



## 3 BOYUTLU YAZICI İLE 6 EKSENLİ ROBOT KOL TASARIM VE İMALATI

Ahu Çelebi<sup>1,\*</sup> , Adem Korkmaz<sup>1</sup> , Tuğcan Yılmaz<sup>1</sup> , Halil Tosun<sup>1</sup> 

Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, TÜRKİYE

\* Ahu ÇELEBİ: [ahu.celebi@cbu.edu.tr](mailto:ahu.celebi@cbu.edu.tr)

(Geliş/Received: 10.12.2019; Düzeltme/Revised: 24.12.2019; Kabul/Accepted: 31.12.2019)

### ÖZET

Gelişen teknoloji ile birlikte günümüzde endüstriyel otomasyon sistemlerine duyulan ihtiyaç her geçen gün artış göstermektedir. Günlük hayatın yanı sıra sanayide de endüstriyel otomasyon sistemlerinin yaygın bir kullanım alanına sahiptir. Bu çalışmada, endüstriyel otomasyon sistemlerinden biri olan ve yaygın kullanım alanına sahip olan robot tasarımı ve üretimi incelenmiştir. Bu incelemeler sonucunda 6 eksenli bir robot kol tasarım ve üretimi amaçlanmıştır. Bilgisayar destekli tasarım ve imalat tabanlı bir yazılım olan Catia V5 ile robot kolu oluşturacak parçaların detaylı çizim ve modelleri oluşturulmuştur. Bu parçalar 3B (üç boyutlu) yazıcılar aracılığı ile ticari bir filament olan PLA (polilaktik asit) kullanılarak basılmıştır. Üretimi sağlanan parçaların uygunluk ve kalitesi incelenmiş ve montaj aşamasına geçilmiştir. Eklem görevi görecek olan bölgeler (Bilek, tutucu, vb.) ve ana döndürme mekanizması (omuz) üzerine servo motorlar yerleştirilmiştir. Bu motorların belirlenmiş fonksiyonlarını yerine getirebilmeleri amacı ile Arduino yazılım geliştirme kiti kullanılarak programlama yapılmıştır. Tüm parçalar, rulmanlar ve vidalar kullanılarak bir araya getirilmiş ve elektro-mekanik bir sistem olarak 6 eksenli robot kol üretimi başarılı bir şekilde tamamlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** PLA Filament, 3B Yazdırma, Robotik Kol.

## DESIGN AND PRODUCTION OF 6 AXIS ROBOT ARM BY 3D PRINTER

### ABSTRACT

Today, the importance of industrial automation systems is increasing with the developing technology day by day. Industrial automation systems are used widely in daily life and industry. In this study, the design and production of robots was investigated which is one of the industrial automation systems and used commonly. As a result of these investigations, the 6-axis robotic arm was aimed to design and production. Detailed drawings and designs to create robotic arm were made by Catia V5 software that computer-aided design and manufacturing based. These parts were printed by 3D printers using a commercial PLA (polylactic acid) filament. The mechanical properties and quality of printed parts were controlled and the assembly process have started. Servo motors were placed on the main rotating mechanism (shoulder) and regions (wrist, holder, etc.) that will serve as joints. Arduino software development kit was programmed to perform the specified functions of these motors. All parts were assembled using bearings and screws and the production of a 6-axis robot arm as an electro-mechanical system was completed successfully.

**Keywords:** PLA Filament, 3D Printing, Robotic Arm

## 1. GİRİŞ

Gelişen teknoloji ile birlikte günlük yaşantımızda kullandığımız alet, cihaz, makine ve birçok elektromekanik sistem de gelişim göstermiştir. Günlük hayatımızı etkilemelerinin yanı sıra bu değişim sanayide de etkilerini göstermiştir. Böylelikle otomasyon sistemlerine farklı alanlarda ihtiyaç ortaya çıkmıştır.

Bilgisayar sistemlerinin sanayiye girmesiyle birlikte endüstriyel otomasyon sistemleri de hızla gelişmiştir. Otomasyonun yaygın olarak kullanıldığı ortamlarda, özellikle fabrikalarda robotlar, her alanda etkin bir kullanıma sahiptir. Her geçen gün artan robot kullanımı malzeme taşınması, paketleme, yapıştırma, kaynak yapma, boyama ve montaj gibi birçok alanda kullanılmaktadır [1]. Düşük maliyet, yüksek oranda üretkenlik, kalite ve esneklik gibi avantajlar göz önüne alındığında endüstriyel otomasyon sistemleri birçok alanda kullanılmaktadır.

Robot denilen kavram en basit tanımı ile insanın günlük hayatını ya da yapacağı işleri kolaylaştıran zamandan tasarruf sağlayan benzer işlemleri defalarca verilen emire göre tekrarlayabilen elektromekanik yapılardır. Yaşam kalitesini artırmak amacıyla, araştırma kurumları ve önemli şirketler son zamanlarda hizmet robotları tasarlamak ve üretmek için dikkatle çalışmaya başladı [2]. Zaman tasarrufu sağlamaları, insan gücüne kıyasla daha ekonomik olmaları, seri üretime katkı sağlamaları, çalışmanın zor veya tehlikeli olduğu iş koşullarında kullanılabilmesi gibi avantajlar nedeniyle robotlar birçok alanda önemli ekipmanlar haline gelmiştir.

Günümüz teknolojisinde robotların önemi giderek artmakta ve birçok endüstriyel, askeri ve diğer uygulamalarda insanın yerini almaktadır. Robotlar, özellikle robot kolları endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır [3]. Her geçen gün artan robot kollarının kullanımı malzeme taşınması, paketleme, yapıştırma, kaynak yapma, boyama ve montaj gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Robotlar endüstriyel, operasyonel, tıp ve sağlık, eğitim ve araştırma, eğlence, siberetik, tarım ve hayvancılık, ulaşım gibi birçok yaygın kullanım alanına sahiptir.

Tarım alanında robotların kullanımı tohum ekimleri, sulama, hasat ve toplama gibi alanlarda kullanılmaktadır. Örneğin EcoRobotix'in ürettiği yeni robotlar sayesinde, tarım alanlarında bulunan zararlı otların temizlenmesi için gerekli olan kimyasal ilaçların kullanımı ortadan kalkmaktadır.

Tıp alanında robot kullanımının temel amacı hassasiyeti artırarak insan faktöründen kaynaklanan hataların en aza indirilmesidir. Tıp alanında robotlar özellik cerrahi uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu robotlar hastanın hayati belirtilerini tarayarak, fotoğraf çekerek ve hatta vaka notlarını okuyarak tanı koyulması ve gerekli tedavinin uygulanması konusunda tıbbi personele yardımcı olmaktadır.

Robotlar eğitim alanında; öğretmen ve öğretim materyali olarak kullanılmaktadır. Eğitimde robotların kullanılması ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalar sonucunda eğitim ve araştırma alanlarında robot kullanımının daha etkili bir eğitimi ortamı yarattığı ve motivasyonu arttırdığı gözlemlenmiştir. Ayrıca araştırma ve üretim maliyetlerinin azalttığı sonuçlarına ulaşılmıştır.

Eklemeli imalat, parçaların kesitlerinin teker teker, birikimli veya eklemeli olarak üretilmesi şeklinde tanımlanmaktadır. Bu yönüyle, var olan malzemenin şekillendirilmesi ya da eksilmesi prensibi ile çalışılan geleneksel imalat yöntemlerinden ayrılmaktadır [3]. Bu teknoloji, tasarımın iyileştirilmesini ve bileşenlerin hızlı bir şekilde üretilmesini sağlamıştır. Özellikle kompleks parçaların üretimini ve tamiratını kolaylaştırmıştır [4]. En yaygın eklemeli imalat teknolojileri; steryolitografi (SLA), ergiterek yığılma ile modelleme (FDM), üç boyutlu yazıcı (3DP), seçmeli lazer sinterleme (SLS), seçmeli lazer ergitme (SLM), elektron ışınli ergitme (EBM) gibi yöntemlerdir [5].

3B yazıcı, aslında genel olarak eklemeli imalat yerine kullanılan bir kelime grubudur ancak bu yanlış bir yaklaşımdır. Eklemeli imalat, tüm bu yöntemlerin genel adı olarak belirlenmiştir. Üç boyutlu baskılama ise genellikle plastik-elastomer malzemelerin ürüne dönüştürülmesinde kullanılan bir alt daldır [6]. Son yıllarda 3B yazıcı ve yazdırma alanında birçok ülkede kayda değer çalışmaların olduğu söylenebilir. 3B

yazıcılar esasında günümüzde yoğunlukla kullanılan x-y eksenlerinde yazdırma yapan 2 boyutlu yazıcılara bir alternatif olarak sunulan ve x-y-z eksenlerinde çıktı almaya imkân tanıyan cihazlardır [7].

Bu çalışmada eklemeli imalat yöntemlerinden biri olan 3B boyutlu yazıcılar ve bilgisayar destekli tasarım ve imalat tabanlı programlar beraber kullanılarak robot kol tasarımını oluşturacak parçalar basılmıştır. Ayrıca yazılım geliştirme kiti, programlama dilleri sayesinde istenilen fonksiyonları yerine getirebilme amacı ile programlanmıştır. Daha sonra bu parçalar ve diğer bileşenler (motorlar ve yazılım geliştirme kiti) birleştirilerek 6 eksenli robot kolun montajı gerçekleştirilmiştir. Son olarak üretim kalitesi değerlendirilmiş ve robotun fonksiyonlarını yerine getirebilme durumu test edilmiştir.

Söz konusu çalışma ile elde edilecek olan robot kol tasarımının raf düzenleyici olarak endüstriyel raf sistemlerinde ve konveyör bantlarında seçme ayırma işleminde kullanılması amaçlanmıştır. Endüstriyel raf sistemleri üzerinde rafa konulacak birimin konumlandırılması veya konumunun değiştirilmesi amacıyla farklı raf düzenleme sistemleri kullanılmaktadır. Konveyörlerde üretim hattını yavaşlatan parçaların seçilerek ayrılması da bu sistem ile sağlanabilecektir. Ayrıca bu konuda yapılan çalışmalar ve araştırmalar da devam etmektedir. Bu çalışma ile üretilen 6 eksenli robot kol bu sorunlar için prototip olarak görev yapacaktır.

## 2. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada ilk olarak üretimi amaçlanan robotik kolun çizim ve tasarım aşaması gerçekleştirilmiştir. Söz konusu tasarımın imalatı için 3 boyutlu baskılama tekniğinde kullanılacak olan en uygun malzeme seçimi için araştırmalar yapılmıştır. Malzeme seçim aşamasından sonra 3 boyutlu baskılama için gerekli olan 3B yazıcı arayışına girilmiştir. Sistemin elektromekanik bir sistem halini alması için uygun motor ve yazılım geliştirme kiti temin edilmiştir. Yazılım geliştirme kiti sistemin gerçekleştirilmesi istenen fonksiyonlar esas alınarak programlanmıştır. Son olarak baskılama işleminin ardından elde edilen tasarıma ait parçalar ve diğer bileşenler (motorlar ve yazılım geliştirme kiti) bir araya getirilerek tasarım nihai şeklini almış ve kullanım için denemeler yapılmıştır.

### 2.1. Tasarım

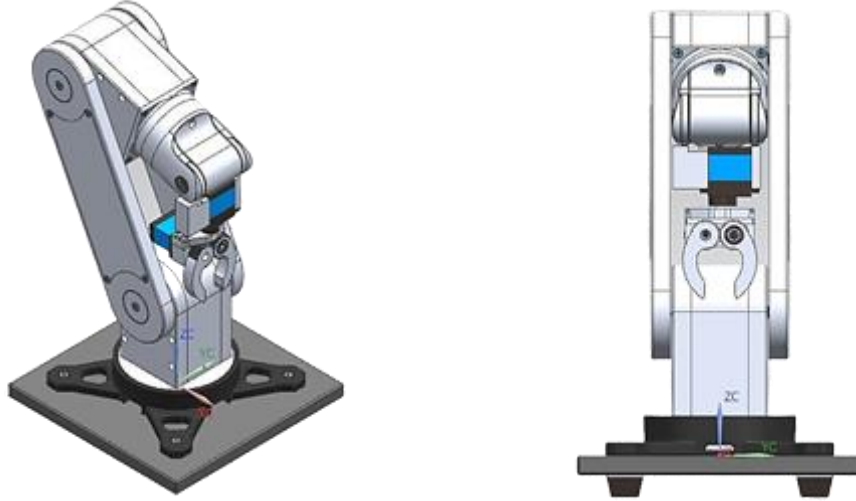
Söz konusu çalışmanın bu aşamasında üretimi gerçekleştirilecek olan ürünün BDT(Bilgisayar Destekli Tasarım) programları yardımıyla ön şeklinin (konstrüksiyon) oluşturulması amaçlanmıştır. İlk olarak bilgisayar destekli tasarım ve imalat programlarından biri olan Catia V5 yazılımı kullanılarak üretimi amaçlanan ürüne ait parçaların çizim ve tasarım aşaması gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada parçaların ölçü ve toleransları ~~boyutları~~ dikkatli bir şekilde seçilmiş ve birbirleri ile olan uyumları kontrol edilmiştir. Robot kolun montajı aşamasında herhangi bir sorun yaşanmaması için son derece dikkatli bir şekilde tasarım aşaması yürütülmüştür. Elde edilen parçalar bilgisayar ortamında bir araya getirilmiştir. Bağlantı yerleri ve rulman takılan yerlerin toleranslarının doğruluğundan nin birbirleri ile örtüştüğünden emin olunmuştur. Son olarak oluşturulan model .stl formatına dönüştürülerek yazıcıya aktarılmıştır.

### 2.2. Yazdırılan Malzeme ve Özellikleri

Bu süreçte tasarım aşamasında elde edilen modelin parçaları .stl dosyası olarak 3B yazıcıya aktarılmıştır. 3B yazıcıda kullanılmak üzere filament olarak PLA seçilmiştir. PLA, laktik asitten yapılmış bir termoplastik polimer olup biyoyumlu ve biyoçözünür özellikte olması ve düşük maliyeti ile öne çıkmaktadır [7, 8]. Gıda paketlenme sektöründe, kişisel bakım ürünlerinde, mutfak eşyalarında ve biyomedikal sektöründe en çok tercih edilen termoplastiklerden birisidir [9]. Kullanılan filament 1.75 mm çapında olmasına dikkat edilerek ticari olarak satın alınmıştır. Filamente ait teknik birkaç özellik; Baskı sıcaklığı: 180°C - 230°C arasındadır. 3B yazıcının baskı ucunun (nozzle) sıcaklığını gösteren değerdir. Bu sıcaklık her zaman malzemenin ergime sıcaklığından yüksek olmaktadır. Ergime sıcaklığı: 160°C-190°C arasındadır. Bu sıcaklık değerinde malzeme erime başlar. Kırılma sıcaklığı (TG): 60-65°C arasındadır. Bu sıcaklık aralığı polimerik malzemenin camsı geçiş özelliğini kaybederek viskoz özellikler göstermeye başladığı sıcaklık değerini temsil eder. Camsı geçiş sıcaklığı her zaman ergime sıcaklığından düşüktür. Erime akış indeksi (MVI): 10.3cm<sup>3</sup>/10dk. Erimiş polimerlerin akış kolaylığını gösteren değerdir. Malzemenin belirli bir çap ve uzunluktaki ince borudan 10 dakika içinde geçmesinin ölçümü sonucunda elde edilerek bulunmuştur [10,11].

### 2.3. Modelin Oluşturulması

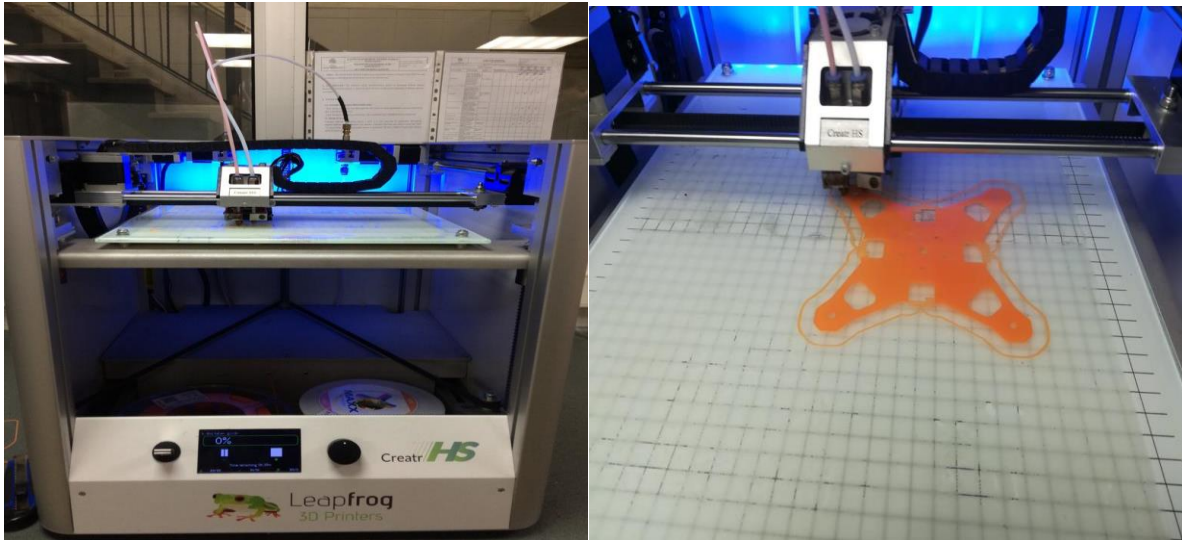
3 boyutlu baskılama işlemi için bilgisayar destekli tasarım ve imalat programında en uygun model tasarımı yapılmıştır. Şekil 1’de bilgisayar programı arayüzünde elde edilen modelin görüntüsüne yer verilmiştir.



Şekil 1. Bilgisayar ortamında modelin görüntülenmesi.

### 2.4. Yazdırma Parametreleri

Bu çalışmada parçaların baskılama işlemini gerçekleştirebilmek için Leapfrog Creatr HS 3 boyutlu masaüstü yazıcı kullanılmıştır. İlk olarak bilgisayar ortamında tasarımı hazırlanan model .stl formatında, Taşınabilir bellek aracılığı ile 3B yazıcıya aktarılmıştır. Yazıcı kullanıcı ekranı üzerinde bulunan taşınabilir bellek simgesi seçilerek, içerisinde bulunan parçalar seçilerek yazdırma işlemi başlatılmıştır.



Şekil 2. Baskılama için kullanılan 3B yazıcı ve yazdırma işlemi.

Yazdırma parametreleri Simplify3D yazılımı ile belirlenmiş ve yazdırma işlemi bu yazılım aracılığı ile kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir. Baskılama için kullanılan 3B yazıcı ve yazdırma işlemi görüntüsü Şekil 2’de gösterilmiştir. Ayrıca, yazdırma esnasında kullanılan parametreler Tablo 1’de verilmiştir.

Yazdırma işlemi sonucu elde edilen parçaların kaliteleri kontrol edilmiş ve uygun olmayan parçaların baskılama işlemi yeniden yapılmıştır. 3B yazıcılar ile elde edilen parçalar ve üretilen parça adedi aşağıda verilmiştir. 1 adet taban, 1 adet soket ayağı, 3 adet servo kolu, 4 adet taban ayağı, 1 adet kapak kılıfı, 2 adet alt kol, 1 adet en üst servo tutucu, 1 adet en üst kapak kılıfı, 2 adet en üst kapak kılıfı (sağ ve sol), 1

adet servo tutucu sol üst, 1 adet servo tutucu sağ üst, 1 adet dişli uç sol, 1 adet kısaç tabanı, 1 adet flanş kısaç olmak üzere toplam 21 parçanın 3B yazıcı ile baskılama işlemi yapılmıştır. Şekil 3’de baskılama işlemi sonucunda elde edilen parçalar gösterilmiştir.

**Tablo 1.** Yazdırma Parametreleri

Sekme	Parametre	Değer
Ekstruder	Nozle Çapı	0,35 mm
	Ekstrüzyon Çarpanı	0,95 mm
	Geri Çekme Mesafesi	4,20 mm
	Geri Çekme Hızı	12000 mm/dk
	Coasting Distance	0,40
	Wipe Distance	0,20
	İlk Katman Yüksekliği	0,1500 mm
	Üst Katı Katmanlar	5
Tabaka	Alt Katı Katmanlar	4
	Outline/Perimeter Shells	4
	Outline Direction	Inside Out
	İlk Katman Yüksekliği	%200
	İlk Katman Genişliği	%125
	İlk Katman Hızı	%30
	İntil Ekstrüder	Sol Ekstrüder
	İç Dolgu Deseni	Rectilinear
Doldurma	Dış Dolgu Deseni	Rectilinear
	İç Dolgu Yüzdesi	%20
	Outline Overlap	%20
	Dolum Ekstrüzyon Genişliği	%110
	Minimum Doldurma Uzunluğu	5 mm
Sıcaklık	Sıcaklık Kontrol Tipi	Isıtımlı Yapı Platformu
	Sıcaklık	200 °C
Soğutma	Fan Hızı	%60

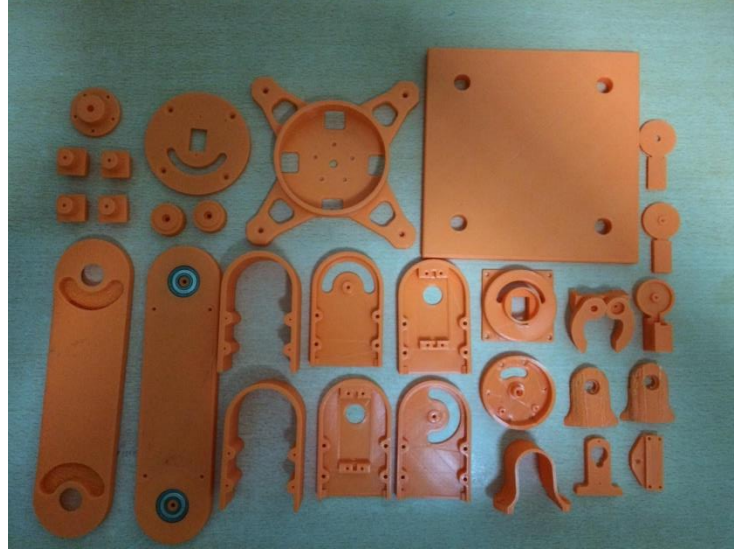
## 2.5. Motor ve Yazılım Geliştirme Kiti

Baskılama işlemi ile elde edilen parçaların bir araya getirilip elektromekanik bir sistem elde edilmesi için motorlar ve yazılım geliştirme kitlerine ihtiyaç duyulmuştur.

Servo kelimesi Latince “servus” kelimesinden gelmektedir. Robot kol uygulamalarında en çok kullanılan motorlar servo motorlardır. Servo motorlar özel yapıya sahip olup sürücünün spesifik olarak kapalı döngülü ya da geri beslemeli kontrol için (hız ya da konum kontrolü) tasarlanmış olduğudur. Servo motorlar bir tasarımın çalışmasında son kontrolü gerçekleştiren elemanlardır. Genellikle güç üreten motorların belli hızlarda dönmesi istenirken, servo motorlar çok geniş hız komutlarını yerine getirmektedir [12,13].

Robot kol tasarımı en altta dönme hareketini sağlayan ve tek düzlemde hareket gerçekleştiren ana döndürme mekanizması (omuz) üzerine kuruludur. Ayrıca dirsek, tutucu ve dönme hareketleri yapabilen bir bilek bu tasarımı oluşturur. Ana döndürme mekanizması, ana döndürme motoru üzerine monte edilen diğer parçaların dairesel olarak dönmesini sağlar. Robotun omuz kısmını oluşturduğundan sağlam yapılıdır ve yüksek torklu motorlar kullanılır. Tutucu, Şekil 4’de gösterilen tip 2 servo motorla çalışmaktadır. Birinci servo motor tutucunun açılıp kapanma hareketi yaparak tutma bırakma işlemi için kullanılmaktadır. İkinci motor tutma ucunun aksenal hareketini sağlar. Bu motorla tutucu yukarı aşağı yönde hareket ederek kısaç için farklı tutma açıları oluşturur. Bu yapılar robot kolun bilek kısmını oluşturur.

Tasarım içerisinde mekanik belirlenen fonksiyonları yerine getirmek amacıyla 5 adet MG92B ve 2 adet LF-20MG servo motor kullanılmıştır. Bu motorlar omuzdan başlayarak tutucuya kadar 6 farklı eklem görevi görecek bölgeye yerleştirilmiştir.



Şekil 3. Baskılama işlemi sonucu elde edilen parçalar.



Şekil 4. Servo motor.[13]

Tasarıma ait parçaların bir araya getirilmesi için bağlantı elemanları temin edilmiştir. Bu bağlantı elemanları vidalar ve rulmanlardan oluşmaktadır. Çalışma için ticari olarak satın alınan vidalar, rulmanlar ve adetleri aşağıda verilmiştir. 1 adet 51104 taban rulmanı, 3 adet 608zz rulman, 2 adet 694zz rulman, 1 adet 623zz rulman, 8 adet M2.5 x 8mm, 6 adet M3 x 16mm, 6 adet M2.5 x 5mm, 2 adet M3 x 10mm vida kullanılmıştır.

Servo motorların yerleştirilmesi ve bağlantı elemanları kullanılarak gerçekleştirilen montaj işlemi sonrası tasarımın görüntüsü Şekil 6'de görülmektedir.



Şekil 5. Servo motorların yerleştirilmesi sonrası tasarım.

Son olarak belirlenen fonksiyonları yerine getirmek amacıyla hareketi sağlayacak olan servo motorların kontrolü aşamasına geçilmiştir. Yazılım geliştirme kitleri elektronik sistemlerin hareket ve fonksiyonlarını yerine getirmeleri amacı ile motorları yönlendiren ve elektronik sistemin tasarlandığı amacı yerine getirmesini sağlayan yapılarıdır.

Arduino yazılım geliştirme kiti istenilen fonksiyonları gerçekleştirecek şekilde programlanması aşamasına geçilmiştir. Bu aşamada Manisa Celal Bayar Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümünden gerekli teknik destek alınmıştır. Arduino İtalyan mühendisleri tarafından geliştirilen açık kaynak kodlu bir geliştirme kartıdır. Bu geliştirme kartının üzerinde temel olarak giriş çıkış pinleri ve mikrodenetleyici bulunur. Kart, açık kaynak kodlu ve geliştirilmesinin kolay olmasından dolayı uygulamalı eğitimlerde tercih edilmektedir [14]. Servo motorların bağlantı kablolarının hareketi kısıtlamamak adına yeterli uzunlukta olmasına dikkat edildi. Daha sonra Arduino ile servo motorlar arasında bağlantı sağlandı ve güç kaynağı sisteme bağlanmıştır. Güç kaynağı olarak adaptör kullanıldı. Arduino kurulumu aşamasında servo motorların çalışması için gerekli olan kütüphane dosyası otomatik olarak kurulmaktadır. Bu nedenle herhangi bir kütüphane kurulumuna ihtiyaç duyulmamıştır. Arduino yazılım geliştirme kiti olarak Arduino Uno R3 ve 16 kanallı servo motor sürücü shield kullanılmıştır. Motorların kontrolünü sağlamak amacıyla servo motorlar Arduino yazılım geliştirme kiti üzerinde 7 farklı pine bağlanmıştır. Programlama aşamasına geçilmeden önce robot kolun belirlenen fonksiyonları yerine getirebilmesi için kullanılacak açılar kinematik analizler sonucunda bulunmuştur.

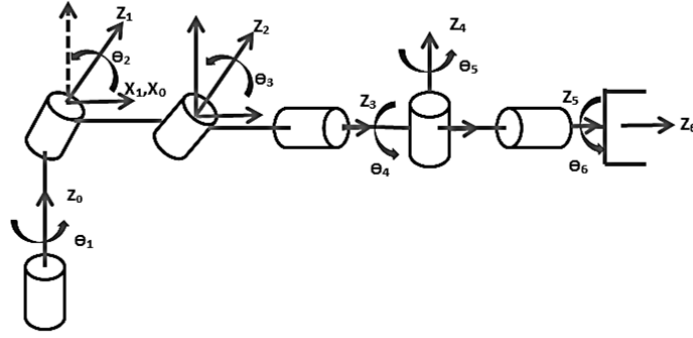
Robotlar ve kinematik mekanizmalar, genelde rijit kolların farklı türde eklemler kullanılarak birbirlerine bağlanması ile kurulur. Bu eklemler hareket ettiğinde açıların nasıl değiştiğini belirlemek için ileri(düz) ve ters kinematik dönüşümler kullanılır [15]. Robot kolu kinematiği, hareketin geometrisinin sabit referans koordinat sistemine göre zamanın fonksiyonu olarak analitik olarak incelenmesidir [16].

Bu çalışmada arka arkaya sıralanan eklem dönüşüm matrisleri ile ana çerçeve ve araç çerçevesi arasındaki ilişkiyi tanımlamak amacıyla Denavit-Hartenberg yöntemi kullanılmıştır. Tasarımın fonksiyonlarını yerine getirmek amacı ile kullanılan kinematik analiz hesaplamalarına aşağıda yer verilmiştir. Ayrıca söz konusu çalışmada robot kolun hareketi otonom olarak hareketini gerçekleştirmesi sağlanmıştır.

Denavit-Hartenberg yönteminde robot ileri kinematiğini bulmak için dört değişken kullanılmaktadır. Bu değişkenler sırasıyla;  $a_{i-1}$ ; iki eksen arasındaki bağ uzunluğu  $\alpha_{i-1}$ ;  $(i-1)$  ile  $i$  eksenleri arasındaki bağ açısı  $d_i$ ; Çakışan bağlar arasındaki eklem kaçıklığı  $\theta_i$ ; iki bağ arasındaki eklem açısı

Bu değişkenler Denavit-Hartenberg (D-H) değişkenleridir. Bu değişkenleri bulmak için önce dönme eksenleri belirlenmiştir ve bu dönme eksenleri bağlardan bir fazla olacak şekilde numaralandırılmıştır. Daha sonra eksenlerin tümüne koordinat sistemi yerleştirilip  $z$  eksenini döner eklemler için bağın dönme eksenini, prizmatik eklemler için ise kayma yönü olarak kabul edilmiştir. Ardından da sağ el kuralına göre  $y$  eksenleri belirleyip sıfır ve birinci eksenler üst üste kabul edilmiştir [17].

Tasarımı yapılan robot kol raf düzenleyici ve konveyörlerde seçici ayırıcı sistem amacıyla kullanılacak 6 eksenli bir robottur. Şekil 6'de görüldüğü üzere 1 numaralı eklem (omuz) orjin kabul edilir ve  $z$  eksenini etrafında dönme hareketini sağlamaktadır. Eklem 2 ve Eklem 3  $x$  eksenini etrafında dönme hareketini sağlayarak robot kolun aşağı ve yukarı doğru hareketini gerçekleştirir. Eklem 4 robot elin  $z$  eksenini etrafında dönüşünü eklem ve aşağı yukarı hareketini sağlamaktadır. Eklem 5 ve eklem 6 ise tutucunun  $z$  eksenini etrafında dönüşünü ve açılıp kapanma hareketini gerçekleştirmektedir. Eklem 6 uç noktanın pozisyon ve yönünü etkilememektedir.



Şekil 6. 6 eksenli robot kolun koordinat eksen takımlarının gösterimi

Tablo 2. 6 Eksenli robot D-H parametre tablosu.

	$\alpha_i$	$\Theta_i$	$d_i$	$a_i$
1	90	$\Theta_1$	0	0
2	0	$\Theta_2$	0	$a_2$
3	-90	$\Theta_3$	0	$a_3$
4	-90	$\Theta_4$	0	$a_4$
5	-90	$\Theta_5$	0	0
6	0	$\Theta_6$	0	0

$$A1 = \begin{vmatrix} \cos 1 & 0 & \sin 1 & 0 \\ \sin 1 & 0 & -\cos 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

$$A3 = \begin{vmatrix} \cos 3 & -\sin 3 & 0 & \cos 3a3 \\ \sin 3 & \cos 3 & 0 & \sin 3a3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

$$A5 = \begin{vmatrix} \cos 5 & 0 & \sin 5 & 0 \\ \sin 5 & 0 & -\cos 5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

$$A2 = \begin{vmatrix} \cos 2 & -\sin 2 & 0 & \cos 2a2 \\ \sin 2 & \cos 2 & 0 & \sin 2a2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

$$A4 = \begin{vmatrix} \cos 4 & 0 & -\sin 4 & \cos 4a4 \\ \sin 4 & 0 & \cos 4 & \sin 4a4 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

$$A6 = \begin{vmatrix} \cos 6 & -\sin 6 & 0 & 0 \\ \sin 6 & \cos 6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

$$\sin \theta_1 \cos \theta_2 + \cos \theta_1 \sin \theta_2 = \sin(\theta_1 + \theta_2) = \sin 12,$$

$$\cos \theta_1 \cos \theta_2 + \sin \theta_1 \sin \theta_2 = \cos(\theta_1 + \theta_2) = \cos 12,$$

$$R_{TH} = \begin{vmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

$$R_{TH} = A1 \times A2 \times A3 \times A4 \times A5 \times A6$$

$$\begin{vmatrix} C_1(C_{234}C_5C_6 - S_{234}S_6) - S_1S_5C_6 & C_1(-C_{234}C_5C_6 - S_{234}C_6) + S_1S_5C_6 & C_1(C_{234}S_5) + S_1C_5 & C_1(C_{234}a_4 + C_{23}a_3 + C_2a_2) \\ S_1(C_{234}C_5C_6 - S_{234}S_6) + C_1S_5C_6 & S_1(-C_{234}C_5C_6 - S_{234}C_6) - C_1S_5S_6 & S_1(C_{234}S_5) - C_1C_5 & S_1(C_{234}a_4 + C_{23}a_3 + C_2a_2) \\ S_{234}C_5C_6 + C_{234}S_6 & -S_{234}C_5C_6 + C_{234}C_6 & S_{234}S_5 & S_{234}a_4 + S_{23}a_3 + S_2a_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

Kinetik analizler ve matematiksel hesaplamalar sonunda 5 kg yük kapasiteli ve belirlenen fonksiyonları rahat bir şekilde yerine getirecek 6 eksenli robot kolun prototip olarak üretimi sağlanmıştır. Yük kapasitesinin hesaplanmasında robot tasarımını oluşturan kolların uzunlukları ve ağırlıkları hareketi



sağlayan motorların özellikleri elde edilmesi amaçlanan verilerde başarılı sonuçlar elde edilmesine katkı sağlamıştır.

Bütün eklemler sıfır açısındaiken eklem koordinatları ve uç noktaların koordinatları sırası ile aşağıda verilmiştir. Robot z ekseninde -26 ile +38 cm, y eksenı boyunca -26 ile +38 cm ve x eksenı boyunca -38 ile +38 cm aralığında çalışabilmektedir. Kinematik analizler sonrasında programlama aşamasına geçilerek fonksiyonlar için uygun olan açılar sisteme aktarıldı ve 6 eksenli robot kolun üretimi tamamlanmıştır.

### 3. SONUÇ

Tüm prosesler sonucunda 6 eksenli robot kol elektromekanik bir sistem olarak başarılı bir şekilde tamamlanmıştır. Özellikle endüstri 4.0 çerçevesinde robot kolların üretim sahasında ve proseslerin her evresinde görülme sıklığı çok artmıştır. Yaptığımız bu 6 eksenli robot kol yardımı ile üretim bantlarında seçme ayırma işlemlerinin yanında yeniden yapılan yazılımsal değişiklikler sayesinde endüstriyel raf sistemlerinde raf düzenleyici olarak da kullanılabilir. Böylelikle gerek kalite-kontrol gerek seçme-ayırma işlemleri gerekse raf düzenleme sistemleri için kullanılan personel ihtiyaçları yerine bu robot kollar tercih edilebilir. Şekil 7’de robot kolun nihai ürün olarak şekli görülmektedir. Gerçekleştirilen robot kolun hedeflenen yükü kolaylıkla taşıması ile birlikte kullanılması amaçlanan alanlarda gayet olumlu sonuç elde edildiği görülmüştür. Uç işlevcisinin tasarlanırken özellikle geniş açılma kapasitesine ve ucun dişlilere sahip olmasına dikkat edilmiştir. Çalışma sonunda bu konuda elde edilen başarılı sonuçlar sayesinde tutucunun büyük çaplı nesnelere tutmasına ve nesnelere rahatça kavramasına tasarımda dikkat edilen bu özelliklerin yüksek oranda kolaylık sağladığı gözlemlenmiştir.



Şekil 7. Robotik kolun görüntüsü.

### KAYNAKLAR

1. Abdullah, Y., Ali, Ş., " Robot Kolu Denetimi", Lisans Bitirme Projesi, Trabzon, 2013.
2. Wang R. vd., The Multiple-Function Intelligent Robotic Arms, Korea, 2009.
3. Kumar, S., Shuklay, A., Duttaz, A., & Beherax, L. Technique for Visual Motor Coordination of a 6 dof Robot Manipulators. Intelligent Control Part of IEEE Multi Conference on System sand Control, pp. 544-549, 2007.
4. Kruth J.P., Leu M.C., Nakagawa T., "Progress in additive manufacturing and rapid prototyping", CIRP Annals – Manufacturing Technology, Vol. 47 No.2, pp. 525-540, 1998.

5. Özsolak, O., “Additive Manufacturing Of Metals And Methods”, International Journal of Innovative Engineering Applications No. 3, pp. 9-14, 1, 2019.
6. Özsoy, K., Duman, B., “Usability Of Additive Manufacturing (Three Dimensional Printing) Technologies In Education” International Journal Of 3d Printing Technologies And Digital Industry Vol. 1 No. 1, pp. 36-48, 2017.
7. Çelik, K., Özkan, A., “Production and Repair Applications with Additive Manufacturing”, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, Issue 5, pp. 107-121, 2017.
8. Aydın, L., Küçük, S., Kenar, H., “Doku ve organ biyo yazdırma amaçlı 3b biyo yazıcı tasarımı ve geliştirilmesi” Vogue, Volume 15 Issue 18, pp. 153-157, 2015.
9. Oksman K., Skrifvars M., Selin J.-F., “Natural fibres as reinforcement in polylactic acid (PLA) composites”, Composites Science and Technology Issue 63, pp. 1317–1324, 2003.
10. Tabi T., Sajo I.E., Szabo F., Luyt A.S. , J.G. “Kovacs, Crystalline structure of annealed polylactic acid and its relation to processing”, Express Polymer Letters, Issue. 4 pp. 659–668, 2010.
11. Aygün, M., Yıldırım, F., Çantı, E., “Farklı Yazdırma Parametrelerinde Pla Filamentin İşlem Performansının İncelenmesi”, International Journal Of 3d Printing Technologies And Digital Industry, 3:2, 102-115, 2019.
12. Engin, S., 2018, Grup Servo Motorların Deadbeat Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 7-36s.
13. Hughes, A., “Elektrik Motorları ve Sürücüleri”, Bileşim Yayınlar, Temmuz 2005.
14. Ahmet Ali S., Osman C., “Arduino Kontrollü Çizim Robotu”, The Journal of Graduate School of Natural and Applied Sciences of Mehmet Akif Ersoy University Special Issue, 1, pp 79-87, 2017.
15. Bingül Z. , Küçük S., “Robot Tekniği” Birsen Yayınevi, İstanbul, 1-17, 2010
16. Uzuner S., “5 Eksenli Manipülatörün Hareket Planlanması ve Kontrol Programının Oluşturulması”, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kasım, 2012.
17. Denavit J. and Hartenberg R.S., “A kinematic notation for Lower-pair mechanisms based on matrices”, ASME Japnl. Mechan. pp. 215-221, June 1955.