**T.C.**

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

# ÜÇ BOYUTLU YAZICIDA ÇOKLU FİLAMAN KULLANIMI İÇİN ALTERNATİF MALZEME DEĞİŞTİRİCİ TASARIMI

**Kerem BOYALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Konstrüksiyon Anabilim Dalı

Makine Mühendisliği Programı

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi İlyas İSTİF

Temmuz, 2019

**T.C.**

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

# ÜÇ BOYUTLU YAZICIDA ÇOKLU FİLAMAN KULLANIMI İÇİN ALTERNATİF MALZEME DEĞİŞTİRİCİ TASARIMI

Kerem BOYALI tarafından hazırlanan tez çalışması çalışması 18.07.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Konstrüksiyon Anabilim Dalı, Makine Mühendisliği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi İlyas İSTİF

Yıldız Teknik Üniversitesi

Danışman

**Jüri Üyeleri**

Dr. Öğr. Üyesi İlyas İSTİF
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Ferhat DİKMEN
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi Vedat TEMİZ
İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Danışmanım Dr. Öğr. Üyesi İlyas İSTİF sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Üç Boyutlu Yazıcıda Çoklu Filaman Kullanımı İçin Alternatif Malzeme Değiştirici Tasarımı başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Kerem BOYALI

İmza

*Desteklerini esirgemeyen aileme*

# TEŞEKKÜR

Öncelikle tez konusunu seçerken göstermiş olduğu yaklaşımı, anlayışı ve bu süreçte sağladığı teknik ve teknik olmayan konulardaki tüm yardımları için tez danışmanım İlyas İstif'e, tezi hazırladığım süre boyunca prototipleme için materyal sağlama konusunda destek olan halen görev almakta olduğum Zaxe firmasına, tüm eğitim hayatım boyunca benden maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, her zaman yanımda olan sevgili aileme bir teşekkürü borç bilirim.

Kerem BOYALI

# İÇİNDEKİLER

**SİMGE LİSTESİ** **vii**

**KISALTMA LİSTESİ** **viii**

**ŞEKİL LİSTESİ** **ix**

**TABLO LİSTESİ** **x**

**ÖZET** **xi**

**ABSTRACT** **xiii**

**1 Giriş** **1**

1.1 Literatür Özeti . . . . . 1

1.1.1 Mevcut Çoklu Malzeme Çözümleri . . . . . 2

1.1.2 Ekstrüzyon Sistemleri . . . . . 5

1.1.3 Çoklu Malzeme Kullanım İhtiyacı . . . . . 7

1.2 Tezin Amacı . . . . . 8

1.3 Hipotez . . . . . 10

**2 Metot** **11**

2.1 İrdeleme Kriterleri . . . . . 11

2.1.1 Kütle . . . . . 11

2.1.2 Kalibrasyon . . . . . 17

2.1.3 Filaman Kapasitesi . . . . . 21

2.1.4 Kinematik Uyumluluğu . . . . . 22

2.2 Karar Verme Matrisi . . . . . 23

**3 Nesnel Tasarım** **24**

3.1 Prototip-1 . . . . . 24

3.2 Prototip-2 . . . . . 30

3.3 Değerlendirme ve Karşılaştırma . . . . . 35

**4 Sonuç ve Öneriler** **36**

**Kaynakça** **37**

**Ekler** **39**

**Tezden Üretilmiş Yayınlar** **41**

# SİMGE LİSTESİ

| | |
|---|---|
| $d_m$ | Adım çapı |
| $T_a$ | Alçalma sırasında gereken torku |
| $T_m$ | Motor torku |
| $\mu$ | Sürtünme katsayısı |
| $\alpha$ | Vida açısı |
| $T_y$ | Yükselme sırasında gereken tork. |

# KISALTMA LİSTESİ

| | |
|---|---|
| CAD | Computer Aided Design |
| FDM | Fused Deposition Modeling (Kaynaşık Biriktirme Modellemesi) |
| HIPS | High Impact Polystyrene |
| PVA | Polyvinyl Alcohol |
| SLA | Stereolithography |

# ŞEKİL LİSTESİ

**Şekil 1.1** Bağımsız çift baskı kafasına sahip bir yazıcı ..... 2
**Şekil 1.2** Tek baskı kafasında iki adet eritme tertibatı barındıran 3 boyutlu yazıcı örneği ..... 3
**Şekil 1.3** Kafa değiştirici 3 boyutlu yazıcıya ait kilitleme mekanizması ve kafaların bulunduğu magazin ..... 3
**Şekil 1.4** Malzeme değiştiriciye ait literatürdeki bir çalışmanın bilgisayar destekli tasarım ve prototip görünümü ..... 4
**Şekil 1.5** Direkt ekstrüzyon ..... 5
**Şekil 1.6** Bowden ekstrüder ve Direkt ekstrüder karşılaştırması ..... 6
**Şekil 1.7** Çözünebilir destek malzemesi ile basılan kurmalı bir mekanizma ..... 7
**Şekil 1.8** Malzeme değiştirici ile basılan çok renkli bir model örneği ..... 8
**Şekil 2.1** Bileşenlerin patlatılmış görünümü ..... 14
**Şekil 3.1** Malzeme değiştirici ve bileşenleri ..... 24
**Şekil 3.2** Trapez vida somunu ile kam profiline sahip parça bağlantısı ..... 25
**Şekil 3.3** Filaman baskı rulmanı ve kam profili ..... 25
**Şekil 3.4** Filaman tahrik dişlilerinin dizilimi ..... 26
**Şekil 3.5** Malzeme değiştirici mekanizma üstten kesit görünümü ..... 26
**Şekil 3.6** Çoklu malzeme değiştirici ..... 29
**Şekil 3.7** Malzeme değiştirici 1. dişlideki filaman seçiliyken ..... 29
**Şekil 3.8** Malzeme değiştirici 2. dişlideki filaman seçiliyken ..... 30
**Şekil 3.9** İkinci prototipe ait bileşenlerin kesit görünümü ..... 30
**Şekil 3.10** İtici kolların açık konumdaki görünümü ..... 31
**Şekil 3.11** İtici kolların kapalı konumdaki görünümü ..... 31
**Şekil 3.12** Serbest filaman boyu kesit görünümü ..... 32
**Şekil 3.13** İticilere bağlanan yaylar ..... 33
**Şekil 3.14** Kayış tutucu parça ve yay itici uzantısı ..... 34
**Şekil 3.15** Prototip-2'nin çalışma sırasında görüntüsü ..... 34

# TABLO LİSTESİ

**Tablo 2.1** Baskı kafasındaki bileşenler ve kütleleri .....14
**Tablo 2.2** A-B-C-D Çözümlerinin toplam bileşen kütleleri .....15
**Tablo 2.3** Bağımsız çift kafa kalibrasyonundaki artı ve eksiler.....19
**Tablo 2.4** Tek kafa çift nozül kalibrasyonundaki artı ve eksiler .....19
**Tablo 2.5** Kafa değiştirici kalibrasyonundaki artı ve eksiler .....20
**Tablo 2.6** Çoklu malzeme kalibrasyonundaki artı ve eksiler .....20
**Tablo 2.7** Kinematik uyumluluğu .....22
**Tablo 2.8** Karar verme matrisi.....23
**Tablo 3.1** Malzeme çiftleri için sürtünme katsayıları .....27
**Tablo 3.2** Entegre trapez vidalı motor için vida ve yük parametreleri .....27
**Tablo 3.3** Malzeme değiştiricilerin karşılaştırılması.....35

# ÖZET

## Üç Boyutlu Yazıcıda Çoklu Filaman Kullanımı İçin Alternatif Malzeme Değiştirici Tasarımı

Kerem BOYALI

Konstrüksiyon Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi İlyas İSTİF

Günümüzde yaygınlaşan katmanlı malzeme yığma esasına dayalı filaman kullanan üç boyutlu yazıcılar tasarım doğrulamada, üretilecek parçanın fonksiyonelliğinin test edilmesinde, anatomik model üretiminde, aparat ve fikstür imalatı gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Katmanlı üretimin doğasından gelen tasarım esnekliği sayesinde kullanıcılar talaşlı imalat, döküm gibi geleneksel yöntemlerle üretilemeyecek tasarımları üretebilir hale gelmelerine ragmen üretilen bu çıktıların baskı sonrasında sökülemeyecek kadar dar alanda bulunan destek yapılarının olması, çıktıların yüzey işlemi gerektirmesi, tasarımın belirli bölgelerinin farklı renkte/dokuda olması gerekliliği, birlikte çalışan birden çok parçanın tek seferde fonksiyonel şekilde üretilebilmesi gibi istekler aynı anda birden çok tür ve renkteki malzeme ile üretim yapma talebini doğurdu. Bu çalışmada, bahsi geçen talebi karşılayacak malzeme değiştirebilen bir mekanizmanın sistematik konstrüksiyon açısından bağımsız çift kafa, tek kafa çift nozül, kafa değiştirici gibi diğer kullanılan yöntemlere kıyasla değerlendirmesini ve tasarımının yapılmasını kapsamaktadır. Karşılaştırma, her bir ekstrüzyon sisteminin kütle, kalibrasyon, kinematik uyumluluğu, takılabilen malzeme

kapasitesi olmak üzere dört adet irdeleme kalemi açısından birbirine göre olan avantaj ve dezavantajlarının kantitatif veriye dönüştürülerek bir karar verme matrisinde tanımlanan etki katsayılarına göre skorlanması yöntemiyle yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre çoklu malzeme değiştiren bir mekanizma kullanılması en faydalı çözüm olarak bulunmuş ve bu doğrultuda gidilerek üzerine aynı anda beş adet malzeme takılabilen ve bunları kam profiline sahip iticiler sayesinde devreye alan bir prototip ile malzeme değiştirici bir motor kullanmadan malzemeleri baskı kafasındaki özel bir aparatın devreye aldığı ikinci bir prototip tasarlanarak çoklu malzeme değiştirici alternatifleri geliştirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Katmanlı malzeme yığma, eklemeli imalat, çoklu malzeme, çift ekstrüder, kafa değiştirici

# ABSTRACT

## Alternative Filament Changer Design for Multi-Material 3D Printer

Kerem BOYALI

Department of Construction

Master's Thesis

Advisor: Assist. Prof. Dr. İlyas İSTİF

In today, FDM type 3d printers are widely being used for many purposes such as verifying design, testing functionality of parts to be manufactured, producing anatomical models, manufacturing apparatus, fixture and prototyping. Design flexibility provided by FDM printers thanks to innate features of additive manufacturing, enabled designers to produce parts which could not be produced by traditional manufacturing methods such as machining, casting etc. In spite of this convenience, 3d printed parts need to be taken care of by applying sanding, gently removing support structures, treating surface and other factors like printing parts ready to function without additional effort, multi-colored parts. Therefore multi-material printing has born to meet those requirements. This work consists of comparison of current extrusion systems (independent dual extruder, dual hotend on single print head, tool changer) with multi-material choice and designing a multi-material mechanism. Comparison has performed by comparing those four extrusion systems in terms of mass, calibration method, kinematics compatibility and material capacity and then converting their advantages and disadvantages into quantitative data then a decision matrix created with those

data. Each criteria has a multiplier which indicates importance of that criteria. Sum of score of each criteria gives a total score to be used in comparison. Obtained results show that the most beneficial method of extrusion is multi-material changer mechanism, according to that knowledge two material changer prototypes have been developed through a CAD software. First prototype employs cam profile to trigger each material drive gear and uses two stepper motors, latter uses only one stepper motor and filament changing process provided by an apparatus mounted on carriage.

**Keywords:** Fused deposition modeling, additive manufacturing, multi-material, dual extruder, tool changer

# 1
# Giriş

## 1.1 Literatür Özeti

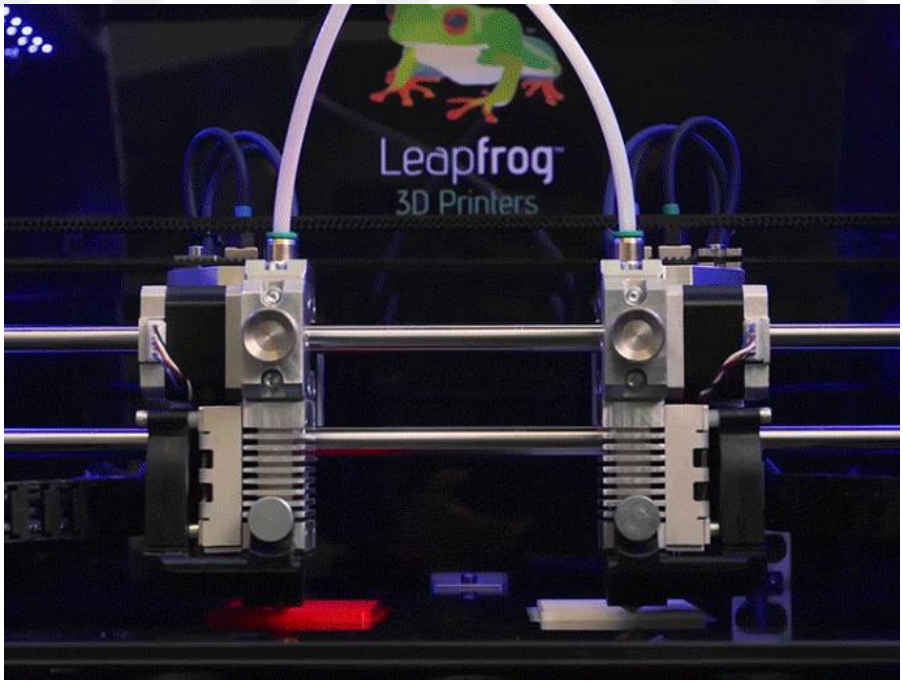
Hızla yayılmasına rağmen Dünya çapında üretimdeki payı henüz %0.1'den az olan [1] FDM yazıcılar sabit çapta bir termoplastik malzemenin daha düşük bir çapta sıcak bir uçtan çıktıktan sonra bilgisayarlı numerik kontrol aracılığıyla kontrollü olarak üstüste yığılması prensibiyle üretim yapar. Üretimi yapılacak olan tasarım önce CAD yazılımları aracılığıyla modellenir ve .stl formatında dışarı verilir. STL formatı 'stereolithography' kelimesinin kısaltması olup 3DSystems firmasının SLA prosesiyle üretim yapan ilk 3 boyutlu yazıcısının piyasaya çıkmasıyla günümüze kadar gelmiştir. STL formatında tasarım, çok sayıda çokgene bölünerek bu çokgenlerin (genelde üçgenlerin) birleşmesiyle oluşur. Bu üçgenlerin boyutu ne kadar küçük olursa dosyanın çözünürlüğü bu oranda artmış olur, burada önemli olan kullanılan yazıcının maksimum çözünürlüğünü bilmek ve .stl dosyasını dışarı verirken üçgen boyutlarını buna göre ayarlamaktır. Dilimleyici adı verilen ve stl formatındaki veriyi işleyen yazılımlar tasarım dosyasını elektronik, mekanik kısıtlar ve malzeme karakterine göre belirlenmiş olan bir dizi parametreye sadık kalarak dilimlere böler. Daha sonra her dilim için bir takım yolu çizilir ve bu yol makineye .gcode ile tarif edilir.

Çoklu malzeme ile ilgili literatürde çok sayıda çalışma mevcuttur.Bunlardan biri, FDM prosesi için malzemelerin dönen bir parçaya ön yükleme yapıldıktan sonra sabit bir motor ve dişli hizasına istenilen malzemeyi getirme prensibiyle çalışır, malzemeyi ekstrüzyon eden ise mekanizmanın kendisidir [2] yani Bowden tipinde bir çözümdür. Görüntü işlemeye dayalı bir üç boyutlu yazıcı platform geliştirilerek yüksek çözünürlüklü, göreceli olarak düşük maliyetli ve genişletebilirlik imkanına sahip bir ürün geliştirilmiştir [3]. Bu sistem baskı kafalarının kendi kendini kalibre etmesini, 3 boyutlu tarama yapmayı ve taranan bu modeli stl modeliyle

kıyaslayarak kapalı döngülü bir geri besleme sistemiyle baskı sırasında düzeltmeler yapmayı sağlamaktadır. Aynı zamanda çoklu malzeme ile de çalışabilmektedir. UV ışık ile kürlenebilen malzemeyle dolu birden çok malzeme havuzuna sahip cihazlar da geliştirilmiştir. SLA prosesiyle üretim yapan bu cihazlar [4, 5, 6, 7] malzeme havuzları arasında geçiş yapmaktadır. Bu sistemler yüksek çözünürlüğe sahip olmalarına rağmen malzeme havuzları arasındaki geçiş prosesi oldukça yavaşlatmaktadır. Birden çok çeşit toz ile üretim yapan SLS cihazlar üzerinde de çalışmalar mevcut olduğu gibi [8] farklı bağlayıcılar kullanarak tam renkli baskılar alınabilmesini sağlayan cihazlar üzerinde çalışmalar da mevcuttur [9]. Biyopolimer ve doku mühendisliği uygulamalarında kullanılabilen biyo mürekkep püskürtebilen baskı kafasına sahip sistem geliştirilmiştir [10]. Fab@Home [11] projesi düşük maliyetli, genişletilebilir ve çoklu malzemeyle üretim yapabilen bir cihaz geliştirme amacıyla başlatılmıştır.

**Mevcut Çoklu Malzeme Çözümleri**

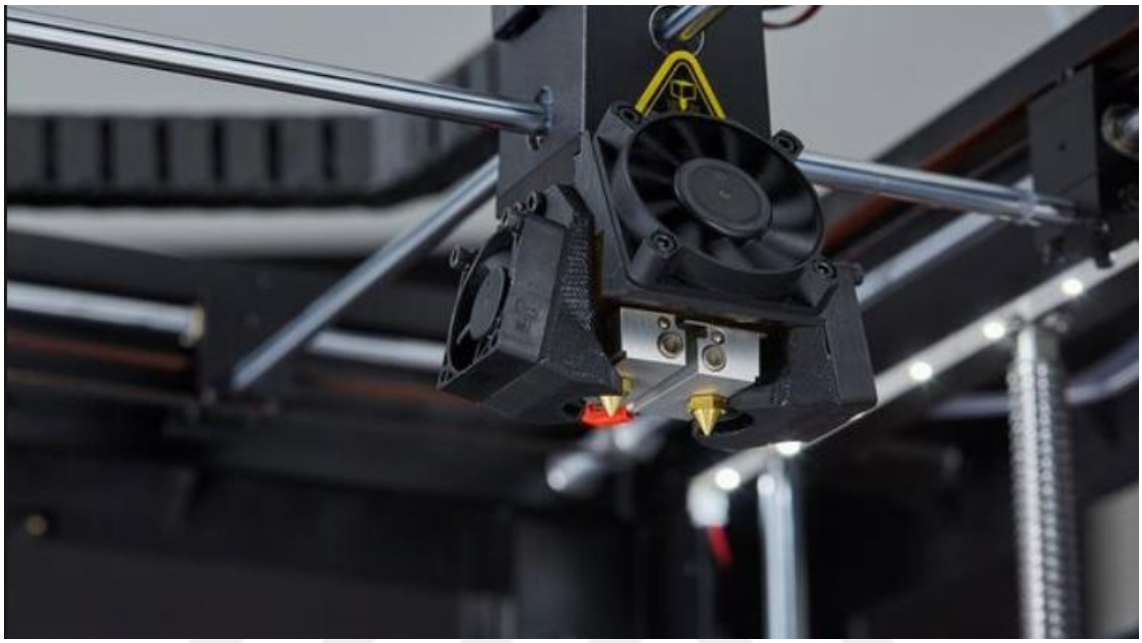
#### 1.1.1.1 Bağımsız Çift Kafa




**Şekil 1.1** Bağımsız çift baskı kafasına sahip bir yazıcı [12]

Yalnızca bir eksende birbirinden bağımsız hareket edebilen iki adet baskı kafası (Şekil 1.1) ve malzeme eritme tertibatından (hotend) oluşur.

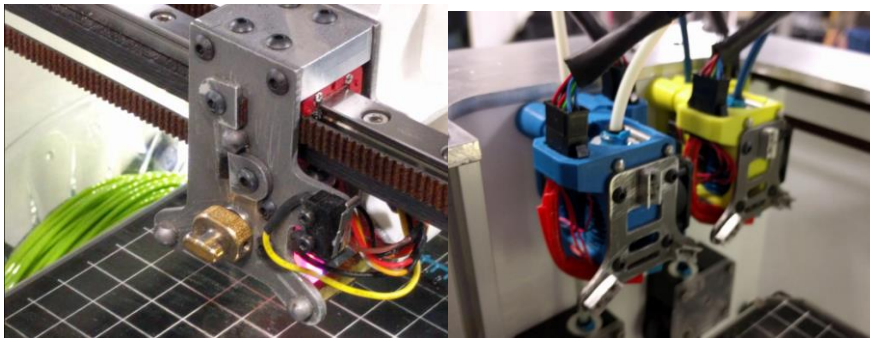
#### 1.1.1.2 Tek Baskı Kafasında İki Nozül



**Şekil 1.2** Tek baskı kafasında iki adet eritme tertibatı barındıran 3B yazıcı örneği [13]

Tek baskı kafasına konumlandırılmış birbirinden ayrı malzeme beslemesi yapılan iki adet sıcak uç (Şekil 1.2) ve eritme tertibatından oluşur.

#### 1.1.1.3 Kafa Değiştirici (Tool Changer)

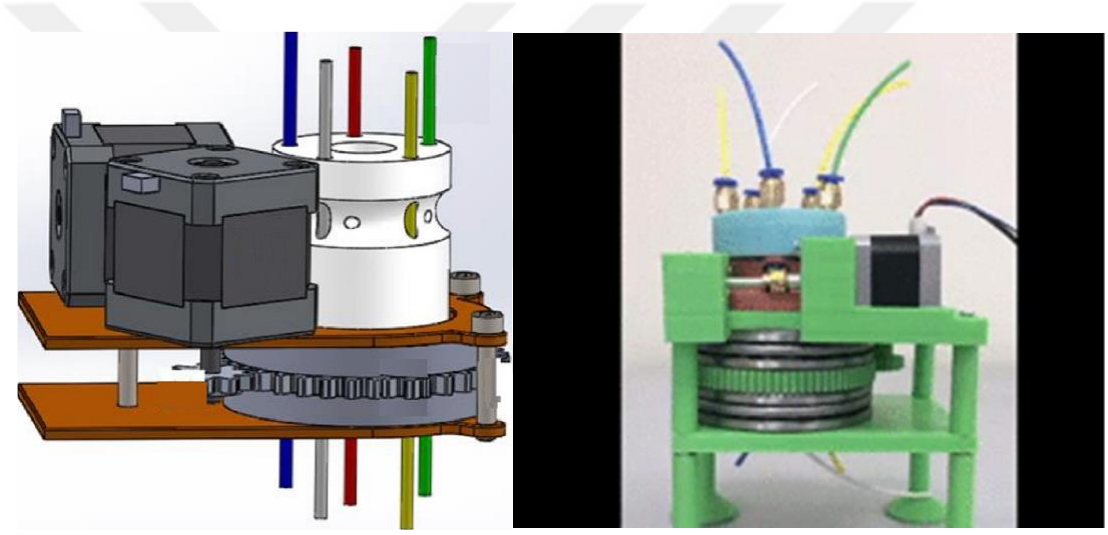


**Şekil 1.3** Kafa değiştirici 3b yazıcıya ait kilitleme mekanizması (solda) ve kafaların bulunduğu magazin (sağda) [14]

Baskı düzlemine paralel hareket eden ve kendi içinde kilit mekanizması bulunduran bir tertibat (Şekil 1.3), önceden belirlenen rotaları takip ederek bir magazindeki (Şekil 1.3) baskı kafasını kilitler, ilgili baskı kafasıyla yazdırma işlemi tamamlandıktan sonra ilk aldığı baskı kafasını bırakıp diğerini alır ve bu dönüşümlü devam eder.

#### 1.1.1.4 Malzeme Değiştirici

İki ve daha fazla malzeme bir malzeme değiştiriciye takılarak ön yükleme yapılır, bu mekanizma, takılan malzemeleri isteğe göre tek baskı kafasında bulundan tek sıcak uca yönlendirir.



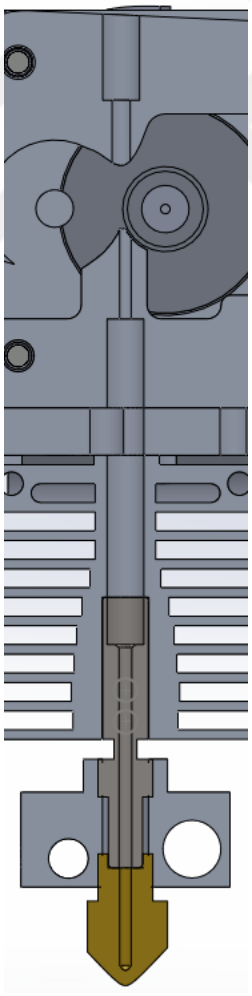
**Şekil 1.4** Malzeme değiştiriciye ait literatürdeki bir çalışmanın bilgisayar destekli tasarım ve prototip görünümü [2]

Şekil 1.4'te yapılan çalışmada 5 adet malzeme bir magazinde ön yükleme yapılarak bekletilmektedir, ihtiyaca göre bir step motor açısal hareketle dişli hizasındaki malzemeyi değiştirmekte, diğer motor ise ilgili malzemeyi sıcak uca sürmektedir.

### 1.1.2 Ekstrüzyon Sistemleri

#### 1.1.2.1 Direkt

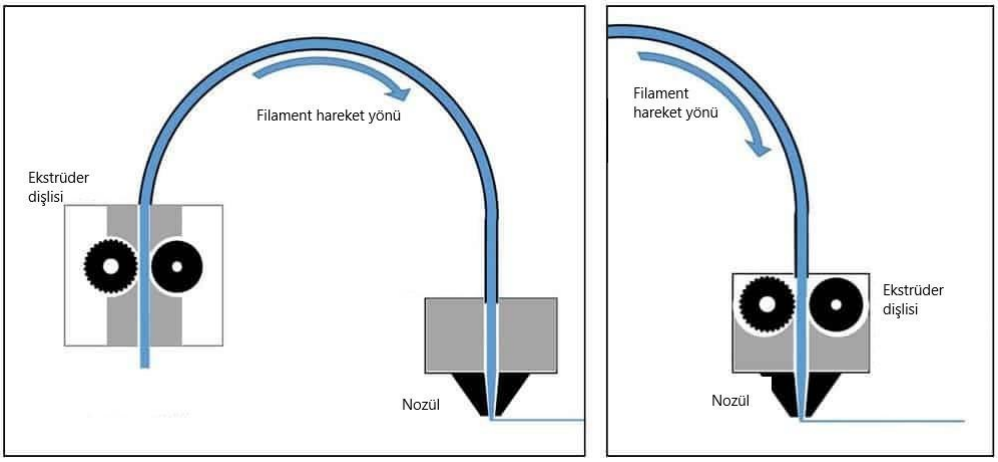
Direkt ekstrüzyon sisteminde filamanın tahrik edildiği yani ekstrüzyon dişlisiyle temas ettiği nokta ile erimiş malzemenin çıktığı nokta Bowden sistemine kıyasla büyük ölçüde daha yakındır. Bu mesafe günümüzdeki yazıcılarda 45-100 mm arasındadır (Şekil 1.5). Bu mesafenin mümkün olduğunca kısa olması bu iki nokta arasında kalan malzemenin serbest uzunluğunun daha kısa olmasını dolayısıyla daha az yaysı özellik göstermesini ve malzeme ekstrüzyonunun daha hassas kontrol edilebilmesini sağlar. Direkt ekstrüzyon sistemi ile Shore 95A değerlerine kadar esnek filamanlar ile baskı alınabilmektedir.



**Şekil 1.5** Direkt ekstrüzyon

### 1.1.2.2 Bowden (Uzaktan Besleme)

Adını bisikletlerin fren teli olarak kullanılan, motorlu taşıtlarda gaz kelebeği ile gaz pedalı bağlantısını sağlayan Bowden kablosunun mucidi olan Frank Bowden'dan alan Bowden ekstrüzyon sisteminde, filamanı süren ekstrüzyon sisteminin tahrik motoru hareket eden baskı kafasında değil yazıcının taşıyıcı iskeletine bağlı ve durağandır (Şekil 1.6). Motorun baskı kafasında bulunmamasını hareket eden kütle miktarının düşmesi ve baskı kafasının kapladığı hacmin düşmesiyle avantaja çeviren bu yapı sayesinde daha hızlı baskı alabilen daha kompakt cihazlar üretilebilmiştir. Bunun yanında içinden filamanın geçtiği 500-600mm uzunluğundaki Bowden borusunun (PTFE malzeme) içinde esneyen filaman ekstrüzyon hassasiyetini olumsuz etkiler ve esnek filamanlar ile baskı almaya olanak vermez. Teflon borunun iç çapını tam filaman çapında üretmek (1,75 mm / 2.85 mm) boru cidarı ile filaman arasındaki sürtünmeyi arttıracağından pratikte geçerli bir çözüm olamaz.




**Şekil 1.6** Bowden ekstrüder (solda) ve Direkt ekstrüder (sağda) karşılaştırması [15]

### 1.1.3 Çoklu Malzeme Kullanım İhtiyacı

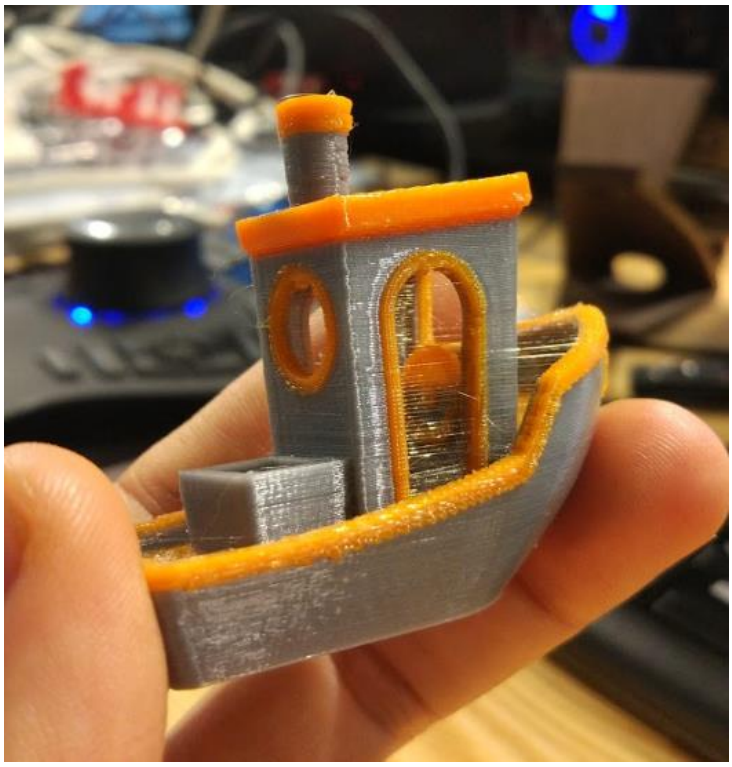
#### 1.1.3.1 Baskı Sonrası İşlemleri



**Şekil 1.7** Çözünebilir destek malzemesi ile basılan kurmalı bir mekanizma (Destek malzemesi: E3D Scaffold, Gri renkli)

3 boyutlu yazıcılardan çıkan ürünler çoğunlukla işçilik gerektirmektedir. Bu işçiliğin bir kısmını destek yapılarının sökülmesi oluşturmaktadır. Bu destek yapıları parçanın yüzeyinde rahatlıkla sökülebilecek yerlerde olabileceği gibi, genelde topoloji optimizasyonu yapılan modellerde rastlanılan [16] bir uzvun veya el aletinin giremeyeceği kadar dar yerlerde de olabilir. Bu gibi durumlarda PVA, HIPS gibi çözünebilir destek malzemeleri [17] kullanılarak daha sonra bu malzeme uygun bir çözeltide veya suda çözülerek nihai ürün elde edilir. Aynı zamanda bu sayede desteklerin sökülmesi sırasında parça yüzeyinde oluşacak izler [18] de engellenmiş olur (Şekil 1.7).

#### 1.1.3.2 Çok Renkli Çıktı Alabilme



**Şekil 1.8** Malzeme değiştirici ile basılan çok renkli bir model örneği

3 boyutlu yazıcılardan çıkan ürünler artık fonksiyonelliğin yanı sıra görsel olarak da kullanıcıyı tatmin etmelidir. Modelleri ölçekli halde üretmek isteyen tasarımcılar bu çıktıların gerçeğe en yakın şekilde somutlaştırılmasını istediklerinden birden çok renk ile çıktı alma gereksinimi duymuşlardır. Sol tarafta turuncu ve gri PLA ile basılan bir model görülmektedir (Şekil 1.8).

## 1.2 Tezin Amacı

Günümüzde yaygınlaşan FDM tipi üç boyutlu yazıcılar tasarım doğrulamada, üretilecek parçanın fonksiyonelliğinin test edilmesinde, anatomik model üretiminde, matematiksel tasarımlarda, aparat ve fikstür imalatı gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Katmanlı üretimin doğasından gelen tasarım esnekliği sayesinde kullanıcılar talaşlı imalat, döküm gibi geleneksel yöntemlerle üretilemeyecek tasarımları üretebilir hale gelmelerine ragmen üretilen bu çıktıların baskı

sonrasında sökülemeyecek kadar dar alanda bulunan destek yapılarının olması, çıktıların yüzey işlemi gerektirmesi [19, 20], tasarımın belirli bölgelerinin farklı renkte/dokuda olması gerekliliği, birlikte çalışan birden çok parçanın tek seferde fonksiyonel şekilde üretilebilmesi (Şekil 1.7) gibi istekler aynı anda birden çok tür ve renkteki malzeme ile üretim yapma talebini doğurdu. Bu çalışma, bahsi geçen talebi karşılayacak malzeme değiştirebilen bir mekanizmanın sistematik konstrüksiyon açısından diğer yöntemlere kıyasla değerlendirmesini ve tasarımının yapılmasını kapsamaktadır.

## 1.3 Hipotez

Çoklu malzeme değiştirme mekanizmasının sağladığı malzeme çeşitliliği, makaralarda az kalan malzemelerin değerlendirilmesi, baskı kafası tasarımında sağladığı avantajlar sayesinde 3 boyutlu baskı teknolojisinde oldukça avantajlı bir çözüm olduğu öngörülmektedir. Bu tahmini bilimsel yönden ele alarak, kantitatif verilerle desteklenen bir çalışma yapıp mevcut olan diğer malzeme ekstrüzyon sistemleriyle karşılaştırması yapılarak hipotezin doğruluğu kanıtlanmak istenmektedir.

# 2
# Metot

Birinci bölümde açıklanan dört adet ekstrüzyon sistemi farklı irdeleme kalemleri yönünden incelenecektir. Hangi ekstrüzyon sisteminin en iyisi olduğuna dair bir sonuca ulaşmak için bir karar verme matrisi oluşturulacaktır. Bu irdeleme kalemlerine etki katsayısı tanımlanacak ve bu etkiyi karşılama ölçüsüne göre de her birine yüzdelik bir değer verilecektir. Toplam skor karşılaştırılarak en avantajlı ekstrüzyon sisteminin hangisi olduğu bulunacaktır. Her sistemin kendisine göre avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır, buradaki zorlayıcı nokta ise bu avantaj ve dezavantajları doğru bir şekilde kantitatif veriye dönüştürmektir. Örneğin, bağımsız çift kafa aynı anda iki parçayı basarak seri üretimde üretim süresini yarıya indirebilirken, bu iki baskı kafasının birbirine göre pozisyonunu ayarlamak, yani kalibrasyon metodu belirlemek ise çok hassas düşünülmesi gereken ciddi bir ödevdir ve baskı kalitesinde hayati önem taşır. Her sistemin kendine özgü artı ve eksilerini ortak bir paydada sayısal verilerle doğru ve adil bir şekilde ifade etmek bu yüzden kritiktir.

## 2.1 İrdeleme Kriterleri

### 2.1.1 Kütle

Bu bölümde bu dört seçeneğin hareket eden kütleler yönünden karşılaştırması yapılacaktır.

Kriterlerden birinin kütle olması ve karşılaştırmanın hareket eden kütleler arasında yapılmasının sebebi, yüksek baskı kalitesiyle yüksek hızı buluşturmada sağlanması gereken şartlardan birisinin hareket eden kütlelerin düşük olması gerekliliğinden gelir, hareket eden kütleler ne kadar düşük olursa makinenin titreşim genliği düşük, mekanik rijitlik sağlanırken kullanılacak malzeme miktarı

ve dolayısıyla genel makine ağırlığı daha düşük olacak ve baskı sırasında daha yüksek ivmelerle hareket edebilme ve daha hızlı çıktı alabilme imkanı doğacaktır.

Karşılaştırmadaki değişkenleri azaltmak adına dört seçenekte de kullanılacak ekstrüzyonun direkt tip olduğu, uzaktan teflon boru vasıtasıyla filamanın itildiği Bowden sisteminin kullanılmadığı kabul edilecektir.

**Diğer cihaz parametreleri:**

Nozzle çapı: 0.4mm

Hedeflenen çizgi kalınlığı: 0.46 (Optimum olarak nozül açıklığının %115'i kabul edilir)

X-Y Ekseninde hedeflenen doğrusal hız: v=100mm/s

Bu hıza ulaşmak için gereken (istenen) mesafe: x=10mm

Bu isterler doğrultusunda eksenin ivme değerini bulmak için zamansız hız formülünü kullanmamız gerekmektedir.

$$a=d^2x/dt^2 \text{ (İvme: mm/s}^2\text{)} \qquad (2.1)$$

Denklem (2.1)'deki türev bileşenlerine ayrılır

$$a=d/dt \cdot dx/dt$$

$$v=dx/dt \text{ (Hız: mm/s)} \qquad (2.2)$$

Denklem (2.2), (2.1)'de yerine yazılırsa

$$a=dv/dt \Rightarrow dv=a.dt$$

$$\int dv=\int a.dt \qquad (2.3)$$

Denklem (2.3)'teki integral için sınır şartları ($v_0$->v ; 0->t) yerine yazıldığında (2.4) elde edilir.

$$v-v_o = a.t \qquad (2.4)$$

Hareket durağan halden başladığından $v_o=0$ yazılır ise

$$v= a.t$$

elde edilir. Denklem (2.4)'teki zaman (t) ise yol (x) ve hız (v) cinsinden yazıldığında zamansız hız denklemi (2.5) elde edilir;

$$t = x/v \Rightarrow a = v^2/x \qquad (2.5)$$

İstenen hız (v) = 100mm/s

Bu hıza ulaşmak için gereken mesafe (x) = 10mm

Bu değerler denklem (2.5)'te yerine yazıldığında gereken ivme değeri:

$$a = 100^2/10 = 1000 \text{ mm/s}^2 \text{ olur.}$$

Bu çizgisel hız değeriyle birim zamanda eritilmesi gereken malzeme hacmi:

$(0.46 \times 0.46 \times 3.14) \times 100 / 4 = 16.6 \text{ mm}^3/\text{s}$

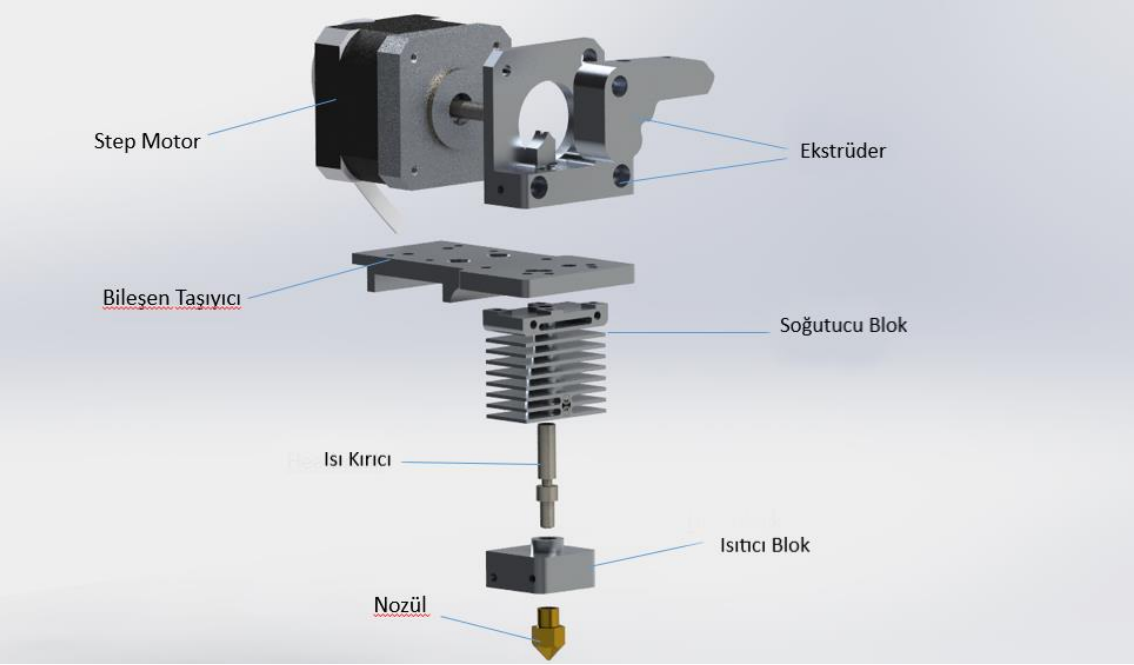
Kullanılan malzeme eritici bu debilerde malzemeyi sürekli akıtacak kapasiteye sahip olduğundan bu akış değeri fizibildir. Test, 100 mm/s hız ile test baskısı alınarak yapılıp görsel olarak ekstrüzyon sorunu veya nozül tıkanması gibi bir sorunla karşılaşılmamıştır. Test baskısı 200x200x200 (mm) boyutlarında %100 dolulukta bir küp olup, kullanılan malzeme PLA ve ekstrüzyon sıcaklığı 215 C'dir.

Baskı kafasındaki bileşenler ve kütleleri:

Kütle tablosu, baskı kafası bilgisayar ortamında tasarlandıktan sonra malzeme ataması yapılarak Solidworks tarafından sağlanan verilerle oluşturulmuştur (Şekil 2.1). Step motor kütlesi datasheetten [Ek-B] alınmıştır

**Tablo 2.1** Baskı kafasındaki bileşenler ve kütleleri

| Bileşen | Malzeme | Kütle (gr) |
|---|---|---|
| NEMA17 Step motor | | 365 |
| Bileşen Taşıyıcı | 6061 alüminyum | 37 |
| Kafa Kitleme Mekanizması | 6061 alüminyum | 140 |
| Ekstrüder | 6061 alüminyum | 44 |
| Soğutucu Blok | 6061 alüminyum | 17 |
| Isı Kırıcı | 304 paslanmaz çelik | 3 |
| Isıtıcı Blok | 6061 alüminyum | 10 |
| Nozül | Pirinç | 4 |




**Şekil 2.1** Bileşenlerin patlatılmış görünümü

**Tablo 2.2** A-B-C-D Çözümlerinin Toplam Bileşen Kütleleri

| **Bileşen Adedi (2 materyal için)** | **A (Bağımsız Çift Kafa)** | **B (Tek Kafa Çift Nozül)** | **C (Kafa Değiştirici)** | **D (Materyal Değiştirici)** |
|---|---|---|---|---|
| NEMA17 Step motor | 2 | 2 | 1 | 1 |
| Ekstrüder | 2 | 2 | 1 | 1 |
| Soğutucu Blok | 2 | 2 | 1 | 1 |
| Isı Kırıcı | 2 | 2 | 1 | 1 |
| Isıtıcı Blok | 2 | 2 | 1 | 1 |
| Nozül | 2 | 2 | 1 | 1 |
| Kafa Kitleme Mekanizması | | | 1 | |
| Bileşen Taşıyıcı | 2 | 1 | | 1 |
| **Toplam Kütle** | 960 | 923 | 583 | 480 |

Mevcut kütle değerlerinin isteneni hangi yüzdeyle karşıladığı tespit edilirken, amaç ve istenen kütlenin asgari düzeyde olduğu, minimum kütlenin (480 gr) %100'e karşılık geldiği kabul edilip ters orantı kurulmuştur.

Böylece bulunan kütle değerlerinin isteneni karşılama yüzdesi sırasıyla şu şekildedir:

A=%50 B=%52 C=%82 D=%100

**Motorun adım kaçırmadan verebileceği maksimum ivmelendirme:**

GT2 Kayış Kasnak Yuvarlanma Dairesi Çapı: 11.3mm

Motor Torku: 3,17 kg.cm x 0,7 (%30 emniyet payı) = 2,219 kg.cm = 217,6 N.mm

Maks.İvme: 217,6/ (11,3/2) = 9,628 N

A için maks. Ivme = F = m.a => 9,628 = 0,48.a

$a_A$=20058 mm/$s^2$

B için maks. Ivme = F = m.a => 9,628 = 0,92.a

$a_B$=10465 mm/$s^2$

C için maks. Ivme = F = m.a => 9,628 = 0,58.a

$a_C$=16600 mm/$s^2$

D için maks. Ivme = F = m.a => 9,628 = 0,48.a

$a_D$=20058 mm/$s^2$

Görüldüğü üzere NEMA17 step motorun sağladığı torkun verilen emniyet katsayısına rağmen oldukça yeterli olduğu görülmektedir. Ancak bu ivme değerlerine pratikte çıkılamamasının sebebi eritici tertibat içindeki eriyik malzeme havuzunun (melt chamber) bu kadar hassas kontrol edilememesi, malzemenin değişken viskozitesi, ısıl iletkenlik katsayısı, ekstrüder dişlisinin geometrisi ve birim zamanda eritilmek istenilen plastik miktarı gibi etkileyici faktörler olmasındandır. Bu sebeplerden dolayı hızlı hareketlerde plastik akışının anlık olarak başlatılıp durdurulması söz konusu olmayıp, akışın rejime ulaşması için zaman tanınmalıdır [21]. Bu da daha düşük ivme değerleriyle hareket ederek olur.

Bazı kontrol algoritmalarında bunu telafi etmeye yarayan ‘Basınç Avansı’ adı verilen ve sıcak uca sürülen ekstrüder dişlisi ve sıcak uç arasındaki serbest malzemeyi bir yay gibi kabul edip bu yayın katsayısını yazılım içinde (test g-code’u ile deneysel olarak bulup) tanımlanır. Daha sonra filaman, eksen hareketinden

kısa bir süre önce ağza sürülerek hareket bitiminden kısa bir süre önce sürme işlemi durmakta ve malzemenin yay gibi davranmasından dolayı oluşan basınç artığını telafi etmektedir. Bu kontrol algoritmasının geliştirilebilir yanları bulunmaktadır. Bu avans işlemini lineer olarak bir yay sabitine bağlı (k) birinci dereceden bir fonksiyon ile yaptığı için burada baskın parametre malzemenin elastik modülüne bağlı olan yaysı özelliğidir ve viskoz etkiler ihmal edilmiştir. Viskoz etkileri de hesaba katan bir algoritma daha işlevsel olacaktır.

Basınç avansı formülü: avans_adimi = anlik_hiz_degiskeni * K

K= Ekstrüder dişlisinin filamana temas ettiği noktanın çizgisel hızı 1mm/s iken ve filaman bu hızda sürülürken arada serbest kalan malzemenin ne kadar sıkıştığının mm cinsinden ifadesidir. (mm/mm/s)

anlik_hiz_degiskeni= Anlık gereken malzeme ekstrüzyon hızı (akselerasyon sırasında pozitif, deselerasyon sırasında negatiftir)

avans_adimi= step motorun harekete başlanırken atması gereken ekstra adım veya hareket tamamlanırken eksik atması gereken adım miktarı.

### 2.1.2 Kalibrasyon

Bu bölümde dört ekstrüzyon sisteminin kalibrasyon metotlarının avantaj ve dezavantajları karşılaştırılacak ve her birine skor verilecektir. Skorlar her avantaj için 1, her dezavantaj için -1 olarak verilip toplanarak nihai skor elde edilecek, daha sonra yüzdelik olarak isteneni ne kadar karşıladığı belirlenecektir.

#### 2.1.2.1 Bağımsız Çift Kafa Kalibrasyon

Birbirinden bağımsız çift kafa sisteminin kalibrasyonunda en önemli şey iki nozül ucunun referans bir konumdayken birbirine X-Y-Z eksenlerinde olan mesafeleridir. Eğer bu mesafe doğru olarak tespit edilemezse ortaya çıkacak olan

nihai ürünün kalitesi dramatik ölçüde etkilenecektir. Bahsedilen X-Y-Z ofset değerlerini doğru olarak belirleyebilmek için:

-Kullanılan lineer hareket mekanizmasının ve referans konumu belirleyen sensörlerin tekrarlanabilirliği uygulamada istenen hassasiyet ve konum doğruluğunu sağlayacak olmalı, arzu edilen tekrarlanabilirlik değerini sayısal olarak belirleyebilmek için step motorun adım miktarı ve adım açısı bilinmeli, kayış-kasnak çifti veya vidalı tahrik mekanizması kullanılıyorsa bunların bir tam turda yaptığı ilerleme bilinmeli ve step motorun bir tam adım konumunda sağlanacak teorik lineer ilerleme bulunmalı. Bununla ilgili bir hesap yapmak gerekirse:

Kullanılan step motorun:
Adım açısı = 0,9 derece
Adım miktarı: s= 360/0,9 = 400 adım

GT3 kayış: h= Adım 2mm/diş
GT3 kasnak: t= 20 diş

Bir adımda alınacak doğrusal yol: h.t/s = 20.2/400 = 0.1 mm/adım

Bunun anlamı 0,1mm'den daha küçük doğrusal hareketlerle tetiklenen bir switch sistemdeki konum sıfırlama doğruluğunu etkilemeyecektir çünkü mekanik olarak sağlanabilen çözünürlük bu değerden daha düşüktür. Üst segment bir FDM yazıcı olan Stratasys Fortus 450MC [22] modelindeki hassasiyet değeri dahi ± 0.127 mm olduğundan kayıştaki 0.00762 mm'lik pozisyonlama hatasının FDM teknolojisinde ürün çıktısına etkisi olmayacağı düşünüldüğünden ihmal edilmiştir [Ek-A].

Bağımsız çift kafa ekstrüzyonda kalibrasyon için kullanılan/kullanılabilecek metotlar şunlardır:

**Tablo 2.3** Bağımsız çift kafa kalibrasyonundaki artı ve eksiler

| **Artılar** | **Eksiler** |
|---|---|
| | -Kopyalama ve aynalama modlarını kullanabilmek için nozül uçlarının aynı düzlemde olması sağlanmalı (-1)<br>-Kafalar birbirinden bağımsız olduğu için endstopların tekrarlanabilirliği ve mekanik tekrarlanabilirlik kalibrasyonu etkileyecektir (-1) |
| TOPLAM SKOR: | -2 |

### 2.1.2.2 Tek Kafa Çift Nozül

**Tablo 2.4** Tek kafa çift nozül kalibrasyonundaki artı ve eksiler

| **Artılar** | **Eksiler** |
|---|---|
| -Endstop ve mekanik hareketin tekrarlanabilirliği baskı uçlarının birbirine göre olan ofsetlerini etkilemez. (1)<br><br>-Nozül uçlarının aynı düzlemde olmasına gerek yoktur ancak tolere edilebilir bir mesafeye müsaade edilebilir ve bu mesafe bilinmelidir. (1) | -Nozül ofsetini bulmak için test baskısı veya kamera ile kullanıcının yönlendirildiği bir kurulum altyapısı hazırlanmalı. (-1) |
| TOPLAM SKOR: | 1 |

### 2.1.2.3 Kafa Değiştirici (Tool Changer)

**Tablo 2.5** Kafa değiştirici kalibrasyonundaki artı ve eksiler

| **Artılar** | **Eksiler** |
|---|---|
| -Endstop ve mekanik hareketin tekrarlanabilirliği baskı uçlarının birbirine göre olan ofsetlerini etkilemez. (1)<br><br>-Nozül uçlarının aynı düzlemde olmasına gerek yoktur ancak tolere edilebilir bir mesafeye müsaade edilebilir ve bu mesafe bilinmelidir. (1) | -Her baskı kafasındaki nozül X-Y-Z ofsetini bulmak için test baskısı veya kamera ile kullanıcının yönlendirildiği bir kurulum altyapısı hazırlanmalı. (-1) |
| TOPLAM SKOR: | 1 |

### 2.1.2.4 Çoklu Malzeme (Multi-material)

**Tablo 2.6** Çoklu malzeme kalibrasyonundaki artı ve eksiler

| **Artılar** | **Eksiler** |
|---|---|
| -Tek nozül olduğu için nozüllerin birbirine göre olan ofsetlerini ayarlama gerekliliği yoktur (1)<br><br>-Endüktif sensor, BL Touch, Nozül ucundan okuma, manuel kalibrasyon gibi birçok kalibrasyon metoduna uygundur. (1) | |
| TOPLAM SKOR: | 2 |

4 ekstrüzyon sistemi kalibrasyon yöntemleri açısından incelenmiş ve sırasıyla:

A=(-2) B=(1) C=(1) D=(2) skorları elde edilmiştir. Aralarında orantı kurmak için negatif skorlar pozitife dönüştürülmek üzere her değere 3 ilave edilerek her skor değerinin sıfırdan büyük olması sağlanmıştır. Yeni skorlar şu şekildedir:

A=(1) B=(4) C=(4) D=(5) Bu değerleri yüzdelik olarak ifade etmek için en yüksek skoru (5) isteklerimizin karşılandığı en üst değer yani 100 kabul edersek:

A=%20 B=%80 C=%80 D=%100 değerlerini elde etmiş oluruz.

### 2.1.3 Filaman Kapasitesi

#### 2.1.3.1 Bağımsız Çift Baskı Kafası

Bağımsız çift baskı kafasında her baskı kafasına bir malzeme yüklenebilir. Toplam 2 malzeme.

#### 2.1.3.2 Tek Kafa Çift Nozzle

Tek kafa ve çift nozülün bulunduğu bu sistemde kafaya aynı anda iki adet malzeme yüklenebilir. Toplam 2 malzeme.

#### 2.1.3.3 Kafa Değiştirici

Kafa değiştiricide direkt ekstrüzyon sistemi kullanıldığını varsaydığımız için, her kafaya ait bağımsız kontrol edilebilenbir termistör, bir step motor, bir ısıtıcı, bir blok soğutma fanı, bir parça soğutma fanı kullanılması gerekmektedir. Anakartta bu bileşenler için yeterli soket olup olmaması ele alınması gereken kısıtlayıcı faktörler arasındadır. Pratikte kafa değiştirici yazıcılar arasında maksimum kafa sayısı dört olarak tespit edilmiştir [Massportal, E3D].

### 2.1.3.4 Çoklu Malzeme

Çoklu malzeme mekanizmasında üst sınır diğer sistemlere kıyasla oldukça yüksektir. Ancak burada 5 adet malzeme arasında geçiş yapabilen bir mekanizma olduğu kabul edilecektir.

Sonuç olarak en yüksek malzeme sayısını %100 kabul ettiğimizde sırasıyla istekleri karşılama oranı: %40, %40, %80 ve %100 olacaktır.

### 2.1.4 Kinematik Uyumluluğu

**Tablo 2.7** Kinematik uyumluluğu

| | A | B | C | D |
|---|---|---|---|---|
| H-Bot | | * | * | * |
| Kartezyen- XY | * | * | * | * |
| Kartezyen- XZ | * | * | | * |
| Kartezyen- X | * | * | | * |
| Kartezyen- Z | | * | | * |
| Kartezyen-XYZ | * | * | * | * |
| Polar | | * | | * |
| Delta | | * | * | * |
| SCARA | | * | * | * |
| **Toplam** | 4 | 9 | 5 | 9 |

Tüm kinematiklere uyumlu olan tipin, istekleri %100 karşıladığı kabul edilmiştir. Buradan yola çıkarak A, B, C, D seçeneklerinin kinematik uyumluluklarının yüzde cinsinden ifadesi sırasıyla %44, %100, %55, %100 dür.

## 2.2 Karar Verme Matrisi

Elde edilen sonuçlar bir matrise yerleştirilerek toplam skor bulunmuştur ve bulunan sonuca göre çoklu malzeme değiştirme mekanizmasının en faydalı çözüm olduğu tespit edilmiştir. Bunu tool changer takip etmektedir. Sonuçlar elde edilirken bir takım kabuller yapılmıştır bunlar: Ekstrüzyon tipinin direkt olduğu, beş adet malzemenin aynı anda kullanılmak istenmesi ve sistemin esnek malzeme basabilme kabiliyetine sahip olmasıdır.

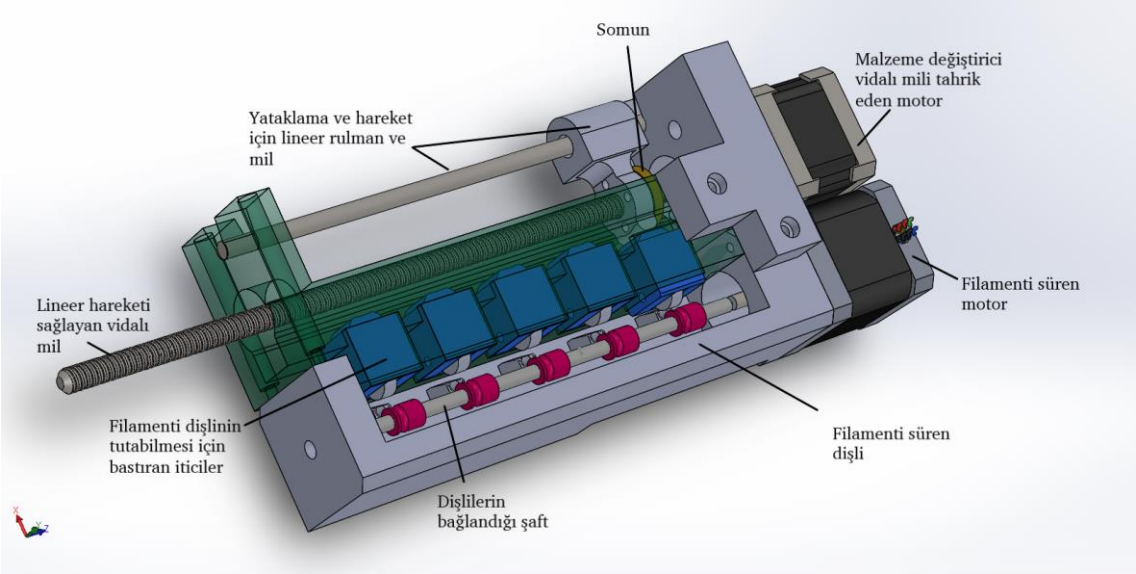
Kavramsal tasarım aşaması burada sona ermektedir, sonraki aşama matristen elde edilen sonuca göre, ihtiyaçları karşılayacak bir nesnel tasarım yapmaktır.

**Tablo 2.8** Karar verme matrisi

| | Kütle (0.3) | Filaman kapasitesi (0.25) | Kinematik Uyumluluğu (0.25) | Kalibrasyon (0.2) | **Toplam Skor** |
|---|---|---|---|---|---|
| A | %50 (0.15) | %40 (0.1) | %44 (0.11) | %20 (0.04) | 0.4 |
| B | %52 (0.16) | %40 (0.1) | %100 (0.25) | %80 (0.16) | 0.67 |
| C | %82 (0.25) | %80 (0.2) | %55 (0.137) | %80 (0.16) | 0.747 |
| D | %100 (0.3) | %100 (0.25) | %100 (0.25) | %100 (0.2) | 1.00 |

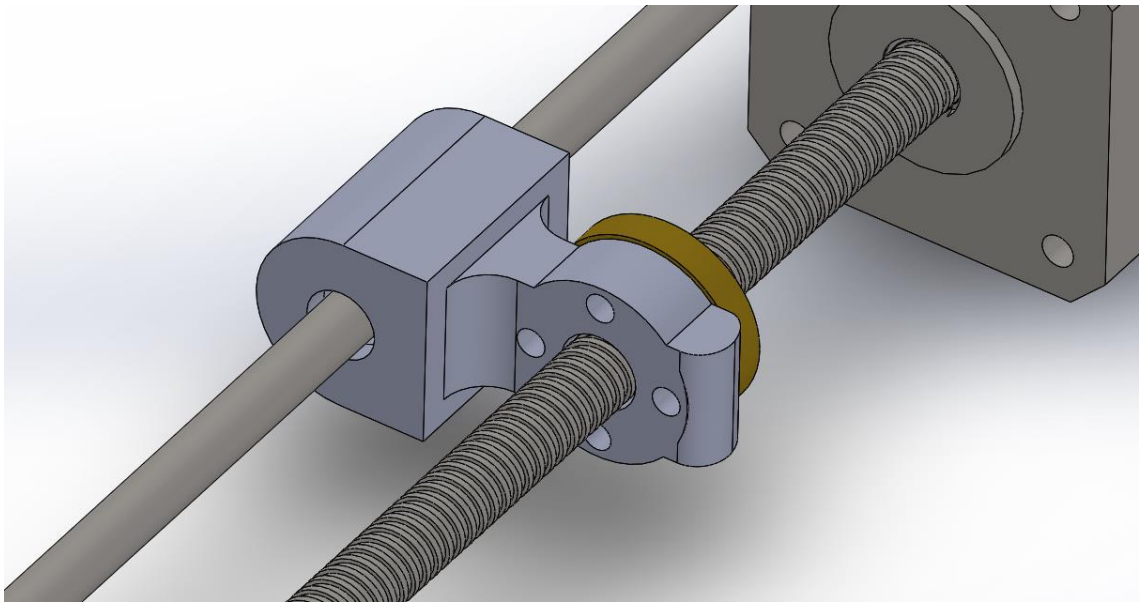
# 3
# Nesnel Tasarım

## 3.1 Prototip-1



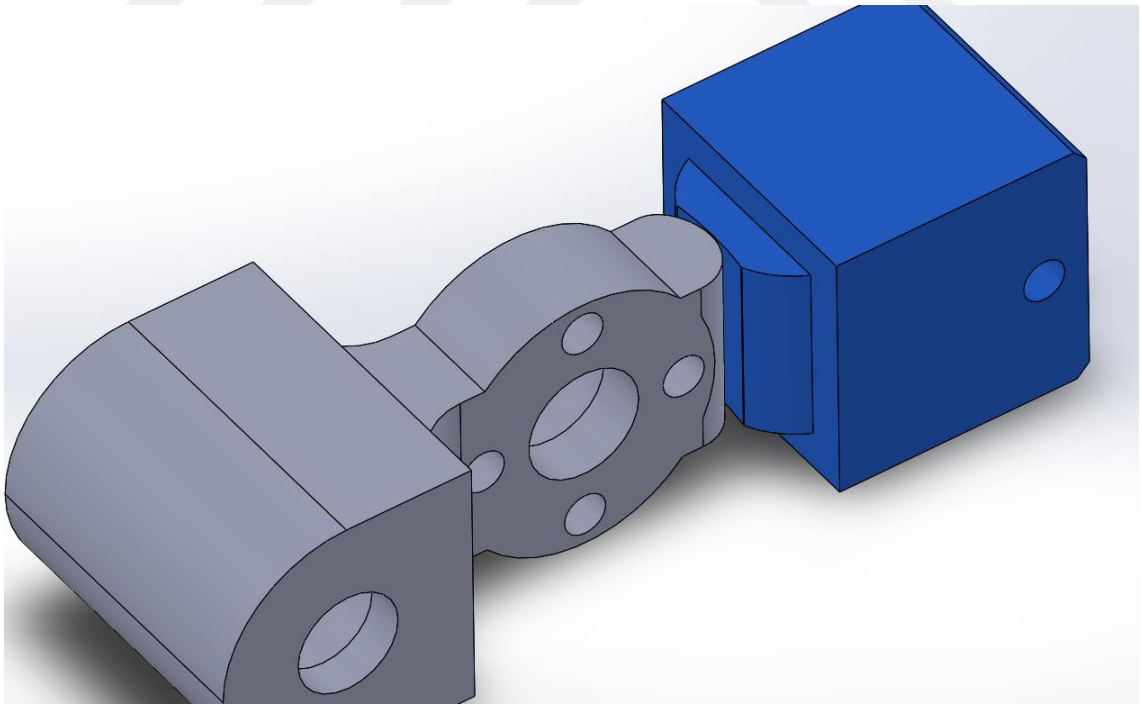

**Şekil 3.1** Malzeme değiştirici ve bileşenleri

Tasarlanan ilk prototipte (Şekil 3.1) açısal hareketi doğrusal harekete çeviren, step motorla entegre trapez vida kullanılmıştır. Bu motoru tahrik eden NEMA17 tipi bir step motor mevcuttur. Diğer NEMA17 step motor ise 5mm çapında bir şafta kaplin vasıtasıyla bağlanıp bu şafta takılı olan 5 adet malzeme ilerletme dişlisini tahrik etmektedir. Malzemeler önce sırasıyla el ile ön yükleme yapılır daha sonra ise kam profilli ve vidalı mil ile tahrik edilen parça mavi iticileri iterek istenilen malzemeyi kullanmak için malzemeyi dişliye bastırır. Trapez vidanın somununa bağlanan kam profiline sahip parça (Şekil 3.2) lineer bir rulmanla yataklanarak hareket ettirilmektedir.



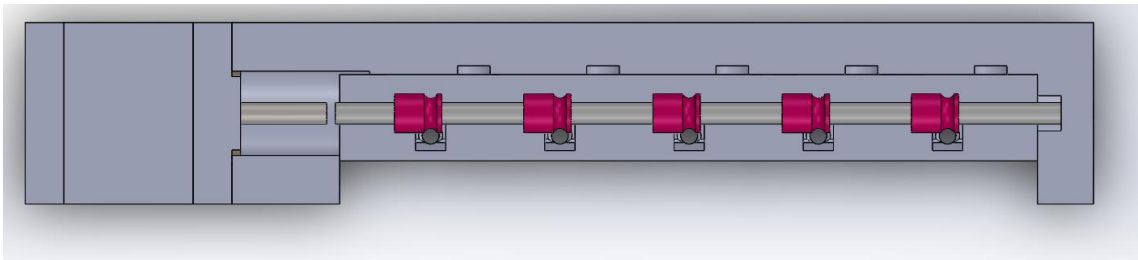
**Şekil 3.2** Trapez vida somunu ile kam profiline sahip parça bağlantısı

Bu parça filamanı sürecek olan dişlinin karşısında baskı yapan bir rulmanı ittirmektedir (Şekil 3.3).



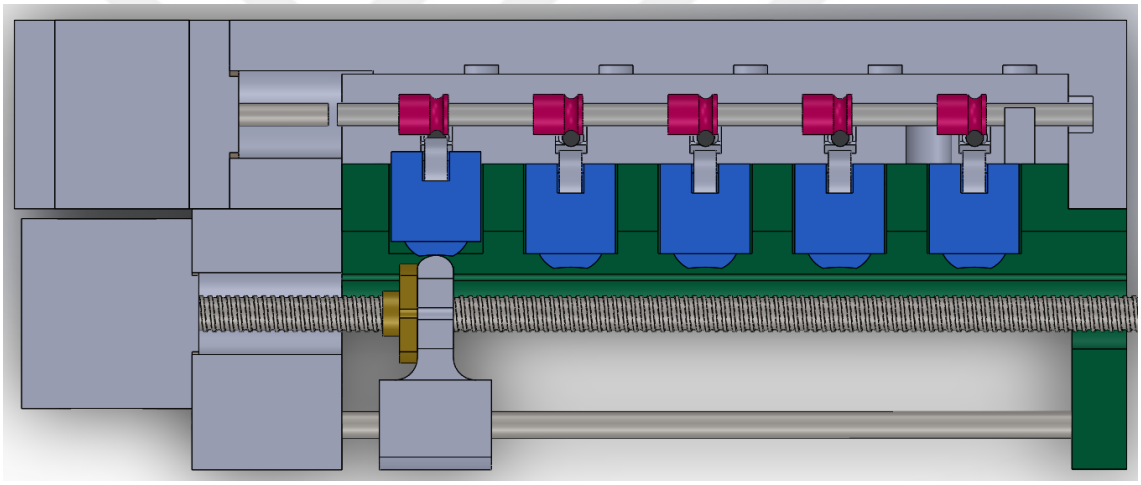
**Şekil 3.3** Filaman baskı rulmanı ve kam profili görülmektedir

Mavi parçanın karşılığında ise filaman iten motor ve motor şaftına bağlı dişliler görülmektedir (Şekil 3.4).



**Şekil 3.4** Filaman tahrik dişlilerinin dizilimi

Tüm mekanizma ise (Şekil 3.5)'de kesit alınarak gösterilmiştir.



**Şekil 3.5** Malzeme değiştirici mekanizma üstten kesit görünümü

Bir malzemeden diğerine geçmek için gereken kuvvet trapez vidanın olduğu parka sökülüp yerine uygun bir aparatla dinamometre bağlanarak ölçülmüş ve 29 N bulunmuştur.

**Tablo 3.1** Malzeme çiftleri için sürtünme katsayıları [23]

| **Vida malzemesi** | **Somun malzemesi** | | | |
|---|---|---|---|---|
| | **Çelik** | **Bronz** | **Pirinç** | **Dökme demir** |
| Çelik, yağlama yok | 0.15-0.25 | 0.15-0.23 | 0.15-0.19 | 0.15-0.25 |
| Çelik, makine yağı | 0.11-0.17 | 0.10-0.16 | 0.10-0.15 | 0.11-0.17 |
| Bronz | 0.08-0.12 | 0.04-0.06 | - | 0.06-0.09 |

**Tablo 3.2** Entegre trapez vidalı motor için vida ve yük parametreleri.

| **Sembol** | **Açıklama** | **Değer** |
|---|---|---|
| $d_m$ | Adım çapı | 7.03 mm |
| 1/l | Diş yoğunluğu | 5 diş/cm |
| $\mu$ | Sürtünme katsayısı | 0.15 (Tablo 3.1) |
| $\alpha$ | Vida açısı | 29 derece |
| F | Yük | 29 N |
| $T_y$ | Yükselme sırasında gereken tork | 2.69 N.cm |
| $T_a$ | Alçalma sırasında gereken tork | 0.8 N.cm |
| $T_m$ | Motor torku | 3.17 N.cm [7] |

Vidalı milde yükselme ve alçalma durumunda gereken torku bulmak için formüller [24] aşağıda verilmiştir.

$$T_{yükselme} = \frac{F.dm}{2}\left(\frac{l+\pi.\mu.\mathrm{dm.sec}(\alpha)}{\pi.dm-\mu.l.\mathrm{sec}(\alpha)}\right) \qquad (3.1)$$

Tablo 3.2'deki parameterler denklem (3.1)'de yazılırsa,

$T_y = 2.69$ Ncm tork değeri elde edilir.

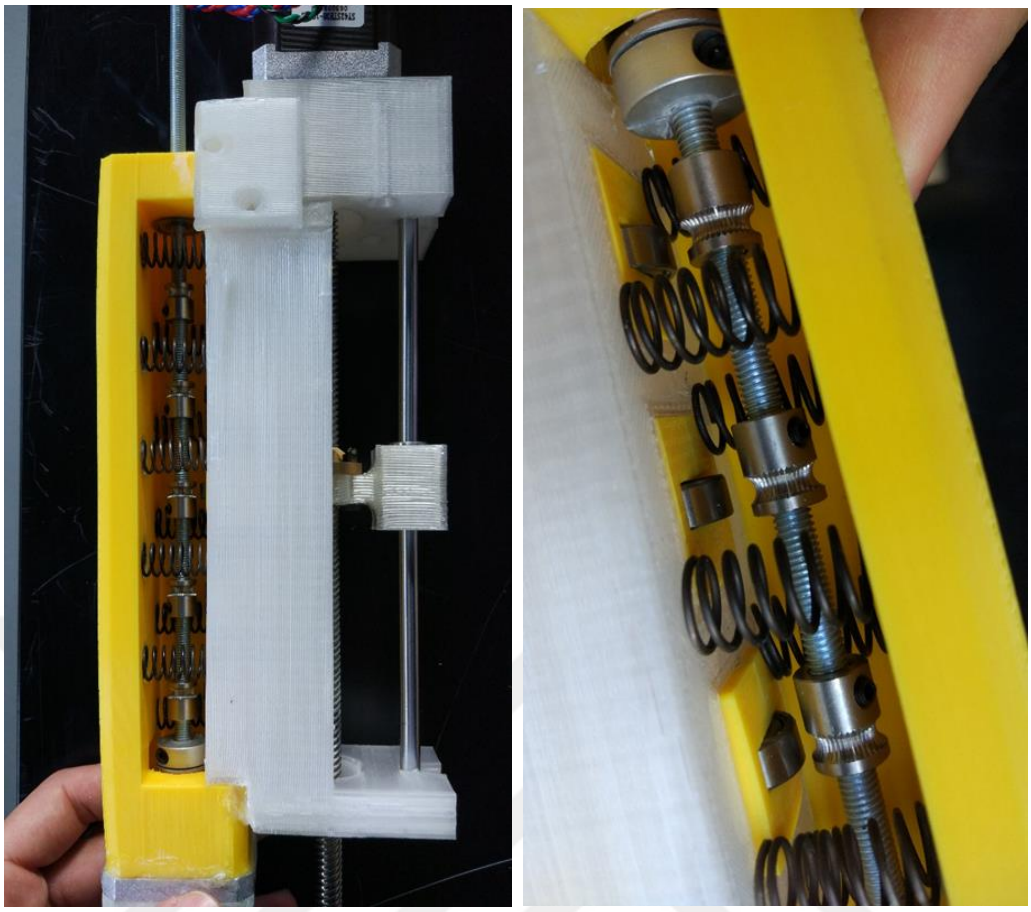
$$T_{alçalma} = \frac{F.dm}{2}\left(\frac{\pi.\mu.\mathrm{dm.sec}(\alpha)-\mathrm{l}}{\pi.dm+\mu.l.\mathrm{sec}(\alpha)}\right) \qquad (3.2)$$

Tablo 3.2'deki parameterler denklem (3.2)'de yazılırsa,

$T_a = 0.8$ Ncm tork değeri elde edilir.

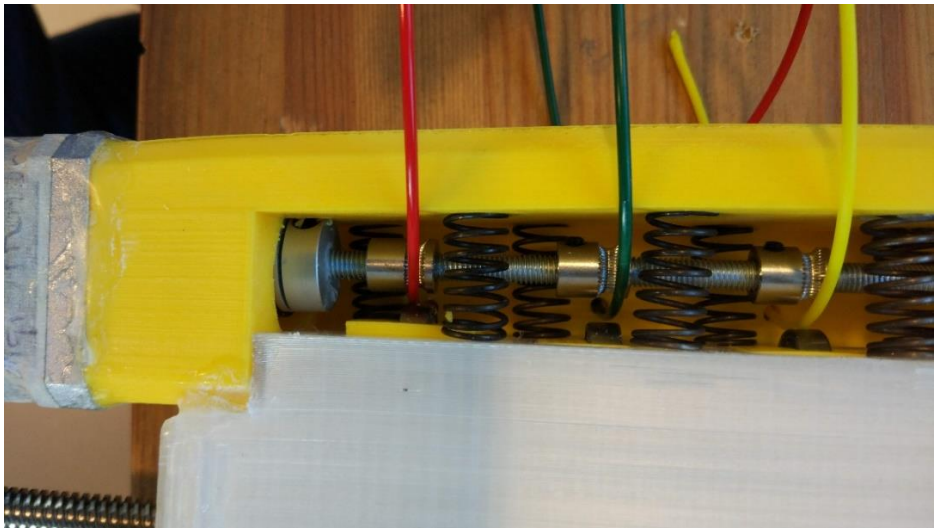
$T_a$ ve $T_y$ değerleri bulunmuş ve motorun sağladığı torkun bu değerlerden büyük olanından daha büyük olduğu görülmüştür. Seçilen motor bu uygulama için yeterlidir.

Şekil 3.6'da malzeme değiştiricinin prototipi görülmektedir.

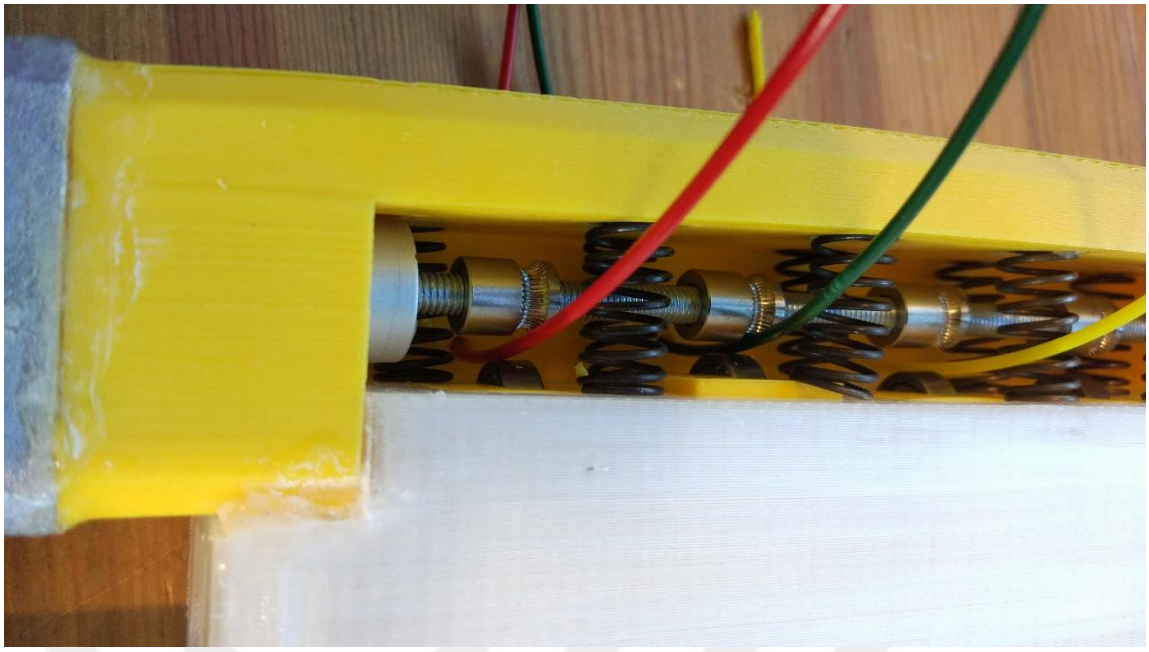


**Şekil 3.6** Çoklu malzeme değiştirici

Şekil 3.7 ve Şekil 3.8'de malzeme değiştiricinin filamanlar arasındaki geçişi görseller yardımıyla ifade edilmiştir.

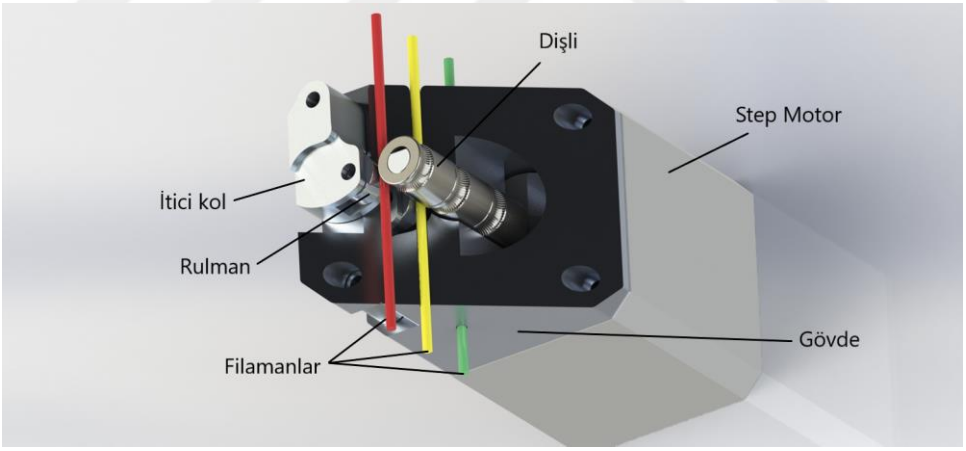


**Şekil 3.7** Malzeme değiştirici 1.dişlideki filaman seçiliyken görülmektedir



**Şekil 3.8** Malzeme değiştirici 2.dişlideki filaman seçiliyken görülmektedir

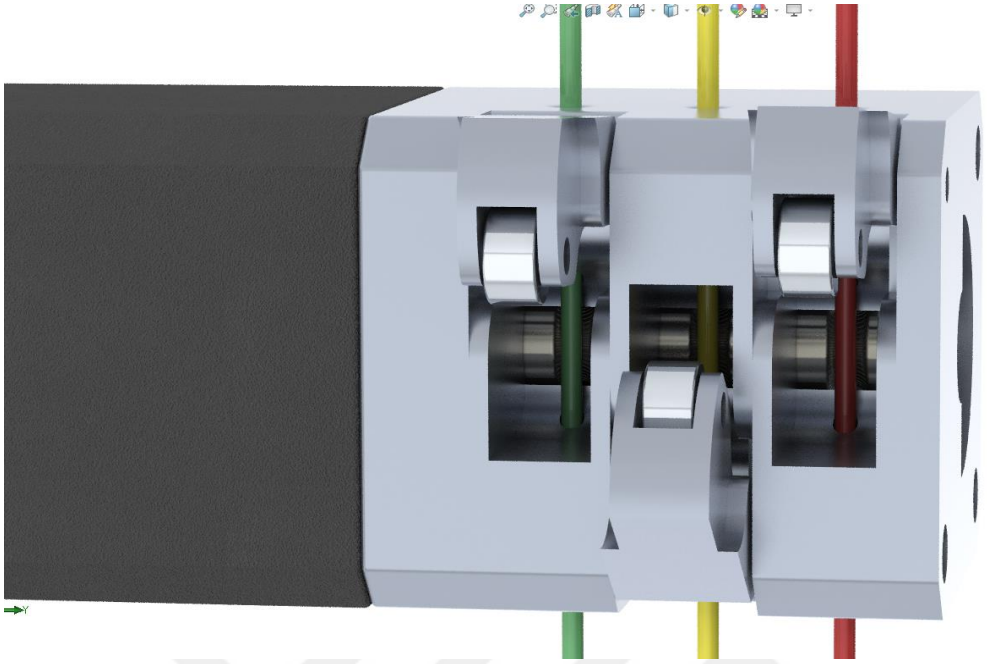
## 3.2 Prototip-2



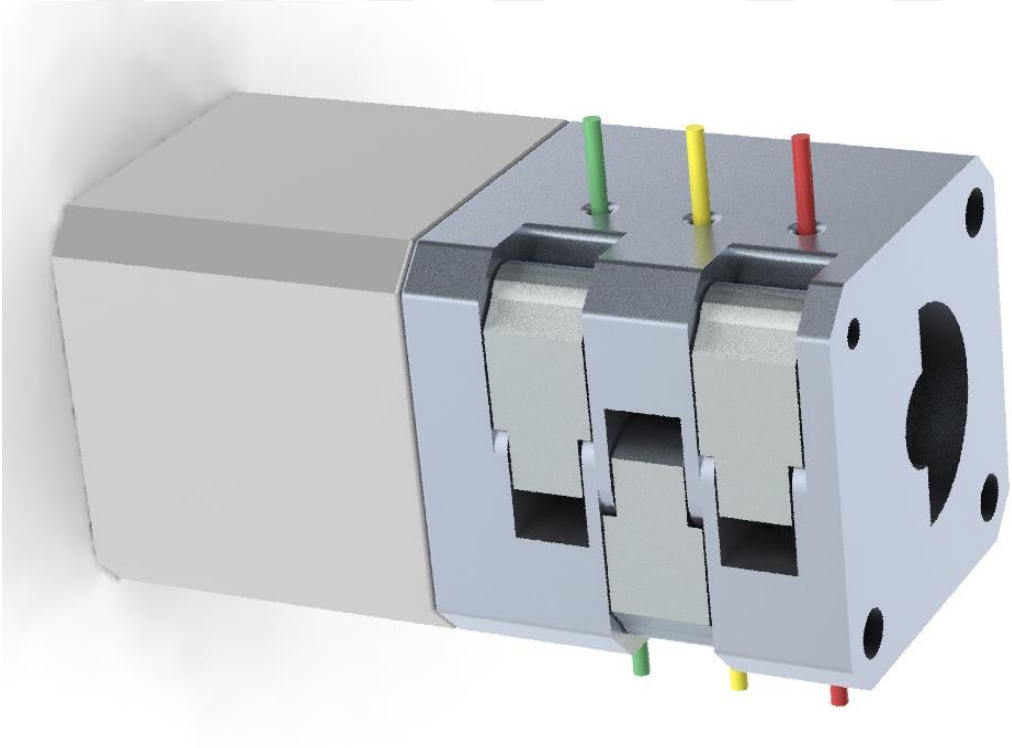

**Şekil 3.9** İkinci prototipe ait bileşenlerin kesit görünümü

Tasarlanan ikinci prototipte (Şekil 3.9) yine genişletmeye müsait yapı korunarak bu sefer bir adet step motorun yalnızca filamanı sürmek için kullandığı, filamanlar arasındaki geçişin ise baskı kafasındaki özel bir aparatla sağlandığı bir çözüm geliştirilmiştir. Filaman ile dişli arasındaki sürtünmeyi sağlayan itici kollarda 693ZZ tipi rulman kullanılarak istenilen filamanın üzerine baskı uygulanmaktadır. (Şekil 3.10)'da görüldüğü gibi kollar bir mandal gibi hareket etmektedir, alandan

tasarruf etmek için kollar sırasıyla bir aşağıdan bir yukarıdan bağlanmıştır böylece 693ZZ rulmanları yerleştirebilmek için yer kazanılmıştır.

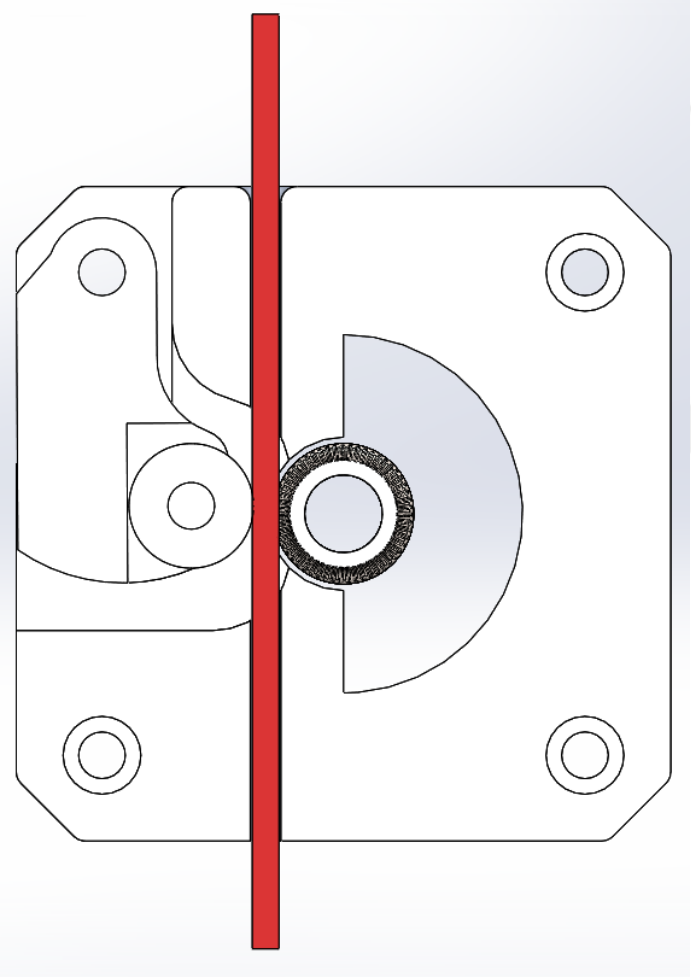


**Şekil 3.10** İkinci prototipe ait itici kolların açık konumdaki görünümü



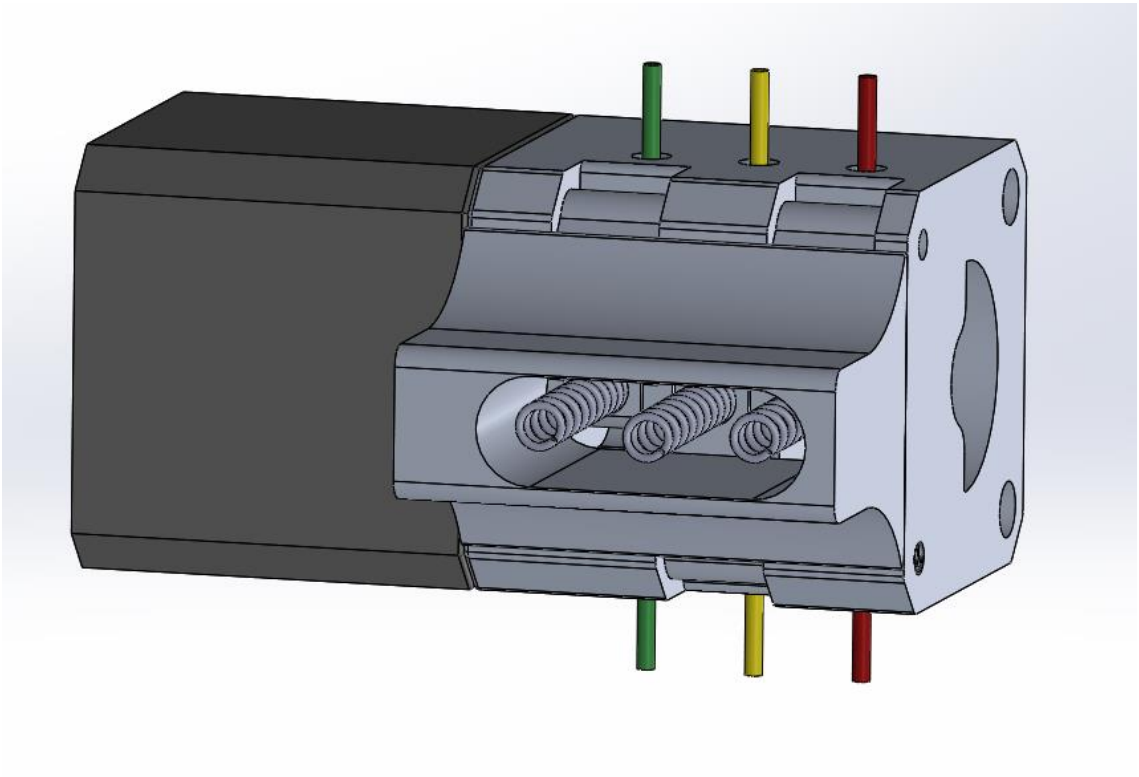
**Şekil 3.11** İtici kolların kapalı konumdaki görünümü

Şekil 3.11'deki gibi itici kollar kapalı konumdayken filamanların hepsi devrede olmayıp dişliyle arasında 250 mikronluk bir boşluk bırakılmıştır. Filamanın mekanizma içindeki serbest kaldığı kısmı 10mm ile sınırlayarak hem itici kolların ilgili filamanı dişliyle temas ettirecek kadar esnetebilmesini sağlamak hem de esnek filamanların bu mekanizmada kullanılabilmesini sağlamak amaçlanmıştır. Aksi takdirde mekanizmanın üst ve alt kısmındaki filaman giriş çıkışları arasında içerideki serbest filaman boyu (Şekil 3.12) gereğinden uzun olursa esnek filamanların içeride bükülüp dişliye dolanması olasıdır.



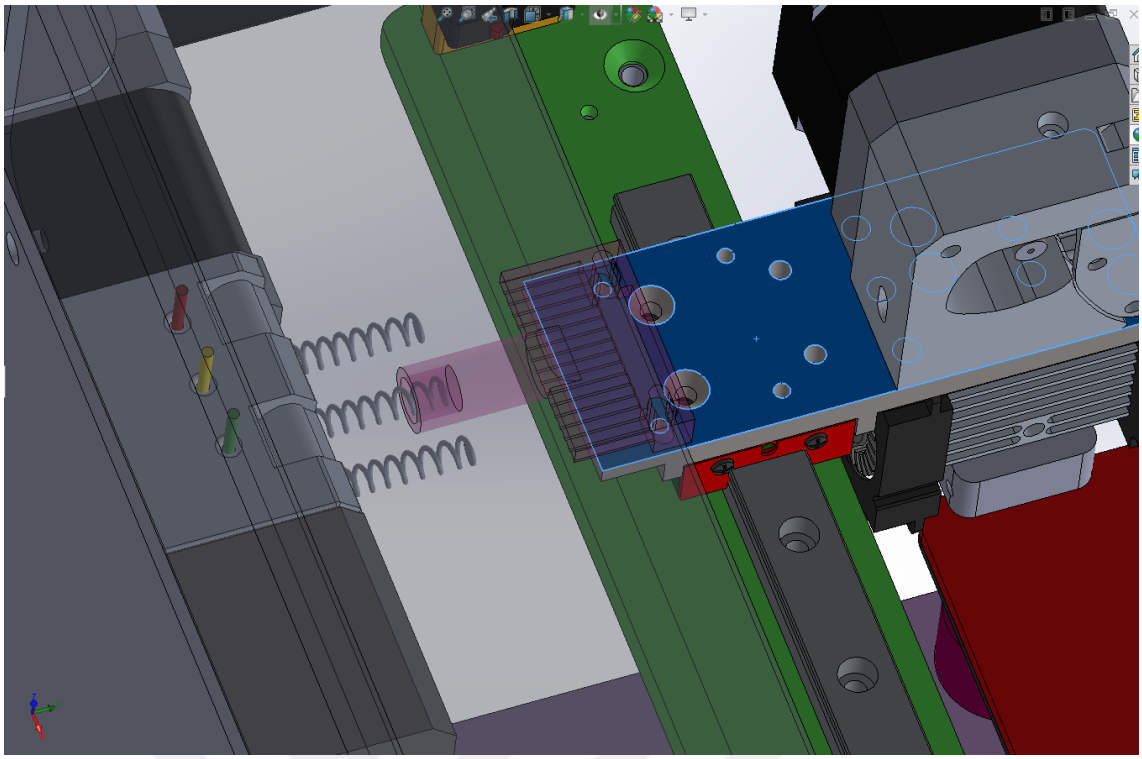
**Şekil 3.12** Serbest filaman boyu kesit görünümü

Daha sonra bu itici kolların tetiklenmesi için kollara yaylar yerleştirilmiştir (Şekil 3.13)

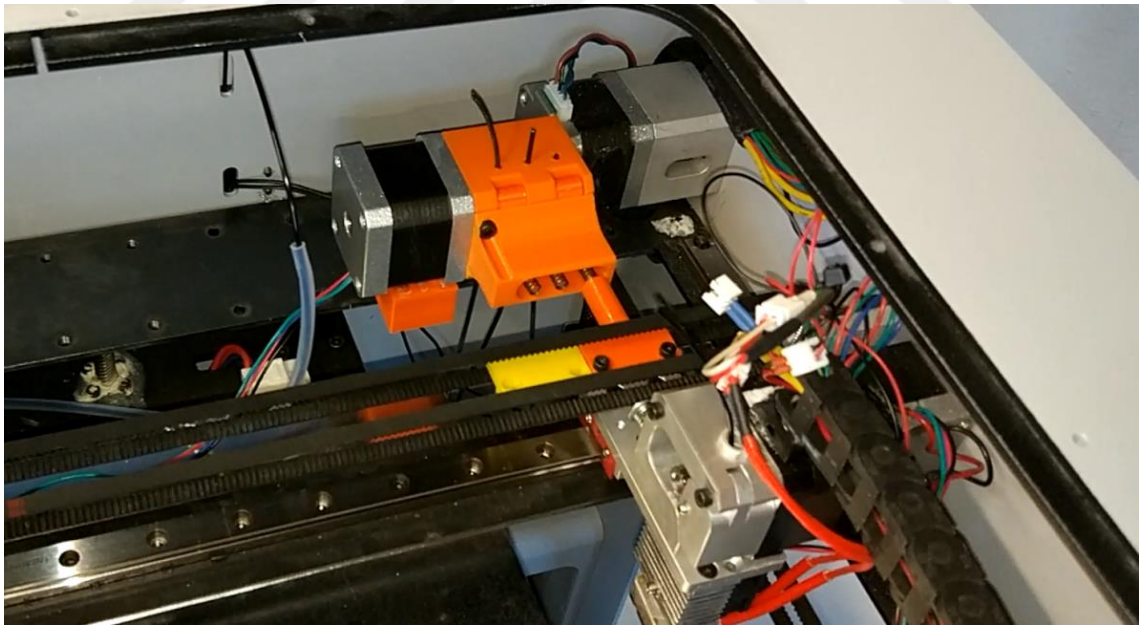


**Şekil 3.13** İticilere bağlanan yaylar

Bu yayların tetiklenmesi ise kayış tutucu parçaya bir uzantı (Şekil 3.14) eklenerek bu uzantının Şekil 3.13'te yayların bulunduğu yuvaya girerek ilgili filaman kolunu ittirmesi ile gerçekleştirilmektedir. Şekil 3.15'te ise çalışma anında çekilmiş bir videodan ekran görüntüsü görülmektedir.



**Şekil 3.14** Kayış tutucu parka ve yay itici uzantısı



**Şekil 3.15** Prototip-2'nin çalışma sırasında görüntüsü

## 3.3 Değerlendirme ve Karşılaştırma

**Tablo 3.3** Malzeme değiştiricilerin karşılaştırması

| | **Literatürdeki Çalışma** | **Prototip-1** | **Prototip-2** |
|---|---|---|---|
| **Kullanılan motor adedi** | 2 | 2 | 1 |
| **Filaman sayısı** | 5 | 5 | 3 (5'e kadar arttırılabilir) |
| **Boyutlar (mm)** | 90x85x80 | 248x100x65 | 42x42x88 |
| **Malzeme değiştirme şekli** | Radyal hareket | Lineer hareket | Makro yazılarak otomatikleştirilmiş |
| **Ekstrüzyon tipi** | Bowden | Direkt | Direkt |
| **Malzeme değiştirme süresi** | Veri yok | Veri yok | Göreceli olarak daha uzun çünkü değiştirme motoru yerine makro yazılarak baskı kafasıyla değiştiriliyor |

Tablo 3.3'de yapılan prototipler literatürdeki [2] çalışmayla karşılaştırılmıştır. Prototip-2'nin diğerlerine göre avantajı tek step motor kullanması ve bu sayede anakartta bir adet fazladan sürücü bulunma zorunluluğunu ortadan kaldırmasıdır. Diğerlerine göre daha az yer kaplaması ise diğer bir avantajdır. Ancak böyle bir yöntem kullanılacaksa bileşenlerin birbirine konumları önem arz etmektedir, çünkü çoklu malzeme değiştirici kasaya bağlandığında mekanizmanın üzerindeki yayların konumu hazırlanan makroya tanımlanacağından seri üretimde yay iticinin mekanizmaya göre olan göreceli konumu değişmemelidir.

# 4
# Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada FDM prosesiyle üretim yapacak bir cihaz için malzemeler arasında geçiş yapmaya yarayan bir mekanizma kullanımının değerlendirilmesi ve iki adet alternatif tasarımı yapılmıştır.

Bu amaç doğrultusunda sistematik konstrüksiyon metoduyla çeşitli ekstrüzyon sistemlerinin karşılaştırılması yapılarak en geçerli çözümün birden çok malzeme arasında geçiş yapabilen ve bunları tek bir baskı kafasına gönderen bir yapının olduğu bulunmuştur. 1.00 skor ile en geçerli çözüm olduğu bulunan malzeme değiştirme mekanizması karşısında kafa değiştirici, tek kafa çift nozül ve bağımsız çift kafa yöntemleri ise sırasıyla (0.747, 0.67, 0.4) skorlarını almıştır. Buradaki avantajlar malzeme renkleri ve çeşitliliğinin yanısıra, yalnızca bir adet nozülün bulunması ve çift nozüllü sistemlerdeki gibi nozüllerin birbirlerine olan mesafelerinin tespit edilme gerekliliğinin olmamasıdır. Bu da kinematik uyumluluğu, hareket eden kütlenin düşük olması gibi avantajları beraberinde getirmiştir. Literatürdeki çalışma ile kıyaslandığında tasarlanan çözümün filamanların bağlı olduğu parçanın hareketsiz olmasından dolayı malzeme değişim sırasında birbirine dolanma sorununun önüne geçtiği görülür. Ayrıca literatürdeki çalışmada malzemeyi iten mekanizma aynı zamanda ekstrüder görevi de görmektedir yani Bowden tipidir. Bu da esnek filamanlarla çalışma konusunda zorluk yaratmaktadır. Yapılan çalışmada mekanizmanın tek görevinin ilgili malzemeyi baskı kafasındaki ekstrüdere sürmek olması, filaman süren dişli ile karşılığındaki rulmanın birbirine yaptığı baskı kuvvetini kritik bir parametre olmaktan çıkarır.

Bu veriler ışığında beş adet malzeme arasında geçiş yapabilen bir prototip ve daha sonra üç adet malzeme arasında geçş yapabilen ancak beş adete kadar genişletilebilme imkanı bulunan bir alternatif tasarlanmıştır, ileride yapılacak çalışmalarda bu mekanizmalara bir filaman sensörü entegre edilerek iyileştirmeler yapılabilir.

# Kaynakça


[1] 3D Hubs, "3D Printing Trends First Quarter of 2019," https://www.3dhubs.com/get/trends/. [Accessed March 21, 2019].

[2] M. H. Ali, N. Mir-Nasiri and W. L. Ko, "Multi-nozzle extrusion system for 3D printer and its control mechanism," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* vol. 86, no. 1-4, pp. 999-1010, 2015.

[3] P. Ammorn, J. Ramos, Y. Wang, J. Kwan, J. Lan, W. Wang and W. Matusik, "MultiFab: A Machine Vision Assisted Platform for Multi-material 3D Printing," *The Computational Fabrication Group, Massachusetts Institute of Technology,* 2015, http://cfg.mit.edu/content/multifab-machine-vision-assisted-platform-multi-material-3d-printing [Accessed: May 18, 2019].

[4] S. Maruo, K. Ikuta and T. Ninagawa, "Multi-polymer microstereolithography for hybrid opto-MEMS," In *The 14th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems,* 2001, pp. 151-154.

[5] A. Inamdar, M. Magana, F. Medina, Y. Grajeda and R. Wicker, "Development of an automated multiple material stereolithography machine," In *Proceedings of 17th Annual Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, TX,* 2006, pp. 624-635.

[6] L. Han, S. Suri and C. E. Schmidt, "Fabrication of three-dimensional scaffolds for heterogeneous tissue engineering," *Biomed Microdevices,* vol.12, pp. 721-725, 2010.

[7] C. Zhou, Y. Chen, Z. Yang and B. Khoshnevis, "Digital material fabrication using mask-image-projectionbased stereolithography," *Rapid Prototyping Journal*, vol.19, no. 3, pp. 153-165, 2013.

[8] P. Kumar, J. K. Santosa, E. Beck and S. Das, "Direct-write deposition of fine powders through miniature hopper-nozzles for multi-material solid freeform fabrication," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 10, no. 1, pp. 14-23, 2004.

[9] E. Sachs, M. Cima and J. Cornie, "Three-dimensional printing: Rapid tooling and prototypes directly from a cad model," *CIRP Annals-Manufacturing Technology,* vol. 39, no. 1, pp. 201-204, 1990.

[10] S. Khalil, J. Nam and W. Sun, "Multi-nozzle deposition for construction of 3d biopolymer tissue scaffolds," *Rapid Prototyping Journal,* vol. 11, no. 1, pp. 9-17, 2005.

[11] Fab@Home, http://www.fabathome.net/ [Accessed: 18 May, 2019].

[12] Leapfrog 3D Printer Manufacturer Website, https://www.lpfrg.com/wp-content/uploads/2019/01/IDEX-gif-2019-Opt.gif [Accessed: 18 May, 2019].

[13] All3DP, "Raise3D Pro 2 Plus Review," https://i.all3dp.com/wp-content/uploads/2018/10/15171438/10_3b5a51e8-5466-40cd-aaad-72a0ee0f4b68_600x600.jpg [Accessed: 18 May, 2019].

[14] Hackaday, "E3D Hotend Manufacturer Introduces Tool Changing 3D Printer," https://i1.wp.com/hackaday.com/wp-

content/uploads/2018/03/img_20180323_183853.jpg?ssl=1 [Accessed: 18 May, 2019].

[15] MANUFACTUR3D, "Direct Drive & Bowden Extruder Assembly," https://manufactur3dmag.com/wp-content/uploads/2018/05/Direct-Drive-Bowden-Extruder-Assembly.jpg [Accessed: 9 May, 2019].

[16] R. Rezaie, M. Badrossamay, A. Ghaie and H. Moosavi, "Topology optimization for fused deposition modeling process," The Seventeenth CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM), 2013, pp. 522-527.

[17] C. Duran, V. Subbian, M. Giovanetti, J. Simkins and F. Beteyye Jr, "Experimental desktop 3D printing using dual extrusion and water-soluble polyvinyl alcohol," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 21, no. 5, pp. 528-534, 2015.

[18] H. Maden, Ö.Ş. Kamber, "FDM Teknoloji ile üretilen prototip parçalarının hataları ve hataların önlenmesi," *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, vol. 2, no. 1, pp. 40-51, 2018.

[19] A. Garg, A. Bhattacharya and A. Batish, "On Surface Finish and Dimensional Accuracy of FDM Parts after Cold Vapor Treatment", *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 31, no. 4, pp. 522-529, 2016.

[20] A. Lalehpour, A. Barari, "Post processing for Fused Deposition Modeling Parts with Acetone Vapour Bath" *12th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems IMS 2016*, vol. 49, no. 31, pp. 42-48, 2016.

[21] A. Bellini, S. Güçeri and M. Bertoldi, "Liquifier Dynamics in Fused Deposition," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 126, pp. 237-246, 2004.

[22] Stratasys, "Fortus 380MC and 450MC Technical Spec Sheet," https://www.stratasys.com/3d-printers/fortus-380mc-450mc. [Accessed May 21, 2019].

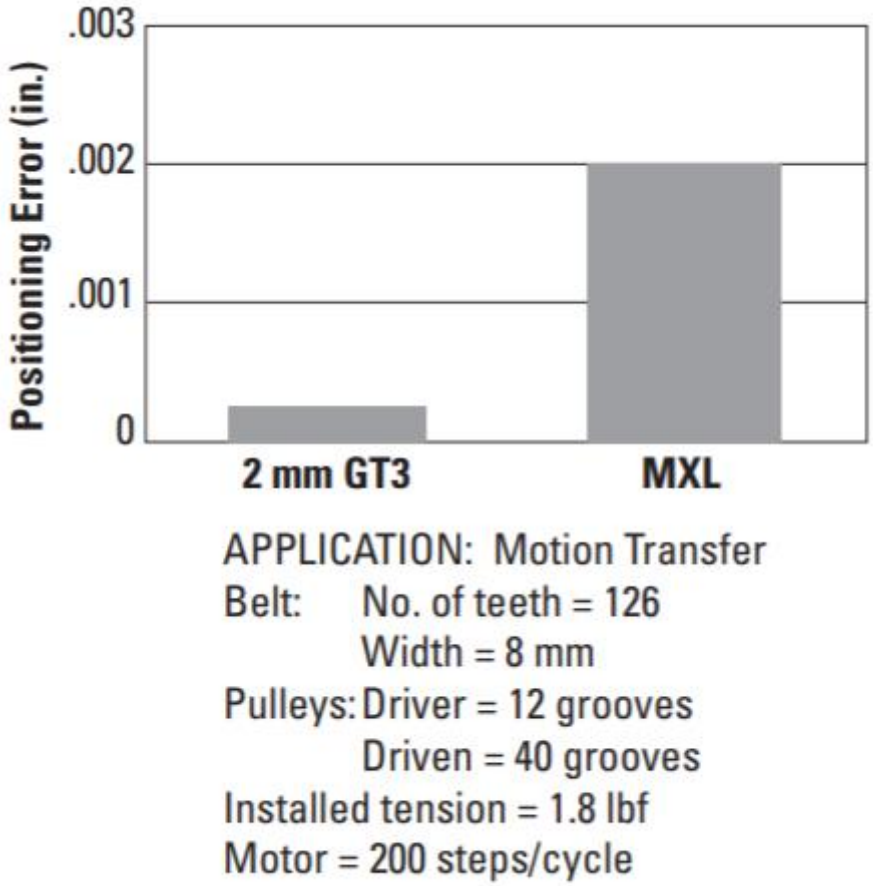
[23] J. Shigley, C. Mischke and R. Budynas, *Mechanical Engineering Design (7th ed.)*, McGraw-Hill, 2003.

[24] V. B. Bhandari, *Design of Machine Elements*, Tata McGraw-Hill, 2007.

[25] Stock Drive Products / Sterling Instrument, "Handbook of Timing Belts, Pulleys, Chains and Sprockets," Section 4 Drive Comparative Studies.

[26] Pololu Robotics & Electronics, "High torque hybrid stepping motor specifications," SY42STH47-1206A datasheet, Jun. 2010.

## Ek-A

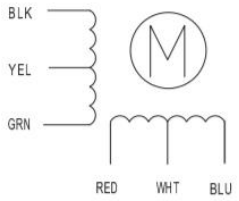



2mm adım mesafesine sahip GT3 tipi kayış için pozisyonlama hatası miktarı [25]

## Ek-B

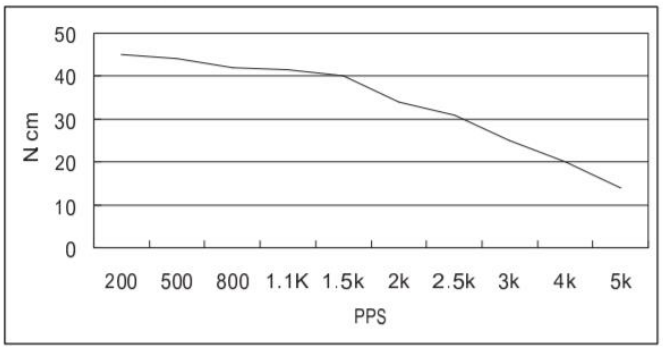
| General specifications | | Electrical specifications | |
|---|---|---|---|
| Step Angle (°) | 1.8 | Rated Voltage (V) | 4 |
| Temperature Rise (°C) | 80 Max (rated current.2 phase on) | Rated Current (A) | 1.2 |
| Ambient temperature (°C) | -20～+50 | Resistance Per Phase (±10%Ω) | 3.3 (25°C) |
| Number of Phase | 2 | Inductance Per Phase (±20%mH) | 2.8 |
| Insulation Resistance | 100MΩ, Min (500VDC) | Holding Torque (Kg.cm) | 3.17 |
| Insulation Class | Class B | Detent Torque (g.cm) | 200 |
| Max.radial force (N) | 28 (20mm from the flange) | Rotor Inertia (g. cm²) | 68 |
| Max.axial force (N) | 10 | Weight (Kg) | 0.365 |

● Wiring Diagram:




● Dimensions:
(unit=mm)

● Pull out torque curve:
VOLTAGE: 24VDC, CONSTANT CURRENT: 1.2A, HALF STEP




Eksen hareketi ve malzeme değiştiricide kullanılan step motorun verileri [26]

# Tezden Üretilmiş Yayınlar

**İletişim Bilgisi:** kerem_boyali@hotmail.com

## Konferans Bildirileri

1. K. Boyalı, İ. İstif, “Fdm 3B Yazıcı İçin Malzeme Değiştirme Mekanizmasının Kavramsal ve Nesnel Tasarımı,” 4th International Congress on 3D Printing Technologies and Digital Industry, Antalya, Türkiye, 2019.