T.C.
KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI İÇİN HİBRİD YAPILI İNİŞ TAKIMI TASARIMI, YAPISAL OPTİMİZASYONU VE MEKANİK ANALİZİ

HAYDAR KADİR ÖZDEMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DR. ÖĞR. ÜYESİ ERMAN ZURNACI

EKİM - 2023
KASTAMONU

TEZ ONAYI

HAYDAR KADİR ÖZDEMİR tarafından hazırlanan "**İNSANIZ HAVA ARAÇLARI İÇİN HİBRİD YAPILI İNİŞ TAKIMI TASARIMI, YAPISAL OPTİMİZASYONU VE MEKANİK ANALİZİ**" adlı tez çalışmasının savunma sınavı **06.10.2023** tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği ile Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Danışman	Dr. Öğr. Üyesi Erman ZURNACI Kastamonu Üniversitesi	.....
Jüri Üyesi	Doç. Dr. Arif UZUN Kastamonu Üniversitesi	.....
Jüri Üyesi	Dr. Öğr. Üyesi Hakan ADA Gazi Üniversitesi	.....

Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Enstitü Müdürü Doç. Dr. Selçuk MEMİŞ .....

TAAHHÜTNAME

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu; ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını, bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini bildirir ve taahhüt ederim.

Haydar Kadir ÖZDEMİR

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI İÇİN HİBRİD YAPILI İNİŞ TAKIMI TASARIMI, YAPISAL OPTİMİZASYONU VE MEKANİK ANALİZİ

HAYDAR KADİR ÖZDEMİR

KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
DANIŞMAN:DR. ÖĞR. ÜYESİ ERMAN ZURNACI

İnsansız hava araçları (İHA) günümüz savunma sanayiinin kritik araçları arasında yer almaktadır. Gelişen teknoloji ile birlikte savunma sanayii araçları da modernize olmuş ve daha etkin ve verimli araçların üretimi mümkün hale gelmiştir. İHA'ların en önemli özelliklerinin başında operasyonel faaliyetlerde personele gerek kalmadan savunma operasyonlarının gerçekleştirilmesi gelmektedir. İHA'ların hem yapısal güvenliğinin sağlanması hem de operasyon süresinin arttırılması için gövde üretimlerinde çeşitli gelişmiş bileşenler kullanılmaktadır. Bu bileşenlerin seçiminde etkili faktörlerin başında hafiflik ve mekanik dayanım kriterleri gelmektedir. Üreticiler, ağırlığın önemli derecede arttırılmadan mekanik mukavemetin arttırılması amacıyla çeşitli üretim teknikleri ve malzemeler kullanarak savunma, havacılık, ulaşım ve denizcilik gibi sektörler için farklı özelliklere sahip bileşenler geliştirmişlerdir. Ağırlık, mekanik dayanım, darbe direnci, korozyon direnci gibi kriterlerin aynı anda sağlanabilmesi için bileşenlerin tasarımında ve üretiminde çeşitli optimizasyon yöntemlerinden yararlanılmaktadır. Üç boyutlu yazdırma tekniklerinin ve araçlarının gelişmesi ile birlikte birçok alanda düşük maliyetli, hafif ve karmaşık geometrili parçalar da üretilmiş ve kullanılmıştır. Bu tekniğin en önemli avantajlarından birisi farklı optimizasyon yöntemleri ile geliştirilen karmaşık geometrili ürünlerin hızlı bir şekilde üretilebilmesidir.

Bu tez çalışmasında; insansız hava araçlarında kullanılabilecek hafif fakat gelişmiş mekanik özelliklere sahip bir iniş takımının geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla ana iniş takımı ve burun iniş takımı bileşenleri geliştirilmiştir. İniş takımı bileşenlerinin hafifletilmesi amacıyla topoloji optimizasyonu tekniklerinden yararlanılmıştır. Geliştirilen burun iniş takımının mekanik özellikleri sonlu elemanlar analizi yöntemi ile incelenmiştir. Ana iniş takımı dikmesi için hibrid yapılı bir tasarım geliştirilmiştir. Geliştirilen hibrid yapılı tasarımın yapısal optimizasyonu sonlu elemanlar analizi ile gerçekleştirilmiş ardından gerçekleştirilen mekanik analizler ile tasarımın mekanik performansı deneysel olarak test edilmiştir. Deneysel test numunelerinin üretiminde üç boyutlu yazdırma tekniklerinden yararlanılmıştır. Ayrıca gerçekleştirilen sayısal analizler ile geliştirilen tasarımın gerilme ve deformasyon oluşumları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, topoloji optimizasyonunun yapının mekanik direncini azaltmadan ağırlığını düşürmede etkili olduğunu göstermiştir. Hibrid yapılı iniş takımı tasarımı ise mekanik dayanımın arttırılmasına önemli derecede katkı sunmuştur.

ANAHTAR KELİMELER:İnsansız hava araçları, iniş takımları, yapısal optimizasyon, hibrid tasarım, üç boyutlu üretim, mekanik analiz

Ekim 2023, 116 Sayfa

ABSTRACT

MSC THESIS

DESIGN, STRUCTURAL OPTIMIZATION AND MECHANICAL ANALYSIS OF A HYBRID STRUCTURE LANDING GEAR FOR UNMANNED AERIAL VEHICLES

HAYDAR KADİR ÖZDEMİR

KASTAMONU UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
SUPERVISOR:ASSIST. PROF. DR. ERMAN ZURNACI

Unmanned aerial vehicles (UAV) are among the critical tools of today's defense industry. With developing technology, defense industry vehicles have also been modernized, and the production of more effective and efficient vehicles has become possible. One of the most critical features of UAVs is the ability to carry out defense operations without the need for personnel in operational activities. Various advanced components are used in the body production of UAVs to ensure their structural safety and increase their operation time. The most influential factors in the selection of these components are lightness and mechanical strength criteria. Manufacturers have developed components with different features for sectors such as defense, aviation, transportation, and maritime, using various production techniques and materials to increase mechanical strength without significantly increasing weight. Various optimization methods are used to design and produce components to simultaneously meet criteria such as weight, mechanical strength, impact resistance, and corrosion resistance. With the development of three-dimensional printing techniques and tools, low-cost, lightweight, and complex geometry parts have been produced and used in many areas. One of the most essential advantages of this technique is the rapid production of products with complex geometries developed with different optimization methods.

This thesis study; aims to develop a landing gear that is lightweight but has advanced mechanical properties that can be used in unmanned aerial vehicles. For this purpose, main landing gear and nose landing gear components were developed. Topology optimization techniques were used to lighten the landing gear components. The mechanical properties of the developed nose landing gear were examined using the finite element analysis method. A hybrid structure design has been developed for the main landing gear strut. Structural optimization of the developed hybrid structure design was carried out with finite element analysis, and then the mechanical performance of the design was tested experimentally with mechanical analysis. Three-dimensional printing techniques were used in the production of experimental test samples. Additionally, the stress and deformation formations of the developed design were examined through numerical analysis. The results obtained showed that topology optimization is effective in reducing the weight of the structure without reducing its mechanical resistance. The hybrid landing gear design has made a significant contribution to increasing mechanical strength.

KEYWORDS: Unmanned aerial vehicles, landing gear, structural optimization, hybrid design, three-dimensional manufacturing, mechanical analysis

October 2023, 116 Page

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezimin hazırlanması ve yapılan çalışmalar sırasında desteğini, bilgisini ve kıymetli zamanını esirgemeyen değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Erman ZURNACI'ya teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her anında olduğu gibi bu tez çalışması esnasında da maddi, manevi beni destekleyen ve her zaman sevgisini paylaşan annem Alime GÜZEL, dedem Mehmet ÖZDEMİR, kardeşlerim Sultan Züleyha ÖZDEMİR ve Samet Mehmet ÖZDEMİR'e tüm kalbimle teşekkür ederim.

Ayrıca bu tezi 1649B022113417 başvuru numarası ile 2210-C Öncelikli Alanlara Yönelik Yurt İçi Yüksek Lisans Burs Programı kapsamında destekleyen TÜBİTAK'a sağladıkları destekten dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Haydar Kadir ÖZDEMİR

Kastamonu, 2023

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEZ ONAYI ..... **ii**
TAAHHÜTNAME ..... **iii**
ÖZET ..... **iv**
ABSTRACT ..... **v**
TEŞEKKÜR ..... **vi**
İÇİNDEKİLER ..... **vii**
ŞEKİLLER DİZİNİ ..... **ix**
TABLOLAR DİZİNİ ..... **xii**
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ..... **xiii**
1. GİRİŞ **1**
1.1 İnsansız Hava Araçları 1
1.2 İnsansız Hava Araçlarının Sınıflandırılması 2
1.3 İnsansız Hava Araçları ve Uygulama Alanları 3
1.4 İHA Bileşenleri 4
1.5 İniş Takımları 5
1.5.1 İniş Takımı Türleri 7
1.5.1.1 Sabit iniş takımları 7
1.5.1.2 Geri katlanır iniş takımları 8
1.6 İniş Takımlarının Yerleştirilmesi 9
1.6.1 Tekli İniş Takımı 9
1.6.2 Bisiklet Tipi İniş Takımı 10
1.6.3 Kuyruk Tipi İniş Takımı 11
1.6.4 Üç Tekerlekli Bisiklet Tipi İniş Takımı 12
1.6.5 Dört Tekerlekli İniş Takımı 13
1.6.6 Çoklu Bogi Tipli İniş Takımı 13
1.7 İniş Takımı Geometrisi 14
1.7.1 İniş Takımı Yüksekliği 14
1.7.2 İniş Takımı Tekerlek Mesafesi 15
2. YAPISAL OPTİMİZASYON **17**
2.1 Boyut Optimizasyonu 17
2.2 Şekil Optimizasyonu 18
2.3 Topoloji Optimizasyonu 18
2.3.1 Homojenizasyon Yöntemi 20
2.3.2 Yoğunluk yöntemi 21
2.3.3 Evrimsel Yapısal Optimizasyon / ESO 22
2.4 Kafes Optimizasyonu 22
3. EKLEMELİ İMALAT **24**
3.1 Eklemeli İmalat Teknolojisi 26
3.1.1 Malzeme Ekstrüzyonu 27
3.1.1.1 Ergiyik yığma modelleme 27
3.1.1.2 Kontur üretimi 29
3.1.2 Toz Yatağı Füzyonu 30
3.1.2.1 Seçici lazer sinterleme 31
3.1.2.2 Doğrudan metal lazer sinterleme 31

3.1.2.3 Seçici lazer eritme ... 32
3.1.2.4 Elektron ışın eritme ... 32
3.1.3 Tekne Fotopolimerizasyon ... 33
3.1.3.1 Stereolitografi ... 33
3.1.3.2 Dijital ışık işleme ... 34
3.1.3.3 Sürekli dijital ışık işleme ... 34
3.2 Eklemeli İmalat Yöntemlerinin Avantaj ve Dezavantajları ... 35
3.3 Eklemeli İmalat Üretimi İçin Öncesi ve Sonrası İşlemler ... 35
3.4 Eklemeli İmalat Yöntemi ile Geleneksel Üretim Metotlarının Karşılaştırılması ... 37
3.5 Eklemeli İmalat Teknolojilerinin Uygulama Alanları ... 38
4. LİTERATÜR ÇALIŞMALARININ DEĞERLENDİRİLMESİ ... 40
4.1 Literatür Özeti ... 42
4.2 Çalışmanın Motivasyonu ... 43
5. İNİŞ TAKIMI TASARIMI ... 45
5.1 İniş Takımını Etkileyen Yükler ... 46
5.1.1 Statik (Durağan) Yük ... 46
5.1.2 Dinamik Yük ... 47
5.2 İniş Takımı Yük Hesabı ... 48
5.3 Burun İniş Takımı Tasarımı ... 49
5.4 Ana İniş Takımı Tasarımı ... 51
5.5 Burun İniş Takımı Ana Taşıyıcı Optimizasyonu ... 54
5.6 Ana İniş Takımı Yapısal Analizi ... 59
5.6.1 Basma ve Üç Nokta Eğme Numunelerinin Boyutlandırılması ... 61
5.7 Basma Numunelerinin Yapısal Analizi ... 62
5.7.1 Dolgusuz Dikme Tasarımı Modeline Ait Basma Deneyi Analizi ... 63
5.7.2 Yatay Dolgulu Hibrid Dikme Tasarımlı Modele Ait Basma Deneyi Analizi ... 66
5.7.3 Düşey Dolgulu Hibrid Dikme Tasarımlı Modele Ait Basma Deneyi Analizi ... 68
5.8 Üç Nokta Eğme Numunelerinin Yapısal Analizi ... 71
5.8.1 Dolgusuz Dikme Tasarımlı Modele Ait Üç Nokta Eğme Deneyi Analizleri ... 72
5.8.2 Yatay Dolgulu Hibrid Dikme Tasarımlı Modele Ait Üç Nokta Eğme Deneyi Analizleri ... 74
5.8.3 Düşey Dolgulu Hibrid Dikme Tasarımlı Modele Ait Üç Nokta Eğme Deneyi Analizleri ... 77
6. TASARIM NUMUNELERİNİN ÜRETİMİ VE MEKANİK ANALİZİ ... 86
6.1 Numunelerin Üretimi ... 86
6.2 Mekanik Analizlerin Gerçekleştirilmesi ... 90
6.3 Basma Deneyi Sonuçları ... 92
6.4 Üç Nokta Eğme Deneyi Sonuçları ... 100
7. SONUÇ VE ÖNERİLER ... 106
KAYNAKLAR ... 109
ÖZGEÇMİŞ ... 116

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1 İlk İHA ve İlk Modern İHA 1
Şekil 1.2 İHA kullanım alanları 4
Şekil 1.3 İHA bileşenleri 5
Şekil 1.4 İHA üzerindeki iniş takımları 6
Şekil 1.5 İniş takımı yükseklikleri, aks mesafesi ve teker izi parametreleri 7
Şekil 1.6 Bayraktar Akıncı İHA'ya ait geri katlanabilen iniş takımları 8
Şekil 1.7 Tekli iniş takımı üst ve yan görünümü 10
Şekil 1.8 Bisiklet iniş takımının üst ve yan görünümü 11
Şekil 1.9 Kuyruk tipi iniş takımının üst ve yan görünümü 11
Şekil 1.10 Üç tekerlekli bisiklet tipi iniş takımının üst ve yan görünümü 12
Şekil 1.11 Dört tekerlek bisiklet tipi iniş takımının üst ve yan görünümü 13
Şekil 1.12 Çoklu bogi tipine ait iniş takımlarının üst ve yan görünümü 14
Şekil 1.13 İniş takımının yüksekliği 15
Şekil 1.14 Aks yükü geometrisi 15
Şekil 2.1 Yapısal optimizasyon türleri 17
Şekil 2.2 Boyut optimizasyonu 18
Şekil 2.3 Şekil Optimizasyonu 18
Şekil 2.4 Topoloji Optimizasyonu 19
Şekil 2.5 Yapısal optimizasyon türlerinin karşılaştırılması 19
Şekil 2.6 Kafes Yapılar 23
Şekil 2.7 Kafes optimizasyonu akış şeması 23
Şekil 3.1 Eklemeli İmalatta Katmanların Oluşması 24
Şekil 3.2 Eklemeli imalatta parça üretimi için gerekli adımlar 26
Şekil 3.3 EYM prosesi üretim şeması 29
Şekil 3.4 Kontur üretimi prosesinin üretim şeması 30
Şekil 3.5 SLS prosesi üretim şeması 31
Şekil 3.6 EBM prosesi üretim şeması 33
Şekil 3.7 SLA prosesinin üretim şeması 34
Şekil 3.8 CDLP prosesi üretim şeması 35
Şekil 5.1 İniş takımlarına gelen yükler ve referans uzaklıkları 46
Şekil 5.2 Burun iniş takımı bileşenleri 49
Şekil 5.3 Burun iniş takımı üç boyutlu modeli 50
Şekil 5.4 Burun iniş takımı ana taşıyıcı çatalı a) ön ve b) izometrik görüntüsü 51
Şekil 5.5 Ana iniş takımı tasarımı 51
Şekil 5.6 Ana dikme tasarımı a) ön görünüşü ve b) profil kesiti 52
Şekil 5.7 Hibrid gövde yapısı 52
Şekil 5.8 Ana dikme tasarım katı modelleri 53
Şekil 5.9 Ana dikme modellerinin yan kesit görünüşleri 54
Şekil 5.10 Ana dikme modellerinin izometrik kesit görünüşleri 54
Şekil 5.11 Mesh kalitesi 55
Şekil 5.12 Burun iniş takımı ana taşıyıcısı von Mises gerilmeleri 55
Şekil 5.13 Abartılmış değerler ile burun iniş takımı von Mises gerilmeleri 56
Şekil 5.14 Burun iniş takımına ait yer değiştirme sonuçları 56
Şekil 5.15 Topoloji optimizasyonu için mesh uygulaması 57

Şekil 5.16 Topoloji optimizasyonu sonucu en kritik bölgeler 57
Şekil 5.17 Topoloji optimizasyonu sonuçları 58
Şekil 5.18 Topoloji optimizasyonu a) yer değiştirme ve b) gerilme sonuçları 58
Şekil 5.19 Optimizasyon sonucu geliştirilen tasarım 59
Şekil 5.20 Topoloji optimizasyonu sonucu ağırlık değişimi 59
Şekil 5.21 Basma numunelerinin boyutları 61
Şekil 5.22 Üç nokta eğme test numunelerinin boyutlandırılması 62
Şekil 5.23 Basma numuneleri simülasyon modeli 63
Şekil 5.24 DTB modeline ait tasarım 64
Şekil 5.25 DTB numunesine ait mesh yapısı 64
Şekil 5.26 DTB numunesine ait toplam deformasyon miktarı 65
Şekil 5.27 DTB numunesine ait gerilme değerleri 65
Şekil 5.28 YHTB modeline ait tasarımı 66
Şekil 5.29 YHTB modeli kesit görünümü 66
Şekil 5.30 YHTB numunesine ait mesh uygulaması 67
Şekil 5.31 YHTB numunesine ait yer değiştirme sonuçları 67
Şekil 5.32 YHTB numunesine ait von Mises gerilme sonuçları 68
Şekil 5.33 DHTB modeline ait tasarımı 68
Şekil 5.34 DHTB modeli kesit görünümü 69
Şekil 5.35 DHTB numunesine ait mesh uygulaması 69
Şekil 5.36 DHTB numunesine ait deformasyon miktarları 70
Şekil 5.37 DHTB numunesine ait von Mises gerilme miktarları 70
Şekil 5.38 Üç nokta eğme numuneleri simülasyon modeli 71
Şekil 5.39 DTE modeline ait numune tasarımı 72
Şekil 5.40 DTE numunesine ait mesh uygulaması 73
Şekil 5.41 DTE numunesine ait deformasyon miktarı 73
Şekil 5.42 DTE numunesine ait von Mises gerilme değerleri 74
Şekil 5.43 YHTE modeline ait ön ve izometrik görünüm 75
Şekil 5.44 YHTE modeline ait kesit görünümleri 75
Şekil 5.45 YHTE numunesine ait mesh uygulaması 76
Şekil 5.46 YHTE numunesine ait yer değiştirme miktarı 76
Şekil 5.47 YHTE numunesine ait von Mises gerilmeleri 77
Şekil 5.48 DHTE modeli tasarımı 78
Şekil 5.49 DHTE numunesine ait mesh uygulaması 79
Şekil 5.50 DHTE numunesine ait deformasyon sonuçları 79
Şekil 5.51 DHTE numunesine ait von Mises gerilmesi 80
Şekil 5.52 Ana dikme tasarımına ait mesh uygulaması 82
Şekil 5.53 İniş takımı dikmesi yer değiştirme sonuçları 83
Şekil 5.54 İniş takımı ana dikmesi gerilme sonuçları 83
Şekil 5.55 Ana iniş takımı dikmesine ait kesit görünümü 84
Şekil 5.56 Ana iniş takımı dikmesine ait detaylı kesit görünümü 84
Şekil 5.57 İniş takımı dikmesinin güvenlik katsayısı 85
Şekil 6.1 Numunelerin dilimlenmiş görüntüleri 86
Şekil 6.2 a) Üç nokta eğme ve b) basma numunelerinin üç boyutlu yazıcıda üretilmesi 88
Şekil 6.3 Üretimi gerçekleştirilen üç nokta eğme deney numuneleri 88
Şekil 6.4 Üretimi gerçekleştirilen basma deney numuneleri 89
Şekil 6.5 Kötü yüzey kalitesine sahip ve zımparalama işlemi yapılmış numuneler 89
Şekil 6.6 Üç nokta eğme numunelerinin test cihazına yerleştirilmiş görüntüsü 91

Şekil 6.7 Basma numunelerinin test cihazına yerleştirilmiş görüntüsü 92
Şekil 6.8 DTB numunelerine ait kuvvet - yer değiştirme grafiği..... 93
Şekil 6.9 DTB numunelerine ait deformasyon..... 94
Şekil 6.10 YHTB numunelerine ait kuvvet yer değiştirme grafiği 95
Şekil 6.11 YHTB numunelerine ait deformasyon..... 96
Şekil 6.12 DHTB numunelerine ait kuvvet yer değiştirme grafiği 97
Şekil 6.13 DHTB numunelerine ait deformasyon..... 98
Şekil 6.14 DTE numunelerine ait kuvvet yer değiştirme grafiği 100
Şekil 6.15 DTE numunelerine ait deformasyon..... 101
Şekil 6.16 DHTE numunesinin kuvvet- yer değiştirme grafiği 102
Şekil 6.17 DHTE numunelerine ait deformasyon..... 103
Şekil 6.18 YHTE numunelerine ait kuvvet – yer değiştirme grafiği 103
Şekil 6.19 YHTE numunelerine ait deformasyon..... 104

TABLOLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 1.1 SHGM'ne göre İHA'ların azami kalkış ağırlığına göre sınıflandırılması ... 2
Tablo 1.2 Kapsamlı İHA sınıflandırılması ... 3
Tablo 1.3 Sabit ve geri katlanabilen iniş takımlarının kıyaslanması 9
Tablo 3.1 Eklemeli imalat teknolojisinde kullanılan yöntemler ... 27
Tablo 3.2 EYM teknolojisinde kullanılan bazı malzemelerin özellikleri ... 28
Tablo 3.3 Eklemeli imalatta kullanılan yöntemler, avantaj ve dezavantajlar ... 35
Tablo 5.1 İnsansız hava aracına ait değerler ... 48
Tablo 5.2 Kullanılan malzemenin mekanik özellikleri ... 60
Tablo 5.3 Basma numuneleri özellik değişimleri ... 81
Tablo 5.4 Üç nokta eğilme numuneleri özellik değişimleri ... 81
Tablo 6.1 Üretim parametreleri ... 87
Tablo 6.2 Üretilen numunelere ait isimlendirme ve ağırlık değişimleri ... 90
Tablo 6.3 DTB numunelerine ait test sonuçları ... 93
Tablo 6.4 YHTB numunelerine ait test sonuçları ... 96
Tablo 6.5 DHTB numunelerine ait test sonuçları ... 98
Tablo 6.6 Basma deneyi numunelerinin enerji sönümleme miktarları ... 99
Tablo 6.7 DTE numunelerine ait test sonuçları ... 101
Tablo 6.8 DHTE numunelerine ait test sonuçları ... 102
Tablo 6.9 YHTE numunelerine ait test sonuçları ... 104
Tablo 6.10 Üç nokta eğme numunelerinin enerji sönümleme miktarları ... 105

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

ASTM : American Iron and Steel Institute
FDM : Fused Deposing Modeling
EYM : Ergiyik Yığma Modelleme
SLS : Seçici Lazer Sinterleme
SLA : Steliografi
SLE : Seçici Lazer Ergitme
DLP : Dijital Işık Projeksiyonu
PLA : Polilaktik Asit
ABS : Akrilonitril Bütadien Stiren
İHA : İnsansız Hava Aracı
EBM : Elektron ışığı Eritme
DMLS : Direkt metal lazer sinterleme
DED : Yönlendirilmiş Enerji Biriktirme
EBM : Elektron Işın Ergitme
PLA : Polilaktik Asit
PEKK : Polieterketonketon
PEI : Polieterimid
PC : Polikarbonat
DMLS : Doğrudan Metal Lazer Sinterleme
UV : Ultraviyole
DED : Direkt Enerji Depolama
STL : Standart Mozaikleme Dili
CAD : Bilgisayar Destekli Tasarım
THK : Türk Hava Kurumu
SHGM : Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü
UAV : Unmanned Aerial Vehicle

1. GİRİŞ

1.1 İnsansız Hava Araçları

İnsansız hava araçları (İHA) içerisinde fiziksel olarak bir pilot bulunmayan, çeşitli görevleri otonom veya manuel kontrollü şekilde yapmak için tasarlanmış hava araçlarıdır (Remondino vd., 2012). İnsansız hava araçlarının en önemli özelliklerinden birisi uçak ile yer kontrol noktası arasında bir kontrol iletişiminin sağlanmasıdır. İnsansız hava araçlarını normal uçaklardan ayıran en önemli özellik, insansız hava araçlarının kontrolü, yeryüzündeki bir kontrol merkezi tarafından sağlanmaktadır (Sharma vd., 2020).

İnsansız hava araçlarının tarihine bakıldığı zaman ilk olarak 1700'lü yılların sonlarına doğru insansız balonlar kullanılsa da Türk Hava Kurumu (THK) ilk İHA için 1918 yılında İngiliz C. Ketterin tarafından üretilen Kettirieng Bug isimli hava torpidosunu örnek olarak göstermiştir. 1909 yılında ise Amerikalı mucit Elmer Sperry, uçuş halindeki uçakların dengesini sağlamak amacıyla cayroskopik aletler tasarlamış ve bu aletler modern ataletsel seyrüsefer sistemlerinin başlangıcı olmuştur (URL-1, 2023). Tarihte kullanılan ilk İHA sistemine örnek olarak 1916 yılında A.M. Low tarafından geliştirilen Aerial Target isimli platformunu gösterilmektedir. Bu tarihlerden sonra insansız hava araçlarının gelişimi hızla devam etmiş 1930 yılında ilk telsizle kontrol edilebilen İHA, 1939 yılında uzaktan kumanda ile kontrol edilebilen İHA ve 1995 yılında günümüz İHA'larının temelini oluşturan ilk modern İHA olan MQ-1 Predator geliştirilmiştir (URL-1, 2023). Şekil 1.1' de İlk İHA olan Kettirieng Bug (a) ve ilk modern İHA olan MQ-1 Predator (b) gösterilmiştir.



Şekil 1.1 İlk İHA ve İlk Modern İHA (URL-2, 2023; URL-3, 2023)

İHA'lar günümüzde savunma sanayi alanında etkin bir şekilde kullanılsa da tarım sanayi, fotoğrafçılık, ilaçlama vb. diğer sektörlerde de kullanımı oldukça yaygınlaşmıştır.

1.2 İnsansız Hava Araçlarının Sınıflandırılması

İHA ilk olarak sınıflandırılırken; uzaktan kumanda edilebilen İHA'lar ve belirli bir uçuş rotasını kendisi takip eden İHA'lar olmak üzere iki sınıfa ayrılmıştır. Literatürde birden çok sınıflandırma şekli yapılmıştır ve bu alan standart bir sınıflandırmaya sahip değildir. Sınıflandırma yapılırken birçok parametre göz önünde bulundurulmaktadır.

Türkiye'de Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü (SHGM) İHA'ları azami kalkış ağırlığına göre İHA0, İHA1, İHA2 ve İHA3 olmak üzere dört farklı şekilde sınıflandırmıştır (URL-4, 2023). Fakat literatürde ağırlığına, kullanım alanına, uçuş kurallarına, kalkış ve iniş tipine, maksimum kalkış ağırlığı, havada kalma süresi, uçuş irtifası, yakıt sistemine, güç ve itki yüklemesine, motor tipine ve kanat tipine göre farklı şekillerde sınıflandırıldığı görülmüştür (Boukoberine vd., 2019; Jawhar vd., 2017; Korchenko ve Illyash, 2013). SHGM'ne göre İHA sınıflandırılması Tablo 1.1' de gösterilmiştir.

Tablo 1.1 SHGM'ne göre İHA'ların azami kalkış ağırlığına göre sınıflandırılması

İHA sınıfı	Azami Kalkış Ağırlığı	Zorunlu Teçhizat
İHA0	500 gr (dahil)- 25 kg	Yok
İHA1	4 kg (dahil) – 25 kg	Var
İHA2	25 kg (dahil) – 150 kg	Var
İHA3	150 kg (dahil)- daha fazla	Var

Literatürde yapılan araştırmalara göre daha kapsamlı bir İHA sınıflandırılması Maria Nunes Bento tarafından yapılmıştır. Bento, İHA'ları Mini/ mikro İHA'lar, taktiksel İHA'lar, stratejik İHA'lar ve özel görev İHA'ları olmak üzere sınıflandırmıştır (Tablo 1.2).

Tablo 1.2 Kapsamlı İHA sınıflandırılması (Decuypere, 2001)

İHA sınıfı	Kategori	Maksimum Kalkış Ağırlığı (kg)	Maksimum Uçuş İrtifası (m)	Havada Kalma Süresi (saat)	Veri mesafesi (km)
Mini/Mikro İHA'lar	Mikro	0.10	25	1	<10
	Mini	<30	150-300	<2	<10
Taktiksel İHA'lar	Yakın Mesafe	150	3000	2-4	10-30
	Kısa Mesafe	200	3000	3-6	30-70
	Orta Mesafe	150-500	3000-5000	6-10	70-200
	Uzun Mesafe	-	5000	6-13	200-500
	Seyir Süreli	500-1500	5000-8000	12-24	>500
	Orta İrtifa	1000-1500	5000-8000	24-48	>500
Stretejik İHA'lar	Yüksek İrtifa,Uzun Seyir	2500-12500	15000-20000	24-48	>2000
Özel Görev İHA'ları	Öldürücü	250	3000-4000	3-4	300
	Tuzağa Düşüren	250	50-5000	<4	<500
	Stratosferik	-	20000-50000	>48	>2000
	Egzostratosferik	-	>30000	-	-

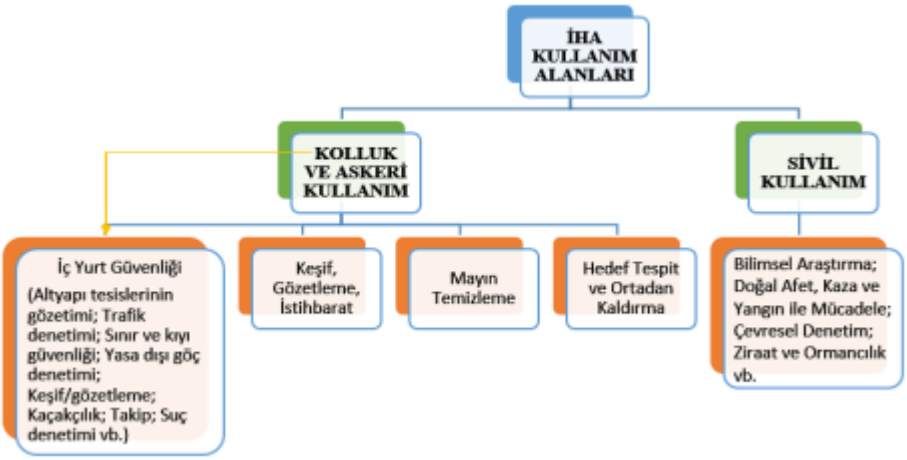
1.3 İnsansız Hava Araçları ve Uygulama Alanları

İnsansız teknolojilerin havacılık sektöründe gelişmesinde ve yaygınlaşmasında teknolojinin getirdiği bazı maliyetli ve sorunlu problemlerin aşılması için harcann çabanın büyük rol oynadığı söylenebilir. İHA'ların uzaktan kontrol edilebiliyor olmasının pilot ile kontrol edilen diğer uçaklara nazaran çok büyük avantajları bulunmaktadır. Uçağı kontrol edecek pilot için yaşam alanı, pilot için ayrılan yer ve mürettebat yüzünden oluşan ağırlık İHA'larda bulunmadığından ciddi bir ağırlık kazanımı olmaktadır. Ayrıca uçağın pilota bağlı olmamasından kaynaklanan manevra, hareket kabiliyeti daha da artmaktadır. Çünkü insan doğası gereği yorgunluk, halsizlik vb. durumlara sahip olabileceğinden her zaman aynı performans ile havada kalabilmesi mümkün değildir. Özellikle uçağı kontrol eden kişinin G kuvvetine maruz kalmamasının olumlu etkileri bulunmaktadır. Tüm bu sebeplerden dolayı İHA'larda, diğer uçaklara göre ciddi bir ağırlık ve maliyet tasarrufu gerçekleşmektedir (URL-1, 2023).

Bütün maddi kaynak, teknolojik ekipman, mühendislik avantajları ve verimlilik özelliklerini göz ardı edildiğinde bile İHA'ların en önemli avantajı pilotların can

güvenliğinin sağlanmasıdır. Dünyada, ülkeleri tarafından eğitimine ciddi miktarda emek ve zaman harcanan, yetiştirilmesi çok maliyetli olan pilotların uçuş sırasında operasyonel ve teknik sebeplerden dolayı kaybı hem maddi hem manevi hem de uzman iş gücü açısından ordular için büyük kayıptır. Bu sebeple İHA'lar ordular için giderek daha fazla önemli hale gelmektedir (URL-1, 2023). Özet olarak İHA'lara, pilotların hayati risklerini ortadan kaldırmak, radyolojik ve nükleer kirlenme olan bölgelerde insan hayatını tehlikeye atmadan gerekli görevi yerine getirebilmek ve insani sebeplerden dolayı oluşabilecek olumsuz koşullardan arınabilmek adına ihtiyaç duyulmaktadır (Erdil, 2021).

İHA'lara ayrılan bütçe, zaman ve yatırımlar en çok askeri anlamda olsa da birçok farklı alanlarda kullanımları sürmektedir. Keşif, gözetleme, bilimsel araştırmalar, doğal afet kaza, yangınla mücadele, koruma, çevresel denetim, ormancılık, ziraat, haberleşme, medya, ticaret, kaçakçılıkla mücadele, arama kurtarma, hava durumu veri toplaması, kargo teslimi ve üniversiteler gibi alanlarda İHA'lar kullanılmaktadır (Şekil 1.2) (Erdil, 2021).

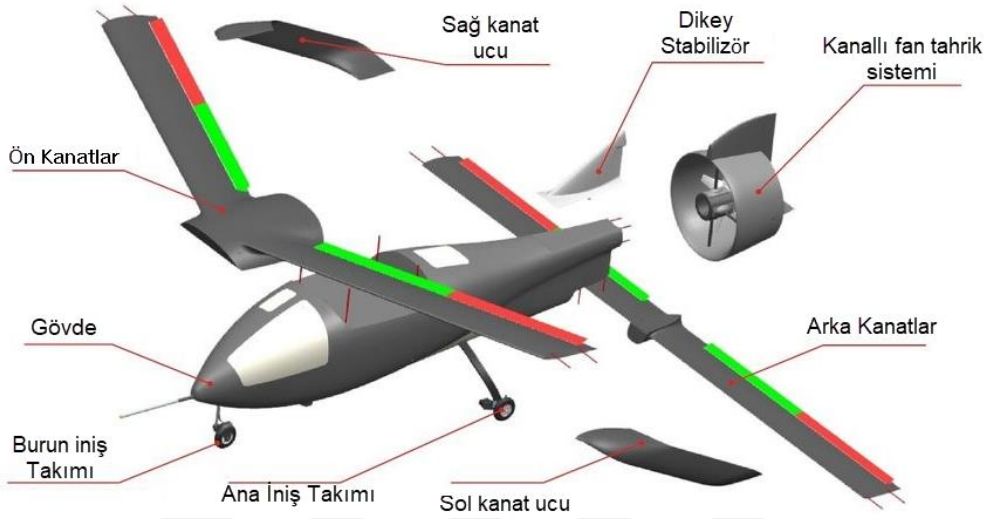


Şekil 1.2 İHA kullanım alanları (Aras, 2021)

1.4 İHA Bileşenleri

İnsansız hava araçları yapısal, elektronik ve yazılımsal anlamda içerisinde çok kompleks teknolojileri barındıran sistemlerdir. İHA daha az hava direnci, daha fazla mekanik dayanım vs. gibi etkenlerden dolayı yapısal anlamda güçlü olmak zorundadırlar. Çok gelişmiş İHA'larda daha fazla yapısal bileşenler kullanılsa da genel

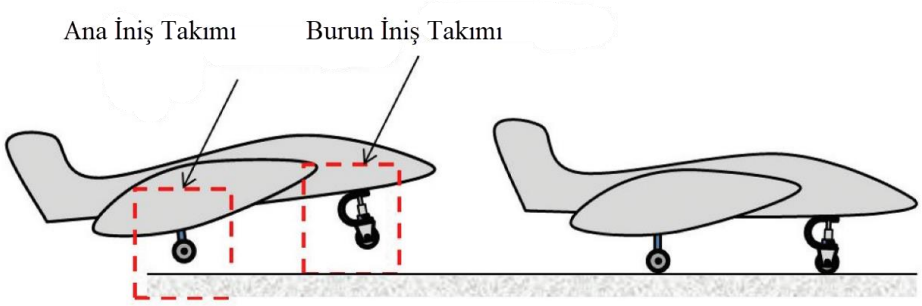
olarak İHA yapısal olarak, gövde, ön ve arka kanatlar, sağ ve sol kanat uçları, burun iniş takımı, ana iniş takımı, dikey stabilizör ve fan kanallı tahrik sistemlerinden oluşmaktadır (Galiński vd., 2014). Şekil 1.3'te genel olarak kullanılan İHA bileşenleri gösterilmektedir.



Şekil 1.3 İHA bileşenleri

1.5 İniş Takımları

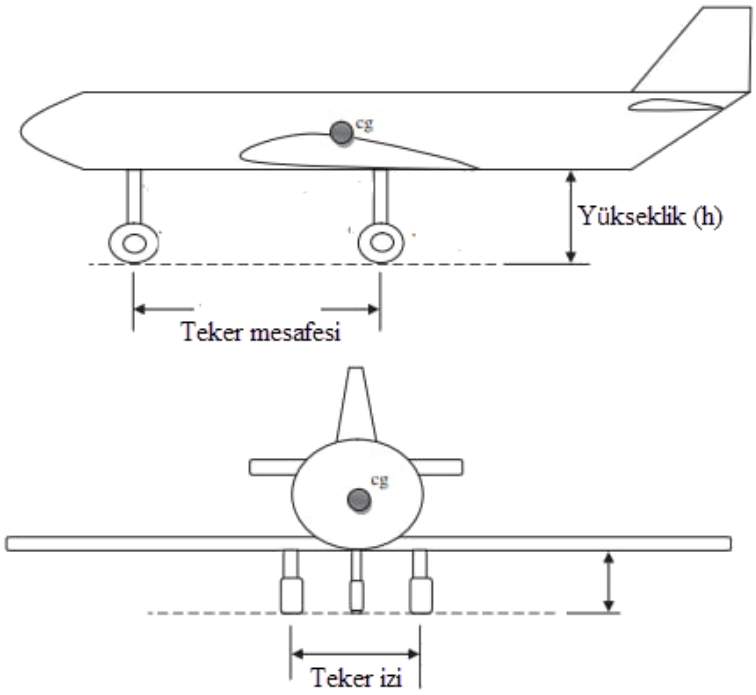
İniş takımları hava araçlarının inişleri, kalkışları ve taksi yaptığı durumlarda yeryüzü ile temasını sağlayan, yeryüzü ile teması esnasında yerçekimi, frenleme, durma, hızlanma vb. kuvvetlerden kaynaklı mekanik yükleri karşılayan ve uçuştan sonra hiçbir şekilde hasar görmeden uçağın güvenli bir şekilde yer yüzeyine dönmesini sağlayan en önemli ve en kritik bileşendir. İniş takımları yeryüzü ile temas eden tek bileşen olduğundan dolayı her zaman en iyi performansı göstermesi beklenmektedir. İniş takımları, iniş veya kalkış sırasında oluşan kinetik enerjiyi sönümlemek ve bu enerjiyi uçağın gövde kısmına güvenli bir şekilde dağıtmak için tasarlanmalıdır. Genel olarak iniş takımlarının, uçağı iniş, kalkış, taksi durumlarında standart bir şekilde tutmak, iniş esnasında darbe kuvvetlerini sönümlemesi ve uçağın gövde parçaları ile yer yüzeyi arasındaki mesafeyi güvenli bir şekilde koruması beklenmektedir (Armaan vd., 2020a; Currey, 1988). İniş takımları ana iniş takımı ve burun iniş takımı olmak üzere ikiye ayrılır (Şekil 1.4). Ana iniş takımları iki tekerlekli burun iniş takımları ise tek tekerleklidir. Yeryüzü ile ilk teması ana iniş takımları sağlar.



Şekil 1.4 İHA üzerindeki iniş takımları (Son vd., 2021)

Uçuş güvenliğini sağlamak için kapsamlı bir araştırma ve testler yapılmalıdır. Uçağın nihai ağırlığını düşük seviyelerde tutmak güvenli uçak parçaları tasarlarken gereken en önemli hususlardan birisidir (Diltemiz, 2021). İniş ve kalkış, uçağın en kritik manevralarıdır. Uçak arızalarının yarısı bu esnada meydana gelmektedir (Armaan vd., 2020b). İniş takımları hem statik hem de dinamik olarak aşırı yüksek gerilmelere maruz kaldığından dolayı güvenli tasarlanmalıdır. Ayrıca atmosferik koşullara karşı direnç göstermesi gerekmektedir. Gerilme korozyonu, arıza çatlaması, yorulma ve aşırı yük arızaları en çok karşılaşılan sorunlardandır (Asi ve Yeşil, 2013).

İniş takımlarında genellikle tekerlekler bulunsa da bazı uçak ve hava araçlarında dikey iniş kalkış yapmak adına kızaklar bulunabilir. İniş takımının yüksekliği, iniş takımının yeryüzüne temas eden en alt noktası ile uçağın bağlantı noktası arasındaki mesafeye denir. İniş takımları yüksekliği amortisörlerde çökme meydana geleceğinden uçaklar yerde iken ölçülür (Sadraey, 2013).



Şekil 1.5 İniş takımı yükseklikleri, aks mesafesi ve teker izi parametreleri (Sadraey, 2013)

İniş takımları için hesaplamalar yapmak için tekerlek izi, teker mesafesi, ağırlık merkezi gibi kavramları iyi hesaba katmak gerekmektedir. İniş takımı tekerlek izi uçağa önden bakıldığında iki ana iniş takımı arasındaki mesafeyi temsil etmektedir. Teker mesafesi ise uçağa yandan bakıldığı zaman burun iniş takımı ile ana iniş takımı arasındaki mesafeyi temsil etmektedir (Şekil 1.5) (Sadraey, 2013).

1.5.1 İniş Takımı Türleri

Uçağın iniş takımları faydalı ve faydası yükün miktarı ile operasyonel faaliyetin türüne göre belirlenmektedir. Uçakların iniş takımları sabit ve geri katlanabilen iniş takımları olmak üzere genellikle ikiye ayrılmaktadır.

1.5.1.1 Sabit iniş takımları

Sabit iniş takımları uçakların yerde veya havada uçarken hep sabit kalan iniş takımı tipidir. Belirli avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Yüksek performans istenen bir uçakta sabit iniş takımları tercih edilmez. Üretim kolaylığı ve düşük maliyetli olması istenen uçaklar için ideal bir iniş takımı tipidir. Yüksek hızlarda uçuş gerektirmeyen uçaklarda yapının basitliği ve ekonomisi daha ön plana alınarak geliştirilmiştir.

Genelde bu tip iniş takımlarında otomobillerde kullanılan çelik yaylı amortisör tiplerini bünyesinde barındırır (Currey, 1988; Kundu, 2010).

1.5.1.2 Geri katlanır iniş takımları

Uçağın sadece iniş, kalkış ve taksi yaptığı durumlarda açık olan, havada kaldığı süre boyunca gövdeye ya da kanatlara geri çekilen iniş takımı tipleridir. Yüksek performans ve kabiliyet beklenen uçaklarda iniş takımlarına gelen yükler arttıkça diğer bileşenlerin boyutu ve mekanik performansının artması gerekmektedir. Daha yüksek hızlara çıkan uçaklarda aerodinamik etkiye daha fazla kalan iniş takımları kontrol edilemeyen etkilere maruz kalacaktır. Buna çözüm olarak uçağın havada olduğu sürece katlanabilen iniş takımları geliştirilmiştir. Geri katlanabilen iniş takımları ana ve yardımcı iniş takımı dikmeleri, hareket elemanı, destek dikmesi, kilit mekanizması, iniş takımı kapakları, damperler, ortalama mekanizması, kumanda ve emniyet sistemleri olmak üzere bazı yapısal ve elektriksel bileşenlerden meydana gelmektedir (Currey, 1988; Sadraey, 2013). Şekil 1.6'da Bayraktar Akıncı İHA'ya ait görselde iniş takımlarının kalkış (a) ve havada uçuş (b) esnasında iniş takımları gösterilmiştir.



Şekil 1.6 Bayraktar Akıncı İHA'ya ait geri katlanabilen iniş takımları (URL-5, 2023; URL-6, 2023)

Performans, maliyet, tasarım, üretim, sürüklenme ve bakım gibi parametreleri göz önünde bulundurularak sabit ve geri katlanabilir iniş takımı arasındaki farklar Tablo 1.3' te verilmiştir.

Tablo 1.3 Sabit ve geri katlanabilen iniş takımlarının kıyaslanması (Sadraey, 2013).

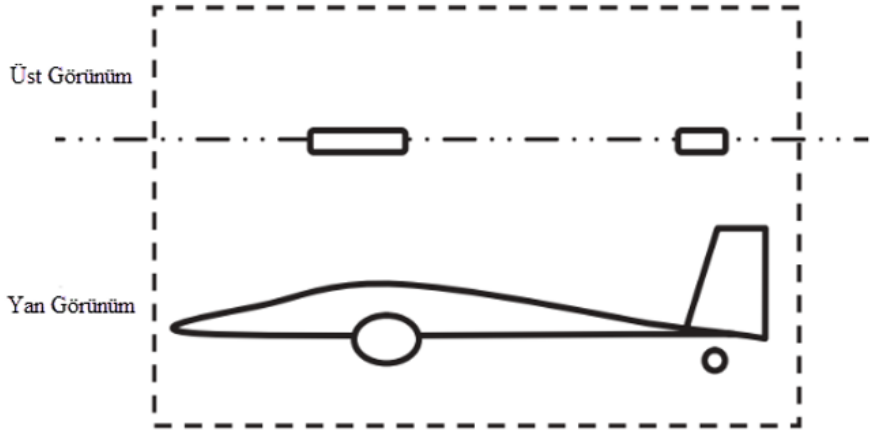
	Sabit İniş Takımı	**Geri Katlanabilir İniş Takımı**
Maliyet	Ucuz	Pahalı
Ağırlık	Hafif	Ağır
Tasarım	Daha kolay	Daha zor
Üretim	Daha kolay	Daha zor
Bakım – Onarım	Daha kolay	Daha zor
Sürüklenme	Fazla sürüklenme	Az sürüklenme
Uçak Performansı	Maksimum hızda düşük	Maksimum hızda yüksek
Boyuna denge	Daha dengeli	Daha dengesiz
Depolama alanı	Depolama ihtiyacı yok	Depolama ihtiyacı var
Geri çekme sistemi	Gerek yok	Gerekli
Yakıt hacmi	Daha fazla iç hacim	Daha az iç hacim
Uçak Yapısı	Bölüntüsüz yapı	Takviyeli yapı

1.6 İniş Takımlarının Yerleştirilmesi

Günümüzde kullanılan uçaklarda iniş takımlarının farklı türde yerleşimleri bulunmaktadır. Muhammed H. Sadraey, Aircraft Design: A System Emgineering Approach isimli kitabında on farklı iniş takımı türünden bahsetmektedir. Bunlar; tekli iniş takımı, bisiklet tipi iniş takımı, kuyruk iniş takımı, üç tekerlekli bisiklet iniş takımı, dört tekerlekli bisiklet iniş takımı, serbest bırakılabilir iniş takımı, kızak iniş takımları, deniz uçağı iniş takımları ve insan bacağı iniş takımlarıdır (Sadraey, 2013).

1.6.1 Tekli İniş Takımı

İniş takımları arasında en basit konfigürasyona sahip iniş takımlarıdır. Bu yapıya sahip uçaklarda ana iniş takımı uçağın yükünün büyük bir kısmını taşımaktadır. Bu tip uçaklarda uçağın ağırlık merkezi, ana iniş takımının arkasında ve diğer iniş takımı ağırlık merkezinin önünde konumlandırılır. Tekli iniş takımının üst ve yan görünümü Şekil 1.7'de verilmiştir.

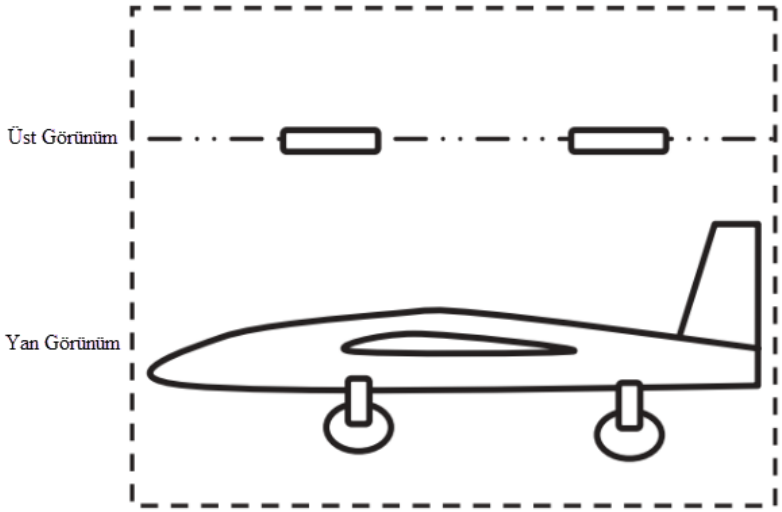


Şekil 1.7 Tekli iniş takımı üst ve yan görünümü (Sadraey, 2013)

Tekli iniş takımları genellikle sabit olduğundan yüksekliği oldukça kısadır. Tekli iniş takımları yerde dengeli olmadığından dolayı kanat uçlarına devrilme eğilimi göstermektedir. Bu nedenle bazı tekli iniş takımına sahip uçaklarda kanatların altında yardımcı iniş takımlarına rastlamak mümkündür. Ağırlık ve maliyet olarak düşük olmasından dolayı tercih edilmektedir (Sadraey, 2013).

1.6.2 Bisiklet Tipi İniş Takımı

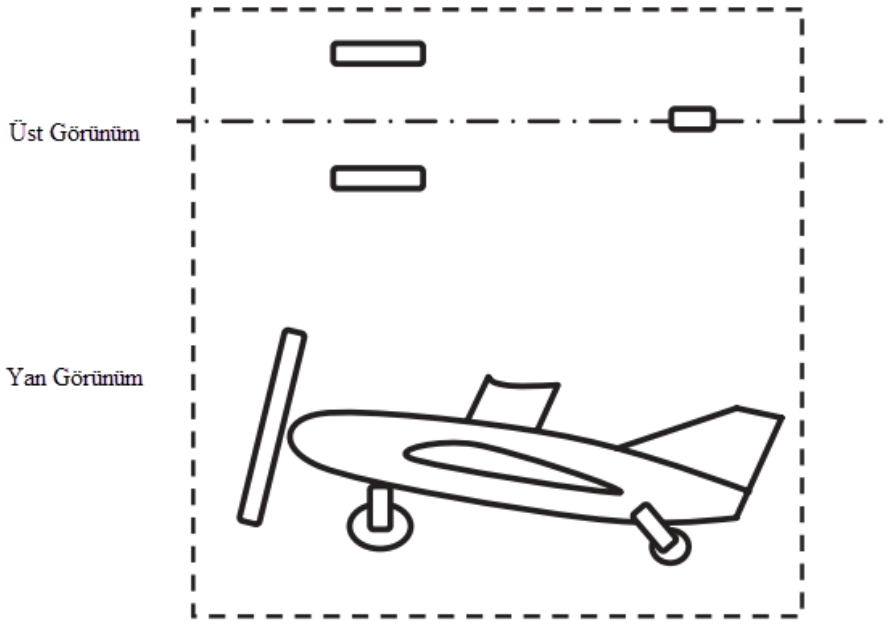
Bisiklet iniş takımları biri arkada ve biri önde olmak üzere iki ana iniş takımına sahiptir. Bu iniş takımları hemen hemen aynı boyuta sahiptirler. Tekli iniş takımında olduğu gibi bisiklet iniş takımında da yana doğru devrilmeyi önleme amacıyla kanatlarda ek tekerlekler kullanılabilmektedir. Ağırlık ve maliyeti oldukça düşüktür. Şekil 1.8'de bisiklet iniş takımının üst ve yan görünümleri verilmiştir.



Şekil 1.8 Bisiklet iniş takımının üst ve yan görünümü (Sadraey, 2013)

1.6.3 Kuyruk Tipi İniş Takımı

Bu iniş takımı türünde uçağın ön kısmında iki adet ana iniş takımı gövdede bulunurken, kuyrukta küçük bir iniş takımı bulunmaktadır. Uçağın ağırlık merkezi ana iniş takımlarına çok yakındır ve bu sayede uçak ağırlığının büyük çoğunluğunu taşımaktadır. Kuyruk tipi iniş takımlarında ana iniş takımı ağırlığın %80-90'ını taşırken arka kısımda bulunan iniş takımı %10 civarında bir yük taşımaktadır. Şekil 1.9'da kuyruk iniş takımına ait üst ve yan görünümler verilmiştir.

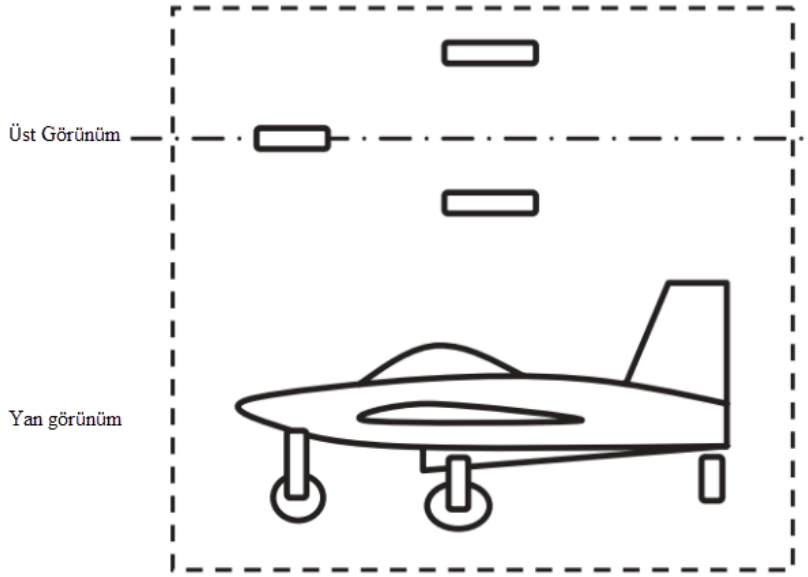


Şekil 1.9 Kuyruk tipi iniş takımının üst ve yan görünümü (Sadraey, 2013)

Havacılık tarihinin ilk 50 yılında kuyruk tipi iniş takımı kullanıldığından bu tip iniş takımlarına geleneksel iniş takımları da denmektedir. Fakat günümüzde kullanılan uçakların yalnızca %10'u kuyruk tipi iniş takımlarına sahiptir.

1.6.4 Üç Tekerlekli Bisiklet Tipi İniş Takımı

Üç tekerlekli bisiklet tipi en yaygın kullanılan iniş takımı modelidir. Bu tip iniş takımlarında ana ve burun iniş takımları mevcuttur. Ağırlık merkezine olan konumundan dolayı yükün daha fazlasını ana iniş takımları taşımaktadır. Ana iniş takımları gövdeye simetrik olarak eşit uzaklıklarda yerleştirilmiştir. Şekil 1.10'da bisiklet tipi iniş takımlarının üst ve yan görünümü verilmiştir.

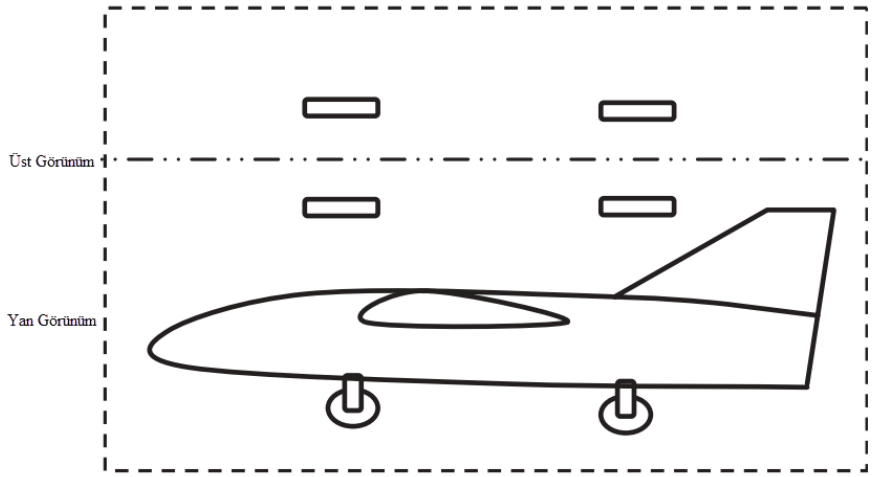


Şekil 1.10 Üç tekerlekli bisiklet tipi iniş takımının üst ve yan görünümü (Sadraey, 2013)

Günümüzde nakliye ve savaş uçakları, üç tekerlekli bisiklet tipi iniş takımlarını kullanmaktadırlar. Uçağın ağırlık merkezine göre taksi esnasında uçağı düzeltme eğilimindedir. Bazı durumlara göre burun iniş takımında büyük tek tekerlek yerine küçük iki tekerlek kullanımları mevcuttur. Uçağın daha güvenli iniş ve kalkış yapması açısından bu şekilde kullanılmaktadır.

1.6.5 Dört Tekerlekli İniş Takımı

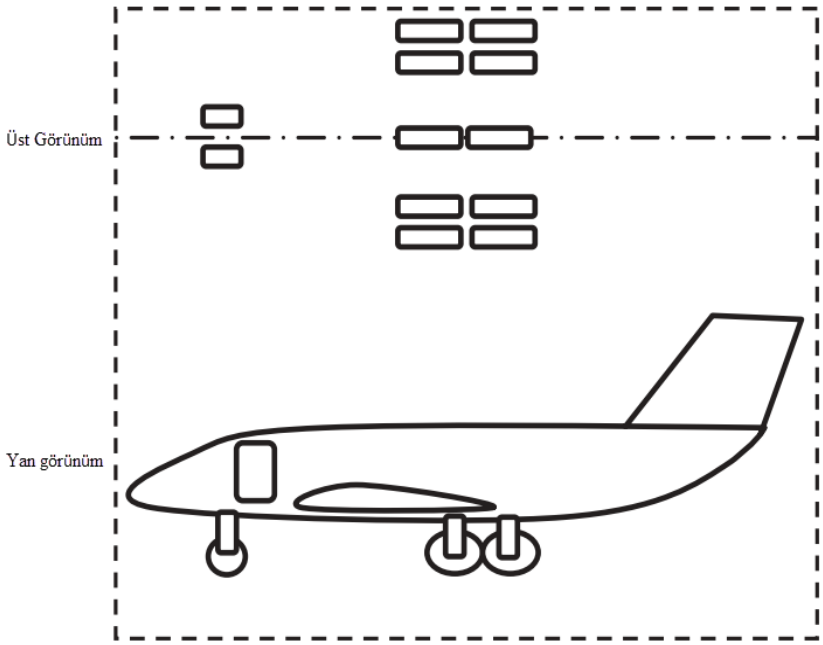
İsminden de anlaşılacağı üzere dört tekerlek kullanılan iniş takımı modelidir. Otomobil tekerlek sistemlerine benzer olarak dört noktadan yük taşımak üzerine geliştirilmiştir. Ağırlık merkezinin dört tekerlek etrafında eşit olarak paylaştırılması ve her tekerin eşit yük taşıması hedeflenmiştir. Bu sayede uçağın kalkış esnasında dönmesi daha zor olacaktır. Üç tekerlekli bisiklet tipi modeline göre daha uzun bir kalkış mesafesine sahiptir. Şekil 1.11'de dört tekerlekli bisiklet tipi iniş takımına ait üst ve yan görünümleri verilmiştir.



Şekil 1.11 Dört tekerlek bisiklet tipi iniş takımının üst ve yan görünümü (Sadraey, 2013)

1.6.6 Çoklu Bogi Tipli İniş Takımı

İniş güvenliğini sağlamak amacıyla ağırlığı artan uçaklara daha fazla tekerleğin eklendiği iniş takımı modelidir. Çoklu bogi tipli iniş takımlarında uçaklar yerde ve taksi sırasında oldukça dengeli hareket ederler. Üretimi çok pahalı ve karmaşık yapıya sahip bir iniş takımı modelidir. Günümüzde Boening 747 uçakları çoklu bogi tipli iniş takımlarıyla donatılmıştır. Şekil 1.12'de çoklu bogi tipli iniş takımının üst ve yan görünümleri verilmiştir.



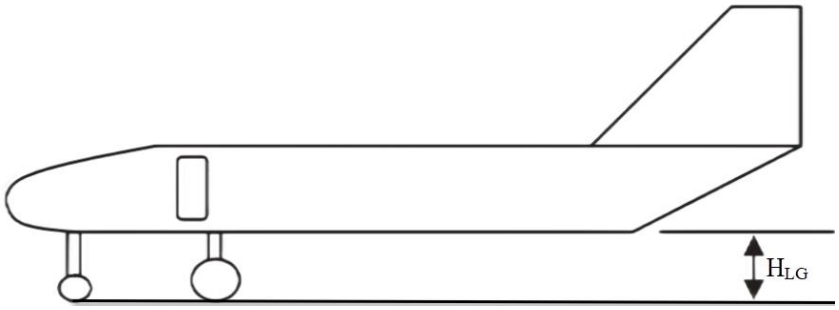
Şekil 1.12 Çoklu bogi tipine ait iniş takımlarının üst ve yan görünümü (Sadraey, 2013)

1.7 İniş Takımı Geometrisi

İniş takımı geometrisi yükseklik, aks aralığı, teker genişliği, teker izi, mesafe, ağırlık merkezi gibi parametrelere bağlıdır. İniş takımlarının analizini yapmak için bu parametrelerin dikkate alınması gerekmektedir.

1.7.1 İniş Takımı Yüksekliği

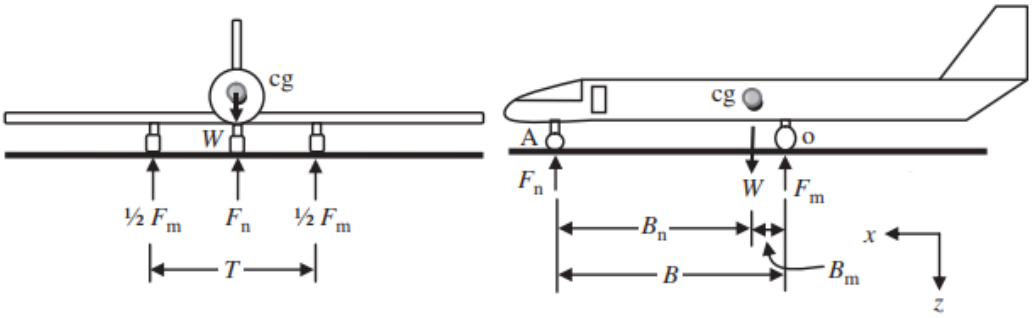
İniş takımı yüksekliği (H_{LG}), uçağın tekerlerinin temas ettiği yer yüzeyi ile iniş takımlarının bağlandığı nokta arasında kalan mesafe olarak tanımlanmıştır. Gövdeye motor bölmesine, kanatlara vb. yollarla farklı bağlantılar yapılabilse de ana mantık yer ile bağlantı noktası arasındaki mesafedir. Şekil 1.13'de iniş takımının yüksekliği gösterilmektedir.



Şekil 1.13 İniş takımının yüksekliği (Sadraey, 2013)

1.7.2 İniş Takımı Tekerlek Mesafesi

Aks mesafesi iniş takımı hesaplamaları için çok önemlidir. Aks mesafesinin tüm tasarımı karşıladığından emin olmalı ve optimum değerin hesaplanması gerekmektedir. Ana iniş takımı ile burun iniş takımı arasındaki mesafe aks mesafesi olarak tanımlanmaktadır. Şekil 1.14' de gösterilen üç tekerlekli bisiklet iniş takımına göre burun iniş takımı toplam yükün %5'inden azını ve %20'sinden fazlasını taşımamalıdır. Ana iniş takımlarının toplam yükün %80-90'ının taşıması idealdir.



Şekil 1.14 Aks yükü geometrisi (Sadraey, 2013)

Uçak statik olarak dengede olduğundan dolayı z eksenindeki tüm kuvvetlerin toplamı Denklem 1.1'de gösterildiği gibi sıfır olmalıdır.

$$\sum F_Z = 0 \Rightarrow F_n + F_m = W \tag{1.1}$$

Ayrıca Z bölgesindeki tüm momentlerin de 0 olması gerekmektedir (Denklem 1.2).

$$\sum M_0 = 0 \Rightarrow F_n B - W B_m = 0 \tag{1.2}$$

Böylece uçak tarafından taşınan statik yükün Burun iniş takımına yüzdesi (Denklem 1.3);

$$F_{m=}\frac{B_m}{B}W \tag{1.3}$$

olarak belirlenir. Ayrıca ana iniş takımına gelecek olan statik yük ise (Denklem 1.4);

$$F_{n=}\frac{B_n}{B}W \tag{1.4}$$

olarak belirlenir. Burada;

F_Z : Z yönündeki kuvvet

B_m: Burun iniş takımı

B_n: Ana iniş takımı

W: Uçağın ağırlığı

B: Aks mesafesi

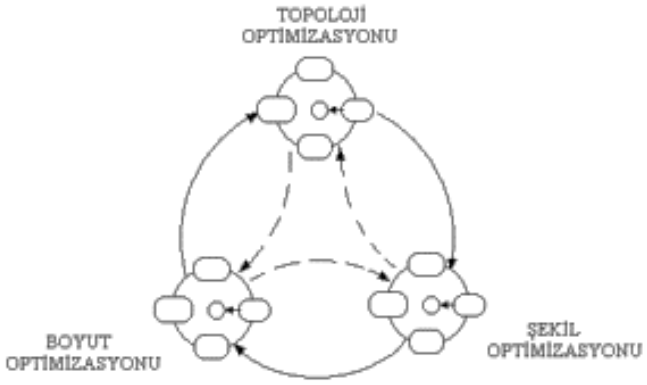
Cg: Ağırlık Merkezi

olarak belirtilmiştir.

Şekil 1.14’ de görüldüğü üzere de ana iniş takımı üzerindeki yükler ½ oranında eşit olarak bölünmektedir. Yani her bir ana iniş takımı, gelen toplam yükün yarısını karşılayacaktır.

2. YAPISAL OPTİMİZASYON

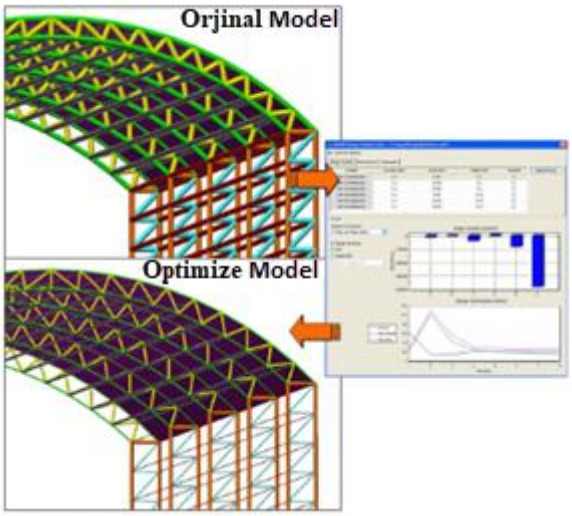
Yapısal optimizasyon, belirli sınır koşulları ve kısıtlar altında, verilen tasarımın topolojisinden başlayarak malzeme dağılımının ya da sınırlarının şekilleri değişerek en uygun (optimum) tasarıma ulaşılması olarak tanımlanmaktadır (Junk vd., 2018). Yapısal optimizasyon, ağırlık azaltılması, ısı iletimini maksimize etmek, daha fazla enerji sönümleme yeteneği, rijitlik gibi sebeplerden dolayı kullanılmaktadır. Genel olarak yapısal optimizasyon boyut, şekil ve topoloji optimizasyonu olmak üzere üç başlıkta incelenmektedir (Şekil 2.1). Literatürde bilinen en eski yapısal optimizasyon yöntemi boyut optimizasyonudur. Günümüzde bazı kaynaklarda topografya optimizasyonu da yapısal optimizasyon başlığı altında incelenmektedir (URL-6, 2023).



Şekil 2.1 Yapısal optimizasyon türleri (URL-7, 2023).

2.1 Boyut Optimizasyonu

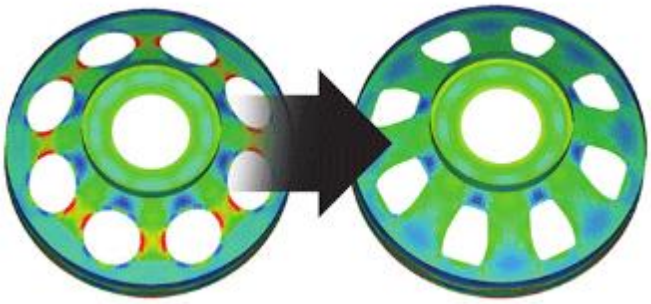
Boyut optimizasyonu, önceden belirlenmiş geometrik ölçülerin değiştirilerek belirli konfigürasyonlar sonucunda, tasarımın et kalınlığı, genişlik ve uzunluğu gibi değerlerini optimum seviyeye çıkarılmasıdır. Boyut optimizasyonunda bağlantı elemanlarının şeklinde herhangi bir değişiklik sağlanmamaktadır (Huawang, 2016). Şekil 2.2'de boyut optimizasyonu görsel olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.2 Boyut optimizasyonu (URL-7, 2023).

2.2 Şekil Optimizasyonu

Şekil optimizasyonu, yapılardaki delik ve kiriş benzeri geometrilerin şeklinin, parçanın titreşim, mukavemet ve çeşitli mekanik özellikleri açısından farklı konfigürasyonlar sonucunda en iyi performansı elde etmek için belirlenmesi amacıyla kullanılmaktadır. Hem iki boyutlu hem de üç boyutlu tasarımlara uygulanabilmektedir. Şekil 2.3'te şekil optimizasyonu gösterilmektedir.

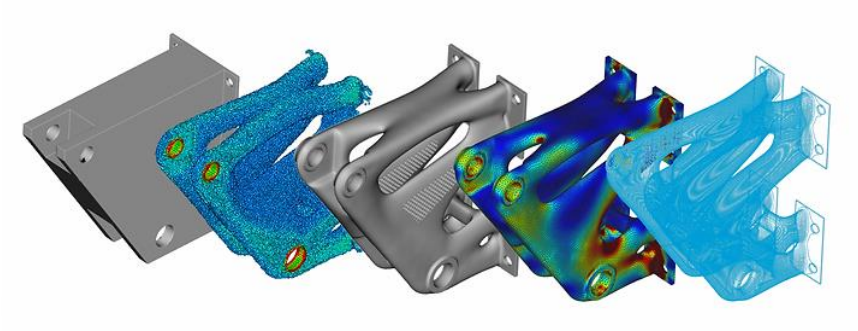


Şekil 2.3 Şekil Optimizasyonu (URL-7, 2023).

2.3 Topoloji Optimizasyonu

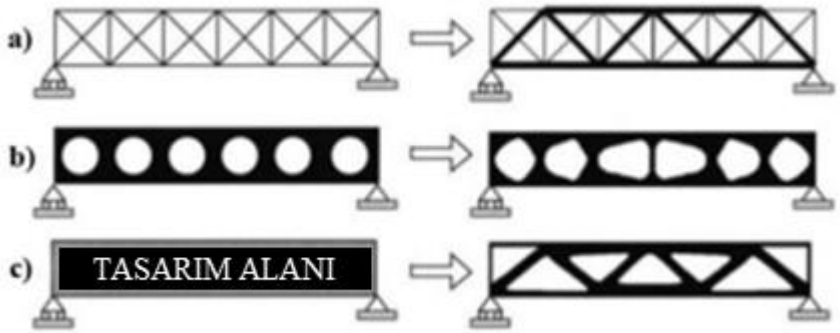
Yapısal optimizasyon, verimli yapısal kavramlar ve formlar oluşturmak için mühendisler tarafından daha sık kullanılmaya başlanmıştır (Gysen, 2011; Huawang, 2016). Topoloji optimizasyonu, yapısal optimizasyonun en genel biçimini sunarak

yapı geometrisi ve boyutlarının optimize edilmesine olanak tanır (Şekil 2.4). Yapısal optimizasyonun diğer iki prosesi olan şekil ve boyut optimizasyonundan farklı olmak üzere topoloji optimizasyonu, boyut, şekil ve tasarımsal açıdan yeni topolojiler oluşturarak farklı bir yaklaşım sergilemektedir (Yildiz, 2008; Yildiz, 2017).



Şekil 2.4 Topoloji Optimizasyonu (URL-8, 2023).

Topoloji optimizasyonu sürecinde tasarım alanı, sınır koşulları ve yükleme koşullarının bilinmesi gerekmektedir. Bu parametrelerle uygulanan topoloji optimizasyonu sonucunda daha ayrıntılı bir tasarım ya da farklı bir tasarım oluşturulabilir. Yapısal optimizasyonun bileşenleri olan şekil (a), boyut (b) ve topoloji (c) optimizasyonunun bir arada karşılaştırılması Şekil 2.5'de verilmiştir.



Şekil 2.5 Yapısal optimizasyon türlerinin karşılaştırılması (Gebisa ve Lemu, 2017).

Optimizasyon yapılması planlanan parçalara, çeşitli optimizasyon yazılımları aracılığıyla boşaltılacak malzeme miktarını, gerilme değerlerini ve yer değiştirme miktarları gibi kısıtları tanımlayarak istenilen hedefler doğrultusunda en uygun şekilde optimizasyon yapılması sağlanmaktadır.

Her üretim yapan firma için imal edeceği ürün için en önemli problem en iyi tasarımı elde ederken maliyetini en aşağıda tutarak en fazla performans elde etmektir. Elde edilen tasarımın ekonomik olarak üretilebilir olması için öncelikli olarak düzgün bir şekle sahip olması, geleneksel imal yöntemlerine uygun olması gerekmektedir. (Yıldız, 2017). Bir ürünün maliyetini ve performansı ürünün şekli doğrudan etkilemektedir.

Geleneksel üretim yöntemlerine uygun olmayan karmaşık parçalar, eklemeli imalat teknolojisinin yaygınlaşması sayesinde üretilebilir hale gelmeye başlamıştır. Üretici firmalar üreteceği ürünlerin en iyi tasarıma sahip olması ve en düşük maliyet ile üretilmesini hedeflerler. Topoloji optimizasyonu uygulanarak aynı işlevselliğe sahip parçalar üretilmeye başlanmış ve fazla hammadde maliyeti olmadan üretilebilirliği sağlanmaktadır. Hammadde maliyeti azalsa da eklemeli imalat teknolojileri ile bir ürünün seri imalatı bazen daha maliyetli durumlara gelebilmektedir. Bu sebepler yüzünden endüstride geleneksel imalat yöntemlerine uygun olarak karmaşık ve hafif yapılar üretilmesi hedeflenmektedir (Bendsoe ve Sigmund, 2005).

Topoloji optimizasyonunun uygulanması için birçok yöntem mevcuttur. Bu yöntemler üç temel formasyonda kategorize edilmektedir. Bunlar; homojenizasyona dayalı yapısal optimizasyon, yoğunluğa dayalı optimizasyon ve evrimsel yapısal optimizasyonlarıdır.

2.3.1 Homojenizasyon Yöntemi

Homojenizasyon yönteminde tasarım alanında bulunan her bir bölgesindeki malzeme miktarı tasarımın değişkeni olarak kabul edilmektedir. Algortima, hangi alanın malzemeye sahip olacağına ve olmayacağına karar vermektedir.

Makro ölçekli yapılardaki her nokta, bir mikro yapının periyodik olarak tekrarını temsil etmektedir. Homojenizasyon yöntemi mikro yapıda bulunan ve herhangi bir materyal içermeyen ‘boyut=1’ izotropik malzeme, ‘boyut=0’ ortoropik malzeme ve ‘0<boyut<1’ materyal içeren üç farklı malzeme grubuna ayrılır. Hacim ve kütle sınırlamasında bulunarak model üzerinde istenilen mekanik özellik olarak minimum

esneklik ya da maksimum sertlik seçenekleri ile optimum yapıyı bulmaya çalışır (Bendsoe ve Sigmund, 2003).

2.3.2 Yoğunluk yöntemi

Yoğunluk yöntemi, optimizasyon yapılması planlanan yapıların üzerinde sonlu elemanlar yöntemi ile arka plan oluşturması fikri sonucunda 1993 yılında ortaya atılmıştır. Yoğunluk yöntemine göre malzemelerin yoğunluklarının fiziksel özellikleri değişken olarak belirtilmektedir. Bu yönteme ait young modülü bağıntısı denklem 2.1 de verilmiştir.

$$p^n = \left(\frac{p_i}{p_0}\right) = \frac{E_i}{E_0} \tag{2.1}$$

Burada tasarım alanındaki malzeme dağılımı ayrıklaşmış alandaki elemanların bağıl yoğunluğuna sahip skaler alanla temsil edilir. Burada p değeri p=1 katı ve p=0 boş anlamına gelmektedir. E_i ara yoğunluğu, E_0 malzemenin gerçek yoğunluğu ve n ise yoğunluğu belirlemede üs olarak temsil edilmektedir. Bağıl yoğunluğun değeri ne olursa olsun, her elemanın içindeki malzemelerin homojen ve izotropik olduğu varsayılmaktadır.

p değeri sıfır ile bir arasında bir değere sahiptir. Eğer elemanın boşaltılacağı ifade edilecekse yoğunluğu sıfır olarak ifade edilir, tasarım bölgesinde kalması için ise bir olarak ifade edilir. E_i ara malzeme yoğunluğu olarak E_0 ise gerçek malzeme yoğunluğu olarak ifade edilir. n malzeme yoğunluğunu belirlemek için üst olarak kullanılır. n'nin birden büyük olması ara yoğunluk olarak ifade edilir. Bu yoğunluğun sıfır veya bir olması için zorlanır. Bendsoe ve Sigmund tasarım alanı içindeki heterojen bir malzeme dağılımının, yani katı malzeme ve boşluğun mikro yapısının, bir ara yoğunluğun beklenen malzeme özelliklerine uyduğunun bulunabilir olduğunu söylemişlerdir (Bensoe ve Sigmund, 2003). Yoğunluk yöntemi, sonlu elemanlar ayrı tasarım değişkeni kabul ettiğinden homojenizasyon yönteminden farklı olarak anılmaktadır.

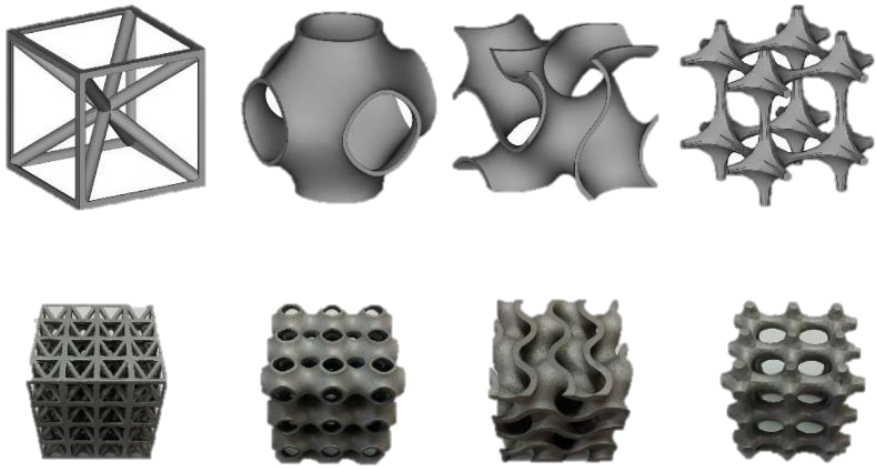
2.3.3 Evrimsel Yapısal Optimizasyon / ESO

Steven ve Xie (1993) tasarım alanı olarak popülasyon kullanılan bir metot geliştirmişlerdir. En iyi sonuca ulaşıncaya dek sürekli döngü halinde olduğu bir optimizasyon yöntemidir. Evrimsel yapısal optimizasyonunda maksimum direnç ve minimum ağırlık hedefiyle malzeme çıkarım işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu parametreler dahilinde her seferinde malzeme çıkarılarak en iyi sonuca ulaşmaya çalışır.

2.4 Kafes Optimizasyonu

Eklemeli imalat teknolojisinin en önemli özelliklerinin başında karmaşık ve detaylı parçaları üretebilmesi gelmektedir. Karmaşık ve detaylı geometrilere en güzel örnek kafes yapılar olarak düşünülmektedir. Geleneksel üretim yöntemleriyle üretimi pek mümkün olmayan karmaşık kafes yapılar günümüzde üç boyutlu yazıcılar sayesinde üretilmekte ve belirli yapılarda kullanılmaktadır.

Kafes yapılar hafif ağırlık, yüksek özgül mukavemet, yüksek enerji sönümleme yetenekleri ve ısıyı dağıtması gibi mükemmel özelliklerinden dolayı havacılık ve otomotiv sektörlerinde yaygın şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Kafes yapılar, doğal hücresel yapılara göre daha düzenli bir konfigürasyona sahip olduklarından dolayı fiziksel özellikleri kontrol etmek mümkündür. Kafes yapıların mekanik özellikleri topoloji optimizasyonu uygulanarak ya da bağıl yoğunluğu değiştirilerek kontrol edilebilmektedir. Kafes yapılar birim hücre diye adlandırılan tekli yapının periyodik olarak tekrarlanması sonucu ile oluşmaktadır. Literatürde birçok kafes yapısı kullanılmaktadır. Literatür gözlemlendiğinde kafes yapısı türlerinin her biri farklı karakteristik özellikler göstermektedir. Örneğin balpeteği yapılar basma yüküne maruz kalan parçalarda kullanılırken, gözenekli köpük yapılar eğme yüküne maruz kalan parçalarda daha sık kullanılmaktadır. Şekil 2.6'da birim hücrenin periyodik olarak çoğaltılmasıyla oluşturulmuş kafes yapılar verilmiştir.



Şekil 2.6 Kafes Yapılar (Teng vd., 2022)

Kafes yapıların mekanik özellikleri, gözenekliliği ve gözenek yapısı ile doğrudan ilgilidir. Kafes birim hücresini daha sık tekrarlayarak, daha yoğun yapılar ve buna bağlı olarak daha gözeneksiz yapılar oluşacağından mekanik özellikleri önemli ölçüde artacaktır fakat bunula doğru orantılı olarak parçanın ağırlığında da bir artış meydana gelecektir. Kafes yapıların kullanılacak malzemenin amacına göre en optimum şekilde tasarlanması gerekmektedir. Kafes optimizasyon yöntemi iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada klasik olarak topoloji optimizasyonu, ikinci aşamada ise boyut optimizasyonu uygulanmaktadır. Şekil 2.7'de Kafes optimizasyonu için akış şeması gösterilmiştir.

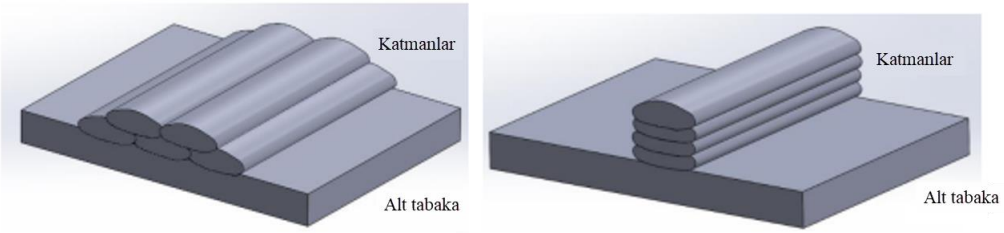


Şekil 2.7 Kafes optimizasyonu akış şeması

3. EKLEMELİ İMALAT

İmalat endüstrisi, rekabetin en üst düzey olduğu sektörlerden biridir. Şirketler, rekabet avantajını elde etmek için sürekli olarak ürün geliştirmeyi ve araştırmayı benimsemelidir. Bununla birlikte şirketlerin üretim teknolojilerinin gelişimini ihmal etmemesi gerekmektedir (Ahlskog, 2015). İmalat endüstrisinde geleneksel yöntemler olan Talaşlı imalat (Torna, freze) ve talaşsız imalat (döküm, dövme) sıklıkla kullanılıyor olsa da eklemeli imalatta sektörde oldukça kullanım alanına sahip olmaya başlamıştır.

Eklemeli imalat ASTM (American Society For Testing Materials) tarafından birleştirme süreci olarak tanımlanmaktadır. Eksiltmeli üretim metotlarının aksine, çoğunlukla katman, üç boyutlu model verilerinden nesne yapmak için malzemeleri birleştirme süreci olarak tanımlanır (Yang ve Zhao, 2015). Eklemeli imalatta polimerler, metaller gibi çeşitli malzemeler kullanarak özel makineler ya da 3d yazıcılar aracılığıyla Modelleme, prototipleme ve takımlama yapılmaktadır. Eklemeli imalatın ana düşüncesi Bilgisayar destekli tasarım (CAD) modeline ya da tersine mühendislik metodolojisine dayanan karmaşık geometrileri katman biriktirme yöntemiyle oluşturmaktır (Gardan, 2016). Şekil 3.1'de eklemeli imalatta katmanların oluşmasına ilişkin görsel yer almaktadır.



Şekil 3.1 Eklemeli İmalatta Katmanların Oluşması (Özsolak, 2019).

Eklemeli imalat teknolojisinin öncelikli kullanım amaçları;

- Karmaşık veya kafes geometrilerin imalatı için,
- İmalat sürelerinin azaltılması için,
- Üretim ve yatırım maliyetlerinin düşürülmesi,

- Küçük ölçekli ya da özel üretimlere uygunluğu olmak üzere eklemeli imalatın kullanım amaçları sıralanabilir (Gibson vd., 2010).

Eklemeli imalat teknolojisinde parça üretimi için izlenilmesi gereken adımlar aşağıda sıralanmıştır (Şekil 3.2).

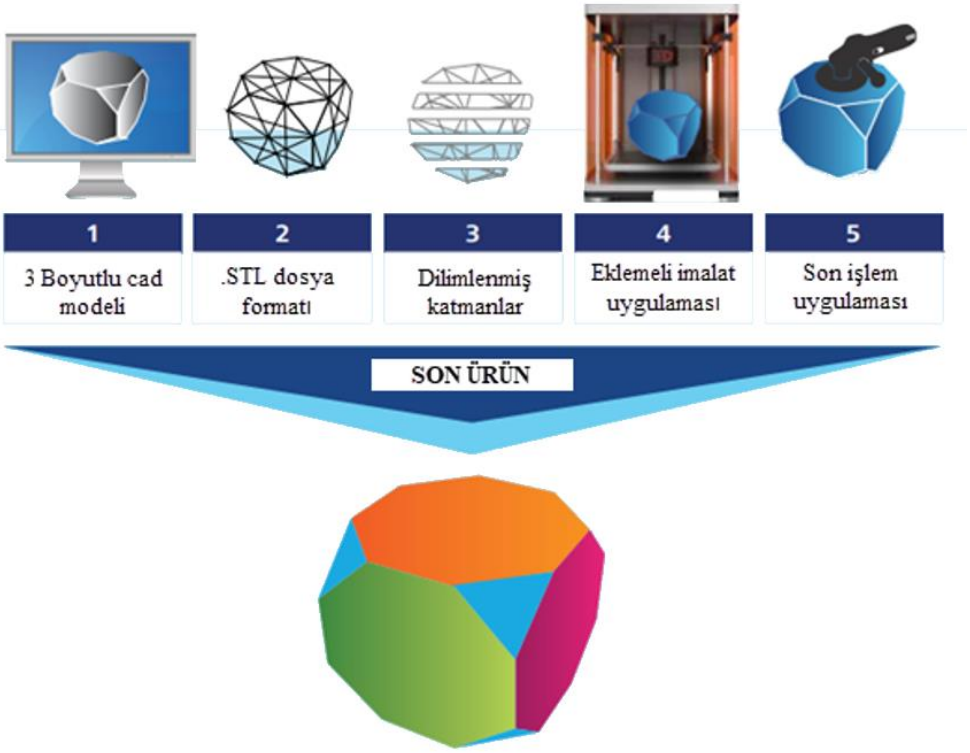
1. Parçanın CAD tasarımı: Eklemeli imalat yöntemiyle ürün üretilebilmesi için öncelikle belirli yazılımlar aracılığıyla CAD modelinin oluşturulması sağlanmalıdır.

2. Tüm CAD modellerini farklı eklemeli imalat teknolojilerine uyarlamak için standart olarak STL dosya formatı kullanılır. SLC, SLI, HPGL ve IGES gibi başka dosya türleri de vardır ancak STL her eklemeli imalat yöntemi için standart olarak kullanılabilir. Oluşturulan 3 boyutlu CAD modeli STL dosya formatına dönüştürülerek Kullanılacak olan arayüz programına aktarılmak üzere hazırlanmalıdır. STL dosya formatı oluşturulan 3 boyutlu modelin yüzeyini üçgen geometrilere bölerek modelin daha basit şekilde gösterilmesini sağlar (Gibson vd., 2010).

3. STL dosya Cura gibi yazılımlara aktarılarak oluşturulan modeli 2 boyutlu tabakalara dilimler. Baskı için kullanılacak olan tabaka sıcaklığı, nozul sıcaklığı, yazdırma hızı gibi veriler yine bu program aracılığı ile belirlenir.

4. Üretilmeye hazır olan dilimlenmiş modelin gCode formatındaki verisi üretimin yapılacağı 3 boyutlu yazıcıya gönderilir.

5. Son işlem uygulamasında parçanın kullanım amacına uygun olarak gerekli fiziksel ve yüzey özelliklerini elde etmek için işlemler uygulanır ve nihai ürün elde edilir.



Şekil 3.2 Eklemeli imalatta parça üretimi için gerekli adımlar (Gibson vd., 2010)

3.1 Eklemeli İmalat Teknolojisi

Eklemeli imalat teknolojisinin mevcutta bulunan farklı işleme metotları bulunmaktadır. Her işleme metodu için farklı kategorilerde özel üretim teknolojisi kullanılmaktadır. Bu üretim teknolojilerine göre farklı özellikte ürünler ve kalite seviyeleri oluşturulmaktadır. ASTM uluslararası standardına dayalı olarak farklı kategorilere ait bazı eklemeli imalat yöntemleri ve bu yöntemlerde kullanılan malzemeler Tablo 3.1'de kategorize edilmiştir (Gibson vd., 2010).

Malzeme esktrüzyonu, toz yatağı füzyonu, fotopolimerizasyon, malzeme püskürtme, yapıştırıcı püskürtme, sac laminasyon ve direkt enerji depolama eklemeli imalat yöntemleri günümüzde bilinen yöntemlerdir. İçerisinde ergiyik yığılma modelleme teknolojisi bulunan malzeme ekstrüzyonu, Seçici lazer sinterleme teknolojisini içerisinde barındıran toz yatağı füzyonu ve stereolitografi teknolojisiyle üretimler gerçekleştirilen fotopolimerizasyon yöntemi en çok kullanılan eklemeli imalat yöntemlerindendir.

Tablo 3.1 Eklemeli imalat teknolojisinde kullanılan yöntemler (Gibson vd., 2010)

Kategori	Teknoloji	Malzeme	Güç kaynağı
Malzeme ekstrüzyonu	Ergiyik yığma modelleme Kontur üretimi	Termoplastik Seramik Metal macunlar	Termal enerji
Toz yatağı füzyonu	Seçici lazer sinterleme (SLS) Direkt metal lazer sinterleme(DMLS) Elektron ışın eritme Seçici lazer eritme (SLM)	Poliamid Polimer Titanyum Metal tozları Paslanmaz çelik	Yüksek güçlü lazer ışını Elektron ışını
Fotopolimerizasyon	Stereolitografi (SLA)	Seramik tozları Fotopolimer seramikler Alümina,zirkonya	Ultraviyole ışın
Malzeme püskürtme	Polijet püskürtme Mürekkep püskürtme	Fotopolimer	Termal enerji Kürleme
Yapıştırıcı püskürtme	Dolaylı mürekkep püskürtme	Polimer tozları Reçine Seramik tozları Metal tozları	Termal enerji
Sac laminasyon	Lamine nesne üretimi	Plastik film Metal sac Seramik bant	Lazer ışını
Dierkt enerji depolama	Elektron ışın kaynağı Lazerde şekillendirme	Metal tozları	

3.1.1 Malzeme Ekstrüzyonu

Malzeme ekstrüzyonu yönteminde, ergimiş olan hammaddenin bir tablanın ya da bir önceki katmanın üzerinde birikmesiyle oluşmaktadır. Malzeme ekstürüzyonunda kullanılan malzemeler termoplastik polimerlerden oluşmaktadır. Endüstride kullanılmasının yanında bireysel olarak çok yaygın kullanılması da bu teknolojiyi dünya çapında en çok tercih edilen eklemeli imalat prosesi konumuna getirmiştir (Wang vd., 2019).

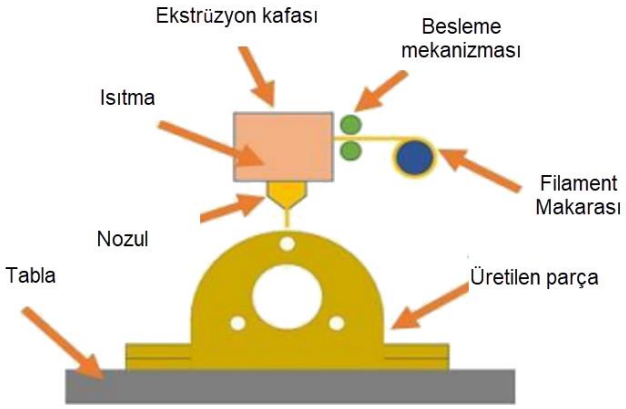
3.1.1.1 Ergiyik yığma modelleme

Eklemeli imalat yöntemlerinin başlıcalarından olan Ergiyik Yığma Modelleme (EYM) literatürde Fused Deposition Modelling olarak geçmektedir. EYM'de polilatktik asit (PLA), Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS) başta olmak üzere Polikarbonat (PC), Polieterketonketon (PEKK), Polieterimid (PEI) gibi polimer malzemeler kullanılmaktadır (Hill ve Haghi, 2014). EYM teknolojisinde kullanılan bazı malzemelerin mekanik özelikleri Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.2 EYM teknolojisinde kullanılan bazı malzemelerin özellikleri (Hill ve Haghi, 2014)

Malzeme	PLA	ABS	HIPS	FILEXIBLE	PVA	WOOD	PA
Baskı sıcaklığı	190-220°C	220-240°C	220-240°C	190-210°C	190-210°C	190-220°C	235-270°C
Özkütle	1.25±0.05g/cm³	1.04±0.2g/cm³	1.04±0.2 g/cm³	1.25±0.05g/cm³	1.25±0.05g/cm³	1.25±0.05g/cm³	1.20±0.05g/cm³
Eriyik akış hızı	5~7g/10 min (190°C, 2.16Kg)	2~4g/10min (190°C, 2.16Kg)	2~5g/10 min (200°C, 2Kg)	3~6g/10min (190°C, 2.16Kg)	4~4g/10 min (190°C, 2.16Kg)	5~7g/10 min (190°C, 2.16Kg)	19~21g/10min
Su absorbsiyonu	0.50%	1.0%	1.0%	0.50%	0.50%	0.50%	0.50%
Çekme dayanımı	260MPa	243Mpa	230Mpa	235Mpa	210Mpa	260Mpa	260Mpa
Eğme modülü	260Mpa	260Mpa	260Mpa	235Mpa	215Mpa	260Mpa	22200Mpa
Kopma uzaması	23.0%	210.0%	250%	2500%	211%	22.0%	250%

EYM metodunun en temel avantajlarından biri makine yatırım ve kullanım maliyetleri açısından uygun olması ve ev şartlarında kullanılmasına imkân tanımasıdır. EYM metodunda rulo halinde bulunan polimer malzemenin teflon borudan geçerek yazıcının ekstruder kısmına filament bağlantısı sağlanır. Ekstruderin alt kısmında bulunan hotend olarak adlandırılan parça, kullanılan filamenti yüksek sıcaklıklara çıkararak gerekli akışkanlığına ulaşmasını sağlar ve en uç kısmında bulunan nozulun uç kısmından dışarıya çıkmasına imkân tanır. Günümüzde bazı yazıcılarda tabla, bazı yazıcılarda ise ekstruder bölgesi X ve Y ekseninde hareket ederek nozuldan ince şeritler halinde çıkan filamentin tabla üzerinde katman katman biriktirilmesi ile istenilen parça oluşturulmaya başlanır. Şekil 3.3'de EYM metodunun şematik çalışma prensibi gösterilmiştir.



Şekil 3.3 EYM prosesi üretim şeması

EYM ile çok hassas ve karmaşık parçaların üretimi gerekebilir. Savunma sanayi, otomotiv endüstrisi, sandviç yapılar, kafes ve hücresel yapılar, diş hekimliği uygulamaları gibi çok çeşitli kullanım alanları vardır. Bazen bu sektörlere karmaşık parçaların üretimi gerekebilir. Bu parçaların sarkan yüzeylerinin üretilebilmesi için destek yapılarına ihtiyaç vardır çünkü eritilmiş bir malzemenin havada üretilmesi fizik kurallarına göre mümkün değildir. İşlem sonrasında bu destekleri kaldırmak için belirli materyaller kullanılmaktadır. Desteklerin kaldırıldıktan sonra istenilen yüzey pürüzlülüğü elde edilmesi için bazen ikinci bir işleme de ihtiyaç duyabilmektedir (Kumar vd., 2004)

3.1.1.2 Kontur üretimi

Metal ekstrüzyon yöntemlerinin bir diğeri olan kontur üretimi, EYM den farklı olarak termoplastik polimerler yerine Kerpiç ve beton türü yapı malzemeleri ile bina ve yapı üretimi konusunda eklemeli imalat teknolojisi olarak ele alınmaktadır. Kontur üretimi yine EYM metodu gibi tasarlanan CAD modelin gCode formatında kaydedilerek malzemenin katman katman biriktirilmesi esasına dayanmaktadır (Lim vd., 2009). Kontur üretim sistemine ilişkin uygulama Şekil 3.4’ te verilmiştir.



Şekil 3.4 Kontur üretimi prosesinin üretim şeması

Geleneksel üretim yöntemleri ile karşılaştırıldığında kontur üretiminin inşaat endüstrisinde kullanılması hem maddi hem de çevresel açıdan birçok avantajı beraberinde getirmektedir Pahalı kalıpları ve yüksek sayıda işçi ihtiyaçlarını ortadan kaldırarak inşaat maliyetlerini düşürmesi, tehlikeli işlerde yaralanma oranlarının minimize edilmesi, inşaat süresinin azaltılması, hassas üretimde hata payını minimuma indirme durumu, estetik ve yapısal olarak mimari özgürlük sağlanması, atık miktarının azaltılması, karmaşık geometrik yapılardan faydalanarak işlevselliğinin arttırılması gibi bir çok fayda sağlamaktadır (Buswell vd., 2007; Gosselin vd., 2016; Nematollahi vd., 2017).

3.1.2 Toz Yatağı Füzyonu

Toz yatağı füzyonu bir metal tozu yatağı üzerinde bilgisayar kontrollü bir lazer kullanarak numunenin katman katman oluşturulduğu eklemeli imalat tekniğidir (Hagedorn vd., 2013). Hagedorn vd. (2013) toz yatağı füzyonunu maddeler halinde şu şekilde açıklamışlardır.

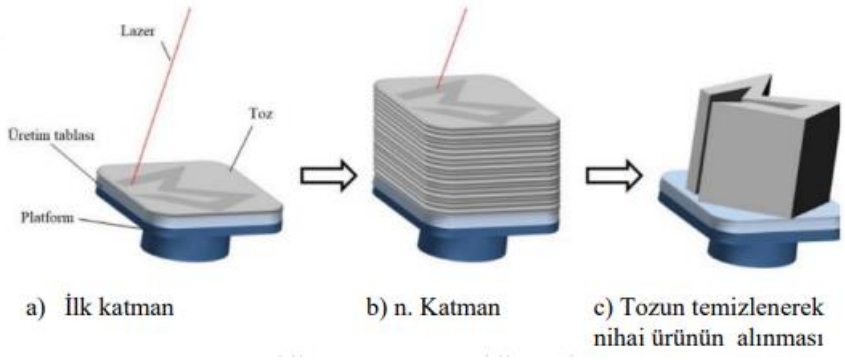
1. Bir kaplayıcı bıçağı, bir alt tabaka malzemesi üzerine toz yayar.
2. Lazer toz yatağının seçici alanlarını eritir. Geçici ergiyik havuzu sonunda tüm katmanı eritir ve ardından katılaştırır.
3. Platform açılır ve yeniden kaplayıcı tarafından yatağın üzerine yeni bir toz tabakası yayılır.

4. 2. adım ve ardından 3. adım tam parça oluşuncaya dek tekrarlanır.
5. Erimemiş toz işlem odasından çıkarılır.
6. Parçalar elektrik deşarjı ile taban plakasından çıkarılır.

Tüm bu işlemler oksidasyonu önlemek için argon gibi inert bir gazla dolu haznede gerçekleşir. Anahtar işlem parametreleri güç, hız, tarama ve katmanlardır. Bu parametrelerin işlenebilirlik üzerine güçlü bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir (Engeli vd., 2016; Hilal vd., 2019).

3.1.2.1 Seçici lazer sinterleme

SLS, DMLS ve SLM proseslerinin çalışma prensipleri birbirine oldukça yakındır. Yoğunluğu yüksek olan bir kızılötesi lazer, tabla üzerinde bir kat oluşturmak için toz halindeki malzemeleri eritir. Yeni toz önceden oluşturulmuş katmanın üzerine eklenir ve modeli birleştirmek için yeni tozu eritir. SLS uygulamasının en önemli özelliklerinden birisi destek yapılara ihtiyaç duymamasıdır. Kesintisiz bir şekilde gelen toz, üretilecek olan parçaya gerekli desteği sağlamaktadır. Bu şekilde SLS yöntemiyle üretilmesi çok zor olan geometrileri oluşturmak için kullanılabilir(Sutton vd., 2016). Şekil 3.5'te SLS yöntemine ait üretim şeması gösterilmiştir.



Şekil 3.5 SLS prosesi üretim şeması (Saleh vd., 2020)

3.1.2.2 Doğrudan metal lazer sinterleme

Doğrudan metal lazer sinterleme teknolojisinin çalışma tekniği Seçici lazer sinterleme teknolojisi ile aynıdır. Aralarındaki fark Seçici lazer sinterleme teknolojisi genellikle polimer ve seramik tozlar için kullanılıyorken DMLS teknolojisinin genellikle metal

tozları için kullanılmaktadır. Gerekli görüldüğü takdirde üretim tamamlandıktan sonra ısıl işlemler uygulanarak mekanik özelliklerinde değişim yapılabilir (Brice vd., 2015).

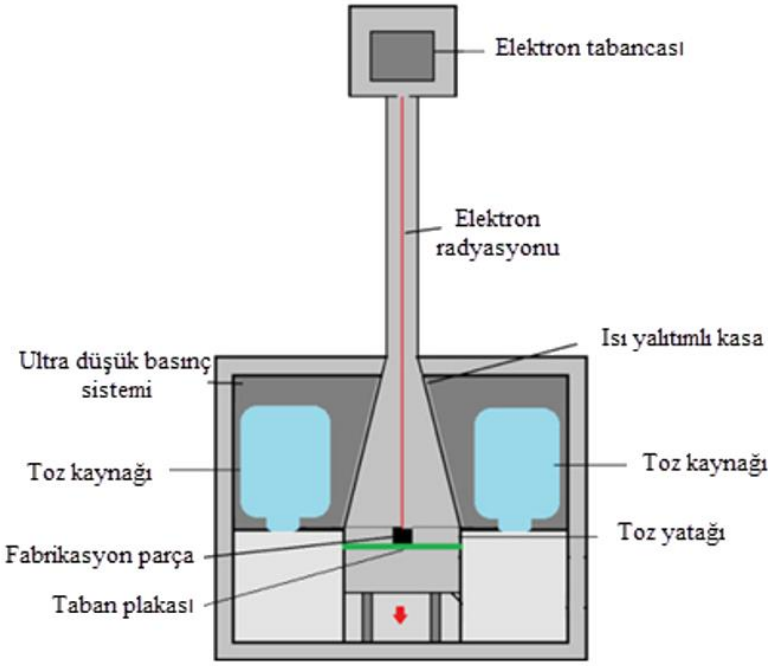
3.1.2.3 Seçici lazer eritme

Seçici lazer eritme teknolojisi, SLS ve DMLS teknolojisiyle oldukça benzer bir çalışma mantığına sahiptir. SLM teknolojisinin SLS ve DMLS teknolojilerinden farkı, sinterleme yapmayıp tozu doğrudan eriterek işlem yapmasıdır. Üretim için kullandığı malzemenin sıcaklığını ergime noktasının üzerine çıkarılmakta ve orada kaynaştırmaktadır. Titanyum ve alüminyum gibi metal tozlarından homojen parçalar imal ederek havacılık, otomotiv, biyomedikal endüstrisinde sıklıkla kullanılmaktadır. SLM teknolojisinde metallerin ergimesi için yüksek güce sahip lazer sistemleri gerekli olduğundan yatırım maliyetleri oldukça yüksektir ve kontrol etmesi zordur (Gibson vd., 2010).

3.1.2.4 Elektron ışın eritme

Elektron ışın ergitme teknolojisinde, bir elektron ışını yardımıyla toz partiküllerinin eritilerek bir araya getirilmesiyle oluşmaktadır. Odaklanmış halde ki elektron ışını, istenilen geometrik şekli odak alarak, serilmiş haldeki ince toz katmanını tarar, bu alan üzerinde kısmi ergitmeyi gerçekleştirdikten sonra eriyik haldeki maddenin katılaşmasıyla katman oluşumu sağlanmaktadır. SLS teknolojisnin çalışma prensibine oldukça benzemektedir. Aralarındaki fark SLS yönteminde sinterleme, EBM teknolojisinde ise eritme yapılmasıdır (Gibson vd., 2010).

EBM teknolojisi, yüksek mukavemetli ya da yüksek sıcaklıklara ihtiyaç duyulan uygulamalar için idealdir. EBM teknolojisi ile %95 oranında tozun geri kazanıldığı, dövme yolu ile elde edilmiş titanyum parçalar ile kıyaslanabilir vaziyette olduğu ve döküm yöntemiyle üretilen titanyum parçalardan daha nitelikli olduğu ifade edilmiştir. (Karakılınç vd., 2019). Şekilde 3.6'da EBM teknolojisinin çalışma şemasıyla ilgili görsele yer verilmiştir.



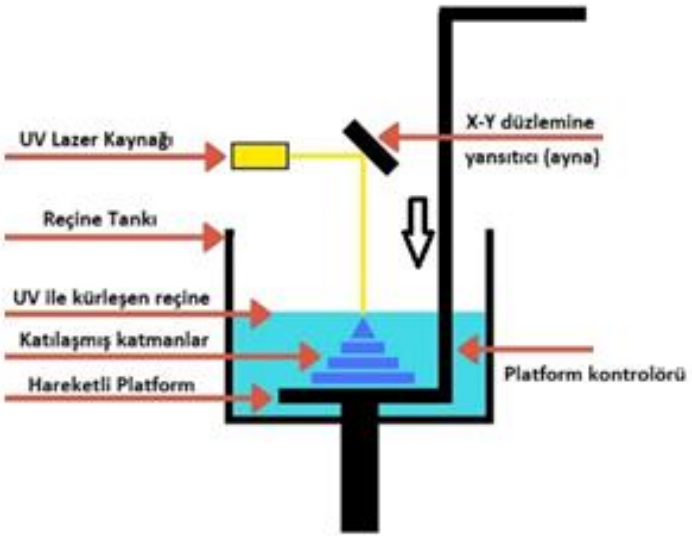
Şekil 3.6 EBM prosesi üretim şeması (Murr ve Gaytan, 2014)

3.1.3 Tekne Fotopolimerizasyon

Fotopolimerizasyon yöntemleri ışın ile katılaşan polimer malzemelerin kullanımına bağlıdır. Stereolitografi, Dijital ışık işleme ve sürekli dijital ışık işleme şeklinde farklı uygulamaları bulunmaktadır (Gibson vd., 2010).

3.1.3.1 Stereolitografi

SLA teknolojisi mor ötesi ışın ile katılaşabilen bir reçine yardımıyla 3B ürünler elde etmeye yarar. Şekilde gösterilen şemada lazer kaynağından çıkan mor ötesi ışın, üretilecek katmanın kesit görüntüsüne uygun olarak bir ayna vasıtası ile yansıtılarak reçinenin yüzeyini tarama işlemi gerçekleştirir ve temas ettiği reçine katmanını katılaştırır. İlk katmanın katılaştırılmasından sonra hareketli bir platform bir katman aşağıya inerek bir sonraki katmanın kürleştirilmesi işlemini başlatır. Lazer kaynağı aşağı veya yukarıdan katılaştırma işlemi yapabilir. Şekil 3.7'de yukarıdan katılaşmaya uygun şema gösterilmiştir.



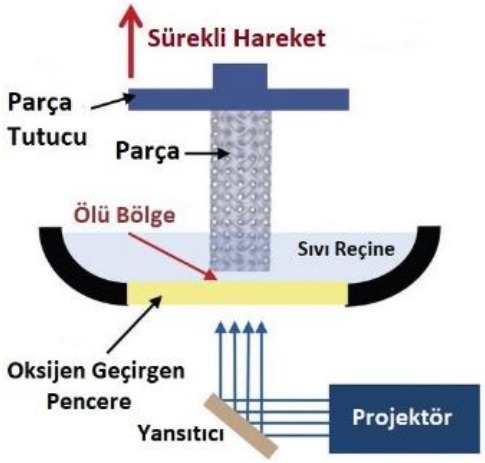
Şekil 3.7 SLA prosesinin üretim şeması (URL-9, 2023)

3.1.3.2 Dijital ışık işleme

SLA ve DLP teknolojilerinin temelde çalışma prensipleri oldukça benzemektedir. SLA teknolojisinde lazer ışını noktasal bir katılaşma yaparken, DLP teknolojisinde bir projektör tarafından ultraviyole ışık ile taranarak katılaştırılır. DLP teknolojisinde üretilmek istenen parçaların her bir üretim adımındaki kesit alanı bir bütün olarak yansıtılarak sertleştirme işlemi gerçekleştirildiği için büyük parçalarda üretim bir hayli hızlıdır (Gibson vd., 2010). Ancak SLA nokta nokta katılaştırma işlemi gerçekleştirdiğinden DLA ya göre daha hassas ve daha yüksek çözünürlükte malzeme üretimi gerçekleştirir. SLA teknolojisinde kullanılan lazer kaynakları, DLA teknolojisinden kullanılan ışık projektörlerine göre daha pahalıdır (Gibson vd., 2010).

3.1.3.3 Sürekli dijital ışık işleme

CDLP teknolojisi çok daha hızlı üretim için geliştirilmiştir. DLP isteminde olduğu gibi projeksiyondan gelen UV ışıklar ile bütün olarak katman taraması yapılır. DLP den farklı olarak CLDP de hareketli platform sürekli olarak yukarı yönde hareket eder. Katılaştırma katman katman değil sürekli olarak gerçekleşir. Şekil 3.8'de CLDP ye ait şema verilmiştir.



Şekil 3.8 CDLP prosesi üretim şeması (Başcı ve Yamanoğlu, 2022)

3.2 Eklemeli İmalat Yöntemlerinin Avantaj ve Dezavantajları

Eklemeli imalat teknolojilerinde kullanılan proseslere göre kırılgan, dayanıklı, yüzey pürüzlülüğü kötü, hassas, karmaşık gibi farklı özelliklerde ürün elde edilmektedir. Tablo 3.3'te üretildiği eklemeli imalat prosesine göre kullanılan malzemeler, avantajları ve dezavantajları verilmiştir (Yan vd., 2004).

Tablo 3.3 Eklemeli imalatta kullanılan yöntemler, avantaj ve dezavantajlar (Gibson vd., 2010)

Kategori	Malzeme	Avantaj	Dezavantaj
Fotopolimerizasyon	Fotopolimer Seramikler	Yüksek işlem hızı Yüksek yüey kalitesi	Yüksek hammadde maliyeti Yüksek kurulum maliyeti
Malzeme Ekstrüzyon	Metal macun Seramik Macun Termoplastik Polimer	Malzeme çeşitliliği Malzeme erişim kolaylığı Ucuz kurulum maliyeti	Kötü yüzey kalitesi
Toz yataklı ergitme	Poliamid Polimer Metal tozları Seramik tozları	Yüksek doğruluk Yüksek rijitlik Destek malzemesine ihtiyaç yok	Kötü yüzey kalitesi Uzun işlem süresi

3.3 Eklemeli İmalat Üretimi İçin Öncesi ve Sonrası İşlemler

Eklemeli imalat teknolojisinin en büyük avantajlarından birisi CAD verisinden direkt olarak üretilebilmesi olsa da Üretim öncesinde birtakım işlemler mevcuttur. Üretim

sonrası için yüzey kalitesinin artması, oluşturulan destek yapıların temizlenmesi gibi üretilen parçaya bazı proses uygulamaları gerekli olabilmektedir.

Literatürde gözlemlenen tüm eklemeli imalat çeşitlerinde dosya formatı olarak STL dosya formatı kullanılmaktadır. Bazı Eklemeli imalat proseslerinde farklı dosya formatları da kullanılabilmektedir. Tasarlanan CAD modeli direkt olarak üretmek için önce CAD verisinin tasarlandığı yazılımda STL olarak kaydedilir. STL dosya formatında parçalar üçgen geometrilerle temsil edilmektedir. Bu nedenle eğri yüzeylerde geometrik hatalarla sık sık karşılaşılmaktadır. Üçgen geometrilerin bir hacim oluşturabilmesi için kapalı olması gerekmektedir. Tam kapalı hazne oluşturmayan üçgenler üretim esnasında hatalı geometrilere neden olmaktadır. STL dosya formatında sadece üçgenleri temsil eden üç noktanın üç koordinatı vardır ve her üçgen için üç yüzey normali bileşeni bulunmaktadır. Başka bir veri içermediğinden dolayı üretim ve sınır koşulları gibi bilgileri aktarmak mümkün değildir (Ahn vd., 2007).

Genel olarak üretim öncesi hazırlık aşamasının planlandığı kısım dörde ayrılmıştır. Bunlar; üretim öncesi yapı oryantasyonunun belirlenmesi, destek yapıların oluşturulması, model dilimlenmesi ve yapı oryantasyonu belirlenmesidir (Ahn vd., 2007).

Destek yapıları üretimin daha başarılı bir sonuçla gerçekleştirilmesi için oluşturulmaktadır. Genellikle EYM metodunda destek üretimde destek yapılara çoğu zaman ihtiyaç duyulmaktadır. Eklemeli imalat teknolojisinin bazı yöntemlerinde destek yapılara ihtiyaç duyulmadan da üretim sağlanabilmektedir. Destek yapılar üretim için kolaylık sağlıyor olsa da birtakım dezavantajları bulunmaktadır. Destek yapılar üretim aşamasında işlem süresini uzatmakta ve fazla hammadde kullanılmasına neden olmaktadır. Bazı eklemeli imalat teknolojilerinin hammaddesi oldukça değerli olduğundan eklemeli imalat prosesinde önemli bir yere sahiptir. Üretim sonrasında ise destek yapıların temizlenmesi gerektiği için işçilik ve ek maliyetler ortaya çıkmaktadır. Eklemeli imalat teknolojisine göre destek yapıların farklı avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır (Gibson vd., 2010).

Parçalar üretildikten sonra parçanın CAD ortamında tasarlanan haline dönmesi için üretim sonrasında birtakım işlemler yapılması gerekebilmektedir. Eklemeli imalat teknolojisinde literatürde merdiven etkisi olarak isimlendirilen bir takım yüzeysel hatalar ile karşılaşılmaktadır. Merdiven etkisi açı ve eğim olan yüzeylerde daha belirgin bir şekilde gözlemlenmektedir. Destek yapılarının ayrılması dolayısıyla oluşan yüzeylerde de zımparalama gibi bir takım işlemler yapılması gerekmektedir (Diegel vd., 2019).

3.4 Eklemeli İmalat Yöntemi ile Geleneksel Üretim Metotlarının Karşılaştırılması

Talaşlı imalat geçmişten beri sıkça kullanılan ve malzeme eksiltmeye dayalı bir imalat yöntemidir. Geleneksel imalat yöntemleri bütün bir malzeme ile işleme başlanır ve kesici takım yardımı ile son şekle gelinceye kadar talaş kaldırma gerçekleşmektedir. Eklemeli imalat ise üç boyutlu yazıcılar kullanarak adından da anlaşılacağı şekilde malzeme eklemeye dayalı bir imalat yöntemidir. Hammadde ergiyik bir şekilde nozula gelerek istenilen yapıya katman katman imal edilerek ulaşılır. Eklemeli imalat yönteminde metaller, plastikler gibi birçok malzemeler için kullanılsa da halen talaşlı imalat yönteminde kullanılan malzemeler kadar çeşitliliği bulunmamaktadır. Eklemeli imalat, talaşlı imalata göre daha yavaş bir imalat çeşididir. Eklemeli imalat yönteminde hurda olarak sadece destek malzemeler bulunmaktadır. Talaşlı imalatta ise oldukça fazla hurda malzeme çıkmaktadır. Bu durum maliyet ve zaman kayıplarına yol açmaktadır. Eklemeli imalat teknolojisinde yüzey pürüzlülüğü gibi fiziksel problemler bulunmaktadır. Eklemeli imalat işleminden sonra bazı talaş kaldırma ve zımparalama işlemleri yapılması gerekebilmektedir.

İki imalat yöntemi de bir arada değerlendirildiğinde genel olarak eklemeli imalat ile üretilen tüm yapıların geleneksel üretim metodları ile işlenmesi uygundur. Eklemeli imalat, geleneksel yöntemler ile üretilemeyecek derecede karmaşık yapıların üretilmesi için daha uyundur. Mühendislik yapıların optimizasyonu firmalar arasında rekabet gücünü arttırmak adına neredeyse zorunluluk haline gelmiştir. Bu nedenle komplike mühendislik yapıları sadece eklemeli imalat yöntemi ile üretilebilmektedir. Acil ve düşük ölçekli imalat gerekli olduğu zamanlarda eklemeli imalat ile üretim

zaman ve maliyet kazancı sağlamaktadır. Sonuç olarak her imalat yönteminin kendine has avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Mühendislik açısından her imalat yöntemini önemlidir ve her imalat yönteminde bulunan dezavantajlarını kaldırabilmek için hibrid imalat yöntemlerine de yönelmek gerekmektedir. Optimizasyon yapılırken her imalat yönteminin avantajları ve dezavantajlarını bilmek ve ona uygun tasarım yapmak zaman, maliyet ve süreç açısından çok önemlidir.

3.5 Eklemeli İmalat Teknolojilerinin Uygulama Alanları

Eklemeli imalat teknolojisi havacılık, otomotiv, eğitim, medikal ve diğer sektörlerde kullanım alanı sürekli genişleyen bir imalat prosesidir. Wohlers (2018) yayınladığı rapora göre eklemeli imalar teknolojisi 2017 yılında 7,3 milyar dolar hacmine ulaşmıştır (Wohler Reports, 2018).

Havacılık endüstrisinde eklemeli imalat teknolojisi zaman yönetiminin azaltılması, üretim maliyetlerinin düşürülmesi ve uçakların imalatında kullanılan parçaların ağırlıklarını azaltmak amacı ile kullanılmaktadır. Ayrıca uçakların bozulan parçalarını üretme teknolojisi olmayan ülkeler eklemeli imalat teknolojisi sayesinde kısa zamanda ve düşük maliyetle tamir edebilme ve üretebilme imkanına erişebilmektedirler (Huang vd., 2016).

Otomotiv endüstrisinde ilk başlarda prototip üretilmesi için kullanılsa da artık araçlarda kullanılabilecek son nihai ürünleri eklemeli imalat teknolojisi ile üretilmeye başlanmıştır. Ayrıca ev tipi 3D yazıcıların çoğalması ile fabrika ortamında büyük yer kaplayan ve bakımları yüksek maliyet gerektiren makinelerin kapladığı hacim azaltılmış üretimin sadeleştirilmesi gerçekleştirilmeye başlanmıştır (Richardson, 2012).

Eklemeli imalat teknolojisinin en yaygın kullanım alanına sahip sektörlerden bir diğeri ise medikal sektörüdür. Biyomedikal cihazlar çoğunlukla hastaya özel tasarlanan ve geleneksel imalat yöntemi ile üretilmesi zor olan geometrik parçalara sahiptir. Bu karmaşık geometrilerin üretilmesinde eklemeli imalat teknolojisi kullanılarak üretilmeye başlanmıştır. Günümüzde diş sağlığı ile ilgili ürünler, implantlar, protezler ve diğer birçok ürün 3D yazıcılar sayesinde üretilmektedir. İlaç sektörü için kapsül ve

kutu üretiminde de eklemeli imalat teknolojisinden faydalanılmaktadır (Cheriachan vd., 2019; Long vd., 2017; Ngo vd., 2018).

Tıp alanında 3D biyobaskı için eklemeli imalat teknolojisi kullanılmaktadır. Silikon ve protein solüsyonları gibi malzemeler kullanılarak üç boyutlu ve yaşam belirtisi olan dokular üretmek mümkündür. 3D biyobaskı alanında çalışan araştırmacıların en büyük amaçları nakledilebilir insan organı üretimidir (Zhang vd., 2018).

Eklemeli imalat teknolojisinin hiç kuşkusuz en çok kullanıldığı alanlardan bir diğeri de akademik çalışmalardır. Akademik çalışmalarda patent ve faydalı model sürecinde prototip üretimi, karmaşık geometri çıktıları gibi sebeplerden dolayı tercih edilmektedir. Öğrencilere yönelik eğitim uygulamalarında ise yine eklemeli imalat teknolojilerinden yararlanılmaktadır (McMenamin vd., 2014).

4. LİTERATÜR ÇALIŞMALARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Araştırmacılar mühendislik alanında kullanılan mekanik bileşenlerin ağırlığını azaltmak amacıyla çeşitli tekniklerden yararlanmışlardır. Özellikle savunma sanayii sektöründe kullanılacak bileşenlerin optimizasyonunda ağırlığın yanında darbe direnci, eğilme direnci, enerji sönümleme kapasitesi gibi mekanik dayanım kriterleri tasarımın amaç fonksiyonlarının en başında gelmektedir. Araştırmacılar geliştirdikleri ürünlerin maliyetini düşürmek ve kolay üretilebilirlik sağlamak amacıyla üç boyutlu yazdırma tekniklerinden yararlanmışlardır. Aşağıda konu hakkında yapılan literatür araştırmalarından bazı örnekler verilmiştir.

Swathi (2019), uçaklar için tasarladıkları iniş takımına topoloji optimizasyonu gerçekleştirerek yeni bir tasarım önermişler ve bu yöntemler yaklaşık %40 oranında bir ağırlık azaltımı gerçekleştirmişlerdir (Anutha ve Swathi, 2019). Dong vd. (2020) eklemeli imalat yöntemi ile kafes yapıların üretilebilirliğini ve kullanılabilirliğini göstermek amacıyla kafes yapılar tasarlamışlar ve mekanik olarak optimize etmişlerdir. Kafes geometrilerin gövdede heterojen bir dağılım göstererek gerilme dağılımını optimize edilebileceğini söylemişlerdir (Dong vd., 2020). Kahraman ve Küçük (2020), topoloji optimizasyonu üzerine çalışmalar gerçekleştirerek, topoloji optimizasyonu yöntemiyle üretilen parça tasarımlarında yükler ve gerilmeler karşısında sınır şartları belirlenerek en optimum ürünün ortaya çıkabileceğini söylemişlerdir (Kahraman ve Küçük, 2020). Bir diğer çalışmada araştırmacılar, farklı eklemeli imalat parametreleriyle kafes yapılar üretmişler, bu yapıların mekanik mukavemetini ve yüzey pürüzlülüğünü incelemişlerdir. 0,15 mm katman yüksekliği, 190 °C nozul sıcaklığı, 0,4 mm nozul çapı ve 80 mm/s hızında gyroid dolgu deseni kullanarak en iyi sonuca ulaşmışlardır (Jain ve Gupta, 2022). Galletti vd. (2008) bal peteği geometrili sandviç paneller üzerinde üç nokta eğilme testi uygulayarak balpeteği sandviç panellerin eğilme davranışlarını incelemişlerdir (Galletti vd., 2008). Bir başka çalışmada araştırmacılar kafes yapıların mekanik özelliklerinden faydalanmak ve özgül direncini artırmak adına güçlendirilmiş balpeteği yapılara basma testi uygulamışlardır. Oluşan yapının mukavemet ve enerji sönümleme yeteneklerini incelemişlerdir. Maksimum ezilme direncinin %28,54 ve enerji

sönümleme kapasitesinin %23,4 oranında arttığını gözlemlemişlerdir (Zurnacı ve Özdemir, 2023). Zaharia ve vd. (2020) üç farklı kafes yapı geometrisini eklemeli imalat teknolojisi ile üreterek her bir kafes geometrisine basma, çekme, çentik darbe ve üç nokta eğme testi uygulayarak mekanik davranışlarını incelemişlerdir. Aynı zamanda sonlu elemanlar analizi ile mekanik analiz sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Farklı yapılardaki kafes geometrilerin dayanımlarının, kullanıldığı alana ve maruz kaldığı kuvvete göre farklılık gösterdiğini tespit etmişlerdir (Zaharia vd., 2020). Ayrıca araştırmacılar farklı tipte kafes yapılar tasarlayarak, kafes yapıların darbe analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Analizler sonucunda darbe sönümleme enerjilerini inceleyerek kafes yapıların mekanik özellikleri hakkında sonuçları değerlendirmişlerdir (Maskery vd., 2017).

Hammad vd., (2019) orta menzilli insansız hava araçları için sabit yapıdaki alüminyum ve karbonfiber iniş takımlarına topoloji ve boyut optimizasyonu gerçekleştirmişlerdir. Optimizasyon sonucunda 4,75 kg iniş takımını hafifletmişlerdir ve bu ağırlığın %62,3 oranında olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmacılar farklı termoplastik filamentler kullanarak eklemeli imalat yöntemiyle farklı doluluk oranlarında numuneler üretmiş ve mukavemet, sertlik ve yüzey pürüzlülük değerlerini incelemek için bu numunelere çekme testi uygulamışlardır. Malzemenin sertliğinin doluluk oranıyla doğru orantıda olduğunu gözlemlemişlerdir. Bir diğer çalışmada araştırmacılar düşük yoğunluklu köpük çekirdeğe sahip sandviç yapıları üç nokta eğme testine tabi tutmuşlar ve etkilerini incelemişlerdir. Numune uzunluğunun ve çekirdek kalınlığının etkisini gözlemlemişlerdir (Uzay ve Geren, 2020).

Eklemeli imalatla üretilen kafes yapıların mekanik özellikleri üzerine yapılan çalışmada kafes yapıların farklı alanlarda kullanımının uygun olduğunu ve eklemeli imalat yönteminin bu kafes yapıları üretmede kolaylık olduğunu belirtilmiştir. Kafes yapılardaki dikme açısı, çapı gibi birim hücre üzerinde etkisi olabilecek çalışmaların ve kafes yapılardaki birim hücre özelinde veya tüm yapı özelinde yapısal optimizasyon (mukavemet arttırmak, enerji sönümleme yeteneğini artırmak, ağırlığı azaltmak vb.) konularının literatürdeki eksikliğinden bahsetmiştir (Gülcan, 2021).

4.1 Literatür Özeti

Havacılık ve otomotiv endüstrisinde hafif, güçlü ve işlevsel parçalara ilgi gün geçtikçe artmaktadır. Malzemelerin düşük ağırlık, yüksek dayanım, enerji sönümleme kapasitesi ve yüksek sertlik göstermesi bu endüstriler için çok önemlidir. Hücresel malzemelerin, kafes yapılar, köpükler ve bal peteği gibi benzersiz kombinasyonlara sahip olduğu bilinmektedir. Hücresel yapıda malzemeler başlıca otomotiv ve savunma sanayisi için aranan malzemeler olmaya devam etmektedir. Bu doğrultuda literatürde yapılan eklemeli imalat, yapısal optimizasyon, kafes yapılar ve iniş takımları ile ilgili çalışmalar incelenmiştir.

Eklemeli imalat teknolojisi yüksek karmaşıklığa sahip yapıların daha kısa zaman ölçeğinde imal edilmesine olanak tanımaktadır. İlk başlarda, eklemeli imalat parçaları genellikle görsel amaçlar için kullanılmış ve uzun yıllar işlevsiz prototipler olarak kalmıştır. Teknolojinin ilerlemesi ile birlikte, eklemeli imalat teknolojisi endüstriyel müşterilere daha fazla hizmet verme potansiyeli sağlamaya başladı. Bu yöntem ile üretilen ürünlerin kalitesi, yüksek karmaşıklığa sahip parçaların geleneksel imalat yöntemleriyle aynı seviyelere gelmeye başlamıştır (Gibson vd., 2010). Havacılıkta kullanılan karmaşık parçaların ayrı ayrı üretilip birleştirilmesindense, eklemeli imalat kullanılarak bütün halinde üretimi sağlanması hedeflenmektedir.

Literatürde farklı hücre yapılarına sahip hücresel dolgu geometrilerine sahip parçaların mukavemet ve mekanik karakteristikleri eğme, basma ve çekme gibi mühendislik testleri ile araştırıldığı gözlemlenmiştir. İniş takımları, yapısal optimizasyon ve eklemeli imalat teknolojileri ilgili sektörlerde yaygın kullanıma sahiptirler. Bu konular üzerinde akademide de birçok çalışma yapılmış ve literatüre eklenmiştir. İniş takımları üzerinde literatürde genellikle matematiksel modellemeler, kompozit malzemelerle üretim ve sonlu elemanlar analizi ile araştırılıp uygulandığı gözlemlenmiştir.

Kafes yapıların bulunduğu gövdeye inanılmaz bir enerji sönümleme sağladığı literatürde gözlemlenmiş ve bu tezde yer verilmiştir. İnsansız hava araçlarının iniş takımlarının yer ile teması noktasında gelen enerjiyi ve darbeyi sönümlemesi açısından çok önemlidir. Günümüzde teknolojisi oldukça gelişen eklemeli imalat yöntemi ile bu

kafes yapıların kolay üretilebilirliğini sağlamak, daha hafif iniş takımlarında daha fazla yüke maruz kalarak dayanıklı olabilmesi beklenmiştir.

4.2 Çalışmanın Motivasyonu

İnsanız Hava Araçları (İHA) operasyonel kabiliyetleri, düşük maliyetli üretimi, can güvenliği açısından sağladıkları avantajları gibi özelliklerinden dolayı tüm ülkeler tarafından giderek daha fazla önemli hale gelmiştir. Özellikle düşük maliyetine rağmen harp alanlarında yüksek seviyede başarı sağlayan taktik İHA'lara olan talep giderek artmaktadır. Ülkemiz de bu alandaki teknolojik gelişmelere katkı sağlamış ve dünyada önde gelen üreticilerden birisi olmuştur.

İHA'ların iniş takımı sistemi, bu araçların en önemli sistemlerinden biri olarak kabul edilir. Bir İHA, iniş anında en yüksek yapısal yüklere maruz kalır ve bu nedenle iniş takımı sisteminin tasarımı çok önemlidir. Uçağın tasarım gereksinimlerine bağlı olarak iniş takımı sistemlerinin çeşitli konfigürasyonları mevcuttur. Havacılık endüstrisindeki tasarımcılar, İHA performansını, yük taşıma kapasitesini ve yakıt verimliliğini artırmak için her zaman ağırlıktan tasarruf etmeye odaklanmışlardır. Yüksek mukavemetli ve düşük ağırlıklı kompozit iniş takımı desteklerinin tasarımı ve geliştirilmesi günümüz dünyasında hala bir zorluktur.

Literatür çalışmaları incelendiğinde İHA iniş takımları ile ilgili yapılan çalışmaların genellikle sayısal analizler vasıtasıyla tasarımsal değişiklikler üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Ayrıca birçok çalışma CFRP ve GFRP malzemeden üretilen U tipi iniş takımlarının mekanik özelliklerinin belirlenmesi üzerine yoğunlaşmıştır. İniş takımlarında kullanılabilecek alternatif tasarımlara yönelik çalışmalarda literatürde bir boşluk olduğu veya bu alanın göz ardı edildiği görülmüştür.

Bu çalışmada, İHA'ların iniş takımı parçaları için mekanik direnç ve ağırlık optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. İniş takımı ana dikmelerinde kullanılabilecek hibrid yapılı tasarımın sayısal ve mekanik analizleri gerçekleştirilmiştir. İniş takımı ana dikmesinin dış yapısında katı geometri iç kısmında ise güçlendirilmiş çekirdek hücre kullanılmıştır. Geliştirilen tasarıma ait modeller üç boyutlu yazıcıda PLA malzemeden üretilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmalar İHA'lar için hafif fakat

mukavemeti yüksek, kolay üretilebilir ve düşük maliyetli iniş takımı parçalarının geliştirilmesi amaçlanmıştır. Üretim teknolojilerinin gelişmesi ile birlikte optimize edilmiş kafes yapılı iniş takımı tasarımlarının havacılıkta kullanılan metallerden üretilip havacılık sektöründe yeni bir heyecan getirmesi beklenmektedir.

5. İNİŞ TAKIMI TASARIMI

İnsansız hava araçlarının menzili arttırmak için ağırlık açısında yüksek derecede verimli mekanik bileşenler kullanılır. Bu bileşenler gelişmiş mekanik özelliklerinin yanında sahip oldukları hafiflik avantajı sayesinde menzil miktarına katkıda bulunurlar. Böylelikle hem kalkış hem de iniş esnasında daha düşük yakıt tüketimi gerektirirler. Ayrıca iniş ve kalkış esnasında oluşan mekanik yüklemeler ve titreşimlere karşı İHA gövde bütünlüğünü korumak ve yük dağılımını gövdenin tümüne yaymak üzere tasarlanırlar.

İHA'ların en önemli bileşenlerinden birisi şüphesiz iniş takımlarıdır. Güvenli bir iniş ve kalkışın sağlanmasında sorumlu en önemli gövde bileşenidir. Bir iniş takımı tasarlamak ağırlık ve hacim gibi faktörlerin en aza indirilmesini gerektirir ancak aynı zamanda performans ve yaşam döngüsünde bir kayıp olmaması gereklidir (Armaan vd., 2020). İniş takımı kalkış ve iniş sırasında süspansiyon geometrisi sağlamak üzerine tasarlanmalıdır. İniş takımlarının mekanik dayanımını arttırmak ve yapısal bütünlüğünü korumak adına yüksek dayanıma sahip sert malzemeler kullanmak gövde ağırlığını arttırırken aynı zamanda darbe sönümleme kapasitesini düşürür. Çünkü aşırı ağırlık uçağın performans ve verimliliğinin düşmesine neden olacaktır. Aşırı ağırlık yüklenen bir uçakta manevra kabiliyeti azalır, tırmanma hızı ve açısında azalmalar görülür (Iele vd., 2018). İniş takımını tasarlarken en uygun optimizasyonu yapmak oldukça önemlidir. Bu sebeple genellikle kompozit yapılar tercih edilir.

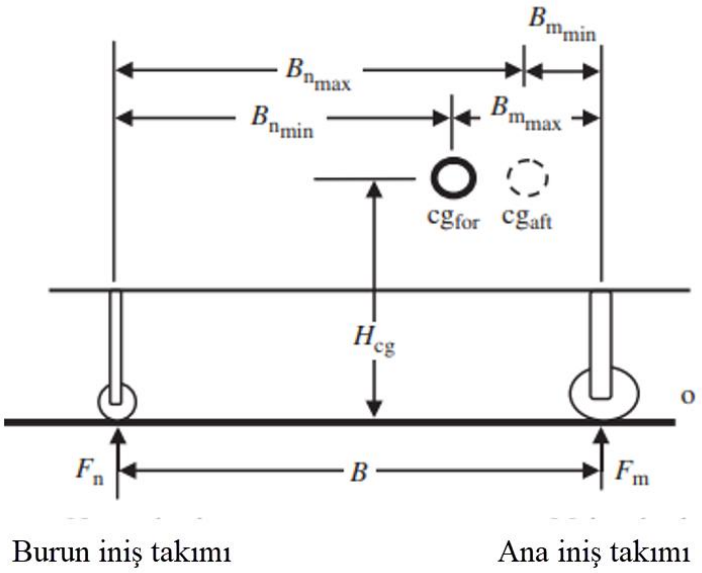
Bu çalışmada; üç tekerlekli bisiklet tipi bir iniş takımı tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bir burun iniş takımı ve ana iniş takımı olmak üzere iki farklı iniş takımı tasarımı yapılmıştır. İniş takımlarını hafifletmek ve mekanik direncini geliştirmek adına farklı optimizasyon teknikleri kullanılarak yeni tasarımlar geliştirilmiş, geliştirilen tasarımların mekanik performansı sayısal ve deneysel analizler kullanılarak test edilmiştir.

5.1 İniş Takımını Etkileyen Yükler

Literatürde iniş takımına gelebilecek yükler ve iniş senaryoları gözlemlenmiştir. İniş takımlarını etkileyen yükler statik (durağan) yük ve dinamik yük olarak iki farklı konfigürasyonda incelenmiştir.

5.1.1 Statik (Durağan) Yük

Statik yük, İHA yerde sabit halde iken iniş takımlarına gelen yükleri temsil etmektedir. Statik yük altındaki iniş takımlarının incelenmesinde ağırlık merkezlerinin çok büyük önemi bulunmaktadır. Sadraey "Aircraft design: A systems engineering approach" isimli kitabında hesaplamalarda arka ağırlık merkezini kullanmıştır (Sadraey, 2013). Raymer ise "Aircraft Design: A Conceptual Approach" isimli kitabında ön ve arka ağırlık merkezlerinden bahsetmiş fakat ana iniş takımına gelen yük neredeyse %90'a yakın olduğundan arka ağırlık merkezini kullanmıştır (Raymer, 2012; Sadraey, 2013). Şekil 5.1' de iniş takımlarına gelen yükler ve referans uzaklıkları verilmiştir. İniş takımlarına gelecek olan statik yük Denklem 5.1'de verilen bağıntıdan hesaplanmaktadır.



Şekil 5.1 İniş takımlarına gelen yükler ve referans uzaklıkları

$$W = \frac{Cg}{B} \tag{5.1}$$

Burada W iniş takımlarına gelen statik yükü, Cg Ağırlık merkezini ve B burun iniş takımı ile ana iniş takımı arasındaki mesafeyi ifade etmektedir

Ayrıca burun iniş takımı ve ana iniş takımlarına gelen statik yüklerin hesaplanması Denklem 5.2-5.5'de verilen bağıntılardan hesaplanmaktadır. Burada burun iniş takımına gelecek olan maksimum ve minimum statik yük yüzdesi;

$$F_{m_{max}} = \frac{B_{n_{max}}}{B} W \tag{5.2}$$

$$F_{m_{max}} = \frac{B_{n_{max}}}{B} W \tag{5.3}$$

bağıntısından ve ana iniş takımlarına gelecek olan maksimum ve minimum statik yük ise;

$$F_{m_{max}} = \frac{B_{n_{max}}}{B} W \tag{5.4}$$

$$F_{m_{max}} = \frac{B_{n_{max}}}{B} W \tag{5.5}$$

bağıntılarından hesaplanmaktadır.

5.1.2 Dinamik Yük

İHA'ların birçok farklı iniş senaryoları bulunmaktadır. Currey, Sadraey ve Raymer kitaplarında iki tekerlekli iniş senaryosu ve üç tekerlekli iniş senaryolarından bahsetmişlerdir (Currey, 1988; Raymer, 2012; Sadraey, 2013). Literatür çalışmaları gözlemlendiğinde yük faktörü olarak belirtilen ve iniş takımına gelecek yükü belirlemede durağan yükün bir katsayı ile çarpımını ifade edilen bir katsayı bulunmaktadır (Currey, 1988; Raymer, 2012; Sadraey, 2013). Currey, iniş takımı yük faktörü olarak adlandırdığı bu katsayıları şu şekilde vermektedir; yere iniş yapan savaş uçakları için 3-5, küçük standart uçaklar için 2-3 ve yolcu uçakları için 0,7-1,5

değerleri arasında alınabilmektedir (Currey, 1988). Dinamik yüklemeye maruz kalan iniş takımları statik yüklemeye göre daha farklı kuvvetler etki etmektedir. İnsansız hava aracının ağırlık merkezinin değişmesi ve yük dağılımlarının değişmesi dinamik hesaplamalara etki etmektedir (Sadraey, 2013).

İHA iniş sırasında hızlanma ve yavaşlama durumu ile alakalı olarak frenleme durumunda dinamik bir yüklenmeye maruz kalmaktadır. Maksimum frenleme iniş takımı yükü, statik yük ve dinamik yükün toplamına eşittir. Currey kitabında frenleme için iniş takımı yükü olarak denklem 5.6 bağıntısıyla ifade etmiştir (Currey, 1988)

$$F_D = \frac{10JW}{32,2F} \tag{5.6}$$

olarak tanımlanmaktadır.

5.2 İniş Takımı Yük Hesabı

Literatür gözlemlendiğinde birçok farklı ağırlıkta uçaklar için çalışmalar yapılmış, kütlesinden doğan yüklere göre iniş takımı yükü hesaplanmıştır. Bu çalışmada orta ağırlıktaki bir İHA için tasarım çalışmaları gerçekleştirilecek ve statik yük altında analizleri incelenecektir. Seçilen hedef insansız hava aracına ait değerler Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1 İnsansız hava aracına ait değerler

Faktörler	Değerler
İHA azami ağırlığı	50 kg
Aks mesafesi	1,02 m
Ağırlık merkezi mesafesi	0,084 m
Tekerlek izi	0,18 m

Bu değerler doğrultusunda uçak ağırlığı W;

$$W = 50 \times 9,81 = 490,5\ N \tag{5.7}$$

İniş takımlarına gelecek toplam statik yük;

$$\sum M_0 = 0 = W(0{,}084) - F(1{,}02) = 0 \tag{5.8}$$

$$F = \frac{50 \times 9{,}81 \times 0{,}084}{1{,}02} = 40{,}38\ N \tag{5.9}$$

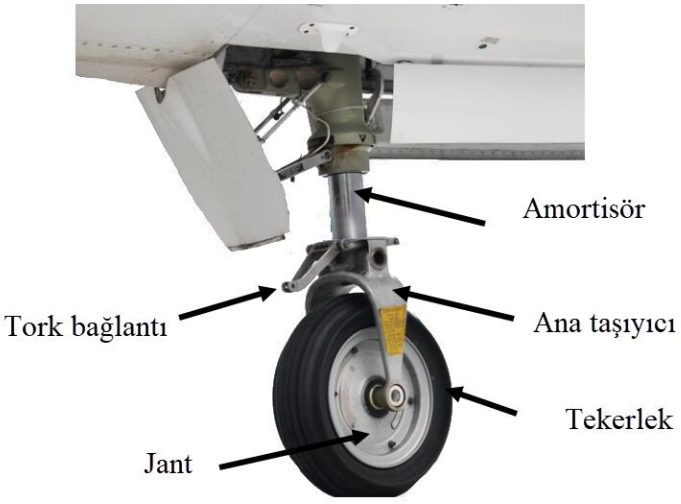
olarak hesaplanmaktadır. Buradan burun iniş takımına gelecek yük oranı;

$$\frac{F}{W} = \frac{40{,}38}{490{,}5} = 0{,}082 = \%82 \tag{5.10}$$

olarak hesaplanmaktadır. Burun iniş takımı toplam yükün %8,2 sini karşılamaktadır.

5.3 Burun İniş Takımı Tasarımı

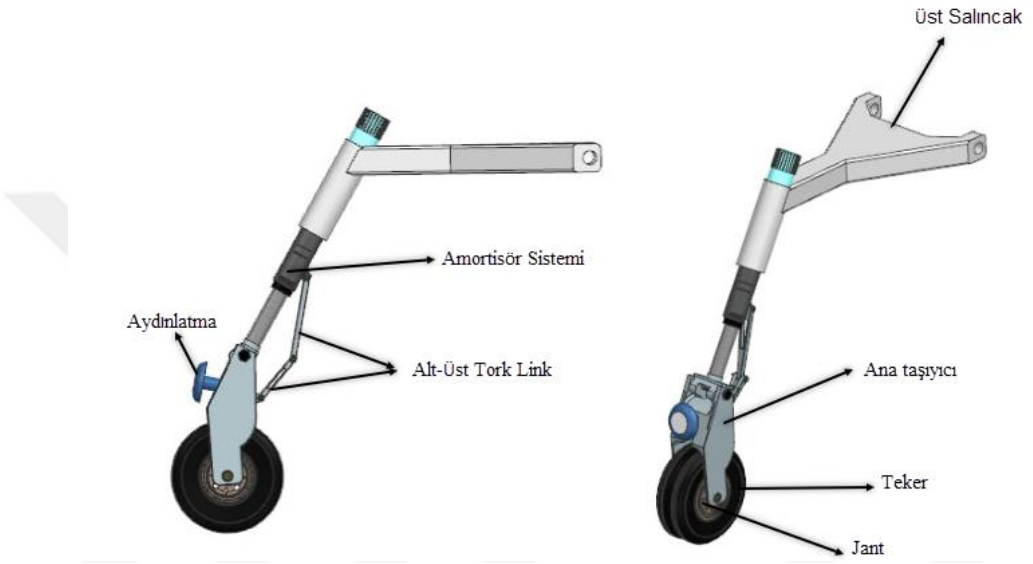
Bu çalışmada üç tekerlekli bisiklet tipi iniş takımı için uygun bir burun iniş takımı tasarımının geliştirilmesi hedeflenmiştir. Burun iniş takımı, İHA'ların inişi esnasında yeryüzü ile ilk temas anında yüksek mekanik direnç gösterirler. Bu mekanik dirence karşı koyabilmek için burun iniş takımlarında amortisör sistemi kullanılır. Şekil 5.2' de bir burun iniş takımının yapısı ve bileşenleri görülmektedir.



Şekil 5.2 Burun iniş takımı bileşenleri

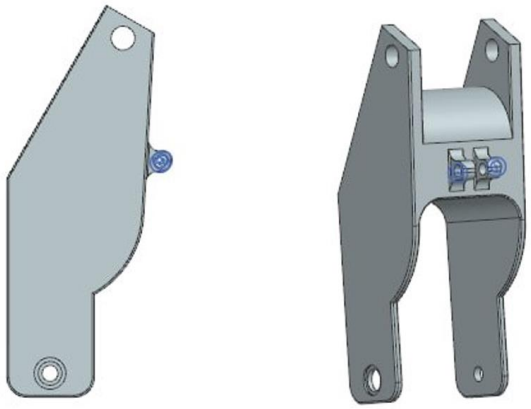
Ana taşıyıcı bileşen İHA'ların yeryüzü ile teması tekerleğin karşılaştığı mekanik yükü amortisöre ileten bileşendir dolayısıyla çok fazla deformasyon yüküne maruz kalır. Literatür çalışmaları incelendiğinde, araştırmacıların genellikle üst salıncağın

geliştirilmesi üzerine odaklandığı ana taşıyıcı parçanın çok fazla dikkate alınmadığı belirlenmiştir. Bu çalışmada; burun iniş takımının ana taşıyıcı parçasının sayısal analiz yöntemleri ile değerlendirilmesi ve topoloji optimizasyonu ile ağırlığının azaltılması hedeflenmiştir. Literatür çalışmaları değerlendirilerek burun iniş takımının üç boyutlu CAD modeli hazırlanmıştır. Tasarımlar üç boyutlu katı modelleme yazılımı SolidWorks 2023 yazılımında gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.3).



Şekil 5.3 Burun iniş takımı üç boyutlu modeli

Tasarlanan burun iniş takımında jant, teker, ana taşıyıcı, bağlantı salıncakları, amortisör sistemi, tork linkler ve aydınlatma elemanları bulunmaktadır. Burun iniş takımı için tekerlek seçimi literatüre uygun bir şekilde seçilmiştir. Tekerlek, iniş takımı tasarımında oldukça önemlidir. Elastik malzemeye sahip olmasından ve içerisinde hava bulundurmasından dolayı aşırı yüklenme esnasında iniş takımına gelen yükleri taşımada oldukça yardımcı olmaktadır. Bu çalışmada; üç boyutlu modellemesi yapılan burun iniş takımının ana taşıyıcı çatalı için sayısal analiz gerçekleştirilecek ardından yapılacak topoloji optimizasyonu ile ağırlığının azaltılması sağlanacaktır. Burun iniş takımı ana taşıyıcı çatalına ait üç boyutlu modelin görünümleri Şekil 5.4'de verilmiştir.

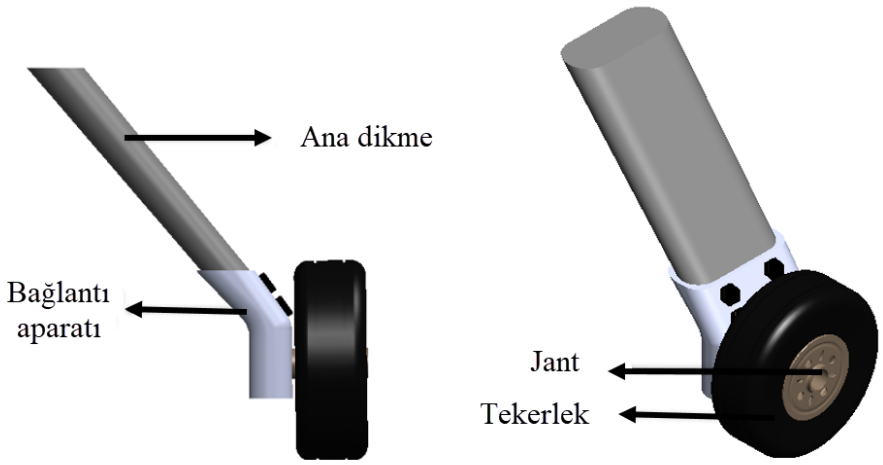


(a) (b)

Şekil 5.4 Burun iniş takımı ana taşıyıcı çatalı a) ön ve b) izometrik görüntüsü

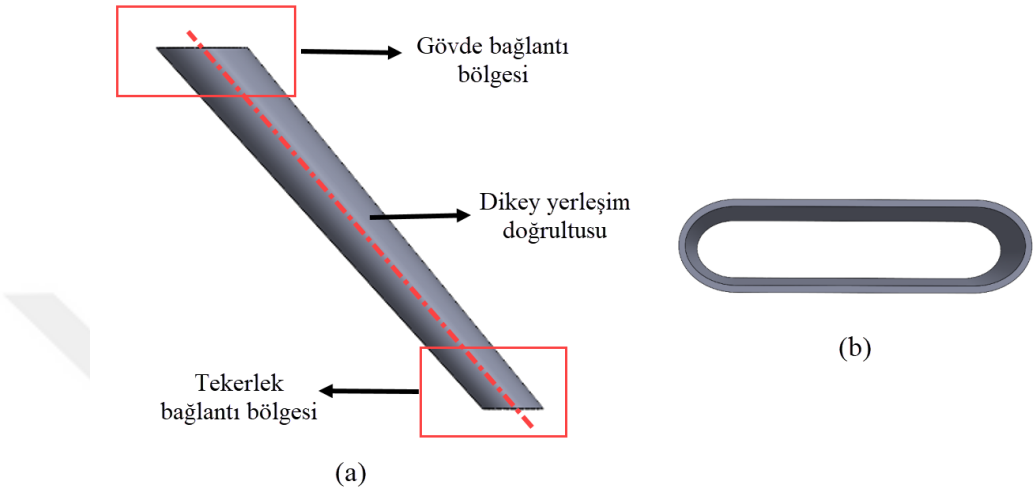
5.4 Ana İniş Takımı Tasarımı

Ana iniş takımı İHA'ların yeryüzü ile ilk temas eden bileşenidir. Bu sebeple ilk deformasyon anında çok yüksek yüke maruz kalırlar ve gövde güvenliğini sağlamak üzere mekanik olarak dirençli bir tasarıma sahiptirler. İHA büyüklüğüne göre kullanılan birçok ana iniş takımı tasarımı bulunmaktadır. Ana iniş takımların temelde gövde ile tekerleği birbirine bağlayan tek veya iki parçalı bir profil ile ona bağlı tekerleklerden oluşur. Bu çalışmada bisikleti tipi iniş takımlarında kullanılan iki parçalı ana iniş takımı seçilmiştir. Ana iniş takımı tasarımına görüntüler Şekil 5.5'te verilmiştir.



Şekil 5.5 Ana iniş takımı tasarımı

Bu tez kapsamında ana iniş takımı ana dikme bileşenin yenilikçi tasarımı ve analizi gerçekleştirilmiştir. Hibrid yapılı bir ana dikme tasarımının geliştirilmesi, sayısal analizi, prototip üretimi ve deneysel analizleri sonucu optimum tasarımın belirlenmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla kullanılacak ana dikme tasarımı Şekil 5.6'da verilmiştir.



Şekil 5.6 Ana dikme tasarımı a) ön görünüşü ve b) profil kesiti

Bu çalışmada hibrid yapılı bir ana dikme tasarımının geliştirilmesi amaçlanmıştır. Hibrid yapı; aynı bileşende iki farklı formun kullanılması ile elde edilmiştir (Şekil 5.7). İHA'ların inişi esnasında doğrusal deformasyona kaşı direnç göstermek amacıyla ana dikmenin dış yapısı katı olarak iç dolgusu ise güçlendirilmiş çekirdek olarak tasarlanmıştır. Böylelikle ana iniş takımının en büyük bileşeni olan ana dikmenin mekanik direncini azaltmadan hafifletilmesi amaçlanmıştır.

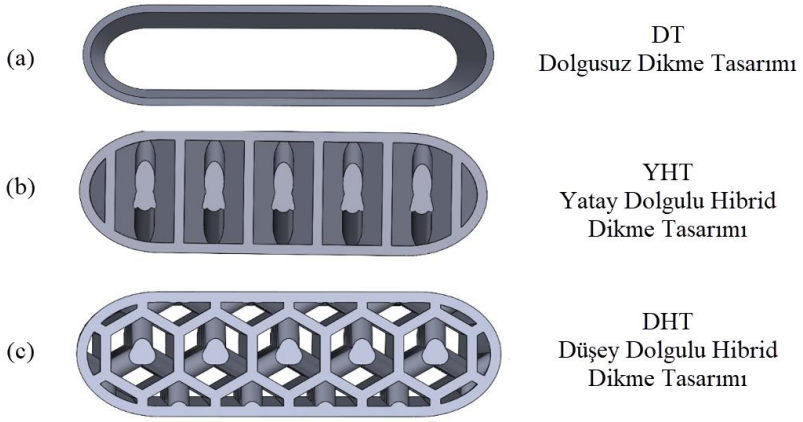


Şekil 5.7 Hibrid gövde yapısı

Bu çalışmada hibrid yapılı iniş takımının mekanik performansını inceleyebilmek amacıyla üç farklı ana dikme modeli tasarlanmıştır. Dolgusuz dikme tasarımı sadece dış katı gövdeden oluşmaktadır, yatay dolgulu hibrid dikme tasarımı ve düşey dolgulu hibrid dikme tasarımı katı dış gövdenin içine periyodik olarak yerleştirilen

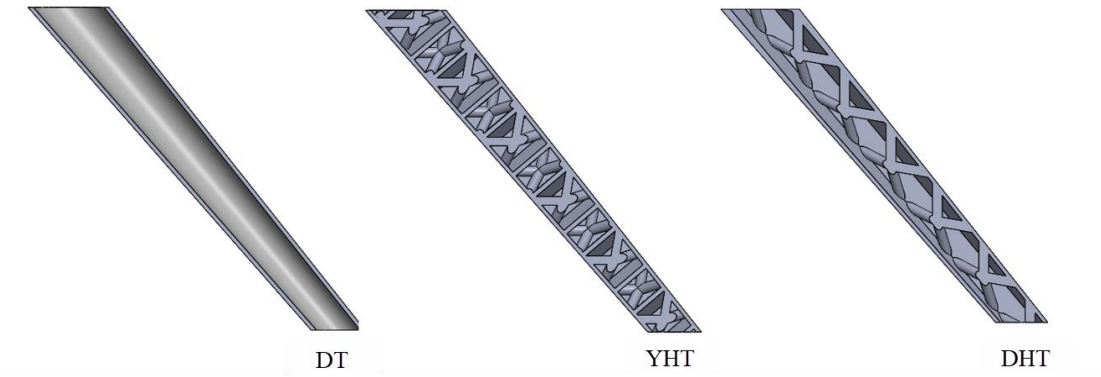
güçlendirilmiş çekirdek hücreden oluşmaktadır. Güçlendirilmiş çekirdek hücre, altıgen profillerin içine yerleştirilmiş konik destek çubukları ve transfer dolgusundan oluşmaktadır. Altıgen yapı düşey doğrultudaki yüklere karşı yüksek direnç gösterirken konik destek çubukları yükü hücre duvarlarına dağıtmaktadır. Böylece yük karşısında yapı bütünlüğü korunmuş olmaktadır (Zurnacı ve Özdemir, 2023).

Bu tez kapsamında; hibrid yapının ve iç dolgu yerleşiminin ana dikmenin mekanik performansı üzerindeki etkisini inceleyebilmek amacıyla üç farklı ana dikme modeli tasarlanmıştır. Dolgusuz dikme tasarımı (DT) sadece katı yapılı dış gövdeden oluşmaktadır (Şekil 5.8a). Katı gövdenin tek başına yük karşısındaki deformasyon davranışını incelemek amacıyla kullanılacaktır. Ayrıca mekanik özellikleri hibrid yapılı ana dikme tasarımları ile mukayase edilecektir. Yatay dolgulu hibrid dikme tasarımı (YHT) hibrid yapıdadır ve katı dış dolgunun içine güçlendirilmiş çekirdek hücre eklenerek elde edilmiştir. Bu tasarımda güçlendirilmiş çekirdek hücre altıgen hücre duvarları katı gövdeye dik olarak yerleştirilmiştir (Şekil 5.8b). Düşey dolgulu hibrid dikme tasarımı (DHT) ise güçlendirilmiş çekirdek hücre altıgen hücre duvarları katı gövdeye paralel olarak yerleştirilmiştir (Şekil 5.8c). Böylelikle iç dolgu doğrultusunun mekanik performans üzerindeki etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

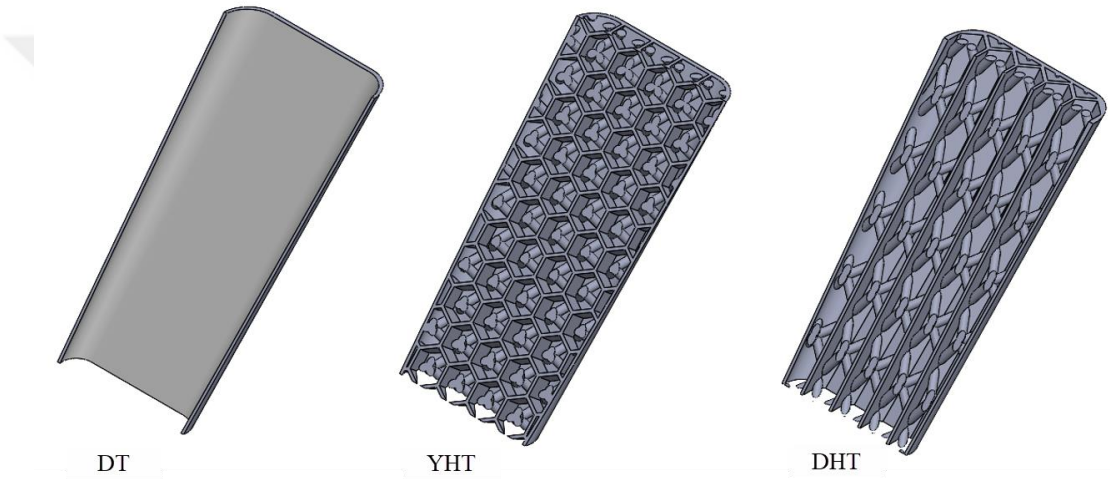


Şekil 5.8 Ana dikme tasarım katı modelleri

İHA iniş takımı ana dikmeleri için SolidWorks yazılımı ile hazırlanan üç boyutlu CAD modelleri Şekil 5.9 ve 5.10'da verilmiştir. Yapılan tasarımlarda katı dış duvarların et kalınlığı 1,2 mm'dir. Güçlendirilmiş çekirdek hücre duvar kalınlıkları 1,2 mm ve konik destek çubuklarının çapları ise 3 mm olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.9 Ana dikme modellerinin yan kesit görünüşleri



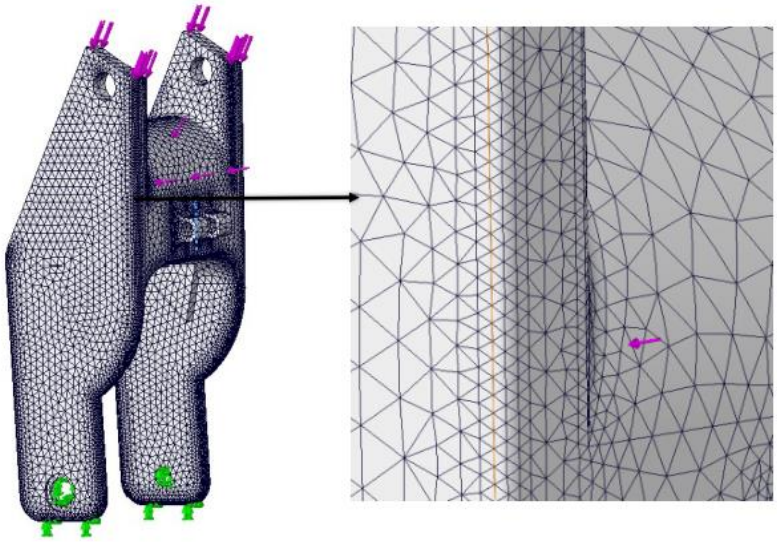
Şekil 5.10 Ana dikme modellerinin izometrik kesit görünüşleri

5.5 Burun İniş Takımı Ana Taşıyıcı Optimizasyonu

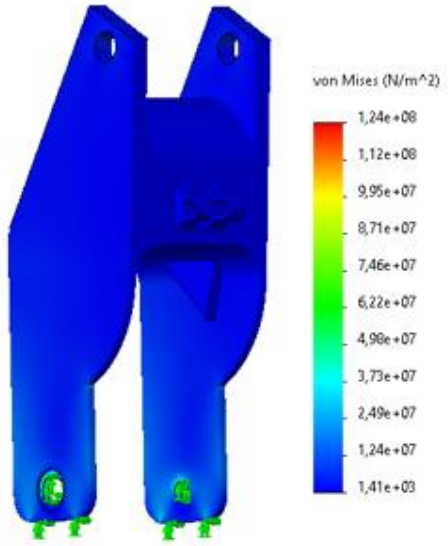
Literatürde burun iniş takımlarının toplam yükün %5 - %20'i oranında arasında bir yük taşıdığı belirtilmektedir (Sadraey, 2013). Havacılıkta iniş takımları güvenlik katsayısı genellikle 3G alınmaktadır. Bu tez çalışmasında iniş takımına gelecek yükler kısmında da yük faktörünün 3 olarak belirlendiği söylenmiştir.

Burun iniş takımına 40,38 N gelecek olan yük için toplamda 121 N'luk bir optimizasyon çalışması yapılmıştır. Burun iniş takımı içinde amortisör ve tekerlek gibi kuvvet sönümleme elemanları olsa da bu çalışmada tüm yükün burun iniş takımı ana taşıyıcısına geldiği şekilde ki senaryo dahilinde hareket edilmiştir. Doğru bir sonuç alma adına ful quadratik geometriler kullanarak 1 mm kalınlığında mesh atılmıştır ve fikstür, kuvvet noktaları belirlenmiştir. (Şekil 5.11). Burun iniş takımı ana taşıyıcısına

önce statik analiz yapılmış olup, gerilme oluşumları ve yer değiştirme miktarları hesaplanmıştır (Şekil 5.12).

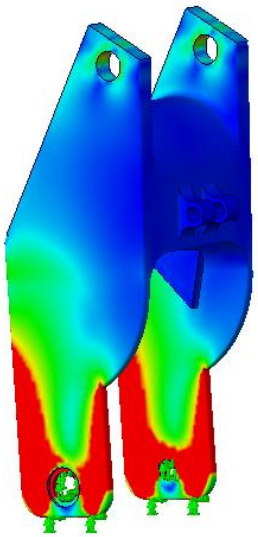


Şekil 5.11 Mesh kalitesi



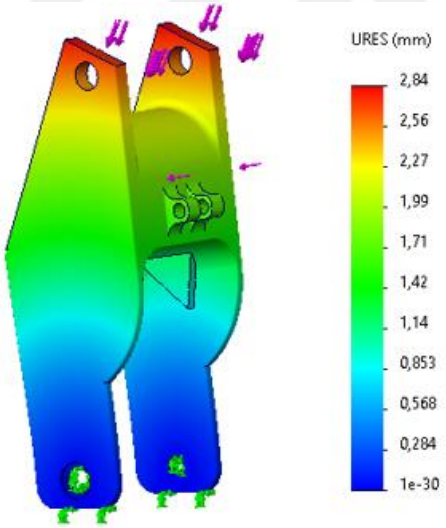
Şekil 5.12 Burun iniş takımı ana taşıyıcısı von Mises gerilmeleri

Burun iniş takımı ana taşıyıcısı gelen kuvvet etkisi altında oldukça güvenli olduğu görülmüştür. Daha iyi sonuçlar alabilmek adına gerilme değerlerini düşürerek, ana taşıyıcının hangi bölgesinde daha fazla gerilme olduğu belirlenmiştir (Şekil 5.13).



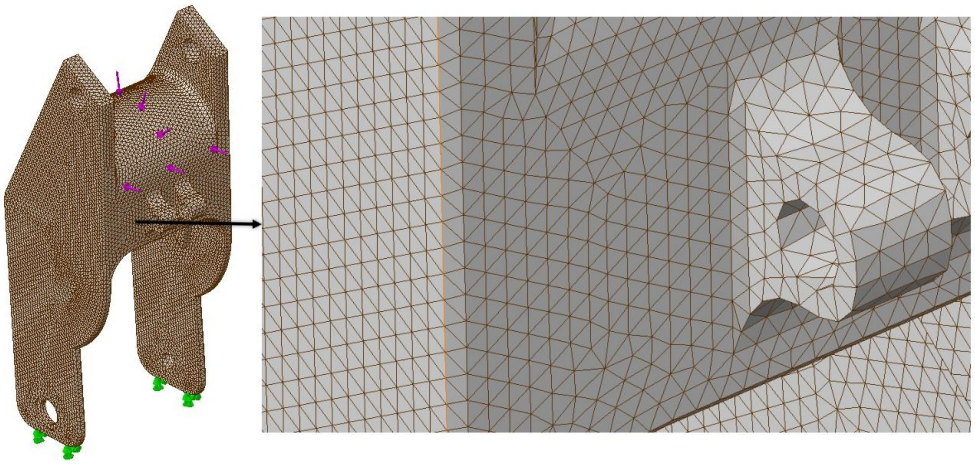
Şekil 5.13 Abartılmış değerler ile burun iniş takımı von Mises gerilmeleri

Burun iniş takımı ana taşıyıcısının yer değiştirme sonuçları Şekil 5.14'de verilmiştir.



Şekil 5.14 Burun iniş takımına ait yer değiştirme sonuçları

Burun iniş takımına ait ana taşıyıcının 3G güvenlikte verdiği maksimum yer değiştirme miktarı 2,84 mm olarak belirlenmiştir. Oldukça güvenli bir tasarımdan oluşan burun iniş takımı ana taşıyıcısı için topoloji optimizasyonu uygulanarak ağırlık azaltımı hedeflenmiştir. Topoloji optimizasyonu için tasarlanan ana taşıyıcıya çok daha kaliteli bir mesh yapısı uygulanmıştır (Şekil 5.15).



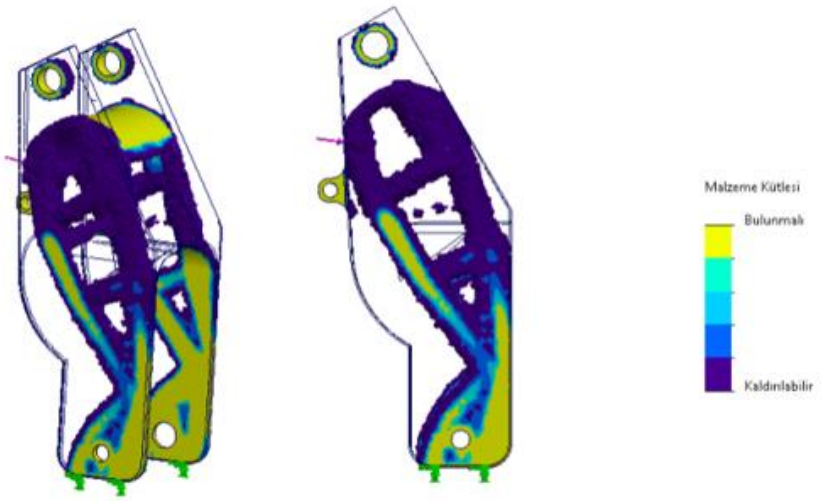
Şekil 5.15 Topoloji optimizasyonu için mesh uygulaması

Topoloji optimizasyonu için maksimum parça çıkarma işlemi uygulanması hedeflenmiştir. Sadece en kritik bölgelerin varlığı gözlemlenerek gerilme ve yer değiştirme grafiklerine göre de optimum parçaya ulaşmak hedeflenmiştir. Bu doğrultuda %70 oranında uygulanan topoloji optimizasyonu sonucu Şekil 5.16'da verilmiştir.



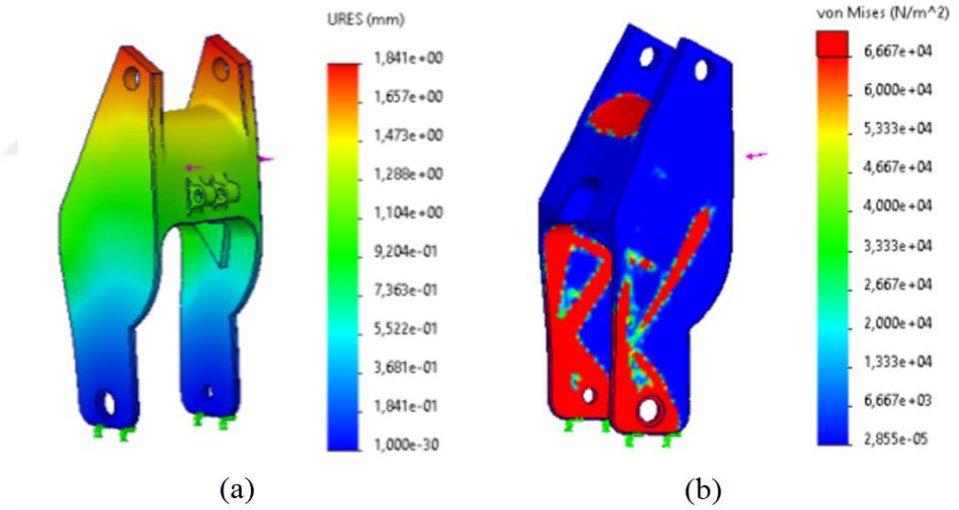
Şekil 5.16 Topoloji optimizasyonu sonucu en kritik bölgeler

Optimizasyondan daha az ağırlık azaltmak istendiğinde %50 oranında topoloji optimizasyonu sonucu Şekil 5.17'de gözlemlenmiştir.



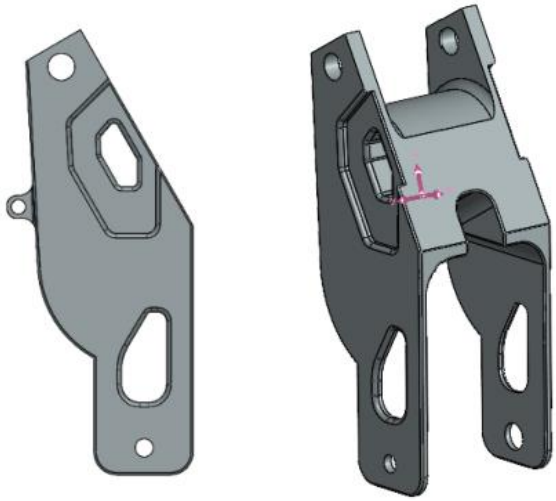
Şekil 5.17 Topoloji optimizasyonu sonuçları

Topoloji optimizasyonundan maksimum yer değiştirme ve maksimum gerilme değerleri de Şekil 5.18'de gözlemlenmiştir.



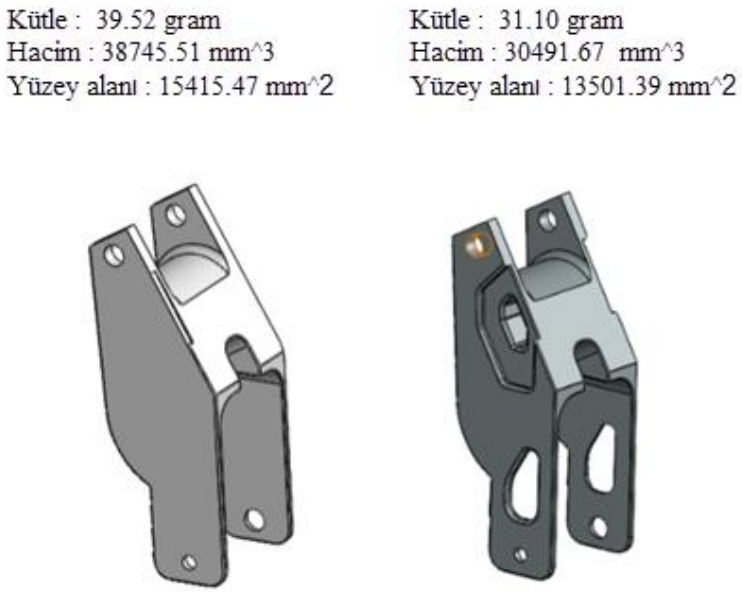
Şekil 5.18 Topoloji optimizasyonu a) yer değiştirme ve b) gerilme sonuçları

Yapılan analizler ve topoloji optimizasyonu neticesinde burun iniş takımı ana taşıyıcısı için yeni bir tasarım gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon sonucu tasarlanan burun iniş takımına ait ana taşıyıcı Şekil 5.19'da gösterilmiştir.



Şekil 5.19 Optimizasyon sonucu geliştirilen tasarım

Topoloji optimizasyonu sonucunda gerçekleşen ağırlık değişimi Şekil 5.20'de gösterilmiştir. Başlangıçta 39,52 gram ağırlığa sahip olan burun iniş takımı ana taşıyıcısı topoloji optimizasyonu sonucu 31 gram seviyelerine düşürülmüştür. Toplamda %21,2 oranında bir ağırlık azaltımı gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.20 Topoloji optimizasyonu sonucu ağırlık değişimi

5.6 Ana İniş Takımı Yapısal Analizi

Bu tez kapsamında ana iniş takımı ana dikmesine ait tasarımlar Bölüm 5.2'de anlatılmıştır. Belirlenen tasarımlara ait yapısal analiz çalışması gerçekleştirilmiştir.

Ana iniş takımı ana dikmesine ait tasarımlar SolidWorks CAD yazılımı ile tasarımları gerçekleştirilmiştir. Burun iniş takımlarına gelen kuvvet daha önce %8,2 hesaplandığından ana iniş takımlarına toplam yükü %91,8 oranında karşılaması gerekmektedir (Denklem 5.10).

$$\%100F = \%F_{m_}\%F_n = 100 - 8{,}2 = \%91{,}8 \tag{5.10}$$

Her bir ana iniş takımı dikmesine gelecek olan yük;

$$\frac{F}{W} = 0{,}918 = 0{,}918 * 490{,}5 = 450{,}5\ N \tag{5.11}$$

$$\frac{450}{2} = 225{,}25\ N \tag{5.12}$$

olarak hesaplamıştır. Analizlerde ana iniş takımı dikmesini etkileyen kuvvetin 226 N olması gerektiği Denklem 5.12 kullanılarak belirlenmiştir.

Ana iniş takımı ana dikmesi için yapılan tasarımların her birine ayrı ayrı yapısal analiz çalışması gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Yapısal analiz çalışmaları Ansys Workbench yazılımında gerçekleştirilmiştir. Yapılan analiz çalışmaları için kullanılan malzeme ve malzemenin mekanik özellikleri Tablo 5.1' de verilmiştir.

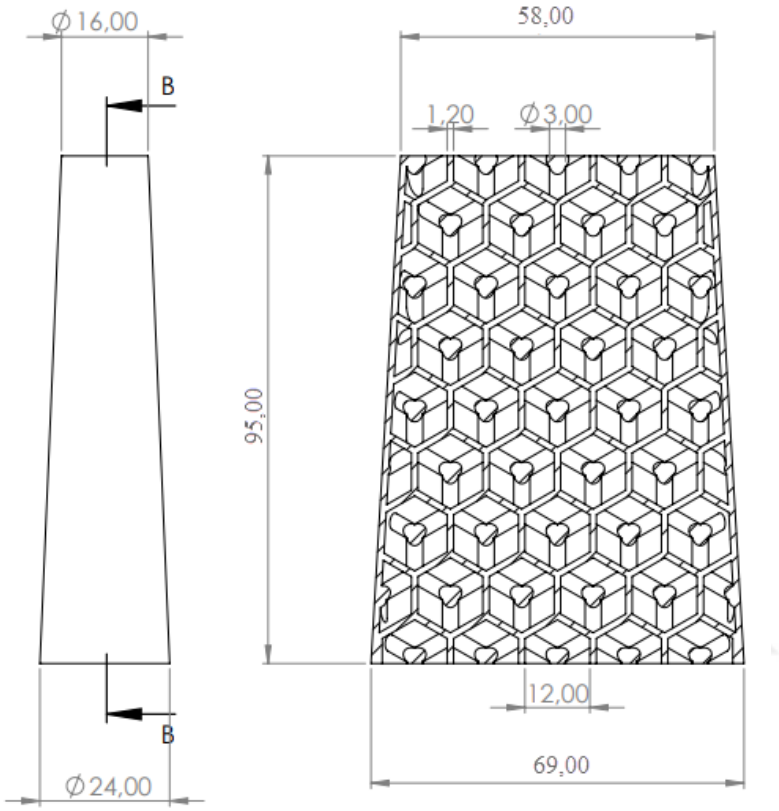
Tablo 5.2 Kullanılan malzemenin mekanik özellikleri

	Değerler	Birim
Malzeme	PLA^+	-
Yoğunluk	1,23	gr/cm^3
Çekme dayanımı	63	Mpa
Eğilme dayanımı	74	Mpa
Young modulü	1975	Mpa
Poission oranı	0,418	-
Kopma uzaması	20	%

Yapısal analiz çalışmasında Esun mara PLA^+ termoplastik filament malzemesi kullanılmış ve bu malzemeye ait mekanik özellikler üreticinin sağladığı katalogdan alınmıştır.

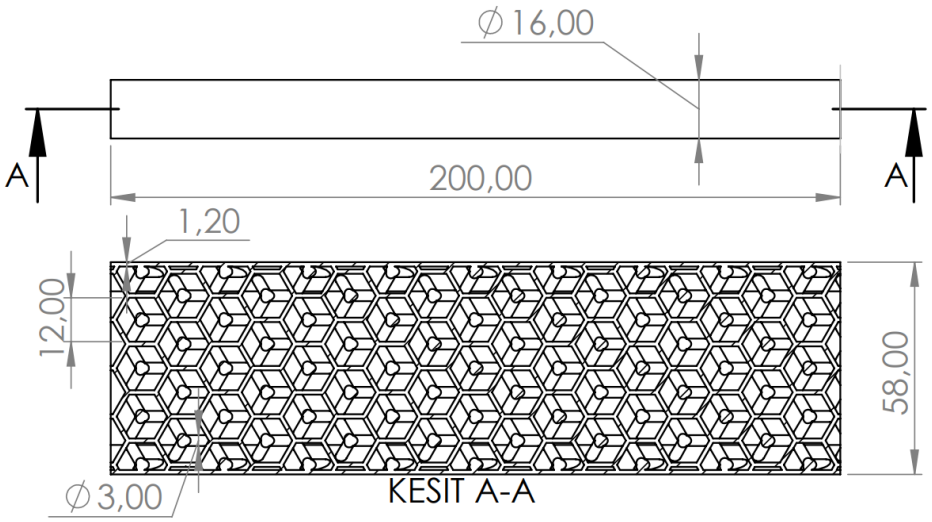
5.6.1 Basma ve Üç Nokta Eğme Numunelerinin Boyutlandırılması

Analiz çalışmasında ve mekanik testler sırasında kullanılan basma test numunelerinin boyutlandırılması Şekil 5.21'de gösterilmiştir



Şekil 5.21 Basma numunelerinin boyutları

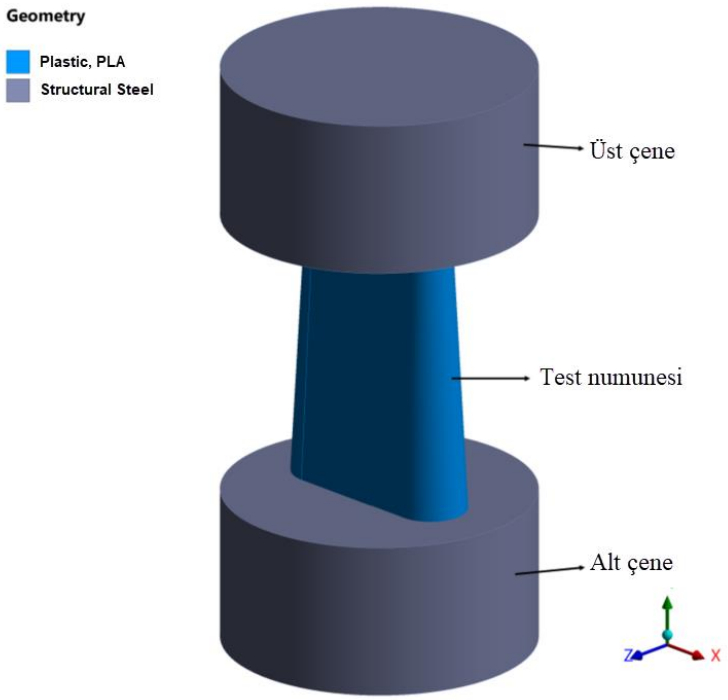
Mekanik testler ve yapısal analiz çalışmalarında kullanılan üç nokta eğme test numunelerinin boyutlandırılması Şekil 5.22'de gösterilmiştir.



Şekil 5.22 Üç nokta eğme test numunelerinin boyutlandırılması

5.7 Basma Numunelerinin Yapısal Analizi

İnsansız hava araçları ana iniş takımı dikmesi için belirlenen tasarım yer düzlemi ile 50° açıya sahiptir. Ana iniş takımı dikmesinin tasarımı nedeniyle günümüzde kullanılan basma ve üç nokta eğilme deney cihazlarında test edilmesi mümkün değildir. Bu nedenle mekanik analiz yapılmak üzere, ana iniş takımı dikmesinde belirlenen aynı tasarımlarla basma test cihazında deneyi gerçekleştirilebilecek şekilde ve ASTM C363 standartlarına uygun olarak basma test tasarımları yapılmıştır. Basma deneyi için gerçekleştirilen yapısal analizler Şekil 5.23'de gösterildiği üzere basma deneyi standartlarına uygun bir simülasyon modeli oluşturulmuştur.

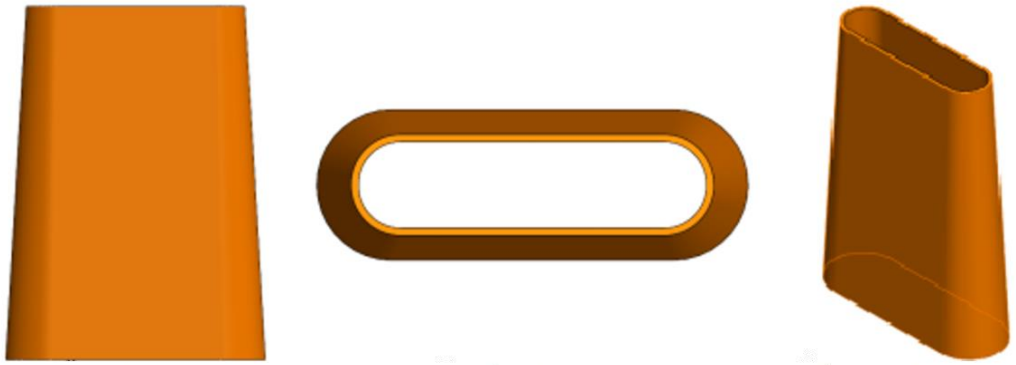


Şekil 5.23 Basma numuneleri simülasyon modeli

Şekil 5.23'de görüldüğü üzere alt ve üst çene arasına yerleştirilen numune sıkıştırılarak gerilme oluşumlarının ve deformasyon miktarının belirlenmesi hedeflenmektedir. Bu tez çalışmasında basma numunelerine ait bütün yapısal analiz simülasyonları Şekil 5.23'de görüldüğü gibi gerçekleştirilmiştir. Senaryoda alt ve üst çene rijit olarak modellenmiştir. Üç farklı model üzerinde simülasyon çalışmaları gerçekleştirilerek toplam deformasyon miktarı, maksimum gerilme miktarları tespit edilmesi hedeflenmiştir. Bu tez kapsamında gerçekleştirilen basma ve üç nokta eğme deneyi numuneleri analiz çalışmalarında Tablo 5.1'de özellikleri verilen Esun PLA+ termoplastik filament malzemesinin mekanik özellikleri kullanılmıştır.

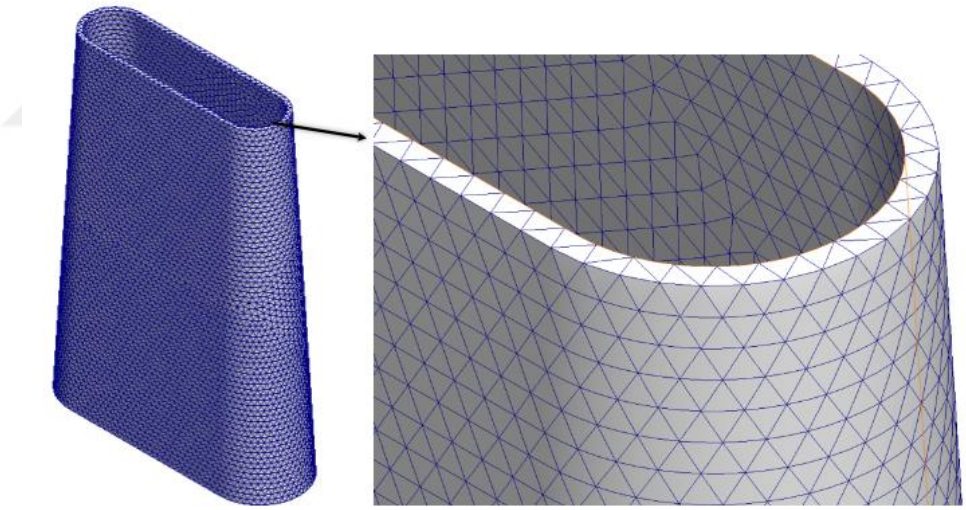
5.7.1 Dolgusuz Dikme Tasarımı Modeline Ait Basma Deneyi Analizi

İç yapısında herhangi bir kafes geometrisi bulunmayan insansız hava aracı ana iniş takımı dikmesine ait basma deneyi numunesi yapısal analiz çalışması gerçekleştirilmiştir. Dolgusuz dikme tasarımına ait basma numuneleri Şekil 5.24'de gösterilmiştir



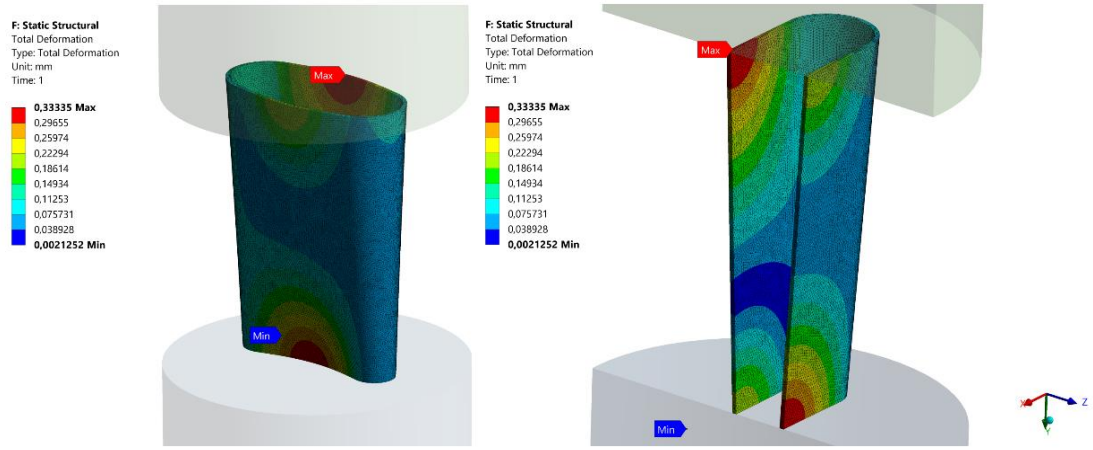
Şekil 5.24 DTB modeline ait tasarım

Ön, üst ve izometrik görünümleri verilen tasarıma yapısal analiz uygulaması gerçekleştirmeden önce mesh atama işlemi gerçekleştirilmiştir. Analiz için en doğru sonucu alabilmek adına 1 mm kalınlığında quadratik mesh atılarak numune analize hazır hale getirilmiştir. Numuneye ait mesh uygulaması Şekil 5.25'de gösterilmiştir



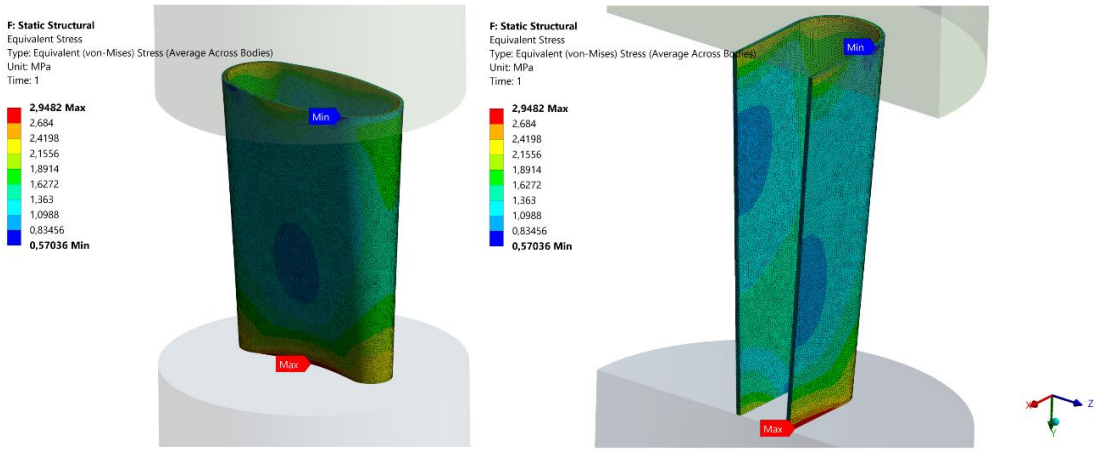
Şekil 5.25 DTB numunesine ait mesh yapısı

Mesh yapısı belirlenen modelde iniş takımı ana dikmesine ait hesaplamaları yapılan değerler kullanılarak yapısal analiz çalışması hedeflenmiştir. Simülasyon modelinde alt çene sabit tutularak üst çeneden numuneye doğru 226 N'luk kuvvet uygulanmıştır. Kuvvet uygulama işleminden sonra toplam yer değiştirme ve maksimum gerilme değerleri gözlemlenmiştir. Modele ait toplam deformasyon sonuçları Şekil 5.26'da gösterilmiştir.



Şekil 5.26 DTB numunesine ait toplam deformasyon miktarı

Şekil 5.26'da görüldüğü üzere dolgusuz dikme tasarımlı basma numunesine 226 N büyüklüğünde kuvvet uygulanmıştır. 226 N büyüklüğünde bir kuvvet altında maksimum 0,33 mm ve minimum 0,02 mm yer değiştirdiği tespit edilmiştir. Maksimum yer değiştirme, numunenin üst çeneye temas noktasında gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Aynı modele ait gerilme sonuçları ise Şekil 5.27'de gösterilmiştir.

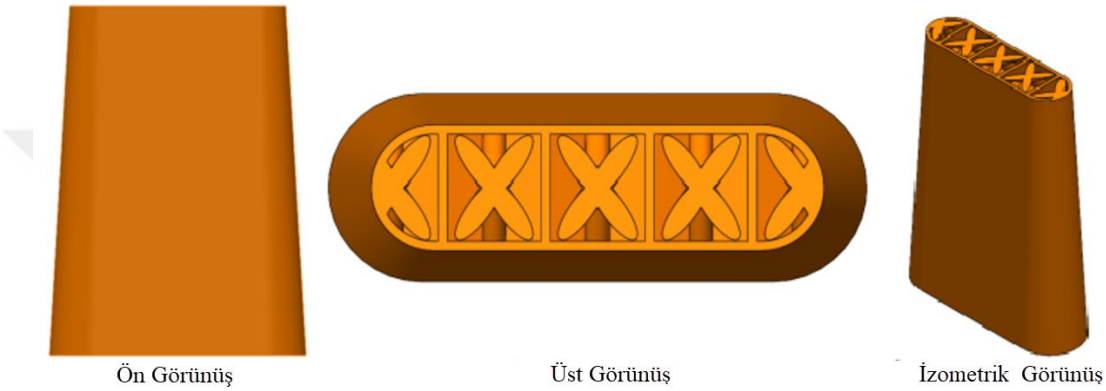


Şekil 5.27 DTB numunesine ait gerilme değerleri

Sonuçlar incelendiğinde dolgusuz dikme tasarımlı basma modeline ait maksimum gerilmeler en çok alt çene temas noktasında tespit edilmiştir. Maksimum 2,94 Mpa ve minimum 0,57 Mpa değerinde bir von Mises gerilmesine sahip olduğu gözlemlenmiştir.

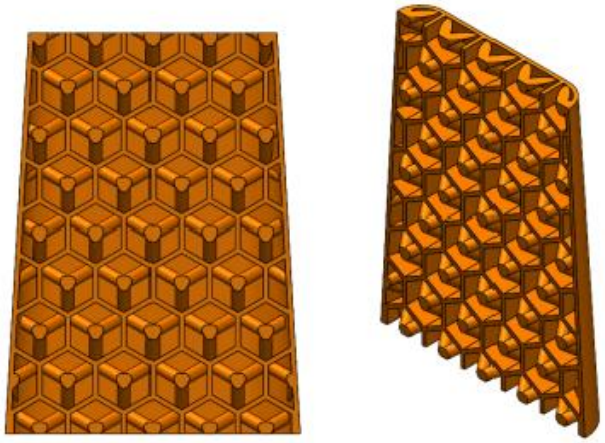
5.7.2 Yatay Dolgulu Hibrid Dikme Tasarımlı Modele Ait Basma Deneyi Analizi

İç yapısında dik olarak konumlandırılan güçlendirilmiş çekirdek hücre bulunan hibrid yapılı insansız hava aracı ana iniş takımı dikmesine ait basma deneyi numunelerine yapısal analiz çalışması gerçekleştirilmiştir. Yatay dolgulu hibrid dikme tasarımlı modele ait basma numuneleri Şekil 5.28'de gösterilmiştir.



Şekil 5.28 YHTB modeline ait tasarımı

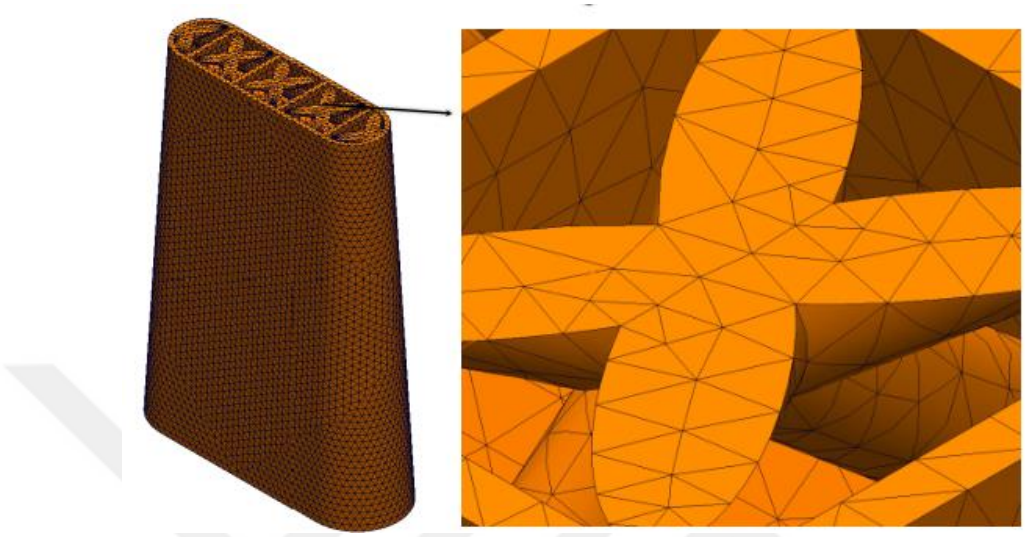
Tasarımın iç kısmında güçlendirilmiş çekirdek hücre modeli kullanılmıştır. Tasarımın daha iyi anlaşılması açısından yatay dolgulu hibrid modele ait basma numunesinin kesit görünümü Şekil 5.29'da verilmiştir.



Şekil 5.29 YHTB modeli kesit görünümü

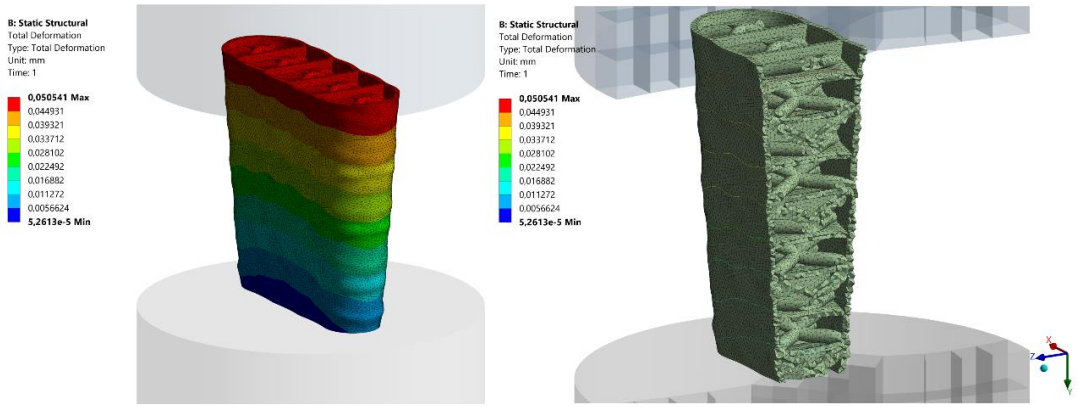
Ön, üst ve izometrik görünümleri ve kesit görünümleri verilen tasarıma yapısal analiz uygulaması gerçekleştirmeden önce mesh atama işlemi gerçekleştirilmiştir. Analiz için

en doğru sonucu alabilmek adına 1 mm kalınlığında ve quadratik mesh atılarak numune analize hazır hale getirilmiştir. Numuneye ait mesh uygulaması Şekil 5.30'da gösterilmiştir.



Şekil 5.30 YHTB numunesine ait mesh uygulaması

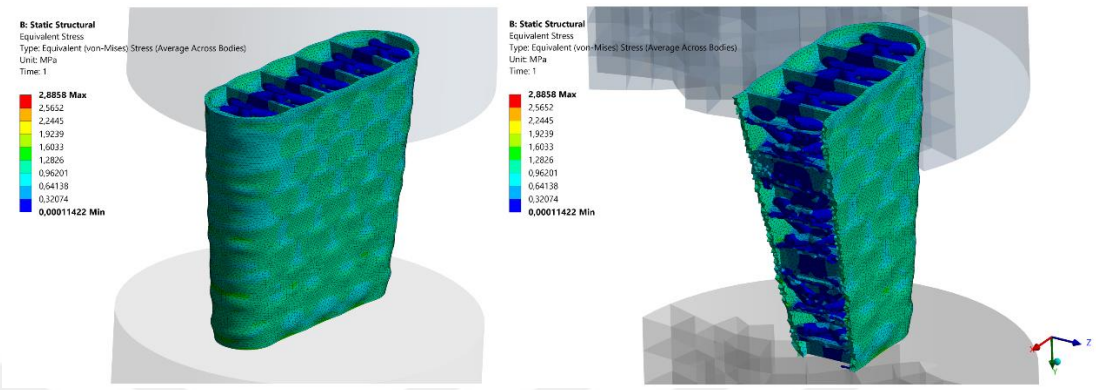
Mesh yapısı belirlenen modelde iniş takımı ana dikmesine ait hesaplamaları yapılan değerler kullanılarak yapısal analiz çalışması hedeflenmiştir. Simülasyon modelinde alt çene sabit tutularak üst çeneden numuneye doğru 226 N büyüklüğünde kuvvet uygulanmıştır. Kuvvet uygulama işleminden sonra toplam yer değiştirme ve maksimum gerilme değerleri gözlemlenmiştir. Modele ait toplam deformasyon sonuçları Şekil 5.31'de gösterilmiştir.



Şekil 5.31 YHTB numunesine ait yer değiştirme sonuçları

Modele ait yer değiştirme sonuçları incelendiğinde 226 N büyüklüğünde bir kuvvet altında maksimum 0,05 mm ve minimum 0,0005 mm yer değiştirdiği tespit edilmiştir.

Maksimum yer değiştirme numunenin üst çeneye temas noktasında gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Yatay dolgulu hibrid dikme tasarımına ait gerilme sonuçları ise Şekil 5.32'de gösterilmiştir.

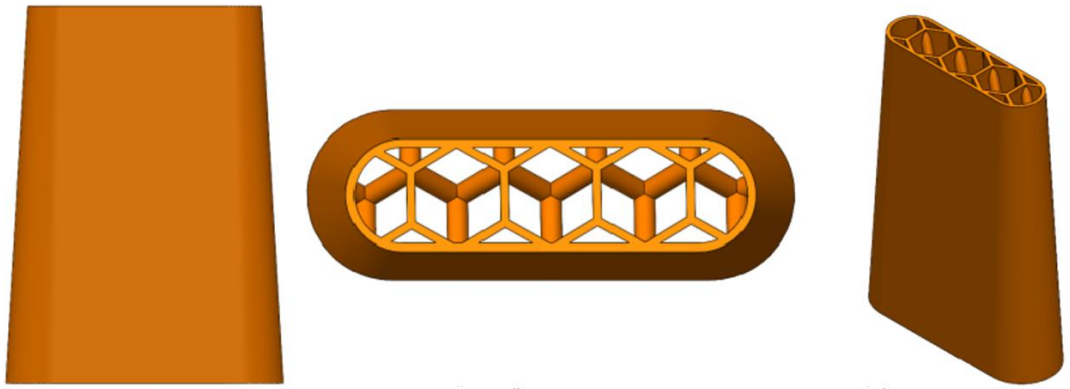


Şekil 5.32 YHTB numunesine ait von Mises gerilme sonuçları

Yatay dolgulu hibrid dikme tasarımı basma numunesine ait yapısal analiz sonucunda maksimum 2,88 MPa değerinde von Mises gerilmesine sahip olduğu gözlemlenmiştir.

5.7.3 Düşey Dolgulu Hibrid Dikme Tasarımlı Modele Ait Basma Deneyi Analizi

İç yapısında dik olarak konumlandırılan güçlendirilmiş çekirdek hücre bulunan hibrid yapılı insansız hava aracı ana iniş takımı dikmesine ait basma deneyi numunelerine yapısal analiz çalışması gerçekleştirilmiştir. Düşey dolgulu hibrid dikme tasarımlı modele ait basma numunesi tasarımı Şekil 5.33'te gösterilmiştir.



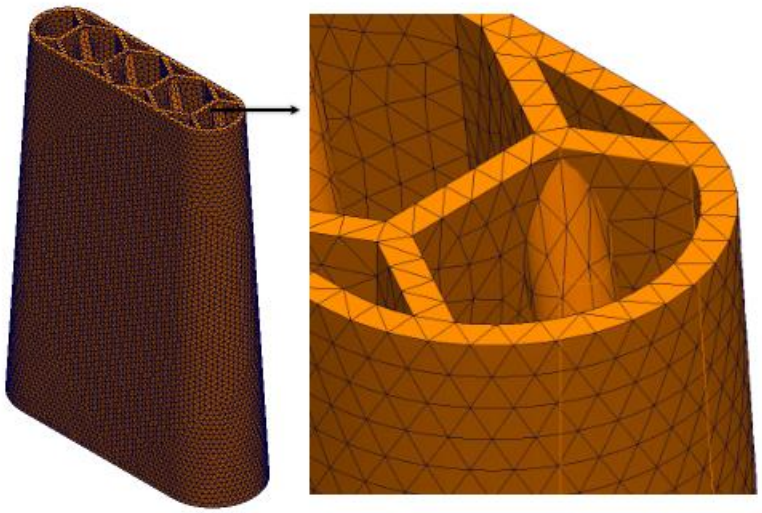
Şekil 5.33 DHTB modeline ait tasarımı

Tasarımın iç kısmında güçlendirilmiş çekirdek hücre modeli kullanılmıştır. Düşey dolgulu hibrid dikme tasarımlı modele ait basma numunesinin kesit görünümü Şekil 5.34'te verilmiştir.



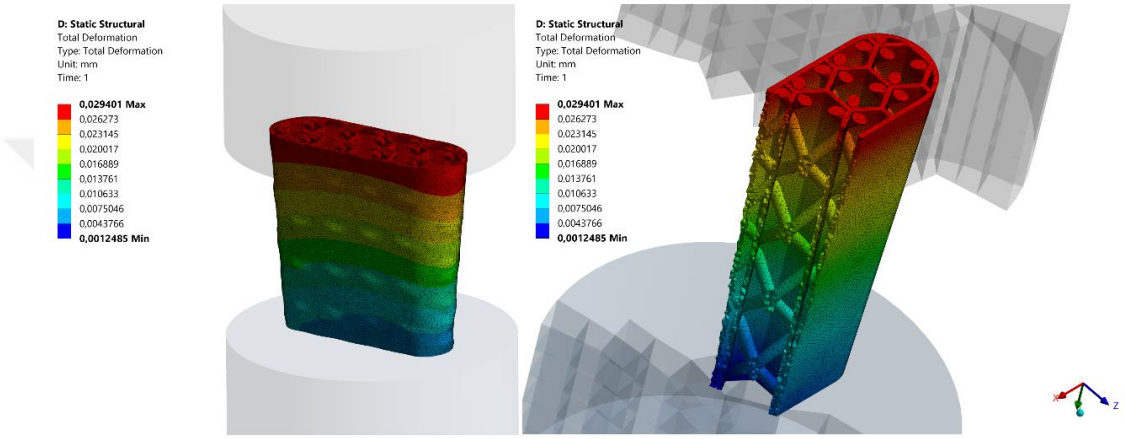
Şekil 5.34 DHTB modeli kesit görünümü

Ön, üst, izometrik görünümleri ve kesit görünümleri verilen tasarıma, yapısal analiz uygulaması gerçekleştirmeden önce mesh atama işlemi gerçekleştirilmiştir. Analiz için en doğru sonucu alabilmek adına 1mm kalınlığında ve quadratik mesh atılarak numune analize hazır hale getirilmiştir. Numuneye ait mesh uygulaması Şekil 5.35'te gösterilmiştir.



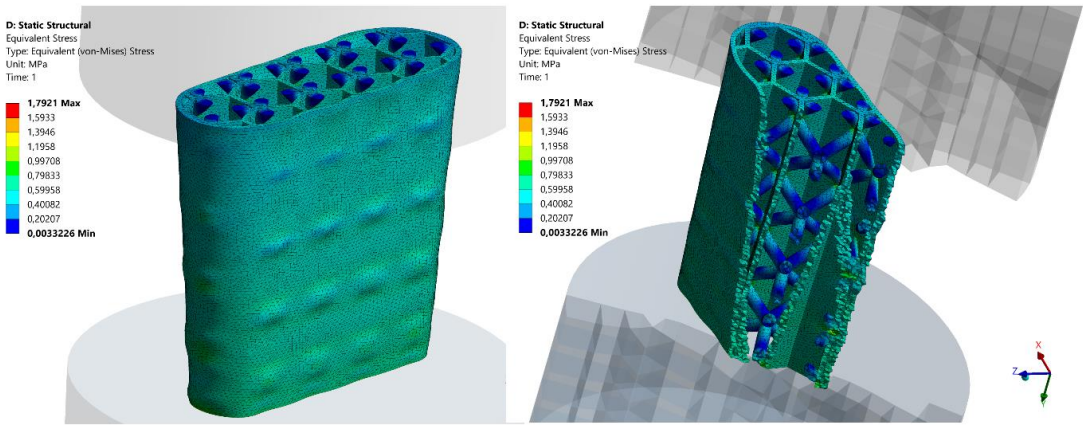
Şekil 5.35 DHTB numunesine ait mesh uygulaması

Mesh yapısı belirlenen düşey dolgulu hibrid modelde iniş takımı ana dikmesine ait sayısal analizler sonucu belirlenen değerler kullanılarak yapısal analiz çalışması gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Simülasyon modelinde alt çene sabit tutularak üst çeneden numuneye doğru 226 N büyüklüğünde kuvvet uygulanmıştır. Kuvvet uygulama işleminden sonra toplam yer değiştirme ve maksimum gerilme değerleri gözlemlenmiştir. Modele ait toplam deformasyon sonuçları Şekil 5.36'da gösterilmiştir.



Şekil 5.36 DHTB numunesine ait deformasyon miktarları

Modele ait yer değiştirme sonuçları incelendiğinde 226 N büyüklüğünde bir kuvvet altında maksimum 0,02 mm ve minimum 0,001 mm yer değiştirdiği tespit edilmiştir. Maksimum yer değiştirmenin, numunenin üst çeneye temas noktasında gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Düşey dolgulu hibrid modele ait gerilme sonuçları ise Şekil 5.37'de gösterilmiştir.

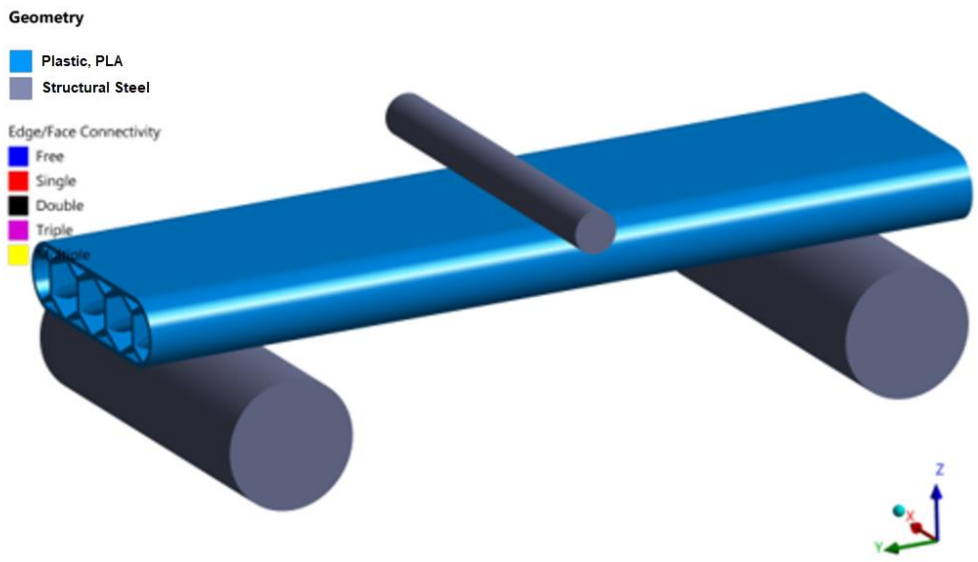


Şekil 5.37 DHTB numunesine ait von Mises gerilme miktarları

Düşey dolgulu hibrid dikme tasarımı basma numunesine ait yapısal analiz sonucunda maksimum 1,79 MPa değerinde von Mises gerilmesine sahip olduğu gözlemlenmiştir.

5.8 Üç Nokta Eğme Numunelerinin Yapısal Analizi

İnsansız hava aracı ana iniş takımı dikmesinden iniş, kalkış ve taksi sırasında basma ve eğilme yüklerine dayanım göstermesi beklenmektedir. İniş takımı ana dikmesine etkiyen yükler altında, ana dikmenin eğilme performansını incelemek için üç nokta eğilme simülasyonları gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Üç nokta eğme deneyi sabit iki adet mesnet üzerine yerleştirilen numuneye, bir başka mesnet tarafından kuvvet uygulanmasıyla gerçekleştirilir. Bu bölümde ana iniş takımı dikmesinde belirlenen aynı tasarımlarla üç nokta eğme test cihazında deneyi gerçekleştirilebilecek şekilde ve ASTM C273 standartlarına uygun olarak üç nokta eğme testi sayısal analizleri yapılmıştır. Üç nokta eğme testleri için gerçekleştirilen simülasyonlar Şekil 5.38'de gösterildiği üzere üç nokta eğme deneyi standartlarına uygun şekilde oluşturulmuştur.



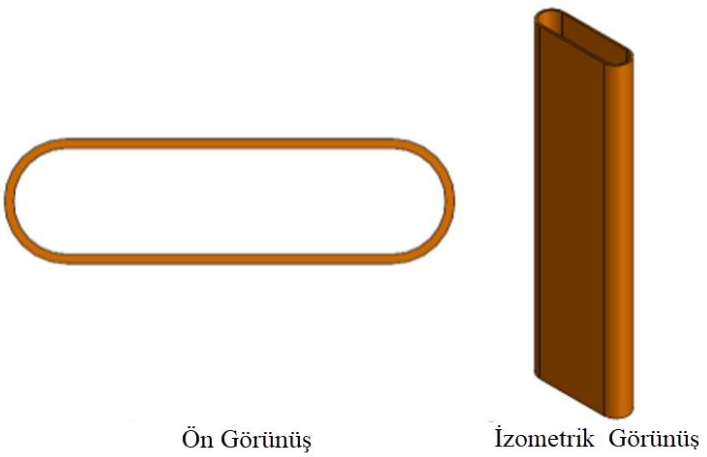
Şekil 5.38 Üç nokta eğme numuneleri simülasyon modeli

Numunelerin üzerine yerleştirildiği mesnetleri çapı 30 mm ve numunelere kuvvet uygulayan mesnet çapı 10 mm olarak belirtilmiştir. Mesnetler rijit olarak modellenmiştir. Kuvvet uygulayan mesnete ise sadece z doğrultusunda hareket tanımlanmıştır. Mesnetler arası mesafe 150 mm, numune boyutu 200 mm olarak yapısal analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu tez çalışmasında üç nokta eğme

numunelerine ait bütün yapısal analiz simülasyonları Şekil 5.38'de görüldüğü gibi gerçekleştirilmiştir. Üç farklı model üzerinde simülasyon çalışmaları gerçekleştirilerek toplam deformasyon miktarı, maksimum gerilme miktarlarının tespit edilmesi hedeflenmiştir

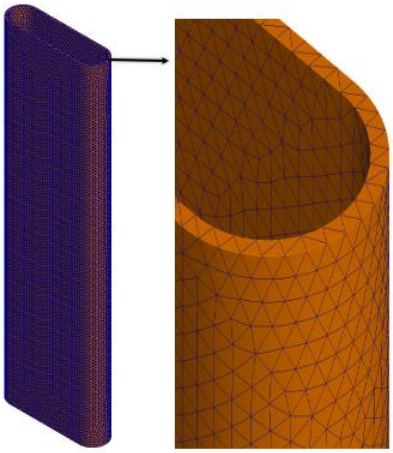
5.8.1 Dolgusuz Dikme Tasarımlı Modele Ait Üç Nokta Eğme Deneyi Analizleri

Belirlenen tasarımda iç yapısında herhangi bir kafes yapı geometrisi bulunmayan insansız hava aracı ana iniş takımı dikmesine ait üç nokta eğme deneyi numunelerine yapısal analiz çalışması gerçekleştirilmiştir. Modele ait üç nokta eğme numunesi tasarımı Şekil 5.39'da gösterilmiştir.



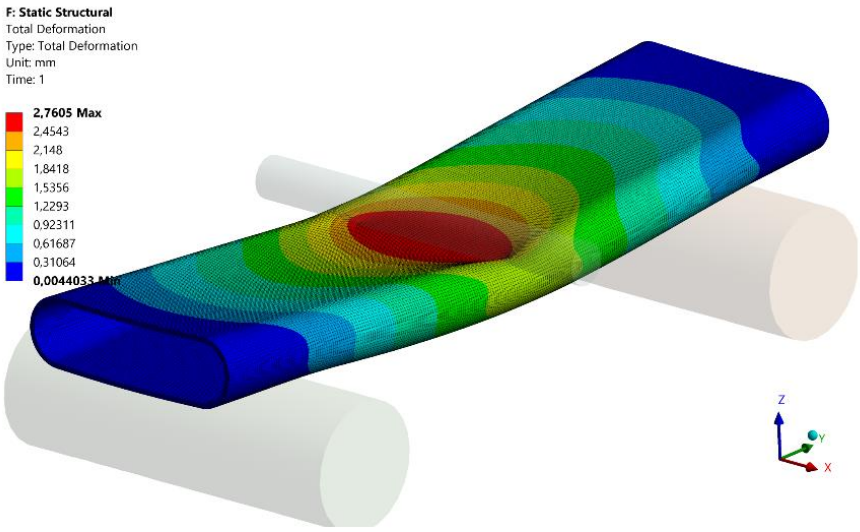
Şekil 5.39 DTE modeline ait numune tasarımı

Üst ve izometrik görünümleri verilen üç nokta eğme numunesi tasarımına yapısal analiz uygulaması gerçekleştirilmeden önce mesh atama işlemi gerçekleştirilmiştir. Analiz için en doğru sonucu alabilmek adına 1 mm kalınlığında ve quadratik mesh uygulaması yapılarak numune analize hazır hale getirilmiştir. Numuneye ait mesh uygulaması Şekil 5.40'ta gösterilmiştir.



Şekil 5.40 DTE numunesine ait mesh uygulaması

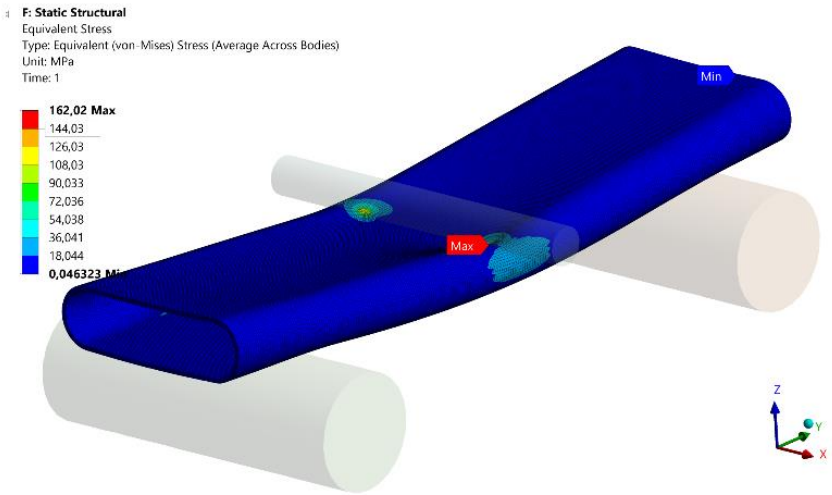
Dolgusuz dikme tasarımına sahip üç nokta eğme numunesinin mesh yapısı belirlendikten sonra insansız hava aracı ana iniş takımı dikmesine gelen yük hesaplamaları sonuçları kullanılarak analiz çalışması yapılması hedeflenmiştir. 30 mm çapında sabit iki mesnet üzerine yerleştirilen numuneye, 10 mm çapa sahip mesnet tarafından 226 N büyüklüğünde bir kuvvet yüklemesi gerçekleştirilmiştir. Kuvvet uygulanması sonucunda numuneye ait toplam yer değiştirme ve maksimum gerilme miktarları tespit edilmiştir. Şekil 5.41'de dolgusuz dikme tasarımına sahip üç nokta eğme numunesinin yer değiştirme sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 5.41 DTE numunesine ait deformasyon miktarı

Hareketli mesnetin temas ettiği ve kuvvetin yüklenmeye başladığı noktada maksimum yer değiştirme miktarının olduğu gözlemlenmiştir. Toplamda 2,76 mm bir yer

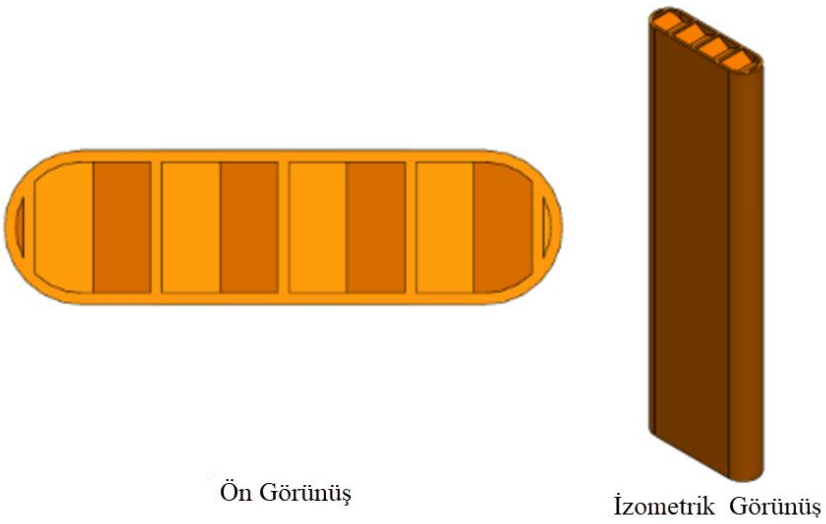
değiştirme tespit edilmiştir. İçi boş modele ait üç nokta eğme numunesinin von Mises gerilme miktarları Şekil 5.42'de gösterilmiştir. Gözlemlenen grafiğe göre hareketli mesnetin temas ettiği noktada yaklaşık 162 Mpa bir maksimum gerilme olduğu tespit edilmiştir.



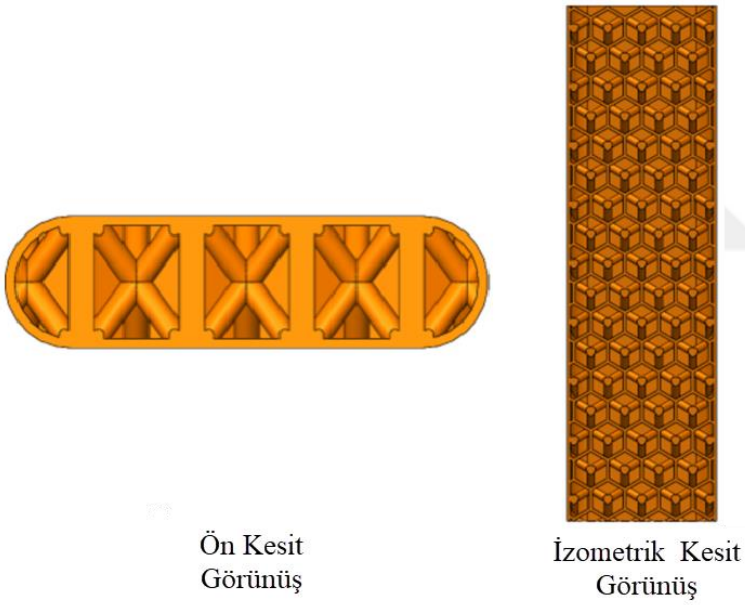
Şekil 5.42 DTE numunesine ait von Mises gerilme değerleri

5.8.2 Yatay Dolgulu Hibrid Dikme Tasarımlı Modele Ait Üç Nokta Eğme Deneyi Analizleri

Yatay dolgulu hibrid dikme tasarımlı üç nokta eğme numunelerinin içerisinde tasarıma dik bir şekilde yerleştirilmiş güçlendirilmiş çekirdek hücre yapısı geometrileri bulunmaktadır. Yatay dolgulu hibrid dikme tasarımlı insansız hava aracı ana iniş takımı dikmesine ait üç nokta eğme deneyi numunelerine yapısal analiz çalışması gerçekleştirilmiştir. Modele ait üç nokta eğme numunesi tasarımı ve kesit görünümleri sırasıyla Şekil 5.43 ve Şekil 5.44'te gösterilmiştir.

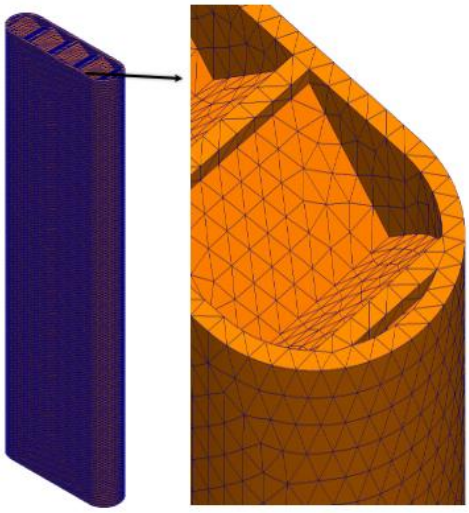


Şekil 5.43 YHTE modeline ait ön ve izometrik görünüm



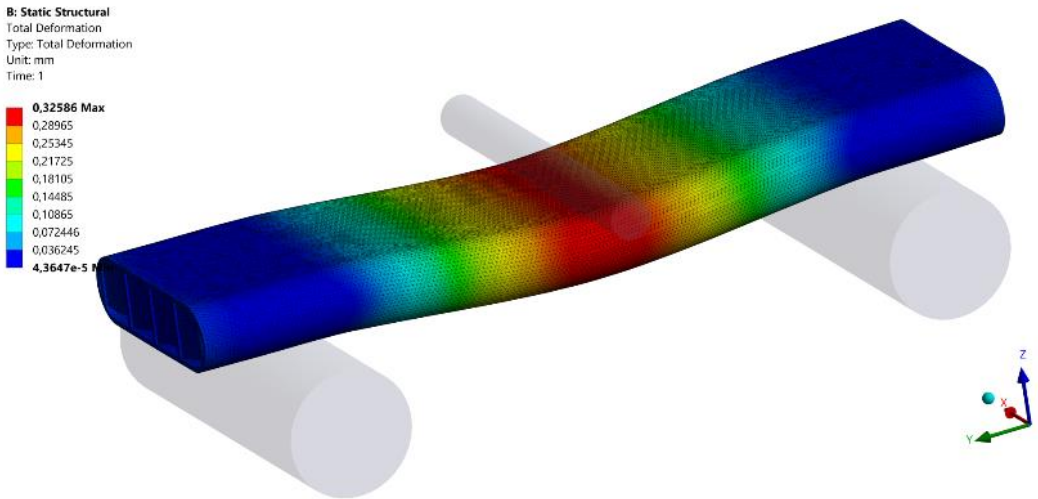
Şekil 5.44 YHTE modeline ait kesit görünümleri

Üst ve izometrik görünümleri ile kesit görünümleri de verilen üç nokta eğme numunesi tasarımına yapısal analiz uygulaması gerçekleştirilmeden önce mesh atama işlemi gerçekleştirilmiştir. Analiz için en doğru sonucu alabilmek adına 1 mm kalınlığında ve quadratik mesh uygulaması yapılarak numune analize hazır hale getirilmiştir. Numuneye ait mesh uygulaması Şekil 5.45'te gösterilmiştir.



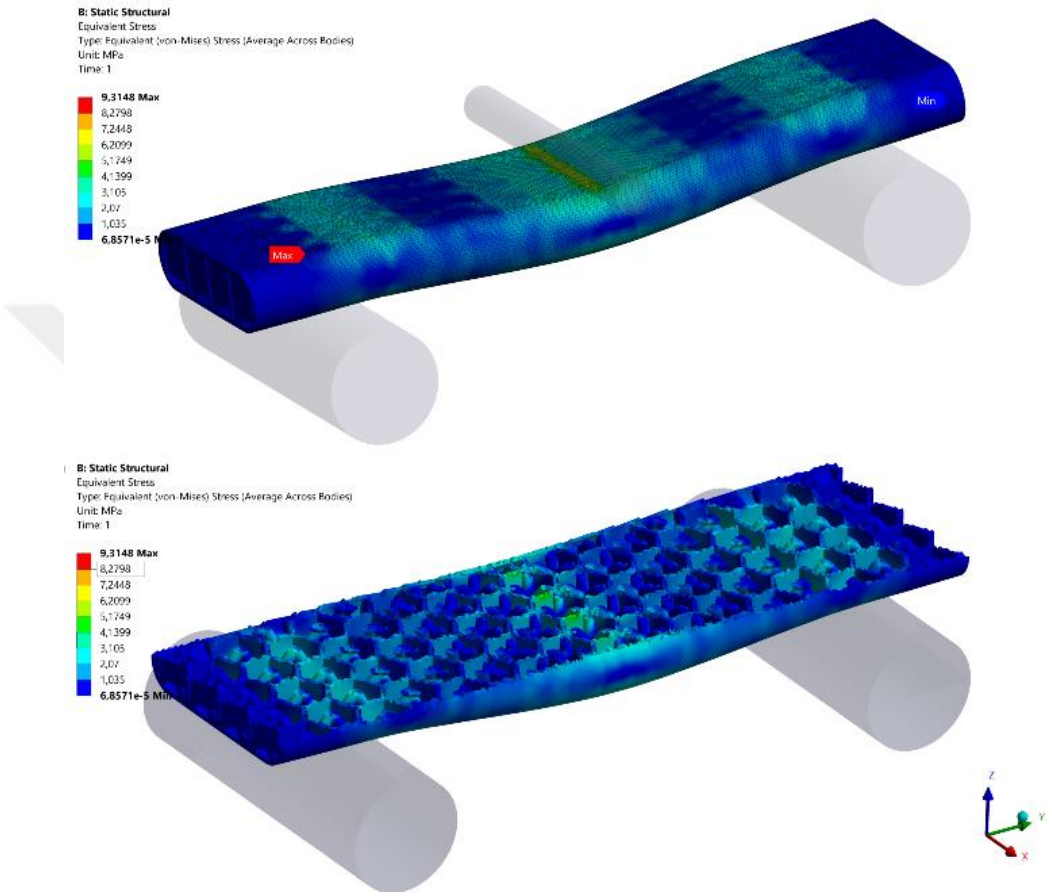
Şekil 5.45 YHTE numunesine ait mesh uygulaması

Yatay dolgulu hibrid dikme tasarımına sahip üç nokta eğme numunesinin mesh yapısı belirlendikten sonra insansız hava aracı ana iniş takımı dikmesine gelen yük hesaplamaları için analiz çalışması yapılması hedeflenmiştir. 30 mm çapında sabit iki mesnet üzerine yerleştirilen numuneye, 10 mm çapa sahip mesnet tarafından 226 N büyüklüğünde bir kuvvet yüklemesi gerçekleştirilmiştir. Kuvvet uygulanması sonucunda numuneye ait toplam yer değiştirme ve maksimum gerilme miktarları tespit edilmiştir. Şekil 5.46'da Yatay dolgulu hibrid dikme tasarımına sahip üç nokta eğme numunesinin yer değiştirme sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 5.46 YHTE numunesine ait yer değiştirme miktarı

Hareketli mesnetin temas ettiği ve kuvvetin yüklenmeye başladığı noktada maksimum yer değiştirme miktarının olduğu gözlemlenmiştir. Toplamda 0,32 mm bir yer değiştirme tespit edilmiştir. Yatay dolgulu hibrid dikme tasarımına ait üç nokta eğme numunesinin von Mises gerilme miktarları Şekil 5.47'de gösterilmiştir.



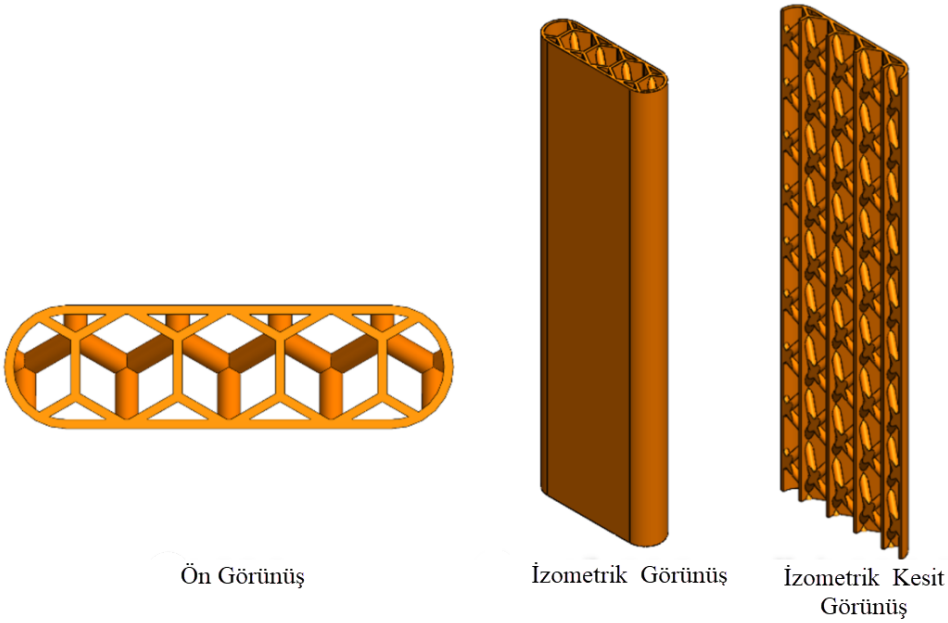
Şekil 5.47 YHTE numunesine ait von Mises gerilmeleri

Şekil 5.47'de gözlemlenen grafiğe göre hareketli mesnetin temas ettiği noktada maksimum gerilme olduğu tespit edilmiştir. Maksimum gerilme miktarı ise 9,31 Mpa olduğu belirlenmiştir.

5.8.3 Düşey Dolgulu Hibrid Dikme Tasarımlı Modele Ait Üç Nokta Eğme Deneyi Analizleri

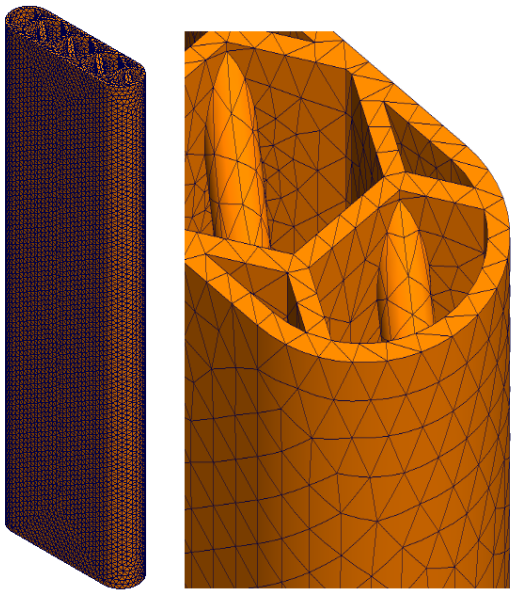
Düşey dolgulu hibrid dikme tasarımına ait üç nokta eğme deneyi numuneleri, içerisinde güçlendirilmiş çekirdek hücre yapısı bulunan ve tasarıma paralel bir şekilde konumlandırılarak oluşturulmuştur Düşey dolgulu hibrid dikme tasarımlı insansız

hava aracı ana iniş takımı dikmesine ait üç nokta eğme deneyi numunesine yapısal analiz çalışması gerçekleştirilmiştir. Modele ait üç nokta eğme numunesi tasarımı ve kesit görünümleri sırasıyla Şekil 5.48'te gösterilmiştir.



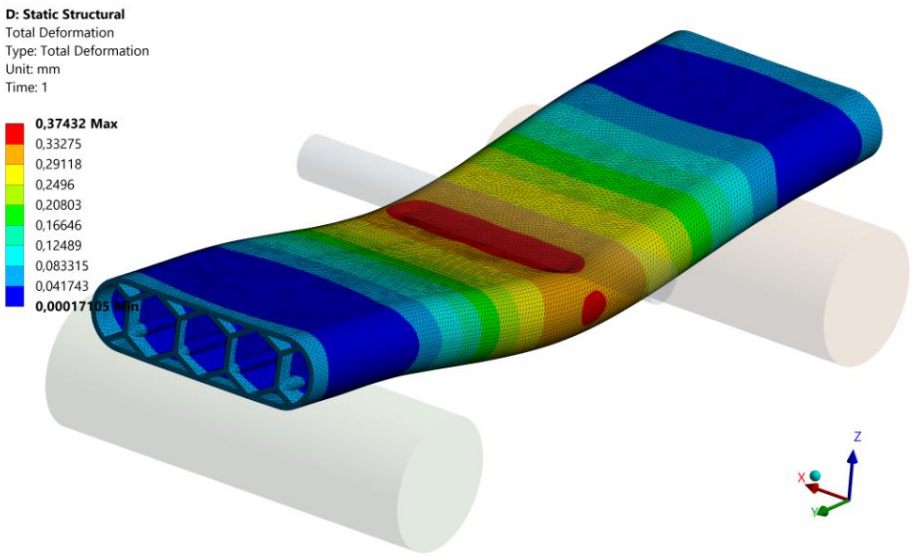
Şekil 5.48 DHTE modeli tasarımı

Üst, izometrik ve kesit görünümleri verilen üç nokta eğme numunesi tasarımına yapısal analiz uygulaması gerçekleştirilmeden önce mesh atama işlemi gerçekleştirilmiştir. Analiz için en doğru sonucu alabilmek adına 1 mm kalınlığında ve quadratik mesh uygulaması yapılarak numune analize hazır hale getirilmiştir. Numuneye ait mesh uygulaması Şekil 5.49'da gösterilmiştir.



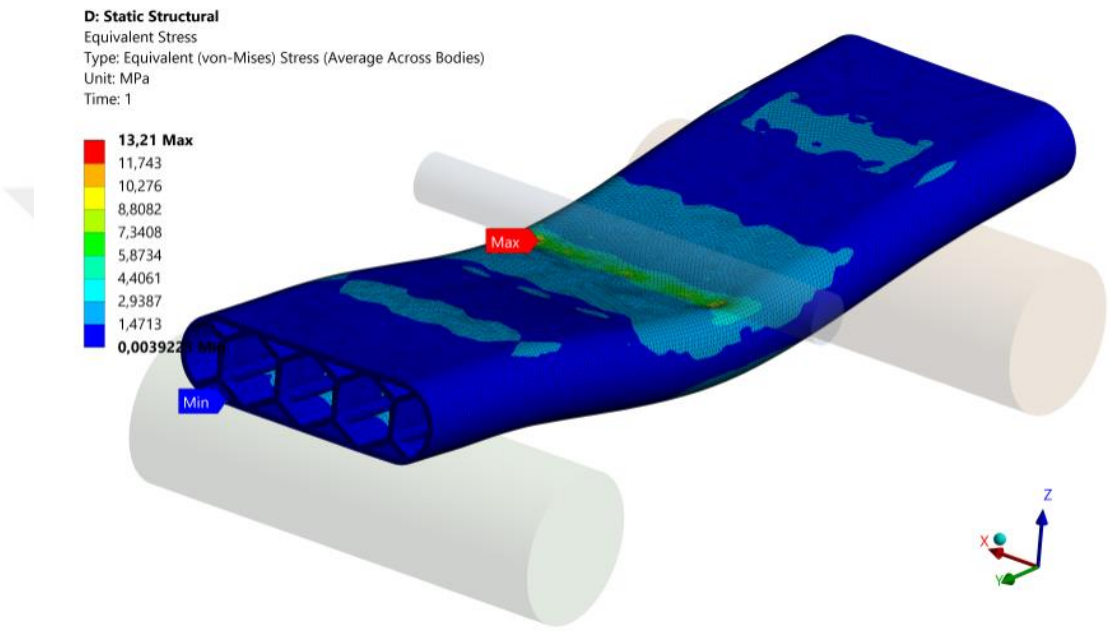
Şekil 5.49 DHTE numunesine ait mesh uygulaması

Düşey dolgulu hibrid dikme tasarımına sahip üç nokta eğme numunesinin mesh yapısı belirlendikten sonra insansız hava aracı ana iniş takımı dikmesine gelen yük hesaplamaları sonuçları kullanılarak analiz çalışması yapılması hedeflenmiştir. 30 mm çapında sabit iki mesnet üzerine yerleştirilen numuneye, 10 mm çapa sahip mesnet tarafından 226 N büyüklüğünde bir kuvvet yüklemesi gerçekleştirilmiştir. Kuvvet uygulanması sonucunda numuneye ait toplam yer değiştirme ve maksimum gerilme miktarları tespit edilmiştir. Şekil 5.50'de Düşey dolgulu hibrid dikme tasarımına sahip üç nokta eğme numunesinin yer değiştirme sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 5.50 DHTE numunesine ait deformasyon sonuçları

Düşey dolgulu hibrid dikme tasarımlı üç nokta eğme numunesine hareketli mesnetin temas ettiği noktada maksimum deformasyon gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Gözlemlenen deformasyon sonuçlarına göre maksimum 0,37 mm yer değiştirme meydana geldiği tespit edilmiştir. Düşey dolgulu hibrid dikme tasarımlı üç nokta eğme numunesine ait von Mises gerilme analiz sonuçları Şekil 5.51'de gösterilmiştir.



Şekil 5.51 DHTE numunesine ait von Mises gerilmesi

Düşey dolgulu hibrid dikme tasarımına sahip üç nokta eğme numunesinin von Mises gerilme sonuçları incelendiğinde maksimum gerilmenin hareketli mesnetin temas ettiği noktada olduğu gözlemlenmiştir. En yüksek gerilme değerinin 13,21 Mpa olduğu tespit edilmiştir.

Numunelerin sayısal analiz sonuçları incelenmiş, basma deneyi numuneleri analiz sonuçlarına göre dolgusuz dikme tasarımlı modelde maksimum 0,33 mm yer değiştirme ve 2,94 Mpa maksimum gerilmeye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Yatay dolgulu hibrid dikme tasarımlı basma numunesinde ise yer değiştirme miktarı 0,05 mm ve maksimum gerilme miktarı 2,88 Mpa olduğu tespit edilmiştir. Düşey dolgulu hibrid dikme tasarımlı basma numunesinde 0,02 mm yer değiştirmeye karşılık 1,79 Mpa maksimum gerilme sonucu verdiği incelenmiştir. Bu sonuçlar neticesinde sıkıştırma yönünde en az deforme olan ve en az gerilmenin oluştuğu tasarımın düşey dolgulu

hibrid dikme tasarımı olduğu belirlenmiştir. Dikme tasarımlarının üç boyutlu tasarımlarına yapılan malzeme atamaları sonucunda ağırlıkları Solidwork yazılımı vasıtasıyla hesaplanmış ve elde edilen sayısal analiz sonuçlarına göre Tablo 5.3'de verilmiştir.

Tablo 5.3 Basma numuneleri özellik değişimleri

Numune	Kütle (gr)	Yer değiştirme (mm)	Gerilme (mm)
DT	17	0,32	2,94
YHT	47,3	0,05	2,88
DHT	45,6	0,02	1,79

Tablo 5.3'de incelenen sonuçlara göre başlangıçta 17 gr olan dolgusuz dikme tasarımının kütlesi yatay dolgulu hibrid dikme tasarımına göre 2,78 kat artmasına karşılık, 226 N kuvvet altında yer değiştirme miktarında iyileşme 6,4 kat daha fazla arttığı gözlemlenmiştir. Düşey dolgulu hibrid dikme tasarımına göre 2,68 kat kütlesi artmış olmasına rağmen yer değiştirme miktarının tam 16 kat daha fazla arttığı tespit edilmiştir. von Mises gerilme değerlerinde ise Yatay dolgulu hibrid dikme tasarımının 1,02 kat, düşey dolgulu hibrid dikme tasarımının ise 1,64 kat arttığı tespit edilmiştir. Gözlemlenen sonuçlar ışığında sıkıştırma yükü altında düşey dolgulu hibrid dikme tasarımlı basma numuneleri en iyi mekanik özellikler gösterdiği tespit edilmiştir.

Üç nokta eğilme numunelerinin optimizasyon değişimlerinde de benzer değişimler olduğu gözlemlenmiştir. Tablo 5.3'te üç nokta eğilme numunelerine ait özellik değişim tablosu yer almaktadır.

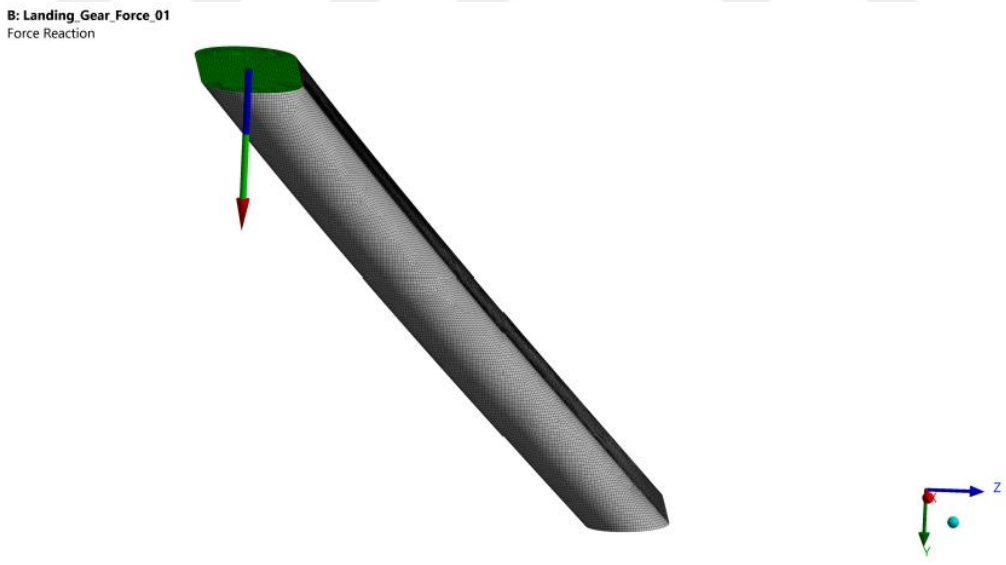
Tablo 5.4 Üç nokta eğilme numuneleri özellik değişimleri

Numune	Kütle (gr)	Yer değiştirme (mm)	Gerilme (mm)
DT	32	2,76	162
YHT	80,8	0,32	9,31
DHT	76	0,37	13,21

Tablo 5.3 incelendiğinde başlangıçta 32 gr olan dolgusuz dikme tasarımının kütlesi yatay dolgulu hibrid dikme tasarımı ile karşılaştırıldığında 2,52 kat kütlesi artmasına

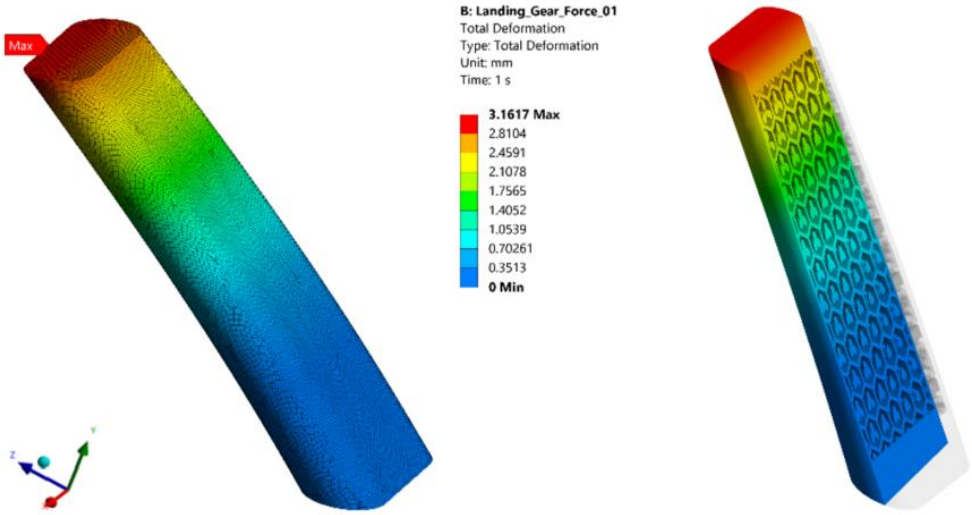
karşılık toplam yer değiştirmesi 6,6 kat daha fazla arttığı gözlemlenmiştir. Düşey dolgulu hibrid dikme tasarımı incelendiğinde kütlesi 2,3 kat arttırılmış buna karşın toplam yer değiştirmesinde 7,5 kat oranında bir artış meydana geldiği tespit edilmiştir. von Mises gerilme değerlerindeki değişimler incelendiğinde basma numunelerinden çok daha farklı sonuçlarla karşılaşılmıştır. Yatay dolgulu hibrid dikme tasarımlarına ait maksimum gerilme 17,4 kat oranında bir değişim olduğu gözlemlenmiştir. Düşey dolgulu hibrid dikme tasarımında ise 12,2 oranında bir değişim meydana geldiği tespit edilmiştir.

Yapılan basma ve eğme numuneleri analiz çalışması sonucunda üç model olarak tasarlanan insansız hava aracı ana dikmesinde kullanılmak için yatay dolgulu hibrid dikme tasarımlı model seçilmiştir. Yatay dolgulu hibrid dikme tasarımı için açısal yük sonucunda dikme gövdesinde oluşan gerilmelerin dağılımını ve deformasyon değişimlerini incelemek amacıyla sayısal anali gerçekleştirilmiştir. İnsansız hava aracı ana dikmesine ait açısal analiz çalışmasında kullanılan mesh çalışması Şekil 5.52'de verilmiştir.



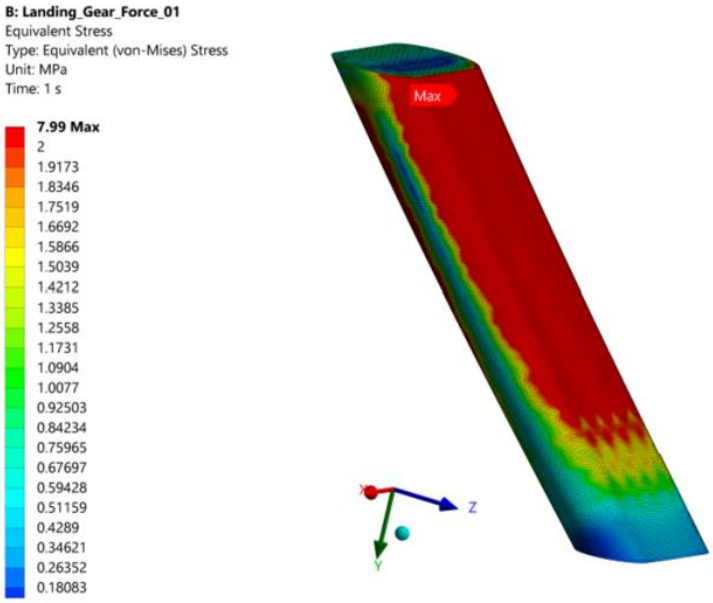
Şekil 5.52 Ana dikme tasarımına ait mesh uygulaması

Mesh uygulaması en iyi sonuca ulaşabilmek için quadratik ve üçgen geometriler ile 0,7 mm kalınlığında mesh tabakaları oluşturulmuştur. Mesh uygulaması gerçekleştirildikten sonra tasarımın yer değiştirme miktarı hesaplanması hedeflenmiştir. Tasarıma ait yer değiştirme miktarı Şekil 5.53'te gösterilmektedir.



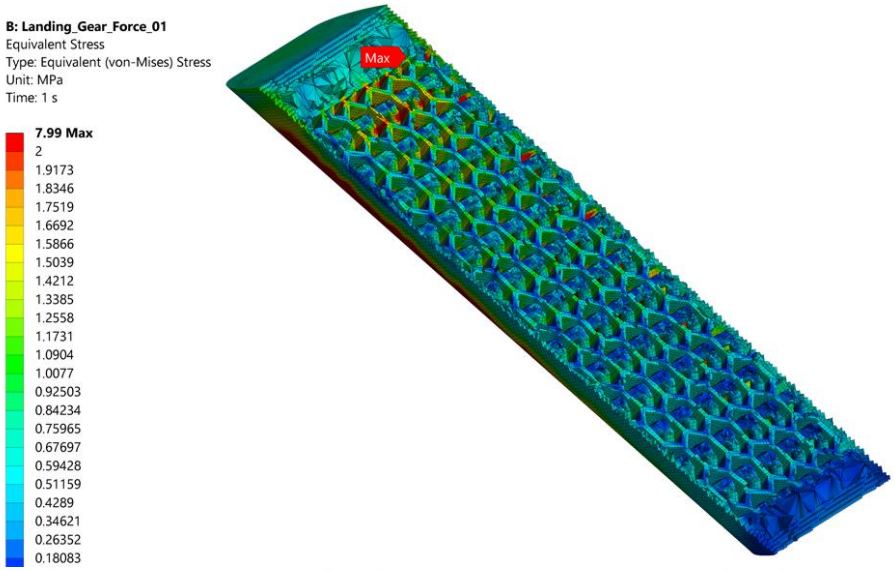
Şekil 5.53 İniş takımı dikmesi yer değiştirme sonuçları

Sonuçlar incelendiğinde maksimum 3,17 mm bir yer değiştirme olduğu tespit edilmiştir. En fazla yer değiştirmenin yük uygulanan kısımda gerçekleştiği tespit edilmiştir. İniş takımı ana dikmesine ait gerilme sonuçları Şekil 5.54'e verilmiştir.

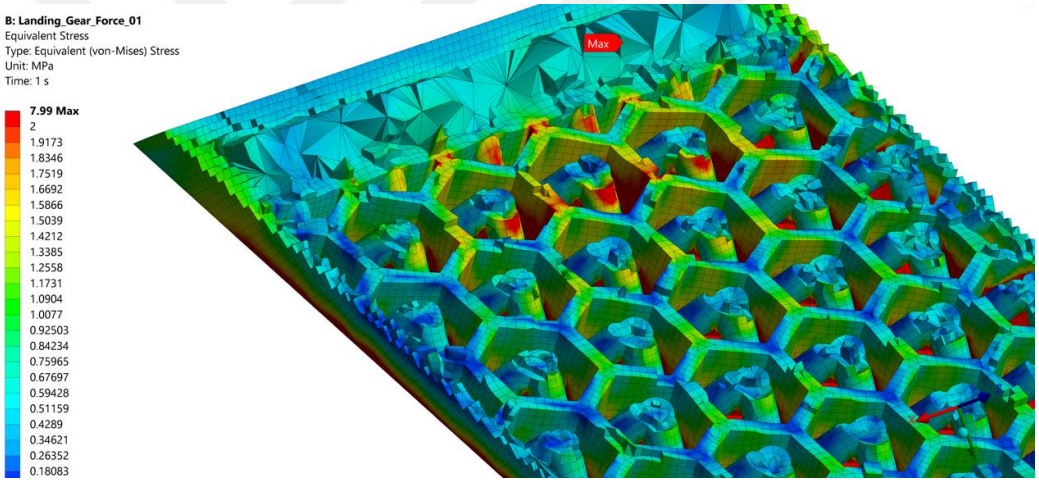


Şekil 5.54 İniş takımı ana dikmesi gerilme sonuçları

İniş takımı ana dikmesine ait maksimum von Mises gerilme değerinin 7,99 Mpa olduğu tespit edilmiştir. Ana iniş takımı ana dikmesi tasarımının içerisinde bulunan kafes geometrilerin davranışlarını daha iyi anlamak amacıyla Şekil 5.55 ve Şekil 5.56'da analiz sonucunun kesit ve detaylı kesit görünümü verilmiştir.

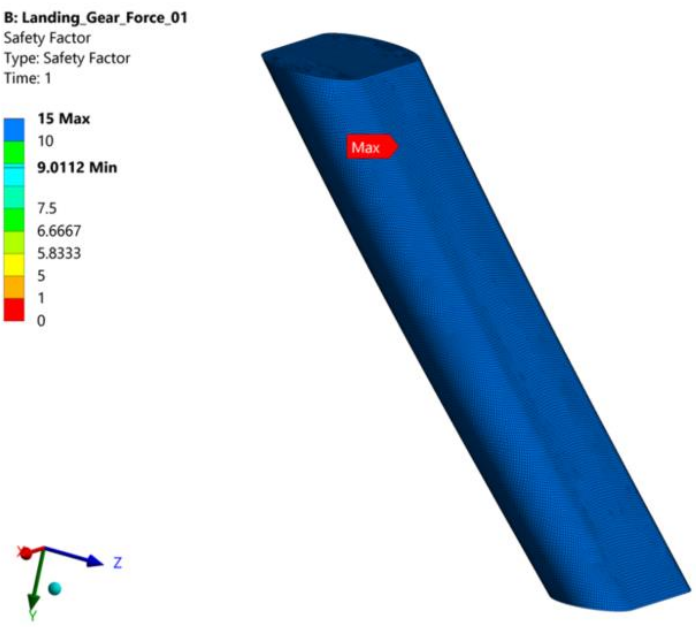


Şekil 5.55 Ana iniş takımı dikmesine ait kesit görünümü



Şekil 5.56 Ana iniş takımı dikmesine ait detaylı kesit görünümü

Sonuçlar incelendiğinde ana iniş takımı tasarım halinde uygulanan kuvvet sonucunda hem basma hem de eğilme yüküne maruz kalmaktadır. İçerisinde bulunan kafes yapılı geometriler üzerine etkiyen kuvveti dolgu noktasında birleştirerek dış duvarlara ilettiği tespit edilmiştir. Gerilmelerin güçlendirilmiş çekirdek hücrelerden başlayarak arttığı, daha sonra hücre duvarlarına iletildiği tespit edilmiştir. Güçlendirilmiş çekirdek hücre ana dikmenin yapısal bütünlüğünü koruyarak gerilmenin gövdenin bütününe dağıtılmasına katkı sağlamıştır. Literatürde uçaklarda iniş takımları için güvenlik katsayısının 3G alındığı gözlemlenmiştir (Sadraey,2018). Bu nedenden dolayı iniş takımı tasarımının güvenlik katsayısı sonuçları incelenmiştir. Şekil 5.56'da iniş takımı dikmesine ait güvenlik katsayısı sonuçları gösterilmiştir.



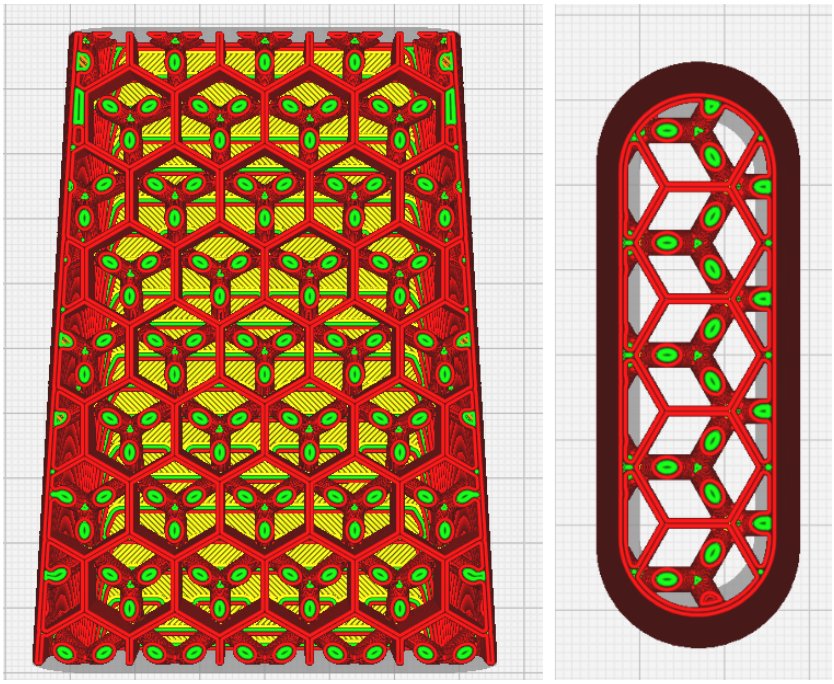
Şekil 5.57 İniş takımı dikmesinin güvenlik katsayısı

Şekil 5.57'de yer alan sonuçlara göre iniş takımı ana dikmesi tasarımı maksimum 15 Mpa ve minimum 9,01 Mpa güvenlik katsayısına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu değerler neticesinde oldukça güvenli bir iniş takımı tasarımı ve optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. İniş takımı ana dikmesi için mekanik analizler yapılabilmek adına tasarımlar gerçekleştirilmiştir. Bu tasarımlara basma ve üç nokta eğme testleri uygulanarak modelin güvenilirliği ve diğer etkenlerin belirlenmesi hedeflenmiştir.

6. TASARIM NUMUNELERİNİN ÜRETİMİ VE MEKANİK ANALİZİ

6.1 Numunelerin Üretimi

Bu tez kapsamında tasarımları yapılan insansız hava aracı iniş takımları için gerekli simülasyonlar oluşturularak burun iniş takımı ana taşıyıcısı için yapısal analiz ve topoloji optimizasyonu çalışması, ana iniş takımı dikmelerine ise yapısal analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Yapısal analizleri gerçekleşen tasarımların mekanik analizleri gerçekleştirilmek üzere numunelerin eklemeli imalat yöntemi kullanılarak üretimi gerçekleştirilmiştir. Tasarımların üretimi Creality Ender-3 S1 markalı üç boyutlu yazıcı ile Esun marka PLA+ termoplastik filament malzemesi ile gerçekleştirilmiştir. Literatürde belirtilen eklemeli imalat proseslerine uygun olarak üretimin gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Solidworks CAD yazılımında tasarımları yapılan numuneler STL formatında kaydedilerek Ultimaker Cura isimli dilimleme yazılımına aktarılmıştır. Şekil 6.1'de numunelerin dilimlenmiş durumdaki görüntüsü gösterilmiştir.



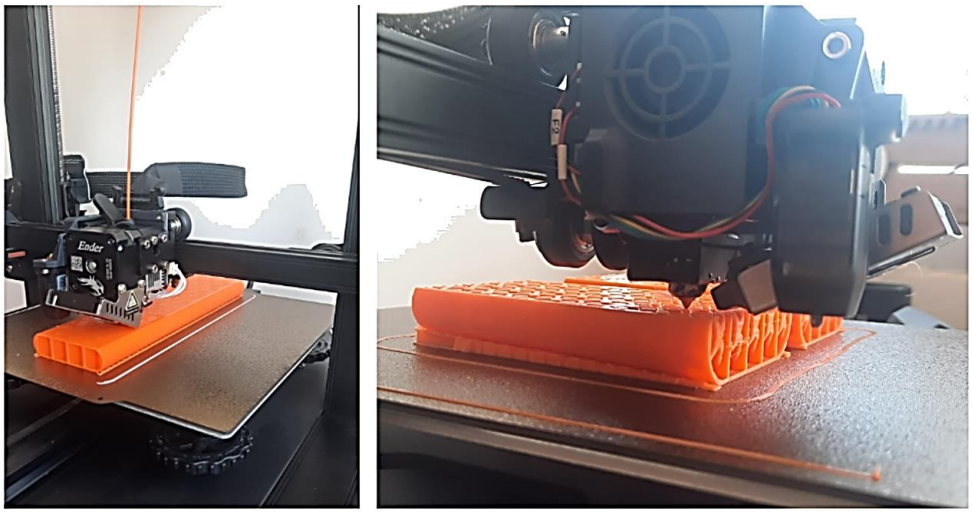
Şekil 6.1 Numunelerin dilimlenmiş görüntüleri

Dilimlenen iniş takımı numuneleri kullanılan PLA+ termoplastik filament malzemesine uygun olarak yazıcı parametreleri belirlendikten sonra EYM yöntemiyle üretilmek hedefiyle üç boyutlu yazıcıya aktarılmak üzere. gcode dosyası olarak kaydedilmiştir. Literatür gözlemlendiğinde araştırmacılar en iyi malzeme özelliklerine ulaşmak için, en iyi baskı parametrelerinin yüksek dolgu yoğunluğu ve 0.12 mm tabaka kalınlığı kombinasyonları ile üretildiğini gözlemlemişlerdir (Torres, 2015). Bir diğer çalışmada ise 60-90 mm/s baskı hızında en iyi basma değerlerine sahip olduğunu söylemişlerdir (Torres, 2016). Bu bilgiler ışığında 220 ^{o}C nozul sıcaklığı, 60 ^{o}C tabla sıcaklığı ve 60 mm/s baskı hızında %80 dolulukta numunelerin üretimleri hedeflenmiştir. Numunelerin üç boyutlu yazıcı aracılığıyla imalatında kullanılan üretim parametreleri Tablo 6.1'de verilmiştir.

Tablo 6.1 Üretim parametreleri

Parametre	Değerler	Birim
Filament Rengi	Turuncu	-
Filament Çapı	1,75	mm
Nozul Çapı	0,6	mm
Yazdırma Hızı	60	m/s
Tabla Sıcaklığı	60	^{o}C
Nozul Sıcaklığı	220	^{o}C
Katman yüksekliği	0,2	mm
Dolgu Geometrisi	Çizgi	-
Doluluk Oranı	80	%

Tablo 6.2'de kullanılan üretim parametreleri ışığında .gcode dosyası olarak kaydedilen tasarımlar üç boyutlu yazıcıda üretilmek üzere hazır hale getirilmiştir. Mekanik analizleri yapılmak üzere eğme ve basma numunelerinin üretimi üç boyutlu yazıcıda üretilmiştir. Şekil 6.2'de üç nokta eğme ve basma numunelerinin üç boyutlu yazıcıda üretim fotoğrafları gösterilmiştir.



(a) (b)

Şekil 6.2 a) Üç nokta eğme ve b) basma numunelerinin üç boyutlu yazıcıda üretilmesi

Deney numuneleri mekanik testlerin gerçekleştirilmesine yönelik uygun bir şekilde üretilmiştir. Basma numuneleri iniş takımının tasarımına uygun olarak konik tasarımını koruyarak üretilmiştir. Üç nokta eğme numuneleri ise mesnetlere eşit şekilde yerleştirilmesi amacı ile düz bir formda üretilmiştir. Üç boyutlu yazıcıda üretilen eğme ve basma numunelerini sırasıyla Şekil 6.3 ve Şekil 6.4'te gösterilmiştir.



Şekil 6.3 Üretimi gerçekleştirilen üç nokta eğme deney numuneleri



Şekil 6.4 Üretimi gerçekleştirilen basma deney numuneleri

Üretim sonrasında özellikle basma numunelerinde EYM eklemeli imalat teknolojisinin dezavantajlarından olan kötü yüzey kalitesi problemleri ile karşılaşılmıştır. Kötü yüzey kalitesine sahip olan basma numunelerine birtakım yüzey zımparalama işlemleri uygulanmıştır. Şekil 6.5' te kötü yüzey kalitesine sahip numune ve zımparalama işlemi yapılmış numune gösterilmektedir.



Şekil 6.5 Kötü yüzey kalitesine sahip ve zımparalama işlemi yapılmış numuneler

Üretimi gerçekleştirilen ve yüzey düzeltme işlemleri yapılan numunelerin deneyler isimlendirilmesi, ağırlık değişimleri ve ortalama kütleleri Tablo 6.2'de verilmiştir.

Tablo 6.2 Üretilen numunelere ait isimlendirme ve ağırlık değişimleri

Numune Tipi	Numune Adı	Kütle (gr)	Ortalama kütle (gr)
Basma Numuneleri	DTB1 DTB2 DTB3	20,05 20,52 20,52	20,36
	YHTB1 YHTB2 YHTB3	60,09 59,92 60,35	60,12
	DHTB1 DHTB2 DHTB3	60,78 60,70 61,00	60,82
Eğme Numuneleri	DTE1 DTE2 DTE3	38,8 38,8 38,8	38,8
	YHTE1 YHTE2 YHTE3	104,36 104,47 103,65	104,5
	DHTE1 DHTE2 DHTE3	94,88 95,1 95,1	95,0

İnsansız hava aracı için tasarlanan iniş takımı numunelerinin üretimi mekanik analizlerini yapmak üzere üretilmiştir. Her bir tasarım üçer adet üretilerek mekanik deney sonuçlarının doğruluğunun artırılması hedeflenmiştir.

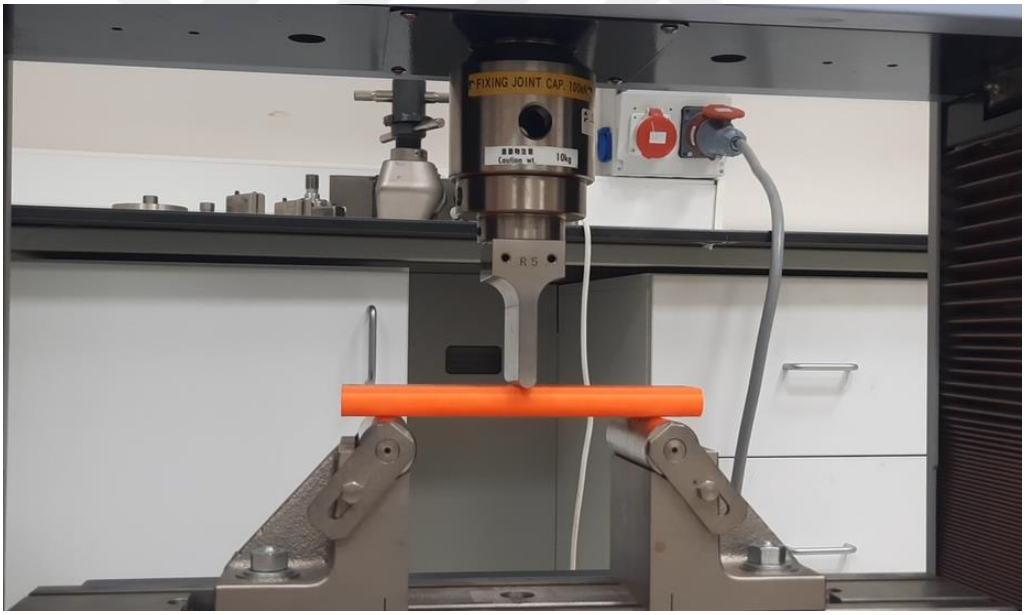
6.2 Mekanik Analizlerin Gerçekleştirilmesi

Basma deneyi statik yükleme koşulları altında metal ya da metal olmayan malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlendiği bir mühendislik deneyidir. İki çene arasına yerleştirilen numuneye sabit hızda artan bir yük uygulanmasıyla gerçekleştirilir. Numunelerin taşıyabileceği maksimum yük değerine ulaşıp daha sonra azaldığı ve numune üzerinde yükseklik boyunca hücre duvarlarının basıldığı deney çeşididir. Üç nokta eğme deneyi ise statik olmayan yükleme koşulları altında iki mesnet üzerine yerleştirilen numuneye sabit hızda üçüncü bir mesnet tarafından artan yük uygulanması ile gerçekleştirildiği bir deney türüdür (Su vd., 1997).

Eklemeli imalat teknolojisiyle üretilen numunelerin basma deneyleri Kastamonu Üniversitesi Merkezi Araştırma laboratuvarında bulunan Shimadzu Autograph AGS-

X marka 100 KN kapasiteli basma cihazında 2,5 mm/dak ilerleme hızında ve ASTM C365/365M standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Üç nokta eğilme deneyleri 1 mm/dak ilerleme hızında ve ASTM C393/C393M standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Her bir tip numune için daha doğru sonuçlar elde etmek amacıyla deneyler üç tekrarlı olarak gerçekleştirilmiştir.

Numunelerin sabit hızda sıkıştırma yükleri altındaki çökme miktarları tespit edilmiştir. Basma testi numunelerde 40 mm sıkıştırmaya kadar devam etmiştir. Üç nokta eğme testinde ise numunelerde kırılma meydana gelinceye kadar test devam ettirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda numunelere ait kuvvet – uzama grafikleri elde edilmiştir. Üç nokta eğme ve basma numunelerinin test cihazına yerleştirilmiş görüntüleri Şekil 6.6 ve Şekil 6.7'de gösterilmiştir. Üç nokta eğme numuneleri 30 mm çapında olan ve merkez uzaklığı 150 mm olacak şekilde sabit mesnetlerin üzerine yerleştirilmiştir.



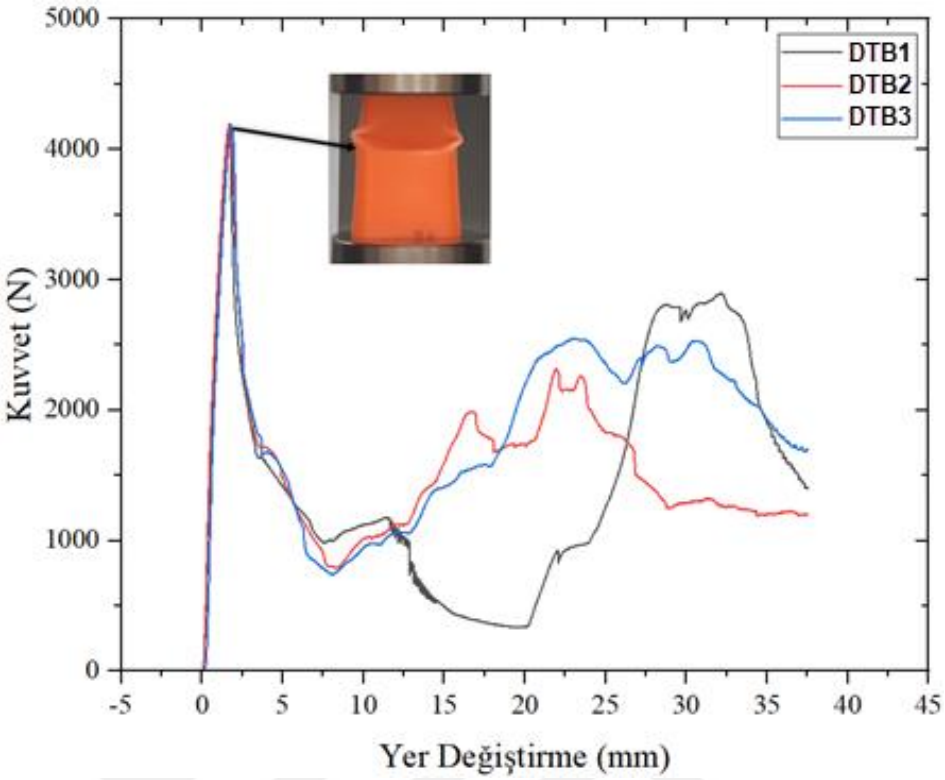
Şekil 6.6 Üç nokta eğme numunelerinin test cihazına yerleştirilmiş görüntüsü



Şekil 6.7 Basma numunelerinin test cihazına yerleştirilmiş görüntüsü

6.3 Basma Deneyi Sonuçları

Dolgusuz dikme modeli, yatay dolgulu hibrid model ve düşey dolgulu hibrid model basma numunesi tasarımlarının mekanik davranışları sıkıştırma yükü altında gözlemlenmiştir. Dolgusuz dikme modeline ait basma numuneleri 40 mm sıkışıncaya kadar basma test cihazında üst çene tarafından kuvvet uygulanmış ve deforme olmuştur. Dolgusuz dikme modeline ait basma numuneleri kuvvet - yer değiştirme grafikleri Şekil 6.8'de gösterilmiştir.



Şekil 6.8 DTB numunelerine ait kuvvet - yer değiştirme grafiği

Şekil 6.8'de bulunan grafik incelendiğinde her üç numunenin de ilk hasar oluşuncaya kadar lineer bir şekilde yüke tepki verdiği gözlemlenmiştir. DTB1 numunesi 4193 N, DTB2 numunesi 4181 N ve DTB3 numunesi ise yaklaşık 4178 N maksimum kuvvet dayanımına sahip olduğu tespit edilmiştir. Her bir numune yaklaşık 3 mm yer değiştirme değerine ulaştıktan sonra verdiği tepki kuvvetinin azalmaya başladığı görülmektedir. Şekil 6.7'de gösterilen grafikte 4200 N seviyelerine kadar çıkan tepki kuvvetinin 1000 N seviyelerine indikten sonra tekrar artmaya başladığı gözlemlenmiştir. Bu durum deforme olan duvarların üst üste gelmesiyle tekrardan bir tepki kuvveti verdiği anlamına gelmektedir. Tablo 6.3'te dolgusuz dikme numunelerine ait maksimum tepki kuvvetleri ve maksimum gerilme değerleri verilmiştir.

Tablo 6.3 DTB numunelerine ait test sonuçları

Deney Numunesi	Maksimum Kuvvet (N)	Maksimum Gerilme (Mpa)
DTB1	4193	3,30
DTB2	4181	3,29
DTB3	4178	3,29

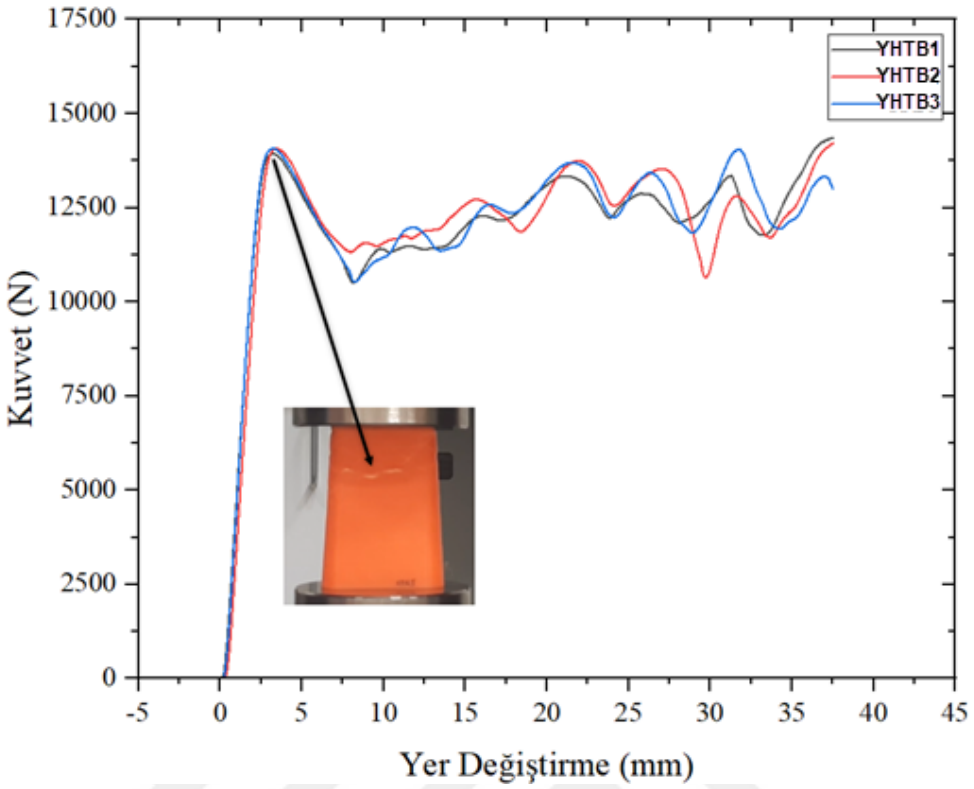
Dolgusuz dikme tasarımlı basma numuneleri sıkıştırma yükü altında deformeleri gerçekleşirken DTB1 3,30 Mpa, DTB2 ve DTB3 3,29 Mpa bir von Mises gerilmesine sahip olduğu tespit edilmiştir. Numunelerde 40 mm sıkışma gerçekleştikten sonra deforme olmuş görüntüsü Şekil 6.9'da gösterilmiştir.



Şekil 6.9 DTB numunelerine ait deformasyon

DTB numunelerinin 40 mm sıkıştırma yükü altında duvarlarında ezilme ve kopma meydana geldiği gözlemlenmiştir. İç yapısında herhangi bir kafes yapılı geometri bulunmamasından dolayı DTB numunelerine etkiyen tüm kuvvetin tasarımın duvarları tarafından karşılandığı tespit edilmiştir.

Yatay dolgulu hibrid dikme tasarımlı basma numuneleri sıkıştırma yükü altında 40 mm sıkışma meydana gelinceye kadar üst çene tarafından kuvvet uygulanmıştır. Test sonucu oluşan yatay dolgulu hibrid dikme tasarımlı basma numunelerinin kuvvet-yer değiştirme grafikleri Şekil 6.10'da gösterilmiştir.



Şekil 6.10 YHTB numunelerine ait kuvvet yer değiştirme grafiği

Şekil 6.10'da bulunan yatay dolgulu hibrid dikme tasarımlı basma numunelerinin kuvvet yer değiştirme grafiği incelendiğinde numunede ilk hasar meydana gelinceye kadar kuvvet lineer bir şekilde artış göstermiştir. YHTB1 numunesi 14367 N, YHTB2 numunesi 15673 N ve YHTB3 numunesi 14191 N yüke kadar dayanım gösterdiği ve deforme olmadığı gözlemlenmiştir. İlk hasar meydana geldikten sonra tepki kuvveti 10000 N seviyelerine kadar düştüğü görülmektedir. İçerisinde bulunan güçlendirilmiş çekirdek hücrenin gelen yükü ilk olarak hücre duvarlarına daha sonra tasarımın dış duvarına ileterek tekrar tepki kuvvetinin yükseldiği ve ilk deforme olmaya başladığı 14500 N seviyelerine kadar arttığı tespit edilmiştir.

Yatay dolgulu hibrid basma numunelerinde güçlendirilmiş çekirdek hücrenin hücre duvarları tasarıma dik olarak yerleştirildiğinden numuneye gelen sıkıştırma yükünü, geometri içerisinde yer alan takviyeler tarafından karşılandığı daha sonra hücre duvarlarına ilettiği tespit edilmiştir. Tablo 6.4'te YHTB numunelerine ait sıkıştırma kuvveti ve maksimum gerilme miktarları gösterilmiştir.

Tablo 6.4 YHTB numunelerine ait test sonuçları

Deney Numunesi	Maksimum Kuvvet (N)	Maksimum Gerilme (Mpa)
YHTB 1	14367	11,31
YHTB 2	15673	12,34
YHTB 3	14191	11,17

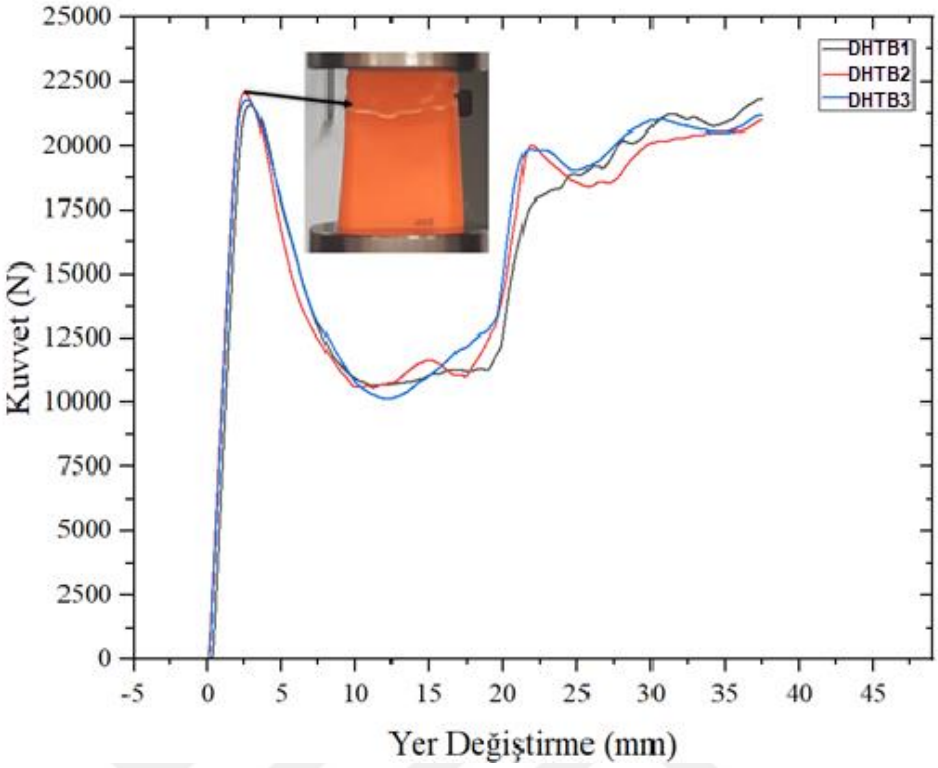
Yatay dolgulu hibrid basma numuneleri sıkıştırma yükü altında deformeleri gerçekleşirken YHTB1 11,31 Mpa, YHTB2 12,34 ve YHTB3 11,29 Mpa bir von Mises gerilmesine sahip olduğu tespit edilmiştir. Numunelerde 40 mm sıkışma gerçekleştikten sonra deforme olmuş görüntüsü Şekil 6.11'de gösterilmiştir.



Şekil 6.11 YHTB numunelerine ait deformasyon

YHTB numunelerinin 40 mm sıkıştırılması sonucunda içerisinde bulunan kafes yapı geometrilerin gelen yükü sönümleyerek önce güçlendirilmiş çekirdek hücre duvarlarına iletildiği, numunenin daha fazla sıkışmasıyla da tasarımın hücre duvarlarına kuvvetin iletildiği gözlemlenmiştir. Yatay dolgulu hibrid basma numunelerin kontrollü bir şekilde deforme olduğu, içerisinde bulunan güçlendirilmiş çekirdek hücre sebebiyle dağılmadan bir arada kaldığı görülmektedir.

Düşey dolgulu hibrid basma numuneleri sıkıştırma yükü altında 40 mm sıkışma meydana gelinceye kadar üst çene tarafından kuvvet uygulanmıştır. Test sonucu oluşan düşey dolgulu hibrid basma numunelerinin kuvvet yer değiştirme grafikleri ve deforme olduğu nokta Şekil 6.12'de gösterilmiştir.



Şekil 6.12 DHTB numunelerine ait kuvvet yer değiştirme grafiği

Şekil 6.12'de bulunan düşey dolgulu hibrid basma numunelerinin kuvvet yer değiştirme grafiği incelendiğinde numunede ilk hasar meydana gelinceye kadar kuvvet lineer bir şekilde artış göstermiştir. DHTB1 numunesi 21836 N, DHTB2 numunesi 22059 N ve DHTB3 numunesi 21773 N sıkıştırma yüküne kadar dayanım gösterdiği ve deforme olmadığı gözlemlenmiştir. İlk hasar meydana geldikten sonra tepki kuvvetinin 10000 N seviyelerine kadar düştüğü görülmektedir. İçerisinde bulunan güçlendirilmiş çekirdek tasarıma paralel olarak konumlandırıldığından dış duvar ve güçlendirilmiş hücre duvarları beraber sıkıştırma yüküne karşı tepki vermektedir. Sıkışan duvarlar 10000 N seviyelerine düştükten sonra çekirdek hücresinin içerisindeki takviyeler üst üste gelerek tepki kuvvetini arttırdığı görülmektedir. Üst üste binen güçlendirilmiş çekirdek hücreler daha fazla sıkıştırma yükü etkisi altında kaldığında hücrelerin ve dış duvarlara baskı yaptığı gözlemlenmiştir. Sıkıştırma miktarı 40 mm seviyesine geldiği anda tasarımın içerisinde bulunan güçlendirilmiş çekirdek hücreler sayesinde DHTB numunelerinin deforme olmadan önceki dayanımına kadar tepki gösterdiği tespit edilmiştir. Tablo 6.5'de DHTB numunelerine ait sıkıştırma kuvveti ve maksimum gerilme miktarları gösterilmiştir.

Tablo 6.5 DHTB numunelerine ait test sonuçları

Deney Numunesi	Maksimum Kuvvet (N)	Maksimum Gerilme (Mpa)
DHTB1	21836	17,19
DHTB2	22059	17,36
DHTB3	21771	17,14

Düşey dolgulu hibrid basma numuneleri sıkıştırma yükü altında deformeleri gerçekleşirken DHTB1 17,19 Mpa, DHTB2 17,36 ve DHTB3 17,29 Mpa bir von Mises gerilmesine sahip olduğu tespit edilmiştir. Numunelerde 40 mm sıkışma gerçekleştikten sonra deforme olmuş görüntüsü Şekil 6.13'te gösterilmiştir.



Şekil 6.13 DHTB numunelerine ait deformasyon

DHTB numunelerinin 40 mm sıkıştırılması sonucu ilk etapta bal peteği kafesin hücre duvarları ve tasarımın dış duvarının yükü sönümlediği görülmüştür. Numunenin daha fazla sıkıştırılmasıyla güçlendirilmiş çekirdek hücreler gelen yükü önce güçlendirilmiş çekirdek duvarlarına daha sonra da tasarımın dış duvarlarına ilettiği gözlemlenmektedir. Üç farklı basma numunesi arasında en fazla sıkıştırma yüküne dayanan tasarım DHTB numuneleri olduğu tespit edilmiştir. DHTB numunelerinin deformasyon sonucunda diğer numunelerden farklı olarak, numunenin alt kısmındaki form, güçlendirilmiş çekirdek hücrelerin yükü dış duvarlara iletmesi haricinde çok fazla bir deformasyon gözlemlenmemiştir. Şekil 6.13'de görüldüğü gibi DHTB numunelerinin alt kısmı neredeyse deforme olmamıştır. Güçlendirilmiş çekirdek hücre duvarları, dış duvar ve çekirdek aynı anda sıkıştırma yüküne tepki verdiğinden en iyi sıkıştırma test sonucu DHTB numunelerinde gözlemlenmiştir.

Basma deneyi gerçekleştirilen numunelerin kuvvet ve gerilme değerleri gözlemlenmiştir. Bu mekanik değerlerin yanı sıra tasarımların sönümlediği enerji miktarını bilmek insansız hava araçları iniş takımı için oldukça önemlidir. Numunelerin birim hacimleri başına düşen ve numuneler kırılıncaya kadar olan enerji sönümleme kapasitesi gerilme- gerinim (σ- ε) grafiğinin altında kalan alanın integrali hesaplanarak bulunur. Enerji sönümleme miktarı Denklem 6.1'de verilen bağıntıyla hesaplanmaktadır.

$$E = \int_0^{\varepsilon_b} \sigma . d\varepsilon \tag{6.1}$$

Bu bağıntıdan DTB, YHTB ve DHTB numunelerinin enerji sönümleme miktarları hesaplanmıştır. Tablo 6.6'da numunelerin enerji sönümleme miktarları ve DTB numunesine göre enerji sönümleme değişimleri verilmiştir.

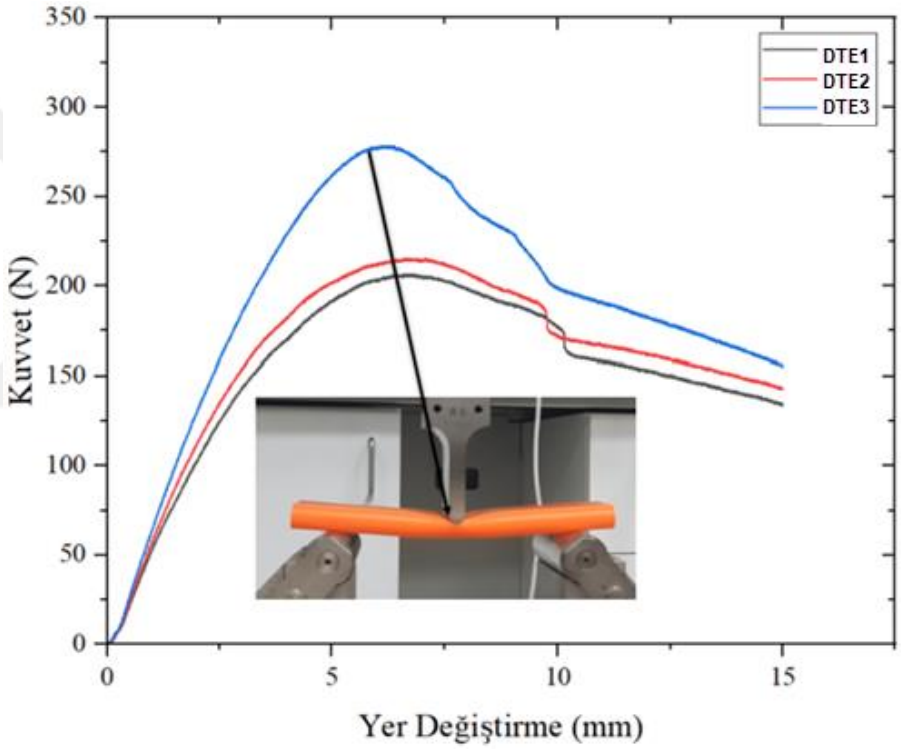
Tablo 6.6 Basma deneyi numunelerinin enerji sönümleme miktarları

Deney Numunesi	Enerji Sönümleme Miktarı (J)	Ortalama Sönümleme Miktarı (J)
DTB 1	46,61	
DTB 2	49,36	54,41
DTB 3	58,27	
YHTB 1	380,49	
YHTB 2	381,56	381,61
YHTB 3	382,78	
DHTB 1	504,31	
DHTB 2	506,92	509,83
DHTB 3	518,27	

Hesaplanan enerji sönümleme değerlerinin ardından YHTB numuneleri DTB numunelerine göre 7 kat oranında bir atış gösterdiği gözlemlenmiştir. DHTB numunelerinin ise DTB numunelerine göre 9,37 oranında bir değişim gösterdiği tespit edilmiştir. DHTB numunesi YHTB numuneleri ile karşılaştırılınca 1,33 kat daha fazla enerji sönümlediği görülmüştür.

6.4 Üç Nokta Eğme Deneyi Sonuçları

Dolgusuz dikme tasarımı, yatay dolgulu hibrid dikme tasarımı ve düşey dolgulu hibrid dikme tasarımlı üç nokta eğme numunelerinin mekanik davranışları üç nokta eğme deneyleri ile gözlemlenmiştir. Her bir numune kırılıncaya kadar testler devam etmiştir. Dolgusuz dikme tasarımlı eğme numuneleri kırılma meydana gelinceye kadar üç nokta eğme test cihazında hareketli mesnet tarafından kuvvet uygulanmış ve deforme olmuştur. Dolgusuz dikme tasarımlı basma numuneleri kuvvet – yer değiştirme grafikleri Şekil 6.14'te gösterilmiştir.



Şekil 6.14 DTE numunelerine ait kuvvet yer değiştirme grafiği

Şekil 6.14 te görülen dolgusuz dikme tasarımlı eğme numuneleri ait kuvvet yer değiştirme grafiğinde üç numunesinde yaklaşık 7 mm yer değişmesinden sonra hasar oluşmaya başladığı gözlemlenmiştir. Her numunenin parabolik hareket yaparak bir tepe noktası oluşturduğu görülmüştür. DTE1 numunesi 288 N, DTE2 numunesi,240 N ve DTE3 numunesi 224 N maksimum kuvvet dayanımına sahip olduğu tespit edilmiştir. Gözlemlenen grafikte DTE3 numunesi diğer iki numuneye göre daha fazla tepki kuvveti göstermiştir. Bunun nedeninin eklemeli imalat teknolojisi ile üretim aşamasında kontrol edilemeyen etkenler olduğu düşünülmektedir. Tablo 6.7'de DTE

numunelerine ait maksimum tepki kuvvetleri ve von Mises gerilme değerleri verilmiştir.

Tablo 6.7 DTE numunelerine ait test sonuçları

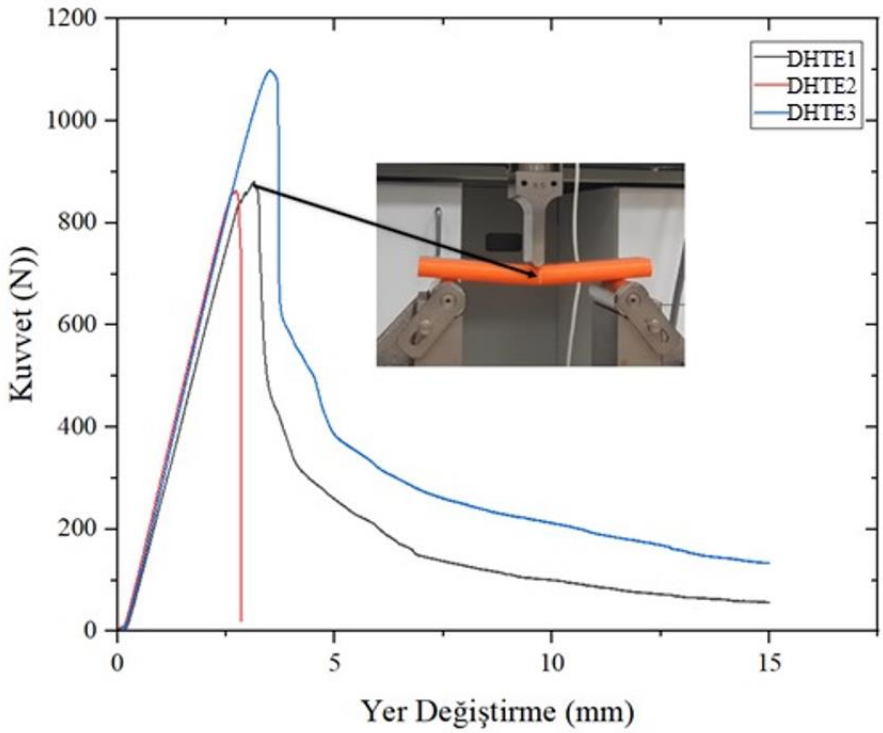
Deney Numunesi	Maksimum Kuvvet (N)	Maksimum Gerilme (N/mm^2)(Mpa)
DTE1	224	3,17
DTE2	234	3,30
DTE3	288	4,20

Dolgusuz dikme tasarımlı eğme numuneleri sıkıştırma yükü altında deformeleri gerçekleşirken DTE1 3,17 Mpa, DTE2 3,30 ve DTE3 4,20 Mpa bir von Mises gerilmesine sahip olduğu tespit edilmiştir. Numunelerin kırılma gerçekleştiği anındaki deforme olmuş görüntüsü Şekil 6.15'te gösterilmiştir.



Şekil 6.15 DTE numunelerine ait deformasyon

DTE numunelerinin kırılıncaya kadar üç nokta eğme işlemi sonucu 1,2 mm kalınlığındaki dış duvar hasar aldıktan sonra eğilmeye karşı verilen tepki gittikçe azaldığı gözlemlenmiştir. Düşey dolgulu hibrid dikme tasarımlı eğme numunelerine kırılma meydana gelene kadar kuvvet uygulanmıştır. Test sonucu oluşan düşey dolgulu hibrid dikme tasarımlı üç nokta eğme numunelerinin kuvvet yer değiştirme grafikleri ve deforme olmaya başladığı nokta Şekil 6.16'da gösterilmiştir.



Şekil 6.16 DHTE numunesinin kuvvet- yer değiştirme grafiği

DHTE numunelerinin kırılıncaya kadar kuvvet uygulanması sonucu 2,5 mm sonra numunelerinin kırılmaya başladığı gözlemlenmiştir. Tasarımın dış duvarı ve güçlendirilmiş çekirdek hücre duvarları yükü yanal olarak, güçlendirilmiş çekirdek hücre içerisindeki takviyeler ise dik olarak kuvveti karşıladığı tespit edilmiştir.

DHTE1 numunesi 882 N, DHTE2 numunesi 858 N ve DHTE3 numunesi 1102 N tepki kuvvetine sahip olduğu görülmüştür. Grafikte görülen DHTE2 numunesi pik noktasına ulaştığı anda ani kırılma sergilemiş ve diğer numunelere göre farklı bir dağılım sergilemiştir. Bu duruma eklemeli imalat yöntemi ile üretilen DHTE2 numunesinde kontrol edilemeyen faktörlerden kaynaklı katman yapışma sorununun sebep olduğu düşünülmektedir. DHTE numunelerine ait maksimum kuvvet ve maksimum gerilme değerleri Tablo 6.8'de verilmiştir.

Tablo 6.8 DHTE numunelerine ait test sonuçları

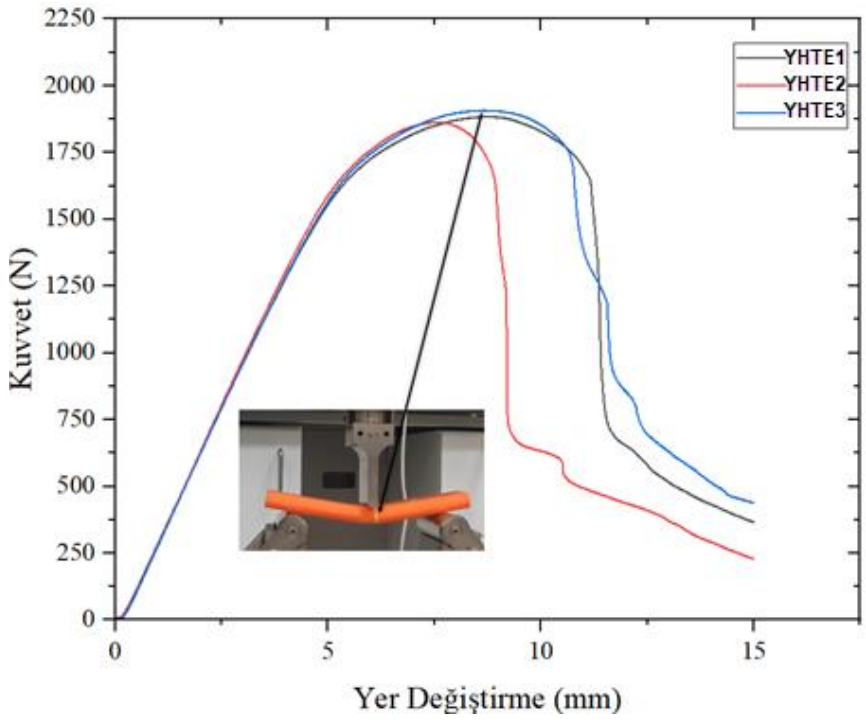
Deney Numunesi	Maksimum Kuvvet (N)	Maksimum Gerilme (Mpa)
DHTE1	882	13,51
DHTE2	858	13,26
DHTE3	1102	16,76

Düşey dolgulu hibrid dikme tasarımlı eğme numuneleri üç nokta eğme testi altında deformeleri gerçekleşirken DHTE1 13,51 Mpa, DHTE2 13,26 ve DHTE3 16,76 Mpa bir von Mises gerilmesine sahip olduğu tespit edilmiştir. Numunelerin kırılma gerçekleştiği anındaki deforme olmuş görüntüsü Şekil 6.17'de gösterilmiştir.



Şekil 6.17 DHTE numunelerine ait deformasyon

DHTE numunelerinin üç nokta eğme testi sonucunda kırılım gerçekleştikten sonra tasarıma paralel olarak yerleştirilmiş güçlendirilmiş çekirdek hücreler tepki vermeye devam etmiştir. Test sonucunda takviye geometrilerin birleşim noktasından numunenin kırıldığı tespit edilmiştir. Yatay dolgulu hibrid dikme tasarımlı eğme numunelerine kırılma meydana gelene kadar kuvvet uygulanmıştır. Test sonucu oluşan yatay dolgulu hibrid dikme tasarımlı üç nokta eğme numunelerinin kuvvet yer değiştirme grafikleri ve deforme olmaya başladığı nokta Şekil 6.18'de gösterilmiştir.



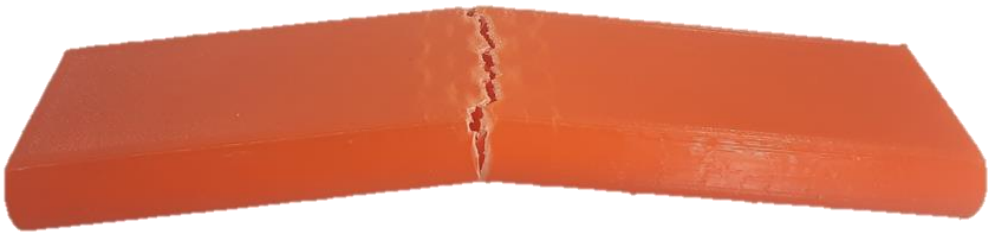
Şekil 6.18 YHTE numunelerine ait kuvvet – yer değiştirme grafiği

YHTE numunelerinin kırılıncaya kadar kuvvet uygulanması sonucu DHTE numunelerinden farklı olarak 8 mm sonra numunelerin kırılmaya başladığı gözlemlenmiştir. Kırılma meydana geldiği anda tasarıma dik olarak yerleştirilen güçlendirilmiş çekirdek hücre duvarları ve takviye geometrisi tepki vermeye devam ederek daha geniş açıda bir grafik oluşturduğu tespit edilmiştir. İlk deformasyon meydana geldikten sonra tasarıma dik olarak yerleştirilen güçlendirilmiş çekirdek geometrisinin yaklaşık olarak 5 mm daha tepki vermeye devam ettiği tespit edilmiştir. YHTE1 numunesi 1864 N, YHTE2 numunesi 1798 N ve YHTE3 numunesi 1886 N maksimum tepki kuvvetine sahip olduğu gözlemlenmiştir. DHTE2 numunesinde olduğu gibi YHTE2 numunesi de diğer numunelere göre daha erken bir kırılma göstermiştir. İmalat aşamasında güçlendirilmiş çekirdek hücrenin dış duvara kontrol edilemeyen faktörlerden kaynaklı olarak katman yapışma sorununun sebep olduğu düşünülmektedir. YHTE numunelerine ait maksimum kuvvet ve maksimum gerilme değerleri Tablo 6.9'da verilmiştir.

Tablo 6.9 YHTE numunelerine ait test sonuçları

Deney Numunesi	Maksimum Kuvvet (N)	Maksimum Gerilme (Mpa)
YHTE 1	1864	28,47
YHTE 2	1798	28.21
YHTE 3	1886	28,66

Yatay dolgulu hibrid dikme tasarımlı eğme numuneleri üç nokta eğme testi altında deformeleri gerçekleşirken YHTE 1 13,51 Mpa, YHTE2 13,26 ve YHTE3 16,76 Mpa bir von Mises gerilmesine sahip olduğu tespit edilmiştir. Numunelerin kırılma gerçekleştiği anındaki deforme olmuş görüntüsü Şekil 6.19'da gösterilmiştir.



Şekil 6.19 YHTE numunelerine ait deformasyon

YHTE numunelerinin üç nokta eğme testleri sonucunda kırılma gerçekleşene kadar kuvvet uygulanmıştır. Tasarıma dik olarak yerleştirilen güçlendirilmiş çekirdek

hücreler sayesinde DHTE numunesinin neredeyse üç katı daha fazla sehim verdiği tespit edilmiştir. Üç nokta eğme testleri için hazırlanan numunelerin mekanik analizi sonucunda en fazla dayanıma sahip numunenin YHTE numuneleri olduğu gözlemlenmiştir. Tasarıma dik bir şekilde yerleştirilen güçlendirilmiş çekirdek hücreler gelen yükü oldukça güçlü bir şekilde karşıladığı tespit edilmiştir. Eğme numuneleri için kuvvet ve maksimum gerilme değerleri tespit edilmiştir. Eğme numunelerinin sönümlediği enerji miktarları 6.2 gösterilen bağıntıdan hesaplanmaktadır.

$$E = \int_0^{\varepsilon_e} \sigma . d\varepsilon \tag{6.2}$$

Bağıntısından hesaplanan üç nokta eğme numuneleri için sönümlenen enerji miktarları Tablo 6.10'da gösterilmiştir.

Tablo 6.10 Üç nokta eğme numunelerinin enerji sönümleme miktarları

Deney Numunesi	Enerji Sönümleme Miktarı (J)	Ortalama Sönümleme Miktarı (J)
DTE1	14,98	16,51
DTE2	15,78	
DTE3	18,79	
DHTE 1	27,27	22,71
DHTE 2	8,22	
DHTE 3	32,64	
YHTE 1	112,10	105,93
YHTE 2	90,64	
YHTE 3	115,05	

Hesaplanan üç nokta eğme test numunelerinin enerji sönümleme miktarları incelendiğinde DHTE numuneleri DTE numunelerine göre 1,37 kat artış gösterdiği görülmektedir. YHTE numunelerinin IBE numunelerine göre ise 6,4 kat artış gösterdiği tespit edilmiştir. Burada en önemli dikkat çeken yerlerden biri YHTE numunelerinin aynı zamanda DHTE numunelerine göre sönümlediği enerji miktarıdır. YHTE numuneleri DHTE numunelerine oranla 4,77 kat fazla enerji sönümlediği gözlemlenmiştir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında insansız hava araçları iniş takımı bileşenlerinin tasarımı, yapısal optimizasyonu ve mekanik analizi hedeflenmiştir. Bu amaçla iniş takımlarına ait burun iniş takımı ve ana iniş takımı dikmesi tasarımları yapılmıştır. Statik yük koşulları altında kuvvetlerin tasarımlar üzerindeki etkisi incelenmiş ve hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler neticesinde burun iniş takımı ana taşıyıcı çatalına statik analiz yapılmış ve sonuçlara göre topoloji optimizasyonu gerçekleştirilerek optimum tasarım elde edilmiştir.

İHA ana dikme tasarımı için hibrid yapılı bir model önerilmiştir. Ana iniş takımı dikmelerine üç farklı tasarım yapılarak her bir tasarıma ait dikme için basma ve üç nokta eğilme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ana dikmelerin insansız hava aracında duruş pozisyonunda iken yapısal analizi yapılarak gerilme ve yer değiştirme sonuçları incelenmiştir.

Yapılan analiz çalışmaları ve mekanik testler sonucuna göre;

- Toplam yükün %8,2 oranında yük burun iniş takımına uygulanmış ve yapısal optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Sayısal analiz sonuçları incelendiğinde burun iniş takımında maksimum 2,84 mm yer değiştirme gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Gerçekleştirilen topoloji optimizasyonu sonucunda başlangıçta 39,52 gram olan burun iniş takımı ana taşıyıcı çatalı, yeni tasarım ile birlikte 31,10 gram seviyelerine düşürülmüştür. Burun iniş takımı ana taşıyıcı çatalında toplamda %21,2 oranında ağırlık azaltımı gerçekleştirilmiştir.

Sayısal basma analizleri sonucunda;

- Sıkıştırma yükü altında DHTB numunelerinin en fazla mekanik dayanım gösterdiği tespit edilmiştir.
- DHTB numunelerinin DTB numunelerine göre ağırlığı 2,68 kat artmasına karşılık toplam yer değiştirmesinde 16 kat, maksimum gerilme miktarında ise 1,64 kat iyileşme gösterdiği tespit edilmiştir.

- YHTB numunelerinin DTB numunelerine göre ağırlığı 2,78 kat arttırılmasına karşılık toplam yer değiştirme miktarının 6,4 kat, maksimum gerilme miktarının ise 1,02 kat iyileşme gösterdiği tespit edilmiştir.
- DHTB numuneleri YHTB numunelerinden 1,03 kat daha hafif olmasına rağmen toplam yer değiştirme miktarının 2,5 kat, maksimum gerilme miktarının ise 1,6 oranında daha iyi sonuç verdiği tespit edilmiştir.

Sayısal eğme analizleri sonucunda;

- YHTE numunelerinin üç nokta eğme yükü altında en iyi eğilme dayanımını gösteren tasarım olduğu tespit edilmiştir.
- YHTE numunelerinin ağırlığı DTE numunelerinden 2,55 kat daha ağır olmasına rağmen toplam yer değiştirme miktarını 6,8 kat, maksimum gerilme miktarını ise 17,4 kat azalttığı gözlemlenmiştir.
- DHTE numunelerinin DTE numunelerinden 2,3 kat daha ağır olduğu, maksimum yer değiştirme miktarının 7,45 kat, maksimum gerilme miktarının ise 12,2 oranında bir değişim gösterdiği tespit edilmiştir.
- YHTE numuneleri DHTE numunelerinden 1,15 kat daha az yer değiştirmeye, 1,41 kat daha az maksimum gerilmeye sahip olduğu gözlemlenmiştir.
- İniş takımı dolgusuz dikme tasarımı basma yükü altında sıkıştırılmış, ortalama maksimum 4184 N basma direnci göstermiştir. Ayrıca ortalama 54,41 J değerinde darbe enerjisini sönümlemiştir. Üç nokta eğme testleri sonucunda maksimum 249 N eğilme direnci göstermiş ve 16,51 J'luk eğilme kuvvetini sönümlemiştir.
- İniş takımı yatay dolgulu dikme tasarımı basma yükü altında sıkıştırılmış, ortalama maksimum 14744 N'luk basma direnci göstermiştir. Ayrıca ortalama 381,61 J değerinde darbe enerjisini sönümlemiştir. Üç nokta eğme testleri sonucunda maksimum 1850 N eğilme direnci göstermiş ve 105,93 J'luk eğilme kuvvetini sönümlemiştir.
- İniş takımı düşey dolgulu dikme tasarımı basma yükü altında sıkıştırılmış, ortalama maksimum 22005 N'luk basma direnci göstermiştir. Ayrıca ortalama 509,83 J değerinde darbe enerjisini sönümlemiştir. Üç nokta eğme testleri sonucunda maksimum 948 N eğilme direnci göstermiş ve 22,71 J'luk eğilme kuvvetini sönümlemiştir.

- Deneysel test çalışmaları sonucunda; DHT'nin basma direncini YHT'ye tasarıma göre %33 oranında arttırdığı, sönümlenen enerji miktarını %40 oranında arttırdığı buna rağmen ağırlığı %1 oranında arttırdığı tespit edilmiştir.
- Deneysel test çalışmalar sonucunda; YHTnin eğilme direncini DHT'ye tasarıma göre %95 oranında arttırdığı, sönümlenen enerji miktarını %466 oranında arttırdığı buna rağmen ağırlığı %10 oranında arttırdığı tespit edilmiştir

Sayısal olarak gerçekleştirilen deformasyon analizleri sonucunda burun iniş takımı üzerinde gerçekleştirilen topoloji optimizasyonunun ağırlık azaltılmasında ve mekanik direncin korunmasında etkili sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

Ana iniş takımı için önerilen hibrid tasarımın ağırlığı önemli derecede arttırmadan mekanik direnci ve enerji sönümleme kapasitesini arttırdığı tespit edilmiştir. Ayrıca güçlendirilmiş çekirdek hücrenin darbe yükünden kaynaklı gerilme dağılımını yapının tamamına aktarmada başarılı olduğu ve yapısal bütünlüğü koruduğu tespit edilmiştir. Ayrıca üç boyutlu üretim tekniklerinin düşük maliyetli ve gelişmiş mekanik özelliklere sahip bileşenlerin üretiminde avantajlı bir yöntem olduğu gözlemlenmiştir.

KAYNAKLAR

Ahlskog, M. (2015). *Supporting pre-development of new manufacturing technologies*. School of Innovation, Design and Engineering, Mälardalen University Press.

Ahn, D., Kim, H., & Lee, S. (2007). Fabrication direction optimization to minimize post-machining in layered manufacturing. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, *47*(3–4), 593–606. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools. 2006.05.004

Anutha, A., & Swathi, L. S. (2019). Optimization of the UAV Landing Gear to Minimize the Weight. Içinde *IJISET-International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology* (C. 6). www.ijiset.com

Aras, B. B. (2021). Kentsel Güvenlik Sorununun Çözümünde Yeni Bir Yöntem: İnsansız Hava Aracı (İHA). *Akademik İzdüşüm Dergisi Journal of Academic Projection*, *6*(1), 19–39.

Armaan, A., Keshav, S., & Srinivas, G. (2020a). A step towards safety: Material failure analysis of landing gear. *Materials Today: Proceedings*, *27*, 402–409. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.245

Armaan, A., Keshav, S., & Srinivas, G. (2020b). A step towards safety: Material failure analysis of landing gear. *Materials Today: Proceedings*, *27*, 402–409. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.245

Asi, O., & Yeşil, Ö. (2013). Failure analysis of an aircraft nose landing gear piston rod end. *Engineering Failure Analysis*, *32*, 283–291. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal. 2013.04.011

Başcı, Ü. G., & Yamanoğlu, R. (2022). Havuz Fotopolimerizasyonu (HFP) ile Eklemeli İmalat. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, *10*(2), 914–928. https://doi.org/10.29130/dubited.922415

Bento, M. N. (2001). Unmanned aerial vehicles (UAV) - An overview. *European Journal of Mechanical and Environmental Engineering*, *46*(2), 99–107. https://doi.org/10.54473/ijtret.2021.5603

Bendsoe, M.P ve Sigmund O. (2003). Topology Optimization, Theory, Methods, and Applications (2nd Edition). Berlin: Springer

Boukoberine, M. N., Zhou, Z., & Benbouzid, M. (2019). A critical review on unmanned aerial vehicles power supply and energy management: Solutions, strategies, and prospects. *Applied Energy*, *255*, 113823. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113823

Brice, C., Shenoy, R., Kral, M., & Buchannan, K. (2015). Precipitation behavior of aluminum alloy 2139 fabricated using additive manufacturing. *Materials Science and Engineering: A*, *648*, 9–14. https://doi.org/10.1016/j.msea.

2015.08.088

Buswell, R. A., Soar, R. C., Gibb, A. G. F., & Thorpe, A. (2007). Freeform Construction: Mega-scale Rapid Manufacturing for construction. *Automation in Construction*, *16*(2), 224–231. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2006.05.002

Cheriachan, D. M., DiPaola, M., Iannotti, J. P., & Ricchetti, E. T. (2019). 3D Printing in Orthopedics—Upper Extremity Arthroplasty. Içinde *3D Printing in Orthopaedic Surgery* (ss. 151–169). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-58118-9.00013-0

Currey, N. S. (1988). Aircraft Landing Gear Design: Principles and Practices. *Aircraft Landing Gear Design: Principles and Practices*. https://doi.org/10.2514/4.861468

Diegel, O., Nordin, A., & Motte, D. (2019). Additive Manufacturing Technologies. *Springer Series in Advanced Manufacturing*, *July*, 19–39. https://doi.org/10.1007/978-981-13-8281-9_2

Diltemiz, S. F. (2021). Failure analysis of aircraft main landing gear cylinder support. *Engineering Failure Analysis*, *129*. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105711

Dong, G., Tang, Y., Li, D., & Zhao, Y. F. (2020). Design and optimization of solid lattice hybrid structures fabricated by additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, *33*. https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101116

Engeli, R., Etter, T., Hövel, S., & Wegener, K. (2016). Processability of different IN738LC powder batches by selective laser melting. *Journal of Materials Processing Technology*, *229*, 484–491. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.09.046

Erdil, B. (2021). *İNSANSIZ Hava Araçlarinin Kullanim Alanlariİle Bu AraçlarinTürkiyeNin YurtdişiOperasyonlarindakiYeri VeÖnemi**. *5*(2), 581–607.

Galiński, C., Hajduk, J., Kalinowski, M., Wichulski, M., & Stefanek, Ł. (2014). Inverted joined wing scaled demonstrator programme. *29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, ICAS 2014, January 2017*.

Galletti, G. G., Vinquist, C., & Es-Said, O. S. (2008). Theoretical design and analysis of a honeycomb panel sandwich structure loaded in pure bending. *Engineering Failure Analysis*, *15*(5), 555–562. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2007.04.004

Gardan, J. (2016). Additive manufacturing technologies: state of the art and trends. *International Journal of Production Research*, *54*(10), 3118–3132. https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1115909

Gebisa, A. W., & Lemu, H. G. (2017). A case study on topology optimized design for additive manufacturing. *IOP Conference Series: Materials Science and*

Engineering, *276*, 012026. https://doi.org/10.1088/1757-899X/276/1/012026

Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B. (y.y.). *Additive Manufacturing Technologies Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*.

Gosselin, C., Duballet, R., Roux, P., Gaudillière, N., Dirrenberger, J., & Morel, P. (2016). Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete – a new processing route for architects and builders. *Materials & Design*, *100*, 102–109. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.03.097

Gülcan, O. (2021). Eklemeli İmalatla Üretilen Kafes Yapıların Mekanik Özellikleri Üzerine Etki Eden Faktörler. *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi*, *19*(2), 64–81.

Gysen, B. L. J. (2011). *Generalized Harmonic Modeling Technique for 2D Electromagnetic Problems Applied to the Design of a Direct-Drive Active Suspension System* (Sayı december). https://doi.org/10.6100/IR719773

Hagedorn, Y., Risse, J., Meiners, W., Pirch, N., Wissenbach, K., & Poprawe, R. (2013). Processing of nickel based superalloy MAR M-247 by means of High Temperature – Selective Laser Melting (HT – SLM). Içinde *High Value Manufacturing: Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping* (ss. 291–295). CRC Press. https://doi.org/10.1201/b15961-54

Hammad, N. A., Gadelrab, R. & ELshaer, Y. I. (2019). Weight optimization of fixed landing gear for medium range UAV. *Engineering Research Journal*, *161*, 18–35.

Hilal, H., Lancaster, R., Jeffs, S., Boswell, J., Stapleton, D., & Baxter, G. (2019). The Influence of Process Parameters and Build Orientation on the Creep Behaviour of a Laser Powder Bed Fused Ni-based Superalloy for Aerospace Applications. *Materials*, *12*(9), 1390. https://doi.org/10.3390/ma12091390

Hill, N., & Haghi, M. (2014). Deposition direction-dependent failure criteria for fused deposition modeling polycarbonate. *Rapid Prototyping Journal*, *20*(3), 221–227. https://doi.org/10.1108/RPJ-04-2013-0039

Huang, R., Riddle, M., Graziano, D., Warren, J., Das, S., Nimbalkar, S., Cresko, J., & Masanet, E. (2016). Energy and emissions saving potential of additive manufacturing: the case of lightweight aircraft components. *Journal of Cleaner Production*, *135*, 1559–1570. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.109

Huawang, S. (2016). *Compressive Strength-Prediction Model for Coal Gangue Concrete via Genetic Algorithm Theory and Support Vector Machine*. *09*(2), 7.

Iele, A., Leone, M., Consales, M., Persiano, G. V., Brindisi, A., Ameduri, S., Concilio, A., Ciminello, M., Apicella, A., Bocchetto, F., & Cusano, A. (2018). Load monitoring of aircraft landing gears using fiber optic sensors. *Sensors and Actuators A: Physical*, *281*, 31–41. https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.08.023

Jain, R., & Gupta, N. (2022). Design optimization of PLA lattice in 3D printing. *Materials Today: Proceedings*, *59*(xxxx), 1577–1583. https://doi.org/10.1016/

j.matpr.2022.02.186

Jawhar, I., Mohamed, N., Al-Jaroodi, J., Agrawal, D. P., & Zhang, S. (2017). Communication and networking of UAV-based systems: Classification and associated architectures. *Journal of Network and Computer Applications*, *84*, 93–108. https://doi.org/10.1016/j.jnca.2017.02.008

Junk, S., Klerch, B., Nasdala, L., & Hochberg, U. (2018). Topology optimization for additive manufacturing using a component of a humanoid robot. *Procedia CIRP*, *70*, 102–107. https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.270

Kahraman, F., & Küçük, M. (2020). Otomotiv Endüstrisinde Topoloji Optimizasyonu ile Ağırlık Azaltma Uygulaması Üzerine Bir Araştırma. *European Journal of Science and Technology*. https://doi.org/10.31590/ejosat.789424

Karakılınç, U., Yalçın, B., & Ergene, B. (2019). Toz Yataklı/Beslemeli Eklemeli İmalatta Kullanılan Partiküllerin Uygunluk Araştırması ve Partikül İmalat Yöntemleri. *Journal of Polytechnic*, *22*(4), 801–810. https://doi.org/10.2339/politeknik.423707

Korchenko, A. G., & Illyash, O. S. (2013). The generalized classification of Unmanned Air Vehicles. *2013 IEEE 2nd International Conference Actual Problems of Unmanned Air Vehicles Developments Proceedings (APUAVD)*, 28–34. https://doi.org/10.1109/APUAVD.2013.6705275

Kumar, A., Mittal, R. K., & Haleem, A. (2004). *Advances ın additive manufacturing: Artifical intelligence, Nature- inspired and biomanufacturing* (Sayı 1).

Kundu, A. K. (2010). *Aircraft Design*. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9780511844652

Lim, S., Le, T., Webster, J., Buswell, R., Austin, S., Gibb, A., & Thorpe, T. (2009). Fabricating Construction Components. *Global Innovation in Construction Conference, April 2018*, 512–520.

Long, J., Gholizadeh, H., Lu, J., Bunt, C., & Seyfoddin, A. (2017). Application of Fused Deposition Modelling (FDM) Method of 3D Printing in Drug Delivery. *Current Pharmaceutical Design*, *23*(3), 433–439. https://doi.org/10.2174/1381612822666161026162707

Maskery, I., Hussey, A., Panesar, A., Aremu, A., Tuck, C., Ashcroft, I., & Hague, R. (2017). An investigation into reinforced and functionally graded lattice structures. *Journal of Cellular Plastics*, *53*(2), 151–165. https://doi.org/10.1177/0021955X16639035

McMenamin, P. G., Quayle, M. R., McHenry, C. R., & Adams, J. W. (2014). The production of anatomical teaching resources using three-dimensional (3D) printing technology. *Anatomical Sciences Education*, *7*(6), 479–486. https://doi.org/10.1002/ase.1475

Murr, L. E. & Gaytan, S. M. (2014). Electron Beam Melting. Içinde *Comprehensive*

Materials Processing (ss. 135–161). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.01004-9

Nematollahi, B., Xia, M., & Sanjayan, J. (2017, Temmuz 1). *Current Progress of 3D Concrete Printing Technologies*. https://doi.org/10.22260/ISARC2017/0035

Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T. Q., & Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, *143*, 172–196. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012

Özsolak, O. (2019). Eklemeli İmalatYöntemleri ve Kullanilan Malzemeler. *International Journal of Innovative Engineering Applications*, *3*, 9–14.

Raymer, D. (2012). *Aircraft Design: A Conceptual Approach, Fifth Edition*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. https://doi.org/10.2514/4.869112

Remondino, F., Barazzetti, L., Nex, F., Scaioni, M., & Sarazzi, D. (2012). Uav Photogrammetry For Mappıng And 3d Modelıng – Current Status And Future Perspectıves. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *XXXVIII-1/*, 25–31. https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXVIII-1-C22-25-2011

Richardson, M. (2012). Designer/Maker: The Rise of Additive Manufacturing, Domestic-Scale Production and the Possible Implications for the Automotive Industry. *Computer-Aided Design and Applications*, *PACE*, 33–48. https://doi.org/10.3722/cadaps.2012.PACE.33-48

Sadraey, M. H. (2013). *Aırcraft Desıgn Aerospace Series List Design and Analysis of Composite Structures: With applications to aerospace Structures*. https://cdn.fbsbx.com/v/t59.2708-21/11808685_1139788599369111_991256954_n.pdf/MohammadH.Sadraey-AircraftDesignASystemsEngineeringApproach-JohnWileyamp_Sons2012-1.pdf?_nc_cat=100&ccb=1-7&_nc_sid=0cab14&_nc_ohc=_KB8dsm8SowAX-ZC837&_nc_ht=cdn.fbsbx.com&oh=03

Saleh, B., Jiang, J., Fathi, R., Al-hababi, T., Xu, Q., Wang, L., Song, D., & Ma, A. (2020). 30 Years of functionally graded materials: An overview of manufacturing methods, Applications and Future Challenges. *Composites Part B: Engineering*, *201*, 108376. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108376

Sharma, A., Vanjani, P., Paliwal, N., Basnayaka, C. M. W., Jayakody, D. N. K., Wang, H.-C. & Muthuchidambaranathan, P. (2020). Communication and networking technologies for UAVs: A survey. *Journal of Network and Computer Applications, 168,* 102739. https://doi.org/10.1016/j.jnca.2020.102739

Son, L., Surya, M., Bur, M., Ubaidillah, U. & Dhelika, R. (2021). Shock and harmonic response analysis of UAV nose landing gear system with air damper. *Cogent Engineering*, *8*(1). https://doi.org/10.1080/23311916.2021.1905231

Sutton, A. T., Kriewall, C. S., Leu, M. C., & Newkirk, J. W. (2016). Powders for additive manufacturing processes: Characterization techniques and effects on part properties. *Solid Freeform Fabrication 2016: Proceedings of the 27th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference, SFF 2016*, 1004–1030.

Teng, F., Sun, Y., Guo, S., Gao, B., & Yu, G. (2022). Topological and Mechanical Properties of Different Lattice Structures Based on Additive Manufacturing. *Micromachines*, *13*(7), 1017. https://doi.org/10.3390/mi13071017

URL-1. https://www.thk.org.tr/iha. Erişim tarihi 05/04/2023

URL-2. https://forums.x-plane.org/index.php?/files/file/29429-charles-kettering-bug-1918-1919/. Erişim tarihi: 13/05/2023

URL-3. https://www.bbc.com/turkce/haberler-turkiye-41275429. Erişim tarihi: 13/05/2023

URL-4. https://web.shgm.gov.tr/. Erişim tarihi: 09/04/2023

URL-5. https://www.aa.com.tr/tr/bilim-teknoloji/bayraktar-akincinin-gelistirme-asamalari-akinci-belgeseliyle-izleyiciyle-bulusacak/1850129 Erişim tarihi: 16/05/2023

URL-6. https://www.trthaber.com/haber/savunma/akinci-tiha-ilk-ihracat sozlesmesini -de-tamamladi-647889.html Erişim tarihi: 19/05/2023

URL-7. https://analizsimulasyon.com/yapisal-optimizasyon/. Erişim tarihi: 19/03/2023

URL-8. https://openzeka.com/endustriler/imalat-urun-gelistirme/. Erişim tarihi: 20/03/2023

URL-9. https://www.dekmake.com/tr/sla-3d-bask%C4%B1-hizmetleri/. Erişim tarihi: 22/03/2023

Uzay, Ç. & Geren, N. (2020). Failure Analysis of Low-density Polymer Foam Core Sandwich Structures under Three-point Bending Loading. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, *35*(1), 49–58. https://doi.org/10.21605/cukurovaummfd.764547

Wang, J.-C., Dommati, H. & Hsieh, S.-J. (2019). Review of additive manufacturing methods for high-performance ceramic materials. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *103*(5–8), 2627–2647. https://doi.org/10.1007/s00170-019-03669-3

Yan, J. Q., Zhou, M. Y. & Xi, J. T. (2004). Adaptive direct slicing with non-uniform cusp heights for rapid prototyping. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *23*(1–2), 20–27. https://doi.org/10.1007/s00170-002-1523-8

Yang, S. & Zhao, Y. F. (2015). Additive manufacturing-enabled design theory and methodology: a critical review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *80*(1–4), 327–342. https://doi.org/10.1007/s00170-015-6994-5

Yildiz, A. R. (2008). Optimal structural design of vehicle components using topology design and optimization. *Materialpruefung/Materials Testing*, *50*(4), 224–228. https://doi.org/10.3139/120.100880

Yıldız, A. R. (2017). Taşıt Elemanlarının Yapısal Optimizasyon Teknikleri ile Optimum Tasarımı Optimum Design of Vehicle Components Using Structural Optimization Techniques. *Journal of Polytechnic*, *20*(2), 319–323.

Zaharia, S. M., Enescu, L. A. & Pop, M. A. (2020). Mechanical performances of lightweight sandwich structures produced by material extrusion-based additive manufacturing. *Polymers*, *12*(8). https://doi.org/10.3390/POLYM12081740

Zhang, B., Luo, Y., Ma, L., Gao, L., Li, Y., Xue, Q., Yang, H. & Cui, Z. (2018). 3D bioprinting: an emerging technology full of opportunities and challenges. *Bio-Design and Manufacturing*, *1*(1), 2–13. https://doi.org/10.1007/s42242-018-0004-3

Zurnacı, E. & Özdemir, H. K. (2023). Investigation of the Compressive Strength, Energy Absorption Properties and Deformation Modes of the Reinforced Core Cell Produced by the FDM Method. *Gazi Journal of Engineering Sciences*, *9*(1), 1–11. https://doi.org/10.30855/gmbd.0705047