hata Türleri [69]

Yapılacak olan dört nokta eğme testi için numunenin cihaz üzerine yerleştirilecek olan noktaları ve numunenin üzerinde basma uygulanacak olan noktalar işaretlenmiştir. Bu işaretleme işleminde ilk olarak parçanın orta noktası belirlenmiştir. Bu noktanın 25 mm sağ ve soluna kuvvetin uygulanacağı noktalar; orta noktanın 76 mm sağ ve soluna da numunenin cihaz üzerine yerleştirilecek olan noktaları işaretlenmiştir. Bu noktalar Şekil 4.24’de gösterilmiştir. Şekil 4.25’de ise numunelerin test cihazına yerleştirilmesi gösterilmiştir. ASTM C393’e göre maksimum yük 3-6 dk arasında kaydedilmelidir ve denemeler sonucu standarda göre istenen değer 0.75 mm/dk hızda elde edilmiştir [70].



Şekil 4.24. Dört Nokta Eğme Testindeki Noktalar



Şekil 4.25. Numunelerin Dört Nokta Eğme Test Cihazına Yerleştirilmesi

Test türleri ve numune boyutlarına göre ağırlıklar Tablo 4.6'da yer almaktadır. Yapılan testlerde balpeteği geometrisi, kalınlığı, hücre genişliği ve yapıştırıcıların etkilerinin incelenmiştir. Geometri etkisi için 1 ile 3 ve 2 ile 4, kalınlık etkisi için 1 ile 7 ve 2 ile 8, kalınlık ve hücre genişlik etkisi için ise 5 ile 7 ve 6 ile 8 numunelerinin test sonuçları karşılaştırılmıştır. Balpeteği ve OX (Over Expanded) geometri türlerinin mekanik özellikler üzerindeki etkilerini incelemek için 1 ile 3 ve 2 ile 4, balpeteği kalınlığının mekanik özellikler üzerindeki etkilerini incelemek için 1 ile 7 ve 2 ile 8 numaralı numunelerin test sonuçları karşılaştırılmıştır. Balpeteği kalınlığı ve hücre genişliğinin birlikte değişken olarak kullanıldığında mekanik özellikler üzerindeki etkilerini incelemek için 5 ile 7 ve 6 ile 8 karşılaştırılmıştır. Elde edilen bu sonuçlara göre hücre geometrisi, balpeteği kalınlığı ve hücre genişliği değişkenlerinin etkileri belirlenerek tasarım aşamasında kullanılacak olan balpeteği özelliklerinin belirlenmesini sağlayacaktır. Numune- etki parametre eşleştirilmesi Tablo 4.7'de görülmektedir.

Tablo 4.6. Test Numune Ağırlıkları

Test Adı	Numune No.	Ağırlık (gr)
Dört Nokta Eğme	1- 2	53,2
	3- 4	49,5
	5- 6	39,4
	7- 8	47,6
Çekme	1- 2	7,4
	3- 4	7,2
	5- 6	6,9
	7- 8	7,1
Soyma	1- 2	50,3
	3- 4	37,6
	5- 6	45,4

Tablo 4.7. Etki Parametresi- Numune Eşleştirilmesi

Etki Parametresi	Karşılaştırılacak Numune
Geometri	Numune 1 ile Numune 3
	Numune 2 ile Numune 4
Balpeteği Kalınlık	Numune 1 ile Numune 7
	Numune 2 ile Numune 8
Balpeteği Kalınlık+Hücre Genişliği	Numune 5 ile Numune 7
	Numune 6 ile Numune 8

4.3 Çekme (Flatwise Tensile) Testi

Test numuneleri test cihazına bağlanarak ASTM C297'e göre 0,1 mm/ dk'da test başlatılmış ve numunelerin kopması birlikte sonlandırılmıştır. Şekil 4.26 ve Şekil 4.27'de sırasıyla test numunelerinin bağlantıları ve test sonunda kopmuş numune görülmektedir.

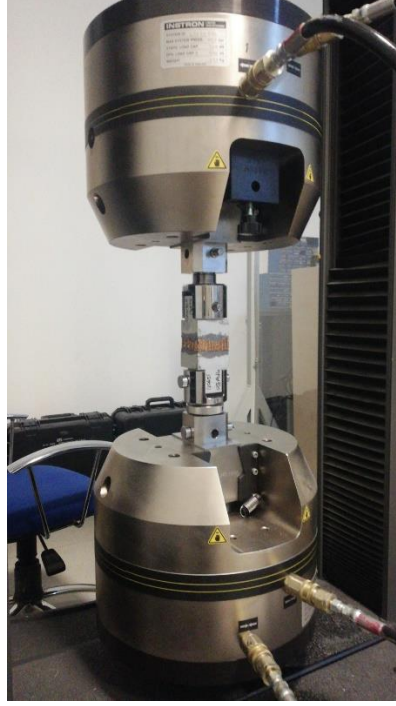
ASTM C 297'ye göre maksimum yük altında çekme gerilmesi Denklem 4.1 de ifade edilmektedir [63];

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (4.1)$$

σ : Çekme mukavemeti

P: Maksimum yük

A: Kesit alanı



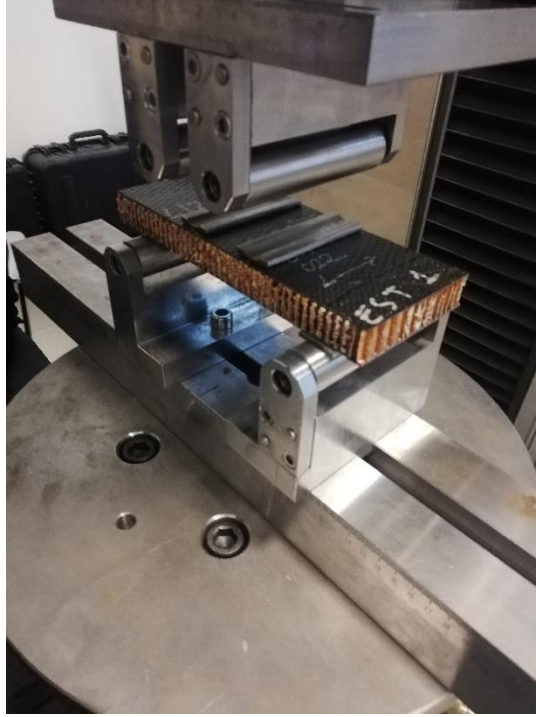
Şekil 4.26. Çekme Numunesinin Test Cihazına Bağlantısı



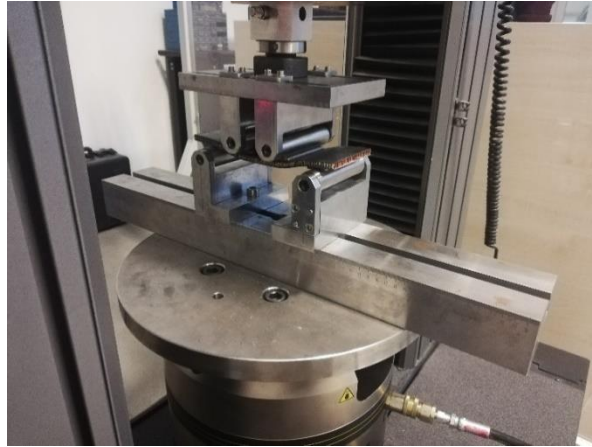
Şekil 4.27. Çekme Testi Sonlandırılması

4.4 Dört Nokta Eğme (Four Point Bending) Testi

Test INSTRON 8805 model cihaz kullanılarak ve ASTM C393 standardına göre yapılmıştır. Standartta belirtildiği gibi 0,75 mm/dk da gerçekleştirilmiş ve maksimum yük 3-6 dk arasında kaydedilmiştir. Numuneler hazırlık aşamasında belirlenen noktalar referans alınarak test cihazına yerleştirilmiştir. Numune yerleşimi Şekil 4.28’de görülmektedir. 0,75 mm/dk test değeri ve 80x200 mm numune boyutu değerleri test cihazının programına girildikten sonra test başlatılmış ve yük-uzama grafiği sabit hale geldiğinde test sonlandırılmıştır. Test sırasında alınan bir görüntü Şekil 4.29’da verilmiştir.



Şekil 4.28. Dört Nokta Eğme Test Cihazı ve Test Numunesi



Şekil 4.29. Dört Nokta Eğme Testi

ASTM C393'e göre yüzey eğilme gerinimi, çekirdek kayma gerilmesi ve uzama sırasıyla denklem 4.2, 4.3 ve 4.4'de verilmiştir [70].

$$\sigma_{eğme} = \frac{P_e L}{4t(d + c)b} \quad (4.2)$$

$$\tau = \frac{P_e}{(d + c)b} \quad (4.3)$$

$$\Delta = \frac{11P_e L^3}{768D} + \frac{P_e L}{8U} \quad (4.4)$$

$\sigma_{eğme}$: Yüzey eğme gerilmesi

P_e : Dört nokta eğme testinde uygulanan yük

L: Açıklık

D: Bükülme direnci

U: Panel kesme sertliği

τ : Balpeteği kayma gerilmesi

d: Sandviç kompozit kalınlığı

c: Balpeteği kalınlığı

b: Sandviç kompozit genişliği

4.5 Soyma (Peeling) Testi

Soyma testleri ASTM D1781'e göre yapılmıştır. ASTM D1781'e göre soyma torku Denklem 4.5'de yer almaktadır.

$$\bar{T} = [(r_o r_i) * (F_p - F_o)]/W \quad (4.5)$$

\bar{T} : Ortalama soyma torku

r_o : Test cihazının dış çapı

r_i : Test cihazının iç çapı

F_p : Yapıştırıcı tabakanın soymaya ve direnç torkuna karşı gelen kuvveti

F_o : Test cihazının direnç tork kuvveti

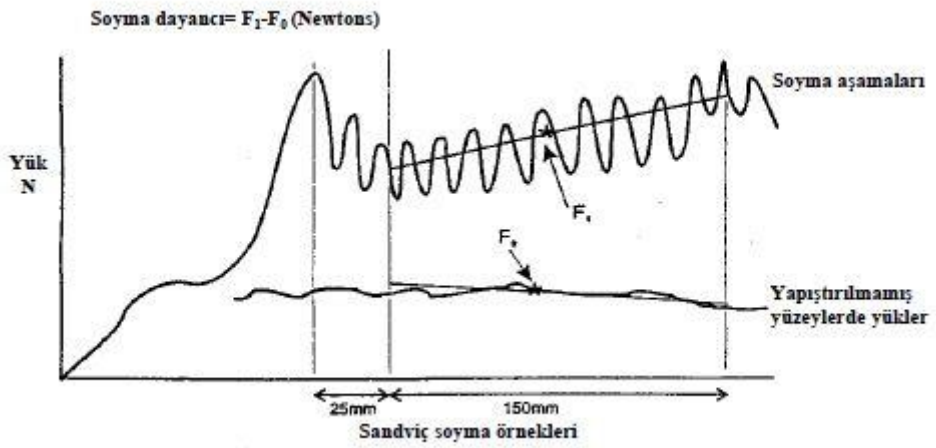
W: Numune genişliği

Soyma testi INSTRON 8805 cihazında yapılmıştır. Test numuneleri ASTM D1781 standardında verilen 75 mm x 300 mm ölçülerine göre hazırlanmış ve standartta belirtilen 25 mm lik kesimleri yapılarak test aparatlarına bağlanmıştır. Test numuneleri cihaza yerleştirildikten sonra cihaz çalıştırılmış ve kuvvet uygulanmaya başlanmıştır. Şekil 4.30'da

numunelerin cihaza bağlanması ve test hazırlıkları ve Şekil 4.31’de soyma (peeling) test grafik aşamaları verilmiştir [5].



Şekil 4.30 Soyma (Peeling) Test Düzenegi



Şekil 4.31 Soyma Test Aşamaları [5]

5. BULGULAR ve TARTIŞMA

Yapılan çalışmalarda ASTM C393'e göre dört nokta eğme testi, ASTM C297'e göre çekme testi, ASTM D1781'e göre soyma testleri yapılmıştır. Yapılan testlerde kullanılan balpeteğinin geometrisi, kalınlığı, hücre genişliği ve oluşturulan kompozit yapıda kullanılan yapışkanın etkileri incelenmiştir. Etki parametresini incelemek için karşılaştırılacak olan numune numaraları Tablo 4.7'de yer almaktadır.

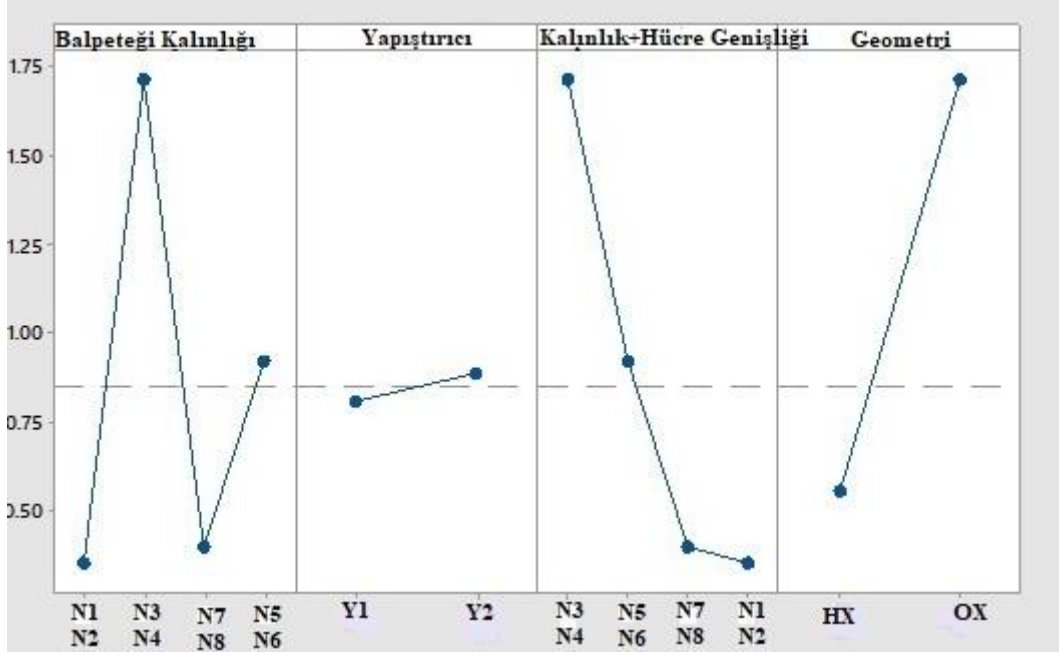
5.1 Dört Nokta Eğme Test Sonuçları

ASTM C393 e göre yapılan 0,75 mm/dk hızla gerçekleştirilen dört nokta eğme testi sonuçları Tablo 5.1'de yer almaktadır. Elde edilen sonuçlara göre balpeteği kalınlığı, geometri ve hücre genişliğinin dört nokta eğme testi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen maksimum yük, eğilme gerilmesi, kırılma anındaki uzama ve eğilme gerinimi

Tablo 5.1'de ve etki parametrelerinin gerilim değerindeki farkları ise Şekil 5.1'de görülmektedir.

Tablo 5.1. Dört Nokta Eğme Test Sonuçları

Numune No.	Maksimum Yük (N)	Maksimum Yük Altında Eğilme Gerilmesi (N/mm²)	Kırılma Anındaki Uzama (mm)	Kırılma Anındaki Eğilme Gerinimi (mm/mm)
Test 1	1111,0	0,356	10,036	0,359
Test 2	1083,0	0,350	13,017	0,466
Test 3	1082,0	1,915	9,934	0,059
Test 4	964,2	1,616	10,500	0,063
Test 5	1017,4	0,932	11,884	0,140
Test 6	1008,8	0,916	10,068	0,118
Test 7	929,3	0,402	10,478	0,250
Test 8	887,4	0,398	9,654	0,117



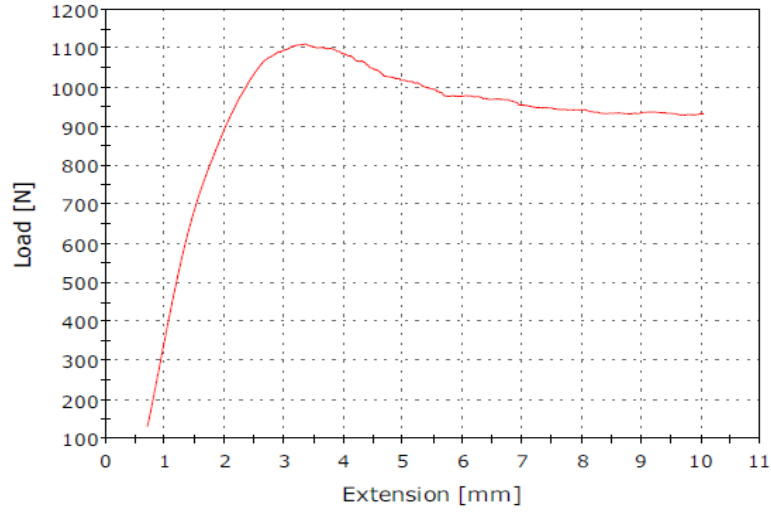
Şekil 5.1 Etki Parametrelerinin Gerilim Değerleri Etkileri

5.1.1 Balpeteği Kalınlık Etkisi

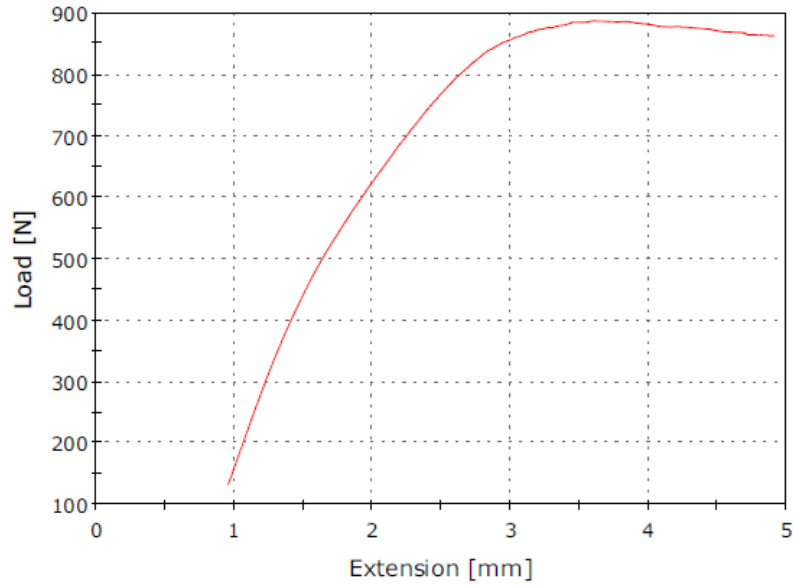
Balpeteği kalınlığının uygulanan maksimum yük ve eğilme gerilmesini incelemek için Numune 1 ile Numune 7 ve Numune 2 ile Numune 8 sonuçları karşılaştırılmıştır. Tüm testlere ait maksimum yük- uzanım eğrileri Şekil 5.2, Şekil 5.3, Şekil 5.4 ve Şekil 5.5’de gerilme- gerinim grafikleri ise Şekil 5.6, Şekil 5.7, Şekil 5.8 ve Şekil 5.9’da yer almaktadır. Test sonuçları incelendiğinde kalınlık arttıkça numune üzerine uygulanan maksimum yük ve eğilme gerilmesinde artış görülmektedir. Numune 1 ve Numune 7 sonuçları karşılaştırıldığında kalınlık artışının maksimum yükte %18 lik, Numune 2 ve Numune 8 sonuçları karşılaştırıldığında ise maksimum yükte %14 lük artış olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar literatürdeki verilerle uyumludur. Balpeteği kalınlığı arttıkça birim alanda artma olmakta ve buna bağlı olarak yapıda hasar meydana getirmek için daha fazla kuvvet ihtiyacı ortaya çıkmaktadır [25]. Artan balpeteği kalınlığı burkulma dayanımını arttırdığı için eğme zorlayan kuvvet değerleri artmaktadır [25]. Ayrıca, Sun ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada kalınlık arttıkça numune üzerine etki eden yükte artış görülmüştür [24]. Xie ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada kalınlık ve elastik modülün artışı ile kompozit yapının enerji emme özelliğinin arttığı görülmüştür[33].

Bunun yanı sıra Numune 1 ile Numune 7 ve Numune 2 ile Numune 8 numuneleri arasında oluşan % 4 lük yük farkı ise balpeteği ve karbon prepreg arasında kullanılan yapıştırıcı tabakadan kaynaklanmaktadır. Yoğunluk ve kayma modülünün artışı ile

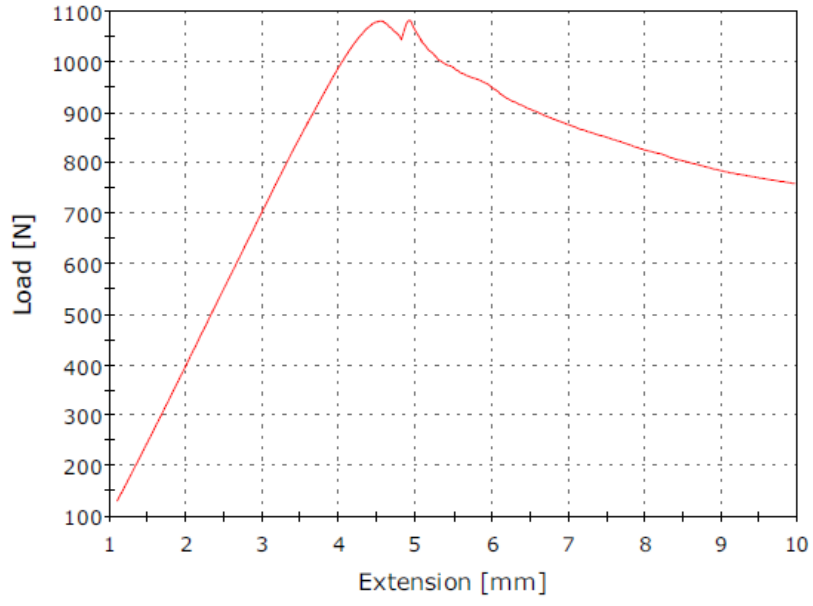
uygulanan yük ve test sırasındaki uzamada artış görülmüştür. Ayrıca Tablo 4.6'da verilen ağırlıklar ile değerlendirildiğinde Numune 1 ve Numune 2 nin 6 gr daha fazla olduğu ve uygulanan yüklerde yaklaşık olarak %20 yük farkı olduğu tespit edilmiştir.



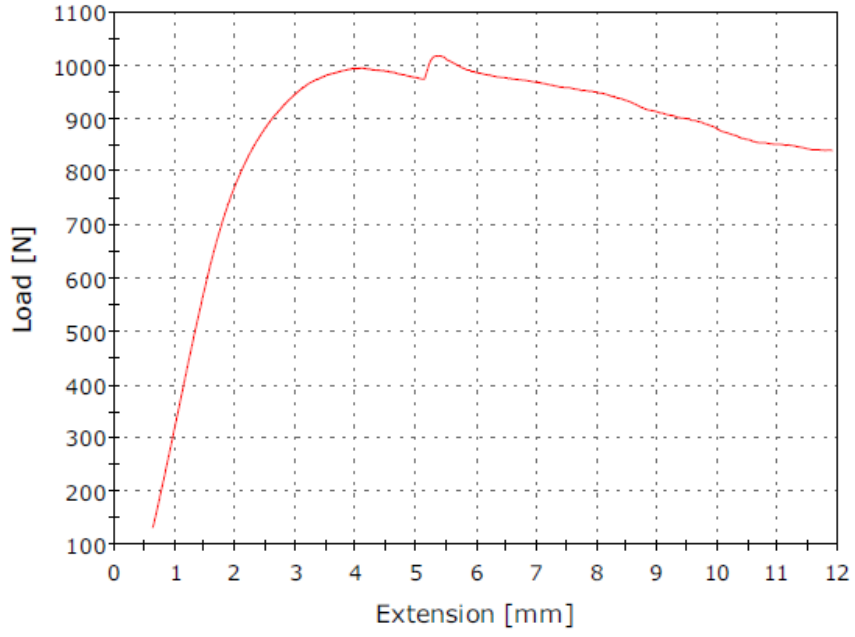
Şekil 5.2.Dört Nokta Eğme Numune 1 Yük- Uzama Grafiği



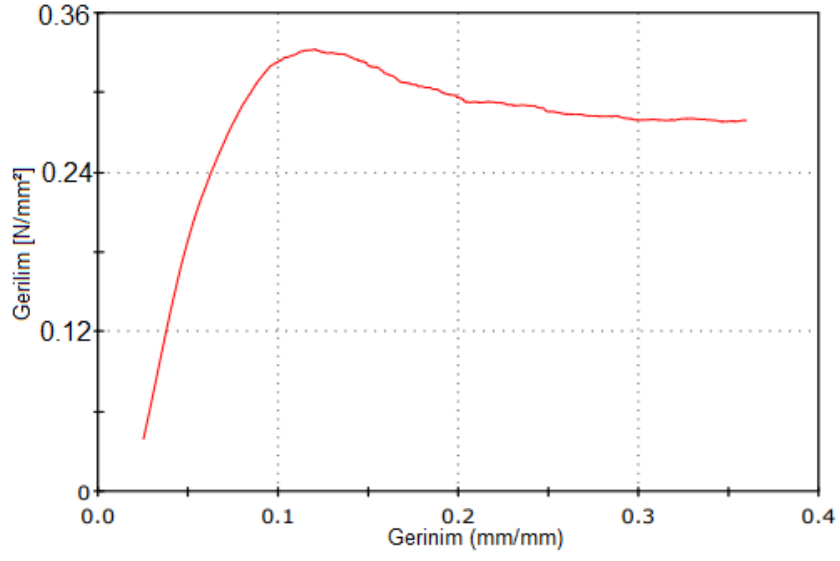
Şekil 5.3. Dört Nokta Eğme Numune 2 Yük- Uzama Grafiği



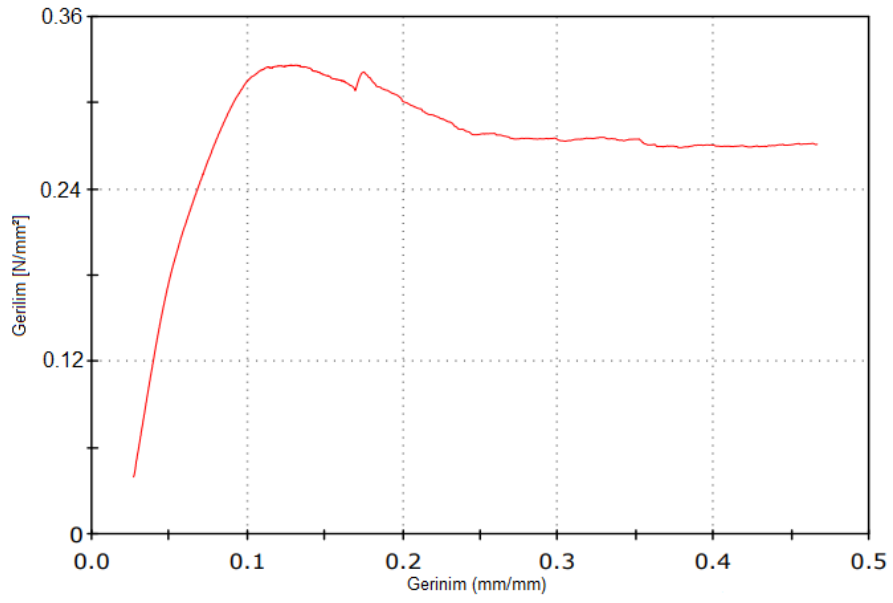
Şekil 5.4. Dört Nokta Eğme Numune 7 Yük-Uzama Grafiği



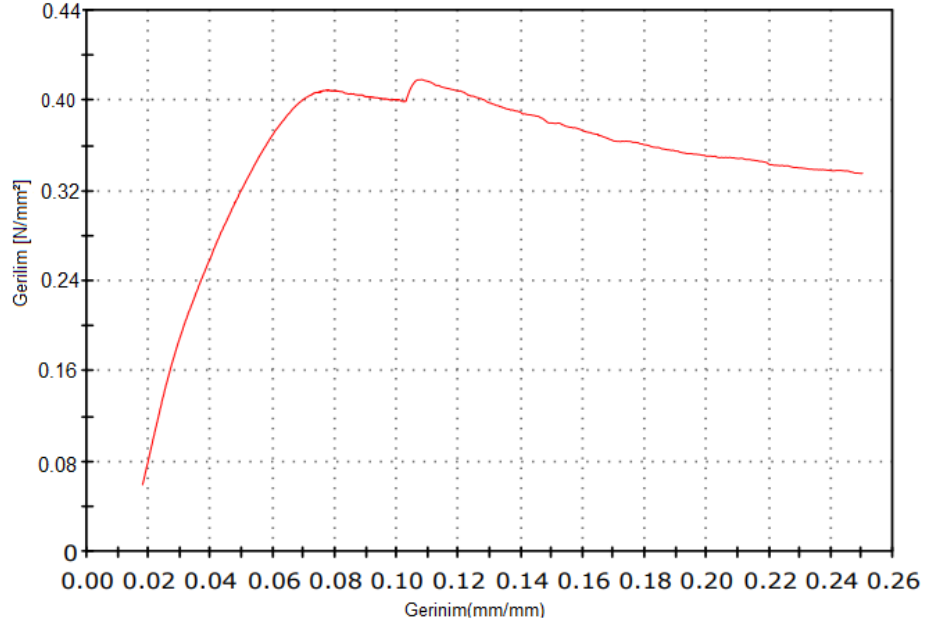
Şekil 5.5. Dört Nokta Eğme Numune 8 Yük-Uzama Grafiği



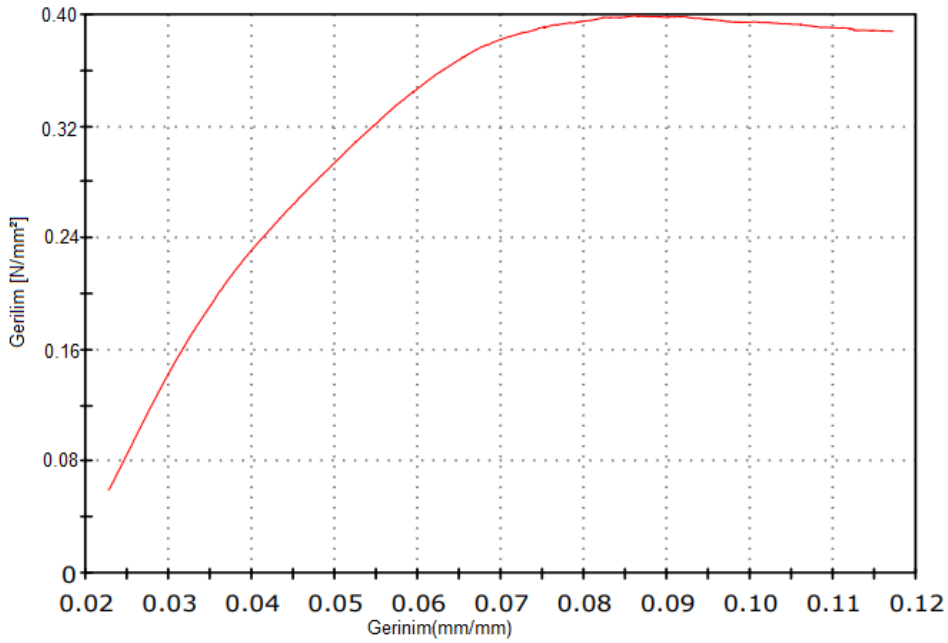
Şekil 5.6 Dört Nokta Eğme Numune 1 Gerilim- Gerinim Grafiği



Şekil 5.7 Dört Nokta Eğme Numune 2 Gerilim- Gerinim Grafiği



Şekil 5.8 Dört Nokta Eğme Numune 7 Gerilim- Gerinim Grafiği



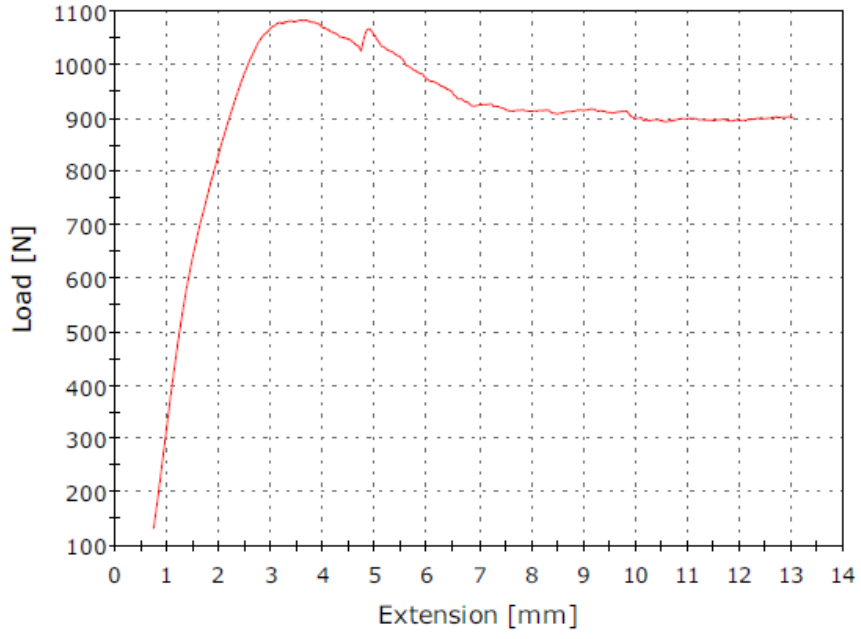
Şekil 5.9 Dört Nokta Eğme Numune 8 Gerilim- Gerinim Grafiği

5.1.2 Balpeteği Kalınlığı ve Hücre Genişliği Etkisi

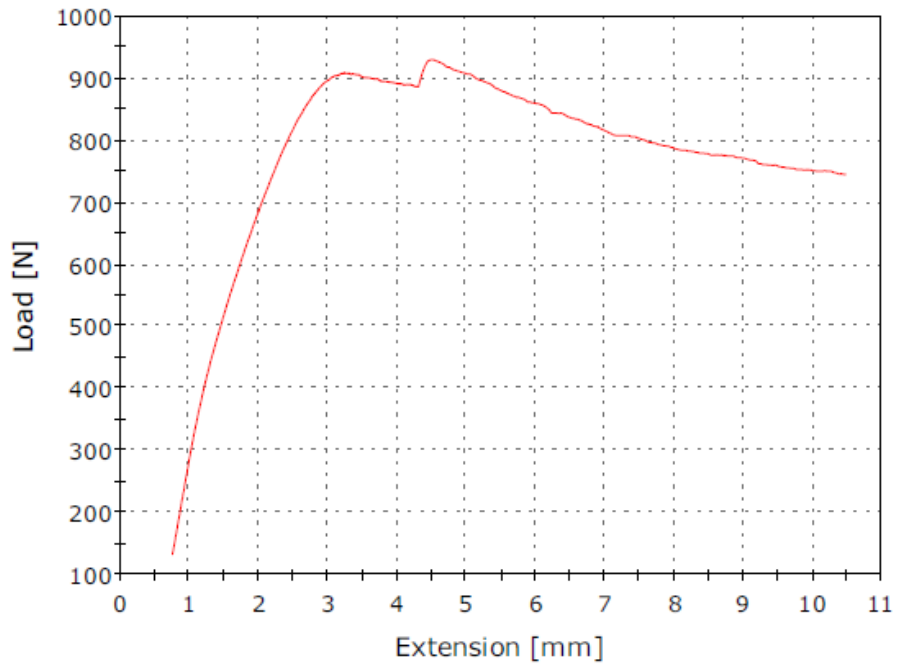
3,2 mm hücre genişliği ve 6,25 mm kalınlığı ile 4,8 mm hücre genişliği ve 12,7 mm kalınlığında iki farklı balpeteği kullanılarak numuneler oluşturulmuştur. Hücre genişliği ve balpeteği kalınlığı etkisini görebilmek için Numune 5 ile Numune 7 ve Numune 6 ile Numune 8 test sonuçları karşılaştırılmıştır. Sonuçta elde edilen eğriler; Şekil 5.4, Şekil 5.5,

Şekil 5.10 ve Şekil 5.11’da yer almaktadır. Numunelere ait gerilim- gerinim grafikleri ise Şekil 5.8, Şekil 5.9, Şekil 5.12 ve Şekil 5.13’de görülmektedir. Yapılan bu testte hücre genişliği aynı kalınlıklar farklı olsaydı kalın olan numuneye uygulanan maksimum yük değeri daha fazla çıkacaktır. Fakat oluşturulan bu numunelerde hem balpeteği kalınlığı hem de hücre genişliği farklıdır. Test sonuçlarına göre hücre genişliği ve balpeteği kalınlığı küçük olan numunelere uygulanan yüklerin daha fazla olduğu görülmüştür. Elde edilen bu sonuçlara göre hücre genişliği ile kalınlık etkisinin karşılaştırılması yapıldığında hücre genişliğinin uygulanan maksimum yükte daha etkili olduğu görülmüştür. Bu testin sonucu olarak hücre genişliği küçüldükçe numune üzerine uygulanan maksimum yükte artış görülmüştür. Aynı şekilde Jen ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmaya göre hücre genişliği küçülürken eğilme yorulmasının arttığı belirtilmiştir [50]. Kullanmış oldukları teoremlerde hücre genişliği ve kayma modülü, yoğunluk ile ters orantılıdır. Bir başka sonuca göre de kayma mukavemeti ile hücre genişliği ters orantılıdır [50]. Bu sonuç, Sahu ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışma ile uyumludur, çalışmada hücre genişliği arttıkça kompozit yapıya uygulanan eğilme mukavemetinde azalma görülmüştür [41]. Bunlara ek olarak hücre genişliği arttıkça yoğunlukta ve kayma modülünde azalma görülmüştür ve bu durumda kayma mukavemetini etkilemiştir[41]. Bir başka çalışmada yine hücre genişliği küçük olan numuneye daha fazla kuvvet uygulandığı görülmüştür [42].

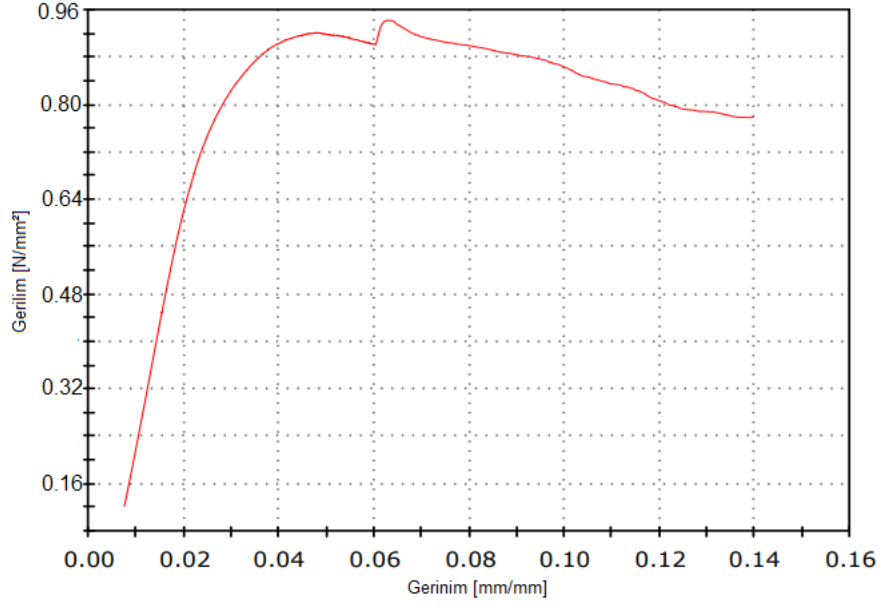
Elde edilen test sonuçları; çekirdek yapıda birim alana düşen hücre sayısı, bağlantı kalınlığı arttıkça çekirdek yapıların eğme, basma, soyma, kesme ve darbe kuvvetlerine karşı mukavemetleri arttığı sonucu ile uyumludur [25]. Ayrıca Tablo 4.6’da verilmiş olan ağırlıklar ile uygulanan yükler karşılaştırıldığında Numune 5 ve Numune 6’nın 8 gr daha hafif olduğu ve test sırasında uygulanan yüklerin ortalama %10 daha fazla olduğu görülmüştür. Günümüzde tasarım mühendislerinin karşılaştığı en önemli problemlerinden biri olan ağırlık parametresi ele alındığında küçük hücre genişliğine sahip olan balpeteklerinin kullanmaları ile yaşanan ağırlık problemini çözülebileceği görülmüştür.



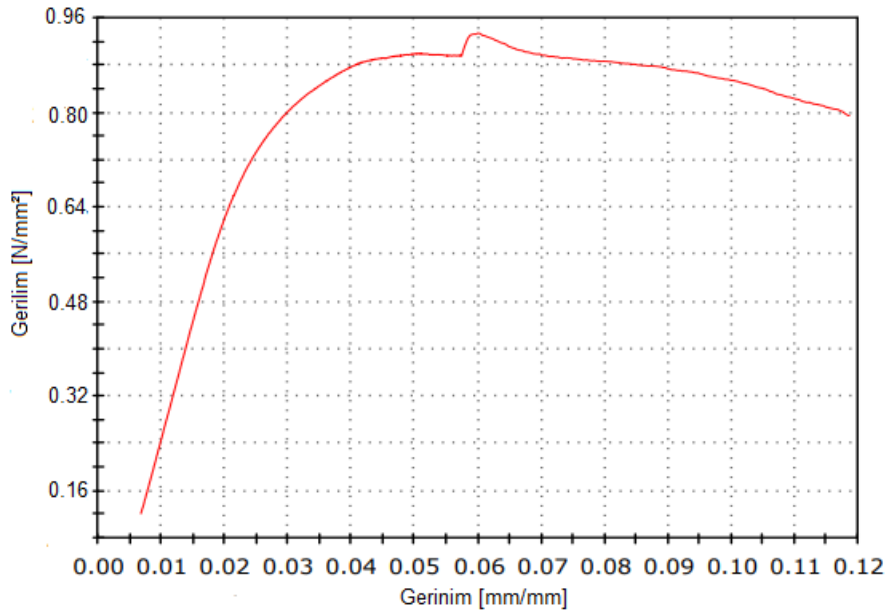
Şekil 5.10. Dört Nokta Eğme Numune 5 Yük- Uzama Grafiği



Şekil 5.11. Dört Nokta Eğme Numune 6 Yük- Uzama Grafiği



Şekil 5.12 Dört Nokta Eğme Numune 5 Gerilim- Gerilim Grafiği



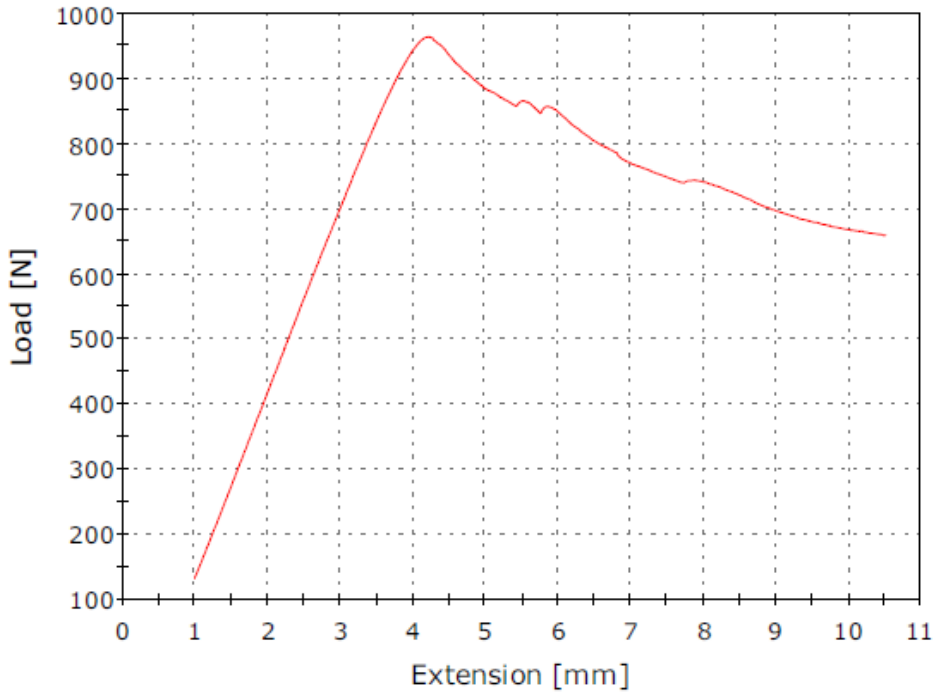
Şekil 5.13 Dört Nokta Eğme Numune 6 Gerilim- Gerilim Grafiği

5.1.3 Geometri Etkisi

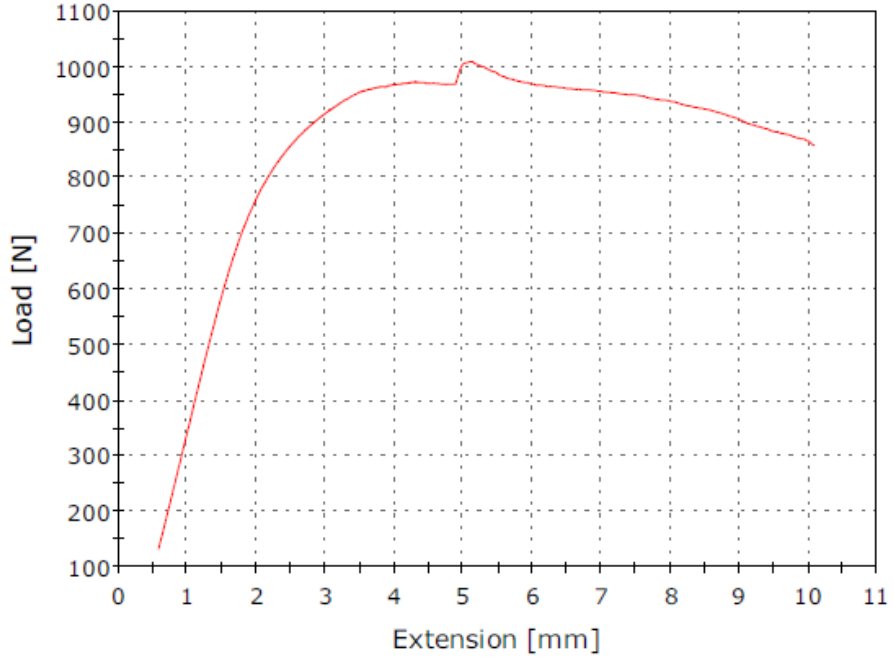
Yapılan dört nokta eğme testleri sonuçlarına göre Numune 1 ile Numune 3 ve Numune 2 ile Numune 4 oluşturulan numunelerde balpeteğinin hücre geometri etkisi incelenmiştir. Yapılan dört nokta eğme test sonuçlarına göre elde edilen değerler Şekil 5.2, Şekil 5.3, Şekil 5.14, Şekil 5.15' da ve gerilim- gerilim grafikleri ise Şekil 5.6, Şekil 5.7, Şekil 5.14 ve Şekil 5.15'de yer almaktadır. Test sonuçları incelendiğinde 4 numune içinde değerlerin birbirine

çok yakın çıktığı görülmüştür. Eğer numuneler aynı hücre geometrisine sahip olsalardı Numune 1- Numune 2 sonuçlarının Numune 3- Numune 4 sonuçlarına göre daha fazla çıkması beklenmektedir. Test sonuçlarına göre OX hücre geometrisi ile oluşturulan numunelerde altıgen hücre şekline göre maksimum yükü arttırdığı tespit edilmiştir. Bu konu ile ilgili yapılmış olan çalışmada yüksek açı/gradyan oranı ile en yüksek spesifik yük, kesilme modülü ve eğilme sertliği sağlamaktadır [54]. Bir diğer çalışmada ise dikdörtgen ve altıgen balpetekleri arasında yapılan karşılaştırmada ise dikdörtgen balpeteklerinin daha yüksek eğilme mukavemeti ve yüzey-çekirdek gerilmesine sebep olmuştur [44].

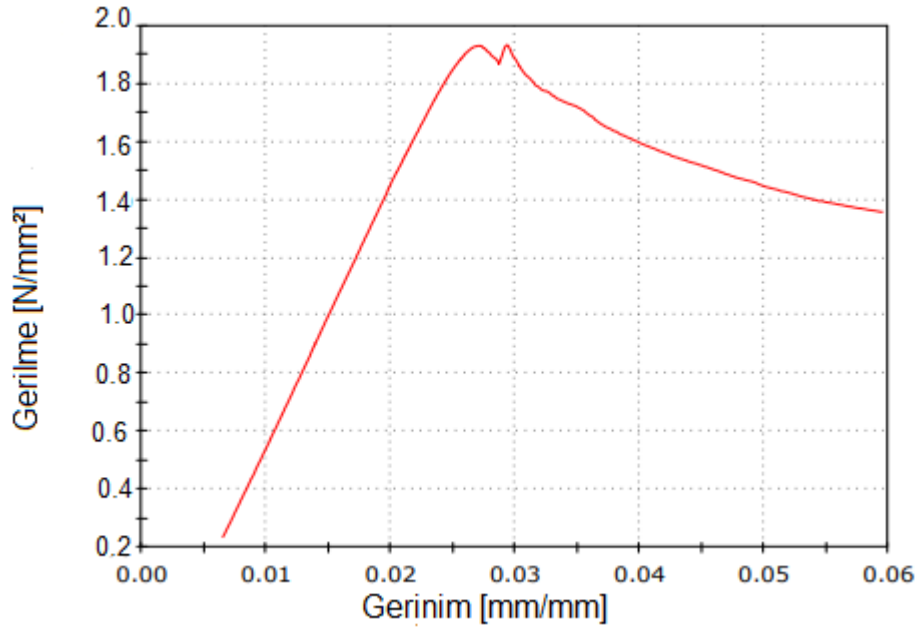
Tablo 4.1’de W yönünde verilen kayma mukavemeti ve kayma modülü ele alındığında Numune 3 ve Numune 4 ün değerlerinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu değer farkı elde edilen sonuçları etkilemektedir. Ayrıca Numune 3 ve Numune 4’ün Numune 1 ve Numune 2’den 4 gr daha hafif olduğu ve test sonuçlarının birbirine çok yakın olduğu elde edilmiştir.



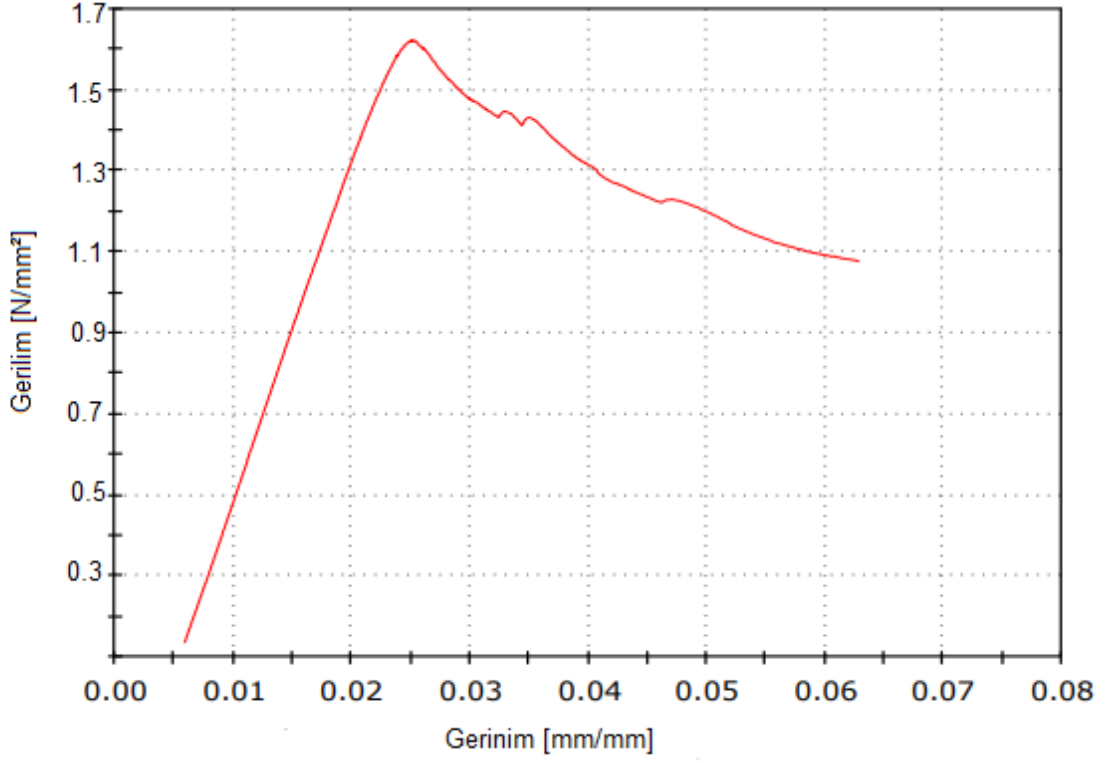
Şekil 5.14 Dört Nokta Eğme Numune 3 Yük-Uzama Grafiği



Şekil 5.15 Dört Nokta Eğme Numune 4 Yük-Uzama Grafiği



Şekil 5.16 Dört Nokta Eğme Numune 3 Gerilim- Gerinim Grafiği



Şekil 5.17 Dört Nokta Eğme Numune 4 Gerilim- Gerinim Grafiği

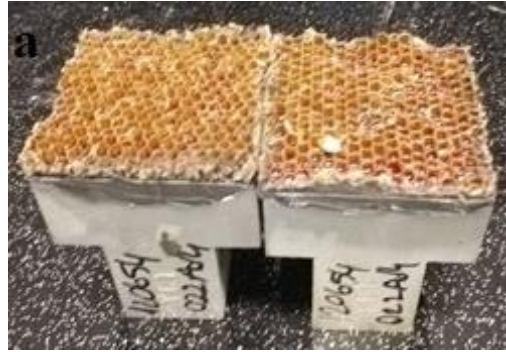
5.2 Çekme (Flatwise Tensile) Test Sonuçları

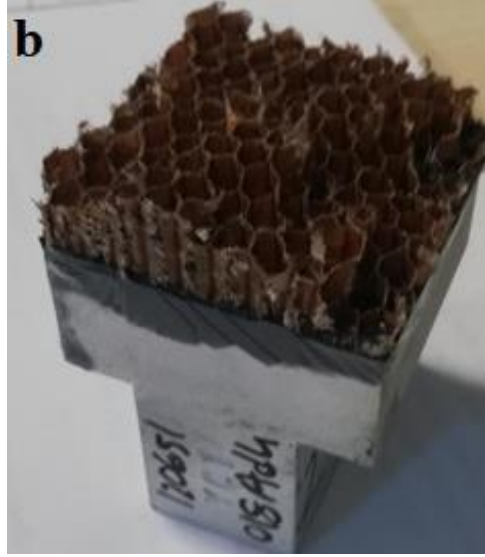
ASTM C297'ye göre yapılan 0.1 mm/dk hız ile yapılan çekme testi sonuçları aşağıdaki Tablo 5.2 de yer almaktadır. Balpeteği kalınlığı, geometri ve hücre genişliğinin çekme testi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Test numuneleri incelendiğinde tüm numunelerde çekirdek hasarı gözlemlenmiştir. Test numuneleri Şekil 5.18'da görülmektedir. Çekme test sonucuna ait maksimum yük ve çekme gerilmesi değerleri

Tablo 5.2'de ve etki parametrelerine göre oluşturulan çekme gerilmesi grafiği Şekil 5.19'da verilmiştir.

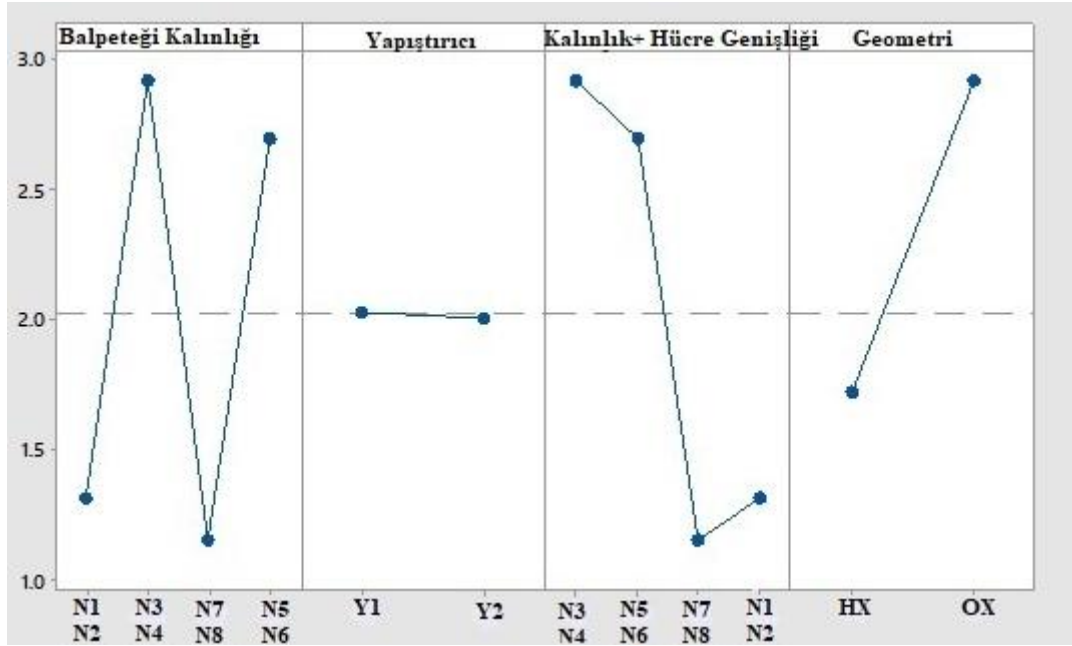
Tablo 5.2. Çekme Test Sonuçları

Numune No.	Maksimum Yük (N)	Maksimum Yük Altında Çekme Gerilmesi (MPa)
Numune 1	3320	1,328
Numune 2	3255	1,302
Numune 3	7234	2,893
Numune 4	7335	2,934
Numune 5	6711	2,684
Numune 6	6771	2,708
Numune 7	2822	1,128
Numune 8	2948	1,179





Şekil 5.18. Çekme Test Numuneleri



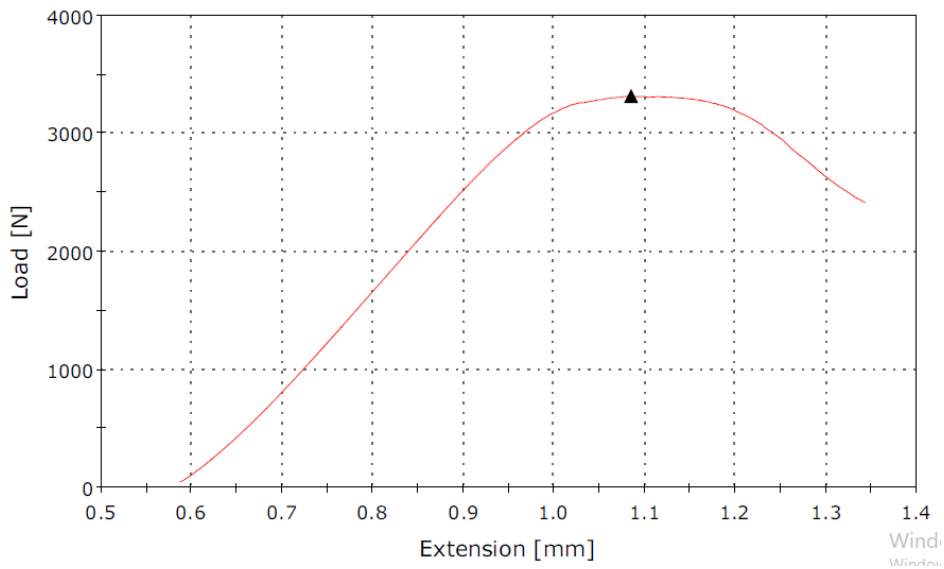
Şekil 5.19 Etki Parametrelerine Göre Çekme Gerilmesi

5.2.1 Balpeteği Kalınlık Etkisi

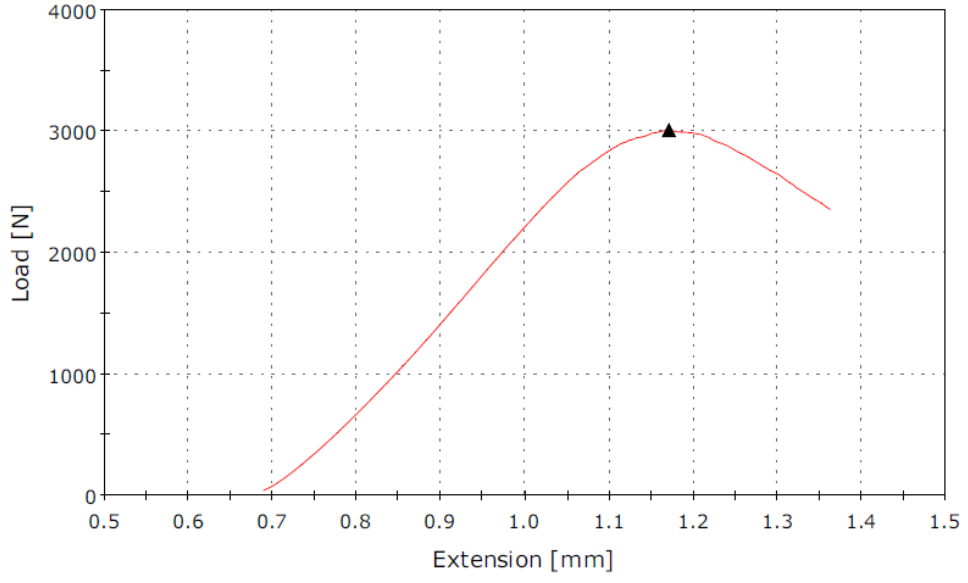
Balpeteği kalınlığının uygulanan maksimum yük ve çekme gerilmesi üzerindeki etkisini incelemek için Numune 1 ile Numune 7 ve Numune 2 ile Numune 8 sonuçları karşılaştırılmıştır. Numune 1, Numune 7, Numune 2 ve Numune 8 sonucunda elde edilen yük uzanım grafikleri Şekil 5.20, Şekil 5.21, Şekil 5.22, Şekil 5.23’de yer almaktadır. Ayrıca test sonuçlarından elde edilen gerilim- gerinim grafikleri ise Şekil 5.24, Şekil 5.25, Şekil 5.26 ve Şekil 5.27’de yer almaktadır. Yapılan test sonuçları incelendiğinde kalınlık arttıkça

numune üzerine uygulanan maksimum yük ve eğilme gerilmesinde artış görülmektedir. Numune 1 ile Numune 7 ve Numune 2 ile Numune 8 numunelerinin sonuçları karşılaştırıldığında kalınlık artışının maksimum yükte %15 lik, bir artışa neden olduğu görülmektedir. Shen ve arkadaşlarının çalışması da sonucu desteklemektedir, çalışmaya göre yoğunluk arttıkça elastite modülü ve akma gerilmesinin arttığı görülmüştür [30]. Bunun sonucunda ise kalınlık artışı ile doğru orantılı olarak çekme kuvvetinde de artış görülmüştür[30]. Bir başka çalışmada yine kalınlık arttıkça çekme mukavemetinin arttığı belirtilmiştir [31]. Fam ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada destek eklenmeden yapılan testlerde 32 kg/m³ ile 64 kg/m³ numuneler karşılaştırıldığında 64 kg/m³ yoğunluğundaki numunenin eğilme mukavemetinin ve sertliğinin yaklaşık olarak iki kat daha fazla olduğu görülmüştür [71]. Köpük içinde bulunan hava miktarı; basma, çekme ve kayma mukavemeti üzerinde etkilidir [30]. Gerilme hatası köpük kalınlığına bağlıdır [30]. Çekme test sonuçlarında köpük kalınlığı arttıkça elastik modülde artış görülmüştür [30]. Çekme testindeki elastik modül değeri basma testindeki değerden daha büyüktür [30].

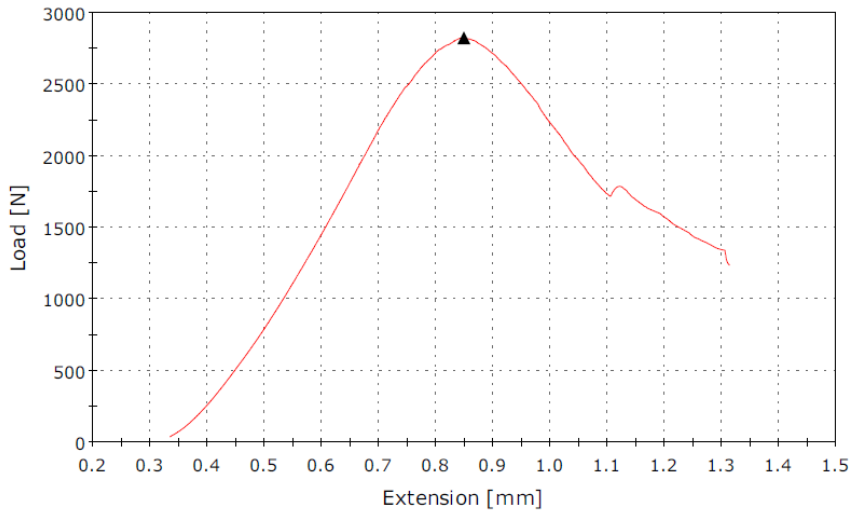
Elde edilen bir diğer sonuç ise kayma mukavemeti ve kayma modülün artışı ile çekme testinde numunelere uygulanan maksimum yük ve çekme altındaki gerilme değerinin arttığı belirlenmiştir.



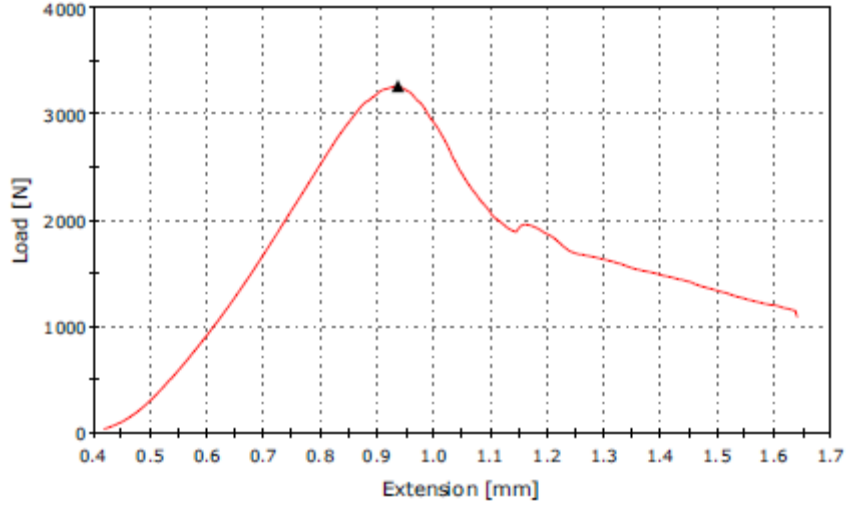
Şekil 5.20 Çekme Numune 1 Yük- Uzama Grafiği



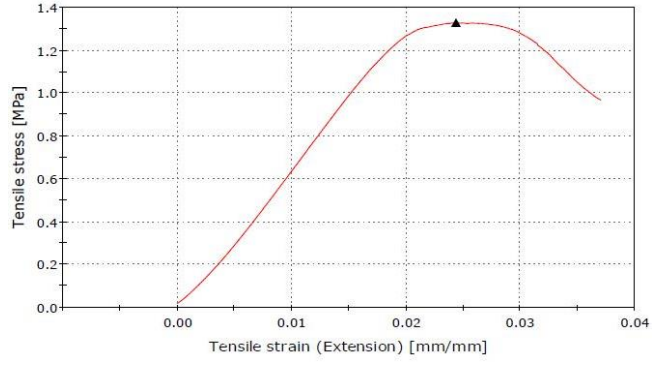
Şekil 5.21 Çekme Numune 2 Yük- Uzama Grafiği



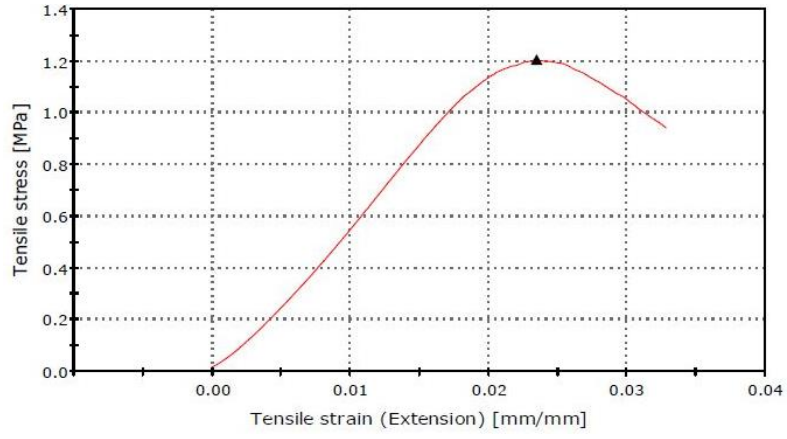
Şekil 5.22 Çekme Numune 7 Yük- Uzama Grafiği



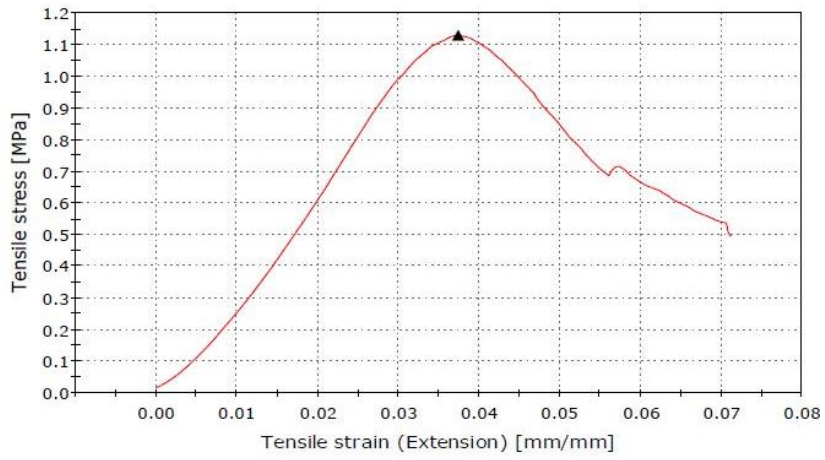
Şekil 5.23 Çekme Numune 8 Yük- Uzama Grafiği



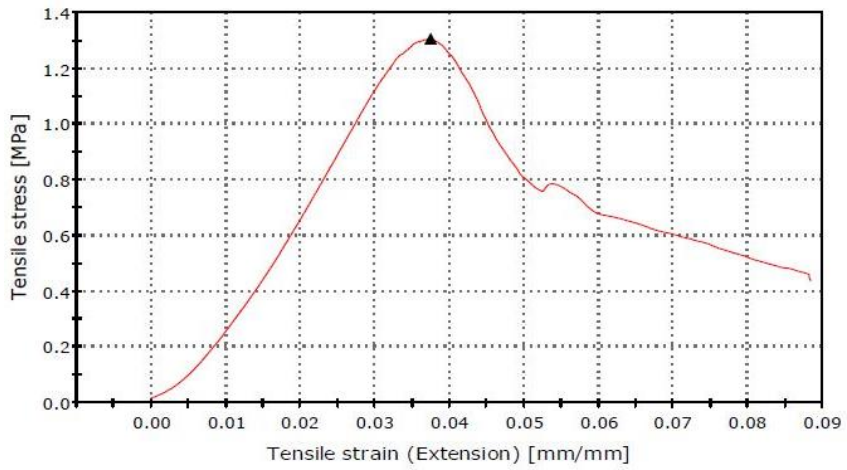
Şekil 5.24 Çekme Numune 1 Gerilim- Gerinim Grafiği



Şekil 5.25 Çekme Numune 2 Gerilim- Gerinim Grafiği



Şekil 5.26 Çekme Numune 7 Gerilim- Gerinim Grafiği

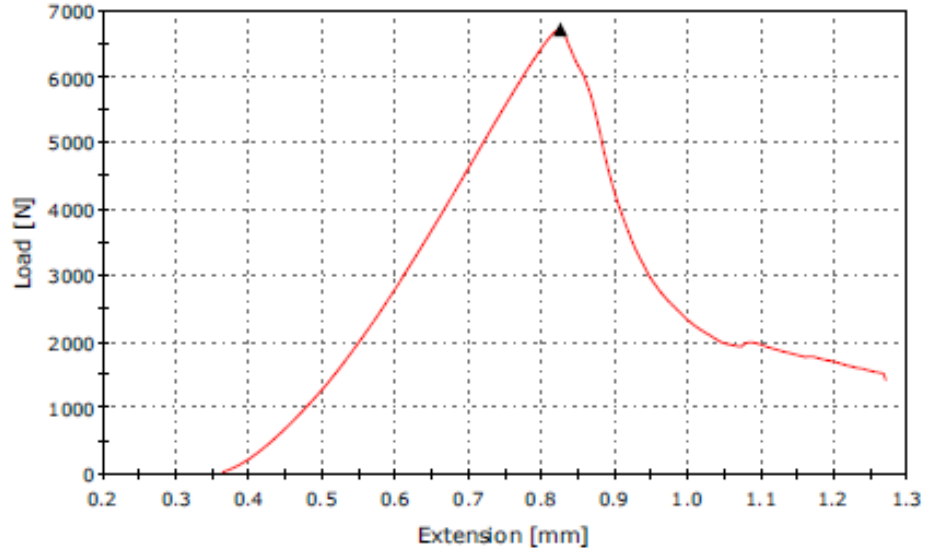


Şekil 5.27 Çekme Numune 8 Gerilim- Gerinim Grafiği

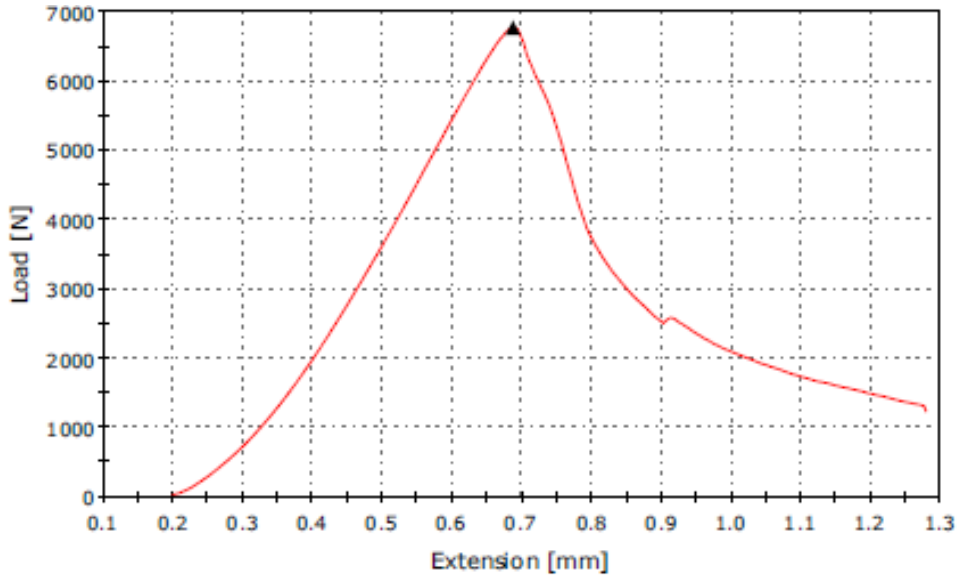
5.2.2 Balpeteği Kalınlık ve Hücre Genişliği Etkisi

3,2 ve 4,8 mm olmak üzere iki farklı hücre genişliği ve 6,25 ve 12,7 mm iki farklı kalınlıktaki numunelere çekme testi uygulanmıştır. Hücre genişliği ve balpeteği kalınlığının etkisini görebilmek için Numune 5 ile Numune 7 ve Numune 6 ile Numune 8 numuneleri karşılaştırılmıştır. Numune 5, Numune 6, Numune 7 ve Numune 8 ile ilgili elde edilen değerler Şekil 5.22, Şekil 5.23, Şekil 5.28, Şekil 5.29'de görölmektedir. Şekil 5.26, Şekil 5.27, Şekil 5.30 ve Şekil 5.31'de gerilme- gerinim grafikleri verilmiştir. Numune 5, Numune 6, Numune 7 ve Numune 8 numunelerinin hücre genişliği aynı, balpeteği kalınlığı farklı olsaydı Numune 7 ve Numune 8 'e uygulanan maksimum yük ve çekme gerilmesinin daha yüksek çıkacağı tahmin edilmektedir. Yapılan testte ise Numune 5 ve Numune 6 3,2 mm hücre genişliği ve 6,25 mm balpeteği kalınlığına sahip olmakla birlikte, Numune 7 ve Numune 8 ise 4,8 mm hücre genişliği ve 12,7 mm balpeteği kalınlığına sahiptir. Numune 5 ile Numune 6'nın sonuçları ve Numune 7 ile Numune 8'in sonuçları karşılaştırıldığında Numune 5 ve Numune 6'nın sonuçları 2,1 kat daha yüksek çıkmıştır. Elde edilen sonuçlara göre balpeteği hücre genişliği küçöldükçe maksimum yük ve çekme gerilmesinde artış görölmüştür. Bunun sebebi çekme testinde sırasında numunelerin kiriş etkisi yaptığı ve 3,2 mm sahip olan numunelerin çekme gerilmesi ve maksimum kuvveti daha fazla çıkması doğrulanmaktadır. Bu sonuç Butukuri ve arkadaşlarının yaptığı çalışma ile desteklenmektedir, çalışmaya göre hücre genişliği küçöldükçe uygulanan maksimum yük artmaktadır [45]. Yine Bianchinin yapmış olduğu doktora tez çalışmasında hücre genişliği küçük olan numuneye uygulanan kuvvet diğer numuneye göre yaklaşık 2 kat daha fazla olduğu belirtilmiştir [43].

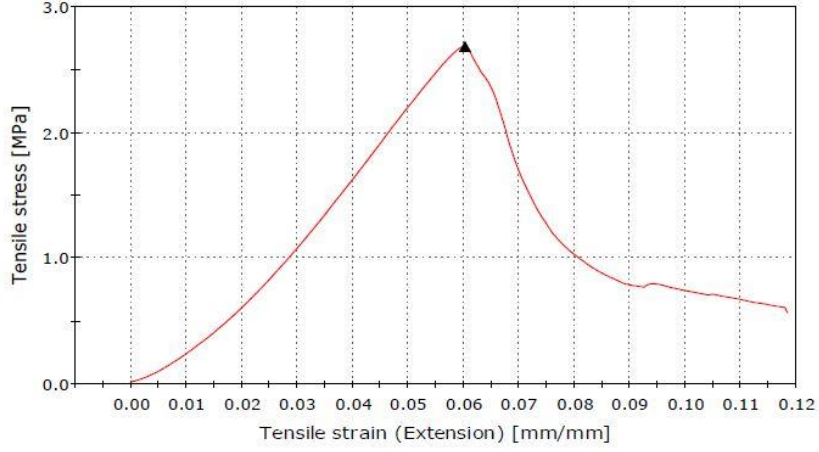
Test sonuçları ve literatür araştırmaları birlikte değerlendirildiğinde hücre genişliği etkisinin maksimum yük ve çekme gerilmesi üzerindeki etkisinin balpeteği kalınlığı etkisinden daha fazla olduğu sonucuna varılmıştır. Test numuneleri incelendiğinde 3,2 mm hücre genişliğine sahip olan numunenin çekirdek yoğunluğu, kayma mukavemeti ve kayma modölünün 4,8 mm hücre genişliğine sahip numunelerden daha büyüktür ve bunun sonucunda elde edilen test değerlerinde artış görölmüştür.



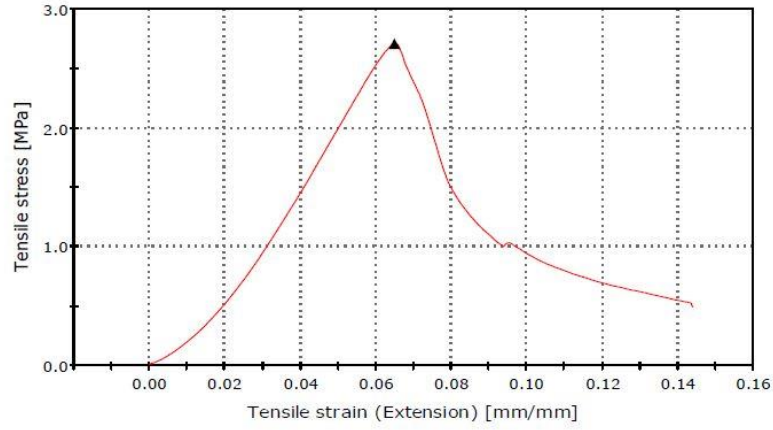
Şekil 5.28 Çekme Numune 5 Yük- Uzama Grafiği



Şekil 5.29 Çekme Numune 6 Yük- Uzama Grafiği



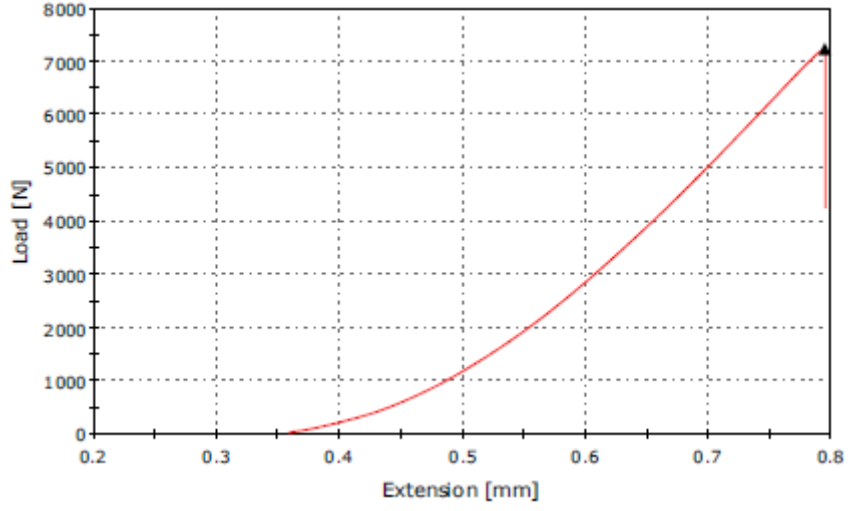
Şekil 5.30 Çekme Numune 5 Gerilim- Gerinim Grafiği



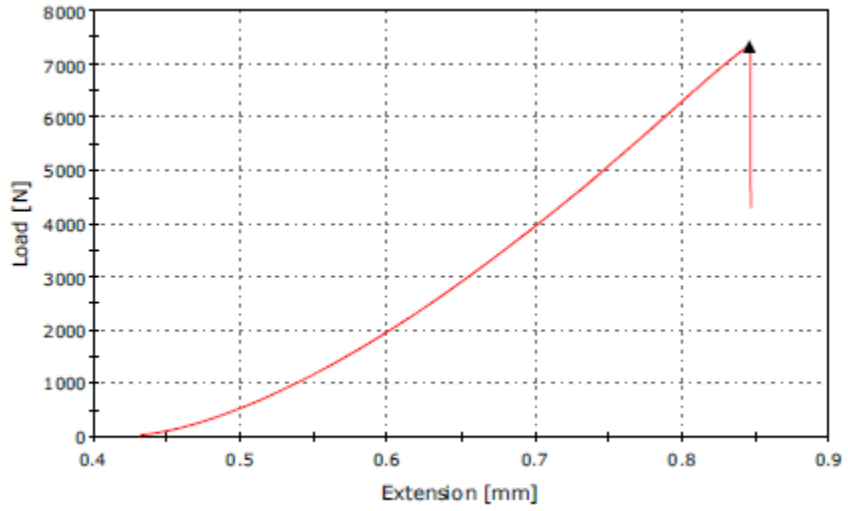
Şekil 5.31 Çekme Numune 6 Gerilim- Gerinim Grafiği

5.2.3 Geometri Etkisi

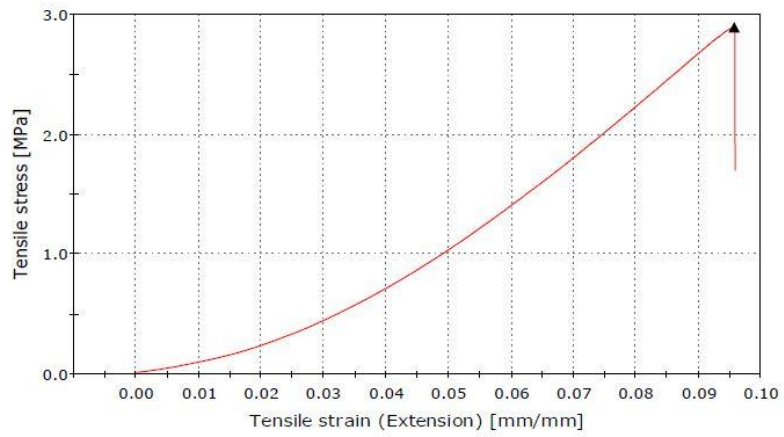
Numune 1 ile Numune 3 ve Numune 2 ile Numune 4 karşılaştırılarak balpeteğinin hücre geometrisinin çekme testlerine olan etkisi incelenmiştir. Çekme testi sonucu elde edilen yük- uzanım grafikleri Şekil 5.20, Şekil 5.21, Şekil 5.32 ve Şekil 5.33'de gerilme-gerinim grafikleri ise Şekil 5.24, Şekil 5.25, Şekil 5.34 ve Şekil 5.35'de verilmiştir. Test sonuçları incelendiğinde OX hücre geometrisinin, altıgen hücre geometrisine sahip olan balpeteğine göre daha yüksek maksimum yük elde edilmiştir. Ayrıca eğer aynı hücre geometrisi ve hücre genişliğine sahip olsalardı Numune 1 ile Numune 2'ye uygulanan maksimum yük Numune 3 ile Numune 4'e göre daha fazla olması beklenirdi. Ayrıca numune özellikleri incelendiğinde OX hücre şekline sahip olan numunenin yoğunluk, kayma mukavemeti ve kayma modülü özelliklerinin 4,8 mm'e göre daha fazla olduğu görülmektedir ve bunun sonucu olarak test değerlerinde artış görülmüştür.



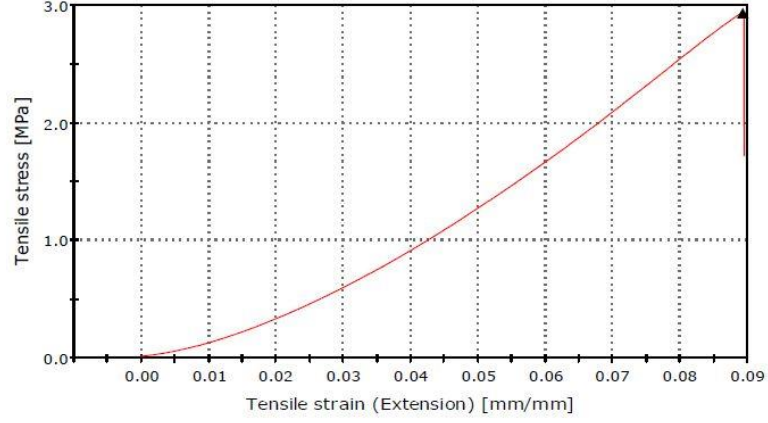
Şekil 5.32 Çekme Numune 3 Yük- Uzama Grafiği



Şekil 5.33 Çekme Numune 4 Yük- Uzama Grafiği



Şekil 5.34 Çekme Numune 3 Gerilim- Gerinim Grafiği



Şekil 5.35 Çekme Numune 4 Gerilim- Gerinim Grafiği

5.3 Soyma Testi

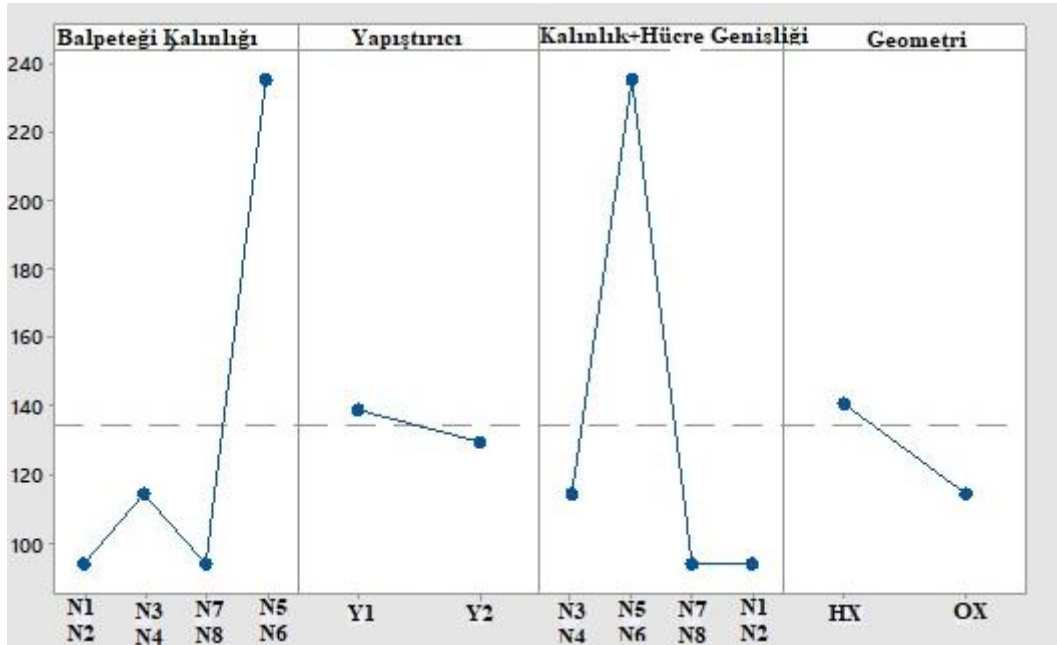
Yapılan soyma testinde hücre genişliği, hücre geometrisi ve kullanılan yapıştırıcının özelliklerine göre soyma torku incelenmiştir. Yapılan soyma testlerine göre elde edilen sonuçlar Tablo 5.3’de test numunelerine ait grafik ise Şekil 5.38’da ve etki parametrelerinin soyma torku üzerindeki etkisi Şekil 5.37’de verilmiştir. Her numune iki defa test edilmiştir. Tablo 5.3’de verilen değerler her iki testin ortalama sonucudur. Şekil 5.36 de testi tamamlanmış numune örnekleri bulunmaktadır. ASTM D1781’e göre numune kalınlığının soyma torku üzerinde önemli bir etkisi olmadığı belirtilmiştir [64]. Soyma torku değeri hesaplanırken ASTM D1781’de verilen 4.6 denklemi kullanılmıştır.



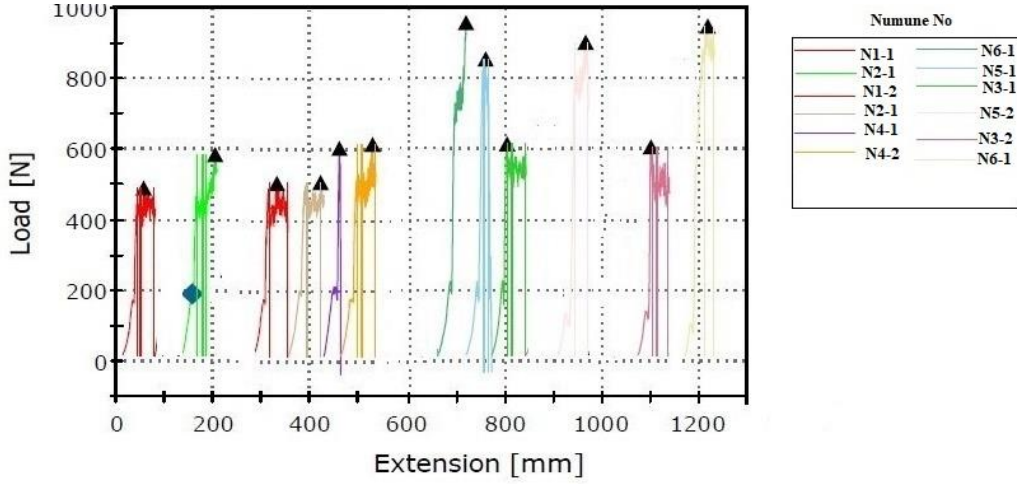
Şekil 5.36 Soyma (Peeling) Test Numuneleri

Tablo 5.3 Soyma (Peeling) Test Sonuçları

Numune No.	Balpeteği Kodu	Yapıştırıcı Kodu	Fp(N)	F0(N)	Soyma Torku (N)
Numune 1	B1	Y1	437	178	96,5
Numune 2	B1	Y2	445	197	91,76
Numune 3	B2	Y1	520	228	121,9
Numune 4	B2	Y2	510	181	108,2
Numune 5	B3	Y1	798	182	242,4
Numune 6	B3	Y2	900	210	228,1



Şekil 5.37 Etki Parametrelerinin Soyma Torku Değerine Ait Grafikler



Şekil 5.38. Soyma Testi Numune Grafikleri

5.3.1 Hücre Genişliği Etkisi

Hücre genişliği etkisini görebilmek için Numune 1 ile Numune 5 ve Numune 2 ile Numune 6 karşılaştırılmıştır. Soyma test sonuçlarına göre hücre genişliği küçüldükçe soyma torkunda artış görülmüştür. Akkuşun yapmış olduğu çalışmada 6,78 mm hücre genişliğine sahip numunede maksimum değer elde edilmesi, 17,32 mm hücre genişliğine doğru soyma kuvvet değerlerinin azalması birim alana düşen malzeme miktarının azalmasıyla açıklanmıştır [25]. Yine Burton ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada hücre genişliğinin küçülmesi ile soyma torku değerinde %50-%75 arasında artış görülmüştür. Ayrıca, Suresh ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada ise farklı iki yoğunluktaki köpük balpeteğinin soyma testindeki performansı incelenmiştir [52]. Yüzeyde bulunan köpük sayısı arttıkça yapışma torkunda artış görülmüştür[52].

Elde edilen test sonuçlarına göre hücre genişliği küçüldükçe birim alanda bulunan hücre sayısı artması ile soyma torku artmıştır. Bir diğer sonuç olarak yoğunluk artışı ile balpeteği sertliğinin arttığı ve bunun sonucu olarak soyma torkunda artış tespit edilmiştir.

5.3.2 Geometri Etkisi

Hücre geometrisi etkisinin soyma torku üzerindeki etkisi incelemek için Numune 1 ile Numune 3 ve Numune 2 ile Numune 4 karşılaştırılmıştır. OX hücre geometrisine sahip olan numunelerin soyma torkunun altıgen balpeteği geometrisinden yüksek olduğu görülmüştür. Test sonuçları incelendiğinde hücre geometrisinin, hücre genişliğinden daha etkili olduğu sonucu elde edilmiştir. Khan'ın yapmış olduğu çalışmada ise yüksek sertlikteki

çekirdekler; çekirdek / yüzey tabakası ara yüzeyinde daha yüksek stres konsantrasyonu göstermişlerdir [22].

5.3.3 Yapıştırıcı Etkisi

Tablo 4.3'de verilen yapıştırıcı (adhesive) özellikleri incelendiğinde Y1 kodlu yapıştırıcının 137 N Y2 kodlu yapıştırıcının ise 108,9 N luk bir soyma torkuna ihtiyacı olduğu görülmektedir. Numune 5 ve Numune 6 haricindeki tüm numunelerin soyma torku değerini sağlamadığı görülmüştür. Bu numunlerin yapıştırıcı soyma değerini karşılayabilmesi için hücre genişliği ya da geometrisinin değiştirilmesi gereklidir.

6. SONUÇ

Elde edilen test sonuçlarına göre balpeteği kalınlığının artışı ile dört nokta eğme ve çekme test numunelerinin dayanımlarında artış görülmüştür. ASTM D1781 standardına göre kalınlığın soyma torkunda etkisi olmayacağı belirtildiği için soyma testlerinde balpeteği kalınlık etkisi incelenmemiştir. Ayrıca, hücre genişliğinin azalması ile yapılan testlerde numune dayanım ve soyma torku sonuçlarında artış görülmüştür. Buna ek olarak hücre genişliği ile balpeteği kalınlık etkisi değerleri karşılaştırıldığında elde edilen test sonuçlarına göre hücre genişliği küçüldükçe numune dayanımında ve soyma torku değerlerinde artış görülmüştür. Hücre genişliğinin azalmasının balpeteği kalınlığının artışından daha etkili bir parametre olduğu belirlenmiştir. Hücre geometrisi etkisi incelendiğinde ise dört nokta eğme, çekme ve soyma testi sonuçlarında; hücre geometrisinin balpeteği kalınlığından daha etkili olduğu görülmüştür. Hücre geometrisi ve hücre genişliği değerleri karşılaştırıldığında ise dört nokta eğme ve çekme testlerinde OX hücre geometrisinin; HX geometrisine sahip numunelere göre daha etkili olduğu belirlenmiştir. Soyma test sonuçları karşılaştırıldığında ise OX hücre geometrisinin sahip numunenin 4,8 mm hücre genişliğine sahip numuneye göre soyma torkunda artış olduğu belirlenmiştir fakat OX hücre geometrisi ile 3,2 mm hücre genişliğine sahip numune karşılaştırıldığında hücre genişliğinin daha etkili olduğu görülmüştür. Yapıştırıcı tabakanın ise dört nokta eğme ve çekme testlerinde önemli bir etkisi olmazken, soyma testinde mekanik özelliklerinden soyma kuvvetinin artışı ile numunelerin soyma torkunda artış görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] D. K. Rajak, D. D. Pagar, R. Kumar, and C. I. Pruncu, “Recent Progress of Reinforcement Materials: a Comprehensive Overview of Composite Materials,” *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 8, no. 6, pp. 6354–6374, 2019.
- [2] M. E. Deniz “Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri ve Isıl İşleme Presleme Tekniği Kullanarak Kompozit Malzeme Üretecek Bir Düzeneğin Tasarım ve İmalatı” Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Harran Üniversitesi, Şanlıurfa, Türkiye, 2008.
- [3] K. Danacıoğlu, “Özgün Petek Yapılı Sandviç Kompozit Panelin Üretimi ve Düşük Hızlı Darbe Davranışının İncelenmesi,”Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, Türkiye, 2013.
- [4] B. Günaydın, “Yüzey Çatlaklı Cam/Polyester Kompozit Malzemelerde Çatlak İlerlemesi,” Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Selçuk Üniversitesi, Konya, Türkiye, 2003.
- [5] H. Ercan, “Uçak Sanayiinde Kullanılan Balpeteği Kompozitlerinin Mekanik Davranışlarının İncelenmesi,”Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniveristesi, İstanbul, Türkiye, 2006.
- [6] H. Püskül, “Effects of Different Fibre Orientations of Composite Materials on The Performance of Adhesively Bonded Joints,” Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Türk Hava Kurumu Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2019.
- [7] S. Rana. and R. Fanguero, *Advanced Composite Materials for Aerospace Engineering: Processing, Properties and Application*. 2016.
- [8] B. Polat, “Cam Takviyeli Polimer Matrisli Termoplastik Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin Araştırılması,” Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İskenderun Teknik Üniversitesi, İskenderun, Türkiye, 2019.
- [9] A. IŞIK, “Kompozit Malzemedен İmal Edilmiş Bir Takviye Elemanın Eğilme ve Burulma Yükü Altında Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi,” Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2008.
- [10] F. Ç. Bolat, “Bal Peteği Kompozit Yapıların Dinamik Analizi,” Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, Türkiye, 2011.

- [11] I. D. Ibrahim, T. Jamiru, R. E. Sadiku, W. K. Kupolati, S. C. Agwuncha, and G. Ekundayo, "The use of polypropylene in bamboo fibre composites and their mechanical properties - A review," *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 34, no. 16, pp. 1347–1356, 2015.
- [12] A. Demirel, "Karbon Elyaf Takviyeli Epoksi Kompozit Malzemelerin Karakterizasyonu," Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2007.
- [13] A. K. Sharma, R. Bhandari, A. Aherwar, and R. Rimašauskienė, "Matrix materials used in composites: A comprehensive study," *Mater. Today Proc.*, no. xxxx, pp. 0–3, 2019.
- [14] B. Algan, "Impact On Laminated Composites," Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, Türkiye, 2012.
- [15] K. Oh, S. Lee, H. Park, Y. Kim, and C. Kong, "Adhesion properties investigation of sandwich composite structure with surface treatment of AA 5052 skin," *ICCM Int. Conf. Compos. Mater.*, vol. 606, pp. 1–4, 2007.
- [16] W. He, L. Yao, X. Meng, G. Sun, D. Xie, and J. Liu, "Effect of structural parameters on low-velocity impact behavior of aluminum honeycomb sandwich structures with CFRP face sheets," *Thin-Walled Struct.*, vol. 137, no. November 2018, pp. 411–432, 2019.
- [17] İ. Aydınçak, "Investigation of Design and Analyses Principles of Honeycomb Structures," Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, Türkiye, 2007.
- [18] A. U. Öztürk, "Sandviç Kompozitlerde Balpeteği Yapısının Optimiasyonu," Bitirme Projesi, Makine Mühendisliği, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, Türkiye, 2009.
- [19] H. Rahman, "Effectiveness of honeycomb structure in main battle tank design," Yüksek Lisans Tezi, Mühendislik Yönetimi ve Teknoloji, Cranfield Üniversitesi, Cranfield, İngiltere, 2013
- [20] S. V Rupani, S. S. Jani, and G. D. Acharya, "Design, Modelling and Manufacturing aspects of Honeycomb Sandwich Structures: A Review," *Int. J. Sci. Dev. Res.*, vol. 2, no. 4, pp. 526–532, 2017.

- [21] Y. M. Jen, C. W. Ko, and H. Bin Lin, "Effect of the amount of adhesive on the bending fatigue strength of adhesively bonded aluminum honeycomb sandwich beams," *Int. J. Fatigue*, vol. 31, no. 3, pp. 455–462, 2009.
- [22] S. Khan and H. Y. Loken, "Bonding of sandwich structures the facesheet/honeycomb interface a phenomenological study," International SAMPE Symposium and Exhibition, 2007.
- [23] M. He and W. Hu, "A study on composite honeycomb sandwich panel structure," *Mater. Des.*, vol. 29, no. 3, pp. 709–713, 2008.
- [24] G. Sun, X. Huo, D. Chen, and Q. Li, "Experimental and numerical study on honeycomb sandwich panels under bending and in-panel compression," *Mater. Des.*, vol. 133, pp. 154–168, 2017.
- [25] H. Akkuş, "Bal Peteği Yapıların Mekanik Davranışlarının Nano Parçacık Takviyeli Yapıştırıcı Kullanılarak Deneysel ve Teorik Olarak Araştırılması," Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Selçuk Üniversitesi, Konya, Türkiye, 2016.
- [26] J. Pflug, I. Verpoest, and D. Vandepitte, "Folded Honeycomb Cardboard and Core Material for Structural Applications," *Sandw. Constr.*, vol. 5, no. January, pp. 1–12, 1999.
- [27] G. Clarke, "Characterization of Low Velocity Impact Damage in Metallic Honeycomb Sandwich Aircraft Panels using Finite Element Analysis," no. December 2017, 2018.
- [28] K. L. Edwards, "A risk-based approach to manufacturing process control: Use in autoclave moulded composite sandwich panels," *Mater. Des.*, vol. 26, no. 8, pp. 690–699, 2005.
- [29] T. B. Block, "Analysis of the mechanical response of impact loaded composite sandwich structures with focus on foam core shear failure," no. October 2014, 2014.
- [30] S. Y. Shen, F. J. Masters, H. L. Upjohn, and C. C. Ferraro, "Mechanical resistance properties of FRP/polyol-isocyanate foam sandwich panels," *Compos. Struct.*, vol. 99, pp. 419–432, 2013.
- [31] O. Skawinski, C. Binetruy, P. Krawczak, J. Grando, and E. Bonneau, "All-thermoplastic composite sandwich panels - Part I: Manufacturing and improvement

- of surface quality,” *J. Sandw. Struct. Mater.*, vol. 6, no. 5, pp. 399–421, 2004.
- [32] Y. Du, N. Yan, and M. T. Kortschot, “Light-weight honeycomb core sandwich panels containing biofiber-reinforced thermoset polymer composite skins: Fabrication and evaluation,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 43, no. 7, pp. 2875–2882, 2012.
- [33] S. Xie, Z. Feng, H. Zhou, and D. Wang, “Three-point bending behavior of Nomex honeycomb sandwich panels: Experiment and simulation,” *Mech. Adv. Mater. Struct.*, vol. 0, no. 0, pp. 1–15, 2020.
- [34] J. Wang, C. Shi, N. Yang, H. Sun, Y. Liu, and B. Song, “Strength, stiffness, and panel peeling strength of carbon fiber-reinforced composite sandwich structures with aluminum honeycomb cores for vehicle body,” *Compos. Struct.*, vol. 184, no. May 2017, pp. 1189–1196, 2018.
- [35] J. Kee Paik, A. K. Thayamballi, and G. Sung Kim, “Strength characteristics of aluminum honeycomb sandwich panels,” *Thin-Walled Struct.*, vol. 35, no. 3, pp. 205–231, 1999.
- [36] A. Gpoichand, R. Mohanrao, N. V. S. Sankar, G. R. Balaji, and P. S. Kumar, “Design and Analysis of Copper Honeycomb Sandwich Structure,” *Int. J. Eng. Adv. Technol.*, vol. 2, no. 4, pp. 635–638, 2013.
- [37] G. Sun, D. Chen, X. Huo, G. Zheng, and Q. Li, “Experimental and numerical studies on indentation and perforation characteristics of honeycomb sandwich panels,” *Compos. Struct.*, vol. 184, no. June 2017, pp. 110–124, 2018.
- [38] D. Wang, “Impact behavior and energy absorption of paper honeycomb sandwich panels,” *Int. J. Impact Eng.*, vol. 36, no. 1, pp. 110–114, 2009.
- [39] M. Styles, P. Compston, and S. Kalyanasundaram, “The effect of core thickness on the flexural behaviour of aluminium foam sandwich structures,” *Compos. Struct.*, vol. 80, no. 4, pp. 532–538, 2007.
- [40] Z. Chen, N. Yan, J. Deng, and G. Smith, “Flexural creep behavior of sandwich panels containing Kraft paper honeycomb core and wood composite skins,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 528, no. 16–17, pp. 5621–5626, 2011.
- [41] S. K. Sahu, N. D. Badgayan, S. Samanta, D. Sahu, and P. S. R. Sreekanth, “Influence of cell size on out of plane stiffness and in-plane compliance character of the sandwich

- beam made with tunable PCTPE nylon honeycomb core and hybrid polymer nanocomposite skin,” *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 148, no. September, pp. 284–292, 2018.
- [42] V. Crupi, G. Epasto, and E. Guglielmino, “Collapse modes in aluminium honeycomb sandwich panels under bending and impact loading,” *Int. J. Impact Eng.*, vol. 43, pp. 6–15, 2012.
- [43] G. Bianchi, “Structural Performance of Spacecraft Honeycomb Panels,” Doktora Tezi, Mühendislik Fakültesi, Southampton Üniversitesi, Southampton, İngiltere, 2011.
- [44] J. R. Dutra, S. L. Moni Ribeiro Filho, A. L. Christoforo, T. H. Panzera, and F. Scarpa, “Investigations on sustainable honeycomb sandwich panels containing eucalyptus sawdust, Piassava and cement particles,” *Thin-Walled Struct.*, vol. 143, no. May, p. 106191, 2019.
- [45] R. R. Butukuri, V. P. Bheemreddy, K. Chandrashekhara, T. R. Berkel, and K. Rupel, “Evaluation of skin-core adhesion bond of out-of-autoclave honeycomb sandwich structures,” *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 31, no. 5, pp. 331–339, 2012.
- [46] L. Wang, W. Liu, L. Wan, H. Fang, and D. Hui, “Mechanical performance of foam-filled lattice composite panels in four-point bending: Experimental investigation and analytical modeling,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 67, pp. 270–279, 2014.
- [47] A. Solmaz, M. Y. Kaman, M. O. Turan, K. Turgut, “Petek Yapılı Kompozit Levhaların Eğilme Davranışlarının İncelenmesi,” Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, vol. 22, no. 1, pp.1-11, 2010.
- [48] M.Y. Solmaz, İ. H. Şanlıtürk, T. Özben “Petek Yapılı Sandviç İ. Yapılarda Köpük Dolgunun Kritik Burkulma Yüküne Etkisinin Sayısal Olarak Tespiti,” 2. Ulusal Tasarım ve İmalat ve Analiz Kongresi, Balıkesir, Türkiye, Kasım 11- 12, 2010, pp. 523–530.
- [49] S. Belouettar, A. Abbadi, Z. Azari, R. Belouettar, and P. Freres, “Experimental investigation of static and fatigue behaviour of composites honeycomb materials using four point bending tests,” *Compos. Struct.*, vol. 87, no. 3, pp. 265–273, 2009.
- [50] Y. M. Jen and L. Y. Chang, “Evaluating bending fatigue strength of aluminum honeycomb sandwich beams using local parameters,” *Int. J. Fatigue*, vol. 30, no. 6, pp. 1103–1114, 2008.

- [51] W. S. Burton and A. K. Noor, "Structural analysis of the adhesive bond in a honeycomb core sandwich panel," *Finite Elem. Anal. Des.*, vol. 26, no. 3, pp. 213–227, 1997.
- [52] E. Suresh and K. Padmanabhan, "Prediction of Flexural Behaviour of Rigid Foam Sandwich Composites through Mode 1, Mode 2 and Mixed Mode Failures," *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 5, pp. 12091–12097, 2018.
- [53] S. Shi, Z. Sun, X. Hu, and H. Chen, "Flexural strength and energy absorption of carbon-fiber-aluminum-honeycomb composite sandwich reinforced by aluminum grid," *Thin-Walled Struct.*, vol. 84, pp. 416–422, 2014.
- [54] Y. Hou, Y. H. Tai, C. Lira, F. Scarpa, J. R. Yates, and B. Gu, "The bending and failure of sandwich structures with auxetic gradient cellular cores," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 49, pp. 119–131, 2013.
- [55] U. A. Khashaba and I. M. R. Najjar, "Adhesive layer analysis for scarf bonded joint in CFRE composites modified with MWCNTs under tensile and fatigue loads," *Compos. Struct.*, vol. 184, no. September 2017, pp. 411–427, 2018.
- [56] M. Kadlec and R. Růžek, "Geopolymer Laminate peel Resistance of Adhesive Bonds with Foam and Honeycomb Cores," 17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference pp, <https://www.sgem.org/index.php/elibrary?view=publication&task=show&id=4700>
- [57] S. T. de Freitas, J. Sinke, "Test method to assess interface adhesion in composite bonding," *Appl. Adhes. Sci.*, vol. 3, no. 1, pp. 1–13, 2015.
- [58] T. Takeda and F. Narita, "Fracture behavior and crack sensing capability of bonded carbon fiber composite joints with carbon nanotube-based polymer adhesive layer under Mode I loading," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 146, pp. 26–33, 2017.
- [59] S. M. R. Khalili, A. Shokuhfar, S. D. Hoseini, M. Bidkhorji, S. Khalili, and R. K. Mittal, "International Journal of Adhesion & Adhesives Experimental study of the influence of adhesive reinforcement in lap joints for composite structures subjected to mechanical loads," vol. 28, pp. 436–444, 2008.
- [60] J. Kim, X. Huang, T. Yu, C. Chan, and B. Guo, "Interlaminar fracture behaviour of re-formed bamboo / aluminium sheet laminates," vol. 4243, 2012.

- [61] H. Shen, A. J. Lavoie, and S. R. Nutt, “Enhanced peel resistance of fiber reinforced phenolic foams,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 34, no. 10, pp. 941–948, 2003.
- [62] T. Turgut, “Manufacturing and Structural Analysis of a Lightweight Sandwich Composite UAV Wing,” Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2007.
- [63] ASTM, “Standard Test Method for Flatwise Tensile Strength of Sandwich Constructions,” *Annu. B. ASTM Stand.*, vol. 94, no. Reapproved, pp. 1–2, 1999.
- [64] A. Drews, “Standard Test Method for Climbing Drum Peel for Adhesives,” *Man. Hydrocarb. Anal. 6th Ed.*, vol. 02, pp. 545-545–3, 2008.
- [65] K. W. Allen, “Theories of adhesion,” *Handb. Adhes. Second Ed.*, pp. 535–538, 2005.
- [66] A. Bayram and M. Yazici, “Partikül Takviyeli Polyester Kompozitlerin Eğilme ve Basma Özellikleri,” *Mühendislik Bilim. Derg.*, vol. 1, no. 2–3, pp. 153–159, 1995.
- [67] I. M. Daniel, “Failure modes of composite sandwich beams,” *Theoretical Application Mechanic*, vol. 35, no. 1, pp. 105–118, 2008.
- [68] E. E. Gdoutos, I. M. Daniel, and K. A. Wang, “Indentation failure in composite sandwich structures,” *Exp. Mech.*, vol. 42, no. 4, pp. 426–431, 2002.
- [69] X. Xiang, G. Lu, Z. Li, and D. Ruan, “Dynamic response of monolithic and sandwich structures subjected to impulsive and impact loadings,” *Adv. Struct. Eng.*, vol. 21, no. 8, pp. 1134–1147, 2018.
- [70] C393/C393M, “Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure,” *Astm*, pp. 1–4, 2011.
- [71] A. Fam and T. Sharaf, “Flexural performance of sandwich panels comprising polyurethane core and GFRP skins and ribs of various configurations,” *Compos. Struct.*, vol. 92, no. 12, pp. 2927–2935, 2010.