



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



EĞİTİM AMAÇLI BİLGİSAYARLA BÜTÜNLEŞİK İMALAT SİSTEMİ TASARIM VE İMALATI

FURKAN GÜMÜŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği

Anabilim Dalı

DANIŞMAN

Prof. Dr. Mustafa KURT

İSTANBUL, 2017



MARMARA UNIVERSITY
INSTITUTE FOR GRADUATE STUDIES
IN PURE AND APPLIED SCIENCES



CIM System Design and Manufacturing for Educational Purpose

FURKAN GÜMÜŞ

MASTER THESIS

Department of Mechanical Engineering

Thesis Supervisor

Prof. Dr. Mustafa KURT

ISTANBUL, 2017

MARMARA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Öğrencisi Furkan GÜMÜŞ'ün "Eğitim Amaçlı Bilgisayarla Bütünleşik İmalat Sistemi Tasarımı ve İmalatı" başlıklı tez çalışması, 14.06.2017 tarihinde savunulmuş ve jüri üyeleri tarafından başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri

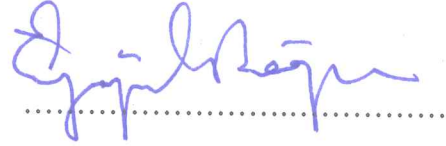
Prof.Dr. Mustafa KURT
Marmara Üniversitesi

(Danışman)



Doç.Dr. Eyup BAĞCI
Yıldız Teknik Üniversitesi

(Üye)



Yrd.Doç.Dr. Bilçen MUTLU
Marmara Üniversitesi

(Üye)



ONAY

Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 06.07.2017 tarih ve 2017/14-02 sayılı kararı ile Furkan GÜMÜŞ'ün Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Makine Mühendisliği Programında Yüksek Lisans derecesi alması onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Prof. Dr. Uğur YAHŞİ



TEŞEKKÜR / ACKNOWLEDGMENT

Bu tez kapsamında analiz ve modelleme için kullandığım Solidworks programını tedarik eden TEKYZ A.Ş eğitim kurumu temsilcisi Y. BALSEVER'e, yazılımda destek olan A. BENCIVENNI'ye ve tez sürecinde yardımlarını esirgemeyen Prof.Dr. Mustafa KURT ve Doç. Dr. Recep YENİTEPE hocama teşekkür ederim.

Bu tez çalışması boyunca beni destekleyen ve motive eden sevgili aileme ve Nurseli ERASLAN'a teşekkür ederim.

Arkadaşlarım Makine ve İnşaat Mühendisi Erkam Vahdettin BALLI ve Nükleer Fizik Öğrencisi Oğuzhan MALLI'ya fikir alışverişlerindeki katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Mart, 2017

Furkan GÜMÜŞ

İÇİNDEKİLER

ÖZET	IV
ABSTRACT	V
SEMBOLLER/SYMBOLS	VI
KISALTMALAR/ABBREVIATIONS	VII
ŞEKİL/LIST OF FIGURES	VIII
TABLO LİSTESİ/LIST OF TABLE	XI
1. GİRİŞ.....	1
2. BİLGİSAYARLI SAYISAL YÖNETİM.....	2
2.1. CNC Yönlendiriciler	2
2.2. CNC Yönlendirici Tasarım Modelleri	2
2.2.1. Sabit köprülü tasarım	3
2.2.2. Gezer köprülü tasarım	4
2.3. CNC Yönlendirici Unsurları	5
2.3.1. Sigma profilin belirlenmesi	6
2.3.2. Yüzey kaplama profilinin belirlenmesi	7
2.3.3. Güç ve hareket aktarma mekanizmaları.....	7
2.3.3.1. Aktarma vidaları (leadscrew)	8
2.3.3.2. Aktarma vidası çeşitleri	9
2.3.3.3. Aktarma vidası tercihi	11
2.3.3.4. Bilyalı vidalar tercihi.....	13
2.3.3.5. Mekanizma seçimi.....	15
2.3.4. Yatak seçimi	15
2.3.5. Doğrusal hareket mekanizmaları	16
2.3.5.1. Kramayer dişli ve pinyon	16
2.3.5.2. Ray ve arabalar	16
2.3.5.3. Alt destekli mil	17
2.3.5.4. Mil ve lineer rulman	18
2.3.6. Tahrik sistemlerinin belirlenmesi	18
2.3.7. Kaplin seçimi	19
2.3.8. Spindle seçimi	19
2.3.9. Kesici takım seçimi	20
3. CNC YÖNLENDİRİCİ İMALATI.....	21
3.1. Kesme Kuvvetinin Belirlenmesi	21
3.2. CNC Yönlendiriciye Etkiyen Kuvvetler	24
3.3. X Ekseninin Tasarımı.....	25
3.4. Y ve Z Eksenin Tasarımı	29
4. ÜÇ BOYUTLU BASKILAMA.....	32
4.1. Yazıcı Teknolojileri	32
4.2. Sarf Malzemeler	32
4.2.1. ABS	33
4.2.2. PLA	33
4.3. Mekanik Unsurlar.....	34

5. ÜÇ EKSENLİ ROBOT KOL	36
5.1. Robot Kinematığı	36
5.1.1. İleri kinematik hesaplaması	37
5.1.2. Ters kinematik hesaplaması	38
5.1.2.1. Birinci yöntem	38
5.1.2.2. İkinci yöntem	41
5.2. Manipülatör Tasarımı	43
5.2.1. Statik kuvvet hesabı	44
5.2.2. Hız ve hareket planlaması	45
5.2.3. Dinamik kuvvet hesabı	46
6. YAZILIM	48
6.1. Bilgisayar Grafiği	48
6.1.1. Dönüşüm kavramı	49
6.1.2. Dönüşüm matrisi	51
6.1.2.1. Öteleme matrisi	51
6.1.2.2. Ölçekleme matrisi	52
6.1.2.3. Dönme matrisi	52
6.2. Kontrolcü Yazılımının Oluşturulması	54
6.3. CNC Kontrolü	59
6.4. 3B Yazıcı Kontrolü	60
7. ELEKTRONİK.....	62
8. SONUÇLAR.....	63
KAYNAKLAR.....	64
EKLER.....	66
ÖZGEÇMİŞ	

ÖZET

Bu çalışmanın temel amacı eğitimde kullanılabilir robot manipölatör, CNC yönlendirici ve 3B yazıcı ünitelerinin yer aldığı bir bütünleşik imalat sistemi tasarımını göstermektir. Üç eksenli bir robot kol manipölatörü için kontrolcü yazılımı oluşturulmuştur. Esnek sistem tasarımı ve özelleştirilebilir arayüz yazılımı sayesinde teknik okullar, üniversiteler, küçük ve orta ölçekli işletmelerde kullanılabilecek maliyeti düşük, fonksiyon açısından endüstriyel standartlara yakın bir teknoloji sunmuş olacak. Eğitim kurumlarının deneysel çalışmalarda kullanabilmesi için sonradan değişikliğe uyarlanabilir bir tasarım yapılacaktır. Mevcut malzeme ve takımların kolay tedarik edilebilmesi hızlı ve ekonomik çözüm sağlayacaktır.



ABSTRACT

The main objective of this work is to demonstrate an integrated manufacturing system design that includes robot manipulators, CNC routers and 3D printer units that can be used in training. Control software for a three-axis robot arm manipulator was created. Due to flexible system design and customizable interface software allows to low-cost at technical schools, universities, small and medium-sized enterprises. In terms of functions, it will be offered additional technology to industrial standards. Due to deterioration and the lifetime of the current system hasn't been used sustainably by. In this case, causing of the fail a technical training. In addition, the systems used in industry has got a lot of functions. This cause to isn't benefited sufficiently by small and medium-sized enterprises that want to mass production, but not requiring advanced equipment. Changeable a design will be made to use in experimental studies of educational institutions. Supplied in the easy way existing materials and equipment will provide a quick and economical solution.

SEMBOLLER/SYMBOLS

a_e	: Kesme genişliği (mm)
a_p	: Kesme derinliği (mm)
D	: Freze çakısı kesme çapı (mm)
h_m	: Talaş kalınlığı (mm)
n	: Devir sayısı (rpm veya devir/dk)
P_s	: Kesme gücü (kW)
S	: İlerleme hızı (mm/dk)
S_z	: Diş başına ilerleme (mm/diş)
t	: Zaman (s)
T	: Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)
V	: Kesme Hızı (m/dk)
w	: Açısal Hız (Rad/s)
α	: Açısal İvme (Rad/s^2)
ϕ_s	: Diş sayısı
τ	: Tork (N.m)
γ	: Yaklaşma açısı

KISALTMALAR/ABBREVIATIONS

3B	: Üç Boyutlu
ABS	: Acrylonitrile Butadiene Styrene
AC	: Alternative Current
CNC	: Computer Numerical Control
CIM	: Computer Integrated Manufacturing
DC	: Direct Current
FDM	: Fusion Deposition Modelling
HSS	: High Speed Steel
PCB	: Printed Circuit Board
PLA	: Polylactic Acid
SCADA	: Supervisory Control And Data Acquisition
RPM	: Revolutions Per Minute

ŞEKİL/LIST OF FIGURES

Şekil 2.1. CNC Router Tasarım Modelleri	2
Şekil 2.2. Hareketli Tabla, Sabit Köprü	3
Şekil 2.3. Hareketli Köprü, Sabit Tabla	5
Şekil 2.4. 8 Kanallı 30x30 Sigma Profil	6
Şekil 2.5. 22.5x180'lik Yüzey Kaplama Profili	7
Şekil 2.6. Dış Profilleri	8
Şekil 2.7. Vida Mekanizmaları	8
Şekil 2.8. Vida Bağlantıları	9
Şekil 2.9. Kare Vida	10
Şekil 2.10. Trapez Dişli Vida	10
Şekil 2.11. 29° Trapez Vida	11
Şekil 2.12. Yuvarlak Dişli Vida	11
Şekil 2.13. Otoblokaj	12
Şekil 2.14. Bilyalı Vida Kesiti	13
Şekil 2.15. Bilyalı Vida Nokta Yük Teması	14
Şekil 2.16. Bilyalı Vida Nokta Yük Teması	15
Şekil 2.17. UP Serisi Rulmanlı Yataklar	16
Şekil 2.18. Kramayer ve Pinyon	16
Şekil 2.19. Lineer Kızak ve Araba	17
Şekil 2.20. Alt Destekli Miller	17
Şekil 2.21. Mil ve Lineer Rulman	18

Şekil 2.22. NEMA Step Motorlar	18
Şekil 2.23. Flexi Kaplin	19
Şekil 2.24. Mabuchi RS-775 DC Motor ve İşleme Takımı	19
Şekil 2.25. Parmak Freze Takımı	20
Şekil 3.1. Parmak Freze ile Talaş Kaldırma	21
Şekil 3.2. Parmak Freze Değerleri	22
Şekil 3.3. Kesme Kuvvetleri	24
Şekil 3.4. CNC Yönlendirici Üzerindeki Kuvvetler.....	24
Şekil 3.5. X Ekseni Gösterimi	26
Şekil 3.6. X Ekseni Statik Analiz	27
Şekil 3.7. X Ekseni Von Mises Stresi	28
Şekil 3.8. X Ekseni Yer Değiştirme	28
Şekil 3.9. X Ekseni Eş Değer Gerilme	28
Şekil 3.10. X Ekseni Güvenlik Faktörü.....	29
Şekil 3.11. Önden Görünüş	29
Şekil 3.12. YZ Ekseni Von Mises Stresi	30
Şekil 3.13. YZ Ekseni Yer Değiştirme	30
Şekil 3.14. YZ Ekseni Eş Değer Gerilme	31
Şekil 3.15. YZ Ekseni Güvenlik Faktörü	31
Şekil 4.1. Sarf Malzemeler	33
Şekil 4.2. MK8 Hareket Mekanizması	34
Şekil 4.3. Sıcak Uç	34
Şekil 4.4. MK8 Yönlendirici	35

Şekil 4.5. 3B Yazıcı	35
Şekil 5.1. Eksen Yerleştirme	36
Şekil 5.2. Konum Vektörü	38
Şekil 5.3. Ters Kinematik	38
Şekil 5.4. Üstten Görünüş	39
Şekil 5.5. X-Z Görünüş	39
Şekil 5.6. Üç Eksenli Manipülatör Modeli	43
Şekil 5.7. Üç Eksenli Manipülatör için Serbest Cisim Diyagramı	44
Şekil 5.8. Üç Eksenli Manipülatörün Dinamik Analizi	47
Şekil 6.1. Vektör Tabanı	48
Şekil 6.2. Vektör Uzayı	50
Şekil 6.3. Kürede Dönüşüm Matrisi Uygulaması	53
Şekil 6.4. Üç Eksenli Robot Kontrolü	54
Şekil 6.5. Arduino Kontrolcü Yazılımı	55
Şekil 6.6. KUKA KR6 Model Manipülatörün Kontrolü	56
Şekil 6.7. Move Master Kodlaması	57
Şekil 6.8. Üç Eksenli Manipülatör için Hesap Makinesi	59
Şekil 6.9. Grbl Kontrolcü Programı	60
Şekil 6.10. Repetier Kontrolcü Programı	61
Şekil 6.11. Üç Eksenli Robot Manipülatör	61
Şekil 7.1. Solda CNC Shield ve Uno, Sağda Ramps 1.4v Shield ve Mega	62
Şekil 7.2. 12V Güç Kaynağı	62

TABLO LİSTESİ/LIST OF TABLE

Tablo 2.1. 8 Kanallı 30x30 Sigma Profil Özellikleri	6
Tablo 2.2. 22.5x180'lık Yüzey Kaplama Profili Özellikleri	7
Tablo 2.3. Mabuchi RS-775 DC Motor Karakteristikleri	20
Tablo 3.1. Kolaylaştırılmış Yöntemle K_s Değeri	23
Tablo 5.1. Denevit – Hartenberg Gösterimi	37
Tablo 5.2. Manipülatör Karakteristikleri	44

1. GİRİŞ

Adını ilk defa 2011 yılında Almanya Hannover Fuarı'nda duyduğumuz Endüstri 4.0 terimi ile 4. Sanayi Devriminin temelleri atılmış, ülkeler ve şirketler küresel boyuttaki bu değişime ayak uydurmak için stratejilerini bu yönde planlamaya başlamıştır.

Ülkemizde otomotiv sektöründe yeni yeni uygulanmaya başlayan bu konsept ile 4. sanayi devrimine geçiş büyük bir hızla devam etmektedir. Endüstri ile bilişim teknolojileri bir araya getirilerek oluşturulan bu sistem daha güvenilir, hızlı ve verimli olmasının yanında internet bağlantılı elektronik cihazların yer alması ile “akıllı fabrika” olma niteliğini elde etmektedir. [1]

Firmalar, bu artan rekabete ayak uydurmak için bilgisayarla bütünleşmiş imalat sistemleri kurmakta ve robotik sistemlere geçme ihtiyacı hissetmektedirler. Ancak teknolojinin çok pahalı olduğu, ilk yatırım maliyetleri ve bakımları fazla olması nedeniyle çoğu işletmeler ve özellikle eğitim kurumları bu tür sistemleri alamamakta ve yeterli personel eğitimini sağlayamamaktadırlar.

Bu çalışmada 4. sanayi devrimine uyum sağlayabilme ve nitelikli bireylerin yetiştirilmesini sağlamak amacıyla teknik okullar ve üniversitelerde kullanılabilecek eğitim amaçlı, ilk kurulum maliyeti düşük, ekonomik ve hızlı çözümler sağlayan bilgisayarla bütünleşik imalat sistemi tasarım ve uygulaması ele alınmıştır.

Literatür taramalarında imalat makinelerinin tasarım ve uygulaması yer almaktadır. Bilgisayar ile bütünleşik imalat sistemleri için süreç analizleri yapılmış ve robotik sistemlerin uygulaması anlatılmıştır. Bu çalışma ile tüm bu unsurlar tek bir çatı altına alınarak incelemesi yapılmıştır.

Eğitim kurumları, bu tür bir sistemi kullanarak maliyeti düşük ve hızlı çözüm sunan bir bütünleşik kontrol sistemi ve yazılım programı ile eğitim verebilirler. Yazılım olarak esnek bir yapıya sahip sistem sayesinde çoklu üniteler tek bir ekrandan görülebilir ve kontrol edilebilir. Robot kol, CNC ve 3B yazıcıların çalışma mantığını, üzerinde yapacakları test ve geliştirme işlemlerini yapabilir olması önemli bir avantajdır. Öğrencinin cihazları bozma korkusu olmadan üzerinde deney yapabilecekleri ve sonradan değişiklik yapmaya uygun bir konsept oluşturulması amaçlanmıştır.

2. BİLGİSAYARLI SAYISAL YÖNETİM

Eğitim amaçlı kullanılacak cihazların işlevsel olması beklenmektedir. CNC freze konseptine çok benzeyen, istikrarlı ve yüksek kaliteli iş yapma kabiliyetindeki CNC router (Bilgisayarlı Sayısal Yönetim Yönlendiricileri) bu tez kapsamında ele alınacaktır.

2.1. CNC Yönlendiriciler

CNC yönlendirici ahşap, kompozit, alüminyum, çelik, plastik veya sert köpük gibi çeşitli malzemeleri kesmek için kullanılan bir bilgisayar kontrollü kesme makinesidir.

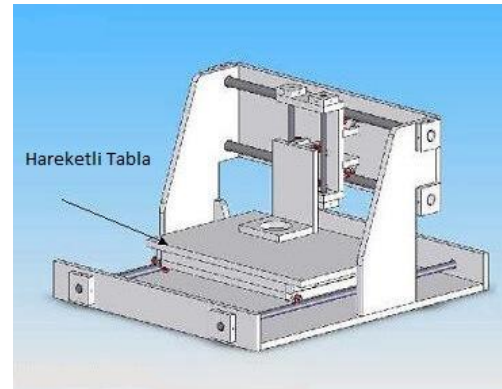
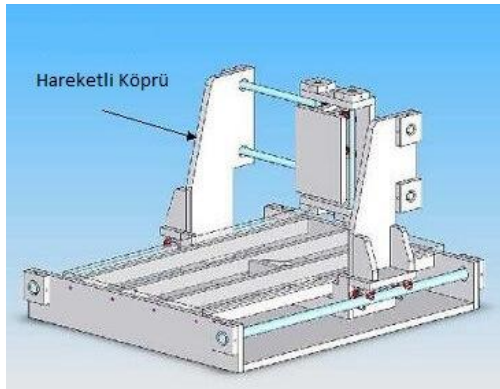
CNC yönlendiriciler, hata sıklıklarını ve bitmiş ürünün piyasaya sürülmesi gereken zamanı azaltır. Daha çok ahşap oymaları, iç ve dış dekorasyon, ahşap paneller, ahşap çerçeveler, kalıplar, mobilya ve benzeri gibi birçok farklı ürünün üretiminde kullanılmaktadırlar. [2]

CNC yönlendiricilerin küçük ev tipinden (masaüstü CNC) büyük endüstriyel alanda kullanılan geniş bir yelpazesi bulunmaktadır.

2.2. CNC Yönlendirici Tasarım Modelleri

CNC makinelerin birçok çeşidi olduğu gibi aynı sınıftaki bir makine için değişik tasarım modelleri bulunmaktadır. CNC yönlendiriciler için temelde iki farklı tasarım ön plana çıkmaktadır:

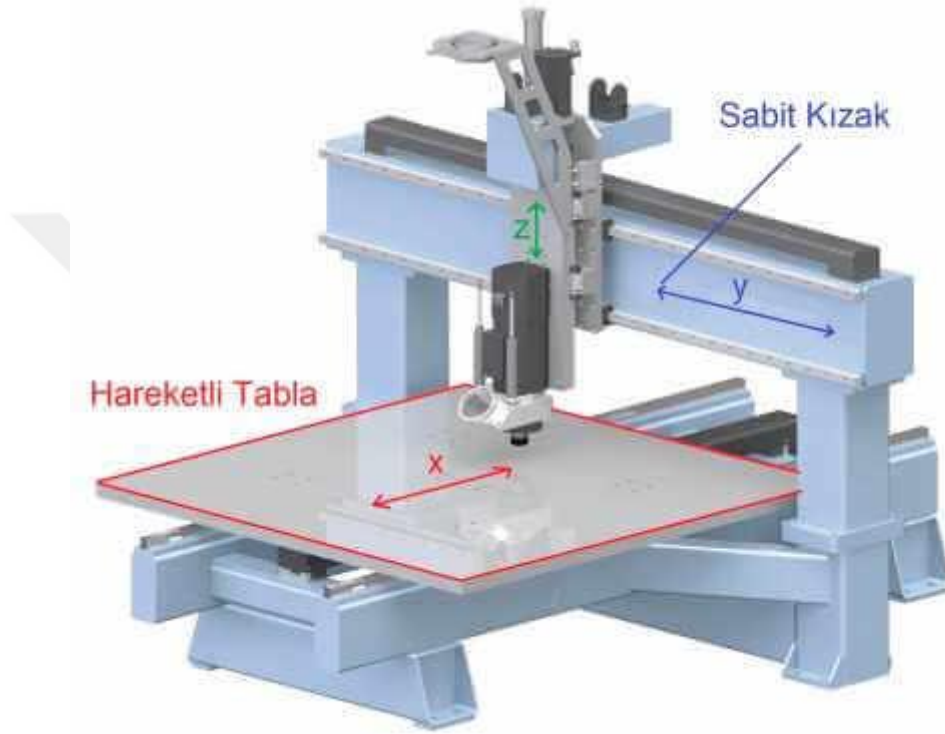
- Sabit köprü, hareketli tabla modeli
- Gezer köprü, sabit tabla modeli



Şekil 2.1. CNC Router Tasarım Modelleri [3]

2.2.1 Sabit köprülü tasarım

CNC router üreticilerinin çok fazla tercih etmediği bir tasarım olmasına karşın sabit köprülü tasarımın da bazı üstün yanları bulunmaktadır. Bu tasarım genel olarak PCB veya gravür makineleri gibi küçük CNC makinelerin yapımında kullanılır. Bu boyutlarda bir makine için yatak tasarımı çok verimli çalışmaktadır.



Şekil 2.2. Hareketli Tabla, Sabit Köprü [4]

Bu tasarımın en önemli avantajı yük altında esnemeyecek, sağlam bir yataklamanın çok daha kolay yapılabilir olmasıdır. Sabitlenmiş tasarım sayesinde köprü ağırlığının ve boyutunun bir önemi kalmayacaktır. Böylece köprü üzerindeki yataklamalar çok daha rahat seçilebilir; belirli boyutlara indirgeme mecburiyeti kalmaz. Gezer köprülü yapılarda ise ağırlık, lineer rulman veya kızaklar üzerinde taşınacağı için köprü ağırlığı ve boyutu çok önemli olmaktadır. Köprünün sabitlenmiş olması ise hem rijitlik hem de daha hassas parça işleme olanağı sağlamaktadır. Ayrıca daha büyük motor seçimleri ve çoklu eksenlerin yapımına izin vermektedir.

Bu tasarımın dezavantajı, x-ekseninin uzunluğu arttıkça hareketli tablanın etkisinin daha az hale gelmesidir. Tabla ağırlığı ve taşıdığı yükün artması ile daha büyük yatak seçimi ve pahalı elemanlara ihtiyaç oluşacaktır.

Sabit köprülü hobi CNC makinelerin x yönündeki hareketi genellikle 30 ile 90 cm arasında olmaktadır. Y ve z-eksenlerinin hareket mesafesi x-eksenine göre daha azdır. Sabit köprülü konstrüksiyon daha rijit yapılı ve hafif olması sebebiyle yataklardaki radyal ve eksenel yükler daha az olacaktır. Bu sayede daha küçük boyutlu yataklama elemanları (lineer rulmanlı yataklar veya mil yatakları) ile taşıyıcı unsurlar (kızak, mil veya ray destekleri) tercih edilebilir.

Gezer köprü tasarımlarında bilyalı vidalar kullanılırken, sabit köprülü yapı için daha ucuz olan aktarma vidalarını kullanılabilir. Ayrıca 3B yazıcılar için çok sık karşılaşılan diğer bir alternatif olan triger kayış-kasnak sistemleri de mevcuttur. Konstrüktif açıdan çok yakın olmalarına karşın freze veya matkabın talaş kaldırma sırasında alt tablaya uygulayacağı itme kuvveti, taşıma sistemlerine fazladan yük bindirmiş olacağından çoğu zaman kayış-kasnak sistemleri tercih edilememektedir. Sonuç olarak,

- Küçük boyutlu bir makine için sabit köprülü tasarım idealdir.
- Daha kompakt ve yapımı diğerlerine göre çok daha basittir.
- İskelet yapısı rijittir.
- Genel olarak boyuta kısıtlama getirilmelidir.
- Maliyeti gezer köprülü tasarıma göre daha düşük olmaktadır.

2.2.2 Gezer köprülü tasarım

Gezer köprü tasarımı, CNC yönlendirici modellerinin %95'ini oluşturmaktadır. Tüm x-ekseni boyunca hareket edebilen köprü tasarımı sayesinde, makine boyutunun çok daha büyük yapılabilmesine olanak sağlamaktadır. Ancak boyutun artması ve ağırlığın fazla olması sebebiyle rijit köprü yapımı da zorlaşacaktır.

Gezer köprülü tasarımlarda eksenel kuvvetlerin çok daha fazla olması sebebiyle aşınma miktarı en az olan ve yer yönlü kuvveti taşıyan bilyalı vidalar tercih edilir. Sürtünme kayıplarının az olması sebebiyle daha düşük güç gereksinimi olan motorlar tercih edilebilmesi bir avantaj sağlar. Bilyalı vida somunları ve yatakları özel olduğu için diğer vidalı sistemlere göre 10 kat daha pahalı olabilmektedirler. Özellikle mil çapının artması,

fiyatının da aşırı yükselmesine neden olduğundan daha ucuz motor seçme avantajımızın bir anlamı kalmamaktadır.



Şekil 2.3. Hareketli Köprü, Sabit Tabla [5]

Sonuç olarak;

- Büyük boyutlu bir makine yapılmak istenildiğinde tercih edilebilir,
- İskeletin rijit şekilde yapılabilmesi nispeten daha zordur,
- Boyutta bir sınırlama yoktur. İmkanların el verdiği ölçüde büyük yapılabilir,
- Maliyeti sabit köprülü tasarıma göre yüksek olmaktadır.

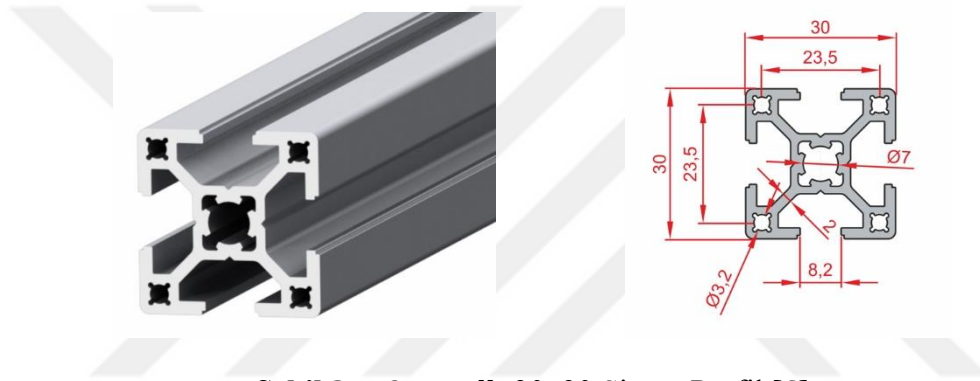
2.3. CNC Yönlendirici Unsurları

Eğitim amaçlı kullanılacak makinenin daha işlevsel olması için hibrid bir tasarım mimarisi uygulanmıştır. 3B Yazıcı veya CNC yönlendiriciyi kullanmak için makine üzerinde ufak değişiklikler yapılarak dönüşümlü kullanılması hedeflenmiştir. Bu sebeple tasarım modeli olarak sabit köprülü tasarım seçilmiştir. Bu tez kapsamında hibrid router çalışması anlatılacaktır. Gerekli tüm seçim kriterleri aşağıdaki gibi olmaktadır.

2.3.1. Sigma profilin belirlenmesi

Hızlı montaj özelliği, kolay tedarik edilebilmesi ve mukavemetli yapısı sebebiyle şase konstrüksiyonu yapımında alüminyum sigma profillerin kullanımı idealdir. Sigma profiller için Türkiye’de çeşitli üretici firmalar bulunmakta ancak yapı ve kalite açısından belirli farkları bulunmaktadır.

Boyut açısından 6, 8 ve 10 kanallı sigma türleri ve yüzey kaplama profilleri bulunmaktadır. 6 Kanal profiller için 20x20 ve 25x25; 8 kanal için 30x30, 35x35, 40x40 ve 60x60; 10 kanal için 35x35, 40x40, 60x60, 80x80 ve daha büyük ebatlarda profiller vardır.



Şekil 2.4. 8 Kanallı 30x30 Sigma Profil [6]

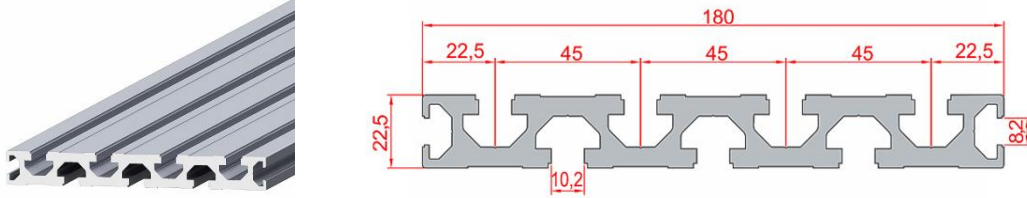
Sigma profil seçimi için başlıca kriterimiz mukavemet, fiyat ve üzerine bağlanacak yatakların montaj edilebilirliği göz önüne alınarak yapılmıştır. Yatak, mil tutucular ve bağlama elemanlarının boyutlarına göre 30’luk profilin kanal ölçüleri uyumludur. Daha büyük boyutlu profiller maliyeti çok yükseltmektedir. Yüzey kaplama profili boyutları ile uyumlu olması amacıyla 20’lik profil kullanılmamıştır. Aşağıdaki özellikler göz önünde bulundurularak ilerleyen bölümde 30’luk profil ile uygun boyutlarda şase yapılacaktır.

Tablo 2.1. 8 Kanallı 30x30 Sigma Profil Özellikleri [6]

Ebat	Malzeme	I_x	I_y	W_x	W_y	Alan	Kütle
30x30	6063	2.95 cm^4	2.95 cm^4	1.97 cm^3	1.97 cm^3	3.16 cm^2	0.85 Kg/m

2.3.2. Yüzey kaplama profilinin belirlenmesi

CNC yönlendiricide işlenecek parçayı sabit ve düzenli bir şekilde iş tezgahına bağlamak önemlidir. Endüstride standartlaşmış halde bağlama takımları bulunmaktadır. T cıvatasının ve bağlama pabuçları için yüzey kaplama profillerine ihtiyaç duyulmuştur.



Şekil 2.5. 22.5x180'lik Yüzey Kaplama Profili [7]

Ölçülerine göre 15x120, 22.5x180, 22x140, 27x170 olup çeşitli profil şekilleri mevcuttur. Buradaki seçme kriterimizi iş parçasını bağlama kolaylığı sağlayan ve frezelerde çokça tercih edilmesi belirlemiştir. Bu sebeple 22.5x180'lik profil tercih edildi.

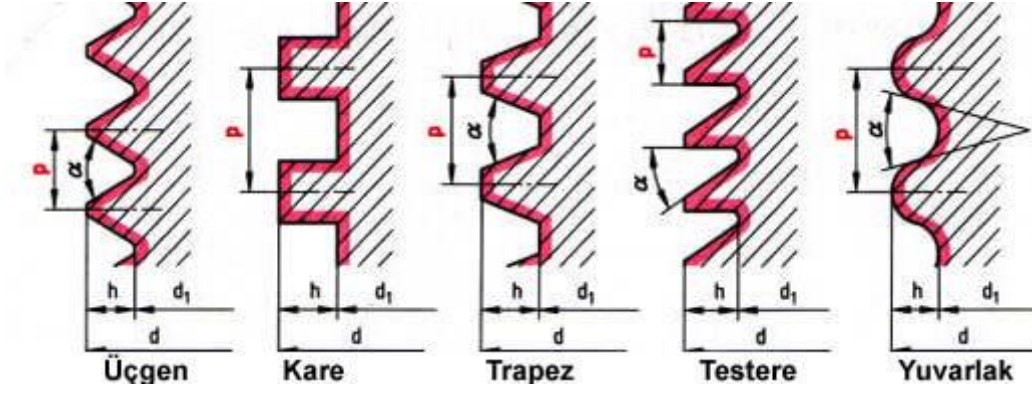
Tablo 2.2. 22.5x180'lik Yüzey Kaplama Profili Özellikleri [7]

Ebat	Malzeme	I_x	I_y	W_x	W_y	Alan	Kütle
22.5x180	6063	590.9 cm ⁴	11.7 cm ⁴	63.43 cm ³	10.4 cm ³	21.1 cm ²	5.7 Kg/m

2.3.3 Güç ve hareket iletim mekanizmaları

Mekanik bir sistemde güç veya hareketi lineer olarak aktarmak istediğinizde en çok karşılaşılan mekanik unsur, vida mekanizmalarıdır. Özellikle CNC ve 3B yazıcı yapımında sıklıkla kullanılan ancak maliyet ve avantajları açısından bakıldığında aralarında ciddi farklar bulunan bu ürünlerin kıyaslaması yapılarak optimum seçenek belirlenmiştir.

Vida mekanizmaları, tespit cıvatalarına (metrik vidalara) göre daha çok aşınma tehlikesine maruz kalacakları için sivri uçlu üçgen diş profili yerine daha az sürtünme gösterecek trapez vida tercih edilir. Kirlilik tehlikesinin çok olduğu yerlerde ise yuvarlak vida seçilmektedir [8].



Şekil 2.6. Diş Profilleri [9]

Hareket cıvataları veya vida mekanizmaları, genelde dönme hareketinin vida eksenî yönünde öteleme hareketine çevrilmesinde kullanılır. Çoğu zaman öteleme hareketinden de (pres, vana, mengene, krika gibi düzeneklerde) bir kuvvet elde etmek için yararlanılır [8]. Bu mekanizmalar kendi içinde diş geometrisine göre adlandırılmaktadır.



Bilyalı Vida



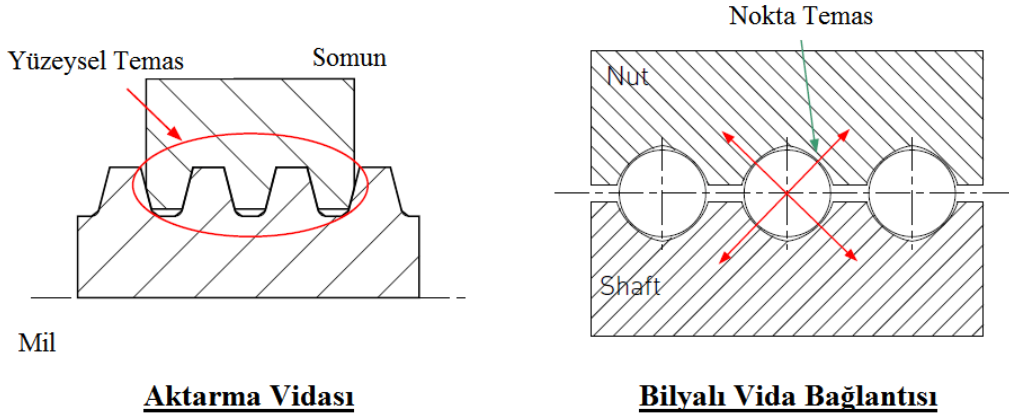
Aktarma Vidası - Trapez

Şekil 2.7. Vida Mekanizmaları [9]

2.3.3.1. Aktarma vidaları (leadscrew)

Aktarma vidaları, güç vidası [10] veya hareket vidası [11] olarak da bilinmektedir. Bu vidalar, bir makinede yer alan mevcut dönme hareketini doğrusal (linear) harekete dönüştürülmesini sağlar.

Diğer bağlantı türleri ile kıyaslandığında, somun ve vida arasındaki dişlerde temas alanı geniş olduğundan sürtünme çok fazla olmaktadır. Bu da daha fazla enerji kaybına yani daha güçlü motor seçmemize neden olur. Bu yüzden genel olarak çok büyük güçlerin taşınması için kullanılmazlar.



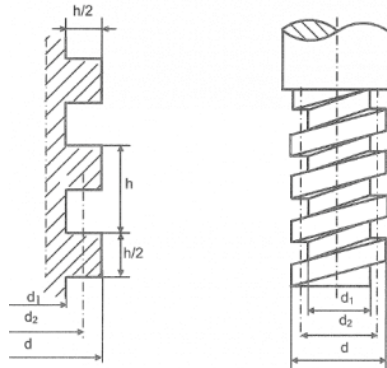
Şekil 2.8. Vida Bağlantıları [9]

Daha çok düşük güç uygulamalarında, aralıklı kullanımlar ile çalıştırma veya mekanizmalarda pozisyonier olarak kullanılmasında tercih edilir. Yaygın uygulama alanları; lineer aktüatörler, araçların kaydırılması (örneğin takım tezgahlarındaki arabanın hareketi gibi), mengene, presler ve krikolar örnek olarak verilebilir. [12]

2.3.3.2. Aktarma vidası çeşitleri

Güç vidaları, kendi diş geometrisine göre sınıflandırılır. Diş açılarının farklı olması değişken sürtünme kuvvetlerinin olmasına sebep olur. Aktarma vidaları, sürtünmesi en az olacak şekilde tasarlanır [13]. Diş açlarına göre en çok kullanılan 3 çeşit aktarma vidası ise şöyledir:

A. Kare Dişli Vida



Şekil 2.9. Kare Vida [9]

Kare dişler, sahip olduğu kare geometrisi ile adını taşır. En yüksek verime ve en düşük sürtünmeye sahip olduğundan sık sık yüksek güç taşıyan uygulamalarda kullanılan vida türüdür. Kuvvet ve hareket iletiminde kullanılır. Diğer türleri gibi belli bir standardı olmadığı için özel üretilir ve bu nedenle çok daha pahalı olmaktadır.

B. Trapezoidal Dişli Vida



Şekil 2.10. *Trapez Dişli Vida:* Vida diş tepeleri ve dipleri geniş olan (sivri olmayan) trapez profil, simetrik kesitli vidalardır. [9]

Tepe açısı 30° olan yamuk bir profil vardır. Genellikle hareket vidası olarak kullanılır. Çoğunlukla tek yönden gelen yük kuvvetinin olduğu uygulamalarda kullanılır [14]. Bu tür uygulamalarda en az kare dişli vidalar kadar verimli olmakla birlikte üretimleri çok daha kolaydır. Trapez vidalar, hareket iletimi maksadıyla ana millerinde, sonsuz vidalarda ve pres millerinde kullanılırlar [15].

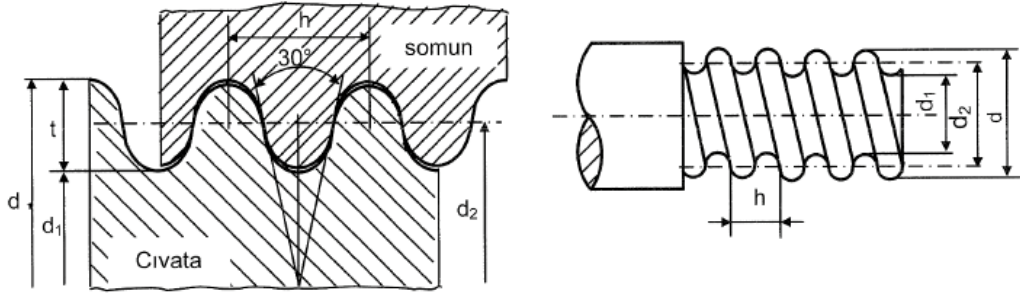


Şekil 2.11. *29° Trapez Vida:* Diş açısı 29° olan, çapların adımları 25,4 mm'deki vida diş sayısı olarak belirtilen vidalardır – ACME Leadscrew [9]

Standart Gösterimi

Örnek: Tr 30×6 (Nominal çap x adım)

C. Yuvarlak Dişli Vida



Şekil 2.12. Yuvarlak Dişli Vida [9]

Toz toprak gibi zararlı etkilere maruz ve sık sık sökülüp takılan uygulamalarda kullanılır. Tepe açısı 30° olan yuvarlak vidalardır. [16]

Keskin kenarlı olmadıklarından gereksiz maddeler, toz, kum ve pastan daha az zarar görür. Bu nedenle kirli su vanalarında, düzgünlük gerekmeyen ampullerde ve gereci plastik veya cam gibi kırılma tehlikesi olan yerlerde kullanılır. [17]

Standart Gösterimi

Örnek: Yv 60×1/6" (Nominal çap x 1"deki diş sayısı)

2.3.3.3. Aktarma vidası tercihi

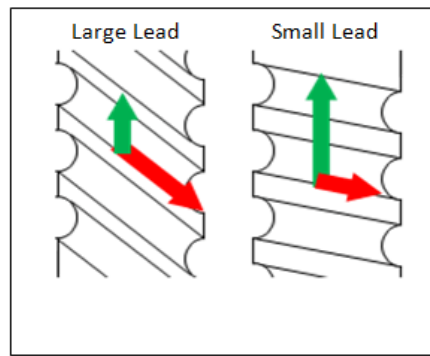
Aktarma vidaları, derin helis dişleri olan ve genellikle polimer kompozit veya bronz somundan oluşan lineer aktarma mekanizmasıdır. Bilyalı vida veya aktarma vidaların kullanımına karar vermeden önce yapacağımız uygulamanın ihtiyaçlarını karşılayacak karakteristikleri anlamamız gereklidir. Bu konuda çoğunlukla; taşınacak yük miktarı, hassasiyet, doğruluk gibi özelliklerin belirlenmesi ile aktarma vidası veya bilyalı vida tercihi karar verilir.

Öne çıkan profiller kare, trapez ve yuvarlak vida ancak bunlardan sadece trapez ve yuvarlak vida standartlaşmış durumdadır. En kolay tedarik edilebilir ürün ise trapez vidadır. Trapez vidanın bilyalı vidaya göre önemli üstünlükleri bulunmaktadır.

Avantajları

- Düşük maliyetlidir,
- Büyük yük taşıma kapasitesi vardır,

- Herhangi bir frenleme sistemi olmaksızın kendini kitleyebilir (Otoblokaj)
- Dikey uygulamalar için en iyi çözümü sağlar,
- Bazı aktarma vidalarında yağlama gerekmez,
- Üretimleri kolaydır,
- Pürüzsüz, az bakım gerektirir ve sessiz çalışır,
- Hız, doğruluk, hassasiyet ve rijitlik gerektiren basit taşıma uygulamalarda daha uygun bir seçenektir.



Şekil 2.13. Otoblokaj [9]

Otoblokaj yani kendiliğinden çözülmemeye özelliği güvenlik için çok önemlidir. Örneğin büyük bir pres makinesinde tabla üst noktaya çıktığında kendiliğinden aşağı çözülerek inmesini istemeyiz veya kriko ile kaldırılan bir aracın üst noktadayken birden aşağı düşmesi istenmeyecek bir durumdur.

Dezavantajları

- Genellikle çok daha az verimlidir. Bu yüzden bilyalı vidaya göre kıyaslandığında daha fazla tork ihtiyacı yani daha büyük motor ve sürücüsü gerekebilir.
- Düşük verimleri nedeniyle sürekli güç iletiminde kullanılmaz. Bunun anlamı, dişler üzerindeki kuvvetler sürtünmeleri arttıracak için gücü iletmeye daha güçlü motor seçmeniz gerekecek demektir.
- Dişler arasında daha büyük sürtünmeler meydana geldiği için vidanın işletme anındaki sıcaklığı daha yüksek olmaktadır.

- Çoğu aktarma vidaları büyük değerlerde ve yüksek hızlı, sürekli veya çok uzun çevrim süresi olan uygulamalar için uygun değildir.
- Bilyalı vidalara göre daha fazla değiştirilmesi gerekmektedir.

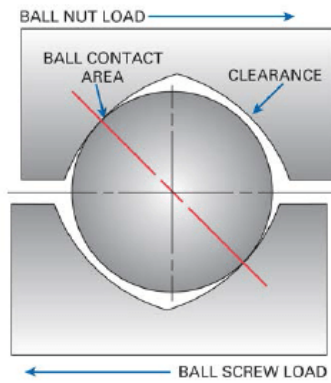
2.3.3.4. Bilyalı vida tercihi

Yarı dairesel helis oyuklara sahip bir vida ve bununla eşleşen bilyalı rulmanın (somun) oluşturduğu taşıma sistemidir. Aynı aktarma vidalarında olduğu gibi bilyalı vidalarda dairesel taşıma hareketini lineer harekete çeviren mekanik bir aktuatördür, ancak en büyük farkı daha az sürtünme ile bunu yapabilmesidir.



Şekil 2.14. Bilyalı Vida Kesiti [9]

Daha az sürtünme, daha çok verim yani daha küçük motor seçimleri anlamına gelmektedir. Kullandığınız projede eğer motor maliyeti çok yüksek oluyorsa bakmanız gereken önemli bir unsur haline gelmektedir. Ayrıca diğer başka mekaniksel üstünlükleri de projelerde kullanım amacına göre değişiklik gösterir.



Şekil 2.15. Bilyalı Vida Nokta Yük Teması [9]

Bilyalı vidalar, aktarma vidalarındaki yuvarlak diş profiline benzeyen bir yapısı vardır ancak somun ile vida dişleri arasında bilyeler yer almaktadır. Aktarma vidasında diş

yüzeyleri temas ettiği için sürtünme daha fazla olurken bilyalı vidalarda bilyalar dişlere nokta teması halindedir. Bu yüzden daha az sürtünme ile çalışırlar.

Avantajları

- Daha verimlidir, yani daha az tork ihtiyacı olduğu için daha küçük motor veya daha ucuz sürücü seçme imkanı sağlar. Tipik bir bilyalı vida verimi %90 civarında olup bu oran eşit boyutlu bir trapez vidada %20-25 olarak kalmaktadır.
- En büyük avantajı, çok yakın tolerans değerlerinde yapıldıkları için hassasiyetin gerekli olduğu durumlarda kullanılması daha uygun olmasıdır.
- Daha az sürtünme olduğu için aktarma vidasına göre daha soğuk işletme sıcaklığında olur.
- Aktarma vidasına göre daha az değiştirilme ihtiyacı duyar.
- Somun ve vida arasındaki sürtünmeler en az olduğu için kullanım ömürleri daha fazladır.
- Bilyalı vidalar büyük değerlerde, yüksek hızlı uygulamalarda veya sürekli ve uzun çevrim süreli uygulamalar için idealdir.

Dezavantajları

- Aktarma vidalarına göre önemli ölçüde pahalıdır
- Diş açısına bağlı olarak, sürtünmeler de çok az olduğu için otoblokaj yoktur.
- Kendiliğinden çözülmeyi engellemek için ek bir frenleme mekanizmasına gerek duyar
- Dikey uygulamalar için güvenli işletme ortamının olması lazımdır.
- Çalışma boyunca önemli ölçüde gürültü yaratır
- Uzun ömürlü olması için yağlama veya gres gerektirir. [18]



Şekil 2.16. Bilyalı Vida Nokta Yük Teması [9]

2.3.3.5. Mekanizma seçimi

Bugünün hareket odaklı otomasyon sistemlerinde çok fazla kullanılan lineer hareketli kontroller, aktarma vidaları veya bilyalı vidaların verimine bağlıdır. Aktarma vidaları, genellikle bilyalı vidaların daha ucuz alternatifi olarak görülüyor olmasına rağmen hangi tip vidanın kullanılacağına karar verilirken maliyete odaklandığımızda işler çok daha karmaşık oluyor. İki vida arasında maliyet açısından büyük bir fark olmaktadır. Aktarma vida ve bilyalı vida arasındaki temel fark, bir bilyalı vida somunu ile vida arasındaki sürtünmeyi en aza indirmek için bilyalı rulmanın kullanılıyor olmasıdır. Aktarma vidalarında ise bu yoktur. Bilyalı vidalar için aktarma vidalarının rulmanlı somun kullanılmış hali olarak değerlendirebilirsiniz. Bu tezin kapsamında eğitim amaçlı bir proje yapacağımızdan maliyet göz önünde bulundurarak trapez vida kullanımı tercih edilmiştir.

2.3.4. Yatak seçimi

Bu tez kapsamında güç ve hareket iletimi amacıyla seçtiğimiz trapez vidaların şaseye bağlanması için rulmanlı yataklar kullanılmıştır. Rulmanlı yatakların boyutları ve özellikleri üretici firmaya göre değişmektedir. 30x30 profile bağlamaya uygun olan UP serili rulmanlı yatak seçilmiştir. Kesin değer ileriki bölümde hesaplamalı olarak ele alınacaktır.



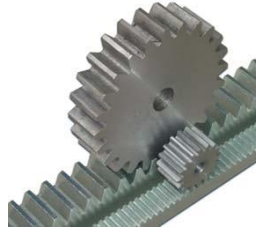
Şekil 2.17. UP Serisi Rulmanlı Yataklar [19]

2.3.5. Doğrusal hareket mekanizmaları

Eksenel hareketlerin sağlanabilmesi için çeşitli doğrusal hareket mekanizmaları bulunmaktadır. Ön plana çıkan bazı mekanizmalar aşağıdaki gibi olmaktadır.

2.3.5.1. Kramayer dişli ve pinyon

Kramayer sistemler hem hareket hem de güç iletme amaçlı kullanılabilirler. Aktarma vidaları yerine pinyona bağlanacak motor ve gezer köprülü tasarım ile eksenel hareketler kolayca sağlanır.



Şekil 2.18. Kramayer ve Pinyon [20]

2.3.5.2. Ray ve arabalar

Lineer kızak ve araba doğrusal hareket iletiminde kullanılan en hassas ve yük taşıma kabiliyeti en yüksek olan sistemdir. Çok hızlı ve seri hareket yapabilme kabiliyetlerinin olması, sağlam yapısı sebebiyle diğer sistemlere göre çok daha pahalıdır.



Şekil 2.19. Lineer Kızak ve Araba [21]

2.3.5.3. Alt destekli mil

Alüminyum alt destek ve indüksiyonlu kromlu mil üzerinde yer alan lineer rulmanlı hazır sistemdir. Yerden yüksekliği desteğe bağlı olduğu için tabla tasarımında sınırlamaya yol açabilmektedir. Desteğin olmasının avantajı lineer rulmanın dönme veya burkulma hareketine karşı bir sınırlama getirmesidir.



Şekil 2.20. Alt Destekli Miller [22]

2.3.5.4. Mil ve lineer rulman

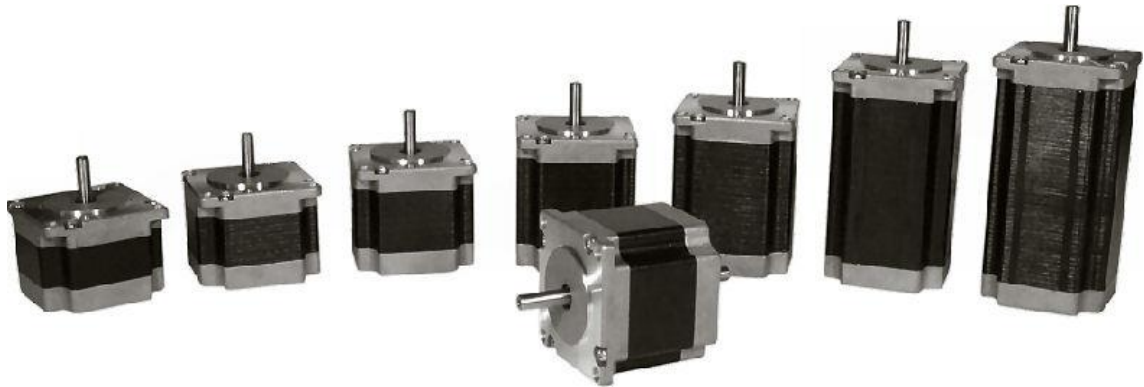
Alüminyum destekli milden farklı olarak desteklerin yerini mil tutucular almıştır. Diğer sistemlere göre en ucuz çözümdür. Lineer rulmanın burkulma veya dönme hareketi tablaya bağlandığında sabitlenecektir. Tez kapsamında bu sistem kullanılacaktır.



Şekil 2.21. Mil ve Lineer Rulman

2.3.6 Tahrik sistemlerinin belirlenmesi

Eksenel hareketlerin sağlanabilmesi için yeterli torku sağlayabilecek tahrik organlarına ihtiyaç vardır. Enkoderli DC/AC motorlar, step veya servo motorlar gibi farklı amaçlar için tercih edilen birçok motor türü bulunmaktadır. Servo motorların kontrolü kolaydır ve hassas konumlama sağlarlar. Ancak yüksek tork gereksinimlerinde maliyeti arttırıcı etmene sahiptir. Kolay pozisyon kontrolü, yüksek tork ihtiyacını karşılama ve nispeten daha ucuz çözüm sunan step (adım) motorlar CNC yönlendirici ve 3B yazıcı yapımında sıklıkla tercih edilmektedir. Bu tez kapsamında NEMA model step motorlar kullanılacaktır.



Şekil 2.22. NEMA Step Motorlar [23]

2.3.7 Kaplin seçimi

Motor hareketi ve torkun aktarılmasında kullanılan esnek (flexi) kaplin, oldham, disk, yaylı, mafsallı veya kauçuk gibi çeşitli kaplin türleri mevcuttur. Güvenli çalışması gerektiği için herhangi bir zorlanma anında kaplin koparak sistemi emniyetli duruma geçirmelidir. Bu şartlar gözetilerek tez kapsamında esnek kaplin tercih edilmiştir.



Şekil 2.23. Flexi Kaplin [24]

2.3.8 Spindle seçimi

Eğitim amaçlı kullanılacağımız için işleyeceğimiz malzemeler tahta, sert köpük, plastik gibi oyulması ve talaş kaldırması kolay malzemeler olacaktır. Endüstriyel kullanımda tercih edilen yüksek devirli ve torklu Spindle motorlar fiyatı yüksek olduğu için tercih edilemedi. İşlenecek malzemeler göz önüne alınarak yüksek devirli ve nispeten düşük torklu MABUCHI RS-755/WC motor bu tez kapsamında kullanılmıştır. Freze takımı kullanımı için haricen mandren bağlanarak çözüm getirilmiştir.



Şekil 2.24. Mabuchi RS-775 DC Motor ve İşleme Takımı [25]

Bu tez kapsamında 12V DC güç kaynağı kullanılmıştır. Katalog değerlerine göre (bkz. Ek 1) motor yaklaşık olarak 9-300 W arasında güç verebilmektedir. 12V için motorun yüksüz anındaki devri 15000 rpm olmaktadır.

Tablo 2.3. Mabuchi RS-775 DC Motor Karakteristikleri [25]

MODEL	VOLTAGE		NO LOAD		AT MAXIMUM EFFICIENCY				STALL	
	OPERATING RANGE	NOMINAL V	SPEED r/min	CURRENT A	SPEED r/min	CURRENT A	TORQUE mN·m	OUTPUT g·cm W	TORQUE mN·m	CURRENT A
RS-775VC	§016(*1)	6 - 20	18	18000	2.20	15680	14.8	127 1292	208	981 10000
RS-775WC	§514(*1)	6 - 20	18	19500	2.70	17040	18.7	153 1561	273	1216 12396
	§013(*1)	6 - 18	18	21000	2.80	18520	20.9	153 1560	296	1295 13201

2.3.9 Kesici takım seçimi

Bu tez kapsamında Çin malı, sert karbür kaplı 4 bıçaklı HSS parmak freze takımı kullanılmıştır. Yedi adet kesici takım HSS [kesici çap x takım çapı] olarak gösterilirse; 1.5x6 mm, 2x6 mm, 2.5x6 mm, 2.5x 6mm, 3x6 mm, 4x6 mm, 5x 6mm, 7x8 mm parmak freze ile işlem yapılacaktır.



Şekil 2.25. Parmak Freze Takımı

3. CNC YÖNLENDİRİCİ İMALATI

3.1. Kesme Kuvvetinin Belirlenmesi

CNC yönlendirici hesaplarını yapabilmemiz için talaş kaldırma işleminde oluşacak kesme kuvvetlerinin de bilinmesi gereklidir. Kesme kuvvetinin belirlenebilmesi için bilmemiz gereken bazı terimler vardır: kesme hızı ve ilerleme. Kesme hızı değeri kesici takım imalatçı firma kataloğundan alınmıştır. Genel olarak kesme hızı HSS kesiciler için **25-50 m/dk** arasında değişmektedir [26]. Kesme hızının formülü aşağıdaki gibidir;

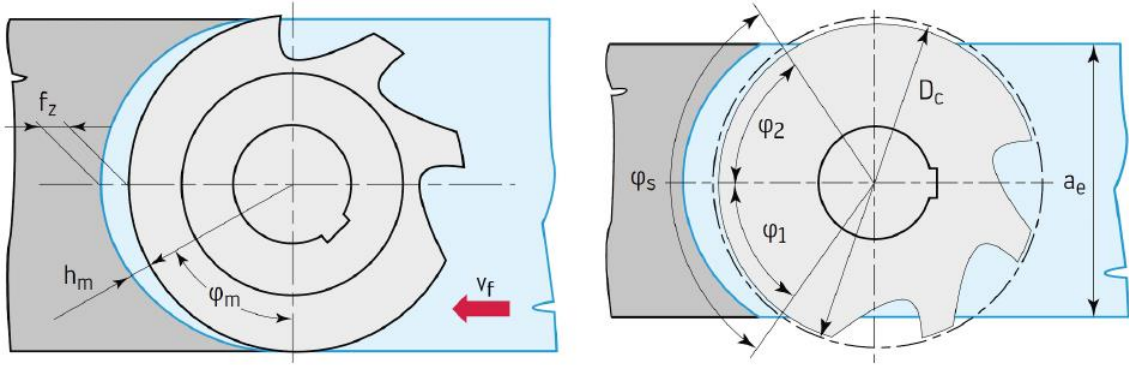
$$V = \frac{\pi D n}{1000} \left[\frac{m}{dk} \right] \quad (3.1)$$

Burada,

- V: Kesme hızı (m/dk)
- D: Freze kesici çapı (mm)
- n: Devir sayısı (rpm veya devir/dk)

En yüksek kesme hızı için 7 mm kesici çapına sahip parmak freze kullanılırsa,

$$V = \frac{\pi \cdot 7 \cdot 1500}{1000} \cong 33 \text{ m/dk}$$



Şekil 3.1. Parmak Freze ile Talaş Kaldırma [27]

Ortalama talaş kalınlığını hesaplayabilmemiz için diş başı ilerleme miktarını belirlememiz gerekmektedir. İşleyeceğimiz malzemeler ahşap, sert köpük olacak ancak katalogda (bkz. Ek 2) yer almadıkları için alüminyuma göre hesap yapılmıştır. Bu durumda parmak freze için f_z veya S_z değeri 0.06 olarak kabul edilmiştir. Ortalama talaş kalınlığı;

$$h_m = \frac{180 \times \sin \gamma \times a_e \times S_z}{\pi \times D \times \sin^{-1} \left(\frac{a_e}{D} \right)} \quad [mm] \quad (3.2)$$

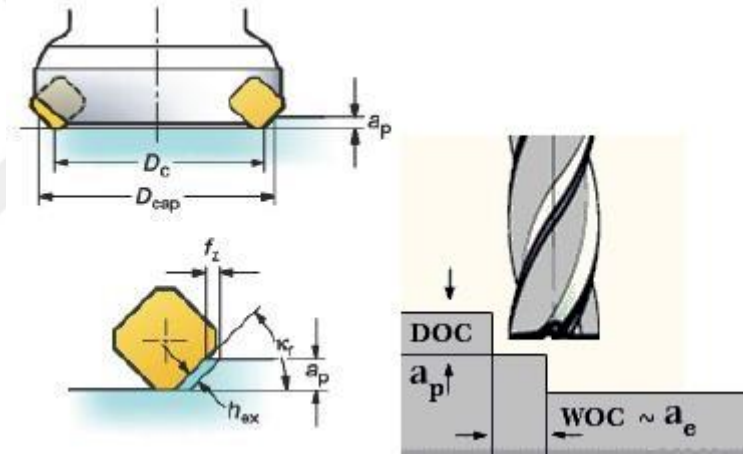
Burada,

- γ : Yaklaşma açısı (parmak freze için 90°)
- a_e : Kesme genişliği (mm) – En yüksek sonuç için 7 mm freze çapı kullanıldı
- S_z : Diş başı ilerleme (mm/diş) olmaktadır. Buna göre:

$$h_m = \frac{180 \times \sin 90 \times 7 \times 0.06}{\pi \times 7 \times \sin^{-1} \left(\frac{7}{7} \right)} = 0.038 \text{ mm}$$

İlerleme hızı (S veya V_f) ise n devir sayısı ve z frezenin diş sayısı olmak üzere aşağıdaki gibidir:

$$S (\text{feed rate}) = z \cdot n \cdot S_z = 4 \times 1500 \times 0.06 = 360 \text{ mm/dk}$$



Şekil 3.2. Parmak Freze Değerleri

Frezenin en fazla 5 mm derinliğe inerek paso vereceğini kabul edersek aksenal kesme derinliği $a_p = 5$ mm olmaktadır. Kesme kuvvetini hesaplamak için K_s değerini aşağıdaki tablodan 800 N/mm^2 olarak kabul ettik. Buna göre bir dişe karşılık gelen ortalama kesme kuvveti:

$$F_{S_z} = A_s \times K_s = a_p \times h_m \times K_s \quad [N] \quad (3.3)$$

$$F_{S_z} = 5 \times 0.038 \times 800 = 152 \text{ N}$$

Olmaktadır.

Tablo 3.1. Kolaylaştırılmış Yöntemle K_s Değeri [28]

Parça Malzemesi	K_s [N/mm ²]
St 60	1600
St 70	1900
İslah Çelikleri ($\sigma_k \leq 100$ N/mm)	2350
İslah Çelikleri ($\sigma_k \leq 1400$ N/mm)	3500
Cr-Ni Çelikleri	3000
Mn Çelikleri	4800
Dökme Çelik	1500
Dökme Demir	2000
Al-Cu-Mg Alaşımı (Duraluminyum)	800

Aynı anda parça ile temasta bulunan diş sayısı ise

$$\varphi_s = 2 \sin^{-1} \left(\frac{a_e}{D} \right) = 2 \sin^{-1} \frac{7}{7} = 180^\circ \Rightarrow Z_e = z \frac{\varphi_s}{360^\circ} = 4 \frac{180^\circ}{360^\circ} = 2 \text{ diş}$$

Buna göre ortalama kesme kuvveti,

$$F_s = Z_e \times F_{sz} = 2 \times 152 = 304 \text{ N}$$

Kesme gücü,

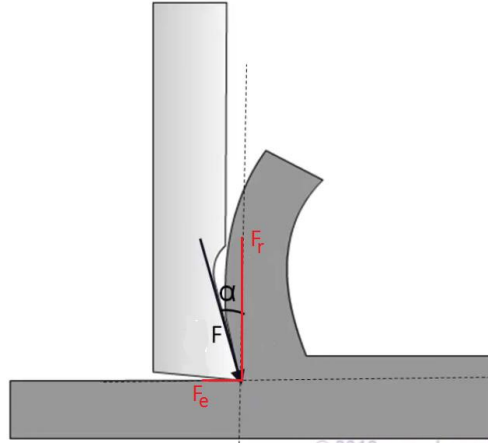
$$P_s = \frac{F_s \times V}{60 \times 1000} \quad [kW] \quad (3.4)$$

$$P_s = \frac{304 \times 33}{60 \times 1000} = 0.167 \text{ kW}$$

Mabuchi RS-775 DC motorumuz Ek.1 kataloğuna göre en fazla 300 W güce sahiptir. Bu durumda redüktör kullanmadan da çalışmaya uygundur. Kesme kuvvetlerinin arasında kesin bağıntılar olmamakla birlikte deneylere dayanarak oluşturulmuş ampirik bağıntılar bulunmaktadır [28]. Aynı yönde frezeleme yöntemine göre radyal ve eksenel (ilerleme) kuvvetlerini hesaplarsak:

$$\begin{aligned} F_{radyal} &= 0.8 \times F_s = 0.8 \times 304 = 243.2 \text{ N} \\ F_{eksenel} &= 0.9 \times F_s = 0.9 \times 304 = 273.6 \text{ N} \end{aligned}$$

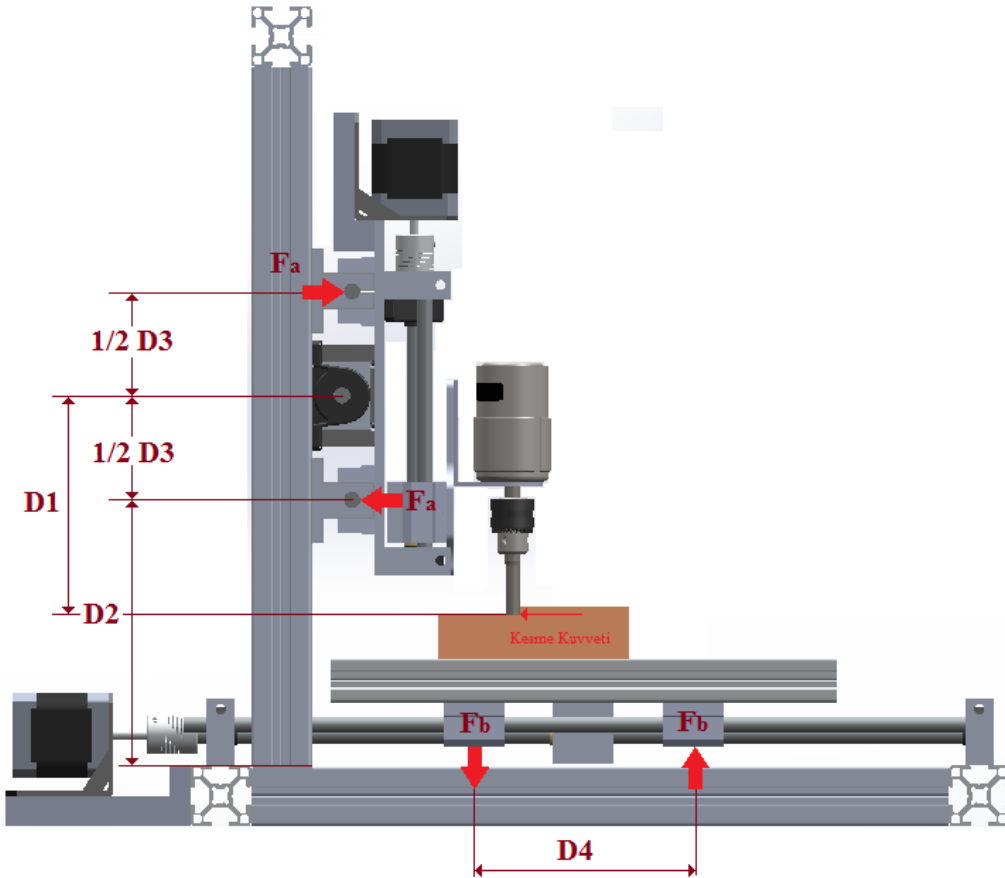
Olmaktadır.



Şekil 3.3. Kesme Kuvvetleri

3.2. CNC Yönlendiriciye Etkiyen Kuvvetler

Bir CNC yönlendiricide genel hatlarıyla meydana gelen kuvvetler aşağıdaki şekildeki gibi olmaktadır. Oluşacak kuvvetleri belirledikten sonra her bir unsurun hesaplanması ilerleyen bölümlerde ele alınmıştır.



Şekil 3.4. CNC Yönlendirici Üzerindeki Kuvvetler

Resim üzerindeki ifadelerin açıklaması:

- **D₁:** Aktarma vidası merkezi ile spindle kesici uç arası mesafedir.
- **D₂:** Y eksenindeki mil ile profilin temas yüzeyi arasındaki mesafedir.
- **D₃:** Y eksenindeki alt ve üst milin merkezleri arasındaki mesafedir.
- **D₄:** X eksenindeki iki lineer rulmanlı yatağın merkezleri arası mesafedir.

Şekil 3.4'deki freze çıkışının soldan sağa hareket ettiği kabulü yapıldı. Freze çıkışında oluşacak kesme kuvvetini daha önce hesaplamıştık. Tablanın rijit olduğu kabul edersek freze çıkışı üzerindeki zorlanmış kesme kuvveti, köprü üzerinde bir A momenti oluşmasına neden olmaktadır. Bu durumda basitçe A momenti;

$$M_A = \text{Kesme Kuvveti} \times D_1 \quad [Nm] \quad (3.5)$$

Olmaktadır. A momentini karşılayacak temel 2 kuvvet vardır. Bunlar Y eksenindeki tablanın dönmesini engelleyen mil ve lineer yataklı rulman bağlantısıdır. Statik denge hesabı ile,

$$M_A = F_a \times D_3 \quad [Nm] \quad (3.6)$$

Aynı şekilde freze çıkışı delme veya ilerleme işlemi sırasında bir B momenti oluşur.

$$M_B = F_b \times D_4 \quad [Nm] \quad (3.7)$$

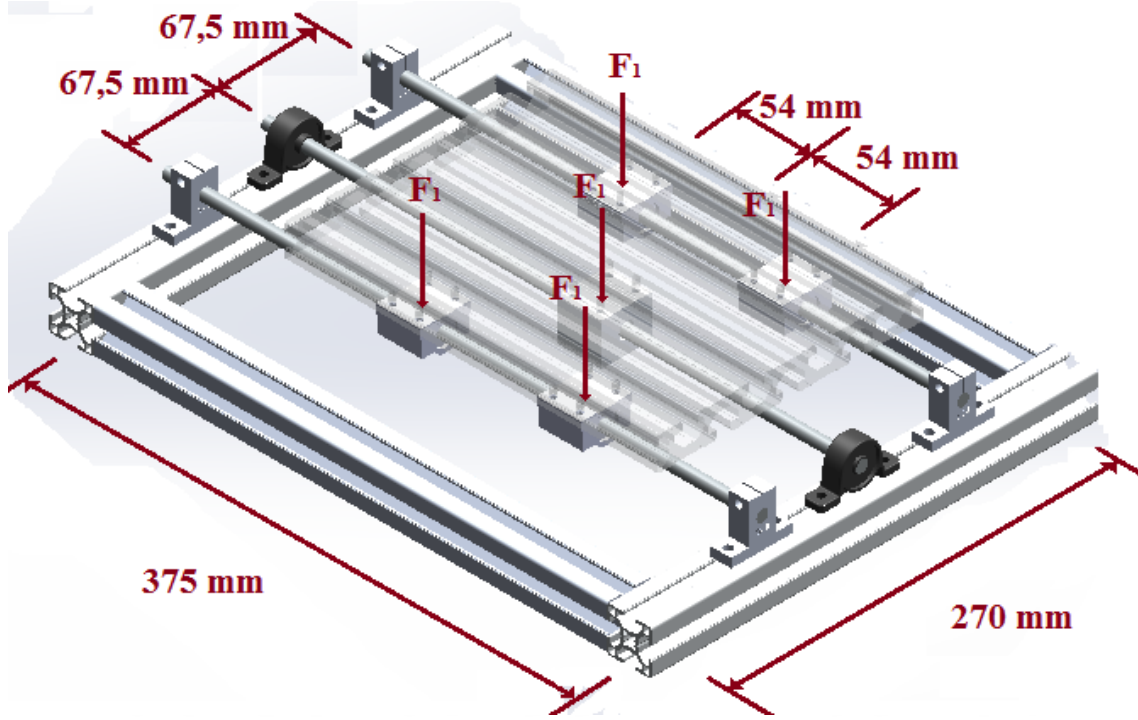
Kesme kuvvetine bağlı olarak oluşacak diğer bir etken ise köprü eğilmesidir.

$$M_C = F_a \times (D_2 + D_3) - F_a \times D_2 \quad [Nm] \quad (3.8)$$

3.3. X Ekseninin Tasarımı

Önceki bölümde aktarma vidası kullanılacağı ve hesaplamaların buna göre olacağı belirtilmişti. Bu verileri kullanarak cnc tablası üzerindeki bir iş parçası için en fazla ne kadar ağırlığa kadar düzenli çalışabileceğinin tespiti yapılmıştır. Maliyet açısından takım halinde tedarik etmeye en uygun seçim Çin menşeli metrik ACME T8 tipi trapezoidal vidalar olmaktadır. Vida yataklaması için UP08 serisi rulmanlı yataklar (bkz. Ek 3) kullanılmıştır. Destekler için daha önce belirttiğimiz gibi mil-lineer yatak kullanılacaktır. Bu amaçla trapezoidal vida uzunluğuna göre belirlediğimiz 375 mm uzunluğunda 8 mm çapında 2 adet krom kaplı indüksiyonlu taşlanmış mil kullanılmıştır. CK 55 malzemesinden imal edilmiş olup 62+/-2 HRC yüzey sertliğindedir [29]. Her mil üzerinde

iki adet SC08UU serili lineer rulman (bkz. Ek 4) kullanılacağı için mil yüzeyinin aşınmaması önem arz etmektedir. Yüzey sertliğinin düşük olması çizilmeyi, bu da rulmanın pis bir yüzeyde çalışmasına ve kısa zamanda bozulmasına sebep olmaktadır. Bu yüzden sertleştirilmiş mil kullanılması tercih edildi.



Şekil 3.5. X Eksen Gösterimi

Nema 17 serisi motorlar kolay bulunabilmektedir. İş parçası ağırlığı, kesme kuvveti vb. etkilerden dolayı cnc yönlendiricinin en fazla torka ihtiyaç duyduğu kısım bu bölümdür. Bu sebeple nema 17 serilerinden (bkz. Ek 5) en yüksek torklu motor seçilmiştir. Aşağıdaki verilere göre,

- Metrik ACME T8 Trapezoidal vida malzemesi 304 kalite paslanmaz çeliktir. (Özellikler için bkz. Ek 6)
- T8 Trapezoidal vidanın akma mukavemeti: 205 Mpa [30]
- T8 Trapezoidal için pitch = 2 mm ve lead = 8 mm
- T8 Sürtünme katsayısı $f = 0.08$
- Nema 17 17HS8401 adım motoru çalışma torku 52 N.cm
- Nema 17 17HS8401 adım motoru frenleme torku: 2.6 N.cm

Aktarma vidası için Ek 7 ve Ek 8'deki önerilen formüle göre hesaplırsak

$$\text{Helis Açısı} = \tan^{-1} \left(\frac{\text{lead}}{\pi d} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{8}{8\pi} \right) = 17.66^\circ \quad (3.9)$$

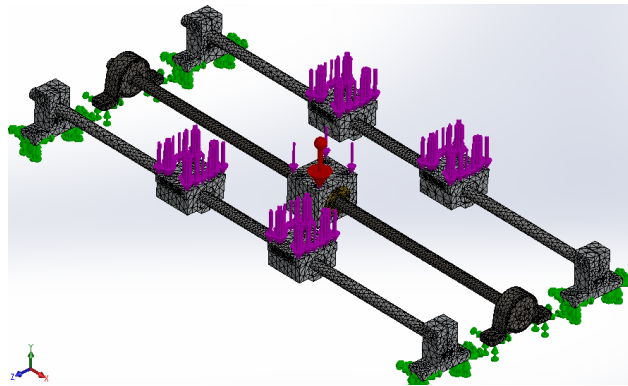
$$\% \text{Verim} [\delta] = \frac{\tan(\text{helis açısı})}{\tan(\text{helis açısı} + \arctan f)} \times 100 \quad (3.10)$$

$$\delta = \frac{\tan(17.66)}{\tan(17.66 + \arctan 0.08)} \times 100 = \%77.88$$

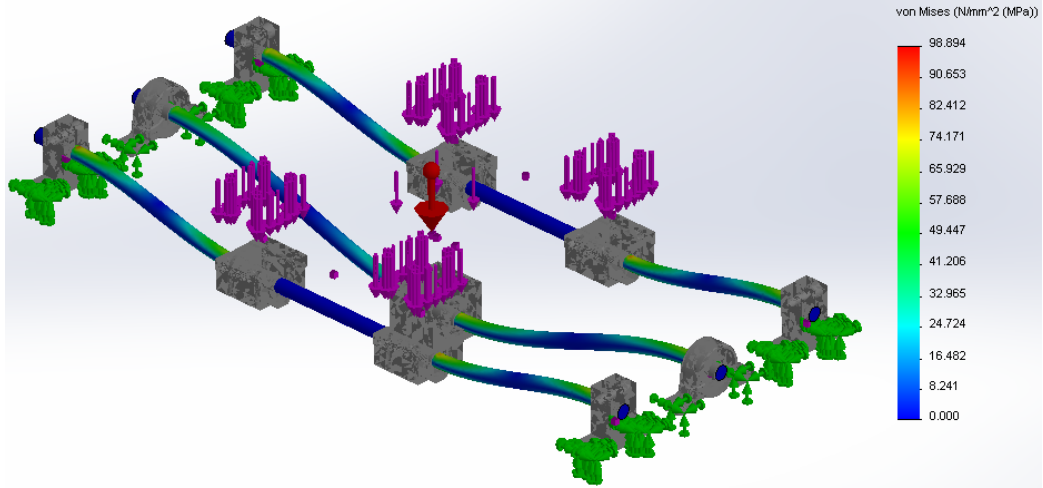
$$\text{Tork} = \frac{\text{Yük [N]} \times \text{Lead [mm]}}{2\pi\delta} \quad [\text{Nmm}] \quad (3.11)$$

$$\text{Yük} = \frac{2\pi \times 0.7788 \times 520}{8} = 318 \quad [\text{N}]$$

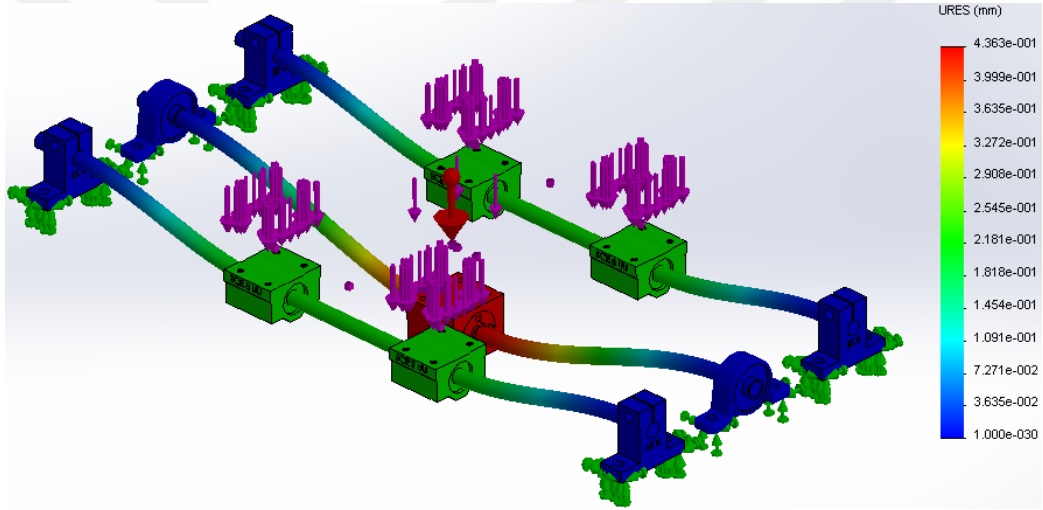
İvmesiz hareket altında Nema 17 17HS8401 model motor ile en fazla 32 kg yük taşıma kapasitesine sahiptir. Radyal kesme kuvveti (243 N) ve tabla üzerindeki ağırlıklar göz önüne alındığında güvenli olarak 7,5 kg yük rahatça işlenebilir. Ayrıca daha düşük freze çakısı çapları kullanıldığında tablanın güvenli taşıma kapasitesinin artacağı da unutulmamalıdır. Şekil 3.4'deki F_b kuvvetleri etkisiyle oluşan B eğilme momentini (3.7) karşılaması için mil ve lineer rulman destekleri şekil 3.5'deki gibi yerleştirilmiştir. Montajlanan sistemde farklı malzeme grupları olduğu için Solidworks 2013 Simulation Pro programı ile statik analiz yapılarak yük dayanımı test edilmiştir. Analizin çözümünü kolaylaştırmak için bazı kabuller yapıldı. Lineer rulmanlara düşey yönlü olarak toplamda 350 N kuvvet uygulandığı, yatak ve mil tutucuların şekil değiştirmez olarak sabitlendiği kabulü ile analiz gerçekleştirilmiştir. İterasyon işleminin uzun sürmesi ve PC belleği yetersiz kaldığı için kaba mesh işlemi uygulanmıştır.



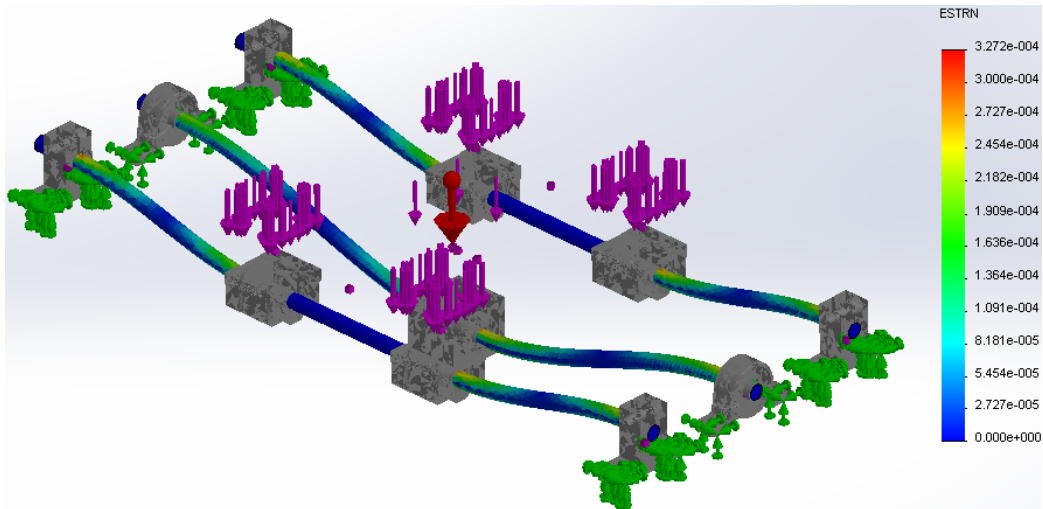
Şekil 3.6. X Eksenli Statik Analiz



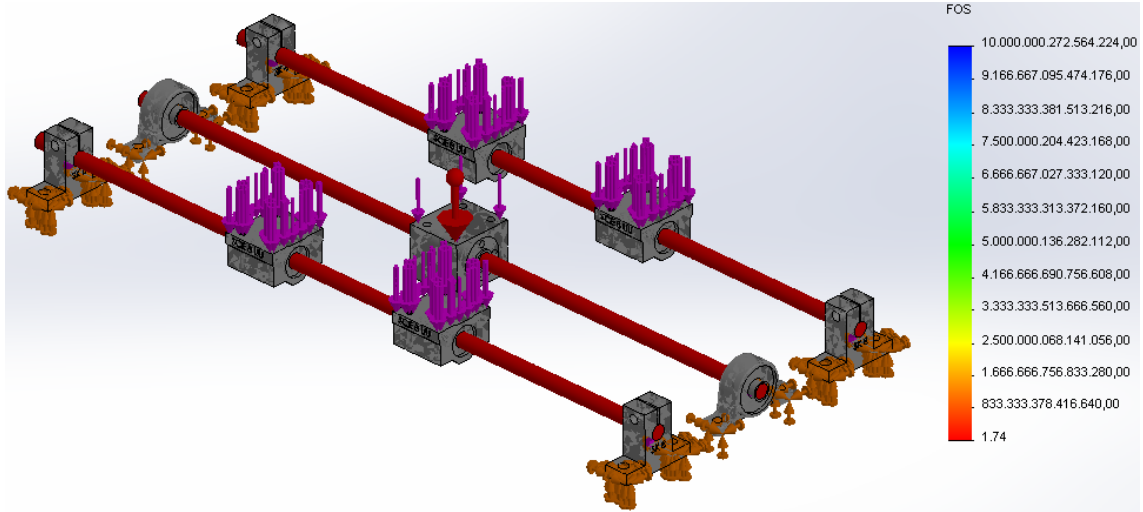
Şekil 3.7. X Eksenli Von Mises Stresi



Şekil 3.8. X Eksenli Yer Değiştirme



Şekil 3.9. X Eksenli Eş Değer Gerilme

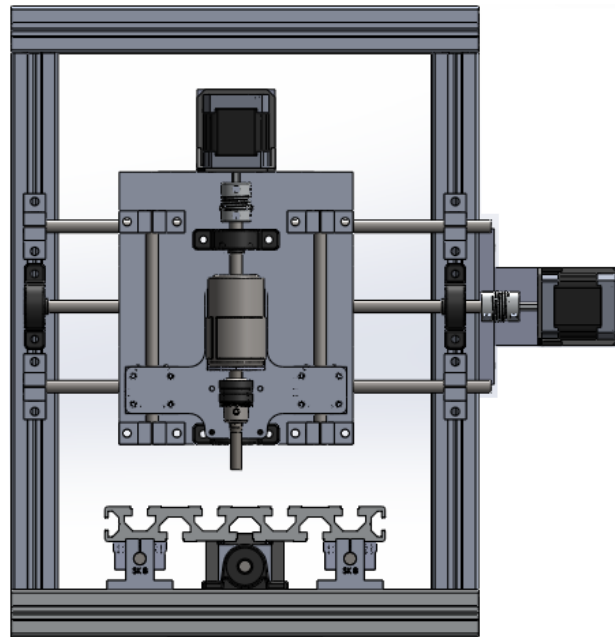


Şekil 3.10. X Eksenli Güvenlik Faktörü

En düşük güvenlik faktörü vida ve mil üzerinde olmasına karşın sistemi 1,74 kat emniyetli taşıyabilmektedir. En yüksek Von Mises gerilmesi (90 Mpa), trapez vidanın akma mukavemeti 205 Mpa ve krom kaplamalı mil için akma mukavemeti 550 Mpa (bkz. Ek 9) değerlerini geçmediğinden herhangi bir kalıcı plastik deformasyonun oluşması söz konusu değildir.

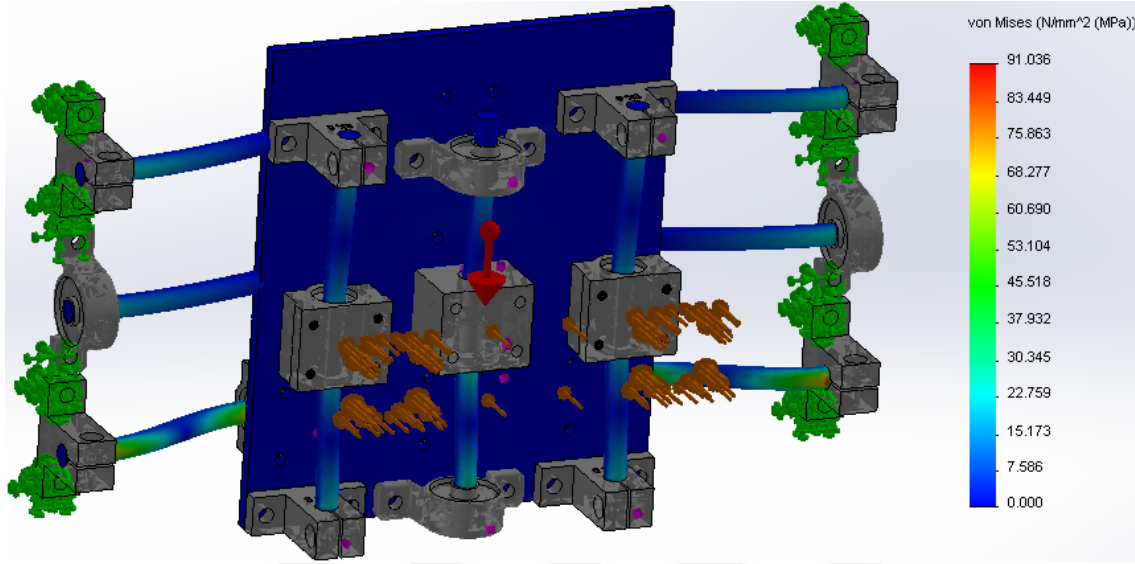
3.4. Y ve Z Ekseninin Tasarımı

Kesme kuvveti etkisiyle Y ve Z eksenlerinde iki yönlü eğilme momenti oluşacaktır.

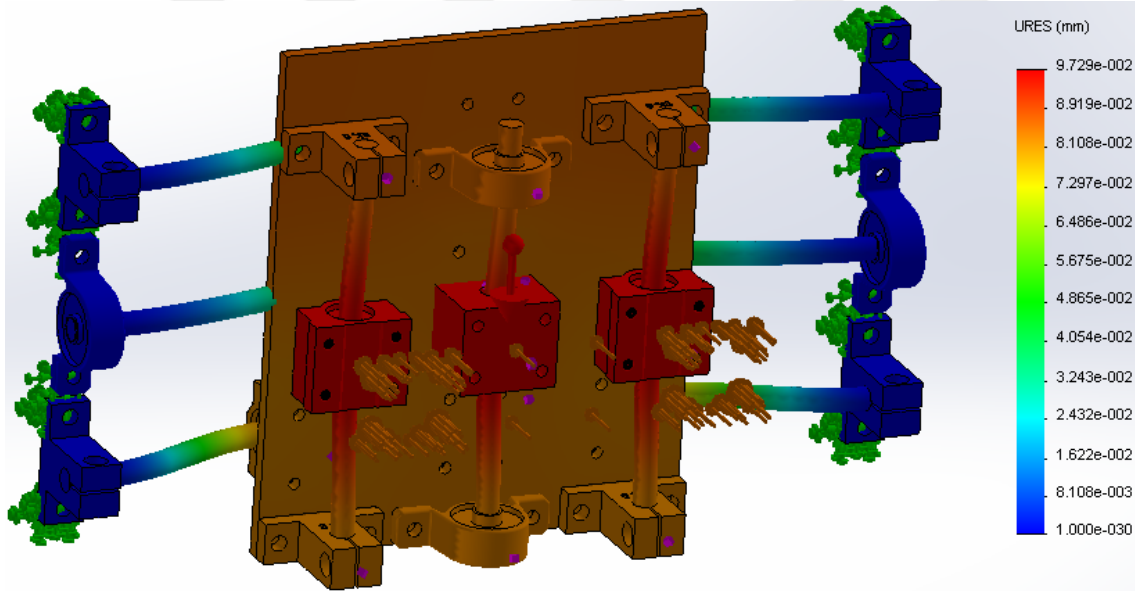


Şekil 3.11. Önden Görünüş

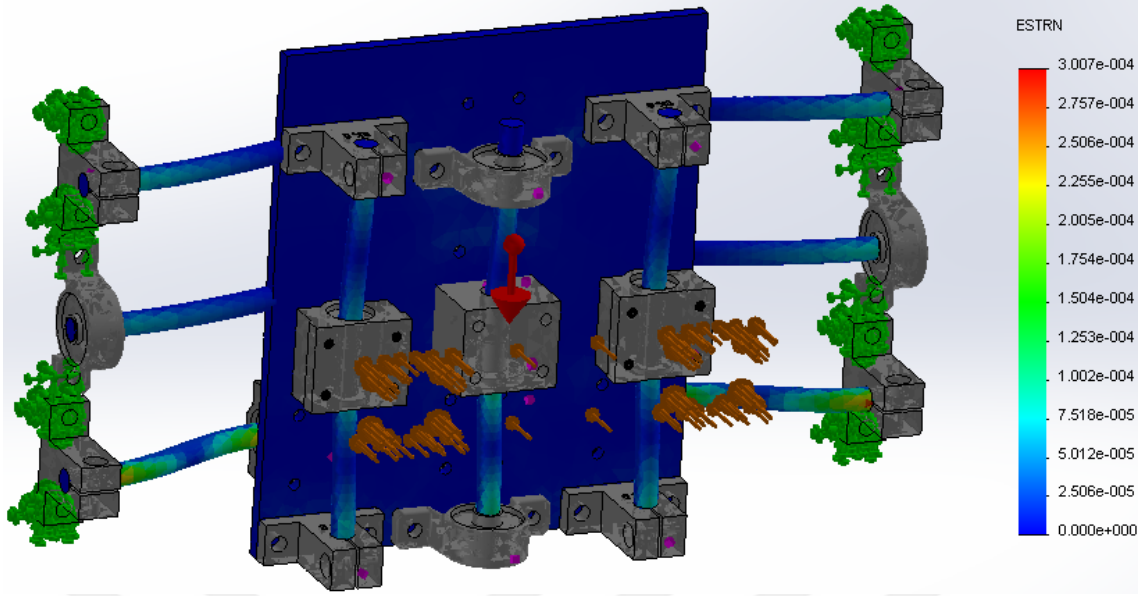
Şekil 3.4’de F_a kuvvetleri etkisiyle oluşan M_x eğilme momenti ve Y yönünde kesme yapıldığında oluşacak reaksiyon kuvvetlerden dolayı M_y eğilme momenti meydana gelecektir. Problemi basitleştirmek kesme kuvvetini (304N) lineer rulmanlı yataklara ve vidalı mil somununa dağıttık.



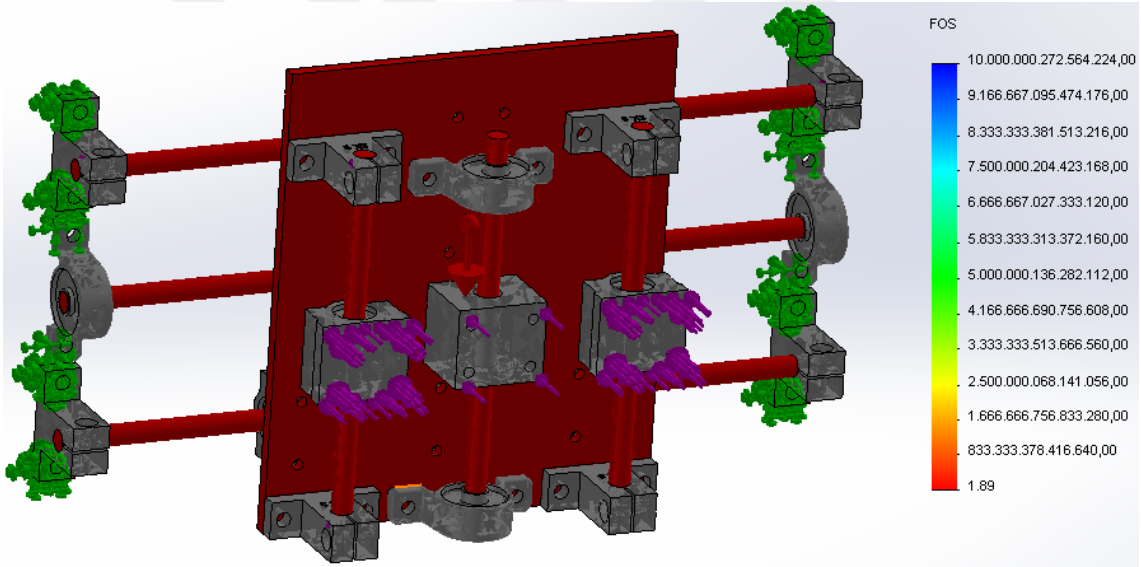
Şekil 3.12. YZ Eksenli Von Mises Stresi



Şekil 3.13. YZ Eksenli Yer Değiştirme



Şekil 3.14. YZ Eksenli Eş Değer Gerilme



Şekil 3.15. YZ Eksenli Güvenlik Faktörü

Analiz sonucunda 1,89 kat emniyetli olarak sistem çalışacaktır. X eksenine göre daha az kuvvetlere maruz kaldığından sonucun güvenli çıkması tabiidir.

4. ÜÇ BOYUTLU BASKILAMA

Hızlı prototipleşmeye imkân verdiği için endüstriyel alanda kendisine yer bulan 3B yazıcı teknolojisi, baskı malzemesi fiyatlarının düşmesiyle birlikte artık bireysel ihtiyaçlara da cevap verebilmektedir. Mühendislik öğrencilerinin projelerini gerçek bir modele dönüştürebilmesi, üzerinde çalışabilir olması ve koşullarını sınayabilmeleri daha üretken olmalarını sağlamakla birlikte mühendislik konularını uygulamalı olarak kavrama şansı elde edebilmektedir.

Bu bölümde imalatını gerçekleştirdiğimiz CNC yönlendiriciye ufak eklemeler yaprak en kolay yoldan 3B yazıcıya dönüştürülmesi anlatılmıştır. Böylece aynı tezgâh ile hem talaşlı imalat hem de plastik model üretimi yapılabilecek bir hibrid sistem tasarlamış oldu. CNC yönlendirici tasarımı aynen kullanılacağı için mekanik unsurlarda bir değişiklik olmamıştır. 3B Baskı teknolojisine özel kavramları incelememiz bizim için yeterlidir.

4.1. Yazıcı Teknolojileri

Üç boyutlu baskı teknolojisinde stereo litografi, lazer sinterleme, color-jet baskı, fusion deposition modeling (FDM), multi-jet baskı ve metal sinterleme yöntemleri gibi birçok üretim teknikleri bulunmaktadır [31]. Her bir tekniğin kendisine göre üstün yönleri ve dezavantajları bulunmasına karşın kesin bir zafer bulunmamaktadır. Seçilecek teknik doğrudan modelin ihtiyaçlarına ve bütçeye göre belirlenmektedir. Bu tez kapsamında eğitim amaçlı model üretimleri yapılacağı için en kolay ve ucuz yöntem olan FDM teknolojisi tercih edilmiştir.

4.2. Sarf Malzemeler

Baskı materyalleri baskının yapılabilmesi için en önemli unsurdur. FDM yazıcılarında baskı materyali çoğunlukla plastik olmaktadır. Genel olarak kabul görmüş bir standart olarak 1.75 mm veya 3 mm çaplarında filamentler kullanılmaktadır. En çok kullanılan türler ABS ve PLA olmasına karşın bambu, bronz alaşım, ahşap dolgulu veya foto kromatik filament çeşitleri bulunmaktadır [31]. Bizim için en ucuz ve uygun olan PLA ve ABS filamentlerin karşılaştırması aşağıdaki gibi olmaktadır.

4.2.1. ABS

Erime sıcaklığı 225°C olan ABS diğer polimerlere oranla nispeten daha güçlü ve biraz daha esnek bir yapıya sahiptir. Yapısındaki stirenden dolayı plastiğe parlak ve pürüzsüz yüzey sağlamaktadır. Bu özellikleri sayesinde yüksek ısıya veya sıcak suya maruz kalan yerlerde ideal olarak kullanılabilecek bir materyaldir. Ayrıca aseton buharı ile pürüzsüz yüzeyler elde etmek mümkündür. Yüksek erime sıcaklığı, baskı zemininde soğuyup katılaşma sürecinde malzemenin çarpılmasına veya kıvrılmalarına neden olduğundan sıcak baskı zeminine (heated bed) ihtiyaç duymaktadır. Baskı işlemi sırasında bileşimlerinden birisi olan akrilonitril dumanı insan sağlığı açısından son derece tehlikelidir [31].



Şekil 4.1. Sarf Malzemeler [32]

4.2.1. PLA

En bilinen ham maddeleri mısır nişastası ve şeker kamışı olan PLA malzemesi 180°C sıcaklıkta erimeye başlamaktadır. Organik bir ürün olduğundan geri dönüştürülebilir ve çevrecidir. ABS malzemesi gibi sıcak tablaya ihtiyaç duymaz ve ortama zehirli gaz yaymamaktadır. PLA polimeri ABS'ye göre daha parlak bir yüzeye sahiptir ancak pürüzsüzlük açısından ABS daha üstündür. Yüzey pürüzlüğü için su altında zımpara ve dolgu malzemesi ile kapatma işlemleri yapılabilir. Organik ürün olduğu için ev şartlarında malzemenin üretimi yapılabilir. Bütün bu koşullar değerlendirildiğinde bu tez kapsamında PLA malzemesini kullanımı daha uygun görülmektedir.

4.3. Mekanik Unsurlar

CNC yönlendirici tasarımını aynen kullanacağımız için yalnızca extruder olarak adlandırılan mekanizmayı yapmamız yeterlidir. Plastiği alıp hareket ettirmekle ilgilenen kısmına soğuk uç, plastiği eritip basmakla ilgilenen kısmına ise sıcak uç olarak adlandırabiliriz. Hareketi sağlamak için pnömatik veya kasnak-motor yardımıyla çalışan mekanizmalar mevcuttur. Kolay olması açısından aşağıdaki gibi bir mekanizma yeterli olacaktır.



Şekil 4.2. MK8 Hareket Mekanizması

Motora bağlı olan MK8 dişlisi ile kasnak arasından filament geçirilmektedir. Step motor ile hassas adım kontrolü yapılarak filament ilerletilir. Bu bölümün sonunda yer alan sıcak uç ile plastik eritmeye başlanır. Aşağıdaki sıcak uç alüminyum blok, baskı ucu memesi ve bağlama civatasından oluşmaktadır. Şekil 4.2'nin üst kısmında görülen yuvaya 12V seramik ısıtıcı yerleştirilmektedir. Diğer kısmına ise NTC 100k sıcaklık sensörü yer alır.



Şekil 4.3. Sıcak Uç

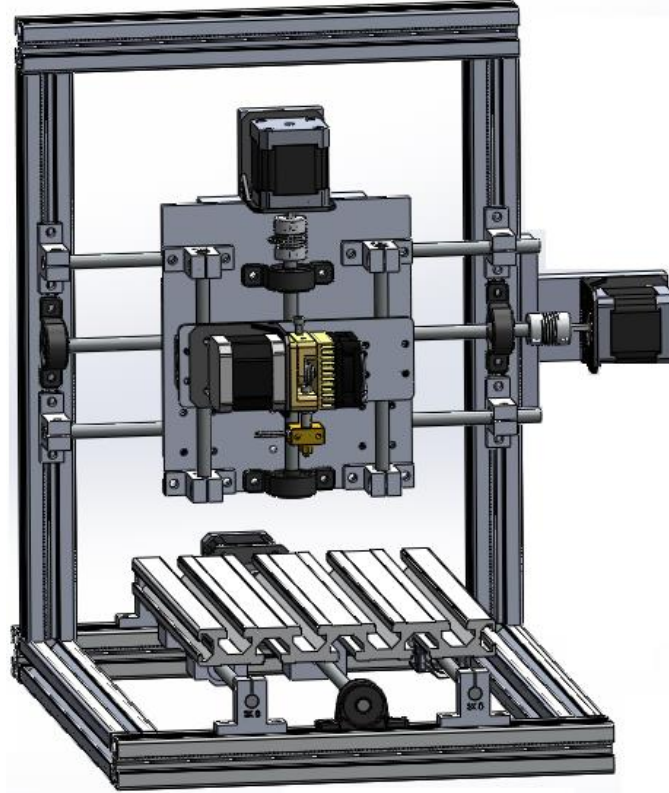
PLA malzemesi için 230⁰C sıcaklıklarda çalışan extruderin parçaları üzerinden ısı transferi gerçekleştirilmektedir. Sıcaklığın motorun bağlı olduğu bölgeye kadar ilerlemesi

ciddi bir sorundur. Ayrıca kontrol altında tutulamayan sıcaklık bölgelerinin oluşması yüzünden daha sıcak uca varmadan malzeme eriyebilir ve tıkanmalara yol açabilmektedir. Isının uzaklaştırılması için fan ve kanatçık kullanmamız gereklidir. Son durumda aşağıdaki gibi bir sistem oluşacaktır.



Şekil 4.4. MK8 Yönlendirici

Mekanik düzenlemeler yapıldıktan sonraki durum aşağıdaki gibi olmaktadır. Üç boyutlu yazıcı için elektronik ve yazılım kontrol ünitesi ilerleyen bölümlerde ele alınacaktır.



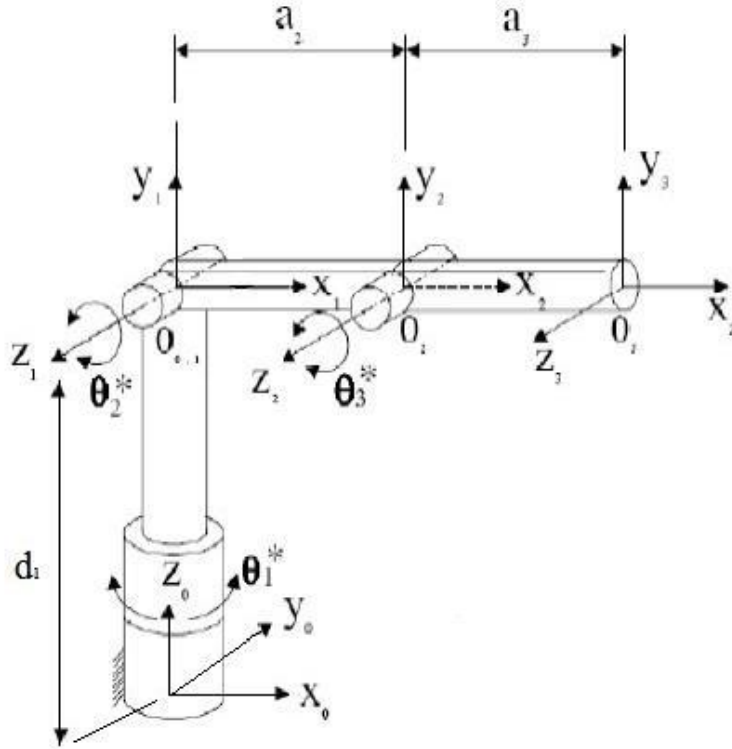
Şekil 4.5. 3B Yazıcı

5. ÜÇ EKSENLİ ROBOT KOL

Bilgisayarlı bütünleşik imalatın temel unsuru olan robot manipülatörler, endüstri 4.0 ile birlikte daha da önem kazanmıştır. Bu tez kapsamında eğitimde kullanılabilecek 3 eksenli robot kol tasarımı, hesaplaması ve imalatı ile kontrol yazılımı gerçekleştirilecektir.

5.1. Robot Kinematiği

Geometrik bir sistemin yapısını ve hareketlerini inceleyen bilim dalına kinematik denir. Bir sistemin belirli şartlar altında nasıl hareket ettiğini anlayabilmek için bu sistemin kuvvet, atalet gibi büyüklükleri yani dinamiği hakkında bilgi sahibi olmamız gerekmektedir. Robotun ileri yön kinematiği, robot bağlarının konumları, hızları ve ivmeleri arasındaki ilişkidir. Robotun eklem değişkenlerinin belirlenmesinde Denavit – Hartenberg yöntemi uygulanacaktır.



Şekil 5.1. Eksen Yerleştirme

Elde edilecek transfer fonksiyonları robot manipülatörün uç ve eklem koordinatlarını vermektedir. Yazılım bölümünde bu transfer fonksiyonları kullanılacaktır.

Tablo 5.1. Denevit – Hartenberg Gösterimi

D-H Değişkenlerinin Belirlenmesi				
i	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	0	90^0	d	θ_1
2	a_2	0	0	θ_2
3	a_3	0	0	θ_3

5.1.1. İleri kinematik hesaplaması

İleri kinematik hesaplamaları manipülatörün eklem açıları girildiğinde uç noktanın koordinatlarını belirlemeye yaramaktadır. Denevit – Hartenberg yönteminden faydalanarak dönüşüm matrislerini hesaplanacaktır.

$${}^{i-1}_iT = \begin{bmatrix} C\theta_i & -S\theta_i C\alpha_i & S\theta_i S\alpha_i & \alpha_i C\theta_i \\ S\theta_i & C\theta_i C\alpha_i & -C\theta_i S\alpha_i & \alpha_i S\theta_i \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

Yukarıdaki dönüşüm matrisi her bir eksen için uygulanırsa,

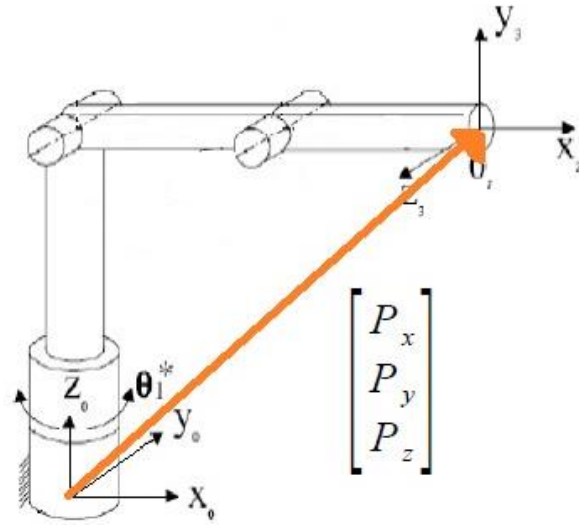
$${}^0_1T = \begin{bmatrix} C\theta_1 & 0 & S\theta_1 & 0 \\ S\theta_1 & 0 & -C\theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^1_2T = \begin{bmatrix} C\theta_2 & -S\theta_2 & 0 & \alpha_2 C\theta_2 \\ S\theta_2 & C\theta_2 & 0 & \alpha_2 S\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^2_3T = \begin{bmatrix} C\theta_3 & -S\theta_3 & 0 & \alpha_3 C\theta_3 \\ S\theta_3 & C\theta_3 & 0 & \alpha_3 S\theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Eklemelerin çarpılmasıyla 0_3T ileri yönlü robot kinematiği elde edilir. Matris Çarpımı yapılırsa ifadesinin genel hali aşağıdaki gibi olur.

$${}^0_3T = \begin{bmatrix} C\theta_1 C\theta_2 C\theta_3 - C\theta_1 S\theta_2 S\theta_3 & -C\theta_1 S\theta_2 C\theta_3 - C\theta_1 C\theta_2 S\theta_3 & S\theta_1 & \alpha_2 C\theta_1 C\theta_2 + \alpha_3 C\theta_1 C\theta_2 C\theta_3 - \alpha_3 C\theta_1 S\theta_2 S\theta_3 \\ S\theta_1 C\theta_2 C\theta_3 - S\theta_1 S\theta_2 S\theta_3 & -S\theta_1 S\theta_2 C\theta_3 - S\theta_1 C\theta_2 S\theta_3 & -C\theta_1 & \alpha_2 S\theta_1 C\theta_2 + \alpha_3 S\theta_1 C\theta_2 C\theta_3 - \alpha_3 S\theta_1 S\theta_2 S\theta_3 \\ S\theta_2 C\theta_3 + C\theta_2 S\theta_3 & C\theta_2 C\theta_3 - S\theta_2 S\theta_3 & 0 & d_1 + \alpha_2 S\theta_2 + \alpha_3 S\theta_2 C\theta_3 + \alpha_3 C\theta_2 S\theta_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

${}^0_3T = {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T$ Dönüşüm matrisinin konum vektörü aşağıdaki gibi bulunur. P_x , P_y ve P_z vektörleri robot kolunun uç noktasının konum koordinatlarını vermektedir.

$${}^0_3T = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_2 C\theta_1 C\theta_2 + \alpha_3 C\theta_1 C\theta_2 C\theta_3 - \alpha_3 C\theta_1 S\theta_2 S\theta_3 \\ \alpha_2 S\theta_1 C\theta_2 + \alpha_3 S\theta_1 C\theta_2 C\theta_3 - \alpha_3 S\theta_1 S\theta_2 S\theta_3 \\ d_1 + \alpha_2 S\theta_2 + \alpha_3 S\theta_2 C\theta_3 + \alpha_3 C\theta_2 S\theta_3 \\ 1 \end{bmatrix}$$



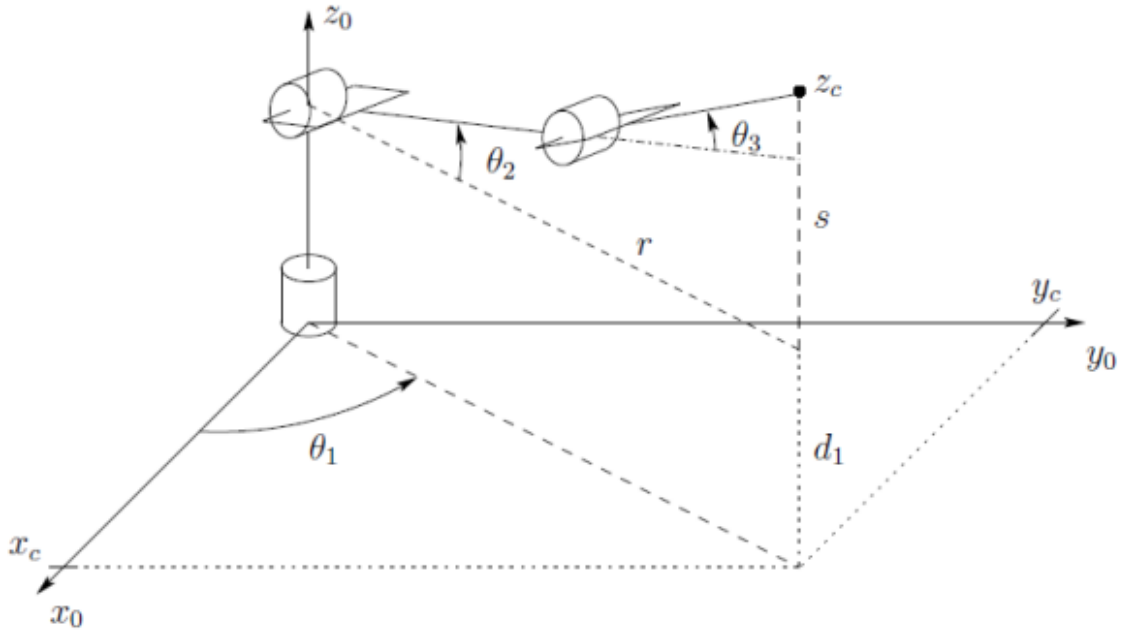
Şekil 5.2. Konum Vektörü

5.1.2. Ters kinematik hesaplaması

Ters kinematik probleminin çözümü için iki farklı alternatif çözüm yolu yapılacaktır.

5.1.2.1. Birinci Yöntem

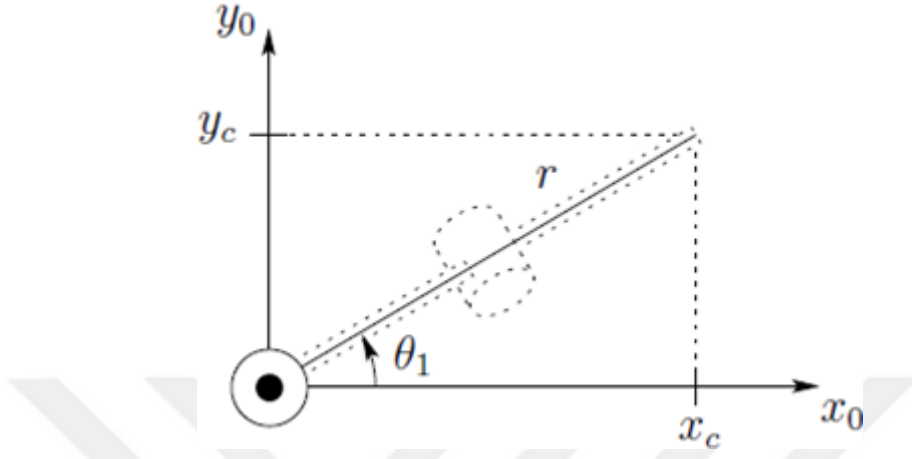
Bu yöntemde çözüm 2 alt probleme ayrılarak sonuca ulaşmaktadır.



Şekil 5.3. Ters Kinematik

1. Alt Problem

Sistem diğer uzuvlarından bağımsız olarak ilk önce θ_1 açısının hesabı yapılır. Bu açının referansının X_0, Y_0, Z_0 'a göre olduğuna dikkat ediniz.



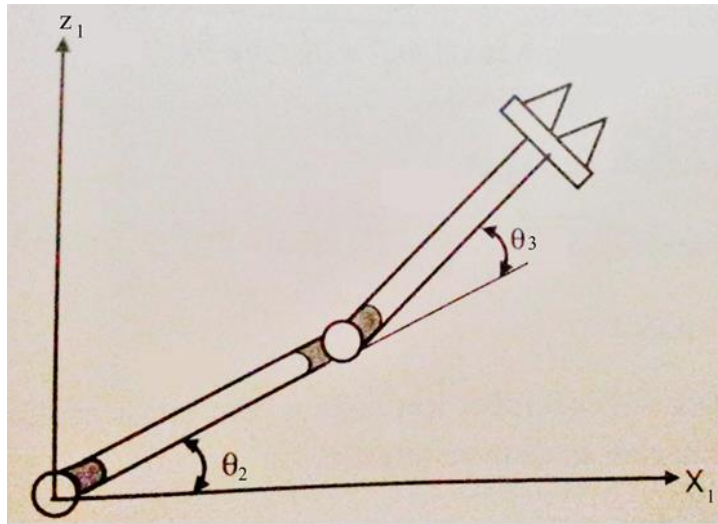
Şekil 5.4. Üstten Görünüş

Buradan θ_1 değeri aşağıdaki gibi olur.

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{P_y}{P_x} \right) \quad (5.2)$$

2. Alt Problem

İkinci ve üçüncü uzvu birlikte X_1, Y_1, Z_1 eksen takımına göre bağımsız analitik çözüm yapılır. X_0, Y_0, Z_0 ye göre verilen koordinatlar X_1, Y_1, Z_1 eksen koordinatlarına dönüşüm yapılarak verilir.



Şekil 5.5. X-Z Görünüş [33]

Buna göre,

$$D = \frac{(P_x/\cos(\theta_1))^2 + (P_z - d_1)^2 - a_2^2 - a_3^2}{2 \cdot a_2 \cdot a_1} \quad (5.3)$$

$$\theta_3 = \tan^{-1} \left(\frac{\pm \sqrt{1-D^2}}{D} \right) \quad (5.4)$$

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left(\frac{(P_z - d_1) \cdot \cos(\theta_1)}{P_x} \right) \pm \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{(P_z - d_1)^2 + (P_x/\cos(\theta_1))^2 - (a_3 \cdot \cos(\theta_3) + a_2)^2}}{a_3 \cdot \cos(\theta_3) + a_2} \right) \quad (5.5)$$

Olmaktadır. Bunu örnek ile irdeleyerek daha net görebiliriz.

ÖRNEK 1:

Uzuv uzunluğu $d_1 = 5\text{mm}$, $a_2 = 10\text{ mm}$ ve $a_3 = 12\text{ mm}$ verilen bir RRR manipülatörün $P_x = 10.40807\text{ mm}$, $P_y = 6.0091\text{ mm}$ ve $P_z = 23.3787\text{ mm}$ noktası için θ_1 , θ_2 ve θ_3 açılarını bulunuz.

ÇÖZÜM 1:

1.Alt Problem: θ_1 Açısı aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{P_y}{P_x} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{6.0091}{10.40807} \right) = 30^\circ$$

2.Alt Problem: θ_2 ve θ_3 Açıları aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\begin{aligned} D &= \frac{(P_x/\cos(\theta_1))^2 + (P_z - d_1)^2 - a_2^2 - a_3^2}{2 \cdot a_2 \cdot a_1} \\ &= \frac{(10.41/\cos(30))^2 + (23.3787 - 5)^2 - 10^2 - 12^2}{2 \cdot 10 \cdot 12} = 0.99278 \end{aligned}$$

$$\theta_3 = \tan^{-1} \left(\frac{\pm \sqrt{1-D^2}}{D} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{\pm \sqrt{1-0.99278^2}}{0.99278} \right) = \pm 7^\circ$$

$\theta_3 = \pm 7^\circ$ açısının pozitif veya negatif değerinin kosinüsü aynı olduğundan $\theta_3 = 7^\circ$ alalım.

$$\begin{aligned} \theta_2 &= \tan^{-1} \left(\frac{(P_z - d_1) \cdot \cos(\theta_1)}{P_x} \right) \pm \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{(P_z - d_1)^2 + (P_x/\cos(\theta_1))^2 - (a_3 \cdot \cos(\theta_3) + a_2)^2}}{a_3 \cdot \cos(\theta_3) + a_2} \right) \\ &= \tan^{-1} \left(\frac{(23.3787 - 5) \cdot \cos(30)}{10.40807} \right) \pm \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{(23.3787 - 5)^2 + (10.40807/\cos(30))^2 - (12 \cdot \cos(7) + 10)^2}}{12 \cdot \cos(7) + 10} \right) \end{aligned}$$

$\theta_2 = 56.82 \pm 3.82$ bulunur.

Buna göre 4 çözüm kümesi oluşur.

$$\zeta_1 = \{\theta_2 = 56.82+3.82 = 60^0, \theta_3 = 7^0\}$$

$$\zeta_2 = \{\theta_2 = 56.82+3.82 = 60^0, \theta_3 = -7^0\}$$

$$\zeta_3 = \{\theta_2 = 56.82-3.82 = 53^0, \theta_3 = 7^0\}$$

$$\zeta_4 = \{\theta_2 = 56.82-3.82 = 53^0, \theta_3 = -7^0\}$$

Bunlardan sadece ζ_2 ve ζ_3 kümesi robotun doğru konuma ulaşmasını sağlamaktadır. Robot manipülatörlerinin eklemlerinin yerleşiminden kaynaklanan farklı geometriler, çok karmaşık ters kinematik denklemleri oluşturmaktadır. Manipülatörlerin son üç eklemi bir noktada kesiştiğinde kolaylıkla ters kinematik çözüm gerçekleşirken, kesişmediğinde ise ters kinematik problem oldukça zor bir hal almaktadır. Ters kinematik problemlerde problemin zorluğundan birisi eklem yapısına bağlıdır. Döner eklem sayısı arttıkça problemin çözülmesi zorlaşır. Bu yöntemin amacı çözülmesi zor ve karmaşık ters kinematik denklemleri için alternatif çözüm yöntemi sunmaktır. RRR (üç döner mafsallı) yapısındaki bir manipülatörü R+RR olarak ayırıp 1.döner mafsallı eksenini 2 ve 3. döner mafsallı eksenlerine dönüşüm uygulayarak $(P_x \cdot \cos\theta_1)$ X_0, Y_0, Z_0 eksenini X_1, Y_1, Z_1 eksenine dönüştürülmüş olunur. Başka bir ifadeyle X_0, Y_0, Z_0 eksen takımı transformasyon uygulanarak X_1, Y_1, Z_1 eksenine yerleştirilmiş olunur.

Bu durumda yeni eksen takımı gerçek eksen takımına (X_0, Y_0, Z_0) göre d_1 mesafesi kadar yukarı taşınmış olunur. Bu yöntemin uygulanmasında d_1 mesafesinin çok küçük olduğu kabulü ile X_0, Y_0, Z_0 ekseninin X_1, Y_1, Z_1 eksenine taşınması yapılmıştır.

5.1.2.2. İkinci Yöntem

Bu yöntem ile eksenlerin yerini değiştirmeden çözümü vermektedir. Buna göre;

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{P_y}{P_x} \right)$$

$$F = \frac{P_x^2 + P_y^2 + (P_z - d_1)^2 + a_2^2 - a_3^2}{2 \cdot a_2 \cdot \sqrt{P_x^2 + P_y^2 + (P_z - d_1)^2}} \quad (5.6)$$

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left(\frac{P_z - d_1}{\sqrt{P_x^2 + P_y^2}} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{\pm \sqrt{1 - F^2}}{F} \right) \quad (5.7)$$

$$G = \frac{P_x^2 + P_y^2 + (P_z - d_1)^2 - (a_2^2 + a_3^2)}{2 \cdot a_2 \cdot a_3} \quad (5.8)$$

$$\theta_3 = \pm \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{1 - G^2}}{G} \right) \quad (5.9)$$

ÖRNEK 2:

Uzuv uzunluğu $d_1 = 5\text{mm}$, $a_2 = 10\text{ mm}$ ve $a_3 = 12\text{ mm}$ verilen bir RRR manipülatörün $P_x = 10.40807\text{ mm}$, $P_y = 6.0091\text{ mm}$ ve $P_z = 23.3787\text{ mm}$ noktası için θ_1 , θ_2 ve θ_3 açılarını bulunuz.

ÇÖZÜM 2:

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{P_y}{P_x} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{6.0091}{10.40807} \right) = 30^\circ$$

$$F = \frac{P_x^2 + P_y^2 + (P_z - d_1)^2 + a_2^2 - a_3^2}{2 \cdot a_2 \cdot \sqrt{P_x^2 + P_y^2 + (P_z - d_1)^2}}$$

$$= \frac{10.40807^2 + 6.0091^2 + (23.3787 - 5)^2 + 10^2 - 12^2}{2 \cdot 10 \cdot \sqrt{10.40807^2 + 6.0091^2 + (23.3787 - 5)^2}} = 0.9979$$

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left(\frac{P_z - d_1}{\sqrt{P_x^2 + P_y^2}} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{\pm \sqrt{1 - F^2}}{F} \right)$$

$$= \tan^{-1} \left(\frac{23.3787 - 5}{\sqrt{10.40807^2 + 6.0091^2}} \right) \pm \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{1 - 0.9979^2}}{0.9979} \right)$$

$\theta_2 = 56.82 \pm 3.82$ bulunur.

$$G = \frac{P_x^2 + P_y^2 + (P_z - d_1)^2 - (a_2^2 + a_3^2)}{2 \cdot a_2 \cdot a_3}$$

$$= \frac{10.40807^2 + 6.0091^2 + (23.3787 - 5)^2 - (10^2 + 12^2)}{2 \cdot 10 \cdot 12} = 0.9925$$

$$\theta_3 = \pm \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{1 - G^2}}{G} \right) = \pm \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{1 - 0.9925^2}}{0.9925} \right) = \pm 7^\circ$$

$$\zeta_1 = \{\theta_2 = 56.82+3.82 = 60^0, \theta_3 = 7^0\}$$

$$\zeta_2 = \{\theta_2 = 56.82+3.82 = 60^0, \theta_3 = -7^0\}$$

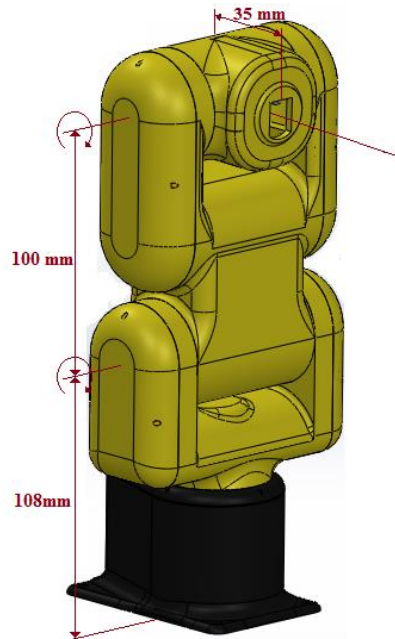
$$\zeta_3 = \{\theta_2 = 56.82-3.82 = 53^0, \theta_3 = 7^0\}$$

$$\zeta_4 = \{\theta_2 = 56.82-3.82 = 53^0, \theta_3 = -7^0\}$$

Her iki yöntemin karşılaştırmasını yaparsak, son çözüm yolumuzda her bir denklem içerisinde x, y ve z konumları mutlaka bulunmaktadır. Ancak ilk yöntemde z koordinatı yer almadığı için kontrol gerçekleştirilirken fazladan fonksiyon kullanılması gerekli kalmaktadır. Bu sebeple yazılım kontrolü yapıldığında son çözüm yöntemi temel alınarak fonksiyon yazılmasına dikkat edilmiştir.

5.2. Manipülâtör Tasarımı

Üç eksenli robot manipülâtörün tasarımını belirleyecek en önemli unsur taşıyacağı ağırlıktır. Kendi ağırlığı, hareket sırasındaki dinamik yükler ve motor ataleti göz önünde bulundurularak boyutlandırma ve motor seçimi yapılması gerekmektedir. Sonraki bölümde ele alınacak kontrolcü yazılımının gerçekleştirilebilmesi için rc servo tip motor kullanılmıştır. Motor seçimini yapmadan önce taslak bir model hazırlanması gerekmektedir. Bu modeli referans olarak başlangıç kütle ve mafsallar arası uzunlukları bir başlangıç koşulu olarak kullanıldı.



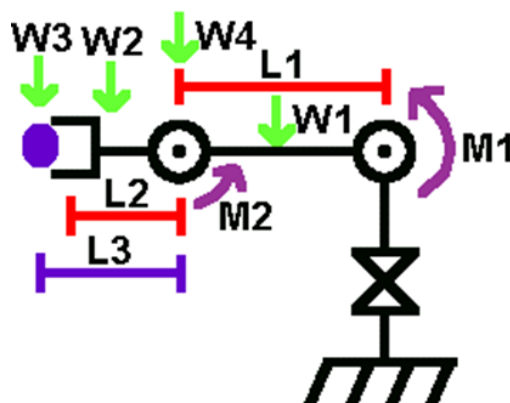
Şekil 5.6. Üç Eksenli Manipülâtör Modeli

Ucuza imal etmek için Tower Pro SG90 RC Mini Servo kütle ve tork değerlerine göre optimum tasarım yapılmıştır. Aşağıdaki tabloda kullanılan tüm ölçüler gösterilmektedir.

Unsur	Ağırlık (kg)	Uzunluk (cm)	Kütle Merkezi Uzaklığı (cm)
Bel (L ₀)	0,04168	10,8	8,15
Omuz (L ₁)	0,06226	10	4,7
Dirsek (L ₂)	0,0144	3,5	11
1. Motor (kg)	2. Motor (kg)	3. Motor (kg)	Nesne (kg)
0,009	0,009	0,009	0,01

5.2.1. Statik kuvvet hesabı

Eklemlere binecek kuvvetleri ve oluşturacakları momentlerin tespit edilmesi sayesinde minimal motor değerlerimizi tespit edebiliriz. Motorlar sadece robot kolunun kendi ağırlığını taşımakla kalmaz, aynı zamanda tutulacak cisminde hedefe güvenli bir şekilde ulaştırılmasını sağlayan önemli bir unsurdur. Taşınacak cismin ağırlığı ve atalet değerleri robotun hassasiyetliğinin ölçütünü belirleyecektir.



Şekil 5.7. Üç Eksenli Manipülatör için Serbest Cisim Diyagramı

İlk adım olarak en fazla uzunluğu gösterecek şekilde robot kolumuzun şekil 5.7 ‘deki gibi bir serbest cisim diyagramı çizilmiştir. Sonraki adımda aşağıdaki gibi bir moment kolu hesabı yapıldı;

0. Eklem için statik moment:

$$M_0 = 0$$

1. Eklem için statik moment:

$$\begin{aligned} M_1 &= (KMU_o \times W_1) + (L_1 \times W_4) + (KMU_d \times W_2) + (L_1 + L_3) \times W_3 \quad [kg.cm] \\ W_1 &= 0,06226 \text{ kg}, W_2 = 0,0144, W_3 = 0,01 \text{ kg}, W_4 = 0,009 \text{ kg} \\ M_1 &= (4,7 \times 0,06226) + (10 \times 0,009) + (11 \times 0,0144) + (10 + 3,5) \times 0,01 \\ M_1 &= 0,67 \quad [kg.cm] \end{aligned}$$

2. Eklem için statik moment:

$$\begin{aligned} M_2 &= (KMU_d \times W_2) + (L_3 \times W_3) \quad [kg.cm] \\ M_2 &= ((11 - 10) \times 0,0144) + (3,5 \times 0,01) \quad [kg.cm] \\ M_2 &= 0,0494 \quad [kg.cm] \end{aligned}$$

5.2.2. Hız ve hareket planlaması

Uç noktanın hız değerinin hesaplanması matematiksel olarak karmaşıktır. Ancak biz burada RC Servo motor kullandığımız için motorun en fazla zorlanacağı konuma göre maksimum hızı bulmaya çalıştık. Kolun en hızlı olacağı pozisyon kolların merkezden en uzak olacağı konum olacağından basitçe $\vartheta = \omega \cdot r$ formülünü kullanarak dairesel hızını bulabiliriz. J_0 eklemının devir sayısı ve uç noktanın merkeze göre olan uzaklığını bilmemiz yeterli olacaktır. Eğer diğer eklemlerde dönüş olsaydı bu vakit hızımız daha farklı olacak ve hesaplaması zorlaşacaktı bu yüzden sadece tek bir eklemi hareketli olduğunu ve merkez noktaya göre dönüşündeki hızının analizini buluyoruz:

$$\begin{aligned} \text{Uç Noktanın Hızı} &= \omega \cdot r = (2\pi r) \times rpm \\ rpm &= \frac{\text{devir sayısı}}{\text{dakika}} \end{aligned} \quad (5.10)$$

RC Servo motorların çoğu en fazla 180° açı değerine kadar dönebilmektedir. Genellikle katalog üzerinde belirtilen açısal hız değerleri $\frac{1}{\omega} = \frac{\text{Saniye}}{60^\circ}$ şeklinde olmaktadır. SG 90 Micro Servo Modeli bir motoru 5 cm'lik bir uzaklıkta 180° açı yol aldığı anda maksimum uç nokta hız değeri aşağıdaki gibi olacaktır.

(SG 90 Micro Servo için işletme hızı $0.12s/60^\circ$)

$$V = \frac{\omega \cdot r}{180^\circ} = \frac{60^\circ \times \pi \times 5 \text{ cm}}{180^\circ \times 0.12 \text{ s}} = 43,63 \text{ cm/s} = 0.4363 \text{ m/s} \text{ olacaktır.}$$

5.2.3. Dinamik kuvvet hesabı

Bu bölüme kadar olan kısımda robot kolun statik yani her zaman için durağan koşullarda üzerine etkiyen kuvvet değerlerine göre hesap yaptık. Ancak hareketli cisimlerin dönmeye karşı kütsel ve yüzey şeklini değıştirmeye çalışan kuvvetlere karşı da bir tepkisi olacaktır. Atalet kuvvetleri göz önünde bulundurarak dinamiksel tork ifadesi oluşturmamız gereklidir.

Kolaylık olması açısından robot kol uzuvlarını L uzunluğunda ve m kütsesinde ince çubuk olduğunu kabul ettik. Çubuğı merkez noktasından döndürmek istediğimizde oluşacak atalet momenti:

$$I_{\text{merkez}} = \frac{mL^2}{12} \quad (5.11)$$

Dönme eksenini çubuğun sonunda olduğundaki atalet momenti ise,

$$I_{\text{son}} = \frac{mL^2}{3} \quad (5.12)$$

Robotumuzun J_0 eklemi için I_{merkez} J_1 , J_2 için ise I_{son} atalet momentlerinin değıerleri kullanılır. Bu ifadelere göre dinamiksel tork ifademizi tanımlarsak;

$$\tau = \text{Atalet Momenti} \times \text{Açısal İvme}$$

Veya $\tau = I \cdot \alpha$ olmaktadır. İfadeyi daha açarsak;

$$\tau = (\text{Kütle} \times \text{uzaklık}^2) \times \left(\frac{\text{Açısal Hızdaki Değışim}}{\text{Zamandaki Değışim}} \right) \quad (5.13)$$

Burada,

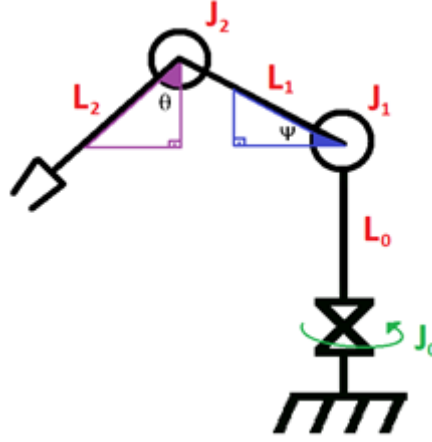
$$\text{Açısal Hızdaki Değışim} = \text{Son Açısal Hız} - \text{ilk Açısal Hız} = \omega_1 - \omega_0$$

$$\alpha = \frac{\omega_1 - \omega_0}{\Delta t} \quad (5.14)$$

Robotumuzu J_0 ekleminden 180° açı ile Sg 90 model servo motor ile 0,3 saniyede alacağı dinamiksel tork değıerini bulmak isteyelim. Başlangıç anındaki ($t_0 = 0$) açısal hızı $\omega_0 = 0$ olarak kabul edersek (yani ilk hızsız olarak harekete başlarsa) 0.3 saniye sonundaki açısal hız ve ivme değıerleri aşağıdaki gibi olmaktadır. (Sg90 model 180° 'yi 0.3s almaktadır)

$$w = \frac{\theta_1 - \theta_0}{\Delta t} = \frac{\pi}{t} = \frac{\pi}{0.3} = 10.47 \frac{\text{Rad}}{\text{s}}$$

$$\alpha = \frac{\omega_1 - \omega_0}{\Delta t} = \frac{10.47}{0.3} = 34.9 \frac{Rad}{s^2} \text{ olmaktadır.}$$



Şekil 5.8. Üç Eksenli Manipülâtörün Dinamik Analizi

Her bir kolun kütlesi sırasıyla m_0 , m_1 , m_2 ve her bir motorun kütlesi de j_0 , j_1 , j_2 olmak üzere kolları gidebileceği en uzak konuma kadar açarak atalet momentlerini hesaplarsak;

$$\begin{aligned} I_0 &= \frac{(m_1 + m_2 + j_1 + j_2)(L_1 + L_2)^2}{3} \\ I_1 &= \frac{(m_1 + m_2 + j_2)(L_1 + L_2)^2}{3} \\ I_2 &= \frac{(m_2)(L_2)^2}{3} \end{aligned} \quad (5.15)$$

Olmaktadır. Atalet değerleri dinamiksel tork formülünde yerine konarak hareketli bir cismi döndürecek tork değerini bulmuş olduk. Bazı durumlarda dinamik değerler statik değerlerden fazla olmaktadır. Bu durumda en büyük tork değeri tercih edilmelidir. Daha emniyetli bir sonuca ulaşılmak isteniyorsa ve değerleriniz ufak ise tork değerlerinin toplamı tercih edilir.

$$\tau_{motor} = \tau_{statik} + \tau_{dinamik} \quad (5.16)$$

Buradaki formüller yazılım kısmında kullanılarak bir hesap makinesi yapılacaktır. Bulunan değerler kullanılarak seçtiğimiz motorun uygunluğu tespit edilecektir.

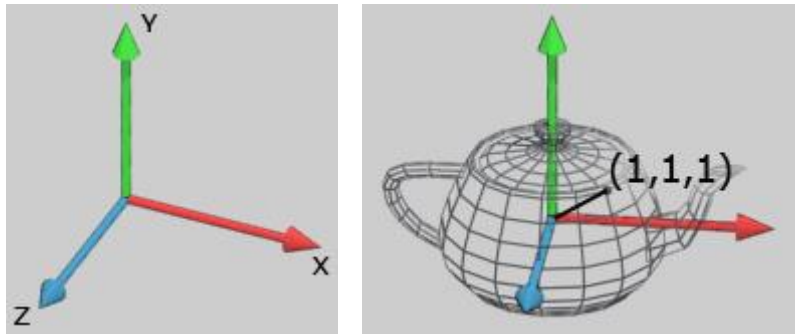
6. YAZILIM

Dördüncü sanayi devrimi ile birlikte kapsamlı ve entegre veri tabanlı kontrol sistemlerinin şirket yerinde önemi giderek artmaktadır. Sürecin izlenmesi, kontrol edilmesi, yönetilmesi veya raporlanması gibi işlemlerin tek bir çatı altında toplanması ile üretim ve imalat süreçleri kısalmaktadır. Bu bölümde bir robot kolun simülasyonu, gerçek zamanlı kontrol işlemi, hesaplama ve sonuçların çıktısını almayı gösteren bir yazılım anlatılacaktır.

C# ve WPF teknolojisinden yararlanarak hazırlayacağımız arayüzlerin nasıl oluşturulduğunu anlayabilmek için bazı kavramların bilinmesi gereklidir. C# nesneye yönelik programlama dili olmasına karşın 3B modellerin hareketi, konumu gibi önemli parametrelerin kendi içerisinde tanımlanmaya ihtiyacı bulunmaktadır. Bilgisayar grafiğinde bazı kavramları ilerleyen bölümlerde sık kullanacağımız için temel unsur aşağıdaki gibi ele alınmıştır.

6.1. Bilgisayar Grafiği

Bir bilgisayar ekranındaki pikseller iki boyuta sahiptir ancak görüntülemek istediğimiz nesne eğer üç boyuta sahipse bunu ancak derinlik algısı yaratarak oluşturabiliriz. Bu algıyı oluşturmak için ışıklandırma, konum için ise vektör uzayı kavramlarını bilmemiz gerekmektedir. Ayrıca nesnenin hareketini yani pikseller arası geçişlerin matematiğini bizlere matris çözümleri verecektir.



Şekil 6.1. Vektör Tabanı [34]

Matris dönüşüm zincirleri bir 3B nesnenin 2B ekran üzerinde temsil edilmesine izin vermeyi sağlar. Bir vektör uzayı ise lineer olan bağımsız vektörlerin sayısına göre tanımlanan matematiksel bir yapıdır. Buna vektör tabanı da denilmektedir. Örnek olarak

üç boyutlu bir uzay, üç taban vektörüne sahip iken 2B uzay 2 taban vektörüne sahip olur. Bu taban vektörleri uzayda tüm diğer vektörleri elde etmek için ölçeklenebilir ve birbirine eklenebilir. Vektör uzayı aslında çok geniş bir konudur ve bizim amacımız tüm bu başlıkları açıklamak değildir. Bizim hedefimiz gerçek bir özel vektör uzayındaki modelimizi, model uzayı ismi altında incelemek ve kabul edilmiş 3B koordinat sistemi ile temsil etmektir.

Şekil 6.1 ele alırsak tüm köşeler model uzayın orijinine göre yapılmıştır. Bu yüzden eğer biz model uzayda (1,1,1) koordinatında bir noktaya sahipsek, nerede olduğumuzu tam olarak biliriz. Her model kendi model uzayında gerçek ve hareketlidir, eğer istersek bu modelleri herhangi bir mekânsal ilişki içerisine sokabiliriz (Çaydanlığı masa üstüne koymak gibi).

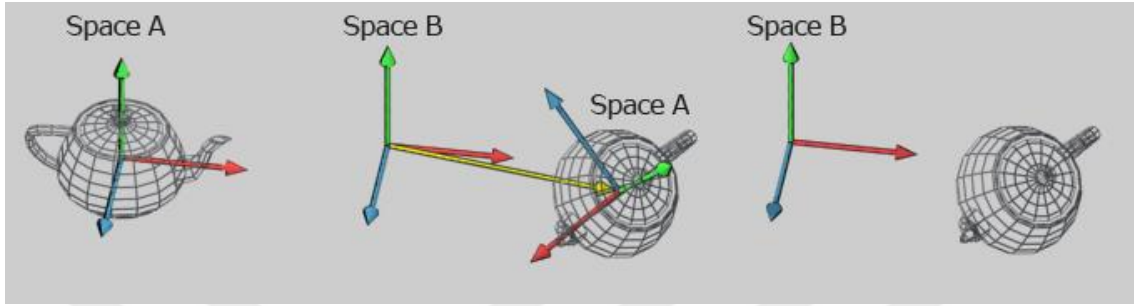
Bunları yapmak için ortak bir uzaya (genellikle World uzayı olarak isimlendirilir) onları dönüştürmeniz gereklidir. Bir vektörün, sadece koordinat sistemi içinde anlamı olduğunu anlamamız önemlidir. Biz uzay belirtemiyorsak herhangi bir noktayı tanımlayamayız. Modeller dışa aktarıldıktan (export) sonra tüm köşeler model uzayında tanımlanmış olur. Eğer bir objeyi içeri almak (import) istersek, onu istenilen konuma taşımamız gerekecektir. Bunu da nesnenin içindeki world uzayına yerleştireceğiz. Taşıma, döndürme ya da ölçeklendirmeyi (scaling) bir nesnenin transformasyonu olarak isimlendiriyoruz. Tüm nesneler ortak bir uzay (World Uzay) içerisinde dönüştürülmektedir. Onların köşeleri kendi world uzayına bağlı olacaktır.

6.1.1. Dönüşüm kavramı - transformation

Herhangi bir değişiklik için, vektör uzayındaki dönüşümü basitçe başka bir uzaydan görebiliriz. Vektör dönüşümlerinin en zor kısmı bitleridir (parçaları). Bu yüzden her birini açık ve anlaşılır yapmaya çalıştık.

Bir 3B vektör uzayında şekil 6.1'deki gibi 3 ortogonal eksen olduğunu hayal edeceğiz. Daima “aktif” bir uzaya sahip olmamız gerekiyor. Böylece bu uzayı her şeyin referansı gibi kullanabiliriz (Ya da hem geometri hem de diğer uzaylar için). Eğer her birisi kendi Model uzayında olmak koşuluyla 2 modelimiz varsa, onları ortak bir “aktif” uzayda tanımlayana kadar her ikisini çizemeyiz.

Aktif uzay kavramını ele alalım ve bu uzaya A ismi verdiğimiz kabulünü yapalım. Bu uzayda bir çaydanlık içeriyor olsun. Şimdi biz A uzayı içerisinde her şeyi yeni bir konum içerisine taşıyan bir dönüşüm uygulamak istiyoruz diyelim. Ancak eğer taşırsak bizim A uzayını, sonradan dönüştürülmüş A uzayını temsil edecek yeni bir aktif uzay tanımlamamız gerekecek. İşte bu yeni aktif uzayımıza B uzayı olarak isim veriyoruz.



Şekil 6.2. Vektör Uzayı [34]

Dönüşümden önce, A uzayındaki herhangi bir nokta tanımlıdır. A uzayının orijini başlangıç konumuna göre (şekil 6.2’de en soldaki). Dönüşüm uygulandıktan sonra tüm noktalar şimdi yeni aktif uzaydaki durumuna bağlıdır: B Uzayı (sağdaki). A uzayındaki herhangi bir işlemde B uzayında yeniden tanımlanır ve bu bir dönüşüm olur. Dönüşümden sonra A uzayı B uzayı içerisinde kayboluyor ya da daha kesin olarak onu B uzayında yeniden haritalandırıyor. Böylece herhangi diğer dönüşümleri uygulamamız için bizim başka yolumuz olmayacaktır (Dönüşümleri geri almadıkça ve A uzayını “aktif” uzay yapmadıkça).

Bunu görmenin diğer yolu, tüm bunları bir uzayda taban vektörleri ile hareket ettiğini varsayarsak ve A uzayını B uzayı üstünde mükemmel bir şekilde çakıştırılmış olduğunu düşündüğümüzde, dönüşümü yaptığımız zaman A uzayı B uzayından ayrılıyor ve A uzayındaki tüm şeyler onun ile hareketleniyor olacaktır. Tüm köşeler taşındıktan sonra bizim B uzayımızdaki konumlara göre tanımlı oluyor ve dönüşümü tamamlamış oluyoruz.

Bu durumda A uzayındaki işlemleri tekrar tersine dönüşüm yapmamız (Inverse Transformation) ile B uzayını elde etmemiz de mümkündür. Böylece B uzayı yeniden haritalanabiliyor olacak A uzayı içerisinde yeniden (ve bu noktaları biz “kaybederiz” B uzayında). Eğer hem dönüşümünü hem de onların tersini (inverse) biliyorsak daima yeniden 2 uzayı, birini diğerinden yeniden haritalandırabiliriz. Vektör uzayındaki

dönüşümleri ölçeklendirme (scale), öteleme (translation), döndürme (rotation) için kullanırız. Burada önemli bir nokta, tüm dönüşümler daima orijine göre tanımlıdır. Eğer 90^0 sol ve sonra öteleme yaparsak farklı bir şey eğer ilk öteleme sonra 90^0 döndürme yaparsak farklı şeyler yapmış oluruz.

6.1.2. Dönüşüm matrisi – transformation matrix

Biliyoruz ki bir dönüşüm bir uzaydan diğerine olan değişimdir ve bunu matematiksel olarak yapabiliriz. Eğer 3B uzayı olan bir dönüşümü diğerine temsil etmek istersek 4×4 'lük bir matrise ihtiyacımız olacaktır. Eğer satır vektörleri içerisindeyse sadece devrik (transpose) matris ve çarpılabilir vektörlere ihtiyacımız olacaktır. Dönüşümleri uygulamak amacıyla tüm vektörleri çarpılabilir yapmamız gereklidir. Eğer A uzayındaki vektörler ve dönüşümler A uzayının yeni konumu B uzayına göre tanımlanabiliyorsa, çarpmadan sonra tüm vektörler B uzayında sonradan tanımlanabilir olacaktır. Aşağıdaki yapı matris formunda genel bir dönüşümü temsil etmektedir.

$$\begin{bmatrix} \text{Transform_XAxis.x} & \text{Transform_YAxis.x} & \text{Transform_ZAxis.x} & \text{Translation.x} \\ \text{Transform_XAxis.y} & \text{Transform_YAxis.y} & \text{Transform_ZAxis.y} & \text{Translation.y} \\ \text{Transform_XAxis.z} & \text{Transform_YAxis.z} & \text{Transform_ZAxis.z} & \text{Translation.z} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- *Transform_XAxis* yeni uzaydaki X ekseninin oryantasyonu veya yönelimidir.
- *Transform_YAxis* yeni uzaydaki Y eksenin yönelimidir.
- *Transform_ZAxis* yeni uzaydaki Z eksenin yönelimi veya yönüdür.
- *Translation* ise yeni uzayın aktif uzaya göre olacağı konumu açıklar.

Bazen basit dönüşümler yapmak isteriz, dönme veya taşıma gibi; bu gibi durumlarda aşağıdaki gibi bazı basit formları kullanabiliriz.

6.1.2.1. Öteleme matrisi – translation matrix

Öteleme bir 3B vektörü uzayımızda taşımak istediğimiz bir konumu temsil etmektedir. Bir öteleme matrisi, aktif uzayda tam olarak döndürülmüş tüm eksenleri bırakır.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \text{Translation.x} \\ 0 & 1 & 0 & \text{Translation.y} \\ 0 & 0 & 1 & \text{Translation.z} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

6.1.2.2. Ölçekleme matrisi – scale matrix

Her bir eksen boyunca ölçeği tanımlayan bir 3B vektördür. İlk sütun okunduğunda yeni X eksenin nasıl olduğu görülebilir. Hala aynı yöne bakacak şekilde duruyor ancak Scale.x tarafından ölçeklendirilmiş şekildedir. Bunun yanı sıra tüm diğer eksenlerde de aynı şeyler olur. Ayrıca translation sütunlarının (en sağdaki siyah olan sütun) bu sefer 0 olduğuna dikkat edelim, bunun anlamı öteleme yapılmadığını gösteriyor.

$$\begin{bmatrix} \text{Scale.x} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \text{Scale.y} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \text{Scale.z} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

6.1.2.3. Dönme matrisi – rotation matrix

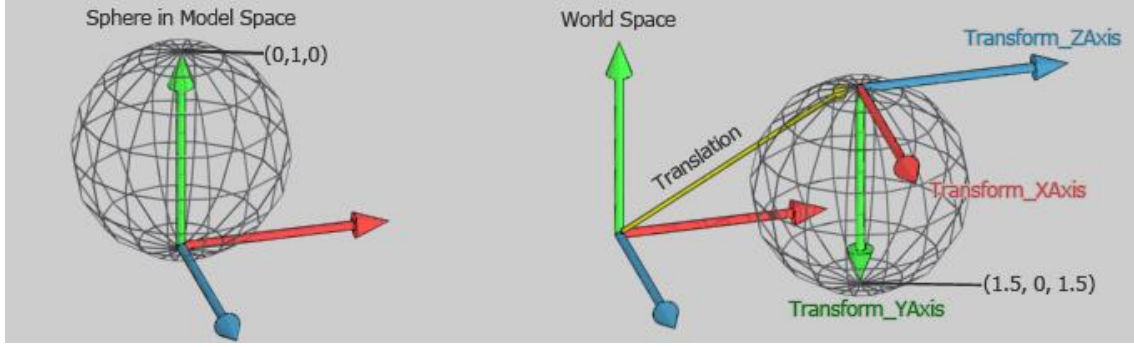
Teta, bizim dönüş yapmak için kullanmak istediğimiz açıdır. X eksenini etrafında dönüş yapıyor olacağımızdan ilk sütunun asla değişmeyecektir. Ayrıca tetanın 90° 'lık değişikliğinin nasıl Y eksenini Z eksenine içerinde ve Z eksenini de $-Y$ eksenine içerisinde yeniden haritalandırdığını görebiliyoruz.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

X eksenini dönme matrisi Y eksenini dönme matrisi Z eksenini dönme matrisi

Z ve Y eksenini için dönme matrisleri X eksenini etrafındaki dönme matrisiyle aynı davranışlara sahiptir. Biz burada sadece en çok kullanılan bazı matrisleri anlattık. Birbiri ardına matrisleri çarpım şekline getirerek onları zincir dönüşümü şeklinde yapabilirsiniz. Sonuç tam bir dönüşümü şifreleyen tek bir matris olacaktır. Dönüşüm bölümünde gördüğümüz gibi transformasyonları uygulamalı olarak kullanabilmemiz çok önemlidir. Matematikteki çarpımda yer değişim özelliği burada biraz farklıdır çünkü [öteleme x dönme] ile [dönme x öteleme] birbirinden farklıdır.

Bunu örnek ile ifade edersek, sütun vektörleri kullandığımızdan dolayı bir zincir dönüşümünü sağdan sola doğru okuyarak 90° dönüşü Y eksenini etrafında sola doğru ve sonra 10 birimlik ötelemeyi Z eksenine doğru bir zincir şeklinde sıralayabiliriz. Bu durumda [Öteleme 10 birim Z Boyunca] x [Dönme 90° Y Etrafında] = [Karma Dönüşüm] olmaktadır.



Şekil 6.3. Kürede Dönüşüm Matrisi Uygulaması [34]

Şimdi bazı sayılar vererek olayın nasıl çalıştığına bakalım. Şekil 6.5’deki küreyi ele alalım. Bunun dönüşümünü yapmak istiyoruz. Basitlik açısından kürenin üst noktasından dönüşümü uygulamaya başlayacağız. Model uzayında buranın konumu (0,1,0) şeklindedir. World uzayında nerede olacağını hesaplayacağız. Her şeyden önce ilk dönüşüm matrisini bulacağız. World uzayında kürenin nerede konumlandırılmış olduğunu söylemek istiyoruz. 90° saat yönü için Y eksenini etrafında döndürülecek sonra X eksenini etrafında 180° döndürülecek ve ardından (1.5, 1, 1.5) konumuna öteleneyecektir. Yani bunun anlamı dönüşüm matrisi şu şekilde olması gerekiyor:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1.5 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1.5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 180 & -\sin 180 & 0 \\ 0 & \sin 180 & \cos 180 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos 90 & 0 & \sin 90 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin 90 & 0 & \cos 90 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1.5 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1.5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

World uzayında X eksenini (kürenin) şimdi uzayın Z eksenini gibi bir doğrultuda yönlendiğini yani (0,0,1) olduğuna dikkat edin (Kırmızı X, Yeşil Y, Mavi Z eksenidir). Y eksenini şimdi ters çevrilmiş dolayısıyla (0,-1,0) şeklindedir. Z eksenini de X eksenini doğrultusuna (1,0,0) yönlenmiş şeklindedir. Sonuç olarak dönüşüm vektörü (1.5, 1, 1.5) olmaktadır.

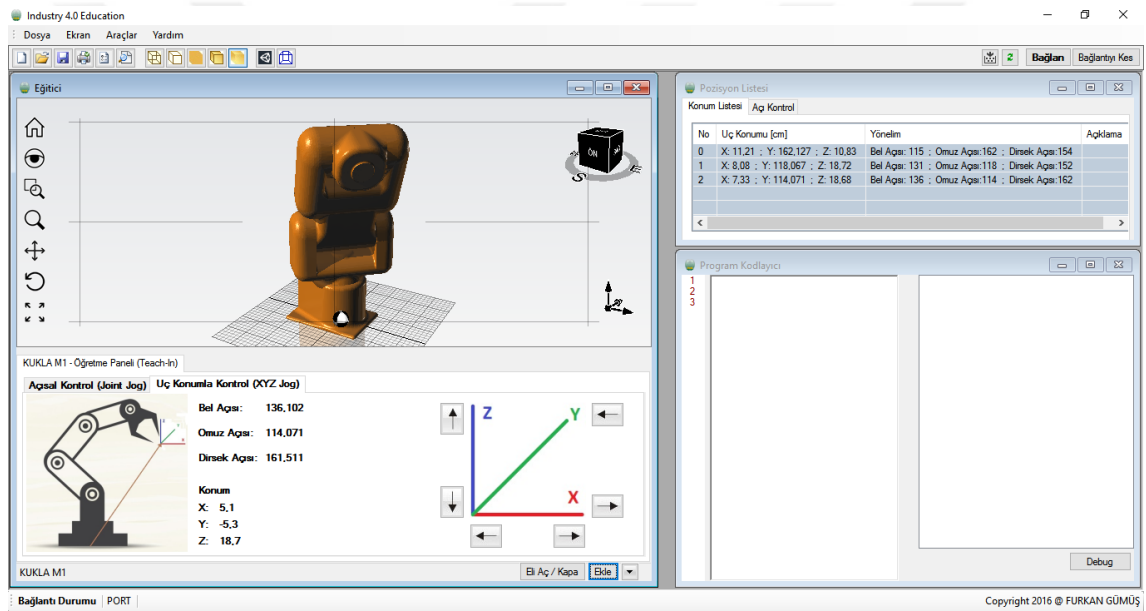
$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1.5 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1.5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.5 \\ 0 \\ 1.5 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Model uzayından World uzayı içerisine kürenin herhangi bir uç noktasını çarpım şeklinde sonucunu gösterebiliriz. Bizim uç noktamız (0,1,0) denersek yandaki şekilde ifade edilir. 4x4 matris kullanmak ve homojen koordinatlara ihtiyacımızın olması önemli bir husustur. Bu nedenle son bileşeni 1 olan 4 boyutlu vektöre gereksinimiz vardır.

Bu bölümdeki kavramları kullanarak simülasyondaki robot manipülatörün hareketlerini matrisler cinsinden ifade edeceğiz. Hesaplamış olduğumuz ileri ve ters kinematik matris yapıları ile birlikte kullanılarak C# yazılımında simüle edilebilirlik kazandırılmıştır.

6.2. Kontrolcü Yazılımının Oluşturulması

Bütünleşik imalat sistemlerini bir çatı altında toplayan ve öğrencilerin temel robot programlama bilgisini oluşturma amacıyla aşağıdaki gibi bir program hazırlanmıştır. Gerçek zamanlı kontrol, simülasyon ve elektronik kartlar ile seri haberleşebilme ve hatta robot programlama dili ile hazırlanmış (move master command) metni debug ve compiler edebilmektedir.

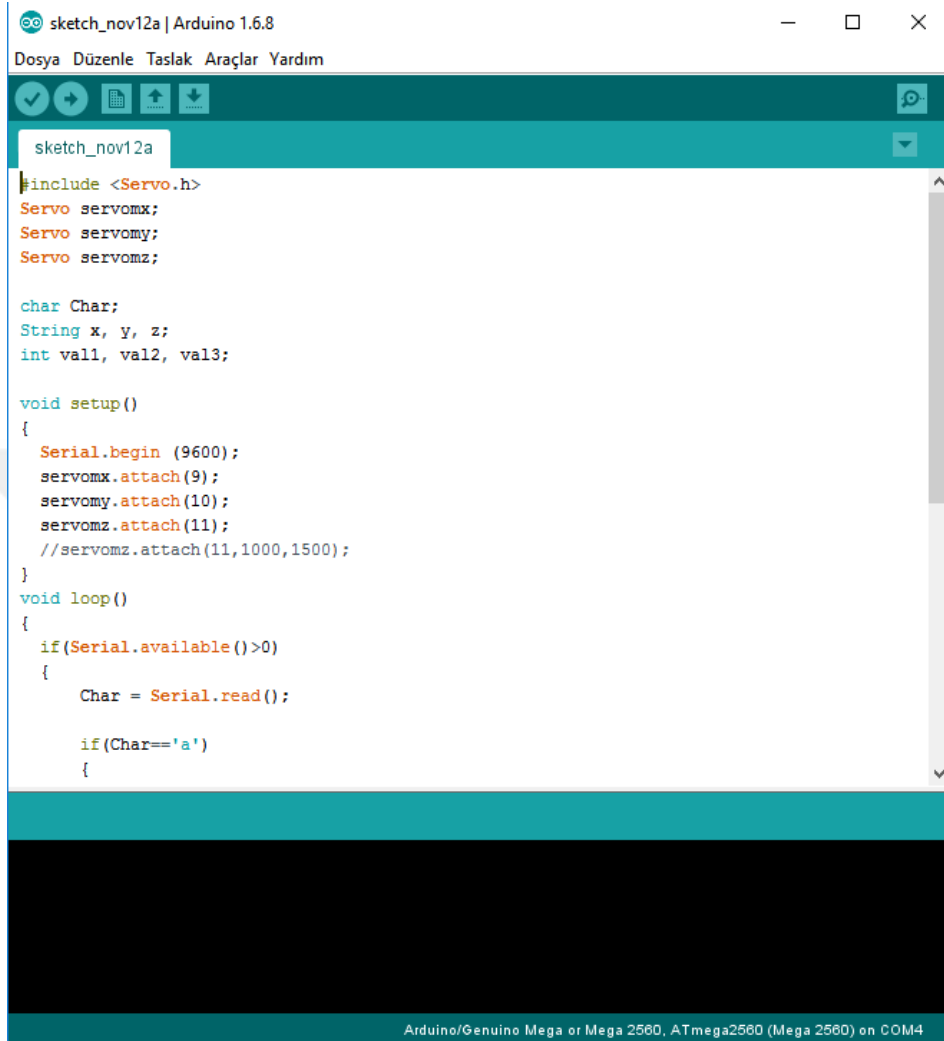


Şekil 6.4. Üç Eksenli Robot Kontrolü

Kontrolcü algoritması ve manipülatörün hareketini oluşturan temel unsur servo motorların çalışma mantığına bağlıdır. Kullandığımız rc servo motor Arduino prototip geliştirme kartı ile sürülmektedir. Kart ve program arasında haberleşmenin sağlanması için Visual Studio'da açtığımız bir winform içerisindeki araçlar menüsünden SerialPort eklendi ve Form1 penceresi içerisine aşağıdaki kodlar yazıldı.

```
public Form1()
{
    InitializeComponent();
    seriport = new SerialPort();
    seriport.BaudRate = 9600;
}
```

Aynı şekilde haberleşmeyi Arduino derleyicisi üzerinde de aşağıdaki şekilde gibi düzenlememiz gerekmektedir.



```
#include <Servo.h>
Servo servomx;
Servo servomy;
Servo servomz;

char Char;
String x, y, z;
int val1, val2, val3;

void setup()
{
  Serial.begin (9600);
  servomx.attach(9);
  servomy.attach(10);
  servomz.attach(11);
  //servomz.attach(11,1000,1500);
}

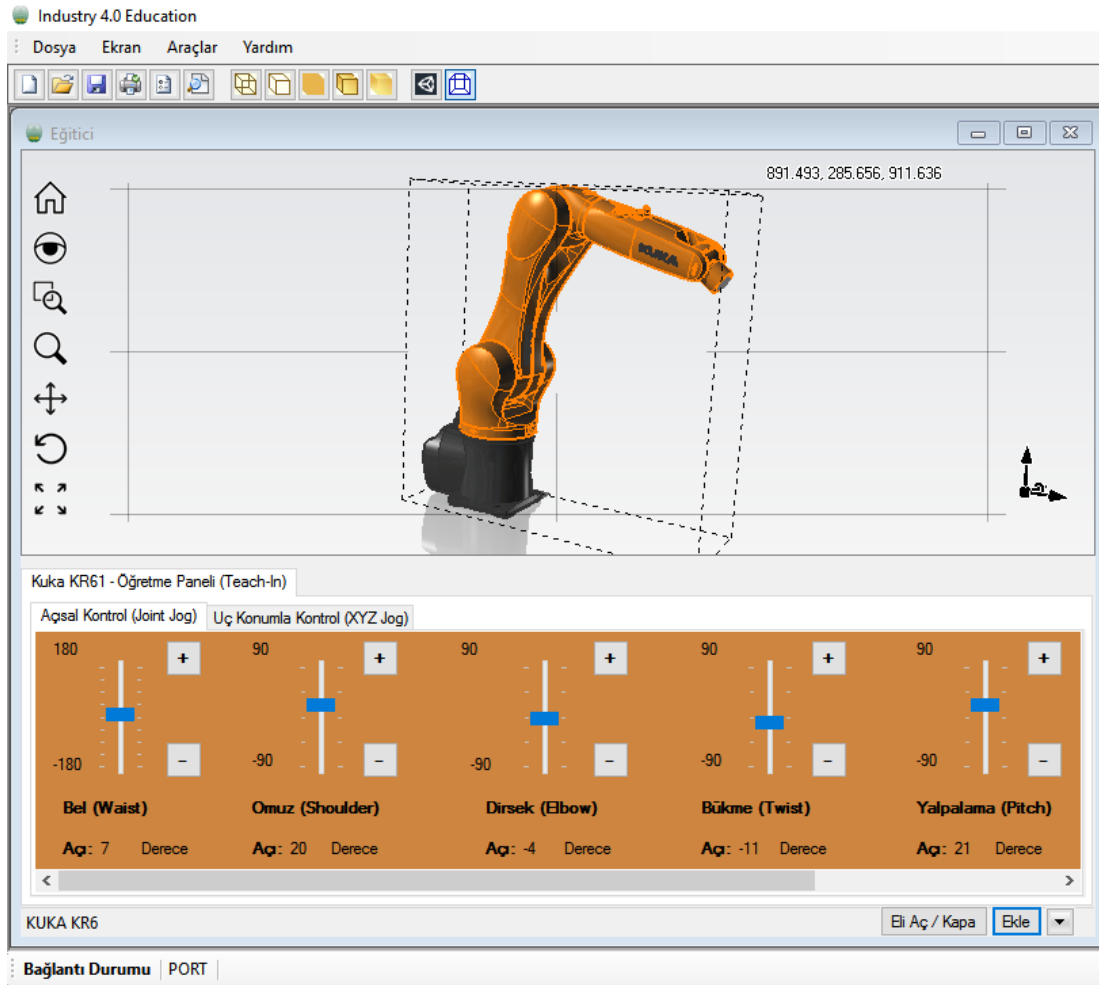
void loop()
{
  if(Serial.available()>0)
  {
    Char = Serial.read();

    if(Char=='a')
    {
```

Şekil 6.5. Arduino Kontrolcü Yazılımı

Servo motorların sürülebilmesi için hazır kütüphaneye sahip olan Arduino sayesinde bilmemiz gerekli olan tek şey motorun konumudur. Sahip olduğumuz motor 0-180° açı değerlerinde çalışabilmektedir. Şekil 6.9’da görüldüğü gibi kart ile yazılım arasında sadece int (tam sayı) değerinde bir karakter gönderilmesi pozisyonlama için yeterlidir. Ancak birden fazla motor olduğu için hangi motora hangi açı değeri gönderilecek bunu ayırt edecek bir şifreleme metodu oluşturmamız gereklidir. Bu amaçla gönderilecek koddan önce her seferinde bir char tipinde karakterin önceden gelmesini istiyoruz. Algoritmanın bu mantık ile kurulması, char tipinde şifreli bir kodun gönderilip başka bir ortamda çözülmesine benzer. Bu özellik farklı ortamlarda da işlevsel olarak kullanılabilir.

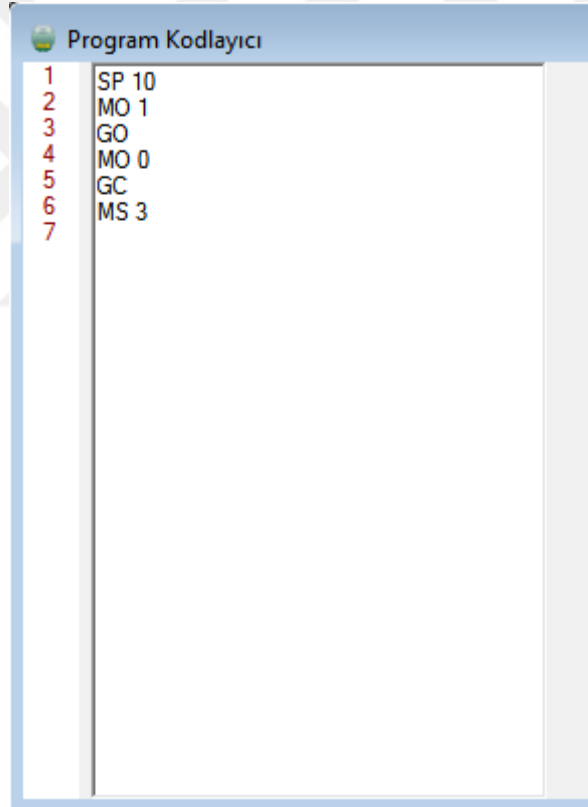
Ancak programı yazan kişinin ne tür bir şifre göndereceğini karşı tarafa da söylemiş olmalıdır. Bu algoritma sayesinde şifreli ve güvenli bir haberleşme de sağlanmış olmaktadır. Şekil 6.6'da görüldüğü gibi robotu istediğimiz pozisyona ulaştırmak için motorun açı değerini kullanıyoruz. Bu değer direk seri haberleşme üzerinden karta gönderip gerçek zamanlı hareket yapmasını sağlayabiliriz veya pozisyonları kaydederek daha sonra belirli sıralarda çağırabiliriz. Açı değerini kullanarak manipülâtörün uç konumunun koordinatlarını ileri kinematik hesaplama ile daha önceki bölümde nasıl bulunacağını göstermiştik. Şekil 6.4'de ise tam tersi gösterilmektedir. Uç noktanın koordinatları x, y ve z'de bir birim ilerlenerek değişmektedir. Bu hareketler sırasında motorların alacağı açı değerlerinin hesaplanması ters kinematik ile olmaktadır. 5. Bölümdeki ters kinematik işlemler kullanılarak bu açı değerlerini saptadık. Bunu hareketlerin simülasyon ekranında 3 boyutlu olarak gösterilmesini sağlamak için önceki bölümde anlatılan transfer matrisleri kullanılmıştır.



Şekil 6.6. KUKA KR6 Model Manipülâtörün Kontrolü

Burada kullandığımız her bir model Solidworks ortamında çizilmiştir. Kinematik denklemlerini çıkartabileceğimiz her modeli buraya yükleyebilir ve kontrol edebiliriz. Bu program bizlere esnek ve geliştirilebilir bir ortam sunmaktadır.

Robotun hareketini açısal kontrol (joint jog) veya uç konum (XYZ jog) hareketiyle sağlayabilmekteyiz. Şekil 6.4’de görüldüğü gibi her hareket sonrasında kaydet butonuna basarak konum ve yönelim bilgisini pozisyon bilgisi ekranında saklayabiliyoruz. Daha sonra bu verilen konumları kullanarak robotumuzu eğitebilir ve algoritma kurarak döngü içerisinde çalıştırılmasını sağlayabiliriz. Bu amaçla geliştirilmiş Move Master, Melfa Basic gibi robot programlama dilleri mevcuttur. Eğitim amaçlı bir uygulama olacağı için bu dilleri kullanabileceğimiz kütüphanelerin oluşturulması gerekmektedir. Move Master komutlarından bazılarını kullanarak detaylandıralım.



Şekil 6.7. Move Master Kodlaması

Örnek bir programlama ekranında, SP (speed) komutu robotun hareket hızını, MO (move) komutu kaçınıcı sıradaki pozisyona gidileceğini, MS (move straight) istenen konuma doğrusal hareket yapılacağını, GO (gripper open) ve GC (gripper close) ise elin açılıp kapatılacağı anlamına gelmektedir. Programın işleyişi yukarıdan aşağı doğru satır halinde

okuyarak gitmektedir. Ancak bu ekrana verdiğimiz kodların dışında yanlış bir karakter girilmesi, fazla veya düşük sayı verilmesi veya eksik kod yazılması durumunda sistemin bu hatayı belirlemesi gerekmektedir. Bu amaçla düzenli ifadeler (regex) kavramını kullanacağız.

Visual studio'da System.Text.RegularExpressions kütüphanesi eklenerek satırdaki ifadelerin düzenli olup olmadığının kontrolünü yapabiliriz. Örnek olarak,

```
Regex move = new Regex("^MO\\s*[0-9]*\\s*$");
Regex movestraight = new Regex("^MS\\s*[0-9]*\\s*$");
Regex equal = new Regex("^EQ\\s*[0-9]*\\s*,\\s*[0-9]*\\s*$");
Regex gripperopen = new Regex("^GO\\s*$");
Regex gripperclose = new Regex("^GC\\s*$");
```

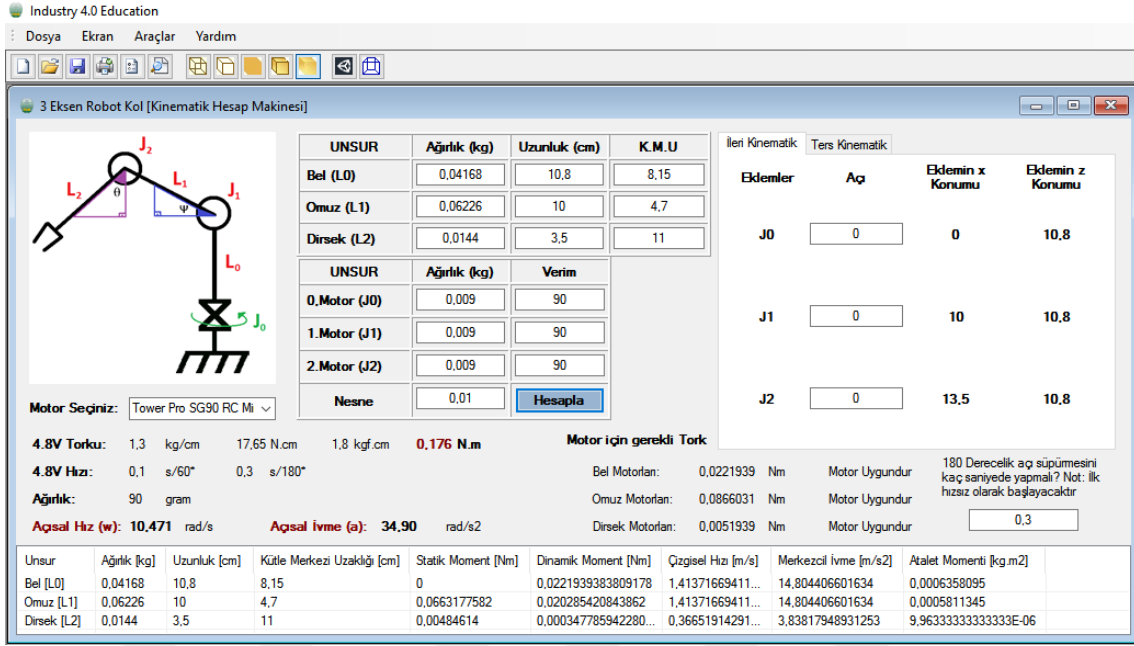
Burada ^ ifadesi MO ile başlayan kelimeyi tut demektir. \\s* ise çoklu satır aralığı ve [0-9]* ifadesi ise sıfır ile 9 rakamları arasında çoklu basamaklar halinde olabilecek karakterlerin eşleşmesini aramaktadır. \$ ifadesi ile aradığımız cümle veya kelime bütününün sonlandığını söylüyoruz.

```
if (move.Match(richTextBox1.Lines[i]).Success)
{
    foreach (Match isim in Regex.Matches(richTextBox1.Lines[i],
                                           "^MO\\s*[0-9]*\\s*$"))
    {
        MessageBox.Show(Convert.ToString(isim.Value));
        string[] dizi = Regex.Split(richTextBox1.Lines[i], " ");

        for (; j <= dizi.Length - 1; j++)
        {
            listBox1.Items.Add(dizi[j]);
        }
    }
}
```

Satır içerisinde bu veya buna benzer regex ifadelerini bulamaz ise o satır geçilmektedir. Geçilen her bir satır aslında debug edilmiş olduğundan hata analizi için benzer bir kodlama yapılmıştır. Yukarıdaki fonksiyonda eşleşme yapılan her bir kodun parçalara ayrılıp diziler içerisinde saklandığı gösterilmektedir. Bu fonksiyon içerisinde motorun nasıl bir hareket yapması gerektiğini anlatan kütüphaneler yazılmıştır.

Bölüm 5'de robot kinematiğini anlattığımızda hesaplamanın yazılım içerisinde yer alacağından bahsetmiştik. Program içerisinde 3 eksenli robot için statik, dinamik ve kinematik analizlerin yapılabileceği bir kodlama yapılmıştır. Şekil 6.8'deki değerler 5.bölümde tasarımını yaptığımız manipülatöre aittir.



Şekil 6.8. Üç Eksenli Manipülator için Hesap Makinesi

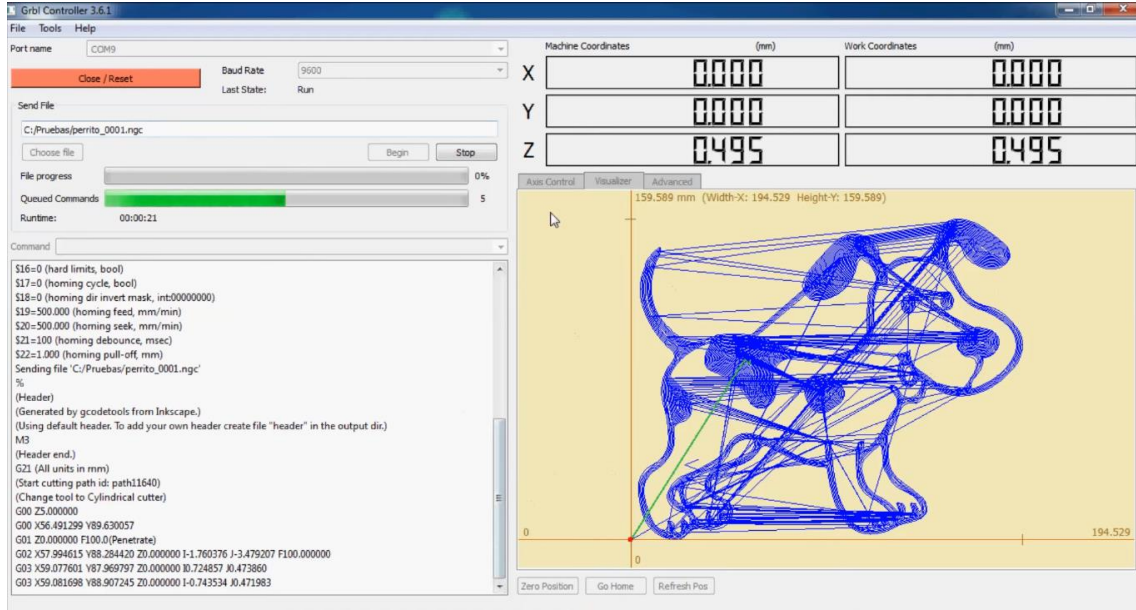
6.3. CNC Kontrolü

Robot manipülatorü programlamak için nasıl kendimiz kütüphane oluşturduk ve satırdaki ifadeleri anlamlandırdıysak CNC kontrolcüsü içinde aynı işlevi görecektir yazılım olması gereklidir. CNC makinelerde bir işlenecek parça için takımın alacağı yolu, hızı, koordinatları vb. bilgilerin anlamlandırıldığı programlama diline G kodlama denir. G kodlar günümüzden standart haline getirilmiştir.

Eğitim amaçlı basit bir CNC tezgah için Arduino kart ile uyumlu olarak çalışan açık kaynak kodlu, yüksek performanslı bir g-kodu ayrıştırıcı bu kapsamda kullanılmıştır. C dili ile hazırlanan GRBL denetleyicisi Arduino için anlamlandırılmış olan hex. dosyası halinde karta yüklememiz yeterlidir.

Grbl hex dosyasının içeriğinde G kodları anlamlandıran kütüphaneler bulunmaktadır. Ancak bu kütüphanelerin anlamlandırılabilmesi ve eyleme dökülebilmesi için bir kontrolcü yazılımına gereksinim vardır.

Bedava olarak dağıtılan Grbl controller 3.6.1. programını kullanarak cnc router kontrol edilmiştir.



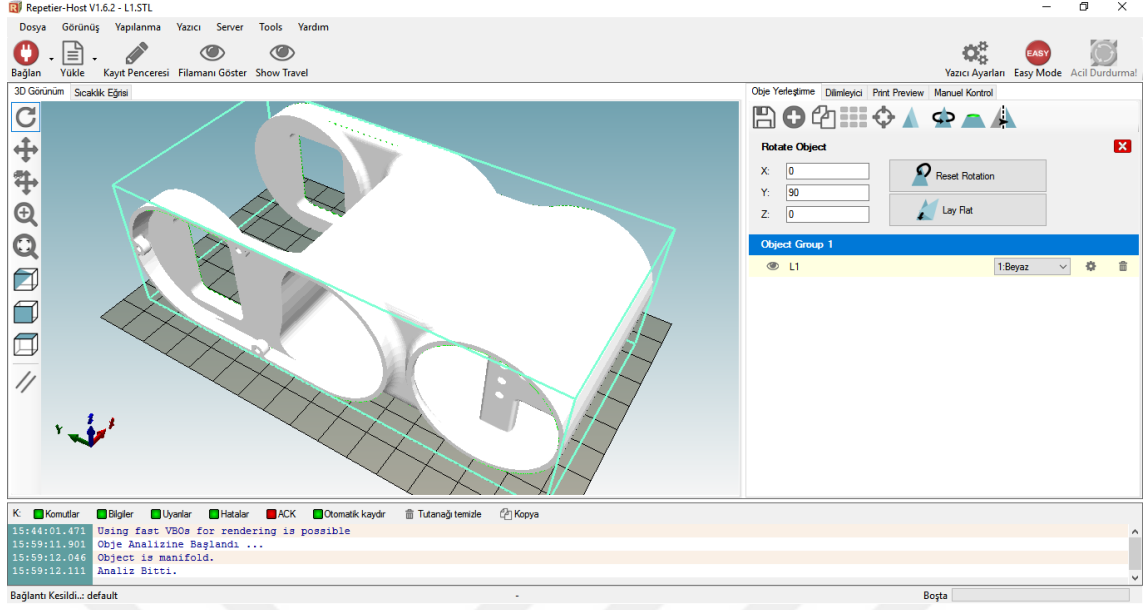
Şekil 6.9. Grbl Kontrolcü Programı

6.4. 3B Yazıcı Kontrolü

Üç boyutlu yazıcılarda tıpkı cnc makineler gibi yapılacak hareketleri anlamlandıran bir kontrolcüye ihtiyaç duymaktadır. CNC makinelerde oyma işlemi yapılırken 3B yazıcılarda tam tersi olarak yapım söz konusudur. Üstelik bu yapımın içi dolgu da olabileceğinden çok daha farklı ve karmaşık algoritmaya ihtiyaç duymaktadır. Baskısı alınacak model önce bir CAD ortamında çizilmeli daha sonra STL formatında kaydedilmesi gereklidir. Nesnenin yüzeyi üçgen mesh yapısı halinde matematiksel bir formda anlamlandırılır.

CAM programlarında iş parçasını bütün olarak değerlendirirken, burada nesnenin matematiksel dış formu ele alınmaktadır. Nesnenin iç yapısı dolu olabileceği gibi petek, kare örgülü, çizgi hat gibi formlar ile yüzdeli olarak boş da yapılabilmektedir. Tüm bu unsurlar için matematiksel algoritmalar geliştirilmiş olup açık kaynaklı yazılımlar halinde dağıtılmıştır.

Bu tez kapsamında açık kaynaklı ve kullanımı çok popüler olan Repetier programını kullanarak robot manipülatörün parçalarını ürettik.



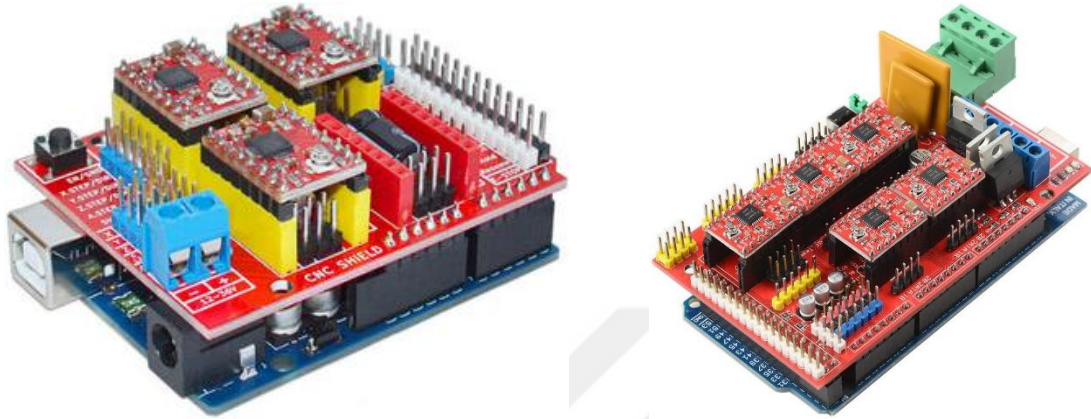
Şekil 6.10. Repetier Kontrolcü Programı



Şekil 6.11. Üç Eksenli Robot Manipülör

7. ELEKTRONİK

Tez kapsamında prototiplerin denenmesi için Arduino geliştirme kartlarından faydalanılmıştır. CNC ve 3B yazıcı için step motor sürücü devleri ile hazır halde bulunan kalkanlar Arduino birlikte kullanılmıştır.



Şekil 7.1. Solda CNC Shield ve Uno, Sağda Ramps 1.4v Shield ve Mega

Mikro adımlama özelliğine sahip Nema 17 step motorlarımız hassas konumlandırma yapmaya izin vermektedir. CNC ve özellikle 3B yazıcı için milimetrik hassasiyetten daha ufak toleranslarda hareket edebilme kabiliyeti önemlidir. Bu amaçla her iki kart (uno ve mega) için A4988 model mikro adım çift kutuplu bipolar step motor sürücüsü kartı kullanılmıştır. Sürücüde akım sınırlaması ve yüksek akım koruma özelliklerinin olması hem Arduino hem de step motorumuzu koruduğu için önemlidir. Kendi sınıfındaki kartlara göre daha yüksek akımda (8-35V ve her bobin için 2A) çalışıyor olması, özellikle cnc yönlendiricide yüksek güç gerektiren uygulamalarda önemli bir tercih sebebi olmaktadır. Tüm sistemin beslemesi için 12V 20A 240 Watt güç kaynağı kullanılmıştır.



Şekil 7.2. 12V Güç Kaynağı

8. SONUÇLAR

Hibrid yönlendiricide bağlama tablası için kullanılan 22.5x180'lik yüzey kaplama profili ağırlığından dolayı trapez vidaya fazladan yük bindirmiştir. Aynı işlevi 15x120'lik yüzey kaplama profili yan şekilde çoklu üniteler halinde bağlaması ile hem daha az maliyet (profil fiyatları arasında ciddi fark vardır) hem de sisteme daha az yük binmesi sağlanabilir. Böylece daha düşük torka sahip ucuz step motor kullanılabilir.

Spindle yerine kullanılan Mabuchi RS-775 model motor gayet yüksek performans göstermiştir. Tahta ve sert köpük işlemesi düşük ilerleme hızlarında başarılıdır. Daha iyi freze takımı ile yüksek ilerleme hızlarında etkili sonuç alabilmeyi vaat etmektedir. Mandlen takımı için daha uygun bağlantı şekilleri yapılarak iyileştirilebilmeye ihtiyaç bulunmaktadır. 12V DC güç kaynağı kullanıldığı için katalogdaki nominal 18V değerinde çalışılma koşulları sınanamamıştır. Motor 20V (en fazla 24V) çalışabilme kapasitesine sahiptir. Voltaj regülatörlü ve PWM kontrollü motor sürücü devresi kullanılarak torktan kayıp olmayacak şekilde verimli talaş kaldırma ve delme işlemleri yapılmaya müsaittir. Redüktör kullanılarak tork daha da yükseltilebilir ve uygun tasarım yapılarak mandlen takımı daha verimli yerleştirilebilir.

Simülasyonda kullanılan modellerin uzantılarına göre yüklenme süreleri değişken olduğu gözlemlendi. Stl uzantısına sahip çizimler daha hızlı açılırken step uzantılı dosyaların yüklenmesi yaklaşık 130 saniye daha uzun sürmektedir. Step uzantılı modellerin görüntüleri daha canlı ve gerçekçi olurken stl uzantılı modellerde bazı görünüm özellikleri eksik çıkmaktadır. Yaptığımız modellerin çıktısını alırken global bir koordinat tanımlamamız gerekmektedir. Aksi halde çizim uzayındaki yerel koordinatlar simülasyon uzayımızda farklı doğrultulara düşebilmektedir.

KAYNAKLAR / REFERENCES

- [1] Endüstri 4.0, <https://goo.gl/wGkcqx> (06.01.2017)
- [2] CNC Router, <https://goo.gl/M5ua1D> (06.01.2017)
- [3] CNC Router Tasarım Modelleri, <https://goo.gl/EroorK> (06.01.2017)
- [4] Sabit Köprülü Tasarım, <https://www.muhendisbeyinler.net/cnc-router-secimi> (06.07.2017)
- [5] Gezer Köprülü Tasarım Resmi, <https://www.muhendisbeyinler.net/wp-content/uploads/2016/06/shg0609-wo-sm.jpg> (06.07.2017)
- [6] 8 Kanallı 30x30 Sigma Profil Özellikleri, <https://goo.gl/SQ3SQw> (06.01.2017).
- [7] 22.5x180'lik Yüzey Kaplama Profil Özellikleri, <https://goo.gl/HCuO2g> (06.01.2017)
- [8] Makine Elemanları ve Konstrüksiyon Örnekleri, Fatih C. Babalık, syf. 230, 3.Baskı
- [9] Aktarma ve Bilyeli Vida Resimleri, <https://www.muhendisbeyinler.net/bilyali-vida-ile-aktarma-vidalarinin-farki/> (06.01.2017)
- [10] Ball&Lead Screws, <http://www.thomsonbsa.com/> (06.01.2017)
- [11] Bhandari, V. B. (2007), Design of Machine Elements, Tata McGraw-Hill, ISBN 978-0-07-061141-2. Sayfa 202
- [12] Shigley, Joseph E.; Mischke, Charles R.; Budynas, Richard Gordon (2003), Mechanical Engineering Design (7th ed.), McGraw Hill, ISBN 978-0-07-252036-1. Sayfa 400.
- [13] Bhandari, V. B. (2007), Design of Machine Elements, Tata McGraw-Hill, ISBN 978-0-07-061141-2. Sayfa 203.
- [14] Bhandari, V. B. (2007), Design of Machine Elements, Tata McGraw-Hill, ISBN 978-0-07-061141-2. Sayfa 204.
- [15] Standart Makine Elemanları, MEGEP, 2012
- [16] Cıvata-Somun Bağlantıları, Prof.Dr. İrfan Kaymaz
- [17] Sökülebilir Birleştirme Elemanları, MEGEP, 2006
- [18] Lead Screws vs. Ball Screw, Helix Linear Technologies, goo.gl/lIsFuW (09.01.2017)

- [19] UP Serisi Rulmanlı Yatak Resmi, <https://goo.gl/ie5hkx> (09.01.2017)
- [20] Kramayer ve Pinyon Resmi, <https://goo.gl/W3uuaG> (09.01.2017)
- [21] Lineer Kızak ve Araba Resmi, <https://goo.gl/rJHmRf> (09.01.2017)
- [22] Alt Destekli Mil Resmi, <https://goo.gl/WrK1D1> (09.01.2017)
- [23] Nema Step Motor Resmi, <https://goo.gl/DsNTyW> (09.01.2017)
- [24] Flexi Kaplin Resmi, <https://goo.gl/eT0S9i> (09.01.2017)
- [25] Mabuchi RS-775 Motor Kataloğu, http://61.114.190.123/cgi-bin/catalog/e_catalog.cgi?CAT_ID=rs_775vcwc (09.01.2017)
- [26] CNC Operatörünün El Kitabı, Makine Yüksek Mühendisi Hamit ARSLAN
- [27] Freze Çakısı Ürün Kataloğu, Engineering Supply Company Ltd., İskoçya, 2017
- [28] Akkurt, A., (1985) Talas Kaldırma Yöntemleri ve Takım Tezgâhları, Birsen Yayınevi, İstanbul
- [29] Krom Kaplı Milin Özellikleri, <https://goo.gl/dqTG8I> (09.01.2017)
- [30] 304 Kalite Paslanmaz Çeliğin Özellikleri, <https://goo.gl/trJ3nH> (09.01.2017)
- [31] Demirbaş, Y.K, Arlı, B., (2015) Uygulamalarla 3 Boyutlu Yazıcı Yapımı ve Kullanımı, Abaküs Kitap Yayın Dağıtım Hizmetleri, ISBN: 978-605-9129-02-2
- [32] Sarf Malzeme Resmi, <https://goo.gl/ZsnE91> (09.01.2017)
- [33] Bingöl, Z., Küçük, S., (2005) Robot Tekniği I, Birsen Yayınevi, ISBN: 975-511-424-6
- [34] Bilgisayar Grafiği Kavramı, <https://www.muhendisbeyinler.net/bilgisayar-grafigi-nedir-ve-matris-kavrami> (09.01.2017)

EKLER

EK 1. Mabuchi Motor Kataloğu



RS-775VC/WC

MABUCHI MOTOR

Carbon-brush motors



OUTPUT:9.0W-300W (APPROX)

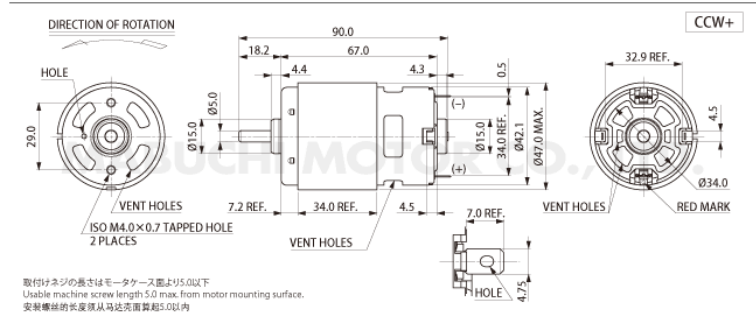
WEIGHT: 383g (APPROX)

Typical Applications :Power Tools > Drill / Garden Tool / Circular Saw

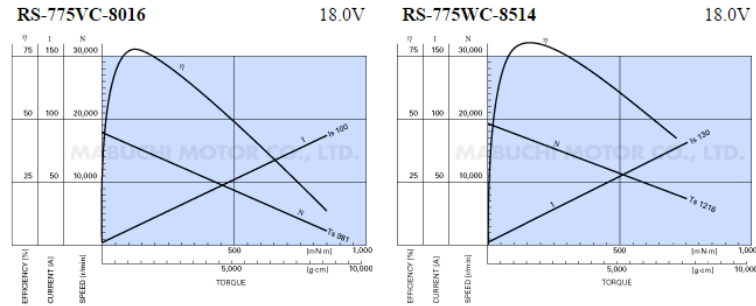
*By clicking the "MODEL", you can display the Performance Chart Simulation.

MODEL		VOLTAGE		NO LOAD		AT MAXIMUM EFFICIENCY				STALL		
		OPERATING RANGE	NOMINAL	SPEED	CURRENT	SPEED	CURRENT	TORQUE	OUTPUT	TORQUE	TORQUE	CURRENT
			V	r/min	A	r/min	A	mN·m g·cm	W	mN·m	g·cm	A
RS-775VC	8016(*1)	6 - 20	18	18000	2.20	15680	14.8	127 1292	208	981	10000	100
RS-775WC	8514(*1)	6 - 20	18	19500	2.70	17040	18.7	153 1561	273	1216	12396	130
	9013(*1)	6 - 18	18	21000	2.80	18520	20.9	153 1560	296	1295	13201	156

(*1) CCW shifted commutation (CCW+)



UNIT: MILLIMETERS



EK 2. Freze Çakısı Kataloğu



makina-takım endüstrisi a.ş. Turkey

YÜKSEK HIZ ÇELİĞİ KALİTESİNDEKİ FREZE BİÇAKLARININ İŞLEYECEĞİ MALZEME ÇİNSİNE GÖRE TAKIM TİPLERİ VE ÇALIŞMA DEĞERLERİ

V= Kesme hızı (m/dak)

Sz= Diş başına ilerleme (mm/diş)

S= İlerleme (mm/dak) = Sz.n.z.

z= Frezenin diş sayısı

n= Frezenin devir sayısı (dev./dak.)

Talaş Kaldırılan Malzeme Cinsi	Freze Malzemesi	Vals; Vals-Alın Freze			Kanal Freze			Parmak Freze		
		V	Sz	Tip	V	Sz	Tip	V	Sz	Tip
Alaşımsız Çelikler 500 N/mm ² 'ye kadar	HSS	16...20	0,20	N	16...20	0,12	N	16	0,05	N
	HSS-Co	30...40	0,2...0,25		20...25	0,10..0,16		30...40	0,08..0,12	
Alaşımsız ve alaşımlı çelikler 800 N/mm ² 'ye kadar	HSS	14...16	0,16	N	14...16	0,10	N	15	0,04	N
	HSS-Co	27...33	0,2...0,25		16...20	0,10..0,12		27...23	0,05..0,10	
Alaşımsız ve alaşımlı çelikler 1000 N/mm ² 'ye kadar	HSS	11...14	0,12	N-S	11...14	0,08	N-S	13	0,03	N-S
	HSS-Co	20...26	0,18..0,22		12...16	0,08..0,10		20...26	0,03..0,08	
Alaşımsız ve alaşımlı çelikler 1300 N/mm ² 'ye kadar	HSS	8...11	0,06	S	8...11	0,05	S	11	0,03	S
	HSS-Co	13...15	0,09..0,15		10...12	0,05..0,07		12...14	0,03..0,08	
Alüminyum alaşımları (yumuşak)	HSS	300	0,12	Y	280	0,12	Y	300	0,04	Y
	HSS-Co	300	0,15		300	0,12		300	0,08	
Alüminyum alaşımları (orta, sert)	HSS	220	0,12	N-Y	200	0,10	N-Y	220	0,04	N-Y
	HSS-Co	240	0,12		220	0,10		240	0,06	
Alüminyum alaşımları (Sert)	HSS	180	0,10	N-Y	160	0,10	N-Y	180	0,04	N-Y
	HSS-Co	200	0,10		180	0,10		200	0,05	
Kır döküm 200 HB'ye kadar	HSS	12...14	0,25	N	12...14	0,20	N	15	0,04	N
	HSS-Co	22...26	0,2...0,25		14...20	0,20		22...26	0,03..0,16	
Kır döküm 200 HB'den yukarı	HSS	8...12	0,16	S	8...12	0,10	S	12	0,03	S
	HSS-Co	12...18	0,15..0,20		8...12	0,10		12...18	0,03..0,1	
Temper döküm 200 HB'ye kadar	HSS	14...18	0,20	N	14...18	0,16	N	17	0,04	N
	HSS-Co	16...20	0,20		16...20	0,20		20	0,04	
Çelik döküm 700 N/mm ² 'ye kadar	HSS	11...14	0,16	N(S)	11...14	0,16	N(S)	15	0,04	N
	HSS-Co	12...18	0,15..0,20		11...14	0,20		18	0,05	
Pirinç (yumuşak)	HSS	40	0,20	Y	36	0,16	Y	36	0,06	Y
	HSS-Co	40-60	0,15..0,20		40	0,20		40	0,06	
Pirinç - Bronz (sert)	HSS	32	0,16	N	32	0,12	N	32	0,06	N
	HSS-Co	30...36	0,16		36	0,20		36	0,06	

Yukarıdaki tablo değerleri;

- Homojen yapıya sahip malzemeler için,
- Stabil makina ve stabil bağlama durumlarında,
- İyi soğutma yapılması halinde,
- Takımın iş parçası eksenine dik olması halinde, referans değerleri olarak verilmiştir.

EK 3. UP08 Rulmanlı Yatak

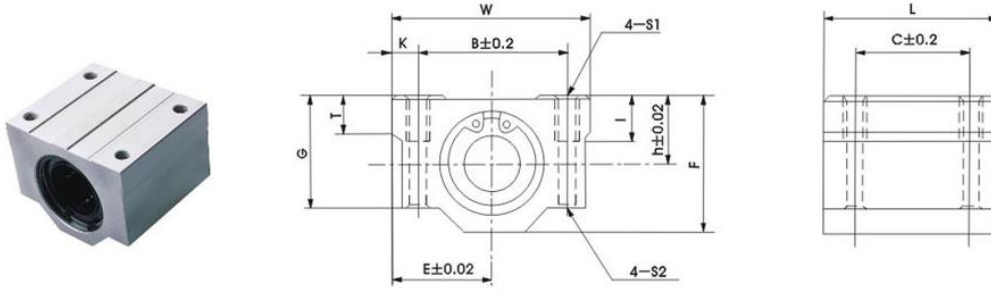
轻型P 系列带座轴承表

型号	孔径d (mm)	外形尺寸(mm)									重量 (KG)	价格 (元)	备注
		A	H	E	F	S	D	B	L	K			
P08	8	15	29	42	55	5	27	13	15	5	0.04	13	
P000	10	18	35	52	67	6	33	16	19	6.5	0.08	15	
P001	12	19	38	56	71	6	38	16	19	6.5	0.09	15	
P002	15	22	43	62	80	7	42	16	20	6.5	0.12	20	
P004	20	28	55	80	100	9.5	54	20	25	10	0.22	25	
P005	25	32	62	90	112	10	60	20	25	10	0.28	28	
P006	30	37	71	106	132	11	67	26	30	12.5	0.4	32	

轻型FL 系列带座轴承表

型号	孔径d (mm)	外形尺寸(mm)						重量 (KG)	价格 (元)	备注
		E	F	S	D	L	K			
FL08	8	36.5	48	4	27	13	5	0.04	13	
FL000	10	45	60	6	36	16	7	0.05	15	
FL001	12	48	63	6	38	16	7	0.08	15	
FL002	15	53	66	7	42	19	7	0.1	20	
FL004	20	70	90	8	55	23	10	0.19	25	
FL005	25	75	95	8	60	24	10	0.22	28	
FL006	30	85	112	9	70	26	13	0.32	32	

EK 4. SCE8UU Lineer Rulman



型 号 MODEL NO.	轴 径 SHAFT DIAMETER	主 要 尺 寸 MAIN DIMENSIONS							安 装 尺 寸 Mounting dimension						重 量 WEIGHT (Kg)
		H	E	W	L	F	G	T	B	C	K	S1	S2	I	
SCE 8 UU	8	11	17	34	30	22	18	6	24	18	5	M4	3.4	8	0.052
SCE 10 UU	10	13	20	40	35	26	21	8	28	21	6	M5	4.3	12	0.092
SCE 12 UU	12	15	22	44	39	30	24.5	8	33	26	5.5	M5	4.3	12	0.120
SCE 16 UU	16	19	25	50	44	38.5	32.5	9	36	34	7	M5	4.3	12	0.200
SCE 20 UU	20	21	27	54	53	41	35	11	40	40	7	M6	5.2	12	0.27
SCE 25 UU	25	26	38	76	67	51.5	42	12	54	50	11	M8	7	18	0.600
SCE 30 UU	30	30	39	78	76	59.5	49	15	58	58	10	M8	7	18	0.776
SCE 40 UU	40	40	51	102	90	78	62	20	80	60	11	M10	8.7	25	1.590
SCE 50 UU	50	52	61	122	110	102	80	25	100	80	11	M10	8.7	25	3.340

EK 5. NEMA 17 Serisi Adım Motorların Özellikleri

Model	Step Angle (deg)	Motor Length (mm)	Rated Current (A)	Phase Resistance (Ohm)	Phase Inductance (mH)	Holding Torque (N.cm)	Detent Torque (N.cm)	Rotor Inertia (g.cm2)	Lead Wire (No)	Motor Weight (g)
17HS24 08	1.8	28	0.6	8	10	12	1.6	34	4	150
17HS34 01	1.8	34	1.3	2.4	2.8	28	1.6	34	4	220
17HS34 10	1.8	34	1.7	1.2	1.8	28	1.6	34	4	220
17HS34 30	1.8	34	0.4	30	35	28	1.6	34	4	220
17HS36 30	1.8	34	0.4	30	18	21	1.6	34	6	220
17HS36 16	1.8	34	0.16	75	40	14	1.6	34	6	220
17HS44 01	1.8	40	1.7	1.5	2.8	40	2.2	54	4	280
17HS44 02	1.8	40	1.3	2.5	5	40	2.2	54	4	280
17HS46 02	1.8	40	1.2	3.2	2.8	28	2.2	54	6	280
17HS46 30	1.8	40	0.4	30	28	28	2.2	54	6	280
17HS84 01	1.8	48	1.8	1.8	3.2	52	2.6	68	4	400
17HS84 02	1.8	48	1.3	3.2	5.5	52	2.6	68	4	400
17HS84 03	1.8	48	2.3	1.2	1.6	46	2.6	68	4	400
17HS86 30	1.8	48	0.4	30	38	34	2.6	68	6	400

EK 6. 304 Kalite Paslanmaz Çelik (Trapezoidal Vida) - X5CrNi18-10

Usine productrice/Hersteller/Manufacturer Ugine Avenue Paul Girod - CS 90100 73403 Ugine Cedex France			INSPECTION CERTIFICATE 3.1 CERTIFICAT DE RECEPTION 3.1 ABNAHMEPRUEFZEUGNIS 3.1 EN 10204 / 3.1						UGITECH Providing special steel solutions								
Numéro certificat/Nummer/Number 81664597 000010			Ordre de fab. / Auftrag / Prod. Order A1624TX63000			N° coulée / Schmelzen Nr / Heat N° 617071			N° lot MM / Chargen / Batch 1624TX6300								
24		90		T° C		Limite d'élasticité Streckgrenze Yield Strength 0,2% 1% Mpa Mpa		RM Zugfestigkeit Tensile Mpa		Allongement Bruchdehnung Elongation A5D A4D % % 30 30		Striction Einschnürung Red area % 40		Dureté-Haerte-Hardness HB HV HRC			
13		Min Max Min Max		20 20		205		288		42 44		71		209		< 22	
N° prélèvement Probenummer Test number BJ42			1201 L			20			469			71			209		
A l'état de Référence / treatment on test sample / Probestreifenbehandlung			14			25			26A			26B			27		
Taux de corroyage Forging ratio Verschmiedungsgrad 121,3			101			Type Form Type			T° C			Sens Richtung Direction			Min		
A l'état de livraison / Lieferzustand / As delivered Solut° annealed & cold worked			13			31			33			32			95		
A l'état de Référence / treatment on test sample / Probestreifenbehandlung			14			31			33			32			95		
Résilience-Kerbschlagzähigkeit-Notch Toughness			14			Type Form Type			T° C			Sens Richtung Direction			Min		
Valeurs individuelles Einzelwerte Individual values			35			Moyenne Mittelwerte Average			36			Expansion latérale Seitliche Breitung Lateral Expansion					
180-175-186			J			180			180			91					
ANTIMIXING TEST PERFORMED TO SPECTROSCOPIC METHOD : CONFORM			56			SURFACE & DIMENSIONS ARE CONTROLLED			MATERIAL FREE FROM WELDS OR WELD REPAIRS AT TIME OF SHIPMENT			MATERIAL IS FREE FROM MERCURY AND RADIOACTIVE CONTAMINATION AND WELDS OR WELD REPAIRS AT TIME OF SHIPMENT					
MACROETCH/MICROSTRUCTURE ACCEPTABLE			INTERGRANULAR CORROSION PER ASTM A262 PRACTICES A & E ACCEPTABLE			GRAIN SIZE GUARANTEED 5 OR THINNER ACCORDING TO ASTM E112			56			56					
We declare that the mentioned product is in compliance with the requirements of the contract and that, after checks and tests, it meets in all respects the specified requirements and applicable standards and regulations, except reservations or exceptions as listed in this declaration of conformity ; Document validated by electronic signature. Material manufactured in the REACH regulation respect.			66-1			Ugine le 03.06.2016			Le Responsable Métallurgie-Qualité			Der Qualitätsbeauftragter					
We declare that the mentioned product is in compliance with the requirements of the contract and that, after checks and tests, it meets in all respects the specified requirements and applicable standards and regulations, except reservations or exceptions as listed in this declaration of conformity ; Document validated by electronic signature. Material manufactured in the REACH regulation respect.			66-2			The Quality Manager			040000993954 Page 2/2			63					

EK 7. Aktarma Vidaları için Formüller



Glossary/Formulas

Some Useful Formulas for Ball Screw Assemblies

Torque, Rotary to Linear

Rotating the screw to translate the nut, or rotating the nut to translate the screw.

Ball Screw Assemblies

$$\text{Torque (in lbs)} = .177 \times \text{Load (lbs)} \times \text{Lead (inches)}$$

Lead Screw Assemblies

$$\text{Torque (in lbs)} = \frac{\text{Load (lbs)} \times \text{Lead (inches)}}{2\pi \times \text{efficiency}^*}$$

* Acme screw efficiency is variable with the helix angle of the threads, the friction of the material and the finish. See the efficiency formula below.

Torque, Linear to Rotary

Translating the screw to rotate the nut, or translating the nut to rotate the screw.

Ball Screw Assemblies

$$\text{Torque (in lbs)} = .143 \times \text{Load (lbs)} \times \text{Lead (inches)}$$

Lead Screw Assemblies

$$\text{Torque (in lbs)} = \frac{\text{Load} \times \text{Lead} \times \text{Efficiency}}{2\pi}$$

The higher the lead of the screw the less effort required to backdrive either the screw or the nut.
As a rule, the lead of the screw should be more than 1/3 the diameter of the screw to satisfactorily backdrive.

Efficiency

Ball Screw Assemblies

Most ball screw assemblies are better than 90% efficient.

Lead Screw Assemblies

$$\% \text{ Efficiency} = \frac{\tan(\text{helix angle})}{\tan(\text{helix angle} + \arctan f)} \times 100$$

f = coefficient of friction

Horsepower

Torque to Horsepower

$$\text{hp} = \frac{\text{Torque (in lbs)} \times \text{rpm}}{63,000}$$

Horsepower to Torque

$$\text{Torque} = \frac{63,000 \times \text{hp}}{\text{rpm}}$$

Column Load Strength*

(Based on Eulers Formula)

$$P_{cr} = \frac{1.405 \times 10^7 \times F_c \times d^4}{L^2}$$

P_{cr} = maximum loads (lbs)

F_c = end support factor

.25 one end fixed, other free

1.00 both ends supported

2.00 one end fixed, other supported

4.00 both ends fixed

d = root diameter of screw (in.)

L = distance between nut and load carrying bearing (in.)

When possible, design for tension loads to eliminate the buckling factor and reduce the required screw size

* Formula only valid if L/d ≥ 18.25.

Critical Screw Shaft Speed

(Maximum rotational speed of screw)

$$C_s = F_c \times 4.76 \times 10^6 \times \frac{d}{L^2}$$

C_s = critical speed (rpm)

d = root diameter of screw (in.)

L = length between supports (in.)

F_c = end support factor

.36 one end fixed, other free

1.00 both ends supported

1.47 one end fixed, other supported

2.23 both ends fixed

Critical shaft speed should be reduced to 80% to allow for other factors such as alignment and straightness

EK 8. Aktarma Vidasının Hesaplaması

Lead Screws

Precision Lead Screws & Supernuts*

Features / Advantages

Low Cost

Considerable savings when compared to ball screw assemblies.

Variety

Large range of leads and diameters to match your requirements.

Lubrication

Internally lubricated plastic nuts will operate without additional lubrication. However, TriGEL grease or dry film lubricant is recommended and will extend product life. See pages 13 and 14.

Vibration and Noise

No ball recirculation vibration and often less audible noise compared to ball screws.

Design Considerations

Supernuts

provide a cost effective solution for moderate to light loads. For vertical applications, anti-backlash supernuts should be mounted with thread/flange on the bottom.

Cantilevered Loads

Cantilevered loads that might cause a moment on the nut will cause premature failure.

Critical Speed

Refer to critical speed chart on page 6.

Column Loading

Refer to column loading chart on page 7.

Self-Locking

Lead screws can be self locking at low leads. Generally, the lead of the screw should be more than 1/3 of the diameter to satisfactorily backdrive.

Custom Capability

Option of custom components to fit into your design envelope.

Non-Corrosive*

Stainless Steel and internally lubricated acetal.

Environment

Less susceptible to particulate contamination compared to ball screws.

Lightweight

Less mass to move.

Temperature

Ambient and friction generated heat are the primary causes of premature plastic nut failure. Observe the temperature limits below and discuss your design with our application engineers for continuous duty, high load and high speed applications. Danaher Motion recommends bronze nuts for very high temperature environments or can aid in your selection of high temperature plastic for a custom assembly.

Efficiency

Except at very high leads, efficiency increases as lead increases. Although the internally lubricated acetal provides excellent lubricity, Ball Screw Assemblies remain significantly more efficient than most Lead Screw designs. See page 12 for actual efficiencies.

Length Limitations

Screw Diameter	Max Length
10 mm	1200 mm
12 - 16 mm	1800 mm
>16 mm	3600 mm

Lead Accuracy

Standard Grade (SRA)	250 µm/300 mm
Precision Grade (SPR)	75 µm/300 mm

Assembly		Screws	Nuts**			
Maximum Temperature	Friction Coefficient	Material	Material	Tensile Strength	Water Absorption (24 HRS %)	Thermal Expansion Coefficient
82 °C	0,08 - 0,14	Stainless Steel*	Acetal with PTFE	55 MPa	0,15	9,7 x 10 ⁻⁵ m/m/°C

* 1.4301 (AISI 304) & 1.4305 (AISI 303) ** Other materials available on a custom basis.

Useful Formulas for Lead Screw Assemblies

TORQUE, ROTARY TO LINEAR

Driving the screw to translate the nut, or driving the nut to translate the screw.

$$\text{Torque} = \frac{\text{Load (N)} \times \text{Lead (mm)}}{2\pi \times \text{efficiency}} \quad (\text{N-mm})$$

TORQUE, LINEAR TO ROTARY

Loading the nut to rotate the screw.

$$\text{Torque} = \frac{\text{Load} \times \text{Lead} \times \text{Efficiency}}{2\pi}$$

EFFICIENCY

$$\% \text{ Efficiency} = \frac{\tan(\text{helix angle})}{\tan(\text{helix angle} + \arctan f)} \times 100$$

f = coefficient of friction

As a rule, assemblies that have an efficiency of 50% or more will backdrive. See page 12 for efficiencies. Efficiencies listed in catalogue computed at 0,1 friction coefficient.

EK 9. Krom Kaplı İndüksiyonlu Taşlanmış Mil (CK 55)

ISLAH ÇELİKLERİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Malz. No.	DIN	SAE/AISI	AKMA SINIRI (Re) ≥Mpa				ÇEKME DAYANIMI (Rm) Mpa				KOPMA UZAMASI (A) L ₀ =5 D ₀				KESİT DARALMASI (Z) ≥%			
			≤Φ 16 MM	Φ >16- 40≤MM	Φ >40- 100≤MM	Φ >100- 160≤MM	≤Φ 16 MM	Φ >16- 40≤MM	Φ >40- 100≤MM	Φ >100- 160≤MM	≤Φ 16 MM	Φ >16- 40≤MM	Φ >40- 100≤MM	Φ >100- 160≤MM	≤Φ 16 MM	Φ >16- 40≤MM	Φ >40- 100≤MM	Φ >100- 160≤MM
1.0402	C 22	1020	350	300			550-700	500-650			20	22			40	45		
1.0501	C 35	1035	430	370	320		630-780	600-750	550-700		17	19	20		35	40	45	
1.0503	C 45	1045	500	430	370		700-850	650-800	630-780		14	16	17		30	35	40	
1.0535	C 55	1055	550	500	430		800-950	750-900	700-850		12	14	15		25	30	35	
1.0601	C 60	1060	580	520	450		850-1000	800-950	750-900		11	13	14		20	25	30	
1.1151	Ck 22	1020/1023	350	300			550-700	500-650			20	22			50	50		
1.1180	Cm 35	1035	430	370	320		630-780	600-750	550-700		17	19	20		40	45	50	
1.1181	Ck 35	1035	430	370	320		630-780	600-750	550-700		17	19	20		35	40	45	
1.1191	Ck 45	1045	500	430	370		700-850	650-800	630-780		14	16	17		35	40	45	
1.1201	Cm 45	1045	500	430	370		700-850	650-800	630-780		14	16	17		35	40	45	
1.1203	Ck 55	1055	550	500	430		800-950	750-900			12	14	15		30	35	40	
1.1209	Cm 55	1055	550	500	430		800-950	750-900	700-850		12	14	15		30	35	40	
1.1221	Ck 60	1060	580	520	450		850-1000	800-950	750-900		11	13	14		25	30	35	
1.1223	Cm 60	-	580	520	450		850-1000	800-950	750-900		11	13	14		25	30	35	
1.5038	40 Mn 4	1039	635	540	440		880-1080	780-930	690-830		12	14	15		40	45	50	
1.5065	28 Mn 6	1330	590	490	440		780-930	690-840	640-790		13	15	16		40	45	50	
1.6511	36 CrNiMo 4	9840	900	800	700	600	1100-1300	1100-1200	900-1000	800-950	10	11	12	13	45	50	55	60
1.6580	30 CrNiMo 8	-	1050	1050	900	800	1250-1450	1250-1450	1100-1300	1000-1200	9	9	10	11	40	40	45	50
1.6582	34 CrNiMo 6	4340	1000	900	800	700	1200-1400	1100-1300	1000-1200	900-1100	9	10	11	12	40	45	50	55
1.7003	38 Cr 2	-	550	450	350		800-950	700-850	600-750		14	15	17		35	40	45	
1.7006	46 Cr 2	5045	650	550	400		900-1100	800-950	650-800		11	14	15		35	40	45	
1.7033	34 Cr 4	5132	700	590	460		900-1100	800-950	700-850		11	13	14		35	40	45	
1.7034	37 Cr 4	5135	750	630	510		950-1150	850-1000	750-900		11	13	14		35	40	45	
1.7035	41 Cr 4	5140	800	660	560		1100-1200	900-1100	800-950		10	12	14		30	35	40	
1.7037	34 Cr5 4	-	700	590	460		900-1100	800-950	700-850		11	13	14		35	40	45	
1.7038	37 Cr5 4	-	750	630	510		950-1150	850-1000	750-900		11	13	14		35	40	45	
1.7039	41 Cr5 4	-	800	660	560		1100-1200	900-1100	800-950		10	12	14		30	35	40	
1.7218	25 CrMo 4	4130	700	600	450	400	900-1100	850-950	700-800	650-800	12	14	15	16	50	55	60	60
1.7220	34 CrMo 4	4135; 4137	800	650	550	500	1000-1200	900-1000	800-950	750-900	11	12	14	15	45	50	55	55
1.7225	42 CrMo 4	4140	900	750	650	550	1100-1300	1100-1200	900-1100	800-950	10	11	12	13	40	45	50	50
1.7226	34 CrMo5 4	-	800	650	550	500	1100-1200	900-1100	800-950	750-900	11	12	14	15	45	50	55	55
1.7227	42 CrMo5 4	-	900	750	650	550	1100-1300	1000-1200	900-1100	800-950	10	11	12	13	40	45	50	50
1.7228	50 CrMo 4	4150	900	780	700	650	1100-1300	1000-1300	900-1100	800-1000	9	10	12	13	40	45	50	50
1.7361	32 CrMo12 4	-	1030	1030	885	785	1230-1420	1230-1420	1080-1270	980-1180	9	9	10	11	35	35	40	45
1.7707	30 CrMoV 9	-	1050	1020	900	800	1250-1450	1200-1450	1100-1300	1000-1200	9	9	10	11	35	35	40	45
1.8159	50 CrV 4	6150	900	800	700	650	1100-1300	1000-1200	900-1100	850-1000	9	10	12	13	40	45	50	50

ÖZGEÇMİŞ



Adı Soyadı: Furkan GÜMÜŞ

Doğum Yeri ve Tarihi: Bakırköy/İstanbul - 1991

E-Mail: furkan-gumus@hotmail.com

Web: <https://www.muhendisbeyinler.net/yazar/furkan>

Eğitim Geçmişi

Lise: Bakırköy Yahya Kemal Beyatlı Lisesi (2009)

Lisans: Karadeniz Teknik Üniversitesi - Makine Mühendisliği (2013)

Çalışma Alanı: Robotik ve mekatronik sistemler, otomatik kontrol, mekanik tasarım, gömülü sistem ve kontrol yazılımlarıdır.