

BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**3 BOYUTLU YAZICI İLE ÜRETİLEN SANDVIÇ YAPILARIN STATİK VE
DİNAMİK YÜK ALTINDA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bahadır ÖZTÜRK

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

TEMMUZ 2020

BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**3 BOYUTLU YAZICI İLE ÜRETİLEN SANDVIÇ YAPILARIN STATİK VE
DİNAMİK YÜK ALTINDA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bahadır ÖZTÜRK

(171080104)

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Selçuk KARAGÖZ

TEMMUZ 2020

BTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 171080104 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Bahadır ÖZTÜRK, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "3 BOYUTLU YAZICI İLE ÜRETİLEN SANDVIÇ YAPILARIN STATİK VE DİNAMİK YÜK ALTINDA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Dr. Öğr. Üyesi Selçuk KARAGÖZ**

Bursa Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Dr. Öğr. Üyesi Erdem UZUNSOY**

Bursa Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Yahya IŞIK

Bursa Uludağ Üniversitesi

Teslim Tarihi : **16 Temmuz 2020**

Savunma Tarihi : **08 Temmuz 2020**

İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı: Bahadır ÖZTÜRK

İmzası:

X X X X X



Aileme,

ÖNSÖZ

Yüksek lisans derslerim ve tez çalışmalarım boyunca her konuda yardım ve desteklerini benden esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübesi ile rehberlik eden saygıdeğer hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Selçuk KARAGÖZ'e teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamın çeşitli noktalarında yardımlarını ve tecrübelerini esirgemeyen Arş. Gör. Hüseyin BEYTÜT'e, Arş. Gör. Necati ERCAN'a, Arş. Gör. Safa ŞENAYSOY'a, Arş. Gör. Ali Osman GÜNEY'e sonsuz destekleri için teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans ve tez çalışmalarım sırasında her türlü imkanı ve desteği sağlayan değerli patronum Sayın Çağatay ÇAĞLA'ya teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, çalışmalarım süresince desteğini esirgemeyen ve bana her zaman güvenen aileme teşekkür eder, saygı ve sevgilerimi sunarım.

Temmuz 2020

Bahadır ÖZTÜRK

İÇİNDEKİLER

Sayfa

| | |
|---|-----------|
| ÖNSÖZ | v |
| İÇİNDEKİLER | vi |
| KISALTMALAR | viii |
| SEMBOLLER | ix |
| ÇİZELGE LİSTESİ..... | x |
| ŞEKİL LİSTESİ..... | xi |
| ÖZET | xiii |
| SUMMARY | xv |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 1.1 Literatür Araştırması | 2 |
| 1.2 Sandviç Yapıların İmalat Yöntemleri | 5 |
| 1.2.1 Uzatarak şekil verme yöntemi..... | 5 |
| 1.2.2 Kıvrırma metodu ile şekil verme..... | 6 |
| 1.3 Sandviç Yapıların Mekanik Özellikleri ve Avantajları..... | 6 |
| 1.4 Sandviç Yapıların Kullanım Alanları..... | 7 |
| 2. EKLEMELİ İMALAT | 8 |
| 2.1 Eklemeli İmalat Yöntemleri | 9 |
| 2.1.1 Fotopolimerizasyon..... | 10 |
| 2.1.1.1 Stereolithography (SLA)..... | 10 |
| 2.1.1.2 Dijital ışık işleme (DLP) | 11 |
| 2.1.2 Malzeme jeti (MJ) | 12 |
| 2.1.3 Malzeme ekstrüzyon | 13 |
| 2.1.4 Yapıştırıcı ile eklemeli imalat (Binder Jetting)..... | 13 |
| 2.1.5 Eriyik biriktirme tekniği (FDM) | 14 |
| 2.1.6 Seçici lazer sinterleme yöntemi | 16 |
| 2.1.7 Direkt metal lazer sinterleme yöntemi | 17 |
| 2.1.8 Tabaka yapıştırma yöntemi (Laminated object manufacturing)..... | 19 |
| 2.1.9 Direkt enerji depolama yöntemi (Direct energy deposition)..... | 20 |
| 2.1.10 Elektron ışınla ergitme (Electron beam melting)..... | 21 |
| 3. MATERYAL VE YÖNTEM..... | 23 |
| 3.1 Sandviç Yapı Modelleri..... | 23 |
| 3.2 Sandviç Yapıların İmalat Malzemesi | 27 |
| 3.3 Sandviç Yapıların Hazırlanması..... | 29 |
| 3.4 Sandviç Yapıların Statik Testleri | 31 |
| 3.4.1 Çekme testi..... | 31 |
| 3.4.1.1 Çekme test numunesinin hazırlanması..... | 33 |
| 3.4.2 Üç nokta eğme testi | 35 |
| 3.4.3 Basma testi | 36 |
| 3.5 Çarpışma Testi..... | 38 |

| | |
|---|-----------|
| 3.5.1 Emilen toplam enerji | 38 |
| 3.5.2 Maksimum (Pik) çarpışma kuvveti | 39 |
| 3.5.3 Ortalama çarpışma kuvveti | 39 |
| 3.5.4 Özgül enerji emilimi | 40 |
| 3.5.5 Ağ yapısı | 40 |
| 3.5.6 Malzeme tanımlaması | 41 |
| 3.5.7 Sınır koşullarının tanımlanması | 41 |
| 3.5.8 Temas tanımlanması | 42 |
| 3.5.9 Darbe enerjisi | 43 |
| 4. BULGULAR VE TARTIŞMA | 44 |
| 4.1 Deneysel Çalışma | 44 |
| 4.1.1 Statik test sonuçları | 44 |
| 4.1.1.1 Çekme test sonuçları | 44 |
| 4.1.1.2 Üç nokta eğme test sonuçları | 45 |
| 4.1.1.3 Basma test sonuçları..... | 47 |
| 4.1.2 Dinamik Test Sonuçları | 50 |
| 4.1.2.1 Çarpışma test sonuçları | 50 |
| 4.1.2.2 Enerji dengesi..... | 52 |
| 5. SONUÇ VE ÖNERİLER..... | 55 |
| KAYNAKLAR | 57 |
| ÖZGEÇMİŞ..... | 62 |

KISALTMALAR

| | |
|-------------|--|
| AM | : Additive Manufacturing |
| ASTM | : American Society for Testing and Materials |
| DED | : Direct Energy Deposition |
| DLP | : Direct Light Processing |
| DMLS | : Direkt metal lazer sinterleme |
| EBM | : Electron Beam Melting |
| FDM | : Fused Deposition Modeling |
| FEA | : Finite Element Analysis |
| LOM | : Laminated Object Manufacturing |
| MJ | : Material Jetting |
| SLA | : Stereolithography |
| SLS | : Selective Laser Sintering |
| TPU | : Termoplastik poliüretan |
| TSE | : Türk Standartları Enstitüsü |

SEMBOLLER

| | |
|-----------------------|--|
| A | : Numunenin kesit alanı |
| A₀ | : Numunenin ilk kesit alanı |
| b | : Kiriş kesitinin genişliği |
| d | : Test edilen kiriş kesitinin yüksekliği |
| E | : Elastisite modülü |
| E_{eğ} | : Eğilme elastisite modülü |
| E_T | : Emilen toplam enerji |
| E_m | : Özgül enerji emilimi |
| J | : Joule |
| L | : Son uzunluk |
| L₀ | : Başlangıç uzunluğu |
| m | : Düşen kütle ağırlığı |
| N | : Newton |
| P | : Yük |
| V | : Hız |
| ΔL | : Boydaki uzama |
| ε | : Birim şekil değiştirme |
| σ | : Gerilme |

ÇİZELGE LİSTESİ

| | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| Çizelge 3.1 : Ultimaker TPU 95A mekanik özellikleri. | 28 |
| Çizelge 5.1 : Sandviç yapılar test sonuçları..... | 55 |



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

| | |
|---|----|
| Şekil 1.1 : Sandviç yapının temel yapısı..... | 1 |
| Şekil 1.2 : Uzatarak şekil verme yöntemi ile petekli yapı hücre üretimi..... | 5 |
| Şekil 1.3 : Kıvrırma metodu ile şekil verme | 6 |
| Şekil 2.1 : Geleneksel İmalat ve Eklemeli imalat arasındaki fark..... | 8 |
| Şekil 2.2 : Eklemeli imalatın ASTM F42 standardına göre sınıflandırılması. | 9 |
| Şekil 2.3 : Fotopolimerizasyon yöntemi..... | 10 |
| Şekil 2.4 : SLA sisteminin çalışma prensibi..... | 11 |
| Şekil 2.5 : Dijital Işık İşleme çalışma prensibi..... | 12 |
| Şekil 2.6 : Malzeme Jeti Yöntemi..... | 12 |
| Şekil 2.7 : Malzeme Ekstrüzyon Yöntemi..... | 13 |
| Şekil 2.8 : Yapıştırıcı ile eklemeli imalat teknolojisi şematik resmi ve bu metolla üretilmiş stator..... | 14 |
| Şekil 2.9 : Eriyik Biriktirme Tekniği..... | 15 |
| Şekil 2.10 : Seçici Lazer sinterleme yöntemi | 17 |
| Şekil 2.11 : Direkt metal lazer sinterleme teknolojisi şematik resmi | 18 |
| Şekil 2.12 : Tabaka Yapıştırma Tekniği..... | 19 |
| Şekil 2.13 : Direkt enerji depolama yöntemi | 20 |
| Şekil 2.14 : Elektron ışınla ergitme teknolojisi şematik resmi..... | 22 |
| Şekil 3.1 : Bal peteği sandviç yapı..... | 23 |
| Şekil 3.2 : Girintili sandviç yapı..... | 24 |
| Şekil 3.3 : Yıldız sandviç yapı..... | 24 |
| Şekil 3.4 : Üçgen sandviç yapı..... | 25 |
| Şekil 3.5 : Üç nokta eğme modeli Bal peteği sandviç yapı..... | 25 |
| Şekil 3.6 : Üç nokta eğme modeli Girintili sandviç yapı..... | 26 |
| Şekil 3.7 : Üç nokta eğme modeli Yıldız sandviç yapı..... | 26 |
| Şekil 3.8 : Üç nokta eğme modeli Üçgen sandviç yapı..... | 27 |
| Şekil 3.9 : Cura programı üzerinde basma ve üç nokta eğme test numuneleri..... | 29 |
| Şekil 3.10 : Cura programı üzerinden işlem parametrelerinin girilmesi..... | 30 |
| Şekil 3.11 : Ultimaker 3 extended cihazında numunelerin imalatı..... | 30 |
| Şekil 3.12 : İmal edilmiş Basma test numuneleri..... | 31 |
| Şekil 3.13 : İmal edilmiş Üç nokta eğme test numuneleri..... | 31 |
| Şekil 3.14 : Çekme test standardı ASTM D638 Type IV..... | 33 |
| Şekil 3.15 : Çekme Test numunelerinin imalatı..... | 33 |
| Şekil 3.16 : İmal edilmiş Çekme test numuneleri..... | 34 |
| Şekil 3.17 : SHIMADZU AG-X plus cihazı..... | 34 |
| Şekil 3.18 : Üç Nokta Eğme Test Düzeneği..... | 35 |
| Şekil 3.19 : Sandviç yapı 3 nokta eğme testi..... | 36 |
| Şekil 3.20 : Basma kuvveti uygulanan sünek malzemelerdeki fiçı oluşumu..... | 37 |

| | |
|---|----|
| Şekil 3.21 : Sandviç yapı basma testi. | 38 |
| Şekil 3.22 : Hypermesh programı üzerinden ağ yapısının oluşturulması..... | 40 |
| Şekil 3.23 : HyperCrash programı üzerinden malzeme kartı oluşturulması..... | 41 |
| Şekil 3.24 : Bal peteği sandviç modele ait sınır koşulları tanımlanması..... | 42 |
| Şekil 3.25 : Model temas tanımlanması..... | 42 |
| Şekil 3.26 : Çarpışma testi sonrası enerji miktarlarının tespit edilmesi. | 43 |
| Şekil 4.1 : TPU malzeme çekme testi. | 44 |
| Şekil 4.2 : TPU malzeme Gerilme-Birim şekil değiştirme grafiği. | 45 |
| Şekil 4.3 : Bal Peteği sandviç yapı 3 nokta eğme Kuvvet-Yer değiştirme grafiği. ... | 46 |
| Şekil 4.4 : Girintili sandviç yapı 3 nokta eğme Kuvvet-Yer değiştirme grafiği..... | 46 |
| Şekil 4.5 : Yıldız sandviç yapı 3 nokta eğme Kuvvet-Yer değiştirme grafiği..... | 47 |
| Şekil 4.6 : Üçgen sandviç yapı 3 nokta eğme Kuvvet-Yer değiştirme grafiği. | 47 |
| Şekil 4.7 : Bal peteği sandviç yapı basma Kuvvet-Yer değiştirme grafiği..... | 48 |
| Şekil 4.8 : Girintili sandviç yapı basma Kuvvet-Yer değiştirme grafiği. | 48 |
| Şekil 4.9 : Yıldız sandviç yapı basma Kuvvet-Yer değiştirme grafiği. | 49 |
| Şekil 4.10 : Üçgen sandviç yapı basma Kuvvet-Yer değiştirme grafiği..... | 49 |
| Şekil 4.11 : Bal peteği sandviç yapı enerji emilim grafiği. | 50 |
| Şekil 4.12 : Girintili sandviç yapı enerji emilim grafiği..... | 51 |
| Şekil 4.13 : Yıldız sandviç yapı enerji emilim grafiği..... | 51 |
| Şekil 4.14 : Üçgen sandviç yapı enerji emilim grafiği. | 52 |
| Şekil 4.15 : Bal peteği sandviç yapı enerji denge grafiği. | 53 |
| Şekil 4.16 : Girintili sandviç yapı enerji denge grafiği..... | 53 |
| Şekil 4.17 : Yıldız sandviç yapı enerji denge grafiği. | 54 |
| Şekil 4.18 : Üçgen sandviç yapı enerji denge grafiği. | 54 |

3 BOYUTLU YAZICI İLE ÜRETİLEN SANDVIÇ YAPILARIN STATİK VE DİNAMİK YÜK ALTINDA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

ÖZET

Son zamanlarda, yüksek performanslı mühendislik uygulamaları için hafif sandviç yapıların tasarım ve üretiminde kafes çekirdek yapılarının sunduğu potansiyele ilgi artmaktadır. Sandviç yapılar günümüzde havacılık, deniz, otomobil, yel değirmeni ve inşaat endüstrisi sektörlerinde, özellikle yüksek eğilme sertliği, ısı yalıtımı ve yüksek enerji emme kabiliyetleri gibi mükemmel çok işlevli özellikleri nedeniyle yoğun olarak kullanılmaktadır.

Sandviç yapıların birçok alanda kullanılıyor olması hafif, yüksek enerji absorpsiyonlu ve ağır hizmet tipi sandviç malzemelerin geliştirilmesi ve uygulanması için mükemmel bir fırsat sunmaktadır. Eklemeli İmalat yöntemi, imal edilmesi imkansız olan karmaşık geometrili çekirdeklerin üretimine olanak sağlamıştır. Sandviç yapıların eklemeli imalat yöntemi ile imal edilmesi, geleneksel yöntemler ile imal edilmiş altıgen bal peteği veya köpük çekirdekli geleneksel sandviç yapılara göre birçok önemli avantaj sağlamaktadır.

Tez kapsamında 4 farklı Sandviç yapı modeli tasarlanmıştır. Sandviç yapılar Bal peteği, Girintili, Yıldız ve Üçgen olarak Solidworks programında tasarlanmıştır. Tasarlanan model boyutları Basma ve Çarpışma testleri için 40x40x20 mm, Üç nokta eğme testi için 130x20x20 mm boyutlarındadır. Hazırlanan modellerin dataları üç boyutlu yazıcıya aktarılacak üzere STL formatına dönüştürülmüştür.

Modellerin datalarını 3 boyutlu yazıcıya aktarmak için ara program olan Cura yazılımı kullanılmıştır. Sandviç yapıların imalatı için Ultimaker 3 extended FDM tipi 3 boyutlu yazıcı kullanılmıştır. Sandviç yapılar Termoplastik poliüretan (Ultimaker TPU 95 A) malzemeden imal edilmiştir.

Malzeme mekanik özelliklerini belirleyebilmek için çekme test numuneleri imal edilmiştir. 3 adet imal edilen çekme test numuneleri Shimadzu AG-X plus cihazında çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Basma ve üç nokta eğme testleri için imal edilmiş modeller yine aynı cihazda testlere tabi tutulmuştur.

Çarpışma testleri için sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Sonlu elemanlar analizinin gerçekleştirilmesinde ise HyperWorks paket programında bulunan, HyperMesh, HyperCrash, HyperView, HyperGraph, ve RADIOSS yazılımlarından yararlanılmıştır. Modellere ait darbe enerjileri ve enerji emilim miktarları elde edilmiştir.

Yapılan testler sonucunda elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Basma, üç nokta eğme ve çarpışma test sonuçlarına göre en iyi statik ve dinamik özellikleri sergileyen model belirlenmiştir.

Elde edilen sonuçlar neticesinde Girintili sandviç yapı modelinin en iyi mekanik özellikler gösteren model olduğu ortaya konmuştur.

Anahtar kelimeler: Bal Peteği, Sandviç Yapılar, Üç Nokta Eğme, Basma, Sonlu Elemanlar Analizi.



INVESTIGATION OF UNDER STATIC AND DYNAMIC LOAD BEHAVIORS OF SANDWICH STRUCTURES PRODUCED WITH 3D PRINTER

SUMMARY

Recently, there has been an increasing interest in the potential of lattice core structures in the design and manufacture of lightweight sandwich structures for high performance engineering applications. Sandwich structures are used extensively today in the aviation, marine, automobile, windmill and construction industry sectors due to their excellent multifunctional properties, especially high bending stiffness, thermal insulation and high energy absorption capabilities.

The fact that sandwich structures are used in many areas provides an excellent opportunity for the development and application of lightweight, high energy absorption and heavy duty sandwich materials. Additive Manufacturing method has enabled the production of cores with complex geometries that are impossible to fabricate. The production of sandwich structures by the additive manufacturing method provides many important advantages over traditional sandwich structures made of hexagonal honeycomb or foam core produced with traditional methods.

Within the scope of the thesis, 4 different Sandwich structure models are designed. Sandwich structures are designed in the Solidworks program as Honeycomb, Re-entrant, Star and Triangle. The designed model dimensions are 40x40x20 mm for Compression and Impact tests, 130x20x20 mm for Three-point bending test. The data of the prepared models were converted to STL format to be transferred to the three-dimensional printer.

Cura software, which is an intermediate program, was used to transfer the data of the models to the 3D printer. Ultimaker 3 extended FDM type 3D printer was used to manufacture sandwich structures. Sandwich structures are made of Thermoplastic polyurethane (Ultimaker TPU 95 A) material.

Tensile test samples were produced to determine the mechanical properties of the material. Tensile tests were carried out on Shimadzu AG-X plus device, which was produced in 3 pieces. Models manufactured for compression and three-point bending tests were also tested on the same device.

Finite element method was used for impact tests. In the finite element analysis, HyperMesh, HyperCrash, HyperView, HyperGraph, and RADIOSS software that are included in the HyperWorks package program were used. Impact energies and energy absorption amounts of the models were obtained.

The results obtained as a result of the tests were examined comparatively. According to compression, three-point bending and impact test results, the model that exhibits the best static and dynamic properties has been identified.

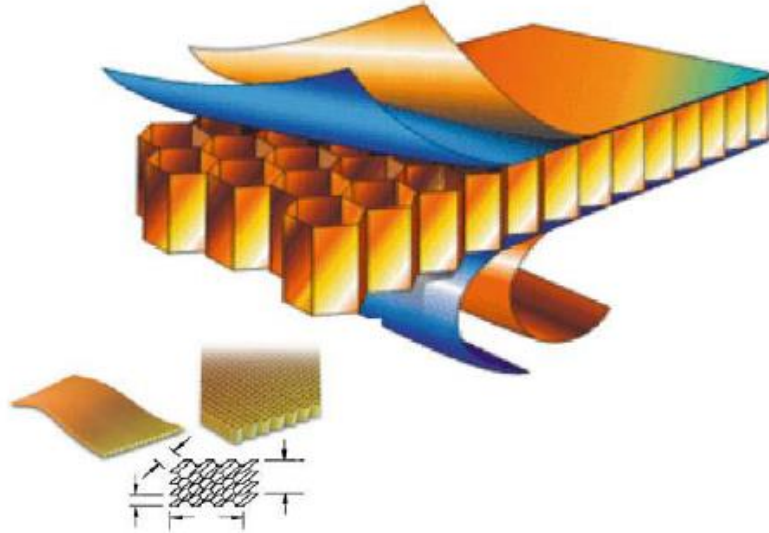
As a result of the obtained results, it has been revealed that the Re-entrant sandwich structure model is the model with the best mechanical properties.

Keywords: Honeycomb, Sandwich Structures, Three Point Bending, Compression, Finite Element Analysis.



1. GİRİŞ

Sandviç yapılar günümüzde havacılık, deniz, otomobil, yel değirmeni ve inşaat endüstrisi sektörlerinde, özellikle yüksek eğilme sertliği, ısı yalıtımı ve yüksek enerji emme kabiliyetleri gibi mükemmel çok işlevli özellikleri nedeniyle yoğun olarak kullanılmaktadır [1,2]. Sandviç yapıların birçok alanda kullanılıyor olması hafif, yüksek enerji absorpsiyonlu ve ağır hizmet tipi sandviç malzemelerin geliştirilmesi ve uygulanması için mükemmel bir fırsat sunmaktadır. Sandviç yapılar üç bileşenden oluşur: nispeten ince ve hafif bir çekirdekle ayrılan üst ve alt yüzeylerde yüksek bükülme sertliğine sahip iki ince katı yüz tabaka. Hafif çekirdek, yüz tabakalarını ağırlıkta küçük bir artışla birleştirerek, yüksek bir eğilme ve bükülme direnci ve mükemmel kayma sertliği ve enerji emme yeteneği sağlar [3]. En iyi duruma getirilmiş hafif sandviç yapılar, enine kesme ve sıkıştırma yükleri taşıyan hücresel çekirdeklerden ve düzlem içi yük ve bükülme taşıyan katı yüzey tabakalarından yapılmıştır. Sandviç yapının temel yapısı Şekil 1.1’de gösterilmiştir.



Şekil 1.1 : Sandviç yapının temel yapısı [4].

Sandviç yapıların malzemesinin ve mimarisinin karmaşıklığı, çok çeşitli mühendislik uygulamaları için sandviç yapıların yapısal, aerodinamik ve ısı yalıtım / ısı değişim performansının iyileştirilmesine olan talep artmaktadır.

Son zamanlarda yapılan sandviç yapıların çok işlevli performansının, sandviç yapıların imalatında hücrel çekirdek yapının mikro mimarisinin mühendisliği ile geliştirilebileceği gösterilmiştir [5].

Gelişmiş üretim teknolojilerindeki son gelişmeler, örneğin Eklemeli İmalat (3B baskı) ve lazerle kesim, geleneksel üretim yöntemleri ile üretilmesi olanaksız olan karmaşık geometrili çekirdeklerin üretimine olanak sağlamıştır [6]. Sandviç yapıların eklemeli imalat yöntemi ile imal edilmesi, geleneksel yöntemler ile imal edilmiş altıgen bal peteği veya köpük çekirdekli geleneksel sandviç yapılara göre birçok önemli avantaj sağlamaktadır. Bununla birlikte, eklemeli imalat yöntemi ile imal edilmiş sandviç yapıların karmaşık bir mikro mimariye sahip olan dayanıklılığı henüz farklı malzemeler için araştırılmamıştır [7].

Sandviç yapıların, yapısal performansı ve enerji emme kabiliyeti temel olarak katı yüz tabakasının ve hücrel çekirdeğin malzeme özelliklerine ve geometrik özelliklerine bağlıdır.

1.1 Literatür Araştırması

Sandviç yapıların mekanik özelliklerini modellemek için hem matematiksel modelleme hem sonlu elemanlar analizi (FEA) hem de deneysel yöntemler kullanarak birçok çalışma yapılmıştır.

Masashi Hayase ve Richard Eckfund [8], 1981 yılında metal levhaların tercihen aralıklı veya kesikli olmayan kaynaklarla metalik bir sandviç yapı meydana getirmesi üzerine bir patent yayınladı.

Sun ve Zhang [9], 1995 yılında piezoelektrik malzemelerle uyumlu sandviç yapıda kalınlık kesme modunun kullanımı hakkında kapsamlı bir araştırma yayınladı.

V. Dattoma ve R. Marcuccio [10], 2001 yılında kompozit sandviç yapılarda mevcut bazı tipik hataları termografik teknik kullanarak tespit ettiler.

Abrate [11], yabancı cisimle kompozit yapı arasındaki etki analizi için matematiksel modellere genel bir bakış sundu.

Sourish ve Atul [12], modele bir rezonans uygulayarak yardımcı petek yapısının davranışını araştırdı ve baskın hücre duvarı deformasyon modunun her zaman bükülme olduğunu ortaya çıkardı.

Zou ve Reid [13], altıgen hücreli bal peteğinin düzlem içi dinamik parçalanmasını simüle ettiler ve 2009 yılında dinamik davranışlarını araştırdılar.

Chi ve Langdon [14], dairesel sandviç panellerin, hava püskürtmeli yüklemeye maruz kalan bal peteği göbekleriyle davranışını bildiren bir makale yayınlamıştır.

Crupi ve Pesto [15], bal peteği yapıların kusur durumunu ve hasarını araştırmak için düşük hızlı darbe testi gerçekleştirmiştir.

Tan ve Akil [16], Fiber metal laminattan yapılmış bal peteği sandviç yapılarını incelemek için bir dizi düşük hızlı darbe testi gerçekleştirmiştir.

Zhang [17] ve Ashby [18], Kesme ve düzlem dışı sıkıştırma altındaki Nomex bal peteği yapılarının elastik ve çökme davranışını incelemiştir. Modelleri, çok çeşitli Nomex peteklerinde yaptığı deneylerle iyi bir şekilde örtüşmektedir.

Ashby [19], Nomex peteklerinin düzlem içi çift eksenli burkulma davranışını da araştırmıştır. Holt ve Webber [20], son gelişmeleri özetlemekte ve petek sandviç kırımların elastik davranışlarını yüz ve çekirdek için doğrusal elastik davranışlar varsayarak analiz etmiştir.

Wierzbicki [21], altıgen bal peteğinin ezilmesi sırasında ezilme dayanımı ve enerji dağıtımını için analitik bir yöntem geliştirmiştir. Geliştirdiği matematiksel model, metalik altıgen bal peteğinin yarı-statik ezilme mukavemetini esas olarak ele aldı. Hücre duvarının, $2H$ 'lik bir bükülme dalga boyu ile aşamalı olarak ezildiğini gösterdi.

Wierzbicki ve Abramowicz [22], ince duvarlı yapıların temel katlama mekanizmasını geliştirdi. Araştırmalarında, altıgen eksenel simetrik hücre duvarlarının ezilmesinin, toroidal bir yüzey üzerinde metal sacın plastik akışı gibi kırıldığını göstermiştir. Ayrıca enerji harcanmasının hızının sürekli ve süreksiz hız alanlarından kaynaklandığını gösterdiler.

Abramowicz [23], metal kolonun bükülme sırasındaki ezilme mesafesini tartıştı ve etkili ezilme mesafesinin analitik modelini geliştirdi.

Reid ve diğ. [24], köpük dolgululu sac metalin kırılması üzerinde deneyler yaptı ve kare tüplerin ortalama kırma yükü için bir denklem geliştirdi.

Wierzbicki ve Bhat [25], tüplerin eksenel simetrik kırma işlemindeki deformasyon modunu analiz etmiş ve ortalama kırma kuvveti için bir çözüm geliştirmiştir.

Langseth ve Hopperstad [26], statik ve dinamik yüklemeye maruz kalan kare ince duvarlı alüminyum ekstrüzyon davranışını araştırdı. Hem statik hem de dinamik testler yapıldı ve birincil değişkenler kare tüplerin et kalınlığı ve temperliği ve merminin çarpma hızıydı. Deneysel sonuçlar aynı zamanda dinamik ortalama kuvvetin aynı aksenal yer değiştirme için karşılık gelen statik kuvvetten önemli ölçüde daha yüksek olduğunu ve bunun da güçlü bir atalet etkisi olduğunu göstermektedir.

Yasui [27], çok katmanlı petek üzerinde deneysel testler yaptı ve tek katmanlı peteklerden daha fazla enerji emdiklerini keşfetti. Bu sonuç, hassasiyet analizinde faydalıdır.

Aaron ve diğ. [28], deneysel yöntemler geliştirdiler, Formgrid peteğinin ezilme dayanımını belirlemek için sonlu elemanlar analizi gerçekleştirdi ve ezilme dayanımı özelliklerini etkileyen parametreleri incelemek için duyarlılık analizi yaptı.

Lee ve diğ. [29], alüminyum-bal peteği sandviç panellerinin davranışları üzerinde deneysel bir çalışma yaptılar.

Wierzbicki ve Abromowicz [30], ince duvarlı gerilme oranına duyarlı malzemelerin kırılması için denklemi türetmiştir. İnce çeperli elemanların dinamik kırılması için temel bükme mekanizmasını geliştirdiler ve deformasyon mekanizmasında yuvarlanma yarıçapı konseptini geliştirdiler.

Wu ve Jiang [31], dinamik ezilme kuvvetini etkileyen parametreleri incelemek için deneyler yaptı. Bal peteğinin genişliğinin ezilme dayanımı değerlerinde önemli bir rol oynadığını buldular.

Baker ve diğ. [32], yüksek yoğunluklu metal peteklerin test edilmesi için bir yöntem geliştirdiler. Alüminyum ve paslanmaz çelik malzeme kullandılar ve alüminyumun bir gerilme hızı etkisiyle davrandığını gördüler. Dinamik darbe testi durumunda plastik gerilme, statik testten yüzde 50 daha yüksekti. Peteklerin ilk ve son deformasyonu yarı-statik ve dinamik ortamlarda test etmişlerdir.

Goldsmith ve Sackman [33], yarı-statik ve darbe koşulları altında birkaç petek üzerinde deneysel testler yapmıştır. Araştırmaları bal peteğinin dinamik ve statik testlerinin maksimum ezilme yükünde bir değişiklik gösterdiğini göstermiştir.

Aaron ve diğ. [34], Formgrid petek yapılı malzeme için analitik modeli geliştirdi ve yarım model yapılandırmaları kullanarak petek yapısını analiz etme yöntemini geliştirdi.

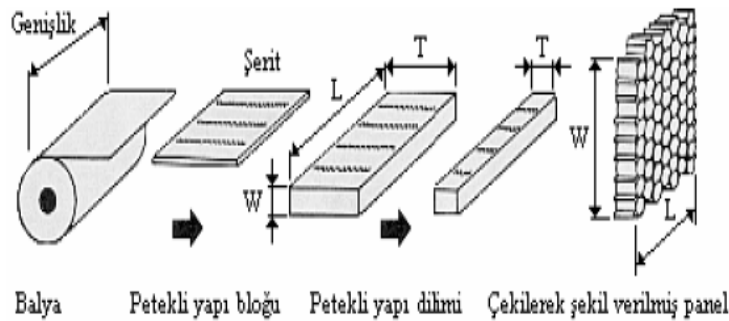
Santosa ve Wierzbicki [35], enerji absorpsiyonu için çift cidarlı sandviç kolon konseptini geliştirmiş ve enerji absorpsiyonunun daha yüksek olduğunu ve enerji absorpsiyon sistemlerinin ağırlık tasarrufunun yaklaşık yüzde 30 ila 45 olduğunu bulmuştur. Ayrıca çift duvarlı sandviç sütun için birleştirilmiş denklem geliştirdiler.

1.2 Sandviç Yapıların İmalat Yöntemleri

Sandviç yapıların üretilmesi için birçok teknik kullanılmaktadır. En yaygın olarak kullanılan 2 yöntem vardır. Bu yöntemler Uzatarak şekil verme ve Kıvrırma metodu ile şekil verme yöntemleridir.

1.2.1 Uzatarak şekil verme yöntemi

Uzatarak şekil verme yöntemiyle sandviç yapı çekirdek üretim işlemi, üzerine yapışkan düğüm çizgilerinin basıldığı alt tabaka malzemelerinin istiflenmesi ile başlar. Yapışkan çizgiler daha sonra genişleme bloğundan önce bir bal peteği oluşturmak üzere sertleştirilir. Uzatma bloğundan önceki petek, uzatılmış bir blok vermek üzere sertleşmeden sonra genişletilebilir. Uzatılmış bloğun dilimleri daha sonra istenen T boyutuna kesilebilir. Uzatarak şekil verme yöntemi ile petekli yapı hücre üretimi Şekil 1.2' de gösterilmiştir.



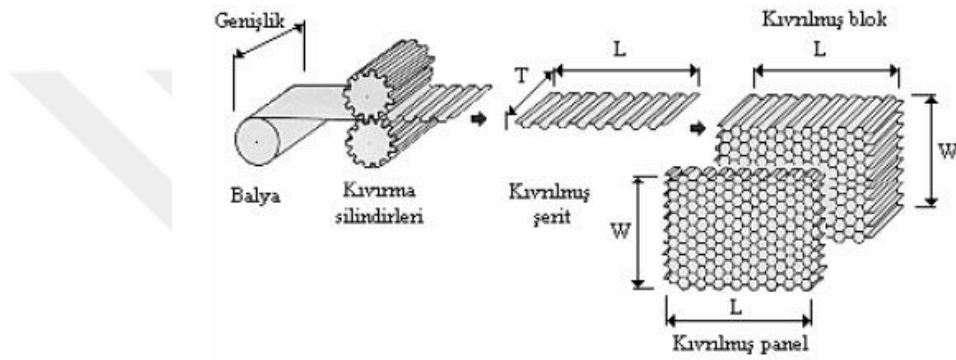
Şekil 1.2 : Uzatarak şekil verme yöntemi ile petekli yapı hücre üretimi [36].

Alternatif olarak, Uzatma dilimlerinden önceki petek, uzatma bloğundan önceki petekten uygun T boyutuna kesilebilir ve ardından genişletilebilir. Dilimler normal altıgenlere, 6 taraflı elmaslara genişletilmiş ve neredeyse dikdörtgen hücrelere

genişletilebilir. Uzatılmış tabakalar istenen L boyutuna (şerit yn) ve W boyutuna (şeride enine) kesilebilir.

1.2.2 Kıvrırma metodu ile şekil verme

Kıvrırma metodu ile sandviç yapı çekirdek üretimi işlemi, normalde daha yüksek yoğunluktaki ürünler üretmek için kullanılır. Bu işlemde yapıştırıcı, kıvrımlı düğümlere uygulanır, kıvrımlı levhalar bloklar halinde istiflenir, düğümlenmiş yapışkanla sertleştirilir ve levhalar bu bloklardan istenen çekirdek kalınlığına kadar kesilir. Kıvrırma metodu ile şekil verme yöntemi şekil 1.3'te gösterilmiştir.



şekil 1.3 : Kıvrırma metodu ile şekil verme [36].

1.3 Sandviç Yapıların Mekanik zellikleri ve Avantajları

Sandviç yapıların mekanik özellikleri ve avantajları aşağıda listelenmiştir;

- Yüksek eğilme dayanımı
- İyi titreşim sönümleme
- Daha yüksek hasar toleransı
- Çekirdek ve yüzeyler için bol miktarda içerik alternatifi bulunması
- Yüksek çekme ve basma dayanımı
- Düşük yoğunluk ve buna bağlı olarak ağırlıktan kazanma
- Yüksek enerji sönümleme
- Isı yalıtımı

Sandviç yapı malzemeleri genellikle iki ana gruba ayrılır: metalik ve metalik olmayan.

Metalik grup şunları içerir: çelik, paslanmaz çelik ve alüminyum alaşımları. Metaller yüksek bir Young modülüne ve yüksek bir gerilme mukavemetine sahiptir, ancak aynı zamanda yüksek bir yoğunluğa sahiptir. Metalik olmayan grup, birçok farklı malzemeye sahiptir ve şunları içerir: kontrplak, çimento, takviyeli plastik ve fiber kompozitler [37].

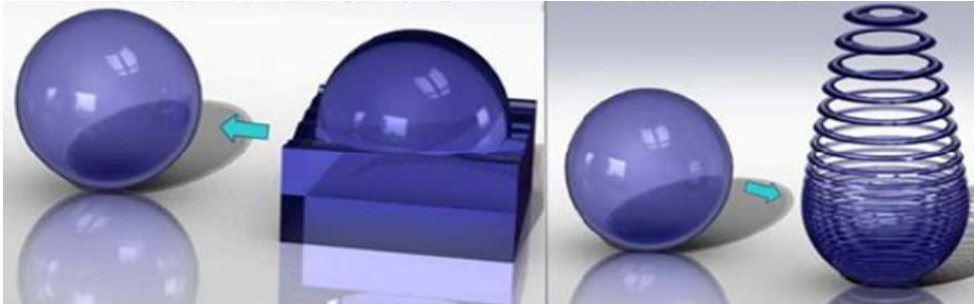
1.4 Sandviç Yapıların Kullanım Alanları

Havacılık, otomotiv, uzay, denizcilik ve inşaat mühendisliği uygulamalarında kompozit sandviç yapıların kullanımı, bu yapıların ağırlık azalmasına ve yakıt tüketimine yol açan ağırlık oranlarında mükemmel bir sertliğe sahip olması nedeniyle daha da artmaktadır. Ayrıca, ani bir çarpışmada büyük miktarda enerjiyi emme yeteneğine sahiptirler. Çarpma güvenilirliğini arttırmak için dünya çapındaki araştırmacılar tarafından çekirdek ve yüzey tabaka malzemelerinin çeşitli kombinasyonları incelenmektedir [38].

Havacılık uygulamalarında, uzay mekiği yapıları için çeşitli petek sandviç yapıları kullanılmış, aynı zamanda askeri ve ticari uçaklar için de kullanılmıştır. ABD Donanması ve İsveç Kraliyet Donanması, geminin ağırlığını azaltmak ve 20 yıldan fazla bir süredir sualtı patlamalarına dayanmak için bal peteği sandviç yapılarını kullanmıştır. Daha yakın zamanlarda sandviç konstrüksiyonlar, düşük maliyetli ve termal performanslarından dolayı, binalar, köprü, güverte, duvar ve çatı kaplamaları gibi inşaat mühendisliği projelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca hızlı transit trenler, otobüsler, yelkenli tekneler, yarış tekneleri, yarış arabaları, kar kayakları, su kayağı, vagonlar ve kanolar için sandviç konstrüksiyonlar kullanılmaktadır [39].

2. EKLEMELİ İMALAT

Eklemeli imalat, modern üretim teknolojilerinden bir tanesidir. Eklemeli imalat, üç boyutlu şekil datalarını kullanarak malzemenin üst üste katman katman eklenmesiyle, kompleks şekle sahip modellerin hızlı bir biçimde üretimine olanak sağlayan bir üretim yöntemidir. Bu yöntemde model, bilgisayar destekli tasarım programları ile çizim, tersine mühendislik, bilgisayarlı tomografi gibi farklı metodlar ile üretilen 3 boyutlu modelden üretilir. 3 boyutlu model çok sayıda ince dilimlere bölünür ve üretim sistemleri, parça nihayi hale gelinceye kadar her bir dilimi art arda olacak şekilde üretmek için bu geometrik datayı kullanırlar [40-42]. Üretimi düşünülen 3 boyutlu katı parça genellikle direk üretim yapılacak cihaza gönderilmemektedir. 3 boyutlu parça öncelikle, eklemeli imalat standart arabirimi olan STL dosya formatına dönüştürülmesi gerekmektedir. Sonrasında, hata denetimi ve düzeltilmesi, inşa tablasına yerleşim ve inşa konumu, ihtiyaç durumunda destek yapılarının eklenmesi gibi bazı ön işlemlere ihtiyaç duyulur. Ön işlemlere tabi tutulan 3 boyutlu model dilimlenerek üretime hazır hale getirilir ve üretim cihazına gönderilir. Geleneksel İmalat ve Eklemeli imalat arasındaki fark Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



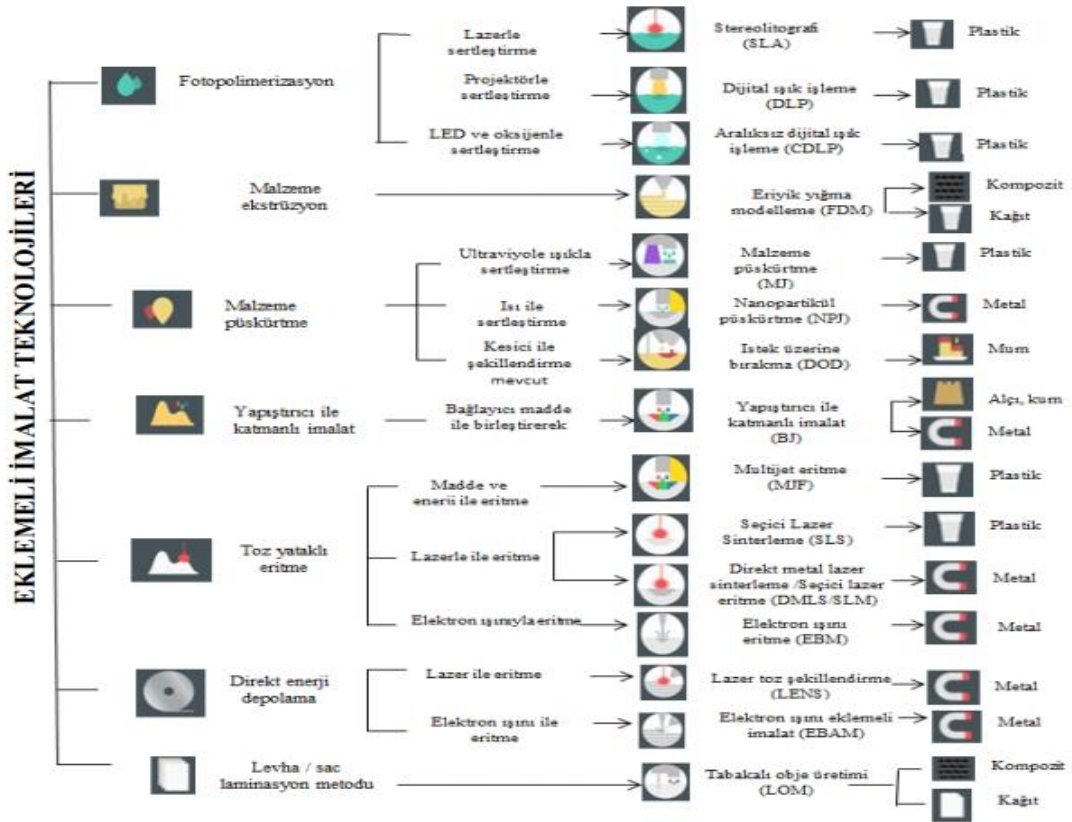
Şekil 2.1 : Geleneksel İmalat ve Eklemeli imalat arasındaki fark [43].

Geleneksel imalat, arzu edilen boyut ve şekildeki bir ürünü oluşturmak için, istenmeyen veya fazla malzemenin hammaddeden çıkarıldığı imalat işlemidir. Geleneksel imalatın bazı örnekleri arasında freze, delme, tornalama, işleme ve öğütme bulunmaktadır. Bu işlem, çevresel sorunlara yol açan işlenmiş malzemelerin israfı gibi birçok dezavantaja sahiptir. Aynı zamanda, ürünün üretim maliyetini artıran yüksek kalifiye işgücü gerektirir [44].

Eklemeli İmalat, ürün tabakasını malzeme israfına uğratmadan katman ile oluşturmayı içeren bir işlemdir. İmalat cihazı önceden programlanmıştır ve bu nedenle yüksek vasıflı işçilik veya denetim gerektirmez. Bu süreç, tasarımcıların karmaşık bileşenleri tasarlamalarına muazzam bir esneklik kazandırmaktadır, çünkü ürünler katman katman oluşturabilir. Bu süreç aynı zamanda 3 boyutlu yazıcı olarak da bilinir [43].

2.1 Eklemeli İmalat Yöntemleri

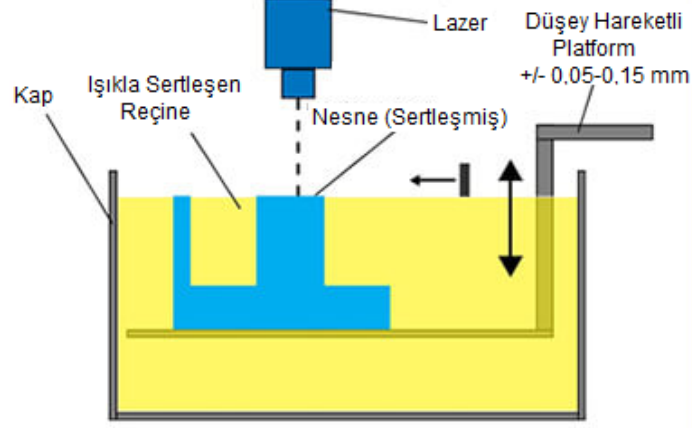
Amerikan Malzeme Testleri Derneği (ASTM), Eklemeli İmalat teknolojileri için standart terminolojiye göre yedi kategoriye ayırmıştır. Esas olarak, ASTM eklemeli imalat grubu, bu dinamik yapıya ve yüksek teknolojiye sahip imalat metodunu, ASTM F42 standardı altında yedi kategoriye ayırmıştır. Bunlar, fotopolimerizasyon (photopolimerization), malzeme püskürtme (material jetting), bağlayıcı püskürtme (binder jetting), malzeme ekstrüzyon (material extrusion), toz yataklı eritme (powder bed fusion), levhalı sac yöntemi (sheet lamination process) ve direkt enerji depolama (directed energy deposition) olarak ifade edilir. Sistematik olarak bu yöntemler Şekil 2.2' de verilmiştir [45].



Şekil 2.2 : Eklemeli imalatın ASTM F42 standardına göre sınıflandırılması [46].

2.1.1 Fotopolimerizasyon

Bu 3 boyutlu yazıcı türü, daha sonra UV ışığı ile sertleştirilen fotopolimer reçine ile dolu bir konteynere sahiptir. Bu kavram, Şekil 2.3'te gösterilmiştir.



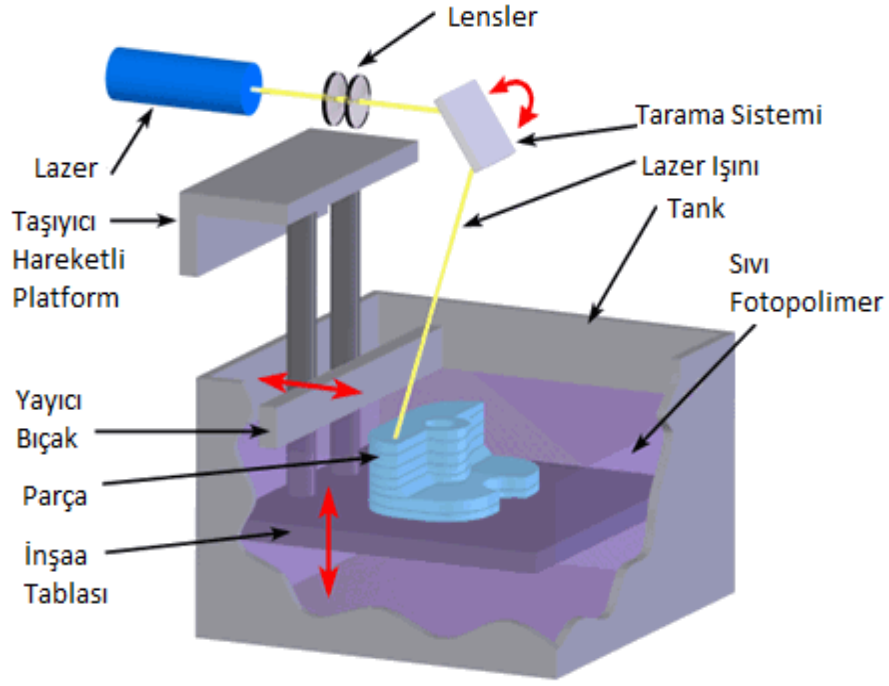
Şekil 2.3 : Fotopolimerizasyon yöntemi [47].

Yapı platformu, reçine kabının tepesinden tabaka kalınlığıyla aşağı doğru hareket ettirilir. Bir UV ışığı, reçine tabakasını katman katman sertleştirir.

Platform aşağı doğru hareket etmeye devam eder ve ek katmanlar bir öncekinin üzerine inşa edilir. Fotopolimerizasyonun iki alt tipi vardır. Bunlar Stereolithography ve Dijital ışık işlemi yöntemleridir.

2.1.1.1 Stereolithography (SLA)

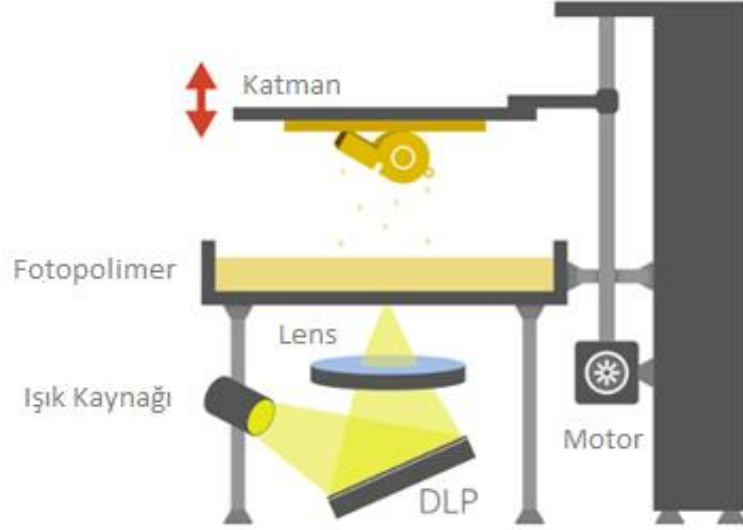
SLA yöntemi oda sıcaklığına sıvı halde bulunan fotopolimer reçine tabakasının noktasal bir morötesi (ultraviyole) lazer ışını aracılığı ile seçili bölgelerinin kürleştirilmesi esasına dayanır. Reçine katmanı ilk katmanın üstüne yapıştırılır ve kürleştirme işlemi katman katman eklenerek parçanın imal edilmesi sağlanır. Parça imalatı bitirdikten sonra parça reçine havuzundan dışarı çıkarılır. SLA yönteminde malzeme olarak bu yönteme has fotopolimer reçineler kullanılır. Katman kalınlığı genel olarak 0.05 mm ila 0.15 mm arasında değişir. SLA sisteminin çalışma prensibi Şekil 2.4'te gösterilmiştir. Stereolitografi tekniği, nesnenin yüzmesini önlemek için gerektiğinde destek yapıları kullanır. Bu destek yapıları prosedürün tamamlanmasından sonra manuel olarak kaldırılır. Şirketi kuran Charles Hull, 1986'da tekniği icat etmiştir [48].



Şekil 2.4 : SLA sisteminin çalışma prensibi [42].

2.1.1.2 Dijital ışık işleme (DLP)

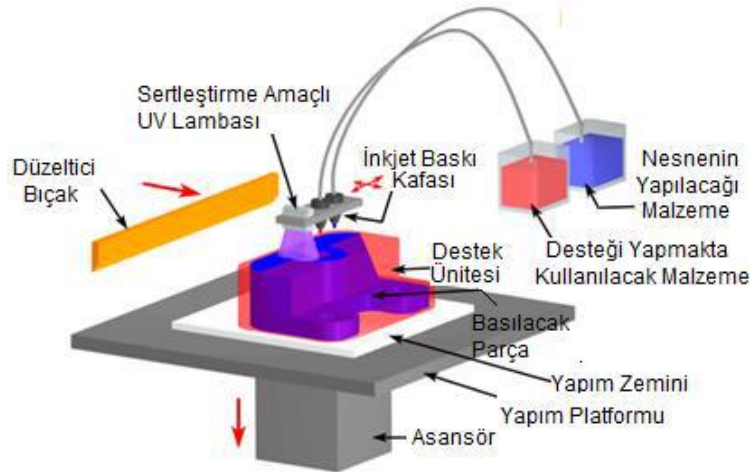
Stereolithografi'ye benzer bir sürecin olduğu fotopolimerin kullanıldığı katmanlı imalat teknolojisidir. Bu yöntemdeki en önemli fark ışık kaynağıdır, DLP yöntemi ark lambaları gibi geleneksel ışık kaynaklarını kullanır. Tek geçişte bütün fotopolimer reçine üzerine uygulandığı için Stereolithografi'den daha hızlıdır. DLP ile yapılan üretimlerde Stereolithografi'deki gibi yüksek çözünürlükte hassas parçalar üretilebilir. DLP ve SL'de destek yapıların temizlenmesi ve sertleşmesi için benzer gereklilikler vardır. DLP'nin SL'ye göre bir avantajı süreci kolaylaştırmak için sadece sığ bir reçine kütüğü gereklidir. Böylece daha az atık ve düşük maliyet elde edilir. DLP teknolojisinde uzmanlaşan şirketler arasında CLIP ve DLP icat eden ONO ve Carbon bulunmaktadır. Envision Tec Ultra, MiiCraft yüksek çözünürlüklü 3D yazıcı ve Luna sabit XG2, bu tekniğin örneklerinden bazılarıdır [48]. Dijital Işık İşleme çalışma prensibi Şekil 2.5'te gösterilmiştir.



Şekil 2.5 : Dijital Işık İşleme çalışma prensibi [49].

2.1.2 Malzeme jeti (MJ)

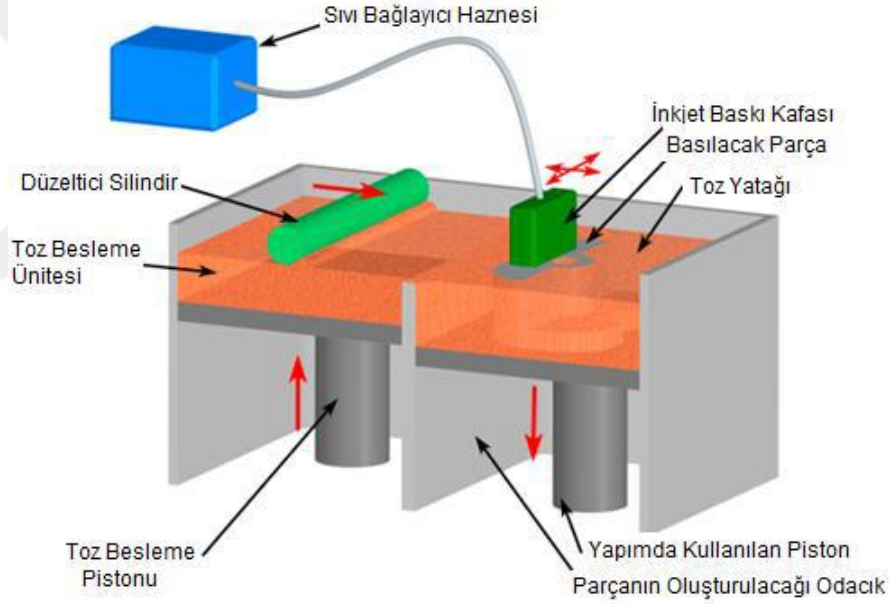
Bu 3D yazıcı tipinin farklı bir mürekkep kullanımı yöntemi vardır. Bu işlem, bir termik veya piezoelektrik yöntem kullanılarak küçük çaplı bir ağızlıktan damlacıklar halinde malzeme uygulamasını içerir. Ortak bir mürekkep püskürtmeli yazıcıya sahiptir. Bununla birlikte, burada mürekkep, UV ışığı ile sertleştirilen bir 3B nesne oluşturmak için tabakaya katmanı uygular. Platforma düşen damlacıklar, UV ışığı ile katılaştırılarak ilk katman oluşturulmakta ve bu katman üzerine diğer katmanlar aynı prensiple imal edilmektedir. Son işlem olarak, destek malzemesinin çıkarılmasından önce, tabakalar soğutulmaya bırakılır yada UV ışık ile daha da sertleştirilerek daha mukavim bir yapı elde edilmektedir. Malzeme jeti yöntemi çalışma prensibi Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



Şekil 2.6 : Malzeme Jeti Yöntemi [50].

2.1.3 Malzeme ekstrüzyon

Malzeme ekstrüzyonunda, malzeme seçici olarak bir nozül aracılığıyla dağıtılır. Arzu edilen form, malzemeyi 2B plastik tel olarak biriktirerek oluşturulur. Her 2B katmandan sonra, inşa platformu aşağı hareket eder ve bir öncekinin üstüne 2B katman daha eklenir. Malzeme ekstrüzyonu yavaş bir işlemdir. Parçaların gücü yapı oryantasyonuna bağlıdır, fakat çoğunlukla parçalar oldukça zayıftır. Malzeme ekstrüzyonu ile üretilen parçaların yüzeyi çok pürüzlüdür. Malzeme ekstrüzyonunun bir avantajı, teknolojinin yaygın olarak mevcut olmasıdır. Bu işlem için hammaddeler de yaygın olarak bulunur. Endüstriyel bir ortamda, bu işlem temel olarak prototipleme ve kalıplama için kullanılır. Aynı zamanda, düşük hacimli parçaların üretimi için de kullanılır. Eriyik biriktirme tekniği (FDM) bu yapım işleminden faydalanır. Malzeme ekstrüzyon yöntemi çalışma prensibi Şekil 2.7’de gösterilmiştir.

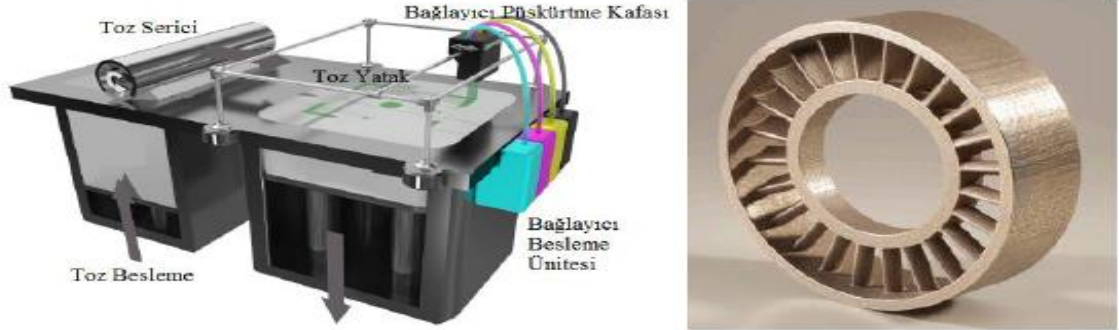


Şekil 2.7 : Malzeme Ekstrüzyon Yöntemi [51].

2.1.4 Yapıştırıcı ile eklemeli imalat (Binder Jetting)

Bu 3D yazıcı türü, toz bazlı bir malzeme ve sıvı bir bağlayıcı olan iki malzeme kullanır. Toz malzemenin stoklandığı iki platform vardır; Biri toz besleyicidir, diğeri ise inşa platformudur. Toz malzeme, inşa platformunun üzerinde bulunur ve İnşa işleminde çok ağızlı bir nozuldan yapıştırıcı püskürtülerek tozlar birbirine bağlanmaktadır. Daha sonra, inşa platformu tabaka kalınlığına eşit olan mesafe ile aşağı indirilir. Yine, silindir toz malzeme tabakasını yaymaktadır ve işlem tekrarlanmaktadır, kalan bağlanmamış toz ana nesneyi çevrelemekte yada onu desteklemektedir. Süreç, model

tamamlanana kadar tekrarlanır ve daha sonra bağlanmamış kum el ile kaldırılır. Yapıştırıcı ile eklemeli imalat teknolojisi şematik resmi ve bu metodla üretilmiş stator örneği Şekil 2.8’de gösterilmiştir.



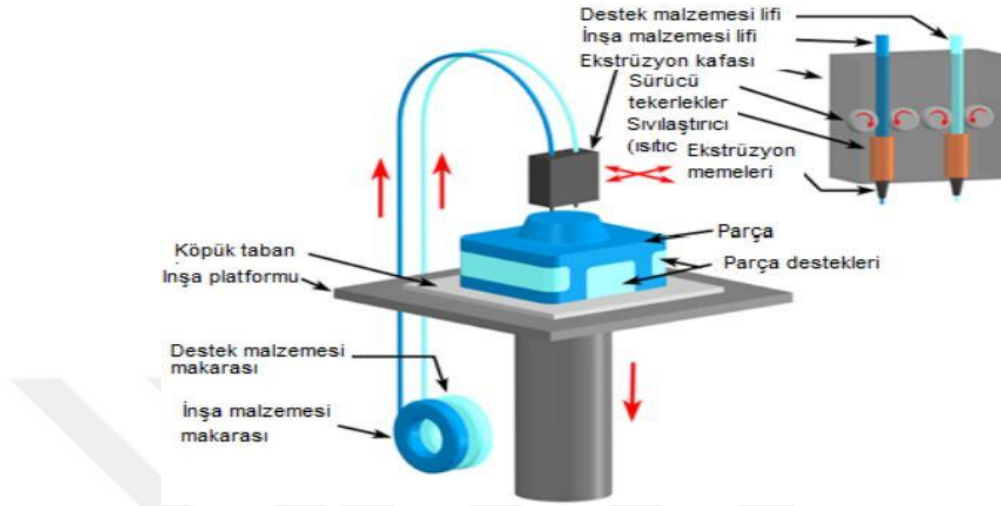
Şekil 2.8 : Yapıştırıcı ile eklemeli imalat teknolojisi şematik resmi ve bu metodla üretilmiş stator [52].

Massachusetts Teknoloji Enstitüsü (MIT) 1993 yılında bu teknolojiyi geliştiren ilk şirket oldu ve Z Corporation 1995 yılında özel bir lisans aldı [48].

2.1.5 Eriyik biriktirme tekniği (FDM)

Eriyik biriktirme tekniğinin literatürdeki İngilizce adı Fused Deposition Modeling (FDM) olarak bilinmektedir. Bu teknikte, makara üzerine sarılı olarak cihaza entegre edilebilen çubuk formunda filamentler kullanılmaktadır. Hammadde ekstrüzyon başlığında ısıtılarak sıvı veya macun kıvamında 0,2-1 mm çapındaki nozuldan geçirilerek gerekli noktalara serilir. Serme işlemi inşa tablasının katman kalınlığı kadar aşağı indirilmesi ile tekrardan başlar ve model inşa edilene kadar bu çevrim tekrar edilir. FDM tekniğinin çalışma prensibi ve bu teknik ile inşa edilmiş deney modeli Şekil 2.9’da görülmektedir. Eriyik biriktirme tekniği inşa aşamasında, termoplastik malzeme katılma noktasının hemen üstündeki bir sıcaklıktadır. Her tabaka, bir önceki tabakaya yarı eriyik halde yapıştırılır. Plastik liflerin (filamentlerin) beslenme hızları kontrol edilebilmektedir. Bu sayede, herhangi bir anda ekstrüde edilen malzeme miktarı kontrol edilerek hassas parçalar oluşturulabilir. Katman kalınlığı kullanılan sarf malzemenin fiziksel özelliğine, nozul çıkış çapına, hareketli kafanın hızına ve ekstrüzyon basıncına göre değişiklik gösterebilmektedir. Katman kalınlığı, meme çapına göre genel olarak olarak 0,15 mm ile 0,5 mm arasında değişmektedir.

Yol genişliği ise 0,20 mm ile 6 mm arasında değişmektedir. Rulolara sarılı halde kullanılan termoplastik malzeme lifi (filament) genel olarak 1,75 mm veya 3.00 mm çapındadır [53,54]. Eriyik biriktirme tekniği çalışma prensibi Şekil 2.9’da gösterilmiştir.



Şekil 2.9 : Eriyik Biriktirme Tekniği [55].

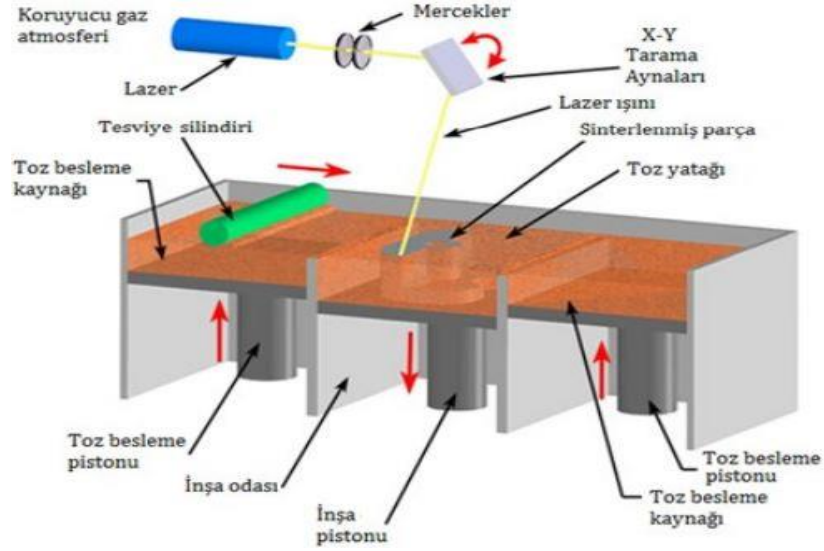
İnşa aşamasında sıvı hammadde, yerçekimi gibi fiziksel etkiler sebebi ile hedeflenen modeli oluşturmada hatalar ile karşılaşabilmektedir. Bu nedenle, inşa hammaddesi haricinde farklı bir hammadde kullanılarak destek yapısı, söz konusu hatalar ile karşılaşmamak amacı ile, ayrıca inşa edilir. Destek yapıları inşa aşamasında parça inşası ile eş zamanlı olarak inşa edilir. Eriyik biriktirme tekniğinde destek yapısı hammaddesi olarak kolay kırılabilir destek sistemi “BASS – Break Away Support System” olarak adlandırılan, iş parçasını oluşturan ana hammaddeden kolayca kırılabilen hammadde kullanılabilir. Bir diğer destek yapısı hammaddesi ise kimyasal yapısı nedeni ile su içerisinde çözünebilen (Water Works) malzemelerdir. Bu malzeme kullanılarak manuel olarak ulaşması imkansız, küçük boyutlu bölgeler rahatlıkla temizlenebilir. Ayrıca bu malzeme kullanıldığında inşa sonrası işlemler aşamasında zaman tasarrufu sağlamaktadır [56].

Eriyik biriktirme tekniğinde, hassas döküm mumu ve poliamidin (termoplastik elastomerler) yanı sıra ABS (Akrilonitril Bütadien Stiren) gibi yüksek erime sıcaklığına sahip mühendislik plastikleri de üretim materyali olarak kullanılabilir. Bu teknikte parça imal edilirken bazen takviye malzemesine ihtiyaç duyulur ve takviye malzemesi eklenilebilmesi için sisteme ikinci bir nozul eklenebilmektedir.

Bu teknoloji ile üretilen parçalar kırılmaya, bükülmeye, esnemeye, neme karşı yüksek direnç, uzamaya karşı yüksek dayanım ve uygun maliyetli üretim imkanı sunarlar. Ayrıca FDM teknolojisi fonksiyonel parçaların üretimi için de uygundur [57].

2.1.6 Seçici lazer sinterleme yöntemi

Seçici lazer sinterleme (SLS), Teksas Üniversitesi'nde geliştirilen toz bazlı bir hızlı prototipleme ve üretim yöntemidir. İlk olarak DTM Corporation'dan ticari olarak temin edilebilirdi, ancak daha sonra 3D Sistemler tarafından 2001'de satın alındı [58]. SLS'de ince bir toz, CO₂ parçacıklarıyla ısıtılır ve bu da toz parçacıklarının sinterlenmesine neden olur ve sonuç olarak birbirlerine bağlanır. Sürecin kendisi çok basit, tekrarlanabilir bir süreçtir. Şekil 2.10'da gösterildiği gibi parçaların inşa edilmesi tekrarlanabilir iki aşamalı bir işlemdir: ilk önce; besleme yataklarından birinin yanına bir rulo yerleştirilmiştir. Bu besleme yatağı daha sonra ayarlanan bir miktar yükseltir ve silindir, yükseltilmiş tozu, parça yatağını bir toz tabakası ile kaplayarak iter. İkinci olarak; Toz tabakası mevcutken, lazer tozun erimesini sağlamak için tozun içindeki parçanın istenen şeklini işlemeye başlar. Bu yapıldıktan sonra, parça yatağı belirli bir miktarda düşer ve işlem diğer besleme yatağı yükseltilirken ve diğer parçadan bir başka toz tabakasını parça yatağı üzerine dağıtırken, diğer taraftan da şekillendirme işlemini yapan lazer, diğer tarafa doğru ilerler. Parça, her bir toz tabakasının parçanın tek bir dilimini temsil ettiği dilimler halinde oluşturulmuştur. Lazer, toz parçaları her bir katman tam bir katı hale getirmek üzere bir araya kaynaştırır. Bununla birlikte, süreç kendi kendini desteklemektedir ve bu nedenle parçalar birbirine bağlanabilir. Seçici Lazer işlemi, işlevsellikten ödün vermeden karmaşık geometrilerin elde edilmesini sağlar. Bitmiş parçalar sinterlenmemiş tozla çevrilidir; bu gevşek toz basitçe bir hava tabancası ile püskürtülür ve daha sonra herhangi bir işlemde kullanılabilir [59]. Seçici lazer sinterleme yönteminde destek malzemesi kullanılmasına gerek bulunmamaktadır. Bu yöntem ile üretilen parçaların yüksek gerilme mukavemeti ve yüksek sertliğe sahip olması sağlanabilmektedir. Seçici lazer sinterleme yöntemi çalışma prensibi Şekil 2.10'da gösterilmiştir.



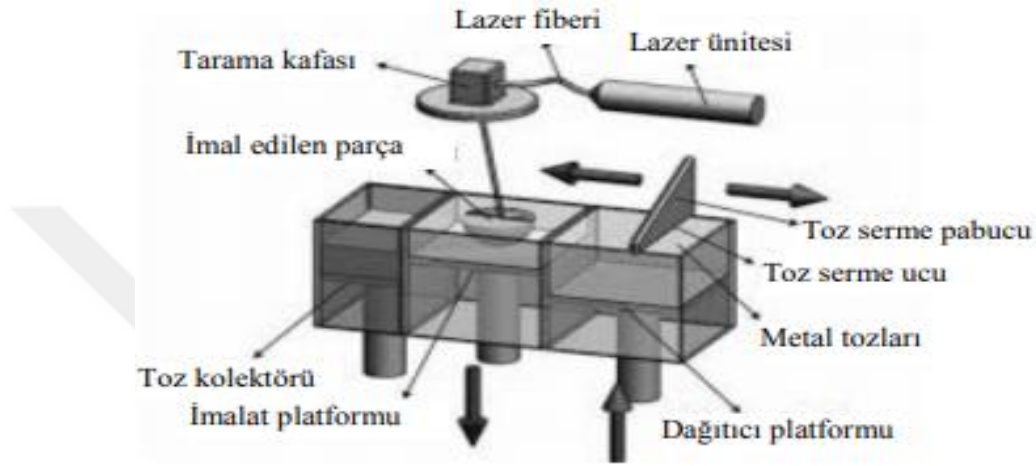
Şekil 2.10 : Seçici Lazer sinterleme yöntemi [42].

Tipik olarak, bir tabaka yaklaşık 0.1 mm kalınlığındadır. Lazer ışını, her katmanı bir araya getirerek sinterler ve ardından bir sonraki katman silindir tarafından eklenir. Pistonun miktarı, bir tabakanın kalınlığına eşittir. Serbest malzeme bırakılır ve işlem sonrası işlemden çıkarılır. Serbest malzeme, toz verme sisteminde yeniden kullanılır. Dr. Carl Deckard, 1980'lerde Savunma İleri Araştırma Projeleri Ajansı (DARPA) sponsorluğunda Teksas Üniversitesi'nde SLS yöntemini geliştirdi ve patentlendirdi [60].

2.1.7 Direkt metal lazer sinterleme yöntemi

Direkt metal lazer sinterleme (DMLS), eklemeli imalat yöntemlerinden bir tanesidir. Bu çalışmanın dayandığı DMLS makinesini üreten aynı şirket olan Electro Optical Systems (EOS), ilk ticari DMLS makinesini EuroMold 2003'te tanıtmıştır [61]. DMLS metal parçaları doğrudan metal tozlarından yapmak için kullanılan bir toz yataklı füzyon işlemi olarak tanımlanabilir. Bu füzyon işlemi, her seferinde bir tabaka olmak üzere, toz metalin her katmanını sinterlemek için bir bilgisayar tarafından kontrol edilen yüksek güçlü bir lazerden oluşur. Genellikle, işlem üç farklı odadan oluşur. İlk oda ham toz metal malzemenin tutulduğu dağıtım platformudur. Bir sonraki oda, yapı plakasının bulunduğu yerdir. Bu, lazerin toz metalin her katmanını sinterlediği yerdir. Son bölme, toplama bölmесidir. Yeniden kaplama işlemi sırasında fazla tozun toplandığı yer burasıdır. İşlem şu şekilde özetlenebilir: Birinci adım, dağıtım platformunun seçilen katman kalınlığının artırılmasıyla genişletilmesinden oluşur.

Daha sonra, bir yeniden-kaplama bıçağı, dağıtım bölmesi boyunca hareket eder, mevcut toz için tüm toz malzemeyi toplar ve bu tabakayı yapı plakasına tekrar kaplar. Fazla toz, toplayıcı platformda toplanır. Bir sonraki adım, lazerin, bu katmandaki dilimlenmiş parçanın geometrisine dayanarak toz metal tabakasını sinterlemesidir. Bu katmandaki dilimlenmiş kısmın geometrisi bu işlem tam geometri inşa edilene kadar tekrar edilir. Direkt metal lazer sinterleme teknolojisi şematik resmi Şekil 2.11’de gösterilmiştir.



Şekil 2.11 : Direkt metal lazer sinterleme teknolojisi şematik resmi [62].

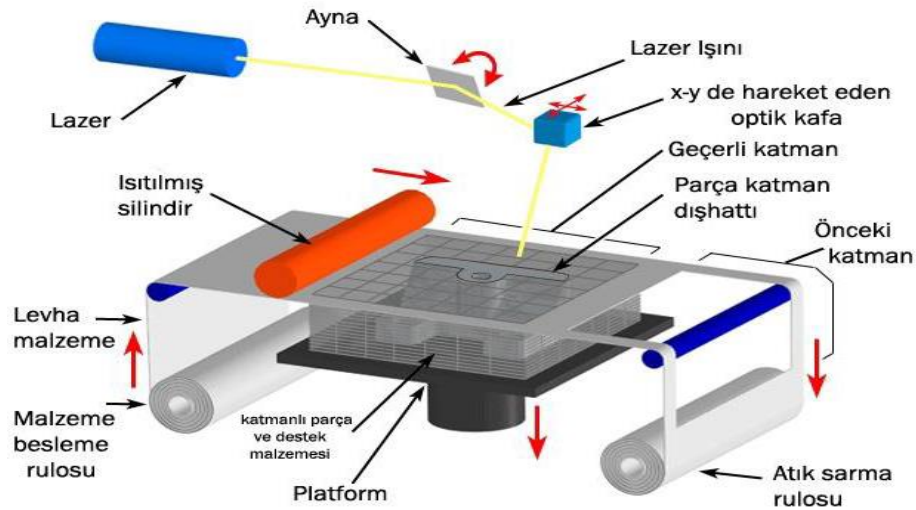
DMLS gibi bir işlemin bir üretim hattına uygulanmasında göz önünde bulundurulması gereken önemli bir faktör, parça yoğunluğudur. Yapım işleminin doğası gereği, DMLS tarafından üretilen parçalar neredeyse % 100 yoğunudur, ancak tam değildir. Çalışmalar, porozitenin çoğunluğunun, basılı malzemenin dış katmanında geliştiğini göstermiştir, ancak iç kısımdaki gözeneklilik de mevcuttur [63]. Çoğu zaman, DMLS tarafından üretilen parçalar, parçanın yoğunluğunu arttırmak için ısıl işleme sonradan işlenir. Bu, DMLS parçalarının genellikle denge fazlarında mikro yapılar ve çok yüksek artık gerilmeler içerdiğinden yapılıdır. Bu denge dışı fazlar sintersiz toz veya kısmen sinterlenmiş tozdan oluşabilir. Bu denge dışı fazlar sintersiz toz veya kısmen sinterlenmiş tozdan oluşabilir. Çalışmalar ayrıca yapım süreci ile ilgili işlem parametrelerinin yeterli parça yoğunluğu üretmek için dikkatlice seçilmesi gerektiğini göstermiştir [63].

Geleneksel imalat yöntemleri yerine DMLS ile yapılan parçaların üretilmesi malzeme atıklarında bir azalmaya neden olabilir ve üretim sırasında takım aşınması gibi sorunları azaltabilir. DMLS ayrıca pahalı takımlar gerektirmeden çok daha karmaşık olabilen parçalar üretme yeteneğine de sahiptir.

DMLS tarafından üretilebilecek karmaşık iç geometrilere sahip parçaların bazı örnekleri arasında bir ısı türbini motoru ve bir gaz türbini motorunun içinde bulunan küçük ölçekli, dahili olarak soğutulmuş türbin rotorları bulunur [64]. Bükülmüş ve eğilmiş şekillerin oluşturulmasına ek olarak, parçalar değişken duvar kalınlıkları, kör delikler, iç dişli özellikleri ve çok yüksek dayanıklılık / ağırlık oranı ile yapılabilir. Bu üretim süreci nispeten yeni olduğu için, bu üretim işlemiyle ilişkili birden fazla işlem parametresinin oynadığı rolü anlamak gerekir [65].

2.1.8 Tabaka yapıştırma yöntemi (Laminated object manufacturing)

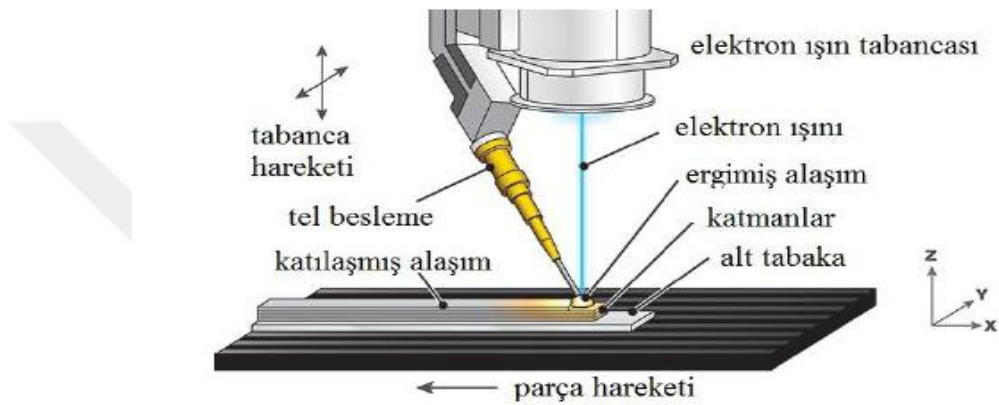
Tabaka yapıştırma tekniği katmanların birbirleri üzerine yapıştırıcı ile eklenmesi işlemidir. Yapıştırıcı ısı ile etkileşime geçebilen malzeme olarak belirlenir. Diğer eklemeli imalat yöntemlerine benzer şekilde tabla Z ekseninde hareket ederek konumlandırılır. Lazer, yapıştırılmış katmanda model şeklini oluşturmak için kullanılır. İşlenen model platform üzerinde yerleştirilir. Isıtılmış silindirler aracılığıyla yapıştırıcının etkileşime geçmesi sağlanır. Plotter çeşidi kaynaktan gönderilen lazer sayesinde malzeme kalınlığına göre istenen biçimde model oluşturulur. Şu şekilde ifade edilebileceği şekilde lazer ışını ile uygulanan kesim işlemi modelin sınırlarının belirlenmesine olanak sağlar. Üretim bitirildiğinde yapı fazla malzemeden ve destek malzemesinden temizlenerek model imalatı tamamlanmış olur [66]. Tabaka yapıştırma tekniği çalışma prensibi Şekil 2.12’de gösterilmiştir.



Şekil 2.12 : Tabaka Yapıştırma Tekniği [66].

2.1.9 Direkt enerji depolama yöntemi (Direct energy deposition)

Yüksek teknoloji ürünü şirketler, uygulamalar için hızlı 3B üretim gerektiğinde bu teknolojiyi kullanır. Bu teknolojinin, kullanılan malzeme ile farklılaştırılmış iki kategorisi vardır: doğrudan enerji biriktirme (DED), materyalleri olarak toz veya tel besleme malzemesi kullanır. Tipik bir DED 3D yazıcı, çok eksenli bir kol üzerine monte edilmiş bir nozuldan oluşur. Bu nozül, eritilmiş malzemeyi, biriktirme yüzeyinde istenilen yerde biriktirir. Direkt enerji depolama yöntemi çalışma prensibi 2.13'te gösterilmiştir.



Şekil 2.13 : Direkt enerji depolama yöntemi [67].

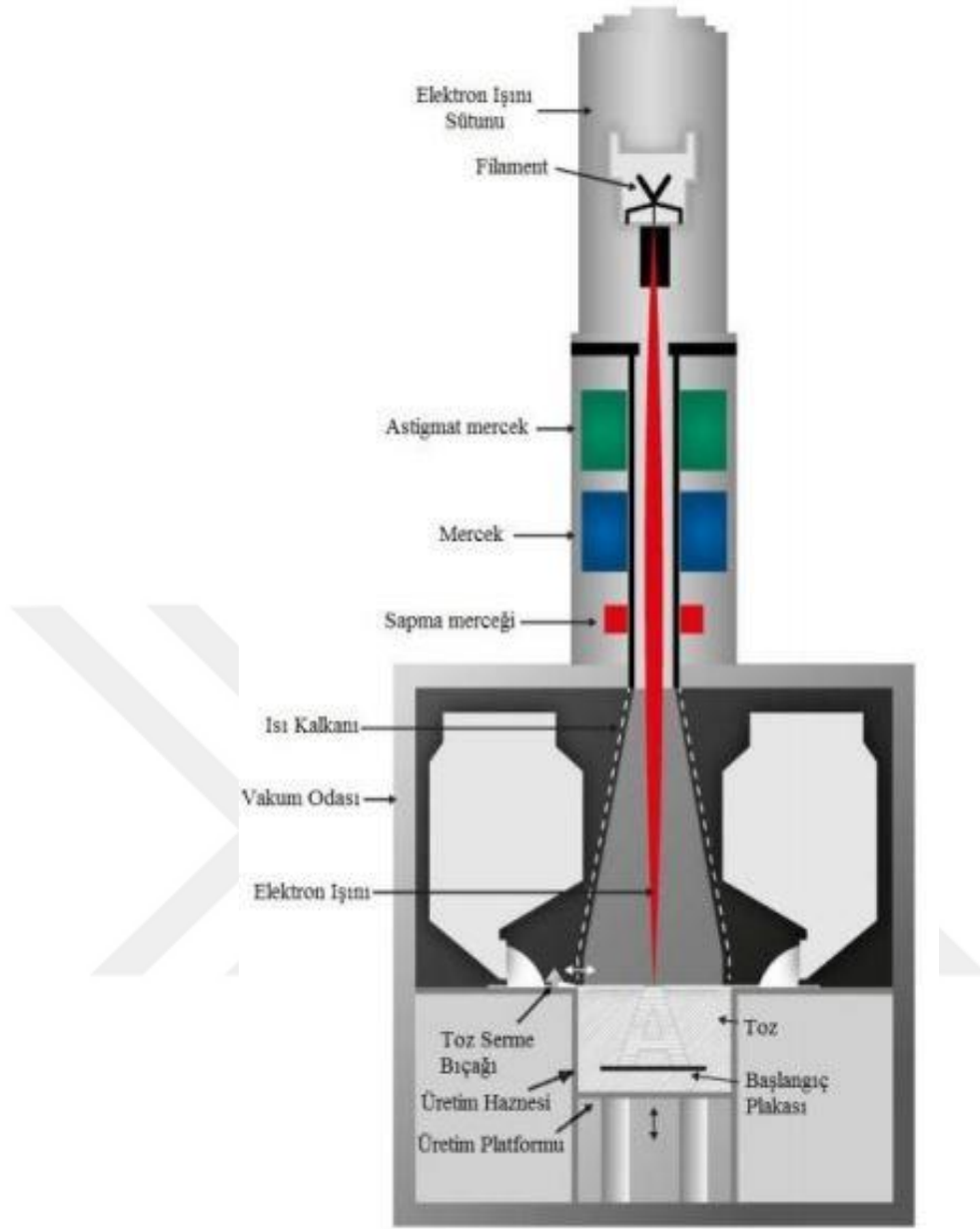
Bu işlem, bu nozulun sadece X ve Y eksenlerinde değil, birden çok yönde hareket edebilmesini sağlayan, eriyik biriktirme yöntemi gibidir. Bu yöntem 4-5 eksenli makinelere sahip olduğu için malzeme herhangi bir açıda biriktirilebilir. Bu teknoloji metaller ve polimerler ile kullanılabilir, ancak tipik olarak metal 3DP ile kullanılır. Direkt Enerji Depolama işleminde, katman-tabaka biriktirme oluşturmak için birlikte çalışan bir tel besleyici ve bir elektron ışını vardır. Bu yöntem, açık bir ortamda veya kapalı bir gaz odasında inert gaz koruyucu içerir. Bu teknik, toz Direkt Enerji Depolama işlemine kıyasla daha yüksek birikim oranları sağlar [67].

Bu yöntem, 0.1mm ila birkaç santimetre arasında değişen katman biriktirme kullanır. Lazer mühendisliği net şekillendirme (LENS) bu teknolojideki yeni gelişmedir. Bu yöntem, zaten mevcut bir parçaya malzeme eklemeye yardımcı olur. Bu yöntem, pahalı metal ürünleri onarmak için kullanılır. Bu, düzenli bakım gerektiren her yerde yüksek esneklik sunar. Bu teknolojiyi kullanan şirketler arasında Fransa'dan BeAM, Almanya'dan Trumpf ve ABD'den Sciaky bulunmaktadır [67].

2.1.10 Elektron ışınla ergitme (Electron beam melting)

Elektron ışını eritme (EBM), 3D yapıları imal etmek için titanyum ve kobalt alaşımları gibi metal tozlarını seçici olarak birleştiren bir eklemeli imalat (AM) teknolojisidir. Geleneksel üretim süreçleriyle karşılaştırıldığında, EBM süreci düşük tedarik sürelerinde düşük hacimli, yüksek değerli ürünler üretme yeteneğine sahiptir. Teknoloji 1993 yılında İsveç'te Göteborg'daki Teknoloji Üniversitesi'nde icat edildi. Arcam 1997 yılında kuruldu. 2002 yılında ilk ticari sistemini sattı. Şirketin şu anda dünya çapında kurulu 100'den fazla sistemi vardır. İşlem, bir elektron ışınının ergitme üretmek için metal parçacıklardan (ortalama 30-120 µm büyüklüğünde) oluşan bir toz yatak içindeki ayrı alanlara odaklanmasını ve ardından karmaşık geometrilerin imalatını mümkün kılan katılaşmayı içerir. EBM sistemi bir elektron ışını tabancası, vakum odası (~ 10⁻⁴ torr), inşa tankı ve toz dağıtım mekanizmalarından oluşur. Elektron ışını tabancası içinde, yüksek voltajda (60 kV) hızlandırılmış elektronları yaymak için bir tungsten filamentini ısıtılır, bu da elektromanyetik merceklerle odaklanan bir elektron ışını (yüksek kinetik enerji taşıyan) ile sonuçlanır. Bu sistem 8000 m/s'ye kadar elektron ışın tarama hızları, +/- 0.025 mm elektron ışın konumlandırma doğruluğu ve 0.05-0.2 mm aralığında katman kalınlıklarına sahiptir [68]. Tamamlanmasını, kullanılan yapının boyutuna ve kullanılan malzemeye bağlı olarak yaklaşık 6 saat süren bir helyum destekli soğuma dizisi takip eder.

Parça üretimi, tozun bir başlangıç plakası üzerine düzgün dağılımı ile başlatılır. Toz tabakası, elektron ışını tarafından önceden ısıtılmakta ve ardından gevşek bir şekilde birleştirilen tozu eriten bir dizi satır tarama gerçekleştirilmektedir. Toz, sadece toz serme bıçağı tarafından yayılır ve paketlenir; bu nedenle, toz boşluklarla düzensizdir. Sonuç olarak, erimeden önce, tabaka kalınlığı olması gerekenden yaklaşık 2-3 kat daha fazladır. Toz eritildiğinde doğru tabaka kalınlığına düşer. Bir tabakanın tamamlanmasından sonra, işlem platformu bir tabaka kalınlığına (0.05-0.2 mm) eşdeğer bir mesafeye indirilir. Yeni bir toz tabakası uygulanır ve tam yapı tamamlanıncaya kadar işlem tekrarlanır. Elektron ışınla ergitme teknolojisi şematik resmi Şekil 2.14'te gösterilmiştir.



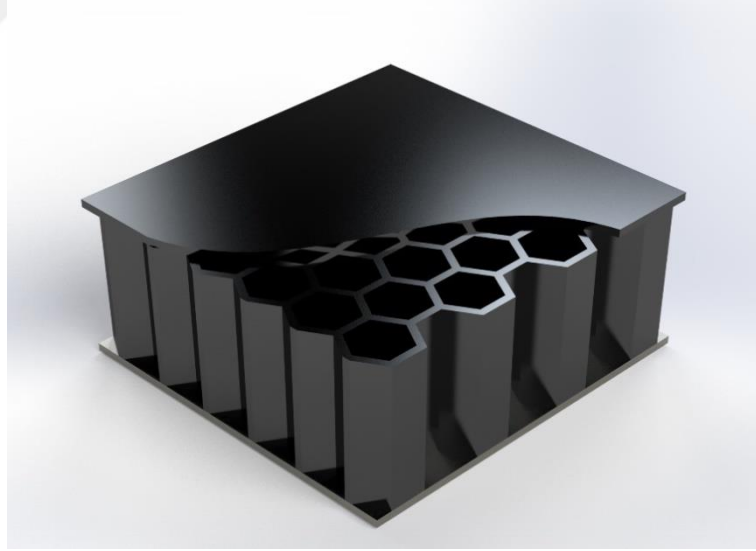
Şekil 2.14 : Elektron ışınla eritme teknolojisi şematik resmi [69].

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Sandviç Yapı Modelleri

Gerçekleştirilen çalışmada 4 farklı hücre yapı modeli tasarlanmıştır. Tasarlanan hücre yapılar Bal peteği hücre yapı, Girintili hücre yapı, Yıldız hücre yapı ve Üçgen Hücre yapılarıdır. Tasarımlar Solidworks programında gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan bu yapılar Basma testi, üç nokta eğme ve çarpışma testleri için farklı ölçülerde dizayn edilmiştir.

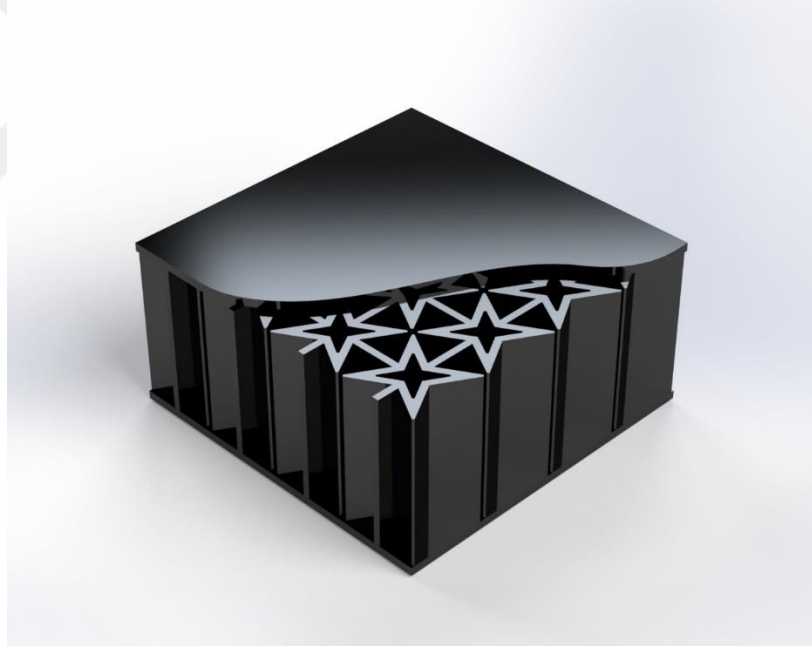
Basma ve Çarpışma testleri için geliştirilen modellerin ölçüleri 40x40x20 mm olarak tasarlanmıştır. Modellerin et kalınlıkları 0.8 mm'dir. Alt ve üst yüzler 1 mm kalınlığa sahiptir. Aşağıdaki şekillerde Solidworks programında tasarlanmış Visualize programında görselleştirilmiş modeller bulunmaktadır.



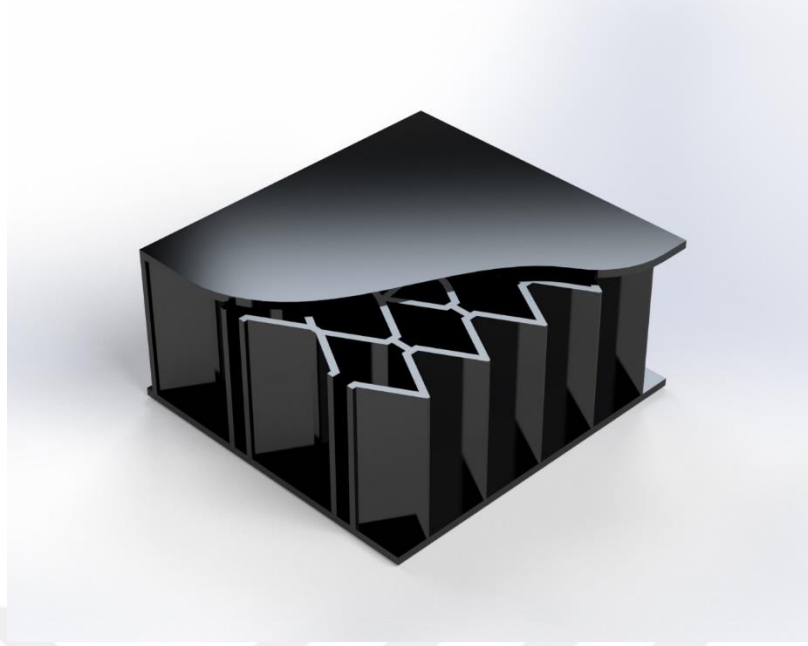
Şekil 3.1 : Bal peteği sandviç yapı.



Şekil 3.2 : Girintili sandviç yapı.



Şekil 3.3 : Yıldız sandviç yapı.



Şekil 3.4 : Üçgen sandviç yapı.

Üç nokta eğme testleri için tasarlanan sandviç yapılar hücre yapıları aynı tutularak test için uygun ölçülere getirilmiştir. Üç nokta eğme test numuneleri boyutları 130x20x20 olarak tasarlanmıştır. Et kalınlıkları 0.8 mm. Alt ve üst yüzler 1 mm kalınlığa sahiptir. Aşağıdaki şekillerde Solidworks programında tasarlanmış Visualize programında görselleştirilmiş modeller bulunmaktadır.



Şekil 3.5 : Üç nokta eğme modeli Bal peteği sandviç yapı.



Şekil 3.6 : Üç nokta eğme modeli Girintili sandviç yapı.



Şekil 3.7 : Üç nokta eğme modeli Yıldız sandviç yapı.



Şekil 3.8 : Üç nokta eğme modeli Üçgen sandviç yapı.

3.2 Sandviç Yapıların İmalat Malzemesi

Tasarlanan sandviç yapılar Termoplastik Poliüretan malzemedan imal edilmiştir. Termoplastik Poliüretan (TPU), aynı anda eritilebilir ve elastik olma özelliğine sahip bir poliüretan sınıfıdır. TPU'lar ısıtıldığında yumuşak, işlenebilir, soğutulduğunda sert ve yapısal bütünlüklerini kaybetmeden birkaç kez tekrar işlenebilme özelliğine sahiptir. TPU'lar, yüksek uzama, mukavemet ve yağlara, solventlere karşı iyi kimyasal direnç gibi çok iyi mekanik özellikler sunar. Bu nedenle, TPU'lar çok çeşitli pazarlar ve uygulamalar arasında popülerdir. TPU'lar, ayakkabı, kablo, hortum tüp, film ve tabaka veya diğer ürünler için katı bileşenler üretmek üzere geleneksel termoplastik üretim makinelerinde kalıptan çekilebilir veya enjeksiyonla kalıplanabilir. Ayrıca lamine tekstiller, koruyucu kaplamalar veya fonksiyonel yapıştırıcılar oluşturmak için organik çözücüler kullanılarak işlenebilirler [70].

Konvansiyonel termoplastik işleme teknikleriyle son kullanım öğelerine dönüştürülebilen granül veya top olarak tedarik edilen birçok tipte TPU vardır. TPU'lar genel olarak kimyasal yapılarına göre iki ana tipte sınıflandırılabilir: polieter ve polyester tipi.

Mekanik davranış: TPU'lar yüksek uzama ve gerilme mukavemetinin bir kombinasyonuna sahiptir. Ek olarak, yüksek tokluk ve mükemmel aşınma ve yırtılma direncine sahiptirler.

Termoplastiklik: TPU'ların termal özellikleri poliüretan ailesinde olağanüstüdür. TPU'ları işlemek için sıcaklık ve basınç kombinasyonunu kullanarak tekrar erime ve donma döngülerini gerektirir. TPU'ların üretilmesi için, aynı zamanda hem termoplastik olacak, hem de gereken derecede tokluk ve yüksek fiziksel dayanım özelliklerine sahip olan yüksek moleküler ağırlıklı bir doğrusal polimerin oluşturulması gerekmektedir. Elastikiyetin termoplastisite ile birleşmesi, TPU'ları kauçuklar ve termoplastik malzemeler arasında bir köprü olarak iyi bilinir hale getirir [71].

TPU'lar, onlarca kullanım için uyarlanabilecek çok yönlü bir materyal olmalarını sağlayan çok sayıda fiziksel özellik kombinasyonu sağlar. TPU'lar sterilize edilebilir, kaynaklanabilir, renkli hale getirilebilir, boyanabilir, üzerine basılabilir ve kesilebilir. Düşük sıcaklık esnekliğine sahiptirler ve bazı sınıflarda biyouyumluluk, hidrolitik stabilite, optik netlik, ayrıca alev geciktirici ve antistatik özellikler gösterirler. Bu özellikler TPU'ların çoğu ürün için son derece kullanılabilir olmasını sağlar.

Tez kapsamında imal edilen Sandviç yapılarda Ultimaker TPU 95A kullanılmıştır. Ultimaker TPU 95A malzemeye ait mekanik özellikler Çizelge 3.1'de verilmiştir.

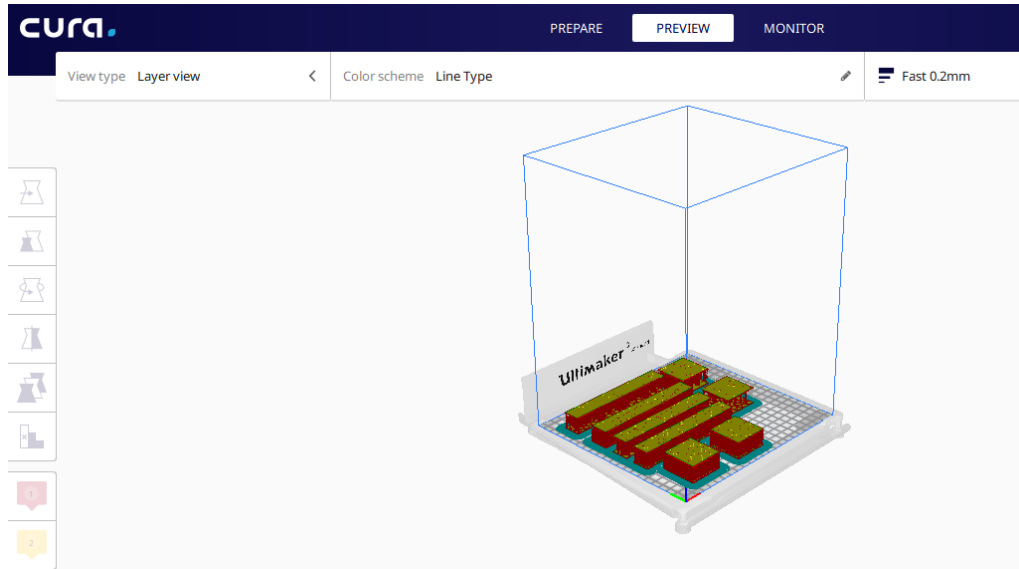
Çizelge 3.1 : Ultimaker TPU 95A mekanik özellikleri [72].

| | |
|---|------------------------------|
| Germe katsayısı | 26,0 MPa |
| Akma noktasında çekme gerilimi | 8,6 MPa |
| Kopma noktasında çekme gerilimi | 39,0 MPa |
| Akma noktasında uzama | %55,0 |
| Kopma noktasında uzama | %580,0 |
| Eğilme mukavemeti | 4,3 MPa |
| Eğilme katsayısı | 78,7 MPa |
| Izod darbe mukavemeti, çentikli (23°C'de) | 34,4 kJ/m ² |
| Sertlik | 95 (Shore A) 46 (Shore D) |
| Aşınma direnci | 0,06 g |
| Özgül ağırlık | 1.22 g/cm ³ |

Ultimaker Termoplastik poliüretan malzeme endüstriyel çalışmalarda kullanılmak üzere üretimi gerçekleştirilmiştir. TPU 95A malzeme hem lastik hem de plastik özellikleri gerektiren birçok alanda kullanılabilir. Ayrıca kimyasal maddelere dayanıklı bir filamenttir. Başka TPU filamentlere göre çok daha iyi baskı olanağı sağlar. Yüksek darbe direnci, yüksek aşınma direnci sağlamaktadır. Sertlik 95 Shore-A değerine sahiptir. Kopma noktasında %580'e kadar uzama gerçekleşmektedir. Kullanıldığı birçok uygulama alanı vardır; prototip imalatı, tutma yerleri, kılavuzlar, menteşeler, manşonlar, ve koruyucu kılıflar. Bu malzeme için kullanılması uygun olmayan yerler uzun süre UV'ye ve/veya neme maruz kalma ve imal edilen modelin 100 °C'den yüksek sıcaklıklarda kullanılması uygun değildir [72].

3.3 Sandviç Yapıların Hazırlanması

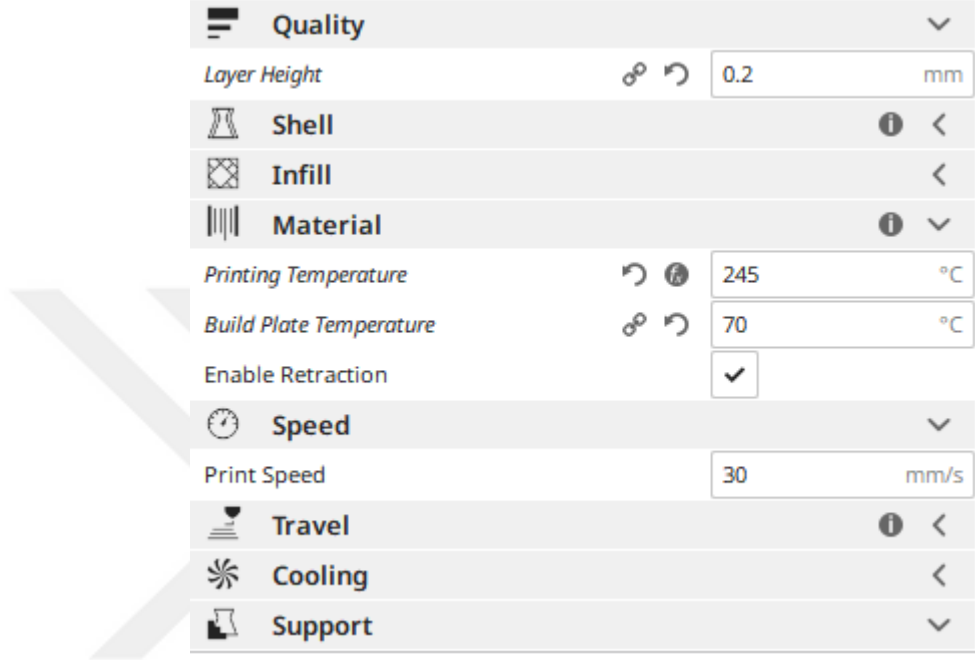
Tasarımı Solidworks programında tamamlanmış sandviç yapılar imalat için STL formatına dönüştürülmüştür. Dönüştürülen datalar 3 boyutlu yazıcıya aktarılmak üzere gerekli parametrelerinin oluşturulmasına olanak tanıyan açık kaynak kodlu Cura yazılım programı üzerinden aktarılmışlardır. Program üzerinden imalatı gerçekleştirilecek basma ve üç nokta eğme numuneleri tabla üzerine yerleştirilmiştir. Şekil 3.9'da Cura programı üzerinde basma ve üç nokta eğme test numunelerinin yerleşimi gösterilmiştir.



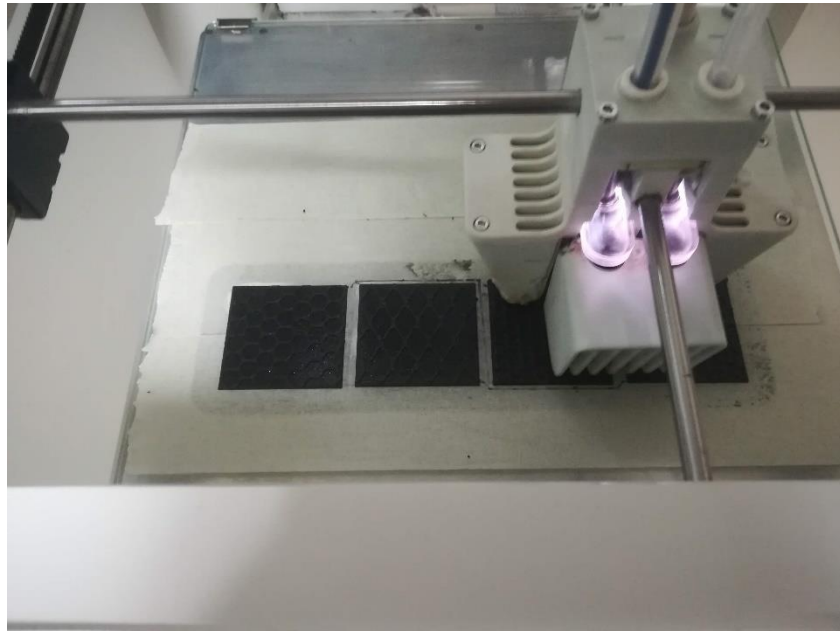
Şekil 3.9 : Cura programı üzerinde basma ve üç nokta eğme test numuneleri.

İmalat parametreleri Cura programı üzerinden tanımlanmıştır. Katman kalınlığı 0.2 mm, yazma hızı 30 mm/s, extruder sıcaklığı 245 °C, inşa tabla sıcaklığı 70 °C olarak ayarlanmıştır.

Tüm basma ve üç nokta eğme numuneleri bu parametrelere göre imal edilmiştir. Şekil 3.10'da Cura programı üzerinden işlem parametrelerinin girilmesi gösterilmiştir.



Şekil 3.10 : Cura programı üzerinden işlem parametrelerinin girilmesi.



Şekil 3.11 : Ultimaker 3 extended cihazında numunelerin imalatı.



Şekil 3.12 : İmal edilmiş Basma test numuneleri.



Şekil 3.13 : İmal edilmiş Üç nokta eğme test numuneleri.

3.4 Sandviç Yapıların Statik Testleri

3 Boyutlu yazıcı ile üretilen Sandviç yapıların statik mukavemetlerinin belirlenebilmesi amacıyla Çekme, Üç nokta eğme ve Basma testleri yapılmıştır.

3.4.1 Çekme testi

Çekme testi, en basit ve en yaygın kullanılan mekanik testlerden biridir. Bir numuneyi kopma noktasına uzatmak için gerekli olan gücü ölçerek, tasarımcıların ve kalite yöneticilerinin, malzemelerin ve ürünlerin uygulamada nasıl davranacağını tahmin

etmelerini sağlayacak malzeme özellikleri belirlenebilir. Çekme testinde numunedeki uzama miktarını belirleyebilmek için ekstensometre ölçüm cihazı kullanılır. Uygulanan kuvveti ölçmek içinde loadcell kullanılarak ölçüm gerçekleştirilir. Ölçüm işlemleri sonucunda elde edilen uzama ve yük değerleri ile gerilim-gerinim eğrisi çıkarılır. Çekme testi sonucunda malzemelerin sünekliği, mukavemeti, young modülü, poisson oranı, akma dayanımı ve rijitliği elde edilir. Testi uygulamak için numune makine çenelerine yerleştirilir ve kopma işlemi gerçekleşene kadar çekme kuvveti uygulanır. Kuvvetin uygulanması sırasında numune kesitindeki uzama miktarı tatbik edilen kuvvete karşı olacak biçimde kayıt altına alınır. Uzama miktarındaki değerler Denklem 3.1 yardımıyla mühendislik deformasyonunu (ϵ) elde etmek için kullanılır.

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L-L_0}{L_0} \quad (3.1)$$

ΔL = Boydaki değişim

L_0 = Başlangıç Boyu

L = Son Boy

Mühendislik gerilmesi, uygulanan yük (P) ve kesit başına (A_0) kuvvet oranıdır. Mühendislik gerilmesi Denklem 3.2'de verilmiştir.

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (3.2)$$

Uzama, numunenin uzunluğundaki başlangıç noktasından kopmaya kadar geçen toplam artışı gösterir. Toplam uzama, kopmuş ve orijinal numune ölçümleriyle belirlenir. Uzama, şekillenebilirlik göstermez, çünkü farklı örneklerdeki aynı malzeme için uzama değişebilir.

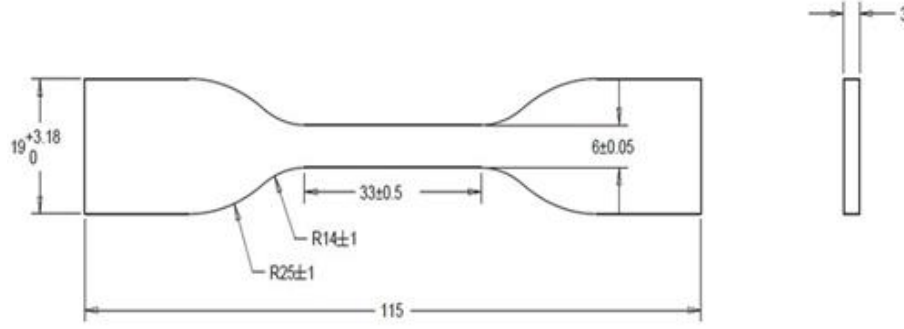
Elastikiyet modülü E , sertliğini tanımlayan bir malzeme özelliğidir ve bu özellik katı malzemelerin belirleyici temel özelliklerinden bir tanesidir.

Malzeme elastik olarak deforme olduğu zaman, deformasyon miktarı da aynı şekilde malzemenin boyutu ile bağlantılıdır, Elastikiyet modülü Denklem 3.3'te verilmiştir.

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (3.3)$$

3.4.1.1 Çekme test numunesinin hazırlanması

Çekme testi için 3 boyutlu yazıcıda ASTM D638 Standartına uygun 3 Adet numune hazırlanmıştır. Çekme test standardı ASTM D638 Type IV Şekil 3.14'de gösterilmiştir.



Şekil 3.14 : Çekme test standardı ASTM D638 Type IV.

Bursa Teknik Üniversitesi bünyesinde bulunan Ultimaker 3 Extended Cihazında Çekme test numunelerinin hazırlanması gerçekleştirilmiştir. Çekme Test numunelerinin imalatı Şekil 3.15'te gösterilmiştir.



Şekil 3.15 : Çekme Test numunelerinin imalatı.

Basma parametreleri Cura programı üzerinde girilmiştir. Katman yüksekliği 0.2 mm Yazma hızı 30 mm/s Extruder sıcaklığı 245 °C İnşa Tabla sıcaklığı 70 °C olarak 3 numune hazırlanmıştır. İmal edilmiş Çekme test numuneleri Şekil 3.16'da gösterilmiştir.



Şekil 3.16 : İmal edilmiş Çekme test numuneleri.

Çekme testleri Bursa Teknik Üniversitesi bünyesinde bulunan SHIMADZU AG-X plus cihazında gerçekleştirilmiştir. SHIMADZU AG-X plus 250 kN kapasitelidir. Bu cihazda Çekme testi, Basma testi, 3 ve 4 nokta eğme testi gerçekleştirilebilmektedir.



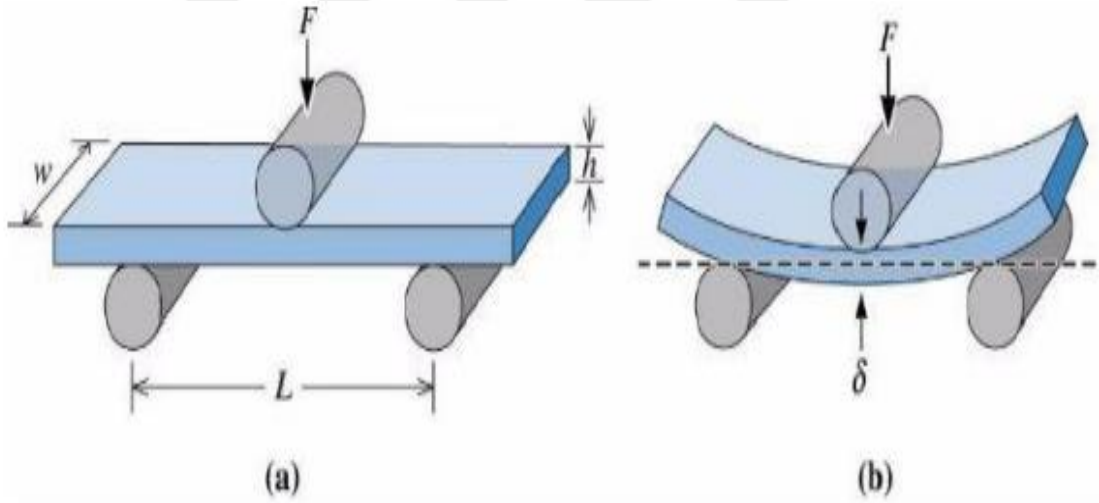
Şekil 3.17 : SHIMADZU AG-X plus cihazı.

3.4.2 Üç nokta eğme testi

Üç nokta eğme testi malzemenin mukavemet değerlerini belirlemede ve malzemenin tasarım kriterlerini oluşturmak ve malzemenin eğme dayanım özelliklerini belirlemek amacı ile yapılır. Eğme testi ile eğilme gerilmesi, elastisite modülü, eğme momenti ve sehimi miktarı gibi mekanik özellikler hesaplanır [73].

Üç nokta eğme testi, iki destek noktasına konumlandırılan genellikle dikdörtgen veya dairesel kesitli test numunesinin, yön değiştirilmeden orta noktasına bir eğme kuvveti uygulandığında ortaya çıkan şekil değişimini esas almaktadır. Eğme testinde, test parçasına bir kuvvet uygulandığında, parça kesitinin belli bir bölümünde basma gerilmesi, kesitin diğer bölümündeki kısmında ise çekme gerilmesi ortaya çıkmaktadır.

Test işlemine tabi tutulan numune elastik ve homojen bir kirişe ve üç nokta eğme testinde maksimum gerilme kirişin dış yüzeyindeki orta bölgede ortaya çıkar. Şekil 3.18'de Üç nokta eğme test yöntemi prensibi gösterilmiştir.



Şekil 3.18 : Üç Nokta Eğme Test Düzenegi [74].

Test boyunca, F kuvveti artırılırken, malzemenin tam orta noktasında meydana gelen sehimi değeri tespit edilir. Tespit edilen değerler sonucunda kuvvet sehimi grafiği elde edilmiş olur. Bütün malzeme çeşitleri için bu ölçümler, en yüksek sehimi ve momentin oluştuğu nokta olan orta noktasında gerçekleşir. Şekil 3.19'da sandviç yapılara uygulanan üç nokta eğme test düzenegi gösterilmiştir.

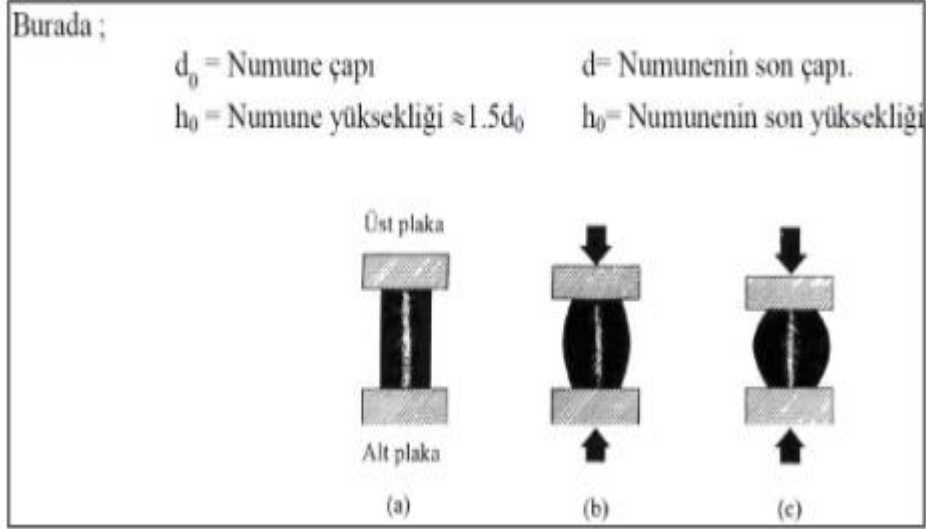


Şekil 3.19 : Sandviç yapı 3 nokta eğme testi.

3.4.3 Basma testi

Basma testi, numuneye basma yükü uygulanması neticesinde test numunesinde kısalma ya da ezilmenin ortaya çıkması prensibine dayalı bir test metodudur. Basma testinde uygulanan yük, çekme testinde uygulanan yükün tersi şeklinde etki etmektedir. Basma testi, genellikle çekme test cihazlarında gerçekleştirilir. Test numunesi genellikle, uygulanan yükü, test numunesinin iki karşıt yüzünün tüm yüzey alanı boyunca dağıtan iki plaka arasına yerleştirilir ve daha sonra plakalar, numunenin düzleşmesine neden olan universal bir test makinesi tarafından gerçekleştirilir. Basma numunesi genellikle uygulanan kuvvet yönünde kısalır ve kuvvete dikey yönde genişler.

Basma testinin amacı, bir malzemenin basınç, gerilim ve deformasyon gibi temel değişkenleri ölçerek basınç yükü yaşarken davranışını veya tepkisini belirlemektir.



Şekil 3.20 : Basma kuvveti uygulanan sünek malzemelerdeki fiçi oluşumu [75].

Basma testi sonucunda, basma dayanımı, akma dayanımı, malzemenin dayanabileceği maksimum kuvvet, elastik sınır ve elastik modül parametrelerinin tümü elde edilmektedir. Bu farklı parametrelerin ve belirli bir malzemeye ilişkili değerlerin anlaşılmasıyla, malzemenin belirli uygulamalar için uygun olup olmadığı veya belirtilen gerilmeler altında başarısız olup olmayacağı belirlenebilir. Bu değerler, her malzemenin kendi türüne, kimyasal yapısına ve iç yapısına göre değişmektedir. Basma testinde gerçek birim şekil değiştirme Denklem 3.4 bağıntısı ile hesaplanır.

$$e = \ln\left(\frac{h_0}{h}\right) \quad (3.4)$$

Tipik olarak, basma testine tabi tutulan malzemeler, genellikle yüksek olduğu kabul edilen bir basma mukavemetine ve daha düşük bir değer olarak kabul edilen bir çekme mukavemetine sahiptir. Hemen hemen tüm malzemeler, uygulamalarına bağlı olarak basma kuvvetlerini bir şekilde yaşayabilir, ancak en yaygın malzemeler kompozit, beton, ahşap, taş, tuğla, harç, polimer, plastik, köpük ve diğer malzemelerdir.

Sandviç yapıların basma testleri sırasında yük numunelere uygulanırken 80 mm çapındaki çelik çeneler arasına yerleştirilmiş ve tek yönde basma kuvveti uygulanmıştır. Test hızı dakikada 2.5 mm seçilmiştir. Basma çeneleri arasına yerleştirilmiş numune Şekil 3.21’de verilmiştir.



Şekil 3.21 : Sandviç yapı basma testi.

3.5 Çarpışma Testi

3.5.1 Emilen toplam enerji

Emilen toplam enerji test sırasında çarpışma anında numunenin enerji emici aracılığıyla sönümlendiği toplam enerji miktarıdır. Bu değer malzemenin sağlamlığının veya sünekliğinin bir göstergesi olarak referans alınabilir. Değer ne kadar yüksek ise malzemede daha güçlü hale gelmektedir. Denklem 3.5 bağıntısı ile emilen toplam enerji miktarı hesaplanır.

$$E_T = \int_{S_b}^{S_s} F \cdot dS \quad (3.5)$$

Denklemde;

F= Eksenel yöndeki ezilme kuvveti (kN)

S= Yer değiştirme (mm)

E_T = Emilen toplam enerji

S_b = Kuvvetin ilk olarak başladığı andaki başlangıç konumu

S_s = Sönümlemenin sonlandığı andaki son konumu

Çarpışma test sonucu ortaya çıkan kuvvet-yer değiştirme grafiğinin oluşturulması ile kuvvet eğrisinin alt bölgesinde oluşan alan emilen toplam enerji miktarı olarak ifade edilmektedir. Enerji sönümleyiciler için, enerji emilim miktarının olabildiğince maksimum seviyede olması arzu edilmektedir [76].

3.5.2 Maksimum (Pik) çarpışma kuvveti

Çarpışma esnasında enerji sönümleyici üzerine eksenel yönde gelen kuvvetler çarpışma kuvvetini belirlemektedir. Genel olarak çarpışmanın gerçekleştiği zamandaki ilk temas anındaki kalıcı deformasyonun başlaması ile beraber gerçekleşen en yüksek kuvvete maksimum (pik) çarpışma kuvveti olarak tanımlanmaktadır. Maksimum çarpışma kuvvetinin mümkün olduğunca en düşük seviyede olması arzulanmaktadır. Bu kuvvetin en düşük seviyede ortaya çıkmasını sağlamak için gerekli tasarımlar ve optimizasyonlar gerçekleştirilmelidir [76].

3.5.3 Ortalama çarpışma kuvveti

Denklem 3.6 ile tanımlanan enerji sönümleyicinin sönümlediği toplam enerjinin, eksenel yöndeki toplam ezilme miktarına oranlaması olarak tanımlanmaktadır.

$$F_o = \frac{E_T}{S_s - S_b} \quad (3.6)$$

Denklemdede;

E_T = Emilen toplam enerji

S_b = Kuvvetin ilk olarak başladığı andaki başlangıç konumu

S_s = Sönümlemenin sonlandığı andaki son konumu

olarak tanımlanmaktadır. Enerji sönümleyicilerin kalıcı şekil değişimi sırasında, enerji sönümleyicideki bölgesel burkulmalar ile üst üste katlanmalar meydana gelmektedir, bu esnada tepki kuvvetlerinde dalgalanmalar meydana gelmektedir. Bu tür kuvvet değerlerindeki değişim durumları meydana gelse, tepki kuvvetlerinin buradaki ortalama çarpışma kuvveti değerine yakın olacak şekilde bir değişim göstermesi arzulanmaktadır [76].

3.5.4 Özgül enerji emilimi

Özgül enerji emilimi enerji sönümleyicinin sönümlediği toplam enerjinin, enerji sönümleyicinin kütlesine oranı olarak tanımlanmaktadır.

$$E_m = \frac{E_T}{m} \quad (3.7)$$

Burada,

E_m = Özgül enerji emilimi

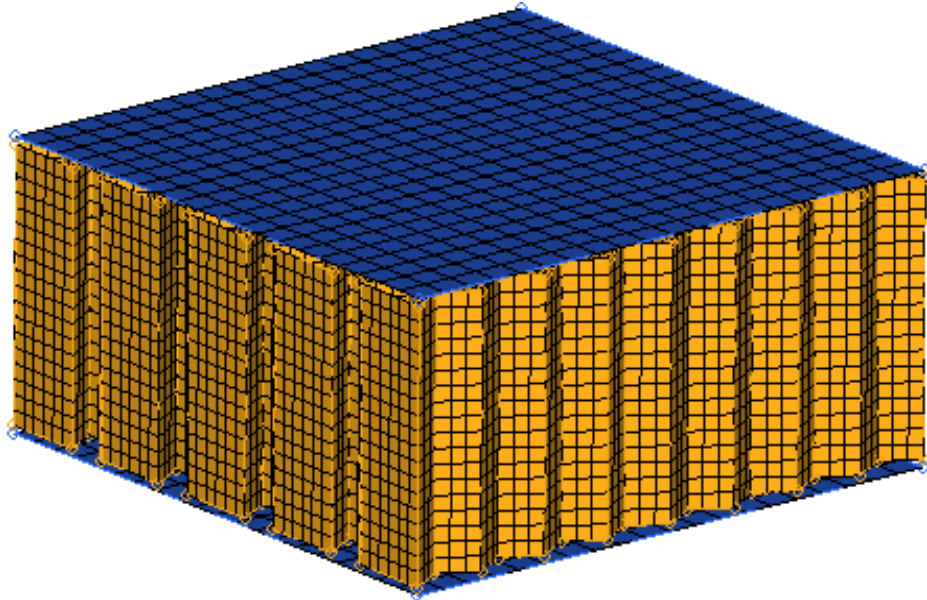
E_T = Emilen toplam enerji

m = Enerji sönümleyicinin kütlesi

olarak ifade etmektedir [76].

3.5.5 Ağ yapısı

Bal peteği sandviç yapı, Girintili sandviç yapı, Yıldız sandviç yapı ve Üçgen sandviç yapı için ağ yapısının oluşturulmasında HyperMesh yazılımından yararlanılmıştır. Hypermesh programı üzerinden ağ yapısının oluşturulması Şekil 3.22'de gösterilmiştir. Tez kapsamında 2 Boyutlu Auto mesh ile Üst plakalar 2x2 boyutunda Kare ,Model Çekirdek yapıları 1x1 boyutunda Kare mesh olarak tanımlanmıştır.



Şekil 3.22 : Hypermesh programı üzerinden ağ yapısının oluşturulması.

3.5.6 Malzeme tanımlaması

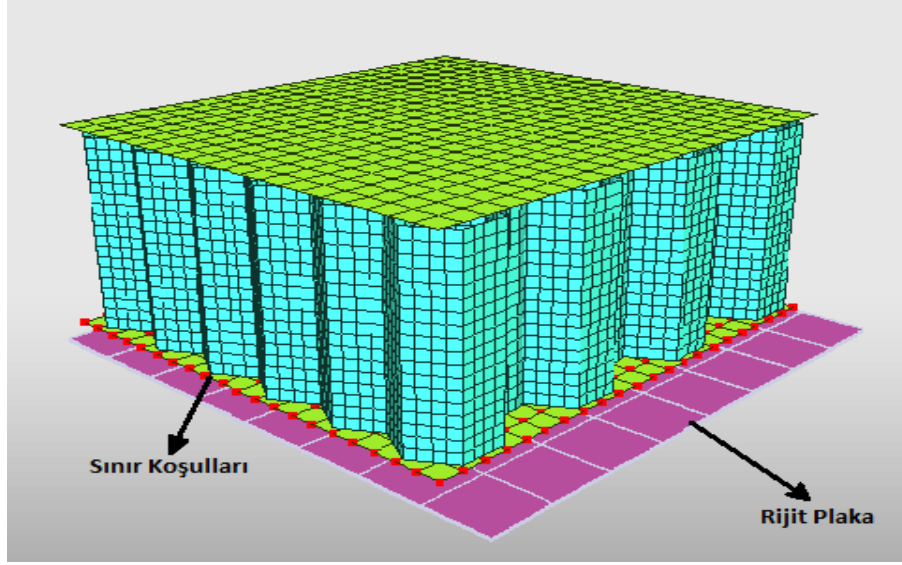
Malzeme tanımlaması modelin gerçeğe en yakın sonuçlar vermesi için en önemli verilerden bir tanesidir. HyperCrash programı üzerinden Termoplastik poliüretan malzeme için elastomer malzeme modeli seçilmiştir. Çekme test sonuçlarına göre elde edilen sonuçlar HyperCrash Programı üzerinden malzeme yoğunluk, elastisite modülü, poisson oranı ve gerinim değerleri girilerek çekirdek ve plakalara malzeme tanımlaması yapılmıştır. HyperCrash programı üzerinden malzeme kartı oluşturulması Şekil 3.23'te gösterilmiştir.

| | |
|--|--------------------------|
| Title | New MAT 4 |
| Local Unit System | None |
| [RHO_] Initial density* | 1.2E-6 |
| [RHO_0] Reference density | 0 |
| [E] Young's modulus* | .021 |
| [Nu] Poisson's ratio* | .48 |
| [Eps_p_max] Failure plastic strain | 6.9 |
| [Eps_t] Tensile failure strain | 0 |
| [Eps_m] Tensile failure strain | 0 |
| [C_hard] Hardening coefficient | 0 |
| [F_smooth] Strain rate smoothing | <input type="checkbox"/> |
| [F_cut] Cutoff frequency for strain rate filter | 0 |
| [Eps_f] Maximum tensile failure strain | 0 |
| [fct_IDp] Pressure vs. yield factor function | None |
| [Fscale] Y-Scale factor for yield factor function | 1 |
| [Fct_IDE] Function identifier for the scale factor | None |
| [EInf] Saturated Young's modulus for infinite strain | 0 |
| [CE] Parameter for Young's modulus evolution | 0 |
| [N_func] Number of functions* | 1 |

Şekil 3.23 : HyperCrash programı üzerinden malzeme kartı oluşturulması.

3.5.7 Sınır koşullarının tanımlanması

Ağ yapıları tanımlanmış 4 farklı Sandviç modelin HyperCrash programın üzerinde sınır koşulları tanımlanması gerçekleştirilmiştir. Bütün analizlerde 3 m/s ilk hız verilmiş 10 kg'lık kütle modeller üzerine çarpıtılmıştır. Malzeme modeli, ağ yapısı ve sınır koşulları tanımlanmış Bal peteği sandviç yapı modeli Şekil 3.24' de gösterilmiştir.

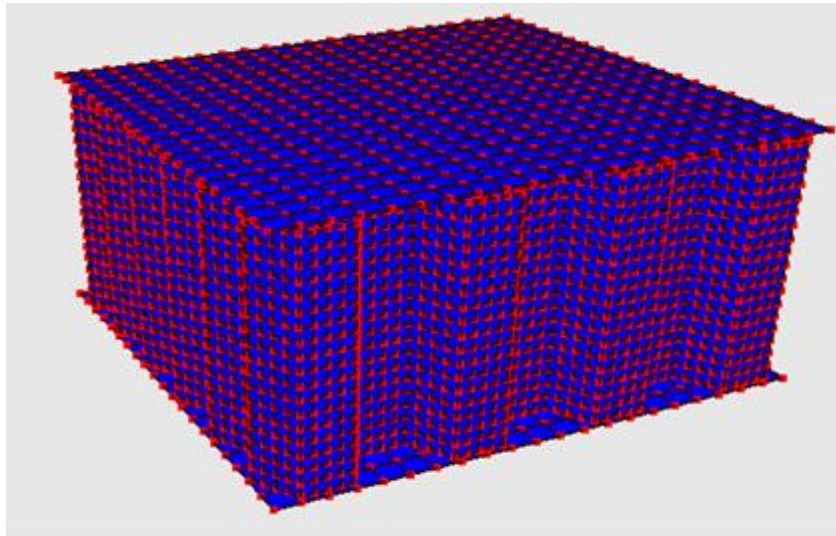


Şekil 3.24 : Bal peteği sandviç modele ait sınır koşulları tanımlanması.

3.5.8 Temas tanımlanması

HyperCrash programı üzerinden modelin sonlu elemanlar yöntemi ile test için doğru tanımlanabilmesi için en önemli verilerden bir tanesi de temas tanımlarının model üzerinde en iyi şekilde uygulanmasıdır.

Temas tanımı olarak program üzerinden birçok yöntem kullanılabilir. Dinamik analizler için en iyi yöntem olan “Nodes to Surface Contact” yöntemi tercih edilmiştir. Yüzeyler arası sürtünme katsayısı 0,2 olarak belirlenmiş Coulomb sürtünme kanunu kullanılmıştır. Hypercrash programı üzerinden Model temas tanımlanması Şekil 3.25’te gösterilmiştir.



Şekil 3.25 : Model temas tanımlanması.

3.5.9 Darbe enerjisi

Darbe enerjisi, malzemeyi kırmak için gereken enerjidir, numuneye darbe anında düşme ağırlığının maksimum kinetik enerjisi veya numuneye verilen enerjidir ve darbe dayanımı, darbe enerjisini kesit alana bölerek elde edilir. Çarpma öncesi maksimum enerjiyi veren formül şu şekildedir:

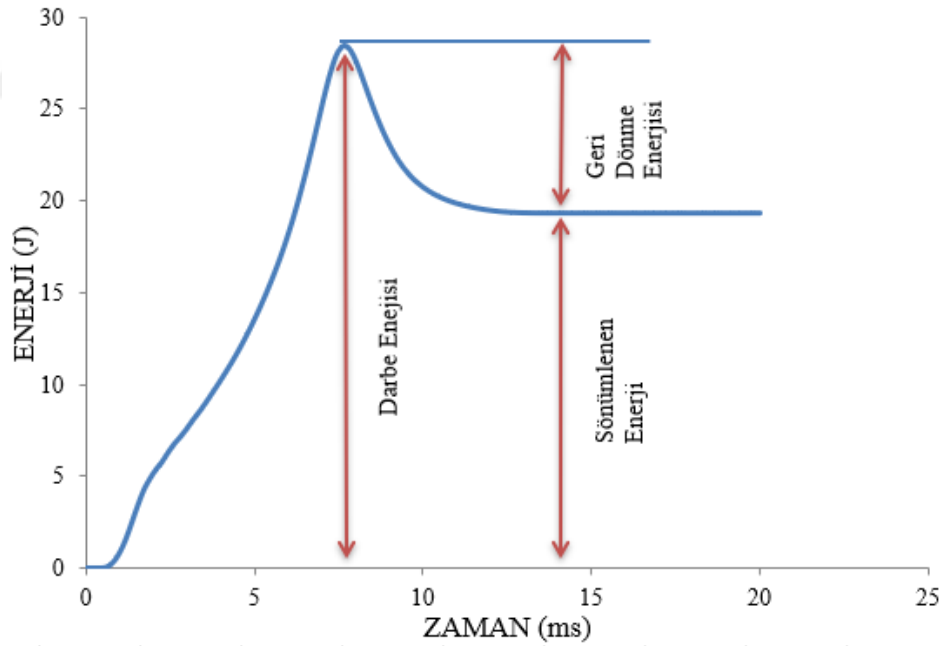
$$E = \frac{1}{2}mV^2 \quad (3.8)$$

E=Enerji (J)

m=Düşen kütle ağırlığı

V=Düşen kütle hızı

Çarpışma sonrası elde edilen grafik şekilde gösterilmiştir. Çarpışma sonrası elde edilen grafiklerde Darbe enerjisi, Geri dönme enerjisi ve Sönümlenen enerji elde edilir. Çarpışma testi sonrası enerji miktarlarının tespit grafiği Şekil 3.26'da gösterilmiştir.



Şekil 3.26 : Çarpışma testi sonrası enerji miktarlarının tespit edilmesi.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Gerçekleştirilen çalışmalarda Bal peteği sandviç yapı, Girintili sandviç yapı, Yıldız sandviç yapı ve Üçgen sandviç yapılarının Üç nokta eğme, Basma ve Çarpışma testlerine tabi tutulmuş yapılar incelenmiştir. Çalışma deneysel ve sayısal olmak üzere iki farklı yöntem kullanılarak yapılmıştır.

4.1 Deneysel Çalışma

4.1.1 Statik test sonuçları

Statik Test Sonuçları Üretimi gerçekleştirilen sandviç yapıların üç nokta eğme ve basma testi gerçekleştirilmiş ve numunelerin dayanım etkileri incelenmiştir.

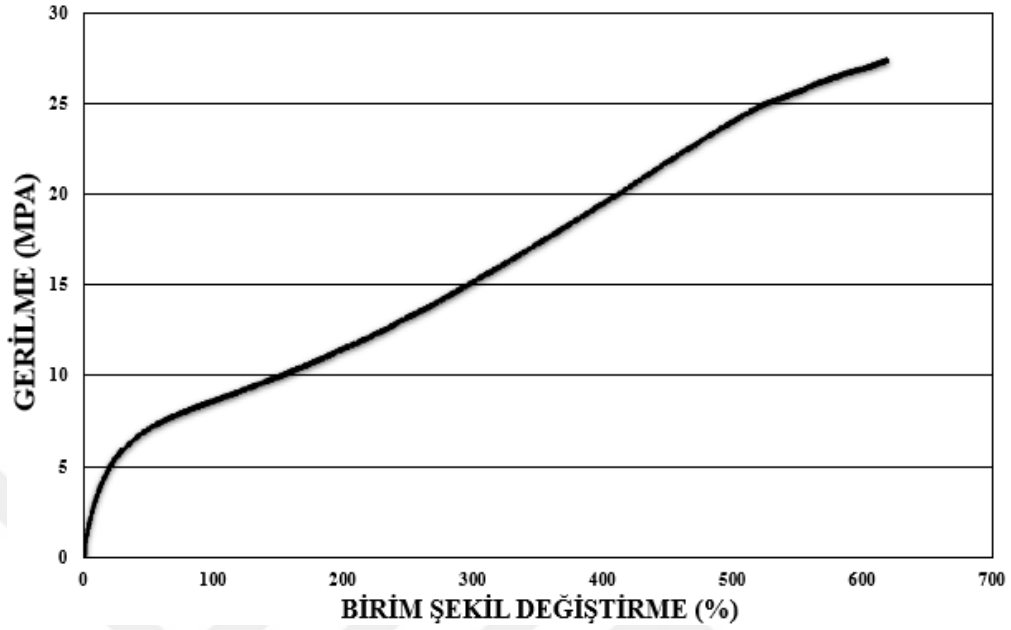
4.1.1.1 Çekme test sonuçları

Çekme testi için 3 boyutlu yazıcıda ASTM D638 Standardına uygun imal edilen TPU 3 Adet numune test edilmiştir. TPU malzeme Çekme testi Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1 : TPU malzeme çekme testi.

SHIMADZU AG-X plus cihazında 3 adet numune içinde çekme testi gerçekleştirilmiş ortalamaları alınmıştır. Şekil 4.2’de Gerilme-Birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir.



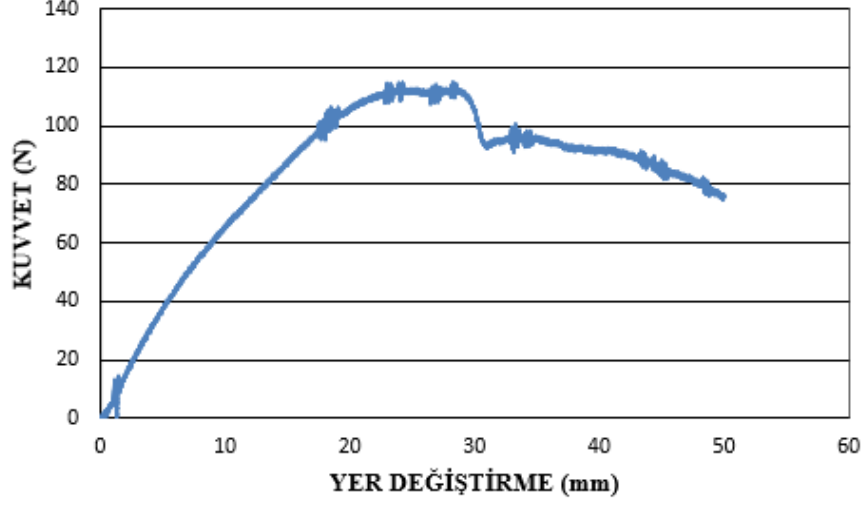
Şekil 4.2 : TPU malzeme Gerilme-Birim şekil değiştirme grafiği.

En yüksek çekme dayanımı 28.9 MPa, Elastisite modülü 21 MPa olarak tespit edilmiştir.

4.1.1.2 Üç nokta eğme test sonuçları

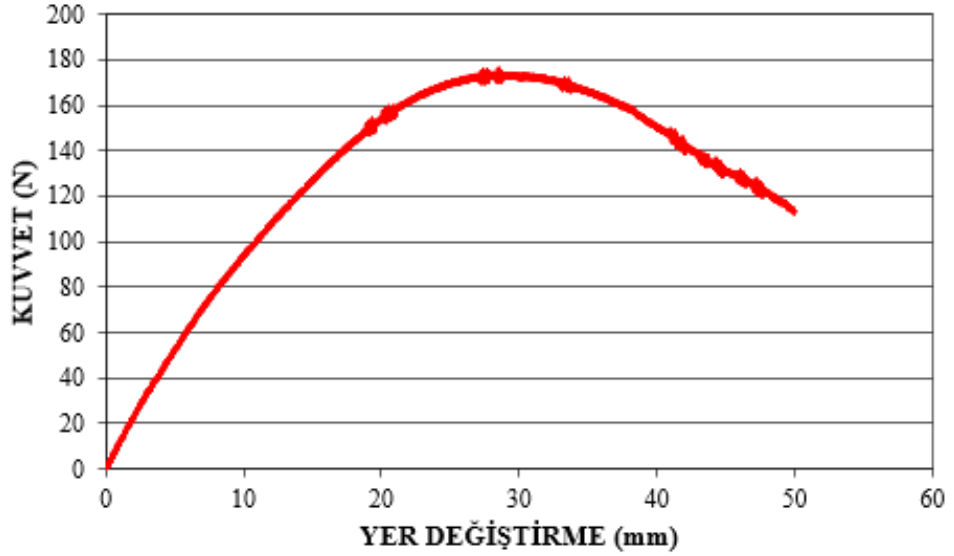
Testler sırasında Shimadzu universal test cihazı kullanılmıştır. 250 kN yük hücresine sahip cihazda testler yapılırken ilerleme hızı 2.5 mm/dk seçilmiştir. Testler sırasında yük numuneye R5 mm çapındaki silindir ile uygulanmıştır. Alt mesnet açıklığı 100 mm olarak belirlenmiştir. Test sırasında uygulanan kuvvete karşılık gelen şekil değişimi kaydedilmiş ve parametreler için karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Bal peteği sandviç yapı modeline uygulanan 3 nokta eğme test sonucuna göre maksimum eğme dayanımı 113.4 N olarak tespit edilmiştir. Şekil 4.3’de Bal peteği sandviç yapıya ait kuvvet-yer değiştirme grafiği verilmiştir.



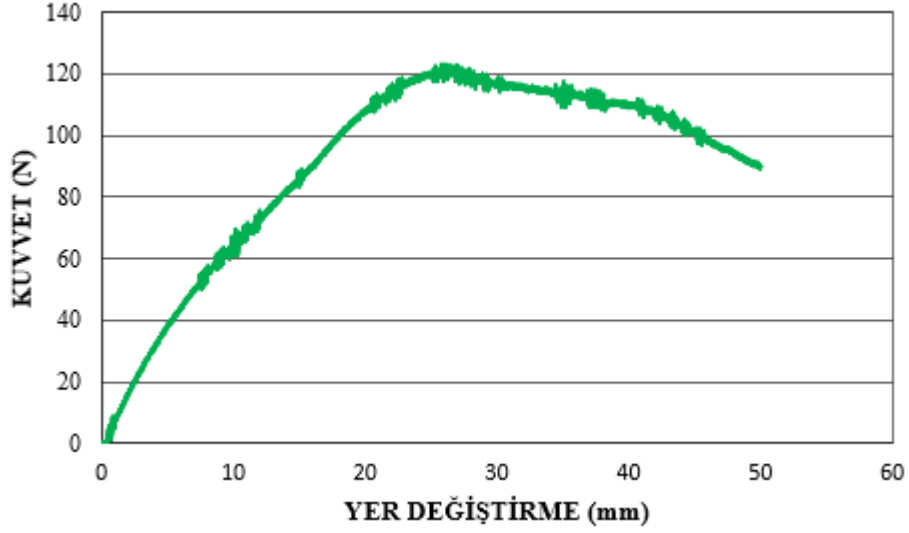
Şekil 4.3 : Bal Peteği sandviç yapı 3 nokta eğme Kuvvet-Yer değiştirme grafiği.

Girintili sandviç yapı modeline uygulanan 3 nokta eğme test sonucuna göre maksimum eğme dayanımı 173.3 N olarak tespit edilmiştir. Şekil 4.4’de Girintili sandviç yapıya ait kuvvet-yer değiştirme grafiği verilmiştir.



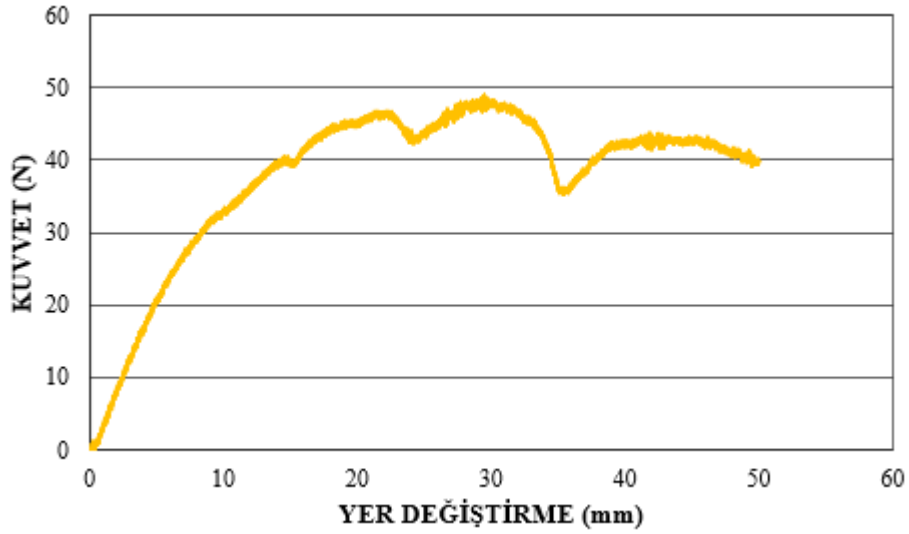
Şekil 4.4 : Girintili sandviç yapı 3 nokta eğme Kuvvet-Yer değiştirme grafiği.

Yıldız sandviç yapı modeline uygulanan 3 nokta eğme test sonucuna göre maksimum eğme dayanımı 121.1 N olarak tespit edilmiştir. Şekil 4.5’de yıldız sandviç yapıya ait kuvvet-yer değiştirme grafiği verilmiştir.



Şekil 4.5 : Yıldız sandviç yapı 3 nokta eğme Kuvvet-Yer değiştirme grafiği.

Üçgen sandviç yapı modeline uygulanan 3 nokta eğme test sonucuna göre maksimum eğme dayanımı 47.6 N olarak tespit edilmiştir. Şekil 4.6’da Üçgen sandviç yapıya ait kuvvet-yer değiştirme grafiği verilmiştir.

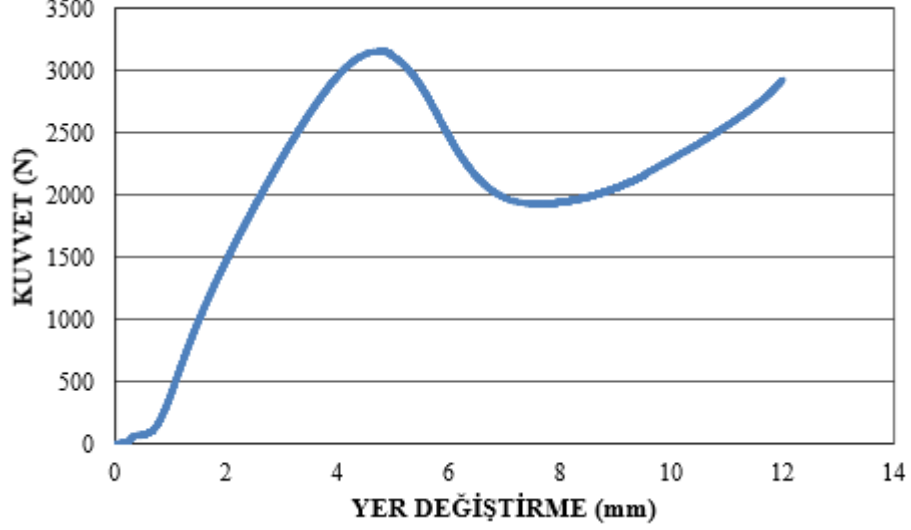


Şekil 4.6 : Üçgen sandviç yapı 3 nokta eğme Kuvvet-Yer değiştirme grafiği.

4.1.1.3 Basma test sonuçları

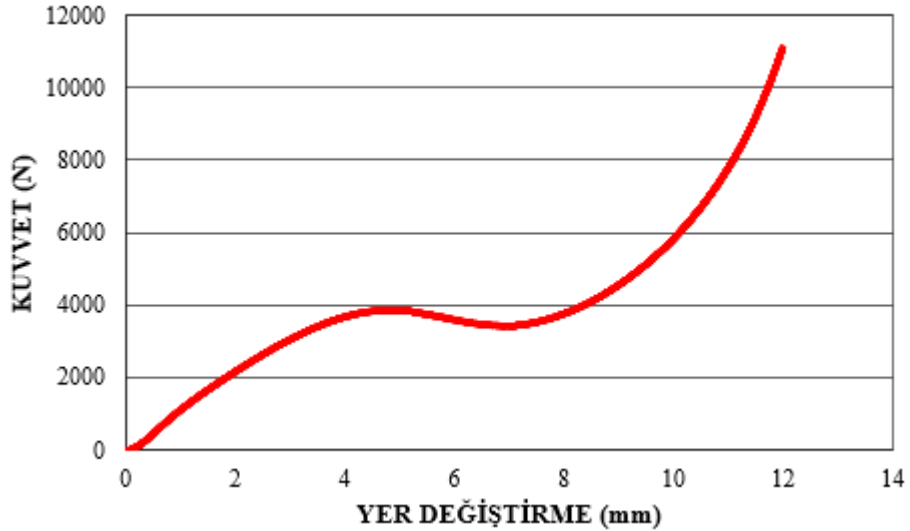
Tüm basma testleri 250 kN yük hücresiyle 2.5 mm/dk ilerleme hızında gerçekleştirilmiştir. Numuneler test cihazına bağlanan rijit plakalar arasına yerleştirilmiş ve yük uygulanmıştır. Basma testleri sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

Bal peteği sandviç yapı modeline uygulanan basma test sonucuna göre maksimum basma dayanımı 3154.2 N olarak tespit edilmiştir. Şekil 4.7’de Bal peteği sandviç yapıya ait kuvvet-yer değiştirme grafiği verilmiştir.



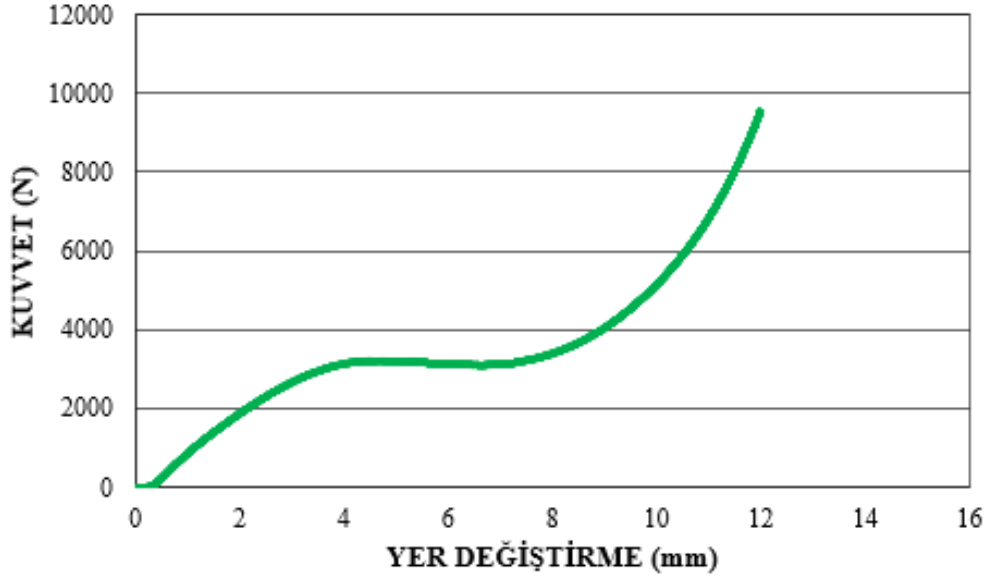
Şekil 4.7 : Bal peteği sandviç yapı basma Kuvvet-Yer değiştirme grafiği.

Girintili sandviç yapı modeline uygulanan basma test sonucuna göre maksimum basma dayanımı 11118.2 N olarak tespit edilmiştir. Şekil 4.8’de Girintili sandviç yapıya ait kuvvet-yer değiştirme grafiği verilmiştir.



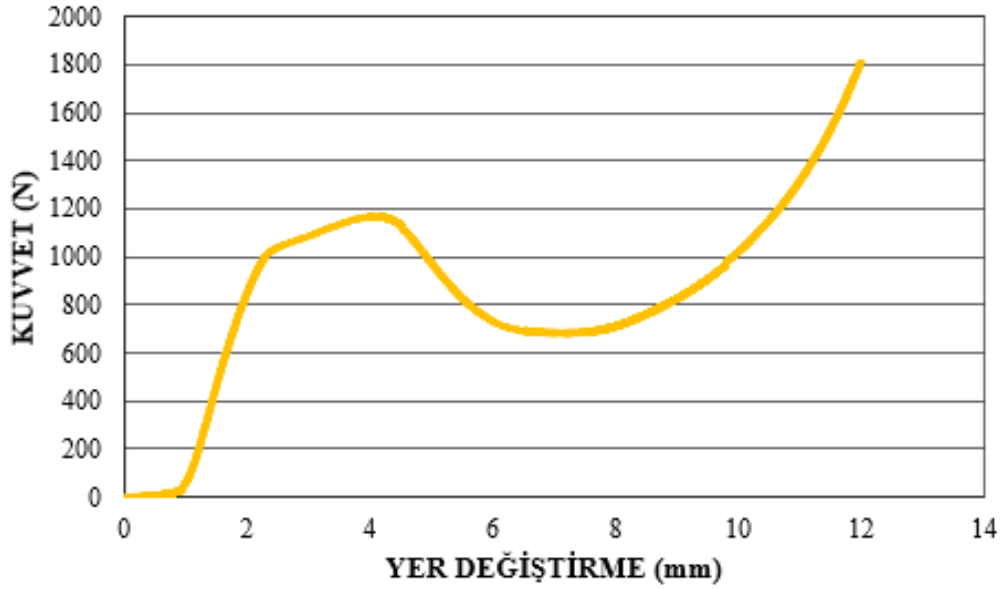
Şekil 4.8 : Girintili sandviç yapı basma Kuvvet-Yer değiştirme grafiği.

Yıldız sandviç yapı modeline uygulanan basma test sonucuna göre maksimum basma dayanımı 9570.9 N olarak tespit edilmiştir. Şekil 4.9’da Yıldız sandviç yapıya ait kuvvet-yer değiştirme grafiği verilmiştir.



Şekil 4.9 : Yıldız sandviç yapı basma Kuvvet-Yer değiştirme grafiği.

Üçgen sandviç yapı modeline uygulanan basma test sonucuna göre maksimum basma dayanımı 1812.3 N olarak tespit edilmiştir. Şekil 4.10'da Üçgen sandviç yapıya ait kuvvet-yer değiştirme grafiği verilmiştir.



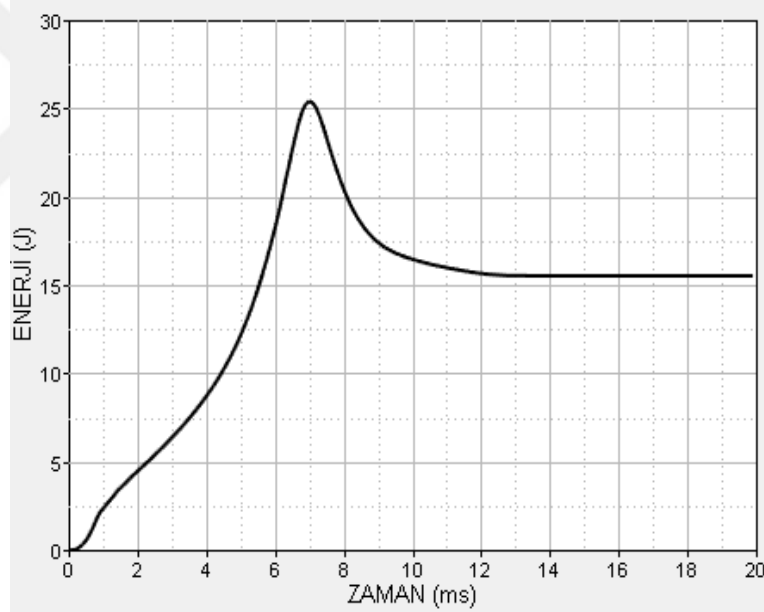
Şekil 4.10 : Üçgen sandviç yapı basma Kuvvet-Yer değiştirme grafiği.

4.1.2 Dinamik Test Sonuçları

4.1.2.1 Çarpışma test sonuçları

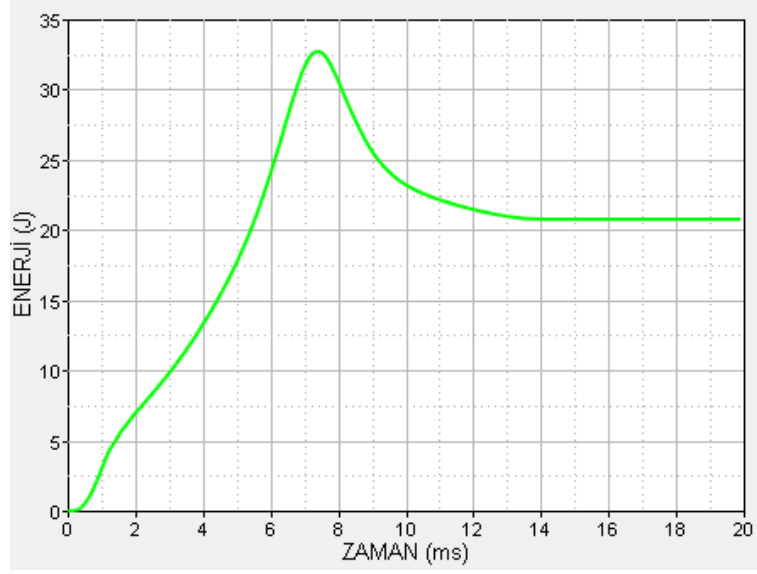
Çarpışma testleri Altair HyperWorks yazılımının alt programı olan HyperCrash üzerinden gerçekleştirilmiştir. HyperCrash programı üzerinden tüm sandviç yapı modelleri oluşturulmuştur. Modellere 3 m/sn hızda 10 kg ağırlık çarpıtılmıştır. Elde edilen data RADIOSS programında çözümlenmiştir. Elde edilen çözümler HyperView üzerinden animasyon haline getirilmiş model doğruluğu kontrol edilmiştir. HyperGraph programı üzerinden Sandviç yapılara ait grafikler hazırlanmış sonuçlar aşağıdadır.

Bal peteği sandviç yapı enerji emilim-zaman grafiği Şekil 4.11’de verilmiştir. Darbe enerjisi 25.4 J olarak elde edilmiştir. Bal peteği sandviç yapı emilen enerji miktarı 15.5 J olarak elde edilmiştir.



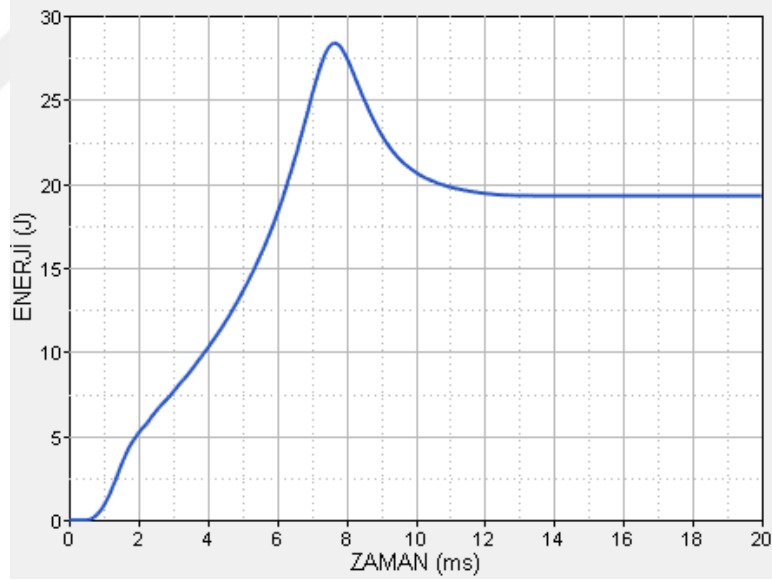
Şekil 4.11 : Bal peteği sandviç yapı enerji emilim grafiği.

Girintili sandviç yapı enerji emilim-zaman grafiği Şekil 4.12’de verilmiştir. Darbe enerjisi 32.8 J olarak elde edilmiştir. Girintili sandviç yapı emilen enerji miktarı 20.8 J olarak elde edilmiştir.



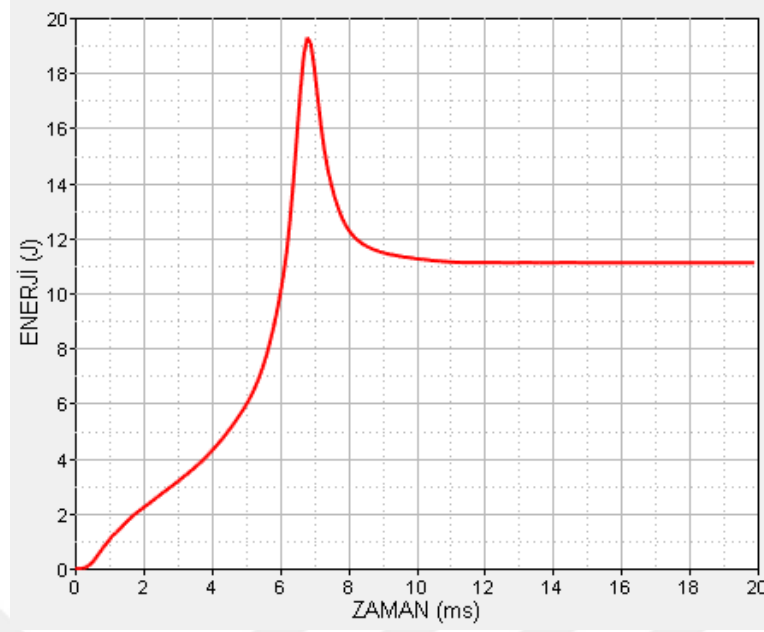
Şekil 4.12 : Girintili sandviç yapı enerji emilim grafiği.

Yıldız sandviç yapı enerji emilim-zaman grafiği Şekil 4.13’de verilmiştir. Darbe enerjisi 28.4 J olarak elde edilmiştir. Yıldız sandviç yapı emilen enerji miktarı 19.3 J olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.13 : Yıldız sandviç yapı enerji emilim grafiği.

Üçgen sandviç yapı enerji emilim-zaman grafiği şekil 4.14’de verilmiştir. Darbe enerjisi 19.3 J olarak elde edilmiştir. Üçgen sandviç yapı emilen enerji miktarı 11.1 J olarak elde edilmiştir.

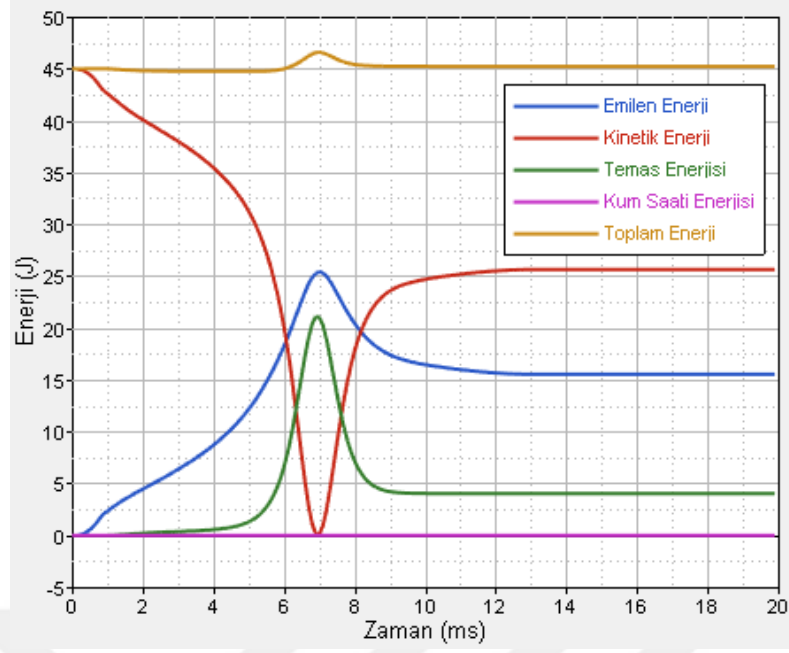


Şekil 4.14 : Üçgen sandviç yapı enerji emilim grafiği.

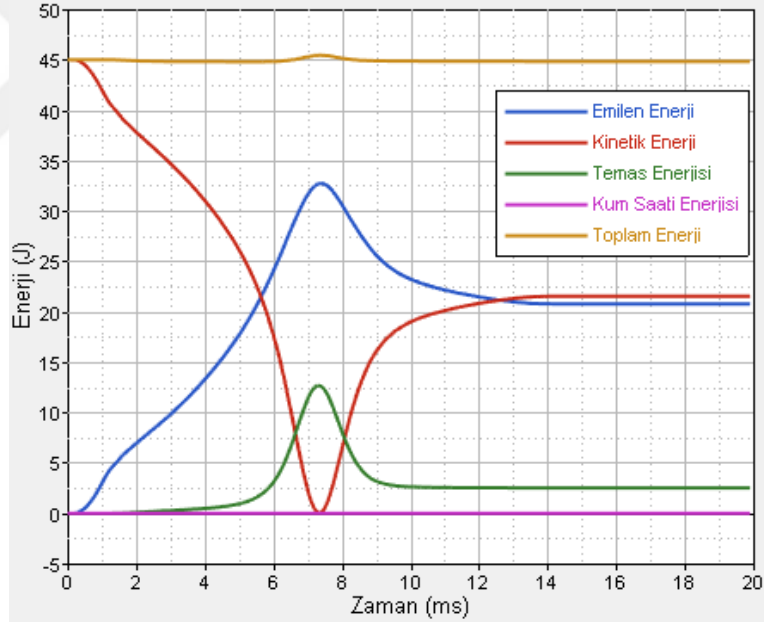
4.1.2.2 Enerji dengesi

Sonlu elemanlar modelinin doğruluğu noktasında sonlu elemanlar analizi tamamlandıktan sonra enerji dengesinin oluşup oluşmadığının kontrol edilmesi gerekmektedir. Enerji dengesinin oluşmadığı durumda, sonlu elemanlar modelinin doğru tanımlanmadığı sonucu ortaya çıkar. Bu durumun sebepleri arasında temas tanımlaması, mesh yapısı tanımlanırken modellere ait elemanların doğru oluşturulmaması, tanımlanan sınır koşulları ve malzeme tanımlanmasından meydana gelebilmektedir. Doğru bir enerji dengesinin sağlanabilmesi için toplam enerji miktarının analiz boyunca sabit kalması ve kinetik enerji, emilen enerji, temas enerjisi ve kum saati enerjisinin toplamına eşit olmalıdır [77].

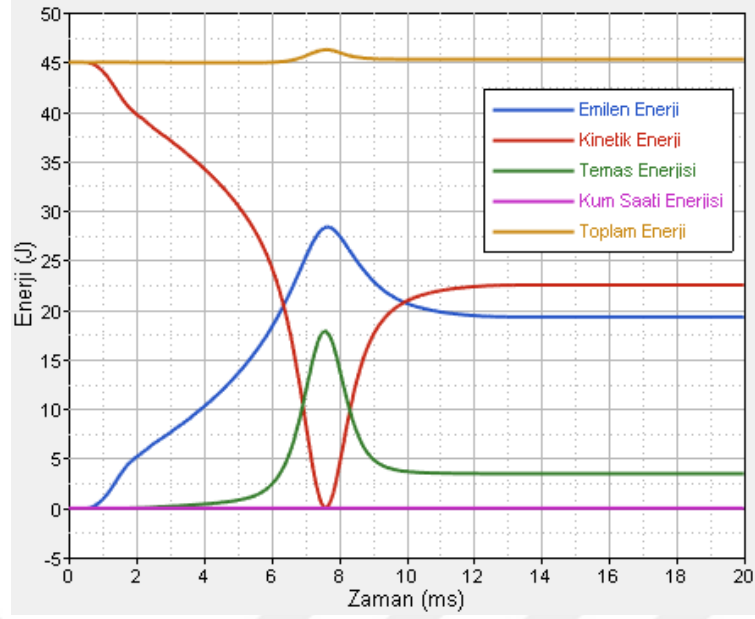
Kum saati enerjisi gerilme veya birim şekil değiştirme meydana getirmeyen, fakat sonuç doğruluğuna etki edebilen, fiziki yapıya sahip olmayan, sıfır enerji durumlarıdır. Genel olarak doğru olmayan gerilme, baskı, eğme ve birbiri ile temas sonuçlarına sebep olmaktadır. Kum saati enerjisinin oluşmaması veya ihmal edilebilecek düzeyde meydana gelmesi sonlu elemanlar analizinin doğruluğu açısından çok önemlidir. Tüm modellere ait enerji denge grafikleri aşağıda verilmiştir.



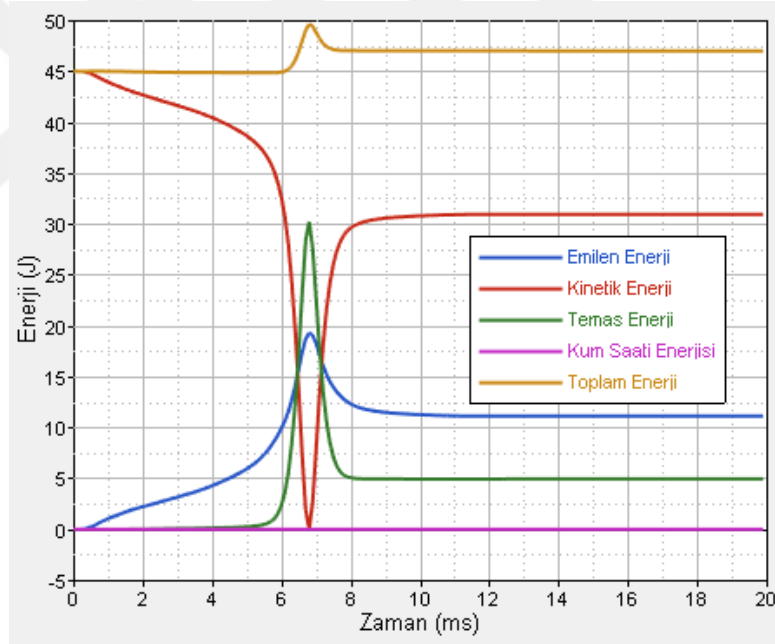
Şekil 4.15 : Bal peteği sandviç yapı enerji denge grafiği.



Şekil 4.16 : Girintili sandviç yapı enerji denge grafiği.



Şekil 4.17 : Yıldız sandviç yapı enerji denge grafiği.



Şekil 4.18 : Üçgen sandviç yapı enerji denge grafiği.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Gerçekleştirilen tez çalışması kapsamında Bal peteği, Girintili, Yıldız ve Üçgen sandviç yapı modellerine üç nokta eğme testi, basma testi ve çarpışma testleri yapılmıştır. Sandviç yapılar Ultimaker 3 extended FDM tipi üç boyutlu yazıcı üzerinden imal edilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıdadır.

Çizelge 5.1 : Sandviç yapılar test sonuçları.

| | Üç Nokta Eğme Testi (N) | Basma Testi (N) | Çarpışma Testi (J) |
|-------------------------|----------------------------|--------------------|-----------------------|
| Bal Peteği Sandviç Yapı | 113.4 | 3154.2 | 15.5 |
| Girintili Sandviç Yapı | 173.3 | 11118.2 | 20.8 |
| Yıldız Sandviç Yapı | 121.1 | 9570.9 | 19.3 |
| Üçgen Sandviç Yapı | 47.6 | 1812.3 | 11.1 |

Üç nokta eğme test sonuçlarına göre Girintili sandviç yapı 173.3 N ile en iyi eğme dayanımına sahip olduğu tespit edilmiştir. Üçgen sandviç yapı eğme test sonuçlarına göre eğme dayanımı 47.6 N ile en düşük model olduğu tespit edilmiştir.

Basma test sonuçlarına göre Girintili sandviç yapı 11118.2 N ile en iyi basma dayanımına sahip olduğu tespit edilmiştir. Üçgen sandviç yapı basma test sonuçlarına göre basma dayanımı 1812.3 N ile en düşük model olduğu tespit edilmiştir.

Çarpışma test sonuçlarına göre Girintili sandviç yapı darbe enerjisi 32.8 J enerji emilim miktarı 20.8 J olarak elde edilmiştir. Üçgen sandviç yapı darbe enerjisi 19.3 J enerji emilim miktarı 11.1 J olarak elde edilmiştir. Çarpışma test sonuçlarında enerji emilim miktarı en yüksek model Girintili sandviç yapı en düşük modelin ise Üçgen sandviç yapı olduğu tespit edilmiştir.

Yapılan statik ve dinamik analizler sonucunda en iyi modelin Girintili sandviç yapı olduğu tespit edilmiştir. Yapıların statik ve dinamik özelliklerinin hücresel yapılar ile ilişkili olduğu görülmüştür.

Eklemeli imalat yöntemi ile üretilmesi olanaksız tüm hücre yapı modelleri bu sistem ile imal edilebilmektedir. Yapılacak olan sandviç yapılar için ön tasarım aşamaları hızlı, düşük maliyetli ve kolay değiştirilebilen bir araç olarak kullanılabilceği sonucuna varılmıştır.

Tez çalışması sonrası ileride yapılacak çalışmalar için aşağıdaki maddeler önerilebilir:

- Yapılacak olan yeni çalışmalarda TPU malzeme ile farklı sandviç hücre yapıları denenebilir.
- Tez kapsamında sandviç yapı modellerin yoğunlukları %100 olarak imal edilmiştir. Yeni yapılacak çalışmalarda farklı yoğunluklarda modellerin statik ve dinamik özelliklerindeki değişim incelenebilir.
- Sandviç yapıların kalınlıkları 20 mm olarak imal edilmiştir. Yeni çalışmalarda kalınlık değişimleri ile enerji emilim miktarları incelenebilir.
- Eklemeli imalat yöntemi ile yapıların birçok farklı malzeme ile imal edilmesi mümkündür. Yapılacak olan yeni çalışmalarda farklı malzemelerin denenmesi ile malzemenin sandviç yapılar üzerindeki mekanik özellikleri incelenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Schaedler, T. A. & Carter, W. B.** (2016). Architected Cellular Materials, *Annual Review of Materials Research*, 46 (1), 187–210.
- [2] **Carlsson, L.A., Kardomateas, G.A.** (2011). *Structural and Failure Mechanics of Sandwich Composites*, London and New York, Springer Science & Business Media.
- [3] **Allen, H.G.** (2013). Analysis and Design of Structural Sandwich Panels: The Commonwealth and International Library: Structures and Solid Body Mechanics Division, *Elsevier*.
- [4] **Abbadi, A., Kourtsawa, Y., Carmasol, A., Belouettar, S. and Azari, Z.** (2009). Experimental and numerical characterization of honeycomb sandwich composite panels. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 17(10), 1533-1547.
- [5] **Akbarzadeh A, et al.** (2014). Dynamic eigenstrain behavior of magnetoelastic functionally graded cellular cylinders. *Compos Struct*, 116, 404–13.
- [6] **Bitzer T.** (2012). Honeycomb technology: materials, design, manufacturing, applications and testing. *Springer Science & Business Media*.
- [7] **Petras A.** (1999). Sutcliffe M. Failure mode maps for honeycomb sandwich panels. *Compos Struct*, 44(4), 237–52.
- [8] **Hayase, M. & Eckfund, R.** (1989). Curved SPF/DB sandwich fabrication, *US Patent*, No. 4833768.
- [9] **Zhang, X. D. & Sun, C. T.** (1996). Formulation of an adaptive sandwich beam, *Smart Materials and Structures*, 5(6), 814-823. doi:10.1088/0964-1726/5/6/012.
- [10] **Dattoma, V. & Marcuccio, R.** (2001). Thermographic investigation of sandwich structure made of composite material, *NDT & E International*, Vol 34, Issue 8, pp. 515-520.
- [11] **Serge, A.,** (2001). Modeling of impacts on composite structures, *Composite Structures*, 51(2), 129-138. doi: 10.1016/S0263-8223(00)00138-0.
- [12] **Sourish, B. & Atul, B.** (2009). The applicability of the effective medium theory to the dynamics of cellular beams, *International Journal of Mechanical Sciences*, 51(8), pp. 598-608. doi: 10.1016/j.ijmecsci.2009.06.001.
- [13] **Zou, Z.** (2009). Dynamic Crushing of Honeycombs and Features of shock Fronts, *International Journal of Impact Engineering*, 36(1), 165-176.
- [14] **Chi, Y. & Langdon, G. S.** (2001). The influence of core height and face plate thickness on the response of honeycomb sandwich panels subjected to blast loading, *Materials and Design*, 31(4), 1887-1899.
- [15] **Crupi, V., Epasto, G. & Guglielmino, E.** (2012). Collapse modes in aluminum honeycomb sandwich panels under bending and impact loading, *International Journal of Impact Engineering*, 6(15), 6-15.

- [16] **Tan, C. Y. & Akil, Hazizan Md.** (2012). Impact response of fiber metal laminate sandwich composite structure with polypropylene honeycomb core, *Composites Part B: Engineering*, 43(3), 1433-1438.
- [17] **Zhang J.** (1989). *The Mechanics of Foams and Honeycombs*, (Doktora Tezi), Cambridge University Engineering Department, Cambridge, U.K.
- [18] **Zhang, J. & Ashby, M.F.** (1992). The out of-plane properties of Honeycombs, *International Journal of Mechanical Science*, 34(5), 475-489.
- [19] **Zhang, J. & Ashby, M.F.** (1992). Buckling of Honeycombs under In-plane Biaxial Stresses, *International Journal of Mechanical Science*, 34(6), 491-509.
- [20] **Holt, P.J. & Werber, J.P.H.** (1982). Exact Solutions to Some Honeycomb Beam, Plate and Shell Problems, *Journal of strain Analysis*, 17(1), 1-8.
- [21] **Wierzbicki, T.** (1983). Crushing Analysis of Metal Honeycombs, *International Journal of Impact Engineering.*, 1(2), 157-174.
- [22] **Wierzbicki, T. & Abramowicz, W.** (1983). On the Crushing Mechanism of Thin-walled Structures, *Journal of Applied Mechanics*, 50, 727-734.
- [23] **Abramowicz, W.** (1983). The Effective Crushing Distance in Axially Compressed Thin-walled Metal Columns, *International Journal of Impact Engineering.*, 1(3), 309-317.
- [24] **Reid, S.R., Reddy, T.Y. & Gray, M. D.** (1986). Static and Dynamic Axial Crushing of Foam-Filled Sheet Metal Tubes, *International Journal of Mechanical Sciences.*, 28(5), 295-322.
- [25] **Wierzbicki, T. & Bhat, S.U.** (1986). Moving Hinge Solution for Axisymmetric Crushing of Tubes, *International Journal Mechanical Sciences.*, 28(3), 135-151.
- [26] **Langseth, M. & Hopperstad, O.S.** (1996). Static and Dynamic Axial Crushing of Square Thin-walled Aluminum Extrusions, *International Journal of Impact Engineering.*, 18(7-8), 948-968.
- [27] **Yasui, Y.** (2000). Dynamic Axial Crushing of Multi-layer Honeycomb Panels and Impact Tensile Behavior of the Component Members, *International Journal of Impact Engineering.*, 24, 659-671.
- [28] **Aaron, V., Adibi-Sedeh A. H., Nagarajan, H., Bahr, B.** (2003). Determination of Strength Characteristics of Aluminum Honeycomb Material Subjected to Out-of-plane Compression Using Finite Element Analysis, *Advances in Structures*, G. Hancock et al., eds., Sydney, Australia, 427-432.
- [29] **Lee, Y., Chun, M. & Paik, J.** (1996). An Experimental Study on the Behavior of Aluminum-honeycomb Sandwich Panels, *Transactions of the Society of Naval Architects of Korea.*, 33(4), 106-123.
- [30] **Wierzbicki, T. & Abromowics, W.** (1981). Crushing of Thin-walled Strain Rate Sensitive Structures, *Engineering Transactions.*, 29(1), 153-163.
- [31] **Wu, E. & Jiang, W.** (1997). Axial Crush of Metallic Honeycombs, *International Journal of Impact Engineering.*, 19(5-6), 439-456.
- [32] **Baker, W.E., Togami, T.C. & Weydert, J.C.** (1999). Static and Dynamic Properties of High-density Metal Honeycombs, *International Journal of Impact Engineering.*, 21(3), 149-163.

- [33] **Goldsmith, W. & Sackman, J.** (1992). An Experimental Study of Energy Absorption in Impact on Sandwich Plates, *International Journal of Impact*.
- [34] **Aaron, V., Adibi-Sedeh, A. H., Bahr, B.** (2005). Strength and Energy Dissipation During the Structural Impact of Aluminum Formable honeycomb, *Accepted for Publication in Electronic Journal of Structural Engineering*.
- [35] **Santosa, S. & Wierzbicki, T.** (1999). The Concept of Double-walled Sandwich Columns for Energy Absorption, *International Journal of Crashworthiness.*, 4(2). 175-197.
- [36] **Arslan N. & Kaman M.** (2002). Alüminyum, Kağıt ve Cam Elyaf Petek Yapılı Kompozitlerin Üretim Teknikleri ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması. Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, *Fen ve Mühendislik Dergisi*, 4(3), 123-113.
- [37] **Zenkert, D.** (1995). An introduction to sandwich construction. Warley: EMAS Publ.
- [38] **Mamalis, A.G., Manolacos, D.E., Ioannidis, M.B. & Papapostolou, D.P.** (2005). On the crushing response of composite sandwich panels subjected to edgewise compression: experimental. *Composite Structures*, 71, 246–257.
- [39] **Vinson, J. R.** (1999). *The Behavior of Sandwich Structures of Isotropic and Composite Materials*. USA: Technomic Publishing.
- [40] **CustomPartNet.** (2008). Inc., <http://www.custompartnet.com/wu/additive-fabrication>
- [41] **Giannatsis, J. & Dedoussis, V.** (2009). Additive Fabrication Technologies Applied To Medicine And Health Care, A Review, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 40, 116-127.
- [42] **Çelik, İ., Karakoç, F., Çakır, M. C., Duysak, A.** (2013). Hızlı Prototipleme Teknolojileri ve Uygulama Alanları. *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 31, 53-69.
- [43] **Geleneksel İmalat ve Eklemeli imalat arasındaki fark.** (t.y.). Erişim Tarihi 10 Aralık 2019, http://www.hardcopyworld.com/gnuboard5/bbs/board.php?bo_table=tech_3dp&wr_id=5
- [44] **Kusuma, C.** (2016). The Effect of Laser Power and Scan Speed on Melt Pool Characteristics of Pure Titanium and Ti-6Al-4V alloy for Selective Laser Melting. (Electronic Thesis or Dissertation). Retrieved from <https://etd.ohiolink.edu/>
- [45] **Annual Book of ASTM Standards Book.** (2012). *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*. International, West Conshohocken, USA.
- [46] **SDU International Journal of Technological Science.** (t.y.). Erişim Tarihi 05 Ocak 2020, <http://dergipark.gov.tr/utbd/issue/36156/406618>
- [47] **Additive Manufacturing Research Group.** (t.y.). Erişim Tarihi 20 Eylül 2019, <http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/>
- [48] **Dijital Işık İşleme yöntemi.** (t.y.). Erişim Tarihi 08 Ocak 2020, <https://3dprinting.com/what-is-3d-printing/>
- [49] **Dijital Işık İşleme çalışma prensibi.** (t.y.). Erişim Tarihi 08 Ocak 2020, <https://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide#04-processes>

- [50] **Malzeme jeti yöntemi.** (t.y.). Erişim Tarihi 24 Eylül 2019, <https://sdgmag.com/features/digital-eye3d-print-technology>
- [51] **Malzeme ekstrüzyon yöntemi.** (t.y.). Erişim Tarihi 14 Aralık 2019 <http://market.makerhane.com/3-boyutlu-yazici-tasarim-atolyesi>
- [52] **Yapıştırıcı ile eklemeli imalat teknolojisi şematik resmi.** (t.y.). Erişim Tarihi 23 Aralık 2019, <http://www.exone.com/Industries-Applications/Industries/Energy>
- [53] **Raja, V., Fernands, K. J..** (2008). *Reverse Engineering–An Industrial Perspective.* London: Springer, 123-198.
- [54] **Apak, S.** (2010). *Farklı Hızlı Prototipleme Cihazlarında Üretilen Parçaların Üretim Zamanı Ve Maliyet Açısından Karşılaştırılması,* Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [55] **Chua, C. K., Leong, K. F., Lim, C. S.** (2010). *Rapid Prototyping: Principles and Applications* (Third edition). World Scientific.
- [56] **Özüğür, B.** (2002). *İleri İmalat Teknolojileri,* (Lisans Tezi), Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makina Eğitimi Bölümü Talaşlı Üretim Ana Bilim Dalı, Ankara, 32- 144.
- [57] **Özüğür, B.** (2002). *Hızlı Prototipleme Teknikleri ile Kompleks ve Mikro Yapıdaki Parçaların Üretilebilirliklerinin Araştırılması,* (Yüksek Lisans Tezi), Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Eğitimi Ana Bilim Dalı, Ankara, 32-144.
- [58] **Kumar, S.** (2010). Selective laser sintering: Recent advances. CSIR National Laser Centre, South Africa.
- [59] **Jain, P. K., Pandeyand, P. M., Rao, P. V. M.** (2008). Experimental investigations for improving part strength in selective laser sintering. *Virtual and Physical Prototyping.* Taylor & Francis. Delhi, India.
- [60] **Material Jetting Additive Manufacturing Research.** (t.y.). Erişim Tarihi 10 Ocak 2020, <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditive-manufacturing/powderbedfusion/>
- [61] **History of Additive Manufacturing.** (t.y.). Erişim Tarihi 15 Ocak 2020, <https://www.wohlersassociates.com/history2016.pdf>
- [62] **Longhitanoa, G.A., Larosaa, M.A., Munhoza, A.L.J., Zavagliaa, C.A.C., Ierardia, M.C.F.** (2015). Surface Finishes for Ti-6Al-4V Alloy Produced by Direct Metal Laser Sintering. *Materials Research,* 18(4), 838-842.
- [63] **Smith, D. H., Bicknell, J., Jorgensen, L., Patterson, B. M., Cordes, N. I., Tsukrov I. & Knezevic M.** (2016). Microstructure and Mechanical Behavior of Direct Metal Laser Sintered Iconel Alloy 718, New Mexico: *ELSEVIER*
- [64] **Additive Manufacturing Direct Laser Sintering of Titanium and other Metals.** (t.y.). Erişim Tarihi 18 Ocak 2020, <https://www.nextbigfuture.com/2010/04/additivemanufacturing-direct-laser.html>
- [65] **Nozar, M., Hanzl, I. P. & Dana, M.** (2017). A Customer's View on Key Aspects of Metal Additive Manufacturing, in *DAAAM International,* Vienna, Austria
- [66] **Oktay, K.** (2015). *Ergitmeli Yığma Yöntemiyle Üretim Yapan 3d Yazıcılarda Çift Filament Süren Ekstruder Tasarımı.* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- [67] **Electron Beam Additive Manufacturing.** (t.y.). Erişim Tarihi 30 Aralık 2019, <http://www.sciaky.com/additive-manufacturing/wire-am-vspowder-am>
- [68] **Gaytan, S. M., Murr, L. E., Medina, F. E., Martinez, M. I. L. & Wicker, R. B.** (2009). Advanced Metal Powder Based Manufacturing of Complex Components by Electron Beam Melting. *Materials Technology: Advanced Performance Materials* 24 (3): 180–190. doi:10.1179/106678509X12475882446133.
- [69] **Elektron ışınla ergitme teknolojisi şematik resmi.** (t.y.). Erişim tarihi 24 Ocak 2020, <http://www.arcam.com/technology/electron-beam-melting/hardware/>
- [70] **Mackey, P.** (2003). The Polyurethanes Book, ed. by D. Randall, S. Lee, chap. 19, 285–294.
- [71] **Prisacariu, C.** (2011). Thermal behaviour of polyurethane elastomers. *Polyurethane Elastomers*, 61-101. doi: 10.1007/978-3-7091-0514-6
- [72] **Ultimaker Teknik bilgi formu TPU 95A.** (t.y.). Erişim Tarihi 24 Ağustos 2019, <https://ultimaker.com/materials/tpu-95a>
- [73] **3 nokta eğme deneyi föyü.** (t.y.). Erişim Tarihi 18 Ocak 2020, <http://depo.btu.edu.tr/dosyalar/makine/Dosyalar/3%20Nokta%20Egme%20Deneyi%20Foyu%281%29.pdf>
- [74] **The Science and Engineering of Materials.** 4 th ed Donald R. Askeland - Pradeep P. Phule Chapter 6 - Mechanical Properties and Behavior
- [75] **Basma Deney föyü.** (t.y.). Erişim Tarihi 20 Ocak 2020, <https://docplayer.biz.tr/24920654-Basma-deneyi-malzeme-muhendisligi-bolumu-1-basma-deneyinin-amaci.html>
- [76] **Karagöz, S.** (2016). *Yüksek Performanslı Taşıt Güvenlik Sistemlerinin Geliştirilmesi.* (Doktora tezi). Bursa Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- [77] **Beytüt, H.** (2019). *Üretim Geçmişi Dikkate Alınarak Dinamik Eksenel Yük Altında İnce Cidarlı Tüplerin Çarpışma Performansının Araştırılması ve Optimizasyonu.* (Yüksek Lisans tezi). Bursa Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Bahadır ÖZTÜRK
Doğum Tarihi ve Yeri : 15.04.1993 / BURSA
E-posta : bahadirozturk542@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2016, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi , Makine Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek Lisans** : 2020, Bursa Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2016- , Çağla Elektromekanik Sistemler-Proje ve Tasarım Mühendisi