



**3BOYUTLU EKLEMELİ ÜRETİM YÖNTEMİYLE ÜRETİLMİŞ
TERMOPLASTİK ESASLI ÖKZETİK ÇEKİRDEK
GEOMETRİLİ SANDVIÇ YAPILARIN STATİK VE DİNAMİK
YÜKLER ALTINDA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

İbrahim Kürşad TÜRKOĞLU



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**3BOYUTLU EKLEMELİ ÜRETİM YÖNTEMİYLE ÜRETİLMİŞ TERMOPLASTİK
ESASLI ÖKZETİK ÇEKİRDEK GEOMETRİLİ SANDVIÇ YAPILARIN STATİK VE
DİNAMİK YÜKLER ALTINDA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

İbrahim Kürşad TÜRKOĞLU

0000-0003-4627-4894

Prof.Dr. Murat YAZICI
(Danışman)

DOKTORA TEZİ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2020

TEZ ONAYI

İbrahim Kürşad TÜRKOĞLU tarafından hazırlanan "3BOYUTLU EKLEMELİ ÜRETİM YÖNTEMİYLE ÜRETİLMİŞ TERMOPLASTİK ESASLI ÖKZETİK ÇEKİRDEK GEOMETRİLİ SANDVIÇ YAPILARIN STATİK VE DİNAMİK YÜKLER ALTINDA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof.Dr. Murat YAZICI

Başkan : Prof. Dr. Murat YAZICI
0000-0002-8720-7594
Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Erol SOLMAZ
0000-0001-9369-3552
Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

Üye : Prof. Dr. Sertan Kemal AKAY
0000-0002-7597-1528
Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Fakültesi,
Fizik Anabilim Dalı

İmza

Üye : Doç.Dr Ali Rıza MOTORCU
0000-0002-9129-8935
Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Mühendislik
Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

Üye : Dr. Öğr. Ü. Yalçın BOZTOPRAK
0000-0003-1714-7394
Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji
ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Hüseyin Akşel EREN

Enstitü Müdürü

..J.....

U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

22/07/2020

İbrahim Kürşad TÜRKOĞLU

ÖZET

Doktora Tezi

3BOYUTLU EKLEMELİ ÜRETİM YÖNTEMİYLE ÜRETİLMİŞ TERMOPLASTİK ESASLI ÖKZETİK ÇEKİRDEK GEOMETRİLİ SANDVİÇ YAPILARIN STATİK VE DİNAMİK YÜKLER ALTINDA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

İbrahim Kürşad TÜRKOĞLU

Bursa Uludağ Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Murat YAZICI

Hafif sandviç yapılar, özellikle otomotiv, denizcilik ve havacılık gibi çeşitli uygulama alanlarında hızlı bir şekilde yayılarak kullanılmaktadır. Hızla yayılmanın başlıca nedenleri, bu yapıların yüksek özgül bükülme sertliğine ve enerji emme kapasitesine sahip olmasıdır. Sandviç yapılar temelde çekirdek ve yüz tabakalarından oluşmaktadır. Bu temel bileşenler arasında yapıya seçicilik ve değişkenlik kazandıran esas eleman çekirdek yapılardır. Birçok farklı amaç ve uygulama için çok sayıda analitik ve deneysel çalışma sonucunda geliştirilen çekirdek yapıların temeli, gözenekli malzemeler ve yapılardan oluşur. Birbirlerine göre farklı avantajları bulunan bu yapıların kullanım alanları istenilen özelliklere göre belirlenir. Bilinen birçok mühendislik malzemesi geleneksel olarak nitelendirilen pozitif poisson oranına sahiptir. Son zamanlarda, özellikle eklemeli üretim yöntemlerindeki gelişmelerle geleneksel davranışı olmayan negatif poisson oranlı (NPO) yeni yapılar ve malzemeler de ortaya çıkmaya başlamıştır. Ökzetik malzemeler veya yapılar olarak adlandırılan bu yeni malzemeler, tasarlanabilir malzemeler olarak da bilinmektedir. Bu mekanizma sayesinde yapılar, özellikle enerji sönmülme ve dayanıklılık konusunda çok üstün özelliklere sahip olabilmektedirler. Bu çalışmada eklemeli üretim yöntemi ile üretilen iki geleneksel ve 3 ökzetik çekirdek geometrisine sahip sandviç yapılar üretilmiştir. Tamamen geridönüştürülebilir biyoplastik PLA malzemesinden üretilen yapıların quasi-statik ve dinamik yükler altındaki enerji sönmülme kabiliyetleri, dayanımları ve hasar mekanizmaları deneysel olarak incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Negatif poisson oranı, ökzetik yapılar, sandviç yapılar, 3Boyutlu eklemeli üretim

2020, xviii + 258 sayfa.

ABSTRACT

PhD Thesis

INVESTIGATION OF BEHAVIOR OF THERMOPLASTIC SANDWICH STRUCTURES WITH AUXETIC CORE GEOMETRIES PRODUCED BY 3- DIMENSIONAL ADDITIVE MANUFACTURING METHOD UNDER STATIC AND DYNAMIC LOADS

İbrahim Kürşad TÜRKOĞLU

Bursa Uludağ University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Automotive Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Murat YAZICI

Lightweight sandwich structures are used extensively in various application fields, especially automotive, marine and aviation. The main reasons for the rapid spread are that these structures have high specific flexural stiffness and energy absorption capacity. Sandwich structures mainly consist of core and face sheets. The main elements that give selectivity and variability to the structure are core structures. The core structures, consist of porous materials and structures, developed as a result of numerous analytical and experimental studies for many different purposes and applications. These structures, which have different advantages compared to each other, are determined according to the features desired from the usage areas. Many known engineering materials have a positive poisson's ratio, which is described as traditional. Recently, with the advances in additive manufacturing methods, new structures and materials with negative poisson ratio (NPO), which do not have traditional behavior, have begun to emerge. These new materials, called auxetic materials or structures, are also known as metamaterials. Thanks to the NPO mechanism, these structures can have superior properties, especially in energy damping and durability. In this study, two traditional and three auxetic core geometry sandwich structures were produced with additive manufacturing method. The energy damping abilities, strengths and damage mechanisms of the structures produced from fully recyclable bioplastic PLA material were investigated experimentally under quasi-static and dynamic loads.

Keywords: Negative poisson ratio, Auxetic structure, Sandwich structures, 3D additive manufacturing

2020, xviii + 258 pages.

TEŞEKKÜR

Bugünlere gelmemde çok büyük emeğe sahip olan, bana hayattaki en büyük erdemin adaletli ve dürüst olmak olduğunu öğreten, doğruluk ve dürüstlüğün her türlü çıkardan daha değerli olduğunu ve yaptığım her hatadan bir ders çıkararak büyümeyi öğreten annem, babam ve kardeşim'e; hayatta iki kişinin nasıl tek kişi olabileceğini gösteren, her düştüğümde, her güldüğümde yanımda olan, hayatıma olduğundan çok daha fazla anlam katan ve akademik hayatım süresince en büyük sabrı ve fedakarlığı gösteren eşime; yüksek eğitim hayatım boyunca yüzleştiğimiz zor durumlarda hep destek veren dostum Halil Bayram'a; bir ekip halinde çalışarak çeşitli başarıları imza attığımız, akademik bir aile olduğumuz Uygulamalı Mekanik ve İleri Malzemeler Araştırma Grubu üyesi arkadaşlarıma; çalışma sürecinde ihtiyaç duyduğumda büyük bir özveriyle yardıma eden arkadaşlarım Harun Güçlü, Sertaç Malkoç ve Tolgahan Bayram'a, akademik kariyerim boyunca sürekli iyiye yönlendirerek, bizlere çalışmanın ve azmin önemini aşılayan, akademik hayatım süresince hep örnek alacağım ve rehberim olacak olan danışmanım Prof. Dr. Murat Yazıcı'ya teşekkürü borç bilirim.

İbrahim Kürşad TÜRKOĞLU

22/07/2020

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xviii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1. Kompozit Malzemeler	3
2.2. Matris Yapısına Göre Kompozit Malzemeler	6
2.2.1. Metal Matrisli Kompozitler.....	6
2.2.2. Seramik Matrisli Kompozitler.....	7
2.2.3. Polimer Matrisli Kompozitler	8
2.2.4. Karbon-Karbon Kompozitler	18
2.3. Takviye Geometrisine Göre Kompozit Malzemeler.....	19
2.3.1. Parçacık Takviyeli Kompozitler.....	19
2.3.2. Süreksiz Elyaf Takviyeli Kompozitler.....	23
2.3.3. Sürekli Elyaf Takviyeli Kompozitler.....	25
2.3.4. Tabakalı Kompozitler	34
2.4. Elyaf Takviyeli Kompozit Üretim Yöntemleri.....	36
2.4.1. El Yatırma Yöntemi.....	37
2.4.2. Sprey Püskürtme Yöntemi	38
2.4.3. Prepreg Kalıplama Yöntemi.....	39
2.4.4. Pultrüzyon Yöntemi.....	40
2.4.5. Torba Kalıplama Yöntemi.....	41
2.4.6. Reçine Transfer Kalıplama Yöntemi (RTM)	42
2.4.7. Vakum Destekli Reçine Transfer Kalıplama Yöntemi (VARTM).....	43
2.4.8. Otoklav Yöntemi	44
2.4.9. Basıncı Kalıplama Yöntemi	46
2.4.10. Filaman (Tel) Sarma Yöntemi	47
2.5. Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin Mekaniği.....	49
2.5.1. Tek Yönlü Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin Mekaniği	50

2.5.2. Tek Yönlü Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerde Karışımlar Kanunu.....	51
2.5.3. Kritik ve Minimum Hacimsel Oran Kavramları	58
2.5.4. Enine Doğrultuda Modül ve Gerilme İfadeleri	60
2.5.5. Poisson Oranı	63
2.5.6. Kayma Modülü	64
2.5.7. Tek Yönlü Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin Bası Gerilmeleri Altında Davranışı	65
2.6. Sandviç Yapılar.....	67
2.6.1. Yüz Tabakaları	71
2.6.2. Yapıştırıcılar	71
2.6.3. Çekirdek Yapıları	72
2.7. Düzlemsel Sandviçler.....	88
2.8. Düzlemsel Sandviç Mekanîği.....	90
2.8.1. Eğilme Rijitliği	91
2.8.2. Sandviç Kirişlerde Gerilmeler.....	94
2.8.3. Kayma Gerilmesi	95
2.8.4. Sandviç Etkisi.....	100
2.8.5. Eşdeğer Genişlik.....	101
2.9. Kaynak Araştırması.....	102
3. MATERYAL ve YÖNTEM	107
3.1. Eklemeli Üretim ve 3 Boyutlu Yazıcı Teknolojisi	107
3.2. Eklemeli Üretim (AM) Türleri	109
3.3. Eriyik Biriktirme Modellemesi (Fused Deposition Modeling FDM)	110
3.4. PLA Malzeme Özellikleri ve Test Numuneleri Üretim Parametreleri ve Üretimi	113
3.5. Sandviç Yapıların Tasarımı ve Üretimi	120
3.5.1. Sinüzoidal Oluklu Çekirdek Yapıya Sahip Sandviç Yapı Tasarımı.....	122
3.5.2. Altıgen Balpeteği Çekirdek Yapıya Sahip Sandviç Yapı Tasarımı.....	124
3.5.3. Yeniden Kıvrımlı Çekirdek Yapıya Sahip Sandviç Yapı Tasarımı.....	128
3.5.4. Çift Ok Kafa Çekirdek Yapıya Sahip Sandviç Yapı Tasarımı.....	146
3.5.5. Tetrachiral Çekirdek Yapıya Sahip Sandviç Yapı Tasarımı	153
3.6. Boyutlu Yazıcıda Üretilen Sandviç Yapıların Statik Deneyleri.....	163
3.6.1. Çekme Deneyi	163
3.6.2. Basma Deneyi.....	164
3.6.3. Eğilme Deneyi	165

3.6.4. Sandviç Numunelerin Statik Bası Deneyi.....	166
3.6.5. Sandviç Numunelerin Statik 3 Nokta Eğilme Deneyi	167
3.7. 3Boyutlu Yazıcıda Üretilen Sandviç Yapıların Dinamik Deneyleri	168
3.7.1. Dinamik Basma Deneyi	169
3.7.2. Dinamik Eğilme Deneyi.....	170
4. BULGULAR.....	171
4.1. Statik Çekme Testi Sonuçları	171
4.2. Statik Basma Testi Sonuçları.....	173
4.3. Statik Eğilme Testi Sonuçları.....	175
4.4. Sandviç Yapıların Statik Bası Testi	177
4.4.1. Sinüzoidal Oluklu Çekirdek Geometriye Sahip Sandviç Yapının Bası Testi	177
4.4.2. Altıgen Balpeteği Çekirdek Geometrisine Sahip Sandviç Yapının Bası Testi ...	181
4.4.3. Yeniden Kıvrımlı Çekirdek Geometrisine Sahip Sandviç Yapının Bası Testi ...	184
4.4.4. Çift Ok Kafa Çekirdek Geometrisine Sahip Sandviç Yapının Bası Testi	187
4.4.5. Tetrachiral Çekirdek Geometrisine Sahip Sandviç Yapının Bası Testi.....	190
4.5. Sandviç Yapıların Statik Eğilme Testi.....	194
4.5.1. Sinüzoidal Oluklu Çekirdek Geometriye Sahip Sandviç Yapının 3-Nokta Eğme Testi	195
4.5.2. Altıgen Balpeteği Çekirdek Geometrisine Sahip Sandviç Yapının 3-Nokta Eğme Testi	198
4.5.3. Yeniden Kıvrımlı Çekirdek Geometrisine Sahip Sandviç Yapının 3-Nokta Eğme Testi	201
4.5.4. Çift Ok Kafa Çekirdek Geometrisine Sahip Sandviç Yapının 3-Nokta Eğme Testi.	205
4.5.5. Tetrachiral Çekirdek Geometrisine Sahip Sandviç Yapının 3-Nokta Eğme Testi	208
4.6. Dinamik Basma Deneyleri	212
4.6.1. Sinüzoidal Oluklu Çekirdek Geometrisine Sahip Sandviç Yapının Dinamik Basma Deneyi	213
4.6.2. Altıgen Balpeteği Çekirdek Geometrisine Sahip Sandviç Yapının Dinamik Basma Deneyi	215
4.6.3. Yeniden Kıvrımlı Çekirdek Geometrisine Sahip Sandviç Yapının Dinamik Basma Deneyi	217
4.6.4. Çift Ok Kafa Çekirdek Geometrisine Sahip Sandviç Yapının Dinamik Basma Deneyi	219

4.6.5.Tetrachiral Çekirdek Geometrisine Sahip Sandviç Yapının Dinamik Basma Deneyi	221
4.7. Dinamik 3-Nokta Eğilme Deneyleri	225
4.7.1.Sinüzoidal Oluklu Çekirdek Geometrisine Sahip Sandviç Yapının Dinamik 3-Nokta Eğilme Deneyi.....	226
4.7.2.Altıgen Balpeteği Çekirdek Geometrisine Sahip Sandviç Yapının Dinamik 3-Nokta Eğilme Deneyi.....	228
4.7.3.Yeniden Kıvrımlı Çekirdek Geometrisine Sahip Sandviç Yapının Dinamik 3-Nokta Eğilme Deneyi.....	230
4.7.4.Çift Ok Kafa Çekirdek Geometrisine Sahip Sandviç Yapının Dinamik 3-Nokta Eğilme Deneyi	232
4.7.5.Tetrachiral Çekirdek Geometrisine Sahip Sandviç Yapının Dinamik 3-Nokta Eğilme Deneyi	234
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	238
KAYNAKLAR.....	246
ÖZGEÇMİŞ.....	254

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
E	Elastisite Modülü
V	Hacim
σ	Normal Gerilme
τ	Kayma Gerilmesi
K	Elyaf Verim Parametresi
ρ	Yoğunluk
d	Çap
ε	Birim Şekil Değiştirme
A	Kesit Alan
F	Kuvvet
δ	Şekil Değiştirme
t	Kalınlık
ν	Poisson Oranı
γ	Kayma Açısı
G	Kayma Modülü
Φ	Nispi Yoğunluk
P	Basınç
κ	Eğrilik Yarıçapı
I	Atalet Momenti
D	Eğilme Rijitliği

Kısaltmalar	Açıklama
nm	nanometre
VOC	Volatile Organic Compound (Uçucu Organik Bileşik)
NPO	Negatif Poisson Oranı
PPO	Pozitif Poisson Oranı
AM	Additive Manufacturing (Eklemeli Üretim)
CAD	Computer Aided Design (Bilgisayar Destekli Tasarım)
FDM	Fused Deposition Method (Eriyik Birikim Modellemesi)
ASTM	American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Malzeme Derneği)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Kompozit malzemelerin konvansiyonel tek fazlı malzemelere göre sahip olduğu üstün özellikler.....	4
Şekil 2.2. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması	5
Şekil 2.3. Metal matrisli kompozit malzeme örnekleri.....	7
Şekil 2.4. Seramik matrisli kompozit malzeme parçaların kullanım örnekleri.....	8
Şekil 2.5. Polimer matrisli kompozitlerden üretilmiş çeşitli parçala	9
Şekil 2.6. Kimyasal reaksiyon sonucu çapraz bağ oluşumu	10
Şekil 2.7. Termoset reçine için kurlenme aşamaları a) Reaksiyon öncesi polimer ve sertleştirici b)Moleküllerdeki büyüme ile başlayan kurlenme c)Tam ağ yapıdaki jelleşme d)Tam kurlenmiş ve çapraz bağlanmış hal.....	11
Şekil 2.8. Bazı termoplastik reçinelerin kimyasal yapıları	16
Şekil 2.9. Amorf ve yarı-kristal termoplastik yapıların karşılaştırılması.....	17
Şekil 2.10. Karbon-karbon (Grafite-Karbon) kompozit malzeme kullanılarak üretilmiş bazı parçalar	18
Şekil 2.11. Takviye geometrisine göre kompozit malzemelerin sınıflandırılması.....	19
Şekil 2.12. Büyük parçacık takviyeli ve dispersiyonla kuvvetlendirilmiş kompozit	21
Şekil 2.13. Süreksiz ve yönlendirilmiş elyaf takviyeli kompozit yapısı.....	24
Şekil 2.14. Süreksiz ve rastgele elyaf dizilimli kompozit yapı	25
Şekil 2.15. Elyaf-matris arasında oluşan arayüz (arafaz) bölgesi.....	27
Şekil 2.16. Elyaf-Matris arayüz yapışma mekanizmaları a-)İnterdifüzyon sonrası moleküler dolaşım ile oluşan bağ b-) Elektrostatik çekim sonrası oluşan yapışma c-)Her iki yüzeydeki X ve A gruplarının kimyasal birleşimi ile oluşan Kimyasal bağlanma d-) Matrisin pürüzlü elyaf yüzeyini ıslatmasıyla oluşan mekanik bağlama	28
Şekil 2.17. Kompozit malzemelerde kullanılan farklı fiber geometrileri	29
Şekil 2.18. Elyaf dizilimine göre kompozit malzemenin boylamasına ve enlemesine doğrultuları	30
Şekil 2.19. a) Tek yönlü dizilim b) Çapraz tabaka dizilimi (Quasi izotropik dizilim) c) 3 Boyutlu örgü.....	31
Şekil 2.20. Lamina ve laminat arasındaki bağıntı	34
Şekil 2.21. Lamina oryantasyon açısı düzlemi gösterimi	35
Şekil 2.22. $[0^{\circ}/-45^{\circ}/90^{\circ}/+45^{\circ}/0^{\circ}]$ oryantasyona sahip tabakalı kompozitin yapısal gösterimi.....	35
Şekil 2.23. El yatırma yöntemiyle kompozit malzeme üretimi.....	38
Şekil 2.24. Sprey püskürtme yöntemi ile kompozit malzeme üretimi.....	39
Şekil 2.25. Prepreg kalıplama yöntemiyle kompozit malzeme üretimi	40
Şekil 2.26. Pultrüzyon yöntemiyle kompozit malzeme üretimi	41
Şekil 2.27. Torba kalıplama yöntemi ile kompozit üretimi.....	42
Şekil 2.28. Reçine transfer kalıplama yöntemiyle kompozit üretimi	43
Şekil 2.29. Vakum destekli reçine transfer kalıplama ile kompozit malzeme üretimi ...	44
Şekil 2.30. Otoklav yöntemiyle kompozit malzeme üretimi.....	45
Şekil 2.31. Basınçlı kalıplama yöntemi ile kompozit malzeme üretimi	47
Şekil 2.32. Filaman sarma yöntemiyle kompozit malzeme üretimi	47

Şekil 2.33. Tek yönlü elyaf takviyeli kompozit tabakanın şematik gösterimi ve eksen doğrultuları	51
Şekil 2.34. Kompozit mukavemetinin elyaf hacimsel oranına göre değişimi.....	55
Şekil 2.35. F_f / F_c oranının elastisite modüllerinin oranına göre farklı hacimsel elyaf oranlarındaki değişimi.....	55
Şekil 2.36. $\varepsilon_f > \varepsilon_m$ durumu için kompozit mukavemetinin elyaf hacimsel oranına bağlı olarak değişimi	57
Şekil 2.37. $\varepsilon_m > \varepsilon_f$ olduğu durumda gerilme-uzama eğrilerinin şematik gösterimi ve gerilmenin hacimsel orana bağlı değişimi.....	58
Şekil 2.38. Tek yönlü bir kompozitin enine özelliklerinin tespiti için kompozitin yandan görünümü	60
Şekil 2.39. Kompozitin boyuna ve enine modüllerinin elyaf hacimsel oranı ile değişimi	62
Şekil 2.40. Elyaf doğrultusunda kayma gerilmesi uygulanmış bir kompozitin şekil değişimi a) Şekil değiştirmeden önce b) Şekil değişimi sonrası	64
Şekil 2.41. Bası yüklemesi altında tek yönlü elyaf takviyeli kompozitin burkulması a) Eksenel tip burkulma b) Kayma tipi burkulma	66
Şekil 2.42. Sandviç yapıyı oluşturan bileşenlerin şematik gösterimi	68
Şekil 2.43. Bina çatı izolasyonunda kullanılan sandviç bir yalıtım plakası.....	69
Şekil 2.44. Temel prensip olarak sandviç yapı ve I kiriş	70
Şekil 2.45. Sandviç yapılarda çekirdek kalınlığının artmasıyla elde edilen mekanik avantajlar	70
Şekil 2.46. Balpeteği yapı geometrisi	73
Şekil 2.47. Balpeteği çekirdek yapının şerit yönleri.....	74
Şekil 2.48. Farklı malzemelerden üretilmiş balpeteği çekirdek yapıları a)Alüminyum b) Nomex (Kevlar) c)Karton d)Plastik.....	75
Şekil 2.49. Farklı geometrilerde oluklu çekirdek yapıya sahip sandviçler A)Üçgen B)Trapezoidal C) Dörtgen D)Sinüzoidal	76
Şekil 2.50. Farklı malzemelerden üretilmiş köpük yapılar a) Açık hücreli metal köpük b) Kapalı hücreli metal c) Açık hücreli polimerik köpük d) Kapalı hücreli polimerik köpük.....	78
Şekil 2.51. Farklı geometrilerde kafes kiriş çekirdek yapılar a)Tetrahedral b) Piramidal c) 3 Boyutlu kagome.....	81
Şekil 2.52. Tek hücreli kafes kiriş yapıların geometrileri a) Piramidal kafes kiriş yapı b) Tetrahedral kafes kiriş yapı	82
Şekil 2.53. Tek yönlü çekme kuvveti uygulanan geleneksel ve ökzetik malzemelerin sahip oldukları poisson oranına göre davranışları a)Geleneksel malzemenin kuvvete dik yönde daralması b) Ökzetik malzemenin kuvvete dik yönde de genişmesi.....	83
Şekil 2.54. Tasarlanabilir metamalzemelerin temelini oluşturan geometriler	84
Şekil 2.55. Tek Hücreli yeniden kıvrımlı ökzetik yapı ve bu yapının NPO ile çalışma prensibi.....	84
Şekil 2.56. Batma direnci üzerinde ökzetik özelliğin etkisi.....	85
Şekil 2.57. Eğilme yükü altında a) antiklastik davranış b)sinklastik davranış.....	88

Şekil 2.58. Sandviç kirişlerin en yaygın hasar modları a) Yüz tabakası akması/kırılması b) Çekirdek kayma hasarı c-d) Yüz kırışması e) Genel burkulma f) Kayma kıvrılması g) Yüz tabakası çukurlanması h) Yerel çekirdek girintisi (batma).....	89
Şekil 2.59. Eğilme momentine maruz bir kiriş.....	91
Şekil 2.60. Sandviç kiriş için işaretlerin belirlenmesi.....	92
Şekil 2.61. Bir alt alan için denge tanımlayan kiriş dx kesiti.....	96
Şekil 2.62. Farklı yaklaşım seviyeleri için normal ve kayma gerilmeleri.....	99
Şekil 2.63. Homojen ve sandviç kesitlerin karşılaştırılması	100
Şekil 2.64. Sandviç yapı ve I-kirişin eşdeğer ağ genişliği	101
Şekil 3.1. FDM teknolojisiyle çalışan bir 3 boyutlu yazıcının şematik gösterimi	112
Şekil 3.2. FDM teknolojisiyle çalışan destek malzemesi yapı malzemesinden farklı olan çift nozullu bir 3 boyutlu yazıcının şematik gösterimi	112
Şekil 3.3. Standartlara göre hazırlanan A)Çekme B) Basma C) 3Nokta eğilme numuneleri ölçüleri	115
Şekil 3.4. 3 boyutlu yazıcı ile üretilen deney numuneleri ve yapı mimarisinin temel özellikleri.....	116
Şekil 3.5. Üretimlerin gerçekleştirildiği 3 boyutlu yazıcı.....	117
Şekil 3.6. Numuneler üretilirken takip edilen [0/90] katman yazdırma yönleri.....	118
Şekil 3.7. Yazdırma sebebiyle kalan boşluk	120
Şekil 3.8. Sinüzooidal oluklu çekirdek geometrisine ait tek hücrenin ölçüleri	122
Şekil 3.9. ASTM D7336/7336M-16 standardına uygun olarak tasarlanan sinüzoidal oluklu çekirdek geometrisine sahip numune ölçüleri	123
Şekil 3.10. ASTM C393/C393M-16 standardına uygun olarak tasarlanan sinüzoidal oluklu çekirdek geometrisine sahip 3-nokta eğilme numunesi ölçüleri.....	124
Şekil 3.11. Altıgen balpeteği çekirdek geometrisine ait tek hücrenin ölçüleri	125
Şekil 3.12. ASTM D7336/7336M-16 standardına uygun olarak tasarlanan altıgen balpeteği çekirdek geometrisine sahip numune ölçüleri.....	126
Şekil 3.13. ASTM C393/C393M-16 standardına uygun olarak tasarlanan altıgen balpeteği çekirdek geometrisine sahip 3-nokta eğilme numunesi ölçüleri	127
Şekil 3.14. Düzgün altıgen balpeteği ve yeniden kıvrımlı ökzetik geometrileri.....	129
Şekil 3.15. a)Yeniden kıvrımlı ökzetik yapı çubuğunun yüklenmesi b) Yeniden kıvrımlı ökzetik yapı çubuğunun bükülmesi	130
Şekil 3.16. Birim hücrenin z yönünde bası yükü altında yükleme analizi a) Birim hücrenin yükleme durumu b) Basitleştirilmiş yapının yüklenmesi c) Basitleştirilmiş yapının kuvvet ayrışması.....	135
Şekil 3.17. Z yönünde bası yükü etkisindeki yeniden kıvrımlı çubuğun koordinat sistemleri arasındaki ilişki.....	136
Şekil 3.18. Farklı tasarımların bası yükü altında Z doğrultusundaki Poisson oranları $L=5\text{mm}$, $t=1\text{mm}$, $\sigma=10\text{kPa}$, $E=114\text{ GPa}$, $G=43\text{ GPa}$	138
Şekil 3.19. Farklı tasarımların bası yükü altında E_z/E_s etkin modülünün değişimi $L=5\text{mm}$, $t=1\text{mm}$, $\sigma=10\text{kPa}$, $E=114\text{ GPa}$, $G=43\text{ GPa}$	140
Şekil 3.20. Yeniden kıvrımlı çubuğun yüklenmesi	142
Şekil 3.21. Farklı tasarımlarda z yönündeki hasar dayanımı $L=5\text{mm}$, $t=1\text{mm}$, $E=114\text{ GPa}$, $G=43\text{ GPa}$	143

Şekil 3.22. Yeniden kıvrımlı çekirdek geometrisine ait tek hücrenin ölçüleri.....	144
Şekil 3.23. ASTM D7336/7336M-16 standardına uygun olarak tasarlanan yeniden kıvrımlı çekirdek geometrisine sahip numune ölçüleri.....	145
Şekil 3.24. ASTM C393/C393M-16 standardına uygun olarak tasarlanan yeniden kıvrımlı çekirdek geometrisine sahip 3-Nokta eğilme numunesi ölçüleri	146
Şekil 3.25. Çift ok kafa geometrisine sahip ökzetik yapının a) Şematik gösterimi b) Birim hücre yapısı gösterimi	147
Şekil 3.26. Çift ok kafa çekirdek geometrisine ait tek hücrenin ölçüleri.....	151
Şekil 3.27. ASTM D7336/7336M-16 standardına uygun olarak tasarlanan çift ok kafa çekirdek geometrisine sahip numune ölçüleri	152
Şekil 3.28. ASTM C393/C393M-16 standardına uygun olarak tasarlanan çift ok kafa çekirdek geometrisine sahip 3-Nokta eğilme numunesi ölçüleri	153
Şekil 3.29. a) Hexachiral ve b) Tetrachiral ökzetik yapılarının geometrilerinin şematik gösterimi.....	154
Şekil 3.30. a) x-yönü tek eksenli yükleme altında bir tetrachiral peteğin şematik gösterimi. b) Tek eksenli yükleme altında yapısal birim hücrenin serbest cisim diyagramı. c) x-y kesme yükü altında bir tetrachiral peteğin şematik gösterimi. (d) Kesme yükü altında yapısal birim hücrenin serbest cisim diyagramı	155
Şekil 3.31. Tetrachiral ökzetik çekirdek geometrisine ait tek hücrenin ölçüleri.....	158
Şekil 3.32. ASTM D7336/7336M-16 standardına uygun olarak tasarlanan tetrachiral ökzetik çekirdek geometrisine sahip numune ölçüleri.....	159
Şekil 3.33. ASTM C393/C393M-16 standardına uygun olarak tasarlanan tetrachiral ökzetik çekirdek geometrisine sahip 3-Nokta eğilme numunesi ölçüleri	160
Şekil 3.34. 3Boyutlu yazıcıdan üretilmiş sinüzoidal oluklu çekirdek yapıya sahip sandviç test numuneleri.....	161
Şekil 3.35. 3Boyutlu yazıcıdan üretilmiş altıgen balpeteği çekirdek yapıya sahip sandviç test numuneleri	161
Şekil 3.36. 3Boyutlu yazıcıdan üretilmiş yeniden kıvrımlı çekirdek yapıya sahip sandviç test numuneleri	162
Şekil 3.37. 3Boyutlu yazıcıdan üretilmiş çift ok kafa çekirdek yapıya sahip sandviç test numuneleri.....	162
Şekil 3.38. 3Boyutlu yazıcıdan üretilmiş tetrachiral çekirdek yapıya sahip sandviç test numuneleri.....	163
Şekil 3.39. Çekme deneyinin gerçekleştirildiği universal çekme cihazı	164
Şekil 3.40. Basma deneyinin gerçekleştirildiği universal test cihazı.....	165
Şekil 3.41. Sandviç bası deneylerinin gerçekleştirildiği universal test cihazı	166
Şekil 3.42. 3-Nokta eğme deneyi gerçekleştirilen universal test cihazı	167
Şekil 3.43. H. Kolsky tarafından öne sürülen split hopkinson bar test düzeneğinin şematik gösterimi.....	168
Şekil 3.44. SHB test düzeneğinden dönüştürülmüş dinamik bası test düzeneği.....	169
Şekil 3.45. SHB test düzeneğinden dönüştürülmüş dinamik 3-Nokta eğilme test düzeneği	170

Şekil 4. 1. Çekme testi ve test sonucu numune hasarı	172
Şekil 4. 2. 3Boyutlu yazıcı ile üretilmiş çekme numunesine ait çekme testi sonuçları	173

Şekil 4. 3. Numuneye uygulanan basma testi görüntüsü ve numunede oluşan fiçı geometrisi.....	174
Şekil 4. 4. 3Boyutlu yazıcı ile üretilmiş bası numunesine ait bası testi sonuçları.....	174
Şekil 4. 5. Numuneye uygulanan 3-Nokta eğme testi ve numunede oluşan eğilme görünümü	176
Şekil 4. 6. 3Boyutlu yazıcı ile üretilmiş bası numunesine ait 3-Nokta eğme testi sonuçları.....	177
Şekil 4. 7. 3Boyutlu yazıcı ile üretilmiş sinüzoidal oluklu çekirdek geometrili sandviç yapıya ait bası deneyleri.....	178
Şekil 4. 8. Deney sonrası sinüzoidal oluklu çekirdek geometrili sandviç yapıya ait numune ve hasar görüntüsü.....	178
Şekil 4. 9. 3Boyutlu yazıcı üretilmiş sinüzoidal oluklu çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının bası testine ait kuvvet-deplasman grafiği.....	179
Şekil 4. 10. Sinüzoidal oluklu çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının bası yükü altında sönümlediği enerji	180
Şekil 4. 11. 3Boyutlu yazıcı ile üretilmiş altıgen balpeteği çekirdek geometrili sandviç yapıya ait bası deneyleri.....	181
Şekil 4. 12. Deney sonrası altıgen balpeteği çekirdek geometrili sandviç yapıya ait numune ve hasar görüntüsü.....	182
Şekil 4. 13. 3Boyutlu yazıcı üretilmiş altıgen balpeteği çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının bası testine ait kuvvet-deplasman grafiği.....	182
Şekil 4. 14. Balpeteği çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının bası yükü altında sönümlediği enerji.....	183
Şekil 4. 15. 3Boyutlu yazıcı ile üretilmiş yeniden kıvrımlı çekirdek geometrili sandviç yapıya ait bası deneyleri.....	184
Şekil 4. 16. Deney sonrası altıgen balpeteği çekirdek geometrili sandviç yapıya ait numune ve hasar görüntüsü.....	185
Şekil 4. 17. 3Boyutlu yazıcı üretilmiş yeniden kıvrımlı çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının bası testine ait kuvvet-deplasman grafiği.....	185
Şekil 4. 18. Yeniden kıvrımlı çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının bası yükü altında sönümlediği enerji	186
Şekil 4. 19. 3Boyutlu yazıcı ile üretilmiş çift ok kafa çekirdek geometrili sandviç yapıya ait bası deneyleri.....	187
Şekil 4. 20. Deney sonrası çift ok kafa çekirdek geometrili sandviç yapıya ait numune ve hasar görüntüsü	188
Şekil 4. 21. 3Boyutlu yazıcı üretilmiş çift ok kafa çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının bası testine ait kuvvet-deplasman grafiği	188
Şekil 4. 22. Çift ok kafa çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının bası yükü altında sönümlediği enerji.....	189
Şekil 4. 23. 3Boyutlu yazıcı ile üretilmiş tetrachiral çekirdek geometrili sandviç yapıya ait bası deneyleri.....	190
Şekil 4. 24. Deney sonrası tetrachiral çekirdek geometrili sandviç yapıya ait numune ve hasar görüntüsü.....	191
Şekil 4. 25. 3Boyutlu yazıcı üretilmiş tetrachiral çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının bası testine ait kuvvet-deplasman grafiği	191

Şekil 4. 26. Tetrachiral çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının bası yükü altında sönümlediği enerji.....	192
Şekil 4. 27. Tüm yapılara ait bası testi kuvvet-deplasman grafiklerinin bir arada görünümü	193
Şekil 4. 28. 3-Nokta eğme test düzeneği ve testten bir görüntü.....	195
Şekil 4. 29. 3Boyutlu yazıcı ile üretilmiş sinüzoidal oluklu çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının 3-Nokta eğme testi ve test esnasındaki hasar oluşumu.....	196
Şekil 4. 30. 3-Nokta eğme testi sonrası sinüzoidal oluklu çekirdeğe sahip sandviç yapıdaki hasar görünümü	196
Şekil 4. 31. Sinüzoidal oluklu çekirdek geometrili sandviç yapının 3-Nokta eğme testine ait kuvvet-deplasman grafiği.....	197
Şekil 4. 32. Sinüzoidal oluklu çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının eğilme yükü altında sönümlediği enerji	198
Şekil 4. 33. 3Boyutlu yazıcı ile üretilmiş altıgen balpeteği çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının 3-Nokta eğme testi ve test esnasındaki hasar oluşumu.....	199
Şekil 4. 34. 3-Nokta eğme testi sonrası altıgen balpeteği çekirdeğe sahip sandviç yapıdaki hasar görünümü	199
Şekil 4. 35. Altıgen balpeteği çekirdek geometrili sandviç yapının 3-Nokta eğme testine ait kuvvet-deplasman grafiği.....	200
Şekil 4. 36. Altıgen balpeteği çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının eğilme yükü altında sönümlediği enerji	201
Şekil 4. 37. 3Boyutlu yazıcı ile üretilmiş yeniden kıvrımlı çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının 3-Nokta eğme testi ve test esnasındaki hasar oluşumu.....	202
Şekil 4. 38. 3-Nokta eğme testi sonrası yeniden kıvrımlı çekirdeğe sahip sandviç yapıdaki hasar görünümü	202
Şekil 4. 39. Yeniden kıvrımlı çekirdek geometrili sandviç yapının 3-Nokta eğme testine ait kuvvet-deplasman grafiği.....	203
Şekil 4. 40. Yeniden kıvrımlı çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının eğilme yükü altında sönümlediği enerji	204
Şekil 4. 41. 3Boyutlu yazıcı ile üretilmiş çift ok kafa çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının 3-Nokta eğme testi ve test esnasındaki hasar oluşumu.....	205
Şekil 4. 42. 3-Nokta eğme testi sonrası çift ok kafa çekirdeğe sahip sandviç yapıdaki hasar görünümü	205
Şekil 4. 43. Çift ok kafa çekirdek geometrili sandviç yapının 3-Nokta eğme testine ait kuvvet-deplasman grafiği.....	206
Şekil 4. 44. Çift ok kafa çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının eğilme yükü altında sönümlediği enerji	207
Şekil 4. 45. 3Boyutlu yazıcı ile üretilmiş tetrachiral çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının 3-Nokta eğme testi ve test esnasındaki hasar oluşumu	208
Şekil 4. 46. 3-Nokta eğme testi sonrası tetrachiral çekirdeğe sahip sandviç yapıdaki hasar görünümü	208
Şekil 4. 47. Tetrachiral çekirdek geometrili sandviç yapının 3-Nokta eğme testine ait kuvvet-deplasman grafiği.....	209
Şekil 4. 48. Tetrachiral çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının eğilme yükü altında sönümlediği enerji.....	210

Şekil 4. 49. Tüm geometrilere ait 3-nokta eğilme grafikleri.....	211
Şekil 4. 50. Sinüzoidal oluklu çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının dinamik bası testi.....	213
Şekil 4. 51. Sinüzoidal oluklu çekirdeğe sahip sandviç yapının deney sonu hasar görünümü	214
Şekil 4. 52. Sinüzoidal oluklu çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının dinamik bası testine ait kuvvet-zaman grafiği	214
Şekil 4. 53. Altıgen balpeteği çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının dinamik bası testi.....	215
Şekil 4. 54. Altıgen balpeteği çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının deney sonu hasar görünümü	216
Şekil 4. 55. Altıgen balpeteği çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının dinamik bası testine ait kuvvet-zaman grafiği	216
Şekil 4. 56. Yeniden kıvrımlı çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının dinamik bası testi.....	217
Şekil 4. 57. Yeniden kıvrımlı çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının deney sonu hasar görünümü	218
Şekil 4. 58. Yeniden kıvrımlı çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının dinamik bası testine ait kuvvet-zaman grafiği	218
Şekil 4. 59. Çift ok kafa çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının dinamik bası testi	219
Şekil 4. 60. Çift ok kafa çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının deney sonu hasar görünümü	220
Şekil 4. 61. Çift ok kafa çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının dinamik bası testine ait kuvvet-zaman grafiği	221
Şekil 4. 62. Tetrachiral çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının dinamik bası testi	222
Şekil 4. 63. Tetrachiral çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının deney sonu hasar görünümü	223
Şekil 4. 64. Tetrachiral çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının dinamik bası testine ait kuvvet-zaman grafiği	224
Şekil 4. 65. Tüm sandviç modellere ait dinamik bası kuvvet-zaman grafikleri.....	225
Şekil 4. 66. Sinüzoidal oluklu çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının dinamik 3-nokta eğilme testi.....	226
Şekil 4. 67. Sinüzoidal oluklu çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının dinamik 3-nokta eğilme deneyi sonu hasar görünümü	227
Şekil 4. 68. Sinüzoidal oluklu çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının dinamik 3-nokta eğilme testine ait kuvvet-zaman grafiği.....	228
Şekil 4. 69. Altıgen balpeteği çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının dinamik 3-nokta eğilme testi.....	229
Şekil 4. 70. Altıgen balpeteği çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının dinamik 3-nokta eğilme deneyi sonu hasar görünümü	229
Şekil 4. 71. Altıgen balpeteği çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının dinamik 3-nokta eğilme testine ait kuvvet-zaman grafiği.....	230

Şekil 4. 72. Yeniden kıvrımlı çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının dinamik 3-nokta eğilme testi.....	231
Şekil 4. 73. Yeniden kıvrımlı çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının dinamik 3-nokta eğilme deneyi sonu hasar görünümü	231
Şekil 4. 74. Yeniden kıvrımlı çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının dinamik 3-nokta eğilme testine ait kuvvet-zaman grafiği.....	232
Şekil 4. 75. Çift ok kafa çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının dinamik 3-nokta eğilme testi	233
Şekil 4. 76. Çift ok kafa çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının dinamik 3-nokta eğilme deneyi sonu hasar görünümü	233
Şekil 4. 77. Çift ok kafa çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının dinamik 3-nokta eğilme testine ait kuvvet-zaman grafiği	234
Şekil 4. 78. Tetrachiral çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının dinamik 3-nokta eğilme testi	235
Şekil 4. 79. Tetrachiral çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının dinamik 3-nokta eğilme deneyi sonu hasar görünümü	235
Şekil 4. 80. Tetrachiral çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının dinamik 3-nokta eğilme testine ait kuvvet-zaman grafiği	236
Şekil 4. 81. Tüm sandviç modellere ait dinamik 3-nokta eğilme kuvvet-zaman grafikleri	237

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Termoset matris reçinelerinin bazı özellikleri	12
Çizelge 3.1. Esun PLA+ 1.75mm malzeme özellikleri.....	114
Çizelge 3.2. Yapı mimarisi verileri.....	118
Çizelge 5.1. Farklı çekirdek geometrilerine sahip sandviç test numunelerinin tasarım ve gerçek ağırlık değerleri	239
Çizelge 5.2. Sandviç yapıların statik yüklemde özgül dayanım ve özgül sönümlenen enerji değerleri.....	240
Çizelge 5.3. Sandviç yapıların dinamik yüklemde özgül dinamik bası kuvveti ve özgül dinamik eğilme kuvveti değerleri	241

1. GİRİŞ

Son yıllarda, hafif sandviç yapılar, özellikle otomotiv, denizcilik ve havacılık endüstrilerinde, çok çeşitli uygulama alanlarında yoğun olarak kullanılmaktadır. Bu hızlı genişlemenin başlıca nedenleri, bu yapıların yüksek özgül bükülme sertliğine, yüksek enerji emme kapasitesine ve üstün ısı yalıtım özelliklerine sahip olmasıdır. Ek olarak, bu yapıların yaygın kullanımının bir diğer önemli nedeni, bu yapıların farklı amaçlar için kontrol edilebilir ve değiştirilebilir özelliklere sahip olmasıdır.

Sandviç yapılar temel olarak iki ana unsurdan oluşur. Bunlardan ilki: yapının üst ve alt kısımlarında iki ince sert yüz tabakasıdır. Bu sert tabakalar özellikle sandviç yapıda düzlem içi gerilim ve eğilme yükleri taşır. Yapının diğer ana unsuru, iki sert yüz tabakası arasına yerleştirilen ve yapıya yüksek burkulma direnci, enerji sönümleme kabiliyeti ve kesme sertliğinin yanı sıra yüksek eğilme dayanımı özellikleri sağlayan çekirdektir. Çekirdek, sandviç özellikle enine kayma/kesme yüklerini taşıyan elemandır. Çekirdek yapıları birçok farklı formda olabilir. Bu yapıların en yaygın bilinen örnekleri köpük malzemeler ve gözenekli yapılardır ki bunlara en iyi örnekler ise balpeteği ve oluklu yapılardır.

Bahsedilen çekirdek geometrileri bilinen mühendislik malzemelerinin çoğunda olduğu gibi, geleneksel olarak tarif edebileceğimiz mekanik özelliklere sahiptir. Belirtilmeye çalışılan bu mekanik özelliklerin en temelini Poisson Oranı oluşturmaktadır. Yani bu yapılar bilinen birçok mühendislik yapıları gibi Pozitif Poisson Oranı (PPO) özelliğine sahiptirler. Fakat son yıllarda yapılan çalışmalarla, bu geleneksel mekanik özelliği göstermeyen malzemeler ve yapılar geliştirilmiştir. Ökzetik olarak isimlendirilen bu yapılar genel adıyla Negatif Poisson Oranına (NPO) sahip yapılar olarak bilinirken bazı araştırmacılar tarafından ise “Tasarlanabilir Malzemeler” yani “Metamalzemeler” olarak isimlendirilir.

Ökzetik yapılar, sahip oldukları bu eşsiz NPO özelliği sayesinde bilinen geleneksel yapılara kıyasla çok kullanışlı avantajlara sahiptirler. Daha sonraki kısımlarda detaylı olarak verilen bu avantajlar sayesinde bu yapılar birçok alanda kendilerine yer aramaya başlamışlardır. Fakat sahip oldukları bu avantajların yanısıra önemli bir dezavantaja da sahip olan bu yapıların günümüze kadar yayılması gerçekleşmemiştir. Bu yapıları engelleyen nitelikteki dezavantajları, üretimlerindeki büyük zorluktur.

Son yıllarda gelişmesine büyük bir ilerleme getiren eklemeli üretim veya daha bilinen adıyla 3Boyutlu yazıcı teknolojisi sayesinde bu yapıların üretimlerindeki büyük engel aşılmıştır. Zira bu teknoloji sayesinde tek seferde istenilen geometrilerde ve ölçülerde yapıların oluşturulabilmesine imkan sağlanmıştır.

Yapılan bu doktora çalışmasının konusunu, 3Boyutlu üretim tekniği kullanılarak 3 farklı ökzetik yapının en yaygın kullanılan geleneksel çekirdek yapılarla statik ve dinamik yükler altındaki mekanik özelliklerinin karşılaştırılması ve belirlenmesi oluşturmaktadır. Son yıllarda bahsedilen gelişmelerin yaşanmasıyla bu alanda yapılan çalışmalar da bir hayli artmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

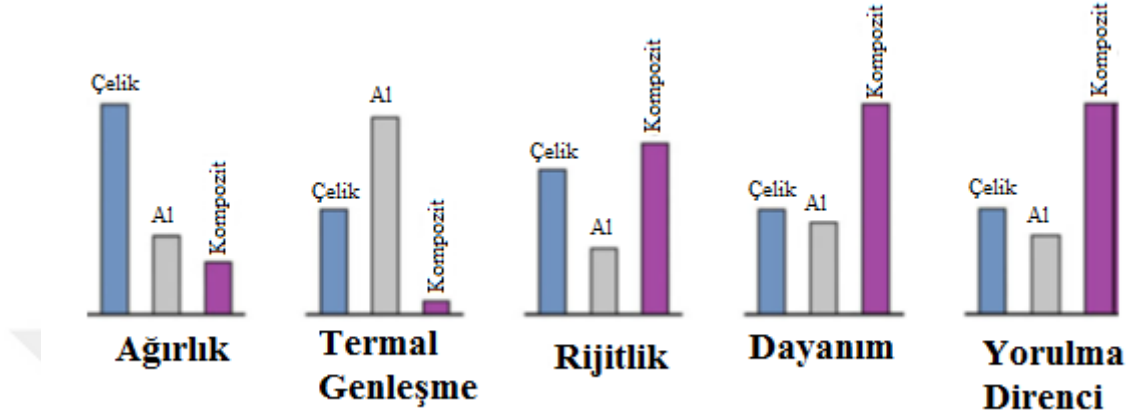
2.1. Kompozit Malzemeler

Makroskobik düzeyde bir araya getirilmiş ve birbirleri içinde çözünmeyen iki veya daha fazla bileşenden oluşan yeni yapılara “Kompozit Malzeme” denmektedir. Yapıyı oluşturan bileşenlerden birisi matris fazını oluştururken diğeri takviye fazını oluşturmaktadır. Kompozit malzemeler, istenilen uygulama alanına göre hazırlanabilen, mükemmel mekanik ve fiziksel özelliklere sahip çok yönlü malzemelerdir. Geleneksel metal malzemelere göre pek çok avantaja sahip olan bu malzemelerin geçmişi insanlık tarihi kadar eskiye dayanmaktadır. Her ne kadar kökeni ev yapımında kullanılan kerpiç malzemeye veya yazı yazmak amacıyla kullanılan papirüs kağıtlara dayandırılrsa da günümüzde ihtiyaçların ve malzemelerin değişmesiyle çok farklı ve geniş yelpazede kompozit malzemeler kullanılmaktadır.

Kompozit malzemelerin geleneksel metal malzemelere göre sahip olduğu başlıca avantajlar şu şekilde sıralanabilir;

- Yüksek özgül mukavemet,
- Yüksek yorulma direnci,
- Yüksek sıcaklıkta ve normal şartlar altında yüksek korozyon direnci,
- Yüksek akma mukavemeti,
- Titreşim sönümleme yeteneği,
- Çatlak ilerleme direnci,
- Düşük termal genleşme katsayısı,
- Üretim proseslerinin büyük ve kompleks yapılara müsaade etmesi,
- Son işlem gerekmeden nihai ürünün üretilmesi,
- Düşük maliyet.

Konvansiyonel tek fazlı malzemelere kıyasla kompozit malzemelerin sahip oldukları temel avantajlar şekil 2.1’de gösterilmiştir.



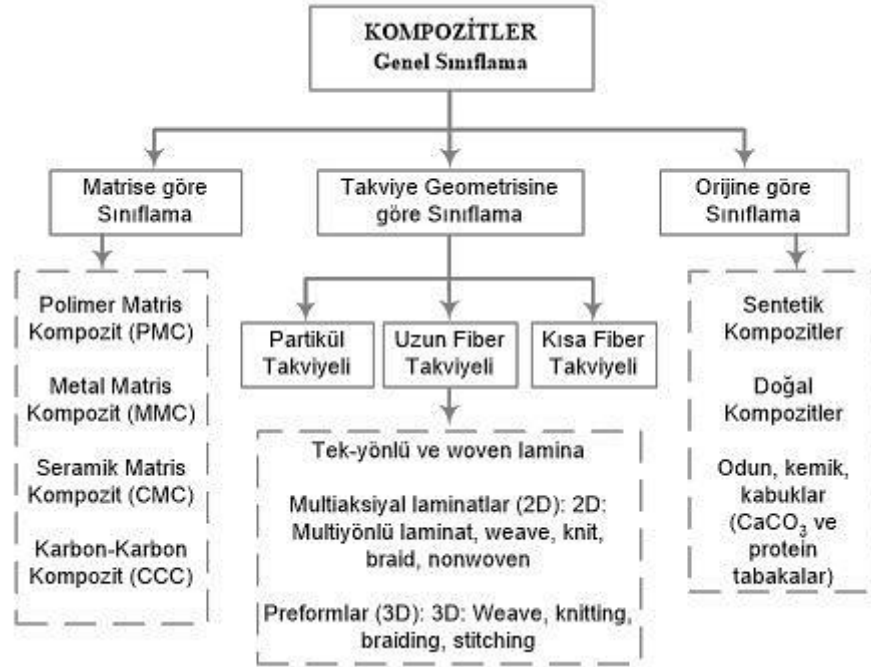
Şekil 2.1. Kompozit malzemelerin konvansiyonel tek fazlı malzemelere göre sahip olduğu üstün özellikler (Chawla 2012)

Sahip oldukları bu önemli avantajların yanı sıra bazı dezavantajları da bulunmaktadır;

- Farklı malzemelerle birleşmesi zordur,
- Farklı doğrultularda farklı mekanik özelliklere sahiptirler (izotropik olmama),
- Üretim aşamasında yoğun özen gerektirir, üretim esnasında yapı içinde nem veya hava boşluğu kalırsa yapının mekanik özellikleri olumsuz etkilenir,
- Delme ve kesme gibi işlemler yapıda süreksizliğe neden olduğundan yapının mekanik özellikleri olumsuz etkilenir,
- Kırılma uzamaları düşüktür,
- Standartlaşmış bir kalite yoktur.

Kompozit malzeme kavramı çok geniş bir varyasyonu kapsamaktadır. Yani kompozit malzemenin oluşumu sınırsız denebilecek kadar çok bileşenle sağlanabilmektedir. Bu sebeple kompozit malzemelerin kesin bir sınıflandırılma yöntemi bulunmamaktadır. Her ne kadar kesin bir sınıflandırma bulunmasa da bilimsel manada kullanılan farklı

sınıflandırmalar bulunmaktadır. Yaygın olarak kullanılan kompozit malzemelerin sınıflandırılmasını gösteren bir grafik şekil 2.2’de gösterilmektedir. Bu sınıflandırmaların ilkinde göre kompozit malzemeler 2 ana başlık altında incelenirler: Doğal Kompozitler ve Sentetik Kompozitler. Doğal kompozitler, doğada kendiliğinden oluşan biyolojik malzemelerdir. Bu tür malzemelere en iyi örnek kemik, diş, ceviz kabukları ve bambular gösterilebilir. Sentetik kompozitler ise özel üretimler sayesinde elde edilen doğal olmayan kompozit malzemelerin tümüdür. Kerpiç malzemesinden çimentoya kadar bir çok farklı tür bu gruba dahildir.



Şekil 2.2. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması (Beşergil 2016)

Diğer bir yaygın kullanılan sınıflandırma ise matris malzemesine göre yapılan sınıflandırmadır.

2.2. Matris Yapısına Göre Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemelerin yapısını oluşturan iki ana faz mevcuttur. Matris adı verilen ana faz ile takviye olarak nitelendirilen ikincil fazların fiziksel olarak birleşmesiyle kompozit yapılar elde edilmektedir. Yapının mukavemet özelliklerini takviye olarak nitelendirilen ikincil faz belirlerken; matris ana fazı, plastik deformasyon başlangıcında yapıda oluşabilecek çatlak ilerlemelerini engelleyen ve kompozitin kopmasını geciktiren bir göreve sahiptir. Ana fazın bir diğer görevi ise yapı içindeki takviye malzemelerini bir arada tutmak ve yapıya uygulanan yükü bu takviye elemanlarına homojen bir şekilde dağıtılmasını sağlamaktır. Bu sayede takviye elemanında plastik deformasyondan kaynaklanan çatlak ilerlemesinin önüne geçilmiş olur. Matris yapısına göre kompozit malzemeler 3 sınıfa ayrılmaktadır,

- ❖ Metal Matrisli Kompozitler
- ❖ Seramik Matrisli Kompozitler
- ❖ Polimer Matrisli Kompozitler

2.2.1. Metal Matrisli Kompozitler

Sünek bir metal malzemenin kompozit malzemenin ana fazını oluşturmaları ve takviye malzemeleriyle birleşimiyle elde edilen kompozit malzeme türüdür. Bu tür malzemelerde matris daima metal veya metal alaşımı bir malzeme olurken yapıdaki ikincil faz olan takviyeler hem metal hem de farklı malzemelerden oluşabilmektedir. Bu tür kompozitlerin çalışma sıcaklığı 200°C ile 800°C arasında değişebilmektedir; bu sebeple yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılabilir. Ayrıca elektrik ve ısı iletkenliğinin gerektiği durumlarda da yine tercih edilen malzemelerdir. En yaygın kullanılan metal matris malzemeleri, Alüminyum, Titanyum, Magnezyum Alaşımları ve Çelik malzemelerdir. Mekanik birçok avantajının yanında her iki fazı arasında mekanik uyumluluğun düşük olması ve yüksek ağırlıklara sahip olma dezavantajına sahiptirler. Sürtünmeden kaynaklı yüksek sıcaklığa çıkan ve üstün bir dayanım gerektiren metal kesme parçaları, yüksek sıcaklık ve sürtünme altında çalışan motor parçaları genellikle

bu tür kompozitlerden üretilmektedir. Metal matrisli kompozit malzemeye örnekler şekil 2.3' te gösterilmektedir.



Şekil 2.3. Metal matrisli kompozit malzeme örnekleri (Anonim 2020a)

2.2.2. Seramik Matrisli Kompozitler

Sert ve kırılgan olan seramikler, yüksek sıcaklığa karşı üstün dayanım özellikleri sergileyen malzemelerdir. Yüksek sıcaklık uygulamalarının gerektirdiği yerlerde seramik matrisli kompozitler yaygın olarak kullanılmaktadır. Seramik matris nedeniyle bu tür yapılar oldukça sert ve kaymaya karşı dirençli yapılar olmaktadır. Sahip olduğu avantajların yanı sıra kırılgan olmaları, düşük tokluk değerine sahip olmaları ve termal şoklara karşı dayanıksız olmaları gibi bazı dezavantajlara sahiptirler. Yüksek ısıl dayanım gerektiren çalışma koşullarına sahip olan askeri ve uzay alanlarında kullanımları yaygındır. En yaygın kullanılan seramik matris türleri ise Alümina (Al_2O_3), Silisyum Karbür (SiC), Zirkona (ZrO_2) ve Silisyum Nitrür (Si_3N_4)'dür.

Günümüzde yaygın olarak kullanılan seramik matrisli kompozit malzemeden üretilmiş parçalara örnekler şekil 2.4’te gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Seramik matrisli kompozit malzeme parçaların kullanım örnekleri (Anonim 2020b, Anonim 2020c)

2.2.3. Polimer Matrisli Kompozitler

Polimer bir malzemenin kompozit yapıda ana faz olarak kullanılması ve takviye malzemesi ile birleşimiyle elde edilen kompozit malzeme türüdür. Kompozit malzeme dendiğinde akla ilk gelen bu tür aynı zamanda kompozit malzeme tabirinin yaygın karşılığı olarak da kullanılmaktadır. Bu tür yapılar havacılık ve uzay başta olmak üzere, otomotiv, denizcilik ve günlük alanlarda da çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Üretim prosesleri diğer türlere göre daha kolaydır. Kırılma ve çatlama dayanımı, ayrıca yorulma direnci yüksek olan bu malzemeler aynı zamanda aşınmaya, korozyona ve delinmeye karşı da dayanıklıdırlar. Sahip olduğu avantajların yanında diğer türlerin aksine termal dayanımları yapının ana fazı olan matrisin polimer olmasından dolayı düşüktür. Buna bağlı bir diğer dezavantajı ise termal genleşme katsayısının yüksek olmasıdır. Ağırlık/dayanım oranının düşük olması istenen yerlerde sıklıkla tercih edilir;

örneğin havacılık ve uzay, otomotiv, medikal ve elektronik alanları başlıca kullanım yerleridir.

İlerleyen başlıklar altında incelenecek olan kompozit malzeme türleri anlatılırken polimer matrisli kompozit oldukları varsayılarak, yani polimer matrisli kompozitler üzerinden anlatılacağından detaylı bilgiler alt başlıklarda verilecektir.

Elyafı düzenli bir sırada bir arada tutmak ve çevreden korumak matrisin rolüdür. Matris, elyafı yükleri aktarır ve özellikle bası yüklemelerinde elyaf mikroburluşmasında kaynaklanan zamansız hataların önlenmesinde kritik bir role sahiptir. Matris ayrıca kompozit yapıya şunları sağlar: tokluk, hasar toleransı ve darbe ve aşınma direnci. Matrisin özellikleri ayrıca maksimum kullanım sıcaklığını, neme ve sıvılara karşı direnci ve termal ve oksidatif kararlılığı belirler. İleri kompozitler için polimerik matrisler, termosetler veya termoplastikler olarak sınıflandırılır.

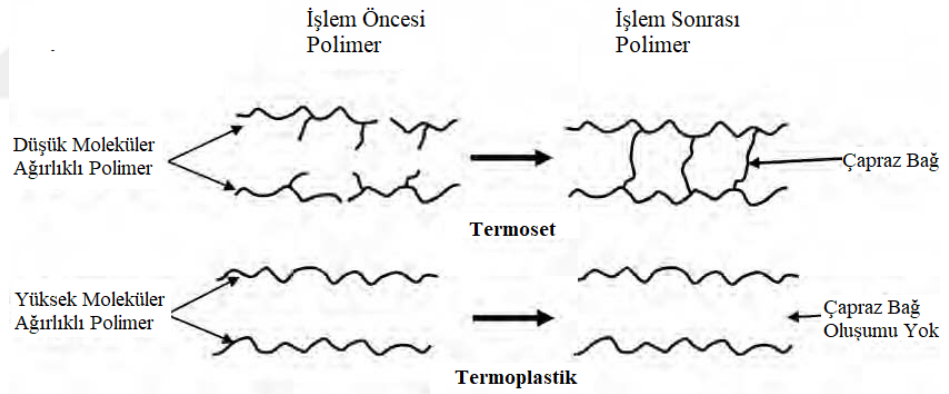
Günümüzde yaygın olarak kullanılan polimer matrisli kompozit malzemelere bazı örnekler şekil 2.5’ te gösterilmektedir.



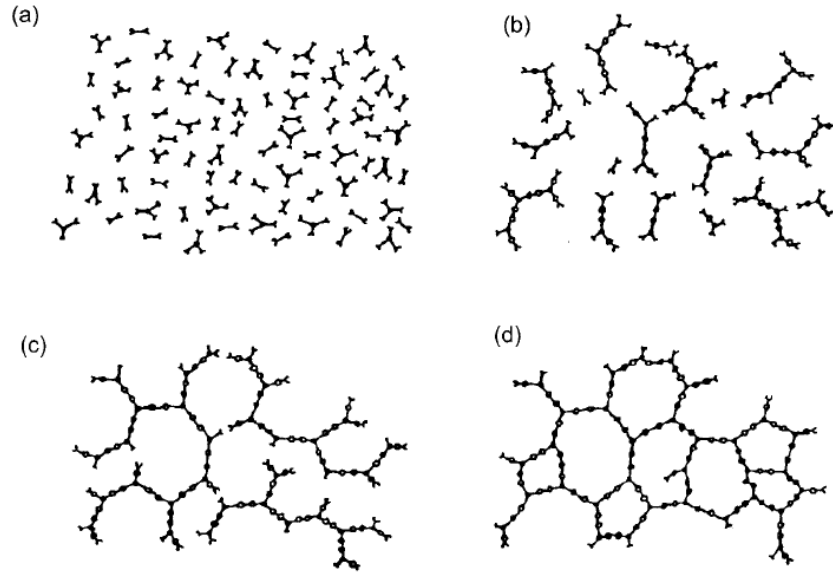
Şekil 2.5. Polimer matrisli kompozitlerden üretilmiş çeşitli parçalar (Anonim 2020d, Anonim 2020e, Anonim 2020f)

Termoset Matrisler

Termosetler, kürlenme sırasında çözünmeyen ve eritemeyen üç boyutlu çapraz bağlı yapılara dönüştürülen düşük moleküler ağırlıklı, düşük viskoziteli monomerlerdir (≈ 2000 centipoise). Şekil 2.6'da gösterilen çapraz bağlanma, kimyasal reaksiyonların kendileri tarafından üretilen ısı, örneğin ekzotermik reaksiyon ısısı veya harici olarak sağlanan ısı ile tahrik edilen kimyasal reaksiyonlardan kaynaklanır. Kürlenme ilerledikçe reaksiyonlar hızlanır ve moleküler düzenleme içindeki mevcut hacim azalır, bu da moleküllerin daha az hareketliliğine ve viskozitede bir artışa yol açar. Reçine jelleşip kauçuksu bir katı oluşturduktan sonra tekrar eritilemez. Daha fazla ısıtma, reçine tamamen sertleşene kadar ilave çapraz bağlanmaya neden olur. Kürlenme yoluyla bu ilerleme şekil 2.7'de gösterilmektedir. Kürlenme, termal olarak tahrik edilen kimyasal reaksiyonlar gerektiren bir olay olduğundan, termosetler oldukça uzun işlem sürelerine sahip olarak karakterize edilir.



Şekil 2.6. Kimyasal reaksiyon sonucu çapraz bağ oluşumu (Iberra 2014)



Şekil 2.7. Termoset reçine için kürlenme aşamaları a) Reaksiyon öncesi polimer ve sertleştirici b) Moleküllerdeki büyüme ile başlayan kürleme c) Tam ağ yapıdaki jelleşme d) Tam kürlenmiş ve çapraz bağlanmış hal (Lackey ve Star 1990)

Çizelge 2.1’de gösterildiği üzere termoset kompozit matrisler arasında polyesterler, vinil esterler, epoksiler, bismaleimidler, siyanat esterler, poliimidler ve fenolikler bulunmaktadır.

Çizelge 2.1. Termoset matris reçinelerinin bazı özellikleri

Polyesterler	Ticari uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. İşleme esnekliğine sahiptir ve nispeten düşük maliyetlidir. Sürekli ve süreksiz kompozitler için kullanılır.
Vinil Esterler	Polyesterlere benzer, ancak daha sert ve daha iyi nem direncine sahiptirler.
Epoksi	Sürekli fiber kompozitler için yüksek performanslı temel matris malzemeleridir. 135°C 'ye kadar sıcaklıklarda kullanılabilir (Geliştirilmiş bazı türlerinde 175°C 'ye kadar). Polyester ve vinil esterlerden daha iyi yüksek sıcaklık performansı sağlar.
Bizmaleimidler	Epoksi benzeri işlemlerle 135-175 ° C sıcaklık aralığında kullanıma uygun yüksek sıcaklık reçine matrisleridir. Yüksek sıcaklıkta son kütleme gerektirmektedir.
Siyanat Esterler	Siyanat esterleri, tek başına yüksek sıcaklıklarda veya düşük sıcaklıklarda uygun bir katalizör varlığında ısıtılarak iyileştirilebilir ve sonradan sertleştirilebilir. Epoksilere kıyasla çok daha iyi özelliklere sahip olmalarından havacılık ve uzay alanlarında kullanılmaktadır.
Poliimidler	Çok yüksek sıcaklık reçine sistemleri (280-315 ° C). İşlenmesi zordur.
Fenolikler	İyi duman ve yangın direncine sahip yüksek sıcaklık reçine sistemleri. Uçak iç mekanlarında yaygın olarak kullanılır. İşlenmesi zor olabilir.

Termoplastik Matrisler

Termoplastik kompozit malzemelerin potansiyel avantajlarını düşünmeden önce, bir termoset ve bir termoplastik arasındaki farkı anlamak gerekir. Şekil 2.6'da gösterildiği gibi, bir termoset sert bir katı oluşturmak üzere, kürleşme sırasında çapraz bağlanır. Kürleşmeden önce reçine, sertleştirme işleminin ilk kısmı boyunca eriyen ve akışan nispeten düşük bir moleküler ağırlıklı yarı katıdır. Kürleşme sırasında moleküler ağırlık arttıkça, viskozite reçine jel haline gelene kadar artar ve daha sonra güçlü kovalent çapraz bağları oluşur. Yüksek performanslı termoset sistemleri için elde edilen yüksek çapraz bağ yoğunlukları nedeniyle, tokluklarını arttırmak için adımlar atılmadıkça doğası gereği kırılıp parçalanırlar. Termoplastikler, aksine, işlemiden önce tamamen reaksiyona giren yüksek moleküler ağırlıklı reçinelerdir. İşleme sırasında erir ve akarlar, ancak çapraz bağlama reaksiyonları oluşturmazlar. Ana zincirleri nispeten zayıf ikincil bağlarla bir arada tutulur. Bununla birlikte, yüksek moleküler ağırlıklı reçineler oldukları için, işlem sırasında termoplastiklerin viskoziteleri, termosetlerinkinden daha yüksek miktarlardadır (örneğin, termoplastikler için 104-107 poise, termosetler için 10 poise).

Termoplastikler işleme sırasında çapraz bağlanmadığından, yeniden işlenebilirler. Örneğin, sadece işlem sıcaklığına yeniden ısıtılarak yapısal şekiller halinde ısıyla şekillendirilebilirler. Diğer yandan, yüksek çapraz bağlı yapıları nedeniyle termosetler yeniden işlenemez ve sonunda yeterince yüksek sıcaklıklara ısıtıldığında bozulurlar. Bununla birlikte, bir termoplastik maddenin yeniden işlenme sayısında bir sınırlama vardır. İşleme sıcaklıkları polimer bozunma sıcaklıklarına yakın olduğundan, birden çok yeniden işleme sonucunda reçine çözünür ve bazı durumlarda çapraz bağlanabilir.

Termosetler ve termoplastikler arasındaki yapısal fark, termoplastiklerin potansiyel avantajları hakkında bir fikir verir. Termoplastikler çapraz bağlanmadığından, termosetlerden doğal olarak çok daha serttirler. Bu nedenle, 1980'lerin başından ortalarına kadar kullanılan sertleştirilmemiş termoset reçinelere göre çok daha fazla hasara toleranslıdır ve düşük hızlı darbe hasarına karşı dayanıklıdır. Bununla birlikte,

esas olarak reçineye termoplastik ilaveler ile, termoset reçineler için geliştirilmiş sertleştirme yaklaşımlarının bir sonucu olarak günümüzde mevcut termosetler, termoplastik sistemlerinkiyle bir ölçüde karşılaştırılabilir tokluk sergilemektedir.

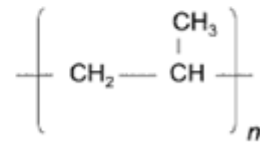
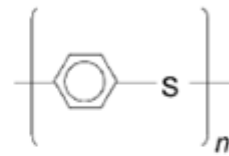
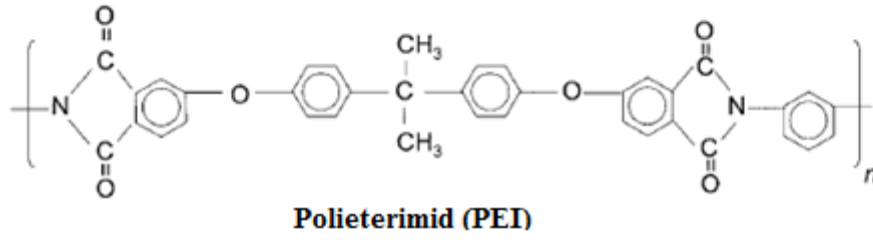
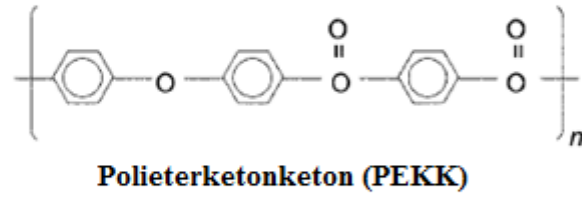
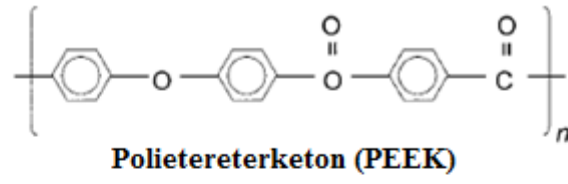
Termoplastikler kürlleme sırasında kimyasal reaksiyona girmeyen tam reaksiyonlu yüksek moleküler ağırlıklı reçineler olduğundan bu malzemelerin üretilmesi teorik olarak daha basit ve daha hızlıdır. Termoplastikler dakikalar hatta saniyeler içinde birleştirilebilir ve ısıyla şekillendirilebilir, Termosetler ise kimyasal reaksiyonlar yoluyla moleküler ağırlık ve çapraz bağ oluşturmak için uzun kürler (saatler) gerektirir. Bununla birlikte, termoplastikler tamamen reaksiyona girdiğinden, yapışma içermezler ve prepreg sert ve katıdır. Termoplastik kompozitlerin bir diğer avantajı ise sağlık ve güvenliği içerir. Bu malzemeler tamamen reaksiyona girdiğinden çalışan için, düşük moleküler ağırlıklı reaksiyona girmemiş reçine bileşenlerinden kaynaklı tehlike yoktur. Buna ek olarak, termoplastik kompozit prepreg'ler, termoset prepregler gibi soğutma gerektirmez. Esasen sonsuz bir raf ömrüne sahiptirler, ancak işlemiden önce yüzey nemini gidermek için kurutulması gerekebilir.

Termoplastiklerin bir başka potansiyel avantajı düşük nem emilimidir. Sertleşen termoset kompozit parçalar atmosferdeki nemi emerek yüksek sıcaklık (sıcak-ıslak) performansını düşürür. Birçok termoplastik çok az nem emdiğinden, böyle bir sorunu da yoktur. Buna karşılık, termosetler yüksek oranda çapraz bağlanmış ve çalışma anında karşılaşılan çoğu sıvı ve çözücülere karşı dirençlidir. Bazı amorf termoplastikler çözücülere karşı çok hassastır ve birçok boya sıyrıcısı için ortak bir baz olan metilen klorürde bile çözünebilirken, diğerleri, özellikle yarı kristalli termoplastikler, çözücülere ve diğer sıvılara karşı oldukça dirençlidir.

Termoplastikler, erime sıcaklıklarının üzerine ısıtılarak yeniden işlenebildikleri için şekillendirme ve birleştirme uygulamalarında büyük bir avantaja sahiptirler. Örneğin, büyük, düz termoplastik kompozit tabakalar otoklavlanabilir veya presle birleştirilebilir, daha küçük boşluklar halinde kesilebilir ve daha sonra yapısal şekiller halinde ısı ile

şekillendirilebilir. Ne yazık ki, bunun pratikte tahmin edilenden çok daha zor olduğu kanıtlanmıştır. Pres oluşturma işlemleri, sürekli elyaf takviyesinin uzatılamaz doğası nedeniyle nispeten basit geometrik şekillerle sınırlıdır. Bir kusur (bağlanmamış gibi) keşfedilirse, parça genellikle kusuru iyileştirmek için yeniden işlenebilir, ancak pratikte bu tür onarımlar istenmeyen lif bozulması ve ilişkili yapısal özellik bozulması olmadan nadiren pratiktir. Termoplastiklerin kolayca eriyebilen doğası, eriyik füzyonu, direnç kaynağı, ultrasonik kaynak ve indüksiyon kaynağı, geleneksel yapışkan yapıştırma ve mekanik sabitlemeye gibi birçok yönteme müsade etmektedir.

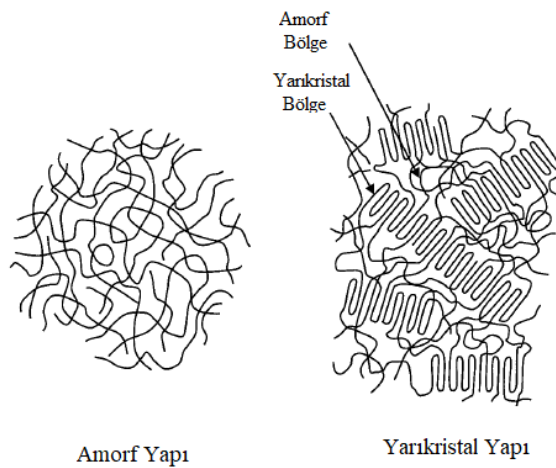
1980'lerde onlarca termoplastik matris ve ürün formu sanayiye sunuldu. Bugün piyasada bulunan sayı çok daha azdır. En önemli beş malzeme şekil 2.8'de gösterilmektedir. Polietereterketon (PEEK), polieterketoneketon (PEKK), polifenilen sülfür (PPS) ve polipropilen (PP) yarı kristal termoplastiklerdir, polieterimid (PEI) amorf bir termoplastiktir. PEEK, PEKK, PPS ve PEI normalde sürekli elyaf takviyeli termoplastik kompozitler için kullanılırken, PP otomotiv endüstrisinde süreksiz bir cam elyaf taviyel ürün formu olarak ve son yıllarda sürekli elyaf takviyeli yapılarda yaygın olarak kullanılan düşük sıcaklık reçinesidir.



Şekil 2 8. Bazı termoplastik reçinelerin kimyasal yapıları (Campbell 2010)

Amorf ve yarıkristalli bir termoplastik arasındaki farklar şekil 2.9'da gösterilmektedir. Amorf yapıdaki bir termoplastik, devasa bir karışık dolaşmış moleküler zincir dizisi içerir. Zincirlerin kendileri güçlü kovalent bağlarla bir arada tutulurken, zincirler arasındaki bağlar çok daha zayıf ikincil bağlardır. Amorf termoplastikler iyi uzama, tokluk ve darbe dayanımı sergiler. Zincirler uzadıkça moleküler ağırlık artar, viskozitede bir artışa yol, daha yüksek erime noktalarına çıkılmasına ve daha fazla zincir dolaşımına yol açar ve bunların hepsi daha yüksek mukavemet sağlar.

Yarı kristal termoplastikler, amorf bölgelerle birbirine bağlanmış sıkıca katlanmış zincir (kristalit) alanlar içerir. Amorf termoplastikler, ısıtmada kademeli bir yumuşama gösterirken, yarı kristalli termoplastikler, kristalin bölgeler çözünmeye başladığında keskin bir erime noktası sergiler. Kristallik yoğunluğu artırır. Yoğunluk artışı, yarı kristalli termoplastiklerin geliştirilmiş çözücü direncinin açıklanmasına yardımcı olur, çünkü çözücü moleküllerinin sıkıca paketlenmiş kristallitlere nüfuz etmesi zorlaşır. Kristallik mukavemeti, sertliği, sünme direncini ve sıcaklık direncini artırır, ancak genellikle tokluğu azaltır. Sıkı paketlenmiş kristal yapı, zincir hareketliliğini azaltarak ve sınırlandırarak termosetlerde çapraz bağlanma gibi davranır. Kristallik, en düşük serbest enerji durumunu elde etmek için ısıнын verildiği ekzotermik bir süreçtir (Campbell 2010).



Şekil 2.9. Amorf ve yarı-kristal termoplastik yapıların karşılaştırılması (Campbell 2010)

2.2.4. Karbon-Karbon Kompozitler

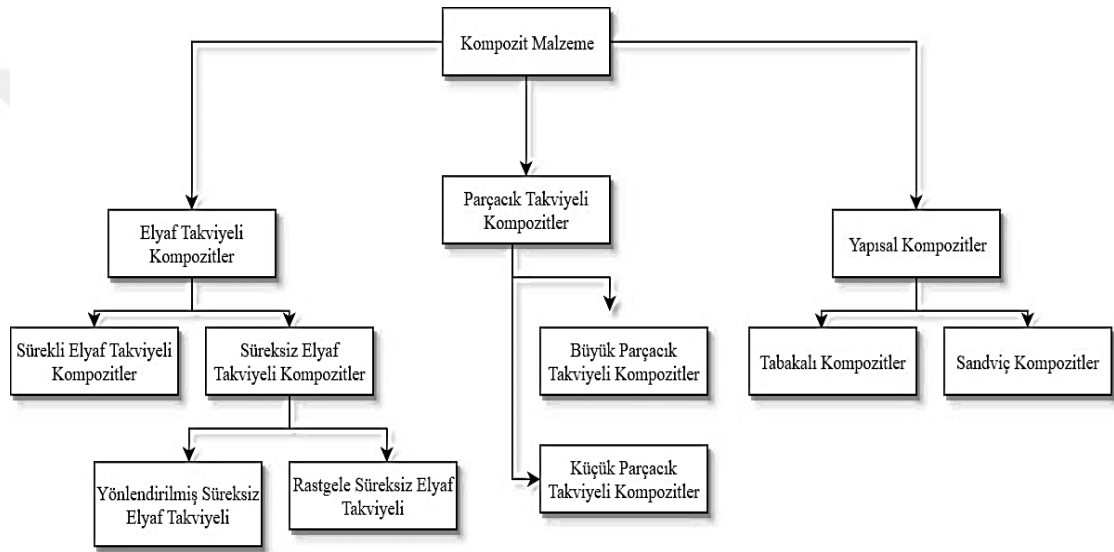
Yapıyı oluşturan ana faz ve ikinci fazda, yani hem matris malzemesinde hem de takviye malzemesinde karbon kullanılarak elde edilen yeni bir kompozit malzeme türüdür. Bu tür yapıların en önemli özellikleri çok hafif olmaları yanında çok yüksek dayanımlara sahip olmalarıdır. Ayrıca çok yüksek sıcaklıklar altında bile ($\sim 2000^{\circ}\text{C}$) yüksek modül ve mukavemet değerlerine sahiptirler. Bu nedenle sürünmeye karşı fevkalade dayanıklıdırlar. Termal genleşme katsayıları düşüktür ve termal iletkenlik değerleri yüksektir. Bu avantajlarının yanında sahip olduğu dezavantajlar şu şekilde sıralanabilir; koruyucu kaplama ile kullanılmadığında nispeten düşük sıcaklıklarda bile ($400-500^{\circ}\text{C}$) oksitlenebilir, kaplama maliyeti ve üretim prosesinin karmaşık olması nedeniyle maliyetleri yüksek, pahalı malzemelerdir. Karbon-Karbon kompozit malzemeler, sahip olduğu bu özelliklerle roket ve uçak motorlarında, yüksek performans araçların sürtünmeye maruz parçalarında ve türbin motorları gibi üstün performans gerektiren yerlerde kullanılmaktadırlar. Karbon-Karbon kompozit malzeme kullanılarak üretilen parçalara örnekler aşağıda şekil 2.10'da gösterilmektedir.



Şekil 2.10. Karbon-karbon (Grafit-Karbon) kompozit malzeme kullanılarak üretilmiş bazı parçalar (Anonim 2020g, Anonim 2020h, Sharma ve ark 2017)

2.3. Takviye Geometrisine Göre Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler kullanılan matris malzemesine göre sınıflandırılması dışında bir de kullanılan takviye malzemesinin geometrisine göre sınıflandırılırlar. Bu sınıflandırmada 3 ana başlık altında yapılmaktadır. Bunlardan ilki Elyaf Takviyeli Kompozitler, ikincisi Parçacık Takviyeli Kompozitler ve son olarak da Yapısal Kompozitlerdir.



Şekil 2.11. Takviye geometrisine göre kompozit malzemelerin sınıflandırılması

Yukarıda şekil 2.11’de kompozit malzemelerin sınıflandırılmasına ait grafik gösterilmektedir.

2.3.1. Parçacık Takviyeli Kompozitler

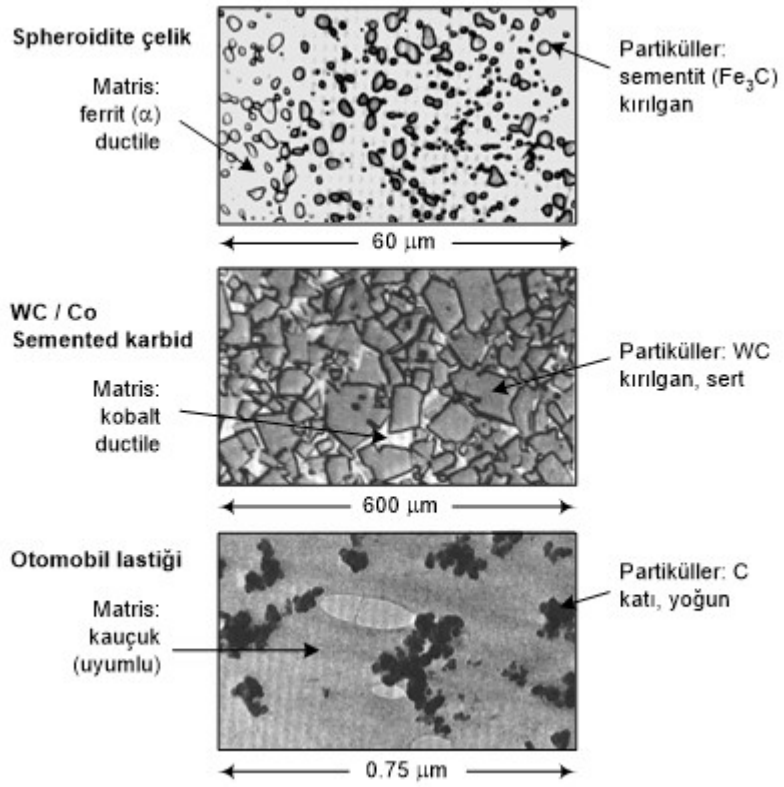
Kompozitlerde parçacık takviyesi, elyaf takviyesinden daha az etkili bir güçlendirme aracıdır. Partikül takviyeli kompozitler, esas olarak sertlik değerinde artış elde eder, fakat aynı zamanda mukavemet ve tokluk değerlerinde artışlar da elde edebilir. Her

durumda, fiber takviyeli bir kompozitte elde edilebilecek kazanımlardan daha düşük özellikler sağlanmaktadır. Partikül takviyeli kompozitler, takviye malzemenin kuvvetlendirme mekanizmasına göre iki gruba ayrılır: Büyük partikül takviyeli kompozitler ve dispersiyonla-kuvvetlendirilmiş (küçük partikül takviyeli) kompozitler.

Buradaki “büyük” terimi parçacık-matris etkileşiminin atomik veya moleküler seviyede olmadığını, mekanik seviyede bir birleşim olduğunu belirtir. Bu tip kompozitlerin hemen hepsinde parçacık faz matristen daha sert ve daha yoğundur. Bu nedenle her parçacık etrafındaki matris fazının hareketini engeller. Tıpkı elyaflarda olduğu gibi matris üzerine gelen yükün bir kısmını parçacıklara iletir. Yapının mekanik özellikleri matris-parçacık ara yüzeyindeki bağlanma kuvvetine bağlıdır.

Dispersiyonla kuvvetlendirilmiş kompozitlerde parçacıklar çok küçüktür (10-100 nm). Bu tip kompozitlerde yapının kuvvet mekanizması parçacık ile matris arasında gerçekleşen atomik veya moleküler bağ sayesinde oluşur.

Her iki tür parçacık takviyeli kompozit örnekleri aşağıda şekil 2.12’de gösterilmektedir.



Şekil 2.12. Büyük parçacık takviyeli ve dispersiyonla kuvvetlendirilmiş kompozit (Beşergil 2016)

Büyük Partikül Takviyeli Kompozitler

- Dolgu maddeli bazı polimerik malzemeler büyük partikül takviyeli kompozitlere örnek olarak gösterilebilir; dolgular polimerin özelliklerini değiştirir veya iyileştirir.
- Partiküller çok farklı geometrilerde olabilmektedir; ancak her yönden yaklaşık olarak aynı boyutta olmalıdırlar.
- Etkili bir takviyelendirme için, parçacıklar küçük olmalı ve matris boyunca eşit olarak dağılmalıdır. Kompozitteki hacim oranları genelde %15 ila %40 arasında değişmektedir.
- Her iki fazın hacim oranı mekanik davranışı etkiler. Mekanik özelliklerin artırılması parçacık miktarının artırılmasıyla sağlanır.

- İki-fazlı bir kompozitte elastik modül fazların hacim oranlarına bağlı olarak iki matematiksel formülle tanımlanır. Bu tanım “karışım kuralına” göre yapılır ve Elastik modül bir üst ile alt sınır arasında tanımlanır.

Üst Limit:

$$E_c = V_m \cdot E_m + V_p E_p \quad (2.1)$$

Alt Limit:

$$E_c = \frac{E_m \cdot E_p}{V_m E_p + V_p E_m} \quad (2.2)$$

Burada;

E_c : Kompozitin Elastik Modülünü,

E_m : Matrisin Elastik Modülünü,

E_p : Parçacığın Elastik Modülünü,

V_m : Matrisin Hacim Oranını,

V_p : Parçacığın Hacim Oranını tanımlamaktadır.

Dispersiyonla Kuvvetlendirilmiş Parçacık Takviyeli Kompozitler

- Dispersiyonla kuvvetlendirilmiş terimi, matris içinde düzgün dağılıma sahip çok küçük durağan faz parçacıklarıyla kompozitin kuvvetlendirilmesi için kullanılmaktadır.
- Parçacık boyutu 100nm’yi geçmemekle birlikte genelde 10 ila 100 nm arasında değişmektedir.
- Dispersiyon fazı metalik veya non-metalik yapılar olmakla birlikte genelde oksit halindeki malzemeler tercih edilir.

2.3.2. Süreksiz Elyaf Takviyeli Kompozitler

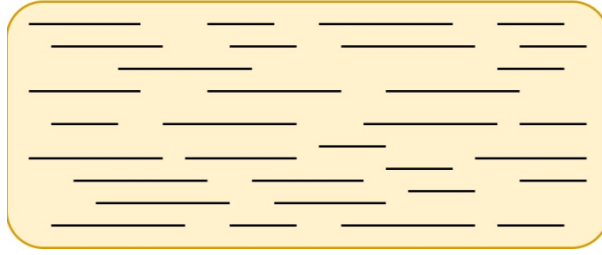
Kompozit malzeme içinde takviye elemanı olarak kullanılan elyafların boyu, kompozitin boyuna kıyasla kısa ise bu tip kompozitlere kısa elyaf takviyeli kompozitler denmektedir. Bu tür kompozitler, sürekli elyaf takviyeli olanlara göre nispeten daha düşük mekanik özelliklere sahip olmalarına rağmen düşük maliyet ve kolay üretilebilirlikleri sayesinde oldukça yoğun ilgi çeken malzemelerdir. Yapıda takviye malzemesi olarak genellikle kırpık cam elyaf kullanılsa da yer yer aramid, karbon ve pamuk kırpık elyafların da kullanımına rastlanılmaktadır. Bu tip yapılarda en önemli unsur ise matris içindeki elyafın kritik elyaf uzunluğuna oranıdır; zira elyaflar yapıya destek vermek yerine yapı içinde bir arayer veya kusur gibi davranarak çatlak ilerleyişini başlatır ve kolaylaştırır. Bu nedenle de yapı dayanımında düşüş gözlemlenir. Süreksiz elyaf takviyeli kompozitlerin dayanımları benzer yapıdaki sürekli elyaf takviyeli kompozit yapılara oranla yarı yarıya kadar düşebilmektedir.

Süreksiz elyaf takviyeli kompozitler 2 grupta incelenir:

- Süreksiz ve Yönlendirilmiş Elyaf Takviyeli Kompozitler
- Süreksiz ve Rastgele Diziliimli Elyaf Takviyeli Kompozitler

Süreksiz ve Yönlendirilmiş Elyaf Takviyeli Kompozitler

Bu tip yapılarda matris içindeki takviye elemanı elyafların tek bir yöne doğru dizilimi sağlanır. Bu sayede yapı tek yönde istenilen düzeyde kuvvetlendirilebilmektedir. Bu durum şekil 2.13'te gösterilmektedir. Bu tip kompozitler anizotropik yapıdadır. Fiber dizilim yönünde en büyük dayanım sağlanırken, buna dik yönde dayanım oldukça düşüktür.



Şekil 2.13. Süreksiz ve yönlendirilmiş elyaf takviyeli kompozit yapısı

Elyaf uzunluğunun kritik elyaf uzunluğundan büyük olması durumunda $L \geq L_{kr}$;

L : Elyaf Uzunluğu

L_{kr} : Kritik Elyaf uzunluğu

Bu durumda, Kompozitin boylamasına (fiber doğrultusunda) dayanımı;

$$\sigma_{11} = \sigma_f \cdot V_f \left(1 - \frac{L_{kr}}{2L}\right) + \sigma_m V_m \quad (2.3)$$

σ_{11} : Kompozitin Elyaf Doğrultusundaki Dayanımı

σ_f : Elyafın Dayanımı

σ_m : Kompozit Hasara Uğradığında Matristeki Gerilme

V_f : Elyaf Hacim Oranı

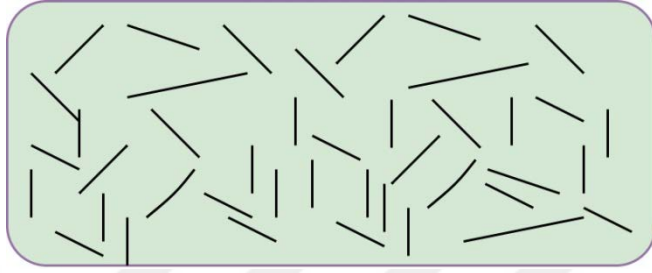
V_m : Matris Hacim Oranı

Elyaf uzunluğunun kritik elyaf uzunluğundan küçük olması durumunda $L \leq L_{kr}$;

$$\sigma_{11} = \frac{L \cdot \tau_{12}}{d} \cdot V_f + \sigma_m \cdot V_m \quad (2.4)$$

Süreksiz ve Rastgele Dizilimli Elyaf Takviyeli Kompozitler

Matris içindeki fiberlerin herhangi bir dizilme tabii olmadan, rastgele ve farklı yönlerde dizilimleriyle elde edilen kompozit türüdür. Rastgele dizilimli elyaf takviyeli kompozit malzeme grafiği şekil 2.14'te gösterilmektedir. Bu tip yapılarda Modül hesabı karışım kuralına bağlı olarak hesaplanır.



Şekil 2.14. Süreksiz ve rastgele elyaf dizilimli kompozit yapı

$$E_{11} = K \cdot E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_m \quad (2.5)$$

Burada;

K : Elyafın Verim Parametresi olmakla birlikte değeri 0.1 ile 0.6 arasındadır.

E_{11} : Kompozitin 0 doğrultusundaki elastisite modülünü temsil eder.

2.3.3. Sürekli Elyaf Takviyeli Kompozitler

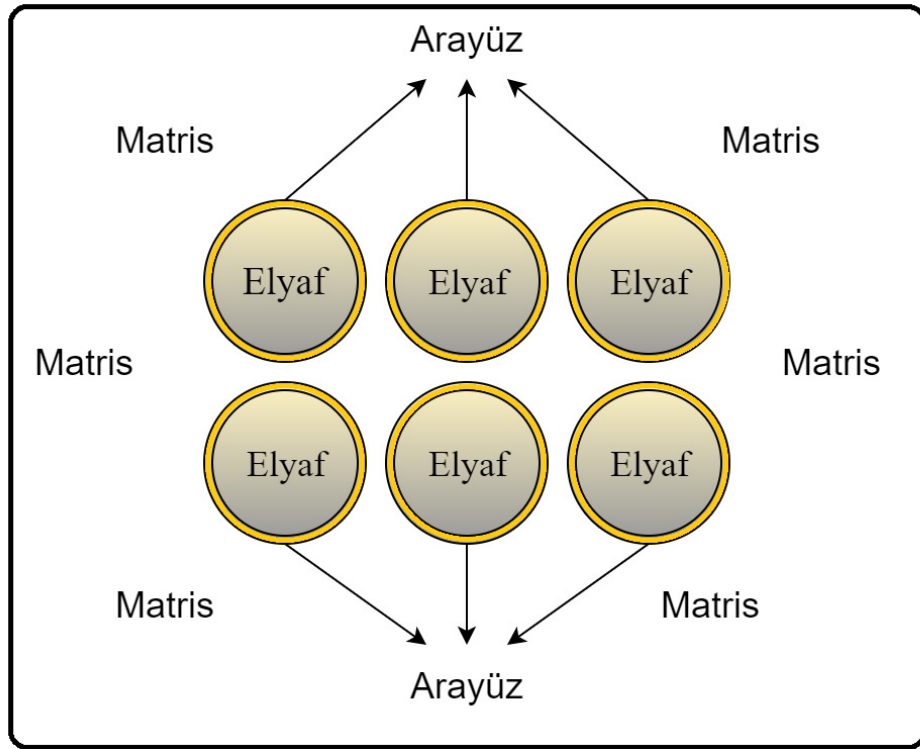
Günümüzde “kompozit malzeme” dendiğinde akla gelen yapı bu grubu tanımlamak için kullanılmaktadır. Yaygın bir biçimde kompozit malzeme tanımının karşılığı olarak kullanılan sürekli elyaf takviyeli kompozit malzemelerde kullanılan elyafların boyu $L \gg L_{kr}$ ya da daha özel bir ifadeyle $L > 15 \cdot L_{kr}$ olmalıdır (Ekşi 2013). Sürekli lifler,

kontrollü anizotropileri ve düşük yüzey boyutu ve kusurları nedeniyle mukavemet ve sertlik gibi özelliklerde genellikle maksimum değerlere ulaşan uzun liflerdir (Barbero 2017). Sürekli elyaf takviyeli kompozitlerde yükün, çoğunlukla yükün yönü boyunca yönlendirilmiş elyaf tarafından taşındığı varsayılır.

İşte tam da bu noktada kompozit malzemeler için çok büyük önemi olan bir durumdan söz etmek gerekmektedir. Yapı mukavemetini belirleyen temel unsur olan bu etmen “arayüz” olarak bilinmektedir.

Arayüz

Arayüz, kompozit malzemelerinde içinde bulunduğu heterojen sistemli malzemelerin özelliklerini büyük ölçüde belirleyen kilit bölgedir. Daha önceki tanımlara göre tipik bir kompozit malzeme sürekli matris fazı içinde yayılmış veya yerleştirilmiş ikincil fazların (elyaf, parçacık veya diğerleri) fiziksel, kimyasal veya mekanik bağlarla birleşmesiyle elde edilmektedir. Yapıya gelen yükün matris fazından takviye fazına aktarıldığı, iki fazın arasında kalan arafaz ya da geçiş fazı denilen bölge malzemenin son mekanik özelliklerini belirleyen temel kısımdır. Kompozit yapılarıdaki matris ile elyaf arasındaki arayüzeyi gösteren bir grafik şekil 2.15’te gösterilmektedir.



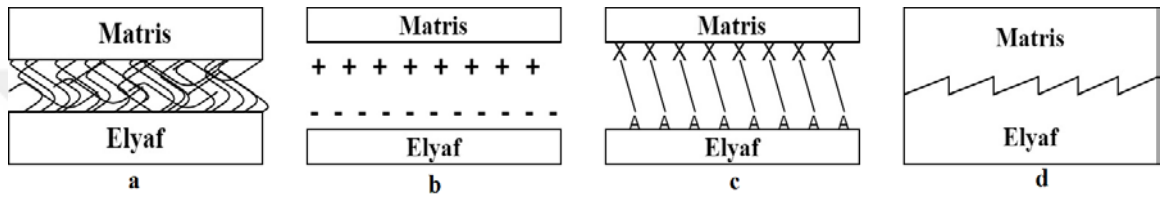
Şekil 2.15. Elyaf-matris arasında oluşan arayüz (arafaz) bölgesi

Kompozit malzemeye kuvvet uygulandığında, yük matris fazından yükü esas taşıyacak olan takviye fazına sağlam bağlanmış bir arayüz vasıtasıyla aktarılır. Malzeme bu bölgede ne matris fazı gibi ne de takviye fazı gibi davranır. Bu bölge her iki elemandan da farklı davranış sergiler. Yapıda kullanılan elyafların çapının küçülmesiyle arayüz bölgesi daha fazla önem kazanır. Bu faz kusursuz oluşturulduğu durumlarda yapıya büyük dayanımlar sağladığı için son yıllarda yapılan kompozit malzemelere nano boyutta katkılar ilave edilerek yapının dayanımında büyük artışlar sağlanmıştır.

Basit bir sistemde bir arayüzde bağlanma, elyaf ve matris arasındaki yapışmadan kaynaklanır. Yapışma, arayüzde bağın üretilmesi için tek başına veya kombinasyon halinde meydana gelebilecek beş ana mekanizmaya bağlıdır (Hull 1996).

- a- Yüzeye tutunma ve Islanma
- b- Ara difüzyon
- c- Elektrostatik çekim
- d- Kimyasal bağlanma
- e- Mekanik yapışma

Yapışma mekanizmalarının grafiksel gösterimi şekil 2.16'da örnek olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.16. Elyaf-Matris arayüz yapışma mekanizmaları a-)İnterdifüzyon sonrası moleküler dolaşım ile oluşan bağ b-) Elektrostatik çekim sonrası oluşan yapışma c-)Her iki yüzeydeki X ve A gruplarının kimyasal birleşimi ile oluşan Kimyasal bağlanma d-) Matrisin pürüzlü elyaf yüzeyini ıslatmasıyla oluşan mekanik bağlama

Sürekli elyaf takviyeler matris içinde çeşitli formlarda olabilmektedir: İp teli (strand), lif (tow), iplik (yarn) ve lif demeti (roving). İp teli (strand) veya iplik (tow), bükülmemiş sürekli elyaf demeti için kullanılan bir birimdir. Bir ip telindeki tüm lifler aynı anda, tek fırından üretilir ve birlikte döndürülür. Bir iplik (yarn) bükülmüş bir ip telidir. Lif demeti (roving) ise, paralel sürekli ip tellerinin bir demet halinde olmasıdır. Lif demetleri, istenen ağırlık numaralandırmasını elde etmek için gereken sayıda tekli ip tellerinin birbirine sarılmasıyla üretilir. Ağırlık numaralandırması, bir elyaf demetinin doğrusal yoğunluğunu tarif etmeye yardımcı olan bir terimdir. Yani birim olarak incelendiğinde, belirli bir uzunluğa düşen ağırlık miktarıdır. En yaygın kullanılan ağırlık numaralandırma birimi ise TEX'tir ve g/km olarak verilmektedir. Özellikle karbon elyaflarda ise "tow" denilen ve bir demetteki elyaf sayısını ifade eden bir terim kullanılmaktadır. Karbon elyaflarda TEX ile Tow sayısı arasında şu şekilde bir bağıntıdan bahsetmem mümkündür;

$$TEX = \frac{\pi \cdot d_f^2}{4} \cdot \rho_f \cdot K \quad (2.6)$$

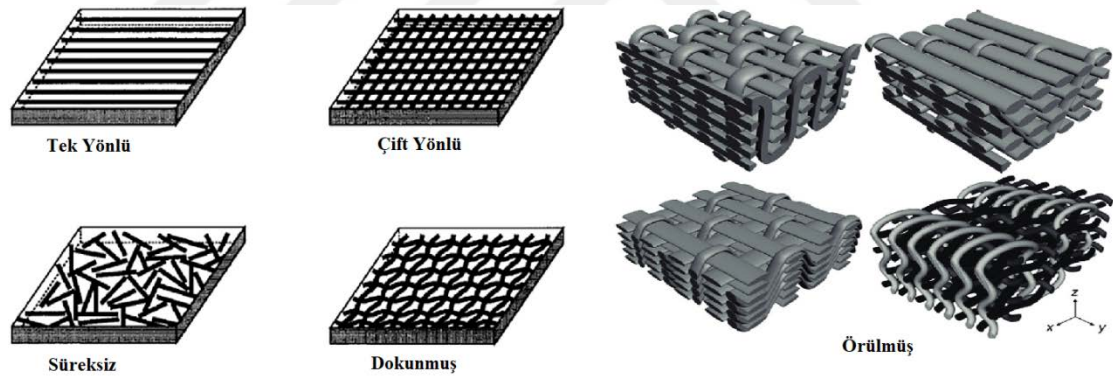
Burada;

ρ_f : Elyafın yoğunluğunu,

d_f : Elyafın çapını,

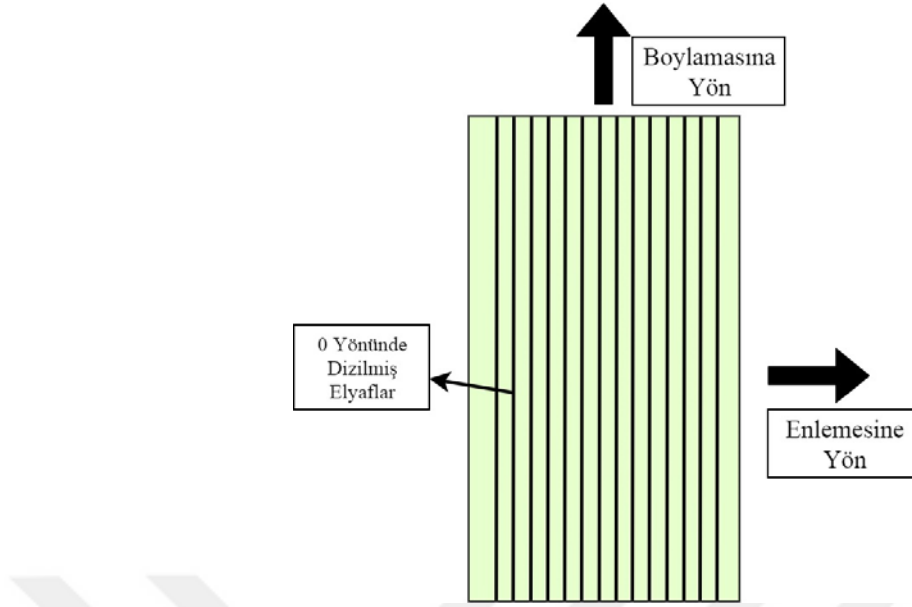
K : 1000 çarpanlı tow sayısını ifade etmektedir.

Sürekli elyaf takviyeler yapı içinde genellikle lif demeti, tek yönlü kumaş, farklı desenlerde dokunmuş kumaşlar veya örülmüş kumaş olarak kullanılmaktadır. Bu farklı yapıların örnekleri aşağıda şekil 2.17’de gösterilmektedir.



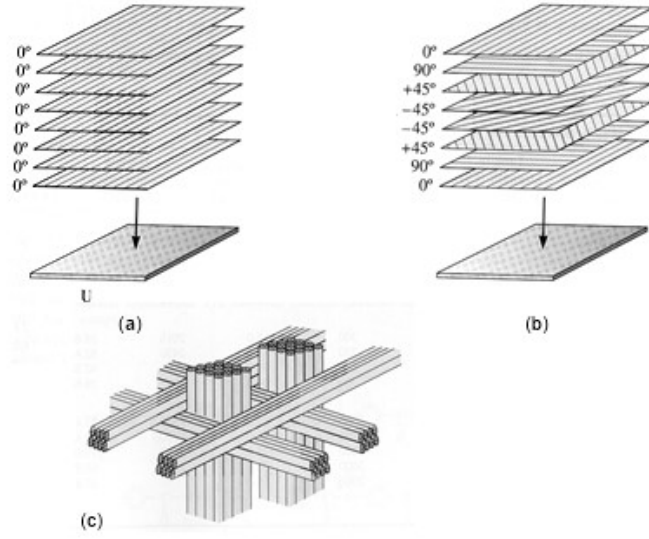
Şekil 2.17. Kompozit malzemelerde kullanılan farklı fiber geometrileri (Günel 2007)

Elyafların matris içindeki yönelimleri kompozit malzemenin dayanımını belirleyen ana faktördür. Boylamasına yapılan dizilimde kompozite etki eden yük elyaf ile aynı yönde olduğunda en yüksek dayanım değeri elde edilirken etki eden yükün elyaf ile aynı doğrultuda olmaması, bir miktar farklı açıda olması bile, yapının dayanımında büyük düşüşlere neden olur. Şekil 2.18’de elyaf takviyeli kompozit yapının elyaf dizilimine göre boylamasına ve enlemesine yönleri gösterilmektedir.



Şekil 2.18. Elyaf dizilimine göre kompozit malzemenin boylamasına ve enlemesine doğrultuları

Uygulamada tek yönlü yüke maruz kalan kompozit malzemeler çok yaygın değildir. Bu sebeple yaygın olarak kullanılan ve tercih edilen karışık elyaf oryantasyonuna sahip kompozit yapılardır. Bu yapıların elde edilmesi içinse sürekli veya süreksiz elyaf takviyeli tek tabakalı teypler farklı yönlerde istiflenebilir. Açılı ve tabakalı kompozitlerin özellikleri tabaka sayısına ve elyaf oryantasyonuna göre değişkenlik gösterir. Çeşitli varyasyonlar ile anizotropik yapıdaki tabakalar, belirli oryantasyonlarla istiflendiğinde yapılar ortotropik malzeme özelliklerine veya enine izotropik malzeme özelliklerine geçiş yapabilir. Hatta farklı açılarda bir araya getirilmiş tabakalar aracılığı ile “quasi izotropik” yani izotropik gibi yapılar halini alabilmektedirler. Buna ek olarak 3 boyutlu örülmüş kumaşlarla da yapılar elde edilebilmektedir. Farklı katman oryantasyonuna sahip yapılar şekil 2.19’da verilmektedir.



Şekil 2.19. a) Tek yönlü dizilim b) Çapraz tabaka dizilimi (Quasi izotropik dizilim) c) 3 Boyutlu örgü (Beşergil 2017)

Yukarıda bahsi geçen Anizotropik, Ortotropik ve Enine İzotropik malzemeler hakkında kısaca şu bilgilerin verilmesi yerinde olacaktır.

Anizotropik Malzeme: Maddelerin fiziksel veya mekanik özelliklerinin yöne bağlı olarak değiştiği malzemelerdir. Malzemenin sahip olduğu [6x6] rijitlik matrisindeki ([C]) 21 elastik sabitin bulunduğu malzemelerdir. Anizotropik yapıya sahip malzemelerin [C] rijitlik matrisi şu şekilde ifade edilir.

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix}$$

Bu matriste toplam 36 eleman bulunmaktadır. Fakat köşegene göre simetrik elemanlar eşit olduğundan toplamda 21 farklı sabite sahip olmaktadır. ($C_{12}=C_{21}$, $C_{51}=C_{15}$ gibi.). Rastgele elyaf takviyeli kompozit malzemelerin birçoğu anizotropik özellikte malzemelerdir.

Ortotropik Malzeme: Eğer bir malzeme, karşılıklı olarak birbirine dik 3 malzeme simetri düzlemine sahipse bu tür yapılara ortotropik malzeme denir. Bu yapılarda esasen anizotropik malzemelerin bir alt kümesidir, çünkü özellikleri farklı yönlerden ölçüldüğünde değişmektedir. Bu tip yapılarda tercih edilen koordinat sistemi silindirik-polar ise bu tip yapılara polar ortotropi adı verilmektedir. Tek eksenli simetriye sahip enine izotropik malzemenin yaygın bir örneği, paralel cam veya grafit elyaflarla takviye edilmiş bir polimerdir. Böyle bir kompozit malzemenin mukavemeti ve sertliği genellikle elyaflara paralel bir doğrultuda enine yönde olduğundan daha büyük olacaktır ve kalınlık yönü genellikle enine yöne benzer özelliklere sahiptir.

Ortotropik malzemeye ait rijitlik matrisli aşağıda gösterildiği gibidir. Bu malzemeler 9 bağımsız sabite sahiptirler. Bu yapılar anizotropik malzemelerin aksine daha yaygın bir şekilde bulunan malzeme simetrisidir.

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix}$$

Ortotropik durumda aşağıdaki şu bağıntılar geçerlidir.

$$C_{16}=0, C_{26}=0, C_{36}=0, C_{45}=0$$

Transverse (Enine) İzotropik Malzeme: Enine bir izotropik malzeme, bir izotropi düzlemine dik olan bir eksen etrafında simetrik olan fiziksel özelliklere sahip bir malzemedir. Bu enine düzlem sonsuz simetri düzlemlerine sahiptir ve bu nedenle bu düzlemde malzeme özellikleri tüm yönlerde aynıdır. Dolayısıyla, bu tür malzemeler "polar anizotropik" malzemeler olarak da bilinir. Jeofizikte, dikey olarak enine izotropi (VTI) radyal anizotropi olarak da bilinir. Bu tür malzeme altıgen simetri sergiler (teknik olarak bu, 6. ve daha üst sıradaki tensörler için doğru olmaz), bu nedenle (dördüncü mertebe) elastikiyet tensöründeki bağımsız sabitlerin sayısı 5'e (tamamen anizotropik bir katı durumunda toplam 21 bağımsız sabitler) düşmüş olur. Elektriksel direnç, geçirgenlik vb. (İkinci dereceli) tensörler iki bağımsız sabite sahiptir. Enine izotropik bir malzemeye örnek olarak, elyafların enine kesitte dairesel olduğu eksen üzerinde tek yönlü fiber kompozit lamina gösterilebilir. Tek yönlü bir kompozitte, elyaf yönüne dik olan düzlem, uyarmanın uzun dalga boylarında (düşük frekanslarda), izotropik düzlem olarak düşünülebilir. Enine izotropik malzemeye ait rijitlik matrisi aşağıda gösterildiği gibi 5 bağımsız sabitten oluşur.

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{C_{22} - C_{23}}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} \end{bmatrix}$$

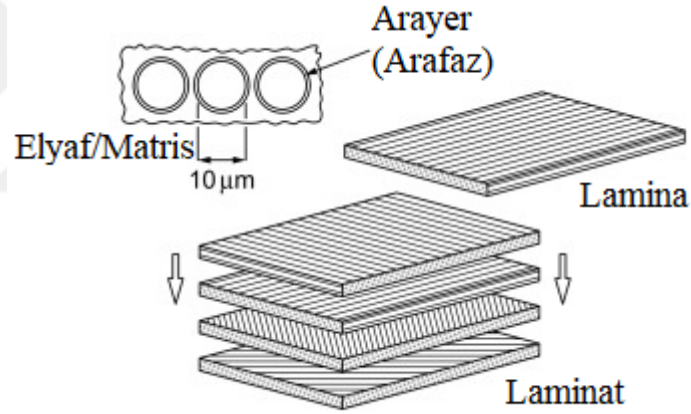
Enine izotropik durumunda aşağıdaki şu bağıntılar geçerlidir.

$$C_{22}=C_{33}, C_{12}=C_{13}, C_{55}=C_{66}, C_{44}=(C_{22}-C_{23})/2$$

Genel olarak bakıldığında ise Anizotropik malzemede 21 malzeme sabiti bulunurken, Ortotropik bir malzemede bu sabitler 9'a düşerken, Enine İzotropik bir malzemede 5'e düşmektedir.

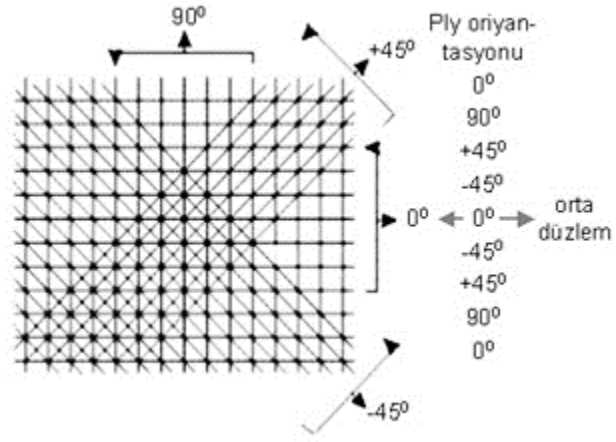
2.3.4. Tabakalı Kompozitler

Yüksek performanslı polimer kompozitler genellikle önceden belirlenmiş bir düzenlemede istiflenen katmanlardan veya tabakalardan oluşur. Bu tabakalar genellikle “lamina” olarak adlandırılır. Kompozit yapının elastik özelliklerinin belirlenebilmesi için, her bir tabakanın elyaf yönlenmesinin ve hacim oranının üniform olduğu ve bu sayede de yapının homojen olduğu varsayılmaktadır. İnce –yaklaşık 0.125mm- ve tek yönlü elyaf takviyeli polimer matrisli yapıya genellikle katman da denilmektedir. Katmanların veya laminaların üst üste istenilen açılarda ve düzenlemelerde bir araya getirilmesiyle oluşan yapıya da “laminat” denmektedir. Lamina ve laminat arasındaki durum aşağıda şekil 2.20’de verilmiştir.



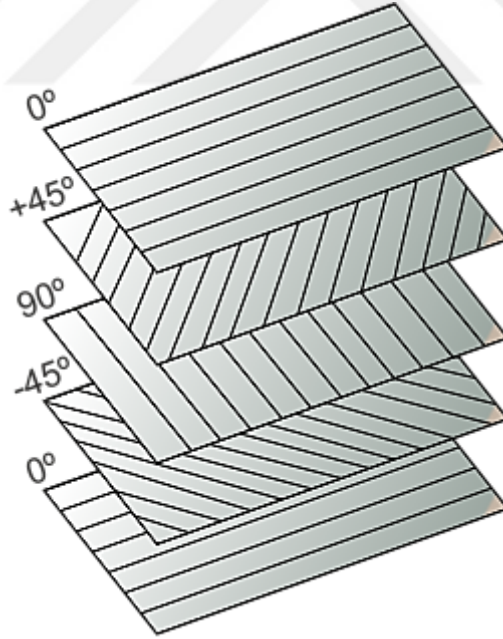
Şekil 2.20. Lamina ve laminat arasındaki bağıntı (Staab 2015)

Laminalar genellikle belirli bir açı düzeninde üst üste istiflenerek laminatları oluştururlar. Örnek olarak $[0^\circ/90^\circ]_n$ veya $[0^\circ/+45^\circ/-45^\circ/90^\circ]_n$ açılarda dizilim en yaygın türlerdir. Açılı lamina yerleştirilmesiyle, tek yönlü laminaya göre düzlem-içi sertlik daha dengeli bir hale gelmektedir. Laminaların bu oryantasyonunu belirleyen açı düzeni şekil 2.21’de gösterilmektedir.



Şekil 2.21. Lamina oryantasyon açısı düzlemi gösterimi (Beşergil 2016)

$[0^\circ/-45^\circ/90^\circ/+45^\circ/0^\circ]$ oryantasyonlu bir laminatın yapısal gösterimi aşağıda şekil 2.22’de örnek olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.22. $[0^\circ/-45^\circ/90^\circ/+45^\circ/0^\circ]$ oryantasyona sahip tabakalı kompozitin yapısal gösterimi (Anonim 2020i)

2.4. Elyaf Takviyeli Kompozit Üretim Yöntemleri

Üretim yönteminin seçimi, matris ve elyaf tipine, parçayı oluşturmak ve matrisi kürleştirmek için gereken sıcaklığa ve kompozit yapının uygun maliyetli tasarımına bağlıdır. Bunun nedeni, maliyet, üretim hacmi, üretim oranı ve istenen yapının türünü üretmek için üretim sürecinin yeterliliğidir. Her üretim yöntemi yapısal tasarım üzerinde belirli sınırlamalar getirir. Bu nedenle tasarımcı, çeşitli üretim süreçlerinin avantajlarını, sınırlamalarını, maliyetini, üretim hızını ve hacmini ve tipik kullanımlarını iyi analiz etmelidir. Kompozit bir yapının tasarımında, malzeme yapıyla eşzamanlı olarak tasarlanabilir. Bu tasarım özgürlüğü sayesinde, tasarımcının malzemenin nasıl üretileceğini anlaması koşuluyla, yüksek performanslı yapılar tasarlanabilir ve elde edilebilir (Barbero 2017).

Polimer matrisli kompozitlerin üretim yöntemleri temel olarak şu aşamalardan oluşmaktadır:

- ✓ Gerekli yönelimler boyunca elyafların yerleştirilmesi;
- ✓ Reçine veya matrisin elyaflara nüfuz ettirilmesi;
- ✓ Fazla reçine, hava ve uçucu maddeleri uzaklaştırmak için reçine emdirilmiş elyafların konsolidasyonu;
- ✓ Polimerin sertleşmesi veya katılaşması;
- ✓ Kalıptan çıkarma;
- ✓ Düzeltme gibi bitirme işlemleri.

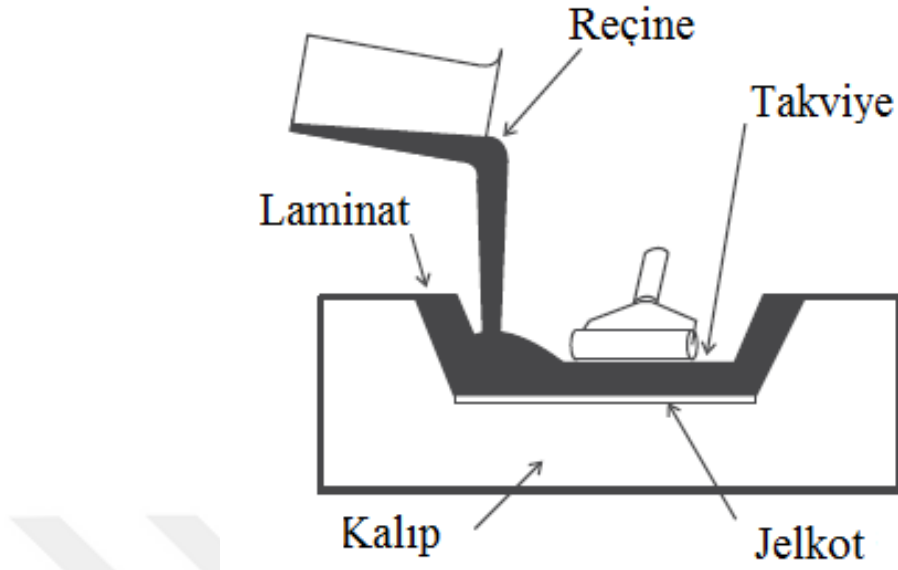
Çeşitli üretim yöntemleri, bu işlemlerin gerçekleştirilme biçiminde farklılık gösterir, ancak hepsi uygulanır. Bazı işlemler zaman kazanmak için basitçe tek bir adımda birleştirilebilir. Örneğin lif yerleştirme, reçine emdirme ve takviyelendirme, filamen sarma yönteminde eşzamanlıdır. Malzemenin işlenme biçimindeki farklılıklar, nihai ürünün maliyeti, üretim oranı, kalitesi ve performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Her işleme yönteminin yapısal ve malzeme tasarımını etkileyen doğal avantajları ve sınırlamaları vardır.

Kısaca aşağıdaki listelenen kompozit malzeme üretim yöntemlerinden bahsedilecektir.

- El Yatırma Yöntemi,
- Sprey Püskürtme Yöntemi,
- Prepreg Kalıplama,
- Pultrüzyon,
- Torba Kalıplama Yöntemi,
- Reçine Transfer Kalıplama Yöntemi (RTM),
- Vakum Destekli Reçine Transfer Kalıplama Yöntemi (VARTM),
- Otoklav Yöntemi,
- Basınçlı Kalıplama,
- Filaman (Tel) Sarma Yöntemi.

2.4.1. El Yatırma Yöntemi

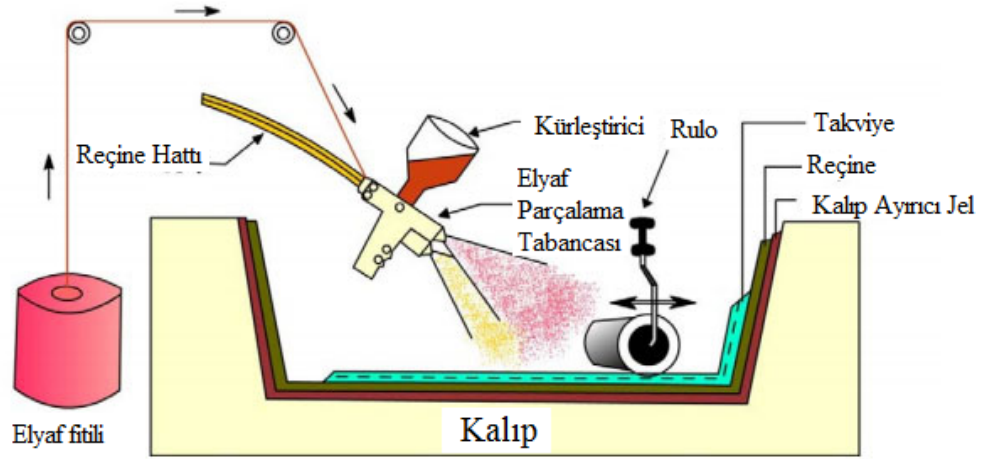
Islak tabaka olarak ta adlandırılan el yatırma tekniği, en basit ve en yaygın kullanılan üretim sürecidir. Temel olarak, kuru takviyelerin kalıba manuel olarak yerleştirilmesini ve daha sonra reçinenin uygulanmasını içerir. Şekil 2.23'te yöntemin uygulanışı gösterilmektedir. Daha sonra, ıslak kompozit, homojen reçine dağılımını ve hava kabarcıklarının çıkarılmasını kolaylaştırmak için el silindirleri kullanılarak haddelenir. Bu işlem istenen kalınlığa ulaşılan kadar tekrarlanır. Katmanlı yapı daha sonra kürlenir. Stiren gibi uçucuların emisyonu, diğer açık kalıp yöntemlerinde olduğu gibi yüksektir. El yerleştirme işlemi dört temel aşamaya ayrılabilir: kalıp hazırlama, jel kaplama, yerleştirme ve sertleştirme.



Şekil 2.23. El yatırma yöntemiyle kompozit malzeme üretimi (Barbero 2017)

2.4.2. Sprey Püskürtme Yöntemi

Sprey püskürtme yönteminin, el yatırması yönteminin bir uzantısı olduğu söylenebilir. Bu teknikte, doğranmış formdaki elyafların ve reçinenin basınçlı bir şekilde kalıba püskürtülmesi için bir sprej tabancası kullanılmaktadır. Yöntemin uygulanışı şekil 2.24'te verilmektedir. Genellikle sürekli haldeki cam elyaf, püskürtme tabancası vasıtasıyla küçük parçalara ayrılır ve tabancanın bir ucundan basınçlı şekilde fırlatılır. Kırılmış elyaflar ile eş zamanlı olarak tabancanın diğer ucundan basınçlı şekilde püskürtülür. Matris ve takviye malzemesi doğrudan kalıp üstünde bir araya gelirler. Yine el yatırma yöntemindeki gibi işlem öncesi kalıba, parçanın kolay çıkarılabilmesi için bir kalıp ayırıcı sürülür. Benzer şekilde, püskürtme işlemi sonrası kalıp içinde rulo ile bastırılarak yapıdaki hava boşlukları yok edilir. İşlem sonrası kalıpta genellikle oda sıcaklığında kürlenmeye bırakılır. Bu yöntem küçükten büyüğe geniş bir aralıkta parça üretmeye elverişlidir. Düşük maliyetli bir işlemdir. Fakat yüksek mukavemetli parçalar üretimine uygun bir yöntem değildir. En büyük kısıt ise yapıdaki elyaf oranının kontrol edilebilir olmamasıdır.



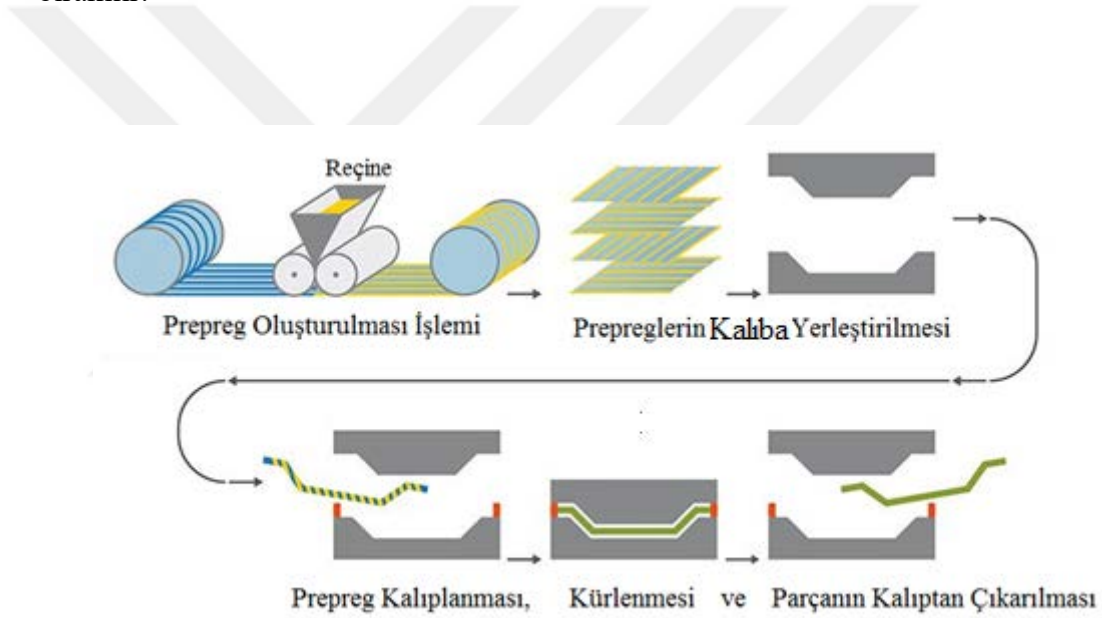
Şekil 2.24. Sprey püskürtme yöntemi ile kompozit malzeme üretimi (Anonim 2020j)

2.4.3. Prepreg Kalıplama Yöntemi

Prepreg, reçinenin kısmen kürlendiği veya kalınlaştırıldığı, önceden reçine emdirilmiş, takviyeli bir malzemedir. Elyaf lar tek yönlü bant, dokuma kumaş veya rastgele doğranmış elyaf tabakalar halinde düzenlenmiştir. Bu yöntemin uygulanışı aşağıda şekil 2.25'te verilmektedir. Prepreg yerleşimi ile geleneksel el yerleşimi arasındaki temel fark prepreg kullanıldığında liflerin kalıplama öncesi reçine emdirilmiş olmasıdır. Prepregler, yüksek performanslı havacılık parçaları ve karmaşık geometriler yapmak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Prepreglerin çoğu epoksi reçine sistemlerinden yapılır ve takviyeler genellikle cam, karbon ve aramid fiberleri içerir. Prepreg sistemlerinin çoğunda, reçine içeriği son üründe istenenden daha yüksektir. Bu fazla reçinenin çıkarılması, sıkışmamış havanın ve çıkarılmadığı takdirde son kısımda boşluklar oluşturabilecek uçucuların giderilmesine yardımcı olur. Bu gereklidir, çünkü boşlukların her %1' i için tabakalar arası kesme mukavemetinde %7 azalma ve boşluk içeriğinde %2' nin üzerinde olduğu durumlarda bası mukavemetinde önemli azalmalar vardır. Düşük reçine içeriği, mukavemeti etkilemeden ağırlığı ve maliyeti de azaltır. Pahalı hale gelen fazla reçinenin atılarak israfını önlemek için net reçine içeriğine yakın yeni prepregler yapılır. Net reçine içeriği, prepreg içindeki reçine miktarının, son üründe arzu edilen reçine içeriğinin yakınında tutulduğu anlamına gelir. Bu prepregler,

prepregde bulunan uçucuları en aza indiren bir sıcak eriyik reçine emdirme yöntemi kullanılarak yapılır.

Farklı fiber çeşitleri ve formlarını içeren termoplastik reçineli prepreglerde bulunmaktadır. Bu prepregler oda sıcaklığında sert olduğundan reçinenin elyafa emdirilmesi için ısıtılmaları gerekir. Termoplastiklerin işlenmesi, termoset reçinelerin işlenmesinden farklıdır. Kullanılan sıcaklıklar ve basınçlar termoplastikler için genellikle daha yüksektir, çünkü termoplastiklerin viskozitesinin işleme sırasında ısı ile düşürülmesi gerekir. Daha sonra, sertleştirme yerine oda sıcaklığına kadar soğumaya bırakılır.

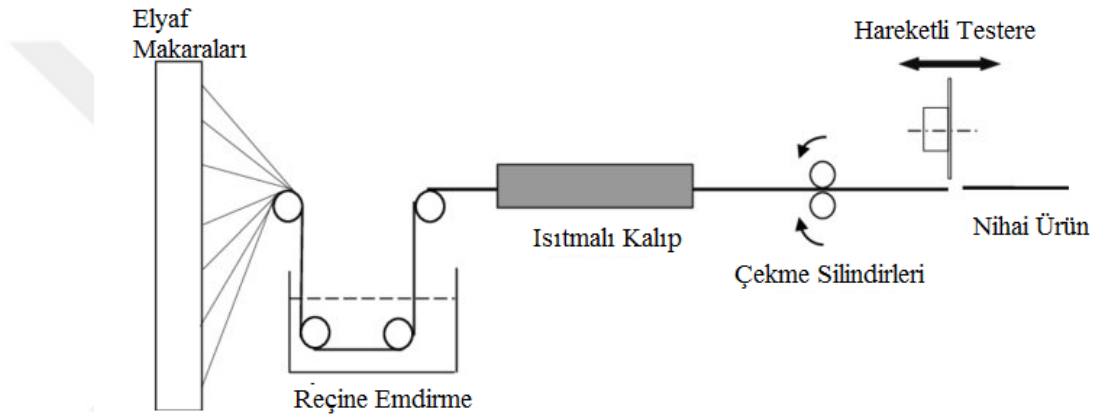


Şekil 2.25. Prepreg kalıplama yöntemiyle kompozit malzeme üretimi (Anonim 2020k)

2.4.4. Pultrüzyon Yöntemi

Pultrüzyon, üniform kesitli sürekli uzunluktaki kompozit profillerin, yüksek mukavemetli hafif yapı parçaları oluşturacak şekilde üretimi için uygulanan bir işlemdir. İşlem sırasında fiberglas takviyesi uzunlamasına hizalanır ve reçine emdirilir, ısıtılmış bir kalıptan çekilir ve istenen şekilde kalıplanır. Standart pultrüzyon işleminde,

elyaflar, dokuma veya örgülü teller gibi takviye malzemeleri reçine emdirilir, genellikle ayrı bir ön şekillendirme sistemi takip edilir ve reçinenin polimerizasyona uğradığı ısıtılmış sabit bir kalıptan çekilir. Emdirme işlemi ya takviyeyi bir banyodan çekerek ya da reçineyi tipik olarak kalıba bağlı olan bir enjeksiyon odasına enjekte ederek yapılır. Polyester, poliüretan, vinilester ve epoksi dahil olmak üzere birçok reçine türü pultrüzyonda kullanılabilir. Termoset reçinelere ek olarak bazı termoplastik reçineler kullanarak da bu yöntemle yapılar elde edilebilmektedir. Bu yöntemin uygulandığı aşağıda şekil 2.26’da verilmektedir.

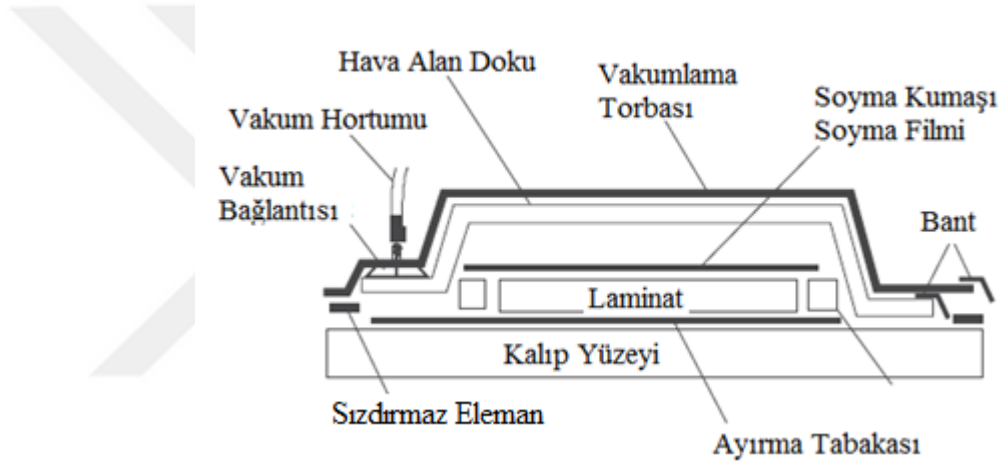


Şekil 2.26. Pultrüzyon yöntemiyle kompozit malzeme üretimi (Barbero 2017)

2.4.5. Torba Kalıplama Yöntemi

Bu yöntemde lamine kurlenmeden önce uygulanan büyük bir basınç, elyafların yerleşimini ve fazla reçine, hava ve uçucu maddelerin matrinden uzaklaştırılmasını sağlar. Basınç, esnek bir diyafram veya torba yardımıyla uygulanır. İşlemin uygulanması aşağıda şekil 2.27’de gösterilmektedir. Laminalar bir kalıp içine serilir ve reçine yayılır. Laminatın kalıba veya havalandırmaya yapışmasını önlemek için her iki tarafında ayırıcı film veya bir ayırıcı madde kullanılır. Bazen, daha sonra yapışma ile birleşmeyi (ikincil yapıştırma) arttırmak için yüzeye bir baskı veya desen bırakmak için bir soyma tabakası kullanılır. Havalandırma / hava alma kombinasyonu vakumu

dağıtmaya yardımcı olur ve uçucu maddeleri ve fazla reçineyi vakum portuna yönlendirir. Laminat daha sonra sisteme mükemmel bir şekilde kapatılan esnek bir torba ile kaplanır. Daha sonra vakum uygulanır ve parça ısı ve basınçla kürlenir. Torbanın altına vakum uygulanmasıyla, atmosferik basınç laminat üzerinde eşit olarak hareket eder. Daha sonra vakum, çözücü, sıkışmış hava veya reçinenin düşük moleküler ağırlıklı bileşenleri gibi fazla uçucu bileşiklerin geri çekilmesine yardımcı olur. Döngüden sonra, malzemeler istenen konfigürasyona göre şekillendirilmiş entegre bir kalıp parçası haline gelir. Bu yöntemin en bilinen alt yöntemleri “vakum destekli reçine transfer kalıplama” ve “otoklav” yöntemleridir.

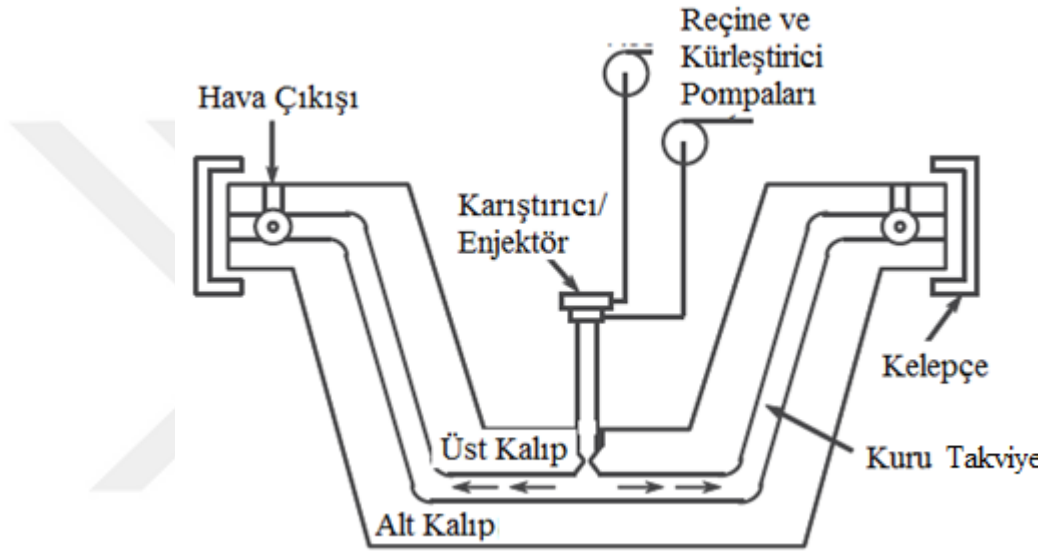


Şekil 2.27. Torba kalıplama yöntemi ile kompozit üretimi (Barbero 2017)

2.4.6. Reçine Transfer Kalıplama Yöntemi (RTM)

Reçine transfer kalıbı (RTM), reçineyi sisteme vermek için girişleri ve havanın kaçmasına izin veren çıkışları olan bir sistemdir. Elyaf takviyesi kalıp içine kuru olarak yerleştirilir ve kalıp kapatılır. Sıvı reçine, giriş yoluyla kalıba pompalanır, elyaflar ıslatılır ve kalıp boşluğu doldurulur. Kalıp dolduğunda, reçine kaynağı çıkarılır, kalıp girişleri ve çıkışları kapatılır ve reçineyi kürlemek için ısı uygulanır. Reçine tamamen sertleştikten sonra kalıp açılır ve ortaya çıkan kompozit parça kalıptan çıkarılır. Üretim yöntemini şekil 2.28’de gösterilmektedir. RTM işlemi, karmaşık şekillere ve nispeten

kısa üretim döngü sürelerine sahip büyük, sürekli elyaf takviyeli kompozitler üretebilir. İşlem, herhangi bir reçine uygulanmadan önce tüm takviyenin kalıpta kuru olarak yerleştirilmesiyle diğer kalıplama işlemlerinden ayrılır. Bu, elyafların yönelimi üzerinde daha iyi bir kontrol sağlar ve böylece malzeme özelliklerini iyileştirir. Ayrıca, işlem daha temizdir, daha az uçucu organik bileşikler (VOC) salınır ve kusurlara daha az eğilimlidir. Temel RTM sürecinin çeşitli varyasyonları bulunmaktadır.

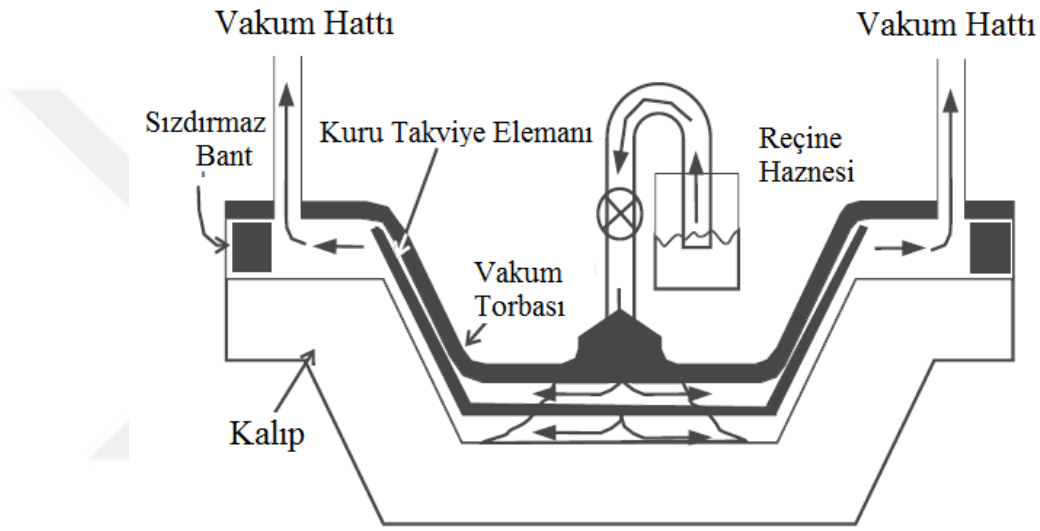


Şekil 2.28. Reçine transfer kalıplama yöntemiyle kompozit üretimi (Barbero 2017)

2.4.7. Vakum Destekli Reçine Transfer Kalıplama Yöntemi (VARTM)

Vakum Destekli Reçine Transfer Kalıplamada (VARTM), vakum kalıbın çıkışına uygulanır ve reçine kalıba vakumla çekilir. İşlemin uygulama şeması şekil 2.29'da gösterilmektedir. Reçineyi elyaflara nüfuz ettirecek basınç, uygulanan vakum ile vakum torbasının açıkta kalan yüzeyi üzerindeki atmosferik basınç etkisi arasındaki basınç farkından kaynaklanmaktadır. Basınç yerine vakum uygulandığından, kalıbın yarısı bir vakum torbası ile değiştirilebilir. Reçine akışı, kalıba veya vakum torbasının altına yerleştirilmiş bir dağıtım sistemine yerleştirilmiş mikro oluklarla desteklenebilir. Basınç

farkı, geleneksel RTM'de kullanılan basınçtan çok daha düşük olduğu ve sertleştirme en yaygın olarak ortam sıcaklığında yapıldığı için, kalıbın maliyeti önemli ölçüde azaltılabilir; Basınçlı RTM'de ihtiyaç duyulan ağır çelik kalıplar, ahşap, epoksi veya hafif çelikten yapılmış daha hafif kalıplarla değiştirilebilir. Bu işlem için döngü süreleri, büyük karmaşık parçalar için dakikalar ile saatler arasında değişir. VARTM'nin tipik uygulamaları arasında tekne gövdeleri ve benzeri büyük ve karmaşık parçalar bulunur.



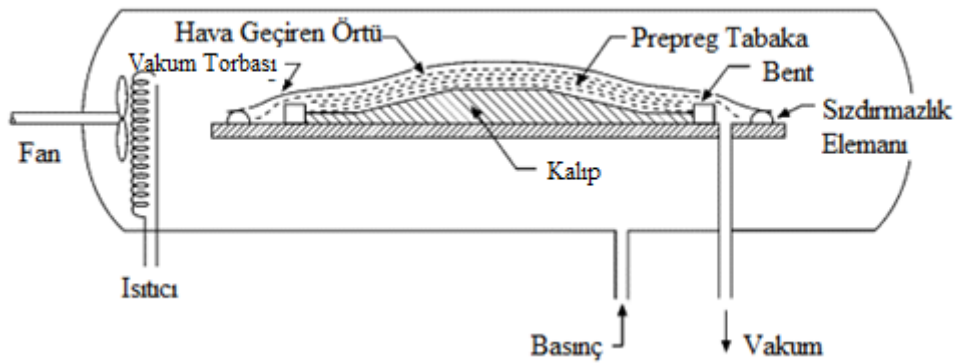
Şekil 2.29. Vakum destekli reçine transfer kalıplama ile kompozit malzeme üretimi (Barbero 2017)

2.4.8. Otoklav Yöntemi

Otoklavlar, kompozitin işlenmesi sırasında sıkıştırılmış gaz içeren basınçlı kaplardır. Yüksek kaliteli, karmaşık parçaların üretiminde kullanılırlar. Yöntem, büyük parçalar ve orta üretim miktarları için idealdir. Kompozitlerin otoklavla yöntemiyle üretilmesi vakum torbası tekniğinin bir uzantısıdır, vakumda mevcut olandan daha yüksek basınç uygulanır ve daha fazla sıkıştırma sağlanır bu sayede de yapı içindeki boşluk ve hava kabarcıklarının daha iyi giderilmesi sağlanır. Kompozit parça bir vakum torbasına konur

ve kapatılır. Torbanın içine tam veya kısmi vakum uygulanır ve torbanın dışına atmosfer basıncından daha yüksek gaz basıncı uygulanır. Daha sonra sıcaklık, polimerin sertleşmesini başlatmak için yükseltilir. Yüksek sıcaklık ayrıca polimerin viskozitesini azaltarak elyafların daha iyi şekilde ıslanmasına yardımcı olur. Yöntemin şeması şekil 2.30’da gösterilmektedir.

Arttırılmış basınç, sertleştirilmemiş kompozit üzerine mekanik kuvvetler uygular, uçucuların vakum portlarına taşınmasının verimliliğini artırır ve reçinenin ıslatma kabiliyetinin ve akışının artmasına neden olur. Yapı içinde sıkışan havanın ve salınan uçucu gazın hacmi, işlem sıcaklığında uygulanan basınç ve vakumla orantılı olarak azaltılır. Bu nedenle, gözeneklilik ve boşluklar en aza indirgenir. Ayrıca, erimiş polimer içindeki uçucu maddelerin vakum portlarına taşınması, yüksek basınçta daha etkilidir. Kompozit üretimi için otoklavların çoğu, biri kapı veya giriş olarak kullanılan kubbeli uçlara sahip silindirik basınçlı kaplardır. Otoklavlar, iç mekana kolay erişim sağlamak için genellikle fabrika zeminine yatay olarak monte edilir. Çap - boyut sınırlayıcı faktördür. Büyük çaplı otoklavlar çok kalın duvarlar gerektirir ve çok pahalı hale gelir. Çoğu araştırma ve geliştirme otoklavı yaklaşık 1 m çapındadır, üretim otoklavları ise yaklaşık 1 ila 8 m çapındadır.

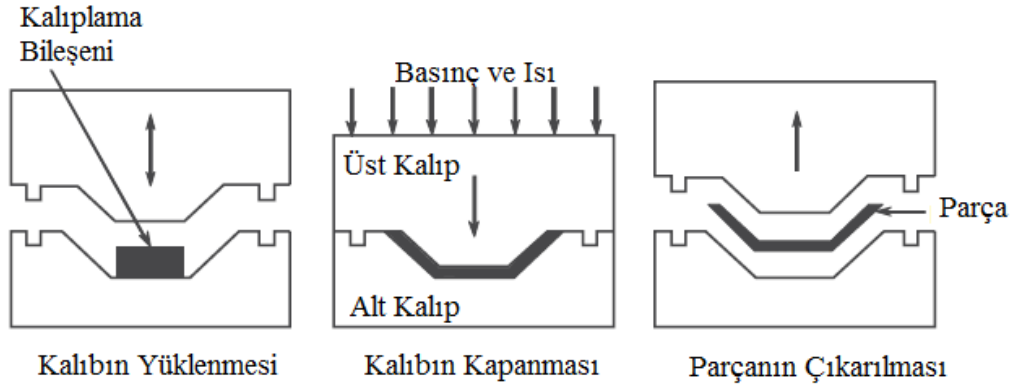


Şekil 2.30. Otoklav yöntemiyle kompozit malzeme üretimi (Barbero 2017)

2.4.9. Basınçlı Kalıplama Yöntemi

Sıkıştırma kalıplama işlemi, kalıbı oluşturmak için eşleşen erkek ve dişi metal kalıplarını kullanır. Ölçülen miktarda yükleme bileşiği (elyaf artı reçine) kalıba yüklenir. Isı ve nispeten yüksek basınç kullanan bir hidrolik pres, kalıbın erkek ve dişi yarımalarını kapatarak lifleri ve reçineyi sertleştirmek için kullanılır. Malzeme sertleştikten sonra basınç tahliye edilir ve parça kalıptan çıkarılır. İşlemin uygulanma şeması şekil 2.31’de gösterilmektedir. Kalıplama sonrası işlemler, çapakların alınmamasını ve post-kürleşmeyi içerir. Basınçlı kalıplama basit ve sağlam bir süreçtir. Parça kurulum maliyetlerini en aza indirir, malzeme israfını neredeyse ortadan kaldırır, ikincil işlemleri azaltır ve minimum işçilik gerektirir. Proses kolayca otomatikleştirilebilir ve her parçada homojenliği sağlayarak yüksek sayıda üretim sağlar. Küçük parçaların üretimi otomatikleştirme ile inanılmaz derecede hızlanırken orta ve büyük boyutlu parçalarda da aynı homojenlikle yeterli hızlarda üretim sağlanabilir. Pres, basınçlı kalıplama işleminde en önemli ve pahalı ekipman parçasıdır. Sıkıştırma kalıplama presleri genellikle takım çeliğinden yapılmış hareketli erkek ve dişi kalıplarla dikey olarak hareket eder. Kalıbın yüzeyleri parlatılır ve bazen yüzey sertliğini arttırmak için krom kaplanır. Basınçlı kalıplama yöntemi yüksek miktarda sürekli lif içeriğine izin vermez. Bu nedenle, bazı ikincil yapılar için kullanılmasına rağmen parçalar birincil yapılar için uygun değildir. Bu sıkıştırma kalıplama bileşenleri, parçaya nervürler ve flanşlar tasarlayarak yüksek sertlik gerektiğinde de kullanılır.

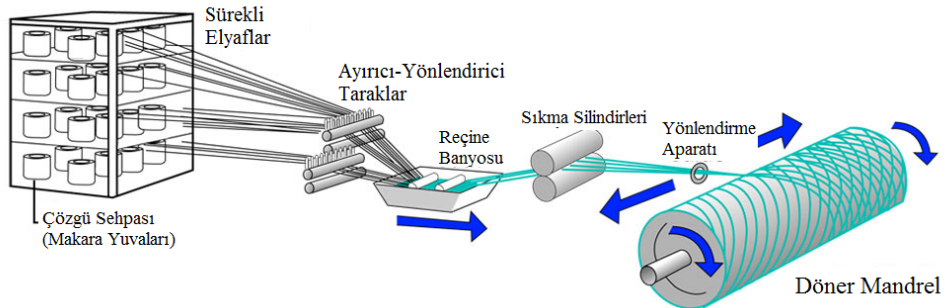
Basınçlı kalıplamada kullanılan en yaygın yükleme bileşikleri “dökme kalıplama bileşiği (BMC)” ve “saç kalıplama bileşiği (SMC)” olarak adlandırılır.



Şekil 2.31. Basıncılı kalıplama yöntemi ile kompozit malzeme üretimi (Barbero 2017)

2.4.10. Filaman (Tel) Sarma Yöntemi

Bu işlemle üretilen şekillerin çoğu, borular, silindirler ve küreler gibi dairesel dönüşlü yüzeyleridir. Filaman sarmada, fitil gibi sürekli takviyeler, yüzey kaplanana ve gerekli kalınlık elde edilene kadar bir mandrel üzerine sarılır. Otomatik bir sistem yardımıyla elyaf ve matris hammaddelerinin kullanımı sayesinde işçilik maliyetleri azaltılır. Bu sayede işlem gayet ekonomik ve düşük maliyetli bir hal alır. Üretim yönteminin şeması aşağıda şekil 2.32’de gösterilmektedir.



Şekil 2.32. Filaman sarma yöntemiyle kompozit malzeme üretimi (Anonim 2020l)

İki temel sargı makinesi tipi vardır: sarmal ve polar. Sarmal sarım makinesi bir torna tezgahına benzer. İletme gözü ileri geri hareket ederken mandrel sürekli döner. Mandrel'in dönme hızı ve iletim gözünün doğrusal hızı, çember sarımı olarak adlandırılan 5° ila 90° arasında herhangi bir oryantasyon üretmek için ayarlanabilir. Elyaf takviyeleri, askı ve bant raflarından ve takviyedeki gerginliği kontrol etmek için ayarlanabilen bir germe cihazı veya fren yoluyla sağlanır. Daha sonra, takviye reçine aldığı bir reçine banyosundan geçer. Ardından, ıslak takviye, bir şaryoya monte edilen dağıtım gözünden verilir. Mil rotasyonuna ek olarak, taşıyıcı ve dağıtım gözü, takviyeyi karmaşık konturlar boyunca yerleştirmeye yardımcı olmak için tasarlanmış çeşitli şekillerde hareket edebilir. Sarmal bir sarıcı doğal olarak jeodezik bir yol oluşturarak parça üretimini sağlar. Parçanın istenen özelliklerine göre bu jeodezik yol istenilen düzende değiştirilebilir.

Polar sarıcılar, uzunluk / çap oranı 2.0' dan küçük olan küresel kaplar veya silindirik kaplar üretmek için kullanılır. Bir polar sarıcı mekanik olarak daha basittir, bu nedenle sarmal bir sarıcıdan daha ucuzdur ve daha hızlıdır. Elyafı düzlemsel bir yola ileten mandrel etrafında dönen bir koldan oluşur. Mandrel yavaşça basamaklandırılır böylece kol yüzeyini kaplar. Mükemmel küre dışında, düzlemsel yol, polar sargının neredeyse küresel şekillere uygulanabilirliğini sınırlayan jeodezik yola göre her zaman bir kayma açısına sahiptir.

Islak takviyeler kullanmanın yanı sıra, prepreg veya ıslak yeniden haddelenmiş malzeme kullanmak mümkündür, ancak bu seçenekler her zaman ürüne daha fazla işlem ve maliyet ekler. Islak takviyeler kullanılarak, elyaf yerleştirme, reçine emdirme ve sertleştirme aynı anda elde edilir. Islak takviye, mandrel üzerine gerilim altında yerleştirilir, böylece önceden sarılmış olan malzeme sıkıştırılır. Kullanılabilecek maksimum gerilim, elyaf mukavemetinin ve kullanılan besleme hızının bir fonksiyonudur. Elde edilen ürün, daha yüksek boşluk içerdiği ve biraz daha düşük mekanik özelliklere sahip olduğundan bir otoklav ile elde edilen ürün kadar iyi değildir. Ancak, otoklava ihtiyaç duyulmaması avantajlıdır çünkü daha düşük yatırım maliyeti ve

daha düşük işlem süresi ile maliyeti düşürür. Ayrıca, mevcut herhangi bir otoklavda yer almayan büyük parçalar bu yöntem ile imal edilebilir.

Sarılabilecek maksimum kalınlık, elyaf tabakasının kayması ve üstteki yeni tabakanın basıncı altında buruşmayla sınırlıdır. Kalınlık büyük olduğunda, daha fazla lamina eklemenden önce sargıyı durdurmak ve parçanın reçine jelleşene kadar kısmen kürlenmesini sağlamak gerekebilir. Bu, süreci yavaşlatarak ek maliyete neden olur. Bu nedenle, hemen hemen tüm işlemlerde olduğu gibi, üretim açısından nispeten ince laminatlar tercih edilir.

Filaman sargısının temel sınırlamaları boyut kısıtlamaları, geometrik olasılıklar, liflerin yönü ve son ürünün yüzey kaplamasıdır. Hiç vakum veya otoklav kullanılmadığı ve reçine düşük sıcaklıkta sertleştiği için boşluk içeriği yüksek olabilir.

Bu yöntem yaygın bir şekilde termoset matrisli kompozitler üretmek için kullanılsa da son yıllarda gelişen yöntemler sayesinde termoplastik matrisli kompozitlerin üretiminde de kullanılmaya başlanmıştır. Termoplastik matrisli kompozitler üretmek için sistemde bazı modifikasyonlar yapılır.

2.5. Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin Mekaniği

Elyaf takviyeli polimerik kompozit malzemelerin mekaniği izotropik olmayan yapılarından dolayı klasik malzemelerin mekaniğinden farklıdır. Bilinen, klasik mukavemet bağıntılarıyla ifade edilemezler.

Kompozit malzemelerin mekanik davranışları temel olarak bileşen özelliklerine, elyaf-matris yapışmasına, hacimsel lif oranına ve kritik fiber boyu gibi etmenlere bağlıdır. Kompozit yapıların gerilme bağıntılarının çıkarılması, H.L. Cox'un (1952) elyaf-matris

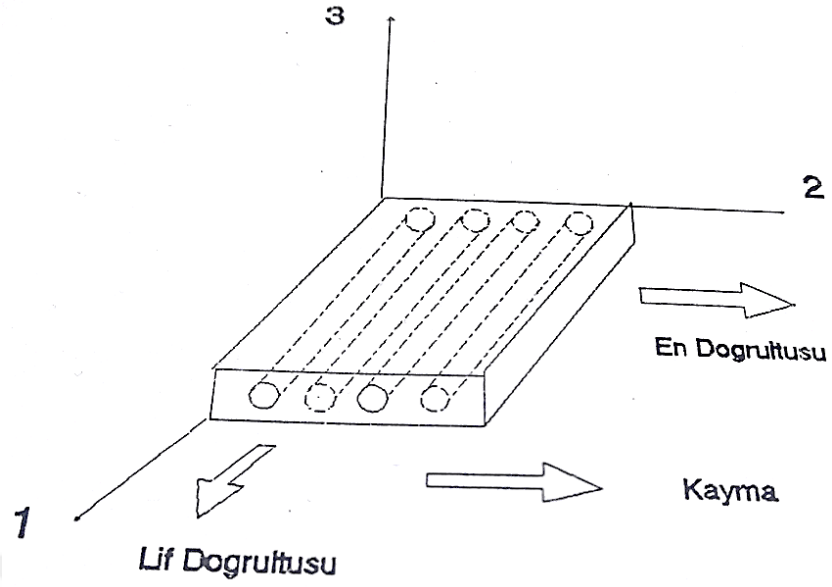
arasındaki gerilme transferi hakkında ortaya atılan ve aşağıda sıralanan kabullerin esasını oluşturduğu takviyelendirme teorisine dayanmaktadır.

- Elyaf ve matris elastik şekil değiştirir,
- Arayer kayma gerilmelerini taşır,
- Elyaf uçlarında yük transferi yoktur,
- Elyaf-matris arasındaki yapışma mükemmeldir,
- Matris içinde hava boşluğu veya arayer yoktur,
- Kompozit yapıda başlangıçta iç gerilmeler yoktur,
- Matris yalnız çekme gerilmelerini taşır.

Bunlara ek olarak, yapıya kuvvet uygulandığında elyaf uçlarında gerilme yoğunlaşmalarının olduğu, sonlu eleman analizleri ile gösterilmiştir. Bu gerilme yığılması elyaf uçlarındaki yapışma zayıflığının gerilme transferine olan negatif etkisinden daha büyük bir etkiye sahiptir. Elyaf uçlarındaki bu kayma gerilmesi yoğunlaşması, elyaf uç geometrisine göre değişkenlik gösterebilmektedir (Agarwal ve ark. 2017, Monette ve ark. 1992).

2.5.1. Tek Yönlü Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin Mekaniği

Tek yönlü elyaf takviyeli kompozitler, kompozit malzemelerin teorik analitik yapılarının temelini teşkil etmektedir. Tek yönlü elyaf takviyeli matris tabakası üç simetri düzlemine sahiptir (ortotropik). Aşağıda şekil 2.33'te görülen tek yönlü elyaf takviyeli kompozitin simetri düzlemleri 1, 2, 3 eksenleri ile çakışmaktadır. Bu eksenlere plakanın malzeme eksenleri de denir. Elyafı paralel olan doğrultuya genellikle boyuna veya boylamasına doğrultu, elyafı dik olan doğrultuya ise genellikle enine veya enlemesine doğrultu denmektedir.



Şekil 2.33. Tek yönlü elyaf takviyeli kompozit tabakanın şematik gösterimi ve eksen doğrultuları (Yazıcı 1993)

Mühendislikte bir yapının üretiminde kullanılacak malzeme türünü belirlerken, yapının gerekli emniyet şartlarını sağlaması için, ilk olarak gerilme değerine bakılarak karar verilir. Kompozit malzemenin tasarım ve üretimde kullanılabilmesi için gerilme ve rijitliğinin hesaplanabileceği bağıntılara ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak kompozit malzeme anizotropik olduğundan farklı doğrultularda farklı mukavemet ve rijitlik davranışları sergilerler. Tek yönlü elyaf takviyeli bir plaka için boyuna ve enine doğrultular için ayrı ayrı ifadeler söz konusudur (Agarwal ve ark. 2017).

2.5.2. Tek Yönlü Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerde Karışımlar Kanunu

İlk olarak Voigt tarafından farklı modüllerdeki üst üste dizilmiş tabakalar için yapılan yaklaşım, elyaf takviyeli kompozitler için de kullanılmaya başlamıştır. Karışım kanunu denen bu yaklaşımın ifadeleri şekil 2.33'te şematik olarak görülen tabakanın boyuna doğrultuda çekme kuvvetine maruz kaldığı durum için aşağıdaki gibi olur. Tabakayı boyuna doğru modellemeden önce; elyafların gerek özellikleri gerekse çaplarının aynı

olduklarını yani homojen olduklarını, kompozit doğrultusunda sürekli ve paralel olduklarını, elyaf-matris arasındaki yapışmanın mükemmel olduğunu (arafazda kayma olmadığını), elyaf-matris-kompozit yapılarıdaki şekil değişiminin eşit olduğunu kabul etmek gerekecektir.

$$\varepsilon_c = \varepsilon_f = \varepsilon_m \quad (2.7)$$

Burada alt indisler sırasıyla ;

c: Kompozit Malzemeye ait olan verileri,

f: Elyaf Malzemeye ait olan verileri,

m: Matris Malzemesine ait olan verileri ifade etmektedir.

Elyaf ve matris malzemelerin şekil değişimine bağlı denklemleri yazıldığında, gerilmeler;

$$\sigma_f = E_f \cdot \varepsilon_f \quad (2.8)$$

$$\sigma_m = E_m \cdot \varepsilon_m \quad (2.9)$$

şeklinde olur. Gerilme, elyaf ve matrisin sırasıyla A_f ve A_m kesit alanlarına etki etmektedir. Dolayısıyla, her elemanın taşıdığı kuvvetler;

$$F_f = \sigma_f \cdot A_f = E_f \cdot \varepsilon_f \cdot A_f \quad (2.10)$$

$$F_m = \sigma_m \cdot A_m = E_m \cdot \varepsilon_m \cdot A_m \quad (2.11)$$

olarak tanımlanabilir. Kompozite gelen kuvvet, elyaf ve matris malzemesi tarafından beraberce taşındığı için,

$$F_c = F_f + F_m \quad (2.12)$$

denklemini yazılabilir. Bu denklemi gerilmeler cinsinden yazmak istersek,

$$F_c = \sigma_c \cdot A_c = \sigma_f \cdot A_f + \sigma_m \cdot A_m \quad (2.13)$$

denklemini elde ederiz. Denklemin her iki kısmını A_c 'ye bölerek,

$$\sigma_c = \sigma_f \cdot \frac{A_f}{A_c} + \sigma_m \cdot \frac{A_m}{A_c} \quad (2.14)$$

orantısal hale getirmiş oluruz. Burada bilmemiz gereken bağıntı,

$$V_f = \frac{A_f}{A_c}, \quad V_m = \frac{A_m}{A_c} \quad (2.15)$$

oranlarını veren bağıntıdır. Elyaf ve matrisin boyları eşit olduğu için bu oranlar hacimsel oranları vermektedir. Yani kompozitin içinde elyafın hacim oranını V_f , Matrisin hacim oranını V_m olarak adlandırabiliriz.

Bu oranlar denklem 2.14'te yerine konduğunda,

$$\sigma_c = \sigma_f \cdot V_f + \sigma_m \cdot V_m \quad (2.16)$$

eşitliği elde edilir. Bu denklem gerilmeleri için karışımlar kanunu genel ifadesidir. 2.16'daki bu genel ifadenin birim uzamaya göre türevi alındığında,

$$\frac{d\sigma_c}{d\varepsilon} = \frac{d\sigma_f}{d\varepsilon} \cdot V_f + \frac{d\sigma_m}{d\varepsilon} \cdot V_m \quad (2.17)$$

denklemini elde edilir. Bu denklemde $(d\sigma/d\varepsilon)$, gerilme- uzama eğrisinin eğimini ifade etmekte olup Elastisite Modülüne (E) eşittir. Denklem 2.17 bu bilgi doğrultusunda eğim terimleri yerine karşılık gelen E değerleri yazıldığında,

$$E_c = E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_m \quad (2.18)$$

kompozitin Elastisite Modülünün, kendini oluşturan elyaf ve matrisin hacimsel oranları ile elastisite modülleri ile ilişkili olduğu görülür. Tek çeşit takviye ve matris için çıkarılan bu ifadeler şu şekilde genelleştirilebilir,

$$\sigma_c = \sum_{i=1}^n \sigma_i \cdot V_i \quad (2.19)$$

ve

$$E_c = \sum_{i=1}^n E_i \cdot V_i \quad (2.20)$$

Denklem 2.16'da,

$$V_f + V_m = 1 \quad (2.21)$$

Eşitliği yerine yazılırsa elyafın hacimsel oranı cinsinden karışım kanunu elde edilir.

$$\sigma_c = \sigma_f \cdot V_f + \sigma_m \cdot (1 - V_f) \quad (2.22)$$

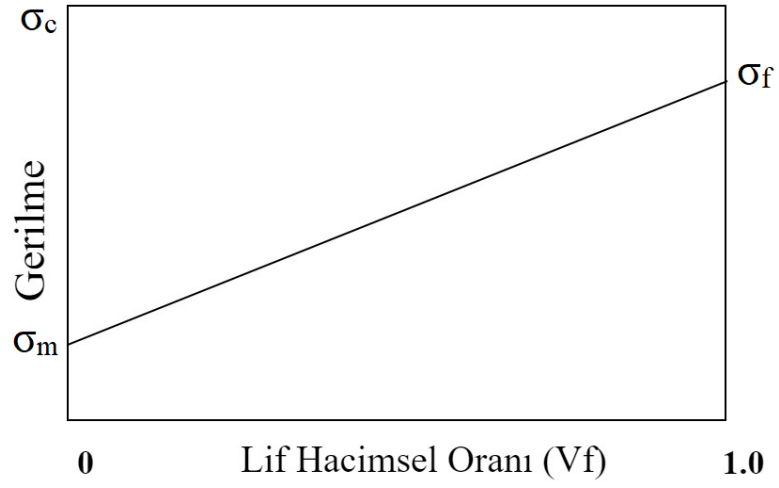
Bu eşitliğe göre elyafın hacimsel oranı, kompozitin mukavemetini doğrudan etkileyen bir parametredir. Denklem 2.22'de gerilmeleri, elastisite modülü ve birim uzamalar cinsinden yazarsak, $\varepsilon_c = \varepsilon_f = \varepsilon_m$ kabulünden dolayı gerekli sadeleştirmeler yapılırsa,

$$E_c = E_f \cdot V_f + E_m \cdot (1 - V_f) \quad (2.23)$$

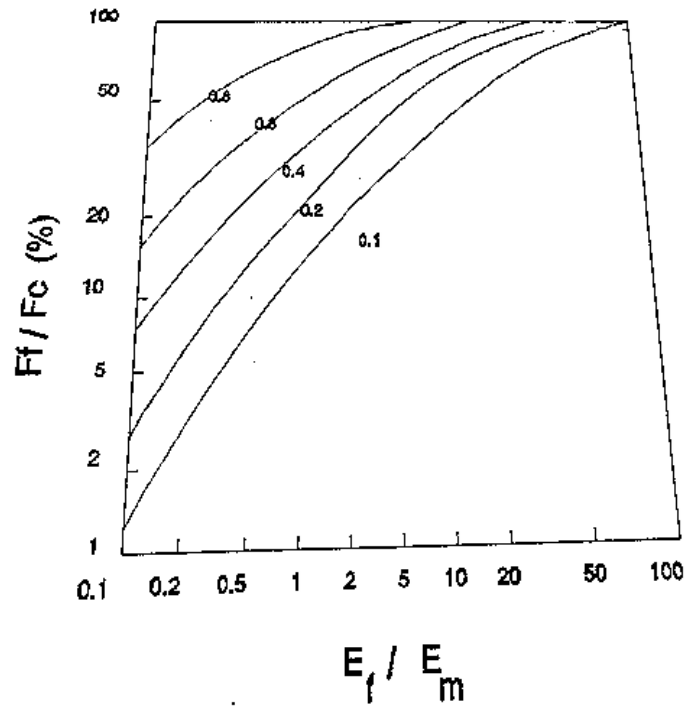
elastisite modülleri için çıkarılan karışımlar kanununu, elyafın hacimsel oranının fonksiyonu cinsinden elde ederiz. Denklem 2.10 ve 2.11 oranlanıp pay ve payda ı boyuyla çarpılıp bölüldüğünde,

$$\frac{F_f}{F_m} = \frac{\sigma_f \cdot V_f}{\sigma_m \cdot V_m} = \frac{\sigma_f \cdot V_f}{\sigma_m \cdot (1 - V_f)} = \frac{E_f \cdot V_f}{E_m \cdot (1 - V_f)} \quad (2.24)$$

denklemini elde edilir. Bu ifadeden elyaf ve matrisin taşıdıkları kuvvetin oranı, elastisite modülleri ve hacimsel oranlarının bir fonksiyonu olduğu sonucu çıkmaktadır. E_f/E_m oranının elyaf takviyeli kompozitlerde en az 10 olduğu ($E_f/E_m \geq 10$) göz önüne alınırsa; elyafın kompozite gelen yükün büyük bir kısmını taşıdığı ve bu taşınan yük miktarının da hacimsel oranın artışıyla arttığı anlaşılr. Bu durum aşağıda şekil 2.34 ve şekil 2.35'teki grafiklerde gösterilmektedir. Hacimsel oranın uygulamadaki üst sınırı %80 civarındadır ve bu oran da filament sarma yöntemiyle elde edilmektedir. Bu oranın üzerindeki durumlarda, matris elyafları tam olarak ıslatmaz. Eğer $E_f \leq E_m$ ise elyaflar takviye görevini yapamayacağı gibi matris içinde boşluk kusuru gibi hareket edeceğinden yapının mukavemetinde düşüşe sebep olacaktır.



Şekil 2.34. Kompozit mukavemetinin elyaf hacimsel oranına göre değişimi



Şekil 2.35. F_f / F_c oranının elastisite modüllerinin oranına göre farklı hacimsel elyaf oranlarındaki değişimi (Agarwal ve Broutman 1980)

Karışımlar Kanunu başta da belirtildiği üzere bazı kabuller altında doğrudur. Bu kabullerden en önemlisi elyaf, matris ve kompozitin şekil değiştirmelerinin eşitliğidir. Gerçekte ise bu doğru olmayıp matris ve lif iki farklı şekil değiştirme gösterir.

$$\triangleright \epsilon_f > \epsilon_m$$

$$\triangleright \epsilon_m > \epsilon_f$$

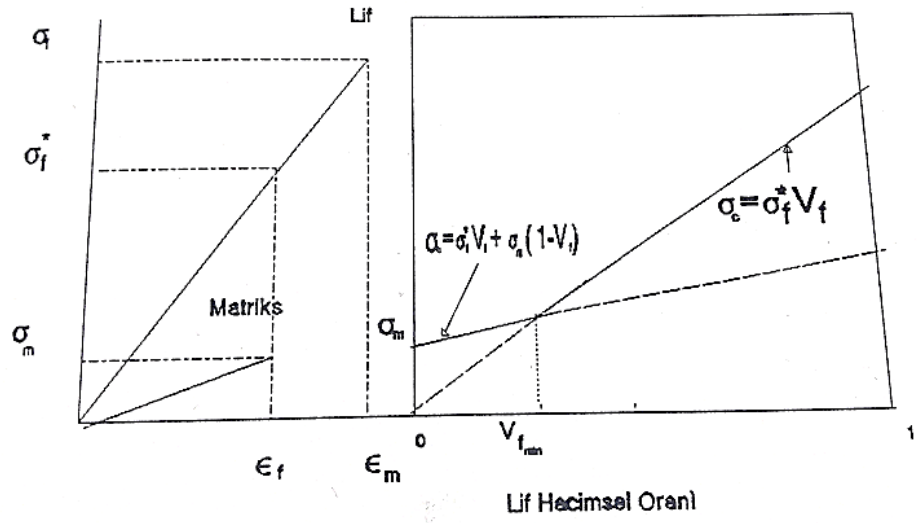
Elyafın hacimsel oranına da bağlı olarak, kompozit malzemenin mukavemeti bu iki duruma göre farklı davranışlar gösterir. Bu nedenden dolayı karışımlar kanunu bazı değişiklikler ile kullanılır. $\epsilon_f > \epsilon_m$ durumunda matris, elyaftan daha önce kopar ve bütün yük elyaflar tarafından taşınmaya başlar. Eğer elyafın hacimsel oranı düşük ise, elyaflar bu yükü taşıyamaz ve kompozit sistem kopar. Bu durum için karışımlar kanunu;

$$\sigma_c = \sigma_f^* \cdot V_f + \sigma_m \cdot (1 - V_f) \quad (2.25)$$

halini alır. Burada σ_f^* 'ın anlamı elyafın matrisin koptuğu anda taşıdığı gerilmedir. Bu durum anlaşılması adına şekil 2.36'da grafiksel olarak gösterilmiştir. Elyafın hacimsel oranının yüksek olduğu halde matris koptuktan sonra yükü tamamen elyaflar taşır. Bu durumda karışımlar kanunundan ikinci terim düşer ve,

$$\sigma_c = \sigma_f \cdot V_f \quad (2.26)$$

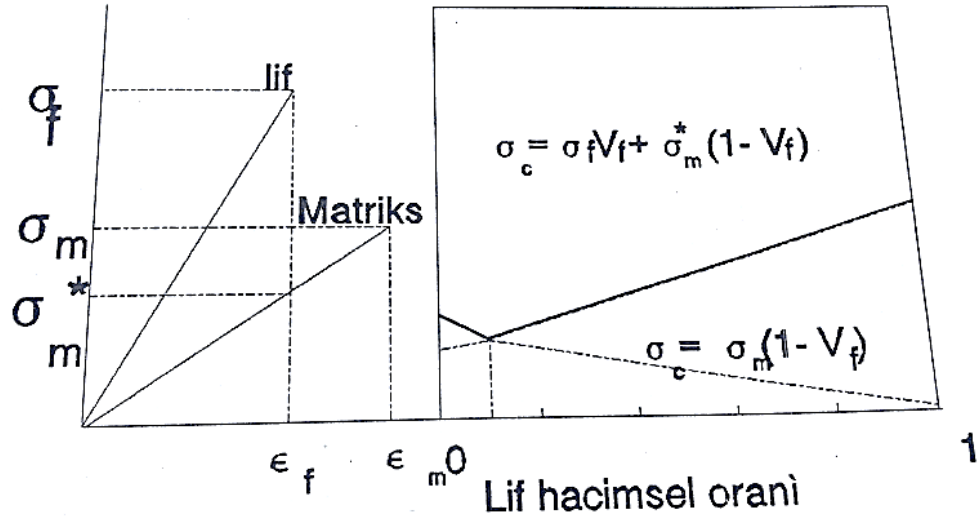
şeklini alır.



Şekil 2.36. $\epsilon_f > \epsilon_m$ durumu için kompozit mukavemetinin elyaf hacimsel oranına bağlı olarak değişimi (Yazıcı 1993)

$\epsilon_m > \epsilon_f$ olması halinde ise yine benzer şekilde hacimsel orana bağlı olarak iki farklı hasar şekli görülecektir. Uygulanan kuvvet elyafları kopardığı halde matrisi koparamayacaktır. Bu durumda hacimsel oran düşük ise elyafların kopmasından dolayı matris içinde oluşan boşluklar direk olarak yükü taşıyan alanı azaltacak ve boşluklar oluşacak kompozitin mukavemetini belli bir hacimsel orana kadar düşürecek, matrisi takviyelemek yerine zayıflatacaktır. Bu durum şekil 2.37de grafik üzerinde gösterilmektedir. Kompozitin elyaf hacimsel oranına bağlı mukavemetini veren ifade aşağıdaki gibi olacaktır.

$$\sigma_c = \sigma_m \cdot (1 - V_f) \quad (2.27)$$



Şekil 2.37. $\epsilon_m > \epsilon_f$ olduğu durumda gerilme-uzama eğrilerinin şematik gösterimi ve gerilmenin hacimsel orana bağlı değişimi (Yazıcı 1993)

Bu ifadede matrisin mukavemeti sadece elyafın oranı nispetinde düşmüştür. Gerçekte ise elyafların kopmasıyla oluşacak boşluk ve elyaf uçlarında meydana gelen yerel gerilme yoğunlaşmaları, bu gerilme değerini daha da düşürecektir. Elyaf hacimsel oranının yeterince fazla olduğu durumda çekme gerilmesi uygulandığında matris, gerilmeleri elyaflar kopana kadar taşıyıp, elyafların kopmasının hemen ardından ani olarak kopacaktır. Bu durumda kompozitin mukavemetini verecek ifade,

$$\sigma_c = \sigma_f \cdot V_f + \sigma_m^* \cdot (1 - V_f) \quad (2.28)$$

şeklinde olacaktır. σ_m^* , matrisin elyaflar koptuğu uzamadaki çekme gerilmesidir (Yazıcı 1993).

2.5.3. Kritik ve Minimum Hacimsel Oran Kavramları

Yukarıda kavramlar içerisinde verilen elyafın hacimsel oranının azlığı veya çokluğu “kritik hacimsel oran” olarak adlandırılan kavram ile izah edilir. Kompozit yapıdaki elyafların, yapı içinde takviyelendirme vazifesi yapıyor olabilmesi için, elyaf hacimsel

oranının bahsedilen kritik hacimsel oranın üzerinde olması beklenir. Denklem 2.28 ele alınırsa kritik elyaf hacimsel oranı şu şekilde ifade edilebilir,

$$\sigma_c = \sigma_f \cdot V_f + \sigma_m^* \cdot (1 - V_f) \geq \sigma_m \quad (2.29)$$

Bu ifadeden V_f çekilirse,

$$V_{cr} = \frac{\sigma_m - \sigma_m^*}{\sigma_f - \sigma_m^*} \quad (2.30)$$

kritik elyaf hacimsel oranı elde edilir. Bunun dışında bir de minimum hacimsel oran kavramı vardır. Bu oranın altında elyafların hiçbir etkisi olmadığı varsayılp, kompozit mukavemeti matris malzemenin verdiği katkı ile sınırlı sayılır. Hatta elyafların arafaz kusuru gibi davrandığı durumlarda kompozitin mukavemeti matrisin mukavemetinden daha düşüktür.

$\varepsilon_m > \varepsilon_f$ durumunda kompozitin mukavemeti, elyaf hacimsel oranının arttırıldığı halde belirli bir hacme kadar düşüp bu değerden sonra pozitif yöne doğru yönelir. Bu değer minimum hacimsel oranıdır.

$$\sigma_c = \sigma_f + \sigma_m^* \cdot (1 - V_f) \geq \sigma_m \cdot (1 - V_f) \quad (2.31)$$

ve bu denklemden V_f çekilirse,

$$V_{fmin} = \frac{\sigma_m - \sigma_m^*}{\sigma_f + \sigma_m - \sigma_m^*} \quad (2.32)$$

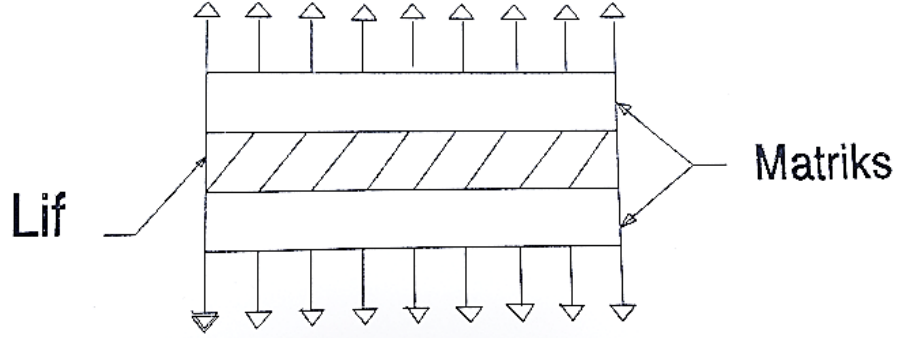
denklemlerle kritik hacimsel oran elde edilmiş olur.

$\varepsilon_f > \varepsilon_m$ durumunda ise kritik hacim kavramı olmayıp, elyaflar matrisi her zaman takviye etmektedir. Fakat belirli bir oranın üzerinde matrisin etkisi olmayıp çekme yükünü sadece elyaflar taşır. Bu durumda oran,

$$V_f = \frac{\sigma_m}{(\sigma_f - \sigma_f^*) + \sigma_m} \quad (2.33)$$

şeklinde elde edilir.

2.5.4. Enine Doğrultuda Modül ve Gerilme İfadeleri



Şekil 2.38. Tek yönlü bir kompozitin enine özelliklerinin tespiti için kompozitin yandan görünümü (Yazıcı 1993)

Reuss tarafından ilk olarak paralel dizilmiş plakların dar kesitleri doğrultusunda kuvvet uygulandığı durum için yapılan yaklaşım, tek yönlü elyaf takviyeli kompozitlerin enine doğrultuları için de uygulanabilir. Şekil 2.33'te görülen plakanın 2 ve 3 numaralı eksenleri doğrultusunda aynı gerilme ve rijitlik ifadeleri geçerlidir. Şekil 2.38'de plakanın enine kesiti görülmektedir. Kesit üniformdur. Enine doğrultuda toplam elyaf ve matris tabakalarının kalınlığı hacimsel oranları ile orantılıdır. Bu plakaya enine doğrultuda gerilme uygulandığında kompozitte meydana gelen şekil değiştirme, elyaf ve matriste meydana gelen şekil değiştirmelerin toplamıdır.

$$\delta_c = \delta_f + \delta_m \quad (2.34)$$

Bu ifadenin her bir terimi t kalınlık olmak üzere, birim şekil değiştirmeler cinsinden yazılabilir.

$$\delta_c = \varepsilon_c \cdot t_c$$

$$\delta_f = \varepsilon_f \cdot t_f$$

$$\delta_m = \varepsilon_m \cdot t_m \quad (2.35)$$

Bu terimler denklem 2.34'te yerlerine konup, t_c 'ye oranlanırsa ve boylarının eşit olduklarından dolayı t_f/t_c ve t_m/t_c oranları yerine sırasıyla V_f ve V_m terimleri kullanılarak yeniden düzenlenirse,

$$\varepsilon_c = \varepsilon_f \cdot V_f + \varepsilon_m \cdot V_m \quad (2.36)$$

ifadesi elde edilir. Bu ifadede birim şekil değiştirmeler elastisite modülü ve gerilmeler cinsinden yazılırsa,

$$\frac{\sigma_c}{E_c} = \frac{\sigma_f \cdot V_f}{E_f} + \frac{\sigma_m \cdot V_m}{E_m} \quad (2.37)$$

denklemini yazılır. Burada bilinmesi gereken ise enine kuvvetin uygulandığı kesit alanının kompozit-elyaf-matris için eşit olduğudur. Uygulanan kuvvetin de eşit olmasından dolayı her bir elemana gelen gerilme eşit olacaktır. Yani ,

$$\sigma_c = \sigma_f = \sigma_m \quad (2.38)$$

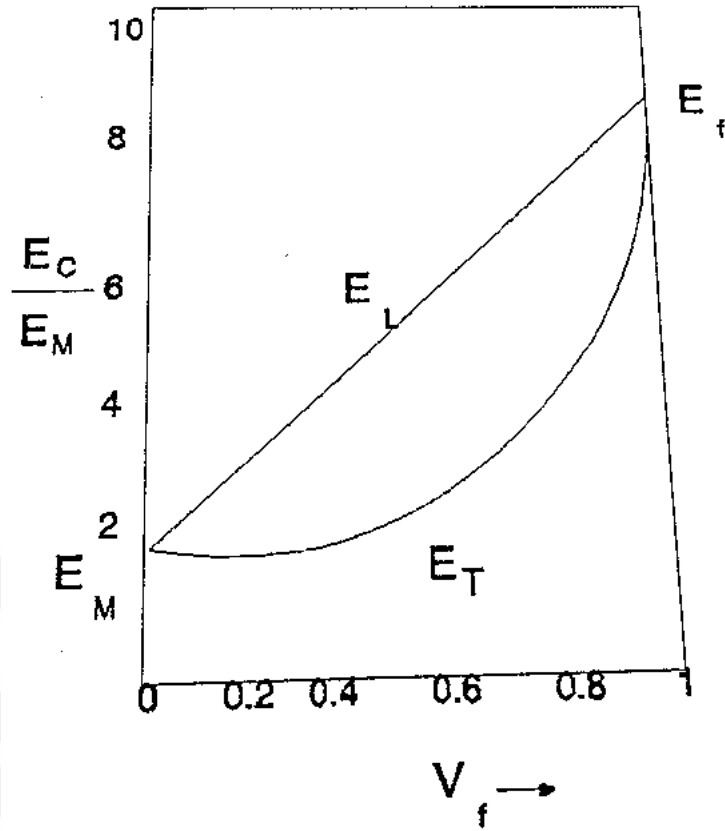
olacaktır. Bu bilgi neticesinde denklem 2.37'de her eleman σ_c 'ye bölünürse,

$$\frac{1}{E_c} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m} \quad (2.39)$$

ifadesi elde edilmiş olur. Bu, Rauss tarafından elde edilen ifade ile aynıdır. Bu ifade daha genel halde n tane malzeme için,

$$E_c = \frac{1}{\sum_{i=1}^n (V_i/E_i)} \quad (2.40)$$

halini alır. Şekil 2.39'da boyuna ve enine karışımlar kanunu ifadelerine göre kompozitin modülü ile matris modülü oranının hacimsel orana bağlı olarak değişimi gösterilmektedir.



Şekil 2.39. Kompozitin boyuna ve enine modüllerinin elyaf hacimsel oranı ile değişimi (Yazıcı 1993)

Enine doğrultuda kompozitin mukavemeti, boyuna doğrultuya göre oldukça düşüktür ve elyaf ve matrisin özelliklerine, arabirim mukavemetine, matris içindeki boşluk oranına, iç gerilme ve uzama dağılımlarına bağlıdır. Matris içinde elyafların mukavemete katkısı olmayıp aksine sert ve kırılğan faz gibi davranıp matrisin mukavemetini düşürür. Kompozitin mukavemeti, matrisin mukavemetinin bir katsayı ile çarpılmasıyla elde edilir. Bu yaklaşımda elyafların basit karesel bir diziliş gösterdiği kabuk edilerek,

$$\Phi = \left[1 - 2 \left(\frac{V_f}{\Phi} \right)^{0,5} \right] \quad (2.41)$$

katsayısı tanımlanır. Kompozitin enine mukavemeti ise,

$$\sigma_c = \sigma_m \cdot \Phi \quad (2.42)$$

şeklinde ifade edilir. Daha sonra Gresczuk aşağıdaki katsayıyı ortaya atmıştır,

$$K_{\alpha} = \frac{1 - V_f \cdot \left[1 - \left(\frac{E_m}{E_f} \right) \right]}{1 - \left(4 \cdot \frac{V_f}{\pi} \right)^{0.5} \cdot \left[1 - \left(\frac{E_m}{E_f} \right) \right]} \quad (2.43)$$

ve buradan kompozitin enine mukavemetini,

$$\sigma_c = \frac{\sigma_m}{K_{\alpha}} \quad (2.44)$$

olarak tanımlamıştır.

2.5.5. Poisson Oranı

Boylamasına gerilmeye maruz tek yönlü elyaf takviyeli kompozitte endeki kısalmanın elyaf doğrultusundaki uzamaya oranı poisson oranı olarak adlandırılır. Şekil 2.33'teki eksenlere göre ,

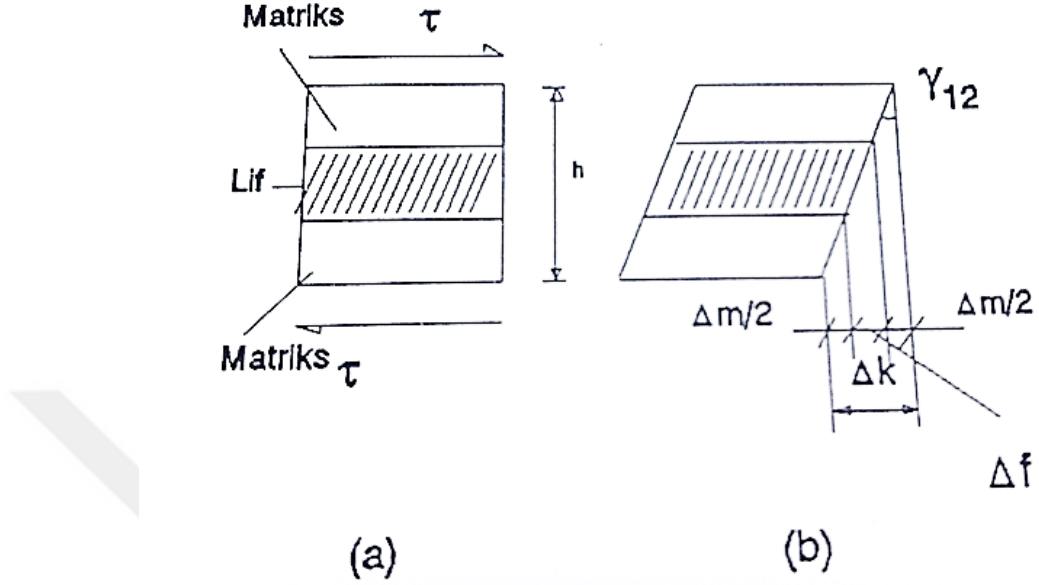
$$\vartheta_{12} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \quad (2.45)$$

denklemleri ile elde edilir. Bu ifadede, boyuna gerilmeye maruz durum için yapılan $\varepsilon_1 = \varepsilon_f = \varepsilon_m$ kabulü ve enine gerilmeye maruz durum için çıkarılan denklem 2.36'daki birim uzama ifadesi denklem 2.45'te yerine konup düzenlenirse,

$$\vartheta_{12} = \frac{\varepsilon_f \cdot V_f + \varepsilon_m \cdot V_m}{\varepsilon_1} = \vartheta_f \cdot V_f + \vartheta_m \cdot V_m \quad (2.46)$$

eşitliği elde edilir. Tek yönlü elyaf takviyeli kompozitte poisson oranının elyaf ve matrisin poisson oranlarına ve hacimsel oranlara bağlı olduğu denklemden anlaşılmaktadır.

2.5.6. Kayma Modülü



Şekil 2.40. Elyaf doğrultusunda kayma gerilmesi uygulanmış bir kompozitin şekil değişimi a) Şekil değiştirmeden önce b) Şekil değişimi sonrası (Yazıcı 1993)

Tek yönlü elyaf takviyeli kompozitte elyaf doğrultusunda kayma gerilmeleri uygulandığında plakada şekil değişimi görülür. Bu durum şekil 2.40'ta gösterilmektedir. Kompozitin γ_c kadar bir kayma yaptığı görülür. Elyaf ve matriste malzeme özelliğinin farklılığından dolayı birbirlerine göre izafi kayma açıları meydana gelir. γ_f ve γ_m olarak simgelenen bu kayma açılarının çok küçük oluşu nedeni ile tanjantları kendilerine eşit kabul edilebilir. Bu durumda kompozitin boyuna kayma açısına γ_L denirse, kompozit ve her bir elemanda, referansa göre diğer ucun yer değiştirmesi,

$$\Delta_c = h \cdot \gamma_L$$

$$\Delta_f = h \cdot \gamma_f \cdot V_f$$

$$\Delta_m = h \cdot \gamma_m \cdot V_m \quad (2.47)$$

$$\Delta_c = \Delta_f + \Delta_m$$

$$\gamma_L = \gamma_f \cdot V_f + \gamma_m \cdot V_m \quad (2.48)$$

denklemleri türetilir. Kayma açıları yerine kayma gerilmeleri cinsinden eşitlikler yazılırsa,

$$\frac{\tau}{G_L} = \frac{\tau}{G_f} \cdot V_f + \frac{\tau}{G_m} \cdot V_m \quad (2.49)$$

elde edilir. Gerekli sadeleştirmelerin yapılması ile boyuna kayma modülü,

$$G_L = \frac{G_f \cdot G_m}{G_f \cdot V_m + G_m \cdot V_f} \quad (2.50)$$

şeklinde elde edilmiş olur. Hashin ve Rosen tarafından boyuna kayma modülü,

$$G_L = G_f + \frac{V_m}{\frac{1}{(G_m - G_f)} + \frac{V_f}{2G_f}} \quad (2.51)$$

şeklinde tanımlanmıştır. Tek yönlü elyaf takviyeli kompozit malzeme elyaf boyuna dik doğrultularda izotropik kabul edildiğinden, enine kayma modülü,

$$G_T = \frac{E_T}{2 \cdot (1 + \nu_T^*)} \quad (2.52)$$

şeklinde tanımlanır. Burada ν_T^* enine poisson oranıdır.

2.5.7. Tek Yönlü Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin Bası Gerilmeleri Altında Davranışı

Tek yönlü elyaf takviyeli kompozitlerin bası gerilmelerine karşı mukavemeti elyaf hacimsel oranı, elyaf-matris yapışması (arabirim kayma gerilmesi), liflerin diziliş düzeni ve kompozit yapı içindeki boşluk oranı gibi birçok faktöre doğrudan bağlıdır. Bu konuda yapılan ilk çalışma Rosen tarafından yapılmıştır; hacimsel orana bağlı olarak kompozit için birbirinden farklı bası gerilmesi ifadeleri çıkarmıştır. Rosen'a göre elyaf

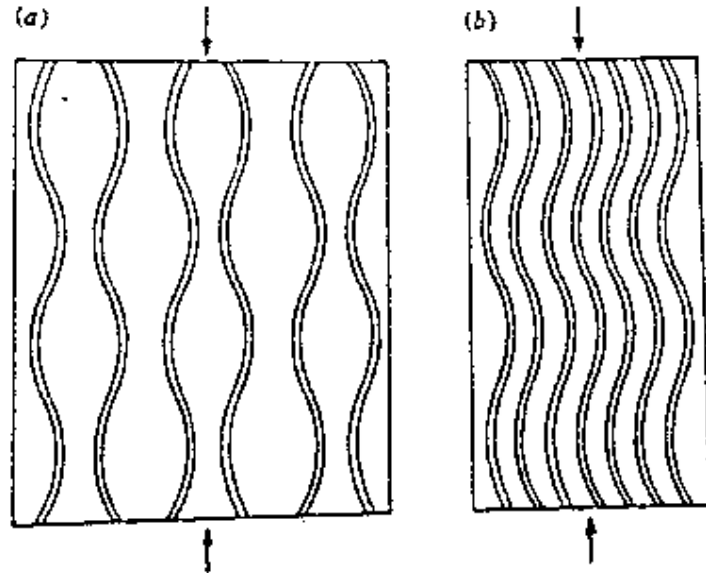
oranı düşük olduğu durumda eksenel tip burkulma meydana gelmektedir. Bu durumda yapının hasar olmadan dayanacağı maksimum bası gerilmesi,

$$\sigma_c = 2.V_f \cdot \frac{[V_f.E_m.E_f]}{3.[1-V_f]^{0,5}} \quad (2.53)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Yüksek elyaf hacim oranlarında burkulma modu kayma ağırlıklı olacak ve bu durumda hasar meydana gelmeden kompozitin taşıyabileceği en yüksek gerilme,

$$\sigma_c = \frac{G_m}{(1-V_f)} \quad (2.54)$$

olacaktır. Burada G_m matrisin kayma modülünü ifade etmektedir. Bu ifadelerden elde edilen sonuçlar Holister ve Thomas tarafından yapılan deneysel çalışmaların sonuçları ile karşılaştırılmış ve arada çok belirgin farklar olduğu görülmüştür (Hull 1996). Bası gerilmesine maruz kompozitte her iki hasar tipinin gösterimi şematik olarak şekil 2.41’de verilmektedir.



Şekil 2.41. Bası yüklemesi altında tek yönlü elyaf takviyeli kompozitin burkulması a) Eksenel tip burkulma b) Kayma tipi burkulma (Yazıcı 1993)

Basma gerilmesi altında kompozitte oluşan kayma gerilmeleri,

$$\tau = \sigma_c \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \quad (2.55)$$

olarak verilir. Burada $\theta=45^\circ$ olduğunda maksimum normal gerilme teorisine göre, kayma gerilmesi maksimum değerini alacağından,

$$\tau_{max} = \frac{1}{2} \cdot \sigma_c \quad (2.56)$$

maksimum kayma gerilmesi bu şekilde ifade edilir. Burkulma sırasında eğer kayma gerilmesi, burkulma gerilmesinde düşük ise kayma hasarı burkulmadan önce olacaktır. Bu durumda kompozitin hasarsız dayanabileceği maksimum bası gerilmesi,

$$\sigma_c = 2 \cdot [V_f \cdot \tau_f^* + (1 - V_f) \cdot \tau_m^*] \quad (2.57)$$

olacaktır. Burada τ_f^* ve τ_m^* sırasıyla elyaf ve matrisin kayma gerilmeleridir.

2.6. Sandviç Yapılar

Sandviç yapılar, havacılık, denizcilik, nakliye ve savunma endüstrilerinde, sertlik ve mukavemet, hafiflik, yüksek enerji sönmüleme kapasitesi ve farklı kullanım yerlerine uygun amaçlarla üretilebilir olması gibi benzersiz avantajları nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır.

Terimsel olarak sandviç yapılar, yüksek mukavemetli iki ince tabakadan ve düşük ila orta derece mukavemet ve yoğunluğa sahip bir orta tabakadan oluşan üç katmanlı bir malzeme yapısı olarak tanımlanır. Genel bir sandviç geometrisi aşağıda şekil 2.42’de gösterilmektedir. İki ince tabakaya yüz tabakaları denir ve genellikle ince, sert ve güçlü malzemelerden oluşur. Orta tabaka ise sandviğin çekirdeğidir ve kalın, hafif ve daha zayıf bir yapıdadır. Yüzeyler ve çekirdek malzemesi, bileşenler arasındaki yük aktarım mekanizmasını kolaylaştırmak için bir yapıştırıcı ile birleştirilir, bu nedenle kullanılan tüm malzemeleri etkili bir şekilde kullanır. İki yüz, yapının nötr eksenini etrafında atalet

momentini ve sonuç olarak bükülme sertliğini arttırmak için birbirinden belirli bir mesafeye yerleştirilir.

Yüzey tabakaları elyaf takviyeli plastik, çelik, alüminyum veya tahtadan yapılabilir ve çekirdek polimer veya metal köpükler başta olmak üzere farklı geometrilerde petek, oluklu veya kafes kiriş yapılardan oluşabilir. Sandviçin farklı kısımlarında kullanılan malzemeler uygulamaya bağlı olarak değişir. Denizcilik uygulamalarında birincil olarak korozyon direncine dayanıklılığı yüksek olan Vinilester gibi malzemeler kullanılırken; havacılık endüstrisinde daha çok yüksek ısı direncine sahip olan epoksi gibi malzemeler kullanılır (Reis 2005).

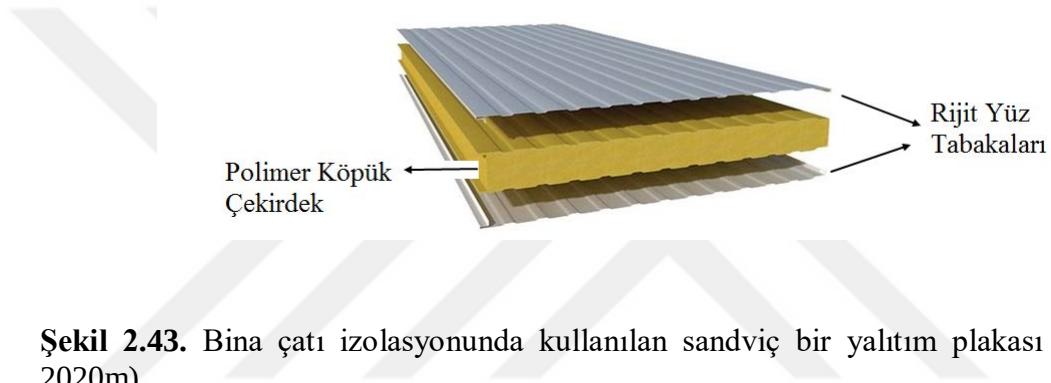


Şekil 2.42. Sandviç yapıyı oluşturan bileşenlerin şematik gösterimi

Sandviç yapı, monokok (ince cidarlı yapı) ve diğer mimarilere kıyasla son derece yüksek eğilme sertliği / ağırlık oranı nedeniyle yapılarda giderek daha önemli bir rol oynamaktadır. Sonuç olarak, sandviç yapı diğer yapılara göre daha düşük yanal deformasyonlar, daha yüksek burkulma direnci ve daha yüksek doğal frekanslara sahip olması nedeniyle büyük avantajlara sahiptirler. Bu nedenle, belirli bir mekanik ve çevresel yük şartları için, sandviç konstrüksiyon genellikle diğer konfigürasyonlara göre daha düşük bir yapısal ağırlığa sahip olmakla çok daha üstün özellikler sergileyebilmektedir (Vinson 2018).

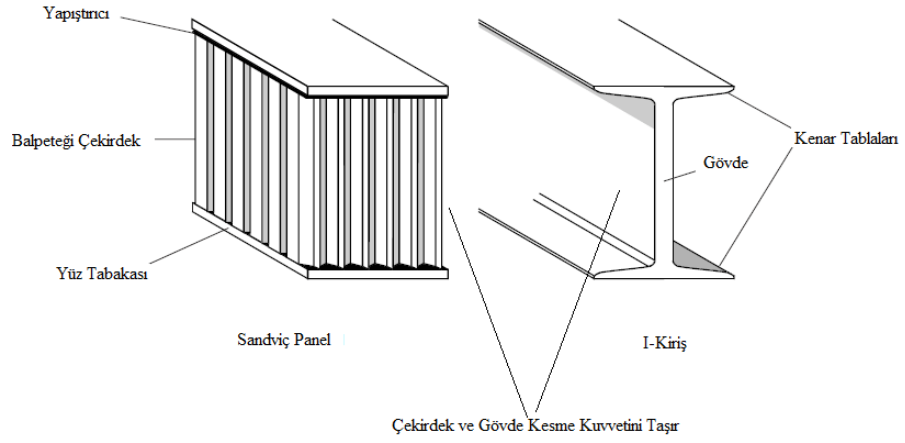
Farklı özelliklerdeki levhalarla çekirdek yapıların birleştirilmesiyle istenilen uygulamalara özel, optimum tasarımda ve ideal parametrelerde sandviç yapılar üretmek mümkündür; ki bu da bu yapıların tercih edilmesinin en önemli sebebidir. Sandviç

yapılar oluşturulurken yapıya dahil edilen elemanların tek tek üstün özellikleri birleştirilip çok daha üstün bir yapı oluşturulabilir; ya da bir eleman ile diğer yapı bileşeninin sahip olduğu negatif özellik ortadan kaldırılarak daha ideal yapılar haline getirilebilir. Örneğin ısı yalıtımı gereken yerlerde ısı yalıtımı özelliği üstün olan polimer bir köpük ile yapıyı dışarıdan gelecek hasarlara karşı koruyan bir başka rijit polimer levha çifti beraber kullanılarak hem istenilen yalıtım özelliği sağlanır hem de bu özellik sağlanırken yapıya gelecek dış etmenlerden yapı korunmuş olur. Örnek olarak verilen durumlarda kullanılan bir bina yalıtım sistemi aşağıda şekil 2.43'te gösterilmektedir.

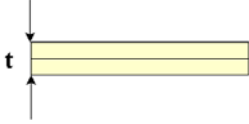
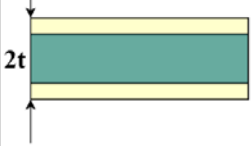


Şekil 2.43. Bina çatı izolasyonunda kullanılan sandviç bir yalıtım plakası (Anonim 2020m)

Sandviç malzemelerin, özellikle de sandviç panellerin sahip oldukları en büyük avantaj düşük ağırlıklarla yüksek eğilme rijitliği sergilemeleridir. Yani özetle sahip oldukları eşsiz özgül eğilme rijitliği davranışlarıdır. Sert ve güçlü yüz panelleri eğilme yüklerini taşıırken daha hafif ve kalın çekirdek yapı kesme yüklerine karşı koyarak yapıya üstün bir mekanik özellik kazandırmaktadır. Bu yapıların temel ilkesi aslında en basit haliyle I kirişi ile aynıdır. Yüz tabakaları I profildeki üst ve alt flanşlarla aynı görevi görürken çekirdek yapı da profil gövdesini ikame etmektedir. Bu durum aşağıda şekil 2.44'te şematik olarak verilirken; şekil 2.45'te kirişlerin daha kalın hale getirilerek bükülme sertliğindeki artışı ve sandviç malzemelerde bu artışın ağırlığa oranla çok daha yüksek olduğu gösterilmektedir.



Şekil 2.44. Temel prensip olarak sandviç yapı ve I kiriş (Bruffey ve Shiu 2016)

	Katı Yapı	t Kalınlığında Çekirdekli S.Y.	3t Kalınlığında Çekirdekli S.Y.
			
Rijitlik	1.0	7.0	37.0
Eğilme Dayanımı	1.0	3.5	9.2
Ağırlık	1.0	1.03	1.06

Şekil 2.45. Sandviç yapılarda çekirdek kalınlığının artmasıyla elde edilen mekanik avantajlar (DIAB Group 2003)

Sandviç yapıyı oluşturan 3 ana elemanın yapı içerisinde üstlendikleri başlıca görevler bulunmaktadır. Bu görevler ve özelliklerin belirtilmesi adına her eleman hakkında kısaca bilgiler verilecektir.

2.6.1. Yüz Tabakaları

Yapısal sandviçlerde, yüz tabakaları çoğunlukla malzeme ve kalınlık bakımından aynıdır ve esas olarak düzlem-içi ve eğilme yüklerini taşırlar. Bu tür malzemesi ve kalınlığı aynı iki yüz tabakası bulunan sandviç yapılara simetrik sandviç yapılar denir. Bununla birlikte, bazı özel durumlarda yüz tabakaları farklı yükleme koşulları veya çalışma ortamı nedeniyle kalınlık veya malzeme olarak değişebilir. Bu konfigürasyon asimetrik sandviç yapılar olarak adlandırılır.

Bir sandviç yapıda, yüz tabakaları birçok farklı malzemeden yapılabilir, izotropik monokok malzeme, anizotropik monokok malzeme veya kompozit malzeme olabilir. Alüminyum, fiberglas, grafit ve aramid en yaygın kullanılan yüz tabakası malzemeleridir. Bununla birlikte, genel olarak yapının ağırlığını en aza indirmek için kompozit yüzey tabakaları tercih edilir.

2.6.2. Yapıştırıcılar

Yapıştırıcının sandviç yapılardaki temel görevi yüzey tabakaları ile çekirdek yapısını bir arada tutmaktır. Bu görevi yerine getirirken sağlaması gereken bir diğer şart ise yüz tabakaları ile çekirdek arasındaki kesme kuvvetini aktarmalarıdır. Kısacası yapıştırıcıların sandviç yapılarda yüklendiği temel görevler, yapı elemanlarını bir arada tutmak ve yapı elemanlarına etkiyen yükleri uygun bir biçimde diğer elemana iletmek ve bunu yaparken de bu yüke karşı koymaktır.

2.6.3. Çekirdek Yapıları

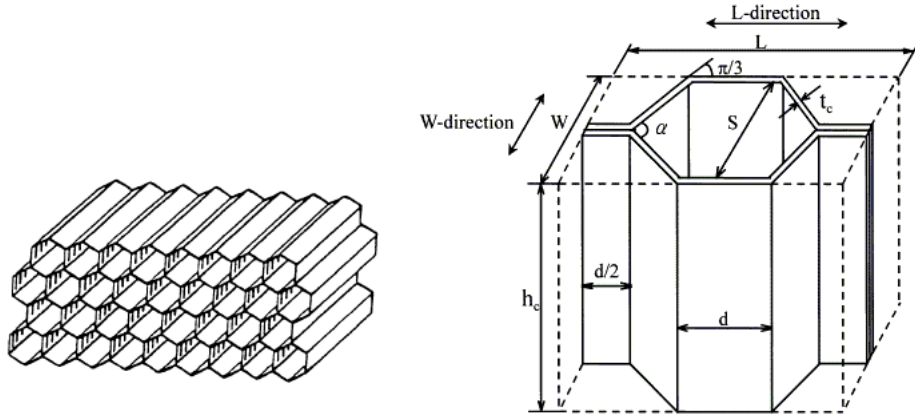
Kompozit sandviç yapıların bir diğer ana bileşeni çekirdek yapısıdır. Bir sandviç yapının çekirdeği, esas olarak, istenen bükülme sertliğine erişilecek şekilde yüz tabakalarını ayırmaya, desteklemeye ve stabilize etmeye yarar. Neredeyse tüm durumlarda, çekirdek bir sandviç kabuğunda veya panel yapısında asıl düzlem-dışı veya enine kesme yüklerini taşır. Isı ve ses yalıtımı gibi diğer işlevler de büyük ölçüde çekirdek malzeme özelliklerine bağlıdır. Bu fonksiyonları minimum ağırlıkta gerçekleştirmek için çekirdek malzeme genellikle yüz tabakaları ve yapışkan bileşenlere kıyasla nispeten düşük yoğunluktadır. Birçok durumda, çekirdek malzeme, bağımsız durumdaki nispi kırılma veya kararsızlık nedeniyle boyutsal kararlılığı korumak için özel işleme veya ara işleme ihtiyaç duyar (SAE 2013).

Tüm sandviç yapılarda düzlem-ici ve eğilme yükleri (birincil yükleme) yüz tabakaları tarafından taşınırken ve çekirdek enine kesme yüklerini taşır. Genellikle, yüz tabakaları malzeme ve kalınlık bakımından aynıdır. Bu yüzden sandviç yapı tiplerinin çeşitliliği temel olarak çekirdeğin konfigürasyonuna bağlıdır (Rocca ve Nanni 2005). Sandviç yapının etkinliğini korumak için çekirdek, panele etkiyen sıkıştırma veya ezme yüküne dayanacak kadar güçlü olmalıdır. Çekirdek yapı ayrıca yapıya etki eden kesme kuvvetlerine de direnç göstermelidir. Çekirdek hasara uğrarsa, sandviç yapının sahip olduğu mekanik özellikler ve rijitlik avantajı kaybolur. Çekirdek malzemeler genellikle dört ana tipe ayrılır. Bunlar balpeteği çekirdek yapılar, oluklu çekirdek yapılar, köpük çekirdek yapılar ve kafes çekirdek yapılarıdır.

a. Balpeteği Yapılar

Balpeteği çekirdek, doğada bulunan ve adını aldığı arıların bal üretmek için yaptıkları peteklere çok benzemektedir. Petek çekirdeğine hücresel çekirdek veya açık hücreli çekirdek de denir. Petek benzeri konfigürasyonlar için oluşturulmuş ince tabaka malzemelerden veya şeritlerden çok çeşitli çekirdek malzemeler yapılabilir. Sac malzeme, tabaka kalınlığı, hücre boyutu ve hücre şekli değiştirilerek, yoğunluk ve

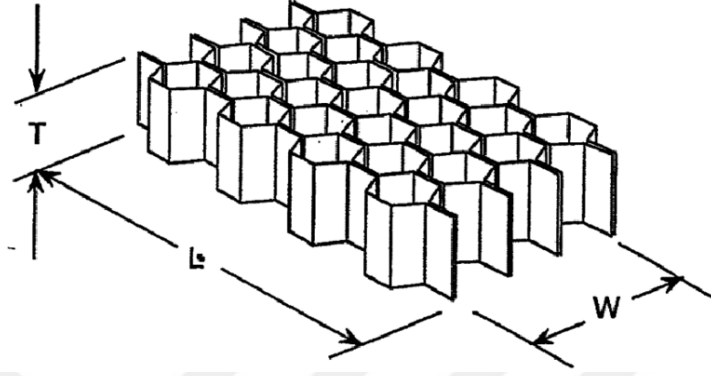
özellik bakımından geniş bir aralıktaki çekirdekler üretilebilir. Birçoğu ticari olarak temin edilebilen çeşitli çekirdek konfigürasyonları bulunmaktadır. Çoğu petek çekirdeği, orta miktarlarda tekli oluklu yapılardan oluşturulabilir. Özel hücre konfigürasyonlarına sahip çekirdekler de farklı üretim yöntemleri ile elde edilebilmektedir. Bazı çekirdekler, özellikle metalik olmayan çekirdekler için şekillendirme, ısı (sıcak şekillendirme) kullanılarak da kolaylaştırılabilir. Herhangi bir ince düz malzemedan yapılabilir ve geçmişte 500'den fazla farklı türde petek üretilmiştir. Prensip olarak pek çok farklı geometride üretimi mevcutsa da en yaygın olarak bilineni aşağıda şekil 2.46'da de gösterilen altıgen balpeteği yapılarıdır. Yapının sahip olduğu bu altıgen geometri bu tür yapılara düşük yoğunlukla beraber yüksek düzlem-dışı bası dayanımı ve yüksek düzlem-dışı kayma dayanımları sağlar (Bitzer 1997).



Şekil 2.46. Balpeteği yapı geometrisi (Paik ve ark. 1999)

Petek çekirdeği hücre boyutu, bir hücrenin iç duvarlarına teğet olarak çizilebilen bir dairenin çapı ile belirlenir. Şekil 2.47 tipik altıgen petek çekirdeği için şerit boyunu (L), enini (W) ve kalınlığı (T) göstermektedir. Belirli bir tabaka malzemesinden elde edilebilen hücre konfigürasyonları kalınlığı ve sertliği ile sınırlıdır. Bağlantı yerlerinde kullanım gibi özel uygulamalarda, petek yapı hücrelerinin bölgesel olarak genişletilmesi/daraltılması yapılabilir veya hücrelerin boylarının yine bölgesel olarak

değiştirilmesi sağlanarak yapı yoğunlaştırılır. Bu yoğunlaştırılmış çekirdek, yoğunluk artışıyla doğru orantılı olarak arttırılmış mekanik özelliklere sahip olacaktır.



Şekil 2.47. Balpeteği çekirdek yapının şerit yönleri (Bruffey ve Shiu 2016)

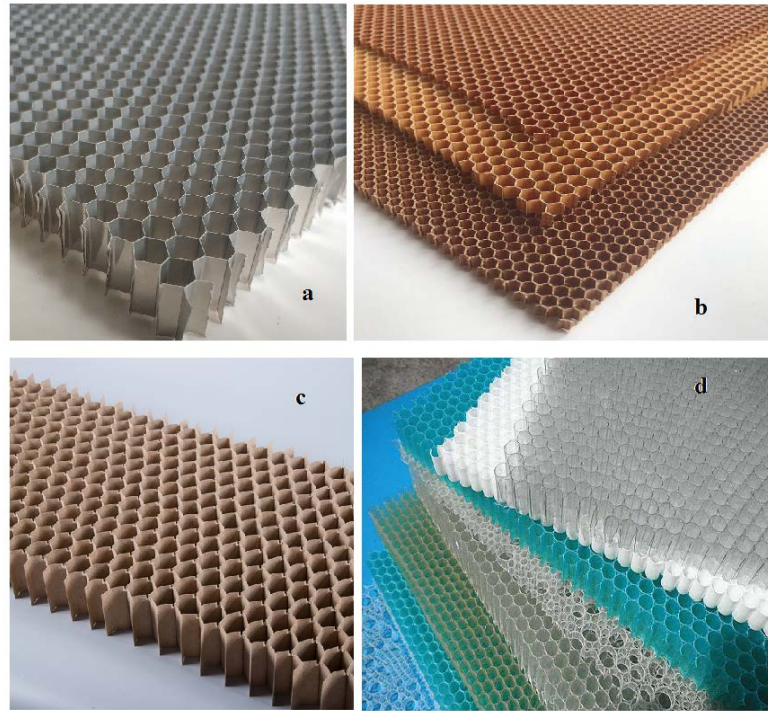
Petek malzemeler, düz veya hafif kavisli yüzeylere ihtiyaç duyulduğu ve yüksek özgül mukavemetlerinin değerli olduğu yerlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle havacılık endüstrisinde yaygın olarak karşımıza çıkmaktadır ve alüminyum, fiberglas ve gelişmiş kompozit malzemelerden üretilmiş petek malzemeler 1950'lerden beri uçaklarda ve roketlerde yer almaktadır. Kağıt bazlı petek karton şeklindeki ambalaj malzemelerinden kayak ve snowboard gibi spor malzemelerine kadar birçok alanda da bulunabilirler. Geleneksel olarak kullanılan 3 ana üretim tekniği mevcuttur. Bunlar genişleme (expansion), kalıplama ve oluklu tabakalardan üretimdir (Bitzer 1997).

Balpeteği yapılar malzemesi bakımından 2 ana gruba ayrılırlar:

- Metalik
- Metalik olmayan

Sandviç yapımı için balpeteği çekirdekler rutin olarak ince alüminyum alaşımları, reçine ile işlenmiş kumaşlar, reçine ile işlenmiş kağıt, paslanmaz çelik alaşımları, titanyum

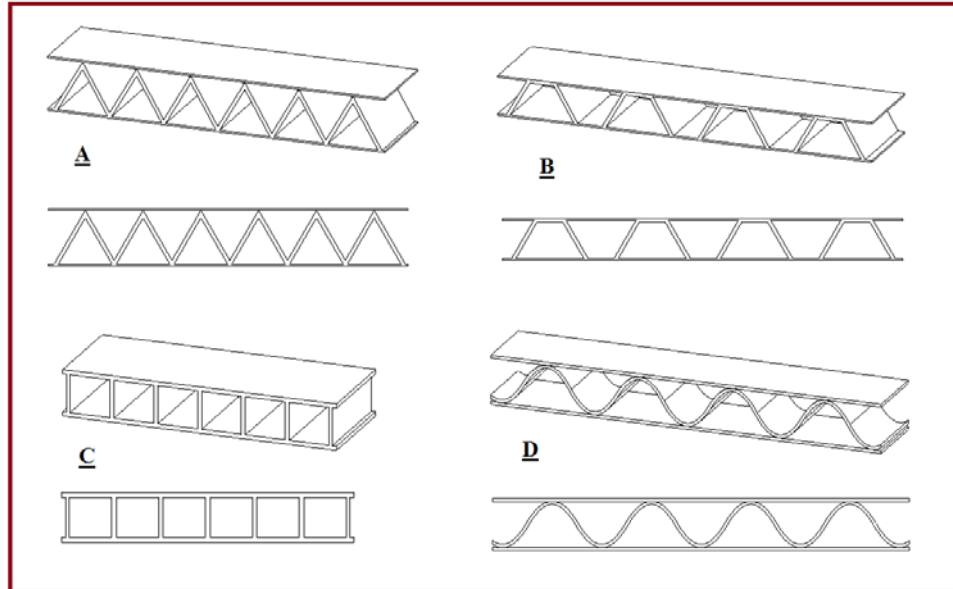
alaşımları ve plastiklerden üretilir. Günümüzde en yaygın kullanılan balpeteği çekirdek yapılar hala Alüminyum temelli olanlarıdır. Metalik olmayan balpeteği yapılar ise yaygın olarak cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerden, kağıttan, Nomex olarak da bilinen kevlar malzemededen oluşmaktadır. Son yıllarda polimerik malzemelere olan ilgi arttıkça geleneksel olarak kullanılan alanlardaki malzemelerin de polimerik malzemelerden üretilmesi sağlanmaktadır. Bu nedenle günümüzde yükselen bir kullanım alanıyla polimerik balpeteği yapılar özellikle de termoplastik polimerik balpeteği yapılar da metalik olmayan balpeteği yapılar grubuna dahil olmuşlardır. Metalik olmayan malzemelerden üretilen balpeteği çekirdekler, metalik balpeteği çekirdeklerinden daha iyi ısı yalıtım özelliklerine sahiptir, ancak her ikisi de ısının açık hücrelerde radyasyon yoluyla iletilmesine izin verir. Sandviç yapısında termal etkiler göz önüne alındığında, sandviçin yansıtıcı bir ısı yalıtkanı olarak hareket edebileceği anlaşılmalıdır. Farklı malzemelerden yapılmış balpeteği yapı örnekleri aşağıda şekil 2.48’de verilmektedir.



Şekil 2.48. Farklı malzemelerden üretilmiş balpeteği çekirdek yapıları a)Alüminyum b) Nomex (Kevlar) c)Karton d)Plastik

b. Oluklu Yapılar

Yüksek dayanıklı sandviç panel yapımında en çok tercih edilen pratik çekirdek topolojilerinden biri de oluklu yapıdaki çekirdektir. Bu çekirdekler, yapıların hem normal hem de uzunlamasına yönlerinde üretim avantajlarının yanı sıra yüksek mukavemet sağlar. Bu tür çekirdekler esasında balpeteği çekirdek yapılarının da yapımında kullanılan ara formdur. Bu sebeple özellikle balpeteği çekirdek yapılara oranla çok daha kolay üretilebilir olmaları en önemli avantajlarından birisidir. Ayrıca bu tip çekirdek yapıları özellikle patlama ve yüksek hızda darbe yüklemeleri altında, sahip oldukları yüksek enerji sönmeme kabiliyetleri nedeniyle tercih edilmektedir. Bu sebeple daha çok patlama yüklerine maruz kalan askeri alanlarda, patlama yaşanma riski olan yerlerde zemin ve yanal duvarlarda ve sıvı-gaz nakliye tanklarında kullanılmaktadır. Oluklu kanallar yüz tabakalarına paralel uzanırken, petek çekirdeği hücre eksenleri yüz tabakalarına normaldir. Oluklu çekirdekler tek eğriliğe kadar oluşturulabilir. Oluklu çekirdek yapılar yaygın olarak üçgen, trapezoidal, kare ve sinüzoidal geometrilerde üretilmektedir. Bu yapıların şematik gösterimi aşağıda şekil 2.49’da gösterilmektedir.

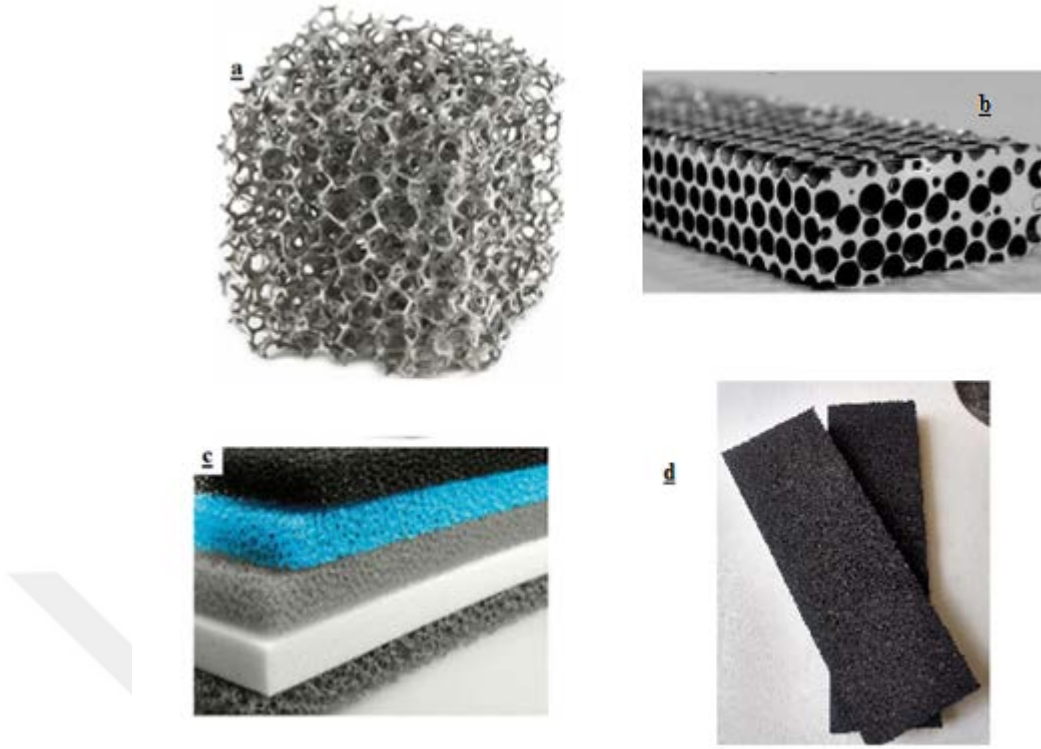


Şekil 2.49. Farklı geometrilerde oluklu çekirdek yapıya sahip sandviçler A)Üçgen B)Trapezoidal C) Dörtgen D)Sinüzoidal

Balpeteği yapılar ile oluklu yapılar arasındaki en temel farklılıklardan bir tanesi de, çekirdek yapı olarak kullanımlarında boylamasına ve diklemesine olarak kullanım farklılıklarıdır. Bilindiği üzere balpeteği yapılar yapıya rijitlik ve yüksek dayanım sağlamak adına gözenekleri yüz tabakaları tarafından kapatılacak şekilde yerleştirilir. Oluklu çekirdek yapılarda ise bu durum tam tersi olarak uygulanır. Bu uygulama farkı da oluklu çekirdeklere temelde şu iki avantajı sağlar; bunlardan ilki yapının plastik deformasyon özelliği kazanmasıyla elde ettiği enerji sönümleme yeteneği diğeri ise yapı boyunca oluşan oluk kanalları sayesinde yapının kazandığı havalandırma mekanizmasına sahip olmasıdır ki bu sayede yapı nem tutmayan bir karakteristiğe sahip olur (Côté ve ark. 2006). Sandviç yapının nem tutması yapıştırıcı başta olmak üzere yapının tamamına zamanla zarar vereceği gibi yapının sahip olduğu ağırlığı da arttıracaktır (Katzman ve ark. 2008). Oluklu yapılarda farklı malzemeler kullanılarak üretilmektedir. Fakat en yaygın kullanılanları çelik ve alüminyum levhalardır.

c. Köpük Yapılar

Köpük çekirdekler, doğal (ahşap veya kağıt) çekirdek malzemelerin başlıca dezavantajlarının, özellikle yoğunluk ve nem emiliminde istenmeyen değişikliklerin üstesinden gelmek için geliştirilmiştir. Plastik çekirdekler, plastiğin görünen yoğunluğunu çekirdek malzeme için pratik bir aralığa düşürmek için köpüklenir, genişletilir veya başka yollarla işlenir. İstenen çekirdek özellikleri, bu çekirdekler için genleşme prosesi kontrol edilerek elde edilebilir. Metalik köpüklü çekirdekler, erimiş alüminyum-magnezyum alaşımlarının uygun köpürtücü ajanlarla karıştırılması ve gözenekli bir katı oluşturmak üzere karışımın soğutulmasıyla üretilir. Bu malzemelere ek olarak cam köpükler de üretilir. Bu tip çekirdek malzemesi, aynı yoğunluktaki petek çekirdeği kadar güçlü veya sert olmasa da, şu avantajları sunar: Çekirdek eklem eliminasyonu; yüz tabakaları ve çekirdek arasında ince ve düzgün birleştirme tabakası; montajdan önce kolayca kontrol edilebilen, önceden kalıplanmış, boşluksuz yüz tabakalarının kullanımı; iyi elektriksel özellikler ve imalat esneklik. Farklı malzemelerden yapılmış köpük çekirdek yapılar aşağıda şekil 2.50’de gösterilmektedir.



Şekil 2.50. Farklı malzemelerden üretilmiş köpük yapılar a) Açık hücreli metal köpük (Borovinšek ve ark. 2008) b) Kapalı hücreli metal (Fiedler ve ark. 2006) c) Açık hücreli polimerik köpük (Anonim 2020n) d) Kapalı hücreli polimerik köpük (Türkoğlu ve ark. 2018)

Köpükler, peteklere göre daha düşük mekanik özellikler gösterir, ancak akustik sönümlenme veya yalıtım gibi bazı avantajlara sahiptirler. Ek olarak, termoplastik köpükler iyi bir termoformabilite sergiler. Ekstrüzyon, sıkıştırma kalıplama, enjeksiyon kalıplama ve benzeri gibi çeşitli imalat yöntemleri, köpük üretmek için kullanılabilir. Köpük çekirdekleri, imalat sırasında genişleyen ve gözenekli, hücreli yapıyı gerçekleştiren bir köpürtücü veya üfleme maddesi kullanılarak yapılır.

Özellikle balpeteği ve oluklu çekirdek malzemelerinin kolayca kullanılmadığı karmaşık yapılarda kullanılan bir çekirdek yapısıdır. Tek başına kullanımına ek olarak diğer çekirdek türleriyle birleştirilerek de kullanılmaktadır. Balpeteği çekirdeklerine oranla genellikle daha düşük maliyetleri nedeniyle, köpük çekirdekler genel havacılık ve denizcilik uygulamaları gibi maliyete duyarlı uygulamalarda yaygın olarak

kullanılmaktadır. Köpüklerin hücresel yapısı açık ve birbirine bağlı hücrelere veya kapalı ve ayrıık hücreler olmak üzere sınıflandırılır. Açık hücre yapısına sahip köpükler genellikle düşük mekanik performansa sahiptirler. Hemen hemen her polimer, uygun bir şişirme maddesi eklenerek köpük üretmek için kullanılabilir (Grünwald ve ark. 2015).

Gazın genleşme derecesine ve özel formülasyona bağlı olarak, köpükler açık hücreli veya kapalı hücreli konfigürasyonlarından herhangi birine sahip olabilir. Bu nedenle kapsamlı bir karakterizasyon aşağıdakilerin bir ölçüsünü içerebilir:

- Köpük Yoğunluğu: Genellikle kg/m^3 birimi ile verilir. Amaca uygun kullanımı ise şu şekilde sağlanmaktadır; köpüğün yoğunluğunun (ρ_f) polimerin köpürtülmeden önceki yoğunluğu (ρ_p) ile oranlanmasıyla nispi yoğunluk (Φ) elde edilir.

$$\Phi = \rho_f / \rho_p \quad (2.58)$$

Nispi yoğunluk ayrıca bir köpük içindeki polimerin hacim fraksiyonu olarak da kabul edilebilir. Düşük yoğunluklu köpükler genellikle, hacim olarak <0.1 olan polimer fraksiyonları olarak kabul edilir.

- Hücre Boyutu: Köpük kesitinin doğrudan incelenmesi ile ölçülebilen hücre boyutu bir diğer karakterizasyon yöntemidir. Hücre boyutunu belirlemek için hali hazırda kullanılan ASTM D3576-15 (2015) standartına göre belirli bir uzunlukta bulunan hücreler sayılır. Ortalama kiriş uzunluğu t belirlenir ve ortalama hücre çapı d , $d = t / 0.616$ formülüyle hesaplanır.

Uygulamada, genellikle hücre boyutlarının bir dağılımı, bazen de çok geniş bir dağılım vardır. Çoğu köpük üreticisi, köpükleri için ya ortalama bir hücre boyutu ya da bir dizi hücre boyutu önermektedir. Farklı boyutlardaki hücrelerin üretimine, kısmen uzay ve zamanda rastgele dağılmış hücreler ve kısmen küçük hücrelerden gaz difüzyonu ile büyüyen hücreler neden olur. Düzgün hücre boyutu sabit bir yapı değildir. Gazın küçükten büyük hücrelere difüzyonu, sıvı

ile çevrili bir baloncunun içindeki basıncı veren klasik denklemlerden anlaşılabilir:

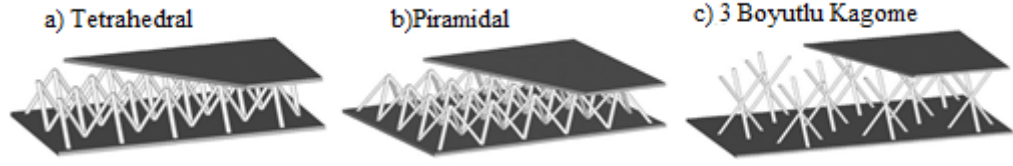
$$P = 2\gamma/r \quad (2.59)$$

Burada P gaz ve çevresindeki sıvı arasındaki basınç farkıdır, γ arayüzey yüzey gerilimi ve r kabarcık yarıçapıdır. Küçük kabarcıklar büyük olanlardan daha yüksek basınçta gaz içerir; dolayısıyla difüzyon daima küçükten büyüğe doğrudur.

Bu iki temel karakteristik özellikten ayrı olarak, Açık/Kapalı Hücre Oranı, Anizotropi ve Hücre Şekli de belirleyici karakteristik özelliklerdir.

d. Kafes Kiriş Yapılar

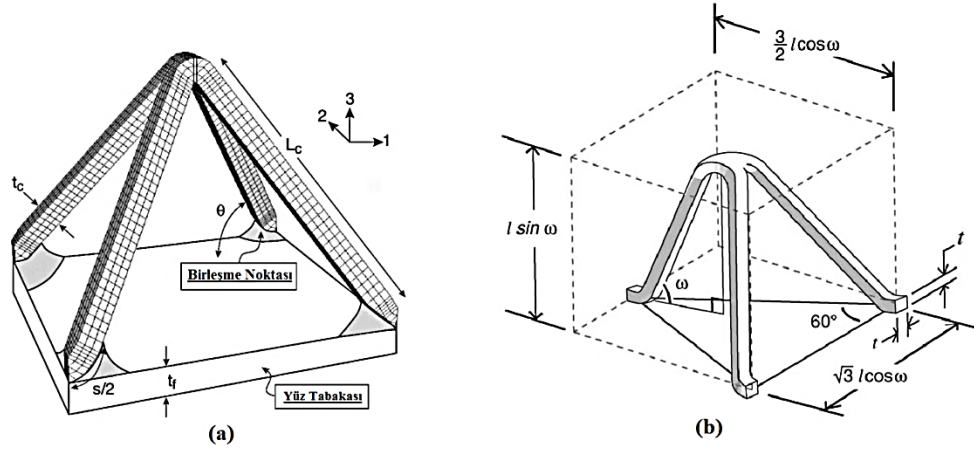
Son zamanlarda, gelişen yeni ihtiyaçlar doğrultusunda açık hücre mimarileri ile kafes çekirdek yapılar adı verilen yeni tür çekirdek malzemeler tasarlanmış ve üretilmiştir. Bu çekirdek genel olarak yapısal performans ve potansiyel çok işlevselliğin kombinasyonunu kullanıcılara sunmaktadır. Kafes çekirdek yapılar çok çeşitli geometrilerde olabilmektedir. En bilinen ve yaygın kullanılanları ise aşağıda şekil 2.51’de verilen dörtyüzlü (tetrahedral), piramidal ve 3 Boyutlu kagome yapılarıdır. Kafes yapıların kiriş elemanları, sandviç paneller eğilme gerilmesiyle yüklendiğinde ağırlıklı olarak eksenel gerilime (çekme ve basma) karşı koymak için topolojik olarak yapılandırılmıştır. Böylece sandviç panel sadece eksenel deformasyonlara maruz kalacaktır. Bu, bağ dokuları gerilmeye maruz kaldığında, ağırlıklı olarak eğilme gösteren stokastik köpüklere kıyasla önemli ölçüde üstün yapısal performansa sahip olmalarını sağlar. Yapısal verimliliklerinin yanı sıra, % 2-10 kafes çekirdek nispi yoğunluklarına ve milimetre aralığındaki hücre boyutlarına sahip sandviç paneller, çok işlevli uygulamalar için potansiyelleri nedeniyle özellikle güncel ilgi çekmektedir (Moongkhamklang 2009).



Şekil 2.51. Farklı geometrilerde kafes kiriş çekirdek yapılar a)Tetrahedral b) Piramidal c) 3 Boyutlu kagome (Kooistra ve Wedley 2007).

Nispi yoğunlukları ile doğrusal olarak ölçeklenen sertlik ve mukavemete sahiptirler. Bu nedenle, düşük göreceli yoğunluklarda, kafes yapıları, aynı ana malzemelerden yapılan köpük yapılardan çok daha rijit ve dayanıklı olabilmektedirler. Yaygın olarak metal malzemelerden üretilen kafes kiriş yapıları karşımıza çıksa da son yıllarda teknoloji gelişmeler sayesinde polimerik malzemelerden üretilmiş yapılarla da karşılaşılmaktadır. Bu durum son yıllarda 3 boyutlu yazıcı teknolojisinin gelişmesiyle elde edilmiştir.

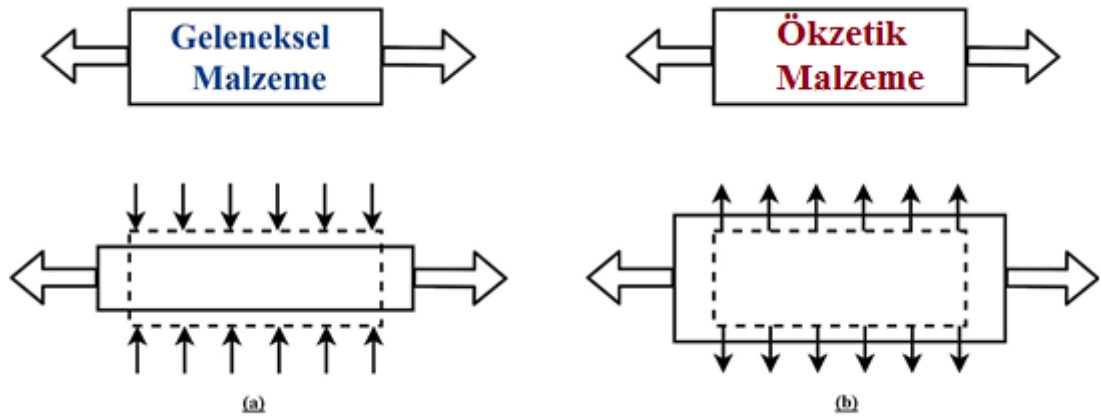
Kafes kiriş yapılar, çeşitli çok işlevli yapısal uygulamalar için potansiyel fırsatlar sağlayan mekanik, termal ve akustik özellik kombinasyonlarına sahip oldukları için giderek daha fazla dikkat çekmektedir. Kafes malzemeler yüksek özgül mukavemet ve yüksek özgül şekil değiştirme, yüksek pozitif ve negatif Poisson oranı, mükemmel darbe sönümleme, akustik yalıtım, eşanjör olarak kullanıma uygunluk ile ultra hafif yapılar sunar (Challapalli 2015). Ayrıca bu çekirdek yapılar sayesinde, balpeteği çekirdeğin, sandviç yapı içerisindeki nem ile korozyona yatkınlıkları ve delaminasyon potansiyeli gibi diğer eksikliklerini de hafifletebilir (Kooistra ve Wedley 2007). Kafes kiriş yapıların temelini oluşturan iki ana geometrinin – piramidal ve tetrahedral- tek hücreli geometrileri aşağıda şekil 2.52’de detaylı olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.52. Tek hücreli kafes kiriş yapıların geometrileri a) Piramidal kafes kiriş yapı (Zok ve ark. 2004) b) Tetrahedral kafes kiriş yapı (Kooistra ve ark. 2004)

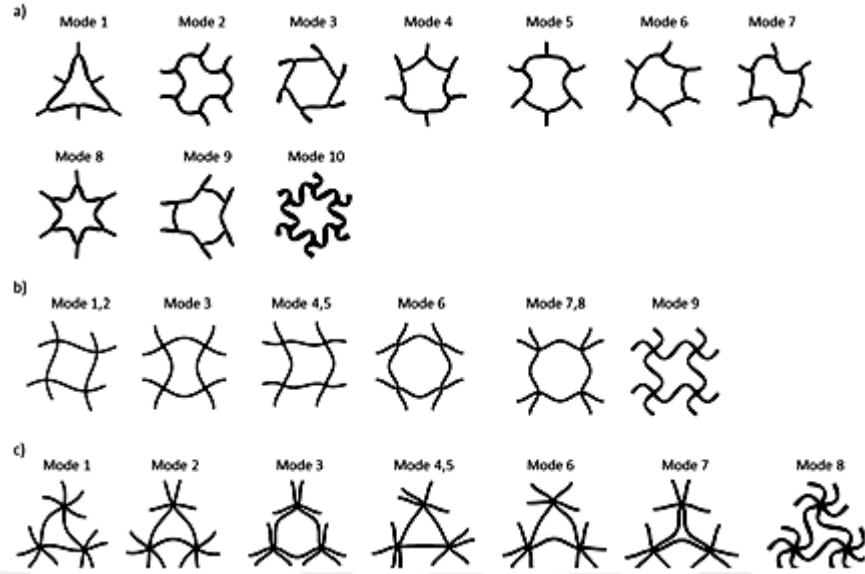
e. Ökzetik Yapılar

Günlük hayatta mühendislik alanında kullandığımız malzemelerin ve yapıların neredeyse tamamı pozitif poisson oranına sahiptirler. Yani bir doğrultuda bası kuvveti uygulayarak onu daralmaya zorladığımızda buna dik diğer bir doğrultuda genişlemeye çalışacaktır. Fakat ilk kez 1987 yılında Roderick Lakes (1987), ürettiği bir köpükte farklı bir davranış keşfetmiştir. Keşfettiği bu davranış, köpüğün geleneksel malzemelerden farklı olarak negatif poisson oranına (NPO) sahip olduğudur. Bu özelliğe sahip malzemelere daha sonra Evans ve Alderson (2000) tarafından “Ökzetik (Auxetic) Malzemeler” ismi verilmiştir. Ökzetik kelimesi köken olarak Yunancadaki “auxetikos” kelimesinden gelmektedir ve anlamı “artmaya eğilimi olan” demektir. Ökzetik malzemeler, bir veya daha fazla yönde negatif poisson oranına sahiptirler. Malzemeye bir doğrultuda çekme kuvveti uygulanarak uzatıldığında; buna dik olan doğrultuda da bir uzama meydana gelecektir. Tam tersi şekilde, bir doğrultuda yapıyı daralmaya zorlayan bir bası kuvveti uygulandığında; buna dik olan doğrultuda da bir daralma meydana gelecektir. Ökzetik malzemelerin sergiledikleri bu NPO davranışın geleneksel malzemelere kıyasla nasıl olduğu aşağıda şekil 2.53’te görsel olarak verilmiştir.

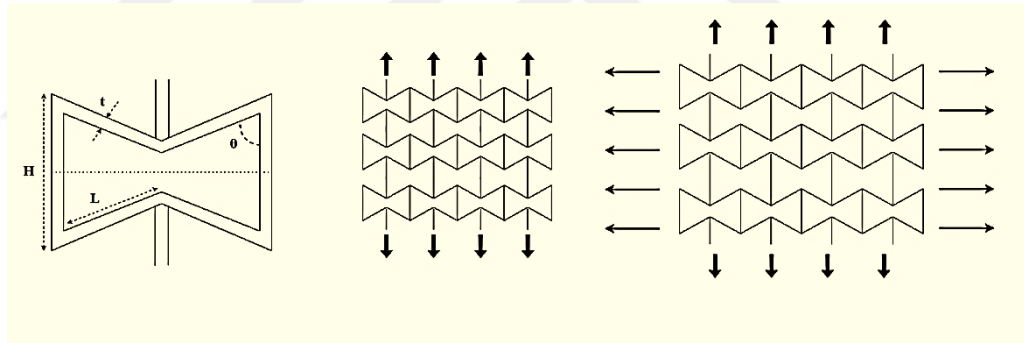


Şekil 2.53. Tek yönlü çekme kuvveti uygulanan geleneksel ve ökzetik malzemelerin sahip oldukları poisson oranına göre davranışları a)Geleneksel malzemenin kuvvete dik yönde daralması b) Ökzetik malzemenin kuvvete dik yönde de genişmesi

Ökzetik malzemeler ya da bir diğer deyişle NPO'na sahip malzemeler çok yeni keşfedilmiş olsalar da aslında doğada kendiliğinden var olan malzemelerdir. Bunlara en iyi örnekler ise kedi ve kertenkele gibi bazı hayvanların ciltleri, insanın sahip olduğu bazı eklemler, demir pirit ve arseniğin sahip olduğu tek kristal yapılarıdır (Evans ve Alderson 2000). Özel olarak işlenmiş bazı insan yapımı köpük malzemeler, benzersiz mikro yapıları nedeniyle ökzetik davranışlar sergilemektedir. Fakat bunların dışında Pozitif Poisson Oranına (PPO) sahip malzemelerin mühendislik olarak tasarlanmasıyla benzersiz geometrilerde de ökzetik yapılar elde etmek mümkündür. Bu tür tasarlanmış yapılara ise “metamalzemeler” adı verilmektedir (Lee ve ark 2012). Bu tasarlanarak oluşturulan metamalzemelerin temel geometrilerini oluşturan tasarımlar aşağıda şekil 2.54'te gösterilmektedir. Ayrıca temel tasarımlar arasında en yaygın kullanılan yeniden kıvrımlı (re-entrant) ökzetik yapı geometrisi bu geometriye ait ökzetik davranış şekil 2.55'te verilmektedir.



Şekil 2.54. Tasarlanabilir metamalzemelerin temelini oluşturan geometriler (Ashjari ve ark. 2017).



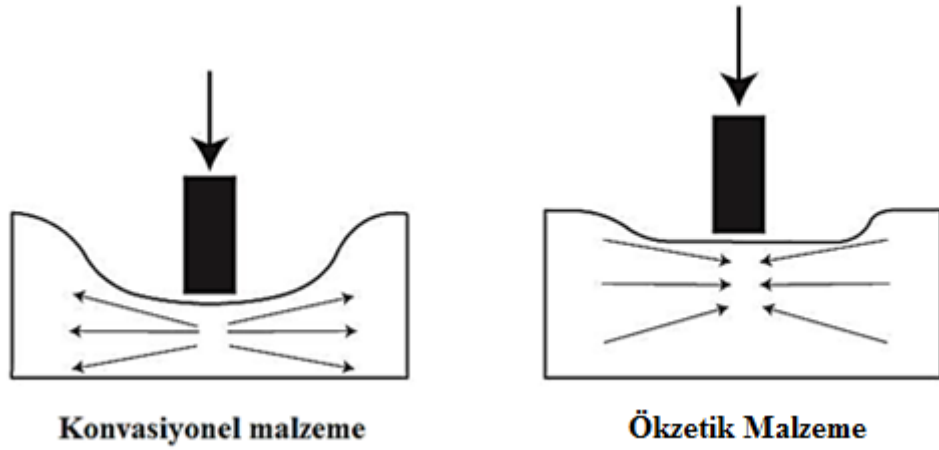
Şekil 2.55. Tek Hücreli yeniden kıvrımlı ökzetik yapı ve bu yapının NPO ile çalışma prensibi

Ökzetik Yapıların Avantajları ve Potansiyel Kullanım Alanları

Teorik olarak ökzetik yapılar/malzemeler, geleneksel malzemelere kıyasla üstün mekanik özelliklere sahiptirler. Örneğin geleneksel izotropik malzemelerin sertliği (1-2v) büyüklüğü ile ters orantılıdır. Bu nedenle klasik elastisite teorilerine göre, PPO'na sahip malzemelerin en büyük sertlik değerine, poisson oranı +0.5 olduğunda ulaşılır.

Benzer young modülüne sahip ökzetik malzemelerde ise, poisson oranı -0.5 'ten aşağıya düştükçe çok daha büyük sertlik değerleri elde edilebilir.

Ökzetiklik, malzemelerin mekanik özellikleri üzerinde önemli etkileri olan bir davranıştır ve malzemeler NPO'na sahip olduğunda davranışlarında dikkate değer değişiklikler meydana gelmektedir. Klasik elastisite teorilerine göre yapılar ökzetiklik özelliğine sahip olduğunda kırılma ve kayma modülleri (Huang ve Blackburn 2002), kırılma dirençleri (Cjoi ve Lakes 1996), akustik tepkilerinde (Lipsett ve Beltzer 1988) bir artış beklenmektedir. Negatif Poisson oranlarına sahip malzemelerin, aynı Young modülüne sahip pozitif poisson oranlı malzeme ile karşılaştırıldığında, elastik kayma modülü ve dinamik tanjant kayıpları daha yüksektir (Smith ve ark 2002). Ökzetik malzemeler ayrıca çok yüksek batma direncine sahiptirler. Eşit yoğunluktaki konvansiyonel petek malzemelerle kıyaslandığında çok daha yüksek değerlerde olan ökzetik malzemelerin batma direnci mekanizmaları aşağıda şekil 2.56'da gösterilmektedir.



Şekil 2.56. Batma direnci üzerinde ökzetik özelliğin etkisi (Nabiyouni 2017).

Konvansiyonel malzemelerde batma yükünün etki ettiği çarpma noktasının hemen altında malzeme yoğunluğu azalır. Yani bu bölgedeki malzeme, poisson oranının pozitif

olması nedeniyle etrafa doğru yayılır. Ökzetik malzemelerde ise bu durum negatif poisson oranına sahip olmaları sebebiyle tam tersi olacaktır. Yani yükün etki ettiği çarpma noktasının hemen altındaki kısımda malzeme yoğunluğu artacaktır. Bu bölgedeki yoğunluk artışından dolayı malzemenin sertliği artacak ve buna bağlı olarak da batma direnci yükselecektir (Nabiyouni 2017).

Ayrıca, malzemelerin visko-elastik performansları ökzetikliğinin varlığında gelişir. Bazı çalışmalar yeniden kıvrımlı petek yapıları kullanıldığında iki fazlı kompozit köpüklerin modüllerinin arttığını kanıtladı. Ayrıca bu çalışmada, ökzetik petekler kullanılarak hem sertliği hem de modal kayıp faktörlerini iyileştirme olasılığı ortaya konmuştur (Scarpa ve ark. 2000).

Ek olarak, ökzetik malzemelerin performansının en önemli yönü olan deformasyon davranışları, poisson oranı işareti ile açıkça değişmektedir. Poisson oranı -0.8 olan bir yeniden kıvrımlı köpüğün homojen mikro-deformasyon oranı sıradan şekilli bir köpüğe kıyasla daha yüksektir (Chen ve Lakes 1993). Ökzetik malzemelerin diğer tüm davranışları deformasyon davranışlarının sonucudur.

Son olarak ise malzemeler ökzetik olduğunda diğer bazı malzeme özelliklerinin daha uygun hale geldiği gözlemlenmiştir. Bunları kısaca belirtmek gerekirse enerji sönümleme kapasitesi (Martz ve ark. 1996), ses ve titreşim yutma davranışı (Howell ve ark. 1994, Chen ve Lakes 1996), ve enine kayma modülü (Smith ve ark. 2002) denebilir.

Sandviç yapılar oluşturulurken kafes yapıların ve köpüklerin çeşitli özelliklerinden yaygın olarak yararlanılmaktadır. Birçok uygulamada, çekirdek yapı kesme yükü sebebiyle hasara uğradığı için sandviç yapıda bir bozulma meydana gelir. Öte yandan, sandviç yapıların daha fazla enerji sönümlemesi ve eğilme momentlerine maruz kaldıklarında uygun bükülme sergilemesi arzu edilmektedir. Ökzetik yapılar potansiyel

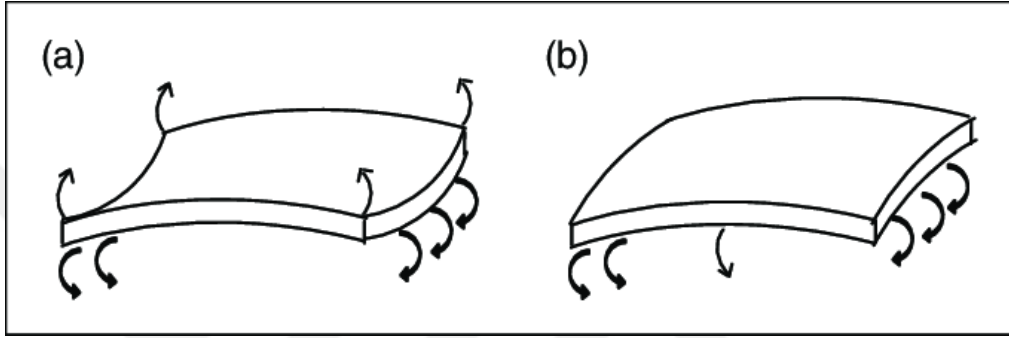
olarak tüm bu avantajları sağlayabilir, bu da onları çekirdek yapılar için en ideal aday yapar.

Ökzetik yapılar büyük ölçekli yapılarda da potansiyel olarak kullanılabilir. Ökzetik yapının sahip olduğu üstün sertlik özelliği, köprü ve yüksek binaların tasarımında onları arzu edilen yapılar kılar. Halen baskın yapısal tasarımlar, sertliği ve stabilitesi nedeniyle üçgen geometrisine dayanmaktadır. Bununla birlikte, üçgen genel performans açısından en verimli örgü yapı tasarımı değildir. Ökzetik yapıların özellikleri bu ikilemin çözümüne yol açabilir.

Ökzetik malzemelerin benzersiz özellikleri, araçlarda crash-box gibi, enerji sönmleme mekanizmalarında kullanıma çok uygundur. Dünyada can kaybı açısından temel sorun savaşlar ve salgın hastalıklar olarak görülse de bu durumlar bazı zamanlarda azalmaktadır. Fakat ölüm oranını bir türlü azaltamadığımız ve ilk aracın yollara çıktığı günden bu yana hiç bitmeyen bir salgın hastalık gibi can almaya devam eden durum, trafik kazalarıdır. Her ne kadar günümüz araçlarında kaza önleyici sistemler üzerinde çalışmalar gerçekleştirilse de henüz önüne geçebildiğimiz bir durum değildir. Bu nedenle yapılması gereken, kaçınılmaz olan bu kazalardan en az hasarla çıkabilmektir. Bu nedenle Araçlarda pasif güvenlik ve çarpışma enerjisi sönmleyici kısımlarda ökzetik çekirdekli sandviç yapıların kullanımıyla araçların çarpışma durumunda sönmlediği enerji miktarı artacak ve araç içindeki yolcu ve sürücüye aktarılan darbe enerjisi azalacaktır ve aracın genel dayanımında bir artış sağlanabilecektir.

Ökzetik yapılar eğme yüküne maruz kaldıklarında geleneksel malzemeler gibi antiklastik özellik sergilemenin aksine sinklastik (eş eğrisellik) davranışı sergilemektedir. Daha basit anlatmak gerekirse geleneksel yapılar eğilmeye maruz kaldıklarında eyer geometrisine benzer bir hal alırken, ökzetik yapılara eğilme yükü uygulandığında kubbe şeklini alırlar. Antiklastik ve sinklastik davranış görsel olarak şekil 2.57’de verilmiştir. İşte yapıların eğilme yükü altında 2 eksen de aynı eğriliği sergileyerek kubbe şekli alarak deforme olmalarına sinklastik davranış denmektedir. Ökzetik yapılar sergiledikleri bu davranış sayesinde özellikle basınçlı kaplarda, ya da iç

veya dış basınç altında çalışan sistemlerde büyük bir avantaj elde etmektedir. Ayrıca bu davranış sayesinde patlamanın sebep olduğu şok yükleri altında da üstün bir özellik sergilediklerinden patlama önleyici sistemlerde de kullanımı çok uygundur. Bu davranışa bu yapıların en önemli özelliği sayılabilecek üstün batma dirençleri de eklendiğinde balistik koruyucu özellik gereken yerlerde çok ideal bir yapı konumuna gelmektedirler (Easey ve ark. 2019).



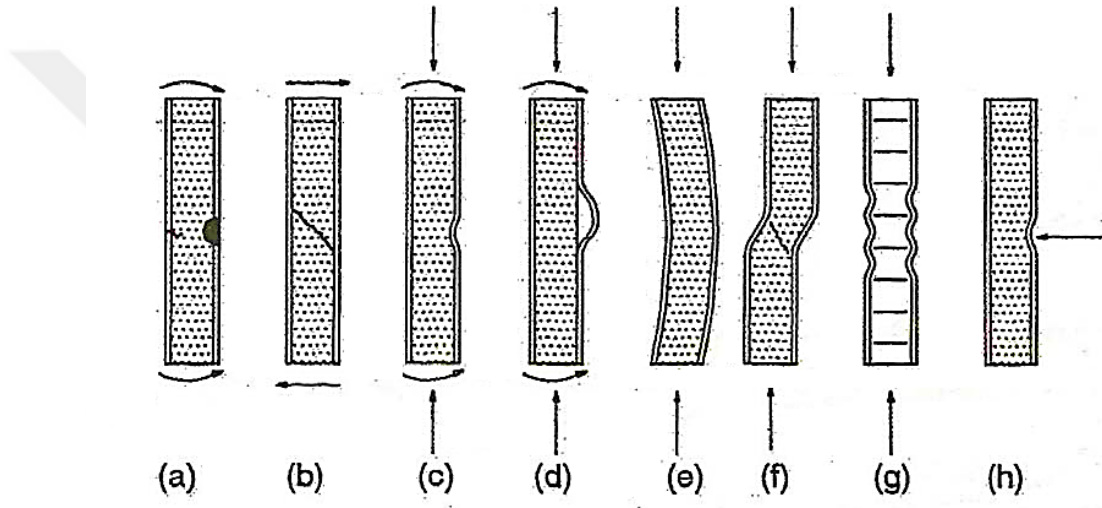
Şekil 2.57. Eğilme yükü altında a) antiklastik davranış b) sinklastik davranış (Wang ve ark. 2014).

2.7. Düzlemsel Sandviçler

Sandviç yapıların bazı tipik avantajları arasında yüksek sertlik ve özgül mukavemet, titreşim ve yüksek enerji sönümlene kapasitesi, iyi termal ve akustik yalıtım vb. özellikleri yer almaktadır. Temel bir dezavantaj, düşük yoğunluklu polimer köpükler gibi çoğu çekirdek malzemenin nispeten düşük enine esnekliğe sahip olmasıdır. Bu nedenle, özellikle lokalize yüklemeler altında, yüz kırışması (wrinkling) ve lokal çekirdek girintisi (indentation) gibi bazı özgün başlangıç hasar modlarını gösterme eğilimindedir. Bu durum tasarımcılar tarafından dikkatle değerlendirilmesi gereken bir durumdur. Zira bir sandviç malzemenin, karmaşık yapılardaki birleşme bölgelerindeki karmaşık yükleme koşullarını, bir çok ulaşım yapılarının maruz kaldığı taşıma veya kullanım sırasında dış objelerden kaynaklı düşük-hızlı darbe yüklemelerinden kaynaklı

oldukça yaygın olan yüksek konsantre yüklerin ortaya çıkmasını da içeren ciddi yükleme koşullarını yaşayabileceği bazı tipik durumlar mevcuttur (Guimares 2010).

Sandviç yapının geometrisine, dış yükleme koşuluna ve sınır şartlarına bağlı olarak kritik yükleme sınırına ulaşıldığında yapılarda hasar başlangıcı görülebilir ve bu yapının işlevselliğini bozmaktadır. Düzlemsel sandviç kirişlerde en yaygın görülen hasar modları aşağıda şekil 2.58'de görsel olarak verilmektedir.



Şekil 2.58. Sandviç kirişlerin en yaygın hasar modları a) Yüz tabakası akması/kırılması b) Çekirdek kayma hasarı c-d) Yüz kırışması e) Genel burkulma f) Kayma kıvrılması g) Yüz tabakası çukurlanması h) Yerel çekirdek girintisi (batma) (Zenkert 1995)

Son yıllarda bazı araştırmacılar, genellikle bazı referans yükleme koşullarını ve yapılarını seçerek, bu tür çökme mekanizmalarının aktivasyonuna yol açan koşulları sistematik olarak araştırmaya çalışmışlardır. Örneğin, üç noktalı eğilme altındaki bir kiriş, hasar modellerinin geliştirileceği ve parametrik hasar karakteristiklerinin oluşturulacağı en yaygın temel kriterlerden biridir (Guimares 2010).

Sandviç paneller, yapısal mekaniklerin geleneksel prensipleri kullanılarak analiz edilebilen nispeten basit yapısal bileşenlerdir. Az sayıda mekanik özelliğin bilinmesi şartıyla, gerilmeleri ve sapmaları tahmin eden yapısal bir analiz temelinde tasarlanabilirler. Bununla birlikte, nispeten esnek çekirdek malzemenin etkisi nedeniyle, sandviç paneller geleneksel kiriş ve plaka teorisi temelinde tasarlanamaz. Çoğu sandviç panel bir yönde uzanır ve bu nedenle çekirdeğin kesme esnekliğini hesaba katan artırılmış bir kiriş teorisi gerektirir.

Ayrıca, yaygın olarak kullanılan çekirdek malzemelerin çoğu, uzun süreli gerilmeler altında sürünür. Bir başka önemli husus, çekirdek malzemelerin genellikle termal yalıtım özellikleri nedeniyle seçilmeleri ve sonuç olarak panelin yüzleri arasında büyük sıcaklık farklarının mevcut olabilmesidir. Bu, sandviç panellerin sıcaklık etkilerine özellikle duyarlı olma eğiliminde olduğu anlamına gelir. Bu nedenle yapısal davranış dikkate alındığında dikkate alınması gereken ana faktörler şunlardır:

- Çekirdeğin kesme esnekliğinin genel davranış üzerindeki etkisi.
- Çekirdeğin, yüz tabakalarının lokal burkulmasını (kırışmasını) engellemedeki etkisi.
- Sıcaklığa bağlı stres ve sapmaların etkisi.
- Sert köpük çekirdek malzemelerinin zamanla sürünmesi.

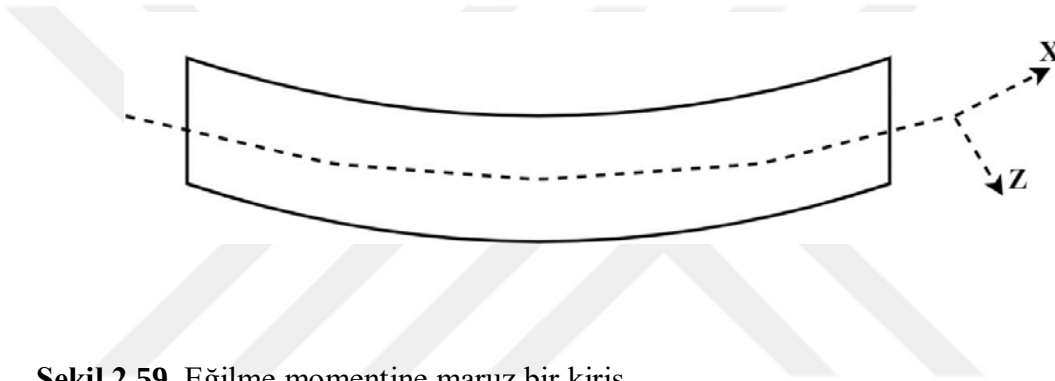
2.8. Düzlemsel Sandviç Mekanik

Bu bölümde sandviç kiriş teorisinin temelleri verilecektir. Mühendislik kiriş teorisi ile hemen hemen aynı olan bu teoride farklı olarak enine kesme deformasyonlarını hesaba katılması gerekecektir. Bu teori genellikle Timoshenko Kiriş Teorisi olarak anılır. Mühendislik kiriş teorisinden başka bir yenilik ise, farklı yüklerin yapının farklı bölümleri tarafından taşınacak olmasıdır. Burada verilen teori, Allen ve Plantema (1966) tarafından iyice tarif edilen şeyin kısa bir özetidir. Basitlik için, tüm kirişlerin birim genişliğine, yani yüklere, sertliğe vb. sahip olduğu varsayılarak değerler birim

genişlik başına verilecektir. Yüz plakaları için "f" indeksi kullanılırken çekirdek için "c" indeksi kullanılacaktır.

2.8.1. Eğilme Rijitliği

Kirişe bir eğrilik (κ_x) (eğrilik yarıçapının (R) tersi) veren sabit bir eğilme momentine maruz kalan düz bir kirişin temel problemini aşağıda şekil 2.59'da verilmektedir.



Şekil 2.59. Eğilme momentine maruz bir kiriş

Nötr eksen den z kadar uzaklıkta bulunan bir lifteki gerinim değeri şimdi şu şekilde ifade edilebilir;

$$\varepsilon_x = \kappa_x \cdot z \quad (2.60)$$

Yani z ile doğrusal olarak değişir. κ_x eğriliğine neden olmak için uygulanması gereken eğilme momenti ifadesi;

$$M_x = \int \sigma_x \cdot z dz = \int \frac{E \cdot z^2}{R_x} \cdot dz = \kappa_x \cdot \int E \cdot z^2 \cdot dz = \frac{E \cdot I}{R_x} \quad (2.61)$$

Buradan da eğilme rijitliği ifadesi çekilirse;

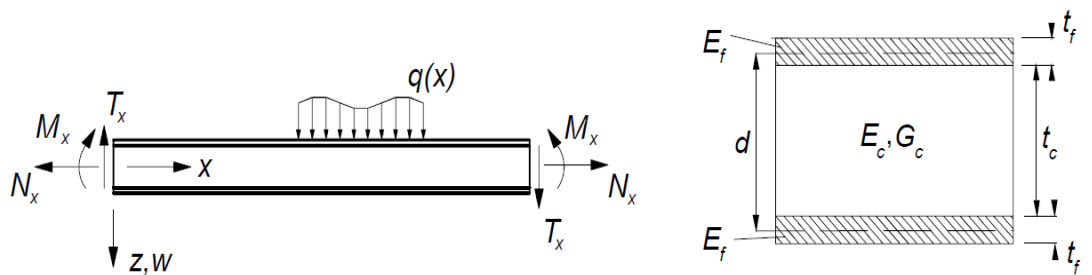
$$E.I = \int E . z^2 . dz = D \quad (2.62)$$

olarak elde edilir. Şimdi, EI, normalde elastik modül E'nin ve atalet momentinin ürünü olan eğilme rijitliğidir. Şu andan itibaren, Young's modülü E, z-koordinatı boyunca değiştiğinde, o zaman denklem 2.62'deki integralin dışında kaldırılamayacağından, EI artık D olarak adlandırılacaktır. Dolayısıyla, atalet momentinin tanımı kaybolur. Bu nedenle, genel bir kesit için, denklem 2.62 verildiği gibi kullanılmalıdır ve eğilme rijitliği (D) iyi tanımlanmış tek özellik olacaktır. Böylece gerinim için geçerli son ifade aşağıdaki gibi olacaktır;

$$\varepsilon_x = \frac{M_x . z}{D} \quad (2.63)$$

Bu sayede şekil değiştirme hala kesit üzerinde z ile doğrusal olarak değişir.

Şimdi temel denklemler oluşturulduğuna göre, bir sandviç kiriş içindeki enine kesit özelliklerini ve gerilmeleri hesaplamaya başlayabiliriz. İlk olarak, koordinat sistemini ve yükler için pozitif yönleri şekil 2.60'daki gibi tanımlayalım.



Şekil 2.60. Sandviç kiriş için işaretlerin belirlenmesi (Zenkert 1995)

Bu aşamadaki analizi karmaşıktırmamak için, sandviğin simetrik bir düzende olduğunu varsayalım, yani yüzler aynı kalınlığa t_f sahip ve aynı malzemeden

yapıldığından elastik modül E_f aynı olacaktır. Çekirdeğin kalınlığı t_c ve elastik modül E_c olarak alınır. Eğilme Rijitliği (D) daha sonra Şekil 2.60'daki gibi bir kesit için şu ifadeyi alır;

$$D = \int E \cdot z^2 \cdot dz = \frac{E_f t_f^3}{6} + \frac{E_f t_f d^2}{2} + \frac{E_c t_c^3}{12} = 2 \cdot D_f + D_0 + D_c \quad (2.64)$$

burada $d = t_f + t_c$, yüzlerin merkezleri arasındaki mesafedir. İlk terim, tek tek nötr eksenleri etrafında eğilen yüzlerin eğilme rijitliğine karşılık gelir, ikincisi, tüm sandviğin merkez eksen etrafında eğilme ile ilişkili yüzlerin rijitliğini temsil eder ve üçüncü terim çekirdeğin eğilme rijitliğidir.

Yüzler, çekirdek ile karşılaştırıldığında genellikle incedir, yani $t_f \ll t_c$ 'dir ve denklem 2.64'ün ilk terimi bu nedenle oldukça küçüktür ve eğer ikincisinin yüzde 1'inden azsa şu ifade kullanılır;

$$3 \cdot \left(\frac{d}{t_f} \right)^2 > 100 \text{ veya } \frac{d}{t_f} > 5.77 \quad (2.65)$$

Malzeme seçiminin bir sonucu olarak, çekirdek genellikle yüzünkinden çok daha düşük bir modüle sahiptir, yani $E_c \ll E_f$. Dolayısıyla, denklem 2.64 'te üçüncü terim;

$$\frac{6 \cdot E_f \cdot t_f \cdot d^2}{E_c \cdot t_c^3} > 100 \quad (2.66)$$

Böylece, ince yüzleri olan bir sandviç, $t_f \ll t_c$ ve zayıf bir çekirdek, $E_c \ll E_f$ için, eğilme rijitliği yaklaşık olarak şu şekilde yazılabilir;

$$D = \frac{E_f \cdot t_f \cdot d^2}{2} \quad (2.67)$$

Sandviç yapımında kullanılan sıradan mühendislik malzemeleri için, çekirdek / yüz kalınlığı oranı yaygın olarak 10 ila 50 rejiminde ve yüz / çekirdek modülü oranı 50 ile 1000 arasındadır. Not edilmesi gereken önemli bir gerçek şudur ki; eğilme rijitliği için ifadedeki baskın terim, tüm sandviçin nötr eksenini etrafında eğilen yüzlerin terimidir. Bu kısım, yüzlerin doğrudan gerilme-sıkıştırmasından kaynaklanan kısımdır. Şimdi, yüzleri çekirdeğe bağlayan yapıştırıcı elemanlar yoksa, bu terim, her biri birbirinden bağımsız olan iki yüzün ve bir çekirdeğin eşdeğer nötr eksenleri civarında eğilmesine karşılık gelen, denklem 2.64 'te sadece 1. ve 3. terimlerdeki ifadenin katkılarını bırakarak ortadan kalkacaktır. Bu, eğilme rijitliğini büyük bir bölümünün veya hemen hemen hepsinin kaybedileceği anlamına gelir. Bir sandviçin eğilme rijitliğinin esas olarak bileşenlerin etkileşiminden kaynaklanan kısımdan oluşması, genellikle *sandviç etkisi* olarak adlandırılır.

2.8.2. Sandviç Kirişlerde Gerilmeler

Denklem 2.63 'teki gerinim tanımını kullanarak, sandviçin eğilmeye bağlı gerilmeleri kolayca bulunabilir. Yüz ve çekirdek gerilmeleri;

$$\sigma_f = \frac{M_x \cdot z \cdot E_f}{D}, \quad \frac{t_c}{2} < |z| < \frac{t_c}{2} + t_f \text{ ise} \quad (2.68)$$

$$\sigma_c = \frac{M_x \cdot z \cdot E_c}{D} \approx 0, \quad |z| < \frac{t_c}{2} \text{ ise} \quad (2.69)$$

Bu nedenle, gerilmeler her bir malzeme bileşeni içinde doğrusal olarak değişir, ancak yüz / çekirdek ara yüzündeki gerilmede bir sıçrama vardır. Düzlem içi yüke bağlı doğrudan gerilim ve gerinim;

$$\varepsilon_{x0} = \frac{N_x}{E_1.t_1 + E_2.t_2 + E_c.t_c} = \frac{N_x}{A_x} \quad (2.70)$$

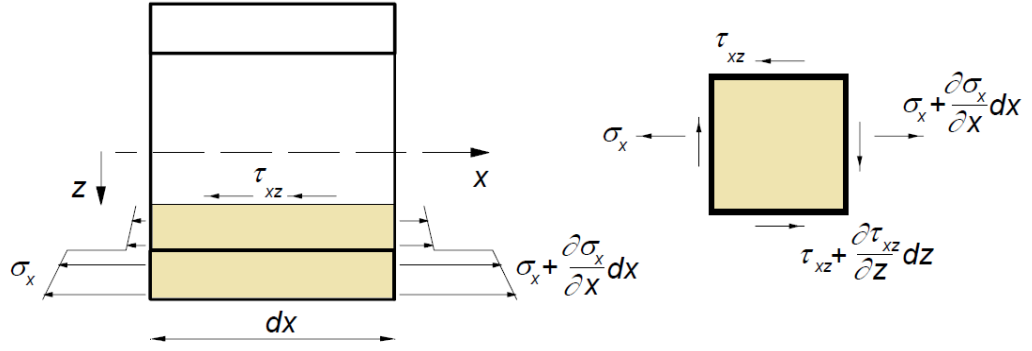
ve böylece de;

$$\sigma_f = \varepsilon_{x0} \cdot E_f \quad ve \quad \sigma_c = \varepsilon_{x0} \cdot E_c \quad (2.71)$$

Burada ε_{x0} nötr eksenindeki gerinimdir. Daha sonra bükülme ve düzlem içi yüklere bağlı gerilme ve gerinimler birleştirilebilir.

2.8.3. Kayma Gerilmesi

Yukarıda özetlendiği gibi, kesme gerilimi için daha genel bir tanım da bulunmaktadır. Şekil 2.61' de gösterildiği gibi bir kirişin bir elemanını (örneğin Şekil 2.60'daki kiriş) düşünün. Kesme kuvveti, doğrudan gerilme alanındaki değişimi dengelemelidir (aynı denklem, denge denkleminin entegrasyonu ile ortaya çıkar).



Şekil 2.61. Bir alt alan için denge tanımlayan kiriş dx kesiti (Zenkert 1995)

$$\frac{d\sigma_x}{dx} + \frac{d\tau_{xz}}{dz} = 0 \rightarrow \tau_{xz}(z) = \int_z^{(d+t_f)/2} \frac{d\sigma_x}{dx} dz \quad (2.72)$$

$(d + t_f)/2$ değerinde τ_{xz} 'nin 0'a eşit olduğu anlaşılmaktadır. Bu durumda, denklem 2.68 ve 2.69'dan $d \cdot M_x / dx = T_x$ değeri kullanılırsa şu denklem elde edilir;

$$\tau = \frac{T_x}{D} \cdot \int_z^{(d+t_f)/2} E \cdot z \cdot dz = \frac{T_x B(z)}{D} \quad (2.73)$$

Burada $B(z)$ alanın ilk momentidir. Formül homojen bir enine kesit için daha iyi bilinen $T_x J(z) / I$ formülüne indirgenir, burada J , en alışılmış tanımı ile alanın ilk momentidir.

Şimdi, bunun yerine, integral şu şekli alır;

$$B(z) = \int_z^{(d+t_f)/2} E \cdot z \cdot dz \quad (2.74)$$

Bu denklem alanın ilk momenti için yeni ve daha genel bir tanım olur. Böylece, $|z| \leq t_c/2$ olan çekirdek malzemeler için alanın ilk momenti;

$$B(z) = \frac{E_f t_f d}{2} + \frac{E_c}{2} \cdot \left(\frac{t_c}{2} - z \right) \cdot \left(\frac{t_c}{2} + z \right) \quad (2.75)$$

Çekirdekteki kayma gerilmesi de;

$$\tau_c(z) = \frac{T_x}{D} \left[\frac{E_f t_f d}{2} + \frac{E_c}{2} \left(\frac{t_c^2}{4} - z^2 \right) \right] \quad (2.76)$$

Benzer şekilde, $t_c/2 \leq |z| \leq \frac{t_c}{2} + t_f$ olan yüz plakalarında;

$$B(z) = \frac{E_f}{2} \left(\frac{t_c}{2} + t_f - z \right) \left(\frac{t_c}{2} + t_f + z \right) \Rightarrow \tau_f(z) = \frac{T_x}{D} \cdot \frac{E_f}{2} \cdot \left(\frac{t_c^2}{4} + t_c \cdot t_f + t_f^2 - z^2 \right) \quad (2.77)$$

Maksimum kesme gerilmesi nötr ekseninde, yani $z = 0$ olduğu noktada oluşur;

$$\tau_{c,max} (z = 0) = \frac{T_x}{D} \left(\frac{E_f \cdot t_f \cdot d}{2} + \frac{E_c \cdot t_c^2}{8} \right) \quad (2.78)$$

ve yüz / çekirdek ara yüzündeki kesme gerilimi şu olur;

$$\tau_{c,min} = \tau_{f,max} = \tau \cdot \left(\frac{t_c}{2} \right) = \frac{T_x}{D} \cdot \left(\frac{E_f \cdot t_f \cdot d}{2} \right) \quad (2.79)$$

ve denklem 2.79'dan anlaşılacağı üzere yüz plakalarının dış elyafındaki kayma gerilimi sıfırdır ki bu açıkça bir serbest yüzey için geçerli olmalıdır.

Eğer aşağıdaki şart sağlanırsa; denklem 2.78 ve 2.79'a göre çekirdekdeki maksimum ve minimum kesme gerilimi arasındaki oran %1'den bile az, oldukça küçük olacaktır,

$$\frac{4.E_f.t_f.d}{E_c.t_c^2} > 100 \quad (2.80)$$

Denklem 2.68 ile denklem 2.80 arasını özetlemek gerekirse,

- Çekirdek zayıfsa, $E_c \ll E_f$, gerilmeler şu şekilde yazılabilir;

$$\sigma_c(z) = 0$$

$$\sigma_f(z) = \frac{M_x.z.E_f}{(D_0+2.D_f)}$$

$$\tau_c(z) = \frac{T_x.E_f.t_f.d}{2.(D_0+2.D_f)}$$

$$\tau_c(z) = \frac{T_x}{(D_0+2.D_f)} \cdot \frac{E_f}{2} \cdot \left(\frac{t_c^4}{4} + t_f \cdot t_c + t_f^2 - z^2 \right) \quad (2.81)$$

- Çekirdek zayıfsa, $E_c \ll E_f$, ve yüz plakalar inceyse $t_f \ll t_c$, denklem mümkün olan en basit haline indirgenmektedir;

$$\sigma_c(z) = 0$$

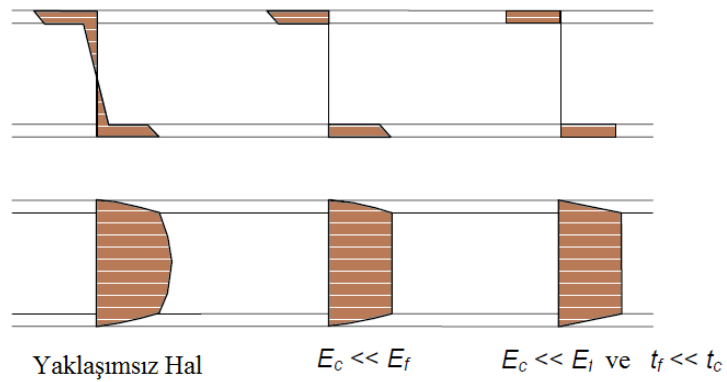
$$\sigma_f(z) = \pm \frac{M_x}{t_f \cdot d}$$

$$\tau_c(z) = \frac{T_x}{d}$$

$$\tau_f(z) = 0 \quad (2.82)$$

Bu, yapısal bir sandviçin çalışma prensibini, veya ana yük taşıma ve gerilme dağılımlarını basitleştirir: yüzler, eğilme momentlerini gerilme ve sıkıştırma gerilmeleri olarak taşır ve çekirdek, kesme gerilmeleri olarak enine kuvvetleri taşır.

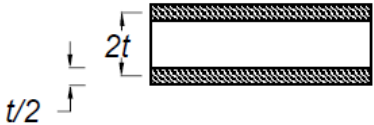
Gerilim dağılımları, farklı yaklaşım dereceleri için, yukarıdaki denklemlerin Şekil 2.61'de gösterildiği gibi z'nin fonksiyonları olarak çizilmesiyle grafiksel olarak da temsil edilebilir. Yük taşıma ile ilgili durumlar aşağıda şekil 2.62'de gösterilmiştir.



Şekil 2.62. Farklı yaklaşım seviyeleri için normal ve kayma gerilmeleri (Zenkert 1995)

2.8.4. Sandviç Etkisi

Şimdi yukarıdaki sonuçların akibetleri araştırılabilir. Belirli bir Young's modülü, E ve belirli bir mukavemete sahip homojen bir malzemeyi düşünün. Bu malzemenin kirişini eğilme momentine maruz bırakın. Kirişin ağırlığını, eğilme sertliğini ve mukavemetini hesaplayın ve uyumlu olacak şekilde ayarlayın. Kirişi şimdi iki yarıya kestiğimizi ve parçaları bir çekirdekle ayırdığımızı varsayalım (bunu önemli bir ağırlık eklemeyi yapabiliriz). Yukarıdaki analiz göz önüne alındığında, artık sandviç kirişlerin karşılık gelen rijitlik ve mukavemetlerinin hesaplanması mümkündür ve şekil 2.63'te verilen bağlı özellikler bulunacaktır.

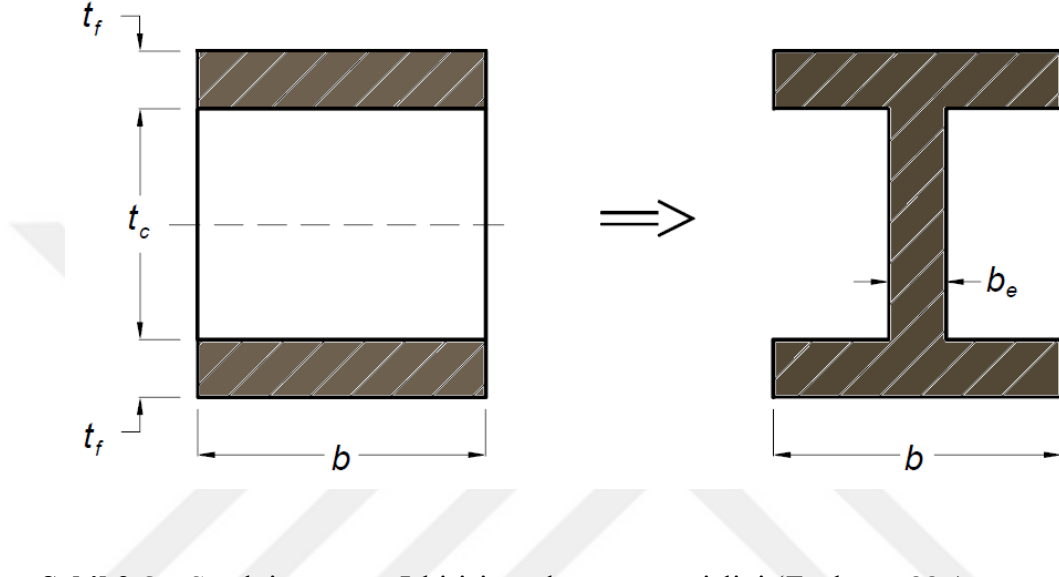
	Ağırlık	Eğilme Rijitliği	Eğilme Dayanımı
	1	1	1
	~ 1	12	6
	~ 1	48	12

Şekil 2.63. Homojen ve sandviç kesitlerin karşılaştırılması (Zenkert 1995)

Böylelikle, sandviç konsepti kullanılarak, eğilme rijitliği ve eğilme dayanımı, fazla ağırlık eklemeyi tek bir plaka yapısına kıyasla önemli ölçüde arttırılabilmektedir.

2.8.5. Eşdeğer Genişlik

Bir sandviçi analiz etmenin bir başka yolu, sandviç yapıyı bir I-kirişi olarak görerek ele almaktır ve şu şekilde yapılır. Aşağıda şekil 2.64’te gösterildiği gibi genişliği b olan bir sandviç yapıyı, yine genişliği b olan bir I-Kirişi gibi düşünün,



Şekil 2.64. Sandviç yapı ve I-kirişin eşdeğer ağ genişliği (Zenkert 1995)

İki kesitin aynı bükülme sertliğine sahip olması için I-kirişinde ağın kalınlığını hesaplayalım. Ya da sandviçin çekirdeğini yüzlerle aynı modüle sahip olana kadar sıkıştırabildiğini düşünelim.

$$\frac{E_c \cdot b \cdot t_c^3}{12} = \frac{E_f \cdot b_e \cdot t_c^3}{12} \Rightarrow b_e = \frac{E_c}{E_f} \cdot b \quad (2.83)$$

Bu şekilde kurgusal bir atalet momenti şu şekilde hesaplanabilir:

$$I = 2 \cdot \frac{t_f^3}{12} + 2 \cdot t_f \cdot \frac{d}{2} + \frac{E_c}{E_f} \cdot \frac{t_c^3}{12} \quad (2.84)$$

Bununla birlikte, bu I değerin sadece belirli bir E_f için geçerli olduğunu, böylece $E_f I = D$ eşitliğinin geçerli olduğunu unutmamak gerekir. Eylemsizlik momenti gibi bir özelliği kullanmadan önce çok dikkatli olunmalı, çünkü özellikle bir Elastisite Modülüyle birlikte verilmedikçe iyi tanımlanmamış kabul edilir.

2.9. Kaynak Araştırması

Özellikle son 30 yılda sandviç yapılar ve çekirdek geometrileri ile ilgili yapılan birçok çalışma bulunmaktadır. Bunların hepsini burada vermek elbette imkansızdır. Fakat çalışma konusuyla ilgili önemli gelişmelerin ve ilerlemelerin gerçekleştirildiği önemli araştırmalar burada kısaca verilmiştir.

İlk olarak Lakes (1987) yaptığı çalışmada, yeniden kıvrımlı yapıya sahip Poliüretan (PU) köpüklerde negatif poisson oranı etkisini keşfetmiş ve buna ilerleyen zamanlarda yeni yapılan çalışmalarla araştırmacılar tarafından anti-kauçuk, ökzetik ve genişleyen (dilatasyonel) gibi isimler verilmiştir. Daha sonra Lakes (1993), ökzetik malzemeler, üretim yöntemleri, bu olağandışı fiziksel özelliklerin sonuçları ve araştırmalarının keşfinden sonraki gelişmeleri ele alan bir derleme sunmuştur.

1996 yılında Choi ve Lakes yaptıkları çalışmada yeniden kıvrımlı köpük malzemelerin kırılma tokluğunu deneysel ve analitik olarak incelemişlerdir. Yaptıkları incelemeler sonucunda yeniden kıvrımlı ökzetik köpüklerin geleneksel köpüklere kıyasla daha düşük Young modülüne sahip oldukları halde çok daha büyük kırılma tokluğuna sahip olduklarını göstermekle kalmamış ayrıca bu köpüklerin proseslerindeki iyileştirmelerle kırılma tokluğu değerlerinin daha da artacağını analitik olarak modellemişlerdir.

Miller ve ark. (2010) yaptıkları çalışmada Tetrachiral ve Hekzachiral peteklerin düzlemsel bası davranışını, hem explicit hem de implicit formülasyonlarla analitik ve

Sonlu Elemanlar simülasyonları kullanılarak analiz etmişlerdir. Chiral peteklerin daha büyük yoğunlukta özgül bükülme yüklerine sahip olduğu ve bu nedenle maksimum bükülme mukavemetinin gerekli olduğu uygulamalarda kullanım için en uygun olduğu, ancak bu davranışın göreceli iç geometriye duyarlı olduğu gösterilmiştir.

Strek ve ark. (2015) yaptıkları bir çalışmada sandviç panelin iki fazlı ökzetik çekirdek ile etkili özelliklerini ve dinamik tepkisini değerlendirmek için bir sonlu eleman modeli geliştirmişler ve çekirdek yapının ve malzeme özelliklerinin sandviç panelin etkin özellikleri ve dinamik tepkisi üzerindeki etkisi araştırmışlardır. Çalışmalarının sonuçları poisson oranı pozitif iki katı malzemeden yapılmış ökzetik sandviç paneller oluşturmanın mümkün olduğunu açıkça göstermektedir. Dolgu malzemesi neredeyse sıkıştırılmazsa, ancak düzlem dışı yönde hareket edebiliyorsa bile bu mümkün olduğunu belirtmişlerdir.

Liu ve ark. (2016) gerçekleştirdikleri çalışmalarında yeniden kıvrımlı ökzetik petek yapının darbe yükü altındaki davranışını, düzlem içi dinamik yüklenmesinin Sonlu Elemanlar yöntemleriyle simüle edilmesiyle incelemişler ve yeniden kıvrımlı petek ve altıgen peteklerin enerji emme performanslarını karşılaştırmışlardır. Aynı büyüklükte sıkışma gerginliğine maruz kaldığında, yeniden kıvrımlı petek yapının plastik deformasyon yoluyla daha fazla enerji sönmüleyebilceğini ortaya koymuşlardır. Ancak, maksimum gerilim malzeme için birincil önemli noktası ise, yeniden kıvrımlı yapı aynı miktarda darbe enerjisini dağıtmak için daha yüksek gerilim üretme eğiliminde olduğunu da notlarına eklemişlerdir.

Qi ve ark. (2017) yaptıkları çalışmada, büyük patlayıcıların yakın ve temas patlamalarından kaynaklanan şok yüklerini azaltmak için ökzetik petek çekirdeğine sahip sandviç paneller kullanan yeni bir koruyucu sistemin performansını nümerik ve deneysel olarak incelemeyi amaçlamışlardır. Yeniden kıvrımlı altıgen hücrelere sahip petek çekirdeği, bu tür sandviç panellerin olağanüstü kuvvet azaltma ve patlama direnci performanslarına önemli ölçüde katkıda bulunan belirgin ökzetik özellikler

gösterdiklerini belirtmişler ve çalışmaya konu olan ökzetik çekirdek yapıya sahip sandviç panellerin, aynı büyüklükte, alansal yoğunlukta ve malzemede geleneksel bal peteği panellerinden daha iyi performans gösterdiğini net bir şekilde ortaya koymuşlardır.

Fu ve ark. (2017) yaptıkları çalışmada altıgen balpeteği tasarımının konfigürasyonu ile elde edilmiş yeniden kıvrımlı eşkenar dörtgen petek modelini geliştirmişler ve bu modelin Young modülü, Poisson oranı ve kritik burkulma mukavemeti dahil olmak üzere tek eksenli bası yükü altında düzlem içi mekanik özelliklerini hesaplamak için hem teorik analiz hem de sayısal simülasyonlar kullanmışlardır. Gerçekleştirilen çalışma sonucunda, yeni konfigürasyona sahip balpeteği yapının ökzetik performansını koruyabildiğini gösterirken, hem düzlem içi Young modülü hem de kritik burkulma gücünün yeniden kıvrımlı altıgen balpeteği yapıya kıyasla önemli ölçüde iyileştirildiğini ortaya koymuşlardır.

Imbalzano ve arkadaşlarının (2017) yaptıkları çalışmanın ana konusunu lokalize darbe direnci uygulamaları için metalik yüzeyler arasında sınırlandırılmış ökzetik kafes çekirdeğe sahip sandviç paneller oluşturmaktadır. Bu çalışmada yapıların lokalize etki altındaki performansları, hıza bağlı etkiler göz önünde bulundurularak sayısal olarak incelenmiştir. Çalışma sonucunda ökzetik çekirdeğe sahip kompozit panellerin plastik deformasyon yoluyla benzer miktarda enerjiyi sönümleyebildiği bulunurken, maksimum arka yüz yer değiştirmelerinin, lokal yoğunlaştırma ve ökzetik çekirdeğin plastik deformasyonu nedeniyle %56'ya kadar azaldığını ortaya koymuşlardır.

Li ve Wang (2017) beraber gerçekleştirdikleri bir çalışmalarında, 3 Boyutlu yazdırma tekniği ile ürettikleri ökzetik ve geleneksel çekirdek yapılara sahip karbon fiber katkılı kompozit yüz levhalarına sahip sandviç yapıları nümerik ve deneysel olarak eğilme yükleri altında incelemişlerdir. Yeniden kıvrımlı ökzetik petek çekirdekli sandviç kompozitler, enerji emme yeteneklerini önemli ölçüde arttıran ardışık bir geçmeli-kararsızlık sergilediğini belirtmişlerdir. Çalışmanın deneysel ve sayısal sonuçları,

geliştirilebilir mimari çekirdek yapıların eğilme özelliklerini ve hasar mekanizmalarını kontrol edebilmek için kullanılabileceğini göstermektedir. Bu sonuçlar, sandviç yapıların doğrusal olmayan mekanik tepkisinin araştırılmasına, çok çeşitli endüstrilere ve uygulamalara fayda sağlayabilecek yeni bilgiler sunmaktadır.

Yang ve ark. (2018) ortaya koydukları çalışmalarında vücut koruyucu pedlerin zırh amaçlı potansiyel uygulamaları için farklı yapıların mekanik özelliklerini teorik, hesaplamalı ve deneysel olarak incelemişlerdir. Farklı malzemeler kullanarak ürettikleri bu yapılar arasında altıgen balpeteği yanısıra yeniden kıvrımlı ve çift ok kafa ökzetik yapıları da bulunmaktadır. Çalışmanın sonuçları, ökzetik yapıların şok kuvvetlerini azaltmada etkili olabileceğini ve her yapı ve malzeme kombinasyonunun sertlik, Poisson oranı ve şok yükü sönümleme verimliliği gibi benzersiz yapısal özellikler gösterdiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca özellikle ökzetik yapıların, ökzetik olmayan yapılara göre daha iyi şok yükü sönümleme performansına sahip olduklarını da açıkça belirtmişlerdir.

Li ve ark. (2018) yaptıkları bir diğer çalışmada yine 3Boyutlu yazıcı ile üretilmiş ökzetik giriş yapıların kullanıldığı yüksek performanslı sandviç yapıların enerji sönümleme kapasitelerini ve sertliklerini deneysel olarak ve sonlu elemanlar analizi yöntemiyle incelemişlerdir. Ökzetik mekanizmasının yapının sertlik ve enerji sönümleme yeteneğinde önemli bir artış sağladığını belirten yazarlar, ökzetik yapının konfigürasyonu ile bu sertlik ve enerji sönümleme kapasitesinin arttırılabileceğini de ortaya koymaktadırlar.

Sarvestani ve ark. (2018a) yaptıkları çalışmada quasi-statik eğilme ve düşük hız darbe yükleri altında 3Boyutlu baskılı meta-sandviçlerin yapısal dayanıklılığını değerlendirmek için sonlu elemanlar simülasyonu ve deneysel testler uygulamıştır. Hazırladıkları bu çalışmada kübik, sekizli ve isomax hücresel çekirdeklerden yapılmış 3D baskılı polimerik meta-sandviç yapıların hasar mekanizmalarını, enerji sönümleme yeteneklerini ve çoklu-vuruş kabiliyetini özellikle incelemişlerdir. Çalışma sonucunda

çekirdek topolojinin ve geometrik parametrelerin, hasar mekanizması ve meta-sandviç yapıların enerji sönümleme kabiliyetleri üzerinde önemli etkileri olduğu ortaya konmuştur.

Sarvestani ve ark. (2018b) yaptıkları diğer bir önemli çalışmada altıgen geometrisinden konfigüre edilerek türetilmiş 3 ayrı çekirdek yapıya sahip, 3Boyutlu yazıcı ile üretilmiş sandviç yapıların enerji sönümlemeleri ve yapısal performanslarını deneysel ve analitik olarak düşük hızlı darbe yükleri altında incelemişlerdir. Gerçekleştirdikleri bu çalışmanın deneysel ve sayısal sonuçları, ökzetik çekirdekli sandviç panelin, yüksek enerji sönümleme kapasitesi ve 3Boyutlu baskılı panelden aktarılan minimum tepki kuvveti nedeniyle enerji sönümleme performansı gerektiren uygulamalar için potansiyel olarak uygun bir aday olduğunu göstermektedir.

Xiao ve ark. (2019) bir çalışmalarında, öncelikli olarak dereceli metalik ökzetik yeniden kıvrımlı peteklerin quasi-statik bası davranışı incelemişlerdir. Seçici lazer eritme yöntemi kullanılarak eşit kütleye sahip tek yönlü derecelendirilmiş ökzetik petek ve çift yönlü derecelendirilmiş ökzetik petek yapıların, bası yükü altındaki davranışlarını deneysel olarak incelenmiş ve sonucunda, maksimum hücre çeperi kalınlığına sahip derecelendirilmiş tabakanın yoğunlaştırılmadan önce, tek yönlü derecelendirilmiş ökzetik petek yapının enerji dağılımının çift yönlü derecelendirilmiş ökzetik petek yapıdan daha düşük olduğunu göstermişlerdir.

Alomarah ve ark. (2020) gerçekleştirdikleri son çalışmalarında, 3Boyutlu yazıcı ile üretilmiş farklı ökzetik çekirdek geometrilerinin quasi-statik bası yükü altındaki mekanik özelliklerini ve enerji sönümleme yeteneklerini deneysel ve sonlu elemanlar analizi yöntemiyle kıyaslayarak incelemişlerdir. Yapılan bu çalışma sonucunda farklı poisson oranlarına sahip ökzetik çekirdek geometrilerinin çok üstün enerji sönümleme yetenekleri olduğunu ortaya koymuş ve bu yeteneklerin yapıların hücre boyutlarındaki konfigürasyonlar ile çok daha ileri düzeylere çıkarılabileceğini söylemişlerdir.

3. MATERİYAL ve YÖNTEM

3.1. Eklemeli Üretim ve 3 Boyutlu Yazıcı Teknolojisi

AM (Additive Manufacturing) veya 3D baskı olarak da adlandırılan Eklemeli Üretim, yaklaşık 30 yıl önce üretimin geleceğini değiştirmeye hazır bir teknoloji olarak ortaya çıkmıştır. Başlangıçta prototipleme için kullanılan AM, artık son kullanım ürünleri üretmek de dahil olmak üzere geniş kapsamlı uygulamalara sahiptir. Geleneksel üretim yöntemlerinden farklı olarak AM, sadece gerekli olduğu yerde malzeme biriktirerek veya katılaştırarak bir kalıp olmadan karmaşık geometriler oluşturmaya dayalıdır. AM'de, tasarlanan 3 Boyutlu geometri, parçayı katman katman üretebilmek için bir makinenin izlediği bir dizi yön koduna dönüştürülür. Bu yetenek, AM'nin geleneksel üretim teknolojilerine kıyasla üstün derecede ve kapsamda ekonomik olmasını sağlar (Cotteler 2014). Tek bir AM makinesi, düşük hacimlerde ekonomik olarak bunu yaparken neredeyse tüm geometrileri üretebilir.

AM'nin geleneksel çıkarmalı üretim işlemlerine (talaşlı imalat) göre avantajları arasında önemli ölçüde daha az malzeme atığı, daha fazla geometrik esneklik ve daha fazla üretim kolaylığı bulunmaktadır. Talaşlı imalatla %80-90 gibi yüksek hurda oranları olabilmektedir, bu da AM'yi titanyum gibi pahalı malzemeler gerektiren havacılık ve savunma uygulamaları için çok cazip kılmaktadır (Cotteler, 2014). Ek olarak, bileşen tasarımları, yalnızca bir AM işlemi kullanılarak elde edilebilen gelişmiş katı olmayan dolgu yapılarından yararlanmak üzere optimize edilebilir. Katı olmayan dolgular, ağırlığın inanılmaz derecede pahalı olduğu havacılık gibi bazı endüstriler için çok değerli olabilecek çeşitli bileşenlerin hafif olmasına izin verir. Örnek vermek gerekirse uluslararası rotalarda uçan bir uçağın ağırlığını 12 kg azaltarak, yılda yaklaşık 440 000 \$ maliyet tasarrufu elde edilebilmektedir (Cotteler 2014).

Enjeksiyon kalıplama ve döküm işlemleri, uzun teslim sürelerine sahip esnek olmayan takımlara çok büyük sermaye yatırımları gerektirir. Takım maliyeti genellikle kalıplanmış bir parçadaki birim maliyetin en büyük yüzdesini oluşturur. Sonuç olarak, çoğu uygulamayı finansal olarak mümkün kılmak için genellikle bin parçayı aşan minimum sipariş miktarları gereklidir. Fikir üretiminden son parça teslimatına kadar tüm tasarım süreci, öncelikle kalıp tasarımı ve üretimi nedeniyle ayları aşmaktadır. Sonuç olarak AM, takım maliyetinin binlerce veya on binlerce parçaya dağıtılamadığı düşük hacimli uygulamalar için güçlü bir yarışmacıdır. Buna ek olarak, AM kalıp gerektirmediği için, parçalar sipariş üzerine hemen üretilebilir. Bu nedenle, ürün üretmek için AM'nin kullanılması, enjeksiyonlu kalıplamadaki döngü süreleri AM'den çok daha kısa olmasına rağmen, enjeksiyonlu kalıplama kullanan bir işlemde daha kısa teslim süreleri ile sonuçlanabilir.

3 Boyutlu Baskının Genel Prensipleri

3B yazdırma işlemi, istenen nesnenin dijital modelinin oluşturulmasıyla başlar; bu, kullanıcıya istenen nesne için gereksinimleri karşılayacak kesin kontrol sağlayan bir çeşit bilgisayar destekli tasarım (CAD) yazılımı ile yapılır. Tasarlanan parça bir 3 Boyutlu yazıcıya göndermek için CAD dosyası, endüstride standart olarak kullanılan bir biçime (yani bir STL formatına) dönüştürülür. STL, Charles Hull tarafından oluşturulan Stereolitografi teriminden alınan bir kısaltmadır (Prince 2014). Bir STL dosya türü üçgen şekillerin geometrisine dayanır (Kwok ve ark. 2017). Tüm 3D baskı makineleri malzeme katmanlarını bir seferde bir katman olacak şekilde bastığından, STL dosyalarının da yazıcıya gönderilmeden önce bu katmanlara ayrılması gerekir; bu işlem dilimleme olarak bilinir ve karmaşık dosyalarda uzun zamanlar alabilir (Aguilera 2016, Kwok ve ark. 2017). Dilimlenmiş dosya (yani G-kodu dosyası) işlendiğinde, yazıcının parçanın en iyi nasıl yapılandırılacağı konusunda talimat içeren bir dosya oluşturulur. Bir G-code dosyası, otomatik takım tezgahlarını kontrol etmek için kullanılan sayısal bir kontrol programlama dili olan G-programlama dili anlamına gelir (Aguilera 2016, Steenhuis ve Pretorius 2016). G kodu tipik olarak özel olarak üretilen ve eklemeli üretim işleminde kullanılan cihaza yazılır (Aguilera 2016).

Gerçek yazdırma işlemi türleri, malzemelere ve kontrol düzeyine bağlı olarak çeşitlilik gösterir, ancak tüm AM ve 3D yazdırma işlemleri katman katman oluşturma işlemini kullanır. Tabaka kalınlıkları da işleme ve malzemeye bağlıdır, toleransları olmakla birlikte 16µ'dan 100µ'a kadar değişim göstermektedir (Mu 2016). Örnek olarak, sıvı reçineler malzeme özellikleri nedeniyle daha ince tabaka kalınlığına sahip olabilirken, mevcut metal tozları 40 ila 50 µ malzeme katman boyutunda bulunabilmesi mümkündür (Mu 2016). Basılan nesnelerin yapıları, parça gövdesinden uzağa uzanan uzantılara veya alanlara sahip özellikler içerebilir. Parça bozulmasını, sarkmasını veya çökmesini önlemek için, modelin kritik yapı alanlarında desteklere ihtiyaç vardır. Yapı sistemi, AM proses tipine bağlı olarak değişiklikleri destekler veya daha spesifik hale gelir. Lischke (2016), parçanın kendi kendini destekleyebilmesi ve destek yapıları gerektirmemesi için bir parçayı bir 3D yazıcıya göndermeden önce tasarım yöntemlerinin değişmesini önermiştir. Genellikle G kodu, yazdırma aygıtındaki parçanın konumuna ve yönüne bağlı olarak desteklerin ne zaman ve nerede gerekli olduğunu belirlemek için algoritmalar kullanır (Aguilera 2016).

3.2. Eklemeli Üretim (AM) Türleri

Her ne kadar eklemeli üretim, yapıyı oluşturmak için malzemenin katman katman üretilmesi prensibine dayansa da, bunun gerçekleştirilmesi için birçok yol vardır. Liu 2017, 3D baskı işlemlerinin, sıvı bazlı AM, katı bazlı AM veya toz bazlı AM gibi kullanılan malzemelere göre sınıflandırılabilirliğini belirtmiştir. Her malzeme setinin bir şekilde uygulamak için farklı bir bağlama mekanizması ve teknolojisine ihtiyacı vardır (Liu 2017). Amerikan Test ve Malzeme Derneği (ASTM)'nin malzemeler için teknik incelemesinde, Picariello (Picariello 2017) en yaygın eklemeli üretim süreçlerini, Hazne İçi Fotopolimerizasyonu (Vat Photopolymerisation), Malzeme Püskürtmesi (Material Jetting), Yapıştırıcı Püskürtmesi (Binder Jetting), Malzeme Ekstrüzyonu (Material Extrusion), Yönlendirilmiş Enerji Çökmesi (Direct Energy Deposition), Levha Laminasyonu (Sheet Lamination) ve Toz Katman Birleştirmesi (Powder Bed Fusion) olarak sınıflara ayırmıştır. Vat fotopolimerizasyonunda hammadde olarak sıvı malzemeler kullanılır. Sıvı hammadde bir tekne haznesi içinde istenilen geometri

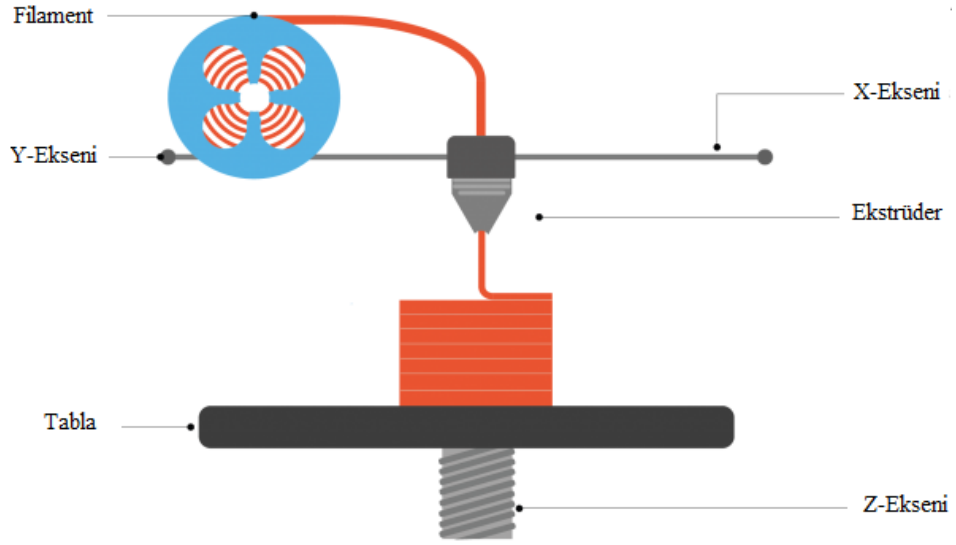
şeklinde üretilene kadar katman katman bir çeşit Ultraviyole (UV) ışık kaynağı kullanarak birleştirilir. Malzeme Püskürtmesinde, malzeme doğrudan inşa edilen tabakaya damlacık şeklinde püskürtülür veya çökeltilir. Bağlayıcı Püskürtmede, baskıda kullanılan malzemeyi birleştirmek için bir sıvı bağlama maddesi kullanır ve damlacık püskürten bir mürekkep püskürtmeli kafa temeline dayanır, toz alt tabakayı birbirine bağlar ve kullanılmayan tozu geride bırakır. Malzeme püskürtmenin avantajları hızı, yüksek çözünürlükte yazdırma potansiyeli, mevcut birçok malzemenin kullanılabilir olması ve düşük maliyettir. Malzeme ekstrüzyonu, malzemeleri eriten ve yapı katmanına ekstrüde eden bir işlemdir. Malzeme ekstrüzyonu en yaygın olarak bilinen eklemeli üretim işlemidir. Yönlendirilmiş Enerji Çökeltmesinde, malzemeleri katmanlar halinde birleştirmek için lazer veya elektron ışını gibi bir enerji kaynağı kullanır. Levha laminasyonu, daha sonra 3D yazıcı tarafından şekillendirilen ince levha veya polimerler gibi malzeme kümelenmesini içerir. Toz Katman Birleştirmesinde, nesneyi katman katman biçiminde oluşturmak için lazer gibi bir tür termal enerji ile birleştirilmiş ince toz malzeme katmanları kullanılır (Picariello 2017).

Bu üretim yöntemlerinin temel prensipleri arasında en yaygın olarak kullanılan ve hatta eklemeli üretim kelimesinin günümüzde en büyük karşılığı olanı Malzeme Ekstrüzyonu prensibinde çalışan “Eriyik Biriktirm Modellemesi (Fused Deposition Modeling - FDM)” yöntemidir.

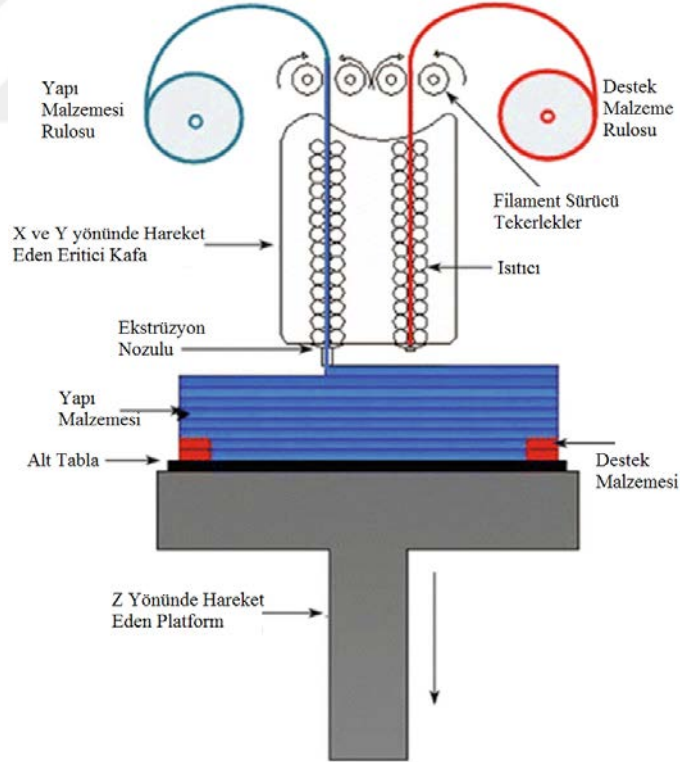
3.3. Eriyik Biriktirme Modellemesi (Fused Deposition Modeling FDM)

FDM yönteminde 3 Boyutlu yazıcılar, erimiş malzeme -genellikle bir çeşit termoplastik- akışını bir nozul veya delikten bir araya kaynayan üst üste katmanlarda ekstrüde ederek parça üretimini sağlar (Malladi ve Sarma 2017). Çoğu FDM yazıcısı, Polilaktik Asit (PLA) veya Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS) plastik malzemelerini kullanır ki bu malzemeler de çok düşük maliyetli malzemelerdir. Bu tür yazıcılar endüstriyel boyuttan evlerde hobi amaçlı kullanılacak kalem boyutlarına kadar çeşitlilik göstermektedir. Profesyonel seviyede bir makinenin avantajı mühendislik polimerlerinin kullanımı ve

büyük nesneleri hızlı bir şekilde yapma yeteneğidir. Son yıllarda yoğun derecede ilgi görmesi dolayısıyla farklı alanlarda kullanıma uygun parçalar üretebilmek için yeni malzemeler de bu yazıcılarda kullanılmaya başlamıştır. Bunlara en bilinen örnekler olarak; Poli Eter Eter Keton (PEEK), Yüksek Etkili Polistiren (HIPS), Akrilonitril Stiren Asetat (ASA), Poli Etilen Tereftalat (PET), Poli Karbonat (PC) ve Poli Amid (PA) verilebilir. Ayrıca son yıllarda bu malzemelerin kısa elyaflarla birleştirilerek kompozit filamentler üretilmesi de sağlanmıştır. Bu filamentler 3 Boyutlu yazıcılarla doğrudan kompozit malzemeler üretilmesinin ilk aşamasını oluşturmaktadır. Daha sonra yapılan çalışmalar ve geliştirilen sistemler sayesinde sürekli elyaf takviyeli termoplastik polimer filamentler ile üretim yapılabilen yazıcılar da geliştirilmiş ve geliştirilmeye devam etmektedir. Bu üretim yöntemi sayesinde özellikle normal yöntemlerle üretimi çok zor ve zahmetli olan yapılar tek seferde ek işlem gerekmeden üretilbilir olmuştur. Özellikle bu tezin konusunu da oluşturan ökzetik yapılar, eskiden beri bilinmesine rağmen bu teknolojinin gelişmesiyle kendine daha belirgin bir yer edinebilmiş ve yoğun çalışmaların konusu olabilmıştır. Sahip olduğu avantajların yanı sıra 3 Boyutlu yazıcıların en büyük dezavantajları, üretilen parçanın katman katman eritilerek üretilmesi sebebiyle parça üstünde yüzey pürüzlülüğünün nispeten daha yüksek olmasıdır. Buna ek olarak bazı geometrilerin üretilmesi için destek malzemeleri kullanımı da gerekmektedir. Bu destek malzemeleri genelde yapıyı oluşturan malzeme ile aynı malzemedir. Sadece üretim esnasında yapıya oranla çok daha zayıf bir şekilde yazdırılır ve üretim sonunda parçadan ayrılması sağlanır. Fakat bu da yapı üzerinde pürüzlülüğe olumsuz yönde etki etmektedir. Son yıllarda gelişen teknoloji sayesinde bu destek malzemeleri yapıyı oluşturan malzemedan farklı bir malzeme de olabilmektedir ki bunu sağlayabilmek için 3 Boyutlu yazıcının en az iki nozulu olması gerekmektedir. Bu yeni destek malzemeleri arasında suya atıldığında eriyebilen malzemeler de bulunmaktadır ki bu da ekstra pürüzlülüğü ekarte etmede büyük bir avantajdır. En temel prensibiyle bir FDM yazıcı aşağıda şekil 3.1’de ve destek malzemesi farklı ola 3Boyutlu yazıcı da şekil 3.2’de şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.1. FDM teknolojisiyle çalışan bir 3 boyutlu yazıcının şematik gösterimi (Anonim 2020o)



Şekil 3.2. FDM teknolojisiyle çalışan destek malzemesi yapı malzemesinden farklı olan çift nozullu bir 3 boyutlu yazıcının şematik gösterimi (M.Sharafeldin ve ark. 2018)

3.4. PLA Malzeme Özellikleri ve Test Numuneleri Üretim Parametreleri ve Üretimi

Günümüz 3Boyutlu yazıcılarında en yaygın kullanılan iki malzeme PLA ve ABS malzemelerdir. Her iki malzemenin de sahip olduğu farklı avantajlar bulunmaktadır. Bunlara kısaca değinmek gerekirse;

- ABS malzemeler, mukavemet, süneklik, işlenebilirlik ve termal stabilite gerektiren uygulamalarda daha çok tercih edilmektedir. Ayrıca ABS malzeme eğilmeye daha dayanıklıdır.
- PLA malzeme ise estetiğin önemli olduğu baskılar için daha idealdir. Bunun yanı sıra ABS'e göre en büyük avantajı düşük basınç sıcaklığına sahip olmasıdır ki bu da ince ayrıntılı parçaları yazdırma kolaylığı sağlarken parça yazdırma süresini de oldukça düşürmektedir.

Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında amaç 3 boyutlu yazıcıdan üretilen parçaların en iyi dayanımlarını incelemek değildir. Ele alınan geleneksel geometrili sandviç yapılar ile ökzetik geometrili sandviç yapıların kıyaslanmasıdır. Bu sebeple parçaları üretirken kullanılacak malzemenin çok büyük bir önemi kalmamaktadır. Ayrıca üretilecek parçaların detaylı bir geometriye sahip olması ve üretim süreçlerinin çok uzun zamanlar gerektirmesi nedeniyle üretimde PLA malzemesi seçilmiş ve kullanılmıştır.

Piyasada birçok firmanın ticari olarak çıkardığı PLA filamentler bulunmaktadır. Bunların mekanik özellikleri arasında belirgin farklar yoktur. Bu nedenle yine çalışmanın ilerlemesinde bir sorun yaşamamak adına yaygın bulunabilen bir markayı seçmek akıllıca olacaktır. Gerçekleştirilen bu çalışmada üretim amacıyla ESUN PLA+ 1.75mm ürünü kullanılmıştır. Bu malzemenin sahip olduğu mekanik özelliklerin verileri aşağıda çizelge 3.1'de verilmektedir.

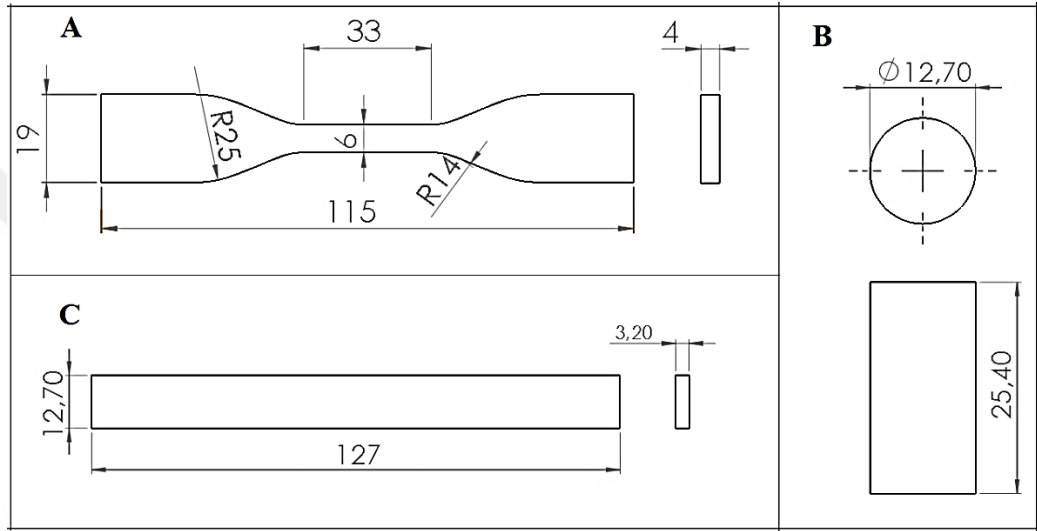
Çizelge 3.1. Esun PLA+ 1.75mm malzeme özellikleri

<i>Yoğunluk (g/cm³)</i>	1.24
<i>Erime Sıcaklığı (°C)</i>	190-220
<i>Baskı Sıcaklığı (°C)</i>	205-225
<i>Baskı Tabla Sıcaklığı (°C)</i>	60-80
<i>Eriyik Akış İndeksi (g/10dk)</i>	4 (190°C/2.16kg)
<i>Çekme Mukavemeti (MPa)</i>	65
<i>Kopma Uzunluğu (%)</i>	12
<i>Eğilme Dayanımı (MPa)</i>	75
<i>Eğilme Modülü (GPa)</i>	2.1-3
<i>İzod Darbe Dayanımı (kJ/m²)</i>	8.5
<i>Isıl Bozunma Sıcaklığı (0.45MPa) (°C)</i>	52

3Boyutlu yazıcılarda kullanılan malzeme kadar önemli bir başka kriter daha vardır. Bu da genellikle “yapı mimarisi” olarak adlandırılır. Yapı mimarisi, 3Boyutlu yazıcıdan yazılacak parçanın basımı esnasında yazıcı programının takip edeceği yazım kriterlerini belirtir. Bunlara örnek vermek gerekirse; parça doluluk oranı, boşluk tarama geometrisi, yazım hızı, katman kalınlığı, yazıcı nozul çap genişliği vb. sıralanabilir. Bu özellikler bütün yazıcılarda kontrol edilebilir özellikler değildir. Bazı yazıcı ve kaynak programlarında bu özellikler kullanıcı tarafından belirlenebilirken bazı ticari modeller bu özelliklere kullanıcı etkisini sınırlandırmışlardır.

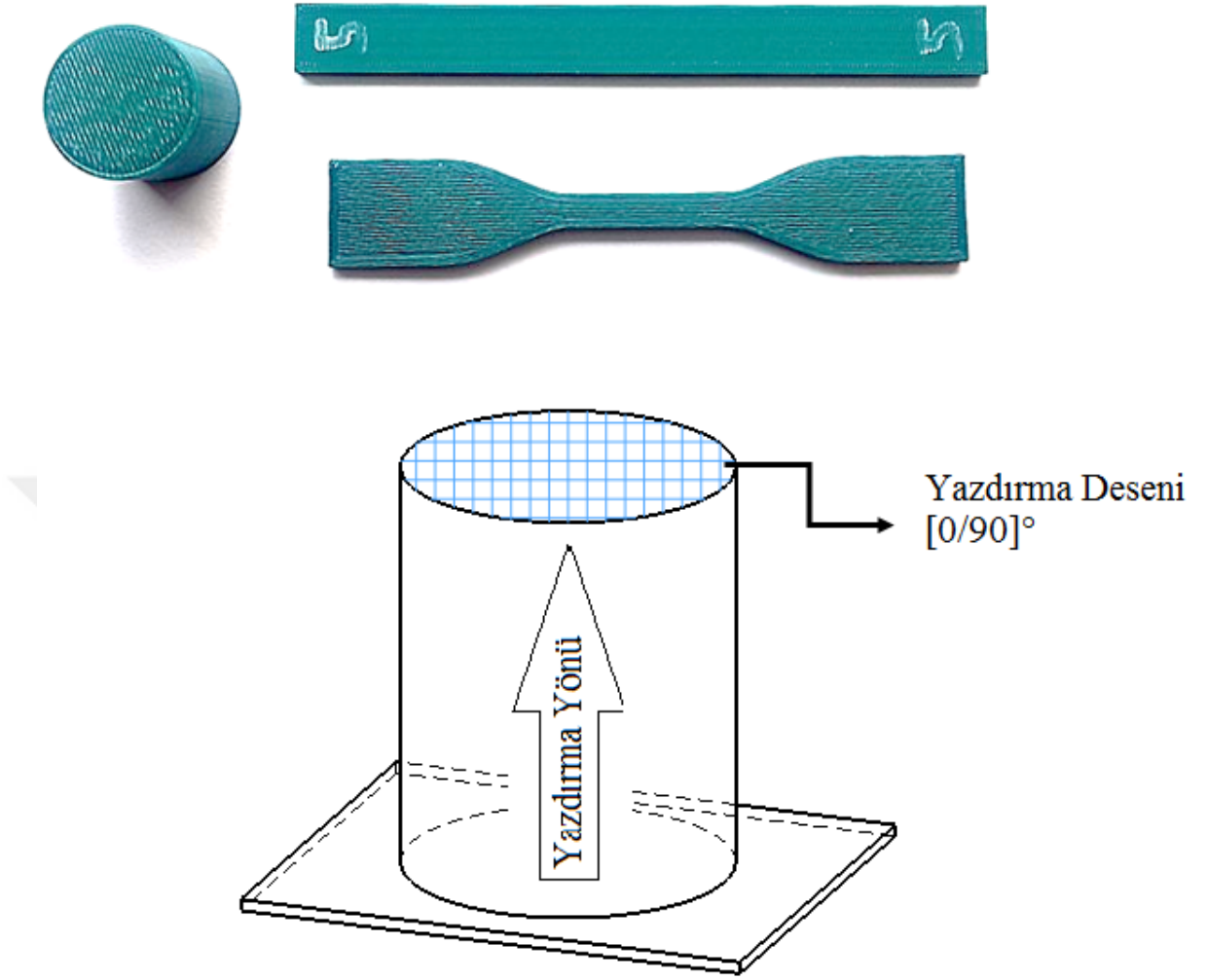
Her ne kadar sandviç yapıların üretiminde PLA malzemesi kullanılsa da ne sonlu elemanlar analizinde ne de nümerik hesaplarda tam olarak bu malzemenin mekanik özellikleri kullanılabilir. Yukarıda bahsedildiği üzere kullanılan malzeme kadar yazıcıda kullanılan yapı mimarisi de yapıların mekanik özelliklerinin belirlenmesinde ana unsurdur. Bu nedenle sandviç yapıların basımına geçilmeden önce malzeme ve yapı mimarisinin birleşiminden oluşan mekanik özelliklerin belirlenmesi gerekecektir. Bunu yapmak için de sandviç yapıların yazımında kullanılacak yapı mimarisine sahip standart deney numuneleri üreterek bu numunelerin test edilmesi gerekmektedir.

3Boyutlu yazıcıdan üretilcek parçalara ait yapı mimarisi mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi için ASTM D638-14 standardına uygun olarak çekme numuneleri; ASTM D695-15 Standardına göre bası numuneleri ve ASTM D790-17 Standardına göre 3-nokta eğilme numuneleri ölçüleri belirlenerek CAD çizimleri Solidworks programında hazırlanmıştır. Aşağıda şekil 3.3’ te sırasıyla çekme, basma ve eğilme numunelerinin ebatları belirtilen standartlara uygun olarak verilmiştir.



Şekil 3.3. Standartlara göre hazırlanan A)Çekme B) Basma C) 3Nokta eğilme numuneleri ölçüleri

Gerçekleştirilecek çekme, basma ve eğilme deneyleri için ölçüleri verilen numunelerden, Bursa Uludağ Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği Bölümü Eklemeli Üretim ve Sensör Laboratuvarı bünyesinde, kurulumunu kendimizin gerçekleştirdiği bir 3Boyutlu yazıcı ile 10’ar adet üretim gerçekleştirilmiştir. Üretilen numunelerin örnekleri ve üretim detayları aşağıda şekil 3.4.’te verilmiştir.



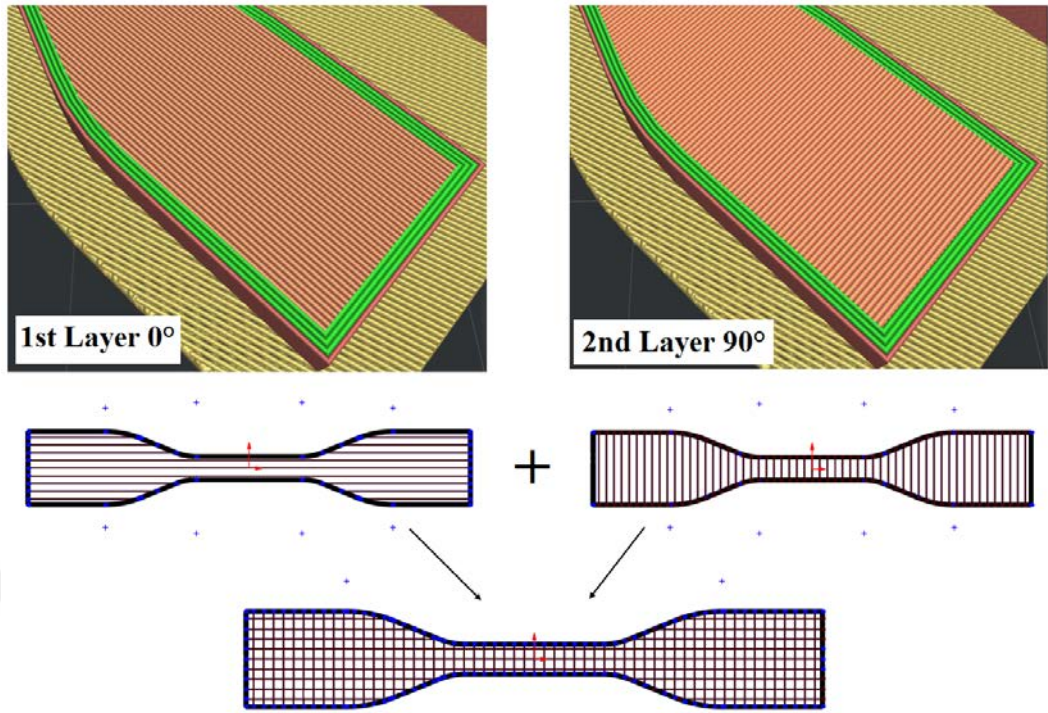
Şekil 3.4. 3 boyutlu yazıcı ile üretilen deney numuneleri ve yapı mimarisinin temel özellikleri

Üretilen numunelerde kullanılan yapı mimarisini incelemek gerekirse ilk olarak yazıcıdan bahsetmek gerekecektir. Kullanmakta olduğumuz 3Boyutlu yazıcı aşağıda şekil 3.5’ te gösterilmektedir. Cihaz belirli bir ticari firmaya ait olmamakla birlikte açık kaynak kodlu dilimleyici programlarıyla çalışmaktadır. Bu alanda ticari firmaların kendi yazılımları dışında en yaygın ve kullanışlı dilimleyici programlarından biri olan Slic3r programıyla yapı mimarisi oluşturulmuştur.



Şekil 3.5. Üretimlerin gerçekleştirildiği 3 boyutlu yazıcı

Numunelerin üretimini gerçekleştirirken kullandığımız mimarinin temel prensiplerinden ilki, katmanları oluştururken eriyiği yönlendirme şeklidir. Yaptığımız çalışmada her katmanı elyaf takviyeli kompozit malzemelerde en yaygın kullanılan $[0/90]^\circ$ yönelimini kullandık. Bu yönetime göre parçayı oluştururken bir katmanı 0° yönünde yazdırırken bir sonraki katmanı buna dik olacak şekilde 90° yönünde yazdırdık. Bahsedilen bu katman yazılım yönleri aşağıda şekil 3.6’da şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.6. Numuneler üretilirken takip edilen [0/90] katman yazdırma yönleri

Yazdırma işleminde kullanılan yapı mimarisinin diğer sayısal verileri aşağıda çizelge 3.2’de verilmektedir.

Çizelge 3.2. Yapı mimarisi verileri

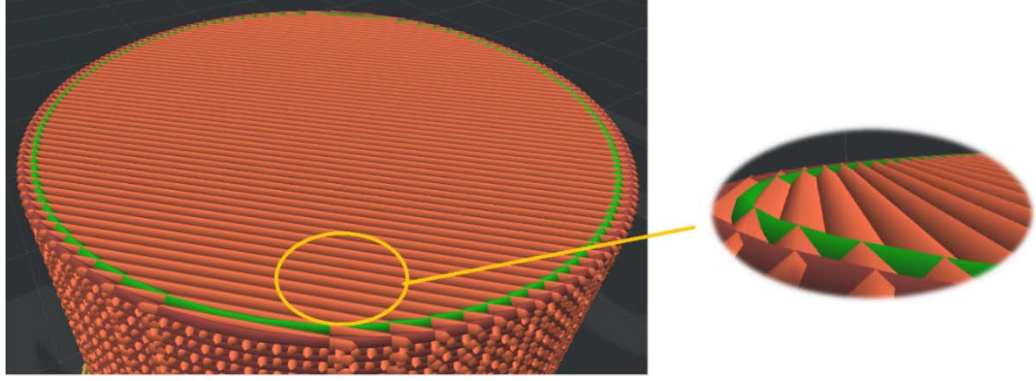
Yazıcı Nozul	Katman	Yazdırma	Yazdırma	Doluluk
Çapı (mm)	Yüksekliği (mm)	Hızı (mm/s)	Deseni	Oranı (%)
0.4	0.3	50	Düz Çizgi	100

Baskı mimarisi verilerini kısaca açıklamak gerekirse şunları söylemek yerinde olacaktır:

- Kullanılan yazıcı nozul çapı 0.4mm olarak belirlenmiştir. Bu tercihteki en büyük sebeplerden biri standart yazıcı nozul çapı olarak bu değerin belirlenmiş olmasıdır. Ayrıca bu değer düşürüldükçe yazım süresi uzamaktadır.

Arttırıldığında ise parçadaki ince bölgelerde yeterli doluluk oranı sağlanamamaktadır.

- Katman kalınlığı 0.15 mm'den itibaren değerler seçilmesi birçok araştırmacı tarafından önerilmektedir. Fakat bu değer düşük seviyede olması yine yazdırma süresinde büyük artışa neden olmaktadır. O yüzden Nozul çapına yakın bir değer olacak şekilde seçilmesi her katmanda akış izlerinde ideal bir genişlik-yükseklik oranı elde edilmesini sağlamaktadır.
- Yazdırma hızı yine dilimleyici program tarafından yazıcı özelliklerine en uygun değer olarak seçilmiştir. Bu değer arttırıldığında yazım anında nozulun hareketi dolayısıyla eriyik artıkları kalabilmekte ve parça da kötü görüntü ile yapı bozukluğuna sebep olabilmektedir. Ters şekilde bu hız değerinin düşürülmesi yazım süresini çok büyük ölçüde arttırmaktadır.
- Parça yazdırılırken yazıcı nozulunun takip ettiği desen yazdırılan parçanın mekanik özellikleri açısından, sanki elyaf yönelimi oluyormuşçasına, etkili bir parametredir. Her dilimleyici programın sahip olduğu ve kendinden tanımlı desenler vardır. Bunların içinde parçanın her iki yazım yönünde (x-y yönlerinde) eş özelliklere sahip olmasını sağlayan desen düz çizgi desenidir.
- Doluluk oranı ise yazılan parçadaki boşlukların tersini göstermektedir. Yani %30 doluluk oranı olan bir parçanın hacmen %70'ini boş bırakacak şekilde yazım işlemi gerçekleşecektir. Biz sanki dökümle üretilmiş gibi olması için %100 doluluk oranını seçtik; fakat her ne kadar %100 doluluk belirtsek de yazıcı nozul geometrisi dolayısıyla aşağıda şekil 3.7'de de gösterildiği gibi yok sayılan bazı boşluklar yapı içinde kalmaktadır.



Şekil 3.7. Yazdırma sebebiyle kalan boşluk

3.5. Sandviç Yapıların Tasarımı ve Üretimi

Sandviç yapılar, yapının mukavemet ve enerji sönümleme kabiliyeti çoğunlukla çekirdek geometrisine ve yapısına bağlıdır (Qi ve ark. 2017). Bugüne kadar sandviç yapı geometrilerinde en yaygın kullanılan geometriler altıgen balpeteği ve sinüzoidal oluklu yapılar olmuştur. Bunun en temel sebebi ise bu yapıların mekanik olarak istenilen özelliklere sahip olmalarının yanı sıra geleneksel yöntemlerle üretimlerinin de kolay olmasıdır. Fakat günümüzde gelişen yeni yöntemlerle birlikte yeni tasarımlar da ortaya çıkmaktadır. Daha önceki bölümlerde anlatıldığı üzere üstün mekanik özelliklere sahip olan ökzetik yapılar günümüzde artan bir ilgiye sahip olmuştur. Fakat işin aslı şudur ki ökzetik son 10 yıldan çok daha eskiye dayanmaktadır. Ökzetik yapıların günümüze kadar istenilen ölçüde yaygınlaşmamasının temel sebebi sürekli yapıda üretimlerinin geleneksel yöntemlerle çok zor olmasıdır. Günümüzde eklemeli üretim yöntemlerinin gelişmesi ve 3Boyutlu yazıcıların teknolojilerinin yaygınlaşmasıyla, negatif poisson oranına sahip ökzetik yapılar araştırmalarda hak ettiği yeri bulmaya başlamıştır.

Gerçekleştirilen bu doktora çalışmasının düzlemsel sandviç yapılarla ilgili olan ilk kısmında da bahsedilen ökzetik geometrili sandviç yapıların mekanik dayanımlarının ve enerji sönümleme yeteneklerinin yaygın olarak kullanılan geleneksel çekirdek

geometrilerine kıyasla ne kadar etkili olduklarını belirlemektir. Bu kapsamda bahsettiğimiz üzere pozitif poisson oranına sahip 2 geleneksel çekirdek geometrisiyle, Altıgen Balpeteği ve Sinüzoidal Oluklu, negatif poisson oranına sahip 3 farklı ökzetik çekirdek geometrisi seçilmiştir. Seçilen bu geometrilerden standartlara uygun şekilde basma ve eğilme numuneleri tasarlanmıştır. Tasarım aşamasında önemle dikkate aldığımız kriterlerden ilki, çekirdek yapıların yüz plakalarına 90° yapacak şekilde yatay olarak dizayn edilmesidir. Bunun temel sebebi, elde etmek istediğimiz sandviç yapıların kullanımına uygun olan otomotiv, havacılık ve denizcilik endüstrisinde ve bilhassa elektrik ve sıvı iletişim hatlarında kullanılmak istenmesi nedeniyle yapı içerisinde boydan boya kablo yerleştirilmesine veya sıvı akışına müsaade edebilir şekilde olmalarını istememizdir. Bu sayede yapıya, gerekli mukavemet sağlanırken ve çarpma/patlama durumlarında yüksek enerji sönmleme yeteneği kazandırılırken aynı zamanda ergonomik tasarım sayesinde hidrolik hatlarının, elektrik kablo hatlarının geçişine de izin sağlamaktır. Ayrıca yapılar optimize edilerek ısı ve ses yalıtımı gibi durumlarda da daha kullanışlı bir hal alacaktır.

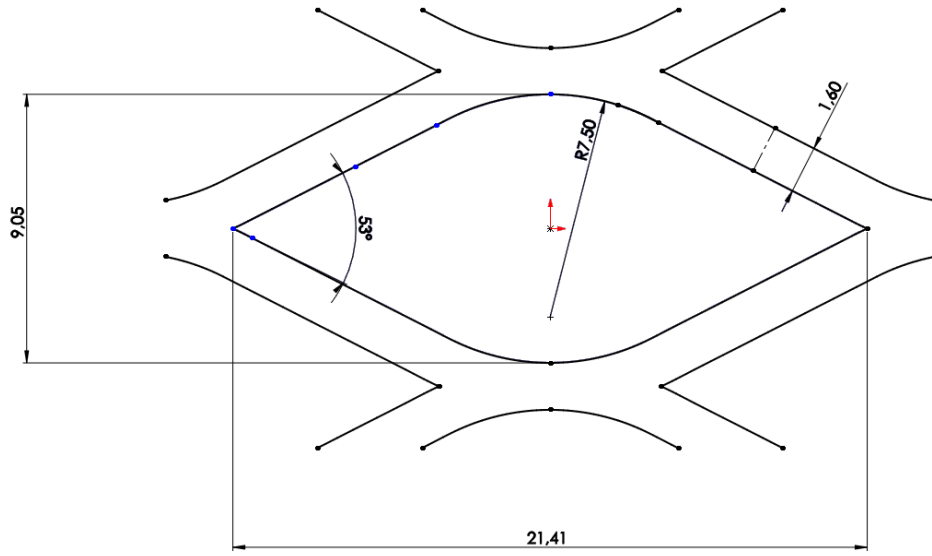
Belirlenen bu kriterler neticesinde baz model olarak, daha önce danışmanımın sentaktik köpük takviyeli şekilde metal malzemeden üretilmiş sinüzoidal oluklu çekirdek yapıya sahip sandviç seçilmiştir.

Sandviç tasarımları verilmeden önce şu bilgiler verilmelidir. Tasarımı gerçekleştirilen modeller iki ayrı test numunesi ebatlarında ölçülendirilmiştir. Bunlardan ilki sandviç yapıların enerji sönmleme kabiliyetlerini hem statik hem de dinamik yüklemeler altında incelenmek üzere ASTM D7336/D7336M-16 standardına göre hazırlanmış olanlardır. Diğerisi ise 3-Nokta eğilme aparatı altında sandviç yapıların davranışını incelemek adına ASTM C393/C393M-16 standardına uygun olan eğilme numuneleridir.

Bahsedilen bu standartlara uygun olarak 5 farklı çekirdek geometrisine sahip sandviç yapıların tasarımları şu şekilde verilebilir:

3.5.1. Sinüzoidal Oluklu Çekirdek Yapıya Sahip Sandviç Yapı Tasarımı

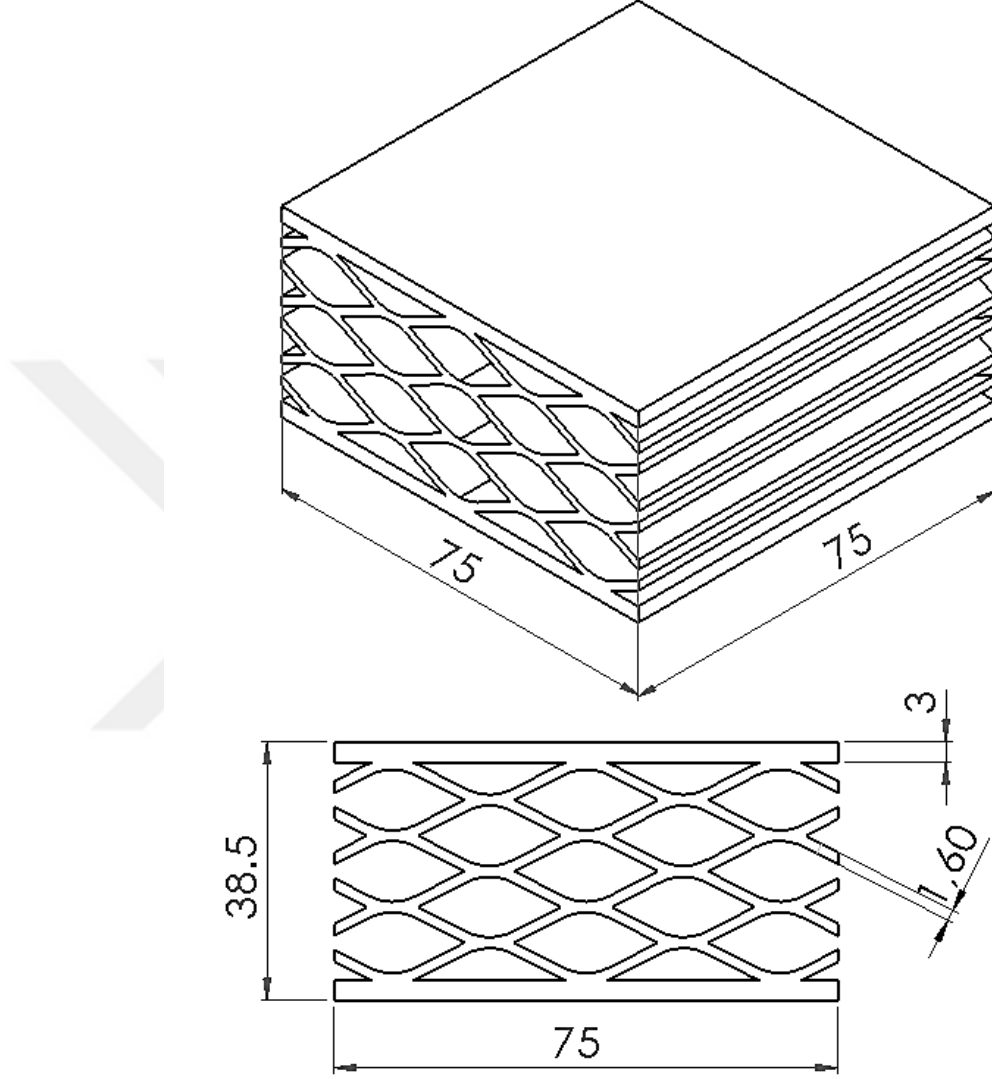
Oluklu çekirdek geometrisine sahip sandviç yapılar yeterli mukavemetleri yanı sıra çok uygun bir enerji sönümleyici yapı görevi görmektedirler. Bu nedenle birçok alanda farklı geometrilerde karşımıza çıkmaktadır. Yapılan bu çalışmada kullanılan oluklu çekirdek geometrisinin tek hücresine ait ölçüler aşağıda şekil 3.8’de gösterilmektedir.



Şekil 3.8. Sinüzaoidal oluklu çekirdek geometrisine ait tek hücrenin ölçüleri

Tek çekirdek geometrisi verilen tasarımdan ilk olarak ASTM D7336/D7336M-16 standardına göre hazırlanmış sandviç yapıların enerji sönümlene kabiliyetlerini belirlemek için teste tabi tutulacak numune tasarımı gerçekleştirilmiştir. Standartta uygun bu sandviç yapı tasarımı ve tasarımın ölçüleri aşağıda şekil 3.9’da verilmektedir. Sandviç yapıların hücrelerinin boş halinin, yapının hücrelerinin tamamen dolu halinin ağırlığına oranı olarak bilinmektedir. Aynı zamanda izafi yoğunluk, gözeneklilik oranının tersini ifade etmektedir. Yapıların mekanik özelliklerini kıyaslarken önemli bir kriter olarak kullanılan bu değer pek çok sandviç yapı için de söz konusudur (Ercan

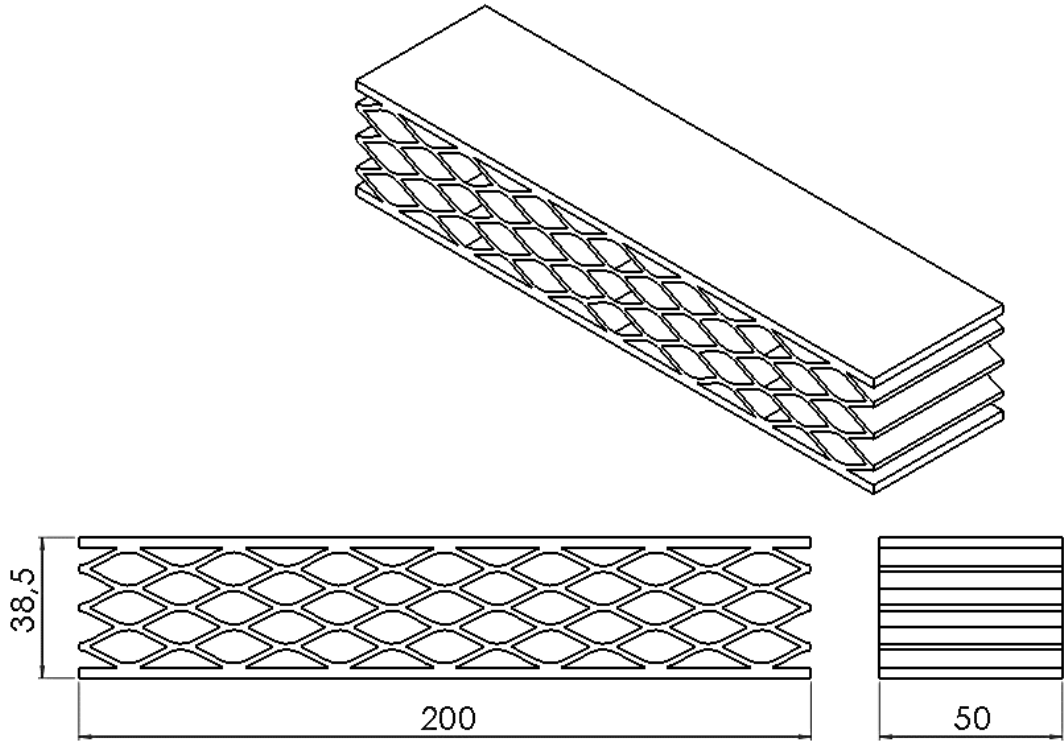
2019). Sinüzoidal Oluklu Çekirdek geometrisine sahip numunenin izafi yoğunluğu 0,387'dir.



Şekil 3.9. ASTM D7336/7336M-16 standardına uygun olarak tasarlanan sinüzoidal oluklu çekirdek geometrisine sahip numune ölçüleri

Yine aynı geometri ile ASTM C393/C393M-16 standardına uygun olarak tasarlanan ve sandviç yapıların 3-nokta eğilme testi ile eğilme yükü altında mekanik özelliklerinin belirleneceği test için tasarlanan numune ve ölçüleri aşağıda şekil 3.10'da verilmektedir.

Numune ölçüleri 50mm x 200mm x 38,5 mm olmakla birlikte alt ve üstteki yüz plakaları kalınlığı 3mm'dir.

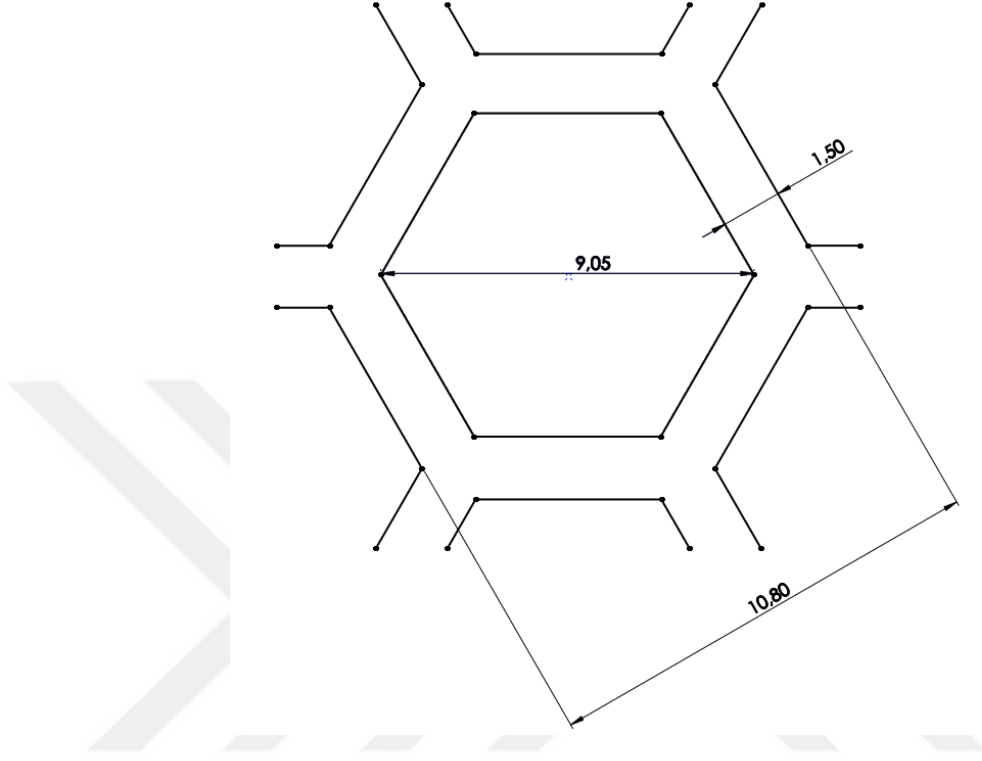


Şekil 3.10. ASTM C393/C393M-16 standardına uygun olarak tasarlanan sinüzoidal oluklu çekirdek geometrisine sahip 3-nokta eğilme numunesi ölçüleri

3.5.2. Altıgen Balpeteği Çekirdek Yapıya Sahip Sandviç Yapı Tasarımı

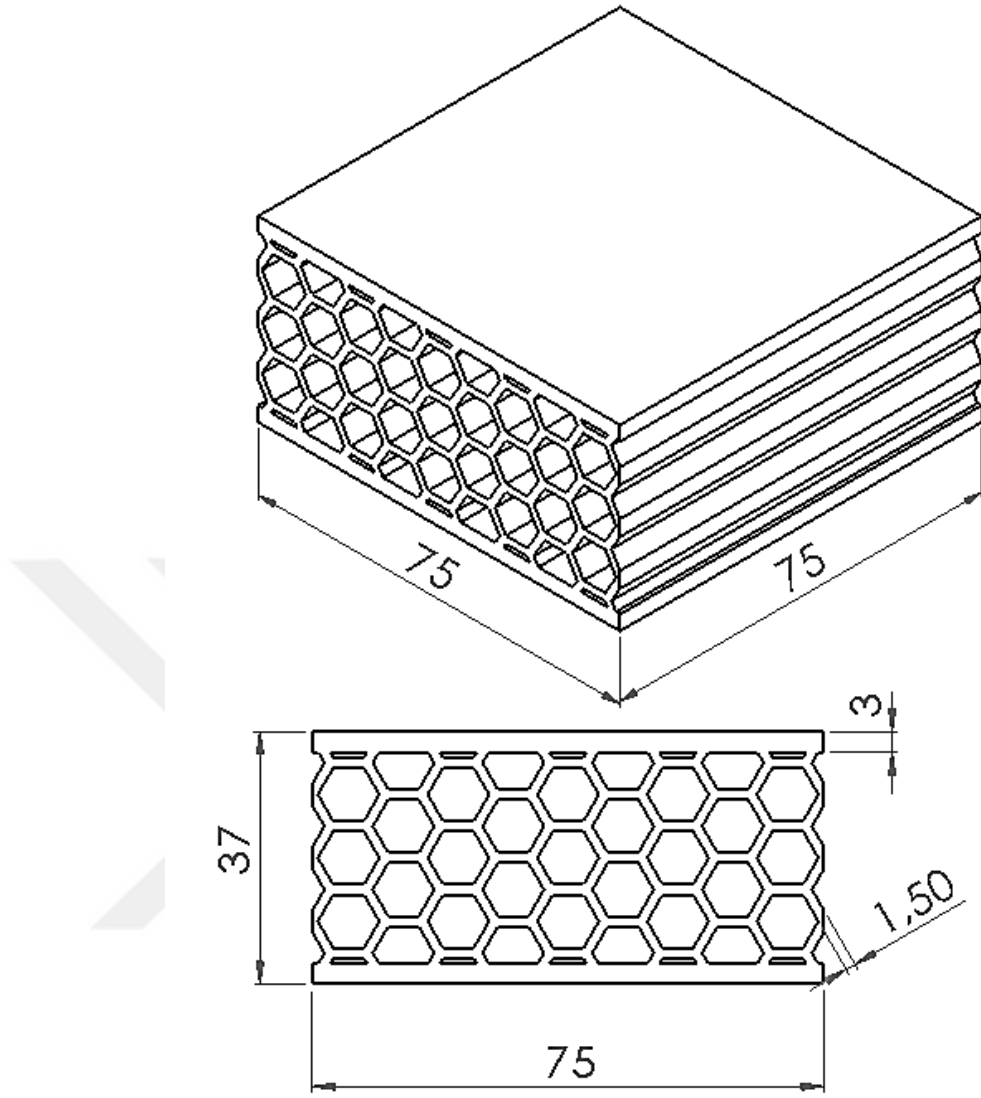
Bilindiği üzere en yaygın kullanılan ve bilinen çekirdek geometrisi altıgen balpeteği geometrisidir. Bunun en büyük sebebi ise yapının doğal geometrisinden kaynaklı yüksek mekanik özellikleridir. Yapılan bu çalışmada da altıgen balpeteği geometrisinin, yeni nesil ökzetik çekirdek geometrileriyle kıyaslamak için en iyi geleneksel yapılardan biri olduğu kabul edilmiş ve bu geometriye ait tasarımlar gerçekleştirilmiştir.

Kullanılacak olan altıgen balpeteği geometrisinin tek hücre tasarımı ve ölçüleri aşağıda şekil 3.11’de verilmektedir.



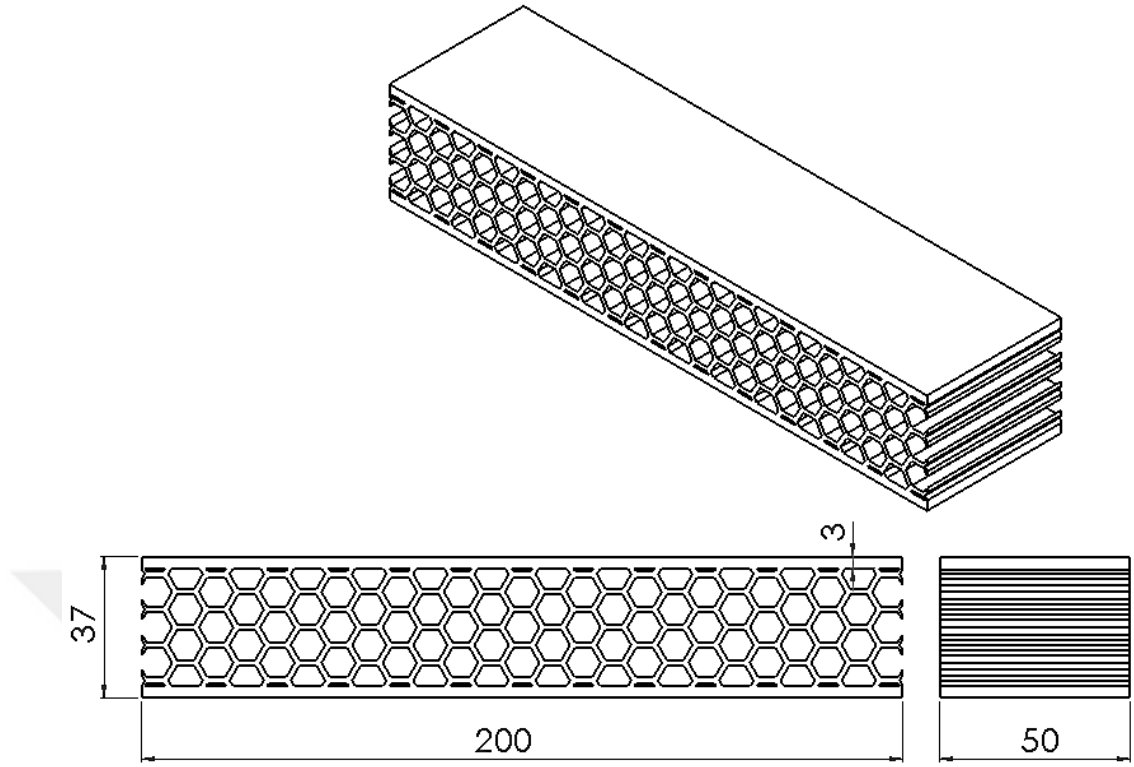
Şekil 3.11. Altıgen balpeteği çekirdek geometrisine ait tek hücrenin ölçüleri

Tek hücre ölçüleri verilen bu geometriye ait, ASTM D7336/D7336M-16 stadardına uygun hazırlanmış test numunesinin tasarımı ve ölçüleri aşağıda şekil 3.12’de verilmektedir. Altıgen Balpeteği Çekirdek geometrisine sahip numunenin izafi yoğunluğu 0,410’dur.



Şekil 3.12. ASTM D7336/7336M-16 standardına uygun olarak tasarlanan altıgen balpeteği çekirdek geometrisine sahip numune ölçüleri

Aynı geometri ile ASTM C393/C393M-16 standardına uygun olarak tasarlanan numune tasarımı ve ölçüleri aşağıda şekil 3.13'te verilmiştir. Numune ölçüleri 50mm x 200mm x 37mm olmakla birlikte alt ve üstteki yüz plakaları kalınlığı 3mm'dir.



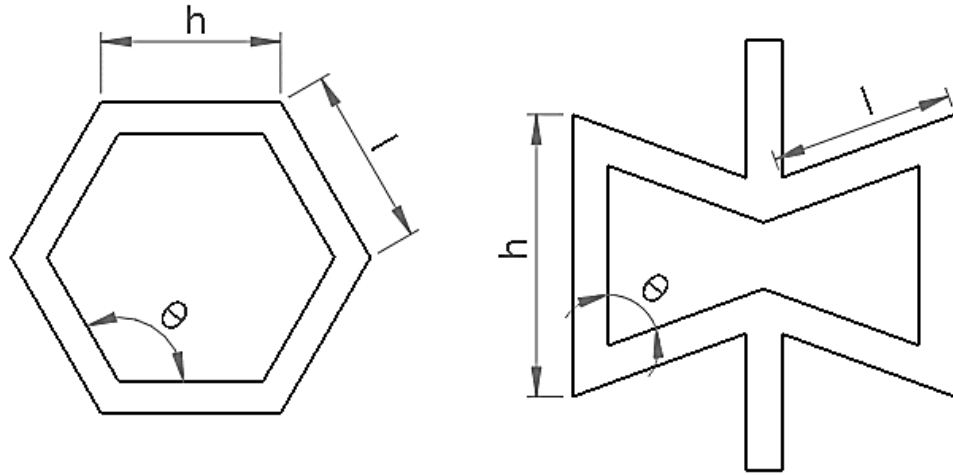
Şekil 3.13. ASTM C393/C393M-16 standardına uygun olarak tasarlanan altıgen balpeteği çekirdek geometrisine sahip 3-nokta eğilme numunesi ölçüleri

Günümüzde oldukça yaygın kullanılan bu çekirdek geometrilerine alternatif olarak bu çalışmada ökzetik geometrili çekirdekler sunulmaktadır. Ökzetik yapılar genel tanım itibariyle tasarlanabilen malzemeler yani “metamalzemeler” arasındadır. Bu nedenle belirgin bi kısıt olmamakla birlikte her geçen gün yeni bir geometrisi ortaya atılmaktadır (Yanping ve Hong 2010). Geçtiğimiz yıllar boyunca, mekanik özelliklerine bağlı olarak farklı etkilere sahip çeşitli ökzetik geometrik yapılar ve modeller çalışmalara konu olmuş ve incelenerek test edilmişlerdir. Bu ökzetik yapıların tasarımları yaygın olarak 2Boyutlu (2D) olarak ortaya çıksa da 3Boyutlu (3D) yapı geometrileri de üretmek mümkündür. Yapılan çalışmalarda en yaygın ve bilinen ökzetik geometri çeşitleri arasında Yeniden Kıvrımlı (Re-Entrant, RE) (Wang ve ark. 2017, Zang ve ark. 2018, Hou ve ark. 2018) , Kiral yapılar sınıfında bulunan Tetrachiral (TC) (Tee ve ark. 2010, Li ve ark. 2017, Miller ve ark. 2010, Grima ve ark. 2008) ve Çift Ok Kafa (Double Arrow Head, DAH) (Wang ve ark. 2018, Lim 2016, Qiao ve Chen 2015)

diğer geometrilere göre bir adım öne çıkan geometrik dizaynlardır. Gerçekleştirilen bu doktora çalışmasında da bu gelenek sürdürülmüş ve yine en yaygın olan bu üç geometri seçilerek tasarımlar oluşturulmuştur.

3.5.3. Yeniden Kıvrımlı Çekirdek Yapıya Sahip Sandviç Yapı Tasarımı

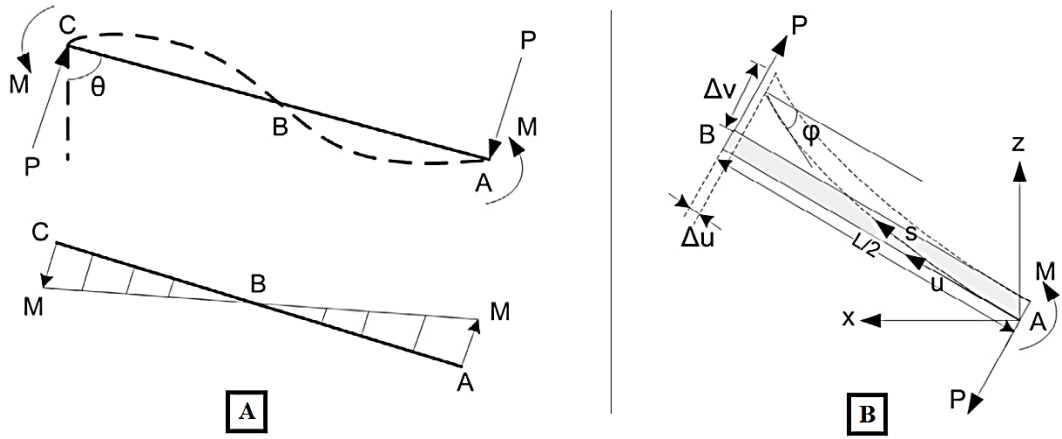
Yapısal uygulamaları hafifletme çalışmalarında sandviç panellerin kullanımı çok önemli bir yer tutmaktadır. Çoğu uygulamada ise tercih edilen genellikle balpeteği geometrili çekirdek yapıya sahip sandviç yapılardır. Bu yapılar özellikle düzlemsel sandviç panellerde çok iyi iş görürken kavisli veya silindirik sandviç yapıların çekirdeğinde kullanıldığında yapı çekirdeğinde yerel çökmelere ve yapı burkulmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle petek geometrisinde gerekli değişiklikler yapılarak kavisli ve silindirik sandviç yapılara uygun hale getirilmesi gerekmiştir. Altıgen balpeteği geometrisinde çeşitli tasarım değişikliği uygulamaları ile pozitif poisson oranına sahip davranış, negatif poisson oranına sahip bir yapıya dönüştürülebilmektedir (Evans 1991). Bu NPO'na sahip yapı ökzetik yapılar içinde en bilinen geometri olan Yeniden Kıvrımlı geometridir. Geleneksel altıgen balpetek geometrisi iç duvarları arasında 120° 'lik açılara sahip iken yeniden kıvrımlı ökzetik yapı altıgen peteğin kıvrılarak yay şeklini almış halinden oluşur ve iç açılar yapının tasarımına göre değişiklik gösterir. Düzgün altıgen balpeteği yapı ve yeniden kıvrımlı petek yapı arasındaki fark aşağıda şekil 3.14'te gösterilmiştir. Yeniden kıvrımlı çekirdek geometrisinin poisson oranı yapının duvarları arasındaki açılara ve geometrik parametrelere bağlıdır (Jinhe ve ark. 1996).



Şekil 3.14. Düzgün altıgen balpeteği ve yeniden kıvrımlı ökzetik geometrileri

Yük Altında Şekil Değiştirmesi

Katı bağlantı kabulüne dayanarak, yeniden kıvrımlı ökzetik yapının dikmeleri, iki ucu sabitlenmiş kiriş olarak dikkate alınır. Bu geometride eksenel yükleme dikkate alınmadığından, yeniden kıvrımlı yapının AC kirişi için etkin olan yükleme koşulu ve aynı kol üzerindeki moment dağılımı aşağıda şekil 3.15a’da gösterildiği gibidir. Moment dağılımında çubuğun orta noktası B’deki etkin momentin sıfır olduğu anlaşılmaktadır. Bu sebeple yarım AB çubuğu, şekil 3.15b’de gösterildiği üzere bir ucu sabit bir ucu serbest bir ankastre kiriş gibi modellenebilir.



Şekil 3.15. a)Yeniden kıvrımlı ökzetik yapı çubuğunun yüklenmesi b) Yeniden kıvrımlı ökzetik yapı çubuğunun bükülmesi (Yang ve ark. 2015)

Şekil 3.15b 'de, S, A orijini ile bükülmüş çubuk boyunca eğrisel bir koordinattır, U deforme olmamış çubuk boyunca, aynı zamanda A'nın orijini ile koordinattır, U açısı deforme olmamış çubuk hizalama yönüne göre sapma açısıdır ve Δv ve Δu sırasıyla, boylamasına yönde ve boylamasına dik yönde boyutlardaki değişimlerdir.

Buradan M momenti dengeden kolayca elde edilebilir;

$$M = P \cdot \left(\frac{L}{2} - \Delta u \right) \quad (3.1)$$

Sapma açısı, çubuğun uzunlamasına konumunun bir fonksiyonudur ve $\varphi(s)$ olarak tanımlanır; bükülme çubuk uzunluğunu değiştirmedikten, kiriş eğilmesi için Euler-Bernoulli teoreminde;

$$\frac{\partial \varphi}{\partial s} = \frac{M(u)}{E.I} = \frac{P}{E.I} \cdot \left(\frac{L}{2} - \Delta u - u \right) \quad (3.2)$$

burada u hesaplanan konumun başlangıç A noktasından uzaklığıdır ve I , kesitin ikinci atalet momentidir. Euler – Bernoulli teoremi, kayma şekil değiştirmesini dikkate almaz, bu da uzun kirişler için iyi bir yaklaşım sağlar.

Çubuk uzunluğunun kısa olduğu durumlarda, kayma yeniden kıvrımlı çubuğun şekil değiştirmesine katkıda bulunur ve bu nedenle dikkate alınması gerekir. Böylece sapma açısı şu şekilde tanımlanır (Hutchinson 2001);

$$\varphi = \frac{dv}{du} + \gamma = \frac{dv}{ds} + \gamma \quad (3.3)$$

Burada γ kayma şekil değiştirmesidir ve v çubuğun uzunlamasına eksenine dik yöndeki yer değiştirmesidir. Kare kesitli bir kiriş için γ şu şekilde elde edilir;

$$\gamma = \frac{6.P}{5.G.A} \quad (3.4)$$

Burada ise G , katı parçanın kayma modülünü ve A ise yeniden kıvrımlı çubuğun enine kesit alanını temsil etmektedir. Denklem 3.3 türevinin alınmasıyla;

$$\frac{\partial \varphi}{\partial s} = \frac{d^2 v}{du^2} = \frac{M(u)}{E.I} = \frac{P}{E.I} \cdot \left(\frac{L}{2} - \Delta u - u \right) \quad (3.5)$$

Denklemini elde edilir. Denklem 3.2’den $A-u$ ve $A-S$ koordinatı arasındaki ilişki göz önüne alındığında aşağıdaki geometrik ilişkiler kolayca elde edilebilir;

$$\frac{du}{ds} = \cos \theta \quad (3.6)$$

$$\frac{dv}{ds} = \sin \theta \quad (3.7)$$

Bu bilgilere göre denklem 3.5 ve denklem 3.6 kullanılarak;

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial s^2} = -\frac{P}{E.I} \cdot \frac{du}{ds} = \frac{-P}{E.I} \cdot \cos \varphi \quad (3.8)$$

Denklem 3.8 ile ek işlemler yapıldığında;

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial s^2} \right) \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial s} &= \frac{-P}{E.I} \cdot \cos \varphi \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial s} \rightarrow \int \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial s^2} \right) \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial s} \cdot ds = \int \frac{-P}{E.I} \cdot \cos \varphi \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial s} \cdot ds \rightarrow \\ \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\partial \varphi}{\partial s} \right)^2 &= \frac{-P}{E.I} \sin \varphi + C \end{aligned} \quad (3.9)$$

Denklemini elde edilir. Sınır koşullarını göz önünde bulundurarak, $S = L/2$ olduğunda, $\varphi = \varphi_{L/2}$ olarak tanımlanır. Bu konumda kirişin eğriliği 0'a eşit olur. Böylelikle denklem 3.9'daki sabit $C = \frac{P}{E.I} \cdot \sin \varphi_{L/2}$ olarak tanımlanır ve denklem 3.9 yeniden düzenlenerek yazılırsa;

$$\frac{\partial \varphi}{\partial s} = \sqrt{\frac{P}{E.I}} \cdot \left(\sin \varphi_{L/2} - \sin \varphi \right)^{1/2} \quad (3.10)$$

Ayrıca $S = 0$ olduğunda, sapma açısı $\varphi(0) = \gamma$ olur. Böylece;

$$\int_{\gamma}^{\varphi_{L/2}} (\sin \varphi_{L/2} - \sin \varphi)^{\frac{1}{2}} \cdot \partial \varphi = \int_0^{\frac{L}{2}} \sqrt{\frac{2.P}{E.I}} ds = \frac{L}{2} \cdot \sqrt{\frac{2.P}{E.I}} \quad (3.11)$$

k ve α 'yı şu şekilde tanımlarsak;

$$k = \sqrt{\frac{1 + \sin \varphi_{L/2}}{2}} \quad (3.12a)$$

$$\sin \alpha = \sqrt{\frac{1 + \sin \varphi}{1 + \sin \varphi_{L/2}}} \quad (3.12b)$$

Bu bilgilerle denklem 3.11 yeniden şu şekilde düzenlenebilir;

$$F(k) - F(\alpha_0, k): \int_{\alpha_0}^{\pi/2} \frac{1}{\sqrt{1 - k^2 \cdot \sin^2 \alpha}} \cdot dx = \frac{L}{2} \sqrt{\frac{P}{E.I}} \quad (3.13)$$

Denklem 3.12 ye göre , $\sin \alpha_0 = \frac{\sqrt{1 + \sin \gamma}}{\sqrt{1 + \sin \varphi_{L/2}}} = \frac{1}{k} \cdot \sqrt{\frac{1 + \sin \gamma}{2}}$ olmaktadır.

Denk. 3.13, Legendre Formunda birinci türün eliptik bir integralinin bir varyasyonudur (Good 2001). Modül açısı α ve eliptik modül k belirlendikten sonra, entegrasyon sonuçları kolayca elde edilebilir. Denk. 3.13 sadece k olarak seçilen bir bağımsız parametreye sahiptir. k ve α_0 değerleri verilen geometrik tasarım parametreleri için sayısal hesaplamalar ile belirlenebilir. k belirlendikten sonra, denk. 3.12'den $\varphi_{L/2}$ sonucu elde edilebilir ki bu gerilim seviyesi ve geometrik parametrelerle tamamen

belirlenen maksimum sapma açısı değerlerini verir. Sonuç olarak, $\varphi_{L/2}$ sapma açısı sonuçlarından, toplam yer değiştirme Δv ve Δu şu şekilde hesaplanabilir:

$$\Delta v = \sqrt{\frac{E.I}{P}} \cdot [F(k) - F(\alpha_0 k)] - 2 \cdot \sqrt{\frac{E.I}{P}} \cdot [E(k) - E(\alpha_0 k)] \quad (3.14)$$

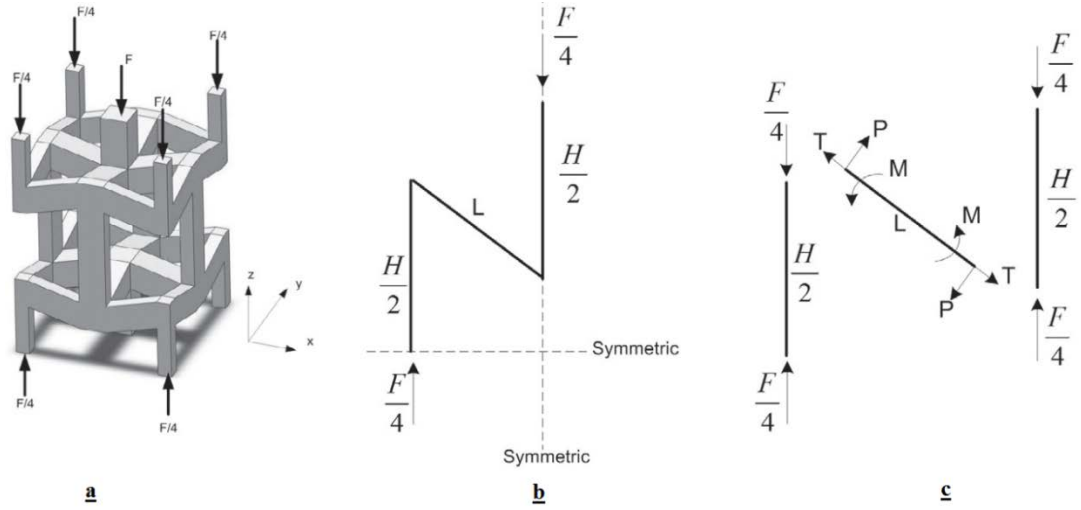
$$\Delta u = \frac{L}{2} - \sqrt{\frac{2.E.I}{P}} \cdot (\sin \varphi_{L/2} - \sin \gamma)^{1/2} \quad (3.15)$$

burada $F()$ ve $E()$, sırasıyla birinci ve ikinci türün eliptik integralleridir. Δv ve Δu 'dan, kirişin küresel koordinasyon Δx ve Δz boyunca saptmaları elde edilebilir, bu daha sonra yapıların mekanik özelliklerini hesaplamak için kullanılabilir.

Z Yönünde Tek Eksenli Basma

Z yönü boyunca sonsuz yapıya uygulanan bir uzak bası gerilimi σ 'yı düşünün. Uzak bası gerilimi altında, bir birim hücredeki kuvvet bileşenleri Şekil 3.16a'da gösterilmiştir. Simetri nedeniyle, birim hücrenin sınırlarında etkili bir bükülme, burulma momenti veya kesme kuvveti yoktur. Ayrıca, kuvvet dengesi nedeniyle, birim hücrenin sınırlarına etki eden etkili normal kuvvetler yoktur. Köşelerdeki her dikey dikme dört bitişik birim hücre tarafından paylaşıldığından, her birine uygulanan kuvvet Şekil 3.16a'da gösterildiği gibi dört birim hücre arasında eşit olarak bölünür. Kuvvet dengesinden, F kuvveti şu şekilde elde edilir:

$$F = \frac{1}{2} \cdot \sigma \cdot A = 2 \cdot \sigma L^2 \cdot \sin^2 \theta \quad (3.16)$$



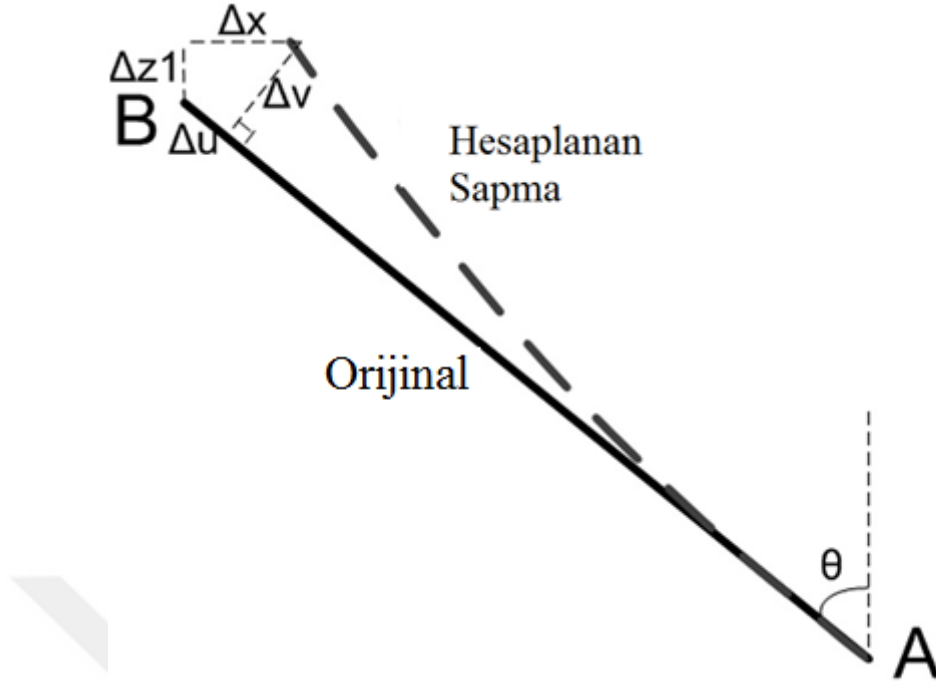
Şekil 3.16. Birim hücrenin z yönünde bası yükü altında yükleme analizi a) Birim hücrenin yükleme durumu b) Basitleştirilmiş yapının yüklenmesi c) Basitleştirilmiş yapının kuvvet ayrışması (Yang ve ark. 2015)

Şekil 3.16a'da gösterilen birim hücre, yüksek simetri derecesi nedeniyle Şekil 3.16b'de gösterilen yapıya basitleştirilebilir. Kuvvet bileşenlerinin daha fazla ayrışması Şekil 4.16c 'de gösterilmiştir. Şekil 3.16c'den, dikey desteklerin sadece normal sıkıştırma gerilmelerine maruz kaldığı, yeniden kıvrımlı çubukların ise normal ve kesme gerilmelerinin bir kombinasyonuna maruz kaldığı görülebilir. Dengeden, kuvvet bileşenleri şu şekilde elde edilebilir:

$$P = \frac{F}{4} \cdot \sin \theta = \frac{1}{2} \sigma \cdot L^2 \cdot \sin^3 \theta \quad (3.17)$$

$$T = \frac{F}{4} \cdot \cos \theta = \frac{1}{2} \cdot \theta \cdot L^2 \cdot \sin^2 \theta \cdot \cos \theta \quad (3.18)$$

Yerel koordinat sistemi ile yeniden kıvrımlı çubukların küresel koordinat sistemi arasındaki ilişki, Şekil 3.17'de kolayca gösterilebilir ve şu şekilde yazılabilir:



Şekil 3.17. Z yönünde bası yükü etkisindeki yeniden kıvrımlı çubuğun koordinat sistemleri arasındaki ilişki (Yang ve ark. 2015)

$$\Delta x = \Delta u \cdot \sin \theta + \Delta v \cdot \cos \theta \quad (3.19)$$

$$\Delta z_1 = \Delta v \cdot \sin \theta - \Delta u \cdot \cos \theta \quad (3.20)$$

Δx ve Δz_1 'in yeniden kıvrımlı çubukların sadece boyutsal değişimini temsil ettiğini unutmamak gerekir.

Dikey çubukların sıkıştırılması, z yönündeki boyutsal değişikliklere de katkıda bulunur ve şu şekilde yazılabilir:

$$\Delta z_2 = \frac{2 \cdot \sigma \cdot H \cdot L^2 \cdot \sin^2 \theta}{E \cdot t^2} \quad (3.21)$$

Δz_2 'nin bir bütün dikey çubuğun aksenal sıkıştırmasını temsil ettiğini unutmak gerekir. Böylece, Şekil 3.16b'de gösterilen basitleştirilmiş yapı için z yönündeki toplam boyutsal azalma şu şekilde olacaktır:

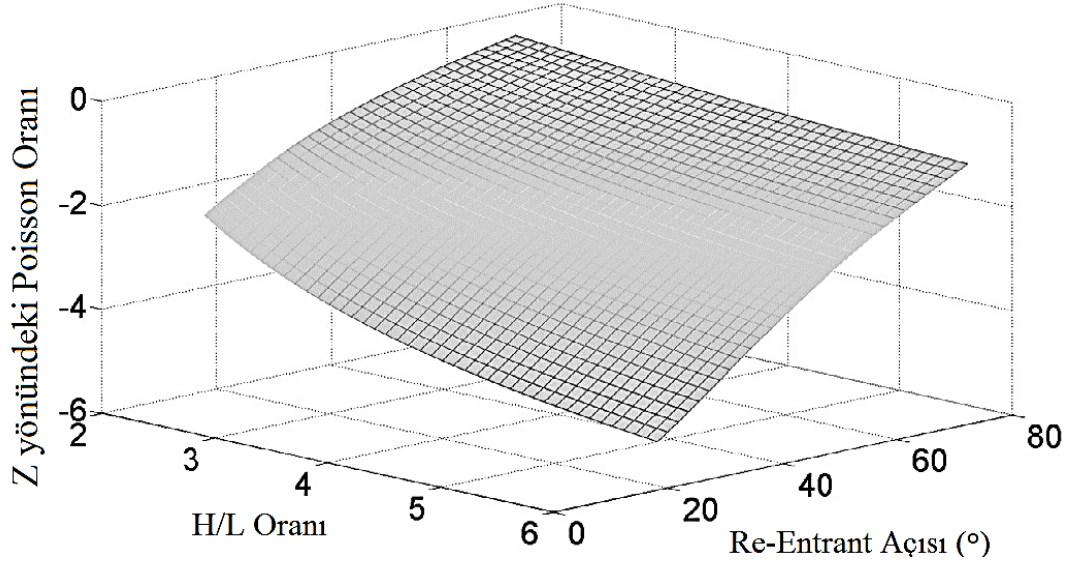
$$\Delta z = 2. \Delta z_1 + \Delta z_2 \quad (3.22)$$

Poisson Oranı

Bası yükü altında, z yönündeki Poisson oranı kolayca elde edilebilir;

$$\nu_{zx} = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_z} = -\frac{\frac{2.\Delta x}{L.\sin \theta}}{\frac{\Delta z}{H-L.\cos \theta}} = -\frac{2.(H-L.\cos \theta).\Delta x}{L.\sin \theta.(2.\Delta z_1+\Delta z_2)} = -\frac{2.(\alpha-\cos \theta).\Delta x}{\sin \theta.(2.\Delta z_1+\Delta z_2)} \quad (3.23)$$

Burada $\alpha = \frac{H}{L}$ 'dir. Şekil 3.18, tasarım parametreleri α ve θ ile z yönünde 10kPa gerilim altındaki poisson oranının ilişkisini göstermektedir. Grafik oluşturulurken hesaplama için kullanılan katı malzeme özellik değerleri, Ti – 6Al-4V'den alınmıştır. Karşılaştırma, iki farklı parametrenin Poisson oranı ν_{zx} üzerindeki etkilerini açıkça göstermektedir. $\frac{H}{L}$ oranı olan α arttıkça ve yeniden kıvrım açısı θ azaldıkça; negatif Poisson oranı daha da büyür. Poisson oranı değerlerinin, nispeten küçük olduğunda, re-entrant açısına (θ) daha duyarlı hale geldiği gözlemlenebilir; ki bu da mühendislik tasarımları sırasında potansiyel olarak faydalanılabilir bir özelliktir.



Şekil 3.18. Farklı tasarımların bası yükü altında Z doğrultusundaki Poisson oranları $L=5\text{mm}$, $t=1\text{mm}$, $\sigma=10\text{kPa}$, $E=114\text{ GPa}$, $G=43\text{ GPa}$ (Yang ve ark. 2015)

Denk. 3.14 ve 3.15'e göre, Δu ve Δv ifadelerinin malzemenin hem strese hem de modülüne bağlı olduğu görülmektedir, bu nedenle bunların Poisson oranı değeri üzerindeki etkileri tanımlanmalıdır. Önceki araştırmalardan (Levy ve Goldfarb 2006, Wan ve ark. 2004), gerilme/birim şekil değiştirme seviyesinin Re-Entrant ökzetik yapının poisson oranı üzerinde büyük bir etkisinin olduğu bildirilmiştir; ancak sonuçların gerçekçi olmayan sapma açılarıyla elde edildiği öne sürülmüştür. Öte yandan, katı malzeme özelliğinin (Elastisite Modülü E) hücresel yapıların performansı üzerinde herhangi bir doğrusal olmayan etkiye sahip olup olmayacağını açıklığa kavuşturmak için önceden gerçekleştirilmiş bir literatür mevcut değildir. Birçok araştırmada daha yüksek gerilme seviyelerinin Poisson oranının daha ince çubuklara sahip yapılar üzerinde daha belirgin bir etkiye sahip olduğu gösterilmiştir. Bununla birlikte, ince çubuklara sahip yapılar için, yapının toplam nispi yoğunluğu azaldıkça, elde edilebilecek maksimum stres seviyeleri sınırlanır. Pratik tasarım amaçları için, Poisson oranı değerlerinin strese bağımlılığı çok daha küçüktür ($<10\%$) ve Denklem. 3.23 doğru kabul edilebilir. Ayrıca, katı malzemenin modülünün yapının Poisson oranı üzerinde herhangi bir etkisi olmadığını, bunun da bir yapının Poisson oranlarının

yalnızca geometrik bir davranış göstermesi gerektiği beklentisinden kaynaklandığı söylenebilir.

Bası yükü altında z yönünde yeniden kıvrımlı petek yapısının Poisson oran değeri de, kaymaya bağlı şekil değişiminin dahil olduğu küçük sapma Timoshenko modeline dayanan bir önceki çalışmada elde edilmiştir. Timoşenko modelinde, sapma açısının yeterince küçük olduğu varsayılır, böylece sapmaya bağlı eksenel uzunluk azalması göz ardı edilebilir (Yang ve ark. 2012). Z eksenini boyunca bası yükü altında Poisson oranının basitleştirilmiş ifadesi şu şekilde gösterilebilir;

$$\nu_{zx} = \frac{\Delta x.(H-L.\cos \theta)}{\Delta z.(L.\sin \theta)} = -\frac{\left(\frac{L^2}{E} + \frac{6.t^2}{5.G}\right).\cos \theta.(\alpha - \cos \theta)}{\frac{L^2.\sin^2 \theta}{E} + \frac{6.t^2.\sin^2 \theta}{5.G} + \frac{4.\alpha.t^2}{E}} \quad (3.24)$$

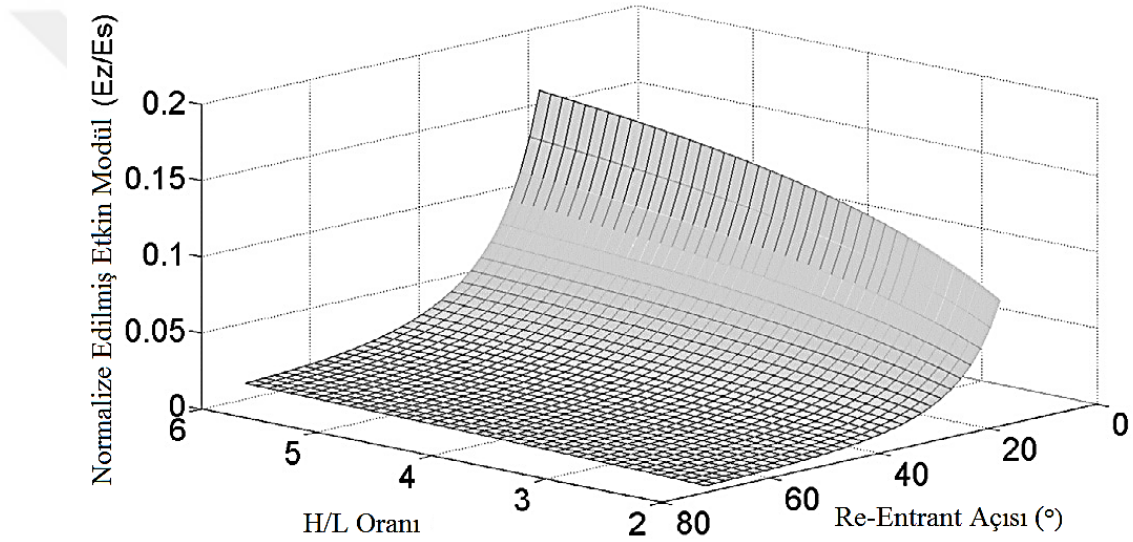
Denklem 3.23 ve 3.24 karşılaştırıldığında, büyük sapma modeli ve küçük sapma Timoshenko modelinin ν_{zx} poisson oranı için birbirine yakın sonuçlar verdiği ve aradaki farkın 10^{-2} 'den küçük olduğu görülmüştür. Burada gösterilmemesine rağmen büyük sapma modelinin ν_{zx} tahmini konusunda Euler-Bernoulli kiriş modeli ile arasında önemli farklar olduğu bulunmuştur. Bu fark, kaymaya bağlı sapmanın, eksenel uzunluk azalmasına kıyasla, yeniden kıvrımlı ökzetik yapının Poisson oranları üzerinde daha önemli etkilere sahip olmasıyla kolayca açıklanabilir.

Etkin Modül

Etkin modülün hesaplanması sırasında, birim hücre yapısı bir blok olarak kabul edilir ve modül değeri birim hücrenin geometrik sınırlayıcı kutusu için, $2.(H - L.\cos \theta) \times 2.L.\sin \theta \times 2.L.\sin \theta$ 'nın bir boyutu olarak hesaplanır. Dolayısıyla etkili modül her zaman aynı toplam boyutlara sahip katı bir malzeme bloğunun modülünden daha düşüktür. Denklem 3.22 sayesinde elde edilen sonuçlardan, yeniden kıvrımlı petek yapısının modülü kolaylıkla hesaplanabilir;

$$E_z = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{\sigma}{\frac{\Delta z}{H-L.\cos \theta}} = \frac{\sigma.(H-L.\cos \theta)}{(2.\Delta z_1 + \Delta z_2)} \quad (3.25)$$

Geometrinin etkin modül üzerindeki etkisini değerlendirmek için $\frac{E_z}{E_s}$ kullanılır. Burada E_z , ökzetik yapının z yönündeki etkin modülünü, E_s ise katı malzemenin modülünü temsil etmektedir. Tasarım parametrelerinin etkin modül E_z üzerindeki etkilerini göstermek için şekil 3.19'a bakılabilir.



Şekil 3.19. Farklı tasarımların bası yükü altında E_z/E_s etkin modülünün değişimi $L=5\text{mm}$, $t=1\text{mm}$, $\sigma=10\text{kPa}$, $E=114\text{ GPa}$, $G=43\text{ GPa}$ (Yang ve ark. 2015)

$\frac{H}{L}$ oranı arttıkça ve yeniden kıvrım açısı θ azaldıkça yapının etkili modülünün arttığı açıktır. Bu sonuç sezgiseldir, çünkü yeniden kıvrımlı çubukların azaltılmış eğilme momenti ve z'deki toplam boyutun artması, şekil değiştirme değerlerinin azalmasına neden olacaktır. İlgi çekici olan bir diğer nokta ise, gerilim seviyesinin bütün tasarım uzayı üzerinde etkin modüle önemli bir etkisinin olmamasıdır. Bu, Poisson oranlarının gözlemlenmesi ile biraz farklıdır ve sapmanın doğrusal olmasının gerçekçi stres seviyelerinde yeterince küçük olması nedeniyle açık bir şekilde açıklanabilir.

Küçük sapma Timoshenko modelini kullanan önceki çalışmalardan, z-yönünde bası yükü altında yeniden kıvrımlı ökzetik çekirdeklerin etkili modülü şu şekilde hesaplanmaktadır (Yang ve ark. 2013) ki bu da büyük sapma modelini kullanan denklem 3.25 ile kıyaslandığında %1'den daha az hata ile sonuçlanan 3.26 denklemini verecektir;

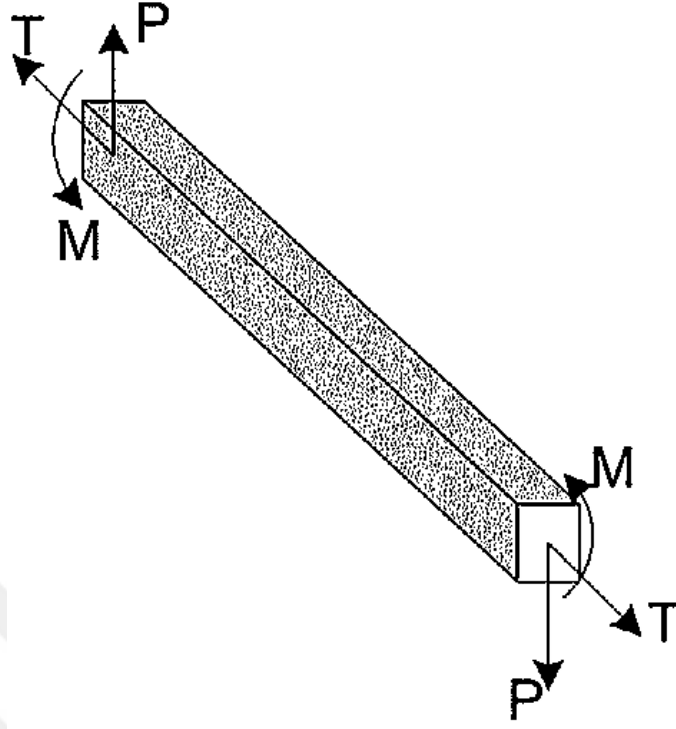
$$E_z = \frac{(\alpha - \cos \theta)}{\frac{2\alpha L^2 \sin^2 \theta}{E t^2} + \left(\frac{L^4}{2 E t^4} + \frac{3 L^2}{5 G t^2} \right) \sin^4 \theta} \quad (3.26)$$

Bası Dayanımı

Yang ve arkadaşlarının (2013) önceki çalışmalarında kullanılan analiz yöntemini takiben, uzaktan gerilim altında yeniden kıvrımlı çubuklar daha kritik yükleme koşullarına tabidir ve bunun için analiz edilmiştir. Şekil 3.20'de gösterildiği gibi kayma ve normal kuvvetlerin birleşik yüklemesi altında, çubuk üzerindeki temel Von Mises stresi şu şekilde ifade edilebilir (Yang ve ark. 2013):

$$\sigma_1 = \frac{\sigma}{2} + \sqrt{\frac{\sigma^2}{4} + \tau^2} \quad (3.27)$$

Burada σ ve τ sırasıyla, çubuk üzerindeki normal ve kayma gerilmelerini temsil etmektedir; σ_1 ise asal gerilmedir. Burada karşılanması gereken asıl kriter unutulmamalıdır: $\sigma_1 < \sigma_y$, burada σ_y katı malzemenin akma dayanımıdır.



Şekil 3.20. Yeniden kıvrımlı çubuğun yüklenmesi (Yang ve ark. 2015)

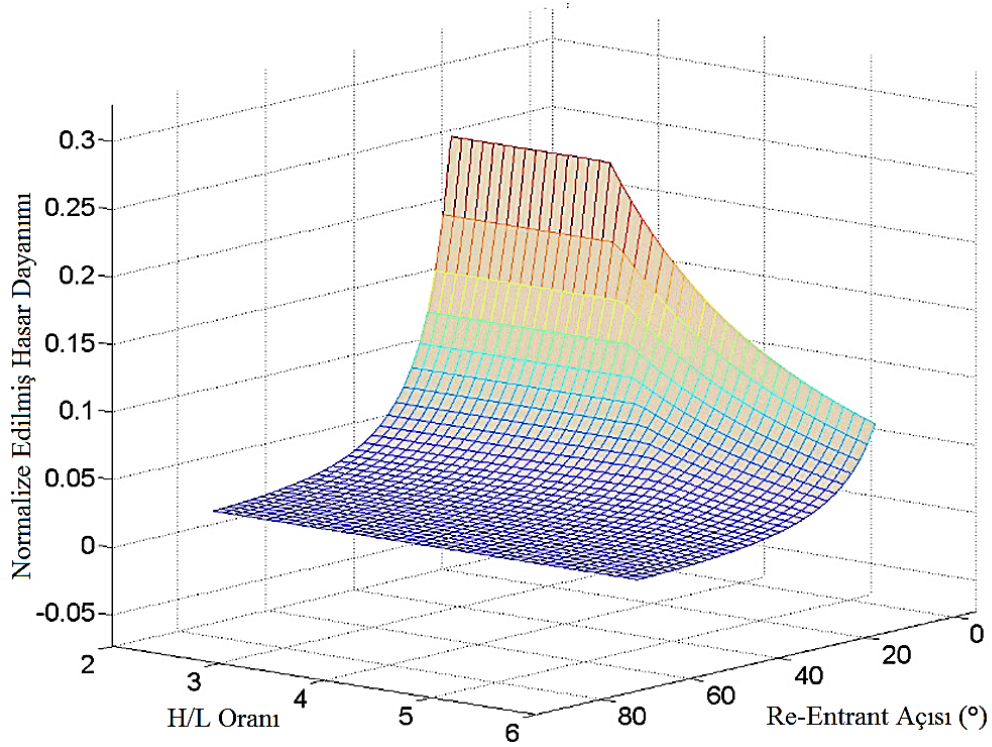
z yönünde bası yükü altındaki yapı için maksimum bası kuvveti F_z şu şekilde hesaplanmaktadır;

$$\frac{F_z \cdot L}{8} \cdot \sin \theta = \frac{\left(\sigma_y^2 - \frac{9 \cdot F_z^2 \cdot \sin^2 \theta}{64 \cdot t^4} \right) \cdot t^3}{4 \cdot \sigma_y} - \frac{F_z^2 \cdot \cos^2 \theta \cdot \sigma_y}{\left(64 \cdot \sigma_y^2 - \frac{9 \cdot F_z^2 \cdot \sin^2 \theta}{t^4} \right) \cdot t} \quad (3.28)$$

Daha sonra F_z değeri denklem 3.28 sayısal olarak çözülerek elde edilebilir. Bu değer elde edilmesiyle de z yönündeki gerilme değeri σ_z aşağıdaki denklem kullanılarak elde edilebilir:

$$\sigma_z = \frac{F_z}{2 \cdot L^2 \cdot \sin^2 \theta} \quad (3.29)$$

Denk. 3.29 sadece yeniden kıvrımlı çubukların hasarını dikkate alırken, sıkıştırma altında dikey çubuklar da burkulma yoluyla elastik bir hasara maruz kalabilir. Elastik hasar modu göz önüne alındığında, yeniden kıvrımlı ökzetik hücresel yapıların z-yönünde bası hasarı dayanımı şekil 3.21'de gösterilmektedir. Yeniden kıvrım açısı θ büyüdükçe yapının mukavemeti de azalır. Ayrıca, küçük θ seviyelerinde, $\frac{H}{L}$ oranı büyüdüğünde yapı elastik burkulma hasarına daha yatkındır.



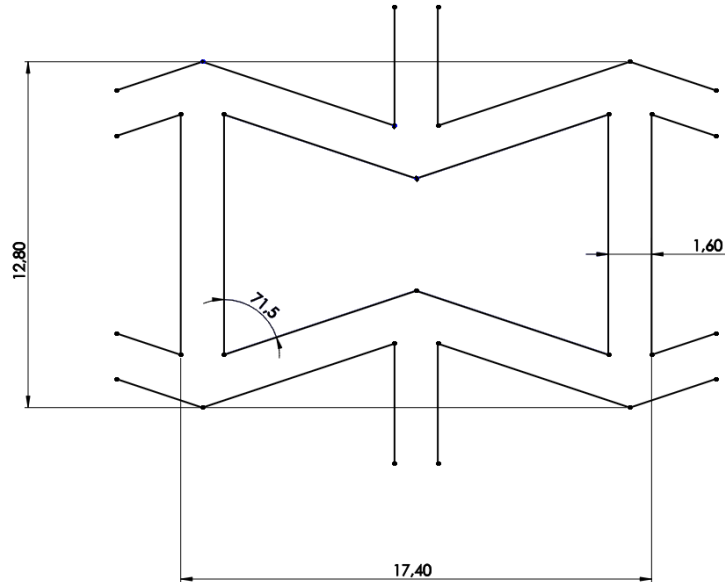
Şekil 3.21. Farklı tasarımlarda z yönündeki hasar dayanımı $L=5\text{mm}$, $t=1\text{mm}$, $E=114\text{ GPa}$, $G=43\text{ GPa}$ (Yang ve ark. 20015)

Sayısal hesaplamalarda kullanılan bu temel formüller ve bilgiler verildikten sonra doktora çalışmasında kullanılan yeniden kıvrımlı ökzetik çekirdek tasarımına geçebiliriz. Özellikle bu yapının bu kadar detaylı incelenmesindeki temel sebeplerin başında yapının sahip olduğu üstün kombine avantajları gelmektedir. Sandviç yapıda çekirdek olarak kullanımında yapıya iyi bir mukavemet ve çok üstün bir enerji

sönümleme yeteneği kazandıran bu çekirdek geometrisi, yapı içindeki boşluk ve gözenekleri ile de birçok ergonomik ve tasarlanabilir kullanım avantajına da sahiptir.

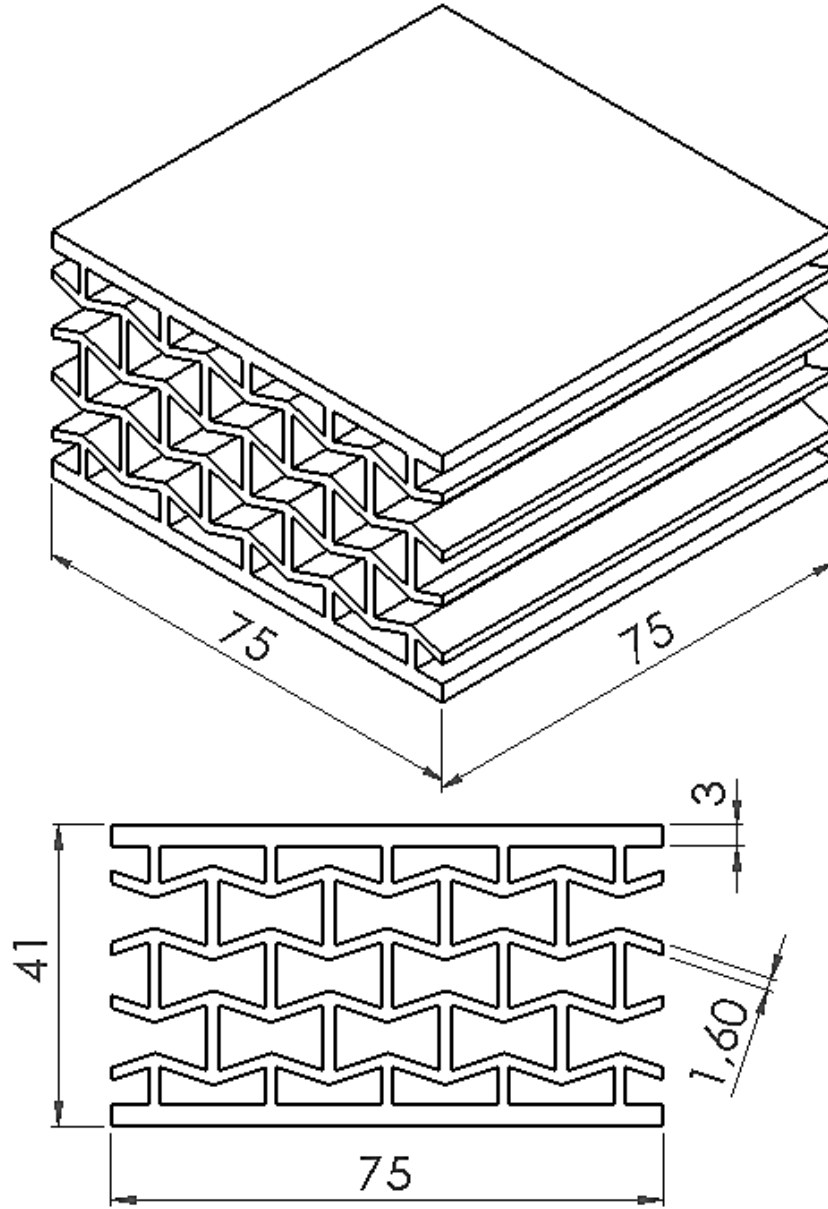
Bu doktora çalışmasında ana tasarım kriterleri, standartlarda belirtilen numune ölçüleri olmakla birlikte, yapıları oluşturacak olan çekirdeklerin de sahip oldukları özellikleri yapı içinde gösterebileceği ölçüde bir yoğunluk ve ebata sahip olmalarıdır. Bu sebeple sandviç yapıların çekirdek geometrileri tasarlanırken çekirdekte en az 3 sıra boşluk patern geometrisine sahip bir tasarım elde edilmeye çalışılmıştır. Bu da bazı çekirdek geometrisi birim hücrelerinin daha büyük bazılarının ise daha küçük olmasına sebebiyet vermiştir. Fakat çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar yapının ağırlığına ve izafi yoğunluğuna göre kıyaslanacağından bir sorun teşkil etmemektedir.

Bu açıklamalardan sonra çekirdek geometrisine bakacak olursak; tasarlanan yeniden kıvrımlı çekirdek geometrisin birim hücresine ait ölçüler aşağıda şekil 3.22’de gösterilmektedir.



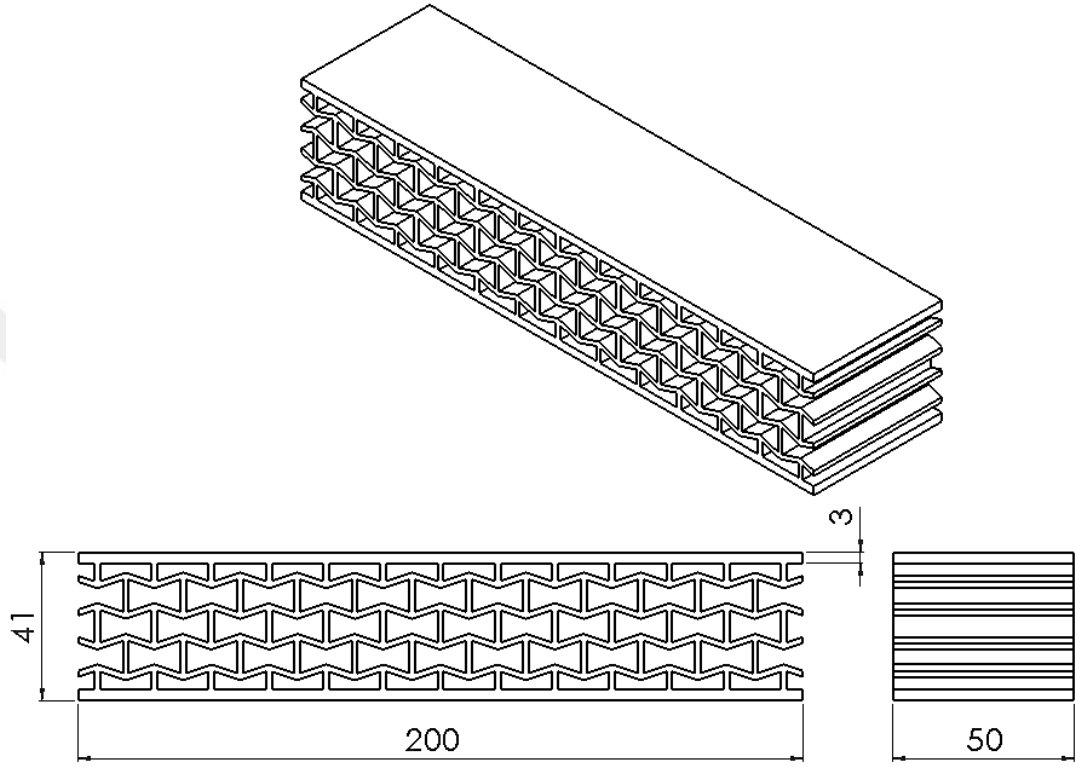
Şekil 3.22. Yeniden kıvrımlı çekirdek geometrisine ait tek hücrenin ölçüleri

Tek hücre ölçüleri verilen bu geometriye ait, ASTM D7336/D7336M-16 standardına uygun hazırlanmış test numunesinin tasarımı ve ölçüleri aşağıda şekil 3.23'te verilmektedir. Yeniden Kıvrımlı çekirdek geometrisine sahip numunenin izafi yoğunluğu 0,402'dir.



Şekil 3.23. ASTM D7336/7336M-16 standardına uygun olarak tasarlanan yeniden kıvrımlı çekirdek geometrisine sahip numune ölçüleri

Aynı geometri ile ASTM C393/C393M-16 standardına uygun olarak tasarlanan numune tasarımı ve ölçüleri aşağıda şekil 3.24’te verilmiştir. Numune ölçüleri 50mm x 200mm x 41mm olmakla birlikte alt ve üstteki yüz plakaları kalınlığı 3mm’dir

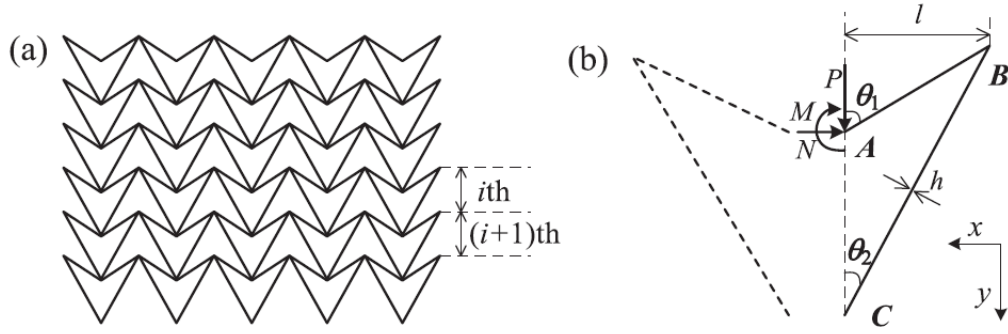


Şekil 3.24. ASTM C393/C393M-16 standardına uygun olarak tasarlanan yeniden kıvrımlı çekirdek geometrisine sahip 3-Nokta eğilme numunesi ölçüleri

3.5.4. Çift Ok Kafa Çekirdek Yapıya Sahip Sandviç Yapı Tasarımı

Bu çalışmada ele alınan çift ok kafa ökzetik yapı, aşağıda şekil 3.25a'da iki boyutlu hali gösterildiği üzere, ilk olarak Larsen ve ark. (1996) tarafından ortaya atılmıştır. Dikey eksene göre simetrik bir birim hücre yapısı ise şekil 3.25b'de gösterilmektedir. Burada geometrik parametreler şu şekilde tanımlanabilir: θ_1 ve θ_2 , AB ve BC eğimli dikmeler ile dikey eksen AC arasındaki karşılık gelen açılarını belirtir ve l , A ve B iki köşe arasındaki yatay mesafedir. Aksi belirtilmedikçe, hücre duvarları h kalınlığında üniform

olduğunu varsaymak doğru olacaktır (bu durum fonksiyonel derecelendirilmiş hücre geometrilerinde farklılık gösterecektir.). Şekil 3.25'te gösterilen üniform bir Çift Ok Kafa geometrisi için, Young modülü, Poisson oranı ve akma gerilimi için analitik ifadeler aşağıdaki gibi türetilbilir (Qiao ve Chen 2015).



Şekil 3.25. Çift ok kafa geometrisine sahip ökzetik yapının a) Şematik gösterimi b) Birim hücre yapısı gösterimi (Qiao ve Chen 2015).

Çift Ok Kafa Geometrisi için Elastik Sabitler ve Akma Dayanımı

Şekil 3.25b'de gösterilen A noktasından uygulanan $2 \cdot P_A = 2 \cdot \sigma_\infty \cdot l \cdot b$ (burada b , düzlem dışı genişliktir) dikey kuvvetinden kaynaklanan ve çekirdek geometrisine etki eden bir (σ_∞) gerilim olduğunu varsayalım. Simetri nedeniyle, birim hücrenin sadece yarısı (yani A-B-C yapısı) dikkate alınır ve A'nın yatay yer değiştirmesi ve dönmesi sırasıyla reaksiyon kuvveti (F_A) ve reaksiyon momentleri (M_A) ile sınırlanır. Ayrıca C köşesi sabitlenir. A noktasının dikey deplasmanı u_x^A olarak, B noktasının yatay deplasmanı u_x^B olarak ifade edilirse, x ve y 'deki normal şekil değiştirmeler şu şekilde verilebilir;

$$\varepsilon_y = \frac{u_y^A \cdot \sin \theta_1 \sin \theta_2}{l \cdot \sin(\theta_1 - \theta_2)} \quad (3.30)$$

$$\varepsilon_x = \frac{u_x^B}{l} \quad (3.31)$$

Buna göre, y yönündeki makroskopik Poisson oranı ve Young modülü için şu ifadeler kullanılabilir,

$$\nu_{xy} = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y} = -\frac{1}{\tan \theta_1 \cdot \tan \theta_2} \quad (3.32)$$

$$E_y = \frac{\sigma_\infty}{\varepsilon_y} = \frac{3 \cdot E_s \cdot I}{b \cdot l^3} \cdot \alpha(\theta_1, \theta_2) \quad (3.33)$$

Burada E_s çekirdeği oluşturan katı malzemenin Young modülünü, I ise atalet momentini ifade etmektedir ve ;

$$\alpha = -\frac{4 \cdot (\cos \theta_1 - \cos \theta_2)}{\sin \theta_1 \cdot \sin \theta_2} - \frac{(\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 - 1)^2 \cdot (\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 - 3)}{\sin \theta_1 \sin \theta_2 \cdot (\cos \theta_1 - \cos \theta_2)} + \frac{(\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 - 3) \cdot (\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 - 1)}{(\cos \theta_1 - \cos \theta_2)} \quad (3.34)$$

olarak tanımlanır.

Y yönünde tek eksenli sıkıştırmaya maruz kalan ökzetik yapının akma dayanımı için, hem üst sınır hem de alt sınır çözümler elde edilebilir. Şekil 3.25'ten, AB ve BC' nin uçlarında dört plastik mafsall oluştuğunda yapının tamamen plastik bir hasara maruz kaldığı anlaşılabacaktır. Sırasıyla θ_1 ve u_y^A 'daki küçük artışları $\delta\theta_1$ ve δu_y^A olarak ifade edelim. Plastik dağılma teorisine göre, P_A kuvveti tarafından yapılan iş, dört mafsaldaki plastik dağılma ile ilişkilidir;

$$2 \cdot M_p \cdot \delta\theta_1 = P_A \cdot \delta u_y^A \quad (3.35)$$

burada M_p mafsallarla ilişkili plastik momenttir. Geliştirilmiş dört plastik mafsall nedeniyle petek veriminin kinematik analizi;

$$\delta u_y^A = \frac{\sin(\theta_1 - \theta_2) \cdot l}{\sin \theta_1 \cos \theta_2} \cdot \delta \theta_1 \quad (3.36)$$

Denklem 4.336'yı denklem 4.35'te yerine koyarsak ve $P_A = \sigma_\infty \cdot l \cdot b$ olarak alırsak, akma gerilmesinin üst sınır denklemi şu şekilde elde edilir;

$$\sigma_p^U = \sigma_\infty = \frac{2 \cdot M_p \cdot \sin \theta_1 \cos \theta_2}{b \cdot l^2 \cdot \sin(\theta_1 - \theta_2)} \quad (3.37)$$

Akma dayanımının alt sınırının denklemini elde etmek için, sadece eşitliği dikkate almak gerekir. A noktasında verilen yükler P_A , F_A ve M_A için, A,B,C noktası boyunca maksimum eğilme momentinin A noktasında meydana geldiği bulunmuştur ($M_{\max} = M_A$).

$$M_{\max} = M_A = P_A \cdot l \cdot K(\theta_1, \theta_2) \quad (3.38)$$

Buradan da; ökzetik yapının $M_{\max} = M_A$ olduğunda akmaya başlayacağı görülmektedir. Daha sonra bu eşitlik ile denklem 3.38 birleştirilerek yeniden düzenlendiğinde akma dayanımı alt sınırı şu şekilde türetilir;

$$\sigma_p^L = \frac{M_p}{K(\theta_1, \theta_2) b \cdot l^2} \quad (3.39)$$

Dikdörtgen kesitli bir kiriş için şu denklem yazılabilir;

$$M_p = \frac{b \cdot h^2}{4} \cdot \sigma_{sy} \quad (3.40)$$

Burada σ_{sy} katı malzemenin akma dayanımını temsil etmektedir. Böylece, denklem 3.37 ve denklem 3.39'a göre;

$$u_p^U = \sigma_\infty = \frac{\sigma_{ys} \cdot \sin \theta_1 \cdot \cos \theta_2}{2 \cdot \sin(\theta_1 - \theta_2)} \cdot \left(\frac{h}{l}\right)^2 \quad (3.41)$$

$$\sigma_p^L = \frac{\sigma_{ys}}{4 \cdot K(\theta_1, \theta_2)} \cdot \left(\frac{h}{l}\right)^2 \quad (3.42)$$

Yapının sonsuz olduğu varsayıldığında, Çift Ok Kafa ökzetik çekirdeğin yoğunluğu şu şekilde elde edilebilir;

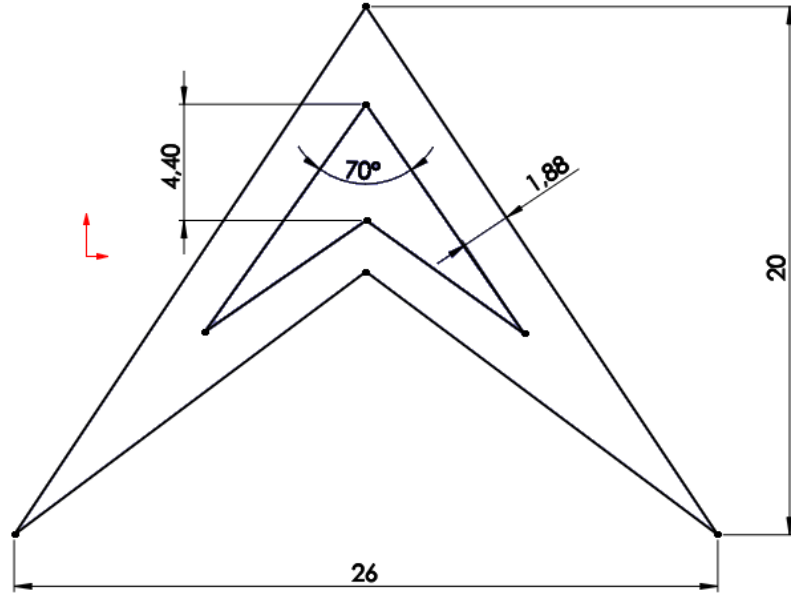
$$\rho = \frac{h \cdot (\sin \theta_1 + \sin \theta_2)}{l \cdot \sin(\theta_1 - \theta_2)} \quad (3.43)$$

Böylece denklem 3.41'deki akma sınırı denklemi yeniden düzenlendiğinde;

$$u_p^U = \frac{\sigma_{ys} \cdot \sin \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \cdot \sin(\theta_1 - \theta_2)}{2 \cdot (\sin \theta_1 + \sin \theta_2)^2} \cdot \rho^2 \quad (3.44)$$

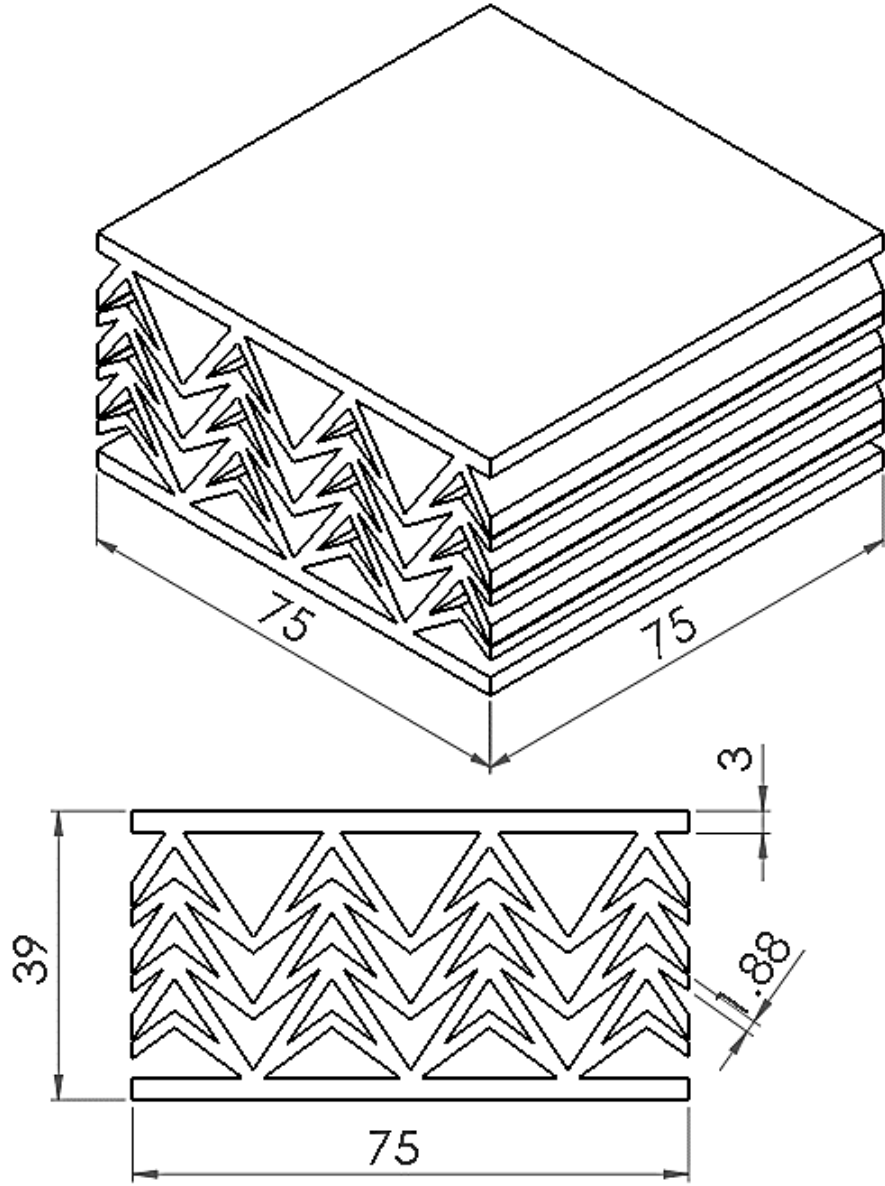
olarak elde edilecektir.

Verilen bu matematiksel bilgiler ışığında, bu çalışmada kullanılmak üzere tasarlanan Çift Ok Kafa ökzetik çekirdek geometrisine ait birim hücre ölçüleri aşağıda şekil 3.26'da gösterilmektedir.



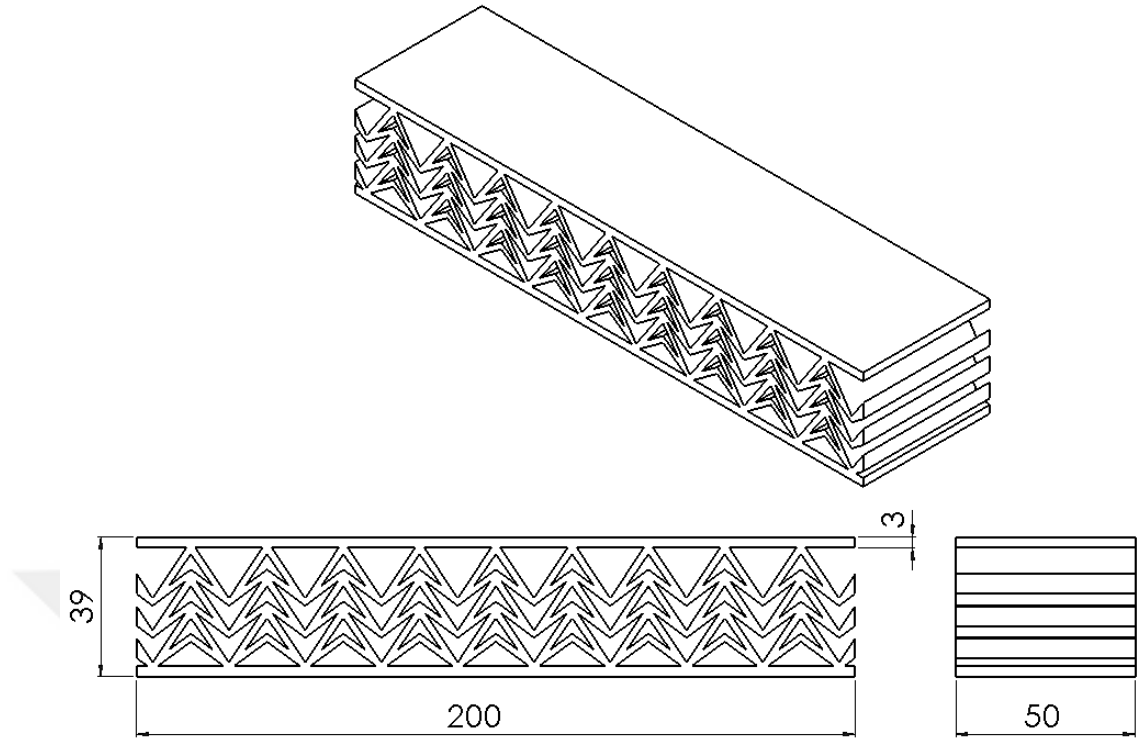
Şekil 3.26. Çift ok kafa çekirdek geometrisine ait tek hücrenin ölçüleri

Tek hücre ölçüleri verilen bu geometriye ait, ASTM D7336/D7336M-16 standardına uygun hazırlanmış test numunesinin tasarımı ve ölçüleri aşağıda şekil 3.27’de verilmektedir. Çift Ok Kafa çekirdek geometrisine sahip numunenin izafi yoğunluğu 0,519’dur.



Şekil 3.27. ASTM D7336/7336M-16 standardına uygun olarak tasarlanan çift ok kafa çekirdek geometrisine sahip numune ölçüleri

Aynı geometri ile ASTM C393/C393M-16 standardına uygun olarak tasarlanan numune tasarımı ve ölçüleri aşağıda şekil 3.28’de verilmiştir. Numune ölçüleri 50mm x 200mm x 39 mm olmakla birlikte alt ve üstteki yüz plakaları kalınlığı 3mm’dir

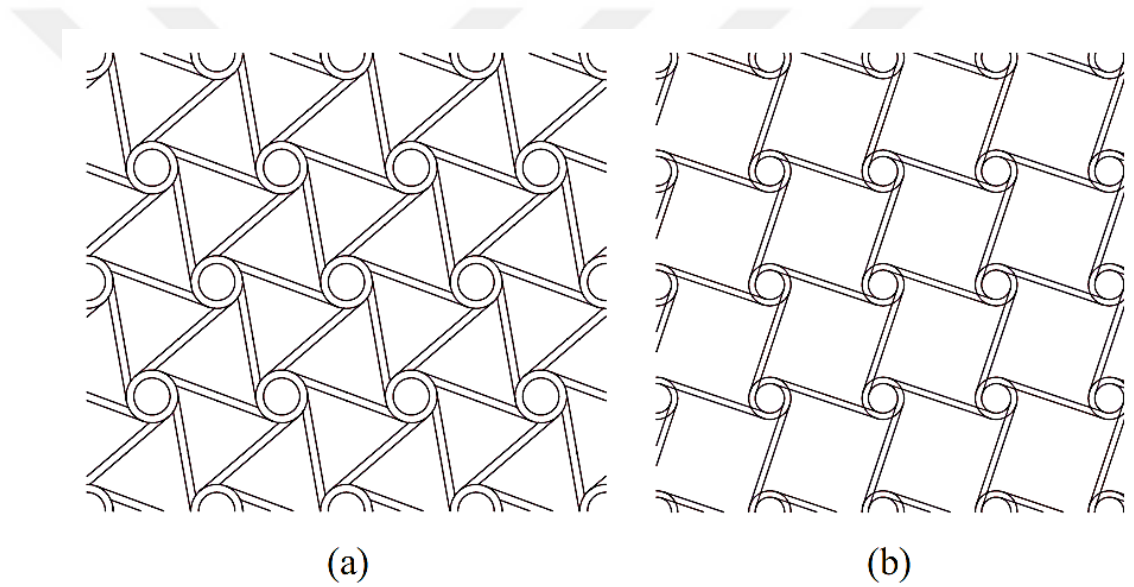


Şekil 3.28. ASTM C393/C393M-16 standardına uygun olarak tasarlanan çift ok kafa çekirdek geometrisine sahip 3-Nokta eğilme numunesi ölçüleri

3.5.5. Tetrachiral Çekirdek Yapıya Sahip Sandviç Yapı Tasarımı

Chiral petek yapılar negatif düzlem içi Poisson oranı gösteren ökzetik hücresel malzemelerdir. Bu peteklerin teorik ve deneysel araştırılması ilk olarak Prall ve Lakes (1997) tarafından yapılmıştır. Mekanik açıdan bakıldığında, chiral yapılardan oluşan petekler daha önce simetri kısıtlamaları nedeniyle teorik olarak düzlem içi Poisson oranı -1 olan yapılar olarak tanımlanmıştır. Bu tip azaltılmış simetriye sahip petekler anizotropik olabilir ancak nadiren de olsa özel ortotropik olarak karşımıza çıkabilir. Negatif Poisson oranı, geleneksel altıgen petek yapılarda gözlemlenen antiklastik veya eyer şeklindeki davranışın aksine, düzlem dışı yönde kubbe şeklinde veya sinklastik bir bükülme davranışı gibi chiral yapıya bazı benzersiz özellikler verir. Kiral petekler geleneksel altıgen peteklere göre önemli avantajlar sağlar, bası ve kayma mukavemetleri silindirler ve bağlar arasında kısmen ayrılmıştır ve bal peteğinin hem

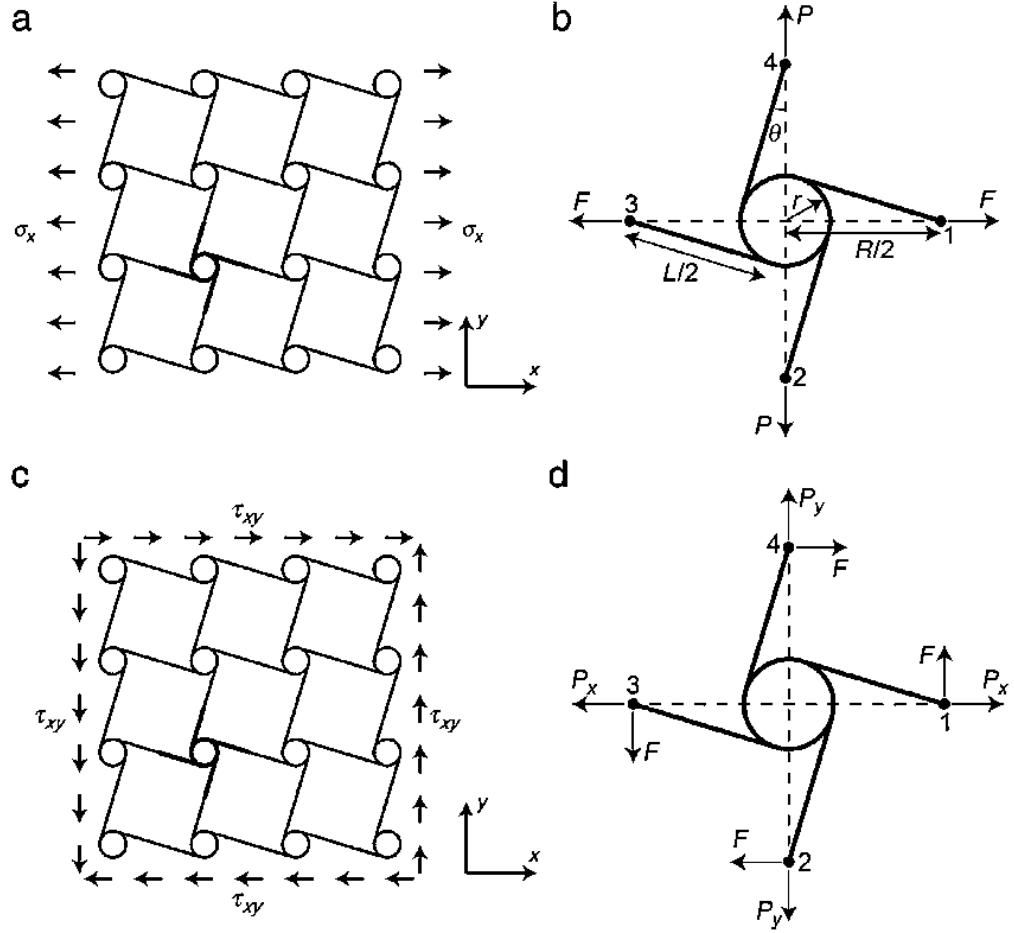
eksen dışı deformasyonları hem de elektromanyetik işlevselliği bal peteği geometrisinin çeşitliliği ile ayarlanabilir. Kiral petekler geleneksel altıgen peteklere göre önemli avantajlar sağlar, bası ve kayma mukavemetleri silindirler ve bağlar arasında kısmen ayrılmıştır ve bal peteğinin hem eksen dışı deformasyonları hem de elektromanyetik işlevselliği bal peteği geometrisinin çeşitliliği ile ayarlanabilir. Aynı zamanda düzlem içi kesme modülünde ve batma direncinde artışa da neden olur (Miller ve ark. 2010, Joshi 2013) Farklı geometrilerde chiral yapılar mevcut olsada en bilinen ve en yaygın kullanılan chiral yapı örnekleri aşağıda şekil 3.29’da gösterilen “hexachiral” ve “tetrachiral” yapılarıdır.



Şekil 3.29. a) Hexachiral ve b) Tetrachiral ökzetik yapılarının geometrilerinin şematik gösterimi (Bacigalupo ve Gambarotta 2014)

Chiral balpeteği yapıların deneysel ve nümerik olarak incelenmesiyle, $-1 < \nu < 0$ aralığında poisson oranlarına sahip oldukları ortaya konmuştur. X-yönünde tek eksenli bir uzak-alan gerilimine maruz kalan, altta yatan bir kare ağa dayanan tetra-chiral yapının şematik gösterimi, Şekil 3.30a'da gösterilmiştir. Bu geometriye karşılık gelen birim hücrenin serbest cisim diyagramı (SCD), şekil 3.30b 'de gösterilmiştir. Birim hücre, rijit olduğu varsayılan bir silindir (düğüm) ve dört yarım bağ içerir. Yapının 180° dönme simetrisi ve mikroskopik gerilmelerin bileşenleri nedeniyle, birim hücrenin dört

harici kesme noktasının tümü (yani, Şekil 3.30'daki 1'den 4'e kadar olan noktalar) keyfi bir makroskopik stres durumu altında momentsiz olmalıdır.



Şekil 3.30. a) x-yönü tek eksenli yükleme altında bir tetrachiral peteğin şematik gösterimi. b) Tek eksenli yükleme altında yapısal birim hücrenin serbest cisim diyagramı. c) x-y kesme yükü altında bir tetrachiral peteğin şematik gösterimi. (d) Kesme yükü altında yapısal birim hücrenin serbest cisim diyagramı (Mousanezhad ve ark. 2016)

Ayrıca, yapıya etki eden tek uzak alan gerilimi x-yönü boyunca olduğu için, tüm dış kesme noktaları, σ_x nedeniyle x yönü boyunca zıt yönlere sahip bir çift kuvvet taşıyan noktalar 1 ve 2 dışında kuvvetsiz olmalıdır. Bu nedenle, birim hücrenin dış kesme noktalarına etki eden bilinmeyen kuvvetler ve momentler, Şekil 3.30b 'de gösterildiği gibi özetlenebilir, burada F , gerilimin uygulanmasının bir fonksiyonu olarak $F = \sigma_x \cdot R$

olarak belirlenebilir; burada R, iki bitişik silindir arasındaki merkezden merkeze mesafedir. Ayrıca, yapının Poisson oranını belirleyebilmek için, bir çift sanal kuvvet, P, birim hücrenin 2 ve 4 noktalarına eklenir. Birim hücrenin şekil değiştirme enerjisi şu şekilde verilir (Mousanezhad ve ark. 2016):

$$U = 2 \cdot \frac{(F \cdot \cos \theta)^2 \cdot L/2}{2 \cdot E_s \cdot A} + 2 \cdot \frac{(P \cdot \cos \theta)^2 \cdot L/2}{2 \cdot E_s \cdot A} + 2 \cdot \int_0^{L/2} \frac{(x \cdot F \cdot \sin \theta)^2}{2 \cdot E_s \cdot I} \cdot dx + 2 \cdot \int_0^{L/2} \frac{(x \cdot P \cdot \sin \theta)^2}{2 \cdot E_s \cdot I} \cdot dx \quad (3.45)$$

Burada E_s (daha önce bahsedildiği gibi) hücre duvarı malzemesinin Young modülünü, A, hücre duvarlarının enine kesit alanıdır (yani birim derinliği olan dikdörtgen bir enine kesit için, $A = t$), I hücre duvarının enine kesitinin atalet momentidir, ve $\theta = \tan^{-1} \left(\frac{2r}{L} \right)$ olmak üzere, Şekil 3.30b 'de gösterildiği gibi her bir bağ ile iki bitişik silindirin merkezlerini birleştiren çizgi arasındaki açıdır (Mousanezhad ve ark. 2016).

Daha sonra, $\frac{\partial U}{\partial F} \big|_{p=0}$ denklemiyle, nokta 1 'in nokta 3' e göre x- yönündeki toplam yer değiştirmesini şu şekilde bulabiliriz;

$$\delta_x = \frac{F \cdot L}{E_s \cdot A} \cdot \cos^2 \theta + \frac{F \cdot L^3}{12 \cdot E_s \cdot I} \cdot \sin^2 \theta \quad (3.46)$$

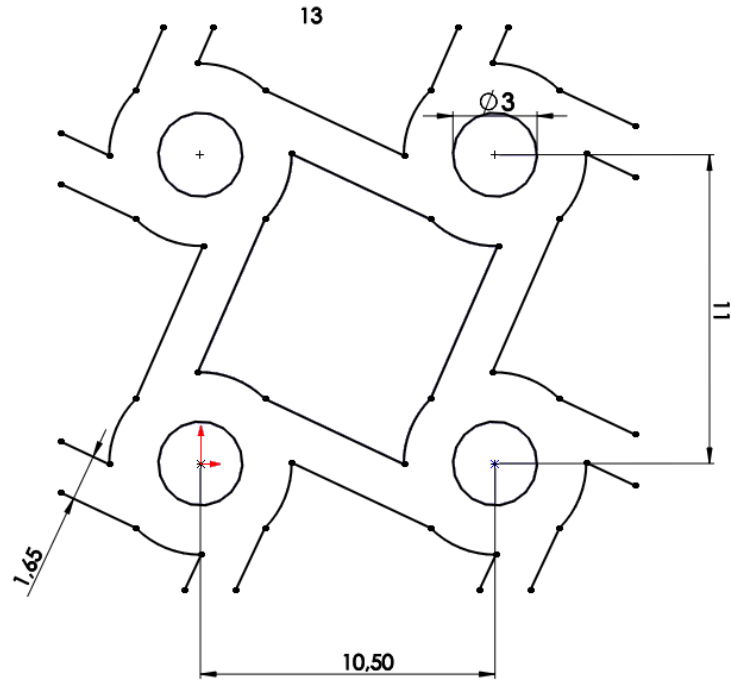
Bundan sonra, yapının x-yönünde ortalama birim şekil değişimini şu şekilde hesaplayabiliriz;

$$\varepsilon_x = \frac{\delta_s}{R} \quad (3.47)$$

Malzemenin Young modülü (E_s) tarafından normalleştirilen yapının Young modülü, daha sonra ortalama gerilim σ_x , ve ortalama birim şekil değişimi ε_x , oranı olarak tanımlanır ve şu şekilde elde edilir (Mousanezhad ve ark. 2016):

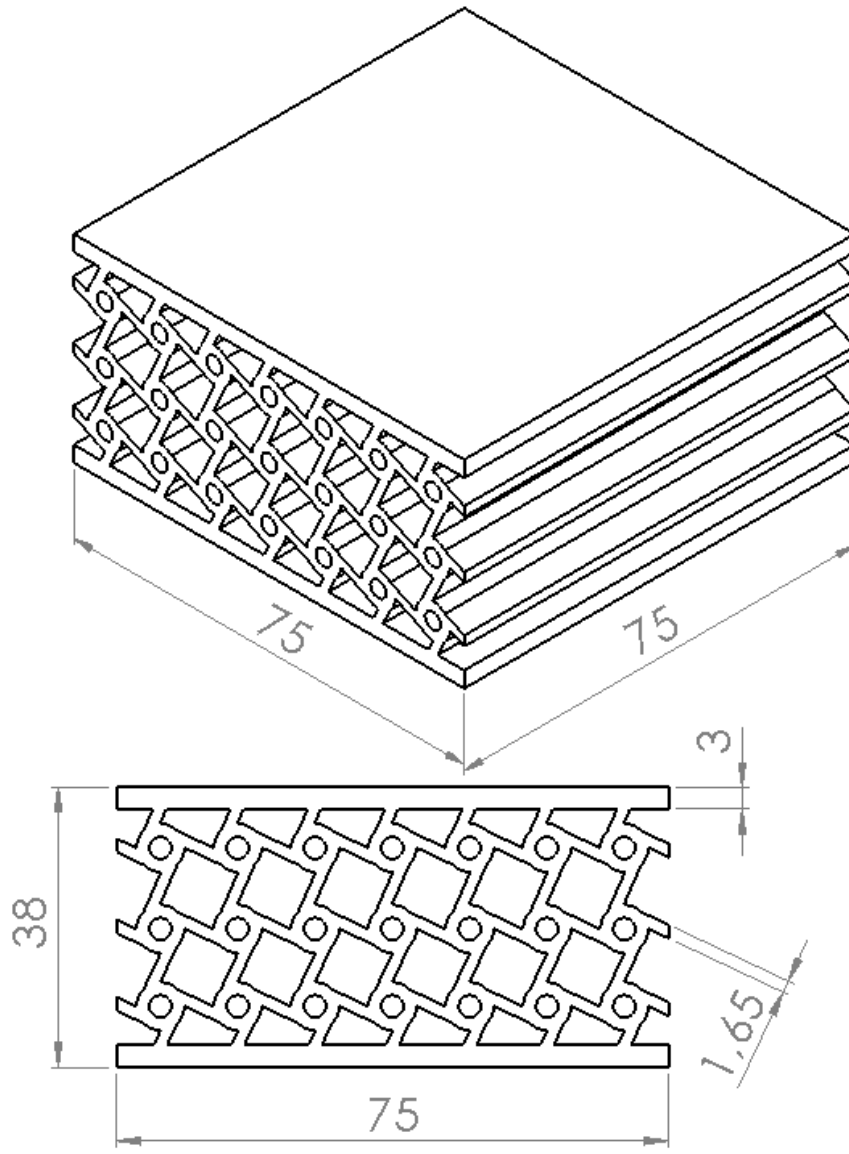
$$\frac{E_x}{E_s} = \frac{t/L}{\cos^2 \theta + \sin^2 \frac{\theta}{(t/L)^2}} \quad (3.48)$$

Verilen bu matematiksel bilgiler sonunda, bu çalışmada kullanılmak üzere tasarlanan Tetrachiral ökzetik çekirdek geometrisine ait birim hücre ölçüleri aşağıda şekil 3.31’de gösterilmektedir.



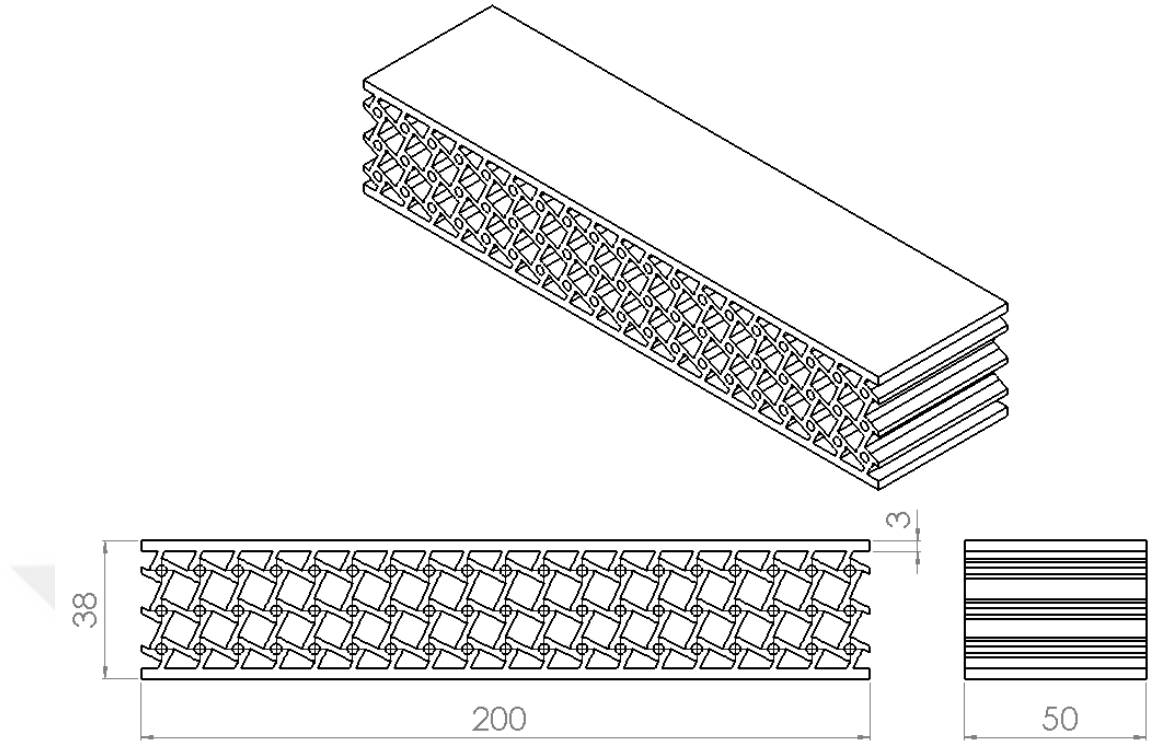
Şekil 3.31. Tetrachiral ökzetik çekirdek geometrisine ait tek hücrenin ölçüleri

Tek hücre ölçüleri verilen bu geometriye ait, ASTM D7336/D7336M-16 standardına uygun hazırlanmış test numunesinin tasarımı ve ölçüleri aşağıda şekil 3.32’de verilmektedir. Tetrachiral çekirdek geometrisine sahip numunenin izafî yoğunluğu 0,475’tir.



Şekil 3.32. ASTM D7336/7336M-16 standardına uygun olarak tasarlanan tetrachiral ökzetik çekirdek geometrisine sahip numune ölçüleri

Aynı geometri ile ASTM C393/C393M-16 standardına uygun olarak tasarlanan numune tasarımı ve ölçüleri aşağıda şekil 3.33'te verilmiştir. Numune ölçüleri 50mm x 200mm x 38 mm olmakla birlikte alt ve üstteki yüz plakaları kalınlığı 3mm'dir

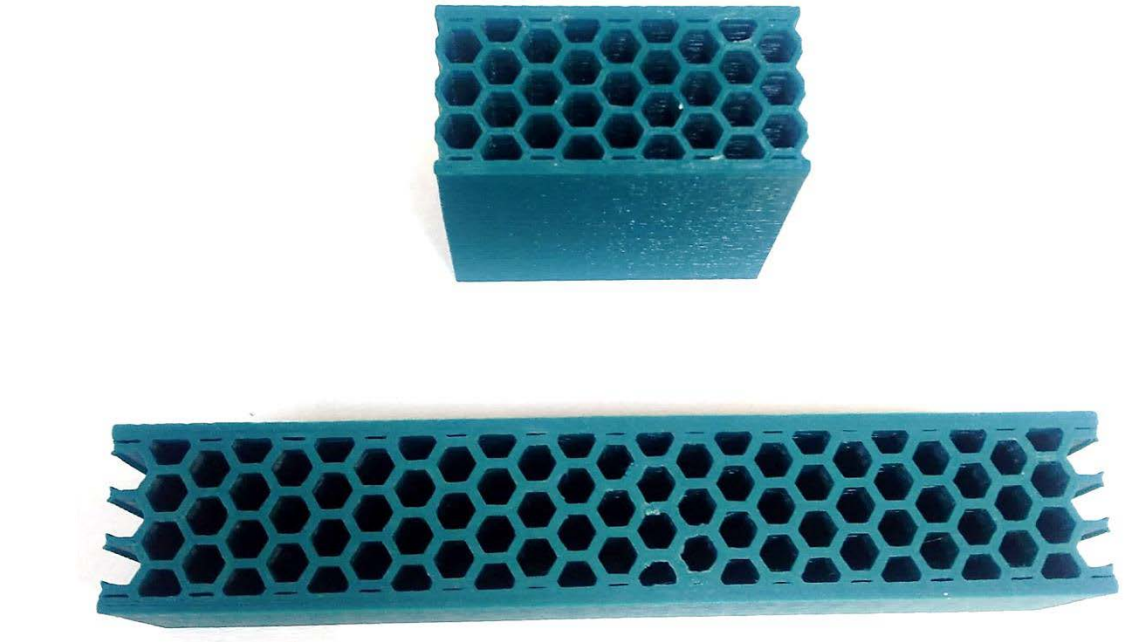


Şekil 3.33. ASTM C393/C393M-16 standardına uygun olarak tasarlanan tetrachiral ökzetik çekirdek geometrisine sahip 3-Nokta eğilme numunesi ölçüleri

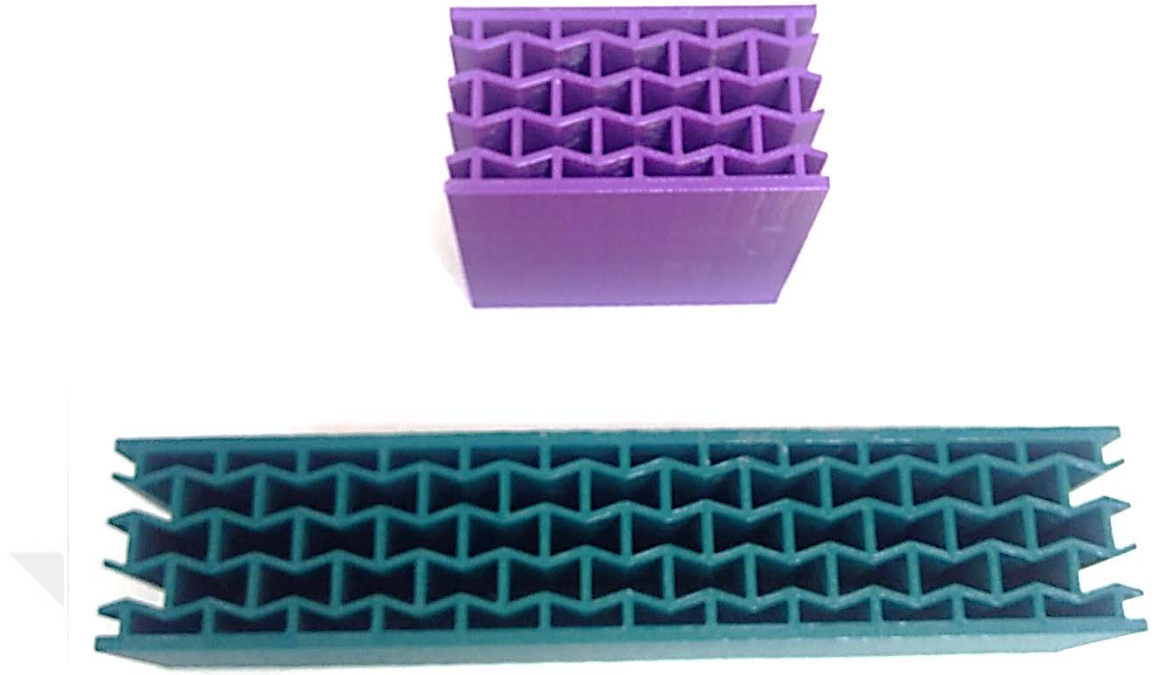
Bu çalışma kapsamında kullanılmak üzere tasarlanan sandviç yapı geometrileri genel bilgileri ile birlikte verilmiştir. Tasarımı verilen geometrilerin üretimi 3Boyutlu yazıcı vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Üretilen sandviç yapıların fotoğrafları sırasıyla şekil 3.34’te Sinüzoidal Oluklu, 3.35’te Altıgen Balpeteği, 3.36’da Yeniden Kıvrımlı 3.37’de Çift Ok Kafa ve 3.38’de Tetrachiral ökzetik çekirdekli olmak üzere verilmiştir.



Şekil 3.34. 3Boyutlu yazıcıdan üretilmiş sinüzoidal oluklu çekirdek yapıya sahip sandviç test numuneleri



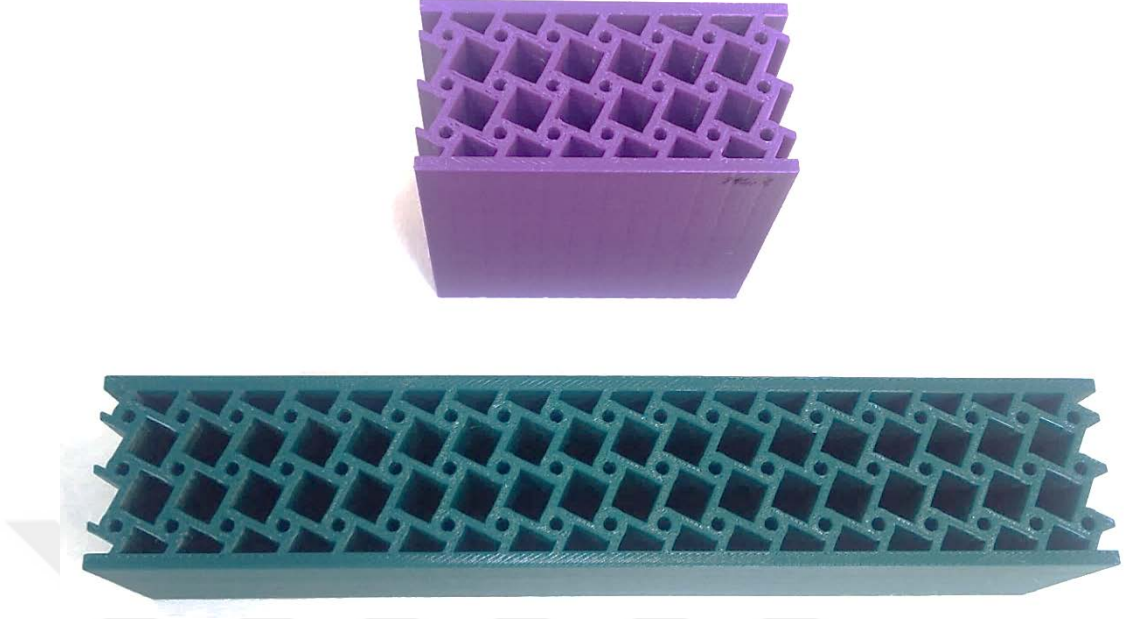
Şekil 3.35. 3Boyutlu yazıcıdan üretilmiş altıgen balpeteği çekirdek yapıya sahip sandviç test numuneleri



Şekil 3.36. 3Boyutlu yazıcıdan üretilmiş yeniden kıvrımlı çekirdek yapıya sahip sandviç test numuneleri



Şekil 3.37. 3Boyutlu yazıcıdan üretilmiş çift ok kafa çekirdek yapıya sahip sandviç test numuneleri



Şekil 3.38. 3Boyutlu yazıcıdan üretilmiş tetrachiral çekirdek yapıya sahip sandviç test numuneleri

3.6. Boyutlu Yazıcıda Üretilen Sandviç Yapıların Statik Deneyleri

Yukarıda üretim yöntemleri ve üretim mimarileri verilen test numuneleri ve sandviç yapıların mekanik deneyleri ile ilgili bilgiler ve veriler aşağıda verilmektedir.

3.6.1. Çekme Deneyi

ASTM D638-14 standardına uygun olarak üretilen çekme numunelerine ait çekme deneyleri Bursa Uludağ Üniversitesi Tekstil Mühendisliği Labaratuvarında bulunan, aşağıda şekil 3.39’da gösterilen Shimadzu Ag-X plus çekme cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Deneyler 10mm/dk sabit hızda ve oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.39. Çekme deneyinin gerçekleştirildiği universal çekme cihazı

3.6.2. Basma Deneyi

ASTM D695-15 standardına uygun olarak hazırlanan numunelere ait basma deneyleri Pega Otomotiv Süspansiyon San. Ve Tic. A.Ş. firmasında bulunan Zwick/Roell Z100 test cihazı ile, sabit 10mm/dk hızda ve oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Deney sistemi aşağıda şekil 3.40’da verilmektedir.



Şekil 3.40. Basma deneyinin gerçekleştirildiği universal test cihazı

3.6.3. Eğilme Deneyi

ASTM D790-17 standardına uygun olarak hazırlanan eğilme numunelerine ait 3 Nokta eğilme deneyleri yine Bursa Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği Laboratuvarında bulunan UTest Üniuersal test cihazı ile sabit 5mm/dk hızda ve oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.

3.6.4. Sandviç Numunelerin Statik Bası Deneyi

ASTM D7336/7336M-16 standardına uygun olarak 3 Boyutlu yazıcı vasıtasıyla üretilen sandviç bası numunesine ait bası deneyleri Sirena Marine firması bünyesinde bulunan Shimadzu AGS-X Test cihazı ile 5mm/dk hızda ve oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Deneylere ait görüntülerden biri aşağıda şekil 3.41’de verilmektedir.



Şekil 3.41. Sandviç bası deneylerinin gerçekleştirildiği universal test cihazı

3.6.5. Sandviç Numunelerin Statik 3 Nokta Eğilme Deneyi

ASTM C393/C393M-16 standardına uygun olarak 3 Boyutlu yazıcı vasıtasıyla üretilmiş sandviç eğilme numunelerine ait 3 Nokta eğilme deneyleri, Sirena Marine firması bünyesinde bulunan Shimadzu AGS-X Test cihazı ile 5mm/dk hızda ve oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Deneylere ait görüntülerden biri aşağıda şekil 3.42’de verilmektedir.

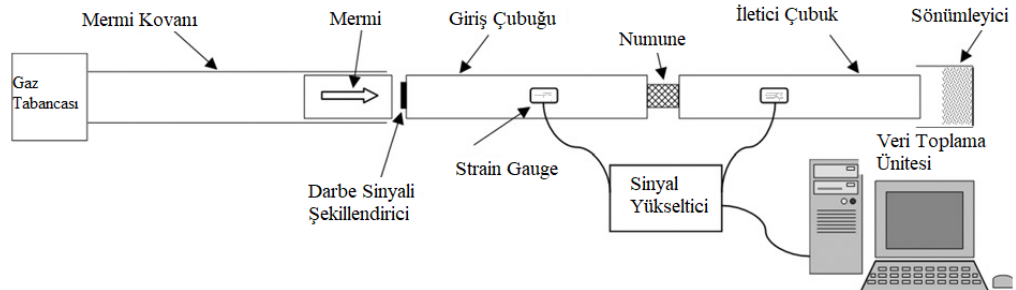


Şekil 3.42. 3-Nokta eğme deneyi gerçekleştirilen universal test cihazı

3.7. 3Boyutlu Yazıcıda Üretilen Sandviç Yapıların Dinamik Deneyleri

Sıklıkla kullanılan mühendislik malzemelerinin, üreticilerce belirtilen mekanik özellikleri genellikle quasi-statik yükleme koşulları için verilmektedir. Fakat yapılan çalışmalar sonucunda açıkça görülmüştür ki birçok malzeme, uygulanan yükün hızına bağlı olarak verdiği tepkilerin değiştiği görülmüştür. Örneğin quasi-statik yükleme altında sünek bir davranış sergileyen malzeme, yüksek yükleme hızlarında yüklendiğinde gevrek davranışa yakın bir özellik sergileyebilmektedir (Owens ve Tippur 2009, Khan ve ark. 2004, Chen ve ark. 1999). Bu nedenle çalışma kapsamında üretilen sandviç yapıların dinamik yükleme koşulları altındaki davranışlarını incelemek adına yine standartlara uygun olarak hazırlanmış bası ve 3-Nokta eğme numunelerini dinamik yükleme koşulları altında teste tabi tutmak gerekecektir.

Dinamik testler için genel olarak Split Hopkinson Bar da denilen ve Herbert Kolsky (1949) tarafından bilim dünyasında öne sürülen ve aşağıda şekil 3.43'te şematik olarak verilen bir test cihazı kullanılmaktadır. Lindholm (1971) alt limiti $\dot{\epsilon} = 10 \text{ s}^{-1}$ 'i olarak tanımlasa da genellikle 1 s^{-1} deformasyon hızı üzerinde oluşan bütün şekil değişimleri veya yüklemeler dinamik olarak kabul edilebilmektedir. Daha önceki çalışmalarımızda ürettiğimiz ve UMİMAG Laboratuvarlarında bulunan Split Hopkinson Bası Test cihazı bu deneyler için kullanılacaktır.



Şekil 3.43. H. Kolsky tarafından öne sürülen split hopkinson bar test düzeneğinin şematik gösterimi (Raj ve ark. 2009)

3.7.1. Dinamik Basma Deneyi

Daha önce de belirtildiği gibi, geçmiş çalışmalarımızda ürettiğimiz bir Split Hopkinson Bası (SHB) test cihazı üretilmiş ve UMİMAG Labaratuvarında kullanılmaktadır. Bu cihaz gerekli değişiklikler ve eklemelerin yapılmasıyla farklı malzemeler için dinamik yük uygulayan bir bası cihazına da dönüştürülebilmektedir. Labaratuvarımızda bulunan ve dinamik bası testleri için kullanılmak üzere dönüştürülmüş SHB çubuğu resmi şekil 3.44'te görülmektedir. Deneyler 15 bar gaz basıncı ile oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.44. SHB test düzeneğinden dönüştürülmüş dinamik bası test düzeneği

3.7.2. Dinamik Eğilme Deneyi

Yine bası deneyinde olduğu gibi SHB test düzeneğinin 3-Nokta eğilme deneyi aparatları eklenerek modifiyelendirilmesiyle elde edilen düzenek deneylerde kullanılmaktadır. Yine quasi-statik deneylerdeki standartlara uygun olarak üretilen sandviç numuneler test cihazına yerleştirilmiş ve yüksek yükleme hızlarındaki deneyler gerçekleştirilmiştir. Dönüştürülmüş deney düzeneği aşağıda şekil 3.45'te verilmektedir. Deneyler 15 bar gaz basıncı altında oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.



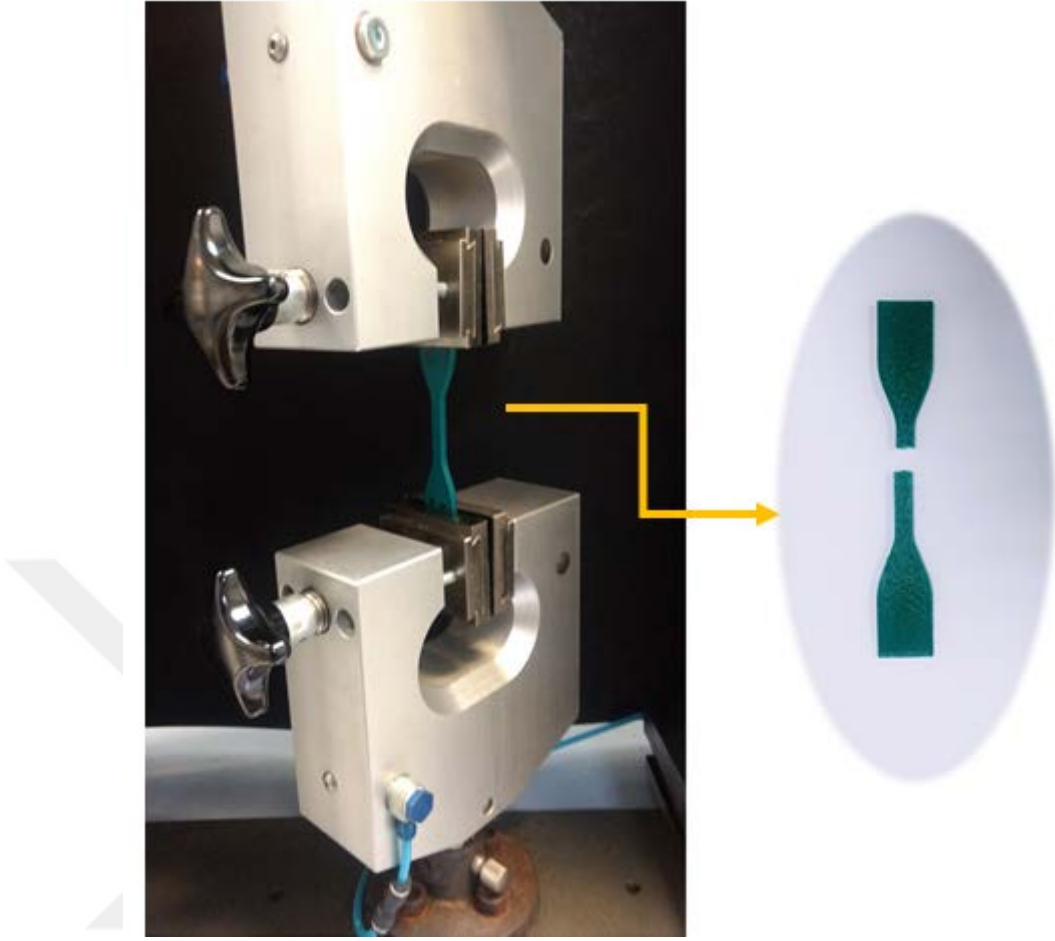
Şekil 3.45. SHB test düzeneğinden dönüştürülmüş dinamik 3-Nokta eğilme test düzeneği

4. BULGULAR

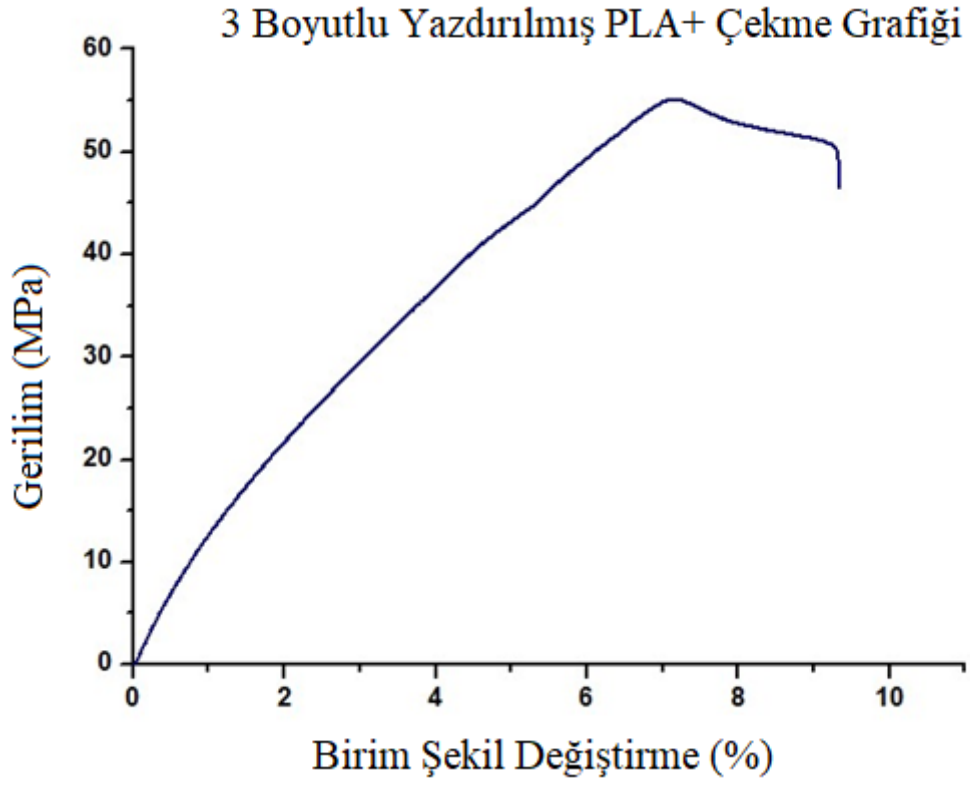
Bu bölümde yukarıda anlatılan deneylerin sonuçları açıklamalarıyla birlikte verilmiştir. Farklı çekirdek konfigürasyonlarına sahip sandviç yapıların standartlara uygun olarak mekanik özelliklerinin belirlenmesi adına gerekli testler yapılmış ve sonuçlar kıyaslama yapılarak incelenmiştir. Bu değerlendirmeler quasi-statik ve dinamik yükler altında gerçekleştirilen deneylerle ortaya konulmuştur. Yapılan bu farklı şekil değiştirme hızına sahip deneyler ile hem yapıların statik ve dinamik yükler altındaki davranışlarının farklılığı incelenmiş hem de farklı geometrideki sandviç yapıların mekanik özellikleri kıyaslanmıştır. Yapılan bu deneyler ile sandviç yapıların hem mukavemetleri hem de enerji sönmüleme kabiliyetleri hakkında veriler elde edilmiş ve bu veriler kıyaslanarak aktarılmıştır.

4.1. Statik Çekme Testi Sonuçları

Dördüncü kısımda da belirtildiği üzere ilk olarak 3 Boyutlu yazıcı ile üretilen çekme numuneleri statik çekme test cihazı ile test edilmiştir. Bu sayede belirlenen mimaride yazdırılan parçaların mekanik özellikleri ile ilgili veriler elde edilmiştir. Bu veriler sandviç yapıların sonlu elemanlar analizlerinde kullanılmıştır. Deneye ait resim aşağıda şekil 4.1’de verilirken deney sonucuna ait grafik şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4. 1. Çekme testi ve test sonucu numune hasarı



Şekil 4. 2. 3Boyutlu yazıcı ile üretilmiş çekme numunesine ait çekme testi sonuçları

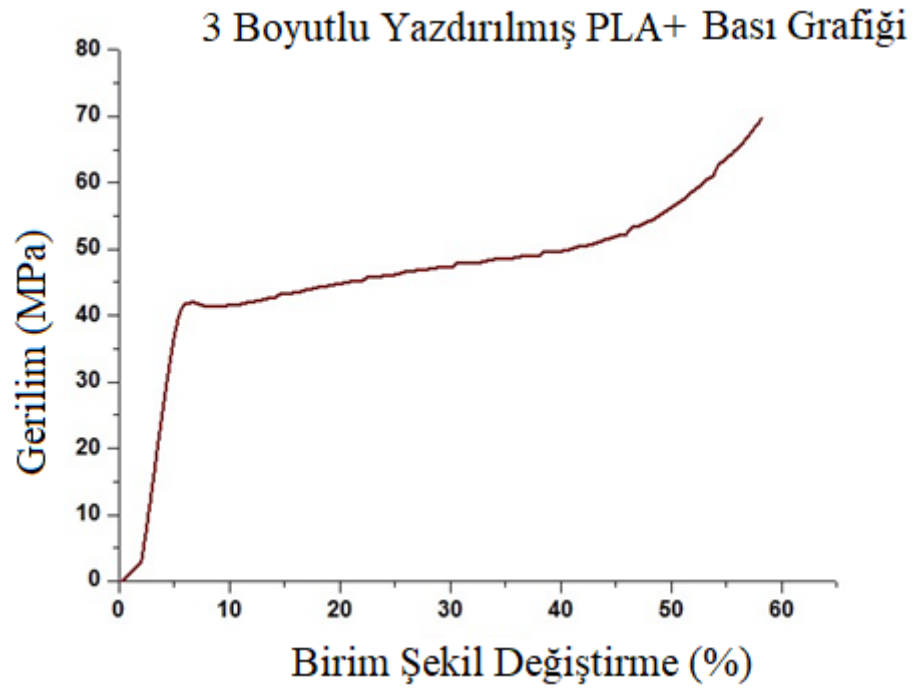
Elde edilen grafik incelendiğinde yapının beklendiği gibi elasto-plastik bir davranış sergilediği görülmektedir. Buna ek olarak grafikteki önemli noktalar incelendiğinde malzemenin üretici tarafından verilen değerleri ile büyük farklılıklar göstermediği fakat 3 boyutlu yazdırma kaynaklı dayanım ve uzama miktarında bir parça düşüş gözlemlenmektedir. Bu da öngörülen bir durumdur.

4.2. Statik Basma Testi Sonuçları

3 Boyutlu yazıcıda yazdırılan parçaların, yazım mimarisine göre bası yükleri altında davranışlarını incelemek üzere standartlarda belirtilen şekilde bası numuneleri üretilmiş ve teste tabi tutulmuştur. Test esnasında numunede oluşan fiçı görünümü şekil 4.3'te verilirken teste ait gerilim-gerinim grafiği şekil 4.4'te gösterilmektedir.



Şekil 4. 3. Numuneye uygulanan basma testi görüntüsü ve numunede oluşan fiç geometrisi



Şekil 4. 4. 3Boyutlu yazıcı ile üretilmiş bası numunesine ait bası testi sonuçları

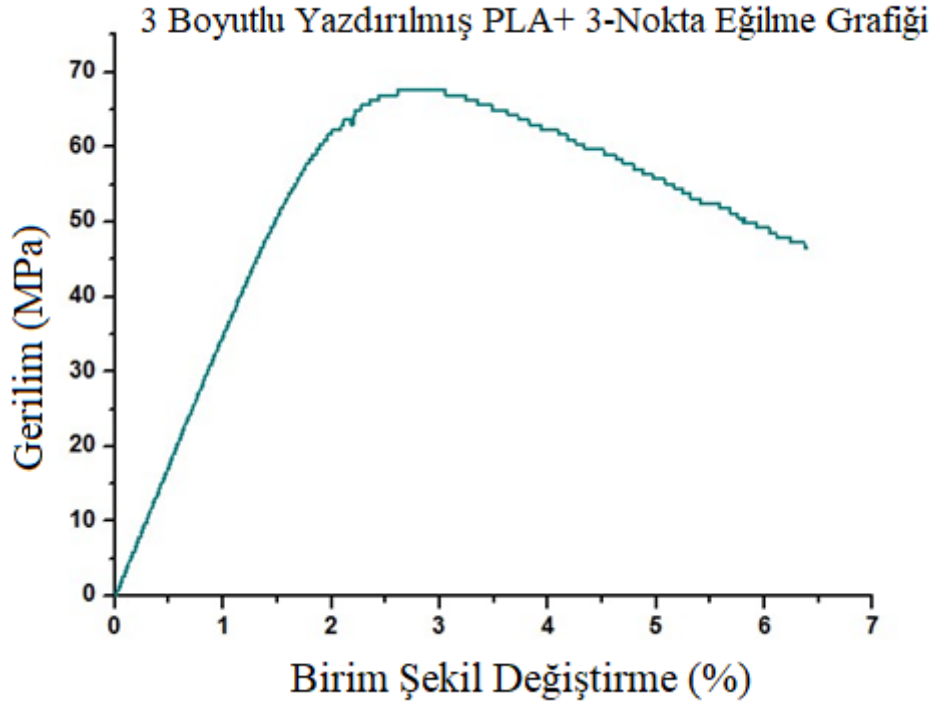
Basma testine ait grafik incelendiğinde ilk olarak göze çarpan kısımıyaklaşık %2'lik birim şekil değiştirme miktarına kadar numunenin test eğrisindeki eğiminin elastik kısımdakinden farklı bir açıya sahip olduğudur. Bu durumun sebebi yine 3 boyutlu yazdırmadaki engellenemeyen boşluk kısımlardan kaynaklanmaktadır. Bası yükü uygulandığında, her bir katmandaki her bir dairesel kesitli eritilmiş filament ilk etapta bu boşlukları dolduracak şekilde hasara uğramaktadır. Yapı içinde çok az yer kapladığından bu ilk hasar bölgesi kısa sürmekte ve ardından bilinen bir bası testi davranışına geri dönmektedir.

4.3. Statik Eğilme Testi Sonuçları

3Boyutlu yazıcıda yazdırılan parçaların, yazım mimarisine göre bası yükleri altında davranışlarını incelemek üzere standartlarda belirtilen şekilde eğme numuneleri üretilmiş ve teste tabi tutulmuştur. Test esnasındaki numunenin görünümü şekil 4.5'te verilirken teste ait gerilim-şekil değiştirme eğrisi şekil 4.6'da verilmektedir.



Şekil 4. 5. Numuneye uygulanan 3-Nokta eğme testi ve numunede oluşan eğilme görünümü

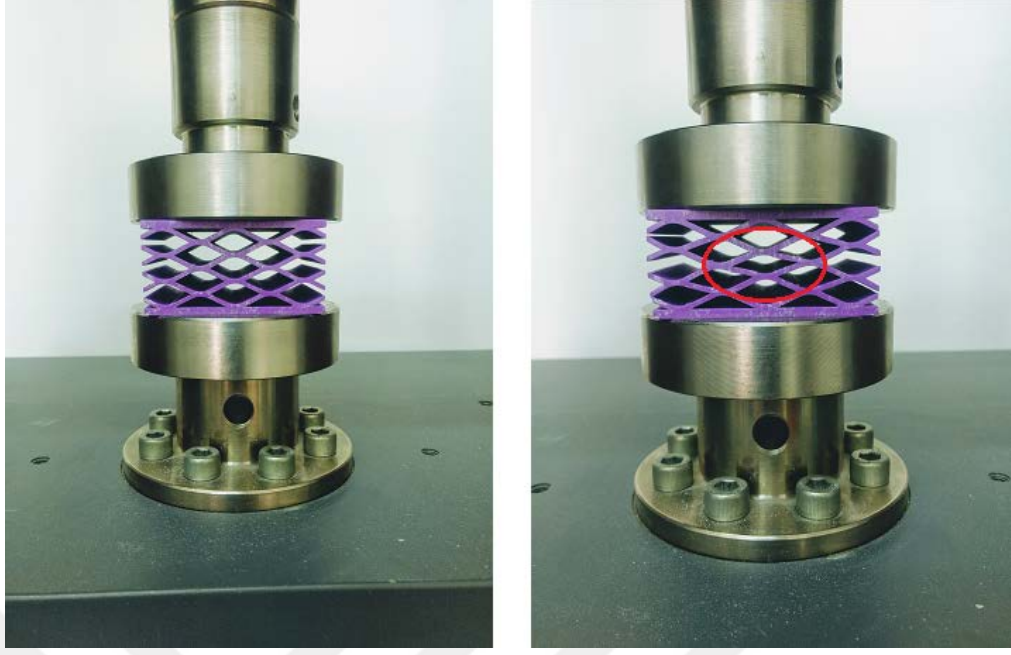


Şekil 4. 6. 3Boyutlu yazıcı ile üretilmiş bası numunesine ait 3-Nokta eğme testi sonuçları

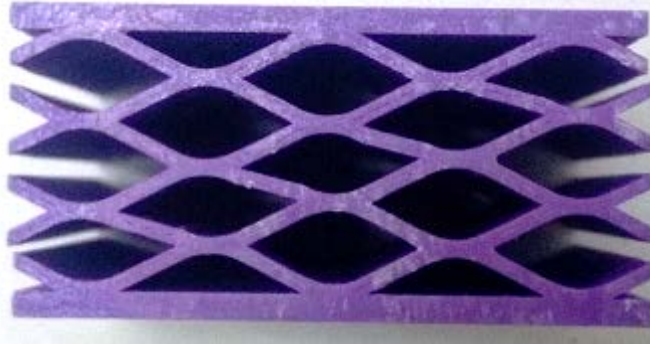
4.4. Sandviç Yapıların Statik Bası Testi

4.4.1. Sinüzoidal Oluklu Çekirdek Geometriye Sahip Sandviç Yapının Bası Testi

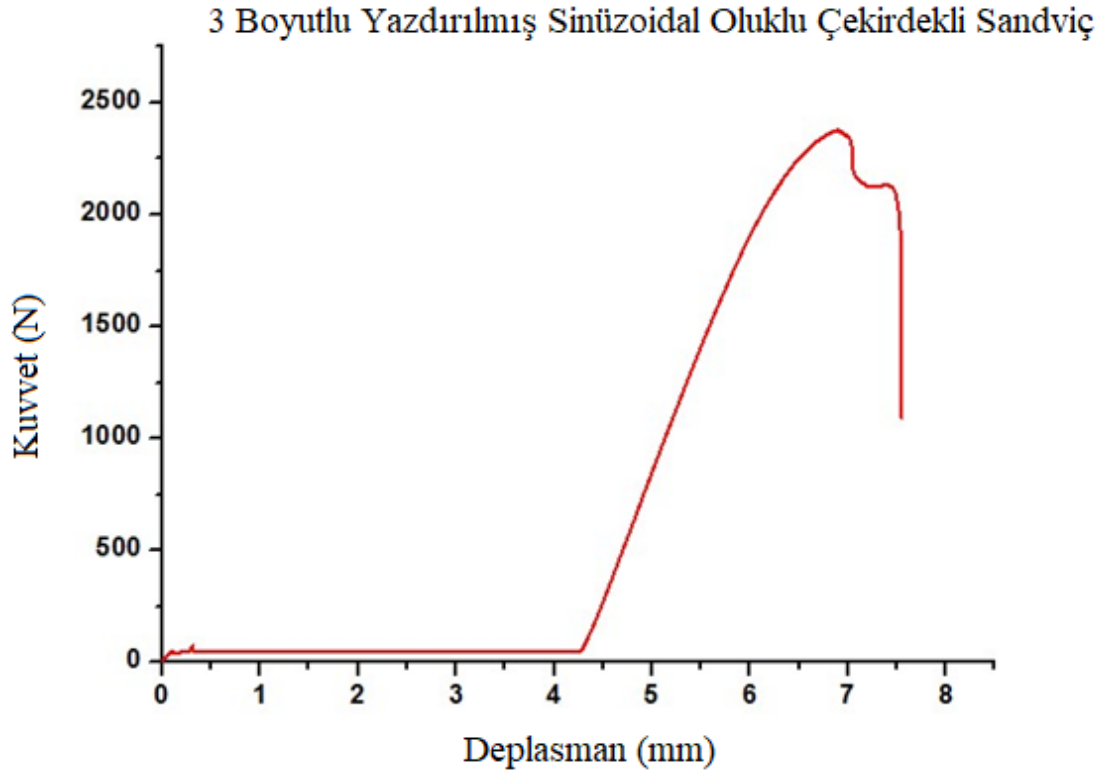
Standartlarda belirtilen özelliklerde tasarlanan sandviç bası numunesine ait deney görselleri ve deney esnasındaki şekil değişimi aşağıda şekil 4.7’de verilirken, deney sonrası yapının son görünümü şekil 4.8’de verilmiştir. Yapılan deneye ait Kuvvet-Deplasman grafiği ise şekil 4.9’da verilmiştir.



Şekil 4. 7. 3Boyutlu yazıcı ile üretilmiş sinüzoidal oluklu çekirdek geometrili sandviç yapıya ait bası deneyleri



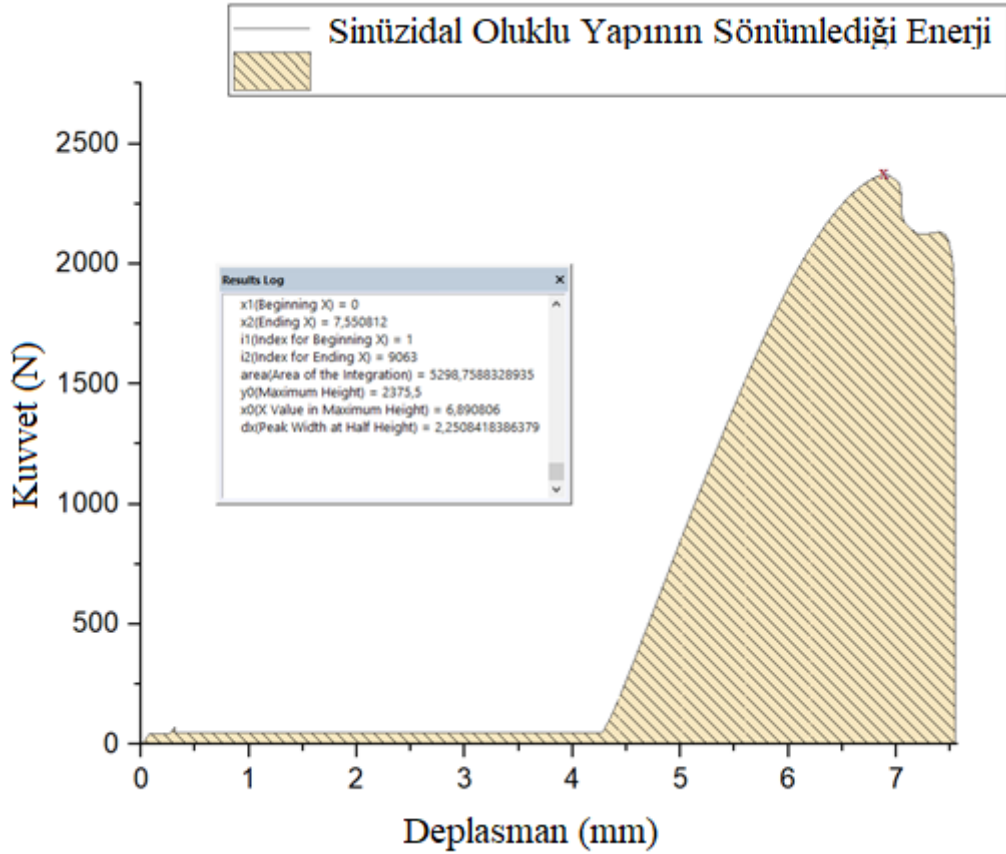
Şekil 4. 8. Deney sonrası sinüzoidal oluklu çekirdek geometrili sandviç yapıya ait numune ve hasar görüntüsü



Şekil 4. 9. 3Boyutlu yazıcı üretilmiş sinüzoidal oluklu çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının bası testine ait kuvvet-deplasman grafiği

Test grafiğine bakıldığında başlangıç kısmındaki plato bir bölge görülmektedir. Bu bölge diğer yapılarda da mevcuttur. Üretim esnasında yapı mimarisi her ne kadar %100 doluluk oranı ile üretilse de; yazdırma mekanizması sebebiyle her bir filament arasında boşluklar kalmaktadır. Bunun sebebi daha önce de bahsedildiği üzere yazdırma ucunun sahip olduğu dairesel geometriden kaynaklanmaktadır. İşte bu yapı içerisinde kontrol edilemeyen boşluklar bası testinin ilk anlarında sıkışarak grafikte bir plato bölgesi oluşmasına sebebiyet vermektedirler. Eğrinin devamında ise yapının elasto-plastik davranışı belirgin olarak göze çarpmaktadır. Yapının bu haliyle enerji sönümleme kabiliyetinin uygun seviyede olduğu görülmüştür. Eğrinin pik noktasından sonra yapıda kusur ve bozunmalar meydana gelse de yapı geometrisi sebebiyle her bir çekirdek katmanının bir diğeri üstüne takviye görevi görmesiyle bir anda anlık büyük düşüşler yaşanmadığı gözlemlenmiştir.

Kuvvet-Deplasman eğrisinin altında kalan alan yapının bu süre boyunca sönümlendiği enerji miktarını göstermektedir. Grafik altında kalan alan, yani parçanın sönümlendiği enerji miktarı, grafikteki pik noktaları değerlerini gösteren alan grafiği aşağıda şekil 4.10’da verilmektedir.

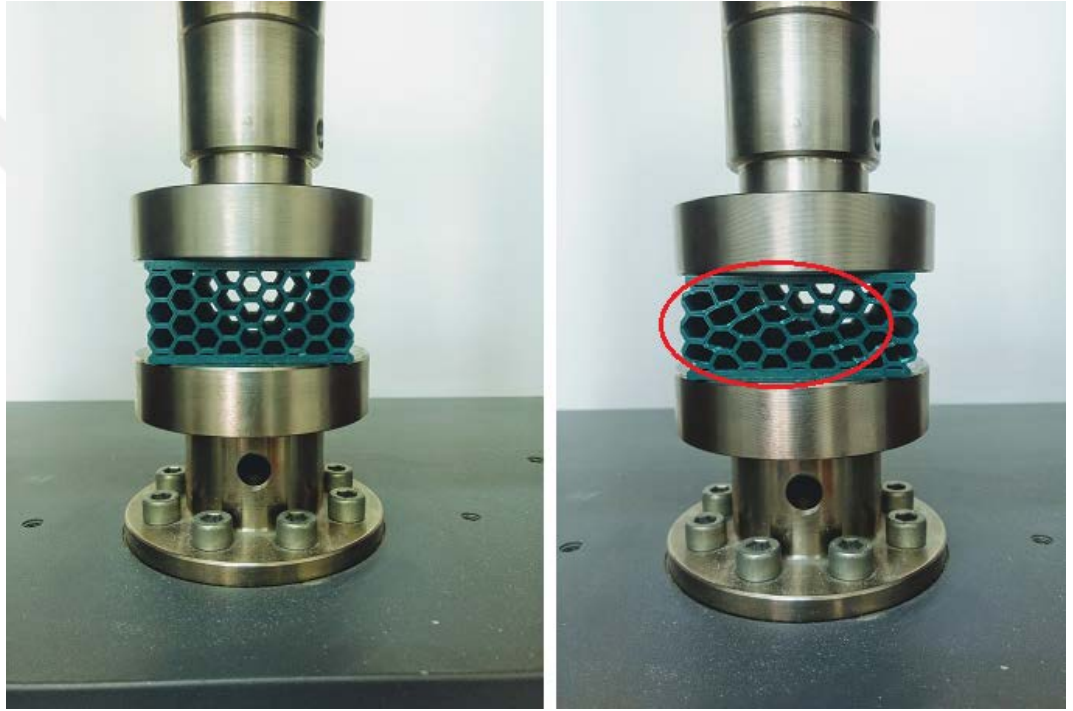


Şekil 4. 10. Sinüzoidal oluklu çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının bası yükü altında sönümlendiği enerji

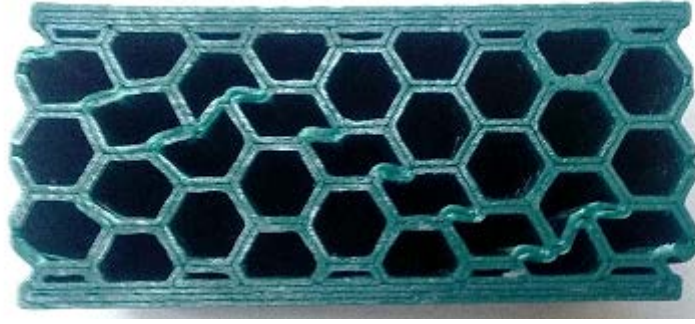
Grafik incelendiğinde ilk olarak yapıya uygulanan maksimum kuvvetin, $F_{C_{s0}} = 2375,5N$ olduğunu görmekteyiz. $F_{C_{s0}}$ kuvvetine ulaşıldığında yapıdaki şekil değiştirme miktarı, $\delta_{C_{s0}} = 6,890mm$ olduğu da not edilmelidir. Bunların yanı sıra yapının sönümlendiği toplam enerji miktarı, $E_{C_{s0}} = 5,3J$ olarak görülmektedir.

4.4.2. Altıgen Balpeteği Çekirdek Geometrisine Sahip Sandviç Yapının Bası Testi

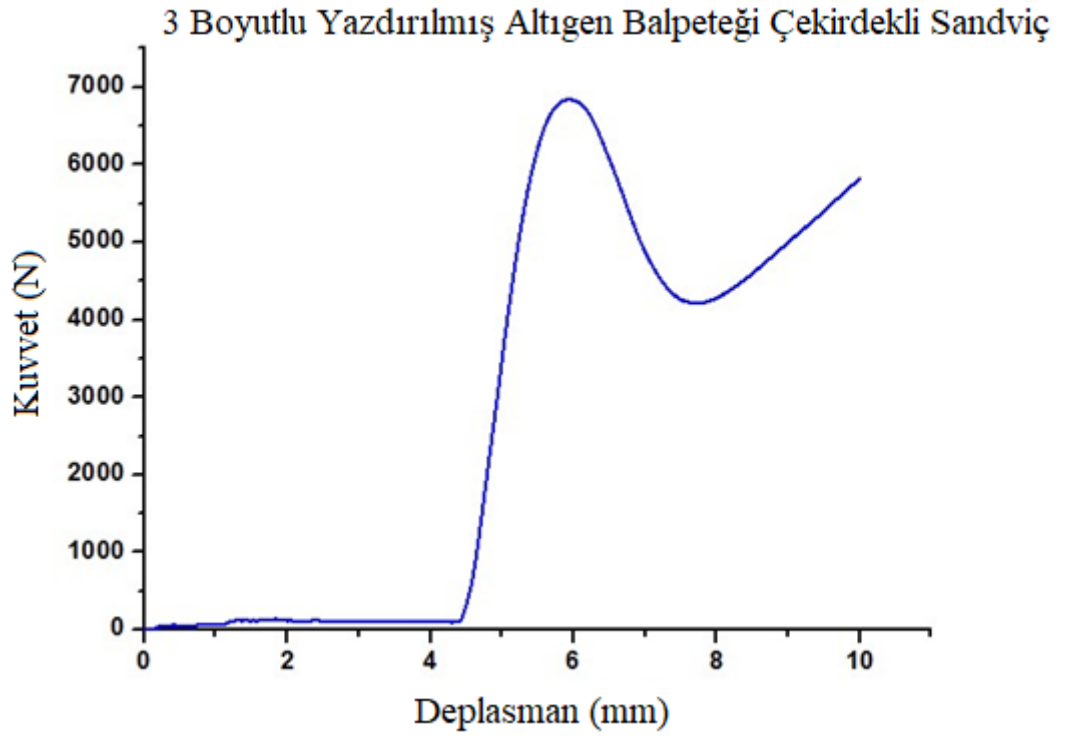
Standartlarda belirtilen özelliklerde tasarlanan sandviç bası numunesine ait deney görselleri ve deney esnasındaki şekil değişimi aşağıda şekil 4.11’de verilirken, deney sonrası yapının son görünümü şekil 4.12’de verilmiştir. Yapılan deneye ait Kuvvet-Deplasman grafiği ise şekil 4.13’te verilmiştir.



Şekil 4. 11. 3Boyutlu yazıcı ile üretilmiş altıgen balpeteği çekirdek geometrili sandviç yapıya ait bası deneyleri



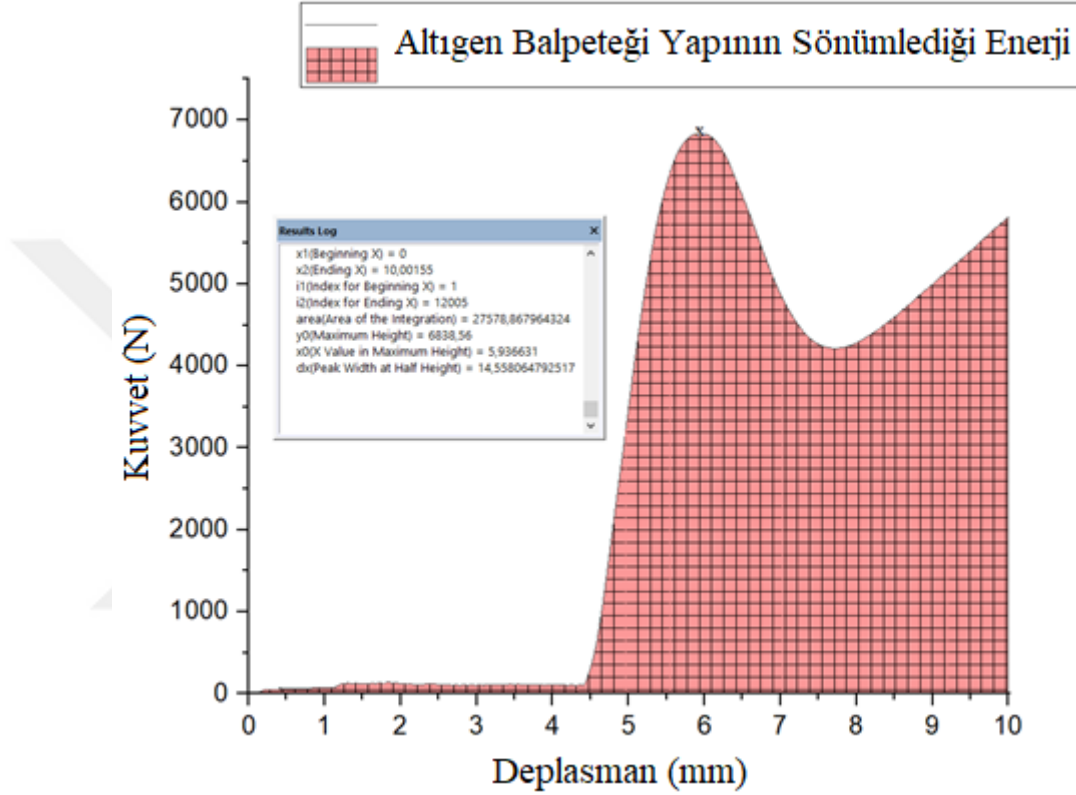
Şekil 4. 12. Deney sonrası altıgen balpeteği çekirdek geometrili sandviç yapıya ait numune ve hasar görüntüsü



Şekil 4. 13. 3Boyutlu yazıcı üretilmiş altıgen balpeteği çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının bası testine ait kuvvet-deplasman grafiği

Grafik incelendiğinde yine başlangıçtaki plato bölgesi görülmektedir. Bu bölgeden sonra yapının taşıdığı kuvvet miktarı çok hızlı şekilde artış olarak görünüyorki bu da yapının Elastisite Modülünün yüksek olduğunu gösteriyor. Ayrıca yapı yine beklendiği

üzere elasto-plastik bir davranış sergilemiştir fakat sinüzoidal oluklu çekirdekli yapı kadar olmadığı görülmüştür. Ayrıca SO çekirdekli yapıya oranla çok daha yüksek kuvvetlere çıkıldığı da görülmektedir. Bunların yanında yine sönümlediği enerji miktarı ve maksimum kuvvet değerleri aşağıda şekil 4.14'te gösterilmektedir.

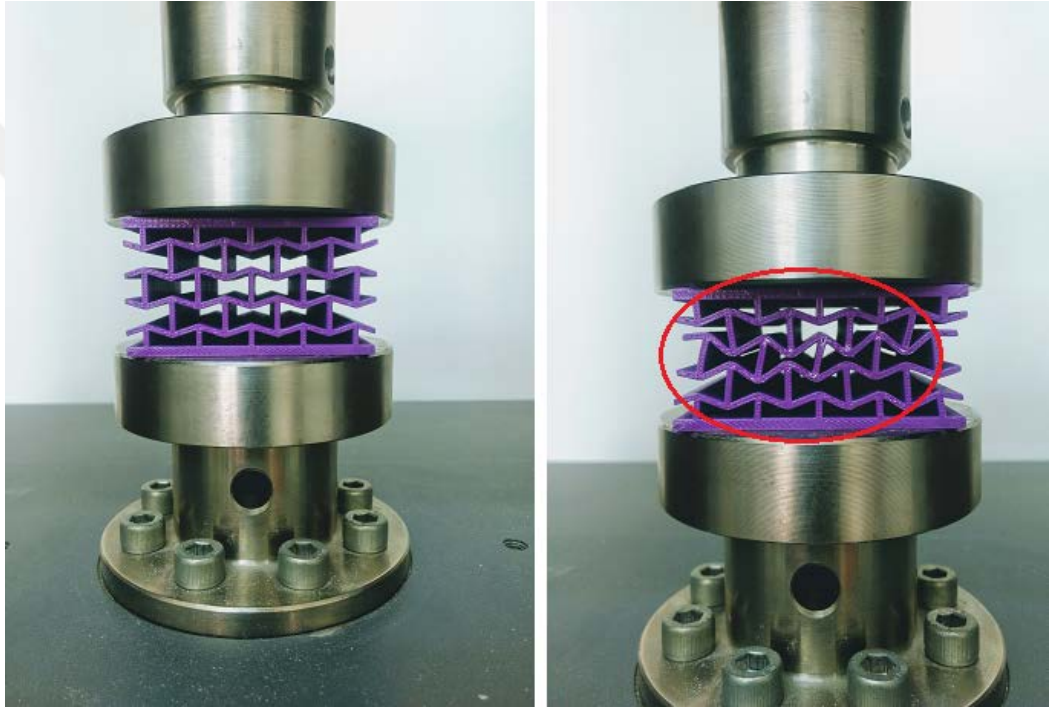


Şekil 4. 14. Balpeteği çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının bası yükü altında sönümlediği enerji

Grafiğe bakıldığında yapıya uygulanan maksimum kuvvet miktarı $F_{Cab} = 6838,5 \text{ N}$ olduğu görülmektedir. F_{Cab} kuvvetine ulaşıldığında yapıdaki şekil değiştirme miktarı, $\delta_{Cab} = 5,93 \text{ mm}$ olarak görülürken; yapının sönümlediği toplam enerji miktarı, $E_{Cab} = 27,6 \text{ J}$ olarak hesaplanmaktadır.

4.4.3. Yeniden Kıvrımlı Çekirdek Geometrisine Sahip Sandviç Yapının Bası Testi

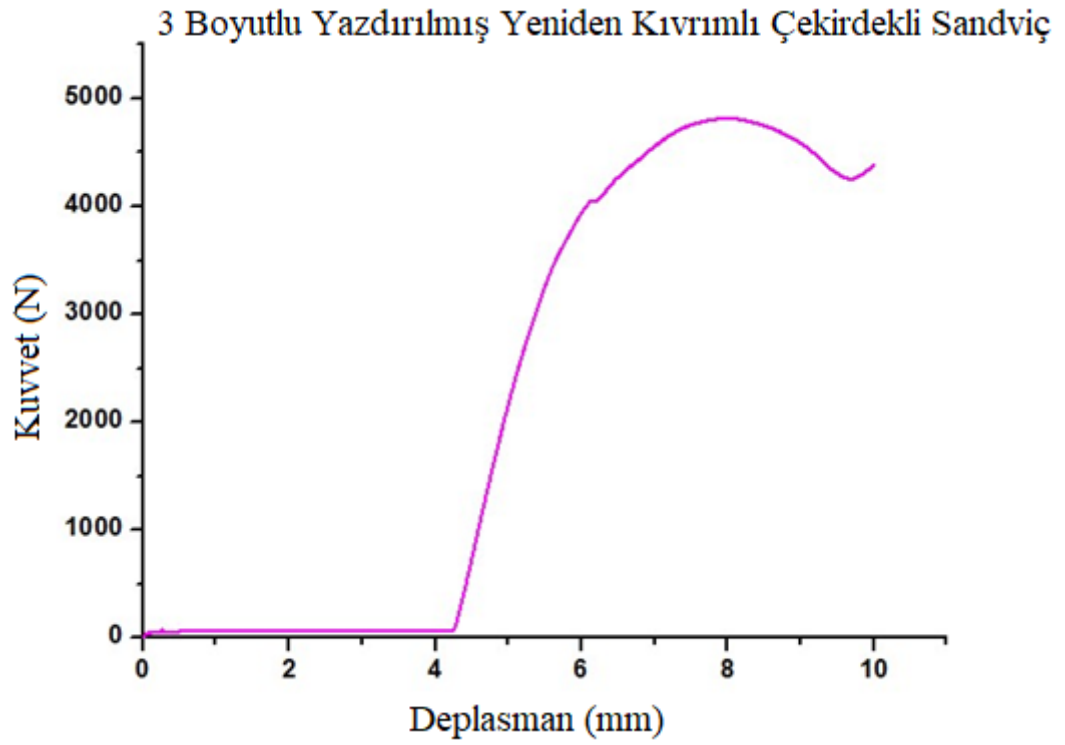
Standartlarda belirtilen özelliklerde tasarlanan sandviç bası numunesine ait deney görselleri ve deney esnasındaki şekil değişimi aşağıda şekil 4.15’de verilirken, deney sonrası yapının son görünümü şekil 4.16’da verilmiştir. Yapılan deneye ait Kuvvet-Deplasman grafiği ise şekil 4.17’de verilmiştir.



Şekil 4. 15. 3Boyutlu yazıcı ile üretilmiş yeniden kıvrımlı çekirdek geometrili sandviç yapıya ait bası deneyleri

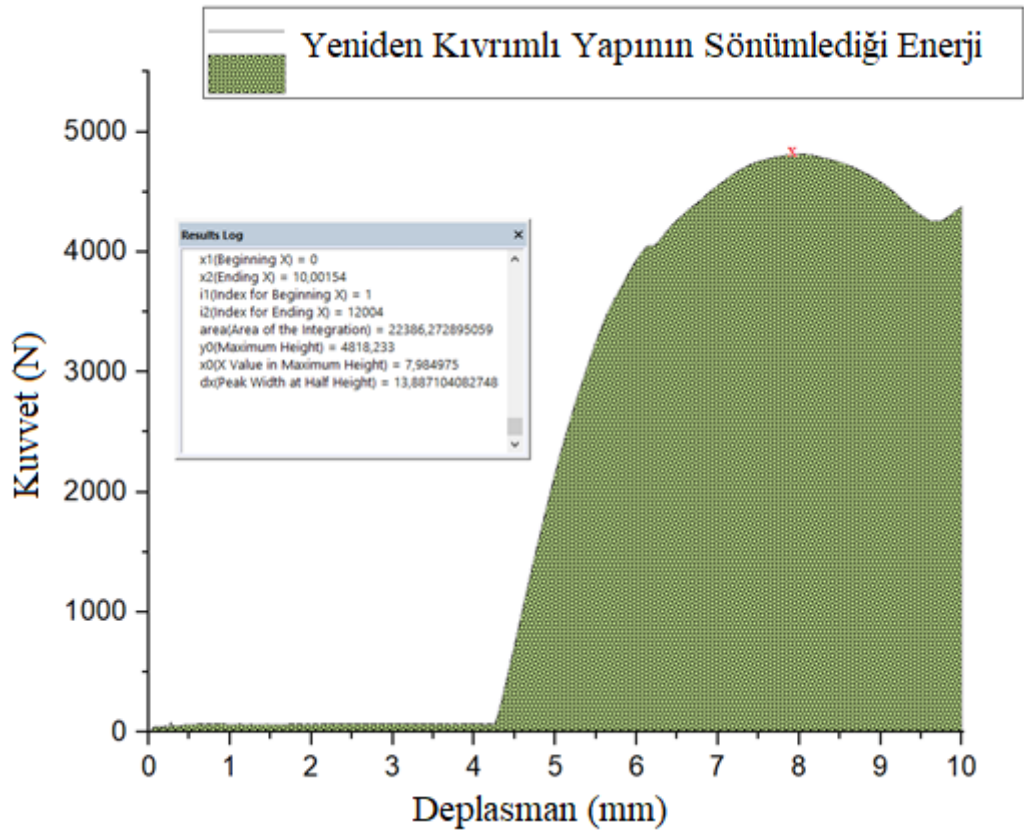


Şekil 4. 16. Deney sonrası altıgen balpeteği çekirdek geometrili sandviç yapıya ait numune ve hasar görüntüsü



Şekil 4. 17. 3Boyutlu yazıcı üretilmiş yeniden kıvrımlı çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının bası testine ait kuvvet-deplasman grafiği

Aynı şekilde yeniden kıvrımlı çekirdekli yapı da bir plato bölgesi ile teste başlamıştır. Daha sonrasında ise yapı elasto-plastik bir davranış sergilemiştir. Yapı, sinüzoidal oluklu yapıya benzer şekilde fakat çok daha yüksek kuvvet seviyelerine çıkarak davranmıştır. Yapının sönümlendiği enerji miktarı ve yapıdaki maksimum kuvvet değeri aşağıda şekil 4.18’de verilmektedir.

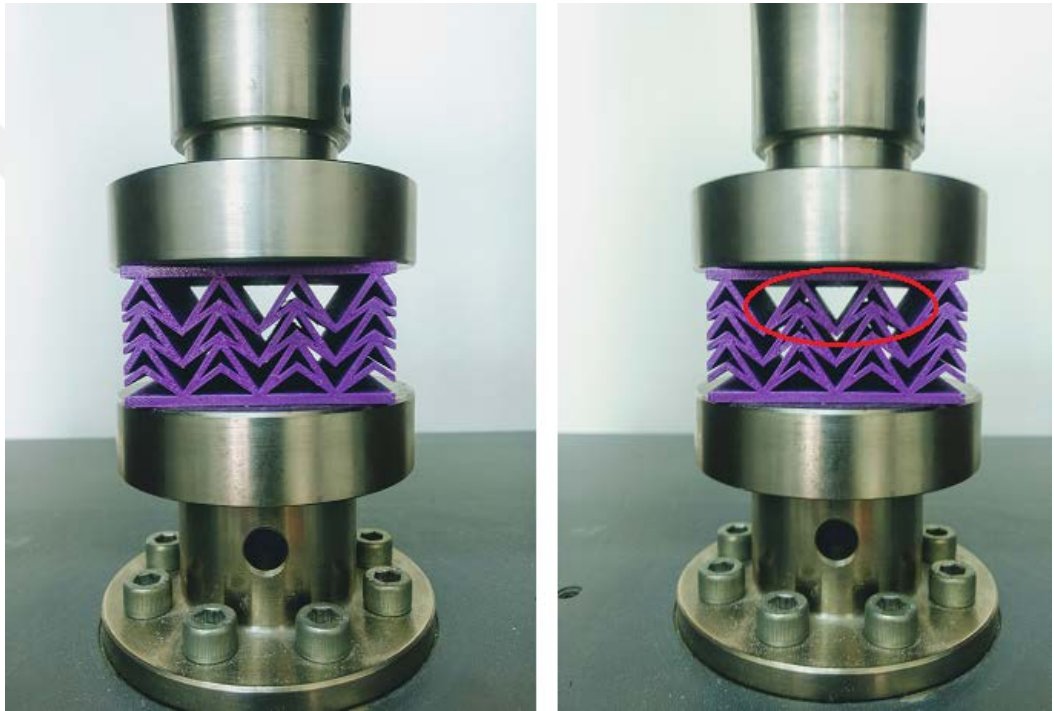


Şekil 4. 18. Yeniden kıvrımlı çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının bası yükü altında sönümlendiği enerji

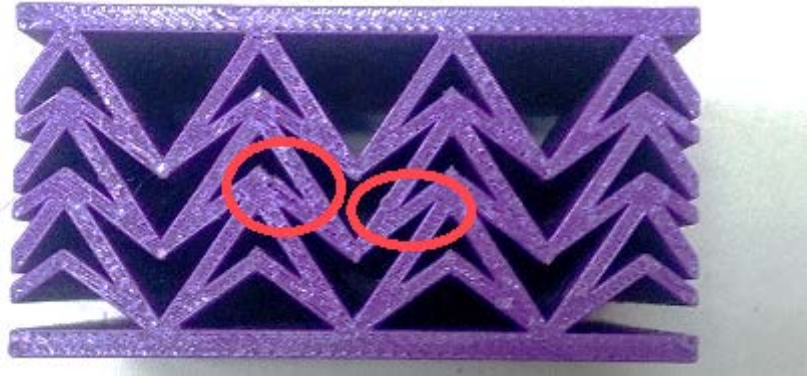
Grafik incelendiğinde yapıya uygulanan maksimum kuvvet miktarı $F_{Cyk} = 4818,23 \text{ N}$ olduğu görülmektedir. F_{Cyk} kuvvetine ulaşıldığında yapıdaki şekil değiştirme miktarı, $\delta_{Cyk} = 7,99 \text{ mm}$ olarak görülürken; yapının sönümlendiği toplam enerji miktarı, $E_{Cyk} = 22,39 \text{ J}$ olarak hesaplanmaktadır.

4.4.4. Çift Ok Kafa Çekirdek Geometrisine Sahip Sandviç Yapının Bası Testi

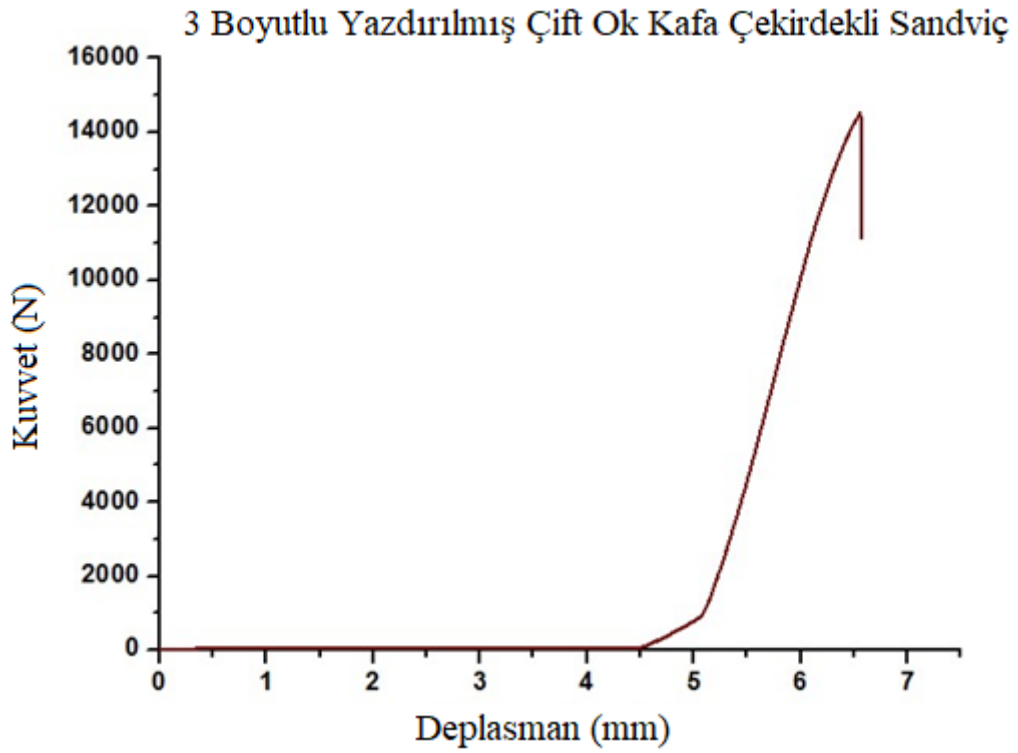
Standartlarda belirtilen özelliklerde tasarlanan sandviç bası numunesine ait deney görselleri ve deney esnasındaki şekil değişimi aşağıda şekil 4.19’da verilirken, deney sonrası yapının son görünümü şekil 4.20’de verilmiştir. Yapılan deneye ait Kuvvet-Deplasman grafiği ise şekil 4.21’de verilmiştir.



Şekil 4. 19. 3Boyutlu yazıcı ile üretilmiş çift ok kafa çekirdek geometrili sandviç yapıya ait bası deneyleri

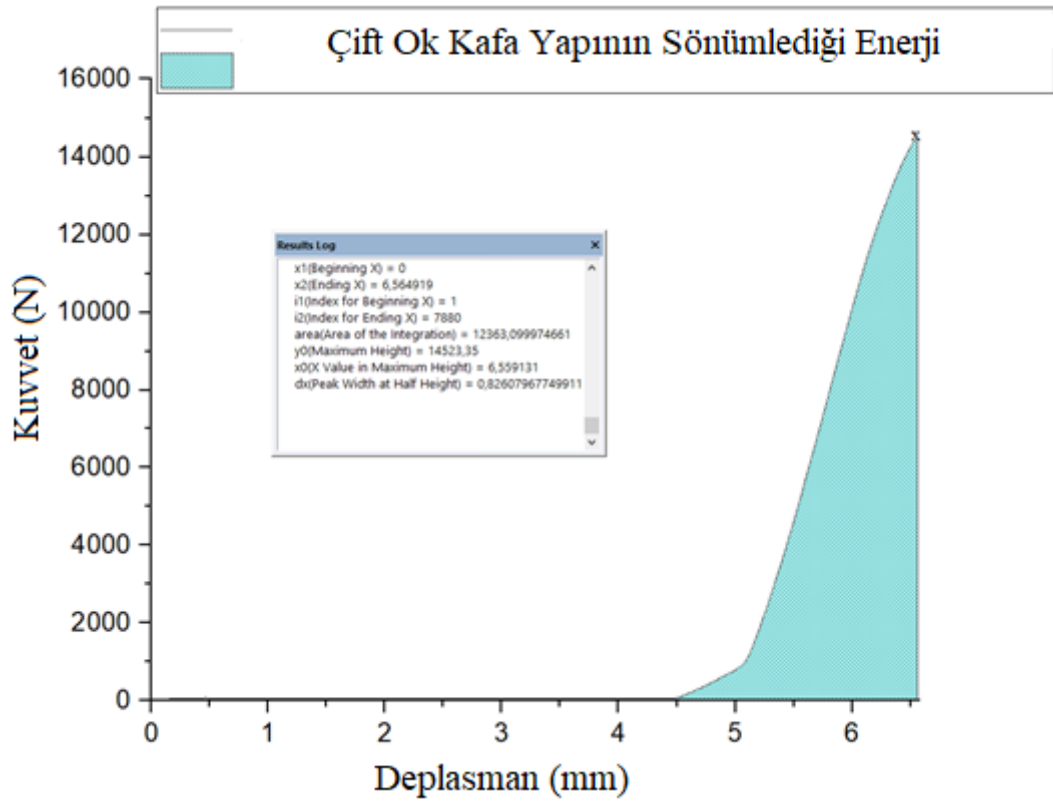


Şekil 4. 20. Deney sonrası çift ok kafa çekirdek geometrili sandviç yapıya ait numune ve hasar görüntüsü



Şekil 4. 21. 3Boyutlu yazıcı üretilmiş çift ok kafa çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının bası testine ait kuvvet-deplasman grafiği

İncelenen yapılar içerisinde en rijit karakteristiğe sahip olan çift ok kafa geometrili yapıda da yine bir plato bölgesi bulunmaktadır, fakat başlangıçtaki bu bölgede kuvvet miktarı diğerleri kadar artış göstermemiştir. Bu bölgeden sonra ise çok ani bir şekilde kuvvet miktarındaki artış yapının ne kadar rijit bir özellikte olduğunu bize göstermektedir. Grafikten de anlaşılacağı üzere Elastisite Modülünün en büyük olduğu yapı budur. Ayrıca en yüksek kuvvet miktarına da bu yapıda ulaşılmış fakat en düşük şekil değiştirme miktarı da bu yapıda oluşmuştur. Yapı çok fazla plastik şekil değişimi göstermeden hasara uğramıştır. Yapının test sonucu sönümlendiği enerji miktarı ve maksimum kuvvet miktarını gösteren grafik aşağıda şekil 4.22’de verilmektedir.

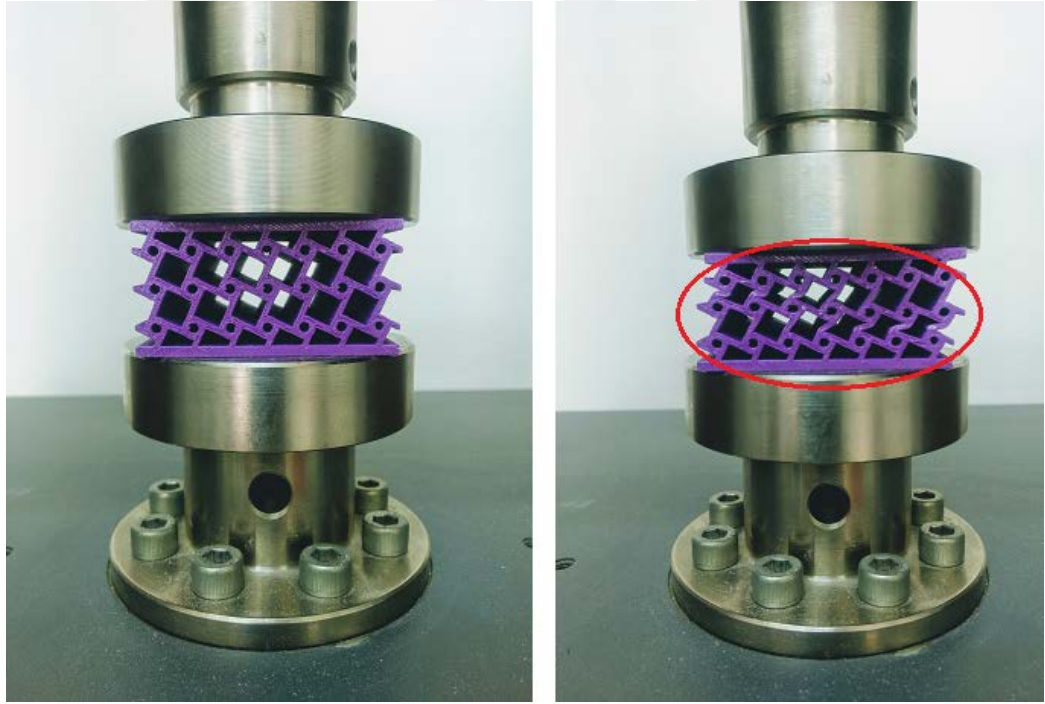


Şekil 4. 22. Çift ok kafa çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının bası yükü altında sönümlendiği enerji

Grafik incelendiğinde yapıya uygulanan maksimum kuvvet miktarı $F_{C\text{çok}} = 14523,35 \text{ N}$ olduğu görülmektedir. $F_{C\text{çok}}$ kuvvetine ulaşıldığında yapıdaki şekil değiştirme miktarı, $\delta_{C\text{çok}} = 6,55 \text{ mm}$ olarak görülürken; yapının sönümlendiği toplam enerji miktarı, $E_{C\text{çok}} = 12,36 \text{ J}$ olarak hesaplanmaktadır.

4.4.5. Tetrachiral Çekirdek Geometrisine Sahip Sandviç Yapının Bası Testi

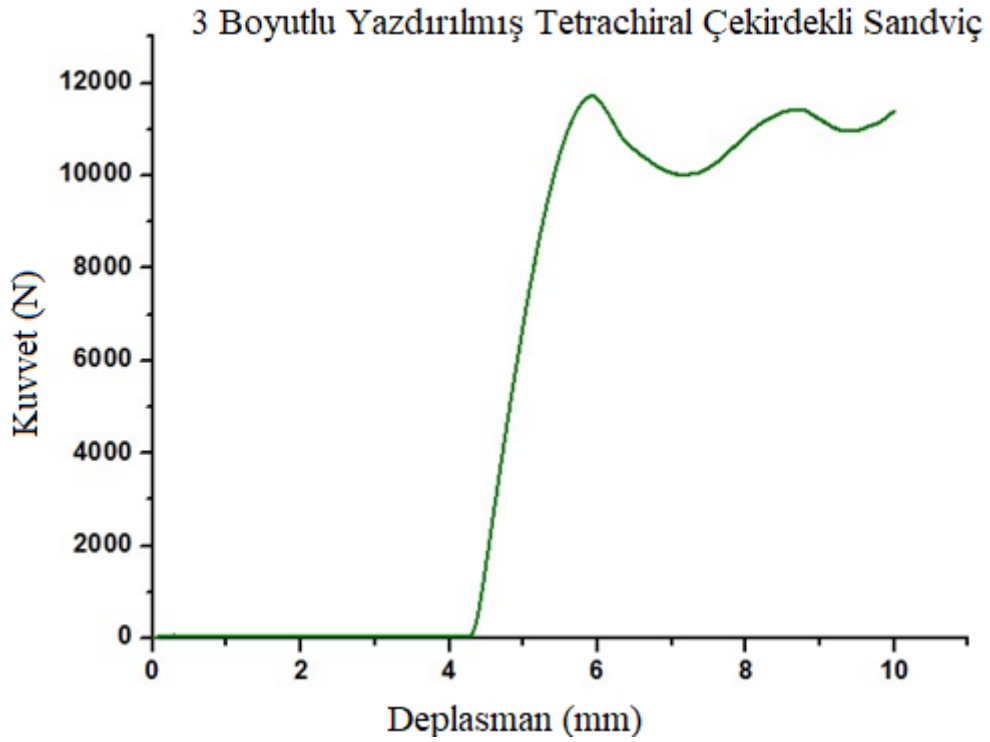
Standartlarda belirtilen özelliklerde tasarlanan sandviç bası numunesine ait deney görselleri ve deney esnasındaki şekil değişimi aşağıda şekil 4.23’de verilirken, deney sonrası yapının son görünümü şekil 4.24’te verilmiştir. Yapılan deneye ait Kuvvet-Deplasman grafiği ise şekil 4.25’te verilmiştir.



Şekil 4. 23. 3Boyutlu yazıcı ile üretilmiş tetrachiral çekirdek geometrili sandviç yapıya ait bası deneyleri



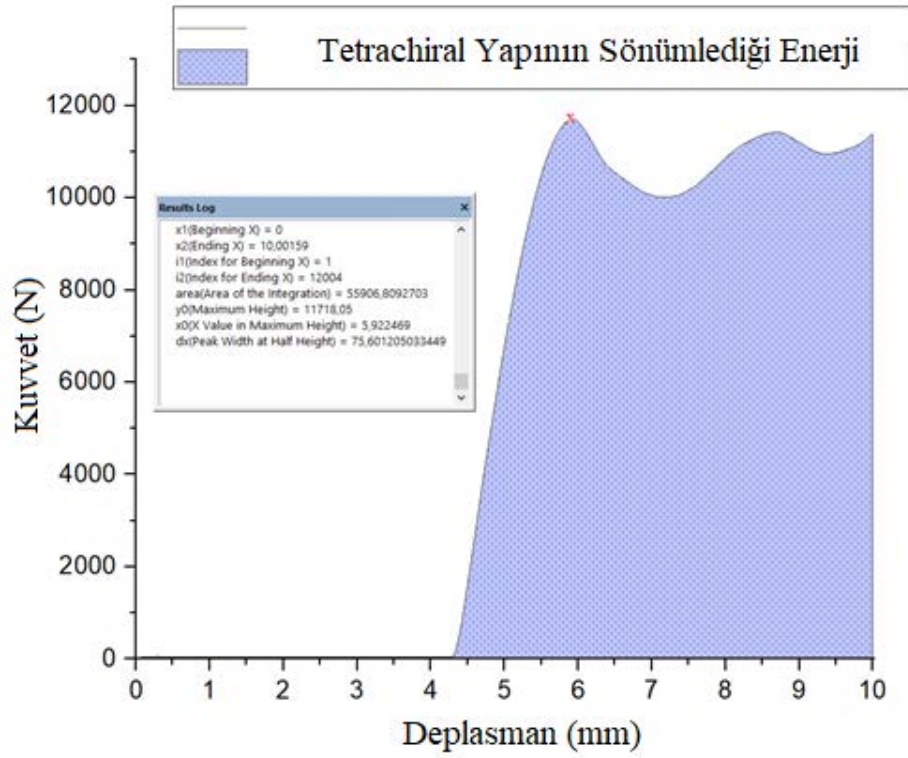
Şekil 4. 24. Deney sonrası tetrachiral çekirdek geometrili sandviç yapıya ait numune ve hasar görüntüsü



Şekil 4. 25. 3Boyutlu yazıcı üretilmiş tetrachiral çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının bası testine ait kuvvet-deplasman grafiği

Son sandviç yapı olan tetrachiral geometrili yapının ise aralarında en iyi mekanik özellik değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Hem yüksek kuvvet dayanım

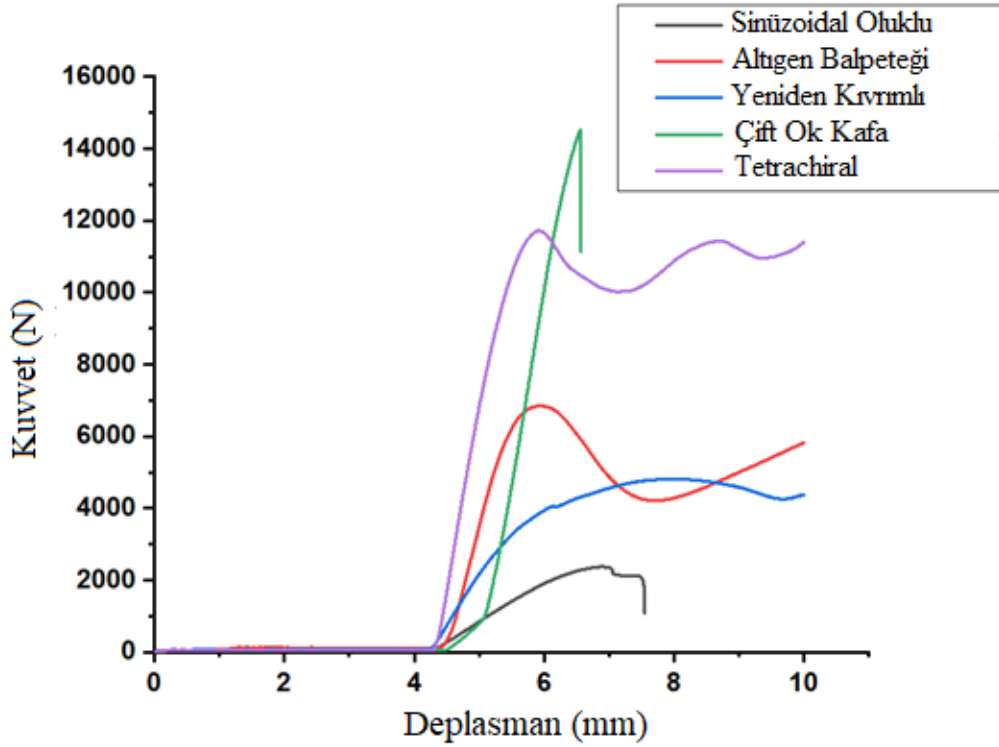
değerlerine ulaşmış hem de daha iyi bir plastik deformasyon karakteristiği göstermiştir ki bu da enerji sönümleyici yapılar için istenilen bir özelliktir. Ayrıca ilk pik noktasından sonraki davranışına bakıldığında mekanik dayanımından pek de bir şey kaybetmeden yine yüksek miktarda yük taşıdığı görülmüştür. 2. Pik noktasının da ilkinin yakın bir değeri olduğu görülmüştür. Bu bilgiler neticesinde bakıldığında yapı başlangıçtaki plato bölgesinden sonra uygun şekilde yüke direnmiş ve elasto-plastik bir davranış sergilemiştir. Yapının test esnasında sönümlediği enerji miktarı ve maksimum yük değerleri aşağıda şekil 4.26’da verilmiştir.



Şekil 4. 26. Tetrachiral çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının bası yükü altında sönümlediği enerji

Grafik incelendiğinde yapıya uygulanan maksimum kuvvet miktarı $F_{Ctc} = 11718,05 \text{ N}$ olduğu görülmektedir. F_{Ctc} kuvvetine ulaşıldığında yapıdaki şekil değiştirme miktarı, $\delta_{Ctc} = 5,92 \text{ mm}$ olarak görülürken; yapının sönümlediği toplam enerji miktarı, $E_{Ctc} = 55,91 \text{ J}$ olarak hesaplanmaktadır.

5 farklı çekirdek geometrisine sahip sandviç yapıların bası testi sonucu elde edilen Kuvvet-Deplasman grafikleri, karşılaştırma yapılabilmesi adına tek bir grafik üzerinde aşağıda şekil 4.27’de verilmektedir.



Şekil 4. 27. Tüm yapılara ait bası testi kuvvet-deplasman grafiklerinin bir arada görünümü

Grafikler incelendiğinde çift ok kafa ve tetrachiral yapının üstünlükleri açıkça görülmektedir. Ayrıca tetrachiral yapının ikinci hatta deney ilerledikçe üçüncü bir pik noktası yaptığı da görülmektedir. Bu da bası yükü altında haar görse bile dayanımından bir şey kaybetmediğini göstermektedir. Tetrachiral yapı ayrıca yüksek dayanım yanı sıra iyi elasto-plastik deformasyon göstererek yüksek enerji sönümleme değerlerine ulaşmıştır.

4.5. Sandviç Yapıların Statik Eğilme Testi

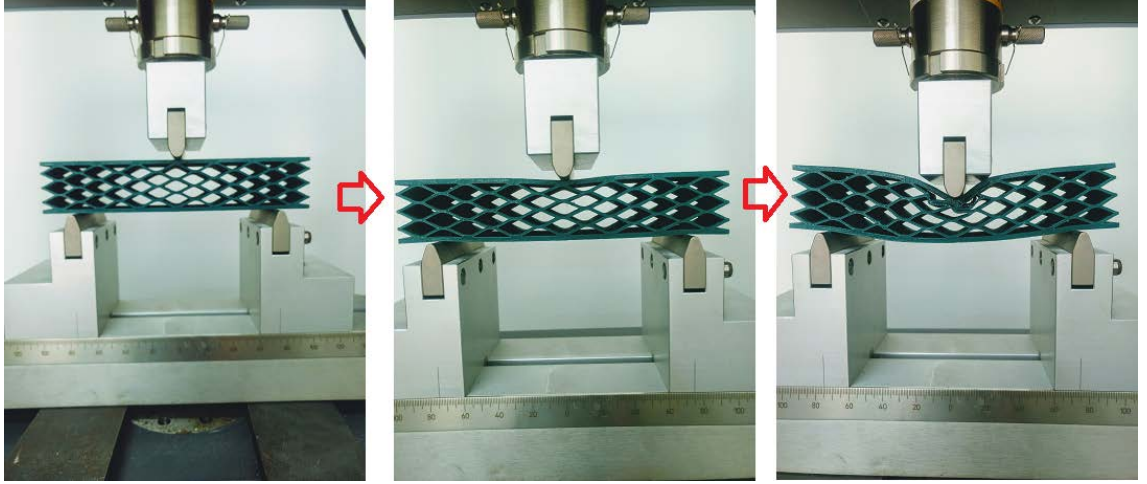
3-Nokta eğilme testi malzemelerin veya yapıların eğilme yükleri altındaki eğilme elastisite modüllerini, eğilme dayanımlarını, eğilme şekil değiştirmelerini ve bu değerlere bağlı gerilme – şekil değiştirme grafiklerini elde ederek malzemenin mekanik özellikleri hakkında önemli bilgiler edinebileceğimiz bir testtir. Özellikle otomotiv ve günlük uygulamalarda yapılar bası yüküne maruz oldukları kadar eğilme yüklerine de maruz kalmaktadır. Eğilme yüküne maruz kalan yeterince kalınlığı olan her malzemede yükün uygulandığı kısımda bası yükü oluşurken kalınlığın diğer tarafında eğilme sebebiyle bir çeki gerilmesi oluşmaktadır. Bu sebeple 3-Nokta eğme testi yapıların hem bası hem de çeki yükleri altında kalmasına sebep olmaktadır. Özellikle otomotiv sanayinde, parçalar statik veya dinamik eğilme yüklerine maruz kalır. Bu nedenle sandviç yapıların karakteristik özelliklerini belirlemede önemli bir yer tutmaktadır. Deneyler daha önce de bahsedildiği üzere Shimadzu AGS-X universal test cihazı ile standartlara uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Deney verileri ise cihaza bağlı bir bilgisayar yardımıyla alınmış test esnasında 50 kN'luk bir yük hücresi kullanılmıştır. Deneylere ait genel bir görüntü aşağıda şekil 4.28'de verilmektedir.



Şekil 4. 28. 3-Nokta eğme test düzeneği ve testten bir görüntü

4.5.1. Sinüzoidal Oluklu Çekirdek Geometriye Sahip Sandviç Yapının 3-Nokta Eğme Testi

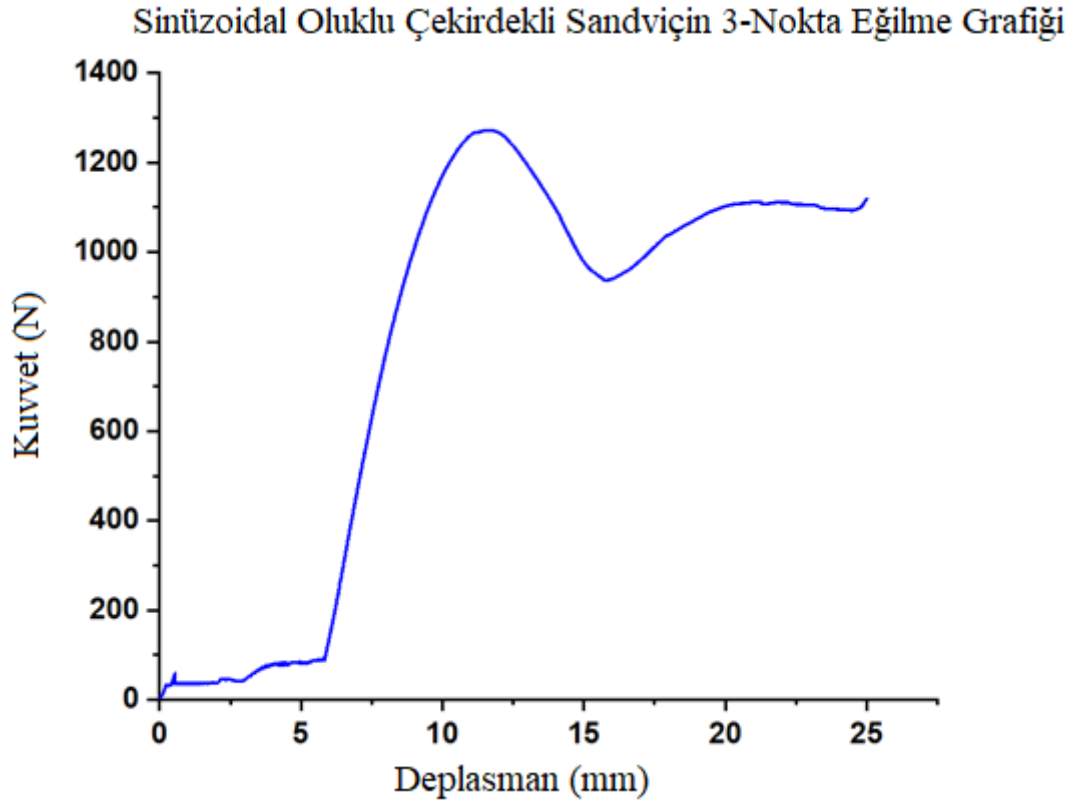
ASTM C393/C393M-16 standardına uygun olarak testleri gerçekleştirilen sinüzoidal oluklu çekirdek geometrisine sahip sandviç yapıların eğme testi, test esnasında parçada oluşan eğilme ve hasar görüntüleri şekil 4.29’da verilmektedir. Test sonucunda parçalardaki hasar durumları şekil 4.30’da verilirken parçaya ait eğilme kuvvet-deplasman grafikleri şekil 4.31’de gösterilmektedir.



Şekil 4. 29. 3Boyutlu yazıcı ile üretilmiş sinüzoidal oluklu çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının 3-Nokta eğme testi ve test esnasındaki hasar oluşumu

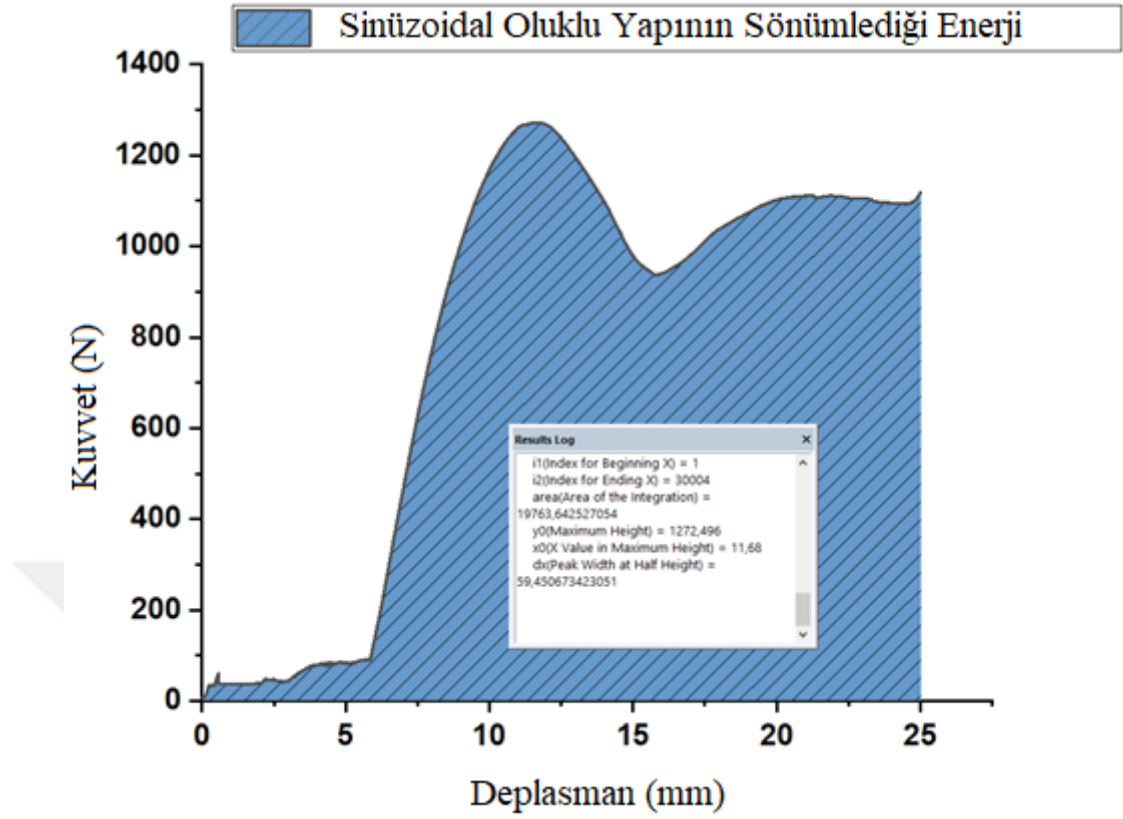


Şekil 4. 30. 3-Nokta eğme testi sonrası sinüzoidal oluklu çekirdeğe sahip sandviç yapıdaki hasar görünümü



Şekil 4. 31. Sinüzoidal oluklu çekirdek geometrili sandviç yapının 3-Nokta eğme testine ait kuvvet-deplasman grafiği

Grafik incelendiğinde, tıpkı bası numunelerindeki gibi başlangıçta bir plato bölgesi göze çarpmaktadır. Bunun sebebi bası testi sonuçlarında da bahsedildiği üzere yazdırma düzeninden kaynaklanan boşluk bölgeler sebebiyle oluştuğunu belirtmiştik. Devamında ise yapı uygun bir elasto-plastik özellik göstermiştir. Kuvvetin pik yaptığı noktada plastik hasar başlamış olsa da kuvvet sürekli bir düşüş sergilememiştir. Bunun nedeni ise gözenekli çekirdek yapılarının katmanlı olmasıdır. İlk katmanda hasar başladıktan sonra sıkışarak ikinci katman üzerine bir destek olmuş ve grafikten de görüleceği üzere kuvvette bir miktar daha artışa sebep olmuştur. Yapının test esnasında sönümlendiği enerji miktarını ve maksimum kuvvet değerlerinin gösterildiği grafik aşağıda şekil 4.32’de verilmektedir.



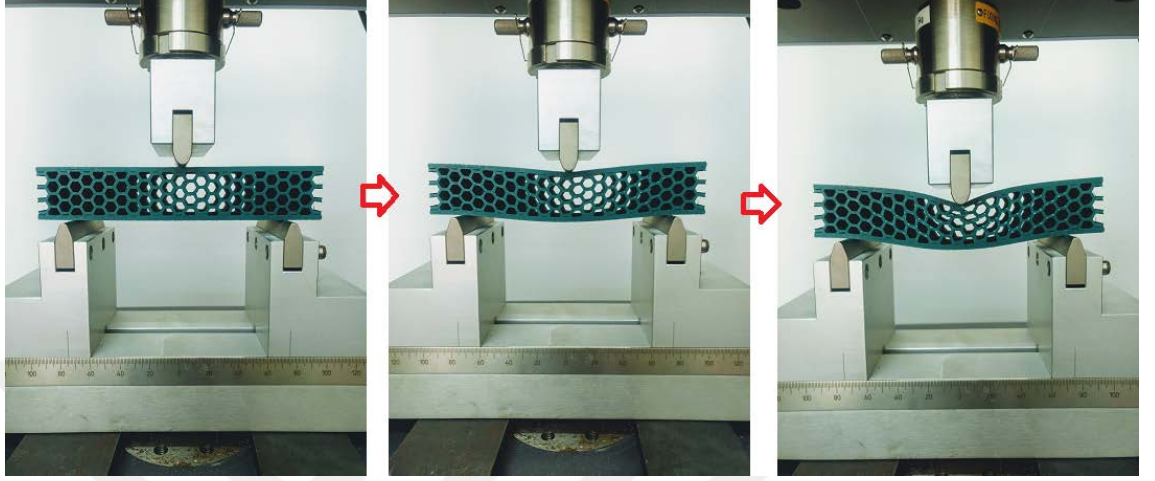
Şekil 4. 32. Sinüzoidal oluklu çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının eğilme yükü altında sönümlediği enerji

Grafik incelendiğinde, yapının dayanabildiği maksimum kuvvetin $F_{Bso}=1272,5N$ olduğu görülürken bu değere ulaştığında yapıdaki toplam şekil değiştirme miktarı, $\delta_{Bso}=11,68mm$ olmaktadır; ayrıca sinüzoidal çekirdekli yapının eğilme yükü altında sönümlediği enerji miktarı $E_{Bso}=19,76J$ olarak kayıt edilmiştir.

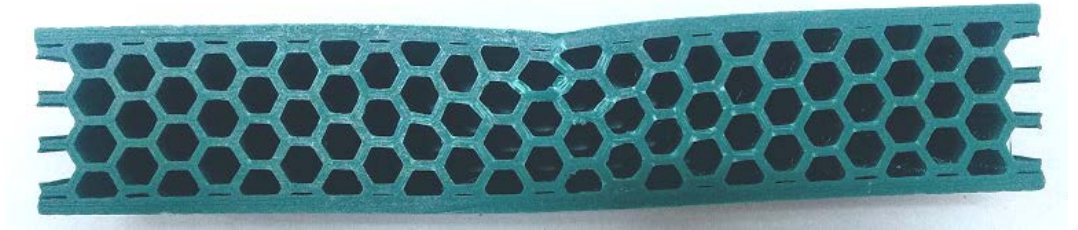
4.5.2. Altıgen Balpeteği Çekirdek Geometrisine Sahip Sandviç Yapının 3-Nokta Eğme Testi

Standarta uygun olarak testleri gerçekleştirilen altıgen balpeteği çekirdek geometrisine sahip sandviç yapıların eğme testi, test esnasında parçada oluşan eğilme ve hasar görüntüleri Şekil 4.33'te verilmektedir. Test sonucunda parçalardaki hasar durumları

şekil 4.34'te verilirken parçaya ait eğilme kuvvet-deplasman grafikleri şekil 4.35'te gösterilmektedir.

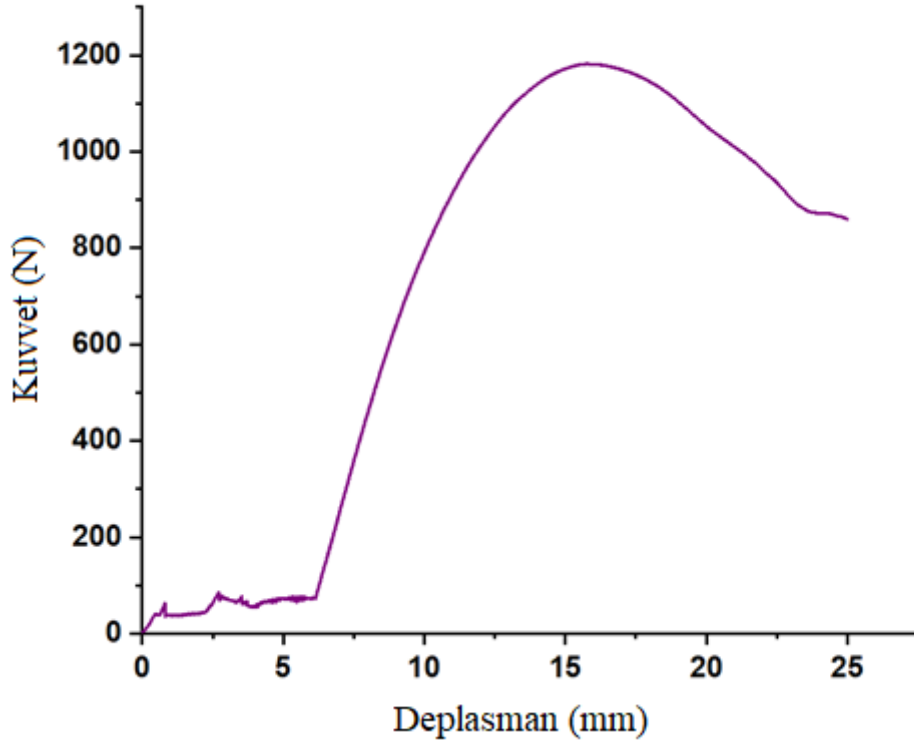


Şekil 4. 33. 3Boyutlu yazıcı ile üretilmiş altıgen balpeteği çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının 3-Nokta eğme testi ve test esnasındaki hasar oluşumu



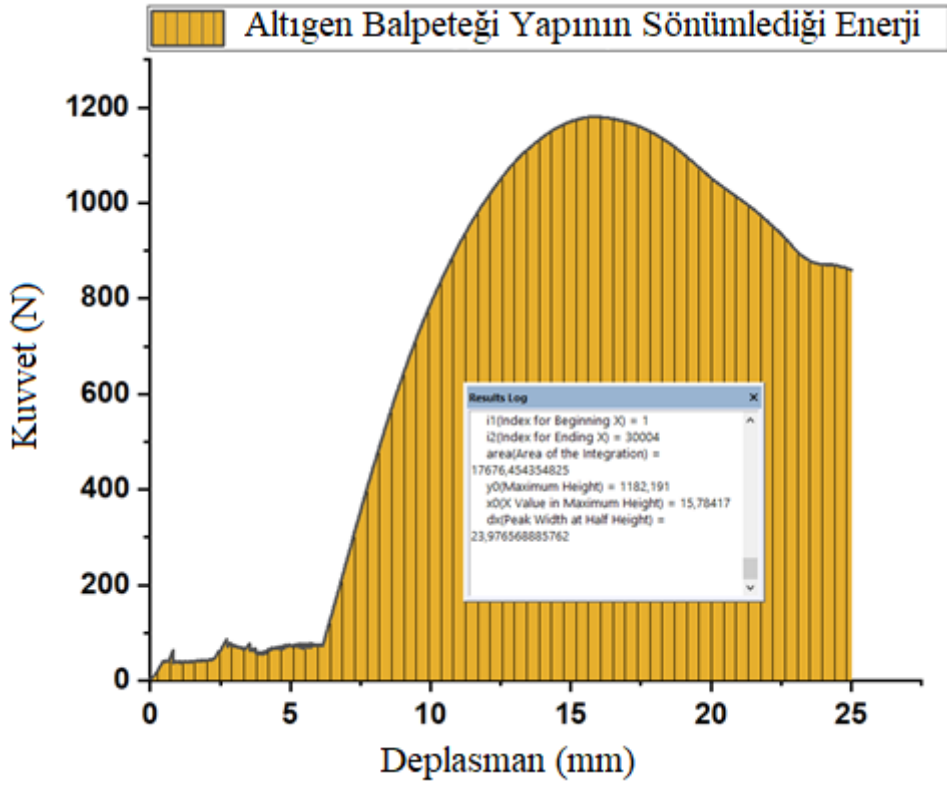
Şekil 4. 34. 3-Nokta eğme testi sonrası altıgen balpeteği çekirdeğe sahip sandviç yapıdaki hasar görünümü

Altıgen Balpeteği Çekirdekli Sandviçin 3-Nokta Eğilme Grafiği



Şekil 4. 35. Altıgen balpeteği çekirdek geometrili sandviç yapının 3-Nokta eğme testine ait kuvvet-deplasman grafiği

Grafik incelendiğinde yine başlangıç esnasındaki plato bölgesinin varlığı bilinmektedir. Bu bölgeden sonra yapı elasto-plastik bir davranış sergilemeye başlamıştır. Sinüzoidal oluklu yapıya kıyasla daha düşük kuvvet değerlerine ulaşabilmiş olsada, sünek davranış olarak, yani hem elastik hem de plastik şekil değişimi miktarı olarak aralarında çok büyük bir fark olmamıştır. Grafik incelendiğinde farkedilen bir diğer durum ise kuvvet eğrisinin eğiminin sinüzoidal oluklu yapıya oranla daha düşük olmasıdır. Ayrıca yapıda oluşan hasar katman katman oluşmadığından bir önceki parçada olduğu gibi ikinci bir kuvvet pik noktası oluşturmamıştır. Hasar görselinden de anlaşılacağı üzere yapıda oluşan hasar, sola eğik olacak şekilde çarpazlama gerçekleşmiş ve bütün yapı boyunca oluşmuştur. Yapının test esnasında sönmülediği enerji miktarı ve ulaşabildiği maksimum kuvvet değerlerini gösteren grafik aşağıda şekil 4.36’da verilmektedir.



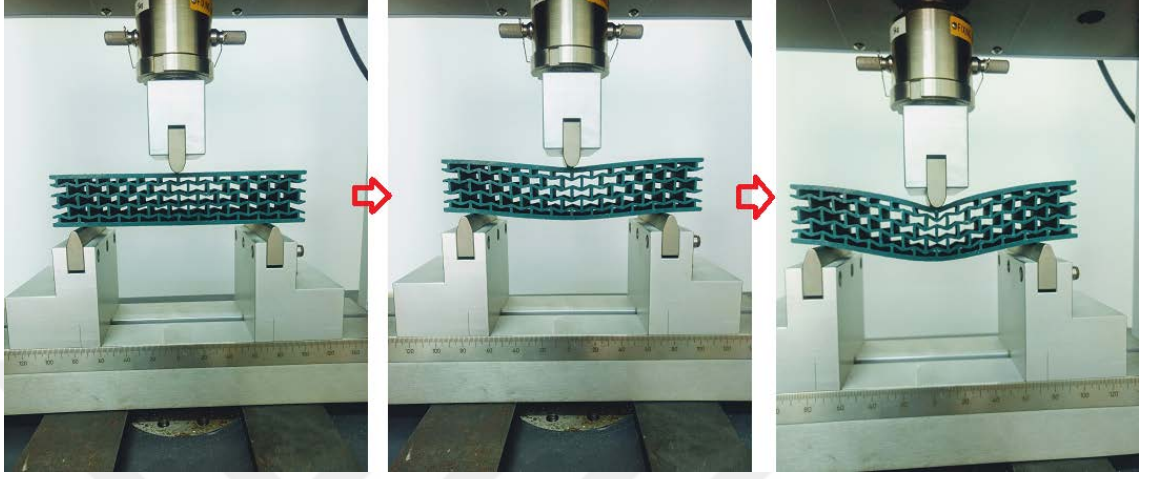
Şekil 4. 36. Altıgen balpeteği çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının eğilme yükü altında sönümlediği enerji

Grafik incelendiğinde, yapının dayanabildiği maksimum kuvvetin $F_{Bab}=1182,2N$ olduğu görülürken bu değere ulaştığında yapıdaki toplam şekil değiştirme miktarı, $\delta_{Bab}=15,78mm$ olmaktadır; ayrıca sinüzoidal çekirdekli yapının eğilme yükü altında sönümlediği enerji miktarı $E_{Bab}=17,68J$ olarak kayıt edilmiştir.

4.5.3. Yeniden Kıvrımlı Çekirdek Geometrisine Sahip Sandviç Yapının 3-Nokta Eğme Testi

Standarda uygun olarak testleri gerçekleştirilen özetik yeniden kıvrımlı çekirdek geometrisine sahip sandviç yapıların eğme testi, test esnasında parçada oluşan eğilme ve hasar görüntüleri şekil 4.37’de verilmektedir. Test sonucunda parçalardaki hasar

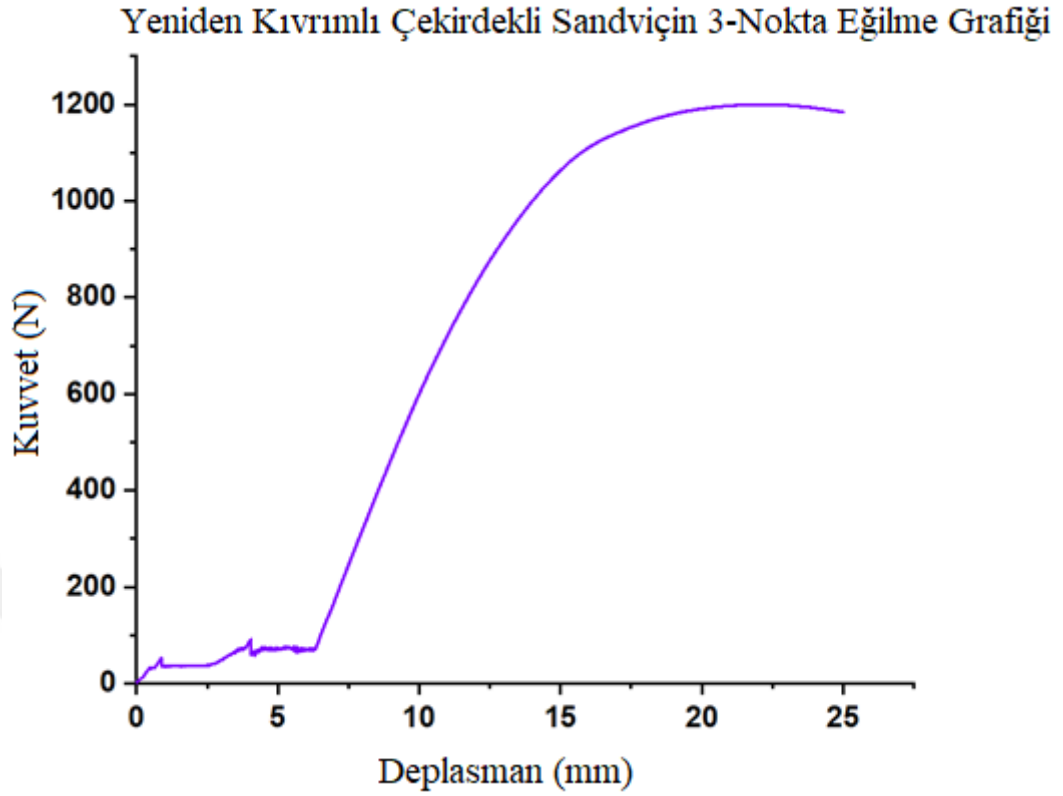
durumları şekil 4.38’de verilirken parçaya ait eğilme kuvvet-deplasman grafikleri şekil 4.39’da gösterilmektedir.



Şekil 4. 37. 3Boyutlu yazıcı ile üretilmiş yeniden kıvrımlı çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının 3-Nokta eğme testi ve test esnasındaki hasar oluşumu



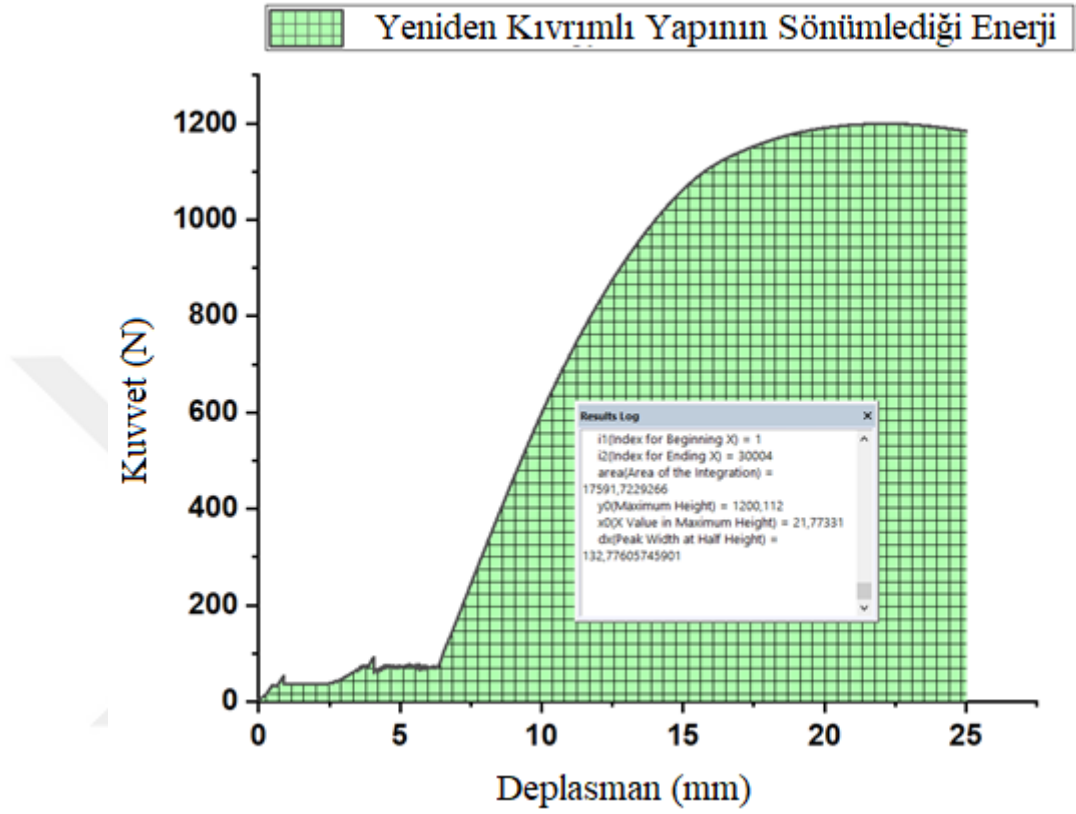
Şekil 4. 38. 3-Nokta eğme testi sonrası yeniden kıvrımlı çekirdeğe sahip sandviç yapıdaki hasar görünümü



Şekil 4. 39. Yeniden kıvrımlı çekirdek geometrili sandviç yapının 3-Nokta eğme testine ait kuvvet-deplasman grafiği

Grafik incelendiğinde başlangıç esnasındaki plato bölgenin varlığı yeniden gözlemlenmektedir. Bu bölgeden sonra diğer 2 yapıya benzer şekilde bir elasto-plastik davranış gösteren yeniden kıvrımlı yapı, test sınırı olan 25mm deplasmana geldiğinde hala taşıdığı kuvvetten büyük oranda kayıp vermemiştir. Yani yapı hasar aldıktan sonra bile dayanım göstermeye devam etmiştir. Bunun en büyük sebeplerinin başında yapının sahip olduğu ökzetik yani negatif poisson oranlı davranış gelmektedir. Çalışmayı yaparken beklendiği üzere ökzetik davranışın yapıya hem elastik hem de plastik bölgede dayanım kattığı gözlemlenmiştir. Ayrıca yapının sahip olduğu bu davranış sonucunda deney sonundaki numunenin hasarı incelendiğinde, oluşan hasarın büyük çoğunluğunun plastik deformasyona bağlı olmadığı görülmüş yani, elastik deformasyon kısmını geri veren yapının diğer yapılara oranla büyük hasar göstermediği gözlemlenmiştir. Bu da bu yapıların uygulanan yük sonrası hasarının kalıcı olmadığını göstermektedir. Yapının

test esnasında sönümlediği enerji miktarı ve dayanabildiği maksimum yük değeri aşağıda şekil 4.40’da grafik üzerinde verilmiştir.

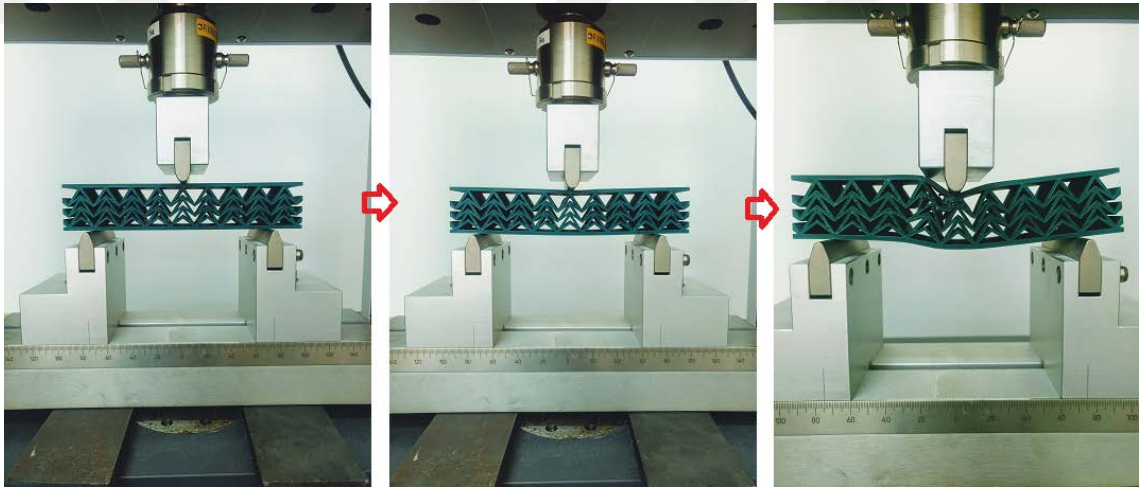


Şekil 4. 40. Yeniden kıvrımlı çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının eğilme yükü altında sönümlediği enerji

Grafik incelendiğinde, yapının dayanabildiği maksimum kuvvetin $F_{Byk}=1200N$ olduğu görülürken bu değere ulaştığında yapıdaki toplam şekil değiştirme miktarı, $\delta_{Byk}=21,78mm$ olmaktadır; ayrıca sinüzoidal çekirdekli yapının eğilme yükü altında sönümlediği enerji miktarı $E_{Byk}=17,6J$ olarak hesaplandığı görülmektedir.

4.5.4. Çift Ok Kafa Çekirdek Geometrisine Sahip Sandviç Yapının 3-Nokta Eğme Testi

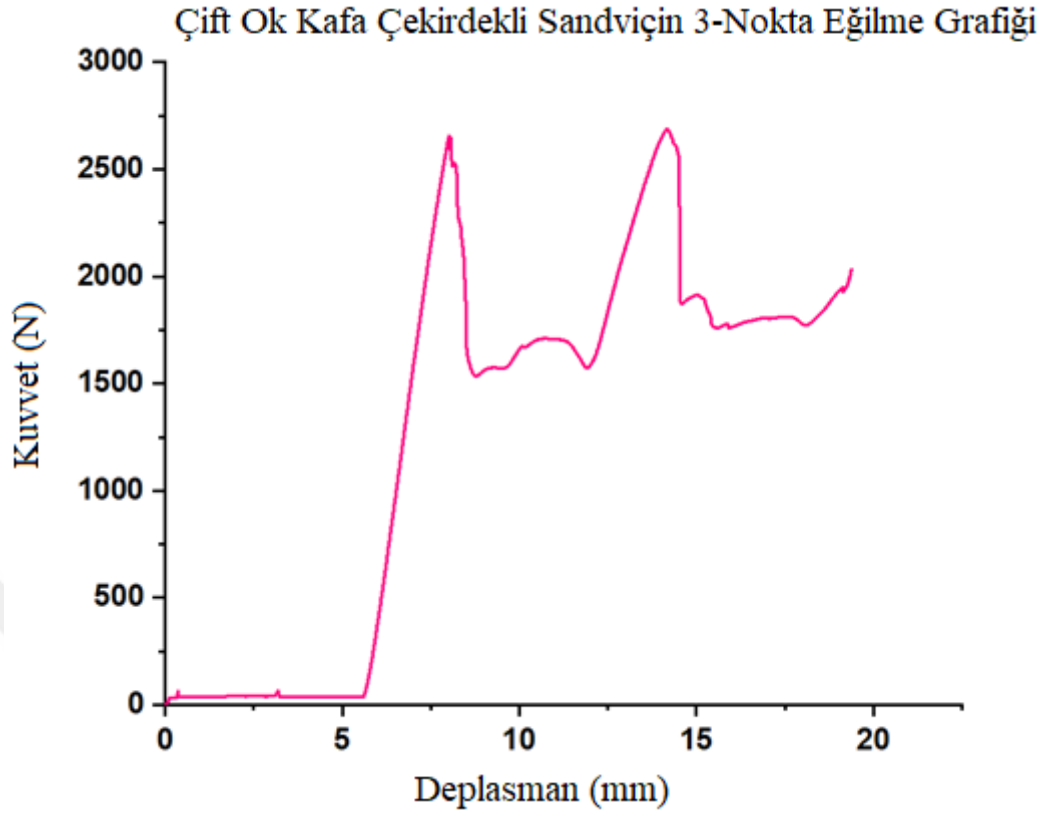
Standartta uygun olarak testleri gerçekleştirilen ökzetik çift ok kafa çekirdek geometrisine sahip sandviç yapıların eğme testi, test esnasında parçada oluşan eğilme ve hasar görüntüleri şekil 4.41’de verilmektedir. Test sonucunda parçalardaki hasar durumları şekil 4.42’de verilirken parçaya ait eğilme kuvvet-deplasman grafikleri şekil 4.43’te gösterilmektedir.



Şekil 4. 41. 3Boyutlu yazıcı ile üretilmiş çift ok kafa çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının 3-Nokta eğme testi ve test esnasındaki hasar oluşumu



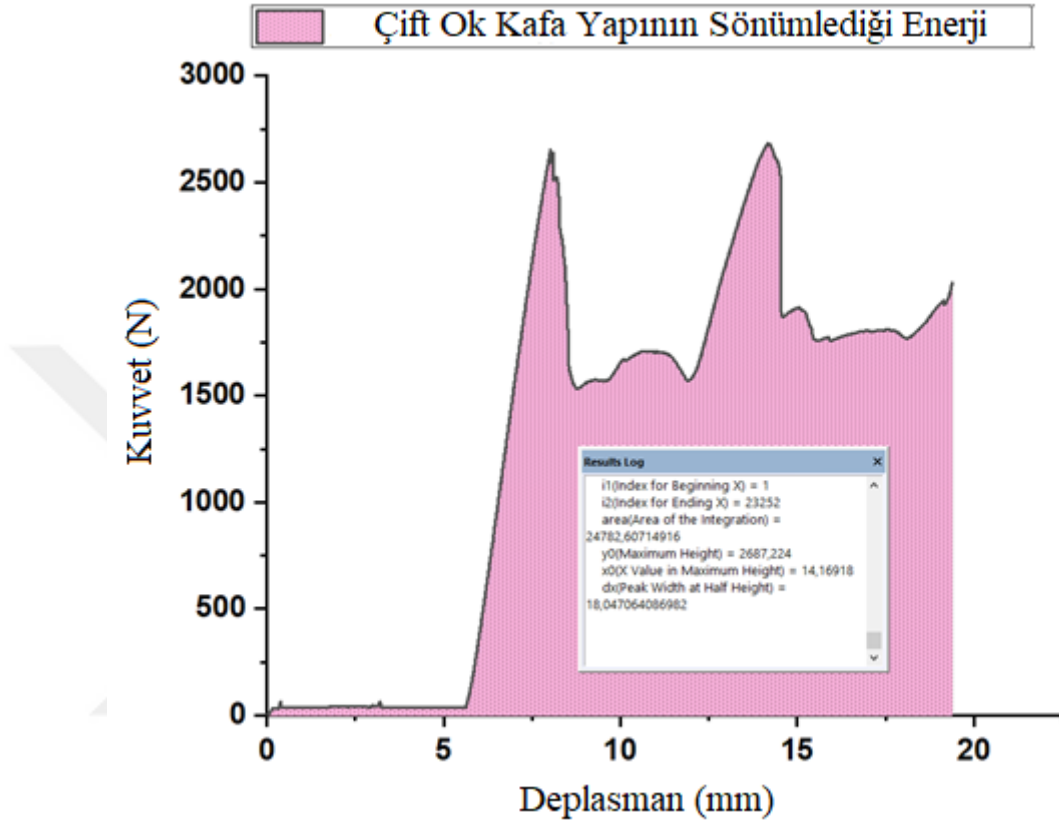
Şekil 4. 42. 3-Nokta eğme testi sonrası çift ok kafa çekirdeğe sahip sandviç yapıdaki hasar görünümü



Şekil 4. 43. Çift ok kafa çekirdek geometrili sandviç yapının 3-Nokta eğme testine ait kuvvet-deplasman grafiği

Bu yapıya ait grafik incelendiğinde başlangıçtaki plato bölgesi sonrasında ani bir kuvvet artışı olduğu gözlemlenmiştir. Bası testinde olduğu gibi yapının sahip olduğu rijitlik kuvvetin hızlı bir şekilde artmasına sebep olmaktadır. Ayrıca yine yapının rijitliği sayesinde şu ana kadar incelenen 3 modele oranla çok daha yüksek kuvvet değerlerine çıktığı görülmektedir. Esas önemli kısım ise, grafikten de görüleceği üzere yapı hasara uğradığı pik kuvvet değerine geldikten sonra hasar etkisiyle bir miktar dayanımında düşüş yaşasa da, hasar gören katmandaki çekirdeğin bir alt katmana ulaşması ile yapının yine hasar görmemiş halindeki kadar bir dayanım göstermesini sağlamıştır. Özellikle yüksek dayanım ve hasar sonrası da yüksek dayanım gerektiren, patlama koruyucu özelliği olan yerlerde istenilen bir davranış şeklidir. Yapının hasar sonrası gösterdiği pik kuvvet değeri hasarsız halinden daha yüksek olmakla beraber, 2. katmanın da hasar sonrası plastik bölgede taşıdığı yük miktarı ilk hasara göre daha fazladır. Yani yapı hasar gördükten sonra, hasarsız halinden bir miktar daha iyi bir dayanım

sergileyebilmektedir. Yapının test esnasında sönümlediği enerji miktarı ve taşıyabildiği maksimum kuvvet miktarı aşağıda şekil 4.44'teki grafikte verilmektedir.

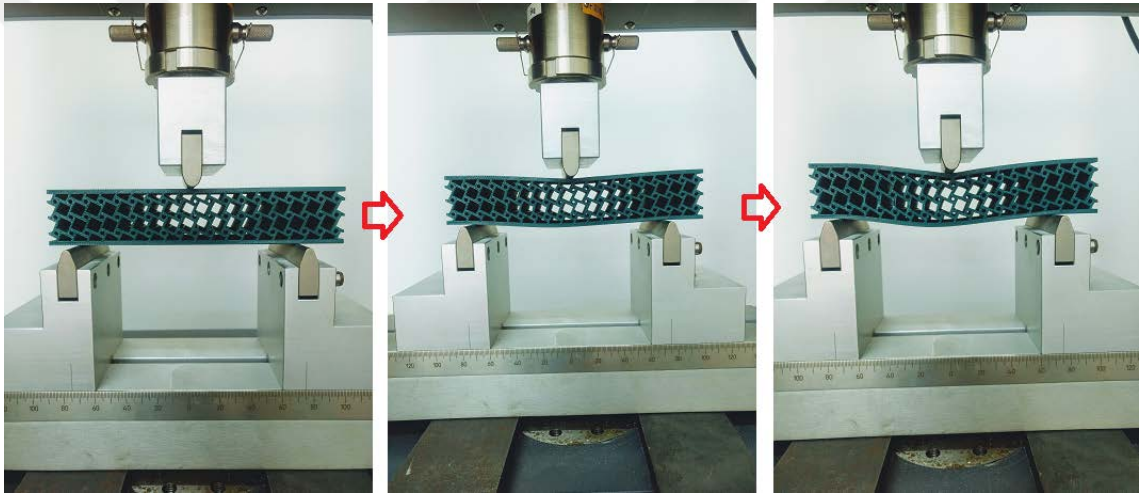


Şekil 4. 44. Çift ok kafa çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının eğilme yükü altında sönümlediği enerji

Grafik incelendiğinde, yapının dayanabildiği maksimum kuvvetin $F_{B\text{çok}}=2687,2\text{N}$ olduğu görülürken bu değere ulaştığında yapıdaki toplam şekil değiştirme miktarı, $\delta_{B\text{çok}}=14,17\text{mm}$ olmaktadır; ayrıca sinüzoidal çekirdekli yapının eğilme yükü altında sönümlediği enerji miktarı $E_{B\text{çok}}=24,78\text{J}$ olarak hesaplandığı görülmektedir.

4.5.5. Tetrachiral Çekirdek Geometrisine Sahip Sandviç Yapının 3-Nokta Eğme Testi

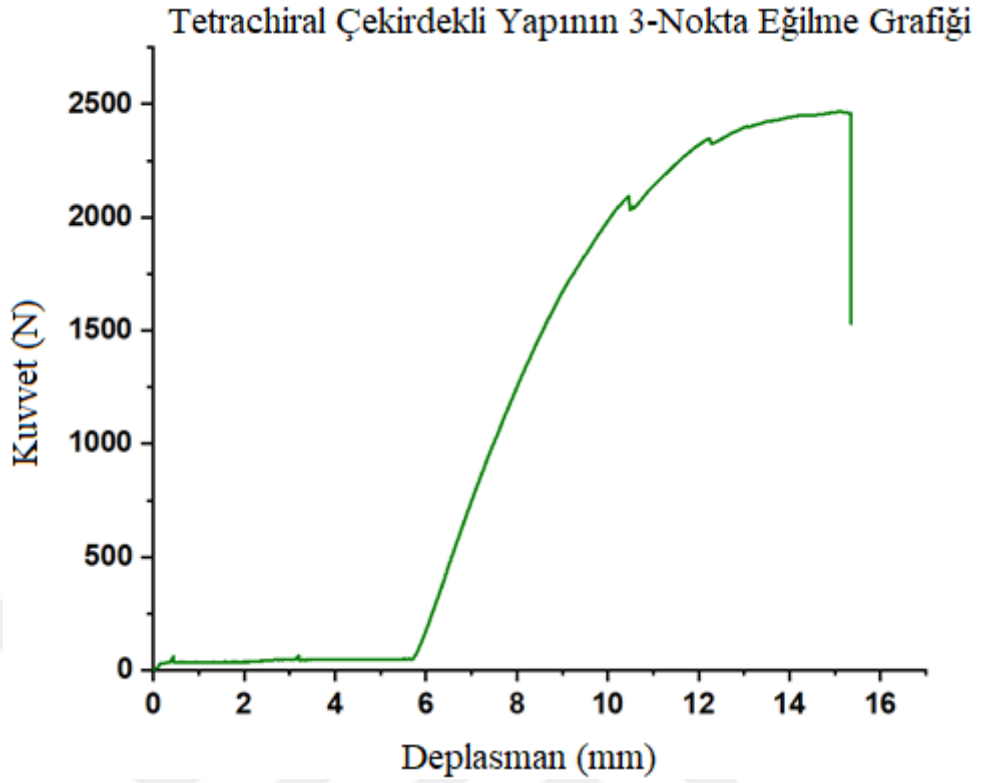
Standarda uygun olarak testleri gerçekleştirilen ökzetik tetrachiral çekirdek geometrisine sahip sandviç yapıların eğme testi, test esnasında parçada oluşan eğilme ve hasar görüntüleri şekil 4.45'te verilmektedir. Test sonucunda parçalardaki hasar durumları şekil 4.46'da verilirken parçaya ait eğilme kuvvet-deplasman grafikleri şekil 4.47'de gösterilmektedir.



Şekil 4. 45. 3Boyutlu yazıcı ile üretilmiş tetrachiral çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının 3-Nokta eğme testi ve test esnasındaki hasar oluşumu

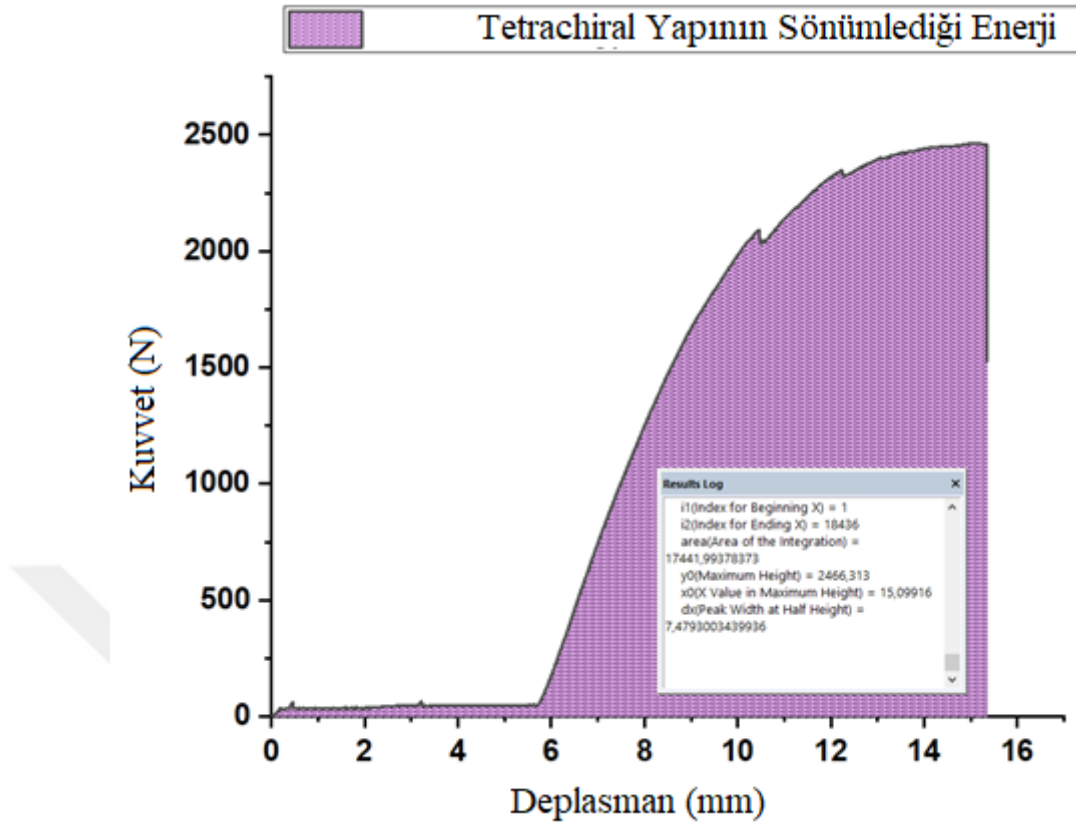


Şekil 4. 46. 3-Nokta eğme testi sonrası tetrachiral çekirdeğe sahip sandviç yapıdaki hasar görünümü



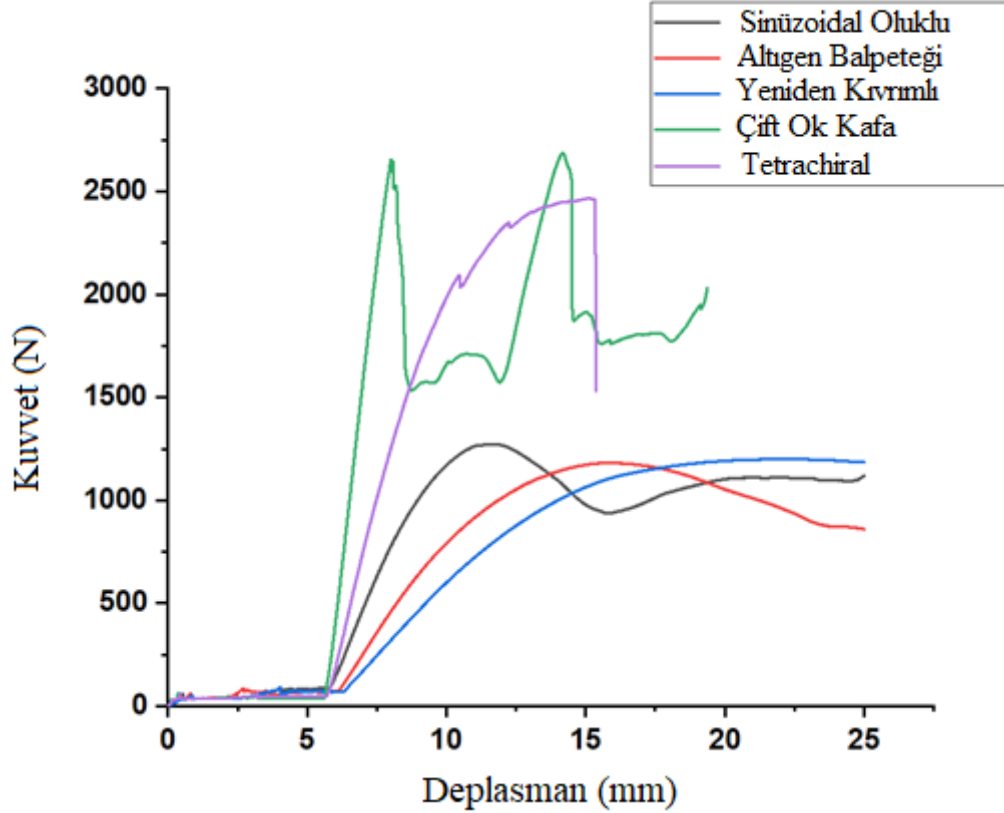
Şekil 4. 47. Tetrachiral çekirdekli geometrilili sandviç yapının 3-Nokta eğme testine ait kuvvet-deplasman grafiği

Grafik incelendiğinde eğilme yükü altındaki yapının test başlangıcındaki plato bölgesinden sonra elasto-plastik bir malzeme davranışı sergilediği, bu davranışı sergilerken ökzetik olmayan sinüzoidal oluklu ve altıgen balpeteği yapıdan çok daha yüksek kuvvet dayanımlarına ulaştığı görülmektedir. Yapının hasar sonrası görseline bakıldığında yine ökzetik yeniden kıvrımlı yapıda olduğu gibi üzerindeki hasarın elastik kısmını geri verdiğinde yapının kullanılabilir olduğu görülmektedir. Çift ok kafa geometrilili yapıda olduğu gibi yapının kullanımını engelleyen kalıcı bir hasar meydana gelmemiştir. Yapının test esnasında sönümlendiği enerji miktarı ve dayanabildiği maksimum kuvvet değeri aşağıda grafikte şekil 4.48’de verilmektedir.



Şekil 4. 48. Tetrachiral çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının eğilme yükü altında sönümlediği enerji

Grafik incelendiğinde, yapının dayanabildiği maksimum kuvvetin $F_{Btc}=2466,3N$ olduğu görülürken bu değere ulaştığında yapıdaki toplam şekil değiştirme miktarı, $\delta_{B\text{çok}}=15,1mm$ olmaktadır; ayrıca sinüzoidal çekirdekli yapının eğilme yükü altında sönümlediği enerji miktarı $E_{B\text{çok}}=17,44J$ olarak hesaplandığı görülmektedir.



Şekil 4. 49 Tüm geometrilere ait 3-nokta eğilme grafikleri

Tüm sandviç yapılara ait 3-Nokta eğilme kuvvet-deplasman eğrileri tek bir grafik olarak yukarıda şekil 4.49'da verilmiştir. Bu grafik incelendiğinde ilk olarak göze çarpan başlangıç anıyla 5mm'lik deplasman arasında kalan plato bölgesindeki dalgalanmalardır. Farklı geometrideki bu yapılar oluştururken yapı mimarisi kaynaklı, yapı içindeki boşluk miktarları da farklıdır. Yani örneğin altıgen balpeteği geometrisini yazarken yazıcının yapı içerisinde bıraktığı boşluk ile tetrachiral geometrisini yazarken bıraktığı boşluk miktarı farklıdır. Bu farklılık üretilecek geometriye bağlı olmakla birlikte yazıcı veya yazdırma mimarisi ile kontrol edilebilen bir parametre değildir. Bu sebeple bu dalgalanmalar ve anlık yükselmeler yapı içerisindeki boşluğun yoğunluğuna bağlı olarak değişmektedir. Grafikte görülen bir diğer önemli husus ise yapıların davranış biçimleridir. Çift ok kafa ve tetrachiral yapılar daha dik bir eğimle kuvvet artışı gösterirken şekil değişimleri daha düşüktür. Bu da yapıların yüksek dayanım ve enerji sönümlene kabiliyetlerine sahip olduklarını bir kere daha ortaya koymaktadır.

Ayrıca testte dikkat çeken bir diğer önemli nokta ise çift ok kafa çekirdekli sandviçte eğilme yükü altında ilk pik noktasına ulaştıktan sonra yapıda bir deformasyon olduğu fakat bu deformasyonun bir süre sonra yapıyı zayıflatmak yerine daha da güçlendirdiği ve buna bağlı olarak ikinci bir kuvvet pik noktası oluşturduğu ve hatta bu ikinci noktanın ilkinden daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu durumun açıklaması yapının geometrisiyle alakalıdır. Hasar sonrası ilk katmandaki yapı ikinci katmandaki yapıdan destek alarak daha güçlü bir çekirdek halini almaktadır.

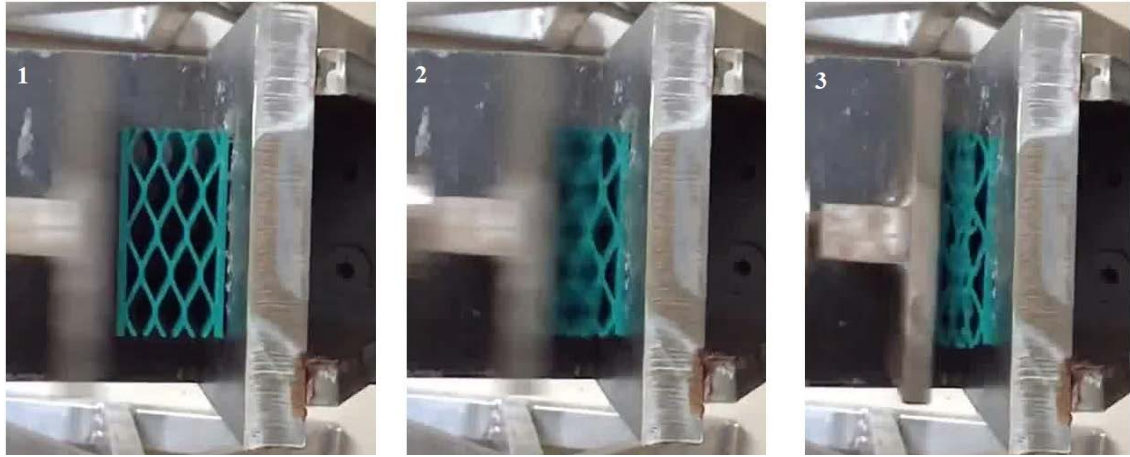
4.6. Dinamik Basma Deneyleri

Birçok mühendislik malzemesi ve yapısı farklı yükleme koşullarında normalde gösterdiğinden farklı özellikler göstermektedir. Özellikle yavaş hatta durağan sayılabilecek yükleme hızlarındaki dayanım ve mekanik davranışlarıyla yüksek yükleme hızlarındaki davranışları belirgin farklılıklar göstermektedir. Bunun başlıca sebebi birçok mühendislik yapı ve malzemesinin yükleme hızına duyarlı davranışlar sergiliyor olmasıdır. Bu sebeple tasarlayıp ürettiğimiz sandviç yapıların hem dinamik yükler altındaki davranışlarını belirleme de hem de yüksek yükleme hızlarında yapıların dayanımlarını karşılaştırmak adına bu deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler, UMİMAG Laboratuvarında bulunan Split Hopkinson Bası deney düzeneği modifiyelendirilerek hem bası hem de 3-nokta eğilme deneylerini gerçekleştirmeye uygun hale getirilmiştir.

Statik basma deneyinde olduğu gibi yine aynı ebatlarda bası numuneleri standartlara uygun olarak üretilmiş ve bu numuneler üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Deney verileri 100kN kapasiteli bir yük hücresinin bağlı olduğu bir veri toplama ünitesi ile elde edilmiştir. Dinamik bası deneyleri $\sim 10^2 \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızında gerçekleştirilmiştir.

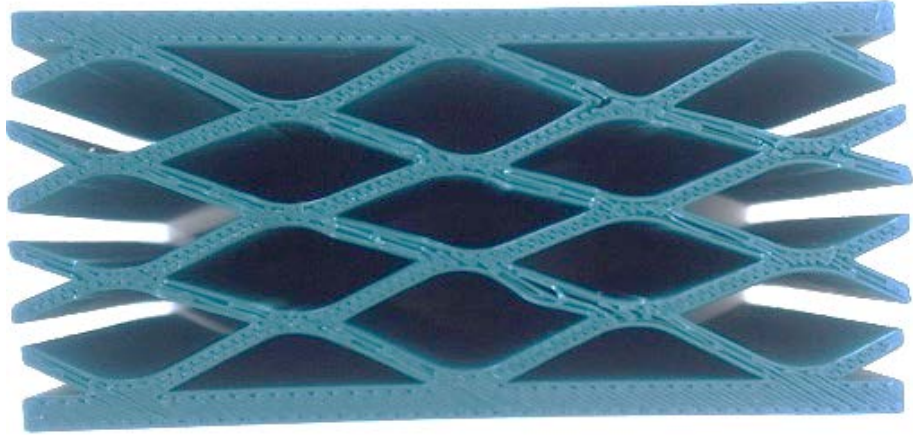
4.6.1. Sinüzoidal Oluklu Çekirdek Geometrisine Sahip Sandviç Yapının Dinamik Basma Deneyi

Standartlara uygun olarak üretilen sandviç numunenin dinamik basma deneyleri 15 barlık gaz basıncı ile gerçekleştirilmiştir. Bası kafası ile numune arasında 150mm ivmelenme mesafesi bırakılmıştır. Bu verilen bilgiler tüm modellerin testi için ortak olarak uygulanmıştır. Aşağıda şekil 4.50’de sinüzoidal oluklu çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının dinamik bası testi görüntüleri verilmektedir. Bu görüntülerde numunenin hasar almadan önceki hali ve deney esnasındaki hasarı gösterilmektedir.

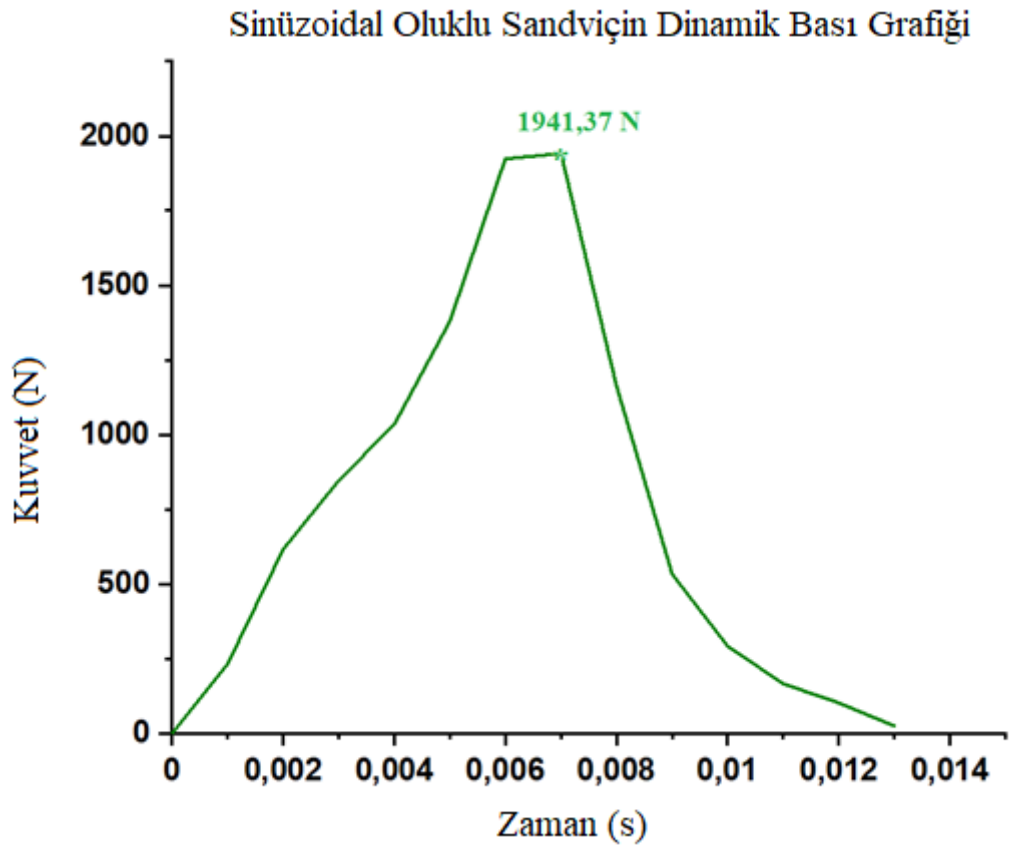


Şekil 4. 50. Sinüzoidal oluklu çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının dinamik bası testi

Deney başlangıcında numunenin sahip olduğu kalınlık 38.45mm iken deney sonucunda bu kalınlık değeri 34.63mm’ye gerilemiştir. Sandviç yapı uygulanan yükün büyük bir çoğunluğunu plastik deformasyonla sönümlenmiştir. Sandviç yapıya ait deney sonu hasar görüntüsü şekil 4.51’de verilirken deneye ait kuvvet-zaman grafiği şekil 4.52’de verilmektedir. Sandviç numunenin gösterebildiği maksimum kuvvet miktarı ise 1941.37N olarak kaydedilmiştir.



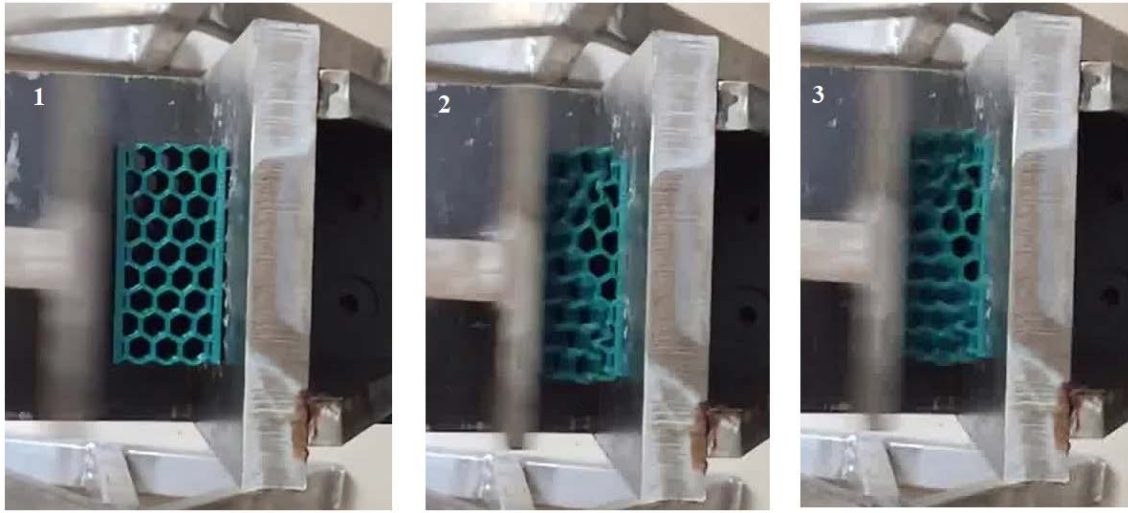
Şekil 4. 51. Sinüzoidal oluklu çekirdeğe sahip sandviç yapının deney sonu hasar görünümü



Şekil 4. 52. Sinüzoidal oluklu çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının dinamik bası testine ait kuvvet-zaman grafiği

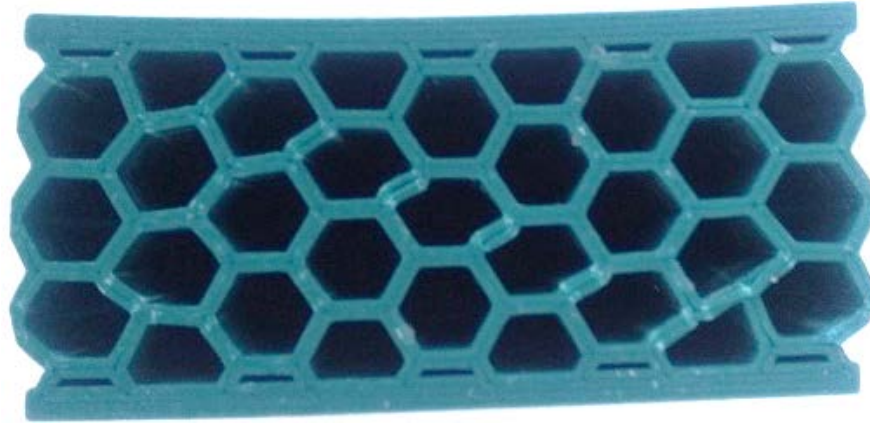
4.6.2. Altıgen Balpeteği Çekirdek Geometrisine Sahip Sandviç Yapının Dinamik Basma Deneyi

Standartlara uygun olarak üretilen sandviç numunenin dinamik deney görüntüleri aşağıda şekil 4.53'te verilmektedir. Görüntüler hasar başlamadan önceki hali ve deney esnasındaki hasarı göstermektedir.

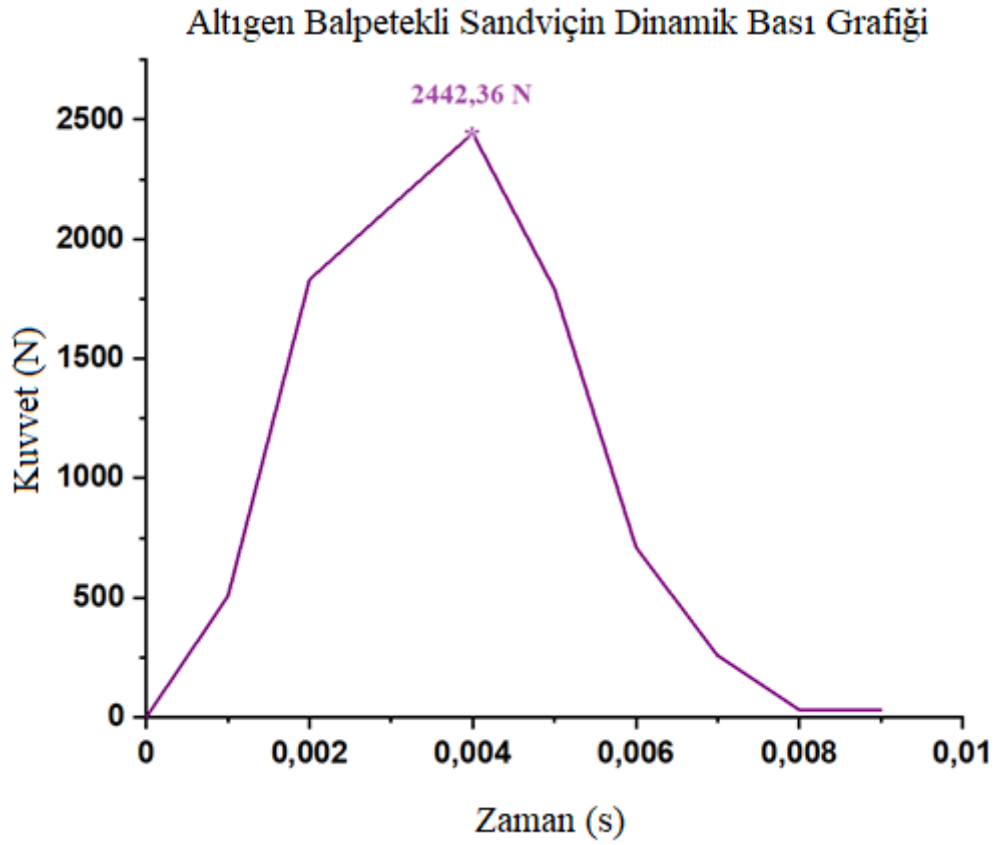


Şekil 4. 53. Altıgen balpeteği çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının dinamik bası testi

Deney başlangıcında numunenin sahip olduğu kalınlık 36,85 mm iken deney sonucunda bu kalınlık değeri 35,33 mm'ye gerilemiştir. Sandviç yapı uygulanan yükün büyük bir çoğunluğunu plastik deformasyonla sönmülemiştir. Sandviç yapıya ait deney sonu hasar görüntüsü şekil 4.54'te verilirken deneye ait kuvvet-zaman grafiği şekil 4.55'te verilmektedir. Sandviç numunenin gösterebildiği maksimum kuvvet miktarı ise 2442,32 N olarak kaydedilmiştir.



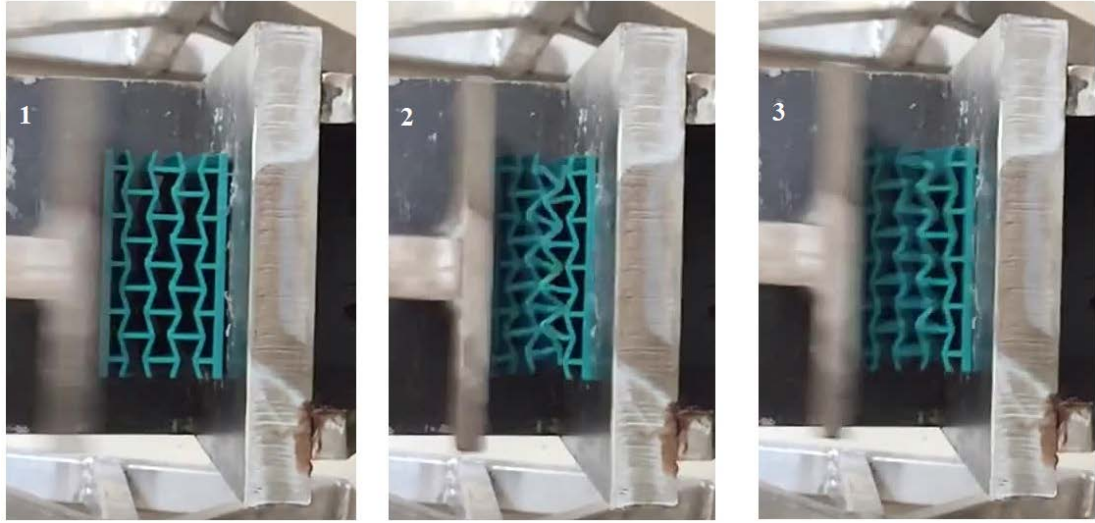
Şekil 4. 54. Altıgen balpeteği çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının deney sonu hasar görünümü



Şekil 4. 55. Altıgen balpeteği çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının dinamik bası testine ait kuvvet-zaman grafiği

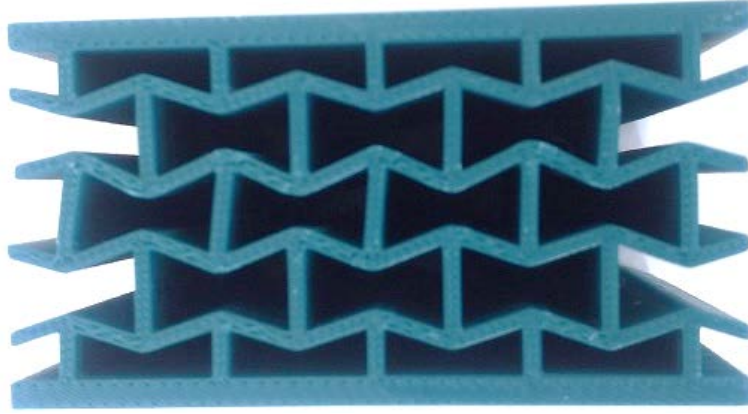
4.6.3. Yeniden Kıvrımlı Çekirdek Geometrisine Sahip Sandviç Yapının Dinamik Basma Deneyi

Standartlara uygun olarak üretilen sandviç numunenin dinamik deney görüntüleri aşağıda şekil 4.56’da verilmektedir. Görüntüler hasar başlamadan önceki hali ve deney esnasındaki hasarı göstermektedir.

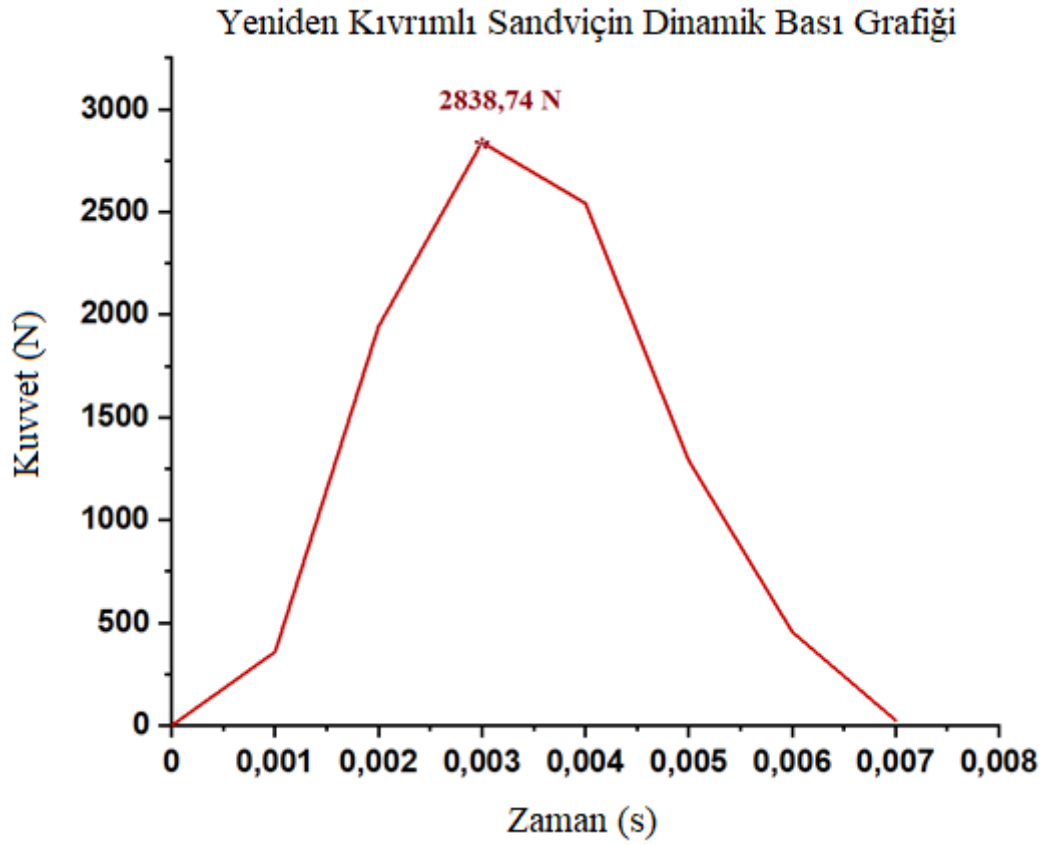


Şekil 4. 56. Yeniden kıvrımlı çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının dinamik bası testi

Deney başlangıcında numunenin sahip olduğu kalınlık 45,96 mm iken deney sonucunda bu kalınlık değeri 45,34 mm’ye gerilemiştir. Sandviç yapı uygulanan yükün büyük bir çoğunluğunu elastik deformasyonla sönmlemiştir. Sandviç yapıya ait deney sonu hasar görüntüsü şekil 4.57’de verilirken deneye ait kuvvet-zaman grafiği şekil 4.58’de verilmektedir. Sandviç numunenin gösterebildiği maksimum kuvvet miktarı ise 2838,74 N olarak kaydedilmiştir.



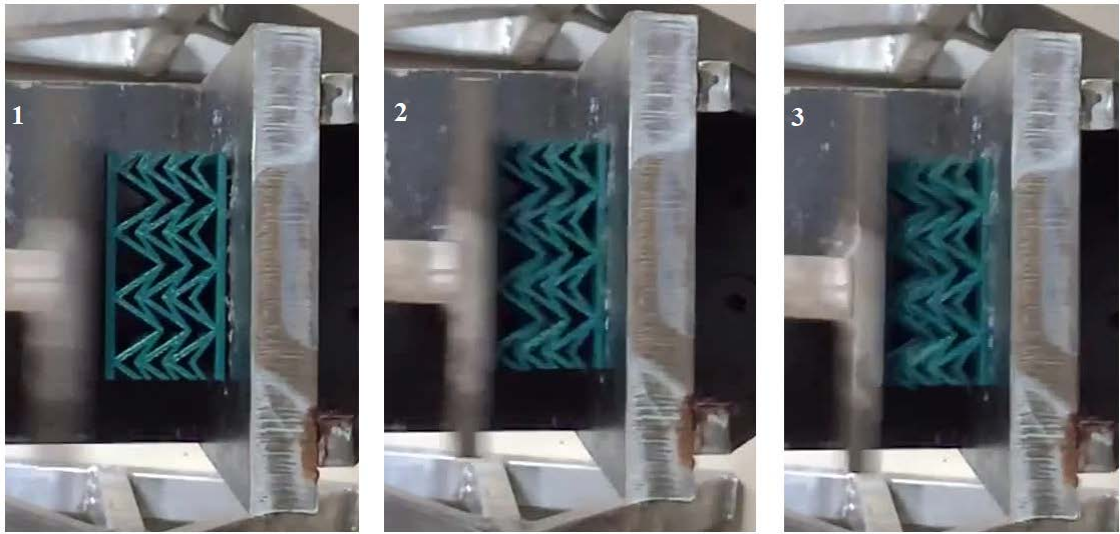
Şekil 4. 57. Yeniden kıvrımlı çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının deney sonu hasar görünümü



Şekil 4. 58. Yeniden kıvrımlı çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının dinamik bası testine ait kuvvet-zaman grafiği

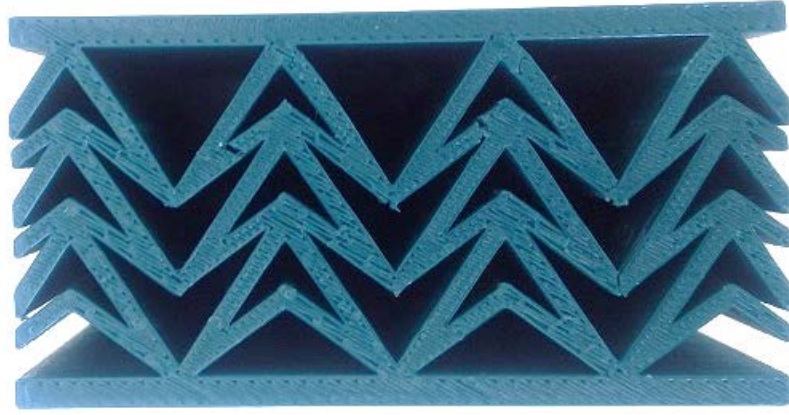
4.6.4. Çift Ok Kafa Çekirdek Geometrisine Sahip Sandviç Yapının Dinamik Basma Deneyi

Standartlara uygun olarak üretilen sandviç numunenin dinamik deney görüntüleri aşağıda şekil 4.59’da verilmektedir. Görüntüler hasar başlamadan önceki hali ve deney esnasındaki hasarı göstermektedir.



Şekil 4. 59. Çift ok kafa çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının dinamik bası testi

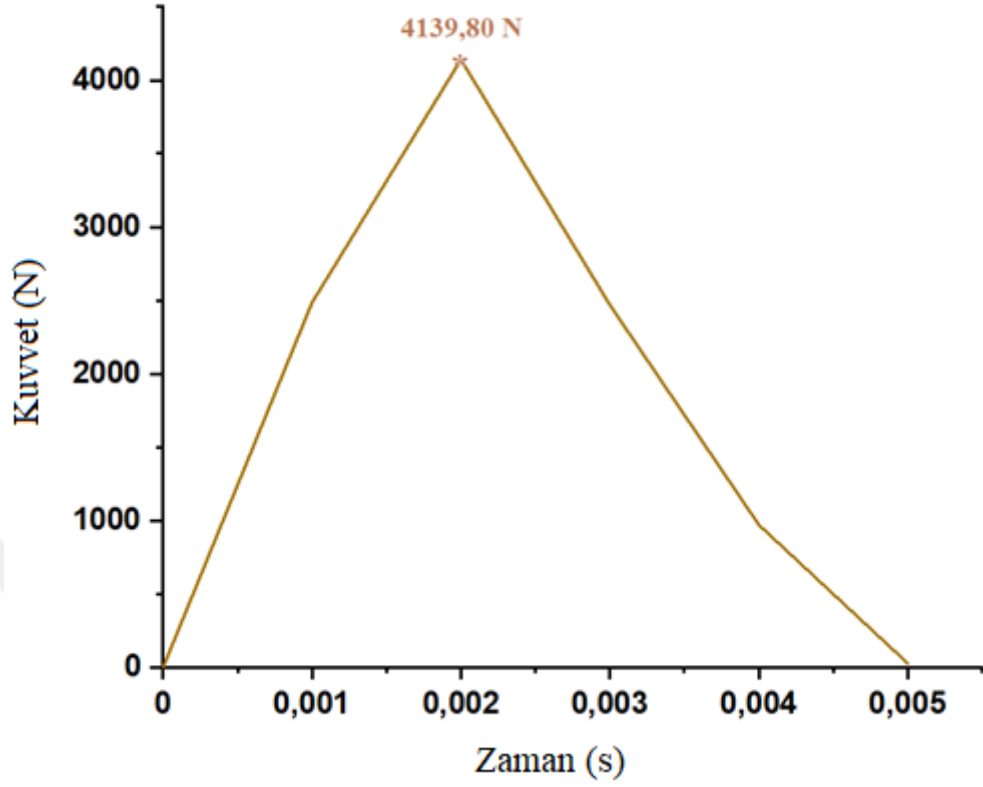
Deney başlangıcında numunenin sahip olduğu kalınlık 38,8 mm iken deney sonucunda bu kalınlık değeri 38,26 mm’ye gerilemiştir. Sandviç yapı uygulanan yükün büyük bir çoğunluğunu elastik deformasyonla sönümlenmiştir. Yapı oldukça rijit bir davranış sergilemiştir. Sandviç yapıya ait deney sonu hasar görüntüsü şekil 4.60’ta verilirken deneye ait kuvvet-zaman grafiği şekil 4.61’de verilmektedir. Sandviç numunenin gösterebildiği maksimum kuvvet miktarı ise 4139,80 N olarak kaydedilmiştir.



Şekil 4. 60. Çift ok kafa çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının deney sonu hasar görünümü

Bu noktada belirtilmesi gereken önemli husus şudur: Çift ok kafa geometrisine sahip sandviç yapı, dinamik bası deneyinde de statik deneye benzer şekilde çok az bir deformasyon göstermiştir. Yapı oldukça rijit bir davranış sergilemiş ve deney sonu hasar yalnızca bölgesel çekirdek yapı hasarları olmuştur. Yapı genel itibariyle çok düşük deformasyon sergilemiş bu da yapının hasarsız kalınlığı ve hasar sonrası kalınlığı arasındaki farkın ne kadar küçük olduğu ile anlaşılabilir.

Çift Ok Kafalı Sandviçin Dinamik Bası Grafiği

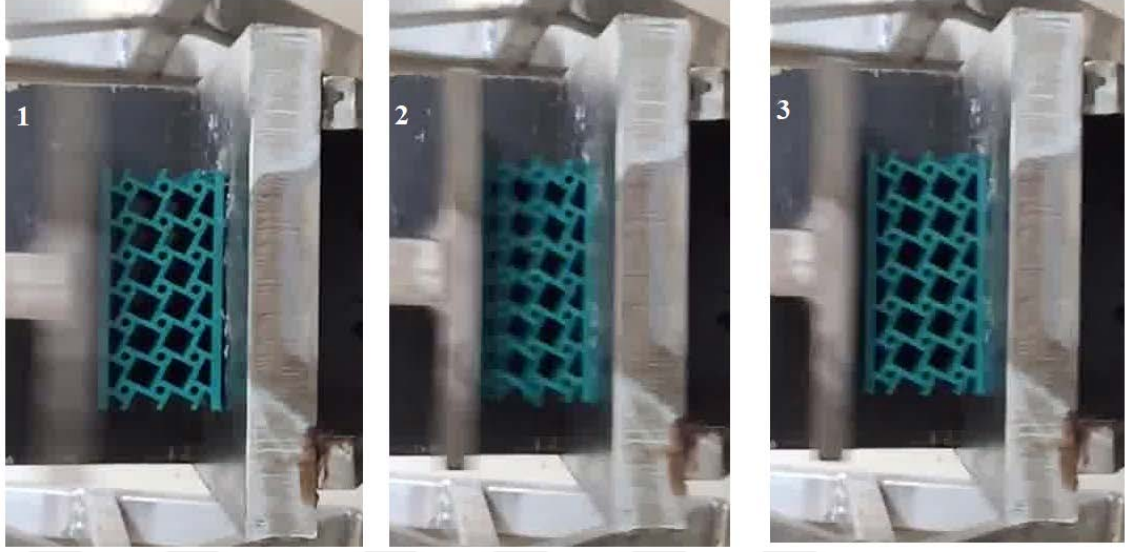


Şekil 4. 61. Çift ok kafa çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının dinamik bası testine ait kuvvet-zaman grafiği

Kuvvet-zaman grafiğine bakıldığında diğer numunelere kıyasla pik kuvvete ulaşma ve sonlanma süresinin daha kısa olduğu görülmektedir. Bu durum da yapının ne kadar rijit bir davranış sergilediğini ve düşük plastik deformasyon değerlerine sahip olduğunu göstermektedir.

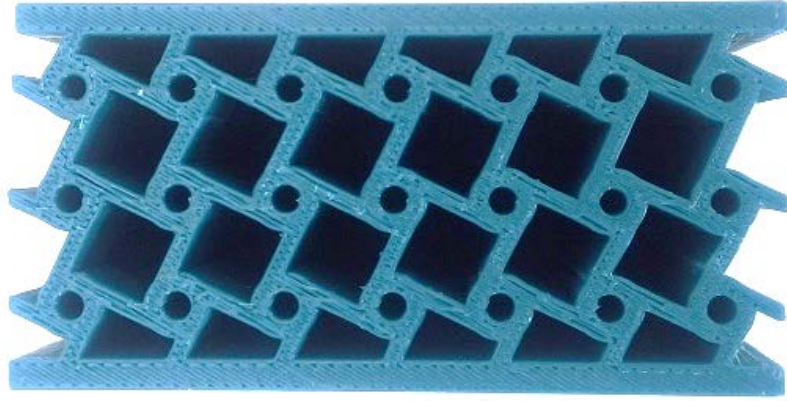
4.6.5. Tetrachiral Çekirdek Geometrisine Sahip Sandviç Yapının Dinamik Basma Deneyi

Standartlara uygun olarak üretilen sandviç numunenin dinamik deney görüntüleri aşağıda şekil 4.62'de verilmektedir. Görüntüler hasar başlamadan önceki hali ve deney esnasındaki hasarı göstermektedir.



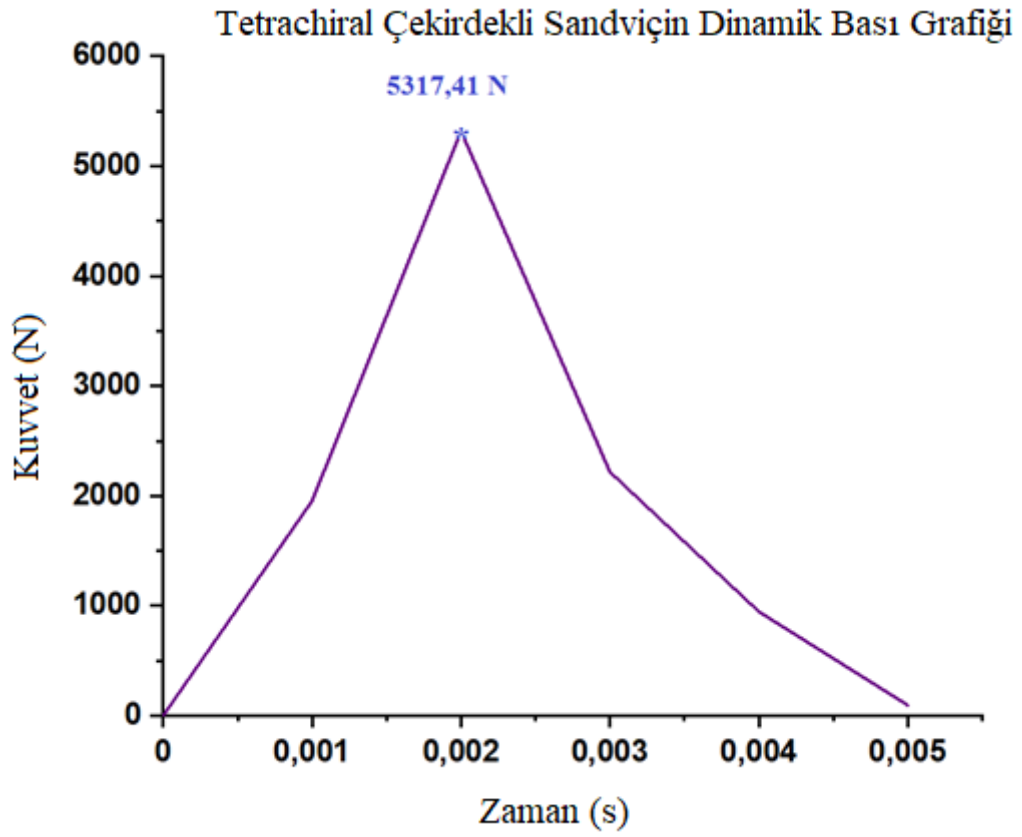
Şekil 4. 62. Tetrachiral çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının dinamik bası testi

Deney başlangıcında numunenin sahip olduğu kalınlık 37,9 mm iken deney sonucunda bu kalınlık değeri 37,7 mm'ye gerilemiştir. Sandviç yapı uygulanan yükün büyük bir çoğunluğunu elastik deformasyonla sönümlenmiştir. Sandviç yapıya ait deney sonu hasar görüntüsü şekil 4.63'te verilirken deneye ait kuvvet-zaman grafiği şekil 4.64'te verilmektedir. Sandviç numunenin gösterebildiği maksimum kuvvet miktarı ise 5317,41 N olarak kaydedilmiştir ve bu değer yapılar içinde elde edilen en yüksek değerdir. Ayrıca test görüntüleri incelendiğinde yapının deformasyonu daha çok elastik olarak sönümlendiğini ve yeniden eski haline çok yakın bir şekilde deneyden çıktığını göstermektedir.



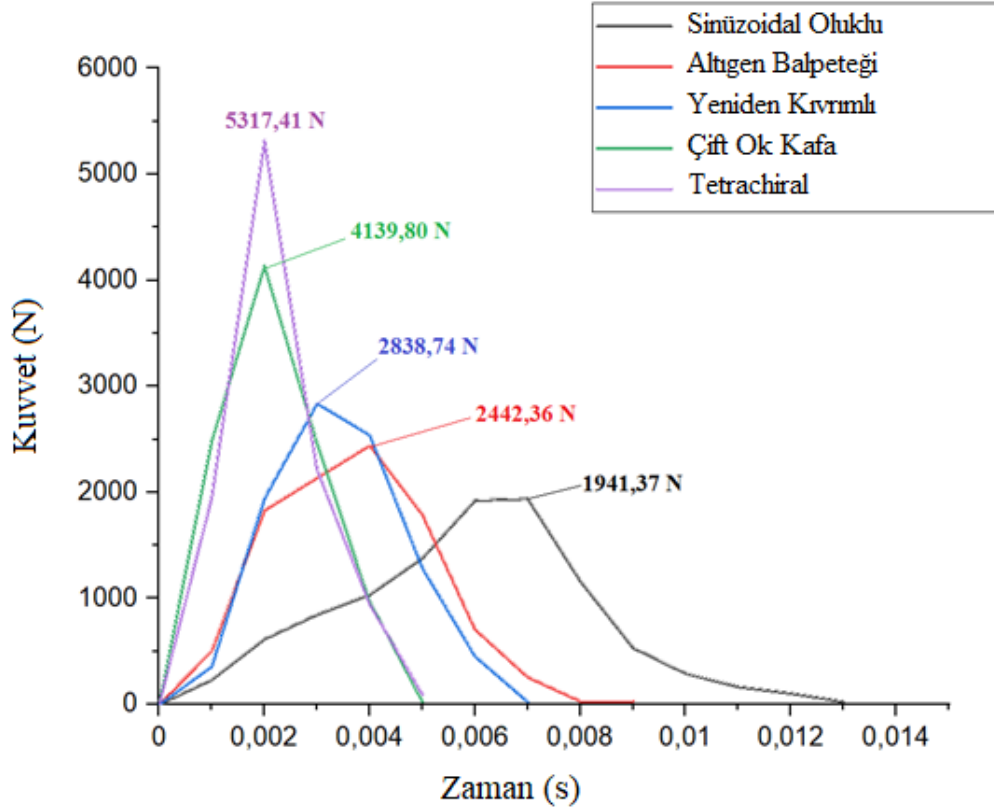
Şekil 4. 63. Tetrachiral çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının deney sonu hasar görünümü

Bu geometriye sahip sandviç yapı da yine çift ok kafa gibi çok düşük deformasyon değerlerine sahiptir. Fakat çift ok kafa geometrisinden farklı olarak yapı oldukça yüksek bir elastik deformasyon yeteneğine sahiptir. Sahip olduğu bu yetenek sayesinde rijit çift ok kafa geometrisinden çok daha yüksek kuvvet değerlerine erişmiştir. Çift ok kafa geometrisinden farklı olarak yapı, önce elastik bir deformasyon sergilemekte ve ardından sıkışma sayesinde rijitliği önemli ölçüde artmaktadır. Bu nedenle bu geometriye ait test de çift ok kafa gibi diğer numunelerden daha kısa sürmüştür.



Şekil 4. 64. Tetrachiral çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının dinamik bası testine ait kuvvet-zaman grafiği

Tüm numunelere ait deneyler tek bir grafikte verildiğinde yapıların davranışlarındaki farklılıklar çok daha net bir şekilde anlaşılabilecektir. Bütün yapılara ait dinamik bası kuvvet-zaman grafiği aşağıda şekil 4.65'te verilmektedir.



Şekil 4. 65. Tüm sandviç modellere ait dinamik bası kuvvet-zaman grafikleri

Toplu haldki grafikler incelendiğinde yapıların dinamik yükler altında belirgin bir dayanım farklılıklarının olduğu görülmektedir. Ayrıca çift ok kafa ve tetrachiral çekirdekli yapıların sahip oldukları rijitlik ve yüksek dayanım nedeniyle fazla deplasman yapmadıkları ve buna bağlı olarak da analiz sürelerinin kısa olduğu görülmektedir.

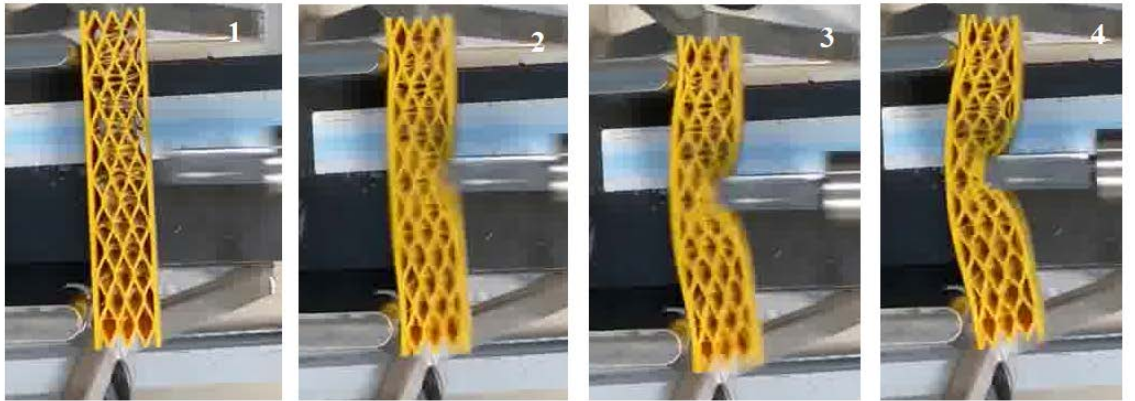
4.7. Dinamik 3-Nokta Eğilme Deneyleri

Dinamik 3-nokta eğilme deneyleri yapıların yüksek eğilme yükü altındaki davranışlarını belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu durum özellikle otomotiv sektöründeki çarpışma önleyici pasif güvenlik elemanlarının çarpışma sırasında yaygın olarak maruz kaldığı yükleri göstermek amacıyla da kullanılmaktadır. UMİMAG Laboratuvarında bulunan Split Hopkinson Bası deney düzeneği aparatlarla modifiyelendirilerek dinamik

3-nokta eğilme deneyine uygun hale getirilmiştir. Deney numuneleri yine statik 3-nokta eğme deneyinde olduğu gibi standartlara uygun şekilde üretilmiştir. Deney verileri 100kN kapasiteli dinamik yük hücresi kullanılarak veri toplama ünitesinin bağlı olduğu bir bilgisayar yardımıyla elde edilmiştir. Deneyde kullanılan tüp basıncı 10bar olmakla birlikte deneyler 10^2 s^{-1} şekil değiştirme hızında gerçekleştirilmiştir.

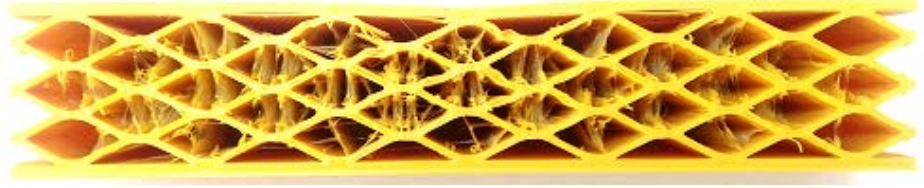
4.7.1. Sinüzoidal Oluklu Çekirdek Geometrisine Sahip Sandviç Yapının Dinamik 3-Nokta Eğilme Deneyi

Standartlara uygun olarak üretilen sandviç numunenin dinamik 3-nokta eğme deneyleri 5 barlık gaz basıncı ile gerçekleştirilmiştir. Eğme kuvvet kafası ile numune arasında 100mm ivmelenme mesafesi bırakılmıştır. Bu verilen bilgiler tüm modellerin testi için ortak olarak uygulanmıştır. Aşağıda şekil 4.66'da sinüzoidal oluklu çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının dinamik 3-nokta eğilme testi görüntüleri verilmektedir. Bu görüntülerde numunenin hasar almadan önceki hali ve deney esnasındaki hasarı gösterilmektedir.

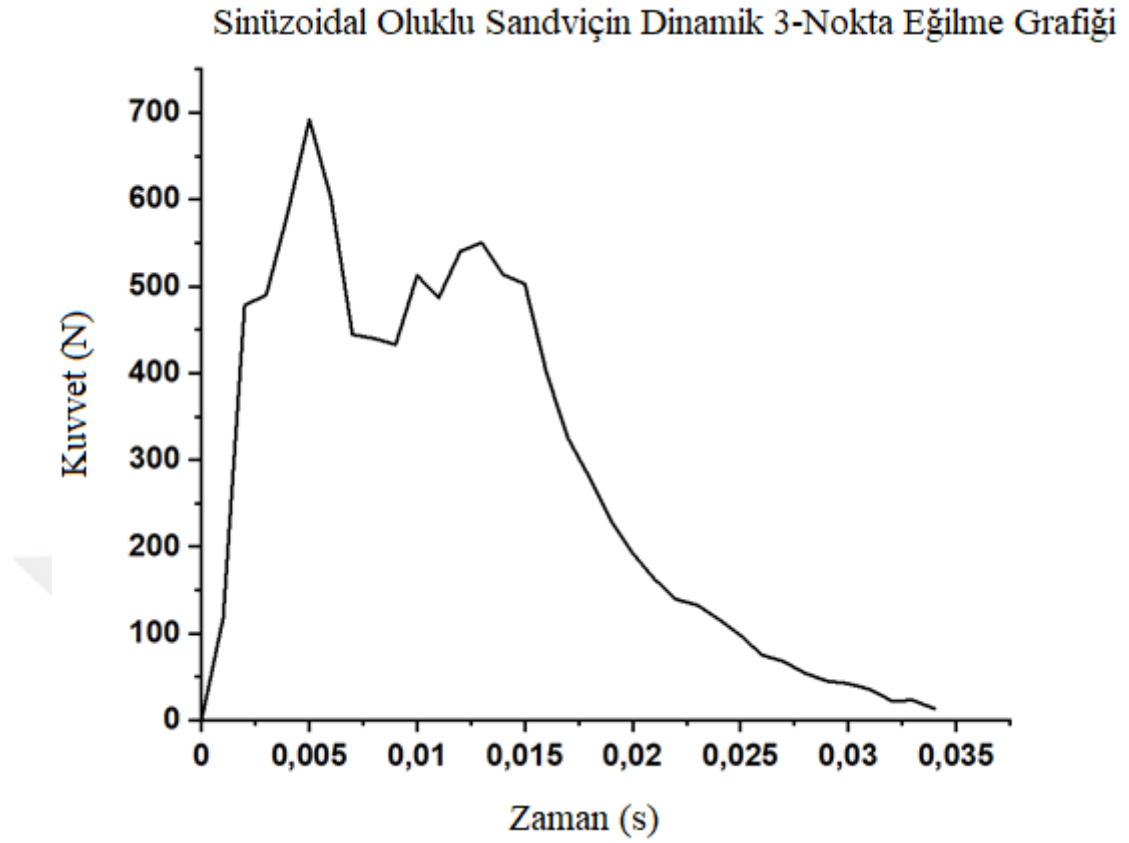


Şekil 4. 66. Sinüzoidal oluklu çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının dinamik 3-nokta eğilme testi

Sandviç yapı uygulanan yükün büyük bir çoğunluğunu plastik deformasyonla sönümlemiştir. Sandviç yapıya ait deney sonu hasar görüntüsü şekil 4.67’de verilirken deneye ait kuvvet-zaman grafiği şekil 4.68’de verilmektedir. Sandviç numunenin gösterebildiği maksimum eğilme kuvvet miktarı ise 692,01 N olarak kaydedilmiştir.



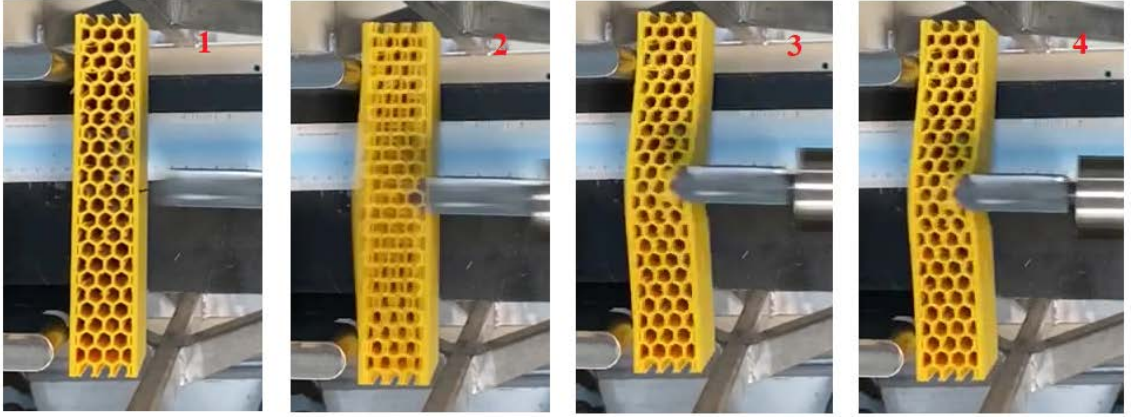
Şekil 4. 67. Sinüzoidal oluklu çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının dinamik 3-nokta eğilme deneyi sonu hasar görünümü



Şekil 4. 68. Sinüzoidal oluklu çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının dinamik 3-nokta eğilme testine ait kuvvet-zaman grafiği

4.7.2. Altıgen Balpeteği Çekirdek Geometrisine Sahip Sandviç Yapının Dinamik 3-Nokta Eğilme Deneyi

Altıgen balpeteği çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının dinamik 3-nokta eğilme deneyine ait görüntüler aşağıda şekil 4.69’da verilmektedir. Bu görüntüde parçanın deney esnasındaki hasarsız ve hasar almış hali görülmektedir.

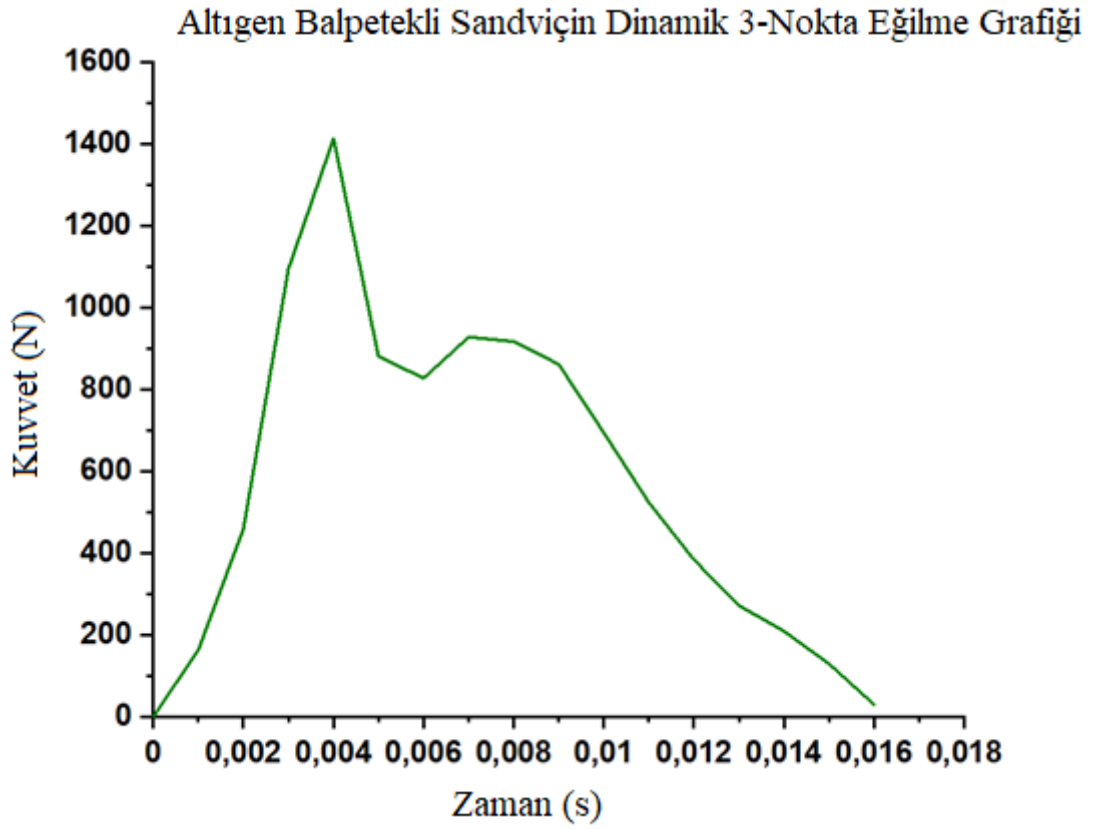


Şekil 4. 69. Altıgen balpeteği çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının dinamik 3-nokta eğilme testi

Sandviç yapı uygulanan yükün büyük bir çoğunluğunu plastik deformasyonla sönümlemiştir. Sandviç yapıya ait deney sonu hasar görüntüsü şekil 4.70’de verilirken deneye ait kuvvet-zaman grafiği şekil 4.71’de verilmektedir. Sandviç numunenin gösterebildiği maksimum eğilme kuvvet miktarı ise 1414,03 N olarak kaydedilmiştir.



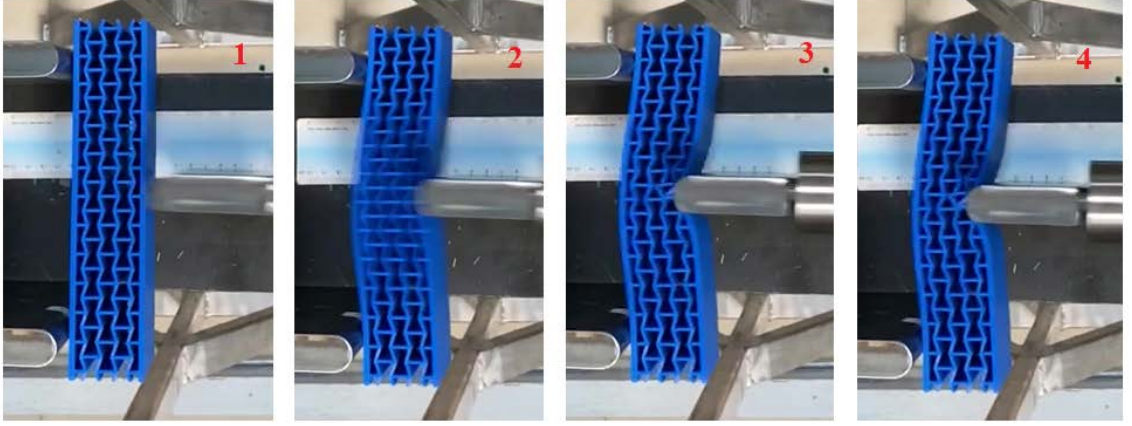
Şekil 4. 70. Altıgen balpeteği çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının dinamik 3-nokta eğilme deneyi sonu hasar görünümü



Şekil 4. 71. Altıgen balpeteği çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının dinamik 3-nokta eğilme testine ait kuvvet-zaman grafiği

4.7.3. Yeniden Kıvrımlı Çekirdek Geometrisine Sahip Sandviç Yapının Dinamik 3-Nokta Eğilme Deneyi

Yeniden kıvrımlı çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının dinamik 3-nokta eğilme deneyine ait görüntüler aşağıda şekil 4.72’de verilmektedir. Bu görüntüde parçanın deney esnasındaki hasarsız ve hasar almış hali görülmektedir.

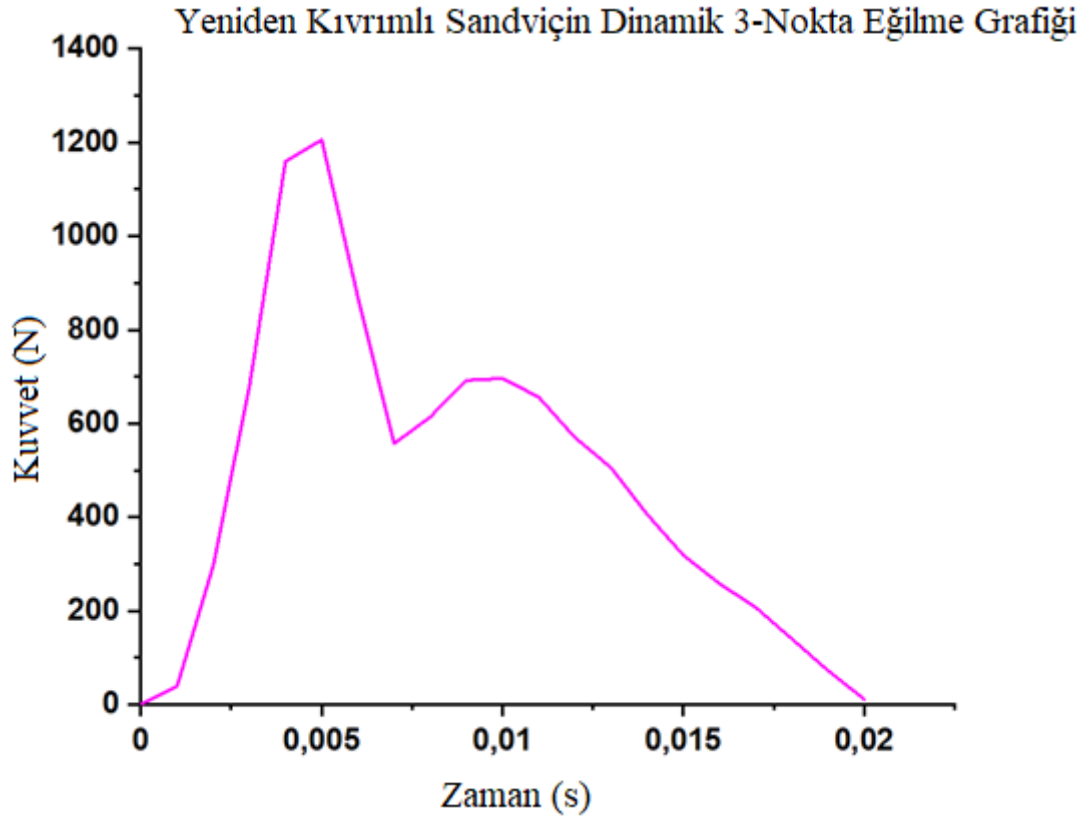


Şekil 4. 72. Yeniden kıvrımlı çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının dinamik 3-nokta eğilme testi

Sandviç yapı uygulanan yükü hem elastik hem de plastik deformasyonla sönümlenmiştir. Sandviç yapıya ait deney sonu hasar görüntüsü şekil 4.73'te verilirken deneye ait kuvvet-zaman grafiği şekil 4.74'te verilmektedir. Sandviç numunenin gösterebildiği maksimum eğilme kuvvet miktarı ise 1205,45 N olarak kaydedilmiştir.



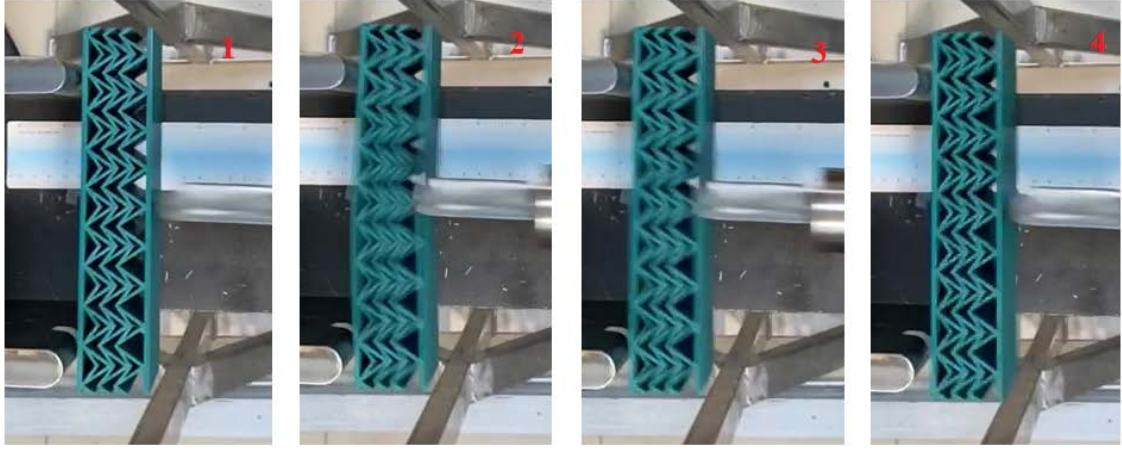
Şekil 4. 73. Yeniden kıvrımlı çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının dinamik 3-nokta eğilme deneyi sonu hasar görünümü



Şekil 4. 74. Yeniden kıvrımlı çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının dinamik 3-nokta eğilme testine ait kuvvet-zaman grafiği

4.7.4. Çift Ok Kafa Çekirdek Geometrisine Sahip Sandviç Yapının Dinamik 3-Nokta Eğilme Deneyi

Çift ok kafa çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının dinamik 3-nokta eğilme deneyine ait görüntüler aşağıda şekil 4.75'te verilmektedir. Bu görüntüde parçanın deney esnasındaki hasarsız ve hasar almış hali görülmektedir.

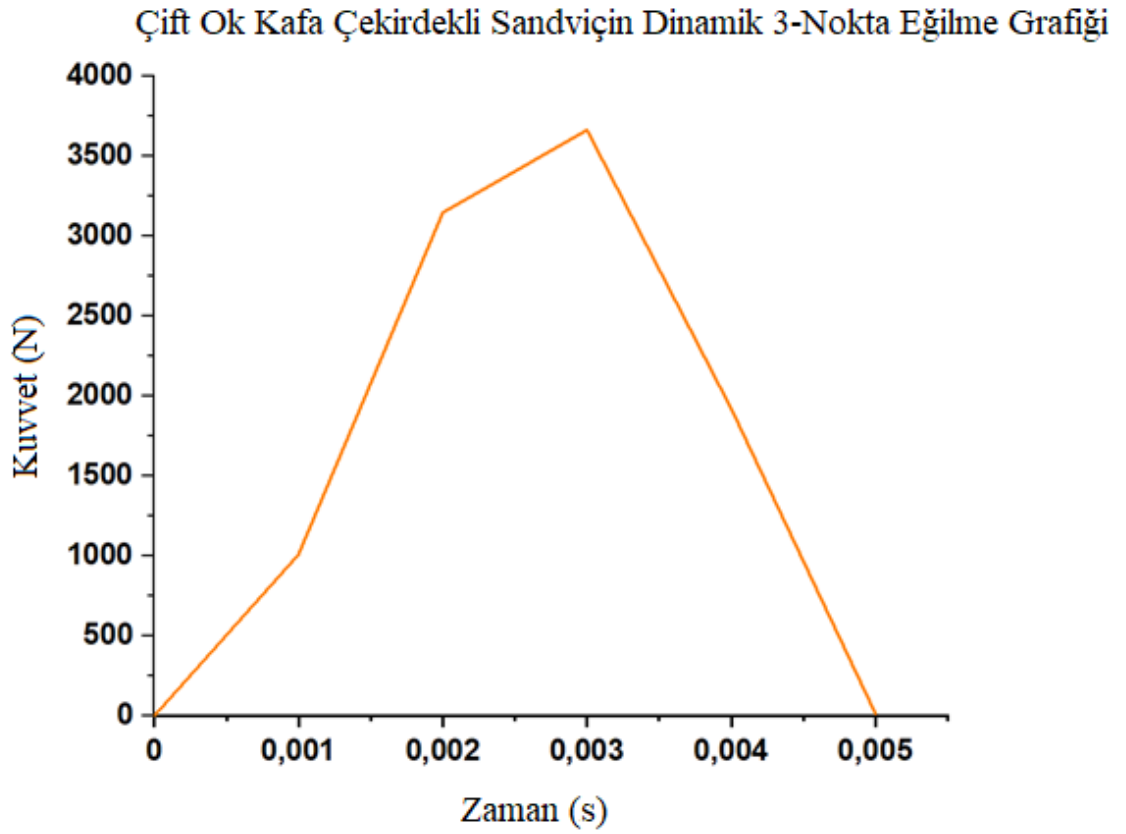


Şekil 4. 75. Çift ok kafa çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının dinamik 3-nokta eğilme testi

Sandviç yapı uygulanan yükün büyük bir çoğunluğunu elastik deformasyonla sönümlemiştir plastik deformasyon sergilemeden parçada kırılma hasarı meydana gelmiştir. Yapı diğer deneylerde olduğu gibi bu yüklemeye de oldukça rijit bir davranış sergilemiştir. Sandviç yapıya ait deney sonu hasar görüntüsü şekil 4.76’da verilirken deneye ait kuvvet-zaman grafiği şekil 4.77’de verilmektedir. Sandviç numunenin gösterebildiği maksimum eğilme kuvvet miktarı ise 3665,29 N olarak kaydedilmiştir.



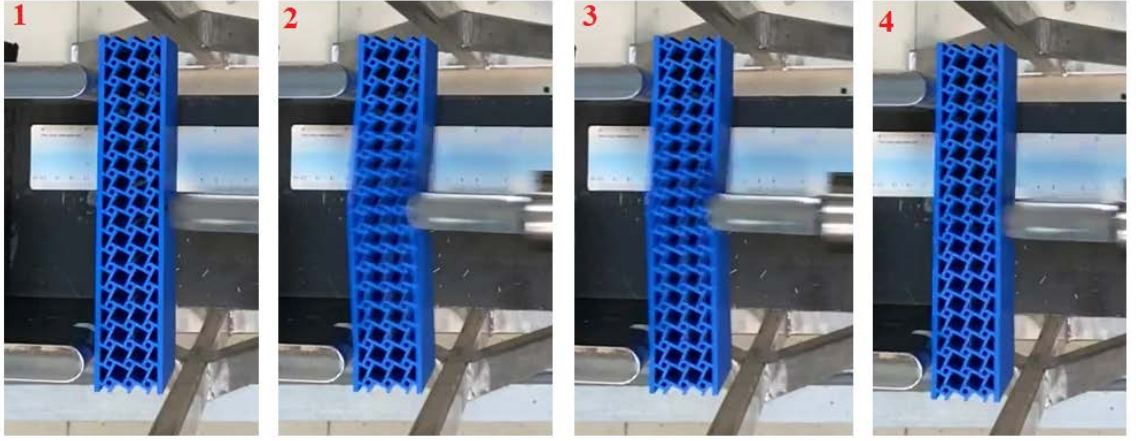
Şekil 4. 76. Çift ok kafa çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının dinamik 3-nokta eğilme deneyi sonu hasar görünümü



Şekil 4. 77. Çift ok kafa çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının dinamik 3-nokta eğilme testine ait kuvvet-zaman grafiği

4.7.5. Tetrachiral Çekirdek Geometrisine Sahip Sandviç Yapının Dinamik 3-Nokta Eğilme Deneyi

Tetrachiral çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının dinamik 3-nokta eğilme deneyine ait görüntüler aşağıda şekil 4.78’de verilmektedir. Bu görüntüde parçanın deney esnasındaki hasarsız ve hasar almış hali görülmektedir.



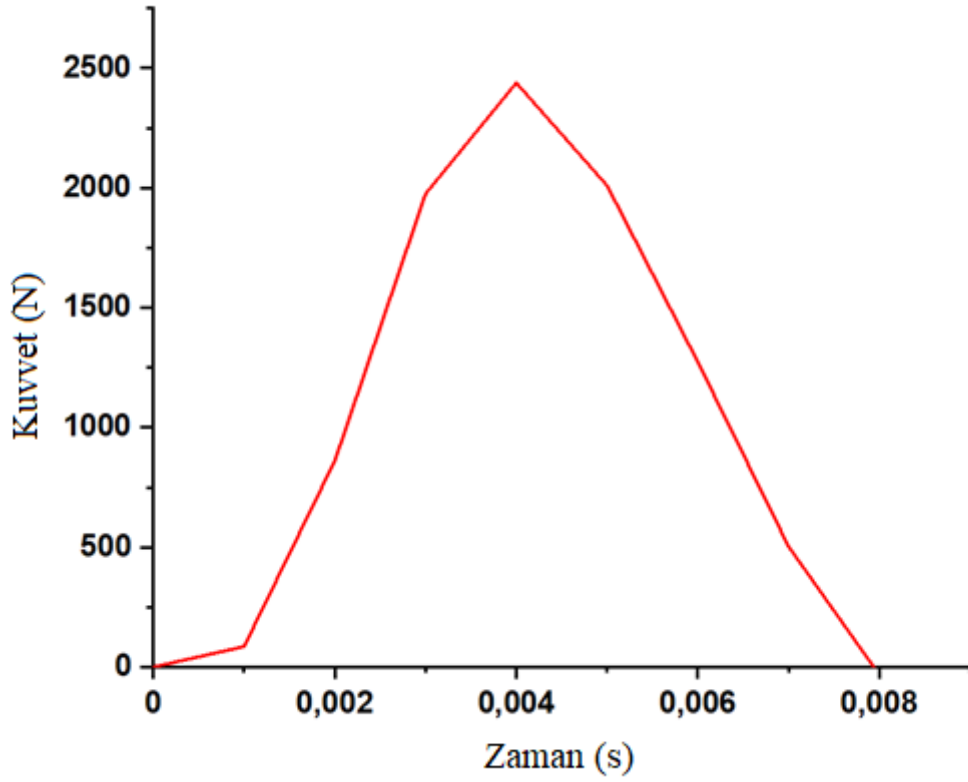
Şekil 4. 78. Tetrachiral çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının dinamik 3-nokta eğilme testi

Sandviç yapı uygulanan yükün büyük bir çoğunluğunu elastik deformasyonla sönmlemiştir. Deney sonunda yapıda kalıcı bir hasar meydana gelmemiştir. Sandviç yapıya ait deney sonu hasar görüntüsü şekil 4.79’da verilirken deneye ait kuvvet-zaman grafiği şekil 4.80’de verilmektedir. Sandviç numunenin gösterebildiği maksimum eğilme kuvvet miktarı ise 2438,95 N olarak kaydedilmiştir.



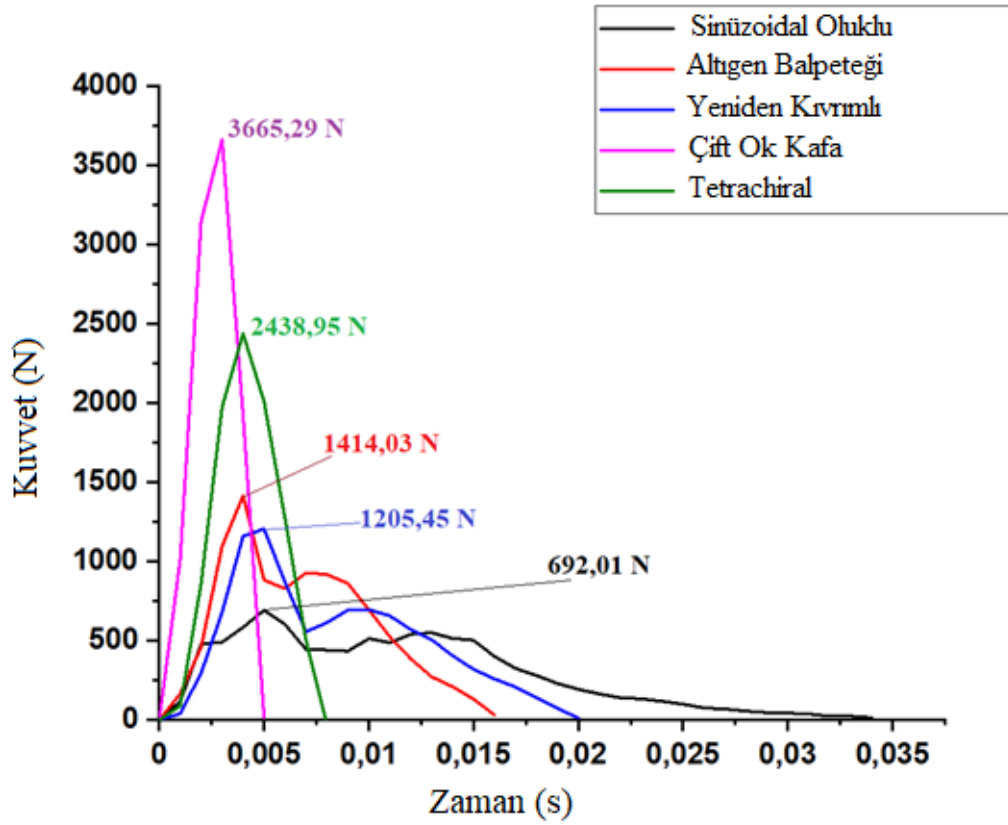
Şekil 4. 79. Tetrachiral çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının dinamik 3-nokta eğilme deneyi sonu hasar görünümü

Tetrachiral Çekirdekli Sandviçin Dinamik 3-Nokta Eğilme Grafiği



Şekil 4. 80. Tetrachiral çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının dinamik 3-nokta eğilme testine ait kuvvet-zaman grafiği

Tüm numunelere ait deneyler tek bir grafikte verildiğinde yapıların davranışlarındaki farklılıklar çok daha net bir şekilde anlaşılabilecektir. Bütün yapılara ait dinamik 3-nokta eğilme kuvvet-zaman grafiği aşağıda şekil 4.81’de verilmektedir.



Şekil 4. 81. Tüm sandviç modellere ait dinamik 3-nokta eğilme kuvvet-zaman grafikleri

Toplu halde verilen grafikler incelendiğinde çift ok kafa geometrili sandviğin çok yüksek eğilme rijitliğine sahip olduğu açıkça görülmektedir. Tetra chiral yapı da yüksek eğilme rijitliğine sahiptir fakat aynı zamanda iyi derecede elastik deformasyon da göstererek çok iyi bir enerji sönümleyici yapı olduğunu yeniden ortaya koymuştur. Bahsedilen bu iki ökzetik yapının diğer yapılara karşı büyük bir avantajı olduğu bu test ile de deneysel olarak ortaya konmuştur.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışmada, 3Boyutlu yazıcı ile üretilmiş 5 farklı çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının mekanik özelliklerini belirlemek için gerekli testler yapılmış ve yapıların dayanımları ve enerji sönümleme kabiliyetlerine bakılmıştır. Elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak yapılar arasında mukayese yapılmıştır.

Yapıların üretiminde aynı hammadde ve aynı üretim prosesi kullanılmıştır. Sandviç yapıların alt ve üst plakaları tüm modeller için eşit kalınlıkta seçilmiş ve bir kriter olmaktan çıkarılmıştır. Yapılarda farklılık gösteren tek özellik sahip oldukları çekirdek geometrisidir. Bu geometrilere bağlı olarak yapıların sahip oldukları kalınlık miktarları arasında küçük farklılıklar oluşmaktadır; bunun sebebi ise tasarımın sebep olduğu kısıtlardır. Ayrıca çekirdek geometrilerinde bu farklılıkları neticesinde yapıların bir diğer farklılıkları sahip oldukları hacim ve ağırlık miktarlarıdır. Farklı geometriler farklı hacimlere ve dolayısıyla da farklı yapı ağırlıklarına sebep olmaktadır. Bu çalışmanın yapılmasındaki temel sebeplerin başında otomotiv, havacılık ve denizcilik sektöründe kullanılan yapıların ağırlığını azaltarak dayanımlarından ödün vermeyecek yapıların tasarım ve üretimi gelmektedir. Bu sebeple yapıların sahip oldukları ağırlıklar kıyaslama için çok önemli bir yer tutmaktadır. Hem bası hem de eğilme testleri için tasarlanan ve üretilen yapıların ağırlıkları, sırasıyla hem tasarım programından alınan analitik veri ile hem de hassas terazi ile ölçülerek aşağıda çizelge 5.1’de gösterilmektedir.

Çizelge 5.1. Farklı çekirdek geometrilerine sahip sandviç test numunelerinin tasarım ve gerçek ağırlık değerleri

Çekirdek Geometrisi	3D Tasarım Programı		Hassas Terazî	
	<i>Bası Numunesi</i>	<i>Eğilme Numunesi</i>	<i>Bası Numunesi</i>	<i>Eğilme Numunesi</i>
Sinüzoidal Oluklu	103,97gr	184,23gr	98,59gr	149,56gr
Altıgen Balpeteği	109,11gr	189,21gr	86,96gr	132,28gr
Yeniden Kıvrımlı	114,24gr	204,88gr	108,29gr	170,12gr
Çift Ok Kafa	144,35gr	250,65gr	134,58gr	213,79gr
Tetrachiral	126,15gr	225,73gr	115,22gr	201,82gr

Tablo incelendiğinde göze çarpan ilk şey, tasarımları yapılan yapıların, tasarlanandan daha düşük ağırlıklara sahip olduğudur. Önceki kısımlarda bu durumdan bahsedilmiştir. Yapıların 3 boyutlu yazıcı ile üretilmesinde kullanılan mimari ve üretimin kontrol edilemeyen parametreleri sebebiyle bu durum oluşmaktadır. Üretimde kontrol edilemeyen en temel parametre ise yazıcı ucunun (nozül) dairesel bir kesite sahip olması ve yazdırılan her bir birim filamentin arasında daire geometrisine bağlı olarak kalan boşluklardır. Bu boşluklar her ne kadar parça dolu da üretilse doldurulamayan kısımlardır. Bu sebeple üretilmiş parçaların tasarımlarından daha hafif olmaları gayet normaldir. Ayrıca özellikle “altıgen balpeteği” yapının verileri incelendiğinde aradaki ağırlık farkı oranın çok daha fazla olduğu, diğer yapılarda da bu oranın birebir örtüşmediği görülecektir. Bunun temel sebebi ise yapıların tasarımlarındaki geometrilerin, yani altıgen balpeteği yapı ile örneğin sinüzoidal oluklu yapı geometrilerinin farklı geometrik özelliklerinden kaynaklanan çeşitliliğidir. 3 boyutlu yazıcılar üretim esnasında belirli geometrik yollar izlerler. Yapının tasarımındaki geometri ile yazıcının yazılımında bulunan bu izlenen yol uyumu da bu farka sebep olan önemli unsurlardandır.

Parçaların ağırlık verilerini hesaplamadaki temel nedenimiz, gösterdikleri dayanımlarla ağırlıklarını oranlayarak bütün parçalar için daha bağımsız bir kıyaslama yapabilmektir. Bu sebeple test sonuçlarından elde edilen maksimum kuvvet ve sönmölenen enerji miktarları, parçaların kendi ağırlıklarına oranlanarak özgöl dayanım kuvveti ve özgöl sönmölenen enerji değeri elde edilerek aşağıya çizelge 5.2’ye girilmiştir.

Çizelge 5.2. Sandviç yapıların statik yüklemde özgöl dayanım ve özgöl sönmölenen enerji değeri

Çekirdek Geometrisi	Özgöl Dayanım		Özgöl Sönmölenen Enerji	
	Özgöl Bası Dayanımı (N/gr)	Özgöl Eğilme Dayanımı (N/gr)	Sönmölenen Özgöl Bası Enerjisi (J/gr)	Sönmölenen Özgöl Eğilme Enerjisi (J/gr)
Sinüzoidal Oluklu	24,01	8,51	0,054	0,13
Altıgen Balpeteği	78,63	8,94	0,28	0,13
Yeniden Kıvrımlı	44,50	7,05	0,21	0,11
Çift Ok Kafa	107,92	12,57	0,092	0,12
Tetrachiral	101,70	12,22	0,49	0,09

Çizelge incelendiğinde şu sonuçlar elde edilebilir; özellikle bası yükü altında çift ok kafa ve tetrachiral çekirdek geometrili sandviç yapıların çok üstün bir dayanım sergiledikleri ve bu dayanımın ağırlıklarına oranlandığında bulunan özgöl bası dayanımlarının da diğer yapılardan çok üstün oldukları görölmektedir. Her iki yapı da ökzetikliğin getirdiği avantajı kullanarak büyük bir dayanım artışı göstermiştir. Yeniden kıvrımlı yapı ise grafikler ve çizelge incelendiğinde ökzetikliğin avantajına sahip değil gibi duruyor olsa da aslında bir dezavantajı vardır. Çekirdek boyutlarına bakıldığında tek çekirdek olarak en büyük boyuta sahip olan yeniden kıvrımlı yapının çekirdek

kirişleri uzun olarak tasarlanmıştır. Bu da yapıdaki kirişlerin lokal burkulma yüklerin karşı daya dayanıksız olmasına neden olmuş ve türdaşı olan altıgen balpeteğine kıyasla daha düşük değerler göstermesine neden olmuştur. Yapı optimize edilerek çekirdek boyutları dengelenirse geleneksel altıgen balpeteğine göre daha üstün olacağı aşıkardır.

Benzer şekilde eğilme yükleri altında da dayanım olarak çift ok kafa ve tetrachiral çekirdek geometrili sandviçler bir adım öne çıkmaktadır. Fakat sahip oldukları bu yüksek eğilme rijitliği değerleri yapıların plastik deformasyonunu azalttığından yapıların eğilme yükü altındaki enerji sönümleme yetenekleri geleneksel malzemelerin altında kalmıştır. Ökzetik yapıların gerekli optimizasyonlar ile geometrilerinde tasarım düzeltmesine gidildiğinde eğilme enerji sönümleme yeteneklerinde de artış olacaktır.

Bir diğer yükleme şekli olan dinamik yüklemede ise elde edilen sonuçlar parça ağırlıklarına oranlandığında aşağıda çizelge 5.3'teki gibi değerler elde edilmiştir.

Çizelge 5.3. Sandviç yapıların dinamik yüklemede özgül dinamik bası kuvveti ve özgül dinamik eğilme kuvveti değerleri

<i>Çekirdek Geometrisi</i>	<i>Özgül Dinamik Bası Kuvveti (N/gr)</i>	<i>Özgül Dinamik 3-Nokta Eğilme Kuvveti (N/gr)</i>
Sinüzoidal Oluklu	19,69	4,627
Altıgen Balpeteği	28,08	10,689
Yeniden Kıvrımlı	26,21	7,086
Çift Ok Kafa	30,76	17,144
TetraChiral	42,46	12,085

Dinamik yükler altında yapıların davranışlarına bakmak gerekirse şu sonuçlar görülebilir; dinamik yükler altında da ökzetik çift ok kafa ve tetrachiral çekirdekli sandviç yapılar belirgin üstünlüğe sahiptir. Özellikle çift ok kafa geometrisi çok yüksek

rijitlik değerlerine sahiptir. Tetrachiral yapı ise yüksek rijitlik değerleri yanısıra elasto-plastik davranışı sayesinde yüksek dayanım değerleri yanısıra gelen yükü elastik ve bir miktar plastik deformasyonla sönümleyerek yapının çok çok az hasarla hala rijit sağlam kalmasını sağlamıştır. Ökzetik çift ok kafa ve tetrachiral yapılar eğilme yükü altında ise diğer yapılardan çok daha üstün eğilme rijitliğine sahip olduklarını deneyler sayesinde ortaya koymuşlardır.

Elde edilen sonuçlar tabloya göre incelendiğinde doğrudan şu çıkarımları yapabiliriz.

- Yaygın olarak kullanılan, enerji sönümleme ve dayanım kabiliyetleri uygun olan sinüzoidal oluklu ve altıgen balpeteği yapılara göre kıyaslandığında ökzetik yapılar önemli mekanik avantajlara sahiptirler.
- Özellikle Çift Ok Kafa ve Tetrachiral çekirdek geometrisine sahip sandviç yapıların taşıdıkları yük miktarları ve bu değerlerin ağırlıklarına göre oranı çok üstün bir sonuç ortaya koymaktadır. Bu durum da bu iki yapının, özellikle yüksek kuvvet dayanımları gerektiren uygulamalarda çok önemli bir tercih olmasını sağlamaktadır.
- Bu üstün özellik gösteren iki yapı kıyaslandığında ise, Çift Ok Kafa çekirdek geometrili sandviç yapının özellikle fazla deformasyona müsaade edilmeyen uygulamalarda en ideal yapı olduğu görülmektedir.
- Tetrachiral çekirdek geometrili sandviç yapı ise, dayanabildiği pik kuvveti değeri olarak Çift Ok Kafa geometrili çekirdeğe sahip sandviç kadar olmasa da ona yakın bir değere dayanabilmekte ve bunu yaparken de plastik deformasyon göstererek çok çok daha üstün bir enerji sönümlemesi ortaya koyabilmektedir. Özellikle bu yapı gösterdiği bu yüksek dayanım ve şekil değiştirme yeteneği sayesinde, darbe ve çarpışma enerjisi sönümleme ihtiyacı duyulan kullanım alanlarında en ideal seçim olduğunu göstermiştir. Bu özellikleri sayesinde özellikle savunma alanında, patlama enerjisi sönümleyici koruyucu duvar veya zırh yapılarında, ince metal bir kaplama ve çekirdek dolgusu ile çok üstün özellikler sergileyebilecektir.
- Eğilme yükleri altında yapıların sönümlendiği enerji miktarları farklılık gösterse de, bu değerler yapı ağırlığına oranlandığında özgül değerler birbirine çok yakın

olmaktadır. Bunun yanısıra yine Çift Ok Kafa ve Tetrachiral Çekirdek geometrilili sandviçler, diğer yapılara oranla çok daha yüksek eğilme yükleri taşıyabilmektedirler. Tıpkı bası yükünde olduğu gibi bu yapılar, eğilme yükleri altında da çok dayanıklı olmaktadır. Bu özellikleri sayesinde her iki yapı da otomotiv ve havacılık alanlarında, yüksek dayanım ve enerji sönümleme kabiliyeti gerektiren uygulamalarda rahatlıkla tercih edilebilirler.

- Sonuçlara bakıldığında bir diğer özetik davranış sergileyen yeniden kıvrımlı çekirdek geometrisine sahip sandviç yapının, özetik olmayan yapılara yakın değerler sergilediği görülmektedir. Esasında bu yapının da mekanizması gereği diğer yapılardan daha üstün olması beklenmektedir. Fakat tasarım esnasında yapıları oluşturmakta kullandığımız tasarım kısıtlarından biri her bir sandviç yapıda 3 çekirdek katmanı olacak şekilde tasarlamaktır. Yani alt yüz plakası ile üst plaka arasında 3 sıra çekirdek geometrisi bulunacaktı. Bu durumu sağlayabilmek adına Yeniden kıvrımlı çekirdek geometrisi, diğer geometrilere göre çok daha uzun çekirdek kollarına sahip oldu. Bu uzun kollar yapıya yük uygulandığında daha kolay lokal burkulmalara sebep olduğundan beklenen dayanım ve enerji sönümleme değerlerinden bir miktar daha az değerler elde edilmiş oldu.
- Dinamik yükler altında yapıları oluşturan PLA malzemesinin yükleme hızına bağlı özellik göstermesi nedeniyle dayanım ve kuvvet değerlerinde farklılıklar olduğu gözlemlenmiştir.
- Özgül bası dayanımı değerlerinde, statik duruma göre belirgin bir farklılık olduğu gözlemlenmiştir. Statik yüklemede en yüksek özgül bası dayanımı değeri çift ok kafa çekirdek geometrilili yapıda iken dinamik yükleme de belirgin bir üstünlükle tetrachiral çekirdek geometrilili yapı öne çıkmaktadır. Buna ek olarak 3-nokta eğilme deneyinde durum değişmemekle birlikte her iki dinamik deney yine çift ok kafa ve tetrachiral özetik yapıların üstünlüğünü gözler önüne sermektedir.
- Ayrıca dinamik deneylerde göz önüne alınması gereken bir diğer unsur da şudur; çift ok kafa özetik geometrisi çok rijit bir davranış sergilerken tetrachiral özetik geometri ise yüksek elasto-plastik bir davranış sergilemektedir. Bu davranışlar çift ok kafanın yüksek dayanım ve düşük enerji sönümleme

gerektiren rijit uygulamalarda eşsiz bir yapı haline getirirken; yüksek dayanım ve yüksek enerji sönümleme kabiliyeti gerektiren uygulamalarda tetrachiral yapıyı çok üstün ve yoğun ilgi çeken bir yapı haline getirmektedir.

- Sonuç olarak bakıldığında, 3Boyutlu yazıcı teknolojisinin gelişmesiyle üretimleri kolaylaşan ve yaygınlaşmak için fırsat bekleyen ökzetik yapılarla yapılan bu çalışma göstermiştir ki bu yapılar geleneksel çekirdek geometrilerinin yerini almak adına çok ideal ve müthiş mekanik özelliklere sahip geometrilerdir. Ayrıca çalışmadan çıkarılacak bir diğer sonuç da 3Boyutlu yazıcıdan PLA, plastik hammaddesi kullanılarak oluşturulan yapılar kendinden beklenen dayanımdan ve enerji sönümleme yeteneğinden çok daha iyi sonuçlar vermiştir. Plastik malzemeden oluşturulan bu yapılar ufak takviyelerle birçok alanda kendine yer bulabilecektir.
- Deneysel olarak incelenen yapılar PLA dışında daha yüksek mekanik özelliklere sahip hammaddeler ile üretildiğinde çok daha üstün özelliklere sahip yapıların elde edilmesi mümkündür. Hatta gelişen teknolojiler ile ortaya çıkmaya başlayan sürekli elyaf takviyeli filament kullanan 3 boyutlu yazıcıların sayesinde doğrudan elyaf takvieli kompozit sandviç yapıların üretilmesiyle mükemmel malzemeler ve yapılar ortaya çıkacağı öngörülmekte; hatta bu bağlamda devam etmekte olan bir projemiz ile bu fonksiyona sahip bir yazıcı sistemi üretilmektedir. Çalışmanın doktora sonrası kısımlarında bahsedilen bu üretimler gerçekleştirilecektir. Bu çalışma ile, daha sonra yapılacak çalışmaların önü açılmış ve yol gösterici olmuştur.
- Son olarak, gerçekleştirilen bu çalışmanın ilerleyen süreçte yapılacak sandviç yapı çalışmalarında yol gösterici ve yeni çalışmalara ufuk açıcı bir çalışma olması beklenmektedir. Bu çalışma sayesinde geleneksel çekirdek geometrilerinden çok daha üstün yapıların özellikleri ortaya konmuş ve özellikle dayanım ve enerji sönümleme ihtiyacı gerektiren uygulamalarda bu yapıların kullanımını dikkate aldıracak sonuçlar ortaya konmuştur.

Bildirme ve Teşekkür

Bu tez çalışması TÜBİTAK-ARDEB 1005 programı 118M571 numaralı ve “Yüksek Mukavemetli Sürekli Elyaf Takviyeli Termoplastik Matrisli Kompozit Filamentler İçin Lazer Destekli Eklemeli Üretim Sistemi Tasarımı, Prototip Üretimi, Kompozit Filament Geliştirilmesi ve Katman Kesit Üretiminin Geliştirilen Kompozitler İçin Optimize Edilmesi” başlıklı proje kapsamında geliştirilen sistemler ile numune üretimleri gerçekleştirilmiştir;

TÜBİTAK-ARDEB 1001 programı destekli 218M468 numaralı ve “ Kendi Kendine Makro Seviyede İyileşebilir Özellikli Yeni Hibrit Sandviç Panel Geliştirilmesi ve Statik, Anlık Dinamik ve Şok Yükleri Altında İyileşme Performansının İncelenmesi” başlıklı proje kapsamında ise sandviç yapı tasarımları ve statik ve dinamik yükler altındaki davranışları incelenmiştir.

Ayrıca bazı malzeme giderleri ise Bursa Uludağ Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) tarafından desteklenen HDP(MH)-2020/10 numaralı hızlı destek projesi kapsamında desteklenmiştir.

Doktora tez çalışmamda verilen bu desteklerden dolayı TÜBİTAK-ARDEB’e ve Bursa Uludağ Üniversitesi Rektörlüğüne teşekkürlerimi sunarım.

Sandviç yapıların statik basma ve 3-nokta eğme testlerini gerçekleştirmek üzere, kalite ve test laboratuvarlarını kullanmamıza izin veren, testlerin gerçekleştirilmesi konusunda desteklerini esirgemeyen Sirena Marine firmasına; bası numunelerinin testlerini gerçekleştirmek üzere ar&ge laboratuvarlarını kullanıma açan ve testler konusunda yardımlarını esirgemeyen Pega Otomotiv Süspansiyon San. Ve Tic. A.Ş. firmasına ve Ar&Ge yöneticisi sayın Dr. Hasan Kasım’a teşekkürlerimi sunarım.

KAYNAKLAR

- Agarwal, B. D., Broutman, L. J., Chandrashekara, K. 1980.** Analysis and performance of fiber composites. John Wiley & Sons, New Delhi, India, pp 562.
- Aguilera, E., Jr. 2016.** Creating multi-functional g-code for multi-process additive manufacturing, *PhD Thesis*. Department of Electrical Engineering, University of Texas, Texas, USA.
- Amorim, J. P. G. 2010.** Investigation Of The Indentation Behaviour Of Foam Cored Lightweight Composite Sandwiches. *PhD Thesis*, Universita Degli Studi Di Palermo, Department of Mechanical Design, Palermo, Italy.
- Anonim, 2020a.** <http://www.won-jin.net/en/al-matrix-composite/?ckattempt=1>. (Erişim tarihi: 20.01.2020)
- Anonim, 2020b.** <https://frptitan.com/us-company-ceramic-matrix-composites-hypersonic-aerial-vehicles>. (Erişim tarihi: 20.01.2020)
- Anonim, 2020c.** <https://www.designnews.com/electronics-test/metal-ceramic-matrix-composites-beat-heat/106075980443686>. ((Erişim tarihi:20.01.2020)
- Anonim, 2020d.** <https://www.plastics.gl/3d-printing-2/worlds-first-3d-printed-vehicle-expected-to-be-driven-on-saturday/>. ((Erişim tarihi:21.01.2020)
- Anonim,2020e.** <http://cnravrasyaboatshow.com/haberlersubpage.aspx?NewsID=4895>. (Erişim tarihi:21.01.2020)
- Anonim, 2020f.** <https://www.carbonfibercustom.com/several-methods-for-weight-reduction-of-unmanned-aerial-vehicle-using-carbon-fiber-composites/>. ((Erişim tarihi:21.01.2020)
- Anonim, 2020g.** <https://www.cfccarbon.com/news/3d-carbon-carbon-composite-application-for-liquid-rocket-engine-1.html>. (Erişim tarihi:25.01.2020)
- Anonim, 2020h.** <https://www.graphitemachininginc.com/graphite-machining-capabilities.html>. ((Erişim tarihi:25.01.2020)
- Anonim, 2020i.** <https://www.oxyblack.com/index.php/en/composites/laminates-sandwiches>. (Erişim tarihi:03.02.2020)
- Anonim, 2020j.** <https://www.eppcomposites.com/spray-layup-process.html>. (Erişim tarihi: 03.02.2020)
- Anonim, 2020k.** <http://m.blog.daum.net/carbonmeca/9>. (Erişim tarihi:03.02.2020)
- Anonim, 2020l.** <https://www.thecompositeshub-india.com/filament-winding--a-cost-effective-composites-process>. (Erişim tarihi:04.02.2020)
- Anonim, 2020m.** <https://jewishlifeneews.com/uncategorized/insulated-sandwich-roof-panels-and-roof-sheets-market-productivity-data-analysis-2019-kingspan-roofing-industries-metalcraft-roofing/>. (Erişim tarihi:05.02.2020)

Anonim, 2020n. <https://www.indexmarketsresearch.com/report/polymeric-foams-market-2/408094/>. (Erişim tarihi:07.02.2020)

Anonim, 2020o. (<https://druckwege.de/en/home-en/technology/fused-deposition-modelling-fdm>). (Erişim tarihi:07.02.2020)

Ashjari, M., Saadatm, S., Hashemi, S.M., Rasoulia, A. 2017. Auxetic materials materials with negative poisson's ratio. *Material Sci & Eng Int J*, 1(2), 00011.

ASTM, D. 3576.2015. Standard test method for cell size of rigid cellular plastics. Annual book of ASTM standards, 8.

Bacigalupo, A., & Gambarotta, L. 2014. Homogenization of periodic hexa-and tetrachiral cellular solids. *Composite Structures*, 116:461-476.

Barbero, E. J., 2017. Introduction to composite materials design. CRC press, Florida, USA, pp:535.

Beşergil, B., 2016. Kompozitler Temel İlkeler ve Test Metotları. Gazi Kitabevi. Ankara,Türkiye, pp: 730.

Bitzer, T. N. 1997. Honeycomb technology: materials, design, manufacturing, applications and testing. Springer Science & Business Media. California, USA, pp:233.

Borovinšek, M., Vesenjāk, M., Matela, J., Ren, Z. 2008. Computational reconstruction of scanned aluminum foams for virtual testing. *J. Serbian Soc. Comput. Mech*, 2:16-28.

Bruffey N. ve Shiu W. 2016. Predicting Flexural Strength of Composite Honeycomb Sandwich Panels Using Mechanical Models of Face Sheet Compressive Strength. *Graduate Thesis*. Faculty of Material Engineering of California Polytechnic State University.Department of Materials Engineering. San Luis Obispo, USA

Campbell, F. C. 2010. Structural composite materials. ASM international. Ohio, Usa, pp:612.

Challapalli, A. 2015. Loading mode dependent effective properties of octet-truss lattice structures using 3D-printing.*MSc Thesis*. University of North Texas.Department of Mechanical and Energy Engineering, Texas, USA.

Chawla, K. K., 2012. Composite materials: science and engineering. Springer Science & Business Media, Alabama,USA, pp: 542.

Chen, C. P., Lakes, R. S. 1993. Viscoelastic behaviour of composite materials with conventional-or negative-Poisson's-ratio foam as one phase. *Journal of materials science*, 28(16):4288-4298.

Chen, C. P., Lakes, R. S. 1996. Micromechanical analysis of dynamic behavior of conventional and negative Poisson's ratio foams. *J. Engineering Materials and Technology* (ASME), 118:285-288

Chen, W., Zhang, B., Forrestal, M. J. 1999. A split Hopkinson bar technique for low-impedance materials. *Experimental mechanics*, 39(2):81-85.

Choi, J. B., Lakes, R. S. 1996. Fracture toughness of re-entrant foam materials with a negative Poisson's ratio: experiment and analysis. *International Journal of fracture*, 80(1):73-83.

Côté, F., Deshpande, V. S., Fleck, N. A., Evans, A. G. 2006. The compressive and shear responses of corrugated and diamond lattice materials. *International Journal of Solids and Structures*, 43(20):6220-6242.

Cotteleer M. 2014. 3D Opportunity for Production: Additive manufacturing makes its (business) case. *Deloitte Review*, (15):146–161.

Cox, H. L. 1952. The elasticity and strength of paper and other fibrous materials. *British journal of applied physics*, 3(3):72.

DIAB Group. 2003. DIAB Sandwich Handbook.

Easey, N., Chuprynyuk, D., Musa, W. W., Banks, A., Dobah, Y., Shterenlikht, A., Scarpa, F. 2019. Dome-shape auxetic cellular metamaterials: manufacturing, modelling and testing. *Frontiers in Materials*, 6:86.

Ekşi S., 2013. Dairesel Kesitli Kompozit Tüp Kirişlerin Eğme ve Burkulma Davranışının Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi. *Doktora Tezi*, S.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği A.B.D., Sakarya.

Evans, K. E., & Alderson, A. 2000. Auxetic materials: functional materials and structures from lateral thinking!. *Advanced materials*, 12(9): 617-628.

Fiedler, T., Pesetskaya, E., Öchsner, A., Grácio, J. 2006. Calculations of the thermal conductivity of porous materials. In *Materials science forum* (Vol. 514, pp:754-758). Trans Tech Publications Ltd.

Fu, M. H., Chen, Y., Hu, L. L. 2017. A novel auxetic honeycomb with enhanced in-plane stiffness and buckling strength. *Composite Structures*, 160, 574-585.

Gerard, G. 1951. Note on bending of thick sandwich plates. *Journal of the Aeronautical Sciences*, 18(6):424-426.

Good, R.H., 2001. Elliptic integrals, the forgotten functions. *Euro. J. Phys.* 22:119–126.

Grima, J. N., Gatt, R., Farrugia, P. S. 2008. On the properties of auxetic meta-tetrachiral structures. *Physica Status Solidi (b)*, 245(3):511-520.

Grünewald, J., Parlevliet, P., Altstädt, V. 2015. Manufacturing of thermoplastic composite sandwich structures: A review of literature. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 30(4): 437-464.

Günel H., 2007. Kompozit Çerçevelerin Doğal Frekanslarının Yapı Boyutlarına ve Fiber Açılarına Göre Değişiminin İncelenmesi. *Bitirme Ödevi*. D.E.Ü. Mühendislik Fakültesi. Makine Mühendisliği Bölümü. İzmir.

- Hou, S., Li, T., Jia, Z., Wang, L. 2018.** Mechanical properties of sandwich composites with 3d-printed auxetic and non-auxetic lattice cores under low velocity impact. *Materials & Design*, 160: 1305-1321.
- Howell, B., Prendergast, P., Hansen, L. 1994.** Examination of acoustic behavior of negative Poisson's ratio materials. *Applied Acoustics*, 43(2): 141-148.
- Huang, X., Blackburn, S. 2002.** Developing a new processing route to manufacture honeycomb ceramics with negative Poisson's ratio. *Key Engineering Materials*, 206(213): 201-204.
- Hull, D., 1996.** An introduction to composite materials. Cambridge university press, New York, USA, pp:326
- Hutchinson, J. R. 2001.** Shear coefficients for Timoshenko beam theory. *J. Appl. Mech.*, 68(1):87-92.
- Imbalzano, G., Tran, P., Ngo, T. D., Lee, P. V. 2017.** Three-dimensional modelling of auxetic sandwich panels for localised impact resistance. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 19(3):291-316.
- Joshi, H. 2013.** Finite Element Analysis of effective mechanical properties, vibration and acoustic performance of auxetic chiral core sandwich structures. *MSc Thesis*, Graduate School of Clemson University, Dept. of Mechanical Eng. Clemson, SC, U.S.A.
- Katzman, H. A., Castaneda, R. M., Lee, H. S. 2008.** Moisture diffusion in composite sandwich structures. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 39(5): 887-892.
- KE Evans. 1991.** The design of doubly curved sandwich panels with honeycomb cores. *Composite Structures* 17: 95–111.
- Khan, A. S., Suh, Y. S., Kazmi, R. 2004.** Quasi-static and dynamic loading responses and constitutive modeling of titanium alloys. *International Journal of Plasticity*, 20(12): 2233-2248.
- Kolsky, H. 1949.** An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading. *Proceedings of the physical society. Section B*, 62(11): 676.
- Kooistra, G. W., Deshpande, V. S., Wadley, H. N. 2004.** Compressive behavior of age hardenable tetrahedral lattice truss structures made from aluminium. *Acta Materialia*, 52(14): 4229-4237.
- Kooistra, G. W., Wadley, H. N. 2007.** Lattice truss structures from expanded metal sheet. *Materials & Design*, 28(2): 507-514.
- Kwok, T., Ye, H., Chen, Y., Zhou, C., Xu, W. 2017.** Mass customization: Reuse of digital slicing for additive manufacturing. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 17(2). doi:10.1115/1.4034010
- L. Jinhee, C. JB, and C. K. 1996.** Application of homogenization FEM analysis to regular and re-entrant honeycomb structures. *Journal of Materials Science* 31: 4105–4110.

- Lackey W.J., Starr T.L. 1990.** Fabrication of Fiber-Reinforced Ceramic Composites by Chemical Vapor Infiltration: Processing, Structure and Properties, Fiber Reinforced Ceramic Composites: Materials, Processing and Technology, Noyes Publications, pp:397–450
- Lakes, R. 1987.** Foam structures with a negative Poisson's ratio. *Science*, 235: 1038-1041.
- Lee, J. H., Singer, J. P., Thomas, E. L. 2012.** Micro-/nanostructured mechanical metamaterials. *Advanced materials*, 24(36): 4782-4810.
- Levy, O., Goldfarb, I., 2006.** Design considerations for negative Poisson ratio structures under large deflection for MEMS applications. *Smart Mater. Struct.* 15: 1459–1466.
- Li, H., Ma, Y., Wen, W., Wu, W., Lei, H., Fang, D. 2017.** In plane mechanical properties of tetrachiral and antitetrachiral hybrid metastructures. *Journal of Applied Mechanics*, 84(8).
- Li, T., Chen, Y., Hu, X., Li, Y., Wang, L. 2018.** Exploiting negative Poisson's ratio to design 3D-printed composites with enhanced mechanical properties. *Materials & design*, 142:247-258.
- Li, T., Wang, L. 2017.** Bending behavior of sandwich composite structures with tunable 3D-printed core materials. *Composite Structures*, 175: 46-57.
- Lim, T. C. 2016.** A 3D auxetic material based on intersecting double arrowheads. *Physica Status Solidi (b)*, 253(7): 1252-1260.
- Lipsett, A. W., Beltzer, A. I. 1988.** Reexamination of dynamic problems of elasticity for negative Poisson's ratio. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 84(6): 2179-2186.
- Lischke, F. 2016.** Design of self-supported 3D printed parts for fused deposition modeling. *MSc Thesis*. Purdue University, Department of Mechanical Engineering, Indianapolis, USA
- Liu, W., Wang, N., Luo, T., Lin, Z. 2016.** In-plane dynamic crushing of re-entrant auxetic cellular structure. *Materials & Design*, 100: 84-91.
- Liu, Y., Hu, H. 2010.** A review on auxetic structures and polymeric materials. *Scientific Research and Essays*, 5(10): 1052-1063.
- Liu, Z. 2017.** Economic comparison of selective laser melting and conventional subtractive manufacturing processes. *MSc Thesis*. Northeastern University, Department of Mechanical and Industrial Engineering, Boston, USA
- Martz, E. O., Lakes, R. S., Park, J. B. 1996.** Hysteresis behaviour and specific damping capacity of negative Poisson's ratio foams. *Cellular polymers*, 15(5): 349-364.
- Miller, W., Smith, C. W., Scarpa, F., Evans, K. E. 2010.** Flatwise buckling optimization of hexachiral and tetrachiral honeycombs. *Composites Science and Technology*, 70(7): 1049-1056.

- Monette, L., Anderson, M. P., Ling, S., Grest, G. S. 1992.** Effect of modulus and cohesive energy on critical fibre length in fibre-reinforced composites. *Journal of materials science*, 27(16):4393-4405.
- Moongkhamklang, P. 2009.** Titanium-Silicon Carbide Composite Lattice Structures. *PhD Thesis*, University of Virginia. Department of Materials Science and Engineering, Virginia, USA
- Morales Ibarra, R., 2014.** Carbon fiber recovery using subcritical and supercritical fluids for chemical recycling of thermoset composite materials. *PhD Thesis*, Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Mousanezhad, D., Haghpanah, B., Ghosh, R., Hamouda, A. M., Nayeb-Hashemi, H., Vaziri, A. 2016.** Elastic properties of chiral, anti-chiral, and hierarchical honeycombs: a simple energy-based approach. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 6(2): 81-96.
- Mu, Y. 2016.** 3D printing of metals. *MSc Thesis*. Stony Brooks University, Materials Science and Engineering Dept. New York, USA.
- Nabiyouni, E. 2017.** Toward Auxetic Composites for Structural Applications: Finite Element Analysis of Origami-Inspired Foldcores. *PhD Thesis*, University of Toledo, Department of Mechanical Engineering, Toledo, USA.
- Owens, A. T., Tippur, H. V. 2009.** A tensile split Hopkinson bar for testing particulate polymer composites under elevated rates of loading. *Experimental mechanics*, 49(6): 799.
- Paik, J. K., Thayamballi, A. K., Kim, G. S. 1999.** The strength characteristics of aluminum honeycomb sandwich panels. *Thin-walled structures*, 35(3): 205-231.
- Picariello, P., 2017.** Committee F42 on additive manufacturing technologies. *ASTM International*. Retrieved from <https://www.astm.org/COMMITTEE/F42.htm>
- Plantema, F. J. 1966.** Sandwich Construction: The Buckling of Sandwich Beams, Plates, and Shells. Wiley. New York, USA, pp:268.
- Prall, D., & Lakes, R. S. 1997.** Properties of a chiral honeycomb with a Poisson's ratio of—1. *International Journal of Mechanical Sciences*, 39(3): 305-314.
- Prince, J. D. 2014.** 3D printing: An industrial revolution. *Journal of Electronic Resources in Medical Libraries*, 11(1): 39-45. doi:10.1080/15424065.2014.877247
- Qi, C., Remennikov, A., Pei, L. Z., Yang, S., Yu, Z. H., Ngo, T. D. 2017.** Impact and close-in blast response of auxetic honeycomb-cored sandwich panels: experimental tests and numerical simulations. *Composite structures*, 180: 161-178.
- Qiao, J., Chen, C. Q. 2015.** Analyses on the in-plane impact resistance of auxetic double arrowhead honeycombs. *Journal of Applied Mechanics*, 82(5).
- Raj, R. E., Parameswaran, V., Daniel, B. S. S. 2009.** Comparison of quasi-static and dynamic compression behavior of closed-cell aluminum foam. *Materials Science and Engineering: A*, 526(1-2): 11-15.

- Reis, E.M. 2005.** Characteristics of Innovative 3-D FRp Sandwich Panels. *PhD Thesis*. Graduate Faculty of North Carolina State University. Department of Civil Engineering. Raleigh, USA
- SAE. 2013.** Composite Materials Handbook Volume 6. Structural Sandwich Composites. SAE International. Wichita State University.
- Sarvestani, H. Y., Akbarzadeh, A. H., Mirbolghasemi, A., Hermenean, K. 2018a.** 3D printed meta-sandwich structures: Failure mechanism, energy absorption and multi-hit capability. *Materials & Design*, 160: 179-193.
- Sarvestani, H. Y., Akbarzadeh, A. H., Niknam, H., Hermenean, K. 2018b.** 3D printed architected polymeric sandwich panels: Energy absorption and structural performance. *Composite Structures*, 200: 886-909.
- Scarpa, F. L., Remillat, C., Landi, F. P., Tomlinson, G. R. 2000.** Damping modelization of auxetic foams. In *Smart Structures and Materials 2000: Damping and Isolation* (Vol. 3989, pp. 336-343). International Society for Optics and Photonics.
- Sharafeldin, M., Jones, A., Rusling, J. F. 2018.** 3D-printed biosensor arrays for medical diagnostics. *Micromachines*, 9(8): 394.
- Sharma, R., Ravikumar, N. L., Dasgupta, K., Chakravartty, J. K., Kar, K. K. 2017.** Advanced Carbon–Carbon Composites: Processing Properties and Applications. In *Composite Materials* pp: 315-367 . *Springer*, Berlin, Heidelberg.
- Smith, F. C., Scarpa, F. L., Burriesci, G. 2002.** Simultaneous optimization of the electromagnetic and mechanical properties of honeycomb materials. In *Smart Structures and Materials 2002: Smart Structures and Integrated Systems* (Vol. 4701, pp: 582-591). International Society for Optics and Photonics.
- Staab, G.H., 2015.** Laminar composites. Butterworth-Heinemann. Oxford, UK, pp:454.
- Steenhuis, H., Pretorius, L. 2016.** Consumer additive manufacturing or 3D printing adoption: an exploratory study. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 27:990–1012. doi.org/10.1108/JMTM-01-2016-0002
- Tee, K. F., Spadoni, A., Scarpa, F., Ruzzene, M. 2010.** Wave propagation in auxetic tetrachiral honeycombs. *Journal of Vibration and Acoustics*, 132(3).
- Türkoğlu İ.K., Güçlü H., Yazıcı M. 2018.** Quasi-Static And Dynamic Characterisation Of Hotmelt Ethylene/Vinyl Acetate Copolymer (Eva) Adhesives And Self Reinforced Composite Laminates /Expanded Polypropylene Foam Sandwich Beams. 9. Otomotiv Teknolojileri Kongresi.7-8 Mayıs 2018. Bursa-Türkiye.
- Vinson, J. R. 2018.** The behavior of sandwich structures of isotropic and composite materials. CRC Press. Delaware, USA, pp:188.
- Wan, H., Ohtaki, H., Kotosaka, S., Hu, G., 2004.** A study of negative Poisson's ratios in auxetic honeycombs based on a large deflection model. *Euro. J. Mech. A/Solids* 23: 95–106.

Wang, X. T., Wang, B., Li, X. W., Ma, L. 2017. Mechanical properties of 3D re-entrant auxetic cellular structures. *International Journal of Mechanical Sciences*, 131:396-407.

Wang, X. T., Wang, B., Wen, Z. H., Ma, L. 2018. Fabrication and mechanical properties of CFRP composite three-dimensional double-arrow-head auxetic structures. *Composites Science and Technology*, 164: 92-102.

Wang, Z., Zulifqar, A., Hu, H. 2016. Auxetic composites in aerospace engineering. In *Advanced composite materials for aerospace engineering* (pp: 213-240). Woodhead Publishing.

Xiao, D., Dong, Z., Li, Y., Wu, W., Fang, D. 2020. Compression behavior of the graded metallic auxetic reentrant honeycomb: experiment and finite element analysis. *Materials Science and Engineering: A*, 758:163-171.

Yang, C., Vora, H. D., Chang, Y. 2018. Behavior of auxetic structures under compression and impact forces. *Smart Materials and Structures*, 27(2): 025012.

Yang, L., Harrysson, O., Cormier, D., West, H., 2013. Modeling of the uniaxial compression of a 3D periodic re-entrant honeycomb structure. *J. Mater. Sci.* 48: 1413–1422.

Yang, L., Harrysson, O., West, H., Cormier, D. 2015. Mechanical properties of 3D re-entrant honeycomb auxetic structures realized via additive manufacturing. *International Journal of Solids and Structures*, 69: 475-490.

Yazıcı M., 1993. Kompozit Malzemelerde Gerilme Dağılımının İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*. U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü. Makine Mühendisliği A.B.D. Bursa

Zenkert, D. 1995. An introduction to sandwich structures. Engineering Materials Advisory Services Ltd., Stockholm, Sweeden, pp: 277.

Zhang, J., Lu, G., Ruan, D., Wang, Z. 2018. Tensile behavior of an auxetic structure: Analytical modeling and finite element analysis. *International Journal of Mechanical Sciences*, 136: 143-154.

Zok, F. W., Waltner, S. A., Wei, Z., Rathbun, H. J., McMeeking, R. M., Evans, A. G. 2004. A protocol for characterizing the structural performance of metallic sandwich panels: application to pyramidal truss cores. *International Journal of Solids and Structures*, 41(22-23): 6249-6271.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : İbrahim Kürşad Türkoğlu

Doğum Yeri ve Tarihi : 01.01.1989 -

Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu

Lise : Sekine Evren Anadolu Lisesi -2006

Lisans : Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü -2007-2009

Selçuk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü – 2009-2013

Yüksek Lisans : Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Otomotiv Mühendisliği A.B.D.

Çalıştığı Kurumlar : Sarıkulak Kardeşler Metal San. Ve Tic. Ltd. Şti, Konya-2011-2012

Konsantaş Döküm, Makine San. Ve Tic. A.Ş.,Konya-2013

Amasya Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 2013-Günümüz

Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü- 2014-2020

İletişim (e-posta) : kursad@uludag.edu.tr

i.kursad@amasya.edu.tr

Akademik Çalışmalar:

Akbulut G., Güçlü H., Türkoğlu İ.K., Korkmaz B., Can Y., Yazıcı M. 2018. Comparative Study On Quasi-static and Impact Load Performance of Cubic, Pyramidal, and Hexagonal CellShaped Carbon Fiber/ Polypropylene Thermoplastic Composite Truss Lattice Core Sandwich Structures with CarbonFiber/Polypropylene Laminated Composite Face Sheets. 4th International Conference on Mechanics of Composites (MECHCOMP4), Madrid-Spain, 09-12 July 2018.

Boztoprak Y., Özada Ç., Ünal M., Türkoğlu İ.K., Yazıcı M. 2019. Ballistic and Impact Performance of Honeycomb Core Aluminum Sandwich Panels with Epoxy Based Syntactic Foam Infill. 6th International Conference on Thermophysical and Mechanical Properties of Advanced Materials (6th THERMAM), Izmir-Turkey, 22-24 October 2019.

Can Y., Güçlü H., Türkoğlu İ.K., Kasar İ., Yazıcı M. 2018. Impact Loading Performance of Polymer Foam Core Aluminum Sandwich Panels. 8th International Advances in Applied Physics and Materials Science Congress Exhibition, Muğla-Turkey, 24-30 April 2018

Can Y., Güçlü H., Türkoğlu İ.K., Kasar İ., Yazıcı M. 2019. Impact Loading Performance of Polymer Foam Core Aluminum Sandwich Panel. *Acta Physica Polonica A*, Vol.135-4, p:769

Can Y., Güçlü H., Türkoğlu İ.K., Yazıcı M. 2018. Continuous Carbon Fiber/Polypropylene Thermoplastic Composite Telescopic Crash Box for a Passenger Car. 21th International Conference on Composite Structures (ICCS21), Bologna-Italy, 04-07 September 2018.

Can Y., Güçlü H., Türkoğlu İ.K., Yazıcı M. 2017. Mechanical Performance of Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic Composite Pyramidal Lattice Core Sandwich Structures. 20th International Conference on Composite Structures (ICCS20), 4-7 September 2017.

Güçlü H., Can Y., Türkoğlu İ.K., Yazıcı M. 2018. The Bending Response of Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic Mono-Composite Pyramidal Lattice Truss Core Sandwich Structures. 9th International Automotive Technologies Congress, OTEKON 2018, Bursa-Turkey, 07-08 May 2018.

Güçlü H., Türkoğlu İ.K., Can Y., Yazıcı M. 2019. Finite Element Analysis on Flexural Behavior of EPP Foam Core Self-Reinforced Polypropylene Thermoplastic Sandwich Structures. 6th International Conference on Computational and Experimental Science and Engineering (ICCESN-2019), Antalya-Turkey, 23-27 October 2019.

Güler B, Saraç İ., Türkel K., Bıyıkçı T., Yazıcı M., Türkoğlu İ.K. 2016. Improving the Material Properties of PTFE By Recycling of Loss Materials that Come Out While Production of PTFE Seals. 4th International Conference and Computational and Experimental Science and Engineering (ICCESN) 2016, Antalya-Turkey 19-24 October 2016.

Sevinç E., Can Y., Türkoğlu İ.K., Yazıcı M. 2019. Continuous Carbon Fiber/Polypropylene Thermoplastic Composite Based Multilayer Pyramidal Lattice Core Ultra-Light Sandwich Panels. 6th International Conference on Computational and Experimental Science and Engineering (ICCESN-2019), Antalya-Turkey, 23-27 October 2019.

Türkoğlu İ.K., Can Y., Yazıcı M. 2017. Impact Loading Performance of EPP FoamCore/ Self Reinforced PP Composite Sandwich Beams. 20th International Conference on Composite Structures (ICCS20), 4-7 September 2017.

Türkoğlu İ.K., Can Y., Yazıcı M. 2017. Self-Reinforced thermoplastic Polypropylene Composite Face Sheets/EPP Foam Core Sandwich Panels for Vehicle Light-Weighting. 3rd International Conference on Mechanics of Composites (MECHCOMP3) 2017, Bologna-Italy, 4-7 July 2017.

Türkoğlu İ.K., Güçlü H., Kurtuluş O., Can Y., Yazıcı M. 2018. Experimental Investigation of the Open-Hole Effect on Self Reinforced Polypropylene Based Thermoplastic Composite Laminates. 1st International Symposium on Light Alloys and Composite Materials (ISLAC'18), Karabük-Turkey, 22-24 March 2018.

Türkoğlu İ.K., Güçlü H., Yazıcı M. 2018. Quasi-Static and Dynamic Characterisation of Hotmelt Ethylene/Vinyl Acetate Copolymer (EVA) Adhesives and Self -Reinforced Composite Laminates /Expanded Polypropylene Foam Sandwich Beams. 9th International Automotive Technologies Congress, OTEKON 2018, Bursa-Turkey, 07-08 May 2018.

Türkoğlu İ.K., Karen İ., Can Y., Yazıcı M. 2016. Determination of the Dynamic Behavior of Sandwich Composite Structures for Vehicle Passive Safety Components Using Split Hopkinson Compression and Tensile Bars. International Congress on Natural and Engineering Sciences (ICNES) 2016, Skopje-Macedonia, 1-5 September 2016.

Türkoğlu İ.K., Kurtuluş O., Taş M.,Yazıcı M. 2016. Alternatif Malzemelerden Üretilmiş Kapı Mentşesinin Karşılaştırmalı Sonlu Elemanlar Analizi. 8. Otomotiv Teknolojileri Kongresi – OTEKON 2016, Bursa-Türkiye 23-24 Mayıs 2016.

Türkoğlu İ.K., Yazıcı M. 2016. Determination of the Dynamic Properties of Carbon and Glass Fiber Reinforced Thermoset and Thermoplastic Composites Using Dynamic Split Hopkinson Compression and Tension Bar Technique. International Congress on Natural and Engineering Sciences (ICNES) 2016, Skopje-Macedonia, 1-5 September 2016.

Türkoğlu İ.K., Yazıcı M., Kasım H., Can Y. 2017. High Strain Rate and Quasi- Static Compression Responses of Glass Bubble/Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) Syntactic Foam. 4th International Conference on Computational and Experimental Science and Engineering (ICCESN-2017), Antalya-Turkey, 4-8 October 2017.

Yazıcı M, Türkoğlu İ.K., Karen İ., Güçlü H., Somyak C. 2016. Finite Element Analysis of Impact Loaded Polymer Composite Side Door Anti - Intrusion Bar. 4th International Conference on Advances in Civil, Structural and Mechanical Engineering – CSM 2016, Birmingham- United Kingdom, 17-18 March 2016.

Yazıcı M., Can Y., Türkoğlu İ.K., Bayram T. 2019. Mechanical Performance of the 3D Printed Continuous Filament Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic Lattice Core

Sandwich Panels. 5th International Conference on Mechanics of Composites (MECHCOMP5), Lİsbon-Portugal, 01-04 July 2019.

Yazıcı M., Güçlü H., Karen İ., Türkoğlu İ.K., Malkoç S., 2015. Optimal Design Light Commercial Vehicle Headlamp for Pedestrian Protection. 3th International Conference and Computational and Experimental Science and Engineering (ICCESEN)-2015, Antalya-Turkey, 14-19 October 2015.

Yazıcı M., Güçlü H., Karen İ., Türkoğlu İ.K., Malkoç S., Buyukluoğlu Ö.F., 2016. Optimal Design of Light Commercial Vehicle Headlamp for Pedestrian Protection. *Acta Physica Polonica A*, vol 130, p:262.

Yazıcı M., Güçlü H., Karen İ., Türkoğlu İ.K., Yagoub S., Malkoç S. 2015. Numerical Analysis of Light Commercial Vehicle Headlamp for Pedestrian Safety. *International Journal of Natural and Engineering Sciences IJNES*. 9-(2) Issue 2, p:34

Yazıcı M., Kasım H., Güçlü H., Türkoğlu İ.K., Can Y. 2017. Lateral Side Impact Performance of Rubber Based Syntactic Foam Core Sandwich Panels. 3rd International Conference on Mechanics of Composites (MECHCOMP3) 2017, Bologna-Italy, 4-7 July 2017.

Yazıcı M., Kasım H., Güçlü H., Türkoğlu İ.K., Can Y. 2018. Finite Element Analysis of the Impact Behaviour of Natural Rubber Based Syntactic Foam Core Sandwich Structure with Aluminum Skin. 5th International Conference on Computational and Experimental Science and Engineering (ICCESEN-2018), Antalya-Turkey, 12-16 October 2018.

Yazıcı M., Özer H., Can Y., Karen İ., Türkoğlu İ.K., Güçlü H. 2015. Frontal Crash Simulation of the Composite Car Bumper to Rigid Barriers and Poles. International Congress on Engineering and Natural Sciences (ICNES) 2015, Sarejova-Bosnia-Herzegovina 9-13 September 2015.

Yazıcı M., Özer H., Türkoğlu İ.K., Güçlü H., Karen İ. 2015. Experimental Determination of Mechanical Properties of 2D Cross Ply Glass Reinforced Thermoplastic Laminated Composite Materials and Finite Element Model Validation. 3th International Conference and Computational and Experimental Science and Engineering (ICCESEN) 2015, Antalya-Turkey, 14-19 October 2015.

Yazıcı M., Türkoğlu İ.K., Karen İ., Güçlü H., Özer H., Somyak C., 2015. Investigation of the Polymer Composite Side Door Anti-intrusion Bar for a Light Commercial Vehicle” International Congress on Engineering and Natural Sciences (ICNES) 2015, Sarejova-Bosnia-Herzegovina 9-13 September 2015.

Yazıcı M., Türkoğlu İ.K., Karen İ., Güçlü H., Somyak C., 2016. Finite Element Analysis of Impact Loaded Polymer Composites Side Door Anti-Intrusion Bar. *International Journal of Automation, Mechatronics & Robotics* , Vol.3 Issue.1,p:50

Yazıcı M., Türkoğlu İ.K., Güçlü H., Can Y. 2017. Quasi-Static and Dynamic Characterisation of Hotmelt Ethylene/Vinyl Acetate (EVA) Adhesives. 4th International

Conference on Computational and Experimental Science and Engineering (ICCESEN-2017), Antalya-Turkey, 4-8 October 2017.

Projeler :

Seri Üretime ve Araç Güvenlik Kriterlerine Uygun Termoplastik Kompozit Kapı Barı Tasarımı ve Prototip İmalatı. Yürütücü: Murat Yazıcı. Tübitak-TEYDEB 1505, TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikaları Paydaşı ile, 2015-77760.(Bursiyer)

Termoplastik Kompozit Malzeme Geliştirilmesi ve Yüksek Yükleme Hızları Altında Mekanik Özelliklerinin Tespiti. Uludağ Üniversitesi B.A.P. Koordinatörlüğü,2016. (Araştırmacı)

Uludağ Racing Formula Sae UR04 Aracının Motor ve Güç Aktarma Sistemi Elemanlarının Tasarımı ve Üretimi. Uludağ Üniversitesi B.A.P. Koordinatörlüğü, 2017. (Araştırmacı)

Yüksek Mukavemetli Sürekli Elyaf Takviyeli Termoplastik Matrisli Kompozit Filamentler için Lazer Destekli Eklemeli Üretim Sistemi Tasarımı, Prototip Üretimi, Kompozit Filament geliştirilmesi ve Katman Kesit Üretiminin Geliştirilen Kompozitler için Optimize Edilmesi. Yürütücü :Murat Yazıcı. Tübitak-ARDEB 1005, Proje No: 118M571. Bursa Uludağ Üniversitesi. (Bursiyer)

Sürekli Elyaf Takviyeli Ökzetik Kafes Geometrilili Çekirdek Yapıya Sahip Termoplastik Kompozit Sandviç Tüplerin, Statik, Anlık Dinamik ve Şok Yükleri Altındaki Davranışlarının İncelenmesi” isimli, TÜBİTAK-2214/A YURT DIŞI DOKTORA SIRASI ARAŞTIRMA BURS PROGRAMI. Bursiyer-Araştırmacı (Uluslararası Pandemi Sebebiyle Ertelendi)

Karbon Elyaf Takviyeli Kompozit Tüp Üretimi İçin Isıtma Özellikli Sarım Açısı ve Hız Ayarlı Filament Sarım Aparatı Geliştirilmesi. Bursa Uludağ Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinatörlüğü, 2020. (Araştırmacı)