



**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

DOKTORA TEZİ

**EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİ İLE
ÜRETİLEN SANDVIÇ KOMPOZİT
PLAKALARIN MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ.**

Mehmet Şah GÜLTEKİN

**EKİM-2025
BATMAN**

**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

DOKTORA TEZİ

**EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİ İLE
ÜRETİLEN SANDVIÇ KOMPOZİT
PLAKALARIN MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ.**

Mehmet Şah GÜLTEKİN

**Danışman
Prof. Dr. Hamit ADİN**

**2. Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Said BAYRAKLILAR**

Diğer Jüri Üyeleri

Doç Dr. Şehmus BADAY

Doç Dr. Oğuz TUNÇEL

Doç Dr. Melih KUNCAN

Dr. Öğr. Üyesi İsmail BAYAR

**EKİM-2025
BATMAN**

TEZ KABUL VE ONAYI

Mehmet şah GÜLTEKİN tarafından hazırlanan “Eklemeli İmalat Yöntemi İle Üretilen Sandviç Kompozit Plakaların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi” adlı tez çalışması 15/10/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Hamit ADİN

.....

2.Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Said BAYRAKLILAR

.....

Üye

Doç Dr. Şehmus BADAY

.....

Üye

Doç Dr. Melih KUNCAN

.....

Üye

Doç Dr. Oğuz TUNÇEL

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi İsmail BAYAR

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Ömer Murat ÖTER
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYANI

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sorumluluğu kabullendiğimi bildiririm.

ETHICAL DECLARATION

I declare that all the information in this thesis has been obtained within the framework of ethical behavior and academic rules, and that the source of any statements and information that do not belong to me in this study prepared in accordance with the thesis writing rules has been fully cited, and I declare that I accept all kinds of legal responsibility in case of any contrary situation.

Mehmet Şah GÜLTEKİN
Tarih: 15.10.2025

ÖZET

DOKTORA TEZİ

EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN SANDVİÇ KOMPOZİT PLAKALARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ.

Mehmet Şah GÜLTEKİN

Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hamit ADİN

2025, 148 Sayfa

Trapezoid kompozit sandviç yapılar, hafiflikleri ile birlikte yüksek eğme ve basma dayanımları sayesinde tercih edilmektedir. Ayrıca, üretildikleri malzemeye bağlı olarak kimyasallara ve suya karşı dayanıklı olmaları, vidalama, delme, eklem ve tamirat gibi çok yönlü kullanım imkânları sunmaları nedeniyle; otomotiv, havacılık, hafif ticari araçlar, denizcilik, yüksek hızlı trenler, inşaat, ambalaj, rüzgâr enerjisi ve güneş panelleri gibi pek çok sektörde yaygın şekilde kullanılmaktadır. Sandviç yapılar, alt ve üst örtü elemanları arasına yerleştirilen bir çekirdek yapının yapıştırılmasıyla elde edilen kompozit yapı elemanlarıdır. Örtü katmanları ince, sert ve yüksek yoğunluklu; çekirdek ise bu katmanlara kıyasla daha kalın ve düşük yoğunluklu malzemelerden seçilmektedir. Bu tür yapılar, başta basma ve eğilme olmak üzere çeşitli mekanik özelliklerde yüksek dayanım sağlaması hedefiyle çok sayıda çalışma kapsamında araştırılmakta ve geliştirilmektedir.

Tez çalışması kapsamında, hücre genişliği ve hücre duvar kalınlığı parametreleri için üç farklı ölçü belirlenmiş ve bu ölçülere göre çekirdek hücreler, üç boyutlu yazıcı kullanılarak polilaktik asit (PLA) filamentinden üretilmiştir. Alt ve üst yüzey plakaları ise, %15–20 oranında karbon içeren ve PLA/CF olarak adlandırılan takviyeli kompozit malzemeden, eklemeli imalat yöntemi ile üretilmiştir. Hazırlanan numuneler, epoksi esaslı yapıştırıcı kullanılarak birleştirilmiştir. Tek ve çift katmanlı olacak şekilde üretilen sandviç kompozit plakaların mekanik özellikleri deneysel yöntemlerle araştırılmıştır. Çalışmada sırasıyla baskı hızı, doluluk oranı, hücre genişliği (Dc), hücre duvar kalınlığı (tc) ve trapezoid taban açısı olmak üzere beş farklı parametre seçilmiştir. Bu parametrelere ait değerler sırasıyla; hız: 75/100/125 mm/sn, doluluk: %70/%85/%100, Dc: 6/9/12 mm, tc: 0,8/1,2/1,6 mm ve trapezoid açısı: 55/65/75 derece olacak şekilde belirlenmiş ve bu değerlere göre trapezoid hücre geometrileri kullanılmıştır. Tek ve çift katmanlı olarak hazırlanan numunelere basma ve üç nokta eğilme testleri uygulanmış; analizler sonucunda elde edilen optimum sonuçlara göre %100 karbon plaka kullanılarak hazırlanmış sandviç plakalarla karşılaştırmalı testler gerçekleştirilmiştir. Testlerden elde edilen veriler, TAGUCHI deney tasarımı yöntemiyle değerlendirilmiş; sonuçlar varyans analizi (ANOVA) yöntemi ile istatistiksel olarak analiz edilmiştir.

Bu çalışma, trapezoid hücre geometrisine sahip sandviç yapılarda üretim parametrelerinin bütüncül etkisini inceleyen nadir çalışmalardan biridir. Tek ve çift katmanlı yapıların karşılaştırmalı analizi literatüre yenilik katmaktadır. 3B baskı ile PLA/CF malzeme kullanımı ise eklemeli imalata yönelik özgün bir uygulamadır. Elde edilen bulgular, yapısal tasarım ve optimizasyon süreçlerine doğrudan katkı sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Eklemeli İmalat, Mekanik Özellikler, Sandviç Kompozit, Trapezoid, 3 Boyutlu Yazıcı, Varyans Analizi (ANOVA), Taguchi Deney Tasarımı

ABSTRACT

DOCTORAL THESIS

INVESTIGATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF SANDWICH COMPOSITE PLATES PRODUCED BY ADDITIVE MANUFACTURING METHOD.

Mehmet Şah GÜLTEKİN

Batman University Graduate Education Institute

Mechanical Engineering Department of Science

Advisor: Prof. Dr. Hamit ADİN

2025, 148 Pages

Trapezoidal composite sandwich structures are preferred due to their lightweight nature and high flexural and compressive strength. In addition, their resistance to chemicals and water—depending on the materials from which they are manufactured—provides versatility for applications such as screwing, drilling, joining, and repair. These advantages have led to their widespread use across various industries, including automotive, aerospace, light commercial vehicles, marine, high-speed trains, construction, packaging, wind energy, and solar panels. Sandwich structures are composite elements composed of a core structure bonded between upper and lower face sheets. The face sheets are typically thin, stiff, and high in density, whereas the core is relatively thicker and made of low-density materials. Such structures are the subject of extensive research and development, particularly aimed at achieving high mechanical performance under compressive and flexural loading.

In the scope of this thesis, three different levels were defined for the parameters of cell width and cell wall thickness, and core structures were fabricated from polylactic acid (PLA) filament using a three-dimensional (3D) printer. The top and bottom face sheets were manufactured using an additive manufacturing method from a composite material called PLA/CF, which contains 15–20% carbon reinforcement. The produced specimens were assembled using an epoxy-based adhesive. Sandwich composite plates were fabricated in both single- and double-layer configurations, and their mechanical properties were investigated through experimental methods. In the study, five process parameters were selected: printing speed, infill density, cell width (Dc), cell wall thickness (tc), and trapezoidal base angle. The respective parameter values were defined as follows: speed: 75/100/125 mm/s, infill: 70/85/100%, Dc: 6/9/12 mm, tc: 0.8/1.2/1.6 mm, and trapezoidal base angle: 55/65/75 degrees. Based on these values, trapezoidal cell geometries were produced. Compressive and three-point bending tests were performed on both single- and double-layer specimens. Comparative tests were subsequently conducted with sandwich plates manufactured using 100% carbon fiber-reinforced plates, based on the optimum results obtained from the initial experiments. The experimental data were evaluated using the TAGUCHI design of experiments method, and the results were statistically analyzed using analysis of variance (ANOVA).

This study is one of the few that examines the holistic effect of production parameters in sandwich structures with trapezoidal cell geometry. The comparative analysis of single- and double-layered structures adds novelty to the literature. The use of PLA/CF material with 3D printing is a unique application for additive manufacturing. The findings directly contribute to structural design and optimization processes.

Keywords: Additive Manufacturing, Mechanical Properties, Sandwich Composite, Trapezoid, 3D Printer, Taguchi design of experiments, ANOVA

ÖN SÖZ

Doktora öğrenim sürecim boyunca akademik rehberliği, engin bilgi birikimi ve değerli tecrübeleriyle çalışmalarımın her aşamasına yön veren, sabrı, desteği ve yapıcı katkılarıyla bana her zaman ilham kaynağı olan saygıdeğer danışmanım Prof. Dr. Hamit ADİN'e en içten teşekkürlerimi ve derin saygılarımı sunarım. Kendisinin titiz akademik yaklaşımı ve yönlendirici desteği, bu tezin her aşamasında yol gösterici olmuştur.

Ayrıca, ikinci danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Said BAYRAKLILAR'a da süreç boyunca sunduğu değerli katkılar, yol gösterici öneriler ve yapıcı değerlendirmeleri için teşekkür ederim. Kendisinin destekleri, bu çalışmanın bilimsel derinliğine ve bütünlüğüne önemli katkılar sağlamıştır. Her iki hocama da, doktora eğitimim süresince gösterdikleri ilgi, sabır, anlayış ve kıymetli rehberlikleri için saygı ve şükranlarımı arz ederim.

Tez izleme sürecinde yapıcı eleştirileri, yol gösterici önerileri ve bilimsel bakış açılarıyla çalışmamın gelişimine önemli katkılar sunan saygıdeğer hocalarım Doç. Dr. Şehmus BADAY ve Dr. Öğr. Üyesi İsmail BAYAR'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Kıymetli değerlendirmeleri ve yönlendirmeleri, çalışmamın bilimsel içeriğinin olgunlaşmasına ve metodolojik açıdan güçlenmesine büyük katkı sağlamıştır.

Tez jürisinde yer alarak değerli zamanlarını ayıran, çalışmamı titizlikle değerlendirip yapıcı görüş ve önerileriyle katkı sağlayan saygıdeğer hocalarım Doç. Dr. Melih KUNCAN ve Doç. Dr. Oğuz TUNÇEL'e teşekkür ederim. Kıymetli değerlendirmeleri ve yönlendirmeleri, bu tezin son hâlini kazanmasında önemli rol oynamıştır. Deney aşamasında yardım ve desteğini esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Serkan BATI'ya da katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Hayatımın her döneminde manevi destekleri, sabırları ve sevgileriyle her zaman yanımda olan, dualarıyla bana güç veren sevgili anneme ve babama en derin şükranlarımı sunarım. Varlıkları, bu uzun ve yoğun süreçte en büyük motivasyon kaynağım olmuştur.

Bu süreç boyunca anlayışı, sabrı ve sevgisiyle her zaman yanımda yer alan sevgili eşime gönülden teşekkür ederim. Ayrıca, hayatıma anlam katan ve varlıklarıyla her zaman güç veren kıymetli evlatlarım Muhammed Eren, Yusuf Erdem, Beyza, Zeren ve Zehra'ya sevgilerimi sunarım. Onların neşesi, sevgisi ve desteği, bu zorlu sürecin en değerli ilham kaynağı olmuştur.

Bu çalışmayı, hayat yolculuğumun her aşamasında yanımda olan ve bu süreci benimle paylaşan tüm sevdiklerime minnet ve sevgiyle ithaf ediyorum.

Mehmet Şah GÜLTEKİN
BATMAN-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	iv
ÖN SÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLO LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Üç Boyutlu Yazıcılar.....	1
1.1.1. Üç boyutlu yazıcı teknolojileri	4
1.1.1.1. Stereolitografi (SLA) teknolojisi	4
1.1.1.2. Dijital ışık işleme (DLP) teknolojisi	5
1.1.1.3. SLA ve DLP teknolojilerinin karşılaştırılması	6
1.1.1.4. Tabaka yapıştırımlı katmanlı imalat (LOM) teknolojisi	8
1.1.1.5. Elektron ışınli ergitme (EBM) yöntemi	9
1.1.1.6. Eriyik yığma modelleme (FDM) yöntemi	10
1.2. Kompozit Malzemeler.....	15
1.2.1. Kompozit malzemelerin avantajları	16
1.2.2. Kompozit malzemelerin dezavantajları	16
1.2.3. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması	17
1.2.3.1. Takviye elemanın yapısına göre kompozitler.....	17
1.2.3.2. Elyaf takviyeli kompozitler	18
1.2.3.3. Parçacık takviyeli kompozitler	18
1.2.4. Hibrit kompozitler.....	18
1.2.5. Sandviç yapılı kompozitler	18
1.3. Trapezoid Sandviç Kompozitler	21
1.3.1. Oluklu çekirdek yapıları	22
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	27
2.1. Üç Nokta Eğme Deneyi ile İlgili Kaynak Araştırması.....	28
2.2. Basma Deneyi ile İlgili Kaynak Araştırması	34
3. MATERYAL VE YÖNTEM	39

3.1. Basma Testi	39
3.2. Üç Nokta Eğme Testi	51
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	68
4.1. Basma Deneyleri	68
4.1.1. Basma testi taguchi yöntemi	69
4.1.2. Basma testi sonuçlarının ANOVA'ya göre analizi	70
4.1.3. Basma testi sonuçlarının varyans analizi	78
4.1.4. Basma testi genel sonuçları	87
4.1.5. Basma testi tartışma	87
4.2. Eğme Deneyleri	90
4.2.1. Eğme testi taguchi yöntemi	92
4.2.2. Eğme testi sonuçlarının ANOVA'ya göre analizi	93
4.2.3. Eğme testi varyans analizi	102
4.2.4. Üç Nokta Eğme Testi Genel Sonuçları	110
4.2.5. Üç nokta eğme testi tartışma	111
4.3. Üç nokta eğme ve basma testi sonuçlarının kıyaslanması	113
4.4. Optimum Deney Sonuçları Karşılaştırılması	124
4.4.1. Optimum basma deneyi karşılaştırılması	124
4.4.2. Optimum üç nokta eğme deneyi karşılaştırılması	130
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	136
5.1. Sonuçlar	136
5.1.1. Basma testi bulguları	136
5.1.2. Üç nokta eğme testi bulguları	136
5.1.3. Basma ve üç nokta eğme testi optimum bulguların %100 karbon plakalar ile mukayesesi	137
5.1.4. Literatürle uyum	137
5.2. Öneriler	138
5.2.1. Akademik ve bilimsel öneriler	138
5.2.2. Endüstriyel ve uygulamalı öneriler	139
5.2.3. Gelecek çalışmalar için öneriler	139
KAYNAKLAR	140

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. 3D yazıcının çalışma prensibi (Nanoteknoloji, 2023).....	2
Şekil 1.2. Eklemeli imalat (3B) baskı işlem adımları (Sürmen, 2019).....	3
Şekil 1.3. SLA çalışma prensibi (Smith ve Johnson 2022).	5
Şekil 1.4. DLP yazıcısının ana bileşenleri (Williams & Zhang 2021).	6
Şekil 1.5. LOM makinesinin temel bileşenleri şematik (Kotaman, 2023)	9
Şekil 1.6. EBM sürecinin genel yapısını ve sistem bileşenleri (Akgümüş vd., 2023). ..	10
Şekil 1.7. FDM makinesinin bileşenleri (Chua et al., 2014).	12
Şekil 1.8. Creality Ender 3D yazıcı ile imal edilmiş örnek numuneler	14
Şekil 1.9. Creality Ender 3D yazıcı ile imal edilmiş örnek numuneler	14
Şekil 1.10. Creality Ender 3D yazıcı	15
Şekil 1.11. Kompozit plakanın basit şeması (Commons, 2025).....	19
Şekil 1.12. Polimer matrisli kompozit malzemenin şematik gösterimi (Dursun ve Ozbay 2008).	20
Şekil 1.13. Periyodik hücre dizilimine sahip hücresel yapılar (Wadley, 2006).	21
Şekil 1.14. Trapezoid çekirdek yapısının ve çekirdek birim hücresinin gösterimi (Zurnacı, 2019).	23
Şekil 1.15. Farklı geometrilerde çekirdek yapıları a) kare tipi, b) trapezoid tipi, c) üçgen tipi, d) yuvarlak tipi (Wadley, 2006).	23
Şekil 1.16. Oluklu sandviç panel plakaların üretimi (Wadley, 2006).	24
Şekil 1.17. Oluklu çekirdek geometrisine sahip farklı sandviç panel örnekleri.	25
Şekil 3.1. Ticari olarak temin edilebilen bir 3D yazıcı ve 3D yazıcı ile üretilmiş örnekler.	41
Şekil 3.2. A) Trapezoid hücre ölçülerinin şekil üzerinde gösterilmiş hali B) Eni boyu 75X75mm trapezoid hücrenin katı modeli	42
Şekil 3.3. A) Ticari olarak temin edilebilen 3D yazıcının basma numunesi baskı aşaması. B) PLA basma numunesi baskı sonu aşaması görüntüsü.	43
Şekil 3.4. Tek Katlı PLA-Carbon fiber Plaka ve PLA çekirdek Hücrenin iki bileşenli epoksi yapıştırıcı ile yapıştırıldıktan sonraki montaj hali	44
Şekil 3.5. İki Katlı PLA-Carbon fiber Plaka ve PLA çekirdek Hücrenin iki bileşenli epoksi yapıştırıcı ile yapıştırıldıktan sonraki montaj hali	45
Şekil 3.6. Radwag WTB 2000 [11] terazisi (Kapasite: 2000 gr, Hassasiyet: 0,01 gr) kullanılarak yapıştırma öncesi ve sonrasında ölçümler	46
Şekil 3.7. a) Basma deneyi için hazırlanmış numunelerin yandan görünüşü b) Basma deneyi için hazırlanmış numunelerin üstten görünüşü	47
Şekil 3.8. A) Yapıştırmadan önce ve sonra Radwag WTB 2000 hassas terazi ile ölçüm. B) Numunelerin yapıştırma aşamasından bir kesit. C) İki bileşenli epoksi bazlı yapıştırıcının spatula ile numunelere uygulanması aşaması. D) Oda sıcaklığında 24 saat boyunca 0,5 MP	48
Şekil 3.9. Batman Üniversitesi Makine Mühendisliği Laboratuvarı'ndaki Shimadzu AG-IC model 250 kN cihazı	50
Şekil 3.10. Basma numunenin test cihazdaki konumu	51
Şekil 3.11. Sandviç yapı elemanlarının üç nokta eğme testi esnasında taşıdığı yükler (Zurnacı, 2019)	53
Şekil 3.12. Ticari olarak temin edilebilen bir 3D yazıcı 3D yazıcı ile üretilmiş örnekler	54
Şekil 3.13. a) Trapezoid hücre ölçülerinin şekil üzerinde gösterilmiş hali b) Eni boyu 200X50 mm trapezoid hücrenin katı modeli	55

Şekil 3.14. A) Ticari olarak temin edilebilen 3D yazıcının baskı aşaması B) PLA baskı aşaması sonu ile ilgili görüntüsü.....	56
Şekil 3.15. Tek Katlı PLA-Carbon fiber Plaka ve PLA çekirdek Hücrenin iki bileşenli epoksi yapıştırıcı ile yapıştırıldıktan sonraki montaj hali	58
Şekil 3.16. İki Katlı PLA-carbon fiber plaka ve PLA çekirdek hücrenin iki bileşenli epoksi yapıştırıcı ile yapıştırıldıktan sonraki montaj hali	58
Şekil 3.17. Radwag WTB 2000 terazisi (Kapasite: 2000 gr, Hassasiyet: 0,01 gr).....	59
Şekil 3.18. Çekirdek numunelere spatula yardımıyla çift bileşenli epoksi esaslı yapıştırılması.....	60
Şekil 3.19. Numunelerin bir kısmının yapıştırma öncesinde çekilmiş görüntüleri	61
Şekil 3.20. Oda sıcaklığında 24 saat boyunca kürlenmiş ve 0,5 MPa basınçta yapıştırılan 81 adet sandviç kompozit yapı numuneleri	61
Şekil 3.21. A ve B de üç nokta eğme testi için her bir deney numarası için 3'er adet olmak üzere toplam 81 adet hazırlanmış numunelerinin farklı kesitlerden görünüşü....	64
Şekil 3.22. Deneylerin yapıldığı Shimadzu AG-IC model 250 kN universal test cihazı	65
Şekil 3.23. 20e-3 eğme numunesinin test cihazındaki konumu mesnetlerin gösterimi..	66
Şekil 3.24. a) Shimadzu AG-IC eğme testi cihazı eğme ünitesi b) Eğme numunesinin test cihazındaki konumu c) Numunelerin deney öncesi görüntüleri.....	67
Şekil 4.1. (A) Basma testi sonucunda deforme olmuş numuneler ve (B) deformasyona uğramış yerlerin örnek kesitler	69
Şekil 4.2. Basma testi numunelerin 3d yazıcıda yazdırma süresi.....	73
Şekil 4.3. Basma testi sonuçlarına göre ortalama S/N oranları grafikleri	74
Şekil 4.4. Basma testi sonuçlarına göre hız faktörü için ortalama SN oranları grafiği ..	74
Şekil 4.5. Basma testi sonuçlarına göre Dc faktörü için ortalama SN oranları grafiği ..	75
Şekil 4.6. Basma testi sonuçlarına göre tc faktörü için ortalama SN oranları grafiği	76
Şekil 4.7. Basma testi sonuçlarına göre açı faktörü için ortalama SN oranları grafiği ..	77
Şekil 4.8. Basma testi sonuçlarına göre doluluk faktörü için ortalama SN oranları grafiği	78
Şekil 4.9. Basma dayanımı için hız, dc, tc, açı, doluluk için varyans analizi grafiği	79
Şekil 4.10. Basma testi sonuçlarının kuvvet grafikleri	81
Şekil 4.11. Basma deneyleri Hız faktörleri için ortalamalar yanıt tablosu grafiği	81
Şekil 4.12. Basma deneyleri Dc faktörleri için ortalamalar yanıt tablosu grafiği	82
Şekil 4.13. Basma deneyleri tc faktörleri için ortalamalar yanıt tablosu grafiği	83
Şekil 4.14. Basma deneyleri Açı faktörleri için ortalamalar yanıt tablosu grafiği	84
Şekil 4.15. Basma deneyleri doluluk faktörleri için ortalamalar yanıt tablosu grafiği...	85
Şekil 4.16. Basma testi için sonuçların sapma oranı	87
Şekil 4.17. Eğme testi sonucunda deforme olmuş numuneler 1e-8e aralığı.....	90
Şekil 4.18. Eğme testi sonucunda deforme olmuş numuneler 9e-16e aralığı.....	91
Şekil 4.19. Eğme testi sonucunda deforme olmuş numuneler 17e-24e aralığı.....	91
Şekil 4.20. Eğme testi sonucunda deforme olmuş numuneler 25e-27e aralığı.....	92
Şekil 4.21. Eğme deneyleri için 3D yazıcıda basılan numunelerinin üretim süreleri. ...	95
Şekil 4.22. Eğme testi sonuçlarının SN ortalama grafikleri	96
Şekil 4.23. Eğme testi sonuçlarına göre hız faktörü için ortalama SN oranları grafiği..	97
Şekil 4.24. Eğme testi sonuçlarına göre Dc faktörü için ortalama SN oranları grafiği ..	98
Şekil 4.25. Eğme testi sonuçlarına göre tc faktörü için ortalama SN oranları grafiği....	99
Şekil 4.26. Eğme testi sonuçlarına göre açı faktörü için ortalama SN oranları grafiği	100
Şekil 4.27. Eğme testi sonuçlarına göre doluluk faktörü için ortalama SN oranları grafiği.....	101
Şekil 4.28. Eğme deneyleri için Hız, Dc, tc, Açı ve Doluluk Varyans Analizi grafiği	102
Şekil 4.29. Eğme testi sonuçları kuvvet grafikleri.....	104

Şekil 4.30. Eğme deneyleri Hız faktörleri için ortalamalar yanıt tablosu grafiği.....	105
Şekil 4.31. Eğme deneyleri Dc faktörleri için ortalamalar yanıt tablosu grafiği.....	106
Şekil 4.32. Eğme deneyleri tc faktörleri için ortalamalar yanıt tablosu grafiği.....	107
Şekil 4.33. Eğme deneyleri Açık faktörleri için ortalamalar yanıt tablosu grafiği.....	108
Şekil 4.34. Eğme deneyleri Doluluk faktörleri için ortalamalar yanıt tablosu grafiği .	109
Şekil 4.35. Eğme testi için sonuçların sapma oranı	110
Şekil 4.36. Üç nokta eğme ve basma deneylerinden ortaya çıkan ortalama sonuçların SN oranlarının Açık faktörüne göre kıyaslanması.....	113
Şekil 4.37. Üç nokta eğme ve basma deneylerinden ortaya çıkan ortalama sonuçların SN oranlarının Dc faktörüne göre kıyaslanması.....	114
Şekil 4.38. Üç nokta eğme ve basma deneylerinden ortaya çıkan ortalama sonuçların SN oranlarının Doluluk faktörüne göre kıyaslanması	115
Şekil 4.39. Üç nokta eğme ve basma deneylerinden ortaya çıkan ortalama sonuçların SN oranlarının Hız faktörüne göre kıyaslanması.....	116
Şekil 4.40. Üç nokta eğme ve basma deneylerinden ortaya çıkan ortalama sonuçların SN oranlarının tc faktörüne göre kıyaslanması.....	117
Şekil 4.41. Üç nokta eğme ve basma deneylerinden ortaya çıkan mukavemet sonuçlarının Açık faktörüne göre kıyaslanması.....	118
Şekil 4.42. Üç nokta eğme ve basma deneylerinden ortaya çıkan mukavemet sonuçlarının Dc faktörüne göre kıyaslanması.....	119
Şekil 4.43. Üç nokta eğme ve basma deneylerinden ortaya çıkan mukavemet sonuçlarının doluluk faktörüne göre kıyaslanması	120
Şekil 4.44. Üç nokta eğme ve basma deneylerinden ortaya çıkan mukavemet sonuçlarının hız faktörüne göre kıyaslanması	121
Şekil 4.45. Üç nokta eğme ve basma deneylerinden ortaya çıkan mukavemet sonuçlarının tc faktörüne göre kıyaslanması	122
Şekil 4.46. Üç nokta eğme ve basma deneylerinden ortaya çıkan mukavemet sonuçlarının R^2 (sapma oranı) faktörüne göre kıyaslanması	123
Şekil 4.47. Üç nokta eğme ve basma deneylerinden ortaya çıkan mukavemet sonuçlarının varyans analizine göre kıyaslanması.....	124
Şekil 4.48. 1 mm kalınlığında %100 karbon fiber plaka (Dostkimya , 2025).....	126
Şekil 4.49. Eni boyu 75X75 mm ve 1 mm kalınlığa sahip %100 karbon fiber plaka ..	127
Şekil 4.50. Basma testi için hazırlanmış numunelerin üstten ve perspektif görüntüsü	128
Şekil 4.51. %100 karbon plaka ile yapılan basma testi için hazırlanmış numune montaj hali	128
Şekil 4.52. %100 karbon plaka ile yapılan basma deneyi	129
Şekil 4.53. %100 karbon plaka ile yapılan basma deneyi kuvvet yer değiştirme grafiği	130
Şekil 4.54. 1 mm kalınlığında %100 karbon fiber plaka (Dostkimya, 2025).....	131
Şekil 4.55. Eni boyu 200X50 mm ve 1 mm kalınlığa sahip %100 karbon fiber plaka	132
Şekil 4.56. Üç nokta eğme testi için hazırlanmış numunelerin üstten ve perspektif görüntüsü	133
Şekil 4.57. %100 karbon plaka ile yapılan üç nokta eğme testi için hazırlanmış numune montaj hali	134
Şekil 4.58. %100 karbon plaka ile yapılan üç nokta eğme deneyi	134
Şekil 4.59. %100 karbon plaka ile yapılan üç nokta eğme deneyi kuvvet yer değiştirme grafiği.....	135

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1. SLA ve DLP Teknolojilerinin Karşılaştırması (Williams & Zhang 2021).....	7
Tablo 3.1. PLA filament teknik özellikleri	40
Tablo 3.2. Seviyeler ve faktörler.....	42
Tablo 3.3. Creality CRX – Pro yazıcının teknik özellikler	43
Tablo 3.4. Creality Slicer 4.8.2 yazılımında seçilen parametreler	44
Tablo 3.5. Basma testi numuneleri için PLA ve PLA-CF trapezoid çekirdek hücreli kompozit sandviç plakaların ölçülen kütle değerleri	49
Tablo 3.6. Pla filament teknik özellikleri.....	53
Tablo 3.7. Basma testi için seviye ve faktörler	55
Tablo 3.8. Creality CRX – Pro yazıcının teknik özellikler	56
Tablo 3.9. Creality Slicer 4.8.2 yazılımında seçilen parametreler	57
Tablo 3.10. Üç nokta eğme testi için PLA ve PLA-CF trapezoid çekirdek hücreli kompozit sandviç plakaların kütle değerleri	62
Tablo 4.1. Basma testi için belirlenen seviye ve faktörler	69
Tablo 4.2. Basma deneyleri için taguchi yöntemi ile belirlenen numunelerin ölçüleri ve basma mukavemeti sonuçları.....	71
Tablo 4.3. Basma testi için S/N oranlarını gösteren sonuç tablosu (büyük daha iyidir) ..	73
Tablo 4.4. Basma deneyleri için varyans analizi.....	79
Tablo 4.5. Basma deneyleri için yanıt tablosu	80
Tablo 4.6. Basma deneyi sonucunda oluşan model özeti.....	86
Tablo 4.7. Eğme deneyleri için belirlenen seviye ve faktörler.	92
Tablo 4.8. Eğme deneyleri için Taguchi yöntemi ile belirlenen numunelerin ölçüleri..	94
Tablo 4.9. Eğme testi için SN oranlarını gösteren sonuç tablosu (büyük daha iyidir) ..	95
Tablo 4.10. Eğme deneyleri için Varyans Analizi	103
Tablo 4.11. Eğme deneyleri için Ortalamalar yanıt tablosu.....	103
Tablo 4.12. Eğme deneyleri sonucunda oluşan model özeti.....	110
Tablo 4.13. Basma deneyleri için optimum parametreler	125
Tablo 4.14. Karbon plakanın teknik özellikleri	127
Tablo 4.15. Üç nokta eğme deneyleri için optimum parametreler.....	131
Tablo 4.16. Karbon plakanın teknik özellikleri	132
Tablo 5.1. Literatür karşılaştırması, sandviç yapıların basma ve eğme dayanımları ...	138

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

Ai	:Kuvvetin uygulandığı andaki deney numunesinin kesit alanı.
AlMg3	:%3 magnezyum içeren alüminyum alaşımı.
AlMg3/SiCp	:SiCp takviyeli: %3 magnezyum içeren alüminyum kompozit malzeme
Er	:Erbium
Fi	:Deformasyonun herhangi bir İ anında numuneye etki eden kuvvet
N	:Gürültü (Noise)
S	:Sinyal (Signal)
TiAl	:Titanyum alüminid.
σ_g	:Gerçek gerilme

Kısaltmalar

3D	:Üç boyutlu
ABS	:Akrilonitril-butadien-stiren
AM	:Additive manufacturing
CAD	:Bilgisayar destekli tasarım
CF	:Karbon fiber
CFRP	:Karbon fiber takviyeli polimer
CLT	:Klasik laminasyon yöntemi
CNC	:Computer numeric control
CTP	:Cam takviyeli polyester
Dc	:Çekirdek hücre genişliği
DLP	:Dijital ışık işleme
DMLS	:Direct metal laser sintering
EBM	:Electron beam melting
EYM	:Eriyik yığma modelleme
FDM	:Fused deposition modeling
FRP	:Fiber takviyeli polimer
GFRP	:Cam elyaf takviyeli polimer
LOM	:Laminated object manufacturing
MC	:Mass customization
MCP	:Model context protocol
MDA	:Multidisipliner tasarım ve analizi
MIT	:Massachusetts Institute of Technology
MLR	:Çoklu doğrusal regresyon
PLA	:Polilaktik asit
RFR	:Rastgele orman regresyonu
SCS	:Sandviç kompozit yapılar
SEM	:Yüzey analizi
SLA	:Stereolitografi
SLM	:Selective laser melting
SLS	:Selective laser sintering
Tc	:Çekirdek hücre kalınlığı
TPU	:Termoplastik poliüretan
YSA	:Yapay sinir ağları

1. GİRİŞ

1.1. Üç Boyutlu Yazıcılar

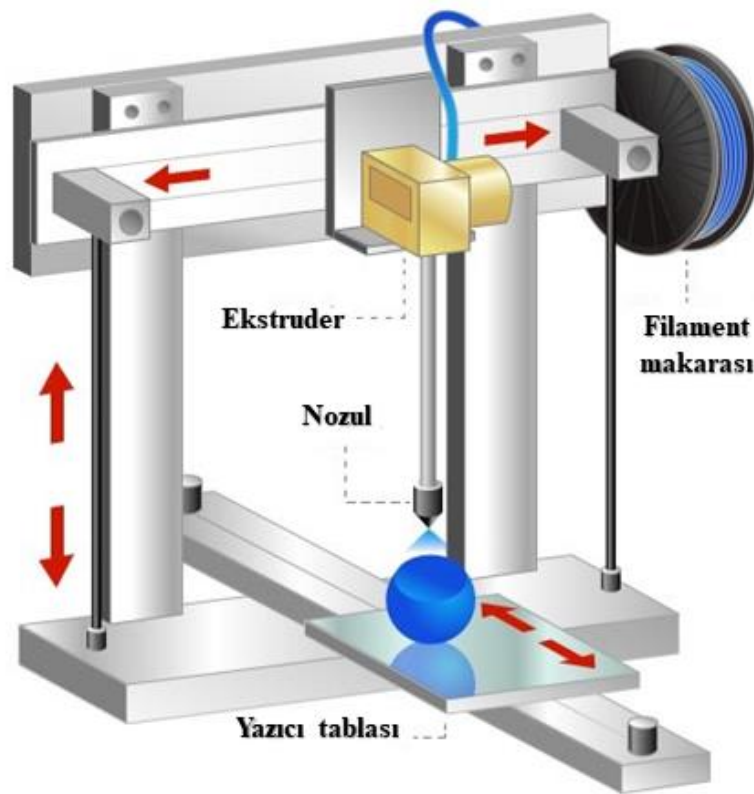
Üç boyutlu (3D) yazıcılar, dijital ortamda bilgisayar destekli tasarım (CAD) yazılımları aracılığıyla oluşturulan nesnelerin, katmanlı üretim (additive manufacturing) yöntemiyle fiziksel olarak imal edilmesini sağlayan ileri üretim teknolojileridir. Bu cihazlar, üretim sürecinde "filament" adı verilen termoplastik veya reçine bazlı hammaddeleri belirli bir sırayla üst üste katmanlar halinde birleştirerek imal edilecek nesneyi inşa eder. Kullanılan filamentin türü, uzunluğu ve kalitesi; elde edilen ürünün mekanik özellikleri, yüzey kalitesi ve boyutsal doğruluğu üzerinde doğrudan etkilidir. Benzer şekilde, üretimde kullanılan reçine malzemesinin özellikleri de nihai ürün performansını belirleyen önemli bir unsurdur. Bu nedenle, üretim amacı ve uygulama alanına uygun 3D yazıcı tipi ile malzeme seçimi kritik bir öneme sahiptir (3Eksen, 2023).

CAD tabanlı olarak geliştirilen üç boyutlu modeller, genellikle AutoCAD, 3Ds Max ve SolidWorks gibi mühendislik yazılımları ile oluşturulmakta ve yazıcılara uygun dosya formatlarında hazırlandıktan sonra işlem öncesi G kodları şeklinde dilimlenmektedir. Sonrasında yazıcı tarafından gerçekleştirilen baskı işlemi ile modelin fiziksel prototipi elde edilir. Bu süreçte kullanılan dilimleme yazılımları, modelin katman kalınlığı, doluluk oranı, baskı hızı ve destek yapıları gibi parametreleri optimize ederek baskı kalitesini ve üretim süresini doğrudan etkiler. Ayrıca, baskı öncesinde model üzerinde gerekli düzeltmelerin yapılması ve yüzey pürüzlülüğünün azaltılması, nihai ürünün boyutsal doğruluğunu ve mekanik performansını artırmaktadır. Böylece, bilgisayar ortamında tasarlanan ürünler kısa sürede fiziksel olarak test edilebilir ve mühendislik doğrulama süreçleri hızlandırılabilir (Bayraklılar, 2024).

Geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla daha hızlı ve esnek çözümler sunan 3D yazıcılar, ürün geliştirme ve prototipleme süreçlerinde önemli avantajlar sağlamaktadır. Bu teknoloji; tıp, otomotiv, inşaat, eczacılık, eğitim, savunma sanayi, havacılık ve uzay, tekstil, denizcilik ve eğlence sektörleri başta olmak üzere çok çeşitli alanlarda yaygın

olarak kullanılmaktadır. Şekil 1.1'de, 3D yazıcıların temel çalışma prensibi şematik olarak gösterilmektedir (3Eksen, 2023).

Eriyik Yığılma Modelleme (EYM) 3D baskı teknolojileri arasında en yaygın olarak kullanılanlardan biridir. EYM, termoplastik bir filamentin sıcak bir nozul (ekstrüzyon başlığı) aracılığıyla eritilerek tabaka tabaka bir yüzeye sıkılması prensibiyle çalışır. Bu sıkma işlemi, üç boyutlu bir nesnenin katman katman oluşturulmasıyla sonuçlanır.



Şekil 1.1. 3D yazıcının çalışma prensibi (Nanoteknoloji, 2023).

Eklemeli imalatın aşamalarını maddeler halinde sıralayacak olursak;

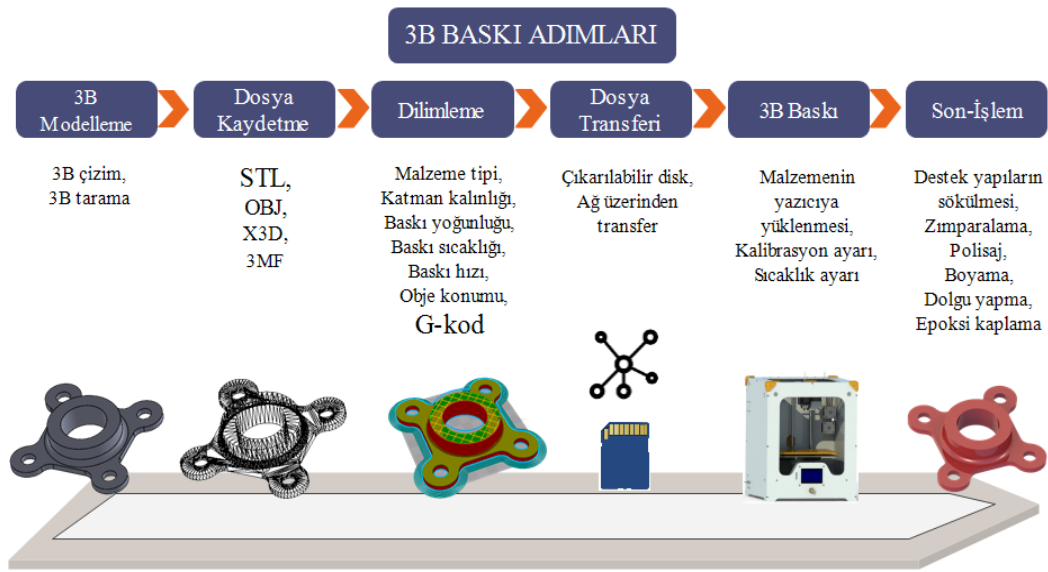
a) Tasarım ve Hazırlık: İlk olarak, 3D bir model CAD yazılımıyla tasarlanır. Tasarlanan model dilimleme yazılımı (slicing software) aracılığıyla ince katmanlara ayrılır. Bu yazılım, modelin katmanlarını ne kadar malzeme ile basılacağını ve başlık hareketlerini belirleyerek makineye gönderir.

b) Filament Beslemesi: Filament rulolarından beslenir ve ekstrüzyon başlığına doğru itilir.

c) **Isıtma ve Ekstrüzyon:** Ekstrüzyon başlığında filament ısıtılarak eritilir. Nozuldan çıkan sıcak malzeme, platform üzerinde belirlenen yolu takip ederek sıkılır.

d) **Katmanlama:** Her katman tamamlandığında, baskı platformu aşağı doğru hareket eder veya ekstrüzyon başlığı yukarı doğru hareket eder, böylece yeni bir katman basılabilir. Bu işlem, tüm nesne tamamlanana kadar tekrar edilir.

e) **Soğuma:** Eritilmiş plastik malzeme hızla soğuyarak sertleşir. Bu, katmanların birbirine yapışarak bütünleşmesini sağlar. Şekil 1.2’de Eklemeli imalat 3B baskı işlem adımları şema halinde gösterilmektedir.



Şekil 1.2. Eklemeli imalat (3B) baskı işlem adımları (Sürmen, 2019)

f) **Kullanılan Malzemeler:** EYM teknolojisinde genellikle ABS (Akrilonitril Bütadien Stiren), PLA (Polilaktik Asit) gibi termoplastik malzemeler kullanılır. Ancak, son yıllarda birçok farklı türde termoplastik malzeme EYM ile uyumlu hale getirilmiştir.

g) **Avantajları ve Dezavantajları:** EYM, hızlı prototipleme ve bazı endüstriyel uygulamalar için popülerdir çünkü düşük maliyetli, hızlı ve nispeten üretimi kolaydır. Ancak, bazen yüzey kalitesi diğer 3D baskı yöntemlerine göre daha düşük olabilir ve özellikle karmaşık geometrilere sahip parçalar için destek malzemesi gerektirebilir.

Özetle, eriyik yığılma modelleme, 3D baskı dünyasında oldukça yaygın ve etkili bir yöntemdir ve birçok uygulamada başarıyla kullanılmaktadır. Eriyik yığılma modelleme, İngilizce’de Fused Deposition Modeling (FDM) olarak adlandırılır ve günümüzde 3D baskıda en yaygın kullanılan teknolojidir (Nanoteknoloji, 2023).

1.1.1. Üç boyutlu yazıcı teknolojileri

1.1.1.1. Stereolitografi (SLA) teknolojisi

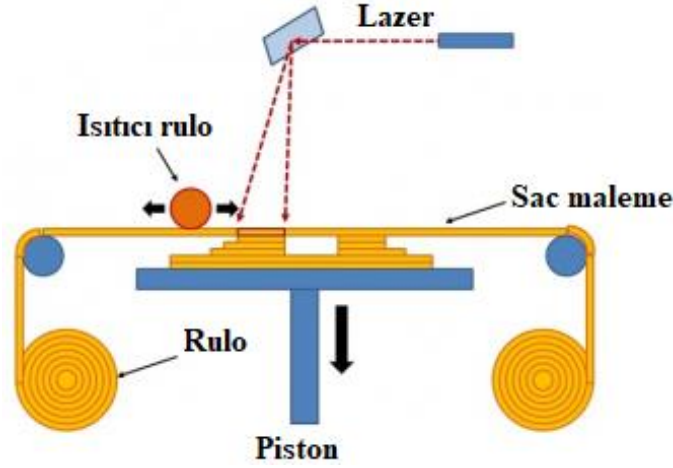
Stereolitografi (SLA), üç boyutlu baskı teknolojileri arasında yer alan, oda sıcaklığında sıvı halde bulunan fotopolimer reçinenin ultraviyole (UV) lazer veya dijital projeksiyon ışığı aracılığıyla katılaştırılması prensibine dayalı bir üretim yöntemidir. Bu teknolojiye, ışığa duyarlı reçine tabaka tabaka kürlenerek katı hale getirilir ve katmanlar birleştikçe nihai ürün elde edilir. Sertleştirilen her yeni katman, önceki katmanla birleştirilerek üç boyutlu yapının oluşturulması sağlanır. Baskı işlemi tamamlandıktan sonra parça, reçine havuzundan çıkarılarak son işlemlere alınır (Smith & Johnson 2022).

Günümüzde SLA teknolojisi iki ana kategori altında sınıflandırılmaktadır:

- **Lazer tabanlı SLA:** UV lazer ışını, galvanometrik aynalarla yönlendirilerek reçinenin yüzeyine odaklanır ve belirlenen desen doğrultusunda reçine polimerleştirilerek katı hale getirilir.
- **Projeksiyon tabanlı SLA (DLP):** Dijital ışık projeksiyonu yöntemi kullanılarak her katmanın tamamı aynı anda ışıkla sertleştirilir. Bu yöntemde tek seferde daha büyük alanlar kürlenebildiğinden, üretim süresi kısalabilir.

Her iki yöntemde de baskı işlemi tamamlandığında, yapı platformu yukarı doğru hareket ederek reçine havuzundan çıkarken objenin son hali ortaya çıkar. Ancak bu yöntemle üretilen parçalarda, özellikle ters açılar, sarkma ve çıkıntılı bölgelerde istenmeyen yüzey bozulmaları veya destek yapılarına bağlı deformasyonlar meydana gelebilir.

Şekil 1.3'te çalışma prensibi verilmiş olan SLA teknolojisinin en belirgin avantajlarından biri yüksek çözünürlüklü baskılar üretebilmesidir. Mikron mertebesinde detaylara ulaşılabilen bu teknik sayesinde özellikle medikal ve dental modellemelerde yüksek yüzey kalitesi elde edilebilmektedir. Ancak, baskı mukavemeti açısından değerlendirildiğinde, SLA ile üretilen yapıların dayanımı, özellikle termoplastik esaslı yöntemlere (FDM – Fused Deposition Modeling) göre görece düşük kalmaktadır (Smith & Johnson 2022).



Şekil 1.3. SLA çalışma prensibi (Smith ve Johnson 2022).

1.1.1.2. Dijital ışık işleme (DLP) teknolojisi

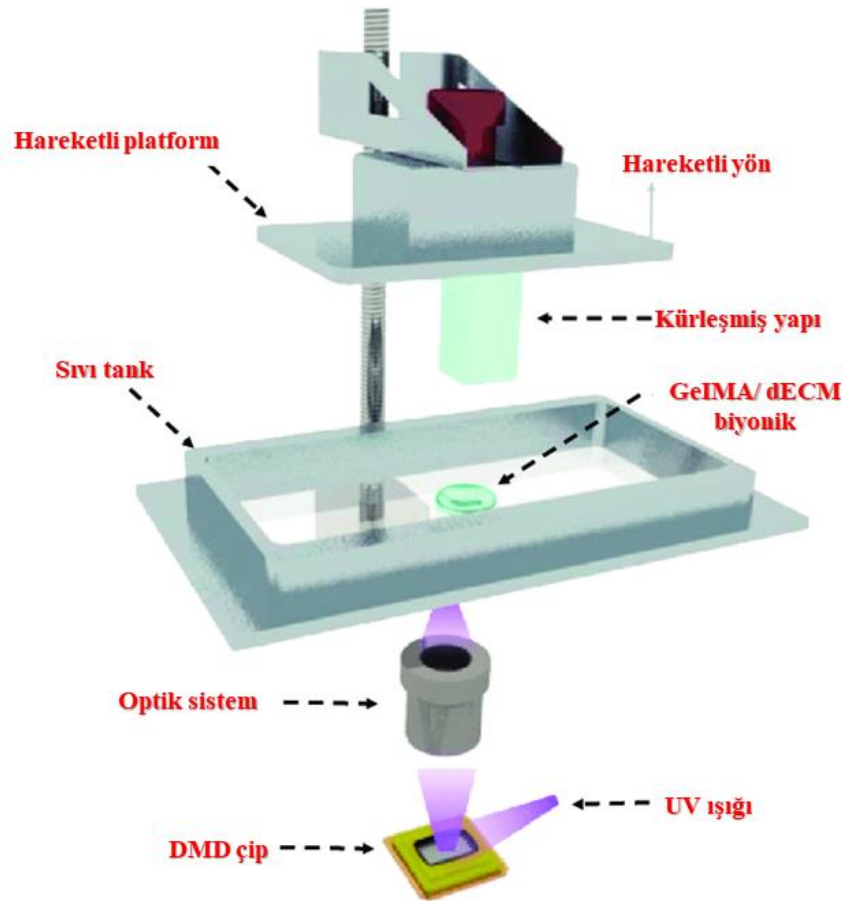
Dijital Işık İşleme (DLP - Digital Light Processing) teknolojisi, fotopolimer esaslı üç boyutlu yazıcı sistemleri arasında yer almakta olup, çalışma prensibi bakımından Stereolitografi (SLA) yöntemi ile önemli benzerlikler göstermektedir. Her iki teknoloji de ışığa duyarlı sıvı reçinenin seçici sertleştirilmesine dayanırken, temel fark enerji kaynağında ve katman oluşturma mekanizmalarında ortaya çıkmaktadır.

DLP sistemlerinde, katılaştırma işlemi SLA'daki gibi bir lazer ışını ile değil, dijital projeksiyon yöntemiyle sağlanır. Bu yöntemde, mikro ayna dizileriyle (DMD - Digital Micromirror Device) yönlendirilen dijital ışık demeti, her katmanın tamamını aynı anda reçine yüzeyine yansıtır ve bu sayede kürleme işlemi eşzamanlı olarak gerçekleşir. DLP teknolojisinin bu özelliği, üretim süresini belirgin ölçüde azaltmakta ve özellikle yüksek hassasiyet gerektiren küçük ölçekli üretimlerde önemli bir avantaj sağlamaktadır.

DLP yönteminde kullanılan ışık kaynağı genellikle UV dalga boyuna sahip olup, fotopolimer reçinenin anlık olarak katılaşmasına neden olur. Bu hızlı kürleme özelliği sayesinde yüksek çözünürlükte ve pürüzsüz yüzey kalitesine sahip prototiplerin kısa sürede elde edilmesi mümkündür. Ancak, katmanın yüzey alanı arttıkça projeksiyonun kenar bölgelerinde çözünürlük kaybı veya kenar bozulmaları meydana gelebilir. Bu durum, özellikle büyük hacimli baskılarda yüzey doğruluğu açısından sınırlayıcı bir faktör olabilir. Ayrıca, reçinenin optik özellikleri, ışık şiddeti ve projeksiyon süresi gibi parametreler de baskı kalitesini doğrudan etkileyen kritik unsurlardır. Bu nedenle, optimum baskı sonuçları elde edebilmek için yazıcı ayarlarının parça boyutu, geometri

karmaşıklığı ve hedeflenen yüzey kalitesine göre dikkatle optimize edilmesi gerekmektedir.

DLP teknolojisi; dental modelleme, takı üretimi, mikroakışkan cihaz tasarımı gibi yüksek detay gerektiren mühendislik uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmektedir. Şekil 1.4'te tipik bir DLP yazıcısının ana bileşenleri sunulmaktadır. Bu teknolojiye, ışık kaynağı ve dijital mikromirror cihaz kullanılarak fotopolimer reçinenin katman katman sertleştirilmesi sağlanır. Yüksek çözünürlük ve hızlı üretim imkânı sunması sayesinde, özellikle karmaşık geometrilere sahip küçük ölçekli parçaların üretiminde önemli avantajlar sağlamaktadır (Williams & Zhang, 2021).



Şekil 1.4. DLP yazıcısının ana bileşenleri (Williams & Zhang 2021).

1.1.1.3. SLA ve DLP teknolojilerinin karşılaştırılması

Stereolitografi (SLA) ve Dijital Işık İşleme (DLP), fotopolimer esaslı 3B baskı teknolojilerinin en yaygın kullanılan iki formudur. Her iki yöntem de reçine bazlı sistemlerde yüksek çözünürlük ve yüzey kalitesi sağlamalarına karşın; üretim hızı,

mekanik özellikler, işlem hassasiyeti ve uygulama alanları açısından belirli farklılıklar göstermektedir. Tablo 1.1’de SLA ve DLP arasındaki farklılıklar çizelge halinde karşılaştırmalı bir şekilde gösterilmiştir. Bu farklar, mühendislik uygulamalarında doğru teknoloji seçimini doğrudan etkilemektedir. Özellikle, karmaşık geometrilere sahip prototiplerin üretilmesi, biyomedikal cihaz tasarımları veya fonksiyonel mühendislik parçalarının imalatı gibi alanlarda, teknolojinin sunduğu hız ve hassasiyet dengesi kritik bir rol oynamaktadır. Ayrıca, maliyet etkinliği, bakım gereksinimleri ve malzeme çeşitliliği gibi faktörler de hangi teknolojinin tercih edileceğini belirleyen önemli kriterler arasında yer almaktadır (Williams & Zhang 2021).

Tablo 1.1. SLA ve DLP Teknolojilerinin Karşılaştırması (Williams & Zhang 2021).

Özellik	SLA (Stereolitografi)	DLP (Dijital Işık İşleme)
Işık Kaynağı	UV lazer	Dijital projektör (DLP çipi)
Katman Sertleştirme	Noktasal (lazer tarama)	Tüm katman tek seferde
Üretim Hızı	Orta	Yüksek
Yüzey Kalitesi	Çok yüksek	Yüksek
Çözünürlük	Yüksek	Çok yüksek (özellikle küçük parçalarda)
Baskı Alanı	Geniş (projeksiyona bağlı değil)	Genellikle daha sınırlı
Mekanik Dayanım	Görece düşük	Görece düşük
Kullanım Alanları	Prototipleme, dental, takı, medikal	Dental, mikroparça, mücevher, kalıp
Destek Yapısı	Gerekli	Gerekli
Ekipman Maliyeti	Orta-Yüksek	Orta

Üretim Hızı: DLP'nin en büyük avantajı katmanları tek seferde projekte ederek zaman kazanmasıdır. SLA'da ise lazer taraması noktasal olduğu için üretim süresi daha uzundur (Williams & Zhang 2021).

Çözünürlük ve Detay İşleme: DLP, projektörün piksel boyutuna bağlı olarak daha küçük ve hassas parçaları yüksek çözünürlükle üretebilir. Bu, mikro-yapılar veya kompleks yüzey geometrilerinde büyük avantaj sağlar (Chia & Wu 2019).

Mekanik Performans: Her iki yöntemde de kullanılan reçine malzemeleri sınırlayıcı faktördür. Dolayısıyla özellikle yük taşıyan uygulamalarda bu teknolojiler sınırlı kalmaktadır (Ngo et al., 2018).

Yüzey Kalitesi: SLA daha pürüzsüz yüzeyler sunabilirken, DLP’de projeksiyonun kenar etkileri mikroskobik düzeyde dalgalanmalara neden olabilir (Chia & Wu 2019).

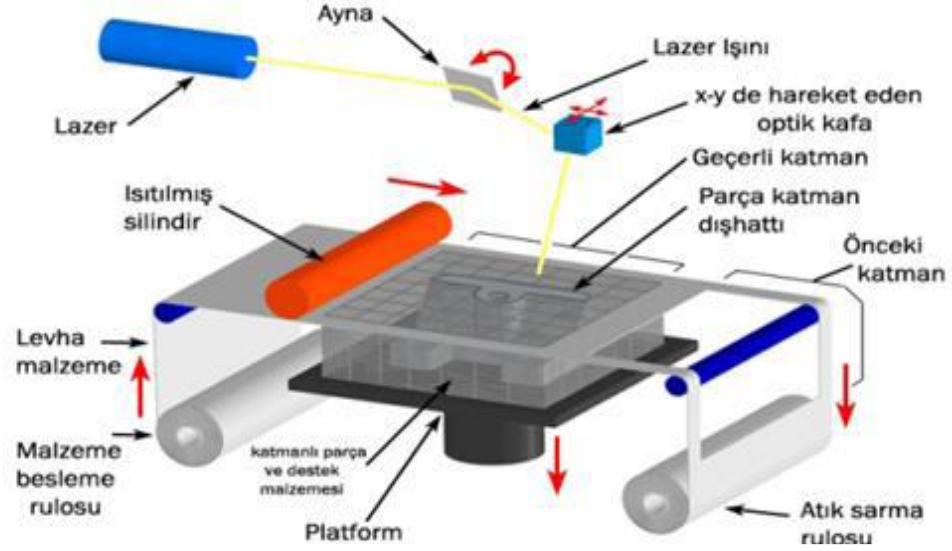
1.1.1.4. Tabaka yapıştırırmalı katmanlı imalat (LOM) teknolojisi

Tabaka Yapıştırırmalı Katmanlı İmalat (LOM - Laminated Object Manufacturing), özellikle prototipleme ve görsel modelleme uygulamalarında tercih edilen, çevre dostu ve hızlı üretim imkânı sunan bir katmanlı imalat teknolojisidir. Bu yöntemde temel olarak, yüzeyi yapıştırıcı ile kaplanmış levha formundaki malzemeler örneğin kâğıt, plastik köpük, seramik veya metal tozu emdirilmiş kompozit yapılar katman katman üst üste serilir ve her katman belirlenen kontur doğrultusunda lazer ya da kesici bıçak yardımıyla kesilir. Ardından ısı ve/veya basınç uygulanarak katmanlar birbiriyle birleştirilir ve üç boyutlu bir yapı elde edilir.

LOM yönteminde geri dönüştürülebilir malzemelerin kullanılabilmesi, teknolojinin çevresel sürdürülebilirliğini artıran önemli bir faktördür. Kullanılan hammaddelerin kolayca temin edilebilir ve düşük maliyetli olması, yöntemin ekonomik açıdan da avantajlı olmasını sağlamaktadır. Ayrıca bu teknoloji, destek yapılarının çoğu zaman gereksiz olması nedeniyle hem işlem süresini azaltmakta hem de son işlem gereksinimlerini minimize etmektedir.

Yöntemin bir diğer avantajı da; uygun tasarım kriterlerinin ve işlem parametrelerinin belirlenmesi halinde, farklı geometrik karmaşıklıklara sahip, yapısal ve yarı işlevsel parçaların geniş bir boyut aralığında üretilebilmesidir. Bu durum, özellikle hızlı prototipleme, mimari modelleme ve eğitim materyali üretimi gibi alanlarda LOM teknolojisinin uygulama potansiyelini artırmaktadır.

Şekil 1.5’te tipik bir LOM makinesinin temel bileşenleri şematik olarak sunulmakta ve üretim sürecinin genel yapısı görselleştirilmektedir.



Şekil 1.5. LOM makinesinin temel bileşenleri şematik (Kotaman, 2023)

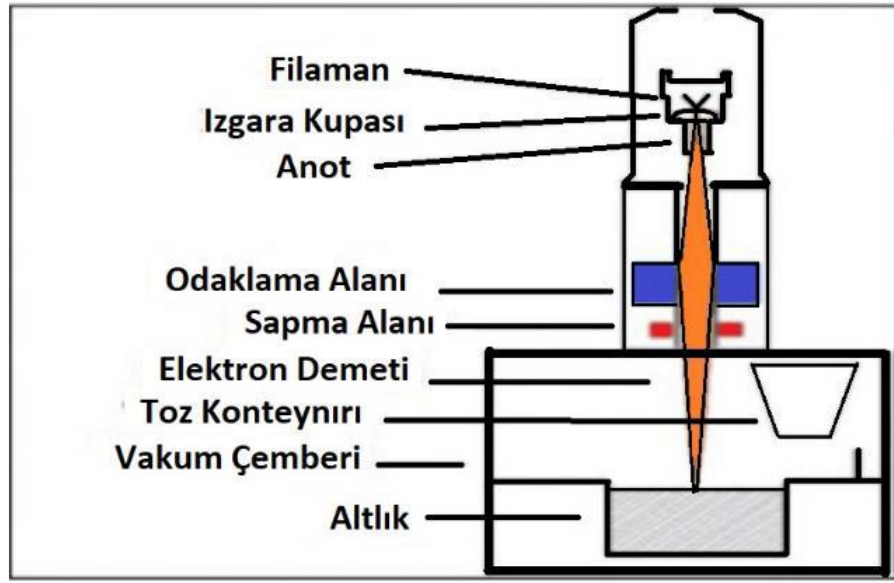
1.1.1.5. Elektron ışınli ergitme (EBM) yöntemi

Elektron Işınli Ergitme (EBM – Electron Beam Melting), seçici lazer ergitme DMLS (Direct Metal Laser Sintering) teknolojisi ile benzer prensiplere dayansa da, temel fark olarak enerji kaynağı olarak lazer ışınları yerine yüksek enerjili elektron ışınlarının kullanılmasıyla ayrılmaktadır. Bu yöntemde, metal tozları vakum ortamında yoğunlaştırılmış elektron demetleri aracılığıyla ergitilerek ardışık katmanlar halinde üç boyutlu yapıların oluşturulması sağlanmaktadır (Chua et al., 2014).

EBM sistemlerinde kullanılan temel bileşenler arasında elektron tabancası, ışın yönlendirici sistemler ve plazma elektronu üretim donanımları yer almaktadır. Yüksek enerjili elektronların malzeme yüzeyine odaklanması ile meydana gelen lokal ısı, toz partiküllerinin ergitilerek birbirine bağlanmasını ve böylece katı bir yapı oluşumunu mümkün kılar. Bu yöntemde genellikle titanyum ve titanyum alaşımları gibi biyouyumlu ve yüksek mukavemetli metal tozları tercih edilmektedir; özellikle havacılık, biyomedikal ve otomotiv endüstrilerinde yaygın kullanım alanına sahiptir. Üretim süreci, belirli bir geometrik kesitin tanımlanmasıyla başlar. İlk olarak, bir toz tabakası üretim tablası üzerine serilir ve elektron ışınıyla seçilen bölgeler ergitilerek bir katman oluşturulur. Katman tamamlandıktan sonra, üretim platformu aşağıya doğru bir miktar indirilir ve üzerine yeni bir toz tabakası yayılır. Bu döngü, istenilen üç boyutlu yapı tamamlanana kadar katman katman tekrarlanır (Negi et al., 2019).

EBM teknolojisinin en belirgin avantajlarından biri, yüksek ergime sıcaklığına sahip malzemelerin kontrollü bir şekilde işlenebilmesidir. Ancak bu yüksek sıcaklık, aynı zamanda yöntemle ilgili en yaygın zorluklardan birini de oluşturmaktadır. Özellikle, ısıl gerilmeler ve artık gerilmeler nedeniyle geometrik doğrulukta sapmalar ya da çatlak oluşumları gözlemlenmektedir.

Şekil 1.6'da EBM sürecinin genel yapısını ve sistem bileşenlerini gösteren bir şematik diyagram sunulmuştur.



Şekil 1.6. EBM sürecinin genel yapısını ve sistem bileşenleri (Akgümüş vd., 2023).

1.1.1.6. Eriyik yığma modelleme (FDM) yöntemi

Katmanlı imalat teknolojileri içerisinde en yaygın kullanım alanına sahip yöntemlerden biri olan Eriyik Yığma Modelleme (FDM – Fused Deposition Modeling), termoplastik polimerlerin kontrollü bir şekilde ısıtılıp katman katman biriktirilmesi esasına dayanmaktadır. Bu yöntem, maliyet etkinliği, sistem basitliği ve çeşitli mühendislik plastikleriyle uyumluluğu nedeniyle özellikle prototipleme ve düşük hacimli üretim uygulamalarında sıklıkla tercih edilmektedir. (Gibson et al., 2015)

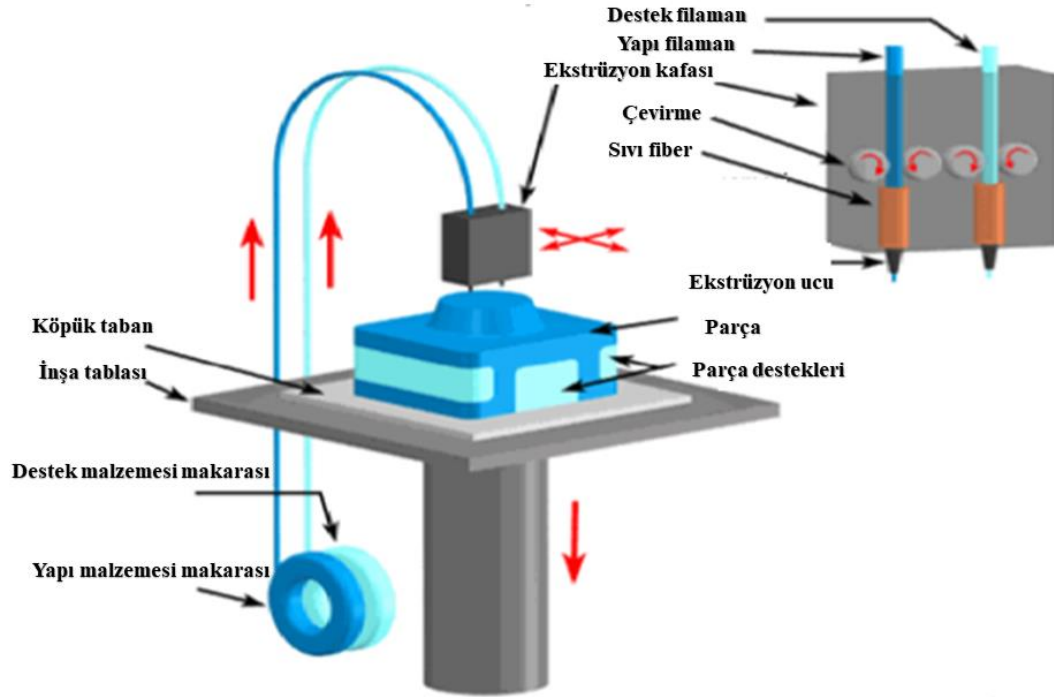
FDM sürecinde, yapı malzemesi genellikle filament formundadır ve bu filament, kontrollü bir şekilde beslenerek ısıtıcı bir ekstrüzyon memesinden geçirilir. Isıtılan malzeme, yumuşama sıcaklığına ulaşarak yarı akışkan hale gelir ve belirlenen yörünge boyunca alt tabaka üzerine biriktirilir. Her katman, önceki katman üzerine tutarlı

biçimde yerleştirilerek üç boyutlu yapının oluşumu sağlanır. Termoplastik malzemenin soğuması ile birlikte katılaşma gerçekleşir ve yapı rijit hale gelir. (Chua et al., 2014).

FDM teknolojisinde kullanılan başlıca polimerler arasında ABS (Akrilonitril Butadien Stiren), PLA (Polilaktik Asit), PETG, Nylon ve mühendislik sınıfı kompozit dolgulu filamentler yer almaktadır. Üretim süreci, kullanılan malzemeye bağlı olarak belirli sıcaklık aralıklarında gerçekleştirilir ve genellikle açık atmosferde çalışır. Bu yönüyle diğer 3B yazıcı teknolojilerine göre daha az karmaşık altyapı gerektirir (Gibson et al., 2015).

FDM yönteminin önemli avantajları arasında düşük işletme maliyetleri, geniş malzeme yelpazesi, basit donanım yapısı ve hızlı prototipleme imkânı yer almaktadır. Bununla birlikte, dezavantajları arasında yüzey pürüzlülüğü, katmanlar arası zayıf mekanik bağ oluşumu ve termal büzölmeye bağlı boyutsal deformasyonlar öne çıkmaktadır (Gibson et al., 2015). Ayrıca, bu yöntemde elde edilen parçaların mekanik özellikleri, kullanılan malzemenin türü, baskı parametreleri ve soğuma sürecinin kontrolüne doğrudan bağlıdır. Özellikle yüksek hassasiyet gerektiren mühendislik uygulamalarında, katmanlı üretimden kaynaklanan anizotropik mekanik davranış, tasarım ve üretim sürecinde dikkate alınması gereken kritik bir sınırlılık oluşturmaktadır (Gibson et al., 2015).

Şekil 1.7’de, tipik bir FDM yazıcısının temel bileşenleri şematik olarak gösterilmiştir (Chua et al., 2014).



Üç boyutlu yazıcıların tarihçesi, son yıllarda hız kazanan gelişmelere rağmen, aslında ilk çalışmaların uzun zaman önce başladığı bilinmektedir. Zaman içinde, üç boyutlu yazıcı teknolojisinde çeşitli yönlü gelişmeler kaydedilmiştir. Bu cihazlar, katmanlı imalatı mümkün kılarak 3D baskı yaparlar. Geleneksel yöntemlerin aksine, 3 boyutlu yazıcılar, maliyet ve üretim hızı açısından avantajlıdır. Günümüzde, tekstil, sağlık, gıda, eğitim, inşaat ve uzay teknolojisi gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadırlar.

Üç boyutlu yazıcı teknolojilerinin gelişim süreci, 1980 yılında Japon araştırmacı Dr. Hideo Kodama'nın hızlı prototipleme amacıyla geliştirdiği ilk patent başvurusu ile başlamıştır. Bu gelişmenin ardından, 1984 yılında Fransız mühendisler stereolitografi (SLA) teknolojisi üzerine çalışmalar yürütmüş ancak projeyi tamamlamadan sonlandırmışlardır. 1986 yılında Charles Hull, stereolitografi tekniğini başarılı bir şekilde hayata geçirerek bu alandaki önemli bir dönüm noktasını oluşturmuştur. İki yıl sonra, 1988'de ilk ticari SLA-1 cihazı üretilmiş, aynı yıl içerisinde DTM Inc. tarafından Selective Laser Sintering (SLS) teknolojisinin ilk prototipi geliştirilmiş ve ilerleyen süreçte bu teknoloji 3D Systems tarafından satın alınmıştır.

1990 yılında EOS firması, doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS) sisteminin ilk versiyonunu tanıtmış, 1992’de ise Stratasys, ergiyerek biriktirme modelleme (FDM)

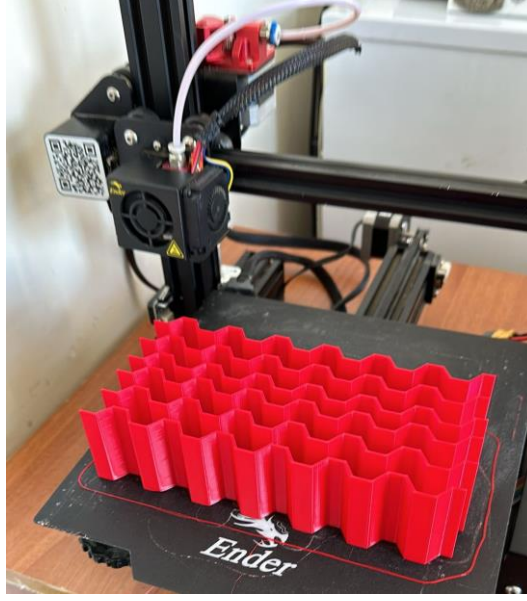
yönteminin patentini almıştır. 1993'te Solidscape firması kurulmuş, 1995 yılında ise Z Corporation, Massachusetts Institute of Technology (MIT) ile toz bağlama (binder jetting) teknolojisi için özel lisans anlaşması yapmıştır. 1999 yılında, biyoyazıcı teknolojilerinin gelişimiyle birlikte tıpta tasarlanmış organ üretimi mümkün hale gelmiş, 2000 yılında ise 3 boyutlu yazıcı kullanılarak işlevsel bir böbrek prototipi üretilmiştir. Aynı yıl MCP Technology firması, seçici lazer eritme (SLM) teknolojisini tanıtmıştır.

2005 yılında Z Corporation, yüksek çözünürlüklü renkli baskı yapabilen Spectrum Z510 modelini piyasaya sürmüş; 2006'da açık kaynaklı RepRap projesi başlatılmıştır. 2008 yılında, 3B baskı teknolojisiyle üretilmiş ilk protez bacak geliştirilmiş; 2009'da FDM patentlerinin kamuya açılmasıyla birlikte teknoloji daha geniş kitlelere ulaşmıştır. Aynı yıl Sculpteo şirketi kurulmuş, 2010'da ise 3B baskı ile üretilmiş ilk otomobil prototipi olan Urbee tanıtılmıştır.

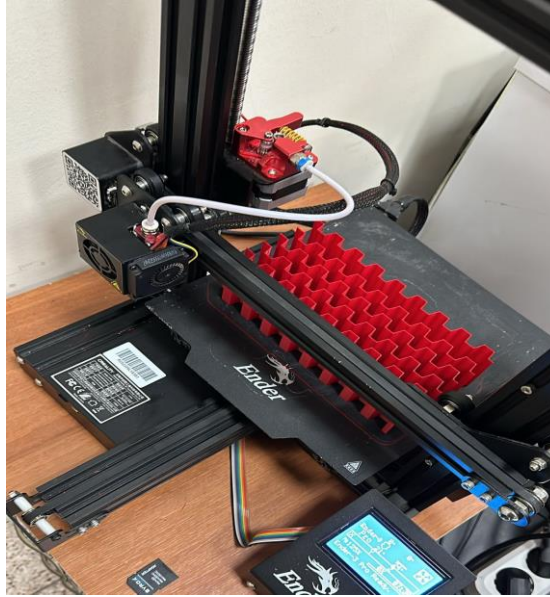
2011 yılında Cornell Üniversitesi, 3B gıda yazıcıları üzerine çalışmalar başlatmış, 2012'de ilk çene protezi 3 boyutlu yazıcı ile basılarak hastaya başarıyla implante edilmiştir. 2015 yılında Carbon3D firması, CLIP (Continuous Liquid Interface Production) teknolojisi ile ultra hızlı baskı yapabilen yenilikçi bir sistem geliştirmiştir. 2016'da Daniel Kelly'nin laboratuvarı, kemik dokusunun 3B baskı ile üretilmesi üzerine önemli bulgular elde etmiştir. 2018 yılında ise dünyada ilk kez bir aile, tamamen 3B baskı ile inşa edilmiş bir eve taşınmıştır.

2020'li yıllara gelindiğinde ise katmanlı imalat teknolojilerinde yüksek mukavemetli metaller, dayanıklı polimerler ve esnek plastikler gibi gelişmiş malzemelerin kullanımında önemli ilerlemeler kaydedilmiş; böylece hem endüstriyel hem de biyomedikal uygulamalarda 3 boyutlu yazıcıların kullanım alanı büyük ölçüde genişlemiştir (3dbaskıal, 2023).

3 boyutlu yazıcılar ile ilgili genel bir değerlendirmeden sonra tez çalışması kapsamında tasarlanan örnek numuneler, Şekil 1.8 ve Şekil 1.9'da gösterilen Creality Ender (Shenzhen Creality 3D Technology Co., Ltd., Shenzhen, China) model FDM tipi 3D yazıcı kullanılarak üretilmiştir. Yüksek hassasiyetli baskı yeteneğine sahip olan Ender 6, kapalı kasa yapısıyla daha kararlı bir baskı ortamı sağlayarak özellikle teknik filamentlerle çalışmalarda tercih edilmektedir. Üretilen numuneler, deneysel çalışmalar veya karakterizasyon testleri için uygun boyut ve geometrilerde tasarlanarak CAD ortamında modellenmiş ve Creality Slicer Yazıcı (Shenzhen Creality 3D Technology Co., Ltd., Shenzhen, China) ile dilimleme işlemi sonrası yazıcıya aktarılmıştır.

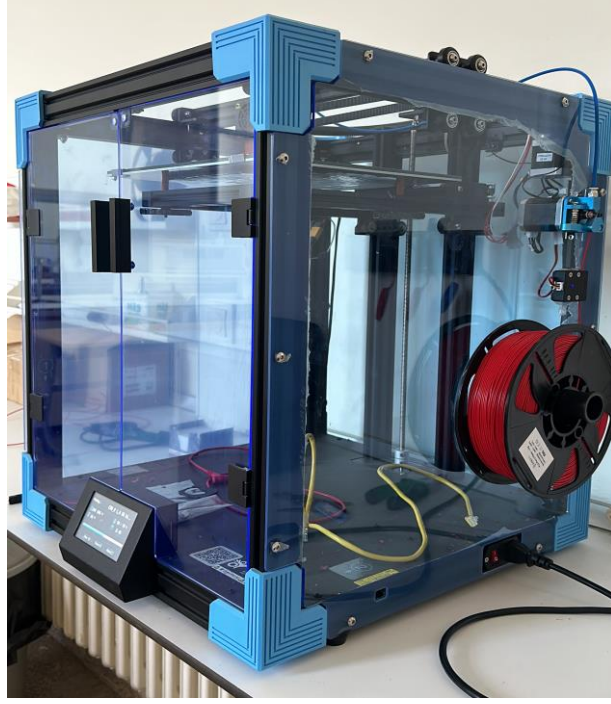


Şekil 1.8. Creality Ender 3D yazıcı ile imal edilmiş örnek numuneler



Şekil 1.9. Creality Ender 3D yazıcı ile imal edilmiş örnek numuneler

Şekil 1.10'da ise Creality Ender'in kapalı kasası, baskı sırasında sıcaklık stabilitesini artırarak özellikle ABS/PLA gibi sıcaklığa duyarlı filamentlerle daha başarılı sonuçlar elde edilmesini sağlar. 4.3 inç ekranı ile kullanıcı dostu bir arayüz sunan cihaz, filament sensörü ve elektrik kesintisi sonrası devam etme özelliği gibi modern 3D yazıcı fonksiyonlarını da destekler.



Şekil 1.10. Creality Ender 3D yazıcı

1.2. Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler, birbirinden farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip en az iki veya daha fazla fazın makro ya da mikro ölçeğe bir araya getirilmesiyle oluşan, her bir bileşenin kendi özgün özelliklerini koruduğu ve birbirleri içerisinde çözünmeyen çok fazlı sistemlerdir (Ngo et al., 2018). Bu malzemeler, oluşan sinerjik etki sayesinde tekil bileşenlere kıyasla daha üstün mekanik, termal, kimyasal ve fiziksel özellikler sergileyebilmektedir (Chia & Wu, 2019). Teknolojide en sık kullanılan kompozitlerden biri, çelik çubuklarla desteklenmiş olan çimento ve kumdan oluşan bir matris malzemesi olarak kullanılan betondur. Bir başka çok eski bilinen kompozit türü ise kerpiçtir. Çamur ve samanın karıştırılmasıyla oluşturulan bu malzeme belki de insanlık tarihinin en eski yapı malzemesidir ve halen Türkiye'nin kırsal kesimlerinde kullanılmaktadır (Kaya, 2016).

Gelişmiş mühendislik uygulamalarında duyulan yüksek performanslı malzeme ihtiyacı, kompozit malzemeleri pek çok sektörde ön plana çıkarmıştır. Günümüzde kompozit malzemeler; robotik sistemler, otomotiv, denizcilik, havacılık ve uzay, raylı ulaşım sistemleri ve biyomedikal cihazlar gibi mühendislik disiplinlerinin çeşitli alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Williams & Zhang, 2021).

1.2.1. Kompozit malzemelerin avantajları

Kompozit malzemeler, sahip oldukları özgün mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikler sayesinde modern mühendislik uygulamalarında konvansiyonel malzemelere kıyasla önemli avantajlar sunmakta olup, bu avantajlar aşağıda özetlenmiştir.

Yüksek özgül mukavemet ve rijitlik: Kompozit malzemeler, özellikle çekme ve eğilme dayanımı açısından konvansiyonel metalik malzemelere kıyasla üstün performans sunar. Elyafların istenilen doğrultuda yerleştirilebilmesi, yapının istenen yöndeki dayanımını maksimize ederken, malzeme tasarrufu ve maliyet etkinliği sağlar (Smith & Johnson, 2022).

Düşük yoğunluk: Kompozit malzemeler, birim hacim başına daha düşük ağırlıkları sayesinde özellikle taşımacılık ve havacılık gibi ağırlığın kritik öneme sahip olduğu alanlarda önemli avantajlar sunmaktadır (Ngo et al., 2018).

Ayarlanabilir elektriksel özellikler: Kompozit malzemeler, üretim sırasında tercih edilen bileşenlerin doğasına bağlı olarak iletken ya da yalıtkan özellik gösterebilecek şekilde tasarlanabilmektedir (Chia & Wu, 2019).

Yüksek korozyon ve kimyasal direnç: Özellikle uygun matris ve takviye bileşenlerinin seçimi ile korozyon ortamlarında uzun ömürlü yapılar elde edilebilir. Örneğin, bu tez kapsamında geliştirilen E-cam elyaf takviyeli hibrit kompozit yapılar, denizaltı uygulamaları gibi agresif ortam koşullarında kullanılabilecek düzeyde korozyon direncine sahiptir (Williams & Zhang, 2021).

Isıl dayanım: Epoksi reçine gibi ısıl dayanımı yüksek matris malzemeleriyle birlikte karbon fiber gibi takviye elemanlarının kullanımı, kompozit malzemelerin yüksek sıcaklıklarda yapısal bütünlüğünü koruyabilmesini sağlar (Ngo et al., 2018).

Titreşim sönümlene kabiliyeti: Kompozit malzemeler, doğal sünek yapıları sayesinde mekanik titreşimleri sönümlene özelliğine sahiptir. Bu özellik, oluşabilecek çatlakların ilerlemesini sınırlandırarak yapısal hasar riskini azaltır (Chia & Wu, 2019).

1.2.2. Kompozit malzemelerin dezavantajları

Kompozit sistemlerin tasarımı ve imalatı sırasında dikkate alınması gereken en kritik faktörlerden biri, bileşenlerden herhangi birinin zayıf özellik göstermesi

durumunda bu zayıflığın tüm kompozit yapının genel performansını olumsuz etkilemesidir (Ngo et al., 2018).

Üretim sırasında yapının içerisinde kalabilecek hava boşlukları, yorulma dayanımını ve genel mekanik performansı düşürmektedir (Smith & Johnson, 2022). Kompozit malzemelerin mekanik özellikleri, yükleme yönüne bağlı olarak değişkenlik gösterdiğinden, anizotropik davranış sergilemektedirler (Williams & Zhang, 2021). Üretim süreçleri uzun ve karmaşık olabileceğinden maliyetler artabilmektedir (Ngo et al., 2018). Geleneksel metalik malzemelere kıyasla geri dönüşüm süreçleri daha zordur (Chia & Wu, 2019). İmalat öncesinde detaylı mühendislik analizleri ve hassas tasarım parametreleri gerektirir; aksi takdirde hammadde israfına ve verimsiz üretime neden olabilir (Smith & Johnson, 2022). Genel olarak daha gevrek bir yapı sergileyen kompozit malzemeler, plastik deformasyon yerine ani kırılma eğilimi gösterir. Bu durum, yapı hasarına müdahale imkanını sınırlayarak güvenlik açısından risk oluşturabilir (Ngo et al., 2018).

1.2.3. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması

Kompozit malzemeler, farklı fazlardan oluşan yapıları, bileşenlerinin çeşitliliği ve üretim yöntemlerindeki esneklik nedeniyle kesin ve katı sınıflara ayrılmaları güç malzemeler olarak değerlendirilmektedir. Bununla birlikte, uygulamalarda kullanım kolaylığı sağlamak, mühendislik tasarımı ve yapısal analiz süreçlerini standartlaştırmak amacıyla bu malzemeler belirli kategoriler altında sınıflandırılarak incelenmektedir (Ngo et al., 2018).

1.2.3.1. Takviye elemanının yapısına göre kompozitler

Kompozit malzemeler, farklı özelliklere sahip matris ve takviye bileşenlerinin bir araya getirilmesiyle elde edilen çok fazlı yapılar olup, nihai performansları büyük ölçüde takviye elemanının geometrisi, boyutu ve yerleşim düzenine bağlıdır. Bu bağlamda, takviye elemanının biçimi ve dizilim özelliklerine göre kompozitler farklı alt sınıflara ayrılabilmekte olup, başlıca sınıflandırma türleri aşağıda sunulmuştur (Ngo et al., 2018).

1.2.3.2. Elyaf takviyeli kompozitler

Elyaf takviyeli yapılar, yüksek çekme ve eğilme dayanımı sağlamaları nedeniyle mühendislik uygulamalarında en yaygın kullanılan kompozit türüdür (Ngo et al., 2018).

Bu malzemelerin performansı; elyaf çapı, uzunluğu, oryantasyon açısı ve katman sayısı gibi parametrelere bağlıdır. Homojen bir elyaf dağılımı sağlandığında, yapı izotropik davranışa yaklaşabilir. Ancak elyaf oryantasyonuna dik yönde yapılan yüklemeler, yapının mukavemetini azaltmaktadır (Aydın, 2018).

1.2.3.3. Parçacık takviyeli kompozitler

Bu tür kompozitlerde, bir matris fazı içerisinde mikro veya nano boyutta dağıtılmış sert parçacıklar bulunur. Parçacıkların sertlik ve boyutsal dağılımı, kompozitin genel dayanım özelliklerini belirler. Özellikle metal matrisli yapılar içerisine entegre edilen seramik parçacıklar, yüksek sıcaklık ve aşınma direncine sahip yapılar elde edilmesini sağlar (Ngo et al., 2018).

1.2.4. Hibrit kompozitler

İki veya daha fazla farklı elyaf türünün bir matris malzemesi içerisinde birlikte kullanılmasıyla oluşturulan bu yapılar, farklı mekanik özellikleri bir araya getirerek karmaşık yükleme koşullarına dayanıklı sistemlerin tasarlanmasına olanak tanır. Yüksek modüllü elyaflar sertlik ve yük taşıma kapasitesini artırırken, düşük modüllü elyaflar darbe direnci ve enerji sönmülme gibi özelliklere katkı sağlar. Düşük hızlı darbe yüklemelerinde oluşan matris çatlakları delaminasyon gibi içsel hasar türlerinin ortaya çıkmasına sebep olabilir. (Ngo et al., 2018; Chia & Wu, 2019)

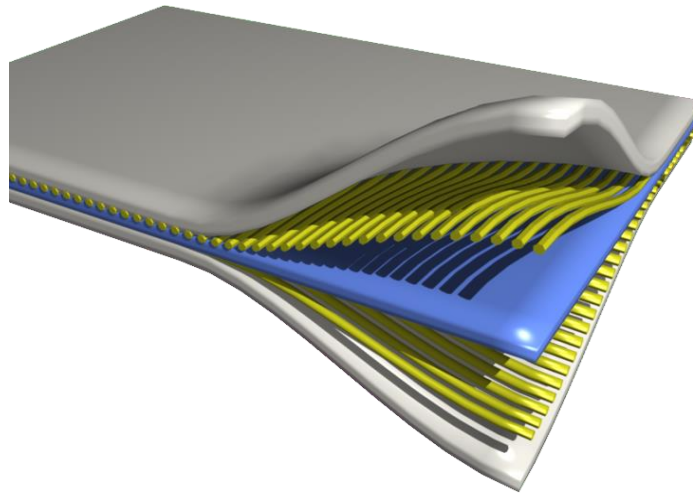
1.2.5. Sandviç yapılı kompozitler

Sandviç yapılar, rijit ve ince dış yüzey tabakaları ile bunların arasında yer alan düşük yoğunluklu ve kalın bir çekirdek katmanından oluşur. Bu yapı kombinasyonu, yüksek eğilme direnci ve düşük ağırlık sağlar (Ngo et al., 2018). Yüzey katmanları fiber takviyeli veya metalik olabilirken, çekirdek malzeme genellikle köpük veya petek

yapılardan seçilmektedir. Geometrik parametrelerin çeşitliliği, mühendislik tasarımlarına yüksek esneklik sağlar. Bu nedenle sandviç yapılar, özellikle havacılık ve otomotiv sektörlerinde yaygın kullanım alanı bulur (Chia & Wu, 2019).

Teknolojinin gelişmesi ve karbon fiber takviyeli plastiklerin havacılık ve uzay endüstrisinde kullanımının yaygınlaşmasıyla birlikte bu malzemelerin üretilebilirliği konusu gündeme gelmiştir. Karbon fiber ilk kez üretildiğinde, karbonun oldukça yüksek elektrik iletkeni olduğu bilinmekteydi. Karbon elyaf çok yüksek ısıl işleme tabi tutulduğunda elyaflar tam anlamıyla karbonlaşır ve bu elyaflara grafit elyaf adı verilir (Smith & Johnson, 2022). Karbon fiber, epoksi matrislerle birleştirildiğinde olağanüstü mukavemet ve sertlik özellikleri sergiler (Ngo et al., 2018). Karbon elyaf üreticilerinin sürekli olarak gelişmesi, karbon elyaf çeşitliliğini de artırmaktadır. Günümüzde piyasada iki tür karbon elyaf bulunmaktadır: sürekli elyaflar ve dokuma elyaflar. Bu elyaflar, çeşitli reçine sistemleriyle birleştirilebilmektedir (Chia & Wu, 2019).

Dayanıklılık, esneklik, hafiflik, çevre koşullarına dayanıklılık (nem, güneş ışığı vb.), darbe dayanımı, sertlik, daha bilimsel bir ifadeyle, ısıl genleşme katsayıları, yorulma, dayanıklılık gibi günlük yaşamda kullanılan terimlerle ifade edilen özelliklerin yanı sıra, çatlama ve malzemeye bağlı olarak yırtılma, esneme ve bükülme. Uygunluk mukavemeti ve benzeri değerlere sahiptir. Bu arzu edilen özelliklerin tamamının tek bir malzemede bulunması son derece nadirdir. 1950'li yıllardan bu yana polimer kompozitler bu boşluğu doldurmuştur (Bulut ve Erdoğan 2011).

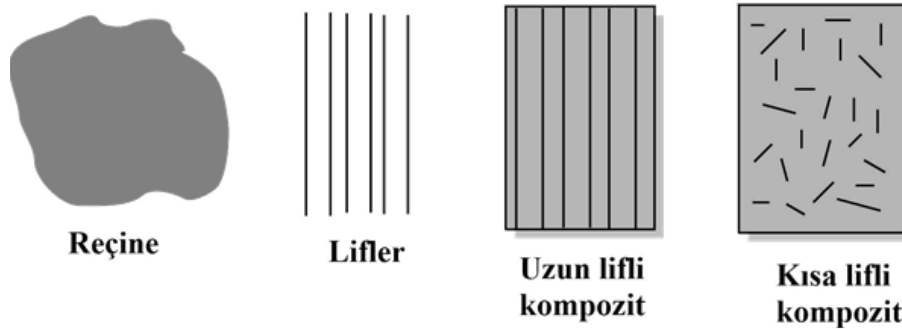


Şekil 1.11. Kompozit plakanın basit şeması (Commons, 2025)

Günümüzde uçak, roket, roket gövdeleri, üst düzey spor malzemeleri gibi yüksek maliyetlerin önemli olmadığı alanların yanı sıra lastik, otomotiv, beyaz eşya, basınca dayanıklı olması ve çok düşük maliyet gerektiren sektörlerin yaygın olarak kullandığı malzemelerdir. Bu amaçla dünyada ve ülkemizde daha güçlü ve dayanıklı elyafların yanı sıra ısı direnci daha yüksek, çatlama yapmayan, darbe dayanımı yüksek ve sertliğe sahip polimer matrisler üzerine araştırmalar devam etmektedir (Kaya, 2016).

Şekil 1.11’de basit şeması verilen polimer matrisli kompozitte polimer malzeme reçinelerden, takviye elemanları ise fiberlerden oluşur. Özelliklerine göre özelliklerini geliştirmek için matrise kimyasallar ve diğer katkı maddeleri eklenir. Polimer esaslı kompozit malzemeler klasik laminasyon yöntemi (CLT) ile üretilir. Bu nedenle polimer matrisli kompozit malzemelerin görünümü katman görünümündedir (Vasiliev & Morozov 2001).

Karbonelyaf takviyeli polimer esaslı kompozit plakaların üretim aşamasını gösteren basit şema Şekil 1.12’de gösterilmiştir.



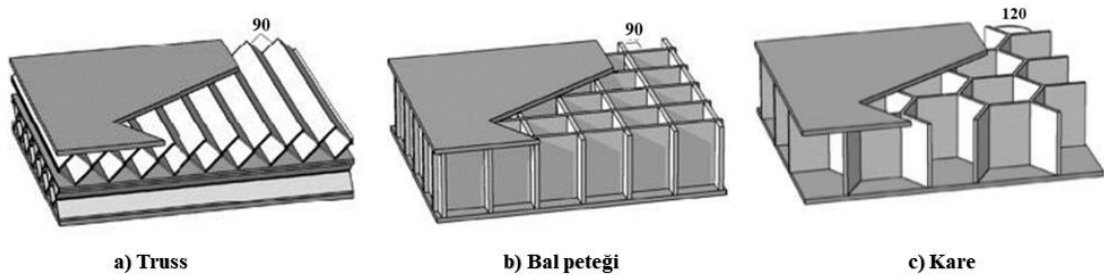
Şekil 1.12. Polimer matrisli kompozit malzemenin şematik gösterimi (Dursun ve Ozbay 2008).

Periyodik hücresel malzemeler, diğer bir ifadeyle kafes yapılı malzemeler, gözeneklerin belirli bir düzen içerisinde tekrarlı olarak yerleştirilmesiyle elde edilen yapılardır (Fleck et al., 2010). Şekil 1.13’te periyodik hücre dizilimine sahip tipik bir hücresel yapı örneği sunulmaktadır. Bu tür yapılar, geometrik kurgularına bağlı olarak iki boyutlu (örneğin bal peteği ve kafes kirişli sistemler) ya da üç boyutlu (örneğin Kelvin hücresi, gyroid) biçimlerde tasarlanabilmektedir. İki boyutlu kafes sistemleri düzlemsel bir düzen sergileyerek yük taşıma ve enerji soğurma gibi davranışlarda anizotropik özellikler gösterebilirken, üç boyutlu kafes yapıları uzaysal bir geometriye

sahip olmaları sayesinde daha izotropik bir mekanik performans sağlayabilmektedir (Al-Ketan et al., 2018).

Periyodik hücresel yapılarda, rastgele gözenek dağılımına sahip geleneksel köpük malzemelere kıyasla, hücrelerin düzenli bir şekilde organize edilmesi daha homojen mekanik ve fiziksel özellikler elde edilmesini sağlamaktadır. Bu homojenlik, malzemenin elastik modülü, akma dayanımı veya enerji soğurma kapasitesi gibi kritik mühendislik parametrelerinin öngörülebilir bir şekilde kontrol edilmesine imkân tanır. Ayrıca hücre topolojisinin tasarım aşamasında belirlenebilmesi, malzemelerin uygulamaya özel olarak uyarlanması mümkün kılmakta; örneğin, darbe dayanımı, hafiflik veya termal iletkenlik gibi farklı performans kriterlerine göre optimize edilmiş kafes yapılar tasarlanabilmektedir (Fleck et al., 2010).

Buna ek olarak, periyodik hücresel yapılar, yalnızca mekanik özellikleri açısından değil aynı zamanda üretim teknolojileri bakımından da önemli avantajlar sunmaktadır. Özellikle eklemeli imalat yöntemleri, karmaşık kafes geometrilerinin yüksek hassasiyetle üretilmesine imkân tanımış ve bu malzemelerin havacılık, biyomedikal implantlar, otomotiv ve enerji emici sistemler gibi pek çok alanda uygulanabilirliğini artırmıştır. Dolayısıyla, periyodik kafes yapılar, mühendislik uygulamalarında özgün tasarım imkânı ve yüksek performans potansiyeli sunan yeni nesil malzemeler olarak öne çıkmaktadır (Wadley, 2006).



Şekil 1.13. Periyodik hücre dizilimine sahip hücresel yapılar (Wadley, 2006).

1.3. Trapezoid Sandviç Kompozitler

Tabakalı kompozitlerden bir alt sınıf olan sandviç yapılı kompozitler, geçmişten günümüze, hücre tipi çekirdek yapısıyla dikkat çeken trapezoid geometrik şekilleriyle bilim insanlarının ilgisini çekmiştir. Trapezoid sandviç kompozitlerin yapısında, ince ve yüksek mukavemetli alt ve üst yüzey kaplamalarının yanı sıra hafif ve düşük

mukavemetli hücre çekirdekleri ile yapıştırıcı malzemeler bulunmaktadır. Trapezoid çekirdek yapıları sandviç kompozit malzemeler, iç dolgu malzemesi olarak birçok alanda kullanılmaktadırlar (Dayyani et al., 2014; Armentani et al., 2006).

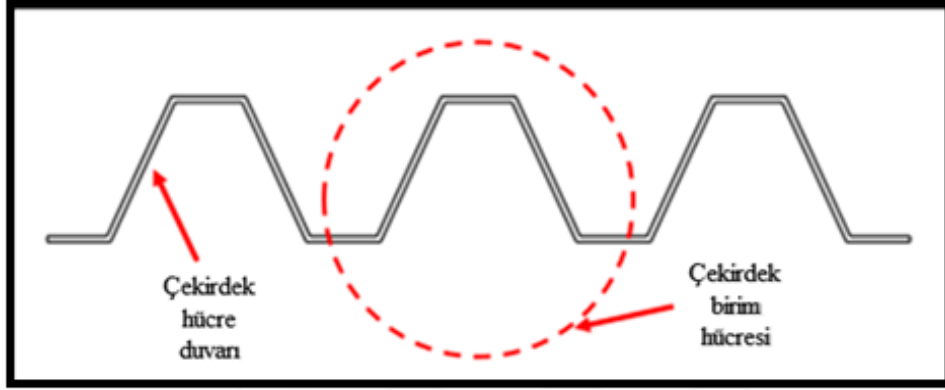
1.3.1. Oluklu çekirdek yapıları

Oluklu çekirdekli sandviç paneller; Düşük maliyetleri, üretim kolaylıkları, düşük yoğunlukları ve geliştirilmiş mekanik özelliklerinden dolayı çok geniş bir uygulama alanına sahiptirler. Metal oluklu çekirdekler, çeşitli mühendislik uygulamalarında etkili darbe direncine ve yüksek enerji emme kapasitesine sahiptir. Oluklu sandviç paneller, çok işlevli özelliklerinden dolayı havacılık uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır (Dayyani et al., 2014; Armentani et al., 2006).

Oluklu sandviç yapılar düşük ağırlıklarının yanı sıra üstün yalıtım, ısı transferi ve yük taşıma kapasitesi sağlar. Oluklu çekirdekler, metal köpük çekirdekler ve petek çekirdekler, nispeten gelişmiş mukavemet ve mekanik özellikler sergiler. Oluklu çekirdekler kağıt kompozitler ve metaller gibi çeşitli malzemelerden yapılabilir. Sandviç panel yapımında sıklıkla tercih edilen oluklu çekirdekler, etkili darbe enerjisi emilimi sağlar ve aynı zamanda hafiftir (Banhart, 2000).

Oluklu çekirdeğin önemli özelliklerinden biri, sandviç panelin uygun kayma mukavemetini ve uygun sertliği artırarak ve yüzey plakalarının ayrılmasını koruyarak düzlemsel şekil değiştirmeleri dengeye koymasındır (Fleck & Deshpande 2004).

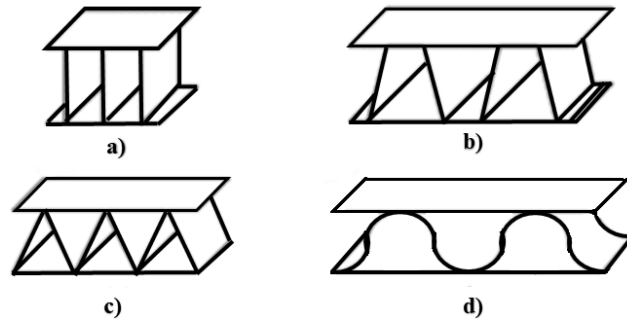
Oluklu çekirdek yapısı sürekli tekrarlanan periyodik birim hücrelerden oluşur ve periyodik birim hücreler bir ağ yapısı gibi bir bütün olarak hareket eder. Böylece birim hücrenin mekanik özellikleri sandviç panelin tamamının mekanik özelliklerini temsil eder (Lin et al., 2010). Şekil 1.14'te Trapezoid çekirdek yapısının ve çekirdek birim hücresi gösterilmektedir.



Şekil 1.14. Trapezoid çekirdek yapısının ve çekirdek birim hücresinin gösterimi (Zurnacı, 2019).

Oluklu çekirdek yapılar çeşitli mühendislik uygulamalarına yönelik olarak kare, üçgen, yuvarlak ve trapez gibi çeşitli geometriler kullanılarak üretilmektedir. Literatürde sık kullanılan temel geometriler Şekil 1.15'te gösterilmektedir.

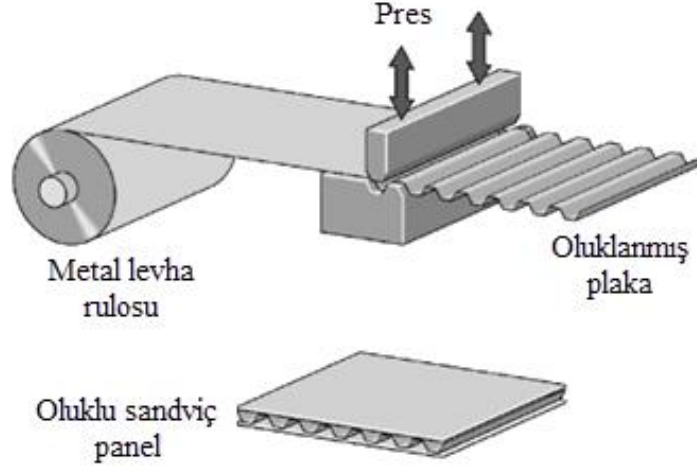
Trapez çekirdek geometrisi, sandviç panel çekirdek tasarımında yaygın olarak kullanımda olan ve sandviç panellerin mekanik performansı üzerinde olumlu etkileri olan çekirdek geometrisidir. Trapez geometriye sahip çekirdek hücre duvarları, darbe yükünü dikey ekseninde korur ve ayrıca sandviç panelin kontrollü deformasyonuna katkıda bulunur (Zhang et al., 2015).



Şekil 1.15. Farklı geometrilerde çekirdek yapıları a) kare tipi, b) trapezoid tipi, c) üçgen tipi, d) yuvarlak tipi (Wadley, 2006).

Trapezoid çekirdek yapılar seri üretime uygunluğu nedeniyle özellikle metal çekirdek malzemelerle birlikte kullanılmaktadır. Metalik malzemeden oluklar geometriye uygun bir şekilde genellikle tabaka oluşturma teknikleriyle üretilir. Çekirdek birim hücre geometrisine göre üretilen şekillendirme kalıbı, sacı pres yardımıyla bükür ve bu işlemi sürekli tekrarlayarak oluklu çekirdek yapısını oluşturur. Oluklu sandviç panel plakaların üretimi Şekil 1.16'da gösterilmektedir. Elde edilen

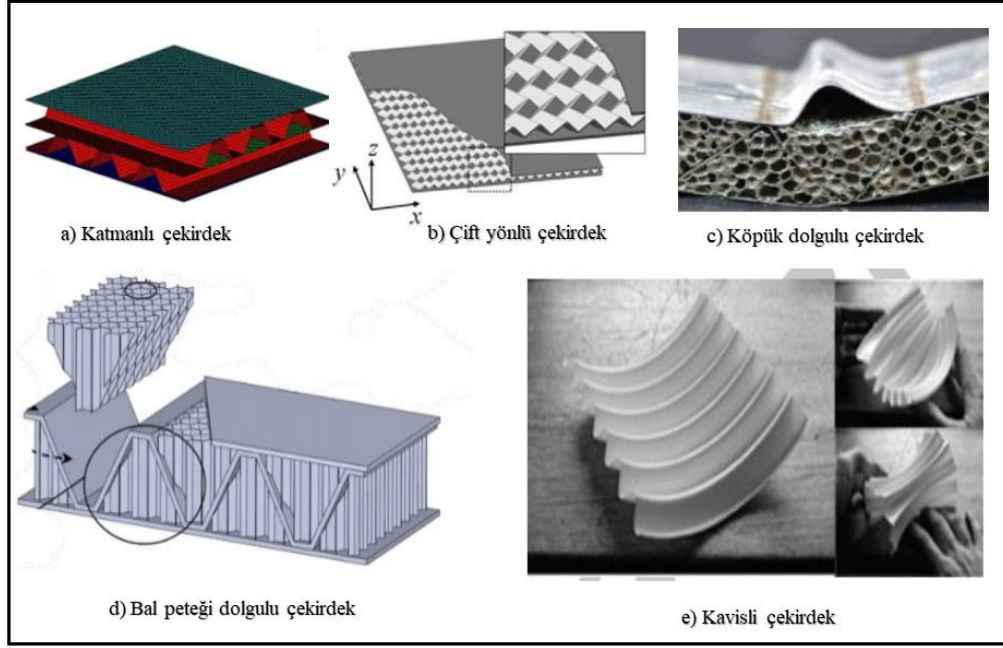
oluklu çekirdeklerin uygun montaj yöntemleri kullanılarak yüzey plakaları ile birleştirilmesiyle sandviç paneller elde edilmektedir.



Şekil 1.16. Oluklu sandviç panel plakaların üretimi (Wadley, 2006).

Oluklu çekirdek yapısı, sandviç panelin gelişmiş mekanik özelliklerini ve sertliğini sağlar. Özellikle metalik oluklu çekirdek yapısıyla beraber ezilme direncinin yüksek olması gibi özelliklerinden dolayı şok ve patlama yüklerinin sönümlenmesini gerektiren uygulamalarda sıklıkla tercih edilmektedir. Oluklu çekirdek, sandviç panelin tek bir ünite gibi davranmasına izin vererek yüksek kesme mukavemeti sağlamasına rağmen, aynı zamanda sandviç paneli dikey kuvvetlerden koruyarak stabilize eder (Bardella & Genna 2001).

Sonuç olarak, oluklu çekirdekli sandviç paneller sağladıkları yüksek eğilme sertliği/ağırlık oranı nedeniyle yüksek düzeyde sertlik gerektiren mühendislik uygulamaları için iyi bir alternatiftir.



Şekil 1.17. Oluklu çekirdek geometrisine sahip farklı sandviç panel örnekleri.

Şekil 1.17’de oluklu çekirdek geometrisine sahip farklı sandviç panel örnekleri gösterilmiştir (Hou et al., 2015; Seong et al., 2010; Kooistra et al., 2007; Yan et al., 2014; Han et al., 2016; Norman et al., 2009).

Farklı ihtiyaçları karşılayacak sandviç paneller tasarlamak ve üretmek için araştırmacılar, yüzey katmanları ve oluklu çekirdeğin uygun şekil, boyut ve malzeme kombinasyonundan yapılmış sandviç paneller geliştirdiler. Geometrik tasarımları ve malzeme kombinasyonlarını kullanarak farklı mukavemet ve sertlik değerlerine sahip sandviç paneller üretmeyi hedeflediler. Katmanlı çekirdek yapılar, aynı ya da farklı çekirdek geometrilerine sahip çekirdeklerin aynı veya farklı yönlerde üst üste yerleştirilip yüzey plakalarına bağlanmasıyla üretilir. İstiflenmiş çekirdek katmanları arasında yer alan ara katman plakaları, darbe kuvvetlerinin katmanlar arasında aktarılmasını sağlar (Odacı vd., 2012).

Lamine sandviç yapılar uygulamaya bağlı olarak farklı sayılarda ve farklı yönlerde katmanlardan oluşabilmektedir. Lamine çekirdek yapıları, özellikle oluklu çekirdeklerde çok sık kullanılır. Amacı, farklı yönlerde konumlandırılmış oluklu iç tabakalara sahip bir sandviç panelin izotropik davranışını sağlamaktır (Hou et al., 2015).

Lamine sandviç paneller, sandviç panellerin yüksek hızlı darbe yüklemesi altında maruz kaldığı darbeye karşı da etkilidir.

Çok yönlü çekirdek tasarımları, oluklu sandviç panellerin oluk yönüne dik yönde bükülme sertliğini arttırıp, kayma sertliği değerlerini geliştirmek ve oluklu geometriye sahip sandviç panellerin izotropik davranış kazanmasını sağlamak için kullanılır (Seong et al., 2010).

Çok yönlü çekirdekler, özel olarak yapılmış metal çekirdeklerin çekirdeğin yüzey plakası üzerine farklı yönlerde yerleştirilmesi veya farklı oluk açılarına sahip çekirdeklerin üretilmesiyle elde edilir (Dayyani & Ziaei-Rad 2011).

Bayraklılar (2024)'a göre eklemeli imalat (AM) yönteminde boyutsal doğruluğu arttırmak için optimal parametreler belirlenmiştir. Çalışmada, akrilonitril bütadien stiren (ABS) ve polilaktik asit gibi yaygın olarak kullanılan malzemelerle yapılan üretimlerde boyutsal doğruluk önemli bir faktördür. Optimal parametreler, ürünün gereksinimlerine bağlı olarak farklılık gösterebilir ancak genel olarak, kübik dolgu deseni, iki kabuk, %50 dolgu oranı ve 0,2 mm duvar kalınlığı en uygun olarak kabul edilmiştir. Araştırmada yapay sinir ağları (YSA) kullanılarak yapılan tahminlerin doğruluk oranı %90'ın üzerindedir. (Bayraklılar, 2024)

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Sandviç paneller, geliştirilmiş mekanik özellikleri, yüksek enerji tüketimi ve düşük ağırlıkları nedeniyle savunma, havacılık, ulaştırma ve uzay teknolojisi gibi çeşitli sektörlerdeki mekanik araçların üretiminde yapısal bileşen olmuştur.

Bir yüzey plakası ve bir çekirdekten oluşan sandviç panellerin mekanik özellikleri, çekirdeğin tasarımına bağlıdır. Sandviç panel çekirdekleri; Oluklu, sünger, petek ve file olmak üzere çeşitli yapılarda üretilmektedir (Griškevičius et al., 2010).

Sandviç yapılar hafif gövde yapısının yanı sıra darbe dayanımı, eğilme direnci ve geliştirilmiş mekanik özellikleri nedeniyle denizcilik, havacılık, karayolları ve uzay gibi farklı mühendislik alanlarında yapı elemanı olarak kullanılmaktadır (Fard et al., 2014).

Darbe enerjisini absorbe etme yeteneğinin yüksek olması nedeniyle uydu, uçak, savunma araçları, gemi, fayton ve otomobil gibi araçların tasarımında; Darbe direncini artırmak için çok emici bileşenler olarak tercih edilirler (Leijten et al., 2009).

Darbe emici olarak kullanılan sandviç yapılar, darbe yüklemesinden kaynaklanan deformasyona karşı direnç göstererek bina gövdesini korur ve yüksek enerjili darbe yüklemesi altında gövde yapısında oluşan kinetik enerjiyi plastik deformasyon yoluyla diğer enerji biçimlerine dönüştürerek absorbe eder (Zhu et al., 2010).

Sandviç paneller, sert ve ince yüzeyli plakalar arasına kalın, düşük yoğunluklu çekirdek yerleştirilerek üretilir (Shahdin et al., (2009).

Sandviç panellerin yüzey plakası ve trapezoid çekirdek türü malzemeleri, panellerden beklenen ihtiyaçlara ve uygulama alanına bağlı olarak metal, kompozit, polimer, balsa ve Nomex gibi çeşitli malzemelerden seçilmektedir (Steeves & Fleck 2004).

Eklemeli imalatın en önemli avantajlarından biri de yerinde çözümler sayesinde lojistik problemlerinin ortadan kaldırılmasıdır. Form ve boyutsal doğruluk; Eklemeli imalat yönteminde ve tüm üretim teknolojilerinde istenilen kalite standartlarının sağlanması kritik bir özelliktir (Popescu et al., (2022).

Eklemeli üretim (Additive Manufacturing - AM), başlangıçta prototipleme ve ürün kişiselleştirme amacıyla geliştirilmiş bir üretim teknolojisi olmasına rağmen, günümüzde uygun maliyetli kitlesel özelleştirme (Mass Customization - MC) süreçlerinde de etkin bir şekilde kullanılmaktadır. AM'nin kalıpsız ve esnek üretim kabiliyeti, bireysel müşteri taleplerine uygun özgün son ürünlerin üretiminde önemli avantajlar sunmaktadır. Bununla birlikte, AM teknolojisinin mevcut geleneksel MC sistemlerinin yerini tamamen alması yerine, bu sistemlerle entegre şekilde çalışarak üretim verimliliğini artırma potansiyeli ön plana çıkmaktadır (Bayraklılar, 2024).

Bu bağlamda, müşteri taleplerinin mekânsal olarak farklılaştığı ve zamanla değişim gösterdiği durumları dikkate alan bir matematiksel model geliştirilmiştir. Söz konusu modelde, AM ve MC teknolojileri arasında geçiş senaryoları değerlendirilmiş, fiyatlandırma stratejileri, ürün çeşitliliği düzeyi ve teknoloji geçiş zamanlaması gibi karar değişkenlerine odaklanan bir optimizasyon problemi ele alınmıştır. Çalışma sonuçları, esnek ve zamana bağlı azalan üretim stratejilerinin kârlılığı maksimize ettiğini ve AM ile MC sistemlerinin birlikte kullanılmasının stratejik açıdan daha verimli olduğunu ortaya koymaktadır (Lacroix et al., 2021).

Sandviç panel üretiminde; Şekillendirilebilirlik kolaylığı, yüksek mekanik performans ve düşük maliyet nedeniyle metalik malzemeler kullanılırken, düşük ısı transferi ve korozyon direnci gibi beklentileri karşılamak için de kompozit malzemeler kullanılabilmektedir. Oluklu, köpük, petek ve ağ gibi farklı yapılarla üretilmekte ve çekirdek yapısına göre farklı çekirdek geometrileri kullanılmaktadır. Sandviç panellerin bütünlüğü, çekirdek ve yüzey plakalarının yapıştırma veya kaynak gibi çeşitli yöntemler kullanılarak birleştirilmesiyle sağlanır (Fard et al., 2014).

2.1. Üç Nokta Eğme Deneyi ile İlgili Kaynak Araştırması

Son zamanlarda, 3 boyutlu yazıcılar kullanılarak sürekli fiber kompozitler üretme çabaları artmaktadır. Ancak, filament füzyonu ile yapılan 3D baskılı kompozitlerin döşeme yönünde takviye fiberleri bulunmamaktadır, bu da düşük sertlik ve mukavemetle sonuçlanır. Bu çalışma, bu sorunu çözmek için basit bir yöntem önermektedir. Delikli bir kompozit parça ve ayrıca karbon fiber takviyesine sahip bir çubuğun ayrı olarak 3D baskısı yapılarak başlanır. Sonrasında, çubuk elektrik akımı verilerek kendiliğinden ısınması sağlanır ve eriyen karbon lifleri parça ile kaynaşır. Bu

yöntem, dölşeme yönünde çekme ve eğilme testlerinde mekanik özelliklerin iyileştirildiğini göstermektedir (Todoroki et al., 2021).

Fused Deposition Modeling (FDM) yöntemiyle üretilen çok malzemeli sandviç yapıların mekanik performansına yönelik gerçekleştirilen çalışmalar, bu yapıların tek malzemeli polimer yapılara kıyasla üstün mukavemet özellikleri sergilediğini ortaya koymuştur. Doğru malzeme kombinasyonlarının seçimi ve uygun üretim parametrelerinin belirlenmesiyle birlikte, sandviç yapıların çekme, eğilme ve darbe dayanımı gibi mekanik özelliklerinde belirgin artışlar sağlanabilmektedir. Özellikle, termoplastik poliüretan (TPU) gibi esnek malzemelerin darbe enerjisini sönümleme kapasitesi sayesinde çatlak oluşumu geciktirilmekte, böylece yapısal bütünlük korunabilmektedir. Bununla birlikte, dolgu deseni, doluluk oranı ve katman yerleşim açılarının mühendislik optimizasyonuna tabi tutulması, yük taşıma kapasitesini ve genel mekanik dayanımı artıran kritik parametreler olarak ön plana çıkmaktadır (Bayraklılar vd., 2024).

Bu çalışmada, üç boyutlu ergiyik biriktirmeli modelleme (EBM) yöntemi kullanılarak üretilen Polilaktik Asit (PLA) filament numunelerinin farklı dolgu oranları ve dolgu desenlerine bağlı olarak sergilediği çekme, basma ve eğme deformasyon davranışları incelenmiştir. Araştırma kapsamında, %25, %50, %75 ve %100 dolgu oranlarında, üçgen ve üçlü-altıgen desenler kullanılarak standart test prosedürlerine uygun numuneler elde edilmiştir. Mekanik özellikler, çekme, basma ve üç nokta eğme testleri aracılığıyla değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda, dolgu oranındaki artışın tüm test türlerinde mekanik özellikleri iyileştirdiği belirlenmiştir. (Kaya vd., 2024).

Eklemeli imalat (Additive Manufacturing – AM) yöntemi ile üretilen parçaların mekanik özelliklerinin doğru bir şekilde belirlenmesi hem tasarımcılar hem de son kullanıcılar açısından büyük önem taşımaktadır. Literatürde, bu konuda farklı üretim parametrelerinin mekanik performansa etkilerini inceleyen çalışmalar bulunmaktadır (Kamer vd., 2021).

Eklemeli imalat sürecinde üretim parametrelerinden nozul sıcaklığı, tabla sıcaklığı ve dolgu deseni değişkenlerinin, üretilen parçaların eğilme dayanımı üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Deneylerde, yaygın olarak kullanılan iki farklı termoplastik malzeme olan Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS) ve Polilaktik Asit (PLA) kullanılmıştır (Kamer vd., 2021).

Farklı parametre kombinasyonlarına sahip numuneler, masaüstü tip üç boyutlu yazıcılar aracılığıyla üretilmiş ve üç noktalı eğme testi yöntemiyle mekanik olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen deney verileri, her bir parametrenin etkisini ortaya koymak amacıyla kuvvet-sehim ($F-\delta$) eğrileri şeklinde analiz edilmiştir (Kamer vd., 2021).

Deneyisel bulgular, PLA malzemesinin eğilme dayanımının ABS malzemeye kıyasla daha yüksek olduğunu göstermiştir. Ayrıca PLA numunelerinde nozul sıcaklığının düşürülmesi, eğilme dayanımında belirgin bir azalmaya yol açmıştır. Dolgu deseninin değiştirilmesi ise her iki malzeme türünde de eğilme dayanımında kayda değer değişimlere neden olmuştur. Bu sonuçlar, eklemeli imalat sürecinde parametre optimizasyonunun, özellikle mekanik performans açısından kritik bir rol oynadığını ortaya koymaktadır (Kamer vd., 2021).

Karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) ve cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) malzemeler kullanılarak üretilen oluklu sandviç kompozit yapıların (Sandwich Corrugated Structures - SCS) bükülme davranışları ve hasar mekanizmaları detaylı olarak incelenmiştir. Bu amaçla, üç noktalı bükülme testine dayalı deneysel bir çalışma yürütülmüş ve farklı çekirdek geometrilerine (yuvarlak, kare, trapez, sinüzoidal ve üçgen) sahip SCS'ler, hibrit yapıdaki SCS'ler ve tamamı 3D baskı yöntemiyle üretilmiş SCS prototipleri değerlendirilmiştir (Shah et al., 2023).

Kompozit prepreg malzemelerin endüstriyel ve yapısal uygulamalarda geniş bir kullanım alanı bulabilmesi için, bu malzemelerin mekanik özelliklerinin ayrıntılı olarak belirlenmesi gerekmektedir. Literatürde, doğal ve sentetik elyafların birlikte veya ayrı olarak kullanıldığı prepreg kompozitlerin darbe dayanımı ve eğilme davranışlarının incelendiği çalışmalar yer almaktadır (Şen ve Özben, 2025).

Bu kapsamda yapılan bir çalışmada, jüt, karbon ve cam elyaf takviyeli prepreg malzemeler altı katmanlı olarak; simetrik, asimetrik ve rastgele dizilim konfigürasyonlarında hazırlanmıştır. Elyaf yönlenmeleri 300, 450 ve 600 açılarında olacak şekilde kesilmiş ve el yatırma yöntemi ile kompozit plakalar üretilmiştir. Üretim sürecinde, hidrolik ısıtma presi kullanılarak 40 bar basınç altında kürleme işlemi gerçekleştirilmiştir.

Mekanik değerlendirme için, ASTM standartlarına uygun boyutlarda hazırlanan numuneler üzerinde Charpy darbe testi ve üç noktalı eğme testi uygulanmış, her test beş tekrar ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler, performans değişimlerini ortaya

koymak amacıyla grafiklerle desteklenmiştir. Ayrıca, hasar modlarının belirlenmesi için kırılmış numunelerin yüzey morfolojileri Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Çalışma sonuçları, farklı elyaf türleri ve tabaka dizilimlerinin hem darbe dayanımı hem de eğilme direnci üzerinde belirgin etkiler yarattığını göstermektedir (Şen ve Özben, 2025).

Deney sonuçları, kare çekirdek geometrisine sahip SCS'lerin, dikey duvar yapıları ve geniş bağlanma yüzeyleri sayesinde daha yüksek yapısal dayanım sergilediğini ortaya koymuştur. CFRP çekirdekli hibrit SCS'lerde, katmanlar arası bağ zayıflığı nedeniyle ani yük düşüşleri gözlenirken; GFRP çekirdekli hibrit SCS'ler, güçlü ara yüzey bağlantıları sayesinde plastik deformasyon kapasitesi göstermiş ve daha fazla enerji absorpsiyonu sağlamıştır. Tamamen 3D baskı ile üretilen SCS'lerde ise, GFRP numuneler yüksek bükülme gerilmesine karşı düşük direnç göstererek erken kırılma sergilemiş; buna karşın CFRP numuneler plastik deformasyon bölgesine geçiş yaparak hasarsız bir şekilde yük taşımaya devam etmiştir (Shah et al., 2023).

Genel olarak, fiber takviyeli polimer (FRP) yüzey kaplamaları ile 3D baskılı çekirdeklerin kombinasyonundan oluşan hibrit oluklu SCS'lerin, yüksek bükülme dayanımı ve iyileştirilmiş güç/ağırlık oranı sunduğu belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, 3D baskı teknolojilerinin gelişmiş SCS tasarımlarında uygulanabilirliğini artırmakta ve özellikle hafif, dayanıklı yapılar gerektiren mühendislik uygulamaları için önemli tasarım verileri sunmaktadır (Shah et al., 2023).

Bal peteği yapılar, mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmakta olup, mekanik özelliklerinin incelenmesi önemli bir araştırma konusudur. Bu çalışmada, ABS ve PLA malzemeleri kullanılarak üretilen bal peteği çekirdekli sandviç yapıların eğme dayanımları deneysel olarak analiz edilmiştir. Hücre çapı değişiminin eğme mukavemeti üzerindeki etkileri üç farklı çap için değerlendirilmiş, her deney üç kez tekrarlanarak toplamda on sekiz üç nokta eğme testi uygulanmıştır. Sonuçlar, PLA numunelerin ABS'ye kıyasla daha yüksek mukavemet sergilediğini ve 9 mm hücre çapına sahip yapıların en yüksek dayanıma ulaştığını göstermiştir. (Kaveloğlu vd., 2022)

Bu çalışmada, hızlı prototipleme teknolojisinde yaygın olarak kullanılan eriyik biriktirme yöntemi ile üretilen numunelerin üretim parametrelerindeki değişikliklerin malzemenin mekanik davranışları üzerindeki etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda, ABS ve PLA termoplastik malzemeler kullanılarak üretilen numunelere,

malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde yaygın olarak tercih edilen çekme, basma ve üç nokta eğme testleri uygulanmıştır. Çalışmada, dolgu geometrisi ve dolgu oranları sabit tutulurken, dolgu deseninin doku açıları 0°, 15°, 30° ve 45° olacak şekilde değiştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, PLA malzemenin ABS malzemeye kıyasla daha yüksek mekanik dayanım sergilediği belirlenmiştir. (Çelikeloglu, 2023)

Sürekli elyaf takviyeli termoplastik kompozitler ve 3B kompozit baskı teknolojisinin avantajlarından yararlanarak gerçekleştirilen bir çalışma, otomotiv parçalarının yeniden tasarlanması alanında önemli potansiyelleri vurgular. UMİMAG Laboratuvarı'nda incelenen bir projenin sonucunda ekstrüderli bir 3B yazıcı kullanılmıştır. Bu çalışma, cam fiber takviyeli kompozit numunelerin mukavemetinde önemli bir artış göstererek, sürekli elyaf takviyeli termoplastik kompozitlerin otomotiv endüstrisindeki kullanım potansiyelini ortaya koyar ve 3B kompozit yazıcı teknolojisinin geliştirilmesi için daha fazla araştırma yapılmasını teşvik eder (Eminoğlu, 2023).

Uyduların yapısal tasarımında kullanılan petek panellerin multidisipliner tasarım ve analizini (MDA) gerçekleştirmektir. Kenetlenmemiş sınır koşullarına dayanan tüm analizlerde, detaylı sonlu elemanlar modelleri geliştirilmiş ve analiz edilmiştir. Yapılan deneysel testler, sonlu elemanlar analizi ve eşdeğer yaklaşımlar arasında uyum göstermiş; elde edilen sonuçlar, modal frekanslardaki farkların %4'ün altında olduğunu göstermiştir. Araştırma, boyut parametrelerinin, petek çekirdeğinin ve kabuk malzemesinin değişiminin petek plakanın modal frekansı üzerindeki etkilerini incelemekte ve geometrik varyasyonun yapısal analize olan etkisini değerlendirmektedir. Bu sonuçlar, geometri parametrelerinin ve malzeme tipinin petek plakanın modal frekans değeri üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır (Boudjemai et al., 2012).

Alüminyum petek yapılar, havacılık ve birçok endüstriyel uygulamada sıkça kullanılan yüksek mukavemet ve sertlik/ağırlık oranlarına sahip malzemelerdir. Bu yapıların işlenme kalitesi, plastik deformasyon ve çapaklarla ilişkili olduğundan özel işleme operasyonları gerektirir. Bu amaçla, Abaqus/Explicit yazılımı kullanılarak alüminyum peteklerin frezelenmesini simüle eden bir 3 boyutlu sonlu elemanlar modeli geliştirilmiş ve çeşitli deneysel testlerle doğrulanmıştır. Kesme işlemi sırasında kesme kuvvetleri ile kesici takım arasındaki sürtünme katsayısının ilişkisi incelenerek, çalışmanın temel amacı olan fiziksel ve geometrik parametrelerin kesme kuvvetleri,

yüzey kalitesi, talaş boyutu ve kesici takım önündeki malzeme birikimi üzerindeki etkileri vurgulanmıştır. Simüle edilen sonuçlar, deneysel verilerle iyi bir uyum içinde olduğunu göstermektedir (Zarrouk et al., 2022).

Metalik sandviç panellerin mekanik performansı ve deformasyon davranışı, oluklu çekirdek yapılarının etkisi deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. İki farklı çekirdek konfigürasyonu kullanılarak gerçekleştirilen deneysel testlerde, oluklu dilimlenmiş çekirdek yapılarının sandviç panellerin ağırlığını artırırken darbe enerjisi emme kapasitesini önemli ölçüde artırdığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, bu konfigürasyonun bükülme mukavemetini ve spesifik enerji emme kapasitesini artırdığı belirlenmiştir. Düşük hızda darbe testleri sonucunda, oluklu dilimlenmiş çekirdek yapılarının kontrollü deformasyona katkı sağladığı ve panel deformasyonunu geciktirdiği, sayısal analizlerle de doğrulanmıştır. Bu bulgular, oluklu dilimlenmiş çekirdek yapılarının sandviç panellerin mekanik performansını artırmak için etkili bir seçenek olduğunu göstermektedir (Zurnaci, 2019).

Yük taşımacılığında sıkça kullanılan alüminyum damla desenli saç ve hazır cam takviyeli polyester (CTP) levhalar kullanılarak üretilen bal peteği sandviç levhaların eğilme dayanımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Araştırma kapsamında, sabit tutulan 2,5 mm kalınlığında alüminyum damla desenli saç üzerine, çeşitli CTP levha kalınlıkları ve bal peteği çekirdek kalınlıkları kullanılarak bal petekleri üretilmiştir. Üç nokta eğme testleri yapılarak CTP levha kalınlığı ve bal peteği kalınlığı değişimlerinin eğilme dayanımına olan etkisi değerlendirilmiştir (Subaşı vd.,2017).

Bi-Grid, Tri-Grid, Quadri-Grid ve Kagome-Grid gibi farklı yapıdaki petekler, 3D baskı teknolojisi kullanılarak tasarlanmış ve üretilmiştir. Bu peteklerin çekirdekleri ve kompozit yüzey tabakaları birleştirilerek sandviç kompozitler oluşturulmuştur. Sonlu elemanlar analizi ve üç nokta eğilme testi gibi yöntemler kullanılarak sandviç yapıların mekanik performansı karakterize edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, Quadri-Grid sandviç yapının en yüksek, Tri-Grid yapının ise en düşük eğilme dayanımına sahip olduğunu göstermektedir (Lu et al., 2018).

ABS ve PLA filamanı kullanılarak 3D yazıcıda tekli veya ikili ekstruder kullanılarak yapılan sandviç numunelerinin eğilme mukavemeti incelenmiştir. İkili ekstruderle üretilen numunelerde, çekirdek ile kaplama arasında istenilen bağlantı sağlanamamıştır, çünkü birinci ve ikinci ekstruderler arasındaki baskı geçişi sırasında birincisi soğumuştur. Tek bir ekstruder tarafından üretilen PLA çekirdeği ile PLA

kabuğu arasındaki daha iyi bağlanma, diğerlerinden daha yüksek üretkenlik elde edilmesini sağlamıştır (Brischetto et al., 2018).

Üç farklı çekirdek konfigürasyonu incelenmiştir: petek, ters petek ve alüminyum kaplamalı Kagome çekirdekler. Bu çekirdekler, bir 3D yazıcıda FDM yöntemi kullanılarak PLA filamentosundan üretilmiştir. Balpeteği, ters balpeteği ve kagome geometrilerinde üretilen çekirdekler alüminyum kaplama ile yapıştırılarak eğilme dayanımları hem deneysel hem de sayısal olarak araştırılmıştır. Sonuçlar, en yüksek dayanımın ters balpeteği geometrisinde, en düşük dayanımın ise Kagome geometrisinde olduğunu göstermektedir (Jiga et al., 2021)

3D yazıcıda truss, geleneksel balpeteği ve tekrar giren balpeteği geometrilerinde üretilen çekirdekler ile karbon fiber destekli polimer (CFRP) kompozit yüzeyler arasında yapıştırma yapılmıştır. Üç nokta eğme testleri uygulanarak bu sandviç kompozit yapıların mekanik performansı değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, truss geometrilili kompozit yapıların en yüksek dayanıma sahip olduğunu göstermektedir (Li & Wang 2017).

2.2. Basma Deneyi ile İlgili Kaynak Araştırması

Oluklu çekirdekli sandviç paneller; Düşük maliyetleri, üretim kolaylıkları, düşük yoğunlukları ve geliştirilmiş mekanik özelliklerinden dolayı çok geniş bir uygulama alanına sahiptirler. Metal oluklu çekirdekler, çeşitli mühendislik uygulamalarında etkili darbe direncine ve yüksek enerji emme kapasitesine sahiptir. Oluklu sandviç paneller, çok işlevli özelliklerinden dolayı havacılık uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır (Dayyani et al., 2014; Armentani et al., 2006).

Oluklu sandviç yapılar düşük ağırlıklarının yanı sıra üstün yalıtım, ısı transferi ve yük taşıma kapasitesi sağlar. Oluklu çekirdekler, metal köpük çekirdekler ve petek çekirdekler, nispeten gelişmiş mukavemet ve mekanik özellikler sergiler. Oluklu çekirdekler kâğıt kompozitler ve metaller gibi çeşitli malzemelerden yapılabilir. Sandviç panel yapımında sıklıkla tercih edilen oluklu çekirdekler, etkili darbe enerjisi emilimi sağlar ve aynı zamanda hafiftir (Banhart, 2000).

Oluklu çekirdeğin önemli özelliklerinden biri, sandviç panelin uygun kayma mukavemetini ve uygun sertliği artırarak ve yüzey plakalarının ayrılmasını koruyarak düzlemsel şekil değiştirmeleri dengeye koymasındadır (Fleck & Deshpande 2004).

Oluklu çekirdek yapısı sürekli tekrarlanan periyodik birim hücrelerden oluşur ve periyodik birim hücreler bir ağ yapısı gibi bir bütün olarak hareket eder. Böylece birim hücrenin mekanik özellikleri sandviç panelin tamamının mekanik özelliklerini temsil eder (Lin et al., 2010).

Trapezoid çekirdek hücreli yapılar, kompozit sandviç plakaların tasarımında yaygın olarak kullanılmakta olup, sandviç panellerin mekanik performansı üzerinde olumlu etkileri olan bir çekirdek birim hücresidir. Trapez geometriye sahip çekirdek hücre duvarları, darbe yükünü dikey ekseninde korur ve ayrıca sandviç panelin kontrollü deformasyonuna katkıda bulunur (Zhang et al., 2015).

Trapezoid çekirdek yapılar, seri üretime uygunlukları nedeniyle özellikle metal çekirdek malzemeleriyle birlikte kullanılmaktadır. Metalik malzemeden yapılmış oluklar, genellikle tabaka oluşturma teknikleriyle geometriye uygun şekilde üretilir. Çekirdek birim hücre geometrisine göre üretilen şekillendirme kalıbı, sacı pres yardımıyla bükür ve bu işlemi sürekli tekrarlayarak oluklu çekirdek yapısını oluşturur. Elde edilen oluklu çekirdeklerin uygun montaj yöntemleri kullanılarak yüzey plakaları ile birleştirilmesiyle sandviç paneller elde edilmektedir. (Lin et al., 2010)

Oluklu çekirdek yapısı, sandviç panelin gelişmiş mekanik özelliklerini ve rijitliği sağlar. Özellikle metalik oluklu çekirdek yapısıyla beraber ezilme direncinin yüksek olması gibi özelliklerinden dolayı şok ve patlama yüklerinin sönmelenmesini gerektiren uygulamalarda sıklıkla tercih edilmektedir. Oluklu çekirdek, sandviç panelin tek bir ünite gibi davranmasına izin vererek yüksek kesme mukavemeti sağlamasına rağmen, aynı zamanda sandviç paneli dikey kuvvetlerden koruyarak stabilize eder (Bardella & Genna 2001).

Oluklu çekirdekli sandviç paneller, yüksek eğilme rijitliği/ağırlık oranı nedeniyle rijitlik gerektiren mühendislik uygulamalarında ideal bir seçenektir. Araştırmacılar, farklı ihtiyaçlara uygun olacak şekilde, yüzey katmanları ve oluklu çekirdeklerin şekil, boyut ve malzeme kombinasyonlarını kullanarak çeşitli sandviç paneller tasarlamışlardır. Bu paneller, farklı mukavemet ve rijitlik değerlerine sahip olacak şekilde geliştirilmiştir. Katmanlı çekirdek yapılar, farklı geometrilere sahip çekirdeklerin üst üste yerleştirilmesiyle oluşturulurken, ara katman plakaları ise darbe kuvvetlerinin katmanlar arasında iletimini sağlar. (Odacı vd., 2012).

Çok yönlü çekirdekler, özel olarak yapılmış metal çekirdeklerin çekirdeğin yüzey plakası üzerine farklı yönlerde yerleştirilmesi veya farklı oluk açılmasına sahip çekirdeklerin üretilmesiyle elde edilir. (Dayyani & Ziaei-Rad 2011)

Lamine sandviç yapılar uygulamaya bağlı olarak farklı sayılarda ve farklı yönlerde katmanlardan oluşabilmektedir. Lamine çekirdek yapıları, özellikle oluklu çekirdeklerde çok sık kullanılır. Amacı, farklı yönlerde konumlandırılmış oluklu iç tabakalara sahip bir sandviç panelin izotropik davranışını sağlamaktır (Hou et al., 2015).

Çalışmada eklemeli imalat (AM) teknolojisi kullanılarak üç boyutlu parçaları hızlı ve verimli bir şekilde üretmişlerdir. Eritilmiş biriktirme modelleme (FDM) ve stereo-litografi (SLA) yöntemleri, karmaşık parçaların maliyet etkin üretimini sağlamışlardır. SLA ve FDM yazıcılar ile üç farklı polimer malzeme (UVR, PLA ve ABS) kullanılarak toplam 45 test numunesi üretmişlerdir. ASTM C365-16 standartlarına uygun olarak %75 doluluk oranıyla basılan numuneler, çekme, basma ve üç nokta eğme testlerine tabi tutmuşlardır. UVR malzemesi, çekme testinde 60,39 MPa, basma testinde 127,74 MPa ve eğme testinde 118,35 MPa ile en yüksek mukavemet değerlerini elde etmişlerdir. (Bayraklılar vd. 2023)

Mekanik özelliklerin yanı sıra sertlik testleri yapılmış ve yüzey analizi SEM ile incelemiştir. UVR tabanlı SLA yöntemi ile PLA-ABS tabanlı FDM yöntemlerinin mekanik özellikleri karşılaştırmıştır. Ayrıca, lamine sandviç panellerin yüksek hızlı darbelere karşı dayanıklı olduğu gözlemlenmiştir. Çok yönlü çekirdek tasarımları, oluklu sandviç panellerin bükülme ve kayma sertliğini artırarak izotropik davranış göstermelerini sağlamıştır. (Seong et al., 2010)

Bayraklılar'a göre (2024), eklemeli imalat (AM) yönteminde boyutsal doğruluğu artırmak için optimal parametreleri belirlemiştir. ABS ve PLA gibi malzemelerde, boyutsal doğruluğun önemli olduğunu vurgulamış ve en uygun parametreler olarak kübik dolgu deseni, iki kabuk, %50 dolgu oranı ve 0,2 mm duvar kalınlığını önermiştir. Yapay sinir ağları (YSA) ile yapılan tahminlerin doğruluk oranı ise %90'ın üzerindedir.

Yönlü katılaştırılmış TiAl alaşımının basınç dayanımı ve gerinimi, Çoklu Doğrusal Regresyon (MLR) ve Rastgele Orman Regresyonu (RFR) ile tahmin etmişlerdir. Alaşım bileşimi, deneysel ve test parametreleri girdi; basma dayanımı ve gerinim ise çıkış değişkenleri olarak seçmiştir. RFR ile yapılan analizde, en etkili faktörler belirlenmiş ve Erbium (Er) elementinin basınç özelliklerine önemli etkisi

olduğu gösterilmiştir. Çalışma, en uygun veri oranıyla yüksek doğrulukta tahminler elde etmiştir. (Kwak et al., 2024)

Eklemeli üretim (AM) sektöründe artan enerji tüketimi, enerji verimliliği optimizasyonunu önemli hale getirmiştir. Ülker vd. (2023), erimiş biriktirme modelleme (FDM) ile 3B yazıcılarda enerji tüketimini tahmin etmek için dört makine öğrenmesi algoritması kullanmışlardır. Model, gerçek zamanlı test verileriyle eğitilmiş ve enerji tüketimi tahmininde Gauss Süreci Regresyon algoritmasının en yüksek doğruluğu sağladığı tespit etmiştir: $R^2 = 0,99$ - MAE = 0,016 - RMSE = 0,022 - MSE = 0,00049 değerlerini elde etmişlerdir.

AlMg3 alaşımı, ısıl işlemle sertleştirilemeyen bir malzeme olmasına rağmen, soğuk plastik şekillendirme ile dayanım ve sertlik özellikleri artırılabilir. Torpak'a göre (2010) AlMg3/SiCp kompozitlerinin basma yüklerini incelemiş ve farklı hacimsel takviye oranlarına sahip olan gruplar arasında davranışları karşılaştırmıştır. Soğuk biçimlendirme işlemi, kompozit malzemelerin dayanımını arttırmış ve takviye oranları ile doğrusal bir ilişki göstermiştir.

Üç boyutlu baskı, malzeme israfını azaltarak karmaşık geometrilerin üretimine olanak tanıdığı için Endüstri 4.0'da önemli bir rol oynar. Bayraklılar(2024), eklemeli üretimde x, y ve z eksenlerindeki deliklerin boyutsal doğruluğu incelemiştir. Taguchi yöntemiyle malzeme israfı önlenmiş, varyans analiziyle en etkili parametreler belirlenmiş ve yapay sinir ağlarıyla tahminler yapmıştır. Sonuçlar, delik çapı küçüldüğünde baskı ısısının doğruluğu olumsuz etkilediğini ve her eksen için tek bir optimum parametre bulunamadığını göstermektedir.

Eklemeli üretim süreçlerine yapay zeka entegre edildikçe, üretim süresi ve maliyetler azalmaktadır. Ülker vd.,'e göre (2024), FDM yönteminde kritik bir parametre olan raster açısının optimizasyonu incelenmişlerdir. Makine öğrenmesi teknikleri kullanılarak raster açısının tahmini için çeşitli algoritmalar uygulamıştır. Sonuçlar, Rastgele Orman Regresyonu (RFR) modelinin $R^2 = 0,92$ ile en yüksek doğruluğa ulaştığını ve farklı geometri ve üretim koşulları altında diğer algoritmalarından daha iyi performans sergilediğini göstermektedir.

Beton, inşaat mühendisliğinde en yaygın kullanılan mühendislik malzemelerinden biri olup yüksek basınç dayanımına karşın düşük çekme dayanımı ve sınırlı süneklik göstermektedir. Bu dezavantajları gidermek amacıyla çeşitli takviye yöntemleri uygulanmaktadır. Karabulut ve Yazıcıoğlu (2025), hem sünekliği hem de

hafifliği artırmak ve aynı zamanda enerji yutma kapasitesini geliştirmek amacıyla Gyroid ve Fluorite tipi hücresel kafes yapıların çimento esaslı harç içine gömüldüğü bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmada, kontrol harcı (KH), lifli harç (LH) ve iki farklı kafes konfigürasyonuna sahip Gyroid harç (GH) ile Fluorite harç (FH) kullanılarak üretilen çimento esaslı kompozitlerin mekanik özellikleri araştırılmıştır. Eriterek biriktirme modelleme (EBM) yöntemi ile akrilonitril bütadien stiren (ABS) malzemeden üretilen kafes yapılar, çimento esaslı harç içine gömülerek numuneler hazırlanmış; bu numuneler üzerinde basma, üç noktalı eğme ve darbe testleri uygulanmıştır. Deney sonuçlarına göre, en yüksek basınç dayanımının lifli harç (LH) numunesinde elde edildiği, ayrıca LH numunesinin kafes takviyeli çimento esaslı harç numunelerinden daha yüksek enerji yutma kapasitesine sahip olduğu belirlenmiştir. Darbe testi sonuçları ise kafes yapıları numunelerin sünek davranış gösterdiğini ve daha yüksek darbe emme enerjisine sahip olduğunu ortaya koymuştur (Karabulut ve Yazıcıoğlu 2025).

Literatürde sandviç kompozit yapıların mekanik performansını etkileyen parametreler üzerine pek çok çalışma bulunmakla birlikte, trapezoid hücre geometrisine sahip yapılar üzerine yapılan araştırmalar oldukça sınırlıdır. Bu çalışma, farklı hücre genişliği, duvar kalınlığı ve taban açısı gibi geometrik parametrelerin yanı sıra baskı hızı ve doluluk oranı gibi üretim parametrelerinin etkisini bütüncül bir yaklaşımla inceleyerek bu alanda önemli bir boşluğu doldurmaktadır. Ayrıca, tek ve çift katmanlı yapıların karşılaştırılmalı olarak analiz edilmesi, mevcut literatüre yenilikçi bir katkı sağlamaktadır. Üretimde PLA/CF gibi karbon takviyeli kompozitlerin 3B baskı yöntemiyle kullanılması ise eklemeli imalat teknolojilerinin sandviç yapı tasarımlarına entegrasyonu açısından özgün bir uygulamadır. Bu yönleriyle çalışma, hem yapısal optimizasyon hem de ileri üretim tekniklerinin malzeme performansına etkisi bakımından literatüre değerli katkılar sunmaktadır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Taguchi yöntemi, Minitab (Minitab, LLC, State College, PA) Deney Tasarımı programı aracılığıyla, ürün ve süreçteki değişkenliği en aza indirmek için kontrol edilebilir faktörlerin en uygun düzeylerini seçen, bu sayede ürün ve süreçte oluşan değişkenliğin kontrol edilemeyen faktörlere karşı direncini artırmayı amaçlayan bir deneysel tasarım metodudur. (Canıyılmaz vd., 2003).

Deney numuneleri için hazırladığımız tasarımların geometrik ölçüleri aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

3.1. Basma Testi

Basma testleri, malzemelerin belirli bir dayanma kapasitesini aşma yeteneğini değerlendirmek için kullanılan bir yöntemdir. Basma deneylerinde kullanılan numuneler, çekme numunelerine göre daha basit şekillere sahip olduğundan, çekme numunelerinin üretimi zor olduğunda basma numuneleri tercih edilir. İzotropik çok taneli kristal malzemelerde basma ve çekme davranışlarının benzer olması beklenirken, anizotropik malzemelerde bu iki davranış genellikle önemli farklılıklar gösterir. (Kuhn, 2000)

Basma deneyi sonucunda elde edilen basma diyagramı (σ - ϵ eğrisi), malzemenin akma ve çekme dayanımı gibi mukavemet değerlerini, kopma uzaması ve kopma büzülmesi gibi süneklik değerlerini belirlemek için kullanılır. Bu değerler, malzemenin türüne, kimyasal bileşimine ve metalografik yapısına bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Basma deneyinde gerçek birim şekil değiştirme hesaplanır ve $e = \ln(h_0/h)$ bağıntısı kullanılır. Gerçek gerilme (σ_g) uygulanan kuvvetin deney parçasının o andaki kesit alanına bölünmesi ile elde edilir ve $\sigma_g = F_i / A_i$ bağıntısı ile hesaplanır. Burada F_i deformasyonun herhangi bir i anında numuneye etki eden kuvvet olup, A_i ise kuvvetin uygulandığı andaki deney numunesinin kesit alanıdır (Teknoloji, 2024).

Bu çalışmada Trapezoid Çekirdek Hücreli Sandviç kompozitlerin çekirdek hücreleri PLA filament malzemesinden üretilmiştir. PLA Filamentinin teknik özellikleri Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1. PLA filament teknik özellikleri

Açıklama	Ölçüler/Özellik
Marka	Creality
Model	Hyper PLA Filament
Renk	Kırmızı
Ürün Kodu	3301010340
Malzeme	Hyper PLA
Çap	1,75±0,03mm
Net Ağırlık	1 kg / 2,2 lb
Brüt Ağırlık	1,29 kg / 2,8 lb
Baskı Sıcaklığı	190 - 230°C
Tabla Sıcaklığı	25 - 60°C
Baskı Hızı	30-600 mm/sn
Fan	%100
Yoğunluk	1,25g/cm ³
Çekme Dayanımı	52,991Mpa
Çekme Modülü	1146,064
Kopmada Uzama	%6,304
Eğilme Dayanımı	92,381Mpa
Eğilme Modülü	2490,178Mpa
Darbe Dayanımı	8,8344kJ/m ²

Bu çalışmada, eklemeli imalat yöntemi kullanılarak üretilen basma test numunelerinin basma dayanımları deneysel olarak incelenmiştir. Numuneler, üç farklı hücre genişliği ve hücre duvar kalınlığına sahip trapezoid geometriye sahiptir. Numunelerin boyutları ASTM C365-16 standardına göre eni ve boyu 75x75 mm olarak belirlenmiştir. Şekil 3.1’de, trapezoid hücrenin 75x75 mm’lik kare şeklinde numunelerin üretim aşaması gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Ticari olarak temin edilebilen bir 3D yazıcı ve 3D yazıcı ile üretilmiş örnekler.

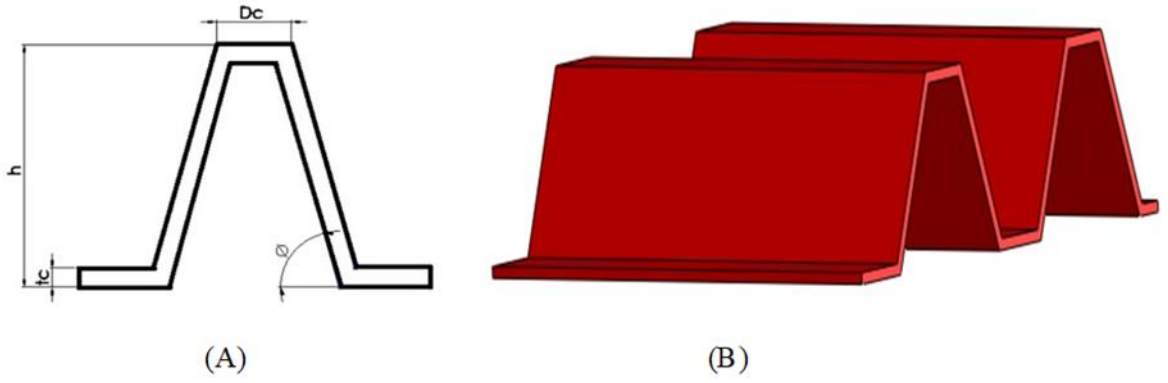
Hücre genişliği 6 mm'den 12 mm'ye genişletildiğinde oluk sayısının azaldığı görülmüştür. Hücre genişlikleri sırasıyla 6, 9 ve 12 mm iken hücre duvar kalınlıkları ise 0,8- 1,2 ve 1,6 mm olarak belirlenmiştir. Taban açısı ise sırasıyla 50, 65 ve 75 derece olarak ayarlanmıştır. Ayrıca, Creality Slicer Yazıcı Dilimleme programında hız 75, 100 ve 125 mm/sn olacak şekilde, doluluk oranı ise yüzde olarak 70, 85, 100 olarak belirlenmiştir. Numunelerin tasarımı SOLIDWORKS® 2018 Computer Aided Design (CAD) (Dassault Systèmes SolidWorks Corporation, Waltham, MA, ABD). yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Taguchi yöntemiyle kontrol edilebilir faktörlerin en uygun düzeyleri seçilerek, ürün ve süreçteki değişkenliği en aza indirme amacı güdülmüştür. (Canıyılmaz vd., 2003)

Deney numuneleri için hazırladığımız tasarımlar tablo halinde Tablo 3.2'de verilmiş ayrıca geometrik ölçüleri, yazdırma hızı; 75, 100 ve 125 mm/sn. Doluluk; 70, 85 ve %100. Dc (Hücre Genişliği); 6, 9 ve 12 mm. tc (Hücre Kalınlığı); 0,8-1,2 ve 1,6 mm. Hücre Taban Açısı: 55⁰, 65⁰, 75⁰ tek katlı ve iki katlı numuneler için ise yükseklik 10 mm, 20 mm olacak şekilde belirlenmiştir.

Tablo 3.2. Seviyeler ve faktörler

Faktör	Birim	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Hız	mm/sn	75	100	125
Dc	mm	6	9	12
tc	mm	0,8	1,2	1,6
Açı	derece	55	65	75
Doluluk	%	70	85	100
Katman		1	2	-

Numunelerin geometrik tasarımı SOLIDWORKS® 2018 Computer Aided Design (CAD) yazılımı kullanılarak çizilmiş ve Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



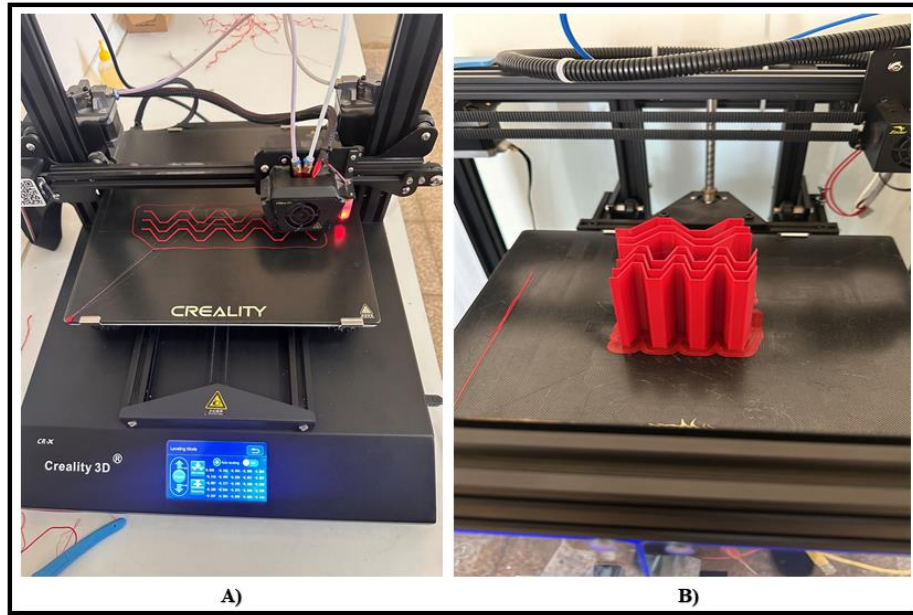
Şekil 3.2. A) Trapezoid hücre ölçülerinin şekil üzerinde gösterilmiş hali B) Eni boyu 75X75mm trapezoid hücrenin katı modeli

Hücre genişlikleri üç farklı parametre olarak seçildiği gibi, hücre duvar kalınlıkları da aynı şekilde üç farklı parametre olarak belirlenmiştir. Çekirdek hücrelerin üretildiği 3 boyutlu yazıcıda nozul çapı 0,4 mm olarak kullanıldığı için hücre duvar kalınlıklarının parametreleri de 0,4’ün katları şeklinde artırılarak belirlenmiştir.

Tablo 3.3. Creality CRX – Pro yazıcının teknik özellikler

Açıklama	Ölçüler/Özellik
Platform boyutu	310*320 mm
Baskı boyutu	300*300*400 mm
Güç	480 Watt
Makine boyutu	550*400*650 mm
Paket boyutu	640*540*340mm
Baskı teknolojisi	FDM
Baskı hızı	180 mm/s (maks) 30-60 mm/s
Hassasiyet	mm
Katman Kalınlığı	– 0,4 mm
Nozul çapı	/ 0,4 mm
Nozzle sıcaklığı	≤260 °C
Tabla sıcaklığı	≤100 °C
Filament kalınlığı	1,75 mm
Destekleyen filamentler	PLA/ABS/WOOD/TPU/Carbon Fiber

Numuneler, Şekil 3.3'te görülen Tablo 3.3'te teknik özellikleri verilen Creality CRX-Pro olan 3 boyutlu yazıcı ile üretilmiştir. Bunun için dilimleme işlemi yapılarak G-kodlarının oluşturulmasında Creality Slicer 4.8.2 yazılımı kullanılmıştır.



Şekil 3.3. A) Ticari olarak temin edilebilen 3D yazıcının basma numunesi baskı aşaması. B) PLA basma numunesi baskı sonu aşaması görüntüsü.

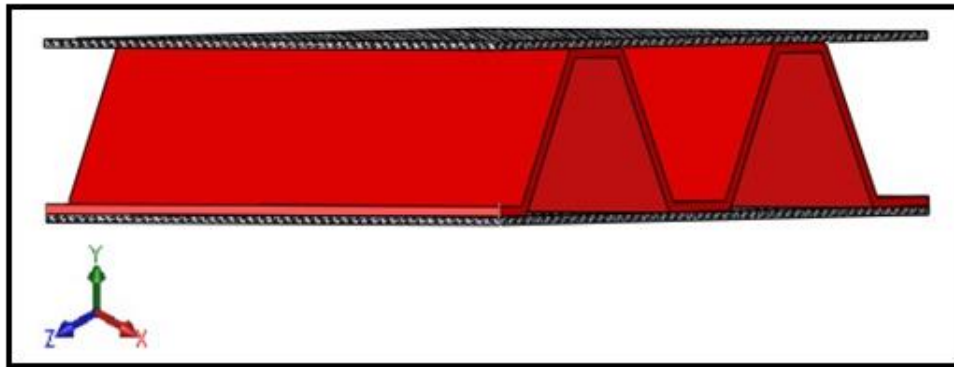
Basımı yapılacak tasarımın yazıcı tablasına konumlandırılması ve tablaya yapışması için uygun açının seçilmesi gibi ayarlar yapıldıktan sonra, dilimleme

programında Tablo 3.4'te belirtilen parametreler seçilerek tasarım dilimlenmiş ve G-kodları oluşturulmuştur.

Tablo 3.4. Creality Slicer 4.8.2 yazılımında seçilen parametreler

Açıklama	Ölçüler/Özellik
Yazıcı	Creality CRX- Pro
Malzeme	PLA
Filament çapı	1,75 mm
Katman kalınlığı	0,2 mm
Duvar kalınlığı	0,8 / 1,2 / 1,6 mm
Dolgu yoğunluğu	%70, %85, %100
Dolgu deseni	Lines
Yazdırma hızı	75 mm/sn,100 mm/sn,125 mm/sn
Boşta gezme hızı	150 mm/s
Nozul sıcaklığı	220°C
Tabla sıcaklığı	60°C

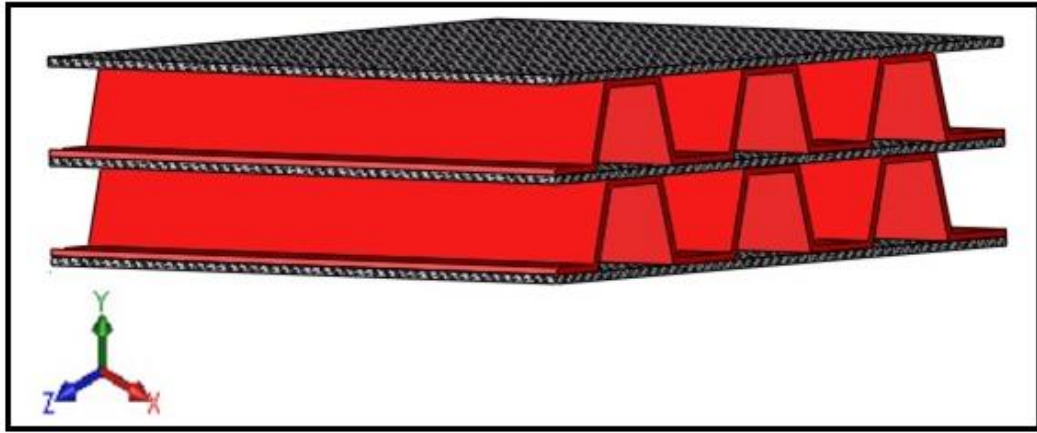
Şekil 3.4'te, Tek Katlı PLA-Carbon fiber Plaka ve PLA çekirdek hücrenin yapıştırılmış hali ve yapıştırıldıktan sonra oluşan sandviç kompozit yapı görülmektedir. Çekirdeklerin üretimine başlamadan önce yazıcının manuel olarak tabla kalibrasyonu yapılmış daha sonra otomatik olarak 24 noktada kalibrasyon yapılmıştır. Basımı yapılacak numuneler için robo90 firmasından tedarik edilen kırmızı renkli Robo90 (ROBO90 Elektronik ve Teknoloji Ticaret A.Ş., Ankara, Türkiye) Kırmızı PLA+ (Plus) marka PLA filament takılarak, 20mm ve 10mm yüksekliğinde çekirdek kısımlar üretilmiştir. 3 boyutlu yazıcının tabla ve nozul sıcaklık değerleri, filamentlerin ürün etiketlerinde belirlenen değerlerde yapılmıştır.



Şekil 3.4. Tek Katlı PLA-Carbon fiber Plaka ve PLA çekirdek Hücrenin iki bileşenli epoksi yapıştırıcı ile yapıştırıldıktan sonraki montaj hali

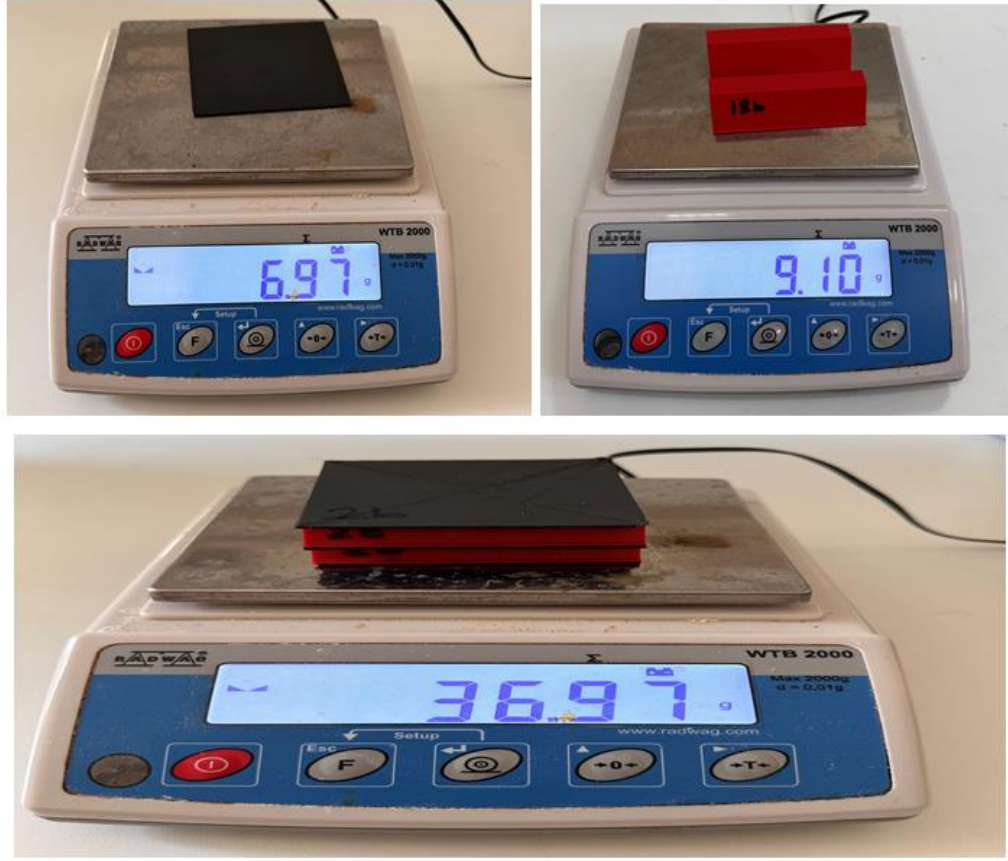
Sandviç kompozit numunelerde yüzey plakası olarak, hacimce %15-20 oranında karbon fiber içeren PLA filamentinden üretilmiştir. Plakalar, 1mm kalınlığında PLA-CF filamentinden eklemeli imalat yöntemiyle 3dyazdiralim firmasından tedarik edilen FROSCH PLA (FROSCH, Mainz, Germany) Karbon Fiber 1,75 mm Filamentinden Creality CRX-Pro 3 boyutlu yazıcı ile 75x75 mm ölçülerinde üretilmiştir.

Çekirdekler ile PLA-CF plakaları 3 boyutlu yazıcıda üretmiş ve yapıştırılmasında çift bileşenli epoksi esaslı Selsil yapıştırıcı kullanılmıştır. Şekil 3.4'te, yapıştırma işleminden sonra montajı görülen PLA çekirdek hücrelere plakalara spatula yardımıyla yapıştırıcı sürülmüş ve malzemeler birbirinin üzerine koyularak Şekil 3.4'te gösterilen montaj hali elde edilmiştir. Yapıştırma işlemi tamamlanan kompozit sandviç yapılar, yapıştırıcının tam olarak kürleşmesi için 1 MPa basınç altında 24 saat boyunca bekletilmiştir. Numuneler, çekirdek yüksekliği 20 mm olan ve 1'er mm alt ve üst yüzey kalınlığına sahip basma numuneleri ile 22 mm yüksekliğinde tasarlanmıştır. Ayrıca, çekirdek hücre yüksekliği 10 mm olan ve alt, üst ve araya konulan 1'er mm kalınlığında plakalarla 2 katlı tasarlanmış numuneler de Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5. İki Katlı PLA-Carbon fiber Plaka ve PLA çekirdek Hücrenin iki bileşenli epoksi yapıştırıcı ile yapıştırıldıktan sonraki montaj hali

Şekil 3.6'da, Radwag WTB 2000 (Radwag Balances and Scales, Radom, Poland) (Jeotest, 2024) terazisi (Kapasite: 2000 gr, Hassasiyet: 0.01 gr) kullanılarak yapıştırma öncesi ve sonrasında her bir numune için çekirdek ve PLA-CF plakaların kütleleri ayrı ayrı ölçülmüştür.



Şekil 3.6. Radwag WTB 2000 [11] terazisi (Kapasite: 2000 gr, Hassasiyet: 0,01 gr) kullanılarak yapıştırma öncesi ve sonrasında ölçümler

Bu değerler Tablo 3.5'te sunulmuştur. Çekirdek numunelere spatula yardımıyla çift bileşenli epoksi esaslı yapıştırıcı sürülmüş ve malzemeler birbirinin üzerine koyulmak suretiyle oda sıcaklığında yapıştırılmıştır. Birleştirilen sandviç yapılar yapıştırıcının kurlaşması için 0,5 MPa basınçta 24 saat süreyle bekletilmiştir.

a)

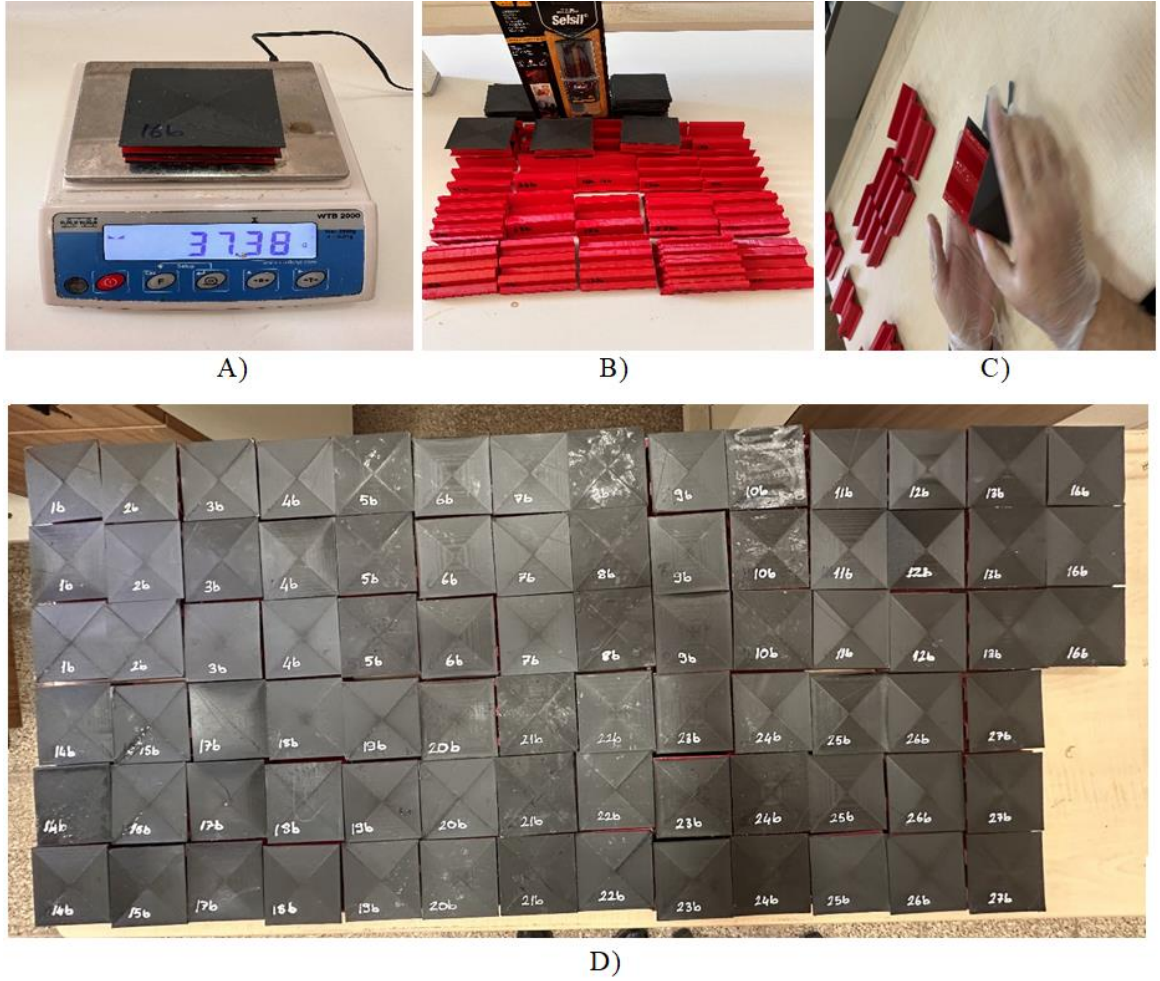


b)



Şekil 3.7. a) Basma deneyi için hazırlanmış numunelerin yandan görünüşü b) Basma deneyi için hazırlanmış numunelerin üstten görünüşü

Basma testi numuneleri hazırlanırken kullanılan 3D baskı, karmaşık geometrilere sahip sandviç yapıların üretilmesindeki esnekliği ve malzeme israfını en aza indirmesi nedeniyle tercih edilmiştir. Katmanlı imalat, geleneksel yöntemlere kıyasla daha iyi mekanik performans ve hafiflik sunarak üstün sonuçlar sağlamaktadır. Ancak kullanılan 3D yazıcının üretim kapasitesi ve malzeme uyumluluğu nedeniyle yapı tek parça halinde basılamamıştır. Ayrıca çekirdek yapı PLA malzemeden imal edilirken yüzey plakalarının %15-20 oranında karbon katkı maddesi içermesi, farklı malzeme özellikleri nedeniyle monolitik üretimi imkânsız hale getirmiştir. Şekil 3.7’de basma deneyi için hazırlanmış 81 adet numunenin farklı açılardan görseli bulunmaktadır.



Şekil 3.8. A) Yapıştırma öncesi ve sonrası Radweg WTB 2000 hassas terazi ile ölçüm. B) Numunelerin yapıştırma aşamasından bir kesit. C) İki bileşenli epoksi bazlı yapıştırıcının spatula ile numunelere uygulanması aşaması. D) Oda sıcaklığında 24 saat boyunca 0,5 MP

Şekil 3.8’de yapıştırma sürecinin farklı aşamaları görsel olarak sunulmaktadır. İlk aşamada, numuneler yapıştırma öncesi ve sonrası kütle değişimlerinin belirlenmesi amacıyla Radweg WTB 2000 hassas terazi ile tartılmıştır. Ardından, iki bileşenli epoksi bazlı yapıştırıcı, spatula yardımıyla yüzeylere homojen şekilde uygulanmış ve numuneler belirlenen konumda birleştirilmiştir. Son aşamada ise, yapıştırılan sandviç yapı numuneleri oda sıcaklığında 24 saat boyunca 0,5 MPa basınç altında kürlenmeye bırakılmıştır. Bu süreçte uygulanan sabit basınç, yapışma yüzeyleri arasındaki boşlukların minimize edilmesini ve yapışma kalitesinin artırılmasını sağlamaktadır. Ayrıca, kürlenme süresince ortam sıcaklığının ve nem oranının sabit tutulması, yapıştırıcının mekanik özelliklerinin optimum seviyede gelişmesine katkıda bulunmuştur.

Tablo 3.5. Basma testi numuneleri için PLA ve PLA-CF trapezoid çekirdek hücreli kompozit sandviç plakaların ölçülen kütle değerleri

Numune adı	Trapezoid çekirdek Kütlesi [g]	Yüzeyleri n kütlesi [g]	Yapıştırıcı kütlesi [g]	Kompozit Plakanın Kütlesi [g]	Sandviç Plakanın Yoğunluğu [g/cm ³]
1b	8,36	6,96	0,51	22,79	4,05
2b	7,59	6,99	1,47	37,59	6,68
3b	8,3	6,75	0,69	22,49	4,00
4b	13,33	6,85	0,56	27,59	4,90
5b	11,58	6,87	2,77	46,53	8,27
6b	12,62	6,92	2,22	28,68	5,10
7b	20,31	6,93	1,03	35,20	6,26
8b	13,96	6,94	1,83	50,68	9,01
9b	19,83	7	1,37	35,20	6,26
10b	15,17	7,02	2,50	53,70	9,55
11b	19,48	7,03	0,75	34,29	6,10
12b	18,49	7,05	1,80	34,39	6,11
13b	14,19	7,06	1,16	50,60	9,00
14b	15,51	7,2	0,96	30,87	5,49
15b	16,23	7,4	0,65	30,88	5,49
16b	7,05	7,3	1,06	37,45	6,66
17b	8,96	6,96	0,94	23,82	4,23
18b	9	6,93	1,14	24,00	4,27
19b	20,8	7,02	0,98	35,82	6,37
20b	19,64	6,97	1,65	35,23	6,26
21b	16,49	7,03	2,59	56,43	10,03
22b	10,84	6,97	1,22	26,00	4,62
23b	10,68	7,03	1,16	25,90	4,60
24b	9,05	6,97	2,45	41,50	7,38
25b	8,1	7,02	0,93	23,07	4,10
26b	8,56	6,99	0,90	23,44	4,17
27b	7,51	9,98	1,47	37,48	6,66

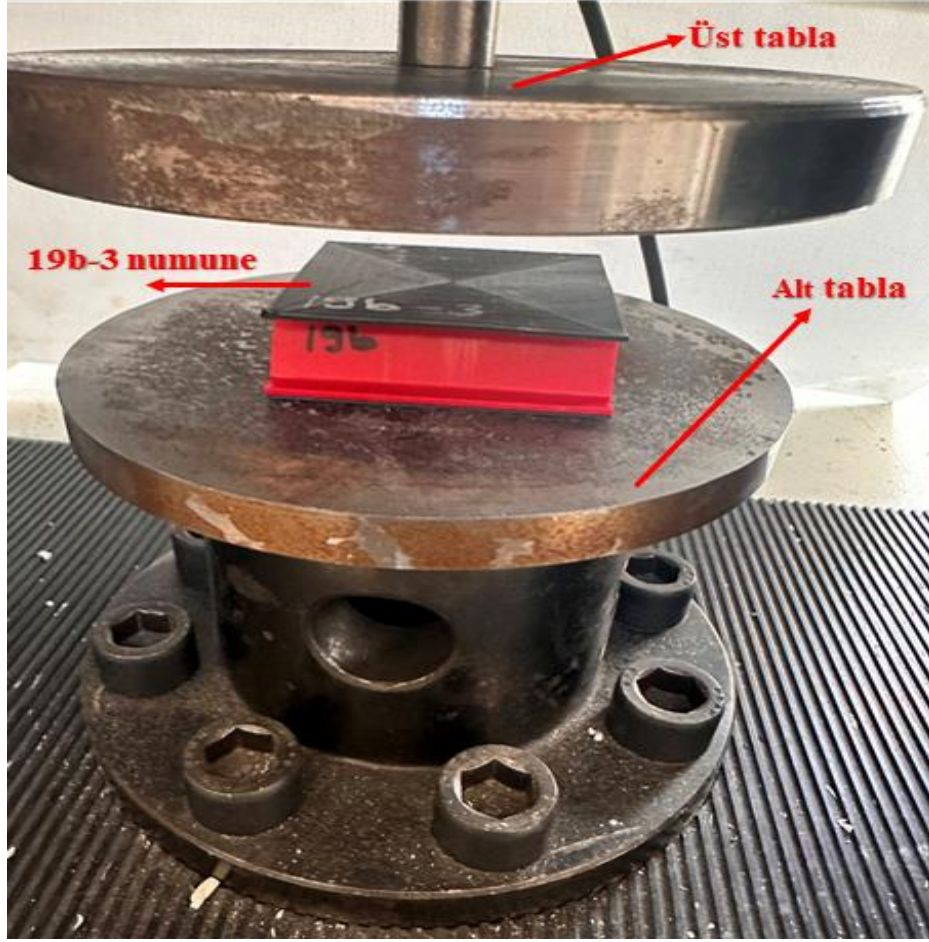
Basma deneyi, malzemelerin statik yük altında maruz kaldıkları koşullarda basma akma mukavemeti, basma mukavemeti, basma elastisite modülü gibi mekanik özelliklerini belirlemek için yapılır. Bu deney, çekme deneyinin tam tersidir; yük, numune üzerine basılarak uygulanır. Üniversal test cihazlarında gerçekleştirilen basma deneyinde, numune arasına yerleştirilir ve sabit hızda artan bir basma yükü uygulanır. Bu süreçte, numune boyu kısılırken, kesit alanı artar. (Yıldız, 2024)

Basma deneyleri, Şekil 3.9'da gösterilen, Batman Üniversitesi Makine Mühendisliği Laboratuvarı'ndaki Shimadzu AG-IC model 250 kN (Shimadzu Corporation, Kyoto, Japan) (Shimadzu, 2023) cihazı kullanılarak oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Deneyler, iki adet sertleştirilmiş basma kafası arasında 1 mm/dak hızda ve ASTM C365-16 standardı doğrultusunda yapılmıştır.



Şekil 3.9. Batman Üniversitesi Makine Mühendisliği Laboratuvarı'ndaki Shimadzu AG-IC model 250 kN cihazı

Numuneler, alt basma tablasının daire merkeziyle aynı olan köşegen merkezine sahip olacak şekilde yerleştirilmiş ve her seferinde aynı konuma konulmuştur. Şekil 3.10'da, numunenin basma testi sırasındaki cihazdaki konumu görülmektedir. Bu yerleşim yöntemi, yükün numune üzerine simetrik ve dengeli bir şekilde iletilmesini sağlayarak ölçüm doğruluğunu artırmaktadır. Ayrıca, her testte aynı konumlandırma yapılması, tekrarlanabilirliği yüksek ve karşılaştırılabilir sonuçlar elde edilmesine olanak tanımaktadır. Test sırasında numunenin konumunu korumak amacıyla, alt ve üst basma plakaları arasındaki hizalama dikkatle kontrol edilmiş ve olası kaymaların önüne geçilmiştir. Bu sayede, basma testi verilerinin güvenilirliği ve doğruluğu maksimum seviyede tutulmuştur.



Şekil 3.10. Basma numunenin test cihazdaki konumu

3.2. Üç Nokta Eğme Testi

Eklemeli imalat yöntemiyle üretilen farklı hücre çaplarında ve malzemelerdeki trapezoid çekirdek yapısına sahip eğme numunelerinin üç nokta eğme testlerini içermektedir. Çalışmalarda bu numuneler çekirdek ve yüzey şeklinde basılmış. PLA malzemesinden üretilen trapezoid çekirdek hücre ile %15-20 oranında Karbon içeren PLA malzemesinden yüzey plakası üç boyutlu yazıcıyla üretilmiştir. Deneyler, hem malzeme etkisinin hem de çekirdek hücre çapının eğme dayanımı üzerine olan etkilerini incelemektedir. Her bir deney üç kez tekrarlanmış olup, toplamda seksen bir adet üç nokta eğme testi yapılmıştır. Testlerde, konumlandırma hatalarının en aza indirilmesi amacıyla özel olarak tasarlanıp üretilen bir konumlandırma aparatı kullanılmıştır. Deneyler sonunda elde edilen kuvvet-sehim eğrileri yorumlanmıştır.

Sandviç yapılarda yüzey plakaları temel olarak eğilme yüklerini taşıırken, çekirdek bölümü enine kesme kuvvetlerinin iletilmesinden sorumludur (Evans et al.,

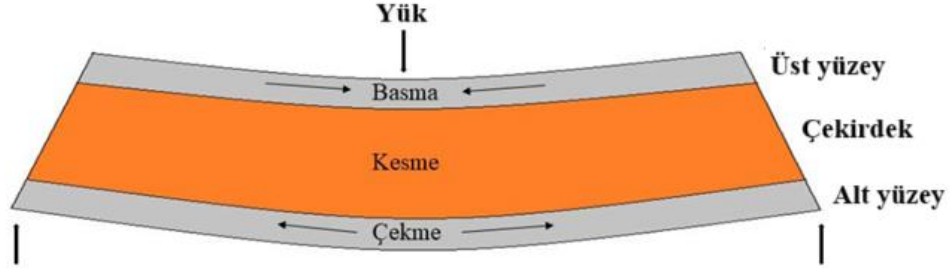
2001). Eğilme durumunda, yüzey plakaları çekme ve basma yönündeki normal gerilmeleri karşılamakta, çekirdek ise kayma gerilmelerini taşıyarak yapının eğilme rijitliğini önemli ölçüde artırmaktadır. Çekirdek, yalnızca kesme dayanımını artırmakla kalmamakta, aynı zamanda burkulma ve bükülme direncini de geliştirerek yüzey plakalarının etkin bir şekilde yük taşımasına katkı sağlamaktadır. Bu özellik, yapının toplam kütleğinde önemli bir artışa neden olmadan yüksek yapısal verimlilik elde edilmesini mümkün kılar (Evans et al., 2001).

Sandviç panellerde kullanılan çekirdekler farklı malzeme türlerinden üretilmektedir. İlk uygulamalarda çekirdek malzemesi olarak genellikle polimer bazlı köpükler tercih edilmiştir (Hirose et al., 2007). Daha sonraki çalışmalarda ise balsa odunu, alüminyum köpükler ve bal peteği tipi hücreli yapılar gibi alternatif malzemeler de kullanılmaya başlanmıştır.

Eğilme yüklemesi altında en yüksek normal gerilmeler yüzeylerde olduğu için, yüzey plakalarının bu gerilmeleri karşılayabilecek düzeyde yüksek mukavemete sahip olması gerekmektedir. Aynı zamanda yapının toplam ağırlığını artırmamak adına bu plakaların mümkün olduğunca ince tasarlanması da önemlidir. Bu nedenle yüzey tabakalarında genellikle karbon fiber, cam elyaf veya kevlar gibi yüksek dayanım/ağırlık oranına sahip ileri kompozit malzemeler tercih edilmektedir (Hirose et al., 2007).

Çekirdek ise yapının eğilme rijitliğini artırmak amacıyla düşük yoğunluklu ancak kalın bir yapı formunda tasarlanır. Böylece atalet momenti artırılarak yüzey plakalarının taşıma kapasitesi desteklenir. Çekirdekte kullanılan malzemenin en kritik görevlerinden biri, eğilme sırasında ortaya çıkan maksimum kayma gerilmelerini karşılamaktır. Bu nedenle yüksek kayma dayanımına sahip olması gerekmekte; aynı zamanda yapının hafifliğini korumak için düşük yoğunluklu olması da beklenmektedir. Bu koşullar nedeniyle köpük malzemeler, yüksek kayma dayanımları ve düşük yoğunlukları sayesinde kompozit sandviç yapılar için en yaygın tercih edilen çekirdek malzemeler arasında yer almaktadır. (Zurnacı, 2019)

Şekil 3.11’de, sandviç yapının eğilme yüklemesi altındaki davranışı şematik olarak gösterilmektedir.



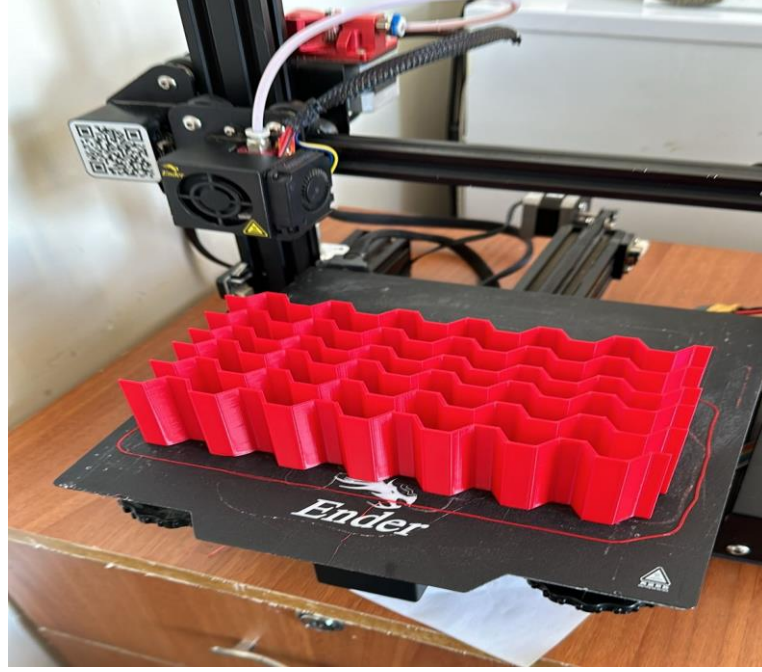
Şekil 3.11. Sandviç yapı elemanlarının üç nokta eğme testi esnasında taşıdığı yükler (Zurnacı, 2019)

Bu çalışmada Trapezoid Çekirdek Hücreli Sandviç kompozitlerin çekirdek hücreleri PLA filament malzemesinden üretilmiştir. PLA Filamentinin teknik özellikleri Tablo 3.6’da verilmiştir.

Tablo 3.6. Pla filament teknik özellikleri

Açıklama	Ölçüler/Özellik
Marka	Creality
Model	Hyper PLA Filament
Renk	Kırmızı
Ürün Kodu	3301010340
Malzeme	Hyper PLA
Çap	1,75±0,03mm
Net Ağırlık	1 kg / 2,2 lb
Brüt Ağırlık	1,29 kg / 2,8 lb
Baskı Sıcaklığı	190 - 230°C
Tabla Sıcaklığı	25 - 60°C
Baskı Hızı	30-600 mm/sn
Fan	%100
Yoğunluk	1,25g/cm ³
Çekme Dayanımı	52,991Mpa
Çekme Modülü	1146,064
Kopmada Uzama	%6,304
Eğilme Dayanımı	92,381Mpa
Eğilme Modülü	2490,178Mpa
Darbe Dayanımı	8,8344kJ/m2

Eklemeli imalat yöntemi kullanılarak üretilen üç nokta eğme test numunelerinin eğme dayanımları deneysel olarak incelenmiştir. Numuneler, üç farklı hücre genişliği ve hücre duvar kalınlığına sahip trapezoid geometriye sahiptir. Numunelerin boyutları ASTM C393-16 standardına göre eni ve boyu 200x50 mm olarak belirlenmiştir. Şekil 3.12’de, trapezoid levhanın 200x50 mm’lik numunelerin üretim aşaması gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Ticari olarak temin edilebilen bir 3D yazıcı 3D yazıcı ile üretilmiş örnekler

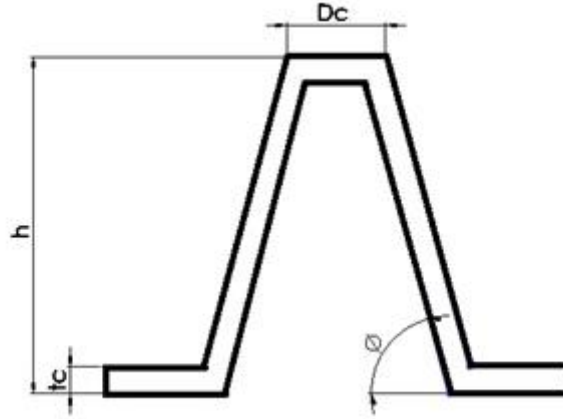
Hücre genişliği 6 mm'den 12 mm'ye genişletildiğinde oluk sayısının azaldığı görülmüştür. Hücre genişlikleri sırasıyla 6, 9 ve 12 mm iken hücre duvar kalınlıkları ise 0,8 - 1,2 ve 1,6 mm olarak belirlenmiştir. Taban açısı ise sırasıyla 50, 65 ve 75 derece olarak ayarlanmıştır. Ayrıca, Creality Slicer Yazıcı Dilimleme programında hız 75, 100 ve 125 mm/sn olacak şekilde, doluluk oranı ise yüzde olarak 70, 85, 100 olarak belirlenmiştir. Numunelerin tasarımı SOLIDWORKS® 2018 Computer Aided Design (CAD) yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Taguchi yöntemiyle kontrol edilebilir faktörlerin en uygun düzeyleri seçilerek, ürün ve süreçteki değişkenliği en aza indirme amacı güdülmüştür. (Canıylmaz vd., 2003)

Deney numuneleri için hazırladığımız tasarımlar tablo halinde Tablo 3.7'de verilmiş ayrıca geometrik ölçüleri, yazdırma hızı; 75, 100 ve 125 mm/sn. Doluluk; 70, 85 ve %100. Dc (Çekirdek Hücre Genişliği); 6, 9 ve 12 mm. tc (Çekirdek Hücre Kalınlığı); 0,8-1,2 ve 1,6 mm. Hücre Taban Açısı: 55°, 65°, 75° tek katlı ve iki katlı numuneler için ise yükseklik 10 mm, 20 mm olacak şekilde belirlenmiştir.

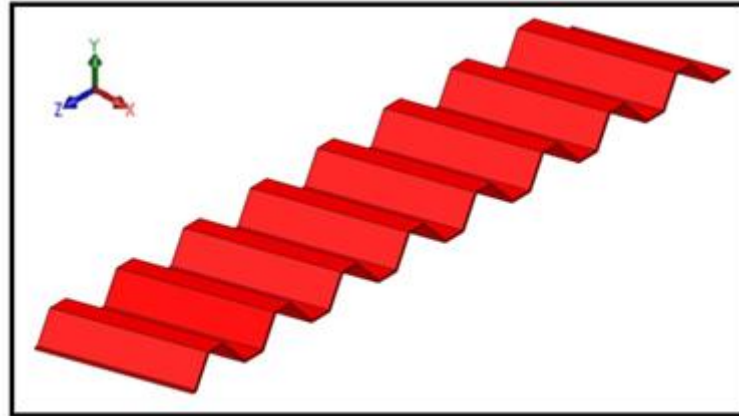
Tablo 3.7. Basma testi için seviye ve faktörler

Faktör	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Hız V (mm/sn)	75	100	125
Dc (mm)	6	9	12
Tc (mm)	0,8	1,2	1,6
Açı (derece)	55	65	75
Doluluk (%)	70	85	100
Katman	1	2	-

Numunelerin geometrik tasarımı SOLIDWORKS® 2018 Computer Aided Design (CAD) yazılımı kullanılarak çizilmiş ve Şekil 3.13’de gösterilmiştir.



a)



b)

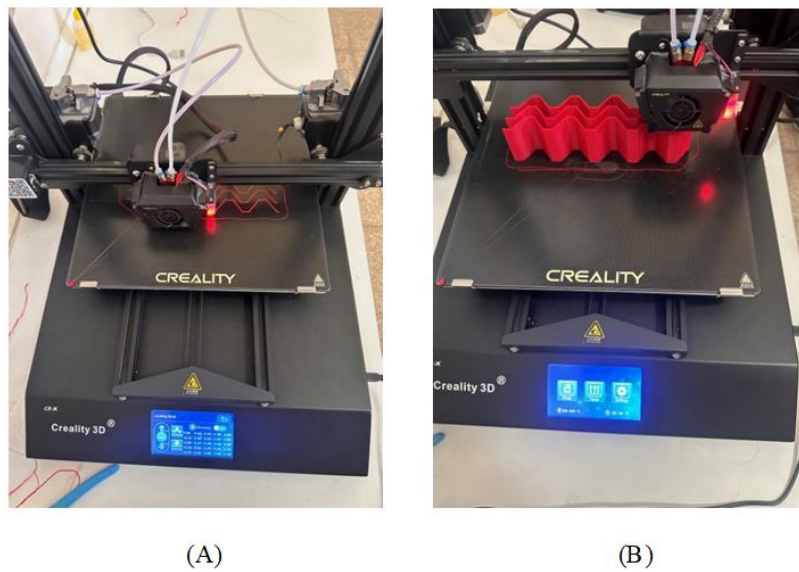
Şekil 3.13. a) Trapezoid hücre ölçülerinin şekil üzerinde gösterilmiş hali **b)** Eni boyu 200X50 mm trapezoid hücrenin katı modeli

Hücre genişlikleri üç farklı parametre olarak seçildiği gibi, hücre duvar kalınlıkları da aynı şekilde üç farklı parametre olarak belirlenmiştir. Çekirdek hücrelerin üretildiği 3 boyutlu yazıcıda nozul çapı 0,4 mm olarak kullanıldığı için hücre duvar kalınlıklarının parametreleri de 0,4'ün katları şeklinde artırılarak belirlenmiştir.

Tablo 3.8. Creality CRX – Pro yazıcının teknik özellikler

Açıklama	Ölçüler/Özellik
Platform boyutu	310*320 mm
Baskı boyutu	300*300*400 mm
Güç	480 Watt
Makine boyutu	550*400*650 mm
Paket boyutu	640*540*340mm
Baskı teknolojisi	FDM
Baskı hızı	180/s (maks) 30-60 mm/s
Hassasiyet	0,1 mm
Katman Kalınlığı	0,1– 0,4 mm
Nozul çapı	0,1- 0,4 mm
Nozzle sıcaklığı	≤260 °C
Tabla sıcaklığı	≤100 °C
Filament kalınlığı	1,75 mm
Destekleyen filamentler	PLA/ABS/WOOD/TPU/Carbon Fiber

Numuneler, Şekil 3.14'te görülen Tablo 3.8'de teknik özellikleri verilen Creality CRX-Pro Menşei: Almanya) olan 3 boyutlu yazıcı ile üretilmiştir. Bunun için dilimleme işlemi yapılarak G-kodlarının oluşturulmasında Creality Slicer 4.8.2 yazılımı kullanılmıştır.



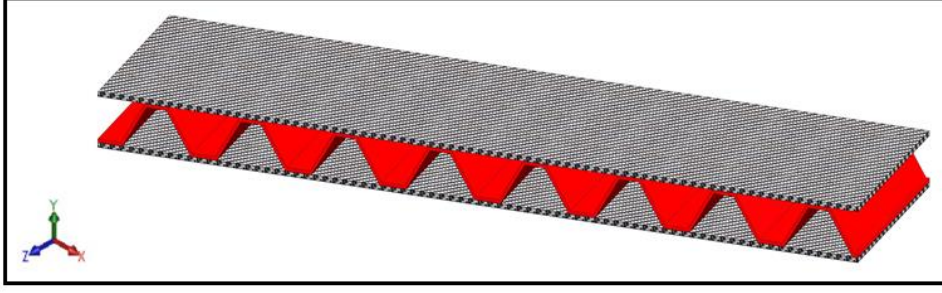
Şekil 3.14. A) Ticari olarak temin edilebilen 3D yazıcının baskı aşaması B) PLA baskı aşaması sonu ile ilgili görüntüsü

Basımı yapılacak tasarımın yazıcı tablasına konumlandırılması ve tablaya yapışması için uygun açının seçilmesi gibi ayarlar yapıldıktan sonra, dilimleme programında Tablo 3.9’da belirtilen parametreler seçilerek tasarım dilimlenmiş ve G-kodları oluşturulmuştur.

Tablo 3.9. Creality Slicer 4.8.2 yazılımında seçilen parametreler

Açıklama	Ölçüler/Özellik
Yazıcı	Creality CRX- Pro
Malzeme	PLA
Filament çapı	1,75 mm
Katman kalınlığı	0,2 mm
Duvar kalınlığı	0,8 / 1,2 / 1,6 mm
Dolgu yoğunluğu	%70, %85, %100
Dolgu deseni	Lines
Yazdırma hızı	75 mm/sn,100 mm/sn,125 mm/sn
Boşta gezme hızı	150 mm/s
Nozul sıcaklığı	220°C
Tabla sıcaklığı	60°C

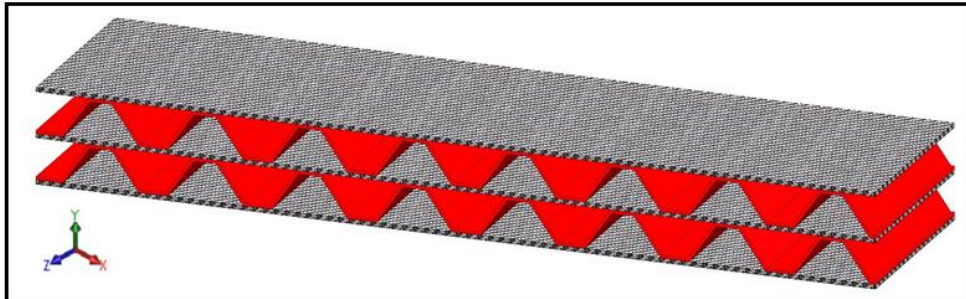
Şekil 3.15'te, Tek Katlı PLA-Carbon fiber Plaka ve PLA çekirdek hücrenin yapıştırılmış hali ve yapıştırıldıktan sonra oluşan sandviç kompozit yapı görülmektedir. Çekirdeklerin üretimine başlamadan önce, numunelerin baskısında kullanılan ticari bir 3D yazıcının özelliklerine uygun olarak tabla manuel şekilde kalibre edilmiştir. Daha sonra, baskı alınacak numunelerde hata payını azaltmak ve baskı kalitesini artırmak amacıyla, yazıcının nozul kısmına takılı bir BLTouch sensörü yardımıyla tablanın 24 farklı noktasına otomatik olarak temas edilerek kalibrasyon gerçekleştirilmiştir. Basımı yapılacak numuneler için robo90 firmasından tedarik edilen kırmızı renkli Robo90 Kırmızı PLA+ (Plus) marka PLA filament takılarak, 20mm ve 10mm yüksekliğinde çekirdek kısımlar üretilmiştir. 3 boyutlu yazıcının tabla ve nozul sıcaklık değerleri, filamentlerin ürün etiketlerinde belirlenen değerlerde yapılmıştır.



Şekil 3.15. Tek Katlı PLA-Carbon fiber Plaka ve PLA çekirdek Hücrenin iki bileşenli epoksi yapıştırıcı ile yapıştırıldıktan sonraki montaj hali

Sandviç kompozit numunelerde yüzey plakası olarak, hacimce %15-20 oranında karbon fiber içeren PLA filamentinden üretilmiştir. Plakalar, 1mm kalınlığında PLA-CF filamentinden eklemeli imalat yöntemiyle 3dyazdiralim firmasından tedarik edilen FROSCH ABS Karbon Fiber 1,75 mm Filamentinden Creality CRX-Pro 3 boyutlu yazıcı ile 200x50 mm ölçülerinde üretilmiştir.

Çekirdekler ile PLA-CF plakaları 3 boyutlu yazıcıda üretmiş ve yapıştırılmasında çift bileşenli epoksi esaslı Selsil yapıştırıcı kullanılmıştır. Şekil 3.16'da yapıştırma işleminden sonra montajı görülen PLA çekirdek hücrelere plakalara spatula yardımıyla yapıştırıcı sürülmüş ve malzemeler birbirinin üzerine koyularak Şekil 3.16'da gösterilen montaj hali elde edilmiştir. Yapıştırılmış kompozit sandviç yapılar, yapıştırıcının tamamen sertleşmesi için oda sıcaklığında 24 saat boyunca 0,5 MPa basınç altında tutuldu. Numuneler, çekirdek yüksekliği 20mm olan ve 1'er mm alt ve üst yüzey kalınlığına sahip basma numuneleri ile 22mm yüksekliğinde tasarlanmıştır. Ayrıca, çekirdek hücre yüksekliği 10mm olan ve alt, üst ve araya konulan 1'er mm kalınlığında plakalarla 2 katlı tasarlanmış numuneler de Şekil 3.16'da gösterilmiştir.



Şekil 3.16. İki Katlı PLA-carbon fiber plaka ve PLA çekirdek hücrenin iki bileşenli epoksi yapıştırıcı ile yapıştırıldıktan sonraki montaj hali

Şekil 3.17'de, Radwag WTB 2000 (Jeotest, 2024) terazisi (Kapasite: 2000 gr, Hassasiyet: 0,01 gr) kullanılarak yapıştırma öncesi ve sonrasında her bir numune için çekirdek ve PLA-CF plakaların kütleleri ayrı ayrı ölçülmüştür.



Şekil 3.17. Radwag WTB 2000 terazisi (Kapasite: 2000 gr, Hassasiyet: 0,01 gr)

Çekirdek numunelere spatula yardımıyla çift bileşenli epoksi esaslı yapıştırıcı sürülmüş ve malzemeler, yüzeyler arasında boşluk kalmayacak şekilde birbirinin üzerine yerleştirilerek oda sıcaklığında yapıştırılmıştır. Birleştirilen sandviç yapılar, yapıştırıcının tam olarak kürlenmesini sağlamak amacıyla 0,5 MPa sabit basınç altında 24 saat boyunca bekletilmiştir. Bu süreç, yapışma yüzeyleri arasında homojen temasın sağlanmasına ve yapıştırıcının mekanik özelliklerinin optimum seviyede gelişmesine katkıda bulunmuştur. Ayrıca, basınç uygulaması sırasında olası hizalama hatalarının önlenmesi için numune konumları dikkatle kontrol edilmiştir.



Şekil 3.18. Çekirdek numunelere spatula yardımıyla çift bileşenli epoksi esaslı yapıştırılması

Eğme testi numuneleri hazırlanırken kullanılan 3D baskı, karmaşık geometrilere sahip sandviç yapıların üretilmesindeki esnekliği ve malzeme israfını en aza indirmesi nedeniyle tercih edilmiştir. Katmanlı imalat, geleneksel yöntemlere kıyasla daha iyi mekanik performans ve hafiflik sunarak üstün sonuçlar sağlamaktadır. Ancak kullanılan 3D yazıcının üretim kapasitesi ve malzeme uyumluluğu nedeniyle yapı tek parça halinde basılamamıştır. Ayrıca çekirdek yapı PLA malzemeden imal edilirken yüzey plakalarının %15-20 oranında karbon katkı maddesi içermesi, farklı malzeme özellikleri nedeniyle monolitik üretimi imkânsız hale getirmiştir. Şekil 3.18’de çekirdek numunelere spatula yardımıyla çift bileşenli epoksi esaslı yapıştırılma aşaması görülmektedir.



Şekil 3.19. Numunelerin bir kısmının yapıştırma öncesinde çekilmiş görüntüleri

Şekil 3.19’da eğme testi numunelerin bir kısmının yapıştırma öncesinde çekilmiş görüntüleri görülmektedir.



Şekil 3.20. Oda sıcaklığında 24 saat boyunca kürlenmiş ve 0,5 MPa basınçta yapıştırılan 81 adet sandviç kompozit yapı numuneleri

Şekil 3.20’de Oda sıcaklığında 24 saat boyunca 0,5 MPa basınçta yapıştırılan 81 adet sandviç yapı üç nokta eğme testi numuneleri görülmektedir.

Tablo 3.10. Üç nokta eğme testi için PLA ve PLA-CF trapezoid çekirdek hücreli kompozit sandviç plakaların kütle değerleri

Numune adı	Trapezoid çekirdek Kütlesi [g]	Yüzeylerin kütlesi [g]	Yapıştırıcı kütlesi [g]	Kompozit Plakanın Kütlesi [g]	Sandviç Plakanın Yoğunluğu [g/cm ³]
1e	10,29	11,75	1,88	34,67	3,47
2e	13,75	11,65	1,65	64,11	6,41
3e	9,77	11,79	1,88	34,15	3,42
4e	24,93	11,75	1,57	49,99	5,00
5e	21,26	11,80	3,83	81,76	8,18
6e	16,43	11,75	1,63	41,55	4,16
7e	23,37	11,65	2,67	49,34	4,93
8e	25,65	11,79	1,39	88,06	8,81
9e	36,62	11,75	1,69	60,82	6,08
10e	27,23	11,80	2,93	94,16	9,42
11e	34,57	11,75	2,02	58,88	5,89
12e	34,24	11,65	1,21	57,64	5,76
13e	16,14	11,79	1,11	68,75	6,88
14e	28,47	11,75	1,01	50,60	5,06
15e	28,51	11,80	1,14	50,30	5,03
16e	13,40	11,75	3,35	65,41	6,54
17e	9,90	11,65	1,87	32,49	3,25
18e	10,02	11,79	1,46	33,99	3,40
19e	23,43	11,75	1,12	48,05	4,81
20e	22,64	11,80	1,77	46,71	4,67
21e	30,50	11,75	1,15	95,90	9,59
22e	13,06	11,65	1,51	35,67	3,57
23e	18,04	11,79	1,85	40,99	4,10
24e	10,24	11,75	2,10	57,84	5,78
25e	20,43	11,80	1,26	43,70	4,37
26e	20,64	11,79	1,39	43,13	4,31
27e	18,88	11,80	1,87	75,03	7,50

Tablo 3.10’da, üç nokta eğme testi için hazırlanan PLA trapezoid çekirdek hücreli kompozit sandviç plakaların kütle değerleri sunulmaktadır. Tabloda numunelerin çekirdek, yüzey ve yapıştırıcı kütleleri ile birlikte toplam kompozit plaka kütleleri ve yoğunlukları gösterilmektedir. Elde edilen veriler, numuneler arasında çekirdek kütesine bağlı olarak toplam kütle ve yoğunluk değerlerinde farklılıklar bulunduğunu ortaya koymaktadır. Bu kapsamda tablo, sandviç yapıların malzeme bileşenlerine göre kütle dağılımını ve yoğunluk değişimlerini sistematik bir biçimde ortaya koymaktadır.



A)



B)

Şekil 3.21. A ve B de üç nokta eğme testi için her bir deney numarası için 3'er adet olmak üzere toplam 81 adet hazırlanmış numunelerinin farklı kesitlerden görünüşü

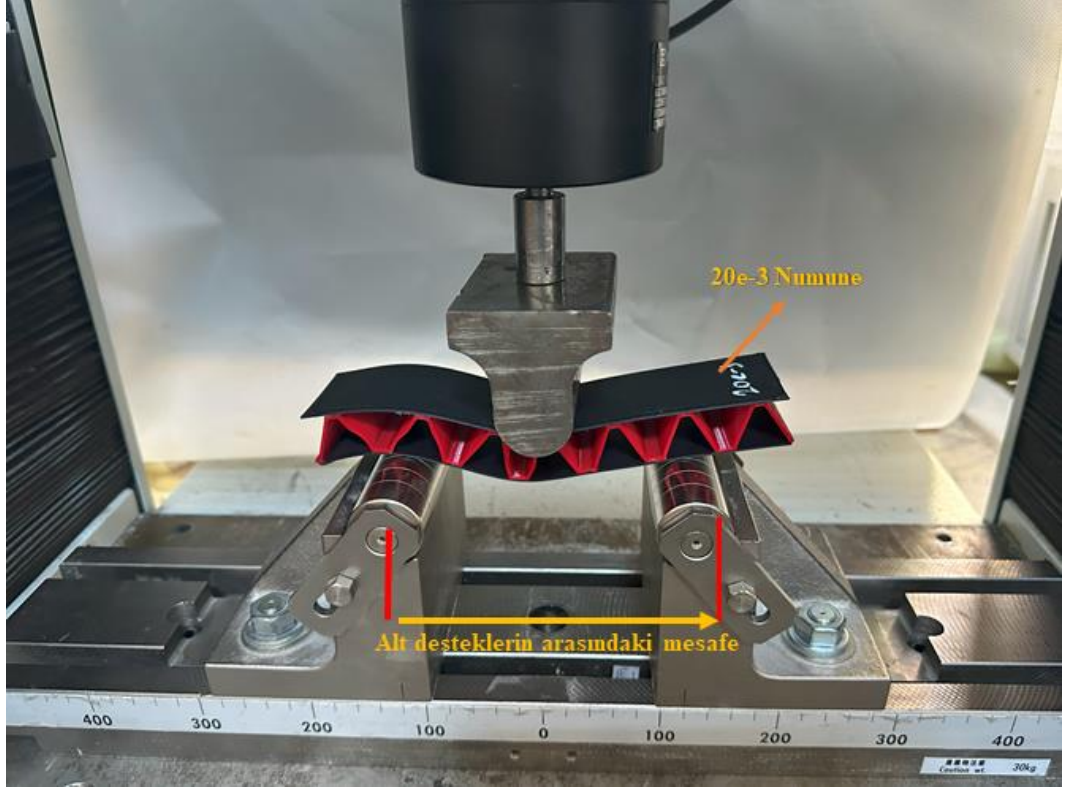
Şekil 3.21'de üç nokta eğme testinde kullanılacak olan eklemeli imalat yöntemi ile hazırlanmış ve epoksi yapıştırıcı ile yapıştırma işleminden geçirilmiş 81 adet sandviç kompozit plakaların farklı açılardan çekilmiş görselleri görülmektedir.

Üç nokta eğme deneyleri, Şekil 3.22'de gösterilen Batman Üniversitesi Makine Mühendisliği Laboratuvarı'nda bulunan Shimadzu AG-IC model 250 kN kapasiteli (Shimadzu, 2023) test cihazı kullanılarak oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Deneyler, 5 mm/dakika yükleme hızıyla uygulanmış ve ASTM C393-16 standardına uygun şekilde yapılmıştır. Bu standart, özellikle sandviç yapıların eğilme dayanımının ve performansının güvenilir ve tekrarlanabilir biçimde ölçülmesini sağlamaktadır. Ayrıca, test parametrelerinin standartlara uygun seçilmesi, elde edilen sonuçların literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırılabilirliğini artırmaktadır.



Şekil 3.22. Deneylerin yapıldığı Shimadzu AG-IC model 250 kN universal test cihazı

Testler sırasında yük, numuneye 30 mm çapındaki silindir şeklindeki yükleyici ile uygulanmıştır. Alt desteklerin arasındaki mesafe 120 mm olarak belirlenmiş ve desteklerin çapı da 30 mm olarak seçilmiştir. Üç nokta eğme testlerinde karşılaşılan en büyük problemlerden biri, numunelerin eğme aparatı üzerine doğru ve tekrarlanabilir şekilde konumlandırılmasıdır. Yanlış yerleştirme, yük dağılımını olumsuz etkileyerek test sonuçlarında sapmalara ve veri güvenilirliğinin azalmasına neden olabilir. Bu nedenle, test öncesinde numunelerin pozisyonunun titizlikle ayarlanması ve sabitlenmesi büyük önem taşımaktadır.



Şekil 3.23. 20e-3 eğme numunesinin test cihazındaki konumu mesnetlerin gösterimi

Yapılan testlerden daha doğru ve güvenilir sonuçların alınabilmesi için numunenin eğme aparatı üzerinde her defasında aynı yerde konumlandırılması gerekmektedir. Bu problemin ortadan kaldırılabilmesi için 30 mm çapındaki silindirin üzerindeki çizgilerden yararlanılmıştır. Aynı nokta üzerinden kuvvet uygulanması suretiyle oluşabilecek konumlandırma hataları sıfırlanmıştır. Şekil 3.23'te, numunenin eğme testi sırasındaki cihazdaki konumu görülmektedir.



a)

b)



c)

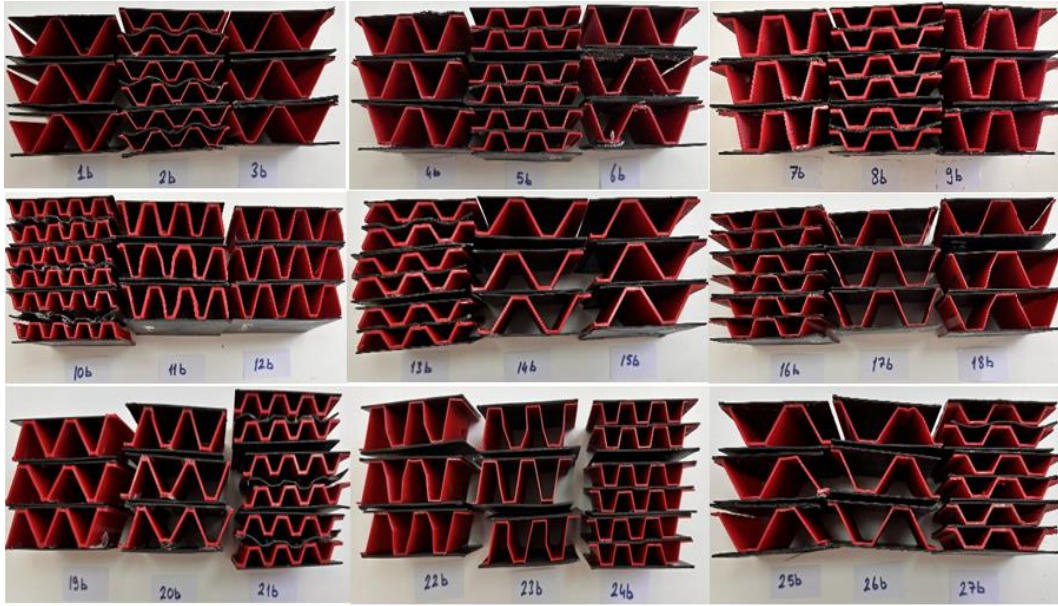
Şekil 3.24. a) Shimadzu AG-IC eğme testi cihazı eğme ünitesi b) Eğme numunesinin test cihazındaki konumu c) Numunelerin deney öncesi görüntüleri

Şekil 3.24'te Batman Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümündeki Shimadzu AG-IC eğme testi cihazı, üç nokta eğme numunenin test cihazındaki konumu ve sonuçların dijital ortama aktarıldığı görseller görülmektedir.

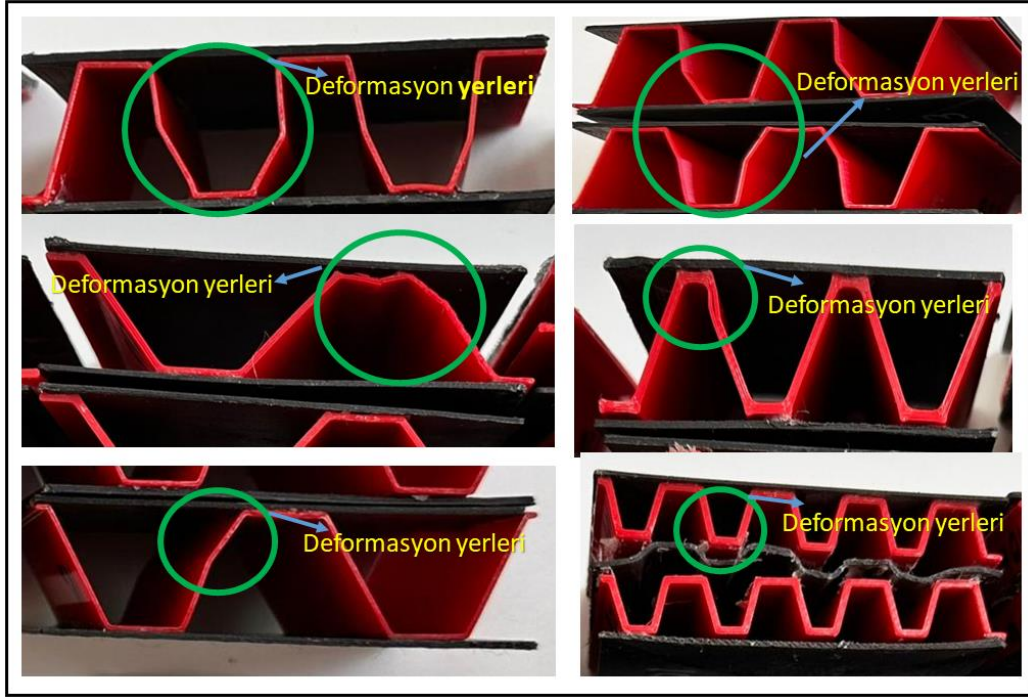
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1. Basma Deneyleri

Her bir numune için üç tekrarlı basma deneyi gerçekleştirilmiş olup, bu sayede ölçüm sonuçlarının güvenilirliği ve istatistiksel doğruluğu artırılmıştır. Deneyler sonrasında malzemelerde gözlemlenen deformasyonlar kayıt altına alınmış ve karakteristik kırılma veya burkulma davranışları incelenmiştir. Elde edilen deformasyon şekilleri, Şekil 4.1’de ayrıntılı olarak sunulmakta olup, bu görseller numunelerin basma yükleri altındaki yapısal tepkilerinin karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.



Basma testi sonucunda deforme olmuş numuneler (A)



Deformasyona uğramış yerlerin örnek kesitler (B)

Şekil 4.1. (A) Basma testi sonucunda deforme olmuş numuneler ve (B) deformasyona uğramış yerlerin örnek kesitler

Tablo 4.1. Basma testi için belirlenen seviye ve faktörler

Faktör	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Hız V (mm/sn)	75	100	125
Dc (mm)	6	9	12
Tc (mm)	0,8	1,2	1,6
Açı (derece)	55	65	75
Doluluk (%)	70	85	100
Katman	1	2	-

4.1.1. Basma testi taguchi yöntemi

Yapılan deneylerde 3 boyutlu yazıcının baskı parametrelerinin sandviç kompozit plakalar üzerindeki basma kuvvetine etkisi araştırılmıştır. Tablo 4.1'de gösterildiği gibi, beş faktör, üç seviye ve bir faktör, iki seviye kullanılmıştır. Bu durumda, $3^5=243$ kombinasyon vardır. Her kombinasyondan üç numune alınacağı düşünülürse, olası hataları doğrulamak için $243 \times 3 = 729$ numunenin basımına ihtiyaç vardır. Bu nedenle, deneysel tasarım, en az sayıda etkili parametreyi belirlemeye olanak tanıyan Taguchi yöntemiyle yapılmıştır. (Nancharaiah, 2010)

Taguchi yöntemi, faktör ve seviye sayısına bağlı olarak uygun bir ortogonal dizi seçerek deney sayısını önemli ölçüde azaltır. Beş faktörlü ve üç seviyeli bir sistem için

en uygun ortogonal dizi L27 dizisidir. L27, 3 seviyeli faktörlerle çalışmak için tasarlanmış ve minimum deney sayısı ile maksimum bilgi elde etmeyi sağlayan bir dizidir. Bu yöntemde, her faktör belirli bir düzen içinde kombinasyonlanarak sadece 27 deneyle en etkili parametrelerin belirlenmesi sağlanmıştır. Seçilen deney kombinasyonları ve fiziki deneylerde elde edilen basma mukavemeti sonuçları Tablo 4.2'de gösterilmiştir. Böylece, 243 farklı kombinasyon yerine yalnızca 27 örnek oluşturarak sonuçların sistematik bir şekilde analiz edilmesi mümkün olmuştur (Nancharaiah, 2010).

4.1.2. Basma testi sonuçlarının ANOVA'ya göre analizi

ANOVA, sapmalara neden olan faktörlere göre, genel ortalamadan elde edilen kare sapmaların toplamını bölerek bu sapmaları analiz etme yöntemidir. Nsikak'a göre (2017) bu çalışmanın amacını, bağımlı değişken üzerindeki deneylerin etkisini incelemek olarak tanımlamıştır.

Varyans analizi (ANOVA), istatistiksel veri değerlendirme sürecinde, farklı gruplar veya deneysel koşullar arasında ortaya çıkan varyasyonun (sapmaların) kaynaklarını belirlemek amacıyla kullanılan güçlü bir yöntemdir. Bu analizde, toplam varyasyon; deneysel faktörlerden kaynaklanan sistematik varyasyon (gruplar arası değişim) ve rastgele hatalardan kaynaklanan varyasyon (grup içi değişim) olmak üzere iki ana bileşene ayrılır. ANOVA, her bir varyasyon bileşeninin kareler toplamını (Sum of Squares) genel ortalamadan sapma miktarına göre hesaplar ve bu bileşenlerin istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını belirlemek için F-testi uygular. Böylece, bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki etkileri, belirli bir güven düzeyinde değerlendirilir.

Nsikak (2017), ANOVA yöntemini, deneysel çalışmalarda bağımlı değişken üzerinde etkili olabilecek faktörlerin istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar yaratıp yaratmadığını incelemek için kullanılan temel bir araç olarak tanımlamaktadır. Makine mühendisliği alanında, bu yöntem özellikle malzeme mekanik özellikleri, imalat parametreleri, ısıtma işlem koşulları, yüzey pürüzlülüğü, yorulma dayanımı veya tribolojik performans gibi çıktı değişkenlerinin optimizasyonunda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu kapsamda, çalışmanın amacı; belirlenen deneysel parametrelerin bağımlı değişken üzerinde oluşturduğu etkinin derecesini ortaya koymak, elde edilen sonuçların

istatistiksel anlamlılığını değerlendirmek ve süreç parametrelerinin optimizasyonuna bilimsel bir temel sağlamaktır.

Tablo 4.2. Basma deneyleri için taguchi yöntemi ile belirlenen numunelerin ölçüleri ve basma mukavemeti sonuçları

Numune adı	Yazma Hızı (mm/sn)	Doluluk (%)	Hücre Genişliği (Dc)	Hücre Kalınlığı (tc)	Hücre Taban Açısı (Θ)	Basma Mukaveti (N)	Katman
1b	75	70	6	0,8	55	413	1
2b	75	85	6	0,8	55	1763	2
3b	75	100	6	0,8	55	1911	1
4b	75	70	9	1,2	65	773	1
5b	75	85	9	1,2	65	1150	2
6b	75	100	9	1,2	65	1797	1
7b	75	70	12	1,6	75	9828	1
8b	75	85	12	1,6	75	9978	2
9b	75	100	12	1,6	75	10578	1
10b	100	70	6	1,2	75	10093	2
11b	100	85	6	1,2	75	11300	1
12b	100	100	6	1,2	75	12242	1
13b	100	70	9	1,6	55	882	2
14b	100	85	9	1,6	55	1351	1
15b	100	100	9	1,6	55	2289	1
16b	100	70	12	0,8	65	670	2
17b	100	85	12	0,8	65	892	1
18b	100	100	12	0,8	65	1466	1
19b	125	70	6	1,6	65	3669	1
20b	125	85	6	1,6	65	4554	1
21b	125	100	6	1,6	65	5671	2
22b	125	70	9	0,8	75	2152	1
23b	125	85	9	0,8	75	3173	1
24b	125	100	9	0,8	75	3429	2
25b	125	70	12	1,2	55	531	1
26b	125	85	12	1,2	55	1234	1
27b	125	100	12	1,2	55	1820	2

Nirmala vd. (2016)'ya göre S/N oranlarına göre, en büyük değer daha iyi sonuç verir. İlkesine göre oluşturulan yanıt tablosu Tablo 4.3'te gösterilmektedir.

1.Yöntem: Küçük olan iyidir. Bu yöntemde sonucu olabildiğince küçük yapmak hedeflenir ve hesap için Formül (1) kullanılır.

$$\frac{S}{N} = -10 * \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right) \quad (4.1)$$

2.Yöntem: Nominal en iyi. Bu yöntemde amaçlanan sonucun dışında çıkan değişkenliği azaltmak hedeflenir ve hesap için Formül (2) kullanılır.

$$\frac{S}{N} = -10 * \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2} \right) \quad (4.2)$$

3.Yöntem: Büyük olan iyidir. Bu yöntemde sonucu olabildiğince büyük yapmak hedeflenir ve ve hesap için Formül (3) kullanılır.

$$\frac{S}{N} = -10 * \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - Y_0)^2 \right) \quad (4.3)$$

R-kare (R^2), regresyon analizinde modelin bağımsız değişkenlerinin bağımlı değişken üzerindeki açıklayıcı gücünü gösteren temel bir istatistiksel ölçüttür. R^2 değeri, modelin verideki toplam varyansı ne kadar açıkladığını belirler ve 0 ile 1 arasında bir değer alır. Yüksek bir R^2 değeri, modelin veriye iyi uyduğunu ve bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki etkisini büyük doğrulukla açıkladığını gösterir. R^2 'nin hesaplanmasında kullanılan formül aşağıdaki şekilde ifade edilir.

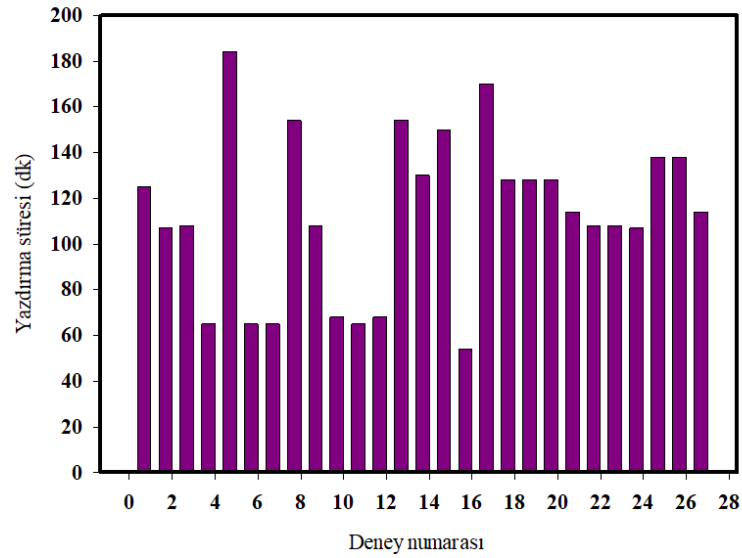
$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (4.4)$$

Burada, y_i gözlemlenen değerleri; $\hat{y}_i$ tahmin edilen değerleri ve $\bar{y}$ ise gözlemlenen değerlerin ortalamasını temsil eder. Bu formülde, $\sum (y_i - \hat{y}_i)^2$ modelin açıklayamadığı hata karelerinin toplamını, $\sum (y_i - \bar{y})^2$ ise toplam varyansı ifade eder (Field, 2013; Gelman & Hill, 2007).

R^2 değeri 1'e yakın olduğunda, modelin bağımsız değişkenleri bağımlı değişkendeki varyansı büyük bir doğrulukla açıklamaktadır. Ancak, yüksek R^2 değerinin her zaman modelin doğruluğunu garanti etmediği unutulmamalıdır; aşırı uyum gibi durumlar, modelin yeni verilere uygulandığında doğruluğunun düşmesine yol açabilir. Bu nedenle, R^2 değeri yalnızca modelin doğruluğunu değerlendiren bir araç olarak kullanılmalı ve modelin uygunluğu başka kriterlerle de değerlendirilmelidir.

Tablo 4.3'te her parametre için üç seviye içinde seçilen en büyük değerler optimum parametre seviyelerini verir (Nirmala et al., 2016). Optimum parametreler tabloda yıldız sembolü ile belirtilmiştir. Tablo 4.3'te delta ile verilen değerler parametrelerin önemini verir. Daha yüksek delta değerlerine sahip parametreler daha

etkili olmuştur. Rank ile gösterilen değerler parametrelerin önem sırasını verir. Bu doğrultuda en etkili parametrenin açısı olduğu görülmektedir. Parametrelerin önem sıralaması şu şekildedir: Açısı, tc (Çekirdek hücre duvar kalınlığı), Dc (Çekirdek Hücre Genişliği), doluluk, hız ve katman. S/N oranlarının parametrelere ve seviyelere göre değişimi Tablo 4.3'te gösterilmektedir. Ayrıca Şekil 4.2'de deney numunelerinin bir tanesinin yazıcıda ortalama üretilme zamanları grafik halinde gösterilmektedir.



Şekil 4.2. Basma testi numunelerin 3d yazıcıda yazdırma süresi

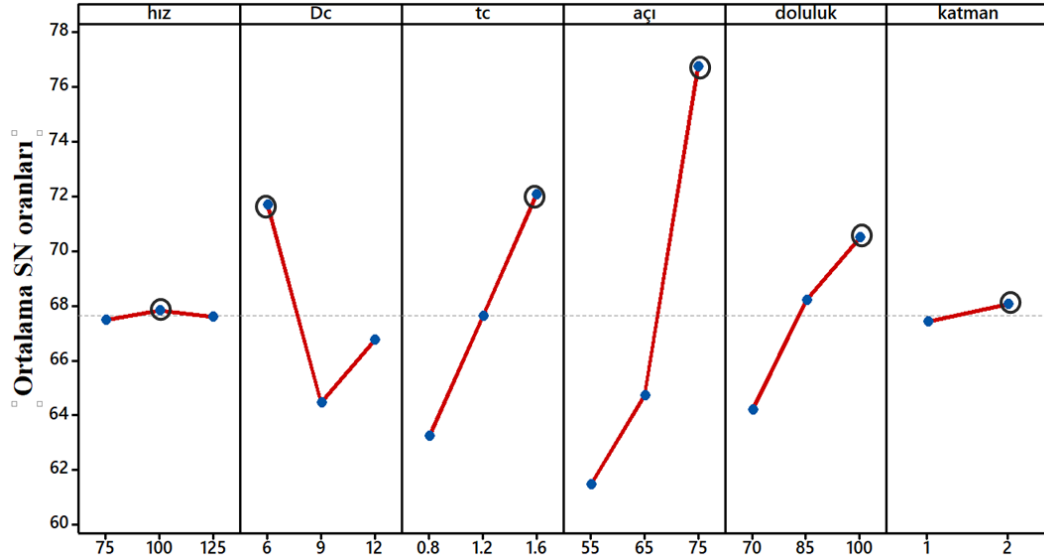
Şekil 4.2'de deneysel numunelerin eklemeli imalat sürelerini gösteren grafik incelendiğinde, üretim süreleri 0-200 dakika aralığında değişmekte olup, numune başına ortalama 100 ± 15 dakika süre kaydedilmiştir. Bu sonuçlar, üretim parametrelerinin zaman verimliliği açısından değerlendirilmesi için önemli bir veri seti sunmaktadır (Gibson et al., 2021).

Tablo 4.3. Basma testi için S/N oranlarını gösteren sonuç tablosu (büyük daha iyidir)

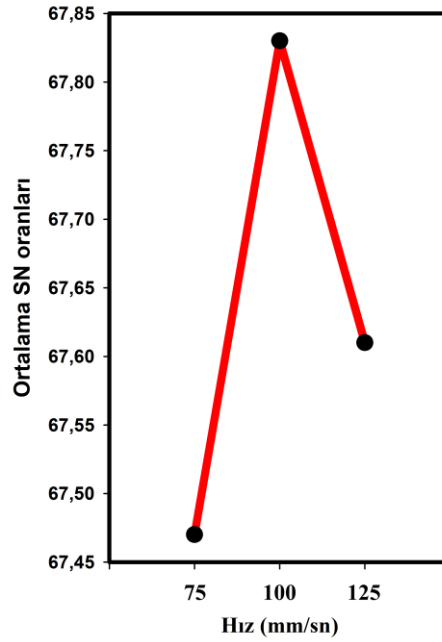
Seviye	Hız	Dc	tc	Açı	Doluluk	Katman
1	67,47	71,70*	63,23	61,46	64,21	67,42
2	67,83*	64,46	67,61	64,72	68,20	68,07*
3	67,61	66,74	72,06*	76,73*	70,49*	67,61
Delta	0,36	7,24	8,83	15,28	6,28	0,65
Rank	6,00	3,00	2,00	1,00	4,00	5,00

*Optimum Seviye

Çalışmada belirlenen kontrol faktörlerinin (baskı hızı, hücre genişliği, hücre duvar kalınlığı, trapezoid hücre taban açısı ve baskı doluluk oranı) ortalama S/N oranları üzerindeki etkileri basma testinden sonra Taguchi yöntemine göre değerlendirilmiş olup, elde edilen sonuçlar Şekil 4.3'te sunulmaktadır. Maksimum değerler çember içerisinde gösterilmiştir.

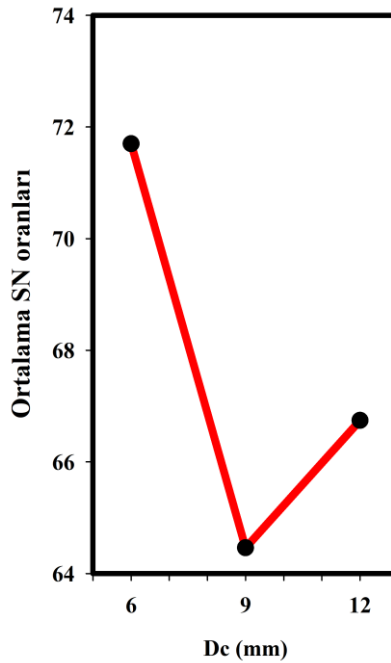


Şekil 4.3. Basma testi sonuçlarına göre ortalama S/N oranları grafikleri



Şekil 4.4. Basma testi sonuçlarına göre hız faktörü için ortalama S/N oranları grafiği

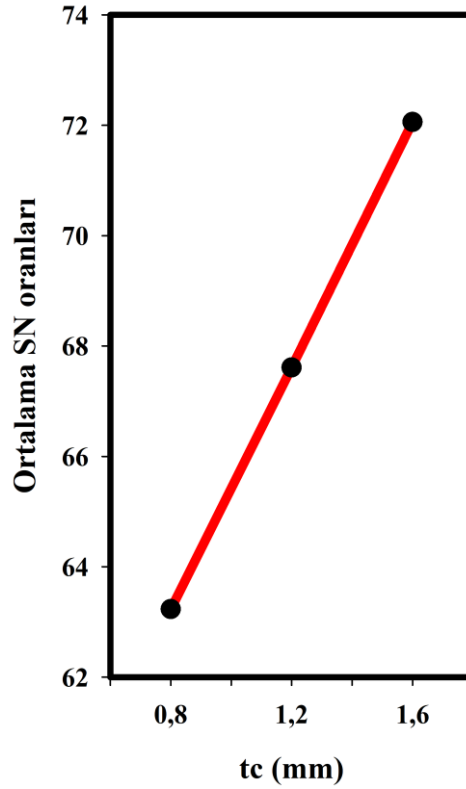
Şekil 4.4'te farklı baskı hızlarının (75, 100, 125 mm/sn) basma dayanımına etkisini gösteren grafikte, hız değişiminin SN oranları üzerinde çok sınırlı bir etki oluşturduğu gözlemlenmektedir. 75 mm/sn hızda 67,85 SN olarak ölçülen ortalama değer, 100 mm/sn'de 67,70 SN'a ve 125 mm/sn'de 67,45 SN'a düşmekle birlikte, bu %0,6'lık toplam düşüş istatistiksel olarak anlamlı kabul edilemeyecek düzeydedir. Grafikte tüm hız değerlerinde SN oranlarının 67,45-67,85 aralığında kalması, test edilen parametre aralığında baskı hızının basma dayanımı üzerinde düşük düzeyde belirleyici bir etkisinin olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, özellikle 75-125 mm/sn hız aralığında üretim parametrelerinin mekanik performansı kritik düzeyde etkilemediğini ve bu nedenle üretim verimliliği açısından daha yüksek hızların tercih edilebileceğini ortaya koymaktadır.



Şekil 4.5. Basma testi sonuçlarına göre Dc faktörü için ortalama SN oranları grafiği

Şekil 4.5'te hücre duvar genişliği Dc parametresinin basma dayanımına etkisini gösteren grafikte, üç farklı değer (6, 9 ve 12 mm) test edilmiştir. Deneysel sonuçlar, Dc artışıyla SN oranlarının düzenli olarak azaldığını göstermektedir: 6 mm'de 74 SN, 9 mm'de 70 SN ve 12 mm'de 64 SN ölçülmüştür. Bu %13,5'lik toplam performans kaybı özellikle 9 mm eşik değerinden sonra belirginleşmekte olup, 6-9 mm aralığında %5,4'lük, 9-12 mm aralığında ise %8,8'lik düşüşler kaydedilmiştir. Grafikteki bu

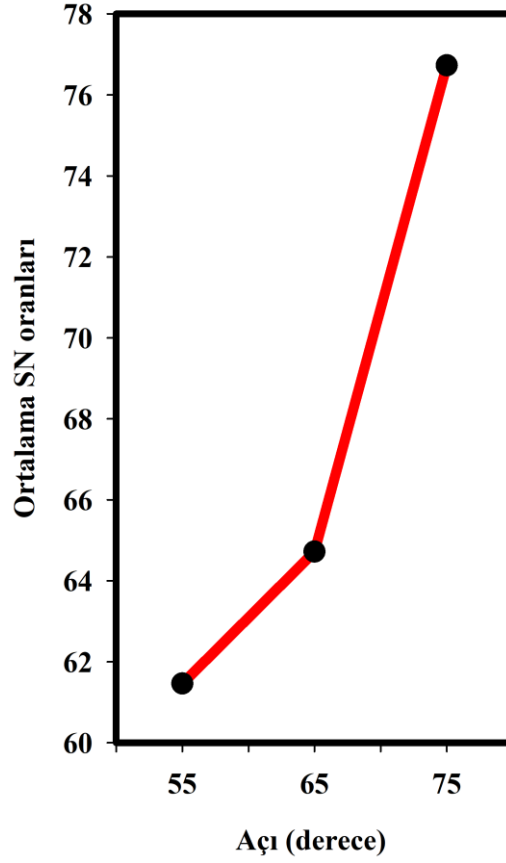
eğilimler, artan duvar genişliğinin hücre geometrisindeki deformasyon mekanizmasını değiştirerek yük transfer verimliliğini azalttığını ve enerji sönümleme kapasitesini düşürdüğünü ortaya koymaktadır. 6 mm duvar genişliğinin en yüksek basma dayanımını (74 SN) sağlamasına karşın, 9 mm üzerindeki değerlerde gözlenen hızlı performans kaybı, bu parametrenin kritik bir eşik değere sahip olduğunu göstermekte ve yüksek basma dayanımı gerektiren uygulamalarda $D_c \leq 9$ mm sınırının korunması gerektiğini desteklemektedir.



Şekil 4.6. Basma testi sonuçlarına göre tc faktörü için ortalama SN oranları grafiği

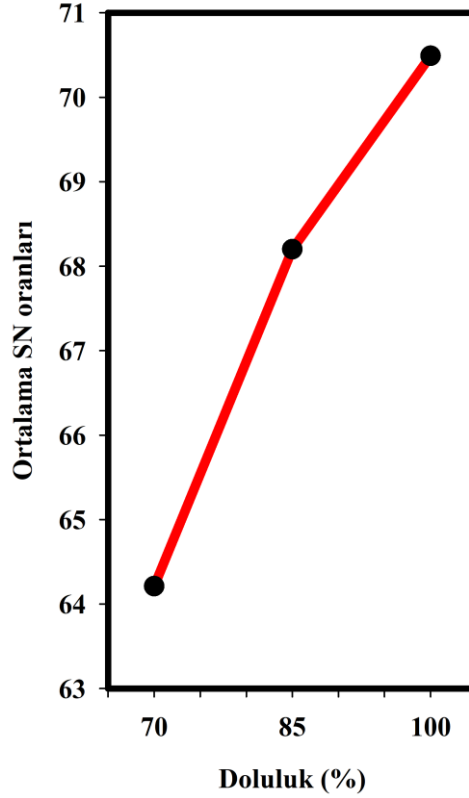
Şekil 4.6'da Trapezoid çekirdek hücre kalınlığının (tc) basma dayanımına etkisini gösteren grafikte, üç farklı kalınlık değeri (0,8-1,2 ve 1,6 mm) test edilmiştir. Sonuçlar, kalınlık arttıkça SN oranlarının düzenli şekilde arttığını göstermektedir: 0,8 mm'de 64 SN, 1,2 mm'de 68 SN ve 1,6 mm'de 72 SN ölçülmüştür. Bu %12,5'lik toplam performans artışı özellikle 1,2 mm'den sonra belirginleşmekte olup, 0,8-1,2 mm aralığında %6,3'lük, 1,2-1,6 mm aralığında ise %5,9'luk iyileşmeler kaydedilmiştir. Grafikteki bu olumlu eğilim, artan trapezoid çekirdek kalınlığının hücre duvarı stabilitesini güçlendirdiğini ve yük transfer mekanizmasını iyileştirdiğini ortaya koymaktadır. 1,6 mm kalınlığın sağladığı 72 SN değeri, test edilen aralıktaki en yüksek

basma dayanımını temsil etmekte olup, yüksek performans gerektiren uygulamalarda $tc \geq 1,2$ mm değerlerinin tercih edilmesi gerektiğini göstermektedir.



Şekil 4.7. Basma testi sonuçlarına göre açı faktörü için ortalama SN oranları grafiği

Şekil 4.7’de hücre açısının basma dayanımına etkisini gösteren grafikte, açı değeri 55°’den 75°’ye artırıldığında ortalama SN oranlarının 72’den 78’e yükseldiği görülmektedir. Bu artış özellikle 65° ile 75° arasında belirginleşmekte olup, yaklaşık %5’lik bir performans iyileşmesine karşılık gelmektedir. Grafikteki eğilimler, artan açı değerlerinin hücre duvarı yönlenmesini iyileştirerek yük transferini optimize ettiğini ve böylece basma dayanımını artırdığını göstermektedir. 75° açı değerinin en yüksek SN oranını vermesi, bu açının test edilen aralıkta optimum değer olduğunu ortaya koymaktadır.



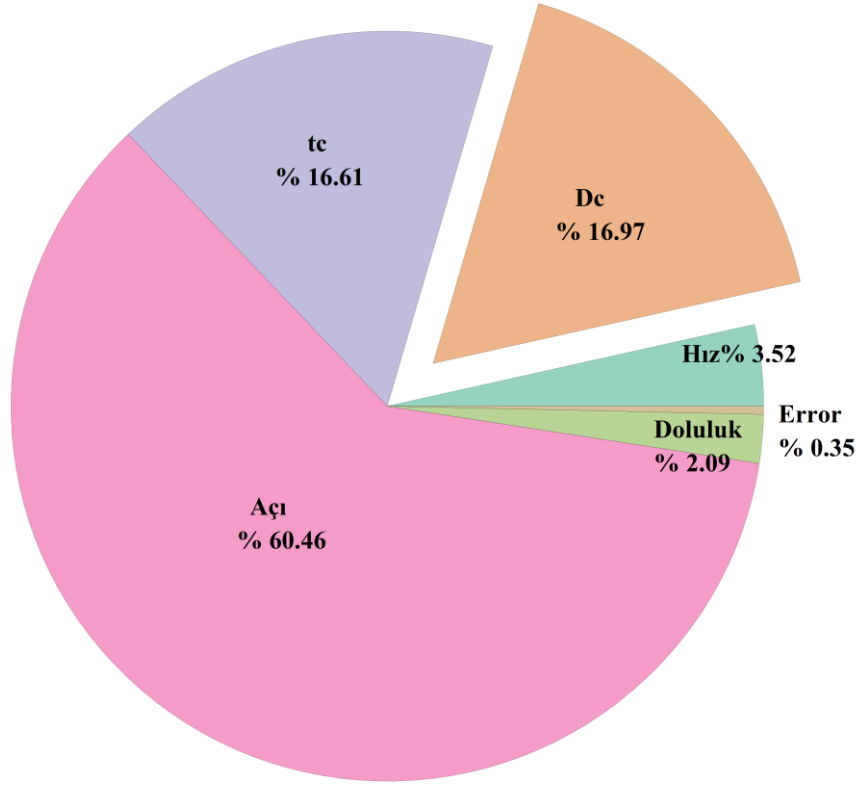
Şekil 4.8. Basma testi sonuçlarına göre doluluk faktörü için ortalama SN oranları grafiği

Şekil 4.8’de doluluk oranının basma dayanımına etkisini gösteren grafikte, üç farklı doluluk değeri (70%, 85%, 100%) test edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, doluluk oranı arttıkça ortalama SN oranlarının düzenli olarak yükseldiği görülmektedir: 70% dolulukta 66 SN, 85% dolulukta 68 SN ve 100% dolulukta 71 SN değerleri ölçülmüştür. Bu artış, doluluktaki her %15’lik artışın yaklaşık 2,5 SN birimlik bir performans iyileşmesine karşılık geldiğini göstermektedir. Özellikle 85% ile 100% doluluk arasındaki 3 SN birimlik fark, yüksek doluluk oranlarının basma dayanımı üzerinde daha etkili olduğunu ortaya koymaktadır. 100% doluluk değerinde ulaşılan 71 SN, test edilen parametre aralığındaki en iyi basma performansını temsil etmektedir.

4.1.3. Basma testi sonuçlarının varyans analizi

Deneysel çalışmalardan elde edilen verileri analiz etmek, yorumlamak ve sonuçlar hakkında karar vermek için istatistiksel yöntemler kullanılır. ANOVA analizi, bağımsız değişkenlerin etkileşimlerinin incelenmesine ve aralarındaki farkın tanımlanmasına olanak sağlayan istatistiksel bir yöntemdir Ulewicz & Bokuvka (2017), Tuncel & Aydın (2023). Bu çalışmada, ANOVA analizlerinin gerçekleştirilmesi için

MiniTab programı kullanılmıştır. Birden fazla faktörün tek bir değişken üzerindeki etkisi incelendiği için tek yönlü varyans analizi tercih edilmiştir. Varyans analizinin sonuçları Tablo 4.4'te gösterilmiş olup Şekil 4.9'da, ise her bir parametrenin yüzde katkısı göstermektedir.



Şekil 4.9. Basma dayanımı için hız, dc, tc, açı, doluluk için varyans analizi grafiği

Tablo 4.4. Basma deneyleri için varyans analizi

Kaynak	DF	Seq SS	Yüzde	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Hız	2	13908152	3,52%	13908152	6954076	75,42	0,0000000148922927
Dc	2	67122206	16,97%	67122206	33561103	363,99	0,0000000000001942
tc	2	65732793	16,61%	65732793	32866396	356,46	0,0000000000002265
Açı	2	239215745	60,46%	239215745	119607872	1297,22	0,0000000000000000
Doluluk	2	8264192	2,09%	8264192	4132096	44,82	0,0000004712491282
Katman	1	10668	0,00%	10668	10668	0,12	0,7384590859105322
Hata	15	1383045	0,35%	1383045	92203		
Toplam	26	395636801	100,00%				

Analysis of Variance (Varyans Analizi) Tablo 4.4'e göre, %60,46 oranında çekirdek hücrenin taban açısının sonuçları üzerinde en büyük etkiye sahip olduğu

görülmektedir. Bu durum, taban açısının farklı düzeylerinin numunelerin basma deneyleri sonuçları üzerinde önemli bir etkisi olduğunu gösterir.

Analysis of Variance (Varyans Analizi) Tablo 4.4'e göre, çekirdek hücrenin taban genişliği (Dc) ölçü değerinin basma mukavemeti deney sonuçlarını %16,97 oranında etkilediği görülmektedir.

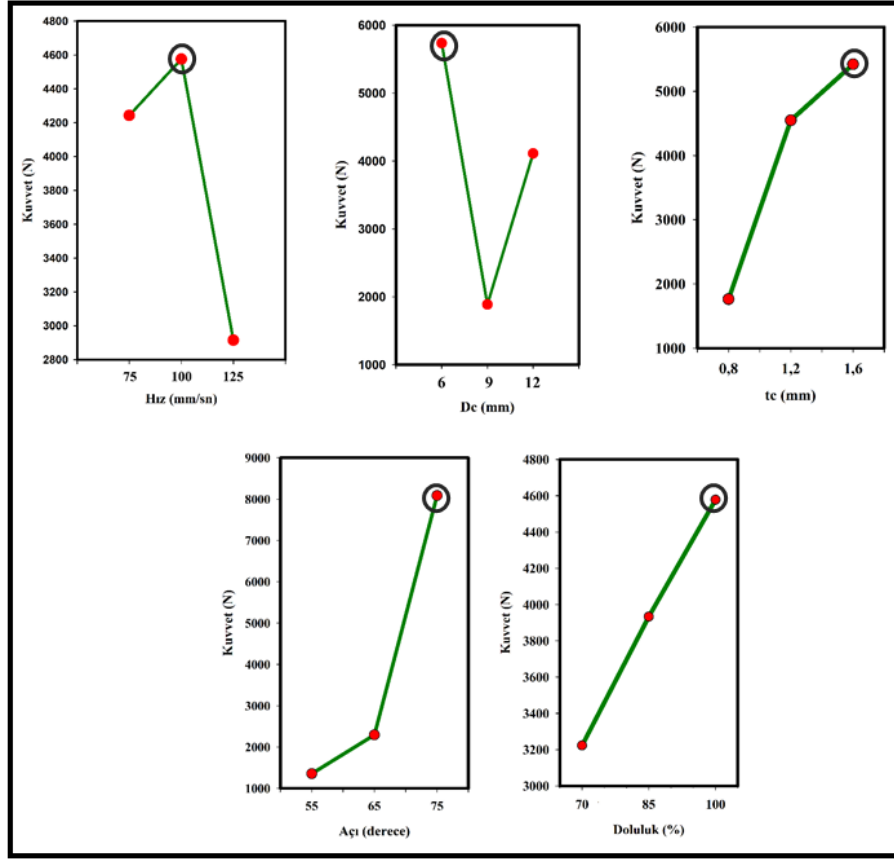
Analysis of Variance (Varyans Analizi) tablosuna göre, çekirdek hücrenin duvar kalınlığı (tc) ölçü değerinin basma mukavemeti deney sonuçlarını %16,61 oranında etkilediği görülmektedir.

Tablo 4.5. Basma deneyleri için yanıt tablosu

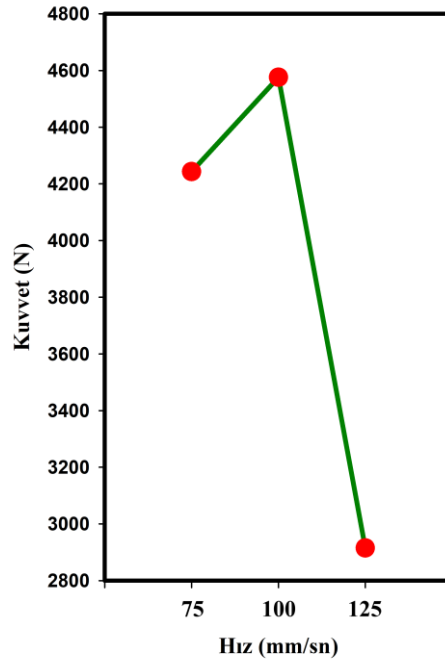
Level	Hız	Dc	tc	Açı	Doluluk	Katman
1	4243	5735	1763	1355	3223	3897
2	4576	1888	4549	2294	3933	3940
3	2915	4111	5422	8086	4578	
Delta	1661	3847	3659	6731	1355	42
Rank	4	2	3	1	5	6

Response Table for Means Tablo 4.5'e göre farklı seviyelerde (1, 2, 3) test edilen faktörlerin (hız, Dc, tc, açı, doluluk, katman) karşılık gelen ortalama yanıtlarını göstermektedir. Tablo 4.5'e göre en iyi sıralama (rank) değeri, taban açısı parametresinin 3. seviyesi olan 75 derecede görülmektedir. Daha sonra sırasıyla hücre genişliği (Dc) 1. seviyesi olan 6mm, hücre duvar kalınlığı (tc) 3. seviyesi olan 1.6mm, doluluk oranının %100 olduğu 3. seviye ve yazma hızı parametresinin 2. seviyesi olan 100mm/sn olarak sıralanmıştır.

Çalışmada belirlenen kontrol faktörlerinin (baskı hızı, hücre genişliği, hücre duvar kalınlığı, trapezoid hücre taban açısı ve baskı doluluk oranı) basma kuvveti üzerindeki etkileri değerlendirilmiş olup, elde edilen sonuçlar Şekil 4.10'da sunulmaktadır. Maksimum değerler çember içerisinde gösterilmiştir.

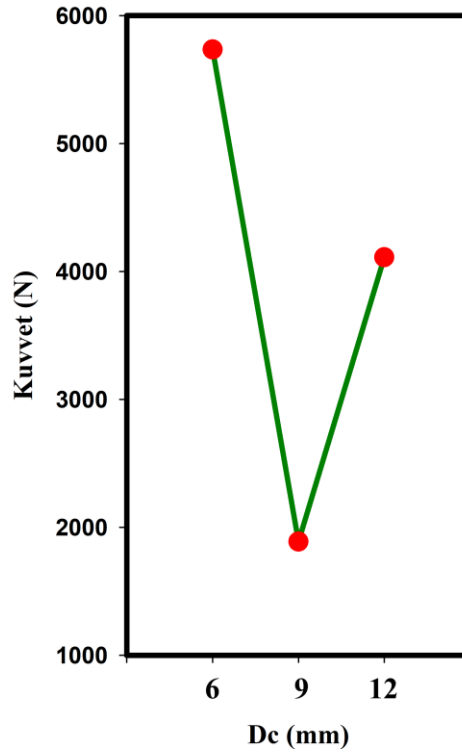


Şekil 4.10. Basma testi sonuçlarının kuvvet grafikleri



Şekil 4.11. Basma deneyleri Hız faktörleri için ortalamalar yanıt tablosu grafiği

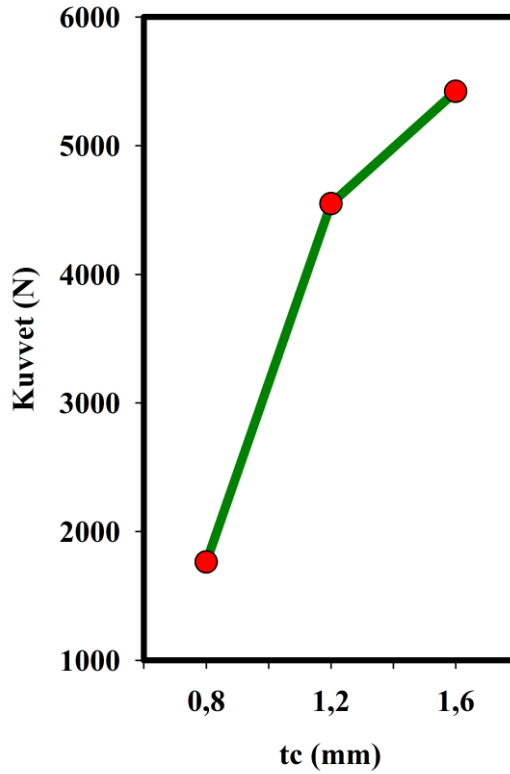
Şekil 4.11’de baskı hızının (75, 100 ve 125 mm/sn) basma dayanımına etkisini gösteren grafikte, hız değişiminin kuvvet değerleri üzerinde belirgin ancak doğrusal olmayan bir etki oluşturduğu gözlemlenmiştir. 75 mm/sn hızda 4250 N olarak ölçülen basma dayanımı, 100 mm/sn’de %8,2 artışla 4600 N’a yükselirken, 125 mm/sn’de ise %31,8 düşüşle 2900 N’a gerilemiştir. Bu sonuçlar, 100 mm/sn hızının optimum üretim parametresi olduğunu, bu hızda malzeme viskozitesinin ideal seviyeye ulaşarak katman bağlanma kalitesini maksimize ettiğini göstermektedir. Ancak 125 mm/sn’ye çıkıldığında aşırı hızın katmanlar arası bağlanmayı bozarak performansı ciddi şekilde düşürdüğü anlaşılmaktadır. Bu bulgular, üretim hızının 100 mm/sn civarında tutulmasının mekanik performans açısından kritik önem taşıdığını ortaya koymaktadır.



Şekil 4.12. Basma deneyleri Dc faktörleri için ortalamalar yanıt tablosu grafiği

Şekil 4.12’da hücre duvar genişliğinin (Dc) basma dayanımına etkisini gösteren grafikte, üç farklı parametre (6, 9 ve 12 mm) test edilmiş olup sonuçlar doğrusal olmayan bir davranış sergilemektedir. 6 mm’de 5735 N olarak ölçülen basma dayanımı, 9 mm’de %67,1’lik dramatik bir düşüşle 1888 N’a gerilemiş, ancak 12 mm’de %117,7’lik bir toparlanmayla 4111 N’a yükselmiştir. Bu beklenmedik eğilim, 9 mm civarında kritik bir geometrik instabilite bölgesi olduğunu, ancak duvar genişliği daha da artırıldığında yapının kısmen stabilize olduğunu göstermektedir. Özellikle 6 mm ile 12 mm arasındaki

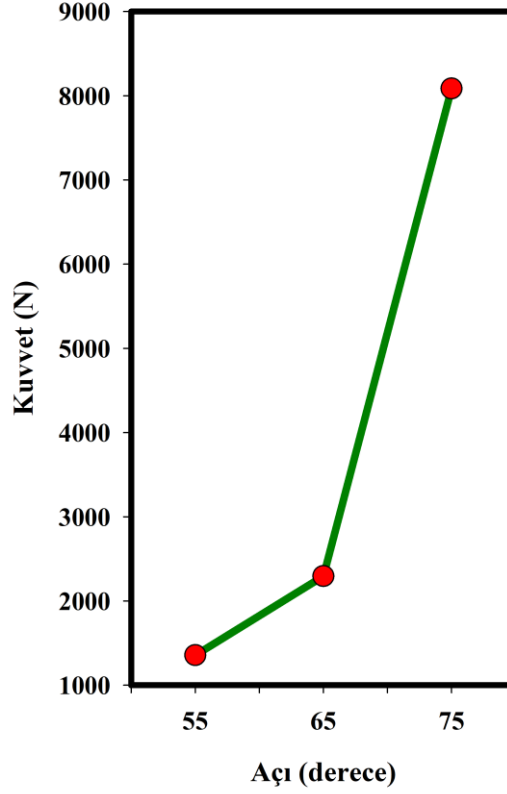
%28,3'lük net performans kaybına rağmen, 9 mm'de gözlenen ani düşüş (%67,1) bu parametrenin tasarımıda kritik bir eşik değeri olduğuna işaret etmektedir. Bu bulgular, hücre duvar genişliği optimizasyonunda 6 mm'nin en yüksek dayanımı sağladığını, 9 mm'den özellikle kaçınılması gerektiğini, 12 mm'de ise kısmi bir iyileşme görülse bile başlangıç değerine ulaşamadığını ortaya koymaktadır.



Şekil 4.13. Basma deneyleri t_c faktörleri için ortalamalar yanıt tablosu grafiği

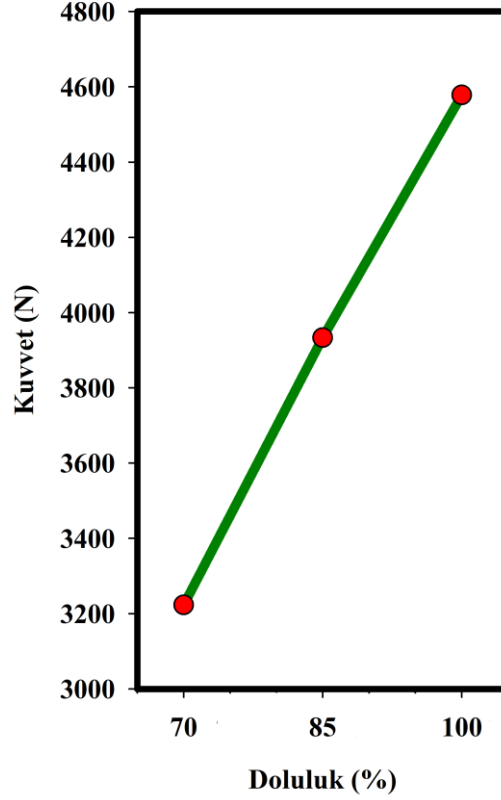
Şekil 4.13'te çekirdek kalınlığının (t_c) basma dayanımına etkisini gösteren grafikte, t_c artışıyla kuvvet değerlerinin belirgin şekilde arttığı görülmektedir. 0,8 mm'de 1763 N olarak ölçülen basma dayanımı, 1,2 mm'de %158'lik önemli bir artışla 4549 N'a ulaşmış, 1,6 mm'de ise %207'lik toplam artışla 5422 N olarak kaydedilmiştir. Bu sonuçlar, çekirdek kalınlığındaki artışın hücre duvarı stabilitesini önemli ölçüde iyileştirdiğini ve yük transfer mekanizmasını güçlendirdiğini ortaya koymaktadır. Özellikle 0,8 mm'den 1,2 mm'ye geçişte gözlenen 2786 N'luk keskin artış, bu aralığın kritik öneme sahip olduğunu göstermektedir. 1,2 mm üzerindeki kalınlık artışlarının ise performansı daha sınırlı düzeyde iyileştirdiği (873 N'luk ek artış) görülmektedir. Bu bulgular, yüksek basma dayanımı gerektiren uygulamalarda $t_c \geq 1,2$ mm değerlerinin

tercih edilmesi gerektiğini, ancak 1,6 mm üzerindeki artışların marjinal fayda sağlayacağını desteklemektedir.



Şekil 4.14. Basma deneyleri Açı faktörleri için ortalamalar yanıt tablosu grafiği

Şekil 4.14'te hücre açısının basma dayanımına etkisini gösteren grafikte, açı değerinin 55°'den 75°'ye artmasıyla kuvvet değerlerinin 1355 N'dan 8086 N'a önemli ölçüde arttığı gözlemlenmiştir. Özellikle 65° ile 75° arasında kuvvet değerlerinde 5792 N'luk (%252,6) dramatik bir artış görülmekte olup, bu eğilim artan açının hücre geometrisini optimize ederek yük transfer verimliliğini belirgin şekilde artırdığını göstermektedir. 55°'de 1355 N olarak ölçülen basma dayanımı, 65°'de %69,3 artışla 2294 N'a yükselirken, 75°'de ise %497'lik etkileyici bir toplam artışla 8086 N'a ulaşmıştır. Bu sonuçlar, 75° açı değerinin test edilen aralıkta en yüksek basma dayanımını sağladığını ve özellikle 65°-75° aralığındaki her 1°'lik artışın yaklaşık 579 N'luk ek yük taşıma kapasitesi kazandırdığını ortaya koymaktadır.



Şekil 4.15. Basma deneyleri doluluk faktörleri için ortalamalar yanıt tablosu grafiği

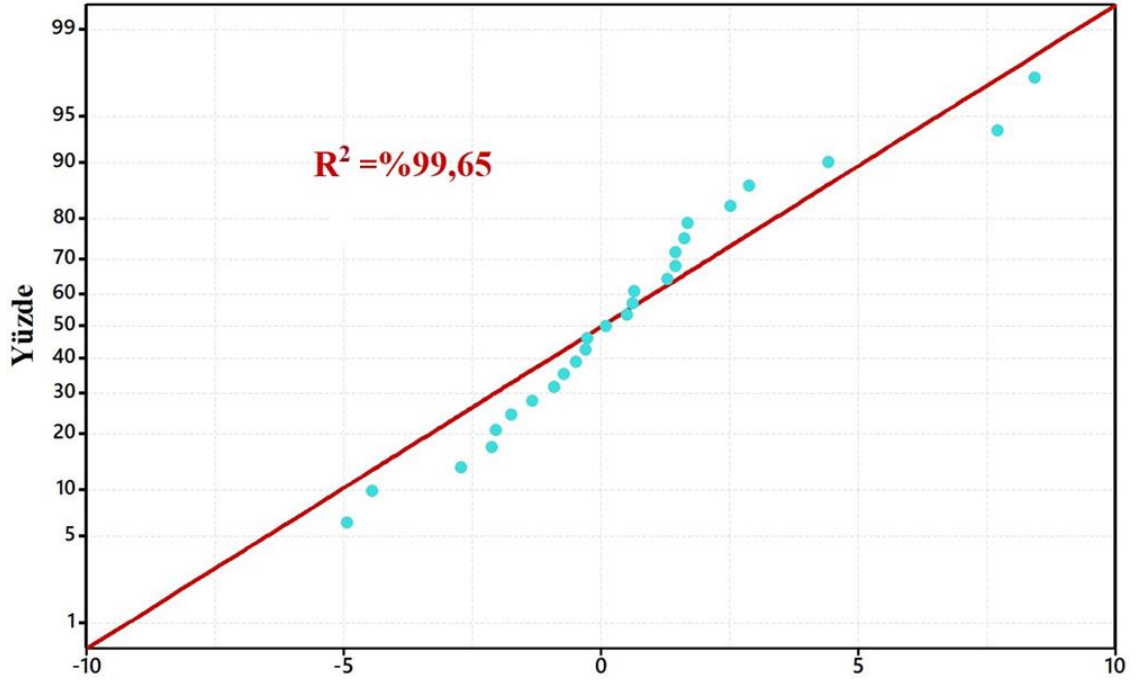
Şekil 4.15’de doluluk oranının basma dayanımına etkisini gösteren grafikte, üç farklı doluluk değeri (70%, 85% ve 100%) test edilmiş olup, doluluk artışıyla kuvvet değerlerinin düzenli olarak arttığı gözlemlenmiştir. 70% dolulukta 3223 N olarak ölçülen basma dayanımı, 85% dolulukta %22’lik artışla 3933 N’a yükselmiş, 100% dolulukta ise %42’lik toplam artışla 4578 N’a ulaşmıştır. Bu sonuçlar, artan doluluk oranının malzeme yoğunluğunu ve iç yapı bütünlüğünü artırarak basma dayanımını iyileştirdiğini göstermektedir. Özellikle 85% ile 100% doluluk arasındaki performans farkı, yüksek doluluk oranlarının mekanik dayanım üzerindeki belirleyici rolünü ortaya koymaktadır. Grafikteki bu eğilimler, yüksek basma dayanımı gerektiren uygulamalarda mümkün olan en yüksek doluluk oranlarının (%100) tercih edilmesi gerektiğini, ancak tasarım kısıtları nedeniyle daha düşük doluluk gerektiren durumlarda en az %85 doluluk oranının hedeflenmesi gerektiğini desteklemektedir.

Şekil 4.16’da basma testi sonuçlarının istatistiksel analizini gösteren grafikte ve Tablo 4.6’da görüldüğü üzere R^2 değeri %99,65 olarak hesaplanmıştır. Bu son derece yüksek determinasyon katsayısı, deneysel verilerin teorik modelle neredeyse mükemmel uyum içinde olduğunu göstermektedir. Grafikteki residual değerlerinin -10 ile +10 aralığında simetrik olarak dağılması ve sıfır çizgisi etrafında yoğunlaşması, ölçümlerin yüksek doğrulukla gerçekleştirildiğinin bir göstergesidir. %99,65’lik R^2 değeri, test sonuçlarının istatistiksel olarak anlamlı ve güvenilir olduğunu, aynı zamanda deneysel metodolojinin tutarlı bir şekilde uygulandığını kanıtlamaktadır. Bu bulgular, basma testi verilerinin istatistiksel analizlerde güvenle kullanılabileceğini ve sonuçların yüksek bir güvenilirlik düzeyine sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

R-kare (R^2), istatistiksel analizlerde bir modelin bağımsız değişkenleri ile bağımlı değişken arasındaki ilişkinin ne kadar güçlü olduğunu gösteren bir ölçüttür. Özellikle varyans analizi (ANOVA) gibi yöntemlerde, modelin açıklayıcı gücünü belirlemede önemli bir yer tutar. R^2 , modelin açıklayabildiği toplam varyansın yüzdesini belirtir ve genellikle 0 ile 1 arasında bir değere sahiptir. R^2 değeri 1’e yaklaştıkça, modelin veri üzerindeki açıklayıcılığı artar, yani model bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki etkisini yüksek doğrulukla tahmin edebilmektedir (Field, 2024). Örneğin, bir regresyon modelinde R^2 değeri %99,65 olarak verildiğinde, bu, modelin bağımsız değişkenlerinin bağımlı değişkendeki varyansın %99,65’ini açıkladığını ve modelin oldukça güvenilir olduğunu gösterir. Bu durum, modelin veriye ne denli iyi uyduğunu ve sonuçların yüksek doğrulukla elde edilebileceğini işaret eder. Ancak, yüksek bir R^2 değeri her zaman modelin doğru olduğu anlamına gelmez; modelin doğruluğu, kullanılan veri setine ve modelin tasarımına bağlı olarak farklılık gösterebilir (Gelman & Hill, 2007).

Tablo 4.6. Basma deneyi sonucunda oluşan model özeti

S	R-sq	R-sq(adj)	Press	R-sq(pred)
303,649	99,65%	99,39%	4645060	98,83%



Şekil 4.16. Basma testi için sonuçların sapma oranı

4.1.4. Basma testi genel sonuçları

Sonuçlar incelendiğinde, taban açısının genişlemesiyle birlikte basma dayanımının arttığı tespit edilmiştir. Response Table for Means analizinde, taban açısı, duvar kalınlığı ve duvar genişliğinin artmasıyla basma kuvvetinin de arttığı görülmüştür. En yüksek basma dayanımı, 75° taban açısında 8086 N, 1,6 mm duvar kalınlığında 5422 N, 6 mm duvar genişliğinde 5735 N, 100 mm/sn yazdırma hızında 4576 N ve %100 doluluk oranında 4578 N olarak kaydedilmiştir. Varyans analizinde, taban açısının basma dayanımına %60,46 ile en büyük etkiyi yaptığı, bunu sırasıyla duvar genişliği (%16,97), duvar kalınlığı (%16,61), yazdırma hızı (%3,52) ve doluluk oranının (%2,09) izlediği belirlenmiştir. Eklemeli imalat ile üretilen sandviç kompozit plakalar için yapılan regresyon analizinde ise $R^2 = \%99,67$ değeri elde edilmiştir.

4.1.5. Basma testi tartışma

Bu çalışmada, üç farklı hücre genişliği ve duvar kalınlığı ölçüsü belirlenmiş ve polilaktik asit (PLA) filamentinden çekirdek hücreler 3D yazıcıyla üretilmiştir. Alt ve üst yüzey plakaları, %15-20 oranında karbon fiber içeren takviyeli kompozit

plakalardan eklemeli imalat yöntemiyle üretilmiştir. Üretilen numuneler epoksi yapıştırıcı ile birleştirilmiştir.

Bu tür sandviç yapıların en önemli potansiyel kullanım alanlarından biri havacılık ve uzay endüstrisidir. Ağırlığın azaltılması yakıt verimliliği ve genel performans için kritik bir faktör olduğundan, katkılı olarak üretilen sandviç paneller uçak iç mekanları, hafif yapısal bileşenler ve ısı yalıtım uygulamaları için ideal bir çözüm sunmaktadır.

Benzer şekilde, inşaat sektöründe, katkılı olarak üretilen sandviç yapılar yüksek performanslı, hafif ve uygun maliyetli yapı malzemelerinin geliştirilmesine katkıda bulunabilir. Bu tür yapılar modüler yapılarda, cephe panellerinde ve yapısal güçlendirme uygulamalarında kullanılabilir. Ayrıca gelişmiş termal ve akustik yalıtım özellikleri sunarak malzeme israfını azaltabilir ve inşaat süresini kısaltabilirler.

Çalışmada, bir ve iki katmanlı sandviç kompozit plakaların basma dayanımları deneysel olarak incelenmiştir. Beş farklı parametre belirlenmiş ve bunlar sırasıyla hız, doluluk, hücre genişliği (Dc), çekirdek hücre duvar kalınlığı (tc) ve trapezoid taban açısıdır. Yazdırma hızı; 75, 100 ve 125mm/sn Doluluk; %70, %85, %100. Dc (Çekirdek Hücre Genişliği); 6mm, 9mm, 12mm. Tc (Çekirdek Hücre Kalınlığı); 0,8-1,2 ve 1,6 mm Hücre Taban Açısı 550, 650, 750 tek katlı ve iki katlı numuneler için ise yükseklik 10 ve 20 mm olacak şekilde belirlenmiştir. Bu ölçülere sahip trapezoid hücre geometrileri kullanılmıştır. Bir ve iki katmanlı numunelere basma testleri uygulanmıştır.

Sonuçlar incelendiğinde taban açısı genişledikçe basma dayanımının yükseldiği ortaya çıkmıştır. Yanıt tablosunda taban açısı, duvar kalınlığı ve duvar genişliği arttıkça yine basma kuvvetinin arttığı sonucu ortaya çıkmış hücre taban açısı en geniş açı olan 75 derecede 8086 N, en iyi hücre duvar kalınlığı 1,6 mm olan değerde 5422 N, hücre duvar genişliği 6mm olan değerde ise en iyi sonucun 5735 N, yazdırma hızı 100 mm/sn değerinde en yüksek sonuç 4576 N, dolulukta ise %100 dolu olarak basılan numunelerin sonucunda çıkan 4578 N değerlerinin çıktığı görülmektedir.

Varyans analizinde ise sandviç plakalarda yapılan basma deneyleri sonuçlarına taban açısı %60,46 oranında en yüksek etkiyi göstermektedir. Bu sonucu sırasıyla Dc %16,97 - tc %16,61. yazdırma hızı %3,52 ve doluluk %2,09 oranında etkilediği sonucu ortaya çıkmıştır.

Bu sonuçlar, Kaveloğlu'nun (2022) hem deneysel çalışmalarında hem de sonlu elemanlar analizlerinde, aynı yüzey alanı ve kütleyle sahip petek yapıların hücre

genişliği değerleri artsa da, hücre duvarı kalınlığının artması nedeniyle maksimum basma kuvvetlerinin de arttığını göstermiştir. Bu artış, basma deneyleri ve sayısal analiz sonularında, PLA örneklerinde yaklaşık %6 ve %10 ABS örneklerinde ise %15 ve %20 oranlarında elde edilen sonularla uyumlu olmuştur.

Taguchi yöntemi, daha az sayıda deneyle en etkili parametreleri bulmamıza olanak sağlayarak hem zaman hem de maliyet israfını önler. Ayrıca, henüz yapılmamış ancak mümkün olan deneylerin sonularını tahmin etme yeteneği sayesinde de kaynak tasarrufu sağlar. Bu alışmada, Kaveloğlu'nun (2022) sandviç plakalarda bal peteği yapısına dayanan çekirdek hücreler üzerine yaptığı çalışmanın sonularıyla uyumlu bulgular elde edilmiştir. Çalışmanın R^2 değerinin %99,65 çıkması, deney sonularının birbiriyle anlamlı bir tutarlılık gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Bayraklılar (2024) tarafından yapılan çalışmada, akrilonitril bütadien stiren (ABS) malzeme ile %50 dolgu oranı ve 0,2 mm duvar kalınlığı kullanılarak elde edilen sonular, yapay sinir ağları (YSA) ile yapılan tahminlerin %90'ın üzerinde doğruluk oranı sağladığını gösterirken; yaptığımız çalışmada farklı bir geometri olan trapezoid hücre deseni kullanılarak %99,67 gibi yüksek bir doğruluk oranı elde edilmiştir.

Varyans analizi sonuları, taban açısının %60,46 oranında en yüksek etkiyi sağladığını, ardından duvar kalınlığı ve genişliği ile yazdırma hızının sırasıyla %16,97- %16,61 - %3,52 ve doluluğun %2,09 oranında etkilediğini göstermektedir. Benzer şekilde, Bayraklılar (2024) alışmasında, farklı geometri ve üretim koşulları altında raster açısının tahmininde RFR modelinin sağladığı yüksek doğruluk oranları dikkat çekmektedir. Her iki çalışmada da, üretim süreçlerinin optimizasyonu ve etkinliği artırmaya yönelik yapılan bu araştırmalar, eklemeli üretim alanında yapay zekâ ve makine öğrenimi uygulamalarının önemli olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

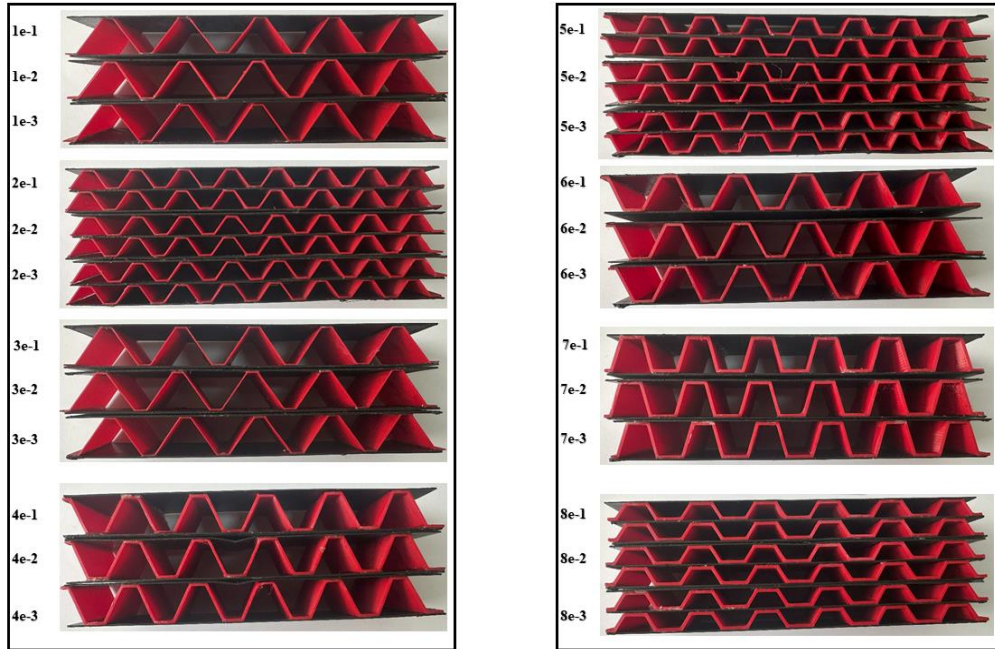
Sonular karşılaştırıldığında, eklemeli imalat ile üretilen sandviç kompozit plakalar üzerine yapılan çalışmada regresyon katsayısının $R^2 = %99,67$ olduğu ortaya ıkmiş ve Taguchi yöntemi ile elde edilen bu değer, iyi bir model oluşturulduğunu göstermektedir. Ulkir vd. (2023) yapmış olduğu çalışmada eriyik biriktirme modelleme (FDM) ile 3B yazıcılarda enerji tüketimini tahmin etmek amacıyla kullanılan Gauss Süreci Regresyon algoritması, $R^2 = 0,99$ - MAE = 0,016 - RMSE = 0,022 ve MSE = 0,00049 değerleriyle yüksek bir doğruluk sağlamıştır. Bu karşılaştırmalar ve çıkan deneylerden elde edilen sonuların literatürle uyumlu olmasından dolayı eklemeli retim (AM) sektöründe artan enerji tüketiminin, enerji verimliliği optimizasyonunu daha da

önemli hale getirdiğini göstermektedir. Her iki çalışmada da elde edilen yüksek doğruluk oranları, makine öğrenimi uygulamalarının üretim süreçlerinin etkinliğini artırma potansiyelini ortaya koymakta ve enerji tüketiminin daha iyi yönetilmesine katkıda bulunmaktadır.

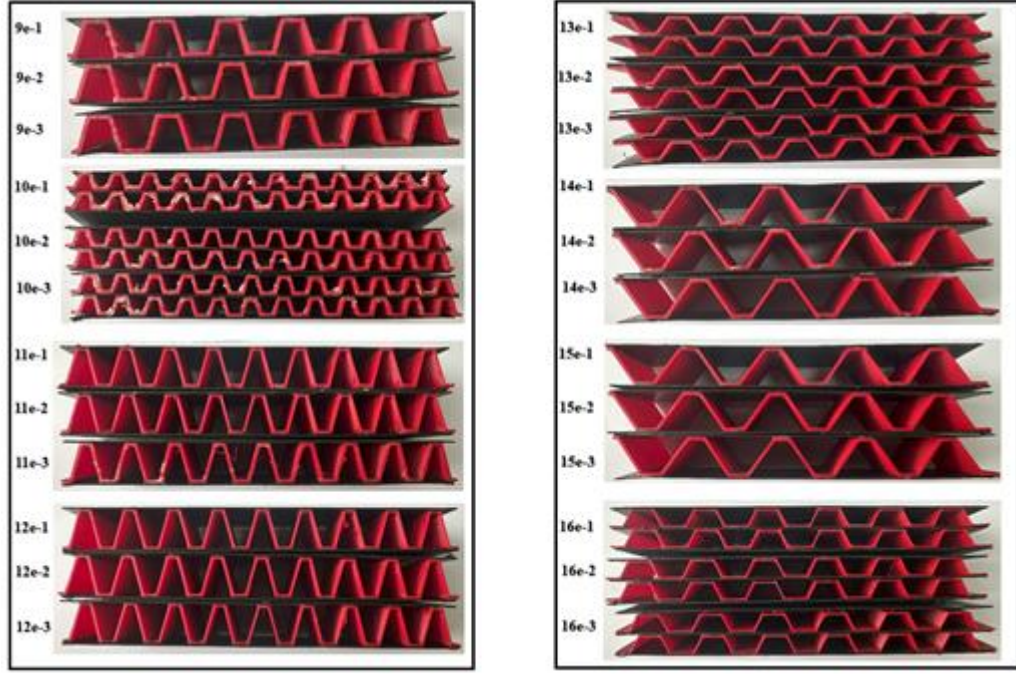
Eklemeli imalat yöntemi malzeme israfının olmaması, yerinde üretim ve karmaşık geometrilerin üretilmesi açısından rakiplerine göre önemli avantajlara sahiptir. Ancak ürün kalitesi ve maliyeti gibi alanlarda eksiklikler yaşanmaktadır. Bu alanda daha fazla çalışmaya ihtiyaç olduğu ortaya çıkmıştır.

4.2. Eğme Deneyleri

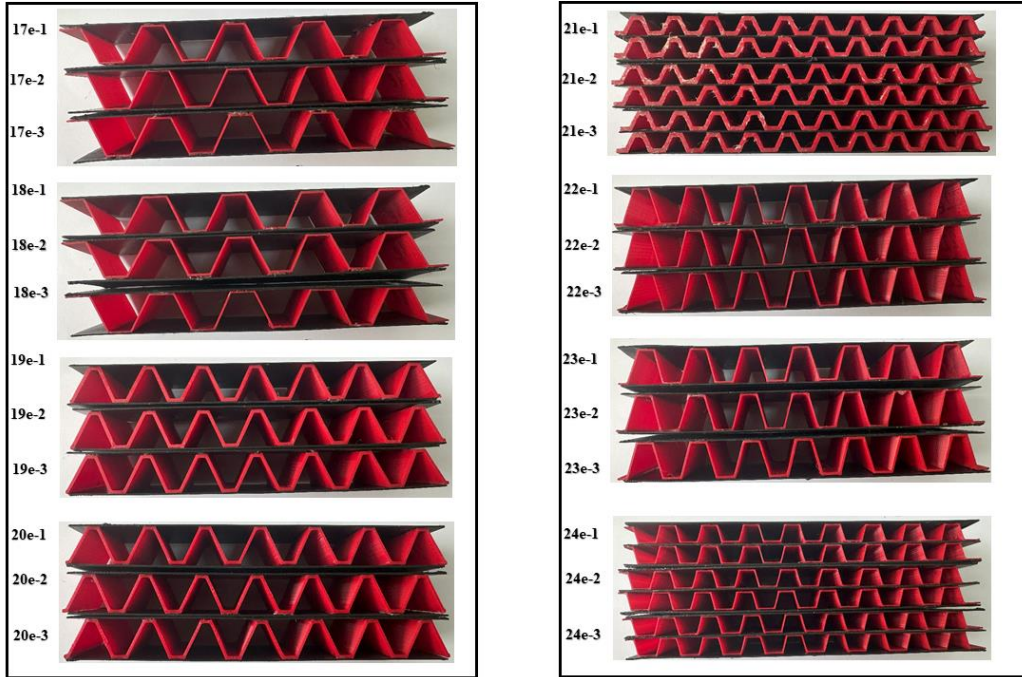
Her bir numune için üç tekrarlı eğme deneyi gerçekleştirilmiş olup, bu sayede ölçümlerin tekrarlanabilirliği ve sonuçların istatistiksel güvenilirliği sağlanmıştır. Deneyler sonrasında malzemelerde meydana gelen deformasyonlar, farklı numune tipleri için ayrı ayrı gözlemlenmiş ve kayıt altına alınmıştır. Elde edilen deformasyon şekilleri, Şekil 4.17, Şekil 4.18, Şekil 4.19 ve Şekil 4.20’de detaylı olarak sunulmuştur. Bu görseller, malzeme yapısının eğilme yükleri altındaki davranışını değerlendirmek ve yapısal performansı karşılaştırmak açısından önemli bir veri seti oluşturmaktadır.



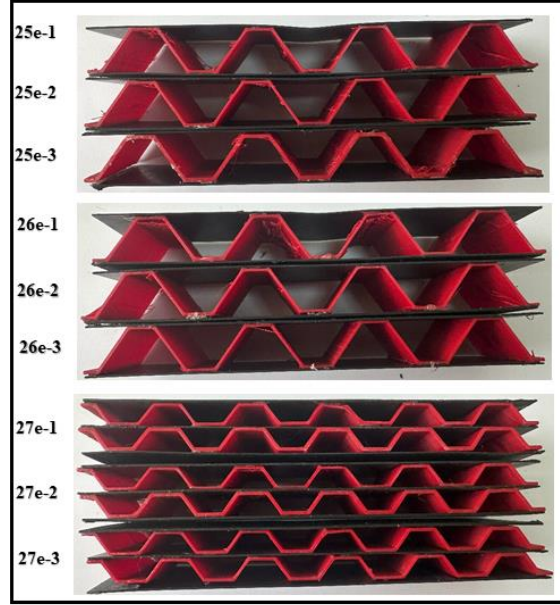
Şekil 4.17. Eğme testi sonucunda deforme olmuş numuneler 1e-8e aralığı



Şekil 4.18. Eğme testi sonucunda deforme olmuş numuneler 9e-16e aralığı



Şekil 4.19. Eğme testi sonucunda deforme olmuş numuneler 17e-24e aralığı



Şekil 4.20. Eğme testi sonucunda deforme olmuş numuneler 25e-27e aralığı

Tablo 4.7. Eğme deneyleri için belirlenen seviye ve faktörler.

Faktör	Seviye1	Seviye2	Seviye3
Hız (mm/sn)	75	100	125
Dc (mm)	6	9	12
Tc (mm)	0,8	1,2	1,6
Açı (derece)	55	65	75
Doluluk (%)	70	85	100
Katman	1	2	-

4.2.1. Eğme testi taguchi yöntemi

Yapılan deneylerde 3 boyutlu yazıcının baskı parametrelerinin sandviç kompozit plakalar üzerindeki eğme kuvvetine etkisi araştırılmıştır. Tablo 4.7'de gösterildiği gibi, beş faktör, üç seviye ve bir faktör iki seviye kullanılmıştır. Bu durumda, $3^5=243$ kombinasyon vardır. Her kombinasyondan üç numune alınacağı düşünülürse, olası hataları doğrulamak için $243 \times 3=729$ numunenin basımına ihtiyaç vardır. Bu nedenle, deneysel tasarım, en az sayıda etkili parametreyi belirlemeye olanak tanıyan Taguchi yöntemiyle yapılmıştır. (Nancharaiah, 2010)

Taguchi yöntemi, faktör ve seviye sayısına bağlı olarak uygun bir ortogonal dizi seçerek deney sayısını önemli ölçüde azaltır. Beş faktörlü ve üç seviyeli bir sistem için en uygun ortogonal dizi L27 dizisidir. L27, 3 seviyeli faktörlerle çalışmak için

tasarlanmış ve minimum deney sayısı ile maksimum bilgi elde etmeyi sağlayan bir dizidir. Bu yöntemde, her faktör belirli bir düzen içinde kombinasyonlanarak sadece 27 deneyle en etkili parametrelerin belirlenmesi sağlanmıştır. Seçilen deney kombinasyonları Tablo 4.7'de gösterilmiştir. Böylece, 243 farklı kombinasyon yerine yalnızca 27 örnek oluşturarak sonuçların sistematik bir şekilde analiz edilmesi mümkün olmuştur.

4.2.2. Eğme testi sonuçlarının ANOVA'ya göre analizi

ANOVA, sapmalara neden olan faktörlere göre, genel ortalamadan elde edilen kare sapmaların toplamını bölerek bu sapmaları analiz etme yöntemidir. Nsikak (2017)'e göre bu çalışmanın amacını, bağımlı değişken üzerindeki deneylerin etkisini incelemek olarak tanımlamıştır.

Varyans analizi (ANOVA), istatistiksel veri değerlendirme sürecinde, farklı gruplar veya deneysel koşullar arasında ortaya çıkan varyasyonun (sapmaların) kaynaklarını belirlemek amacıyla kullanılan güçlü bir yöntemidir. Bu analizde, toplam varyasyon; deneysel faktörlerden kaynaklanan sistematik varyasyon (gruplar arası değişim) ve rastgele hatalardan kaynaklanan varyasyon (grup içi değişim) olmak üzere iki ana bileşene ayrılır. ANOVA, her bir varyasyon bileşeninin kareler toplamını (Sum of Squares) genel ortalamadan sapma miktarına göre hesaplar ve bu bileşenlerin istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını belirlemek için F-testi uygular. Böylece, bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki etkileri, belirli bir güven düzeyinde değerlendirilir.

Nirmala vd., (2016)'ya göre S/N oranlarına göre, en büyük değer daha iyi sonuç verir. İlkesine göre oluşturulan yanıt tablosu Tablo 4.9'da gösterilmektedir.

1.Yöntem: Küçük olan iyidir. Bu yöntemde sonucu olabildiğince küçük yapmak hedeflenir ve hesap için Formül (1) kullanılır.

$$\frac{S}{N} = -10 * \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right) \quad (4.5)$$

2.Yöntem: Nominal en iyi. Bu yöntemde amaçlanan sonucun dışında çıkan değişkenliği azaltmak hedeflenir ve hesap için Formül (2) kullanılır.

$$\frac{S}{N} = -10 * \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2} \right) \quad (4.6)$$

3.Yöntem: Büyük olan iyidir. Bu yöntemde sonucu olabildiğince büyük yapmak hedeflenir ve ve hesap için Formül (3) kullanılır.

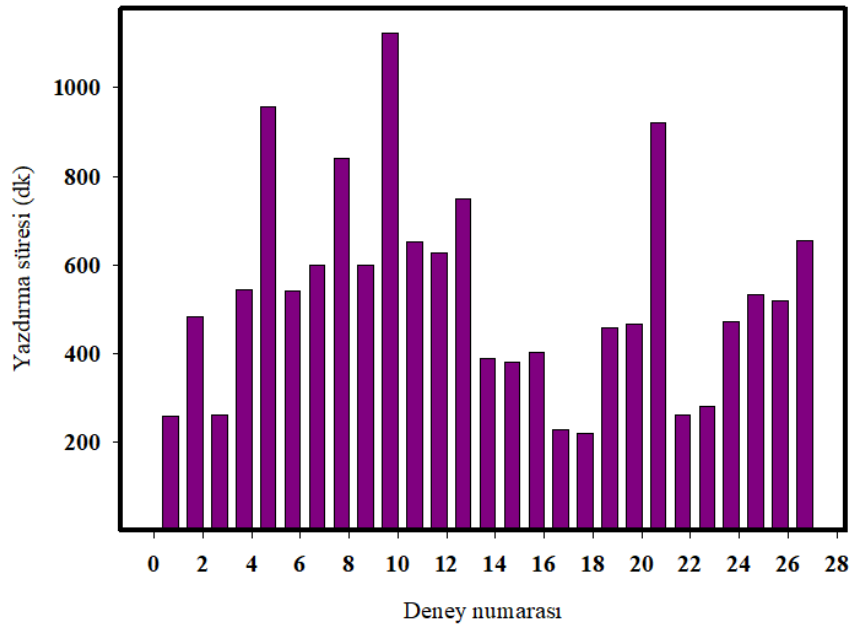
$$\frac{S}{N} = -10 * \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - Y_0)^2 \right) \quad (4.7)$$

Tablo 4.8. Eğme deneyleri için Taguchi yöntemi ile belirlenen numunelerin ölçüleri

Numune adı	Yazma Hızı (mm/sn)	Doluluk (%)	Hücre Genişliği (Dc)	Hücre Kalınlığı (tc)	Hücre Taban Açısı (Θ)	Eğme Mukavemeti (N)	Katman
1e	75	70	6	0,8	55	797,44	1
2e	75	85	6	0,8	55	817,61	2
3e	75	100	6	0,8	55	897,59	1
4e	75	70	9	1,2	65	834,88	1
5e	75	85	9	1,2	65	845,55	2
6e	75	100	9	1,2	65	950,26	1
7e	75	70	12	1,6	75	1193,46	1
8e	75	85	12	1,6	75	1258,46	2
9e	75	100	12	1,6	75	1329,71	1
10e	100	70	6	1,2	75	1095,31	2
11e	100	85	6	1,2	75	1052,88	1
12e	100	100	6	1,2	75	1207,97	1
13e	100	70	9	1,6	55	911,52	2
14e	100	85	9	1,6	55	831,26	1
15e	100	100	9	1,6	55	957,03	1
16e	100	70	12	0,8	65	792,14	2
17e	100	85	12	0,8	65	805,19	1
18e	100	100	12	0,8	65	918,57	1
19e	125	70	6	1,6	65	956,53	1
20e	125	85	6	1,6	65	986,28	1
21e	125	100	6	1,6	65	1129,17	2
22e	125	70	9	0,8	75	871,78	1
23e	125	85	9	0,8	75	892,66	1
24e	125	100	9	0,8	75	1023,99	2
25e	125	70	12	1,2	55	825,68	1
26e	125	85	12	1,2	55	835,94	1
27e	125	100	12	1,2	55	977,55	2

Tablo 4.9’da her parametre için üç seviye içinde seçilen en büyük değerler optimum parametre seviyelerini verir. Optimum parametreler tabloda yıldız sembolü ile belirtilmiştir. Tabloda delta ile verilen değerler parametrelerin önemini verir. Daha yüksek delta değerlerine sahip parametreler daha etkili olmuştur. Rank ile gösterilen değerler parametrelerin önem sırasını verir. Bu doğrultuda en etkili parametrenin aç

olduğu görülmektedir. Parametrelerin önem sıralaması şu şekildedir: Açı, tc (duvar kalınlığı), Dc (Taban genişliği), doluluk, hız ve katman. S/N oranlarının parametrelere ve seviyelere göre değişimi Tablo 4.9'da grafikleri gösterilmektedir. Ayrıca, Şekil 4.21'de deney numunelerinin yazıcıda ortalama üretim süreleri grafiksel olarak sunulmaktadır. Bu grafik, farklı numune tiplerinin üretim süreleri arasındaki karşılaştırmayı görselleştirerek üretim verimliliğinin değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Elde edilen veriler, baskı parametreleri, numune geometrisi ve kullanılan malzeme türünün üretim süresine etkisini analiz etmek açısından önemli bir referans niteliği taşımaktadır. Böylece, ilerleyen çalışmalarda üretim süresini optimize edecek parametrelerin belirlenmesi mümkün olmaktadır.



Şekil 4.21. Eğme deneyleri için 3D yazıcıda basılan numunelerinin üretim süreleri.

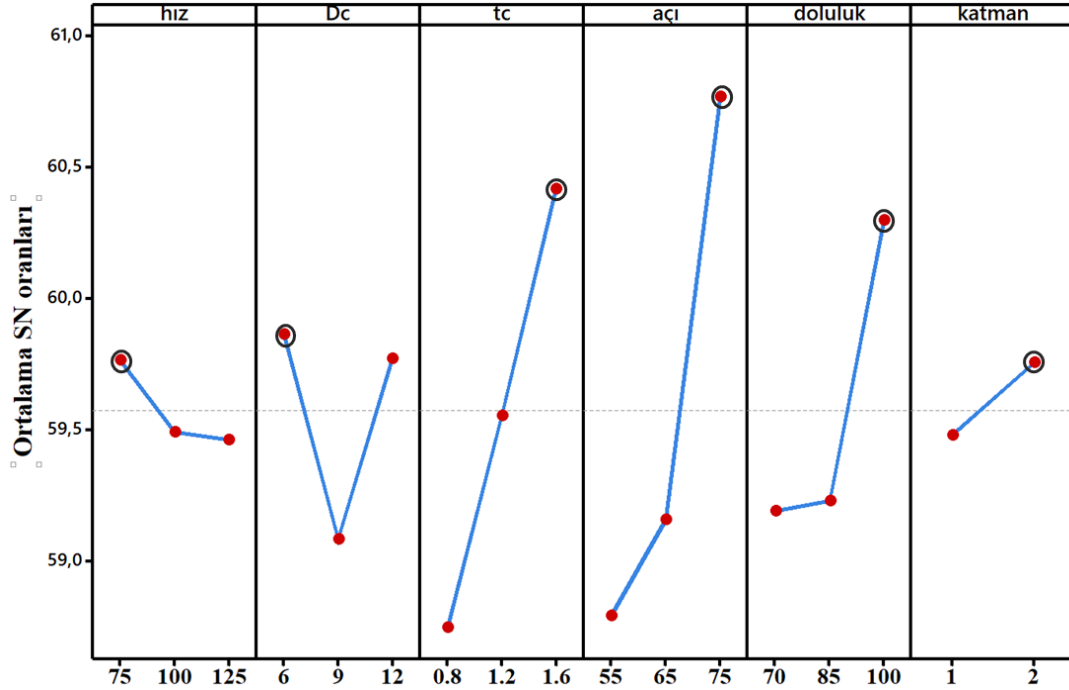
Tablo 4.9. Eğme testi için SN oranlarını gösteren sonuç tablosu (büyük daha iyidir)

Seviye	Hız	Dc	tc	Açı	Doluluk	Katman
1	59,77*	59,86*	58,75	58,79	59,19	59,48
2	59,49	59,09	59,55	59,16	59,23	59,76*
3	59,46	59,77	60,42*	60,77*	60,30*	59,46
Delta	0,30	0,78	1,67	1,98	1,11	0,28
Rank	5	4	2	1	3	6

*Optimum Seviye

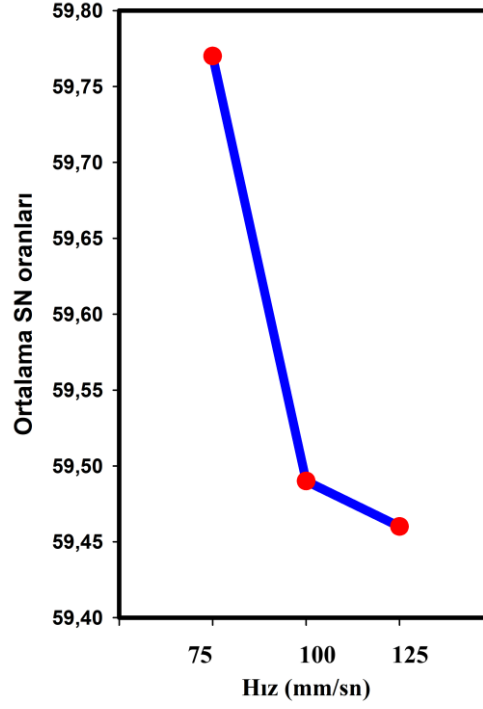
Çalışmada belirlenen kontrol faktörlerinin (baskı hızı, hücre genişliği, hücre duvar kalınlığı, trapezoid hücre taban açısı ve baskı doluluk oranı) ortalama S/N

oranları üzerindeki etkileri üç nokta eğme testinden sonra Taguchi yöntemine göre değerlendirilmiş olup, elde edilen sonuçlar Şekil 4.22’de sunulmaktadır. Maksimum değerler çember içerisinde gösterilmiştir.



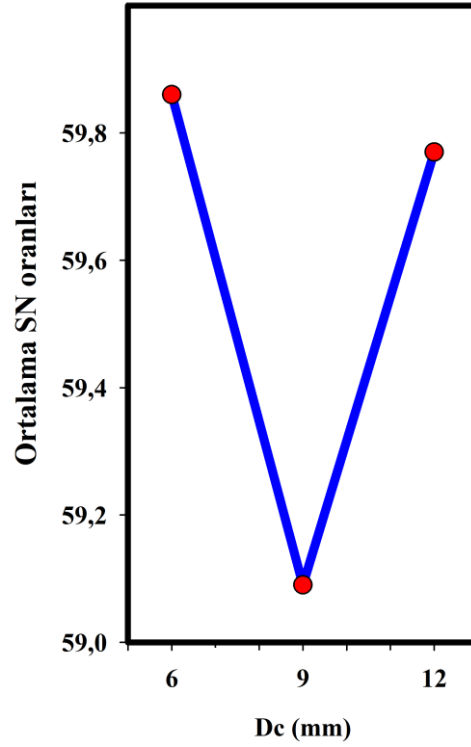
Şekil 4.22. Eğme testi sonuçlarının SN ortalama grafikleri

Eğme dayanımı için SN oranlarını gösteren sonuç Tablo 4.9’a göre, eklemeli imalat yöntemiyle üretilen sandviç kompozit plakalar arasında üç nokta eğme testlerinde; düşük hız (75 mm/sn), düşük hücre duvarı genişliği ($D_c = 6$ mm), yüksek et kalınlığı ($t_c = 1,6$ mm), yüksek hücre taban açısı (75°), yüksek doluluk %100 oranı ve iki katmanlı yapıdaki numuneler en iyi mekanik performansı göstermiştir.



Şekil 4.23. Eğme testi sonuçlarına göre hız faktörü için ortalama SN oranları grafiği

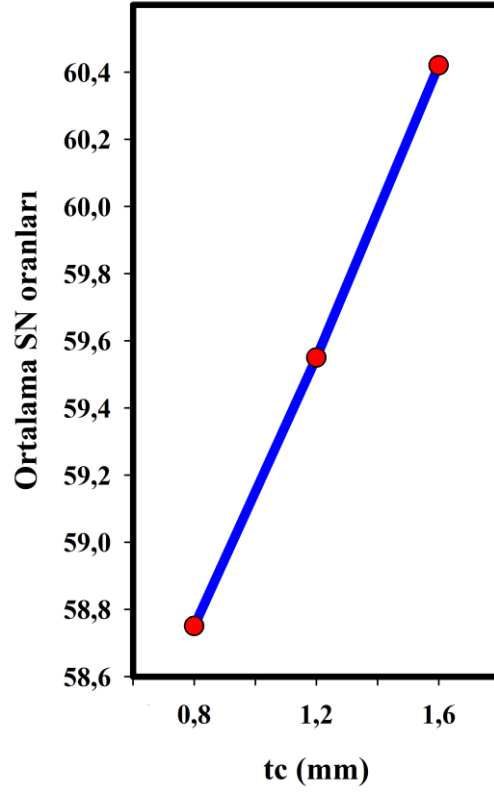
Şekil 4.23'te verilen hız değerlerine (75, 100, 125 mm/sn) karşılık gelen ortalama SN oranları sırasıyla 59,77-59,49 ve 59,46 olarak ölçülmüş olup, hız arttıkça SN oranlarının azaldığı gözlemlenmiştir. Özellikle 75 mm/sn'den 100 mm/sn'ye geçişte belirgin bir düşüş (59,77→59,49) görülürken, 100 mm/sn'den 125 mm/sn'ye çıkıldığında bu azalma daha sınırlı kalmıştır (59,49→59,46). Bu eğilim, artan hızın malzeme üzerindeki mekanik etkiler nedeniyle SN performansını olumsuz etkilediğini, ancak belirli bir hız seviyesinden sonra (100 mm/sn üzeri) SN oranındaki değişimin stabilize olma eğiliminde olduğunu düşündürmektedir. Sonuçlar, hızın SN oranları üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkiye sahip olduğunu ve özellikle 75-100 mm/sn aralığının malzeme performansı açısından kritik bir bölge olabileceğini göstermektedir. Bu bulgular, tribolojik süreçlerde hız optimizasyonu ve malzeme dayanımı çalışmaları için önemli veriler sağlamaktadır.



Şekil 4.24. Eğme testi sonuçlarına göre Dc faktörü için ortalama SN oranları grafiği

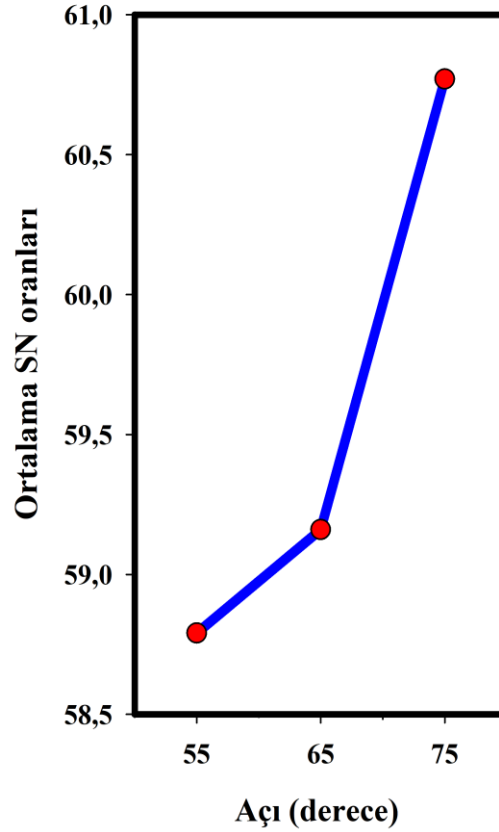
Şekil 4.24'te grafikte farklı Dc değerleri (6, 9, 12 mm) için ölçülen ortalama SN oranları sırasıyla 59,86-59,09 ve 59,77 olarak belirlenmiştir. Veriler incelendiğinde, Dc parametresindeki artışın SN oranları üzerinde doğrusal olmayan bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmektedir. Özellikle Dc değerinin 6 mm'den 9 mm'ye yükselmesiyle SN oranında belirgin bir düşüş (59,86→59,09) görülürken, Dc'nin 12 mm'ye çıkarılması durumunda SN oranının kısmi bir iyileşme gösterdiği (59,09→59,77) tespit edilmiştir.

Bu doğrusal olmayan davranış, Dc parametresinin malzeme performansı üzerinde kritik bir etkiye sahip olduğunu düşündürmektedir. 6-9 mm aralığındaki keskin düşüş, bu bölgede bir eşik değer etkisinin varlığına işaret edebilir. Daha yüksek Dc değerlerinde (12 mm) gözlenen kısmi toparlanma ise sistemin farklı mekanizmalar (örneğin gerilme dağılımı veya temas geometrisindeki değişimler) nedeniyle adaptasyon sağladığını göstermektedir. Sonuçlar, Dc parametresinin SN oranları üzerinde istatistiksel olarak anlamlı ve karmaşık bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle 9 mm civarındaki kritik bölge, malzeme tasarımı ve proses optimizasyonu açısından dikkatle incelenmelidir.



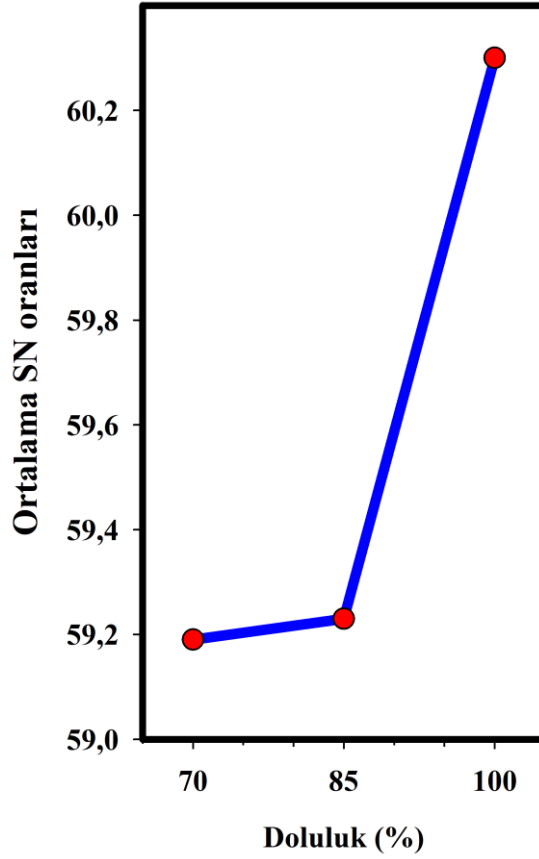
Şekil 4.25. Eğme testi sonuçlarına göre tc faktörü için ortalama SN oranları grafiği

Şekil 4.25'te grafikte farklı çekirdek hücre duvar kalınlıklarına ($t_c = 0,8-1,2-1,6$ mm) karşılık gelen ortalama SN oranları sırasıyla 58,75-59,55 ve 60,42 olarak ölçülmüş olup, duvar kalınlığı arttıkça SN oranlarının belirgin şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Bu pozitif korelasyon, özellikle 1,2 mm'den 1,6 mm'ye geçişte daha belirgin hale gelen ($59,55 \rightarrow 60,42$) bir eğilim sergilemekte ve artan duvar kalınlığının malzemenin deformasyon davranışını iyileştirerek yüzey bütünlüğünü artırabileceğini düşündürmektedir. Elde edilen bulgular, kesme parametrelerinin optimizasyonunun malzeme performansı üzerinde doğrudan etkili olduğunu ortaya koymakta olup, bu sonuçlar imalat süreçlerinde proses tasarımı ve yüzey kalitesi kontrolü açısından önemli çıkarımlar sunmaktadır.



Şekil 4.26. Eğme testi sonuçlarına göre açı faktörü için ortalama SN oranları grafiği

Şekil 4.26'da grafikte farklı açı değerlerine (55°, 65°, 75°) karşılık gelen ortalama SN oranları sırasıyla 58,79-59,16 ve 60,77 olarak ölçülmüştür. Veriler, artan açı değerleriyle birlikte SN oranlarında istikrarlı bir yükseliş eğilimi olduğunu göstermektedir. Özellikle 65°'den 75°'ye geçişte belirgin bir artış (59,16 → 60,77) gözlenmiş olup, bu durum açı parametresinin kritik bir eşik değerden sonra malzeme performansını önemli ölçüde iyileştirebileceğini düşündürmektedir. Bu pozitif korelasyon, artan açı değerlerinin muhtemelen gerilme dağılımını optimize ederek veya yüzey etkileşimlerini geliştirerek SN performansını artırdığını göstermektedir. Bulgular, proses parametrelerinin optimizasyonu açısından açı değişkeninin önemli bir kontrol parametresi olabileceğine işaret etmekte ve özellikle 65°-75° aralığının malzeme performansı için kritik bir bölge oluşturduğunu ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, imalat proseslerinde geometrik parametrelerin doğru seçiminin malzeme dayanımı üzerinde belirleyici rol oynayabileceğini göstermektedir.



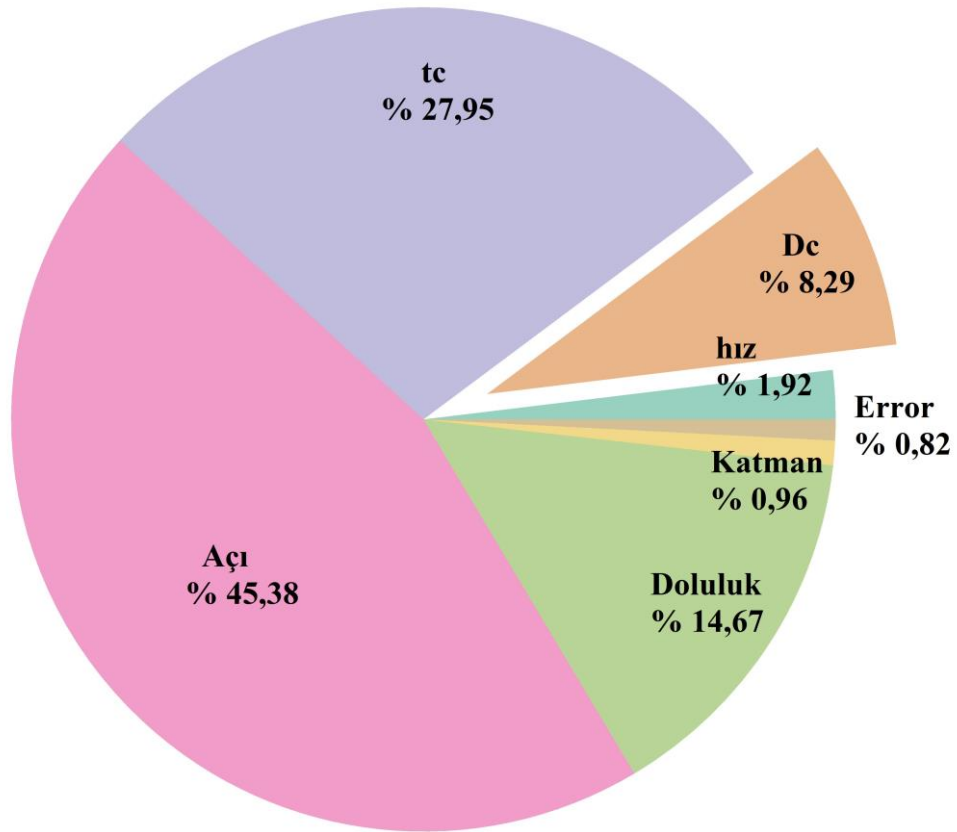
Şekil 4.27. Eğme testi sonuçlarına göre doluluk faktörü için ortalama SN oranları grafiği

Şekil 4.27’de grafikte farklı doluluk oranlarına (%50,2-%59,0-%70-%85-%100) karşılık gelen ortalama SN oranları sırasıyla 59,19-59,23 ve 60,30 olarak ölçülmüştür. Veriler, doluluk oranı arttıkça SN oranlarında genel bir artış eğilimi olduğunu göstermektedir. Özellikle %70 doluluk oranında belirgin bir performans artışı (60,30) gözlenmiş olup, bu değerin kritik bir eşik değeri temsil edebileceği düşünülmektedir. Doluluk oranındaki artışın malzemenin içyapısal bütünlüğünü iyileştirerek veya boşluk oranını azaltarak SN performansını artırdığı değerlendirilmektedir. Ancak %59 ile %70 arasındaki keskin artışın ardından daha yüksek doluluk oranlarında (%85 ve %100) beklenen doğrusal artışın gözlemlenmemesi, malzemenin belirli bir doluluk seviyesinden sonra maksimum performansa ulaştığını ve ek doluluk artışlarının SN oranını önemli ölçüde etkilemediğini göstermektedir. Bu bulgular, üretim parametrelerinin optimizasyonu açısından %70 doluluk oranının optimum bir değer olabileceğine işaret etmekte olup, bu sonuçların malzeme tasarımı ve üretim proseslerinde dikkate alınması önerilmektedir.

4.2.3. Eğme testi varyans analizi

Deneyisel çalışmalardan elde edilen verileri analiz etmek, yorumlamak ve sonuçlar hakkında karar vermek için istatistiksel yöntemler kullanılır. ANOVA analizi, bağımsız değişkenlerin etkileşimlerinin incelenmesine ve aralarındaki farkın tanımlanmasına olanak sağlayan istatistiksel bir yöntemdir (Ulewicz & Bokuvka 2017; Tuncel ve Aydın, 2023).

Bu çalışmada, ANOVA analizlerinin gerçekleştirilmesi için MiniTab programı kullanılmıştır. Birden fazla faktörün tek bir değişken üzerindeki etkisi incelendiği için tek yönlü varyans analizi tercih edilmiştir. Varyans analizinin sonuçları Tablo 4.10'da gösterilmiş olup Şekil 4.28'de, ise her bir parametrenin yüzde katkısı göstermektedir.



Şekil 4.28. Eğme deneyleri için Hız, Dc, tc, Açı ve Doluluk Varyans Analizi grafiği

Tablo 4.10. Eğme deneyleri için Varyans Analizi

Kaynak	DF	Seq SS	Katkı	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Hız	2	11513	1,92%	11513	5757	17,60	0,0001161084976
Dc	2	49785	8,29%	49785	24893	76,12	0,0000000139785
tc	2	167773	27,95%	167773	83887	256,54	0,0000000000025
Açı	2	272392	45,38%	272392	136196	416,50	0,0000000000000
Doluluk	2	88061	14,67%	88061	44031	134,65	0,0000000002614
Katman	1	5756	0,96%	5756	5756	17,60	0,0007799793580
Hata	15	4905	0,82%	4905	327		
Toplam	26	600186	100,00%				

Analysis of Variance (Varyans Analizi) Tablo 4.10'a göre, %45,38 oranında çekirdek hücrenin taban açısının sonuçları üzerinde en büyük etkiye sahip olduğu görülmektedir. Bu durum, taban açısının farklı düzeylerinin numunelerin eğme deneyleri sonuçları üzerinde önemli bir etkisi olduğunu gösterir.

Analysis of Variance (Varyans Analizi) Tablo 4.10'a göre, çekirdek hücrenin duvar kalınlığı (tc) ölçü değerinin eğme mukavemeti deney sonuçlarını %27,95 oranında etkilediği görülmektedir.

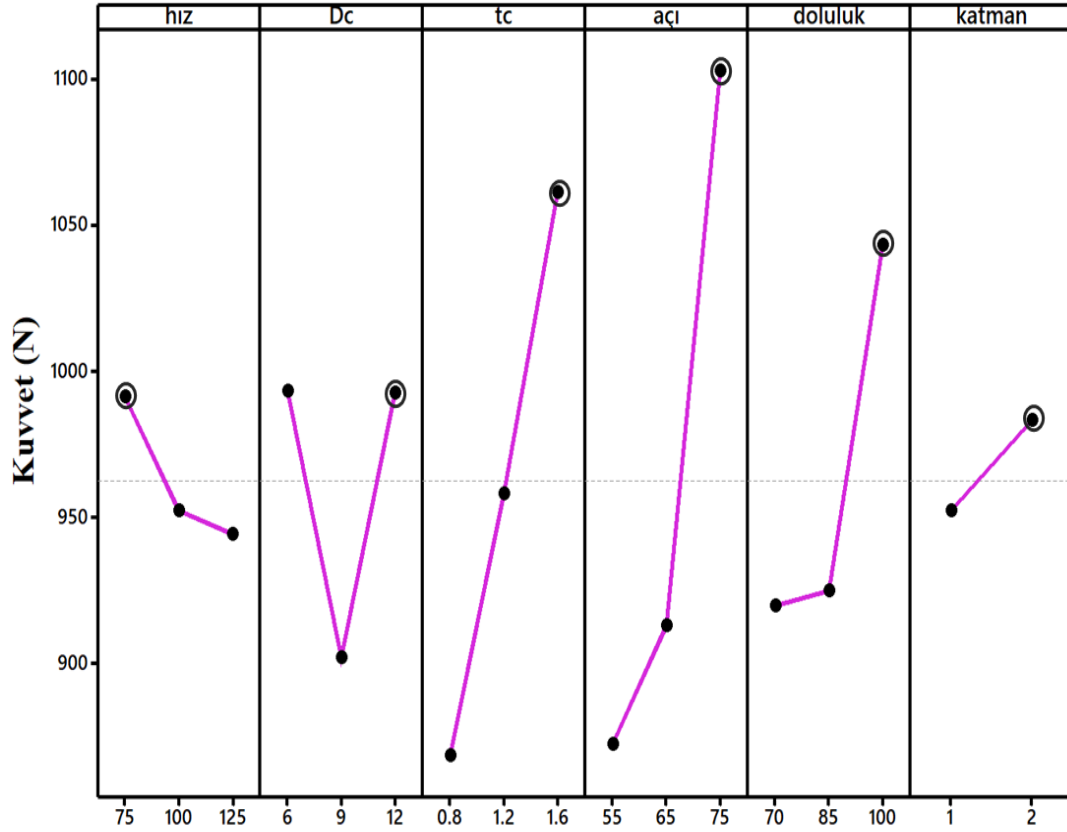
Analysis of Variance (Varyans Analizi) Tablo 4.10'a göre, çekirdek hücrenin taban genişliği (Dc) ölçü değerinin eğme mukavemeti deney sonuçlarını %8,29 oranında etkilediği görülmektedir.

Tablo 4.11. Eğme deneyleri için Ortalamalar yanıt tablosu

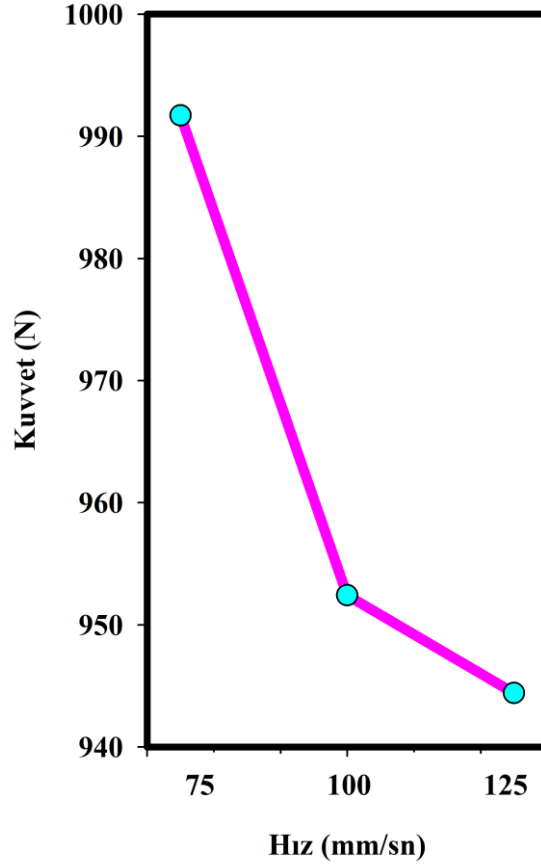
Seviye	Hız	Dc	tc	Açı	Doluluk	Katman
1	991,7	993,4	868,6	872,4	919,9	952,5
2	952,4	902,1	958,4	913,2	925,1	983,5
3	944,4	993,0	1061,5	1102,9	1043,5	944,4
Delta	47,3	91,3	192,9	230,5	123,7	31,0
Rank	5	4	2	1	3	6

Response Table for Means Tablo 4.11'e göre farklı seviyelerde (1, 2, 3) test edilen faktörlerin (hız, Dc, tc, açı, doluluk, katman) karşılık gelen ortalama yanıtlarını göstermektedir. Tablo 4.11'e göre en iyi sıralama (rank) değeri, taban açısı parametresinin 3. seviyesi olan 75 derecede görülmektedir. Daha sonra sırasıyla duvar kalınlığı (tc) 3. seviyesi olan 1,6mm, hücre genişliği (Dc) 1. seviyesi olan 6mm, hücre, doluluk oranının %100 olduğu 3. seviye ve yazma hızı parametresinin 1. seviyesi olan 75mm/sn olarak sıralanmıştır.

Çalışmada belirlenen kontrol faktörlerinin (baskı hızı, hücre genişliği, hücre duvar kalınlığı, trapezoid hücre taban açısı ve baskı doluluk oranı) kuvvet oranları üzerindeki etkileri üç nokta eğme testinden sonra Taguchi yöntemine göre değerlendirilmiş olup, elde edilen sonuçlar Şekil 4.29’da sunulmaktadır. Maksimum değerler çember içerisinde gösterilmiştir.

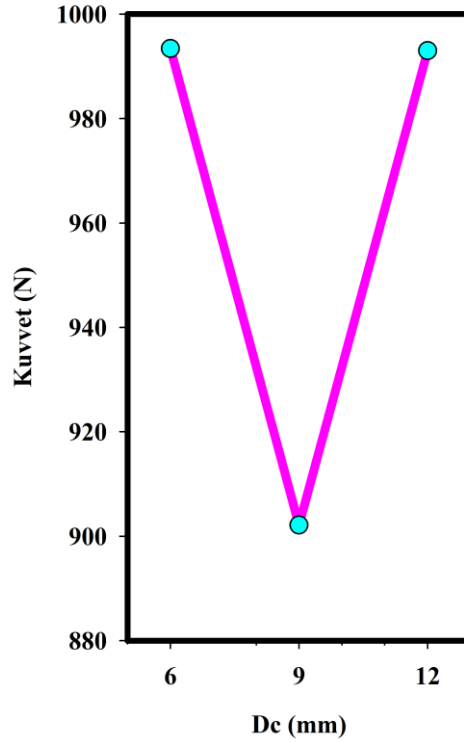


Şekil 4.29. Eğme testi sonuçları kuvvet grafikleri



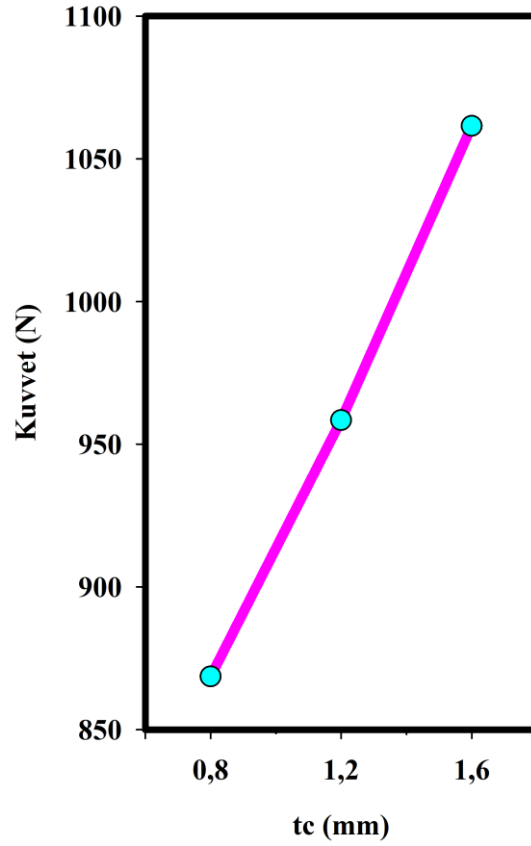
Şekil 4.30. Eğme deneyleri Hız faktörleri için ortalamalar yanıt tablosu grafiği

Şekil 4.30’da grafikte yazıcı işleme hızının 75, 100 ve 125 mm/sn değerlerine karşılık gelen kuvvet ölçümleri sırasıyla 991,7 N, 952,4 N ve 944,4 N olarak kaydedilmiştir. Veriler, işleme hızı arttıkça kuvvet değerlerinde istikrarlı bir azalma eğilimi olduğunu göstermekte olup, bu düşüşün 75-100 mm/sn aralığında (991,7 N → 952,4 N) daha belirgin, 100-125 mm/sn aralığında ise (952,4 N → 944,4 N) daha sınırlı olduğu görülmektedir. Bu davranış, artan işleme hızıyla birlikte malzeme besleme mekanizmasının dinamiklerindeki değişimler, tabaka oluşum sürecindeki polimerizasyon derecesinin farklılaşması ve nozül-malzeme etkileşim süresinin kısılması gibi faktörlerle ilişkilendirilebilir. Özellikle 100 mm/sn eşik değerinden sonra gözlenen kuvvet stabilizasyonu, sistemin bu hız seviyesinde optimum bir denge durumuna ulaştığını düşündürmektedir. Sonuçlar, eklemeli imalat proseslerinde işleme hızının mekanik dayanım özellikleri üzerinde belirleyici bir rol oynadığını ve proses optimizasyonu çalışmalarında 75-100 mm/sn aralığının kritik bir parametre bölgesi olarak değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.



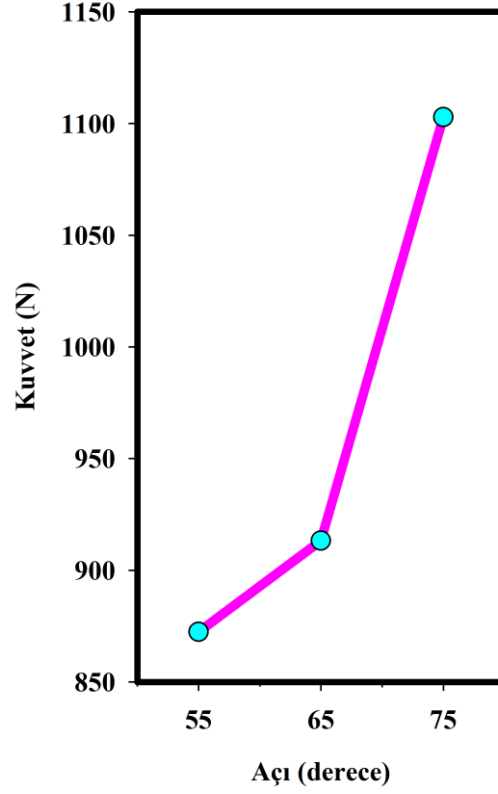
Şekil 4.31. Eğme deneyleri Dc faktörleri için ortalamalar yanıt tablosu grafiği

Şekil 4.31’de grafikte çekirdek hücre genişliği (Dc) parametresinin 6, 9 ve 12 mm değerlerine karşılık gelen kuvvet ölçümleri sırasıyla 993,4 N, 902,1 N ve 993,0 N olarak ölçülmüştür. Veriler, Dc parametresi ile kuvvet değerleri arasında belirgin bir U-şeklinde ilişki olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle 9 mm Dc değerinde kuvvetin minimum seviyeye (902,1 N) ulaştığı gözlemlenirken, bu değer altında (6 mm) ve üstünde (12 mm) kuvvetlerin yaklaşık %10 artış gösterdiği tespit edilmiştir. Bu davranış, hücresel yapıdaki genişliğin mekanik performans üzerinde kritik bir optimizasyon noktası olduğunu düşündürmektedir: 6 mm’den 9 mm’ye artışla görülen kuvvet azalımı, hücre duvarı gerilme dağılımının iyileşmesiyle açıklanabilirken; 12 mm’deki kuvvet artışı ise hücre boyutunun aşırı büyümesi nedeniyle yapısal bütünlüğün zayıflamasından kaynaklanabilir. Sonuçlar, hafif yapı tasarımlarında hücre boyutunun mekanik davranış üzerinde belirleyici rol oynadığını ve 9 mm civarındaki optimum değer en iyi mukavemet/ağırlık oranını sağladığını göstermektedir. Bu bulgular, özellikle enerji sönümleme kapasitesi gerektiren uygulamalarda hücresel parametre optimizasyonunun önemini vurgulamaktadır.



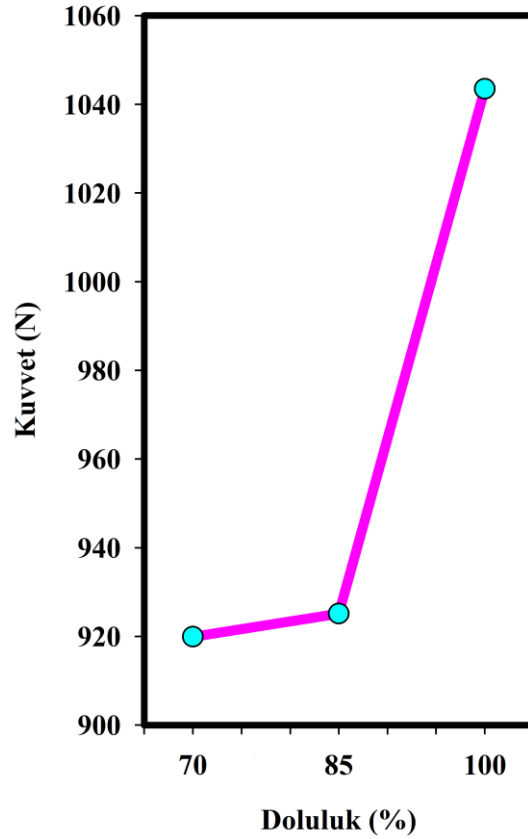
Şekil 4.32. Eğme deneyleri t_c faktörleri için ortalamalar yanıt tablosu grafiği

Şekil 4.32’de grafikte çekirdek hücre duvar kalınlığının (t_c) 0,8 mm’den 1,6 mm’ye artırılmasıyla kuvvet değerlerinin 868,6 N’dan 1061,5 N’a yükseldiği gözlemlenmiş olup, bu artışın özellikle 0,8-1,2 mm aralığında (868,6 N → 958,4 N) daha belirgin olduğu tespit edilmiştir. Bu davranış, artan et kalınlığının hücre duvarlarının burkulma direncini artırması, stres dağılımını iyileştirmesi ve üretim kaynaklı kusurları azaltması gibi mekanizmalarla açıklanabilirken, 1,2 mm üzerindeki kalınlık artışlarında (958,4 N → 1061,5 N) kuvvet kazanımının nispi olarak azalması malzeme verimliliği açısından kritik bir optimizasyon noktası olduğunu düşündürmektedir. Elde edilen bulgular, hafif yapı tasarımlarında hücre et kalınlığının mekanik performans üzerinde belirleyici bir parametre olduğunu ve özellikle 1,2 mm civarının ağırlık-mukavemet dengesi açısından optimum değerler sunabileceğini ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, enerji sönmüleme kapasitesi gerektiren uygulamalarda hücresel parametre seçiminin önemini vurgulamakta olup, malzeme tüketimi ile mekanik performans arasındaki dengenin uygulama gereksinimlerine göre optimize edilmesi gerektiğini göstermektedir.



Şekil 4.33. Eğme deneyleri Açı faktörleri için ortalamalar yanıt tablosu grafiği

Şekil 4.33'te üç nokta eğme deneyi sonuçları, çekirdek hücre taban açısının mekanik performans üzerindeki kritik etkisini ortaya koymaktadır. 55°, 65° ve 75° açı değerlerinde ölçülen kırılma yükleri sırasıyla 872,4 N, 913,2 N ve 1102,9 N olarak belirlenmiş olup, açı artışıyla birlikte eğme direncinde doğrusal olmayan bir artış eğilimi gözlemlenmiştir. Özellikle 65°'den 75°'ye geçişte kaydedilen %20,8'lik belirgin yük artışı (913,2 N → 1102,9 N), hücre geometrisindeki bu değişimin yapısal rijitliği optimize ederek gerilme dağılımını iyileştirdiğini ve yük transfer mekanizmasını verimli hale getirdiğini düşündürmektedir. Maksimum kuvvet değerinin 75° açıda elde edilmesi, bu açı değerinin eğme yükleri altında optimum performans sağladığını göstermekle birlikte, malzeme verimliliği ve ağırlık optimizasyonu açısından 65°-75° aralığının kritik bir tasarım bölgesi olduğunu ortaya koymaktadır. Bu bulgular, özellikle yük taşıyan hafif yapı uygulamalarında hücre açısının stratejik bir tasarım parametresi olarak dikkate alınması gerektiğini vurgulamaktadır.



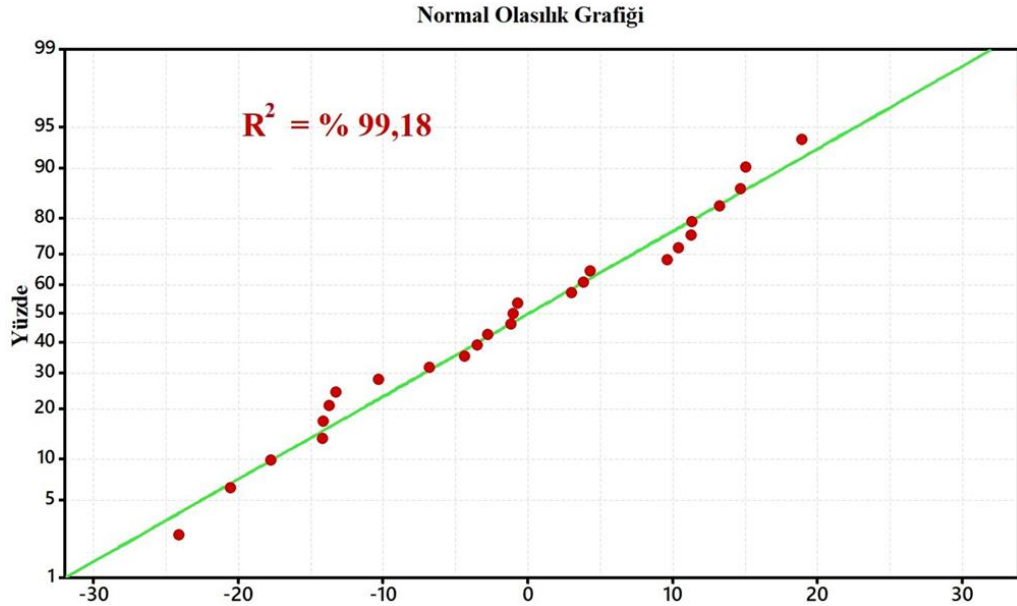
Şekil 4.34. Eğme deneyleri Doluluk faktörleri için ortalamalar yanıt tablosu grafiği

Şekil 4.34'te grafikte doluluk oranının artmasıyla üç nokta eğme deneyinde ölçülen kuvvet değerlerinde belirgin bir artış gözlemlenmiştir. %70 doluluk oranında 919,9 N olarak ölçülen kuvvet değeri, %85 dolulukta 925,1 N'a yükselirken, %100 doluluk oranında 1043,5 N ile en yüksek değere ulaşmıştır. Bu sonuçlar, doluluk oranı ile mekanik dayanım arasında pozitif bir korelasyon olduğunu göstermektedir. Özellikle %85'ten %100'e geçişte gözlenen yaklaşık %12,8'lik belirgin artış (925,1 N → 1043,5 N), malzeme yoğunluğundaki artışın iç gözenekliliği azaltarak ve yük aktarım yollarını iyileştirerek yapısal bütünlüğü güçlendirdiğini düşündürmektedir. Ancak, %70 ile %85 doluluk oranları arasındaki sınırlı artış (919,9 N → 925,1 N), bu aralıkta gözenek yapısının hala baskın etki gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu bulgular, yüksek mekanik performans gerektiren uygulamalarda maksimum doluluk oranlarının tercih edilmesi gerektiğini, ancak ağırlık optimizasyonu gereken durumlarda %85 doluluk oranının makul bir denge sağlayabileceğini göstermektedir. Malzeme tüketimi ile mekanik performans arasındaki bu ilişki, özellikle katmanlı imalat uygulamalarında doluluk parametresinin stratejik önemini vurgulamaktadır.

Sonuçlarda da görülebileceği gibi, tahminler regresyon katsayısının Tablo 4.12’de görüldüğü üzere (R^2) %99,18 değeri ortaya çıkmaktadır. Eklemeli imalat ile üretilen sandviç kompozit plakalar için yapılan deneysel çalışmanın (R^2) %99,18 değeri verisine göre analizlerin iyi bir model oluşturduğunu göstermektedir. Şekil 4.35’de grafik halinde gösterilmiştir.

Tablo 4.12. Eğme deneyleri sonucunda oluşan model özeti

S	R-sq	R-sq(adj)	PRESS	R-sq(pred)
18,0831	99,18%	98,58%	16421,6	97,26%



Şekil 4.35. Eğme testi için sonuçların sapma oranı

4.2.4. Üç Nokta Eğme Testi Genel Sonuçları

Sonuçlar incelendiğinde, taban açısının genişlemesiyle birlikte basma dayanımının arttığı tespit edilmiştir. Response Table for Means analizinde, taban açısı, duvar kalınlığı ve duvar genişliğinin artmasıyla eğme kuvvetinin de arttığı görülmüştür. En yüksek eğme dayanımı, 75° taban açısında 1102,9 N, 1,6 mm duvar kalınlığında 1061,5 N, 6 mm duvar genişliğinde 993,4 N, 75 mm/sn yazdırma hızında 991,7 N ve %100 doluluk oranında 1043,5 N olarak kaydedilmiştir. Varyans analizinde ise sandviç

plakalarda yapılan eğme deneyleri sonuçlarına taban açısı %45,38 oranında en yüksek etkiyi göstermektedir. Bu sonucu sırasıyla tc %27,95, doluluk %14,67 Dc %8,29, yazdırma hızı %1,92 oranında etkilediği sonucu ortaya çıkmıştır. Eklemeli imalat ile üretilen sandviç kompozit plakalar için yapılan regresyon analizinde ise $R^2 = \%99,18$ değeri elde edilmiştir.

4.2.5. Üç nokta eğme testi tartışma

Bu çalışmada, üç farklı hücre genişliği ve duvar kalınlığı ölçüsü belirlenmiş ve polilaktik asit (PLA) filamentinden çekirdek hücreler 3D yazıcıyla üretilmiştir. Alt ve üst yüzey plakaları, %15-20 oranında karbon fiber içeren takviyeli kompozit plakalardan eklemeli imalat yöntemiyle üretilmiştir. Üretilen numuneler epoksi yapıştırıcı ile birleştirilmiştir.

Çalışmada, bir ve iki katmanlı sandviç kompozit plakaların 3 nokta eğme dayanımları deneysel olarak incelenmiştir. Beş farklı parametre belirlenmiş ve bunlar sırasıyla hız, doluluk, hücre genişliği (Dc), hücre duvar kalınlığı (tc) ve trapezoid taban açısıdır. Yazdırma hızı; 75, 100 ve 125mm/sn Doluluk; %70, %85, %100. Dc (Hücre Genişliği); 6mm, 9mm, 12mm. Tc (Hücre Kalınlığı); 0,8-1,2 ve 1,6 mm Hücre Taban Açısı 55^0 , 65^0 , 75^0 tek katlı ve iki katlı numuneler için ise yükseklik 10 ve 20 mm olacak şekilde belirlenmiştir. Bu ölçülere sahip trapezoid hücre geometrileri kullanılmıştır. Bir ve iki katmanlı numunelere 3 nokta eğme testleri uygulanmıştır.

Sonuçlar incelendiğinde taban açısı genişledikçe eğme dayanımının yükseldiği ortaya çıkmıştır. Yanıt tablosu sonucuna göre taban açısı, duvar kalınlığı ve doluluk arttıkça yine eğme kuvvetinin arttığı sonucu ortaya çıkmış hücre taban açısı en geniş açı olan 75^0 derecede 1102,9 N, en iyi hücre duvar kalınlığı 1,6 mm olan değerde 1061,5 N, hücre duvar genişliği 6mm olan değerde ise en iyi sonucun 993,4 N, yazdırma hızı 75 mm/sn değerinde en yüksek sonuç 991,7 N, dolulukta ise %100 dolu olarak basılan numunelerin sonucunda çıkan 1043,5 N değerlerinin çıktığı görülmektedir.

Varyans analizinde ise sandviç plakalarda yapılan eğme deneyleri sonuçlarına taban açısı %45,38 oranında en yüksek etkiyi göstermektedir. Bu sonucu sırasıyla tc %27,95, doluluk %14,67 Dc %8,29, yazdırma hızı %1,92 oranında etkilediği sonucu ortaya çıkmıştır.

Bu sonuçlar, Kaveloğlu'nun (2022) hem deneysel çalışmalarında hem de sonlu elemanlar analizlerinde, aynı yüzey alanı ve kütleye sahip petek yapıların hücre genişliği değerleri artsa da, hücre duvarı kalınlığının artması nedeniyle maksimum eğme kuvvetlerinin de arttığını göstermiştir. Bu artış, eğme deneyleri ve sayısal analiz sonuçlarında, PLA örneklerinde yaklaşık %6 ve %10 ABS örneklerinde ise %15 ve %20 oranlarında elde edilen sonuçlarla uyumlu olmuştur.

Taguchi yöntemi, daha az sayıda deneyle en etkili parametreleri bulmamıza olanak sağlayarak hem zaman hem de maliyet israfını önler. Ayrıca, henüz yapılmamış ancak mümkün olan deneylerin sonuçlarını tahmin etme yeteneği sayesinde de kaynak tasarrufu sağlar. Bu çalışmada, Kaveloğlu'nun (2022) sandviç plakalarda bal peteği yapısına dayanan çekirdek hücreler üzerine yaptığı çalışmanın sonuçlarıyla uyumlu bulgular elde edilmiştir. Çalışmanın R^2 değerinin %99,18 çıkması, deney sonuçlarının birbiriyle anlamlı bir tutarlılık gösterdiğini ortaya koymaktadır.

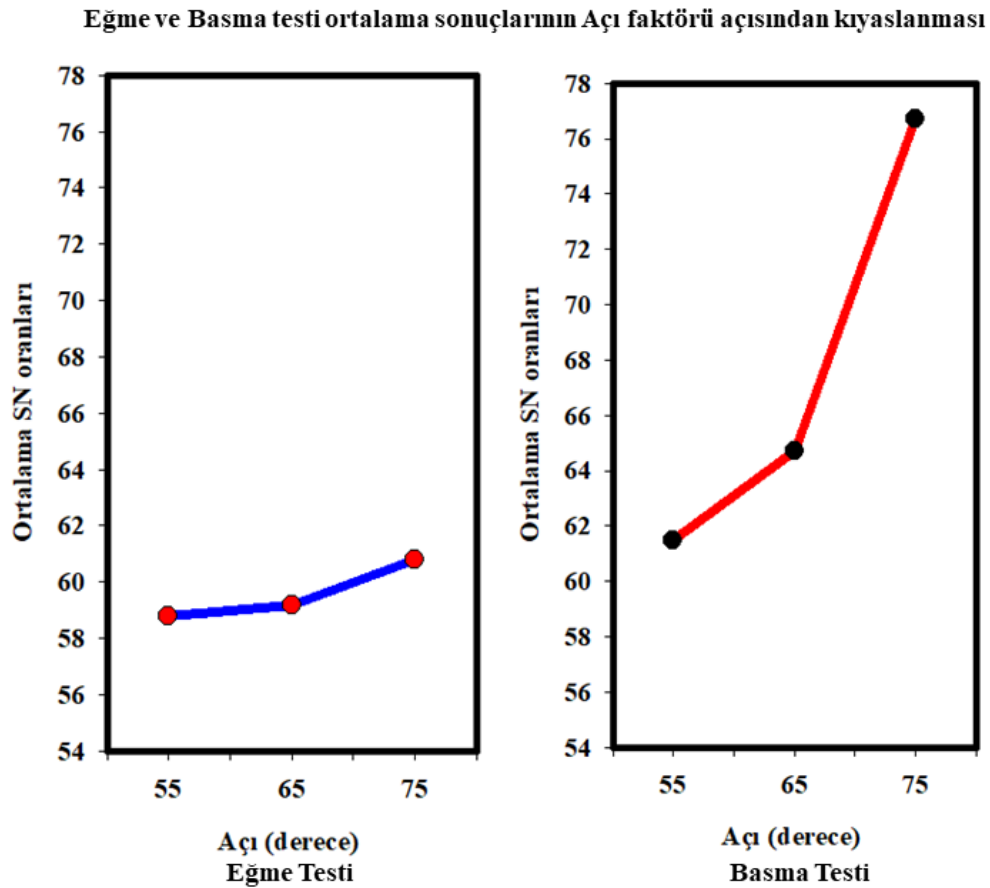
Varyans analizinde ise sandviç plakalarda yapılan eğme deneyleri sonuçlarına taban açısı %45,38 oranında en yüksek etkiyi göstermektedir. Bu sonucu sırasıyla tc %27,95, doluluk %14,67 Dc %8,29, yazdırma hızı %1,92 oranında etkilediğini göstermektedir. Benzer şekilde, Bayraklılar (2024) çalışmasında, farklı geometri ve üretim koşulları altında raster açısının tahmininde RFR modelinin sağladığı yüksek doğruluk oranları dikkat çekmektedir. Her iki çalışmada da, üretim süreçlerinin optimizasyonu ve etkinliği artırmaya yönelik yapılan bu araştırmalar, eklemeli üretim alanında yapay zekâ ve makine öğrenimi uygulamalarının önemli olduğu sonucuna ulaşmıştır.

Sonuçlar karşılaştırıldığında, eklemeli imalat ile üretilen sandviç kompozit plakalar üzerine yapılan çalışmada regresyon katsayısının $R^2 = \%99,18$ olduğu ortaya çıkmış ve Taguchi yöntemi ile elde edilen bu değer, iyi bir model oluşturulduğunu göstermektedir. Ulkir vd. (2023) yapmış olduğu çalışmada erimiş biriktirme modelleme (FDM) ile 3B yazıcılarda enerji tüketimini tahmin etmek amacıyla kullanılan Gauss Süreci Regresyon algoritması, $R^2 = 0,99$ -MAE = 0,016-RMSE = 0,022 ve MSE = 0,00049 değerleriyle yüksek bir doğruluk sağlamıştır. Bu karşılaştırmalar, eklemeli üretim (AM) sektöründe artan enerji tüketiminin, enerji verimliliği optimizasyonunu daha da önemli hale getirdiğini göstermektedir. Her iki çalışmada da elde edilen yüksek doğruluk oranları, makine öğrenimi uygulamalarının üretim süreçlerinin etkinliğini

artırma potansiyelini ortaya koymakta ve enerji tüketiminin daha iyi yönetilmesine katkıda bulunmaktadır.

Eklemeli imalat yöntemi malzeme israfının olmaması, yerinde üretim ve karmaşık geometrilerin üretilmesi açısından rakiplerine göre önemli avantajlara sahiptir. Ancak ürün kalitesi ve maliyeti gibi alanlarda eksiklikler yaşanmaktadır. Bu alanda daha fazla çalışmaya ihtiyaç olduğu ortaya çıkmıştır.

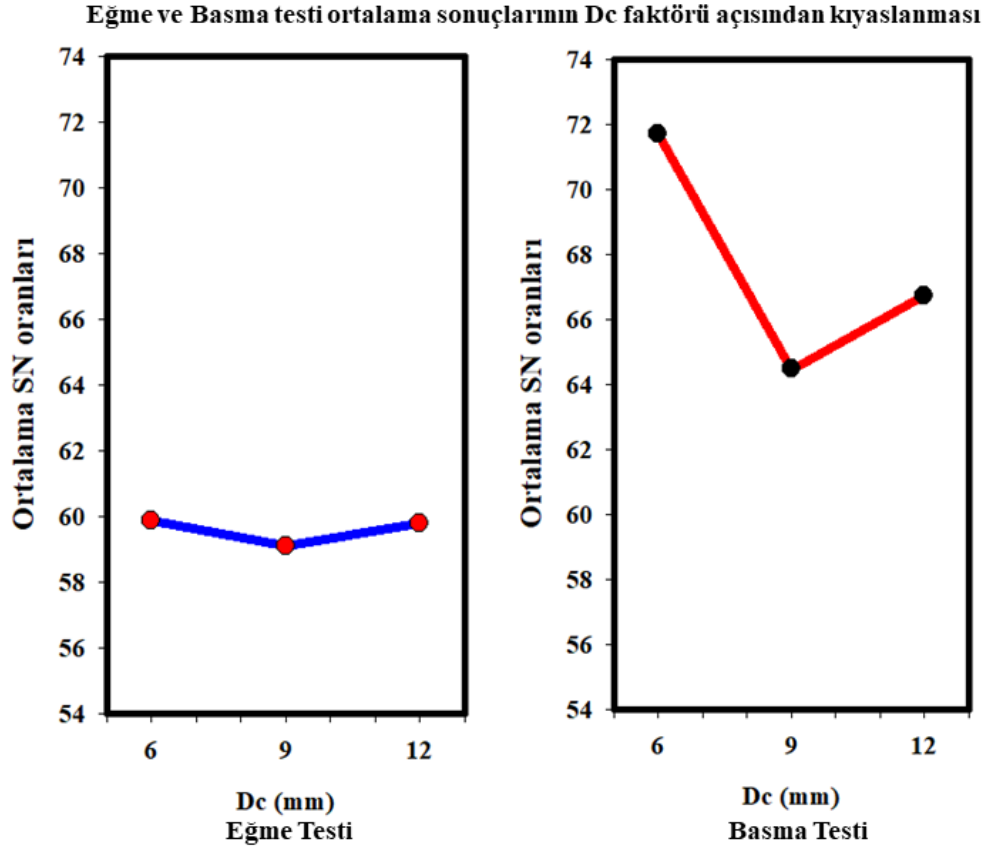
4.3. Üç nokta eğme ve basma testi sonuçlarının kıyaslanması



Şekil 4.36. Üç nokta eğme ve basma deneylerinden ortaya çıkan ortalama sonuçların SN oranlarının Açı faktörüne göre kıyaslanması

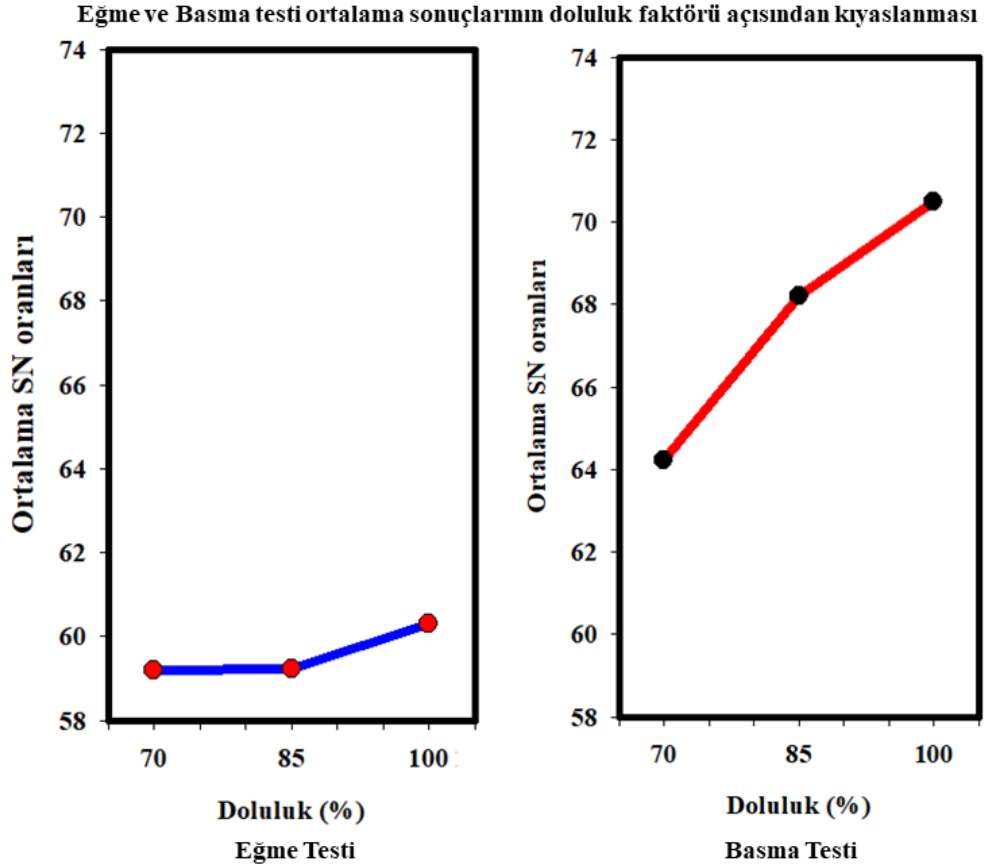
Şekil 4.36’da hücre açısının (55°, 65°, 75°) eğme ve basma dayanımına etkisini gösteren grafik. Deneysel sonuçlar, her iki test tipinde de açı artışıyla SN oranlarının tutarlı şekilde arttığını göstermektedir. 75° açı değeri, hem eğme hem de basma dayanımı için en yüksek değerleri sağlamıştır. Bu artışın temel nedeni, artan açının hücre duvarı yönlenmesini optimize ederek yük transfer verimliliğini artırmasıdır.

Ancak 75° üzeri açıların üretim zorlukları nedeniyle, 65-75° aralığının optimum tasarım bölgesi olarak önerilebileceği görülmektedir (Gibson & Ashby 2014).



Şekil 4.37. Üç nokta eğme ve basma deneylerinden ortaya çıkan ortalama sonuçların SN oranlarının Dc faktörüne göre kıyaslanması

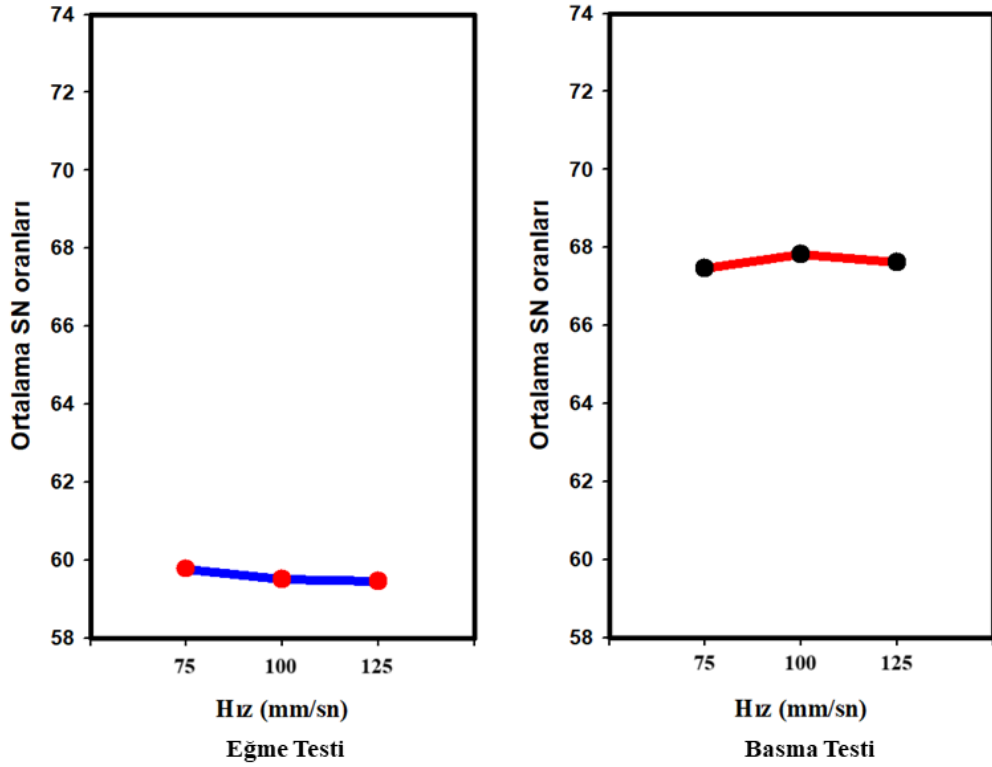
Şekil 4.37’de Hücre duvar genişliğinin (Dc) eğme ve basma dayanımına etkilerini gösteren grafik. Deneysel sonuçlar, Dc artışının (6-12 mm) eğme dayanımını etkilemediğini (SN: 59-59,8), ancak basma dayanımında belirgin düşüşe yol açtığını göstermektedir (SN: 74→64, %13,5 azalma). Bu bulgular, hücre duvar genişliğinin basma dayanımı için kritik bir parametre olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle 9 mm’den sonraki her 1 mm’lik artışta %2,2 performans kaybı gözlenirken, bu durum basma yükleri altında artan duvar genişliğinin hücre duvarı stabilitesini azaltarak performans düşüşüne yol açmasıyla açıklanabilir. Sonuçlar, basma yüklerine maruz kalacak yapılar için $Dc \leq 9$ mm sınırının korunması gerektiğini ortaya koymaktadır (Ashby, 2016).



Şekil 4.38. Üç nokta eğme ve basma deneylerinden ortaya çıkan ortalama sonuçların SN oranlarının Doluluk faktörüne göre kıyaslanması

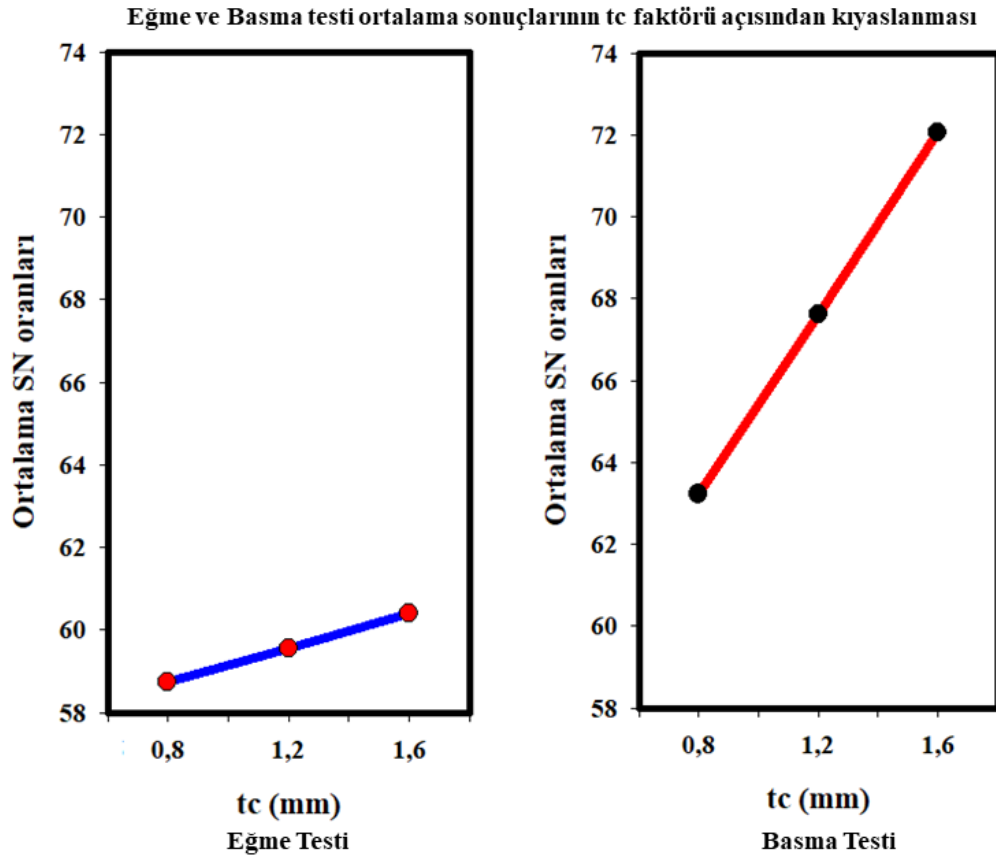
Şekil 4.38’de Eklemeli imalatla üretilen çekirdek hücreli yapılarda yapılan testler, doluluk oranı arttıkça (70%'den 100%'e) hem eğme hem de basma dayanımının tutarlı şekilde arttığını göstermektedir. Eğme testlerinde SN oranı 70'ten 100'e (%42,9 artış), basma testlerinde ise 64'ten 70'e (%9,4 artış) yükselmiştir. Bu sonuçlar, artan doluluğun malzeme yoğunluğunu ve hücre duvar kalınlığını artırarak yük taşıma kapasitesini iyileştirdiğini, aynı zamanda katmanlar arası bağlanmayı güçlendirerek mekanik performansı artırdığını ortaya koymaktadır. Özellikle %85-100 doluluk aralığında eğme dayanımında %19,2, basma dayanımında %6,7'lik ek artışlar gözlenmiştir. Bu bulgular, yüksek doluluk oranlarının (özellikle %100) çekirdek hücreli yapıların mekanik performansını önemli ölçüde artırdığını ve yapısal uygulamalar için tercih edilmesi gerektiğini göstermektedir (Gibson & Ashby 1997).

Eğme ve Basma testi ortalama sonuçlarının Hız faktörü açısından kıyaslanması



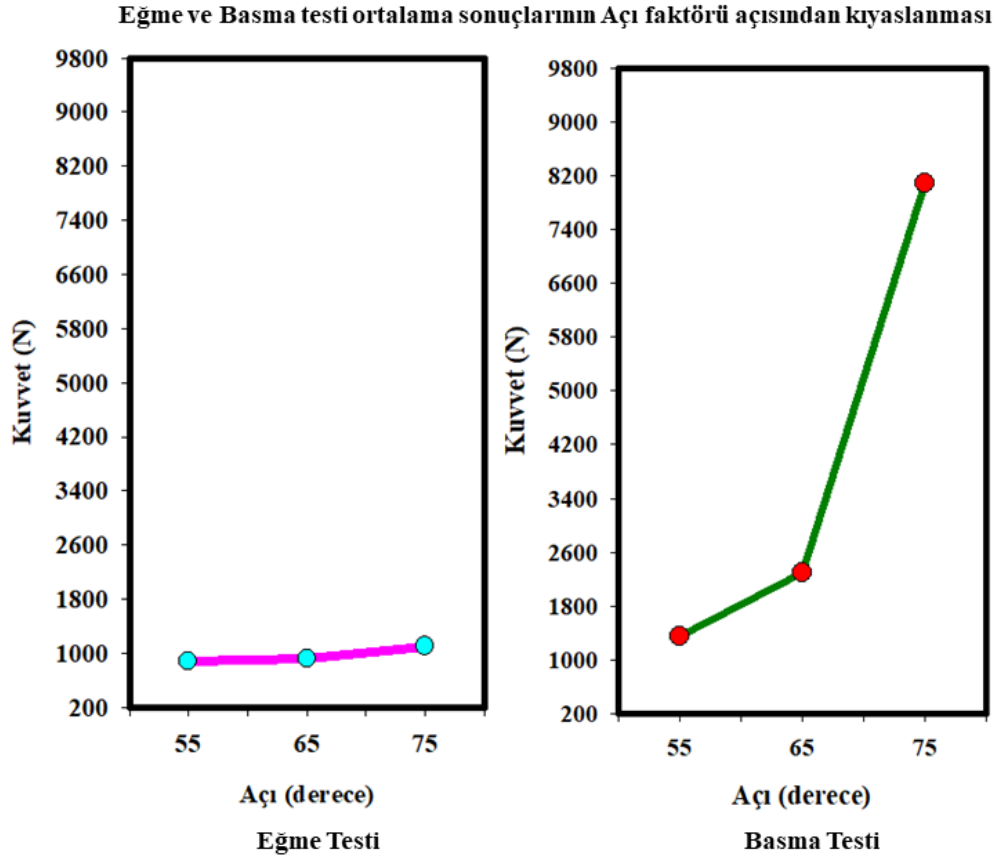
Şekil 4.39. Üç nokta eğme ve basma deneylerinden ortaya çıkan ortalama sonuçların SN oranlarının Hız faktörüne göre kıyaslanması

Şekil 4.39’da Eklemeli imalat hızının (75-125 mm/sn) mekanik performansa etkisini gösteren grafik görülmektedir. Deneysel sonuçlar, hız artışının eğme (SN: 59,40-59,80) ve basma (SN: 67,45-67,85) dayanımları üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir fark oluşturmadığını göstermektedir ($\pm\%0,3$ 'ten az varyasyon). Bu bulgular, test edilen hız aralığında üretim parametrelerinin mekanik performansı koruyarak 125 mm/sn'ye kadar optimize edilebileceğini ortaya koymaktadır (Gibson et al., 2021).



Şekil 4.40. Üç nokta eğme ve basma deneylerinden ortaya çıkan ortalama sonuçların SN oranlarının t_c faktörüne göre kıyaslanması

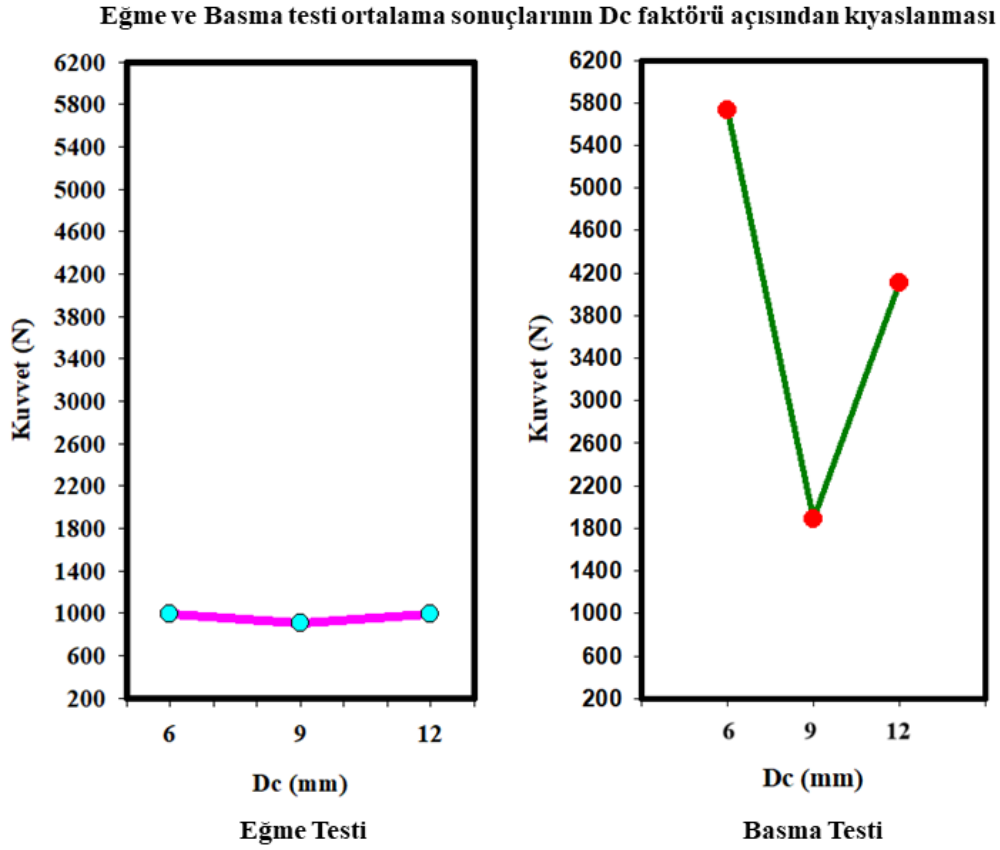
Şekil 4.40’da, eklemeli imalat yöntemiyle üretilmiş trapezoid çekirdek hücre yapısına sahip sandviç kompozit numunelerin üç nokta eğme ve basma testlerinden elde edilen ortalama S/N oranları, t_c (çekirdek hücre duvar kalınlığı) değişimine bağlı olarak karşılaştırılmaktadır. Eğme testi sonuçlarına bakıldığında, t_c değerinin artmasıyla birlikte ortalama S/N oranlarında belirgin bir artış gözlemlenmektedir; bu durum, daha kalın çekirdek yapısının eğilme sırasında daha yüksek enerji absorpsiyonu ve daha düşük varyanslı tepkiler sağladığını göstermektedir. Basma testi sonuçlarında ise t_c değerinin artışıyla birlikte ortalama S/N oranlarının arttığını ortaya koymaktadır; bu da basma dayanımının kalınlıkla doğru orantılı olarak iyileştiğini göstermektedir. Her iki testin sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, çekirdek kalınlığının hem eğme hem de basma performansında önemli bir etken olduğu ve yapısal rijitliği artırdığı söylenebilir. Bu bulgular, özellikle yapısal hafiflik ve dayanımın ön planda olduğu havacılık ve otomotiv gibi sektörlerde, hücresel çekirdek geometrisinin optimizasyonunun kritik olduğunu vurgulamaktadır (Gibson & Ashby 1997).



Şekil 4.41. Üç nokta eğme ve basma deneylerinden ortaya çıkan mukavemet sonuçlarının Açı faktörüne göre kıyaslanması

Şekil 4.41’de, üç farklı açı değerine (55° , 65° , 75°) sahip trapezoid çekirdek hücreli sandviç kompozit yapıların eğme ve basma testleri sonucunda elde edilen ortalama kuvvet değerleri karşılaştırılmaktadır. Sol taraftaki eğme testi sonuçları, açı arttıkça taşıma kapasitesinin belirgin şekilde yükseldiğini göstermektedir. 75° ’lik açı ile elde edilen kuvvet değerinin, 55° ve 65° açılara kıyasla oldukça yüksek olması, bu açı değerinin yapının eğilme dayanımını optimize ettiğini göstermektedir. Sağ taraftaki basma testi sonuçları da benzer bir eğilim göstermekte olup, 75° ’lik açıyla yapıların basma altında çok daha yüksek yük taşıyabildiği görülmektedir. Bu durum, çekirdek hücre açısının hem eğme hem de basma dayanımı üzerinde kritik bir rol oynadığını ortaya koymaktadır. Açının artmasıyla birlikte hücre geometrisinin yük transferini daha etkin hale getirdiği ve yapının genel rijitliğini artırdığı söylenebilir. Bu da hem enerji sönmüleme kapasitesinin hem de yapısal bütünlüğün gelişmesine katkı sağlamaktadır. Sonuçlar, hücre geometrisindeki açısal değişimlerin, özellikle yüksek mekanik performans gerektiren uygulamalarda dikkatle optimize edilmesi gerektiğini

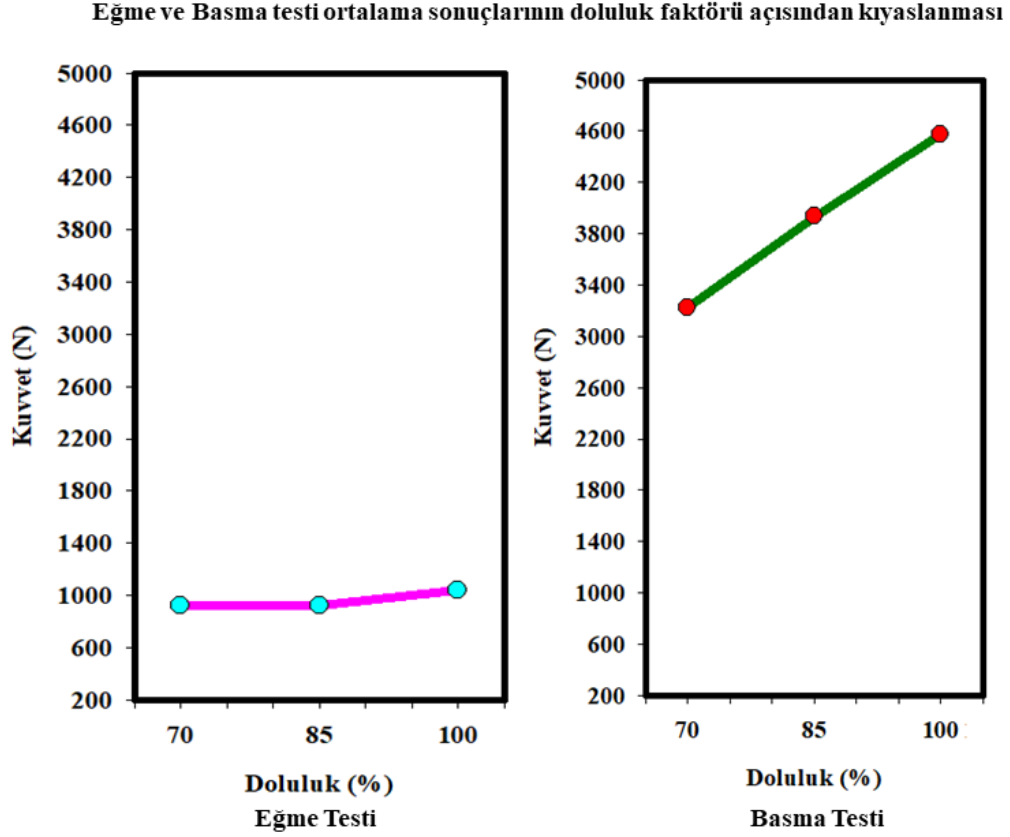
göstermekte ve tasarım aşamasında bu parametrenin dikkate alınmasının gerekliliğini vurgulamaktadır (Gibson & Ashby 1997).



Şekil 4.42. Üç nokta eğme ve basma deneylerinden ortaya çıkan mukavemet sonuçlarının Dc faktörüne göre kıyaslanması

Şekil 4.42’de, trapezoid çekirdek hücreli sandviç kompozit yapıların eğme ve basma testleri sonucunda, farklı Dc (çekirdek hücre genişliği) değerlerine bağlı olarak elde edilen ortalama kuvvet sonuçları sunulmaktadır. Eğme testi sonuçlarına göre, Dc değeri 6 mm ve 12 mm olduğunda yüksek eğilme dayanımı elde edilirken, 9 mm’de belirgin bir düşüş gözlemlenmiştir. Bu durum, 6 mm ve 12 mm’lik hücre genişliklerinin yapının eğme altındaki rijitliğini artırdığını, ancak 9 mm değerinde bu etkinin azaldığını göstermektedir. Benzer şekilde, basma testi sonuçlarında da Dc = 6 mm ile en yüksek basma dayanımı elde edilmiş; 9 mm’de ciddi bir dayanım kaybı yaşanırken, 12 mm’de görece bir toparlanma görülmüştür. Bu sonuçlar, çekirdek hücre genişliği (Dc) parametresinin hem eğme hem de basma davranışı üzerinde doğrusal olmayan, kritik etkiler yarattığını ortaya koymaktadır. Belirli bir aralıkta (bu örnekte 9 mm) hücre geometrisinin yapısal performansı zayıflatabileceği, bu durumun da hücreler arası yük

aktarımı, burkulma davranışı ya da gerilme birikimi ile ilişkili olabileceği düşünülmektedir. Bu nedenle Dc parametresi, sandviç yapı tasarımında yalnızca geometrik değil, aynı zamanda mekanik performans optimizasyonu açısından da dikkatle belirlenmelidir (Ashby, 2016).

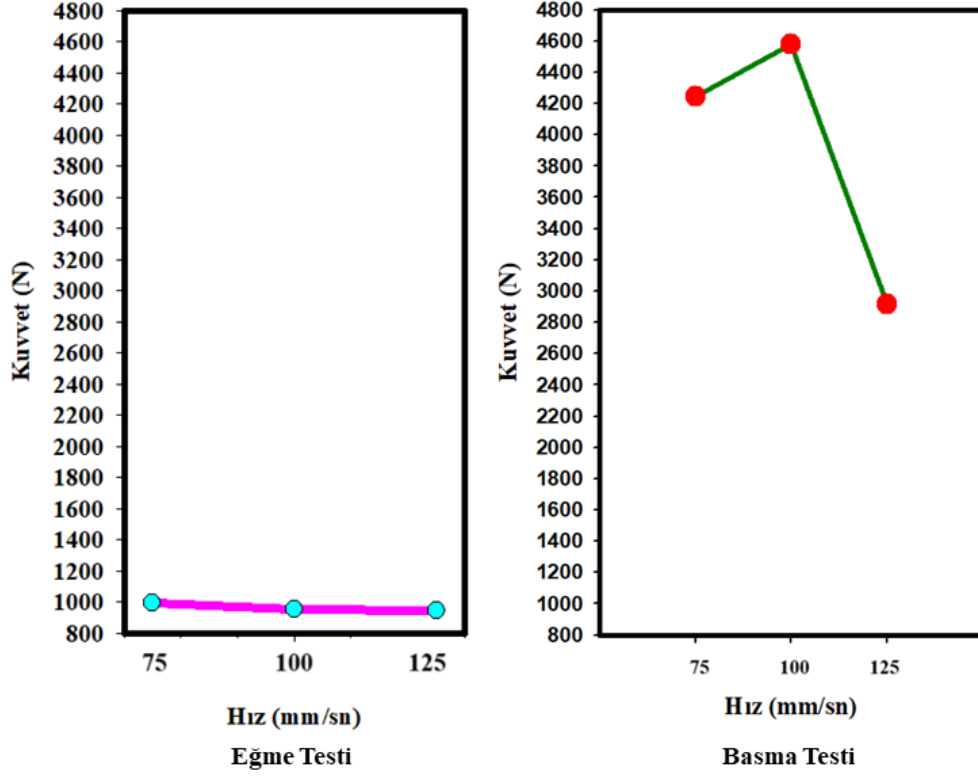


Şekil 4.43. Üç nokta eğme ve basma deneylerinden ortaya çıkan mukavemet sonuçlarının doluluk faktörüne göre kıyaslanması

Şekil 4.43'te eğme ve basma testi sonuçları incelendiğinde, doluluk oranı arttıkça her iki testte de kuvvet değerlerinin arttığı, ancak bu artışın basma testlerinde (3000-4800 N) eğme testlerine (920-940 N) kıyasla çok daha belirgin olduğu görülmektedir. Bu durum, doluluk faktörünün malzemenin basma dayanımı üzerinde daha etkili olduğunu, eğme direncinde ise nispeten sınırlı bir iyileşme sağladığını göstermektedir. Basma yükleri altında doluluk artışının malzeme içindeki boşlukları azaltarak yük dağılımını iyileştirdiği, buna karşılık eğme yüklerinde yüzey gerilmeleri ve nötr eksen etkilerinin bu iyileşmeyi kısıtladığı değerlendirilmektedir. Sonuç olarak, yüksek doluluk oranının özellikle basma yüklerine maruz kalacak malzemelerin

tasarımında kritik bir parametre olduğu, eğme dayanımı için ise ek optimizasyonlar gerektirebileceği anlaşılmaktadır (Wang et al., 2018).

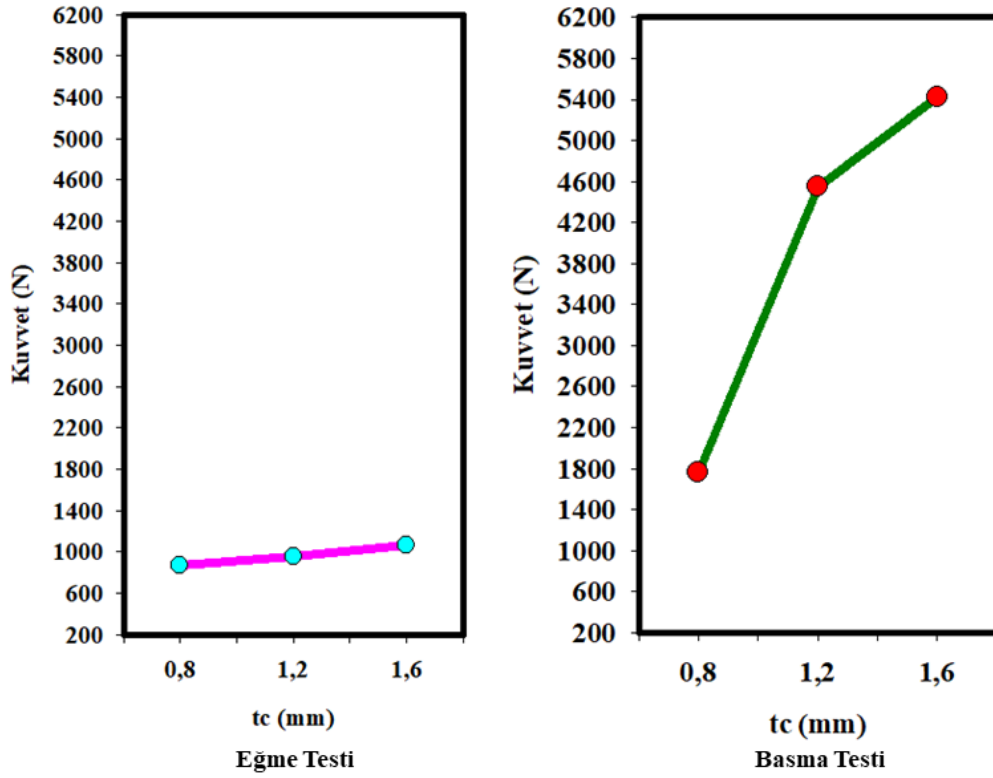
Eğme ve Basma testi ortalama sonuçlarının Hız faktörü açısından kıyaslanması



Şekil 4.44. Üç nokta eğme ve basma deneylerinden ortaya çıkan mukavemet sonuçlarının hız faktörüne göre kıyaslanması

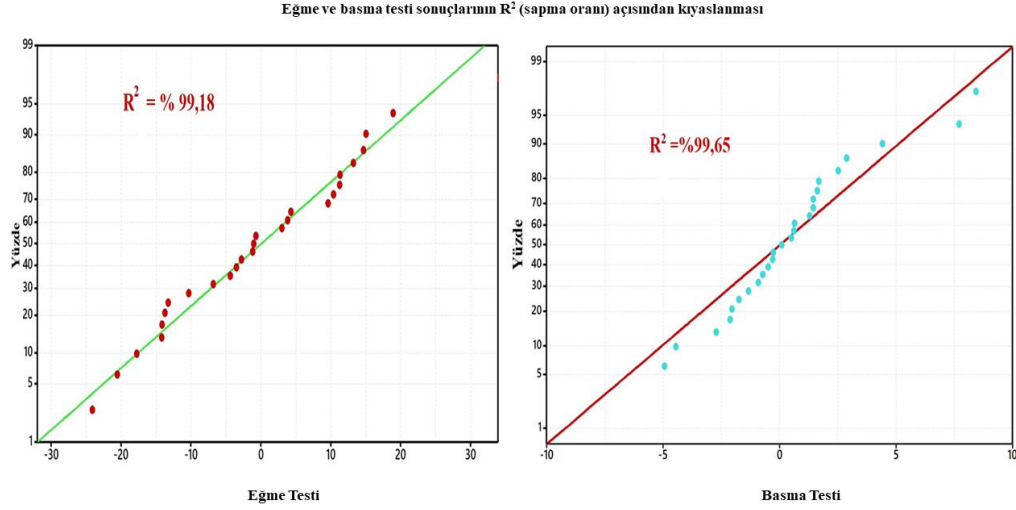
Şekil 4.44’de sunulan deneysel veriler, eklemeli imalat yazıcı hızının numunelerin mekanik performansı üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Düşük hızda (75 mm/sn) üretilen numunelerde ölçülen eğme (1000 N) ve basma (4800 N) kuvvet değerleri, yüksek hızda (125 mm/sn) üretilen numunelere kıyasla sırasıyla %6 ve %42 daha yüksek çıkmıştır. Bu önemli fark, artan imalat hızıyla birlikte katmanlar arası bağlanma kalitesinin azalması ve malzeme içi gözenekliliğin artmasından kaynaklanmaktadır. Özellikle basma testlerinde gözlenen bu belirgin düşüş, hücresel yapının yük taşıma kapasitesinin hız artışından önemli ölçüde etkilendiğini göstermektedir. Sonuçlar, kritik yapısal uygulamalar için imalat hızının optimize edilmesi gerektiğini ve özellikle 100 mm/sn üzerindeki hızların mekanik performansta ciddi kayıplara yol açabileceğini ortaya koymaktadır (Gibson et al., 2021).

Eğme ve Basma testi ortalama sonuçlarının t_c faktörü açısından kıyaslanması



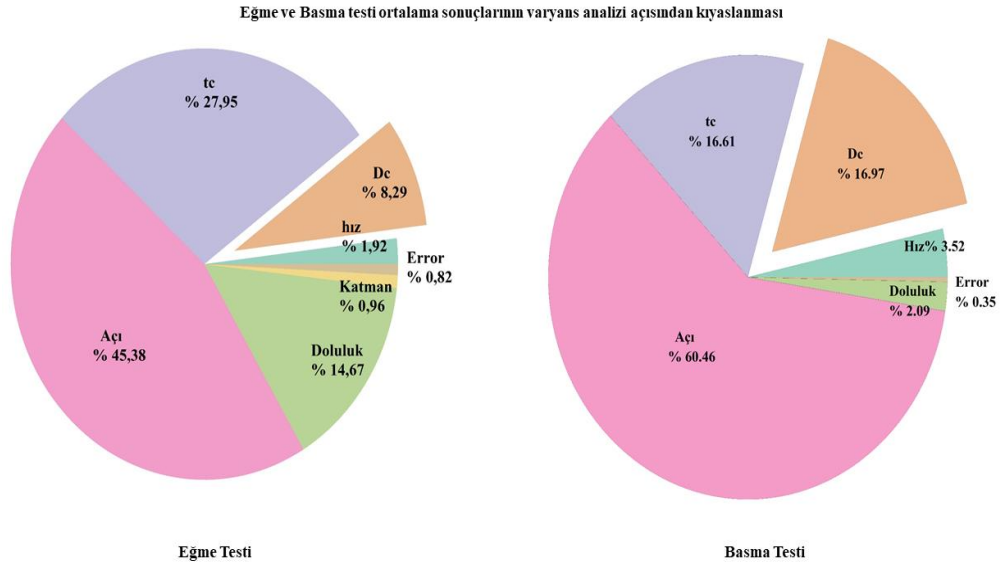
Şekil 4.45. Üç nokta eğme ve basma deneylerinden ortaya çıkan mukavemet sonuçlarının t_c faktörüne göre kıyaslanması

Şekil 4.45’de verilen t_c (çekirdek hücre duvar kalınlığı) faktörü-kuvvet ilişkisi grafiği incelendiğinde, hem eğme hem de basma testlerinde t_c kalınlığı arttıkça (0,8 mm’den 1,6 mm’ye) kuvvet değerlerinin belirgin şekilde yükseldiği gözlemlenmektedir. Eğme testlerinde (900-1000 N aralığı) ve basma testlerinde (1000-6000 N aralığı) ölçülen bu artış, malzeme kesit alanındaki artışın yük taşıma kapasitesini doğrudan etkilediğini göstermektedir. Özellikle basma testlerindeki kuvvet değerlerinin eğme testlerine kıyasla çok daha yüksek olması, t_c kalınlığı artışının basma dayanımı üzerinde daha belirgin bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bu davranış, Hooke yasası ve kesit alanı-mukavemet ilişkisi ile tutarlıdır. Eğme testlerindeki nispeten düşük kuvvet artışı ise, malzemenin eğilme durumunda nötr eksen etkileri ve yüzey gerilmelerinin baskın rol oynamasıyla açıklanabilir. Sonuçlar, mekanik tasarımda t_c kalınlığının kritik bir parametre olduğunu ve özellikle basma yüklerine maruz kalacak bileşenlerde bu parametrenin optimize edilmesi gerektiğini vurgulamaktadır (Gür ve Arslan 2010).



Şekil 4.46. Üç nokta eğme ve basma deneylerinden ortaya çıkan mukavemet sonuçlarının R^2 (sapma oranı) faktörüne göre kıyaslanması

Şekil 4.46'da verilen R^2 değerleri incelendiğinde, eğme testi için %99,18 ve basma testi için %99,65 olarak hesaplanan determinasyon katsayılarının, deneysel verilerin teorik modellerle neredeyse mükemmel uyum gösterdiğini ortaya koyduğu görülmektedir. Bu sonuçlar, testlerin yüksek tekrarlanabilirlikle gerçekleştirildiğini ve numunelerin homojen özellikler sergilediğini kanıtlamaktadır. Özellikle basma testindeki %99,65'lik R^2 değeri, hüresel yapıların mekanik davranışının matematiksel olarak yüksek doğrulukla modellenebileceğini göstermektedir. Eğme testlerindeki %99,18'lik değer ise, nötr eksen etkileri gibi karmaşık deformasyon mekanizmalarına rağmen modelin güvenilir olduğunu desteklemektedir. Bu yüksek determinasyon katsayıları, yapılacak ileri çalışmalarda teorik modellerin geçerliliğini doğrulamaktadır (Montgomery et al., 2021).



Şekil 4.47. Üç nokta eğme ve basma deneylerinden ortaya çıkan mukavemet sonuçlarının varyans analizine göre kıyaslanması

Şekil 4.47’de sunulan varyans analizi sonuçlarına göre, eğme ve basma testlerindeki parametre etkileri şu şekilde özetlenebilir: Eğme testinde en yüksek etkiye sahip parametreler sırasıyla açı (%45,38), et kalınlığı (%27,95) ve doluluk oranı (%2,09) olarak belirlenmiştir. Basma testinde ise açı parametresi %60,46’lık katkıyla baskın faktör olarak öne çıkarken, et kalınlığı (%16,61) ve hız (%3,52) parametreleri ikincil derecede önem taşımaktadır. Her iki testte de hata paylarının düşük olması (eğmede %0,82, basmada %0,35) deneysel sonuçların güvenilirliğini desteklemektedir. Bu bulgular, özellikle hücresel yapıların mekanik tasarımında açı parametresinin kritik önem taşıdığını, eğme dayanımı için ise et kalınlığının optimize edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır (Anderson & Whitcomb 2017).

4.4. Optimum Deney Sonuçları Karşılaştırılması

4.4.1. Optimum basma deneyi karşılaştırılması

ASTM C365-16 standardına uygun olarak tasarlanan çekirdek hücre yapıları, tamamen eklemeli imalat yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Çekirdek yapıların üretiminde malzeme olarak polilaktik asit (PLA) tercih edilmiş olup, üst ve alt yüzey plakaları ise %15–20 oranında karbon fiber katkılı PLA malzeme ile imal edilmiştir.

Hazırlanan numuneler üzerinde basma deneyleri gerçekleştirilmiş ve mekanik performansları detaylı şekilde incelenmiştir.

Deneyssel çalışmalar sonucunda elde edilen veriler, Taguchi deney tasarımı yöntemi çerçevesinde planlanmış olup, sonuçlar varyans analizi (ANOVA) yöntemi ile istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, çekirdek yapının basma dayanımını etkileyen en önemli üretim parametreleri belirlenmiş ve Tablo 4.13'te verilen optimum üretim koşulları tespit edilmiştir.

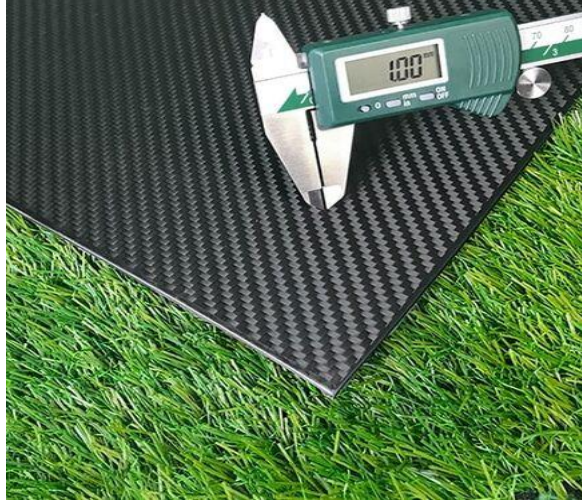
Tablo 4.13. Basma deneyleri için optimum parametreler

Faktör	Birim	Değer
Hız	mm/sn	100
Dc	mm	6
tc	mm	1,6
Açı	derece	75
Doluluk	%	100

Bu kapsamda çalışma, 3D baskı teknolojileriyle üretilen hibrit kompozit yapıların mekanik davranışlarının anlaşılması ve üretim sürecinin optimizasyonuna yönelik önemli katkılar sunmaktadır.

Optimum parametrelerin belirlenmesinin ardından, aynı standart çerçevesinde çekirdek hücresi yeniden tasarlanmış ve PLA malzemeden, 3 boyutlu yazıcı kullanılarak eklemeli imalat yöntemiyle üretilmiştir. Bu kez üretilen çekirdek yapı, üst ve alt yüzeylerinde 75×75 mm boyutlarında ve 1 mm kalınlığında, %100 karbon fiberden geleneksel yöntemlerle imal edilmiş kompozit plakalar ile birleştirilmiştir. Söz konusu karbon fiber plakalar, Dost Kimya firmasından temin edilmiş olup, Şekil 4.48'de görseli sunulmuştur. Bu birleşim sonucunda, sandviç yapı formunda nihai bir kompozit plaka elde edilmiştir.

Oluşturulan bu yeni sandviç kompozit yapı, mekanik performans açısından deneyssel olarak test edilmiş ve elde edilen sonuçlar, geleneksel yöntemlerle imal edilen karbon fiber takviyeli kompozit plakaların performansları 3D ile imal edilen plakalar ile karşılaştırılmıştır.

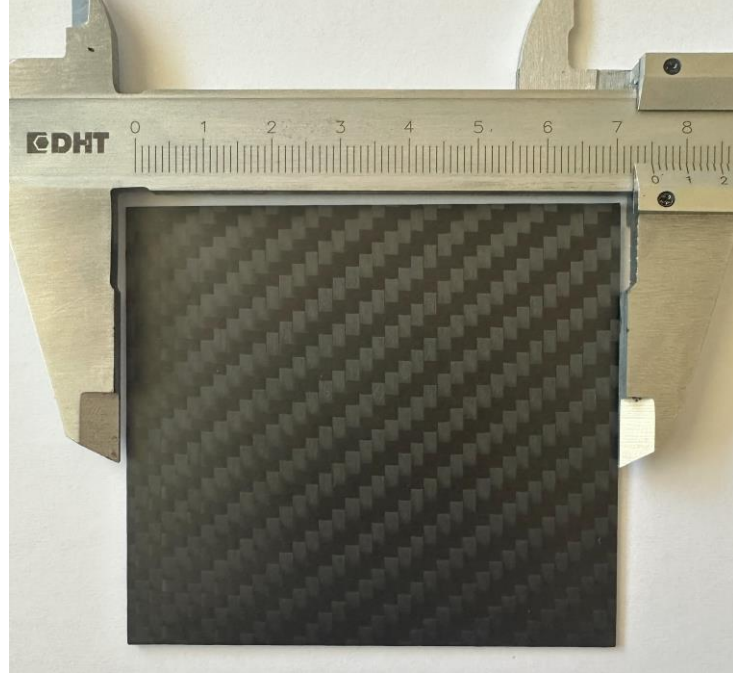


Şekil 4.48. 1 mm kalınlığında %100 karbon fiber plaka (Dostkimya , 2025)

Bu çalışmada kullanılan karbon fiber takviyeli kompozit plakalar, epoksi bazlı prepreg malzemelerin sıcak presleme yöntemi ile her iki yüzeyi pürüzsüz olacak şekilde üretilmiş yüksek performanslı yapısal elemanlardır. Söz konusu plakalar, yalnızca dekoratif amaçlı değil, aynı zamanda yüksek mekanik dayanım gerektiren yapısal uygulamalar için de uygundur.

Plakalar, mühendislik, mimarlık, denizcilik, havacılık, medikal cihaz üretimi, modelleme, makine sistemleri, fıkstür tasarımları, insansız hava araçları (İHA), drone teknolojileri ve motor sporları gibi geniş bir endüstriyel uygulama yelpazesinde kullanılmaktadır. Standart ebat ve kalınlıkların yanı sıra, farklı karbon fiber oryantasyonlarına sahip özel üretim plakalar da kullanıcı ihtiyaçlarına göre üretilmektedir.

Ayrıca, bu plakalar CNC kesim teknolojisi ile yüksek hassasiyette işlenebilmekte ve istenilen geometrilere uygun şekilde şekillendirilebilmektedir. Şekil 4.49’da, CNC kesim yöntemi ile hazırlanmış Tablo 4.14’te teknik özellikleri verilmiş karbon fiber plakaların bir örneği görsel olarak sunulmuştur.

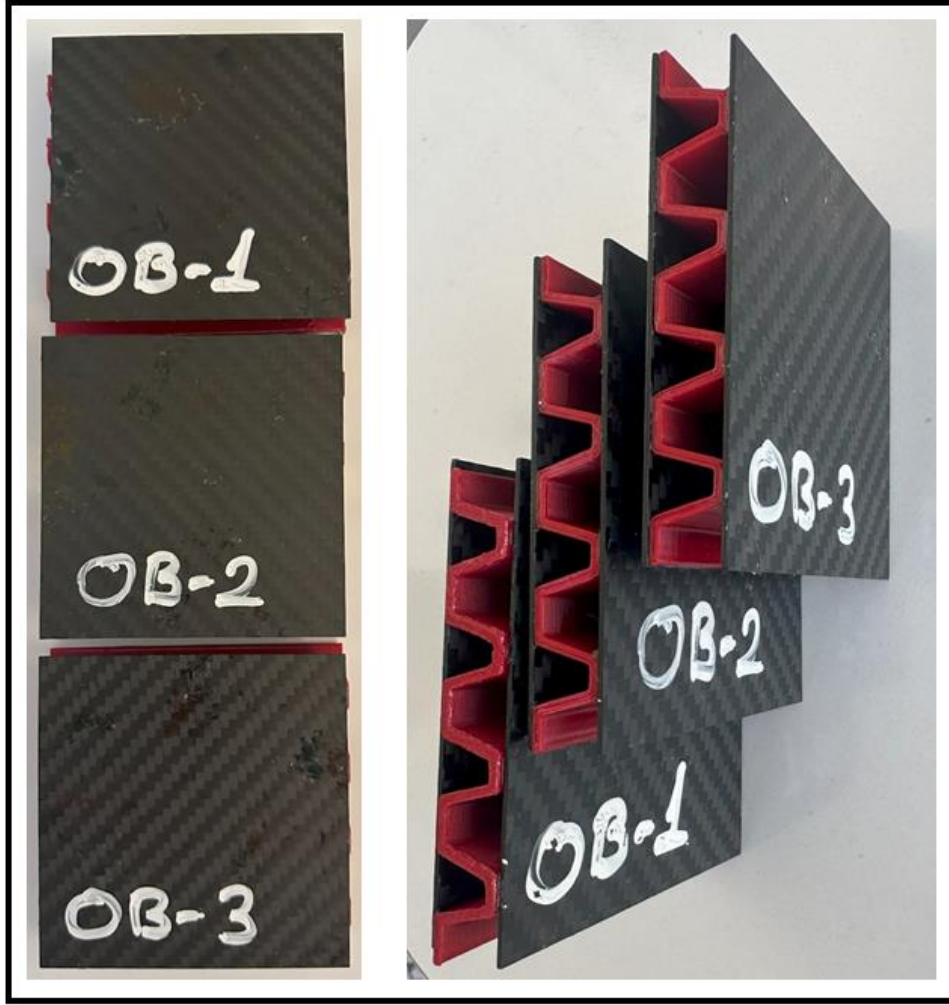


Şekil 4.49. Eni boyu 75X75 mm ve 1 mm kalınlığa sahip %100 karbon fiber plaka

Tablo 4.14. Karbon plakanın teknik özellikleri

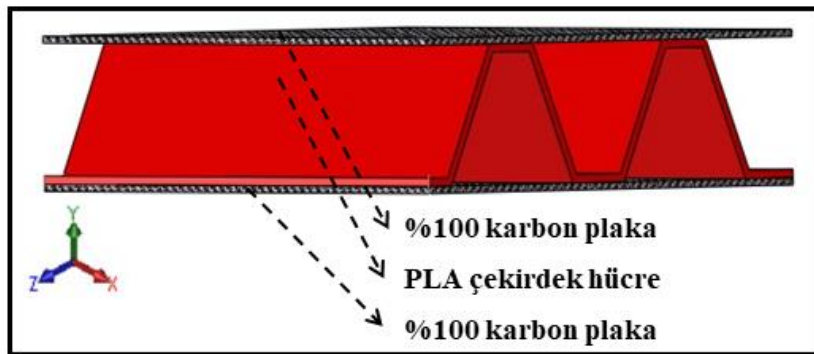
Açıklama	Ölçüler
Ağırlığına göre lif içeriği	%60
Hacimce lif içeriği	%50
Çekme dayanımı	775 Mpa
Sıkıştırma dayanımı	475 Mpa
Bükölme mukavemeti	725 Mpa
Eğilme Modölü	60 Gpa
Yoğunluğu	1,5 g/cm ³

Üst ve alt yüzeyleri %100 karbon plakadan, çekirdek kısmı ise PLA esaslı hücresel yapıdan oluşın ve optimum basma testi için hazırlanmış trapezoid sandviç plakanın, oda sıcaklığında 24 saat boyunca 0,5 MPa basınç altında kürlenme işlemi sonrasında elde edilen üstten ve perspektif görünümü Şekil 4.50’de verilmektedir.



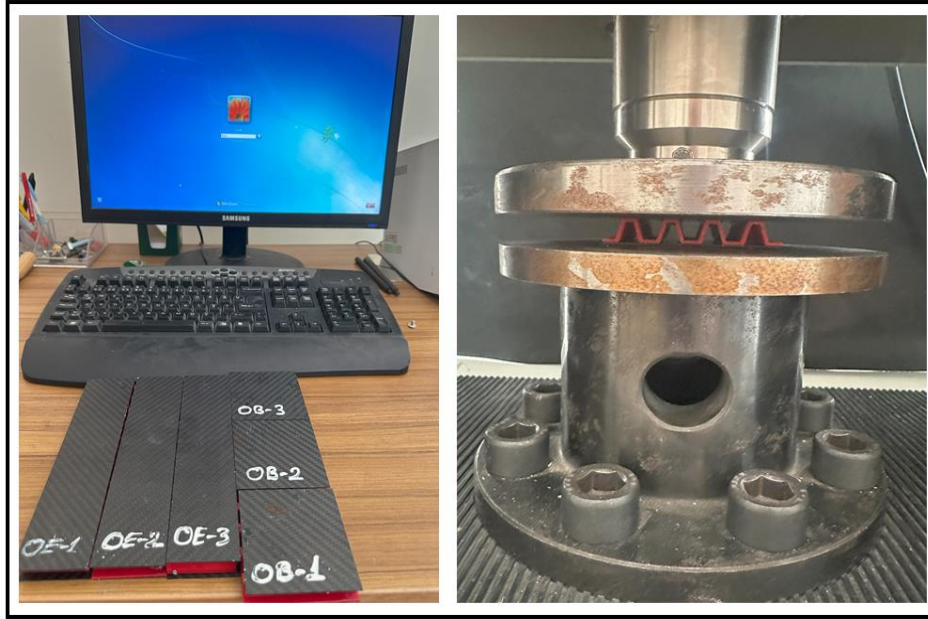
Şekil 4.50. Basma testi için hazırlanmış numunelerin üstten ve perspektif görüntüsü

Üst ve alt yüzeyleri %100 karbon plaka, çekirdek kısmı ise PLA hücre yapısından oluşan basma testi için hazırlanmış trapezoid sandviç plakanın şematik gösterimi Şekil 4.51’de gösterilmektedir.



Şekil 4.51. %100 karbon plaka ile yapılan basma testi için hazırlanmış numune montaj hali

Optimum Basma mukayese deneyleri, Şekil 4.52’de gösterilen, Batman Üniversitesi Makine Mühendisliği Laboratuvarı’ndaki Shimadzu AG-IC model 250 kN (Shimadzu, 2023) cihazı kullanılarak oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Deneyler, iki adet sertleştirilmiş basma kafası arasında 1 mm/dak hızda ve ASTM C365-16 standardı doğrultusunda yapılmıştır.

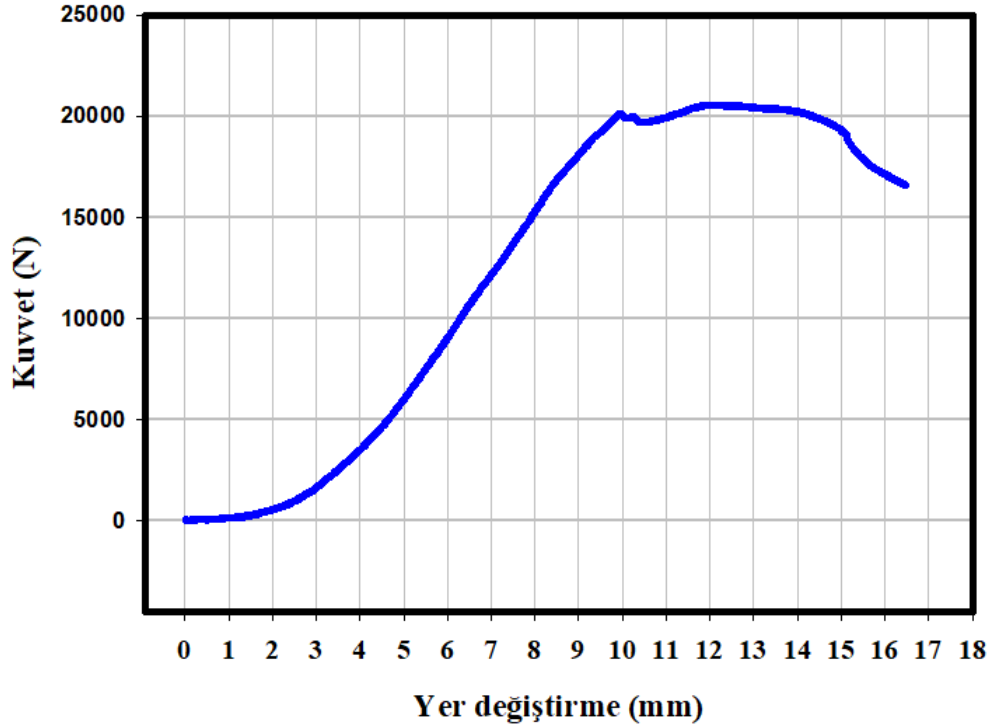


Şekil 4.52. %100 karbon plaka ile yapılan basma deneyi

Basma testi verilerinin Taguchi yöntemi ile analiz edilmesi ve varyans analizi (ANOVA) sonuçlarına göre, optimum üretim parametreleri; üç boyutlu yazıcı baskı hızı 100 mm/sn, hücre genişliği $D_c=6$ mm, hücre duvar kalınlığı $t_c=1,6$ mm, trapezoid hücre taban açısı 75 derece ve baskı doluluk oranı %100 olarak belirlenmiştir. Bu optimum parametreler ile üretilen numunelerin performansını karşılaştırmak amacıyla, sandviç plakanın alt ve üst yüzey plakaları %100 karbon plaka kullanarak üretilmiş sandviç kompozit plaka üzerinde basma testi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrisi Şekil 4.53’de sunulmuş olup, maksimum basma kuvvetinin 20570 N olduğu tespit edilmiştir.

Karşılaştırmalı deneylerde, tamamen eklemeli imalat yöntemi ile üretilen ve alt-üst yüzey plakaları %15–20 oranında karbon fiber takviyeli PLA (PLA-CF) malzemeden imal edilen sandviç plakaların maksimum basma kuvveti 8086 N olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar dikkate alındığında, %100 karbon plaka kullanılan

sandviç kompozit plakanın, PLA-CF takviyeli numunelere kıyasla yaklaşık %254 oranında daha yüksek 20570 N basma mukavemeti sergilediği belirlenmiştir.



Şekil 4.53. %100 karbon plaka ile yapılan basma deneyi kuvvet yer değiştirme grafiği

4.4.2. Optimum üç nokta eğme deneyi karşılaştırılması

ASTM C393-16 standardına uygun olarak tasarlanan çekirdek hücre yapıları, tamamen eklemeli imalat yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Çekirdek yapıların üretiminde malzeme olarak polilaktik asit (PLA) tercih edilmiş olup, üst ve alt yüzey plakaları ise %15–20 oranında karbon fiber katkılı PLA malzeme ile imal edilmiştir. Hazırlanan numuneler üzerinde basma deneyleri gerçekleştirilmiş ve mekanik performansları detaylı şekilde incelenmiştir.

Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen veriler, Taguchi deney tasarımı yöntemi çerçevesinde planlanmış olup, sonuçlar varyans analizi (ANOVA) yöntemi ile istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, çekirdek yapının basma dayanımını etkileyen en önemli üretim parametreleri belirlenmiş ve Tablo 4.15'te verilen optimum üretim koşulları tespit edilmiştir.

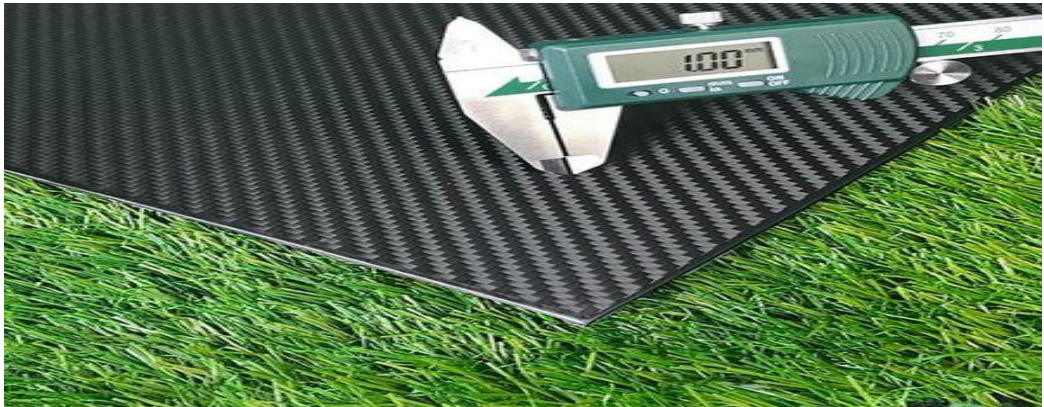
Tablo 4.15. Üç nokta eğme deneyleri için optimum parametreler

Faktör	Birim	Değer
Hız	mm/sn	75
Dc	mm	6
tc	mm	1,6
Açı	derece	75
Doluluk	%	100

Bu kapsamda çalışma, 3D baskı teknolojileriyle üretilen hibrit kompozit yapıların mekanik davranışlarının anlaşılması ve üretim sürecinin optimizasyonuna yönelik önemli katkılar sunmaktadır.

Optimum parametrelerin belirlenmesinin ardından, aynı standart çerçevesinde çekirdek hücresi yeniden tasarlanmış ve PLA malzemeden, 3 boyutlu yazıcı kullanılarak eklemeli imalat yöntemiyle üretilmiştir. Bu kez üretilen çekirdek yapı, üst ve alt yüzeylerinde 200×50 mm boyutlarında ve 1 mm kalınlığında, %100 karbon fiberden geleneksel yöntemlerle imal edilmiş kompozit plakalar ile birleştirilmiştir. Söz konusu karbon fiber plakalar, Dost Kimya firmasından temin edilmiş olup, Şekil 4.54'te görseli sunulmuştur. Bu birleşim sonucunda, sandviç yapı formunda nihai bir kompozit plaka elde edilmiştir.

Oluşturulan bu yeni sandviç kompozit yapı, mekanik performans açısından deneysel olarak test edilmiş ve elde edilen sonuçlar, geleneksel yöntemlerle imal edilen karbon fiber takviyeli kompozit plakaların performansları 3D ile imal edilen plakalar ile karşılaştırılmıştır.

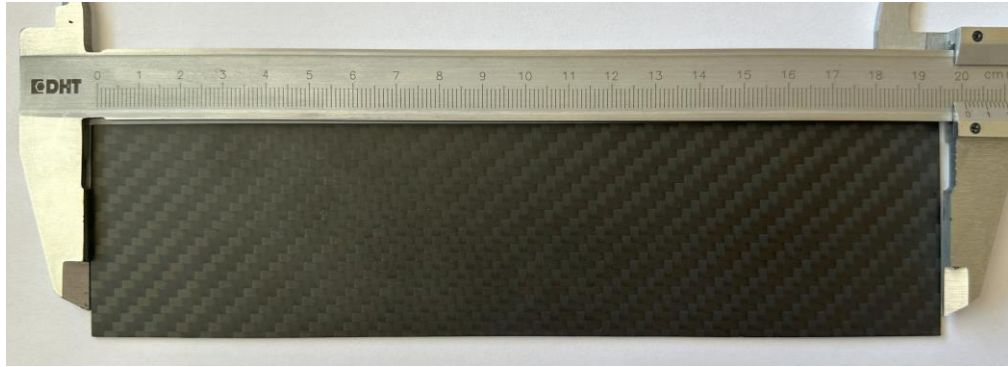


Şekil 4.54. 1 mm kalınlığında %100 karbon fiber plaka (Dostkimya, 2025)

Bu çalışmada kullanılan karbon fiber takviyeli kompozit plakalar, epoksi bazlı prepreg malzemelerin sıcak presleme yöntemi ile her iki yüzeyi pürüzsüz olacak şekilde üretilmiş yüksek performanslı yapısal elemanlardır. Söz konusu plakalar, yalnızca dekoratif amaçlı değil, aynı zamanda yüksek mekanik dayanım gerektiren yapısal uygulamalar için de uygundur.

Plakalar, mühendislik, mimarlık, denizcilik, havacılık, medikal cihaz üretimi, modelleme, makine sistemleri, fiktür tasarımları, insansız hava araçları (İHA), drone teknolojileri ve motor sporları gibi geniş bir endüstriyel uygulama yelpazesinde kullanılmaktadır. Standart ebat ve kalınlıkların yanı sıra, farklı karbon fiber oryantasyonlarına sahip özel üretim plakalar da kullanıcı ihtiyaçlarına göre üretilmektedir.

Ayrıca, bu plakalar CNC kesim teknolojisi ile yüksek hassasiyette işlenebilmekte ve istenilen geometrilere uygun şekilde şekillendirilebilmektedir. Şekil 4.55’de, CNC kesim yöntemi ile hazırlanmış Tablo 4.16’da teknik özellikleri verilmiş karbon fiber plakaların bir örneği görsel olarak sunulmuştur.



Şekil 4.55. Eni boyu 200X50 mm ve 1 mm kalınlığa sahip %100 karbon fiber plaka

Tablo 4.16. Karbon plakanın teknik özellikleri

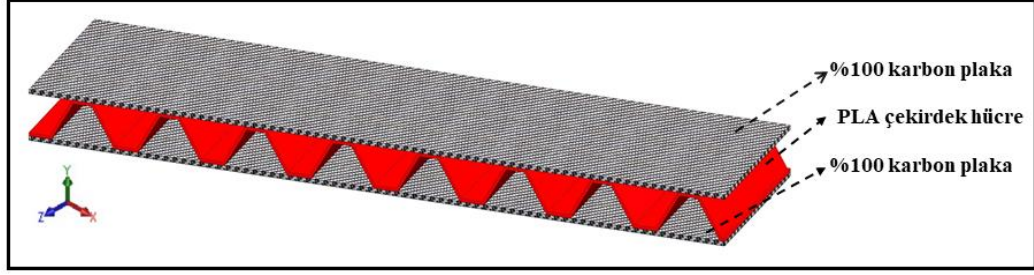
Açıklama	Ölçüler
Ağırlığına göre lif içeriği	%60
Hacimce lif içeriği	%50
Çekme dayanımı	775 MPa
Sıkıştırma dayanımı	475 MPa
Bükülme mukavemeti	725 MPa
Eğilme Modülü	60 GPa
Yoğunluğu	1,5 g/cm ³

Üst ve alt yüzeyleri %100 karbon plakadan, çekirdek kısmı ise PLA esaslı hücresel yapıdan oluşan ve üç nokta eğme (optimum eğme) testi için hazırlanmış trapezoid sandviç plakanın, oda sıcaklığında 24 saat boyunca 0,5 MPa basınç altında kürlenme işlemi sonrasında elde edilen üstten ve perspektif görünümü Şekil 4.56'da verilmektedir.



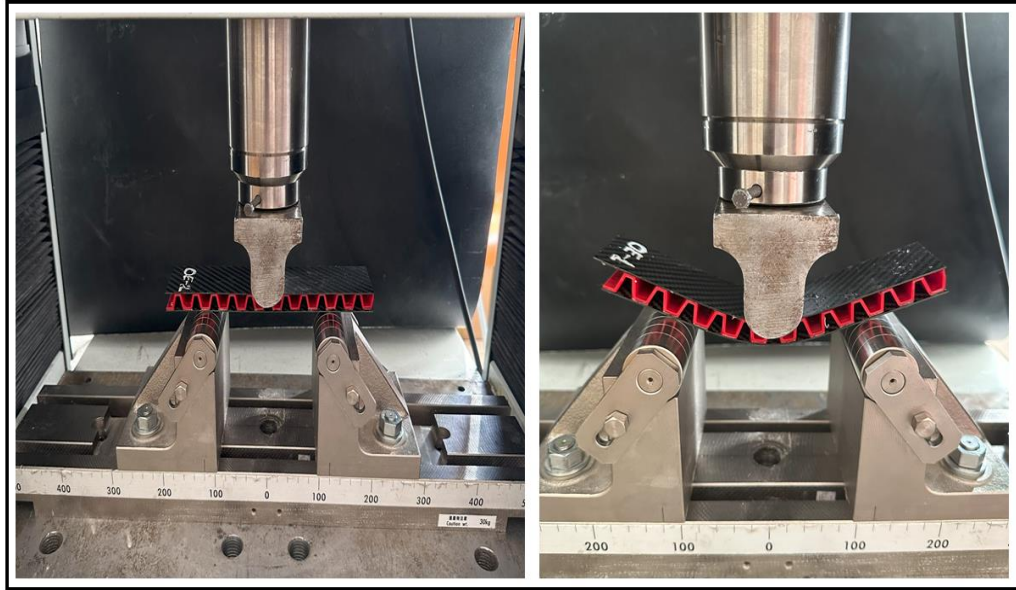
Şekil 4.56. Üç nokta eğme testi için hazırlanmış numunelerin üstten ve perspektif görüntüsü

Üst ve alt yüzeyleri %100 karbon plaka, çekirdek kısmı ise PLA hücre yapısından oluşan üç nokta eğme testi için hazırlanmış trapezoid sandviç plakanın şematik gösterimi Şekil 4.57'de gösterilmektedir.



Şekil 4.57. %100 karbon plaka ile yapılan üç nokta eğme testi için hazırlanmış numune montaj hali

Optimum Üç nokta eğme mukayese deneyleri, Şekil 4.58’de gösterilen Batman Üniversitesi Makine Mühendisliği Laboratuvarı’nda bulunan Shimadzu AG-IC model 250 kN kapasiteli (Shimadzu, 2023) test cihazı kullanılarak oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Deneyler, 5 mm/dakika yükleme hızıyla uygulanmış ve ASTM C393-16 standardına uygun şekilde yapılmıştır. Bu standart, özellikle sandviç yapıların eğilme dayanımının ve performansının güvenilir ve tekrarlanabilir biçimde ölçülmesini sağlamaktadır. Ayrıca, test parametrelerinin standartlara uygun seçilmesi, elde edilen sonuçların literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırılabilirliğini artırmaktadır.

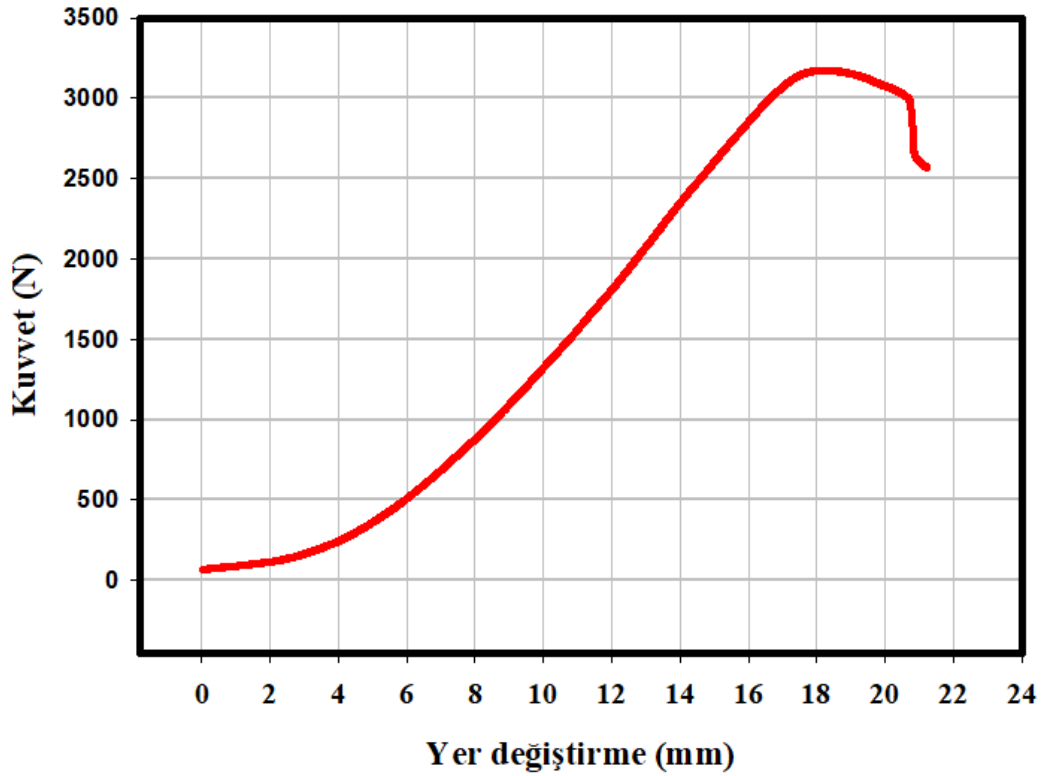


Şekil 4.58. %100 karbon plaka ile yapılan üç nokta eğme deneyi

Üç nokta eğme testi verilerinin Taguchi yöntemi ile analiz edilmesi ve varyans analizi (ANOVA) sonuçlarına göre, optimum üretim parametreleri; üç boyutlu yazıcı baskı hızı 100 mm/sn, hücre genişliği $D_c=6$ mm, hücre duvar kalınlığı $t_c=1,6$ mm, trapezoid hücre taban açısı 75 derece ve baskı doluluk oranı %100 olarak belirlenmiştir.

Bu optimum parametreler ile üretilen numunelerin performansını karşılaştırmak amacıyla, sandviç plakanın alt ve üst yüzey plakaları %100 karbon plaka kullanılarak üretilmiş sandviç kompozit plaka üzerinde üç nokta eğme testi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrisi Şekil 4.59’da sunulmuş olup, maksimum eğme kuvvetinin 3173 N olduğu tespit edilmiştir.

Karşılaştırmalı deneylerde, tamamen eklemeli imalat yöntemi ile üretilen ve alt-üst yüzey plakaları %15–20 oranında karbon fiber takviyeli PLA (PLA-CF) malzemeden imal edilen sandviç plakaların maksimum eğme kuvveti 1103 N olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar dikkate alındığında, %100 karbon plaka kullanılan sandviç kompozit plakanın, PLA-CF takviyeli numunelere kıyasla yaklaşık %287 oranında daha yüksek 3173 N eğme mukavemeti sergilediği belirlenmiştir.



Şekil 4.59. %100 karbon plaka ile yapılan üç nokta eğme deneyi kuvvet yer değiştirme grafiği

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

5.1.1. Basma testi bulguları

- Basma dayanımı, özellikle hücre taban açısının artışı ile anlamlı şekilde yükselmiştir. 75° taban açısına sahip örnek, 8086 N ile en yüksek dayanımı göstermiştir.
- Duvar kalınlığı 1,6 mm, duvar genişliği 6 mm olarak belirlenen örnekler sırasıyla 5422 N ve 5735 N dayanım ile en iyi performansları sergilemiştir.
- Yazdırma hızı ve doluluk oranı, diğer parametrelere göre daha az etkili olmakla birlikte, sırasıyla 100 mm/sn hızda 4576 N ve %100 dolulukta 4578 N değerine ulaşılmıştır.
- Varyans analizine göre; taban açısı (%60,46), basma dayanımını etkileyen en önemli parametre olarak belirlenmiş; bunu duvar genişliği (%16,97), duvar kalınlığı (%16,61), yazdırma hızı (%3,52) ve doluluk oranı (%2,09) izlemiştir.
- Regresyon analizinde elde edilen $R^2 = \%99,67$ değeri, modelin yüksek derecede doğrulukla deneysel verileri temsil ettiğini göstermektedir.

5.1.2. Üç nokta eğme testi bulguları

- Eğme dayanımı, tıpkı basma dayanımında olduğu gibi, taban açısının artışıyla artmıştır. 75° taban açısına sahip numunede 1102,9 N ile en yüksek eğme kuvveti ölçülmüştür.
- En iyi eğme performansı, 1,6 mm duvar kalınlığı (1061,5 N), 6 mm duvar genişliği (993,4 N), %100 doluluk oranı (1043,5 N) ve 75 mm/sn yazdırma hızı (991,7 N) ile elde edilmiştir,
- ANOVA sonuçları, eğme dayanımında da taban açısının (%45,38) en yüksek etki oranına sahip olduğunu; bunu duvar kalınlığı (%27,95), doluluk oranı

(%14,67), duvar genişliği (%8,29) ve yazdırma hızı (%1,92) parametrelerinin izlediğini ortaya koymuştur.

- Regresyon analizinde elde edilen $R^2 = \%99,18$, eğme test verilerinin modelle uyumlu olduğunu göstermektedir.

5.1.3. Basma ve üç nokta eğme testi optimum bulguların %100 karbon plakalar ile mukayesesi

Taguchi yöntemi ve varyans analizi (ANOVA) ile belirlenen optimum üretim parametreleri kullanılarak üretilen sandviç plakalar, %100 karbon plaka yüzeylere sahip sandviç kompozit plakalar ile karşılaştırılmıştır.

Basma testinde, %100 karbon plaka numuneler 20570 N maksimum kuvvet ile %15–20 PLA-CF yüzey plakalı numunelere kıyasla yaklaşık %254 daha yüksek basma mukavemeti sergilemiştir.

Üç nokta eğme testinde ise, %100 karbon plaka numuneler 3173 N maksimum kuvvet ile PLA-CF yüzey plakalı numunelere kıyasla yaklaşık %287 daha yüksek eğme mukavemeti göstermiştir.

Bu sonuçlar, karbon plaka yüzeylerin hem basma hem de eğme yükleri altında belirgin bir mekanik performans üstünlüğü sağladığını ortaya koymaktadır.

5.1.4. Literatürle uyum

- Elde edilen sonuçlar, Tablo 5.1’de de gösterildiği gibi Kaveloğlu (2022), Bayraklılar (2024) ve Ulkir ve ark. (2023) gibi literatürdeki benzer çalışmalardaki bulgularla tutarlılık göstermektedir.
- Yapay zekâ ve regresyon modellerinin üretim sürecine entegrasyonu, hem mekanik özelliklerin optimizasyonu hem de enerji verimliliğinin artırılması açısından önemli bir potansiyel sunabilmektedir.
- Taguchi yöntemi ile yapılan tasarım, parametrelerin etkisini minimum sayıda deneyle belirleme açısından etkinliğini ortaya koyabilmektedir.
- Bu çalışma, trapezoid hücre geometrisine sahip sandviç yapılarda üretim parametrelerinin etkisini ele alan sınırlı sayıdaki çalışmalardan biri olarak

değerlendirilebilir. Tek ve çift katmanlı yapıların karşılaştırılması, literatüre katkı sunabilecek nitelikte sonuçlar ortaya koymuştur. Ayrıca, PLA/CF malzemenin 3B baskı ile kullanımını, eklemeli imalat açısından dikkat çekici bir uygulama olarak öne çıkmaktadır. Bulguların, benzer yapısal tasarım ve optimizasyon çalışmalarına yön verebileceği düşünülmektedir.

Tablo 5.1. Literatür karşılaştırması, sandviç yapıların basma ve eğme dayanımları

Çalışma	Malzeme/Geometri	Parametreler	Basma Dayanımı (N)	Eğme Dayanımı (N)	R ² Değeri	Önemli Bulgular
Kaveloğlu (2022)	PLA, PET, ABS; Petek yapı, 3D yazıcı	Hücre genişliği, duvar kalınlığı, yazdırma hızı, doluluk oranı	PLA: %6 artış, ABS: %15-%20	PLA: %10 artış, ABS: %15-%20	%99,65	Hücre genişliği ve duvar kalınlığı arttıkça basma ve eğme dayanımlarının arttığı gözlemlenmiştir.
Tez Çalışmamız	PLA, Karbon Fiber Takviyeli Kompozit, Trapezoid hücre	Hücre genişliği, duvar kalınlığı, yazdırma hızı, doluluk oranı	8086 N (75° taban açısı)	1102,9 N (75° taban açısı)	%99,67	Trapezoid hücre deseniyle yapılan çalışmada, hücre taban açısının ve duvar kalınlığının dayanım üzerinde önemli etkisi olduğu bulunmuştur.
Bayraklılar (2024)	ABS, 50% doluluk, 0,2 mm duvar kalınlığı	Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS) kullanımı, yapay sinir ağları (YSA) ile tahmin	%90 doğruluk (YSA)	—	—	ABS malzeme ile yapılan çalışmada, YSA kullanılarak yapılan tahminlerin %90'ın üzerinde doğruluk sağlandığı bulunmuştur.
Ulkir vd. (2023)	PLA, FDM, enerji tüketimi tahmini	Gauss Süreci Regresyon, 3B yazıcılar	—	—	%99,00	FDM ile yapılan çalışmada enerji tüketimini tahmin etmek için yüksek doğruluk sağlanmıştır.

5.2. Öneriler

5.2.1. Akademik ve bilimsel öneriler

- Trapezoid hücre geometrisinin, hem basma hem de eğme dayanımında olumlu etkileri olduğu görülmüş; bu nedenle benzer uygulamalarda bu tür geometrilerin tercih edilmesi önerilmektedir.

- Taguchi ve ANOVA yöntemlerinin birlikte kullanılması, hem deney sayısını azaltmakta hem de en etkili parametrelerin belirlenmesini kolaylaştırmaktadır; bu yöntemlerin, diğer mekanik testlerde de yaygın olarak kullanılabilirliği artırılmalıdır.
- Geliştirilen regresyon modelleri, deneysel süreçlerin önceden simülasyonla tahmin edilmesine imkân tanımakta olup; bu modellerin ileri düzey yapay zeka teknikleri ile desteklenerek daha geniş malzeme gruplarında denenmesi önerilmektedir.

5.2.2. Endüstriyel ve uygulamalı öneriler

- Havacılık ve savunma sanayii gibi hafiflik ve yüksek mekanik performansın kritik olduğu sektörlerde, eklemeli imalatla üretilmiş sandviç yapılar güvenle kullanılabilir.
- İnşaat sektöründe, modüler yapılar, cephe panelleri ve ısı-akustik yalıtım malzemeleri olarak bu tür yapılar etkin biçimde uygulanabilir.
- Üretim sırasında kullanılan parametrelerin dijital ikiz modellerle senkronize edilmesi, üretim hatalarının azaltılmasına ve enerji verimliliğinin artırılmasına katkı sağlayabilir.
- Ürün kalitesi ve maliyet avantajlarının artırılması için, yazılım destekli otomatik kalibrasyon sistemleri ve ileri düzey izleme teknikleri geliştirilmelidir.

5.2.3. Gelecek çalışmalar için öneriler

- Farklı polimer türlerinin (ABS, PETG vb.) ve takviye malzemelerinin mekanik etkilerinin karşılaştırmalı olarak incelenmesi literatüre katkı sağlayabilecek görülmektedir.
- Yapay sinir ağları (YSA), rastgele ormanlar (RFR) ve Gauss Süreci Regresyonu gibi modellerin, çok değişkenli analizlerde daha geniş veri kümeleri ile test edilmesi önerilmektedir.
- Termal, akustik ve darbe dayanımı gibi çoklu performans kriterleri açısından da benzer deneysel çalışmaların yapılması, bu yapıların bütüncül değerlendirilmesine olanak tanıyabilecektir.

KAYNAKLAR

- Akbaba, A. İ., & Akbulut, E. (2021). 3 Boyutlu Yazıcılar ve Kullanım Alanları. *ETÜ Sentez İktisadi Ve İdari Bilimler Dergisi*(3), 19-46.
- Akgümüş Gök, Z., Ertürk, M., & Yılmaz, B. (2023). Elektron ışınli ergitme teknolojisinin mekanik özelliklere etkisi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 13(3), 517–537. <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.1251130>
- Al-Ketan, O., Rowshan, R., & Abu Al-Rub, R., K. (2018). Topology-mechanical property relationship of 3D printed strut, skeletal, and sheet based periodic metallic cellular materials, *Additive Manufacturing*, 19, 167–183.
- Anderson, M. J., & Whitcomb, P. J. (2017). DOE simplified: Practical tools for effective experimentation (3rd ed.). Productivity Press. <https://doi.org/10.4324/9781315215197>
- Armentani, E., Caputo, F., & Esposito, R. (2006). FE Analysis of buckling of corrugated structures. *4th International Journal of Impact Engineering*.
- Ashby, M. F. (2016). Materials selection in mechanical design (5th ed.). Butterworth-Heinemann.
- ASTM International. (2022). *ASTM C365/C365M-16: Standard Test Method for Flatwise Compressive Properties of Sandwich Cores*. ASTM International.
- Aydin, F. (2019). Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen farklı partikül takviyeli magnezyum matrisli kompozit malzemelerin mekanik ve korozyon özelliklerinin incelenmesi [Yüksek lisans tezi, Karabük Üniversitesi].
- Banhart, J. (2000). Manufacturing routes for metallic foams. *Jom*, 52(12), 22–27. <https://doi.org/10.1007/s11837-000-0062-8>
- Bardella, L., & Genna, F. (2001). Elastic design of syntactic foamed sandwiches obtained by filling of three-dimensional sandwich-fabric panels. *International Journal of Solids and Structures*, 38(2), 307–333.
- Bay, K. E., & Uzun, G. (2024). FDM Yöntemi ile Üretilen Sandviç Yapılarda Üretim Parametrelerinin Mekanik Performans Üzerindeki Etkisi. *Manufacturing Technologies and Applications*, 5(2), 75-88. <https://doi.org/10.52795/mateca.1488266>
- Bayraklılar, M. S., Kuncan, M., Buldu, A., Koçak, M. T., & Ülker, O. (2023). Comparison of mechanical properties of samples fabricated by stereolithography

- and fused deposition modelling. *Journal of Materials and Mechatronics: A*, 4(2), 475–491. <https://doi.org/10.55546/jmm.1358963>
- Bayraklılar, M. S. (2024). Dimensional accuracy of a hole diameter produced by material extrusion. *Journal of Testing and Evaluation*, 52(4), 1968–1987.
- Bayraklılar, M. S. (2024). Dimensional accuracy of acrylonitrile butadiene styrene material produced by additive manufacturing method. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 33(5), 2531–2551.
- Boudjemai, A., Bouanane, M. H., Mankour, R. A., Salem, H., & Chouchaoui, B. (2012). MDA of hexagonal honeycomb plates used for space applications. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 6(6), 1061-1069.
- Brischetto, S., Ferro, C. G., Torre, R., & Maggiore, P. (2018). 3D FDM production and mechanical behavior of polymeric sandwich specimens embedding classical and honeycomb cores. *Curved and Layered Structures*, 5(1), 80–94.
- Bulut, Y., & Erdoğan, Ü. H. (2011). Selüloz esaslı doğal liflerin kompozit üretiminde takviye materyali olarak kullanımı. *Tekstil ve Mühendis*, 18(82), 26–35.
- Canıyılmaz, E., & Kutay, F. (2003). Taguchi metodunda varyans analizine alternatif bir yaklaşım. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 18(3), 51-63
- Chia, S., & Wu, B. (2019). Recent advances in 3D printing of biomaterials. *Biomaterials Science*, 3(5), 760–772. <https://doi.org/10.1039/C8BM01246G>
- Chia, H. N., & Wu, B. M. (2015). Recent advances in 3D printing of biomaterials. *Journal of biological engineering*, 9(1), 4.
- Chua, C. K., Leong, K. F., & Lim, C. S. (2014). 3D printing and additive manufacturing: Principles and applications (4th ed.). *World Scientific Publishing Company*.
- Çelikeloglu, R. (2023). *PLA ve ABS polimerlerin hızlı prototipleme üretimi sonrası mekanik davranışlarının değerlendirilmesi* [Yayınlanmamış yüksek lisans tezi]. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi.
- Dayyani, I., & Ziaei-Rad, S. (2011). *Nonlinear finite element analysis of composite corrugated boards with elastomeric coatings* [Doctoral dissertation, Master dissertation]. Isfahan university of Technology, Iran.
- Dayyani, I., Ziaei-Rad, S., & Friswell, M. I. (2014). The mechanical behavior of composite corrugated core coated with elastomer for morphing skins. *Journal of Composite Materials*, 48(13), 1623–1636.
- Dursun, T., & Ozbay, M. (2008). Progressive damage modeling for laminated composite plates. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 23(1), 65–68.

- Eminoğlu, E. (2023). *Pelet esaslı 3B kompozit yazıcı, karma elyaf tekniği ile parça üretimi ve performansının incelenmesi*. [Yayınlanmamış yüksek lisans tezi]. Bursa Uludağ Üniversitesi.
- Evans, A. G., Hutchinson, J. W., Fleck, N. A., Ashby, M. F., & Wadley, H. N. G. (2001). The topological design of multifunctional cellular metals, *Progress in Materials Science*, 46(3-4), 309-327.
- Fard, K. M., Khalili, S. M. R., Forooghi, S. H., & Hosseini, M. (2014). Low velocity transverse impact response of a composite sandwich plate subjected to a rigid blunted cylindrical impactor. *Composites Part B: Engineering*, 63, 111–122.
- Field, A. (2024). *Discovering statistics using IBM SPSS statistics*. Sage publications limited.
- Fleck, N. A., & Deshpande, V. S. (2004). The resistance of clamped sandwich beams to shock loading. *Journal of Applied Mechanics*, 71(3), 386–401.
- Fleck, N., A., Deshpande, V., S., & Ashby, M. F. (2010). Micro-architected materials: past, present and future, *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 466(2121), 2495–2516.
- Gawel, T. G. (2020). Review of additive manufacturing methods. *Solid State Phenomena*, 308, 1-20.
- Gelman, A., & Hill, J. (2007). *Data analysis using regression and multilevel/hierarchical models*. Cambridge university press.
- Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2015). Direct digital manufacturing. In *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing* (pp. 375-397). New York, NY: Springer New York.
- Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2021). Additive manufacturing technologies (3rd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3>
- Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., Khorasani, M., Rosen, D., Stucker, B., & Khorasani, M. (2021). *Additive manufacturing technologies* (Vol. 17, pp. 160-186). Cham, Switzerland: Springer.
- Gibson, L. J., & Ashby, M. F. (1997). Cellular solids: Structure and properties (2nd ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139878326>
- Gibson, L. J., & Ashby, M. F. (2014). Cellular solids: Structure and properties (2nd ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139878326>
- Griškevičius, P., Zeleniakienė, D., Leišis, V., & Ostrowski, M. (2010). Experimental and numerical study of impact energy absorption of safety important honeycomb core sandwich structures. *Materials Science*, 16(2), 119–123.

- Gür, A. O., & Arslan, K. (2010). The effect of process parameters on mechanical properties in fused deposition modeling. *Journal of Materials Processing Technology*, 210(8), 1048–1055. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.02.013>
- Han, B., Wang, W., Zhang, Z., Zhang, Q., Jin, F., & Lu, T. (2016). Performance enhancement of sandwich panels with honeycomb-corrugation hybrid core. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 6(1), 54–59. <https://doi.org/10.1016/j.taml.2016.01.001>
- Hirose, Y., Hojo, M., Fujiyoshi, A., & Matsubara, G. (2007). Suppression of interfacial crack for foam core sandwich panel with crack arrester, *Advanced Composite Materials*, 16(1), 11-30.
- Hou, S., Shu, C., Zhao, S., Liu, T., Han, X., & Li, Q. (2015). Experimental and numerical studies on multi-layered corrugated sandwich panels under crushing loading. *Composite Structures*, 126, 371–385. <https://doi.org/10.1177/1099636220909755>
- Kamer, M. S., Doğan, O., Temiz, Ş., Yaykaşı, H. (2021). 3 boyutlu yazıcı ile farklı yazdırma parametreleri kullanılarak üretilen eğme test numunelerinin mekanik özelliklerinin incelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 36(3), 835-846. <https://doi.org/10.21605/cukurovaumfd.1005909>
- Kannan, S., & Ramamoorthy, M. (2020). Mechanical characterization and experimental modal analysis of 3D printed ABS, PC and PC-ABS materials. *Materials Research Express*, 7(1), 015341.
- Karabulut, M. Y., & Yazıcıoğlu, S. (2025). Üç boyutlu polimer kafes yapıları ile çimento esaslı kompozitlerin üretimi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi. *Journal of Innovative Engineering and Natural Science*, 5(1), 313–326. <https://doi.org/10.61112/jiens.1582330>
- Kaveloglu, S., & Temiz, S. (2022). An experimental and finite element analysis of 3D printed honeycomb structures under axial compression. *Polymers and Polymer Composites*, 30, 09673911221122333. <https://doi.org/10.1177/09673911221122333>
- Kaveloğlu, S., Temiz, Ş., Doğan, O., & Kamer, M. S. (2022). 3 boyutlu yazıcı ile üretilen farklı hücre çaplarındaki bal peteği sandviç yapıların eğme dayanımlarının incelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 37(2), 459–470. <https://doi.org/10.21605/cukurovaumfd.1146410>
- Kaya, A. İ. (2016). Kompozit malzemeler ve özellikleri. *Putech & Composite Poliüretan ve Kompozit Sanayi Dergisi*, 29, 38–45.
- Kaya, E., Bayar, İ., & Akpınar, A. F. (2024). Dolgu desenlerinin ve oranlarının ergiyik biriktirme modellemede PLA malzemesinin mekanik performansına olan etkisi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 13(3), 792–798. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.1442158>

- Kooistra, G. W., Deshpande, V., & Wadley, H. N. G. (2007). Hierarchical corrugated core sandwich panel concepts. *Journal of Applied Mechanics*, 74(2), 259–268. <https://doi.org/10.1115/1.2198243>
- Kuhn, H. A. (2000). Uniaxial compression testing. In *Mechanical Testing and Evaluation* (pp. 143-151). ASM International.
- Kwak, S., Kim, J., Ding, H., Liang, H., Chen, R., Guo, J., & Fu, H. (2024). Prediction improvement of compressive strength and strain of directionally solidified TiAl alloy based on training data size adjustment. *Journal of Materials Research and Technology*, 30, 5017–5027. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.04.165>
- Lacroix, R., Seifert, R. W., & Timonina-Farkas, A. (2021). Benefiting from additive manufacturing for mass customization across the product life cycle. *Operations Research Perspectives*, 8, 100201. <https://doi.org/10.1016/j.orp.2021.100201>
- Leijten, J., Bersee, H. E., Bergsma, O. K., & Beukers, A. (2009). Experimental study of the low-velocity impact behaviour of primary sandwich structures in aircraft. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 40(2), 164–175.
- Li, T., & Wang, L. (2017). Bending behavior of sandwich composite structures with tunable 3D-printed core materials. *Composite Structures*, 175, 46–57. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.05.001>
- Lin, J., Luo, Z., & Tong, L. (2010). Design of adaptive cores of sandwich structures using a compliant unit cell approach and topology optimization. *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, 132(8), Article 081012. <https://doi.org/10.1115/1.4002201>
- Lu, C., Qi, M., Islam, S., Chen, P., Gao, S., Xu, Y., & Yang, X. (2018). Mechanical performance of 3D-printing plastic honeycomb sandwich structure. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 5(1), 47–54. <https://doi.org/10.1007/s40684-018-0005-x>
- Memur, T. (2023). *Eriyik yığma ile modelleme (FDM) yönteminde filament kalınlığının üretilen plakaların mekanik özellikleri ve dinamik davranışı üzerindeki etkisi* [Yayınlanmamış yüksek lisans tezi]. Bursa Uludağ Üniversitesi.
- Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. G. (2021). *Introduction to linear regression analysis* (6th ed.). Wiley.
- Nancharaiah, T. R. D. R. V., Raju, D. R., & Raju, V. R. (2010). An experimental investigation on surface quality and dimensional accuracy of FDM components. *International Journal on Emerging Technologies*, 1(2), 106–111. <https://doi.org/10.1007/s40940-010-0011-5>

- Negi, S., Dhiman, S., & Sharma, R. K. (2019). Basics and applications of electron beam melting technology. *Materials Today: Proceedings*, 18, 3464–3472. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.029>
- Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T., & Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 143, 172–196. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>
- Nirmala, D. B., & Raviraj, S. (2016). Experimental study of optimal self compacting concrete with spent foundry sand as partial replacement for M-sand using Taguchi approach. *Selected Scientific Papers - Journal of Civil Engineering*, 11(1), 119–130. <https://doi.org/10.1515/sspjce-2016-0013>
- Norman, A. D., Seffen, K. A., & Guest, S. D. (2009). Morphing of curved corrugated shells. *International Journal of Solids and Structures*, 46(7–8), 1624–1632.
- Nsikak, S. (2017). On the goodness of four types of organic fertilizers using the split plot design and the two-way block design with interactions. *American Journal of Applied Mathematics and Statistics*, 5(4), 136–144. <https://doi.org/10.12691/ajams-5-4-4>
- Odacı, İ. K., Kılıçaslan, C., Taşdemirci, A., & Güden, M. (2012). Projectile impact testing of glass fiber-reinforced composite and layered corrugated aluminium and aluminium foam core sandwich panels: A comparative study. *International Journal of Crashworthiness*, 17(5), 508–518. <https://doi.org/10.1080/13588265.2012.690215>
- Popescu, D., Gheorghe Amza, C., Marinescu, R., Cristiana Iacob, M., & Luminița Căruțașu, N. (2022). Investigations on factors affecting 3D-printed holes dimensional accuracy and repeatability. *Applied Sciences*, 13(1), 41. <https://doi.org/10.3390/app13010041>
- Seong, D. Y., Jung, C. G., Yang, D. Y., Moon, K. J., & Ahn, D. G. (2010). Quasi-isotropic bending responses of metallic sandwich plates with bi-directionally corrugated cores. *Materials & Design*, 31(6), 2804–2812. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.01.009>
- Shah, S. Z. H., Altaf, K., Lee, J., Sharif, T., Choudhry, R. S., & Hussain, S. M. (2023). Bending performance and failure mechanisms of hybrid and regular sandwich composite structures with 3D printed corrugated cores. *Composite Structures*, 325, 117580. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117580>
- Shahdin, A., Mezeix, L., Bouvet, C., Morlier, J., & Gourinat, Y. (2009). Fabrication and mechanical testing of glass fiber entangled sandwich beams: A comparison with honeycomb and foam sandwich beams. *Composite Structures*, 90(4), 404–412. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.02.007>

- Smith, J., & Johnson, A. (2022). Stereolithography in modern prototyping: High-resolution 3D printing with photopolymer resins. *Journal of Additive Manufacturing Technologies*, 12(3), 150–165. <https://doi.org/10.1016/j.jamt.2022.03.004>
- Steeves, C. A., & Fleck, N. A. (2004). Material selection in sandwich beam construction. *Scripta Materialia*, 50(10), 1335–1339. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2004.02.013>
- Subaşı, S., Çetin, V., & Şamandar, A. (2017). Kompozit panellerde CTP levha ve çekirdek kalınlığının mekanik özelliklere etkisi. *El-Cezeri*, 4(2), 135–145.
- Sürmen, H. K. (2019). Eklemeli imalat (3B baskı): Teknolojiler ve uygulamalar. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24(2), 373–392. <https://doi.org/10.17482/uumfd.519147>
- Şen, H., & Özben, T. (2025). Jüt takviyeli kompozit prepreg malzemelerin Charpy darbe dayanımı ve eğme davranışlarının analizi. *Recep Tayyip Erdogan University Journal of Science and Engineering*, 6(1), 92–109. <https://doi.org/10.53501/rteufemud.1524044>
- Todoroki, A., Oasada, T., Ueda, M., Matsuzaki, R., & Hirano, Y. (2021). Reinforcing in the lay-up direction with self-heating for carbon fiber composites fabricated using a fused filament fabrication 3D printer. *Composite Structures*, 266, 113815. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113815>
- Toprak, O. (2010). *AlMg3/SiCp kompozitlerinin basma dayanımı özelliklerinin incelenmesi*. [Yayınlanmamış yüksek lisans tezi]. Trakya Üniversitesi.
- Tuncel, O., & Aydın, H. (2023). Optimization of Nd: YAG laser welding factors of cold rolled strenx 700 CR steel by Taguchi method. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 38(1), 85–92. <https://doi.org/10.21605/cukurovaumfd.1236529>
- Türkoğlu, İ. K. (2020). *3 boyutlu eklemeli üretim yöntemiyle üretilmiş termoplastik esaslı özküteli çekirdek geometrili sandviç yapıların statik ve dinamik yükler altında davranışının incelenmesi* [Yayınlanmamış doktora tezi]. Bursa Uludağ Üniversitesi.
- Ulewicz, R., Szataniak, P., Novy, F., Trsko, L., & Bokuvka, O. (2017). Fatigue characteristics of structural steels in the gigacycle region of loading. *Materials Today: Proceedings*, 4(5), 5979–5984. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.06.132>
- Ulkir, O., Bayraklılar, M. S., & Kuncan, M. (2023). Energy consumption prediction of additive manufactured tensile strength parts using artificial intelligence. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 10(6), 1423–1438. <https://doi.org/10.1089/3dp.2023.0189>

- Ulkir, O., Bayraklılar, M. S., & Kuncan, M. (2024). Raster angle prediction of additive manufacturing process using machine learning algorithm. *Applied Sciences*, 14(5), 2046. <https://doi.org/10.3390/app14052046>
- Url 1 3D Yazıcı nedir. (2021, Nisan 7). 3Eksen. <https://www.3eksen.com/blog/icerik/3d-yazici-nedir>
- Url 2 Etiket arşivi: 3 boyutlu yazıcılar. (2019, Nisan 6). *Nanoteknoloji.org*. <https://nanoteknoloji.org/tag/3-boyutlu-yazicilar/>
- Url 3 Kotaman. (2018, Nisan 6). *Üç boyutlu yazdırma teknolojileri*. <https://www.kotaman.com/uc-boyutlu-yazdirma-teknolojileri/>
- Url 4 3D Baskıal. (2023, Nisan 3). *3D yazdırma teknolojilerinin tarihi üzerine*. <https://3dbaskial.com/3d-yazdirma-teknolojilerinin-tarihi-uzerine>
- Url 5 PerOX. (2025, Mayıs 15). *Karbon fiber görseli* [Kamu malı]. <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=5788733>
- Url 6 Teknoloji Isparta. (2024, Mayıs 15). *Teknoloji.isparta.edu.tr*. <http://www.teknoloji.isparta.edu.tr>
- Url 7 Jeotest. (2014, Mayıs 30). *Radwag WTB 2000 hassas terazi (kapasite 2000 g, hassasiyet 0,01 g)*. <https://www.jeotest.com.tr/tr/anasayfa/755-radwag-wtb-2000-hassas-terazi-kapasite-2000gr-hassasiyet-001-gr.html>
- Url 8 Shimadzu. (t.y.). *Autograph universal testing machines*. <https://www.shimadzu.com/an/products/material-non-destructive/test/retrofits/retrofits2.html>
- Url 9 Dost Kimya. (2025, Mayıs 15). *Karbon fiber plakalar*. <https://www.dostkimya.com/tr/urunler/karbon-fiber-plakalar//karbon-fiber-plaka-t1mm>
- Vasiliev, V. V., & Morozov, E. V. (2001). Mechanics and analysis of composite materials. Elsevier.
- Wadley, H. N. G. (2006). Multifunctional periodic cellular metals. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 364(1838), 31–68. <https://doi.org/10.1098/rsta.2005.1697>
- Wang, X., Jiang, M., Zhou, Z., Gou, J., & Hui, D. (2018). 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective. *Materials & Design*, 154, 28–41. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.05.022>
- Williams, H., & Zhang, T. (2021). Comparative study of SLA and DLP technologies in photopolymer-based 3D printing. *Additive Manufacturing Review*, 8(2), 90–104. <https://doi.org/10.1016/j.amr.2021.02.003>

- Yan, L. L., Han, B., Yu, B., Chen, C. Q., Zhang, Q. C., & Lu, T. J. (2014). Three-point bending of sandwich beams with aluminum foam-filled corrugated cores. *Materials & Design*, 60, 510–519. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.04.014>
- Yıldız, S. (2024). *Eklemeli imalat ile üretilmiş hücresel boşluklu sandviç yapıların mekanik özelliklerinin incelenmesi*. [Yayınlanmamış yüksek lisans tezi]. Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi.
- Zarrouk, T., Salhi, J. E., Nouari, M., Salhi, M., Chaabelasri, E., Makich, H., & Salhi, N. (2022). Modeling machining of aluminum honeycomb structure. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 123(7–8), 2481–2500. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10115-5>
- Zhang, P., Cheng, Y., Liu, J., Wang, C., Hou, H., & Li, Y. (2015). Experimental and numerical investigations on laser-welded corrugated-core sandwich panels subjected to air blast loading. *Marine Structures*, 40, 225–246. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2015.10.003>
- Zhu, F., Lu, G., Ruan, D., & Wang, Z. (2010). Plastic deformation, failure and energy absorption of sandwich structures with metallic cellular cores. *International Journal of Protective Structures*, 1(4), 507–541. <https://doi.org/10.1260/2041-4196.1.4.507>
- Zurnacı, E. (2019). *Farklı çekirdek konfigürasyonuna sahip sandviç yapıların tasarımı, üretimi ve mekanik özelliklerinin araştırılması*. [Yayınlanmamış doktora tezi] Karabük Ün