



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN NİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**ELEKTRO KIVILCIM BİRİKTİRME
YÖNTEMİ İLE WC ESASLI KAPLAMANIN
PASLANMAZ ÇELİK ÜZERİNE
UYGULANMASI İÇİN BİR MEKATRONİK
SİSTEM TASARIMI**

Hasan Esat Çelik

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

**Ocak-2021
KONYA
Her Hakkı Saklıdır**

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Hasan Esat Çelik
Tarih: 26/01/2021

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRO KIVILCIM BİRİKTİRME YÖNTEMİ İLE WC ESASLI KAPLAMANIN PASLANMAZ ÇELİK ÜZERİNE UYGULAMASI İÇİN BİR MEKATRONİK SİSTEM TASARIMI

Hasan Esat ÇELİK

**Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Mekatronik Anabilim Dalı**

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Barış GÖKÇE

2021, 112 Sayfa

Jüri

Dr. Öğr. Üyesi Barış GÖKÇE

Prof. Dr. Mehmet KARALI

Dr. Öğr. Üyesi Ziya ÖZÇELİK

Günümüzde Elektro Kıvılcım Biriktirme (ESD) sistemleri, otomotiv, tekstil, kimya, uzay, tıp, gıda ve askeri alanlardaki kullanımı giderek artmaktadır. Bununla birlikte ESD ile kaplama işlemleri manuel olarak yapılmakta ve bunun için el kuvveti kullanılmaktadır. Bu sebeple, kaplama sistemlerinin otomatik olarak yapılabilmesi için ileri teknoloji ekipmanlar ile donatılması ve çeşitli yardımcı sistemlerle birlikte kullanılmasının gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bu ihtiyaçlara çözüm bulmak amacıyla bu tez çalışmasında paslanmaz çelik üzerinde Elektro Kıvılcım Biriktirme yöntemi ile otomatik kaplama yapabilmek için çok eksenli bir mekatronik sistem tasarımının uygulaması gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, bu sistem için iki farklı yardımcı tasarım belirlenmiş ve üretilmiştir. Bunlar; Z eksenindeki yaylı kaplama sistemi ve ağırlık denge kontrollü kuvvet ölçüm geri besleme sistemleridir. Geliştirilen sistemin katı modelleri tasarlanmış, tasarlanan modellerin üretimi gerçekleştirilmiş ve sisteme montajlanarak üç eksenli kaplama sistemi oluşturulmuştur. Bu sistemin kinematik analizleri yapılmış, X ve Y eksenli Mach3 kontrol kartı ve yazılımı ile kontrol edilmiştir. Z eksenindeki DC motor kontrolü ve yardımcı ağırlık ölçüm-denge sistemi için bir devre

oluşturulmuş ve sistem kontrolü STM32F103 mikro denetleyicisi ile gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen üç eksenli sisteme HUYS (Kanada) şirketinden temin edilen ESD kaplama cihazı montajlanarak kaplama sistemi oluşturulmuştur. Geliştirilen sistemde AISI 304 paslanmaz elik yüzeğine WC kaplaması gerçekleştirilmiştir. Paslanmaz eliğin kaplanması sırasında bilgisayar kontrollü olarak 100 μ F, 80V ve 80 Hz olarak belirlenen parametrede, P:50, I:.2, D:0,6 PID değerlerinde üç farklı kaplama deseninde otomatik kaplama işlemi gerçekleştirmiştir. Çalışma sonucunda ağırlık-denge analizleri, mikro ve makro yapı analizleri yapılmıştır. alışmalar sonucunda paslanmaz elik yüzeğlerin başarı ile istenilen 100 gram ağırlık kuvvet hassasiyetinde kaplandığı gözlemlenmiştir. Manuel kaplamaya göre sürekli zamanda daha fazla kaplama işleminin otomatik olarak yaptığı ve birim zamanda daha fazla verim sağlandığı sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Eksen hareket sistemleri, EKB Kaplama, Paslanmaz elik, PID Kontrol

ABSTRACT

MS THESIS

A MECHATRONIC SYSTEM DESIGN FOR THE APPLICATION OF WC BASED COATING ON STAINLESS STEEL USING ELECTRO SPARK DEPOSITION METHOD

Hasan Esat ÇELİK

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN MECHATRONICAL ENGINEERING**

Advisor: Asst. Prof. Dr. Barış GÖKÇE

2021, 112 Pages

Jury

Asst. Prof. Dr. Barış GÖKÇE

Prof.Dr. Mehmet KARALI

Asst. Prof. Dr. Ziya ÖZÇELİK

Today, Electro Spark Deposition (ESD) systems are increasingly used in automotive, textile, chemistry, space, medicine, food and military fields. However, ESD coating processes are performed manually and hand force is used for this. For this reason, it is necessary to equip the coating systems with advanced technology equipment and to be used with various auxiliary systems in order to make the coating systems automatically. In this thesis, in order to find solutions to these needs, a multi-axis mechatronic system design has been applied in order to make automatic coating on stainless steel by Electro Spark Deposition method. In addition, two different auxiliary designs were determined and produced for this system. These; Spring coating system and weight balance-controlled force measurement feedback systems in the Z axis. Solid models of the developed system were designed, the designed models were produced and assembled to the system and a three-axis coating system was created. Kinematic analysis of this system was made, X and Y axis were controlled by Mach3 control card and software. A circuit was created for the DC motor control and auxiliary weight measurement-balance system in the Z axis and the system control was carried out with the STM32F103

microcontroller. The coating system was created by mounting the ESD coating device supplied from HUYS (Canada) to the developed triaxial system. In the developed system, WC coating was applied to the surface of AISI 304 stainless steel. During the coating of stainless steel, computer controlled automatic coating process was carried out in three different coating patterns at P: 50, I: .2, D: 0.6 PID values at the parameter determined as 100 μ F, 80V and 80 Hz. At the end of the study, weight-balance analysis, micro and macro structure analysis were made. As a result of the studies, it has been observed that the stainless-steel surfaces are successfully coated with the desired 100-gram weight strength sensitivity. It is concluded that more coating processes are performed automatically in continuous time compared to manual coating and more efficiency is obtained per unit time.

Keywords: Axis motion systems, ESD Coating, Stainless steel, PID Control

ÖNSÖZ

Bilgi ve deneyimlerinden sürekli yararlanmaya çalıştığım, tezin her aşamasında yardımlarını hiç esirgemeyen danışman hocam Dr. Öğretim Görevlisi Barış Gökçe'ye özellikle çok teşekkür ederim. Bu tez çalışması süresince bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren, Fatih Mehmet Saraç, Muhammed Mevlut Karaca, Muhammed Rojhat Kara, Emrehan Yavşan hocalarım, amcam Hüseyin Aydın'a, teknik bilgilerinden faydalandığım; yazılım bölümünde Adem Adatepe ve Fatih Mehmet Saraç'a, elektronik ve devre bölümlerinde Muhammed Kara'ya, üç eksenli sistem ve mekanikleri bölümünde Feridun Dağlı 'ya, mekanik bölümünde ise Emre Göksu ve Ali İmran Ceyhan dostlarıma bana yol gösterip, bilgilerini aktarıp, ilgilendikleri için teşekkür ederim. Diğer alanlarda bana yön ve yol gösteren dostlarıma teşekkür ederim. Kanada Huys Industries şirketine kaplama makinası yardımı, hibesi ve kaplayan (elektrot) malzeme yardımları için, ayrıca her konuda sabır ve desteklerini esirgemeyen değerli aileme teşekkür ederim.

Hasan Esat ÇELİK

KONYA-2021

İÇİNDEKİLER

ÖZET	III
ABSTRACT.....	V
ÖNSÖZ	VII
İÇİNDEKİLER	VIII
ŞEKİLLER LİSTESİ	X
TABLolar LİSTESİ	XIII
SİMGELER VE KISALTMALAR	XIV
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1. Elektro Kıvılcım Biriktirme (EKB) Temel Kavramlar	3
2.1.1. Elektro kıvılcım biriktirme yöntemi tarihçesi	4
2.1.2. EKB'nin çalışma prensibi.....	6
2.1.3. EKB donanımı	6
2.1.4. Kütle transferi	7
2.1.5. EKB parametreleri	11
2.1.6. EKB materyalleri uygulamaları	12
2.1.7. Elektro kıvılcım biriktirme kaplama özellikleri	13
2.1.8. EKB kaplama yönteminin kullanım ve uygulama alanları.....	14
2.1.9. EKB'nin avantaj ve dezavantajları	15
2.2. Çok Eksenli Sistemler ve Kinematik Modelleri.....	16
2.2.1. Kinematik modelleme	17
2.2.1.1. Düz (İleri) kinematik	18
2.3. PID Kontrolü	23
2.3.1. Oransal kazanç (Kp)	25
2.3.2. İntegral kazanç (Ki).....	25
2.3.3. Türev kazanç (Kd).....	25
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	26
3.1. Çok Eksenli Kontrol Sistemler.....	26
3.2. Üç Eksenli Kaplama Kontrol Sistem Tasarımı ve İmalatı	28
3.2.1. Boyutsal tasarım	28
3.2.2. Konstrüksiyon malzemesinin seçilmesi	29
3.3. Sistemi Üç Eksende Tasarımı ve Montaj Aşamaları	34
3.3.1. X eksenli montaj aşamaları.....	34
3.3.2. Y eksenli montaj aşamaları.....	36
3.3.3. Z eksenli montaj aşmaları.....	39
3.4. Tasarlanan Üç Eksenli Sistemin İleri Kinematik Hesaplamaları	42
3.4.1 İleri kinematik denklemlerinin doğruluğunun test edilmesi.....	44

3.4.2. Ters kinematik analitik çözüm	45
3.5. Üç Eksenli Kaplama Sisteminin Panosu	49
3.5.1. Motor sürücü	49
3.5.2 Çok eksen kontrol kartı	50
3.6. Kontrol Yazılımı Ara Yüzü	51
3.6.1. Ara yüzde X ve Y eksenlerindeki step motor ayarı.....	51
3.7. Pano ve Mikro Denetleyicinin Montajı	53
3.7.1. Baskı yükü ölçme sistem tasarımı	54
3.7.2. Yaylı yük dengeleme sistem.....	56
3.8. Tasarlanan Sistemin Modelleme Yöntemi	60
3.8.1. Kara kutu modeli ile sistem tanımlama	60
3.8.1.1. Tasarım için kullanılan gerçek zamanlı veriler	61
3.8.1.2. Sisteme alınan verilerin işlenmesi ve tasarlanması	62
3.9. Kaplama Çalışması.....	69
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	73
4.1. Sistem için PID Katsayılarının Belirlenmesi.....	74
4.2 Kuvvet Algılaması ve PID Kontrolü Sonrasındaki Sistem Davranışları	75
4.3. Kaplama Kalınlık Analizi.....	78
4.3.1 Kaplama sonuçları	80
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	81
KAYNAKLAR	84
EKLER	89
ÖZGEÇMİŞ	96

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Elektro kıvılcım makinası ve kaplama işlemi	5
Şekil 2.2. EKB ekipmanının ana bileşenlerini (Felix, 2018).....	7
Şekil 2.3. Elektro kıvılcım işlemi (Zhen Jiao, 2016).....	7
Şekil 2.4. Termal akı ve kaplama oluşumu(Vizureanu ve diğerleri, 2018).....	8
Şekil 2.5. Ark kıvılcımları ve damlacık oluşumu (Lešnjak ve Tušek, 2002).	9
Şekil 2.6. Kütle transferi ile oluşan erozyon krateri ve ideal krater formu(Vizureanu ve diğerleri, 2018).....	9
Şekil 2.7. Kütle transferi kaplama oluşumun dört adımda oluşan fiziksel modeli. (Liu, Wang ve Qian, 2005).	10
Şekil 2.8. Argon Gazlı ortamda yapılan kaplamanın SEM görüntüleri (Tang, 2009).....	13
Şekil 2.9. TiC kaplamışını argon gazı ve atmosfer altında denemesi(Z. Jiao ve diğerleri, 2018)	14
Şekil 2.10. MIG uçları kaplama uygulaması	14
Şekil 2.11. Hasarlı tribün tamiri (“Applications • Electrospark Coatings/Repairs • Huys”, t.y.).....	15
Şekil 2.12. Kartezyen robot	16
Şekil 2.13. Endüstriyel robotların genel koordinat sistemleri (Shah, Nagal ve Sharma, 2016).....	17
Şekil 2.14. Ters ve düz kinematik örnekleri (“Forward and Inverse Kinematics”, 2019) ..	18
Şekil 2.15. P noktasının {A} koordinat sistemine göre tanımlanması(Bingül ve Küçük, 2017).....	19
Şekil 2.16. Uç işlevcinin yöneliminin referans koordinata göre tanımlanması (Craig, 2005)	20
Şekil 2.17. Yönelimleri aynı fakat merkezleri farklı noktada bulunan iki koordinat sistemi	21
Şekil 2.18. Denavit-Hartenberg değişkenlerinin belirlenmesi (Bingül ve Küçük, 2017)....	22
Şekil 2.19. Genel olarak kapalı döngü geri PID geri beslemeli sistemi	24
Şekil 2.20. PID kontrol algoritmasının blok diyagramı.....	24
Şekil 3.1. CNC ve 3D yazıcı bilgisayar destekli otomatik sistemlerdir(Systems, 2017)	27
Şekil 3.2. Üç eksenli kaplama sistemde kaplama işlem adımları	27
Şekil 3.3. 6063 alaşımlı 45x90 alüminyum sigma profil kesiti	29
Şekil 3.4. 90 x 90 sigma profil teknik özellikleri	30
Şekil 3.5. 1605 vidalı tahrik mili	31
Şekil 3.6. SFUR 1605 vidalı mil somunu	31
Şekil 3.7. Sistemde kullanılan vidalı mil somun gövdesi.....	32
Şekil 3.8. Sistemde kullanılan kaplin çeşitleri.....	32
Şekil 3.9. Doğrusal ray ve kızak sistemi	33
Şekil 3.10. Sistemde Kullanılan vidalı mil uç yatakları	33
Şekil 3.11. X eksenini için sigma profillerin raylı sisteme montajı.....	34
Şekil 3.12. X eksenini için dengeleyici sigma profil	35
Şekil 3.13. X eksenini işlem alanının montajı	35
Şekil 3.14. X eksenine Y ve Z eksenini taşıması için yapılan montaj.....	36
Şekil 3.15. Y eksenini sigma profillerin montajı	37
Şekil 3.16. Y eksenini profillerin raylı sisteme montajı	37
Şekil 3.17. Y eksenine Z eksenini üzerine taşıması için yapılan montaj.....	38
Şekil 3.18. Montajlanan gövde raylı sistem üzerine montajı	38
Şekil 3.19. Eksenini raylı sisteme montajı.....	39

Şekil 3.20. Z eksenine motora mekanik montajı	40
Şekil 3.21. X, Y eksenine ve Z eksenine montaj aşamaları	40
Şekil 3.22. Mekanik modellemelerin tasarımları.....	41
Şekil 3.23. X, Y ve Z ekseninin montajı	41
Şekil 3.24. Tasarlanan sistemin eksen atamaları.	42
Şekil 3.25. Tb6560 step motor sürücüsü ve bağlantıları(“Tb6560 3a single axis stepper motor driver board”, t.y.)	49
Şekil 3.26. Tasarlanan sistem için pano kurulum şeması	50
Şekil 3.27. Mach3 ara yüzü	51
Şekil 3.28. Dört fazlı Unipolar step motor yarım adım (1/8) (“Stepper Motor”, 2020).....	52
Şekil 3.29. X eksenine motor hareket profili.....	52
Şekil 3.30. Y eksenine motor hareket profili.....	53
Şekil 3.31. Sistem hareket eksenine için hazırlanan pano.....	53
Şekil 3.32. Ağırlık sensör kontrolü için tasarlanan gram ölçme sistemi	54
Şekil 3.33. Gram ölçerek kuvvet geri besleme yapmak için tasarlanan devre	55
Şekil 3.34. Denemesi yapılan ölçme sisteminin kaplama sistemine bağlanması	55
Şekil 3.35. Ölçme sistemi üzerinde manuel EKB işlemi yapılması	56
Şekil 3.36. Z eksenine kaplamaya yardımcı yaylı dengeleme sistem kaplama tabancasına montajı	57
Şekil 3.37. Yaylı sistemin üç eksenli sistemine montajı	57
Şekil 3.38. Üç eksenli hareket sistemi, ağırlık ölçme sistemi, yaylı dengeleme sistemi montajı	58
Şekil 3.39. EKB makinası ve kaplama tabancası	58
Şekil 3.40. Argon gazlı ortamda manuel EKB deneyleri	59
Şekil 3.41. Sistemin argon gazlı ortamda deneyleri	59
Şekil 3.42. Kara kutu (Black Box) sistemi	60
Şekil 3.43. Alınan verilerin workspace’ye aktarılması.....	61
Şekil 3.44. SIT /Veri yükleme penceresi	62
Şekil 3.45. İşlenen data.....	63
Şekil 3.46. Time Plot seçeneği	63
Şekil 3.47. Sisteme girilen input sinyali	64
Şekil 3.48. Sistemden çıkan output (kuvvet) zamanla değişimi gösterilmiştir	64
Şekil 3.49. Kutup, sıfır (pay, payda) derecesinin belirlenmesi.....	65
Şekil 3.50. Transfer fonksiyon tahmin verisi	65
Şekil 3.51. Transfer fonksiyon modeli verisi	66
Şekil 3.52. Transfer fonksiyon sonucunun ölçülen veriyle kıyaslanması	66
Şekil 3.53. Alınan tfl (Transfer fonksiyon) workspace’ye aktarılması	67
Şekil 3.54. tfl verisinin sisteminde oluşan step response sonuç	67
Şekil 3.55. Alınan verilere göre tahmini transfer fonksiyonu sonucu(tfl)	68
Şekil 3.56. Oluşturmak istediğimiz kontrol sistem mimarisi tercihleri menüsü	68
Şekil 3.57. Veriler ile tasarlanan sistemin model gösterimi	68
Şekil 3.58. Tasarlanan sistemin transfer fonksiyonu	69
Şekil 3.59. Kaplama desenleri sırasıyla No:1, No:2 ve No:3 kaplama deseni	69
Şekil 3.60. Birinci parametrede otomatik sistemde kaplama işlemi.....	70
Şekil 3.61. İkinci parametrede otomatik sistemde kaplama işlemi	71
Şekil 3.62. Üçüncü parametrede otomatik sistemde kaplama işlemi	72
Şekil 3.70. Kaplamaların ortalama kalınlık kıyaslamaları	80
Şekil 4.1. Kayıt edilen veriler doğrultusunda oluşturulan sistem tasarımı	74
Şekil 4.2. Tasarlana sistem için belirlenen PID değeri.....	74
Şekil 4.3. Tasarlanan sistemin adım cevabı (Step response).....	75

Şekil 4.4. Sistemin Kuvvet geri besleme ve PID olmadan çalışma simülasyonu	76
Şekil 4.5. Sistemin yaylı, kuvvet geri besleme ve PID sonrası çalışma simülasyonu.....	77
Şekil 4.6. PID sonrası 100 gr'da kaplamanın zemine uyguladığı kuvvetin zamanla değişimi	77
Şekil 4.7. Kaplamaların makro görüntüleri	78
Şekil 4.8. No:1 deseninde kaplanan numunenin 500x Tabaka Mikro yapısı 3 farklı bölgesindeki kaplama kalınlıkları	79
Şekil 4.9. No:2 deseninde kaplanan numunenin 500x Tabaka Mikro yapısı 3 farklı bölgesindeki kaplama kalınlıkları	79
Şekil 4.10. No:3 deseninde kaplanan numunenin 500x Tabaka Mikro yapısı 3 farklı bölgesindeki kaplama kalınlıkları	79

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Kaplama özelliklerini ve yapısını etkilediği bilinen EKB parametreleri (Felix, 2018)	11
Tablo 2.2. EKB uyum kombinasyonları (Tang, 2009).....	12
Tablo 2.3. EKB kaplanmış kaplanan malzeme alaşımları. (Tang, 2009)	13
Tablo 2.4. EKB sürecinin avantajları ve dezavantajları (Syed, 2010)	16
Tablo 2.5. D-H yöntemi dört ana değişken (Bingül ve Küçük, 2017)	22
Tablo 3.1 Tasarım Parametreleri.....	28
Tablo 3.2. 45x90 ve 90x90 sigma profil teknik özellikleri	30
Tablo 3.3. PPP üç eksenli sistemin D-H parametre tablosu.....	42
Tablo 3.4. Kaplama parametreleri.....	70
Tablo 4 1. Desen numarasına göre mikro yapı özellikleri	80

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

$^{\circ}$: Derece
μf	: Mikrofarad
a_{i-1}	: Z_{i-1} ile Z_i arasında X_{i-1} boyunca belirlenen uzunluk
cm	: Santimetre
d_i	: X_{i-1} ile X_i arasında Z_i boyunca belirlenen uzunluk
F	: Kuvvet
g	: gram
K	: Kelvin
L	: Eksen sabitleme rulmanları arası mesafe, mm
mm	: milimetre
P	: Güç
r	: Yarıçap
sn	: Saniye
V	: Hız
X	: X koordinatı
Y	: Y koordinatı
Z	: Z koordinatı
α_{i-1}	: Z_{i-1} ile Z_i arasında X_{i-1} boyunca ölçülen açı
θ	: İvme
θ	: Konum
θ_i	: X_{i-1} ile X_i arasında Z_i boyunca ölçülen açı
τ	: Tork

Kısaltmalar

AC	: Alternatif Akım (Alternative Current)
BSD	: Bilgisayarlı Sayısal Denetim
CAD	: Computer Aided Design, Bilgisayar Destekli Tasarım
CAD-CAM	: Bilgisayar Destekli Konstrüksiyon ve İmalat
CAM	: Computer Aided Manufacturing, Bilgisayar Destekli Üretim
CIM	: Computer Intemated Manufacturing, Bilgisayar Destekli Bütünleşik
CNC	: Computer Numerical Control, Bilgisaylı Sayısal Kontrol
DC	: Doğru Akım (Direct Current)
D-H	: Denavit Hartenberg
DNC	: Direct Numerical Control, Doğrudan Sayısal Kontrol
EKB	: Elektro Kıvılcım Biriktirme
ENIAC	: Electronic Numerical Integrator and Computer, Elektronik Sayısal Entegreli Hesaplayıcı
ESD	: Elektrosark Deposition
FMS	: Flexible Manufacturing System, Esnek İmalat Sistemleri
GPS	: Küresel Konumlama Sistemi (Global Positioning System)
IFR	: Uluslararası Robotik Federasyonu (International Federation of Robotics)
LEW	: Düşük Enerjili Kaynak
MIT	: Massachusetts Instute of Tecnnology, Massachusetts Teknoloji Enstitüsü
NC	: Numerical Control, Sayısal Kontrol
PCB	: Printed Circuit Board, Baskılı Devre Kartı
PID	: Oransal İntegral Türevsel denetleyici (Proportional Integral Derivative)
PLC	: Programmable Logic Controller (Programlanabilir Mantıksal Denetleyici)
ROM	: Read Only Memory, Salt Okunur Bellek
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı elektron mikroskobu)
SIT	: System Identification Tool

1. GİRİŞ

Endüstriyel kullanım alanı oldukça geniş olan kaplama sistemleri otomotiv, tekstil, kimya sektörlerinden uzay, tıp, gıda ve askeri alanlarda kullanılmaktadır. Bu sistemlerin istenilen özellikte iş yapılabilmesi için ileri teknoloji ekipmanlar ile donatılması ve çeşitli yardımcı sistemlerle birlikte kullanılmasını gerektirmektedir. Bu yardımcı sistemlerden biri çok eksenli işlem yapan sistemlerdir. Bu sistemlerin işlem yapma yeteneği incelendiğinde kaynak, boyama, yapıştırma, montaj, taşıma, paketlenme vb. özellikleri ön plana çıkmaktadır. Bu tez çalışmasında çok eksenli işlem yapan sistemlerin ve kaplama sisteminin iş yapma özellikleri göz önünde tutularak üç boyutlu katı modelleme programında bu iki sistemin bir arada kullanılması için üç eksenli bir kaplama sistemi tasarlanmıştır. Daha sonrasında imalat ve montajı gerçekleştirilen üç eksenli sistemin ilk olarak kinematik ve dinamik hesaplamaları yapılmış, ileri ve ters kinematik inceleme için Denavit-Hartenberg yöntemi kullanılmıştır. İleri kinematikte sistemin değerleri girdi olarak verilip çıkış değeri olarak uç işlevcinin yönelim ve konumu bulunmuştur. Ters kinematikte ise uç işlevcinin yönelim ve konum değerleri verilip sisteme verilen açı değerleri bulunmuştur. Ters kinematikte analitik ve geometrik yaklaşım ele alınmıştır. Bu kapsamda sistemin diğer farklı sistemler ile birlikte kullanılarak tasarım, imalat ve analiz adımları birçok yönüyle ele alınmıştır.

Bu tez çalışmasında üç eksenli sistemine ek olarak kuvvet geri beslemeli ağırlık ölçen bir sistem ve ağırlık dengeleyici yaylı sistem tasarlanmış imalatı ve analizi yapılmıştır. Z eksenine bağlı kaplama tabancası ile ağırlık sensörleri arasında paslanmaz çelik üzerine kaplama yapacağı için Kanada HUYS şirketinden gelen kaplama cihazına uyumlu parçalar tasarlanmıştır. Burada kaplamanın zemindeki dengesi için Z eksenine bağlı olan yardımcı yaylı sistem tasarlanmıştır. Bu sayede kaplama işlemi yaparken zeminde oluşabilecek ani hatalarda Z ekseninde bir titreme ve kaplama hatası olmaması için yaylı bir sistem oluşturulmuştur. Diğer bir tasarım ise kaplama zeminine uygulanan ağırlık-kuvvet ölçüm sistemidir. Kaplama zeminine uygulanan ağırlık ölçüm sistemi birbirine paralel bağlanmış dört tane ağırlık sensörünün bulunduğu bir sistemdir. Bu ağırlık ölçüm sistemi ve Z eksenindeki DC motor için bir kontrol kartı üretilmiştir. Ağırlık sensörlerinden gelen verinin doğru ölçüm yapabilmesi için sensörlere kuvvetlerin homojen gelmesi dikkate alınmıştır. Bununla birlikte sistemin tüm elektriksel ve mekanik bölümleri tamamlanmıştır. Bu belirtilen tüm sistemler literatürde bulunan sistem tasarımlarıyla bazı benzerlik ve farklılıklar

göstermektedir. Temelde ayrı olarak kullanılan sistemler CNC, ağırlık ölçen sistemi, yaylı dengeleyici sistemler, kontrol sistemleri ve kaplama sistemleri bu çalışmada birleştirilmiştir. Bu sayede sistem tasarımının kendine has özellikleri ortaya çıkmıştır. Sistem montajı ve tasarımı çok eksenli sistemlerin üretim kurallarına ve formüllerine uygun olarak hesaplanmış ve montajlanmıştır. Daha sonra oluşturulan montajın elektronik bağlantıları tamamlanmış ve bir panoda toplanmıştır. Sistemde X ve Y eksen Mach3 kontrol yazılımı ile kontrol edilmiştir. Bu iki eksen sistem step motorlar kullanılmıştır.

Bu tez çalışmasında yazılımsal olarak üç adımda ilerlenmiştir. Bunlar: Ağırlık sensörlerinin ağırlık verisini ölçülmesi, DC motorun kontrolü ve DC motora mikro işlemciden sinyallerin gönderilmesiyle zamanla ağırlık sensörlerinden gelen veriler dahilinde kaplanan yüzeye uygulanan kuvvet kontrolüdür. Bu doğrultuda sistem için oluşturulan ağırlık sensörleri ile kuvveti geri beslemeli kontrol sistemi tasarımı için Matlab yazılımı üzerinde “Kara Kutu” adı verilen modeli çıkarma metodu kullanılmıştır. Buradaki yöntem için giriş ve çıkış verisi bilinmesi şarttır. Bunun için sisteme belirlenen bir giriş sinyali gönderip sonunda oluşan çıkış verisi olan ağırlığın zamanla değişiminin kayıt edilmesiyle veriler elde edilmiştir. Temel olarak sisteme verilen giriş verisi Kara Kutu’ya veri olarak gelir ayrıca çıkış sinyali bellidir. Transfer fonksiyonu sistem tanımlama araç kutusu (System Identification Toolbox (SIT)) sisteminde kestirim yoluyla hesaplanır. Kestirimde bir transfer fonksiyonu oluşturulur. Bu transfer fonksiyon sonucunu kontrol sistemi tasarım modeline girilerek istenilen şekilde sistemin tasarımını oluşturulur.

Verilerin toplanması ve modelin çıkarılması için STM32F103 mikro denetleyicisine gönderilen giriş sinyali ile motor kuvvet ilişkisi verileri alınmıştır. Bu doğrultuda veri toplama sistemi test edilmiş ve doğruluğu sağlanmıştır. Sonuç olarak ağırlık sensörleri ve DC motor dengesi farklı ağırlıklarda dengelenmiştir. Birçok parametrede kuvvet geri beslemesi ile kaplama işlemi yapılmış ve sonuçlar gözlemlenmiştir. Bu denemeler ve gözlemler doğrultusunda yazılımla 100 gram ağırlıkta kaplanana zemin üzerine kuvvet dengesi oluşturulmuştur.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu tez çalışmasında bazı konular temel alınarak EKB sisteminin optimum şekilde otomatik olarak kaplama yapılabilmesi için araştırma, tasarım ve analiz çalışmaları yapılmıştır. Bu tez çalışmasında kullanılan temel konular Elektro Kıvılcım Biriktirme yöntemi ile paslanmaz çelik yüzey kaplama, üç eksenli kaplama robotunun kinematik analizi, imalatı, sistemin kontrol tasarımı ve performans analizidir. Malzeme mikro yapı analizidir. Kaynak araştırmasında bu konular kullanılarak sistemin tasarımı ve analizleri gerçekleştirilmiştir.

2.1. Elektro Kıvılcım Biriktirme (EKB) Temel Kavramlar

Günümüzde elektro-kıvılcım biriktirme işlemi, sertlik ve yüksek aşınma direnci gerektiren çeşitli endüstriyel parçaların zamanla yüzey tabakasında meydana gelen yıpranma, korozyon, aşınma, yorgunluk, mekanik tahrip nedeniyle oluşan boyutsal hatalarının düzeltilmesi için elektrot malzemesinin metalik bir yüzey üzerine malzeme biriktirmek amacıyla kısa süreli akım darbeleri üreten kaynak işlemi olarak tanımlanır (Bozkurt, 2019; Coşkun, 2019; Vizureanu, Perju, Achiței ve Nejneru, 2018).

Elektro Kıvılcım Biriktirme (EKB), düşük enerjili kaynak (LEW) olarak adlandırılan bir sürecin üyesidir. Bu işlem, ısıdan en az etkilenen bölgeleri, metalürjik olarak bağlanmış kaplamaları, minimum element difüzyonu ve farklı metalleri kaynaklama kabiliyeti ile bilinir. Elektro Kıvılcım Birikimi, yüksek akım, kısa süreli darbelerin yüzeye çarpan ve yüzeye biriken küçük hacimli elektrot malzemelerini erittiği bir mikro ark kaynağı işlemidir. Kaplayan malzeme soğuma hızı 105 ila 106 K/s 'dır. Yüksek soğutma; mikro bağlamayla baz malzemenin ark darbeleriyle oluşan soğuması birkaç mikro saniye kadar az bir sürede gerçekleşebilir. Bu soğuma oranları, elementel difüzyonu ve kırılğan metaller arası bileşiklerin oluşumunu en aza indirerek ince taneli bir mikro kaplamaya neden olur. İşlem başına düşük kütle transferi, minimum ısıdan etkilenen bölgeler ve ihmal edilebilir termal gerilimlerle sonuçlanır. Alt tabakanın termal bozulma veya metalürjik yapıdaki değişikliklerden etkilenmemesini sağlar. Ama istenilen özelliklere sahip mikro tabakalar elde etmek için birbirine uygun malzemeler tercih edilir (Felix, 2018; Huang vd., 2016; PERJU vd., 2014; Tang, 2009, Jiao vd., 2018).

2.1.1. Elektro kıvılcım biriktirme yöntemi tarihçesi

“Elektro Kıvılcım” ifadesi birbirine yakın nesnelere arasında elektro potansiyel farkın sınır değeri aşması ile elektrik yükü değişmesinin gözlemlendiğinden beri bilinmektedir. Kökeni, eski Yunanlı filozof Miletli Thales’in Milattan Önce 600 yılında sürtünmeyle oluşan elektriği gözlemesine kadar dayandırılabilir (Korkmaz, 2008; “Static electricity”, 2020).

Elektrik deşarjlarının yol açtığı elektro-kıvılcımın metaller üzerinde bir etkisinin olduğu, ilk defa 1768 yılında İngiliz bilim adamı Joseph Priestley tarafından yapılan elektrik deşarj deneyleri sonucunda fark edilmiştir (Coşkun, 2019).

Yirminci yüzyılda ise kıvılcım işleminin yüzey özellikleri üzerindeki etkisine dair bilinen en eski referansları 1924 yılında H. S. Rawdon tarafından Birleşik Devletler Standartlar Ofisi’nde not edilmiştir. Burada yapılan araştırmada demir yüzeylerinin nikel veya bakır elektrot ile kaplanan malzeme yüzeyi kaplandığında sertliğinin arttığı tespit edilmiştir (Johnson ve Sheldon, 1986).

EKB yönteminde yüzey sertleştirme konusundaki öne çıkan çalışmalar, yayınlar Rusya’da yapılmış ve elektro-kıvılcım kaplama işlemi hakkında önemli ilerleme gerçekleştirmiştir. Sert dolgu yönteminin birçok özelliği tanımlanmıştır. Bunun sonucunda 1943 yılından EKB yöntemi ile metalik araç yüzeylerini yeni yöntem olan kaplama tabasıyla kaplayarak ilk çalışmaları gerçekleştirmiştir. Bu sayede EKB yöntemini geliştirmeye başlamıştır (Korkmaz, 2008).

Zamanla yıpranmaya maruz kalan elaman yüzeylerinin iyileştirilmesi ve bu sayede elamanların çalışma ömürlerinin uzatılması araştırmaları yapmıştır. Bu yöntem aşınmaya maruz kalan birçok parçanın ömrünü arttırmak için kullanılan bir yöntem haline gelmiş ve EKB en önemli yöntemlerden biri olmuştur (Johnson ve Sheldon, 1986).

1957 yılında N.C Welsh, atmosfer veya yağlayıcıların bulunduğu farklı ortamların içinde kaplama yapılması halinde kaplanan yüzeyin sertlik değişimini etkileyebileceğini, ve bu sayede malzemenin sertlik özelliğinin önemli miktarda arttığını gözlemlemiştir (Korkmaz, 2008).

EKB yöntemi bilinmesi ve kullanılmasına rağmen diğer batılı ülkelerde önemi daha sonra anlaşılmıştır. ABD’de 1974’te Johnson, nükleer reaktör uygulamalarının desteklenmesiyle başarılı EKB deneyleri gerçekleştirmiştir. Ancak bu kaplamaların tamamen kabul edilebilir hale gelmeden önce daha fazla gelişme gerektiğini belirtilmiştir (Johnson ve Sheldon, 1986).

EKB yöntemi 1990’lı yılların başından itibaren birçok alanda yüzey geliştirme prosesi olarak uygulanmaya başlanmıştır. Son yıllarda EKB uygulaması ile yapılan kaplamalarda, elde edilen yeni özellikleri ile kullanılan ekipman ve işlem sistemlerinin verimi üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Şekil 2.1’de Kanada HUYS firmasından temin edilen Elektro kıvılcım makinası, ekipmanları ve argon gazlı ortamda EKB işlemi manuel olarak metal yüzeylere uygulanması gösterilmektedir.



Şekil 2.1.Elektro kıvılcım makinası ve kaplama işlemi

Otomatik kontrol ve EKB sisteminin birlikte kullanılması ile kaplama sistemi sistem veriminin dört kata kadar arttığı tespit edilmiştir (Korkmaz, 2008). Ancak elektrot kalınlıkları, alt malzeme, elektro malzemesi ve parametreler bu verimliliği de farklı olarak etkilemektedir. Bu yüzden her otomatik kontrol sürecinin ayrı olarak düşünülmesi gerekmektedir.

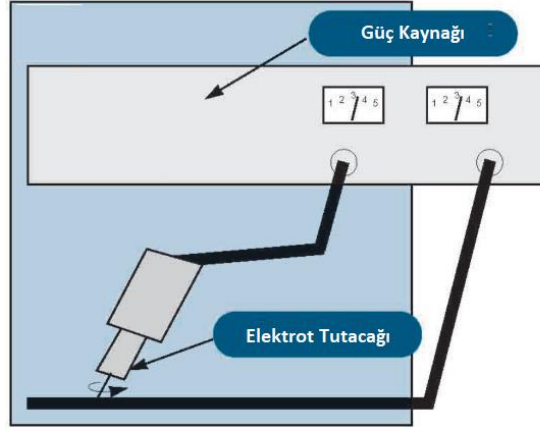
2.1.2. EKB'nin çalışma prensibi

EKB süreci temel olarak kaplanan (altlık) malzeme ve elektrot unsurundan oluşur. Belirli bir baskı kuvveti ile uygulanan elektrot, kaplanan malzeme üzerinde işlem yapması için kapasitans, voltaj ve frekans değişkenlerini kullanır. Elektrot ve kaplanan malzeme arasındaki temasla ve elektrot hareketiyle kaplama işlemi gerçekleşir. Sonucunda elektrot ucu ve kaplanan malzeme arasında yüksek sıcaklıkta bir plazma arkı üretir. Erimiş elektrot materyali kaplanan malzemeye aktarılır. Elektrotlar arasında elektron, iyon ve nötr atom akışı vardır. Elektrik arkı içinde eritilebilen iletken metal alaşımlar, metal tabakalar üzerinde birikir. Birikme yoluyla oluşmuş yüzeysel tabaka hızlı bir şekilde katılır. Düşük ısı girdisi, kısa süreli, yüksek akım prosesi olduğundan çok çeşitli kaplama malzemeleri için kullanılabilir (Młynarczyk, Spadło ve Bartos', 2018; Syed, 2010; Tang, 2009; Vizureanu ve diğerleri, 2018).

Malzeme yüzeyleri üzerinde Elektro Kıvılcım Biriktirme işlemi, argon gazı bulunan ortamda titreşim hareketi yaptırılan elektrot deşarjıyla gerçekleştirir. EKB biriktirme yöntemi, üstün tribolojik nitelikli yüzeysel katmanlarını elde etmek için sert koşullarda, aşındırıcı ortamlarda nemli veya kuru ortamda çalışan ve yüzey üzerinde malzeme biriktirerek kaplama için kullanılan güncel bir araştırma yöntemidir (Korkmaz ve Yılmaz, 2017).

2.1.3. EKB donanımı

EKB ekipmanın şekil 2.2'de görüldüğü üzere iki ana birleşeni vardır. Bunlar: Güç kaynağı doğrultucu (rectifier) ve deşarj devresidir. EKB işlemindeki elektriksel süreç değişkenleri (şarj voltajı, kapasitans ve deşarj frekansı) bir güç kaynağı tarafından kontrol edilir. DC doğrultucu alternatif akımı (AC) DC'ye dönüştürür. Bir dizi kapasitör şarj etmek için kullanılır. Kondansatörlerin deşarjı bir direnç kondansatörü veya bir mikroişlemci tarafından kontrol edilir. Aynı zamanda elektrot tutucu, çalışma sırasında aşınan elektrotun güvenli bir şekilde enerjilenmesini sağlamak için tasarlanmıştır. Şekil 2.2'de EKB ekipmanının şematik bir temsili sırasıyla gösterilmiştir.

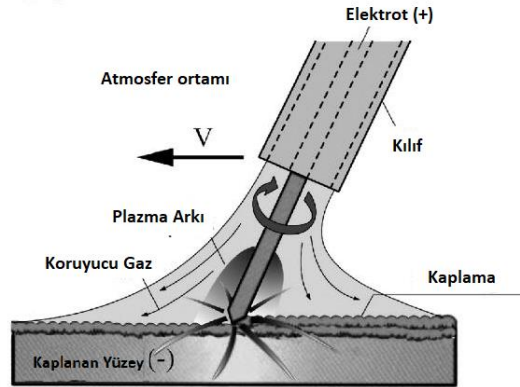


Şekil 2.2. EKB ekipmanının ana bileşenlerini (Felix, 2018).

Tutacak gövdesi içi mekanik stabilite ve iletkenlik sağlamak için metal parçalardan oluşur. Dış malzemesi ise elektrik çarpması riskinden kaçınmak için iletken olmayan malzeme kullanılır. Genellikle elektrotun EKB işleminde kıvılcım üretmek için gerekli harekete sahip olmasını sağlayan metalik pensler tarafından tutulur (Felix, 2018). Ayrıca çalışma sırasında işleme koruyucu gaz (argon) uygulanır.

2.1.4. Kütle transferi

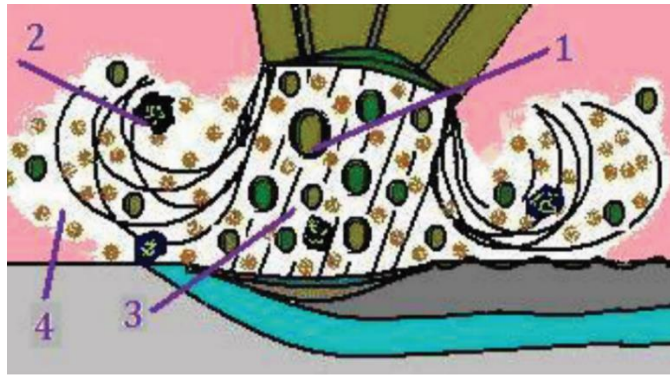
Temel olarak EKB'nin kütle transferi, yüzey modifikasyonu ve lokal onarımlar olmak üzere iki tür uygulaması vardır. Yüzey modifikasyonu, aşınma direnci, korozyon direnci, sertlik gibi spesifik özellikler elde etmek için altlık malzeme yüzeyine şekil 2.3'te görüldüğü üzere kaplama uygulamaktır (Zhen Jiao, 2016).



Şekil 2.3. Elektro kıvılcım işlemi (Zhen Jiao, 2016).

Kütle aktarım yoğunluğu ve kaplama parametreleri elektrot malzemesi yapısına ve temel özelliklerine bağlı olarak değişebilir. Fiziksel ve kimyasal özelliklere (özgül ısı, yoğunluk iletkenliği ve termal transfer katsayısı), atom numarasına, katot, anot ve çalışma ortamı bileşimindeki elementlerin değerine bağlıdır (Vizureanu ve diğerleri, 2018).

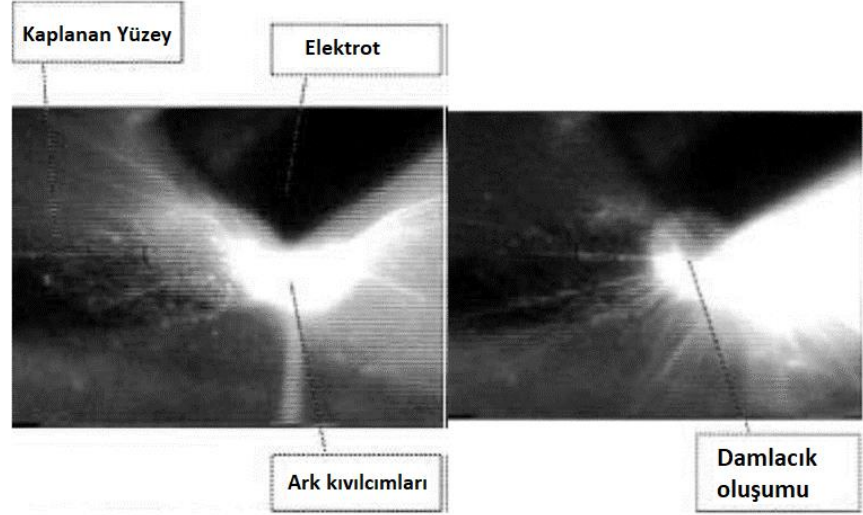
EKB’de yüzey kaplaması belli bir sıra ile oluşur. Bu adımlarda kaplama katmanları oluştururken kaplama yapılan alanın elektrotuna uzaklığı, koruyucu gaz bulunan alanın yoğunluğu ve oluşturulan plazma alanda oluşan reaksiyonlar kütle transferini etkiler. Aynı zamanda oluşturulan kaplama bölgesindeki bu etkiler kaplama akı alanı kaplanan materyal kaplayan malzeme göre değişir. Akı alanı, atomlar, iyonlar ve elektronlardan oluşan yüksek dinamizme sahip alandır. Bu oluşumlar kaplamanın kalitesini ve karakterini etkiler. Şekil 2.4’te akı ve kaplamanın nasıl oluşturulduğu gösterilmiştir (Vizureanu ve diğerleri, 2018).



Şekil 2.4. Termal akı ve kaplama oluşumu(Vizureanu ve diğerleri, 2018).

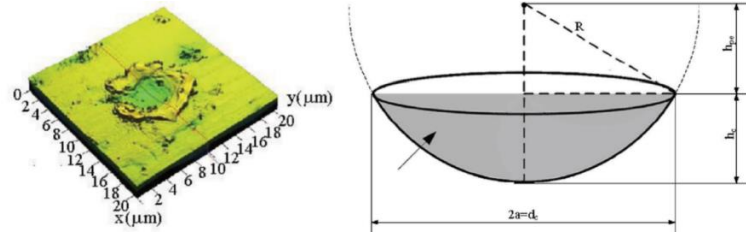
Buna göre üzerinde belirtilen numaralardan “1” kaplanan materyal, “2” kaplayan malzeme parçacıkları, “3” termal akı, “4” ise plazmadır (Topală, Slătineanu, Dodun, Coteață ve Pınzaru, 2010).

Bu doğrultuda ESD kaplamasında kıvılcımları ve damlacık oluşumu şekil 2.5’de gösterildiği gibi elektro kıvılcımların oluşması ile elektrot malzemesinden parçalar koparak alt malzemeye metalürjik olarak bağlanmaktadır.



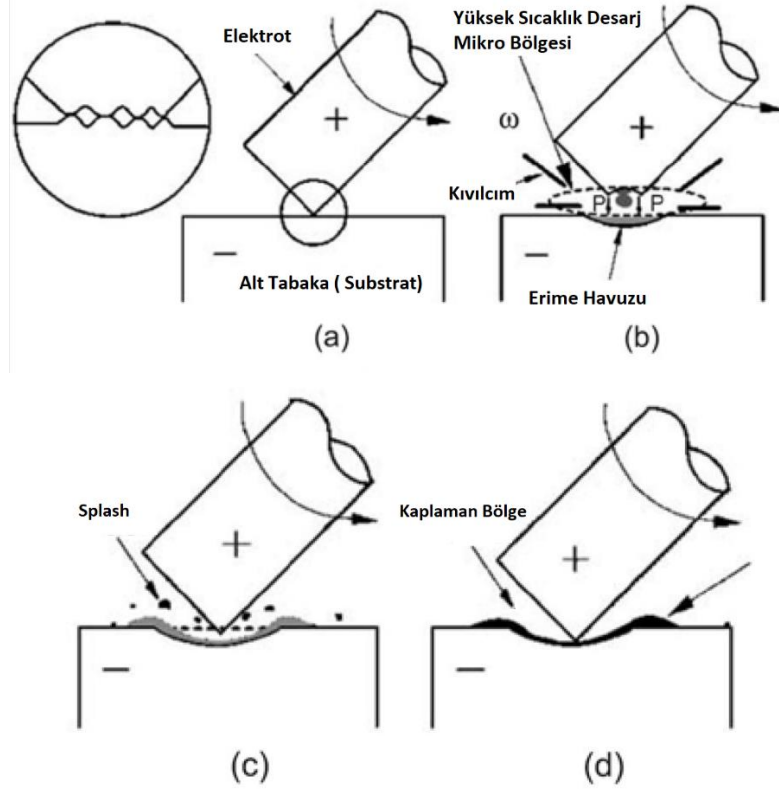
Şekil 2.5. Ark kıvılcımları ve damlacık oluşumu (Lešnjak ve Tušek, 2002).

Lui ve arkadaşları şekil 2.4'deki kaplama oluşumunu açıklamak için Şekil 2.5'de görülen biriktirme noktasının oluşumunu göstermişlerdir. Oluşturulan bu kaplama incelenmiş ve sonunda kaplanan yüzeyde oluşan materyal birikimini ve kaplama sonucunda oluşan erozyon krateri açıklamak için şekil 2.6'da gösterilen fiziksel bir model oluşturulmuştur (Zhen Jiao, 2016).



Şekil 2.6. Kütle transferi ile oluşan erozyon krateri ve ideal krater formu (Vizureanu ve diğerleri, 2018).

Şekil 2.6'daki kütle transferi ile oluşan erozyon krateri gözlemlere dayanarak Lešnjak ve arkadaşları EKB'nin malzeme transferinin şekil 2.7'de gösterilen 4 aşamaya ayrılabilirliği belirlenmiştir (Vizureanu ve diğerleri, 2018).



Şekil 2.7. Kütle transferi kaplama oluşumun dört adımda oluşan fiziksel modeli. (Liu, Wang ve Qian, 2005).

İlk kaplama adımı şekil 2.7.(a)'daki hareketli elektrot ile kaplanan malzeme arasındaki temastır ve kaplanan malzeme ve elektrot ucu yerel temas noktalarında güçlü bir şekilde ısıtılır. İkinci adımda şekil 2.7.(b), biriktirme noktasını oluşturan elektro kıvılcım deşarjlarıdır. Üçüncü şekil 2.7.(c) 'de ark, elektrot ucunu eritmek için yeterli enerji üretir ve sonucunda kaplama oluşumuna neden olur. En son aşamada şekil 2.7.(d) ise yüzey kaplanır. Titreşen veya dönen elektrot, alt tabaka ile tekrar temas ile yeni bir atımlı boşaltma döngüsüne devam eder. Termal giriş, elektrot ve kaplanan malzeme arasındaki gaz iyonizasyonunu artırır. Erimiş damlacık hızla alt tabakaya tutturulur ve katılaştırılır. Ayrıca EKB birikiminde argon gazı, birikintinin atmosferden kirlenmesini önlemek amacıyla koruyucu gaz olarak kullanılır (Liu ve diğerleri, 2005).

2.1.5. EKB parametreleri

Elektro Kıvılcım Biriktirme genellikle bir mikro ark kaynağı işlemi olarak tanımlanmıştır. EKB işlemi tutarlı kaplama kalitesi ve performansı elde etmek için kontrol edilmesi gereken birçok işlem parametresi içermektedir. Bu parametreler Tablo 2.1’de gösterildiği gibi elektrot, kaplanan malzeme, ortam ve elektriksel özelliklerdir.

Tablo 2.1. Kaplama özelliklerini ve yapısını etkilediği bilinen EKB parametreleri (Felix, 2018)

Elektrot	Kaplanan malzeme	Çevre Etkileri	Elektriksel	Diğer
Materyali	Malzeme Türü	Ortam Gazı	Güç Girişi	Sistem Verimi
Geometrisi	Yüzeyi	Akım Hızı (Gaz)	Voltaşı	Üst üste yapılan kaplama sayısı
Hareket Hızı	Temizliği	Ortam Sıcaklığı	Kapasitans	Kaplama süresi
Temas Kuvveti	Sıcaklığı	Kaplama Yeri	Kaplama oranı	
Kaplama İşlem Yönü	Geometrisi			

Kaplama yapılan elektrot ve kaplanan malzeme arasındaki baskı kaplama işlemi yapılırken çok yüksekse, malzemede işlem sırasında hiçbir boşluk oluşturmayarak kaplama işlemi engeller. Baskı çok düşükse, elektrot ark oluşumunu önleyerek kaplanan yüzeye kütle aktarımı gerçekleştiremez. Bu durumları düzenlemek için kuvvet geri beslemeli bir sistem tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte kaplanan ve kaplayan malzemelerin sert, yumuşak olması, belirlenen parametre değerleri, elektrottaki aşırı ısınmalar ve birbirleriyle uyumsuz malzemelerin kullanılması kaplama işlemi etkiler.

Her ne kadar mikro kaynak olarak malzeme yüzeyindeki uygulanabilirlik EKB işleminin en büyük avantajlarından biri olarak kabul edilse de sürecin en büyük dezavantajı, hızlı biriktirme oranı yakalayamamasıdır. EKB uygulamalarının çoğunda 25 ila 100 µm kaplama kalınlıkları en çok arzu edilenidir. Ama EKB kaplamada, 25µm kalınlığında bir kaplama için biriktirme oranı 20 cm²/dakikada elde edilebilir. EKB işlemi ile elde edilebilecek kaplama kalınlığındaki değişiklikler düşünüldüğünde, bu birikme oranı, fiziksel buhar biriktirme ve kimyasal buhar biriktirme işlemlerine kıyasla nispeten hızlıdır. Bununla birlikte, EKB birikme oranı, çeşitli termal sprey işlemlerine kıyasla hala düşüktür (Felix, 2018; Galinov ve Luban, 1996; Zhen Jiao, 2016; Syed, 2010; Tang, 2009).

2.1.6. EKB materyalleri uygulamaları

EKB teorik olarak, elektrik atlamasıyla eritilebilen tüm iletken malzemeler ile kaplanan yüzeyler üzerine biriktirme yapabilir. Değerli alaşımları ve normalde kaynak yapılamayan alaşımlarla istenilen malzeme kombinasyonlarını kaplamak için EKB kullanılır. Bu yüzden birçok çalışmada, literatürde çok çeşitli elektrot ve kaplanan malzeme kombinasyonları araştırılmıştır. Aşınma direncini, korozyon direncini ve birikmeyi iyileştirmek için bazı örnek elektrot malzemeleri Tablo 2.2’de listelenmektedir. Tablo 2.2’de görülen EKB işleminin malzeme uyum kombinasyonları, diğer kaynak işlemleriyle yapılan kaplama işlemlerinde uyumsuz olarak kabul edilen malzeme kombinasyonu ile bağ elde etmek için kullanılabilirliği gösterilmiştir. Bununla birlikte her elektrik iletken malzeme EKB için uygun değildir. Bunlara örnek olarak Bizmut tellür ve krom silisit gösterilebilir. Benzer şekilde, kaplama elektrotu olarak grafit kullanılmış ancak grafitin altlık malzeme yüzeyine aktarılmadığı görülmüştür (Felix, 2018; Zhen Jiao, 2016; Tang, 2009).

Tablo 2.2. EKB uyum kombinasyonları (Tang, 2009)

Aşınmaya Dirençli Kaplama	Korozyona Dirençli Kaplama	Özel Yüzey Modifikasyonu
Sert karbitler’in ^(a) : W, Cr, Ti, Ta, Hf, Mo, Zr, V, Nb Sert kaplama olan alaşımların: Stelitler, tribaloıylar, Colmanoıylar, vb malzemeler Borürlerin: Cr, Ti, Zr ve Ta İntermetalikler ve Sermetler	Paslanmaz çelikler, Hasteloy alaşımlılar, inconel alaşımlılar, moneller Aluminidlerin: Fe, Ni ve Ti FeCrAlY, NiCrAlY, CoCrAlY Al ve Al-Tunç Alaşımları	Ni bazlı ve Co bazlı Süper Alaşımlar Isıya dayanıklı Sert Alaşımlar: W, Ta, Mo, Nb, Re, Hf Soy Metaller: Au, Pt, Ag, Pd, Ir Diğer Alaşımlar: Fe, Ni, Cr, Co, Al, Cu, Ti, V, Sn, Er, Zr, Zn
^(a) Metal Bağlayıcılar ile birlikte, genellikle %5-%15 Arasında Ni veya Co bulundurur.		

Tablo 2.3’de gösterildiği gibi EKB alüminyum, bakır, titanyum ve magnezyum alaşımları gibi geleneksel metal kombinasyonlarının yanı sıra nikel ve kobalt bazlı süper alaşım elementlerinin kaplayabilme imkanı sağlar (Zhen Jiao, 2016).

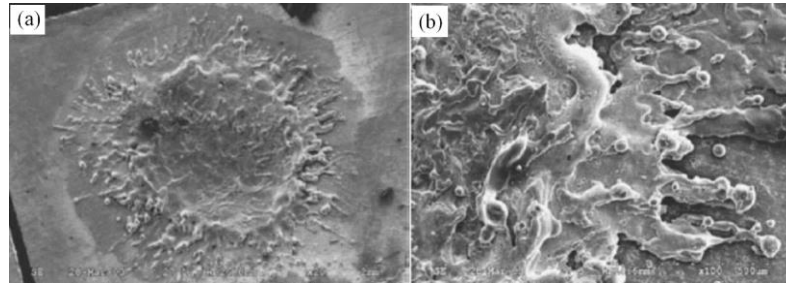
Tablo 2.3. EKB kaplanmış kaplanan malzeme alaşımları. (Tang, 2009)

Yüksek ve düşük karbonlu alaşımlar	Nikel kobalt alaşımlar	Isıya dayanıklı sert alaşımlar: W, Ta, Mo, Nb, Re, Hf
Paslanmaz Çelik	Titanyum alaşımları	Krom
Tool Çelikleri	Alüminyum Alaşımları	Uranyum
Zirkonyum Alaşımları	Bakır Alaşımları	Erbiyum

Sonuç olarak EKB parametreleri iyi bir metalürjik bağ ve minimum ısıdan etkilenen bölgeler için kaplanmasında kullanılan en önemli teknik olduğu belirlenmiştir. Ayrıca EKB parametrelerinin temel biriktirme boyutu ve iç mikro yapı üzerinde etkili olduğu ve bileşenlerin yorulma ömrü için kritik öneme sahip olduğu görülmektedir (Tang, 2009).

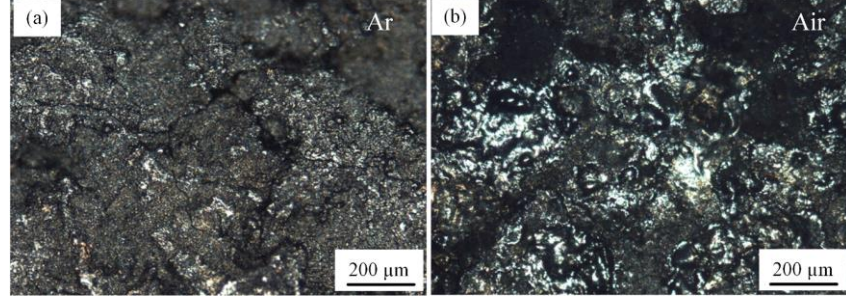
2.1.7. Elektro kıvılcım biriktirme kaplama özellikleri

Elektrottan gelen erimiş damlacık küresel malzeme transferi, atmosfer altında veya koruyucu gaz ortamında gerçekleştirilebilir. Malzeme transferi kaplamanın yapıldığı ortama göre fiziksel farklılıkları gösterebilir. Şekil 2.8.(a)’da argon gazlı ortamda kütle transferi ile oluşan erozyon krateri gözlenmektedir. Şekil 2.8.(b)’de ise erozyon kraterinin sem görüntüleri elde edilmiştir. Burada görüldüğü gibi şekil 2.’de verilen erozyon kriterinin oluşumu ve ideal krater formu gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Argon Gazlı ortamda yapılan kaplamanın SEM görüntüleri (Tang, 2009)

Şekil 2.9’da deney sonunda kaplanan tabakanın özellikleri, elektrot malzemesine, elektrotlar arasındaki ortamın bileşimine, kaplama parametrelerine ve katot tabakası oluşumunun ortamda argon gazı bulunma faktörünün kaplanan yüzeyindeki kaplama kalitesine etkisi gösterilmiştir (Z. Jiao ve diğerleri, 2018)



Şekil 2.9. TiC kaplamasını argon gazı ve atmosfer altında denenmesi(Z. Jiao ve diğerleri, 2018)

Şekil 2.8’ye örnek olarak Şekil 2.9’da TiC kaplama deneyi yapılmıştır. Bu deneyde şekil ilk olarak argon gazı ortamda TiC kaplaması yapılmıştır. Şekil 2.9.(a)’da görülen yüzey kaplaması elde edilmiştir. Daha sonrasında ise aynı deney atmosfer ortamında yapılan kaplamada şekil 2.9.(b) görülen yüzey kaplaması elde edilmiştir. Fiziksel olarak farklılık gösterilmiştir. Sonuçta, 2.9’da argon gazının kaplanan malzeme yüzeyine koruyucu ve temizleme etkisi belirlenmiştir.

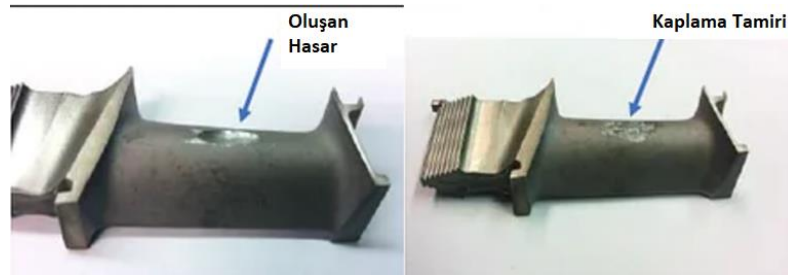
2.1.8. EKB kaplama yönteminin kullanım ve uygulama alanları

EKB yöntemi çoğunlukla manuel olarak yapılması ve aynı zamanda ekipmanındaki uygulanabilirlik alanının çeşitliliği sayesinde birçok alanda kullanılmaya başlanmıştır. Örnek olarak Şekil 2.10’da manuel olarak MIG uçları kaplama uygulaması yapılmıştır. Bu sayede yüzey modifikasyonu ve yüzey kalitesini düzeltme kolaylığı sağlamaktadır.



Şekil 2.10. MIG uçları kaplama uygulaması

Kaplama, yüzey modifikasyonu ve parçaların birleştirilmesinde, uygulamaların yüzeylerinin geliştirilmesine, aletler, matkaplar, freze bıçakları, türbin kanatları vb. gibi aşınmaya maruz kalan birçok parçanın hizmet ömrünü ve performansını arttırmak amacıyla kullanılmıştır. Örnek olarak EKB yöntemi ile hasarlı tribün onarım işlemi şekil 2.11’de gösterilmiştir.



Şekil 2.11. Hasarlı tribün tamiri (“Applications • Electrospark Coatings/Repairs • Huys”, t.y.)

2.1.9. EKB’nin avantaj ve dezavantajları

EKB kaplama yönteminin kolay bir işlem olması, kavisli yüzeylerde, eğimli yüzeylerde ve hatta çok ince malzemelerde yüksek hassasiyet ve oranda malzeme birikimi ile kaplama yapması en büyük avantajlarından biridir.

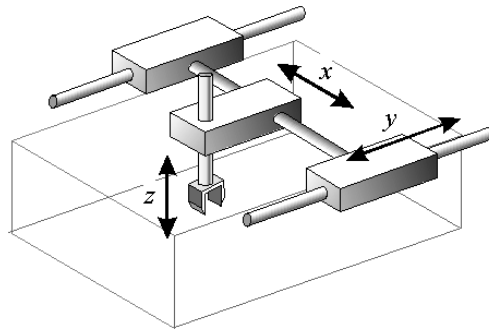
EKB için özel bir ortam (argon gazlı ortam hariç) ya da hazırlık gerekli değildir. Bu nedenle vakum sistemleri, odalar, kimyasallar veya spreycabinleri gibi pahalı ekipmanlara olan ihtiyacı ortadan kaldıran tehlikeli atık veya duman oluşmaz. Kaynaklanması zor yüksek mukavemetli, uzun ömürlü alaşımları ve metallerinin kaplanması ince, hassas ve kompozit dolgulu parçaların tamiri ve yenilenmesi uygulamaları, hasarlı uçak kanatları ve bileşenleri parça ömrünü uzatmak, nikel bazlı süper alaşımlarda yapılan türbin bileşenleri gibi yüksek değerli parçaların restorasyonu ve geri kazanımı için kullanılabilir. EKB’nin bu özellikleri göz önünde bulundurularak Tablo 2.4’de EKB sürecinin avantajları, dezavantajları ve sınırlandırmaları kıyaslanmıştır.

Tablo 2.4. EKB sürecinin avantajları ve dezavantajları (Syed, 2010)

Avantajları	Dezavantajları ve Sınırlamaları
Metalürjik olarak yapıştırılabilir kaplama	Kaplama kalınlığı en fazla 2mm kadardır.
Düşük ısı girdisi, kaplanan malzemede bozulmayı veya metalürjik değişiklikleri ortadan kaldırır	Kaplama malzemelerin doğasından gelen çatlaması olasılığı
Nano yapıya veya amorf tabakalar hızlı katılma ile mümkündür	Kaplanan ve kaplayan malzemelerin elektriksel olarak iletken olması
Yüzey hazırlığı gerektirmez	Etkili Kaplama oranının en fazla 20cm ² /min olması
Tekrarlanabilir bir süreçtir ve kolaylıkla otomatik olarak kullanılabilir.	Aynı uygulama için kaplama parametrelerinin kapsamlı bir optimizasyonu gerekebilir
Operatörleri kolaylıkla eğitilebilir ve ekipmanları kolaylıkla taşınabilir	EKB işlemi diğer birçok kaynak işleminden de daha yavaştır
Karmaşık şekilli tüm metal uygulamaları için kullanılabilir	EKB işleminde elektrotun sürekli tüketimi nedeniyle, temas geometrisi deşarj bölgesinde düzensizdir ve kaplama özelliklerinin tekrarlanabilirliğini önler

2.2. Çok Eksenli Sistemler ve Kinematik Modelleri

Endüstride prizmatik ve döner eklemleri kullanarak birçok endüstriyel robot tipi oluşturulmuştur. Bunlardan bazıları küresel, silindirik, kartezyen vb. robotlardır. Tasarlanan sistem çalışması üç eksenli yapıda oluşturulduğu için sistemin kartezyen robot kinematik model üzerinden incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.12’de bir kartezyen robotun hareket ve konumunun durumu verilmiştir.

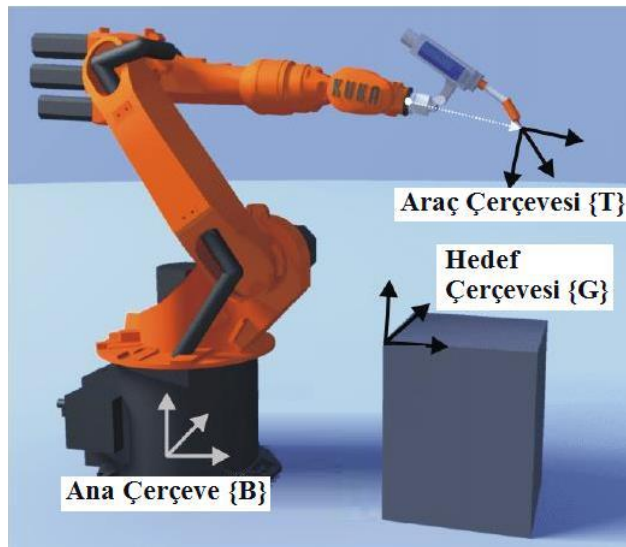


Şekil 2.12. Kartezyen robot

Kartezyen robotlar şekil 2.12’de görüldüğü üzere PPP cinsinden robotlardır. Bu sistemler genellikle taşıma ve aktarım sistemleri ile CNC sistemleri vb. sistemlerde kullanılan robotların farklı çeşitleridir. PPP cinsinden robotlar genel itibariyle kartezyen robot olarak tanımlanır. Üç eksenli sistemin tasarım sürecinde öncelikle sistemin hangi görevlerde kullanılacağı belirlenmiştir. Daha sonrasında sistem gövdesinde kullanılan malzemenin cinsi belirlenmiş ve bilgisayar destekli çizim programında gövdesi ve uç işlevcisi ve yardımcı sistemleri tasarlanmıştır. Tasarlanan katı modellerin mekanik montajı yapılmıştır. Kinematik denklemleri “Denavit Hartenberg” yöntemiyle elde edilmiştir. Daha sonrasında da kinematik denklemleri elde edilmiştir, Z eksenindeki DC motor, sistemi kontrol etmek ve ağırlık sensörlerinden anlık bilgi almak için STM32F103 mikro denetleyicisi kullanılmıştır.

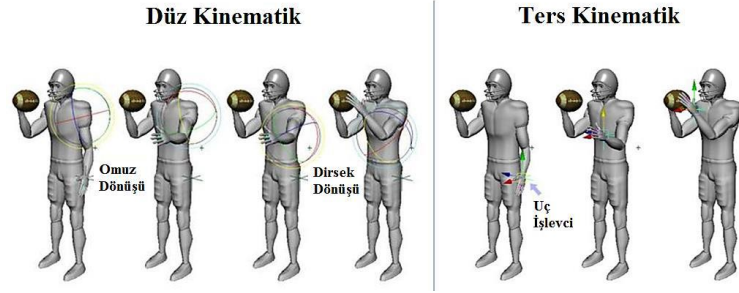
2.2.1. Kinematik modelleme

Kinematik, nesneye etki eden kuvvetlere bakmaksızın hareketi ele alan bilimdir. Kinematik bilimi, hareketli cisimlerin pozisyonunu, hızını, ivmesini ve tüm yüksek dereceli türevlerini zamana veya diğer değişkenlere göre inceler (Craig, 2004). Kinematik hesaplamalar yapılırken koordinat sistemlerine gereksinim vardır. Robot eksenleri için kullanılan başlıca koordinatlar şekil 2.13’de gösterilmiştir.



Şekil 2.13. Endüstriyel robotların genel koordinat sistemleri (Shah, Nagal ve Sharma, 2016)

Ana çerçeve robotun sabit yeri olan taban noktasında, araç çerçeve uç işlevicide ve hedef çerçevede işlem yapılacak parçanın üzerine tanımlanmaktadır. Robotların ileri kinematığında ana çerçeveden araç çerçeveye olan vektör ele alınırken, ters kinematikte ise araç çerçevesinden ana çerçeveye olan vektör ele alınır. Ters ve düz kinematik kıyası şekil 2.14'teki örneklerle gösterilmiştir.



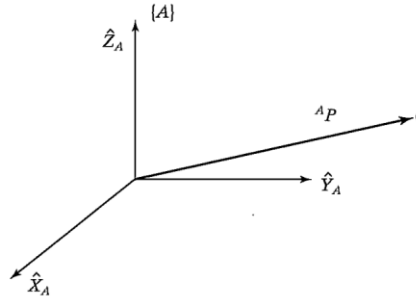
Şekil 2.14. Ters ve düz kinematik örnekleri (“Forward and Inverse Kinematics”, 2019)

Şekil 2.14'te bir eliyle topu tutan insan diğer eliyle topu kavramak için önce omuz sonra dirsek eklemini döndürmektedir. Eklemlere verilen açı neticesinde eli topa ulaşmaktadır. Bu eylem ileri kinematiğe örnektir. Diğer taraftan elin (uç işlevcinin) topu tuttuğu konumunun bilinmesinden yola çıkarak eklemlere verilmesi gereken açı değerlerinin hesaplanması ters kinematiğe örnektir (Karaca, 2020).

2.2.1.1. Düz (İleri) kinematik

Denavit ve Hartenberg (D-H yöntemi) 1955 yılında, her bir ekleme koordinat sistemi yerleştirerek komşu eklemler arasındaki dönüşüm ve dönme ilişkisini gösteren matris tanımlamıştır. Elde edilen matris ile robot kolunun hareketi sonucunda uç işlevcinin pozisyonu ve yönelimi bulunmaktadır. Robotların düz (ileri) kinematiğini hesaplanmasında kullanılan yöntemler arasında en çok tercih edilen yöntemdir. D-H yöntemine geçmeden önce dönüşüm matrisi kavramı bilinmesi gerekir. Bir robotun uzayda hareketi boyunca çevresindeki nesnelere olan konum ve yönelimini koordinat sistemlerine göre tanımlamak için dönüşüm matrisleri kullanılır. “Dönüşüm matrisi” dönme matrisi ve konum vektöründen oluşur. Konum vektörü, bir noktanın evrensel uzayda referans alınan eksen takımına göre olan tanımlanmasıdır. Şekil 2.15'te P noktası A koordinat eksen takımına göre tanımlanmıştır (Bingül ve Küçük, 2017; “Denavit–Hartenberg parameters”, 2020).

Bir nokta, koordinat sistemi tanımlamak suretiyle evrensel çerçeve içerisinde herhangi bir yere konumlandırılabilir. Bilindiği gibi evrensel koordinat çerçevesi içerisinde birçok koordinat sistemi yerleştirilebilir. Üç boyutlu uzayda, bir nokta bu koordinat sistemlerinin merkezine göre tanımlanmış 3x1 boyutlu bir vektörle gösterilebilir. Bu vektörler hangi koordinat sistemine göre tanımlanmışsa ona göre isimlendirilir. Şekil 2.15'te birbirine dik üç vektöre sahip $\{A\}$ koordinat sistemi ve P noktası birlikte gösterilmiştir.



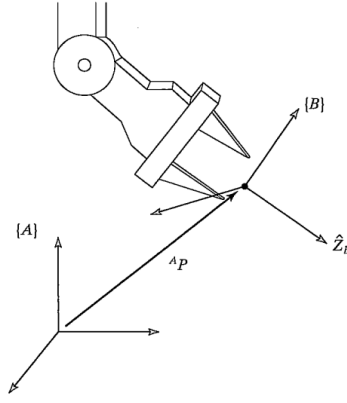
Şekil 2.15. P noktasının $\{A\}$ koordinat sistemine göre tanımlanması(Bingül ve Küçük, 2017)

Evrensel çerçeve içerisinde bulunan bir P noktasının $\{A\}$ koordinat sisteminin merkezine uzaklığı, (x, y, z) eksenlerinde sayısal olarak tanımlanır. Şekil 2.15 'de verilen ${}^A P$ vektörünün ifade edilişi matematiksel olarak denklem 2.1 'de gösterilmiştir

$${}^A P = \begin{bmatrix} {}^A P_x \\ {}^A P_y \\ {}^A P_z \end{bmatrix}$$

(2.1)

Şekil 2.16'da uç işlevcinin yöneliminin referans koordinata göre tanımlanması gösterilmektedir. Bir robot uç işlevcisinin A noktasına uzaklığını tanımlamak için, A noktasına ve robotun uç işlevcisine koordinat sistemleri yerleştirilmiştir. $\{A\}$ ve $\{B\}$ koordinat sistemlerinin merkezleri arasındaki uzaklık A noktasıyla uç işlevcisi arasındaki uzaklıktır ve ${}^A P_{\text{BORG}}$ şeklinde gösterilir.



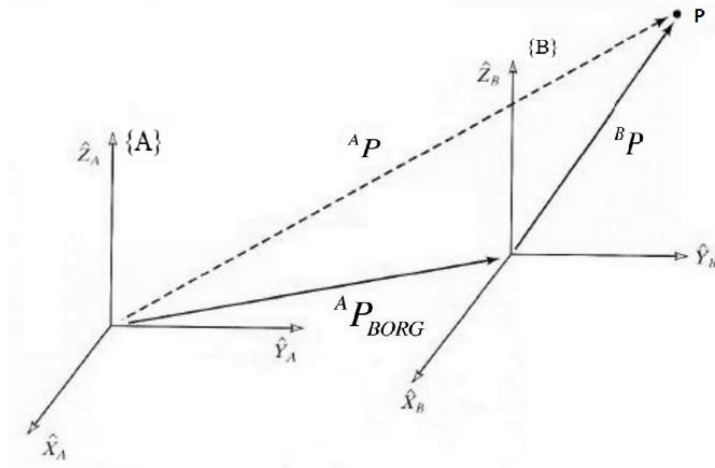
Şekil 2.16. Uç işlevcinin yöneliminin referans koordinata göre tanımlanması (Craig, 2005)

Üç boyutlu uzayda, bir noktanın herhangi bir koordinat sistemine göre konumunun yanı sıra yönelimi de tanımlanır. Yönelim bir koordinat sisteminin bir başka koordinat sistemine göre dönme miktarıdır. 3x3 boyutlu bir matrisle ifade edilir. Şekil 2.16’da görüldüğü gibi uç işlevcisine {B} koordinat sistemi yerleştirilerek {A} referans koordinat sistemine göre yönelimi tamamlanır. ${}^A_B R$ Şeklinde gösterilir. ${}^A_B R$, {B} koordinat sisteminin {A} koordinat sistemine göre X, Y ve Z eksenlerindeki dönme miktarını gösterir. Matematiksel olarak ifade edilişi denklem 2.2’de gösterilmiştir.

$${}^A_B R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$$

(2.2)

Şekil 2.16’daki tanımlardan yola çıkarak {A} koordinat sisteminin {B} koordinat sistemine uzaklığı, ${}^A P_{BORG}$ ise konum vektörüyle temsil edilir. Şekil 2.17’de yönelimleri aynı merkezleri farklı noktalarda bulunan iki koordinat sistemi verilmektedir.



Şekil 2.17. Yönelimleri aynı fakat merkezleri farklı noktada bulunan iki koordinat sistemi

${}^A P$ ve ${}^B P$ arasındaki ilişki, içerisinde dönme matrisi ve konum vektörünün bulunduğu 4x4 boyutunda bir matrisle ifade edilir. Bu matrise homojen dönüşüm matrisi denir. Aşağıda denklem 2.3'deki gibi gösterilir.

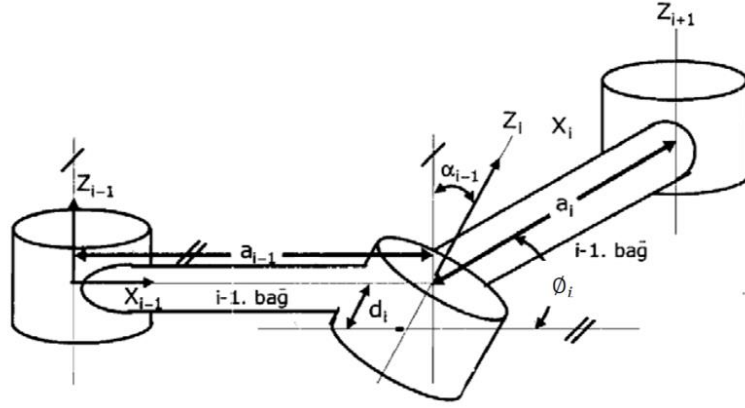
$${}^A T_B = \begin{bmatrix} {}^A R_B & {}^A P_{BORG} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Denklem 2.3'de gösterilen ${}^A R_B$ 3x3 boyutlu bir matris, ${}^A P_{BORG}$ ise 3x1 boyutlu bir vektördür. Denklemde, p_x , p_y , p_z ${}^A P_{BORG}$ vektörünün elemanları, $r_{11}, r_{12}, r_{13}, r_{21}, r_{22}, r_{23}, r_{31}, r_{32}, r_{33}$ ise ${}^A R_B$ matrisini temsil etmektedir.

Bir robot, ana çerçevesinden araç çerçevesine doğru birbirine prizmatik ve dönelemlerle tutturulmuş seri bağlantılardan oluşur. Eğer her ekleme bir koordinat sistemi yerleştirilirse, komşu iki eklem arasındaki ilişki bir ${}^{i-1} T_i$ dönüşüm matrisi ile ifade edilir. İlk ekleme ait dönüşüm matrisi, ilk ekleme ana çerçeve arasında bir ilişkiyi tanımlarken son ekleme ait dönüşüm matrisi ise uç işlevci ile son eklem arasında bir ilişki tanımlar. Bu ilişkiye ileri kinematik denir. Komşu eklemler arasındaki ilişki dönüşüm matrisiyle ifade edilir. Eklemlerde oluşan dönüşüm matrisinin art arda çarpılmasıyla uç işlevciye ait konum ve yönelim matrisi denklem 2.4'te elde edilir.

$${}^0T_N = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 \dots \dots {}^{N-1}T_N \quad (2.4)$$

D-H yönteminde kullanılan temel adımlar şunlardır. İlk olarak eklem yerleri tespit edilir. Döner eklemlerde Z eksenini dönme yönü, prizmatik eklemlerde kayma yönü Z eksenini olarak atanır. Kol boyunca uzanan ve Z eksenine dik olarak X eksenini yerleştirilir. Y eksenini X ve Z eksenleri tanımlandıktan sonra sağ el kuralına göre tanımlanır. Genellikle Z eksenleri öyle bir yerleştirilir ki arka arkaya gelen eklemlerde eksenini etrafında döndürüldüğünde bir sonraki eklemin Z eksenleri üst üste denk gelir. Değişkenler bulunduğundan sonra D-H tablosu oluşturulur ve düz (ileri) ve ters kinematik hesaplamaları yapılır (Bingül ve Küçük, 2017; “Denavit–Hartenberg parameters”, 2020). Bu değişkenlerin belirlenmesi şekil 2.18’de gösterilmiştir.



Şekil 2.18. Denavit-Hartenberg değişkenlerinin belirlenmesi (Bingül ve Küçük, 2017)

D-H yönteminde dört ana değişken kullanılarak robot kinematiği çıkarılır. İki eksen arasındaki bağı uzunluğu a_{i-1} , üst üste çıkan bağı arasındaki eklem kaçıklığı d_i , (i-1) ile i eksenleri arasındaki bağı açısı α_{i-1} ve iki bağı arasındaki eklem açısı θ_i ’dir. Tablo 2.5’te D-H yönteminde kullanılan dört değişken gösterilmiştir.

Tablo 2.5. D-H yöntemi dört ana değişken (Bingül ve Küçük, 2017)

a_{i-1}	Z_{i-1} ile Z_i arasında X_{i-1} boyunca ölçülen açıdır
a_{i-1}	Z_{i-1} ile Z_i arasında X_{i-1} boyunca belirlenen uzunluktur.
d_i	X_{i-1} ile X_i arasında Z_i boyunca belirlenen uzunluktur.
θ_i	X_{i-1} ile X_i arasında Z_i boyunca ölçülen açıdır

Tablo 2.5’te gösterilen bu dört değişkenin meydana getirdiği matrislerin çarpımıyla, n serbestlik derecesine sahip bir motorun yalnızca bir eklemine ait dönüşüm matrisi elde edilir. Bir dönüşüm matrisi, 3x3’lük bir dönme matrisinden ve 3x1’lik bir konum vektöründen oluşur. Konum matrisi ve yönelim matrisin çarpılmasıyla elde edilen dönüşüm matrisi denklem 2.5, 2.6 ve 2.7’de gösterilmiştir

$${}^{i-1}T_i = R_x(\alpha_{i-1}) D_x(a_{i-1}) R_z(\theta_i) D_z(d_i) \quad (2.5)$$

$${}^{i-1}T_i =$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & 0 \\ 0 & s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_{i-1} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & 0 \\ s\theta_i & c\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

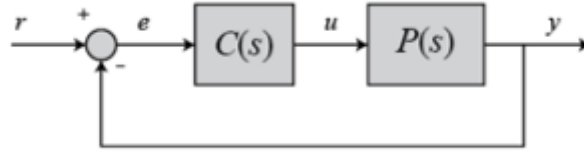
=

$$\begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & 0 \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} d_i \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Denklemden, $s\theta_i$, $\sin \theta_i$ ve $c\theta_i$, $\cos \theta_i$ ifadelerini temsil etmektedir.

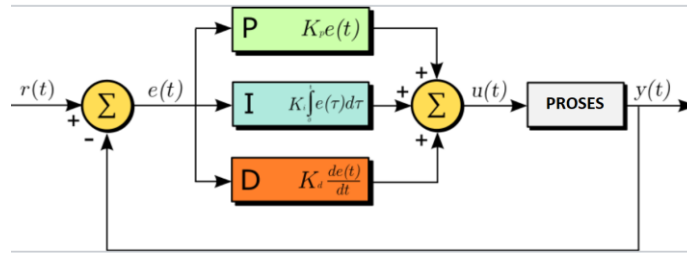
2.3. PID Kontrolü

Oransal-integral-türev (**P**roportional **I**ntegral **D**erivative) kontrolü, kapalı döngü geri besleme tepkisi için kullanılan matematiksel bir kontrol algoritmasıdır. Sistem aktif sistemden bir geri besleme algılayarak çalışır, ardından istenen çıktıyı elde etmek için uygun çıktıyı hesaplar. Geri besleme, oransal, integral ve türev cevabını hesaplayarak ve bir çıktıyı tahmin etmek için faktörleri bileştirir. Kaydedilen son veri noktası ile istenen giriş ayarı arasındaki hata kontrolör tarafından çıkış yanıtının büyüklüğünü belirlemek için kullanılır. Denetleyici süreç kontrol girdisini ayarlayarak hatayı en aza indirmeye çalışır. Kapalı döngü geri besleme sistemi şekil 2.19’da gösterilmektedir. (“An Introduction to Control Systems”, t.y.; “Control Tutorials for MATLAB and Simulink—Introduction: PID Controller Design”, t.y.).



Şekil 2.19. Genel olarak kapalı döngü geri PID geri beslemeli sistemi

PID kontrolündeki her bir kazanç değeri, çıktıya farklı bir etki yapar. Farklı kontrol durumları farklı bir birleşim gerektirir. Her bir kazanç tipinde değişken olarak farklı değerler atanabilir. Kapalı döngü kontrol sistemi Şekil 2.20’de sıralı bir blok şema olarak gösterilmiştir. Blok şeması bu parametrelerin nasıl hesaplandığını ve uygulandığını gösterilmektedir. Şemada görüldüğü gibi PID denetleyici sürekli olarak bir $e(t)$ hata değerini hesaplamaktadır. $e(t)$ amaçlanan durum $r(t)$ ile ölçülen durum $y(t)$ arasındaki farktır. Denetleyici oransal, integral ve türevsel terimleri içeren bir düzeltme uygular. Bu düzeltme, bir $u(t)$ kontrol değişkenini ayarlayarak hatayı en aza indirmeyi amaçlamıştır.



Şekil 2.20.PID kontrol algoritmasının blok diyagramı

Şekil 2.19’deki e değişkeni, set değeri r ile çıkış değeri y arasındaki farkı temsil eden gerçek zamanlı bir hatadır. Şekil 2.20’de PID algoritması hata değerini azaltmak için üç ayrı sabit parametreyi kontrol eder. Bunlar integral ve türev kazanç değerlerini temsil eder, bu yüzden üç aşamalı kontrol olarak adlandırılır: oransal, P ile gösterilir; integral I ile gösterilir, türev değerleri, D ile gösterilir. Sezgisel olarak, bu değerler mevcut değişim göz önüne alınarak zaman açısından; P mevcut hataya bağlıdır, I geçmiş hataların toplamı ve D gelecekteki hataların bir tahminidir. Bu üç eylemin ağırlıklı toplamı yoluyla kontrol edilen süreç istenilen seviyeye ayarlamak için kullanılır ve en düşük hata ile sistemi elde edilmeye çalışılır.

2.3.1. Oransal kazanç (Kp)

Kontrol sistemine oransal kazanç katkısı, atanan değer ile süreç değişkeni arasındaki bir ölçüm olarak hatanın büyüklüğünü etkilemektir. Çıkış cevabı ve hata sinyali arasındaki oran oransal kazanç ile belirlenir. Oransal kazancın artırılması sistemin reaksiyon süresini artıracak, böylece artış süresini azaltacaktır. Orantılı kazançtaki önemli artışlar kalıcı durum hatasını artıracak ve hatanın her döngüde artmasına neden olabilir (“Control Tutorials for MATLAB and Simulink—Introduction: PID Controller Design”, t.y.).

2.3.2. İntegral kazanç (Ki)

İntegral kazanç, gerçek yanıt ile atanan değer arasındaki alanı eklemek için integrali kullanarak zaman içinde biriken hataya cevap verir. Bu terim, zaman içinde küçük hata değerlerine bile tepki verir. Bu, sistemlerin kalıcı durum hatasının büyüklüğünü azaltmaya yarayan integral kazancı ile sonuçlanır (“Control Tutorials for MATLAB and Simulink—Introduction: PID Controller Design”, t.y.).

2.3.3. Türev kazanç (Kd)

Türev kazanç, eğer artış çok aşırı ise, cevabı azaltmak için süreç değişkenindeki değişim oranını dikkate alır. Türev teriminin artırılması, hata sinyali değiştiğinde daha hızlı tepki veren, hataya dayanarak çıktı yanıtını modüle etmeye yarar. Tipik olarak, türev kazancı, yanıt gürültüye duyarlı olduğu için veya döngü hızı çok yavaşsa, çok düşük olarak ayarlanır. Bu koşullar altında türev kontrol uygulamak, türev kazancının kontrol devresi hızını düşük devirli hız sistemiyle azaltabileceği için dengesiz bir tepki ve çok yavaş bir reaksiyona neden olabilir (“An Introduction to Control Systems”, t.y.).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında EKB yöntemi ile malzeme üzerine otomatik kaplama yapabilmek için çok eksenli bir otomatik sistem geliştirmesi yapılmıştır. Bu çalışmada ana ve yan taşıyıcılar için beş adet 45x90 sigma profili, 1 adet 90x90 sigma profili, üç adet tahrik mili, üç adet vidalı mil somunu ve somun gövdesi, üç adet kaplin ve altı adet vidalı uç mil yatakları kullanılmıştır. X, Y ve Z eksenleri doğrultusunda hareket etmesi için dört adet doğrusal kızak rayı ve altı adet kızak kullanılmıştır. Kaplama baskı kuvveti ölçme ve yaylı kuvvet dengeleme sistem tasarımı, çok eksenli otomatik sisteme entegre edilmiştir. Tasarlanan sistemin kinematik analizleri yapılmış ve sistemde gönderilen giriş sinyali karşılığında ağırlık sensörlerinden gelen ağırlık verileri ile sistem modeli tanımlanmıştır. Sistem bu modeller doğrultusunda 100 gramlık ağırlık-kuvvet düzeyinde DC motor ve ağırlık sensörü arasında kaplanan yüzey dengelenmiştir. Ağırlık dengesi sağlanan sistem belirlenen kaplama parametresinde kaplama işlemi yapılarak sistem tamamlanmıştır.

3.1. Çok Eksenli Kontrol Sistemler

Çok eksenli otomatik sistemler bir ara ünite kontrolü ile önceden tanımlı iş üzerinde operasyon yapan sistemlerdir. Bir istasyon ünitesini programlanmış kodlar ile belirlenen görevi operatöre ihtiyaç duymadan yapabilen sistemlerdir. Bunlar Kartezyen robotlar, Silindirik robotlar, Küresel robotlar, SCARA robotlar, Mafsallı robotlar, Paralel robotlardır. Bu sistemler uç işlevcisine göre iş parçası üzerinde belirtilen özellikleri istenilen duruma gelene kadar manuel sistemlere göre daha hassas şekilde işler. Bu özelliklerden dolayı diğer yardımcı sistemlerden olan torna, lazer kesim, kaplama cihazları ve plazma kesim sistemler gibi çok eksenli sistemlere uyarlanarak endüstriyel alanlarda yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bunlara örnek olarak kartezyen robot cinsinden olan Şekil 3.1'deki CNC ve 3D yazıcı gösterilebilir.



Şekil 3.1. CNC ve 3D yazıcı bilgisayar destekli otomatik sistemlerdir(Systems, 2017)

Bilgisayar denetimli sistemler fonksiyonlarını yerine getirebilmesi için verileri toplama ve saklamakta kullanılan kontrol ünitesi ile bilgisayar arasında iletişimi ve bilgi akışını sağlayan, bilgileri ünitesine gönderen arabirim, hız ve ilerleme kontrolleri, servo, DC, step birimlerini içeren birleşenlerden oluşur. Arasında bilgi iletişimi ise tahrik elemanları (elektrik motorları, hidrolik veya pnomatik tahrik elemanları, elektro mıknatıslar), ölçme elemanları (sensörler, takometreler, encoderler ve switchler), bilgisayar ile tahrik ve ölçme elemanları arasındaki iletişimi sağlayan devreler (interface ünitesi), sistemin çalışmasını sağlayan bilgisayar programı sayısal denetimli olarak vermesi şeklinde sıralanabilir. Bu sayede kaplama sisteme büyük esneklik sağlamakta, verilerin hazırlanması ve hesaplanmasında sistem için büyük yarar sağlamaktadır. Kplama sisteminin üç eksenli olarak ve bilgisayar kontrollü kullanılması amacı ile kaplama esnasında operatörün müdahalesini tamamen ortadan kaldırılması planlanmaktadır. Bu sayede elle yapılan kaplama işlemi otomatik olarak çalışacak ve operatör hataları azalacaktır. Bu sistemde kaplama yapmanın birinci yolu; kaplama alanına yapılacak işlemin öncelikle belirlenmesidir. Şekil 3.2’de sırası ile üç boyutlu model ya da iki boyutlu çizim kontrol sistemi programına aktarılarak kaplama alanı ve hareket parametreleri girilir. İki boyutlu hareket için kontrol programında G kodları çıkarılıp kontrol makinesine yüklenir.



Şekil 3.2. Üç eksenli kaplama sistemde kaplama işlem adımları

3.2. Üç Eksenli Kaplama Kontrol Sistem Tasarımı ve İmalatı

Üç eksenli kaplama kontrol sistem tasarımında farklı ebatlarda alüminyum sigma profiller ve çeşitli malzemelerden yararlanılmıştır. Tahrik, hareket, elektronik ve mekanik sistemler için gereken standart malzemeler araştırılmıştır. Performans ve mevcut imkânlar dâhilinde seçilmiştir. Bu sistemde kullanılan malzeme çeşitleri başlıklar altında aşağıda incelenmiştir.

3.2.1. Boyutsal tasarım

Tasarlanan sistem X ve Y ekseninde belirli bir örüntü şeklinde hareket edebilen ve bunun dışında baskı kuvvetine duyarlı ayrı bir sistem olan Z eksenini tasarlanarak tasarıma monte edilmiştir. Z eksenini ise DC motorla ağırlık sensör kontrollü bir sistem olarak tasarlanmıştır. Bu tasarım Y eksenini üzerine montaj edilebilecek ayrı bir sistem olarak tasarlanmıştır. Z eksenine kaplama işlemine yardımcı ağırlık ölçme sistemi ve yaylı dengeleme sistemi eklenmiştir. Tasarlanan sistemin parametreleri tablo 3.1’de belirtilmiştir.

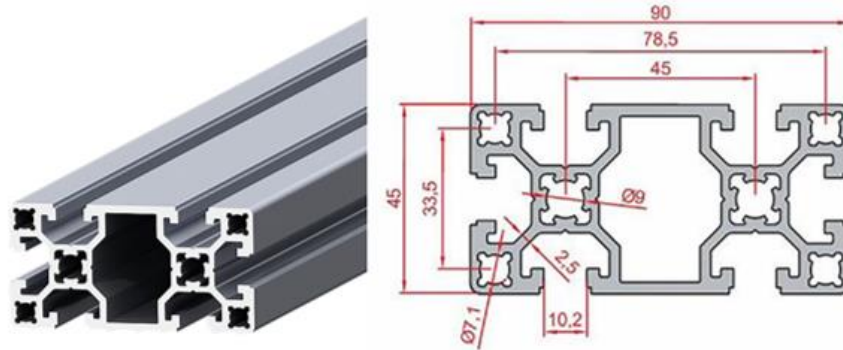
Tablo 3.1 Tasarım Parametreleri

Türü	Üç eksenli kaplama sistemi
Gövdesi	Alüminyum
Tahrik Şekli	DC, step motor ve vidalı mil
İşlem	Kaplama işlemi

Sistem tasarımı aşamalarında ilk önce boyutsal ön tasarım yapılması, yapı malzemesinin seçilmesi, standart elemanların belirlenmesi olmuştur. Ön tasarım ve standart elemanlara göre üç boyutlu katı modelleme programında modellenerek, malzeme listeleri ve imalat resimlerinin oluşturulması ve genel hareket prensibi seçilmiştir. Sistemin genel hareket ve tahrik sistemleri göz önünde bulundurularak eksenlerde kullanılacak malzeme türleri belirlenmiştir.

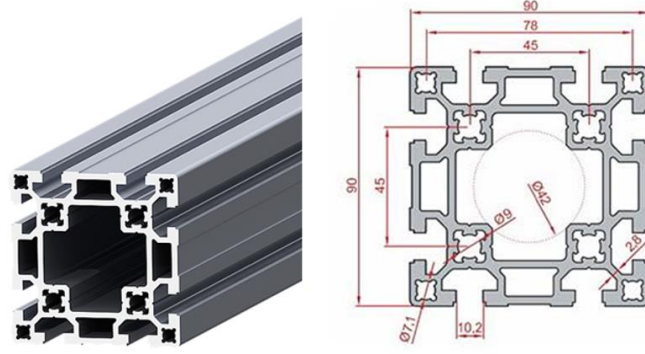
3.2.2. Konstrüksiyon malzemesinin seçilmesi

Yüksek mukavemet, hafiflik, rijitlik ve dinamik kararlılık bir sistemde istenen özelliklerdir. Tasarlanan üç eksenli sistemde 6063 alaşımlı, 45x90 mm, 90x90 mm kesitli alüminyum sigma profilleri kullanılmıştır. Ayrıca 3D yazıcıdan istenilen özellikte parça çıkarılmıştır. 3D yazıcıdan parça çıkarılmasındaki amaç çıkan parçalar kolayca işlenmesi ve hafifliğidir. Ancak çok fazla hafif parça kaplama sisteminin çalışmasını olumsuz yönde etkilemektedir. Bu oluşan durumu da kontrol yazılımı, mekanik sistemdeki düzenlemelerle, sönümleyiciyle veya taban ağırlığını arttırmak suretiyle sistemi zemine sabitleyerek azaltılabilir. Sigma profil ise bu ağırlık özellikleri göz önünde bulundurulduğunda sistem üzerinde yapılması gerektiren revizyonlara ve montajlara esneklik, denge ve rijitlik sağlamaktadır. Sistemde kullanılan alüminyum sigma profilleri teknik özellikleri 45x90'lık alüminyum sigma profili şekil 3.3 ve 90x90'lık alüminyum sigma profili ise şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3. 6063 alaşımlı 45x90 alüminyum sigma profil kesiti

Sistemin tasarımında şekil 3.3'de özellikleri gösterilen beş adet 45x90 alüminyum sigma profil kullanılmıştır. Bunlardan iki tanesi 565 mm uzunluğunda, üç tanesi 480 mm uzunluğundadır. Sigma profillerinin düzgün bir yapıya sahip olması ve alüminyumdan üretilmesi, istenilen özellikteki sigma profil işlenmesinde kenarlarının düzgün olması sistemin rijit olmasında önemli bir etkidir ve modüler bir yapı kazandırmaktadır.



Şekil 3.4. 90 x 90 sigma profil teknik özellikleri

Sistemde tablo 3.2’de ve şekil 3.4’te özellikleri gösterilen bir adet 480 mm uzunluğunda 90 x 90 alüminyum sigma profil kullanılmıştır. Alüminyum sigma profilinin seçilmesinin ana nedeni hafifliği, düzgün geometrisiyle birlikte kolay montaj edilebilmesi ve kolay işlenmesidir. Tasarımda bu profil Y eksen ve Z eksenin birlikte hareket etmesinde önemli etken sahibidir. Sisteme çok büyük ölçüde rijitlik sağlamaktadır.

Tablo 3.2. 45x90 ve 90x90 sigma profil teknik özellikleri

Ebat(mm)	Malzeme	Kesit Alanı (cm ²)	Birim Kütle (kg/m)	Atalet Momenti	
				I _x (cm)	I _y (cm)
45x90	Alüminyum	12,86	3.47		
90x90	Alüminyum	25,31	6.83	108,14	24.0
				220.49	220.49

Oluşturulan sistemde adım motorlu X ve Y eksenleri için ve DC motorlu Z ekseninde kullanılacak tahrik sistemleri araştırılmış ve 1605 vidalı mil tahrik sistemi tercih edilmiştir. Tasarlanan sistemde üç adet şekil 3.5’de gösterilen vidalı tahrik mili kullanılmıştır. Hareket esnasında sürtünmenin azaltılabilmesi amacıyla somun ile mil arasında yer alan boşlukta yataklanan bilyeler mevcuttur. Bir iletim hareketi elemanı olan vidalı miller, doğrusal hareketi bu sayede daha az sürtünme ile iletirler. Düşük sürtünme özelliği sayesinde yüksek mekanik verim elde edilir.



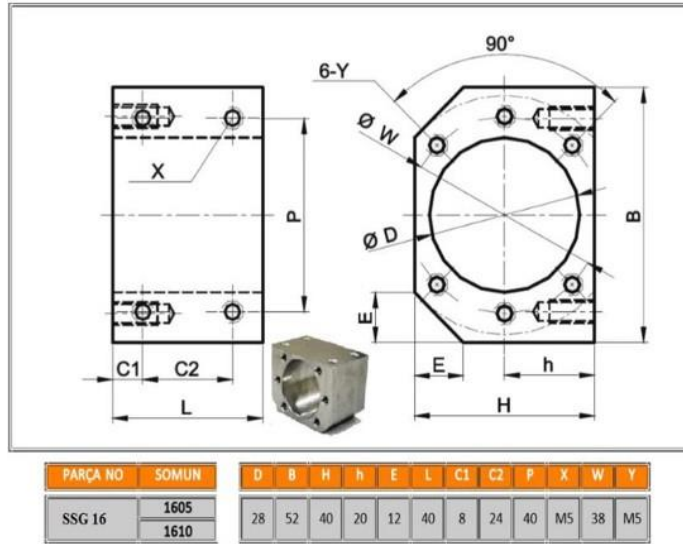
Şekil 3.5. 1605 vidalı tahrik mili

Sistemde şekil 3.6’da tanımlanan üç adet vidalı mil için özel somun kullanılmıştır. Vidalı mil somun SFUR 1605 serisi ve vidalı mili somunu güvenilir tahrik unsurlarından biridir. Bilyeli mili beş mm hatve ile motor unsurlarının hareketli parçalarına sabitlenmesi ile sistemin rijit hareketini sağlar. Bu vidalı mil somunu tahrik kuvvetlerinin aktarım hassasiyetini kaybetmez ve parça ömrü uzundur.



Şekil 3.6. SFUR 1605 vidalı mil somunu

Sistemde üç adet şekil 3.7’de gösterilen somun gövde kullanılmıştır. X, Y ve Z eksenlerinin gövdeye sabitlenmesi ve tahrik milinin doğrultusunda ilerlemesi önemlidir. Somun gövdede mil doğrultusunda sabitlenen parçada eksen kaymasını engeller. Genel gövdenin alüminyumdan yapılmasından dolayı mil somunu eksenlerde hata ve kayma olmaması açısından rijitlik artırır.



Şekil 3.7. Sistemde kullanılan vidalı mil somun gövdesi

İmalatı gerçekleştirilen sistemin boyutları çok büyük olmadığı ve alüminyum konstrüksiyon kullanıldığından kaplin seçilmiştir. Tasarlanan sistemde şekil 3.8’de görülen üç adet kaplin kullanılmıştır.



Şekil 3.8. Sistemde kullanılan kaplin çeşitleri

Tasarlanan sistemde doğrusal bir düzlemde hareketi sağlamak için şekil 3.9’da görülen dört adet doğrusal kızak rayı ve şekil 3.10’da görülen 6 adet kızak kullanılmıştır. Buradaki amaç kaplama sisteminin istenilen düz doğrultuda hareket etmesi ve hareket eksenlerinde kaçıklıkların olmamasıdır. İşlem sırasında kaplamaya ve sisteme zarar vermemesini sağlamaktadır.



Şekil 3.9. Doğrusal ray ve kızak sistemi

Sistemde 6 adet şekil 3.10’da görülen vidalı mil uç yatakları kullanılmıştır. Yataklar vidalı milin karşılıklı iki tarafında eksen rijitliğini sağlamak içindir. X, Y ve Z eksenlerinde bulunan miller, vidalı uç mil yataklarının içindeki sıra bilyeli rulmana yerleştirilerek eksek kaçıklığını engeller



Şekil 3.10. Sistemde Kullanılan vidalı mil uç yatakları

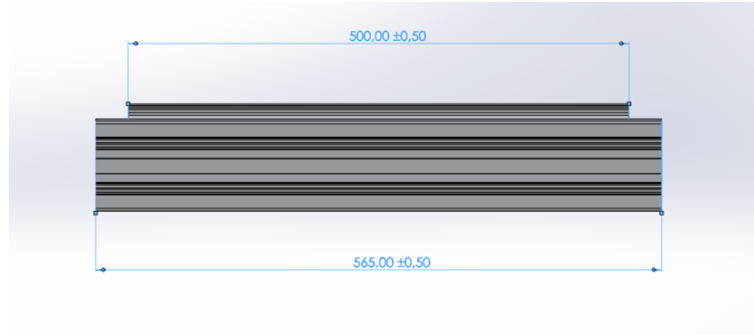
Segman ile vidaya sabitlenen rulman yatak gövdesine ortalanacak şekilde oturtulur. Yatak gövdesi içinde bulunan rulmanın görevi eksen millerinin sıcak ve soğuk ortamlardan etkilenmemesi içindir. Sonuçta tasarıma göre belirlenen malzemeler ile birlikte montaj aşamalarına geçilmiştir.

3.3. Sistemi Üç Eksende Tasarımı ve Montaj Aşamaları

Tasarım montaj aşamaları beş aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci adımda X eksenini daha sonrasında ise Y eksenini tasarlanmıştır. Üçüncü adımda X ve Y eksenini birbirine montajlanmıştır. Dördüncü adımda Z eksenini tasarlanmıştır. Z eksenini tasarlanırken: Ağırlık kuvvet dengesi, kaplama oluşabilecek titreşimleri dengelemek ve benzeri durumlarda kaplama işleminin ihtiyaçlarına göre düzenlenmiştir. Son adımda ise X, Y ve Z eksenleri birbirine montajlanarak sistem tamamlanmıştır.

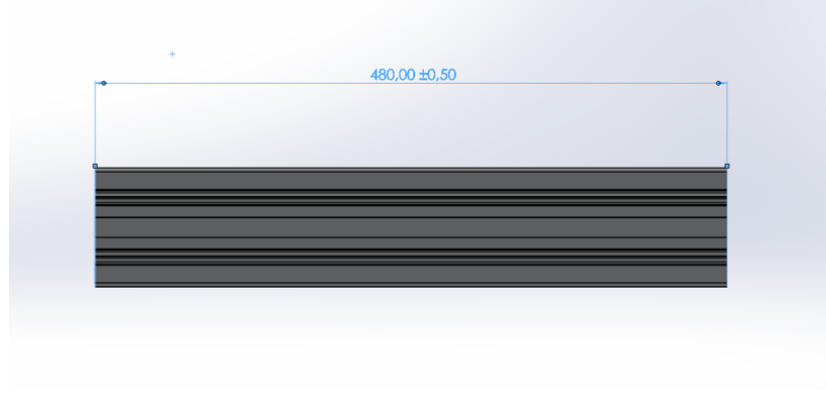
3.3.1. X eksenini montaj aşamaları

Şekil 3.11’de montajdan iki adet üretilecek üzere 565 mm uzunluğunda 45x90 sigma profillerinin üzerine 500 mm uzunluğunda doğrusal ray montajlanmıştır. Doğrusal ray montajlanmasındaki amaç X ve Y ekseninin hareket etmesini sağlamak için bir kılavuz yol oluşturmaktır.



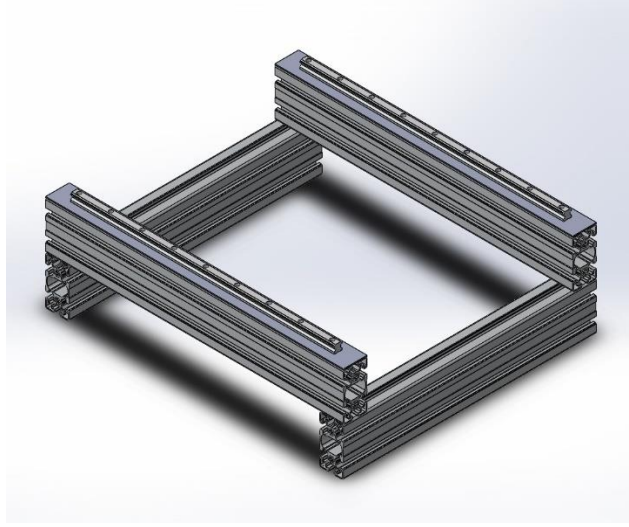
Şekil 3.11. X eksenini için sigma profillerinin raylı sisteme montajı

Daha sonrasında şekil 3.12’deki montajlar 90 derecelik açıyla iki adet 480 mm uzunluğundaki 45x90 sigma profillerinin üzerine köşe bağlantıları sayesinde birleştirilmiştir.



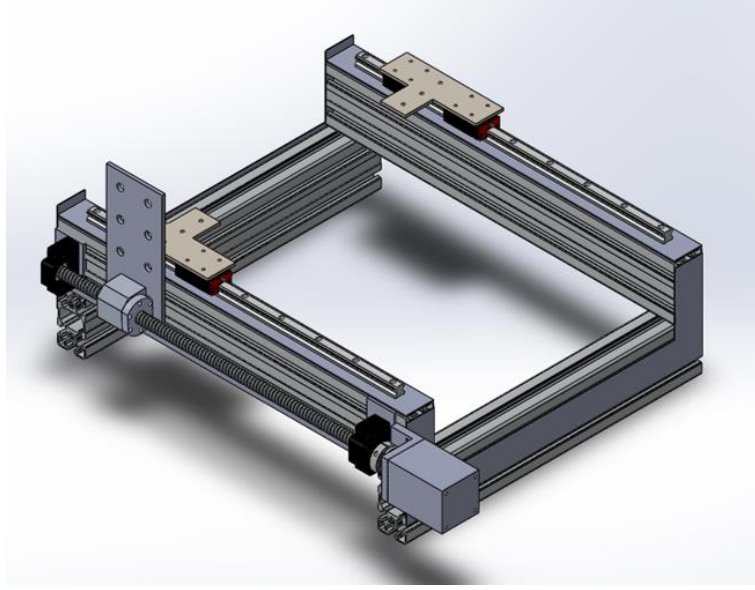
Şekil 3.12. X eksenini için dengeleyici sigma profil

Şekil 3.13'te görüldüğü gibi X ekseninin Y ve Z eksenini taşıyacağı bir sistem montajlanmıştır. Sonrasında doğrusal rayların üzerine dört tane kızak yerleştirilmiş ve yerleşilen kızakların istenilen mesafede durması ve X, Y ekseninin taşınması için kızakların altına şekil 3.14'teki gibi poliyamid plaka yerleştirilmiştir.



Şekil 3.13. X eksenini işlem alanının montajı

İki vidalı uç mil yataklarına tahrik mili, tahrik miline ise mil somunu ve somun gövdesi bağlanmıştır. Bu montajdan sonra mile kaplin ve step motoru bağlanarak şekil 3.14'teki montaj elde edilmiştir. Bu montaj sayesinde Y ve Z eksenini hareketi sağlanır.

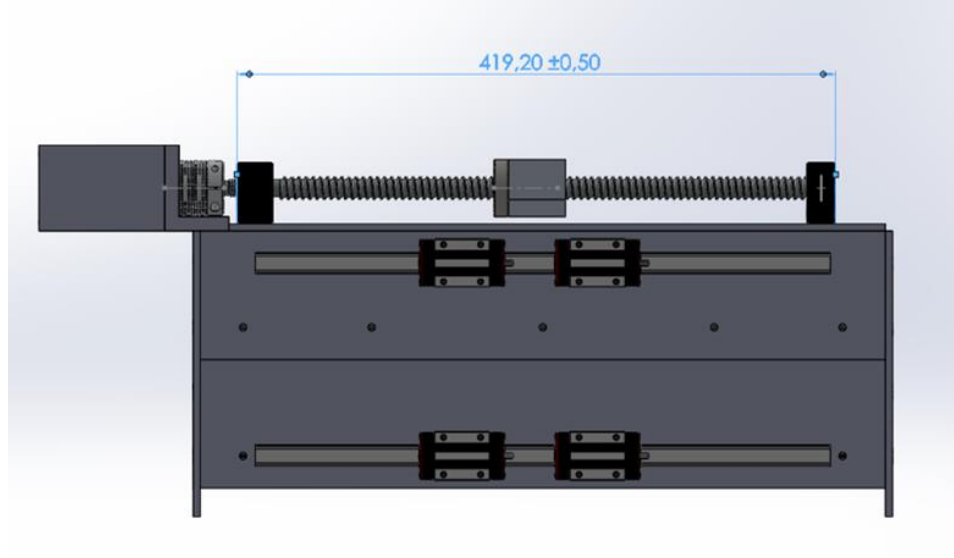


Şekil 3.14. X eksenine Y ve Z eksenini taşıması için yapılan montaj

X eksenini taşıma sisteminin önemli bir parçasıdır. Bu eksenin altında oluşturduğu alan sayesinde taşıma sisteminin taşıma yapacağı işlem alanı düzenlenebilir. Ayrıca Şekil 3.14'teki montaj sayesinde X ve Y eksenlerinin birlikte hareketini ve rijitlik sağlanmıştır.

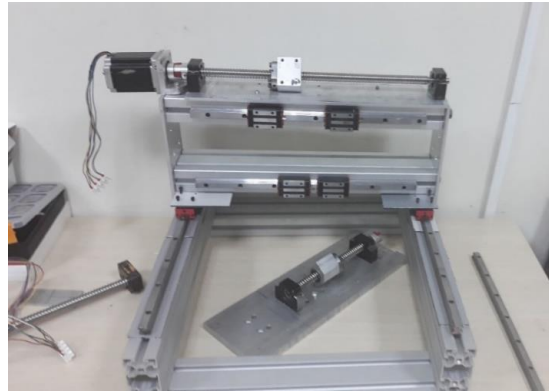
3.3.2. Y eksenini montaj aşamaları

Y eksenini için 1 adet 480 mm boyutunda 90x90 sigma profil ve 1 adet 45x90 sigma profili kullanılmıştır. Sigma profiller alüminyum kenarlıklarla sabitlenmiştir. Şekil 3.15 'de dikkat edilmesi gereken sigma profillerin kenarlarının düzgün kesilmesidir. Düzgün kesilmeyen sigma profiller eksen kaçıklığına neden olabilmektedir. Bu da taşıma sisteminin kalitesini olumsuz etkileyebilmektedir. Şekil 3.15'de 480mm boyutunda 90x90 sigma profil ve 40mm 45x90 sigma profil üst üste yerleştirilmiştir. Bu profillerin kesim yüzeylerinde iki tane olmak üzere alüminyum levha ile montajlanmıştır. Buradaki yöntem sigma profillerin kesim yüzeylerinde açılan vida deliklerini, alüminyum levhalarda oluşturulan deliklere uyumlu olması ve birlikte hareket etmesi için belirlenmiştir. Bu sayede daha sonra X ekseninden gelen ve X ve Y eksenini birbirine bağlanmasını sağlayan kompozit ara parçalar ile X ve Y birbirine montajlanmış ve uyum içinde hareket etmesi sağlanmıştır. Daha sonrasında 90x90'lık sigma profilin üzerine Z eksenini hareket bölgesine uyumlu alüminyum levha yerleştirilmiştir. Bu sayede Y eksenini montajı tamamlanmıştır.



Şekil 3.17. Y eksenine Z ekseni üzerine taşınması için yapılan montaj

Tasarım üzerinde montajı yapılan X ve Y eksenleri gerçek sistem üzerine uygulanmıştır. Daha sonrasında X ve Y ekseni montaj edilerek sistem şekil 3.18’de montajlanan Y ekseni X eksenine yerleştirilip hareketi sağlanmıştır.

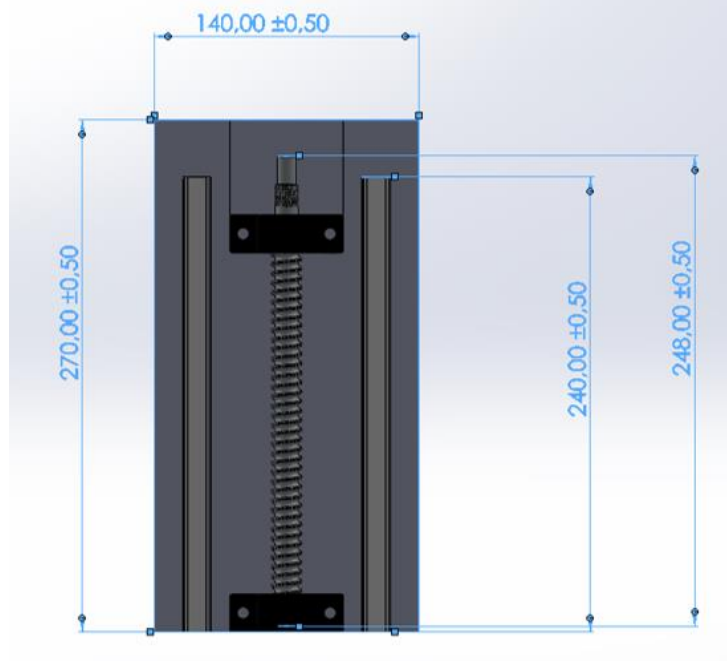


Şekil 3.18. Montajlanan gövde raylı sistem üzerine montajı

X ekseni ve Y ekseninin tasarım montaj ve imalatı gerçekleştikten sonra eksen hareketleri sağlanması ile Z ekseni için tasarımı aşamasına geçirilmiştir.

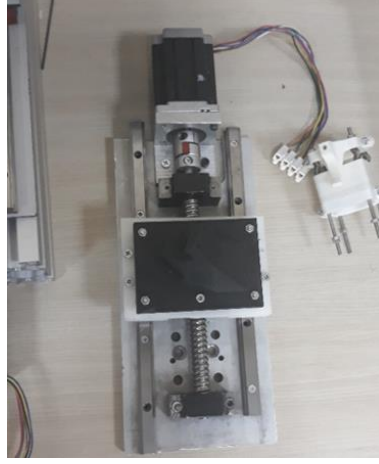
3.3.3. Z ekseni montaj aşmaları

Z ekseni üç boyutlu tasarım programında modellenmiş ve parçalar birbiri ile montajlanmıştır. Şekil 3.19'da modellenen Z ekseni birleşenleri gösterilmiştir.



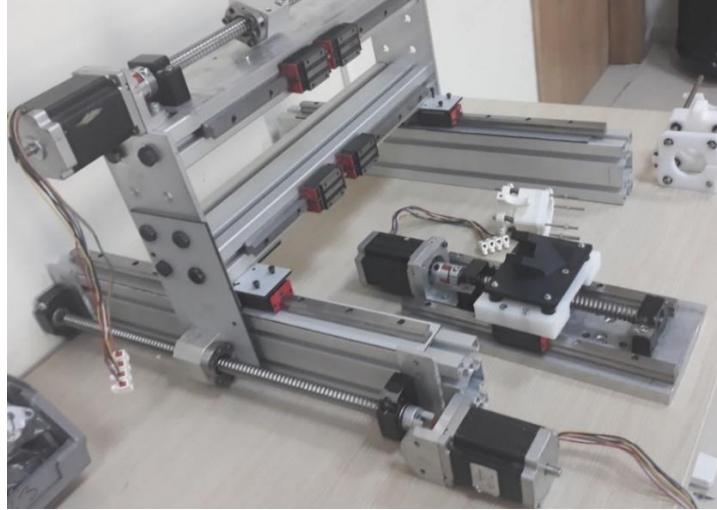
Şekil 3.19. Ekseni raylı sisteme montajı

Z ekseni kaplama işlemi için elektrodu tutan döner sistemi tutmak amacıyla tasarlanmıştır. Yük geri beslemeli kaplama sistemi ve yaylı sistem tasarımı için düzenlemeler yapılmıştır. İki vidalı uç mil yataklarına tahrik mili, tahrik miline ise mil somunu ve somun gövdesi bağlanmıştır. Bu montajdan sonra mile kaplin ve motora bağlanarak şekil 3.20'de gösterildiği şekilde montaj edilir. Bu montaj ile birlikte Z ekseni tasarımı tamamlanmıştır.



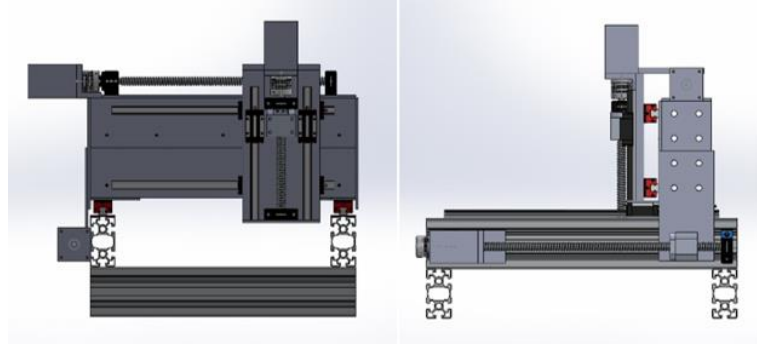
Şekil 3.20. Z eksenine motora mekanik montajı

Z ekseninde konstrüksiyon malzemesi olarak alüminyum sigma profil kullanılmıştır. Daha sonrasında sistemdeki DC motora ve Z eksen tahrik milini birlikte rijitlik sağlamak için üç boyutlu yazılardan çıkan parçalar montaj edilmiştir. Şekil 3.21’de görüldüğü üzere iki eksenli mekanik sistemin Z ekseninde hareket sistemleri, tahrik sistemleri ile Z eksenine montaj aşamalarına geçilmiştir.



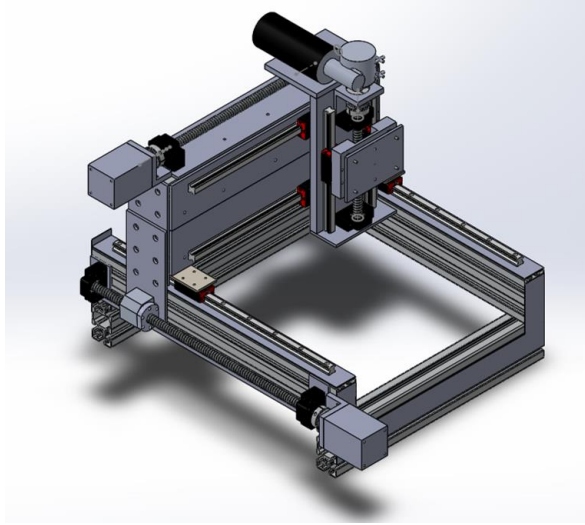
Şekil 3.21. X, Y eksenleri ve Z ekseninin montaj aşamaları

Eksenlerin raylı sistemde hareket edebilmesi için Y eksenine ve Z eksenine kompozit malzemeler ve kızaklar eklenerek bağlantı sağlanmıştır. Şekil 3.21’de X, Y ve Z ekseninin montaj aşamaları gösterilmiştir.



Şekil 3.22. Mekanik modellemelerin tasarımları

Şekil 3.22’de katı modelleme programında tasarlanan mekanik sistemin montajlanmış hali farklı açılardan görülmektedir. Mekanik modellemelerin üretim aşamalarından sonra eksenler şekil 3.23’de gösterildiği gibi birleştirilmiştir. Sistemin hareket testleri yapılmış ve istenilen özelliklerin sağlandığı görülmüştür.

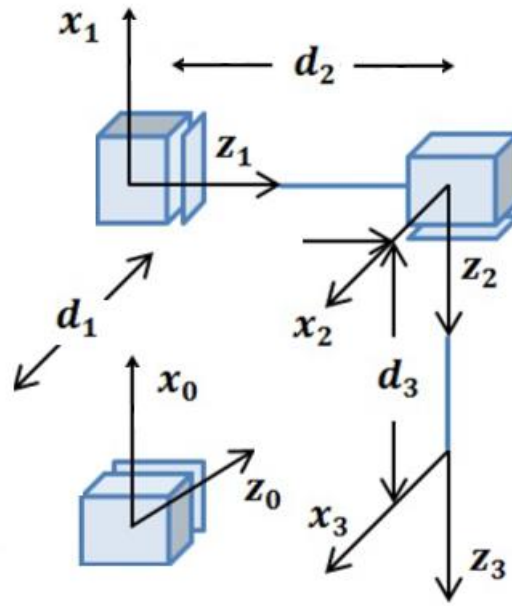


Şekil 3.23. X, Y ve Z ekseninin montajı

Tasarlanan tüm eksenler birbirine montaj edilmiştir. Montajlanan eksenler eksen kaçıklığı olmaması için kontrol edilmiştir. Sonunda kaplama sistemi için üç eksenle hareket hareketi sağlayan sistem oluşturulmuştur.

3.4. Tasarlanan Üç Eksenli Sistemin Kinematik Hesaplamaları

Tasarlanan üç eksenli sisteminin yardımcı ağırlık ölçme sistemi ve yaylı dengeleme sistemleri hariç eksen atamaları daha rahat anlaşılabilmesi için sadeleştirilmiş eksen atama hali şekil 3.24’te gösterilmektedir. Tasarlanan üç eksenli robot eksen atamaları yapıldıktan sonra D-H parametreleri yer almaktadır. PPP kartezyen robot cinsindedir. Genel tablosu D-H yönteminin dört ana değişkeni kullanılarak bir tablo oluşturulur. Sonrasında sırasıyla takip edilen işlemler şunlardır:



Şekil 3.24. Tasarlanan sistemin eksen atamaları.

Şekil 3.24’te tasarlanan sistemin eksen atamaları belirlenmiştir. Belirlenen eksen atamaları sayesinde tablo 3.3’teki D-H parametre tablosunda değerleri bulunmuştur.

Tablo 3.3. PPP üç eksenli sistemin D-H parametre tablosu

Eksen No	D-H parametrelerin Tablosu			
	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
1	-90	0	d_1	$\theta_1 = 0$
2	-90	0	d_2	$\theta_2 = 90$
3	0	0	d_3	$\theta_3 = 0$

Denklem 3.1’de D-H tablosundan gelen değerler gösterilmektedir. Burada d_i parametresi X_{i-1} ile X_i arasında Z_i boyunca belirlenen uzunluktur. $d_1= 100$ mm, $d_2= 300$ mm, $d_3= 250$ mm olarak belirlenmiştir. α_{i-1} parametresinin değerleri Z_{i-1} ile Z_i arasında X_{i-1} boyunca ölçülen açıdır. $\alpha_0 = -\frac{\pi}{2}$, $\alpha_1 = -\frac{\pi}{2}$, $\alpha_2 = 0$ olarak belirlenmiştir. a_{i-1} parametresinin değerleri Z_{i-1} ile Z_i arasında X_{i-1} boyunca belirlenen uzunluktur. $a_0 = 0$, $a_1 = 0$, $a_2 = 0$ olarak belirlenmiştir. θ_i parametresinin değerleri X_{i-1} ile X_i arasında Z_i boyunca ölçülen açıdır. Değerleri $\theta_1 = 0$, $\theta_2 = 90$, $\theta_3 = 0$ olarak belirlenmiştir.

$$d_1=100\text{mm}, d_2=300\text{mm}, d_3=250 \text{ mm}$$

$$\alpha_0 = -\frac{\pi}{2}, \alpha_1 = -\frac{\pi}{2}, \alpha_2 = 0$$

$$a_0 = 0, a_1 = 0, a_2 = 0,$$

$$d_1=L_1, d_2=L_2, d_3=L_3,$$

$$\theta_1 = \theta_1, \theta_3 = \theta_3, \theta_2 = \theta_2 = \frac{\pi}{2},$$

(3.1)

Tablo 3.3’teki D-H değişkenlerinin belirlenmesiyle her bir eklem için eklem dönüşüm matrisleri kullanılmıştır. Birinci eklem dönüşüm matrisi denklem 3.2’de gösterilmiştir. İkinci eklem dönüşüm matrisi, denklem 3.3’te gösterilmiştir. Üçüncü eklem dönüşüm matrisi denklem 3.4’de gösterilmiştir.

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L_1 \\ -\sin\theta_1 & -\cos\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(3.2)

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L_2 \\ -\sin\theta_2 & -\cos\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(3.3)

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(3.4)

Ana çerçeveden araç çerçeveye doğru denklem 3.5’te 0T_3 ileri yönlü robot kinematiği oluşturulmuştur.

$${}^0_3T = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 * \cos\theta_2 & -\cos\theta_1 * \sin\theta_2 & -\sin\theta_1 & -\sin\theta_1 * L3 + \cos\theta_1 * 0 - \sin\theta_1 * L2 \\ -\sin\theta_2 & -\cos\theta_2 & 0 & L1 \\ -\sin\theta_1 * \cos\theta_2 & \sin\theta_1 * \sin\theta_2 & -\cos\theta_1 & -\cos\theta_1 * L3 - \sin\theta_1 * 0 - \cos\theta_1 * L2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

0_3T Dönüşüm matrisindeki konum vektörleri, eklem sayısına bağlı olarak denklem 3.5'deki matrisin son sütunundaki elemanları (en sondaki eleman hariç) uç işlevcinin noktasal konumu X, Y ve Z eksenlerinin bağ uzunları toplanmasıyla bulunur. Bunun için son sütundaki elemanlar px, py ve pz ifadeleri açı toplam cinsinden ifade edilmiştir ve son sütundaki elemanlar px, py ve pz elemanlarıyla eşitlenir. Sırasıyla denklem px için denklem 3.6, py için denklem 3.7 ve pz için denklem 3.8'de gösterildiği gibi oluşturulur.

$$px = -\sin\theta_1 * L3 + \cos\theta_1 * 0 - \sin\theta_1 * L2 + 0 \quad (3.6)$$

$$py = L1 \quad (3.7)$$

$$pz = -\cos\theta_1 * L3 - \sin\theta_1 * 0 - \cos\theta_1 * L2 \quad (3.8)$$

3.4.1 İleri kinematik denklemlerinin doğruluğunun test edilmesi

Sistem işlem alan uzunluk parametreleri sırasıyla L1=100 mm, L2=300 mm, L3=250 mm, şeklindedir. Bütün açılara 0° vererek robotun sıfır konumu elde edilir. Hesap programında birinci ve ikinci eksene 0° verildiğinde, uç elemana ait ölçüler gösterilmektedir. Bu ölçüler sistem taban noktası referans alınarak hesaplanmıştır. Sistemin uç işlevcisine ait px, py ve pz konumları denklem 3.9-3.13 denklemlerinde belirtilmiştir

Sistemin başlangıç konumu ($\theta_1=\theta_2=0$)

$$\theta_1=\theta_2=0 \quad (3.9)$$

$$px = -\sin(0) * L3 + \cos(0) * 0 - \sin(0) * L2 + 0 = 0 \quad (3.10)$$

$$p_y = L_1 \quad (3.11)$$

$$p_z = -\cos(0) * L_3 - \sin(0) * 0 - \cos(0) * L_2 = L_3 - L_2 \quad (3.12)$$

$$(p_x, p_y, p_z) = (-550, 100, -550) \quad (3.13)$$

3.4.2. Ters kinematik analitik çözüm

Bu bölümde, ters kinematik hesaplamasında kullanılan analitik ve geometrik çözüm olarak iki yöntem üzerinde durulmuştur. Ters kinematikte uç işlevciye ait konum ve yönelim bilgisine göre eklemlere verilmesi gereken açı değerleri hesaplanır. Ters kinematikten kullanılan hesaplamalar doğrusal olmayıp karmaşık yapıda olabilirler. Bu nedenle birden fazla çözüm kümesi olabilir. Matrisinin konum ve yönelim bilgilerini içeren matris gösterilmektedir. Üç serbestlik derecesine sahip sistemin ileri yön kinematiği denklem 3.14'te verilmiştir.

$${}^0_3T = {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T \quad (3.14)$$

Denklem 3.14 temsili 0_3T ileri yön kinematik matrisi ise denklem 3.15'te gösterilmiştir.

$${}^0_3T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Denklemin her iki tarafı $[T_1^0]$ çarpılmış hali denklem 3.16'da gösterilmiştir. Bir matrisin tersiyle çarpımı birim matrise eşit olacağından $[T_1^0]^{-1}[T_1^0] = I$ 'ya birim matrise eşit olur.

$$[T_1^0]^{-1} {}^0_3T = {}^1_2T {}^2_3T \quad (3.16)$$

Ters kinematikte dönüşüm matrislerinin sağ ve sol taraftan sırasıyla çarpılıp eşitlenmesiyle çözüm yoluna gidilir. Denklemin tekrar düzenlenmiş hali denklem 3.17'de gösterilmiştir.

$$[{}^0_1T {}^1_2T]^{-1} {}^0_3T = {}^2_3T \quad (3.17)$$

Bir dönüşüm matrisinin denklem 3.18’de görüldüğü gibi tersini almak için öncelikle dönme matrisinin transpozu alınır. Daha sonra konum vektörü ile transpozu alınan matris çarpılır ve önüne eksi işareti konulur. Hesaplanan bu değerler aşağıdaki denklem 3.18’deki yerlerine yazılarak matrisin tersi bulunur.

$$[{}^{N-1}T]^{-1} = \begin{bmatrix} ({}^{N-1}R)^T & ({}^{N-1}R)^T P_N \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Tasarımı yapılan robotun ters kinematik hesaplamasında sırasıyla aşağıdaki adımlar takip edilmiştir:

Denklem 3. 19’da birinci ekleme ait matris oluşturuldu.

$${}^0_1R = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & -\sin(\theta_1) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -\sin(\theta_1) & -\cos(\theta_1) & 0 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Denklem 3.20’de matrisin transpozu alınır.

$$({}^0_1R)^T = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & 0 & -\sin(\theta_1) \\ -\sin(\theta_1) & 0 & -\cos(\theta_1) \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Denklem 3.21’de birinci ekleme ait konum vektörü alınmıştır.

$${}^0_1P = \begin{bmatrix} 0 \\ d1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

Denklem 3.22’de birinci ekleme ait dönme matrisinin transpozu ile konum vektörü çarpılmıştır.

$$({}^0_1R)^T \cdot {}^0_1P = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -100 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Elde edilen veriler yerine yazılarak birinci ekleme ait dönüşüm matrisinin tersi denklem 3.23’te gösterildiği gibi olur.

$${}^{(0T)^{-1}}_1 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & 0 & -\sin(\theta_1) & 0 \\ -\sin(\theta_1) & 0 & -\cos(\theta_1) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -500 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Denklem 3.24'te Oluşturulan matris, robot kolunun ileri yön kinematik denklemindeki eşitliğin her iki tarafıyla çarpılmasıyla elde edilir.

$${}^{(0T)^{-1}}_1 {}^0_3T = {}^1_2T {}^2_3T \quad (3.24)$$

Denklem 3.25'te birinci eklem tersi ile ileri yön kinematiğini temsil eden matris çarpılmıştır.

$$\begin{aligned} {}^{(0T)^{-1}}_1 {}^0_3T &= \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & 0 & -\sin(\theta_1) & 0 \\ -\sin(\theta_1) & 0 & -\cos(\theta_1) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -100 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \\ &= \begin{bmatrix} \cos(\theta_1)r_{11} - \sin(\theta_1)r_{31} & \cos(\theta_1)r_{12} - \sin(\theta_1)r_{32} & \cos(\theta_1)r_{13} - \sin(\theta_1)r_{33} & X \\ -\sin(\theta_1)r_{11} - \cos(\theta_1)r_{31} & -\sin(\theta_1)r_{12} - \cos(\theta_1)r_{32} & -\sin(\theta_1)r_{13} - \cos(\theta_1)r_{33} & Y \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &X = \cos(\theta_1)px - \sin(\theta_1)pz \\ &Y = -\sin(\theta_1)px - \cos(\theta_1)pz \\ &Z = -100 + py \end{aligned} \quad (3.25)$$

Denklem 3.26 de gösterilen denklem ile denklem 3.25 birbirine eşitlenir

$${}^1_2T \quad {}^2_3T = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & -\sin(\theta_2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 550 \\ -\sin(\theta_2) & -\cos(\theta_2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

Denklem 3.25 ve 3.26'da matrislerin üçüncü sütunundaki elemanları birbirine eşitlenmiştir. Eşitlenen denklem 3.27'de gösterilmiştir. Bu eşitlemeler kullanılarak verilen p_x , p_y ve p_z konum değerlerinden açı değerlerine ulaşılır.

$$\begin{aligned} \cos(\theta_1) \cdot p_x - \sin(\theta_1) \cdot p_z &= 0 \\ -\sin(\theta_1) \cdot p_x - \cos(\theta_1) \cdot p_z + 330 &= 550 \\ -100 + p_y &= 0 \end{aligned} \quad (3.27)$$

Denklemlerin yeterli olmadığı durumda eşitliğin her iki tarafının da karesinin alınır. Denklem 3.28'deki gibi hesaplamalara devam edilir.

$$\begin{aligned} (\cos(\theta_1) \cdot p_x - \sin(\theta_1) \cdot p_z)^2 + (-\sin(\theta_1) \cdot p_x - \cos(\theta_1) \cdot p_z)^2 &= 302500 \\ &= \\ p_x^2 + p_z^2 &= 302500 \end{aligned} \quad (3.28)$$

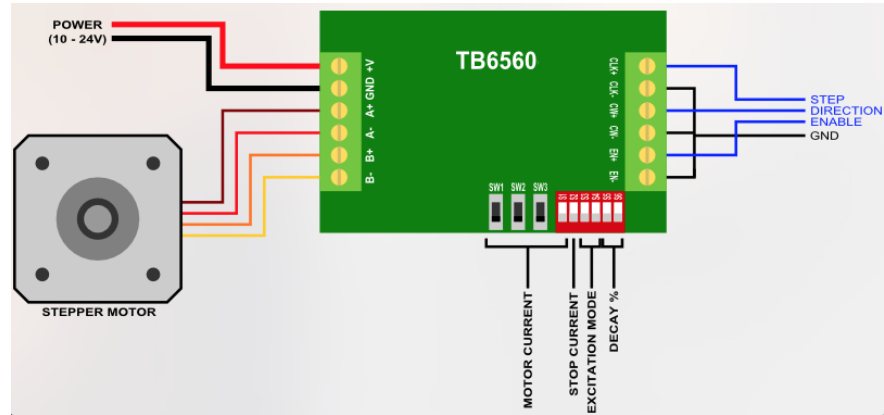
Konumdan açı bulma hesapları bir matematik programında p_x , p_y ve p_z değerlerine belirlenen konumları yazılarak sistemin konum ve açı durumları elde edilmiştir.

3.5. Üç Eksenli Kaplama Sisteminin Panosu

Çok eksenli kaplama sistemcilerinde eksen hareketlerini sağlamak için eksen motorlarına motor sürücü bağlanır. Sistem motorlarının uyum içinde çalışması için kontrol kartı gereklidir. Sistemlerin motorlarının ve eksen kartının işlem yapılırken zarar görmemesi ve görsel olarak uyum içinde olması için sistem panosunda elektronik birleşenler toplanmıştır.

3.5.1. Motor sürücü

Sistemin step motoruna bağlı olan eksenlerini hareket ettirmek için şekil 3.25'te görülen TB6560 adım motor sürücüsü kullanılmıştır. Bu sürücüler yüksek amperli adım motorları sürebilmektedir. 35v 3A e kadar 4 – 6 kablo 4 fazlı adım motor sürme kapasitesi vardır. Sürücü üzerinde bulunan büyük alüminyum soğutucu sayesinde çip üzerindeki ısı hızlıca dağıtılabilir. Sistemde X ve Y eksenindeki İki adet Jk60hs8-300b adım motorları için iki tane TB6560 motor sürücüsü kullanılmıştır.

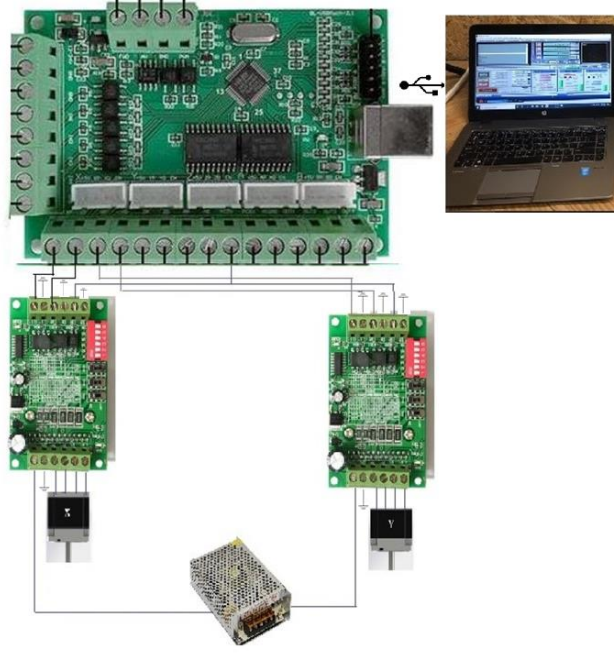


Şekil 3.25. Tb6560 step motor sürücüsü ve bağlantıları(“Tb6560 3a single axis stepper motor driver board”, t.y.)

Kontrol kartı için 5 eksen kontrol edebilen USB portlu kontrol kartı seçilmiştir. Kontrol kartının “spindle kontrol”, “home switch” ve limit “switch” özellikleri vardır.

3.5.2 Çok eksen kontrol kartı

X ve Y eksenlerine bağlı olan motorları tahrik etmek için motor sürücülerini ve Mach3 kontrol kartını kullanılmıştır. Bu kart bir dizüstü bilgisayar tarafından kontrol edilebilir. Elektronik devre kurulum şeması şekil 3.26'da gösterilmiştir. Çok eksen kontrol kartları, bilgisayar bağlantısı ile bazı kontrol yazılımları kurularak servo ya da step motorların çalıştırılması ve CNC router makinelerinin yapımı için kullanılırlar. USB bağlantı Mach3 kontrol kartı ve motor sürücü bağlantı şeması şekil 3.26'da gösterilmiştir.

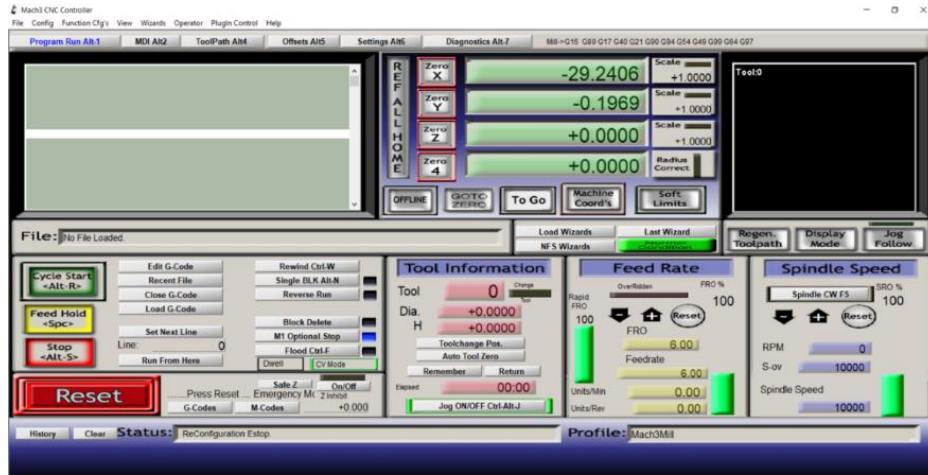


Şekil 3.26. Tasarlanan sistem için pano kurulum şeması

Şekil 3.26'daki bağlantı şemasına göre güç kaynağı TB6560 motor sürücüsüne bağlanmıştır. Jk60hs8-300b step motorları sürücülerini motor veri sayfasındaki bağlantı şemalarına göre sürücülerin A+, A-, B+, B- pinlerine bağlanmıştır. Daha sonrasında kontrol kartı veri sayfasındaki bağlantı şemasına göre TB6560 ve kontrol kartı birbirine bağlanmıştır. Bağlantı sonrasında sürücü ve kontrol kartı panonun içine enerji kaynağı ile birlikte montaj edilmiştir.

3.6. Kontrol Yazılımı Ara Yüzü

Tasarlanan sistemde sadece X ve Y eksen kontrolü için Mach3 programı kullanılmıştır. Kullanımı kolay ve anlaşılır olan Mach3 programı bir ara yüz programıdır. Mach3 programı, bilgisayarın paralel ve USB portlarına çıkış verebilen 6 eksene kadar sistemleri kontrol edilebilen bir programıdır. Mach3 ara yüzü Şekil 3.27’de gösterilmektedir ve kodların kontrol sistemine ve hareket eksenlerine aktarımında gerekli olan hız ve eksen ayarları yapılmıştır.

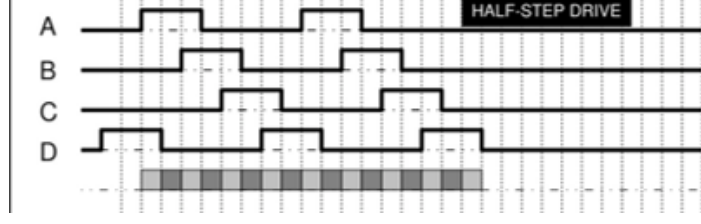


Şekil 3.27. Mach3 ara yüzü

Mach3 ara yüz çok eksenli sistemleri eş zamanlı olarak kontrol edilmesine imkân sağlamaktadır. Dxf uzantısına sahip her türlü nümerik kod tanımlanabilen bu programda tasarlanan parçaların çizimleri G koduna dönüştürülür. Bu kodları yorumlayan kontrolcü sistemi harekete geçirerek makinenin işlem yapmasını sağlamaktadır.

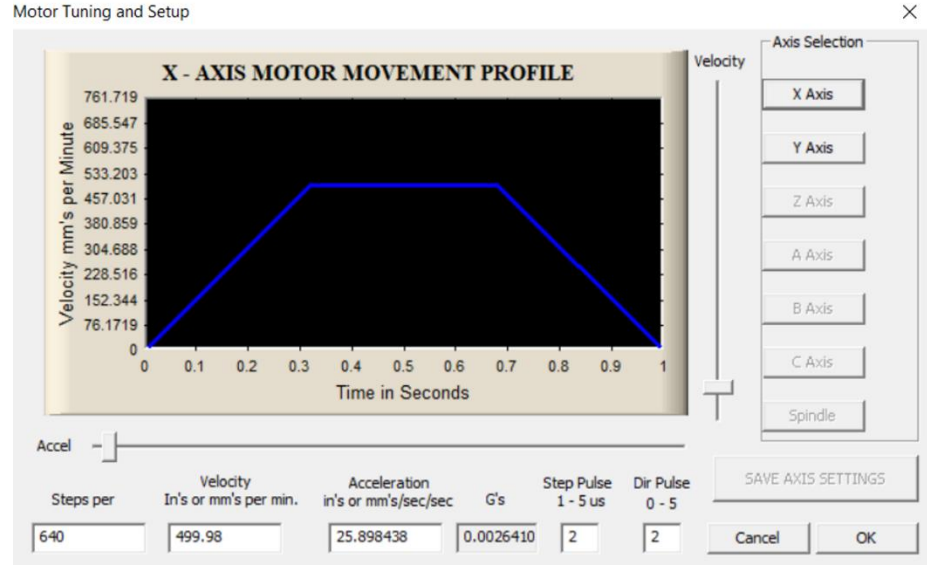
3.6.1. Ara yüzde X ve Y eksenlerindeki step motor ayarı

Üç boyutlu kaplama sisteminde sadece X ve Y eksenlerinde step motor kullanılmıştır. Şekil 3.28’de 4 fazlı tek kutuplu bir step motorda bobin akımını yarım adım sürüş modu gösterilmektedir. Bu adım başına açısı, tam adımın yarısı demektir. Buradaki sürüşte step motorunda bir pozisyonu döndürmek için 8 adım alacaktır. Yani tam dönüş başına $25 \times 8 = 200$ adım olacak ve her adım $360/200 = 1,8^\circ$ olacaktır.



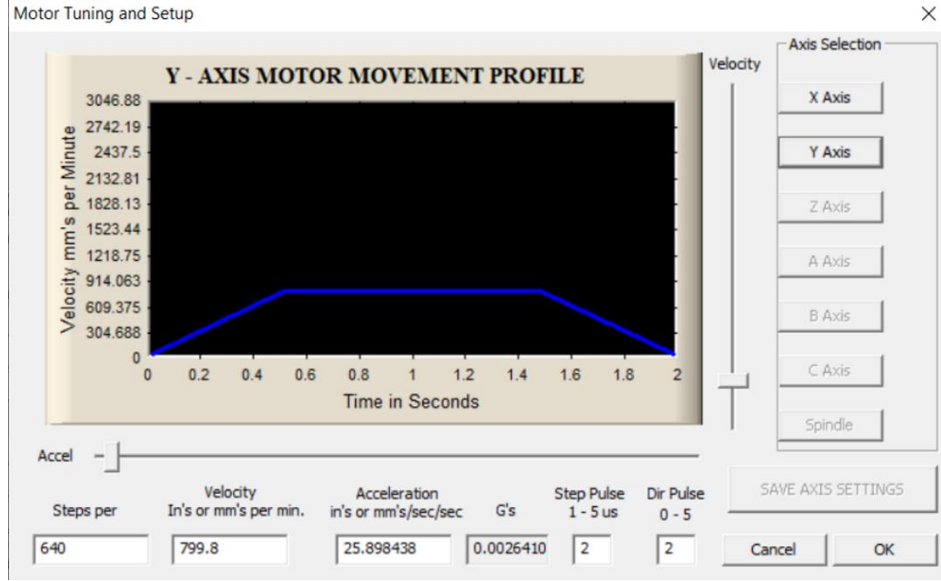
Şekil 3.28. Dört fazlı Unipolar step motor yarım adım (1/8) (“Stepper Motor”, 2020).

Kullanılan adım motor her bir adımını 1.8 derecedir. 360 derecelik bir turda 200 adım atar. Sürücü üzerinde yarım adım 1/8 olduğundan tam turda 1600 mikro adım atmış olacaktır. Bu bilgiler doğrultusunda X ve Y eksenlerindeki adım motorlar kaplin sayesinde vidalı tahrik miline bağlanmıştır. Bağlanan tahrik mili için SFUR 1605 vidalı mil somunu kullanılmıştır ve vidalı mil somun gövdesi vidalı mile montajlanarak eksen hareketleri oluşturulmuştur. SFUR 1605 vidalı 1600 adımda 5 mm hatve yapılmasını sağlamaktadır. 1 mm hatve için 320 adım gerekir. Bu yüzden X ekseninde bulunan step motor ayarı 2 mm hatve yapması için şekil 3.29’da “Steps per” bölümü 640 olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.29. X eksen motor hareket profili

Y eksenlerinde bulunan step motor ayarı 2 mm hatve yapması için şekil 3.30’a “Steps per” bölümü 640 olarak belirlenmiştir.

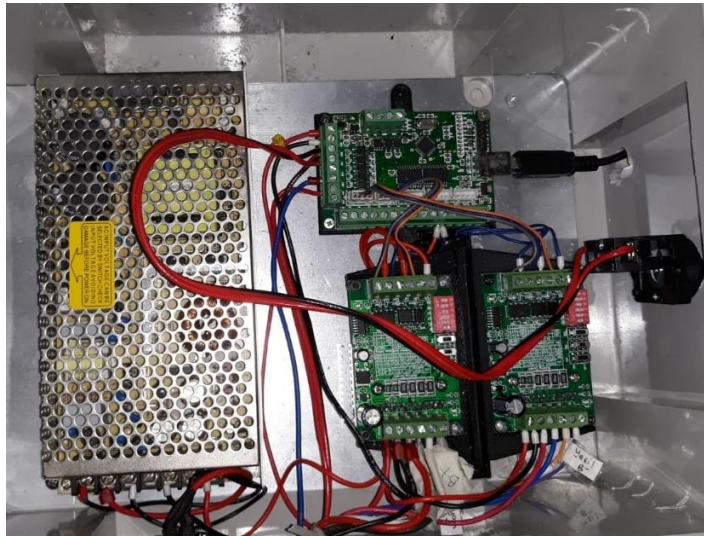


Şekil 3.30. Y eksen motor hareket profili

Sistemlerdeki X ve Y eksenindeki motorların hızları şekil 3.34 ve şekil 3.35'te kontrol edilmiştir.

3.7. Pano ve Mikro Denetleyicinin Montajı

Sistem için üretilen şekil 3.31'deki panoda eksen kontrol kartı, step motorlara ait sürücüler ve güç kaynağının pano içerisindeki yerleşimi gösterilmektedir.

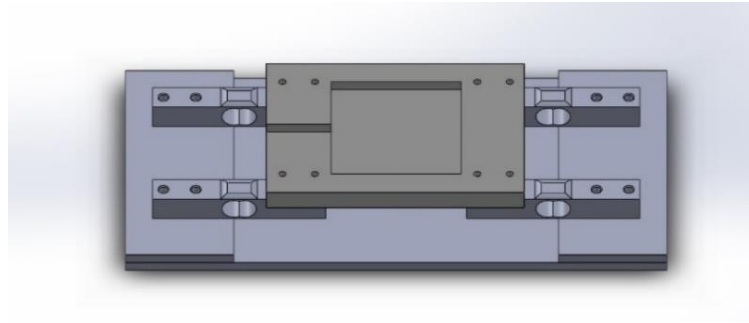


Şekil 3.31. Sistem hareket eksen için hazırlanan pano

Şekil 3.31 panoda iki tane adım motor sürücü TB6560, bir tane enerji kaynağı, bir tane stop butonu ve kontrol kartı kullanılarak pano hazırlanmıştır. Sistemlerin hareket eksenleri test edilmiştir. İkinci aşamada ise Z ekseninde ağırlık sensörleriyle ölçüm yapılacağı için istenilen özellikte MG402E DC motor montaj edilmiştir.

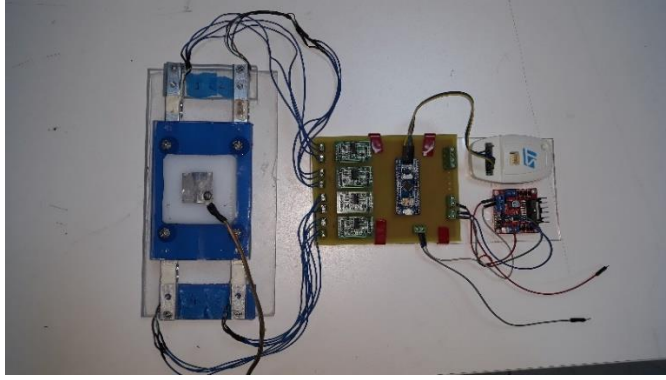
3.7.1. Baskı yükü ölçme sistem tasarımı

Kaplama yapan tutucunun altlık malzemeye yaptığı baskı yükü ölçme sisteminde kaplanan malzemenin DC motordan uygulanan ağırlığın dengelemesi için oluşturulmuş bir yardımcı sistemdir. Şekil 3.32’de görünen sistemde 4 adet ağırlık ölçme sensörü bulunmaktadır. Bu ağırlık sensörleri kaplama yapılacak alanın altına baskı yükü ölçmek amacıyla yerleştirilmiştir. Bu sayede kaplama sistemine uygulanan DC motorun çalışmasıyla tahrik sistemlerinin zemine uyguladığı ağırlığın dengelenmesi sağlanmıştır.



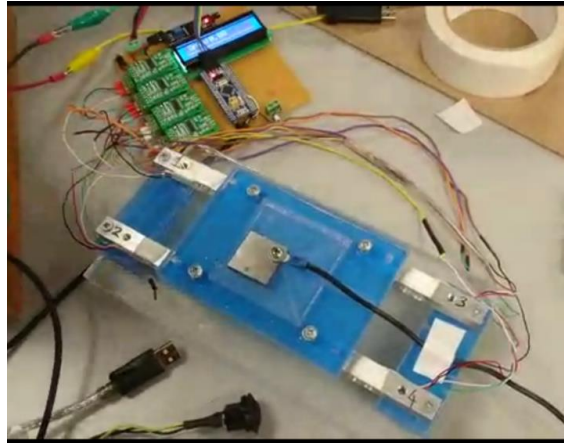
Şekil 3.32 Ağırlık sensör kontrolü için tasarlanan gram ölçme sistemi

İkinci aşama olan DC motor ve ağırlık sensörleri arasında ilişki kurabilmek için şekil 3.33’te görünen devre hazırlanmıştır. Bu devrede STM32F103 mikro denetleyicisi kullanılmıştır. Ayrıca ağırlık sensörleri ölçümü için ağırlık sensörlerinden gelen veriyi analogdan dijitale çevirici 4 tane HX711 entegresi kullanılmıştır. Ağırlık sensöründen okuduğu veriyi (direnç değerini) dönüştürerek mikro kontrolcü yardımıyla ağırlık değeri olarak görmemizi sağlamıştır.



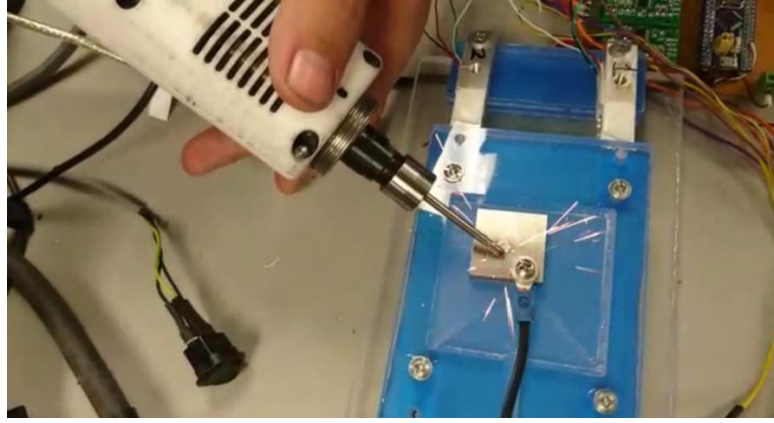
Şekil 3.33. Gram ölçerek kuvvet geri besleme yapmak için tasarlanan devre

Devre ve ağırlık ölçme mekanik sistem birbirine montaj edildikten sonra kalibrasyon ve sistem hızı denemesi yapılmıştır. Şekil 3.34'te görünen sistemin 100 gram aralığında çalışacağı için bu ağırlıklarla denemeleri yapılmıştır. Yazılımın ve sistemin doğruluğu farklı ağırlıklar altında denenerken en iyi sonuca ulaşılmaya çalışılmış ve ölçümün doğruluğu denenmiştir. Kalibrasyonu için belli ağırlık altında kütle ölçme ve deneme çalışmaları sonucu ağırlık yazılımın doğru çalıştığı belirlenmiştir. Bu sayede kaplama sistemini işlem yaparken kaplamaya uygulanan kuvveti hesaplanmıştır. Kalibrasyon denemelerinde 4000 grama kadar ağırlıklarla ölçülmüştür.



Şekil 3.34. Denemesi yapılan ölçme sistemin kaplama sistemine bağlanması

Argon gazı olmayan ortamda deneme yapılarak hem elektro kıvılcım kaplama çalışması hem de ağırlık ölçme sistemi gözlemlenmiştir. Şekil 3.35'te yapılan denemeler sonunda bu iki sisteminde doğruluğunu belirlenmiş sonrasında ise sistemin deney ortamı oluşturulmuştur.



Şekil 3.35. Ölçme sistemi üzerinde manuel EKB işlemi yapılması

Tez çalışmasında EKB yöntemiyle uyumlu denemeleri yapılmıştır. Şekil 3.55'teki denemede 30x30 mm kesilen AISI 304 paslanmaz çelik numuneleri ağırlık ölçmek için oluşturulan sistemin üzerine yerleştirilmiş ve manuel olarak kaplama işlemi yapılmıştır. Numune yüzeyine kaplama yapılması için elektrot ile kaplanan malzeme yüzeyine dokundurmak yeterlidir. Kaplama işlemi yapılan numuneye manuel olarak uygulanan kuvvet değerleri ağırlık ölçme sisteminde gözlemlenmiştir.

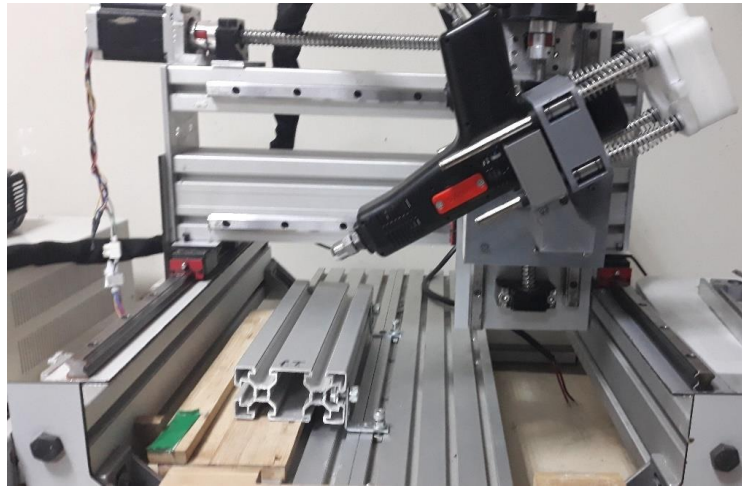
3.7.2. Yaylı yük dengeleme sistem

Sistemin istenilen özellikte çalıştığı doğrulanınca sistemin Z eksenini için şekil 3.36'da gösterilen yaylı bir tutucu sistem geliştirilmiştir. Şekil 3.36'da montajlanmış olarak görünen yaylı sistem, kaplama tabancasıyla uyumlu olarak tasarlanmış ve Z eksenini ve kaplama tabanca arasında yaylı sistem oluşturulmuştur. Bu sistem ani hata anında kaplamaya veya sisteme zarar vermemesi için tasarlanan yaylı bir sistemdir



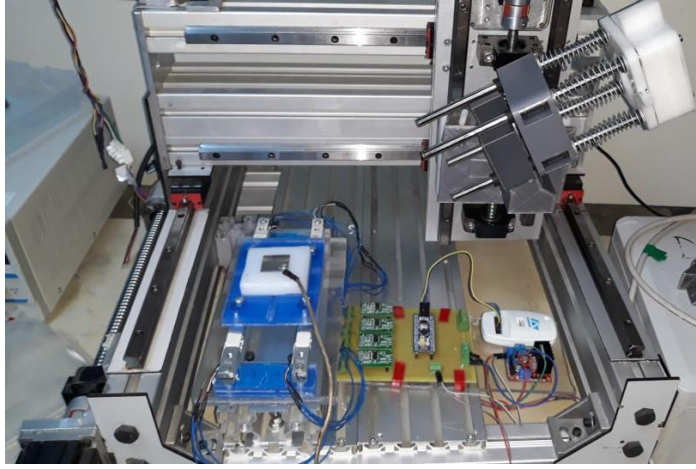
Şekil 3.36. Z eksenine kaplamaya yardımcı yaylı dengeleme sisteminin kaplama tabancasına montajı

Sistem kaplama yapacağı için tabancanın aksel olarak uyumu çok önemlidir. Bu yüzden ağırlık dengeleyici bir yaylı sistem kurulmuştur. Oluşturulan bu yapı kaplama tabancasıyla kolayca ayrıştırılıp istenilen başka yapılarla kolayca birleştirilebilir. Yaylı sistem Z eksenine Şekil 3.37'deki gibi montaj edilmiştir. Üç eksenli sistemin DC motor-ağırlık ölçme sistemi birbirine montaj edilerek kalibrasyon ayarı yapılmıştır.



Şekil 3.37. Yaylı sistemin üç eksenli sistemine montajı

Şekil 3.38’de kaplama tabancası yaylı sistemle birleştirilmiştir. EKB sisteminin yük uygulama deneylerine geçilmiştir. Denemede zemine uygulanan kuvvet 100 gramdan fazla olmaması gerekli olduğu ve çalışma hızı göz önünde bulunarak hareket edilmiştir. Sistemin hızlı çalışmasından dolayı kaplama yüzeyinde atlama olmaması için çalışma hızı minimum seviyede tutulmuştur. Kaplama yüzeyde ve mikro seviyede olacağından ağırlık sensörlerin ölçtüğü kaplanan metal üzerindeki kütle birikimi ihmal edilmiştir. Farklı sistemlerden oluşmasında dolayı sistemde PID değerleri belirlemek için farklı, genel sistem çalışması için farklı yazılım kullanılmıştır.



Şekil 3.38. Üç eksenli hareket sistemi, ağırlık ölçme sistemi, yaylı dengeleme sistemi montajı

Şekil 3.39’daki EKB cihazı el ile kaplama yapmak için uygundur. Tezdeki ana amaç bu kaplama sisteme yardımcı bir sistem tasarlamaktır.



Şekil 3.39. EKB makinası ve kaplama tabancası

Elektro kıvılcım kaplama yapmak için sistem kurulmuştur. Sistem ilk önce şekil 3.40'daki gibi manuel olarak elle çalıştırılmıştır. Sistemde Kanada Huys şirketinin ürettiği frekans, voltaj vb. ayarı istenilen şekilde değiştirilebilen parametre ayarı kolay olan EKB makinası kullanılmıştır.



Şekil 3.40. Argon gazlı ortamda manuel EKB deneyleri

Şekil 3.41'de gösterildiği gibi üç eksenli hareket sistemi ağırlık sensörlü DC motor sistemi ve elektro kıvılcım makinası birbirine montaj edilerek sistem tamamlanmıştır. Kaplama deneylerine geçilmiştir.



Şekil 3.41. Sistemin argon gazlı ortamda deneyleri

Oluşturulan sistem elle kaplama yapmak yerine otomatik bir sistem olarak yüzey üzerinde belirlenen 100 gram ağırlık değerlerinde kaplama yapmaktadır. Bu sayede daha hızlı ve daha verimli kaplama yapılması sağlanmıştır.

3.8. Tasarlanan Sistemin Modelleme Yöntemi

Tasarlanan sistemde belirli zaman aralığında sistemin verdiği tepki ağırlık sensörleri ile ölçülerek kayıt edilmiştir. Bu veriler kullanılarak sistem modellemesi yapılmıştır. İşlemler sonunda EKB kaplama sistemini istediğimiz kuvvet parametrelerinde kaplanan malzeme yüzeye ağırlık geri besleme ve otomatik olarak işlem yapmasını sağlayan üç eksenli otomatik bir kaplama sistemi geliştirilmiştir ve sistem modellemesi tanımlanmıştır.

3.8.1. Kara kutu modeli ile sistem tanımlama

İncelenen sistemin yapısı hakkında hiçbir bilgiye sahip olunmadığında kullanılan yaklaşımdır. “Kara Kutu” modeli yaklaşımında, sistemin matematiksel modeli çıkartılırken sadece deneysel verilerden yararlanır. Bu yaklaşım sürecinde içeriği hakkında hiçbir bilgi sahibi olunmayan sisteme çeşitli giriş sinyaller uygulaması sonucunda çıkış sinyalleri izlenerek bir model oluşturulur. Şekil 3.42’de gösterilen kara kutu modelleme türü en çok kullanılan türdür. Gerçek sistemler çok karmaşık olduğundan sisteme belirli sinyal girişi uygulanarak çıkış verileri alınmakta ve giriş-çıkış verileri ile sistemin matematiksel modeli çeşitli matematik ve simülasyon programlar vasıtasıyla hesaplanmaya çalışılmaktadır.



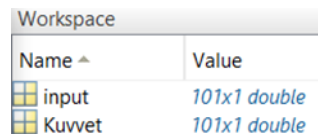
Şekil 3.42. Kara kutu (Black Box) sistemi

“Kara Kutu” yaklaşımı ile matematiksel modelleme yapılan araçlar genellikle sistem tanımlama araç kutularıdır. Ölçülen giriş-çıkış verisinden dinamik sistemlerin matematiksel modellerini oluşturmak için bazı fonksiyonları ve bazı bloklar kullanılır. Bu tür modellemeler, kolay modellenemeyen dinamik sistemlerin modellerinin oluşumuna ve kullanılmasına izin verir.

“Kara kutu” modelindeki amaç sistem hakkında hiçbir bilgiye sahip olunmadığı var sayılarak sistemin matematiksel modeli elde edilmeye çalışılmasıdır. “Kara Kutu” modeli ile sistem modellemek amacıyla üç eksenli kaplama sisteminde birbirine paralel iki farklı yazılım kullanılmıştır. Bu sistem modelinde giriş sinyaline göre ağırlık sensörlerinden bir çıkış verisi alınmaktadır. Birinci yazılımda Z eksenindeki DC motor kullanılarak ağırlık sensörlerinin zamanla gösterdiği yük değişimi kayıt altına alınmış ve sistem verisi oluşturulmuştur. Buradaki X ve Y eksen hareketleri Mach3 sistemiyle kontrol edilmiştir. İkinci yazılım ise birinci yazılımdan gelen veriler doğrultusunda transfer fonksiyonu, PID ve matematik modelinin belirlenmesi için kullanılmıştır. İkinci yazılım ile birinci yazılımda kayıt altına alınan, DC motora gelen giriş sinyal verisi, çıkış verileri ve sensörlerden zamana bağlı olarak gelen ağırlık verisi sayesinde sistemin matematiksel modeli hesaplanmış ve PID ayarları yapılmıştır.

3.8.1.1. Tasarım için kullanılan gerçek zamanlı veriler

Sistem modeli tasarlamak için bazı verilerin olması gerekmektedir. Bunlar bu tasarlanan sistem için mikroişlemciden DC motora gelen sinyal verisi ve ağırlık sensörlerinin zamanla ölçtüğü değerler verisidir. Sistem belli bir süre çalıştırılmış ve verileri kayıt altına alınmıştır. Bu veriler sistem çalışırken çeşitli yazılım ve ara yüzlerden işlenerek belirlenmiştir. Bu veriler sistem tasarımı için “input” ve “Kuvvet” olarak belirlenmiştir. Şekil 3.43’te sistem verisi tanımlamak için “Workspace”ye aktarılmıştır.



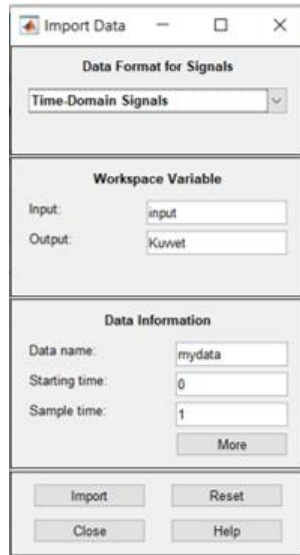
Name ^	Value
input	101x1 double
Kuvvet	101x1 double

Şekil 3.43. Alınan verilerin workspace’ye aktarılması

Verilerin sistem tanımlama kutusuna (SIT) yüklenmesi için şekil 3.43’deki formatta olmalıdır.

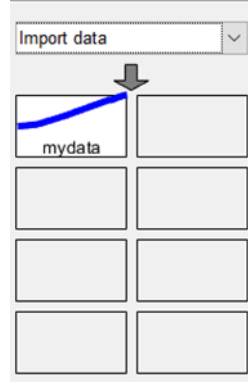
3.8.1.2. Sisteme alınan verilerin işlenmesi ve tasarlanması

Şekil 3.43'te Workspace'ye aktarılan veriler "System Identification Toolbox"'a gönderilmiştir. Burada "Time-Domain Signal" seçeneği belirlenir. Bunun nedeni belirlen zaman içinde sisteme gelen giriş sinyallerine göre kuvvet verilerinin değişmesidir. Daha sonra şekil 3.44'teki "Import data" sekmesinden "Data Format for Signals" penceresinde "Time-Domain Signal" seçeneği belirlenmiştir. Verilerin Şekil 3.43'te gösterilen "input" ve "Kuvvet" değerleri "Workspace Variable" da bulunan giriş (input) değerine "input", çıkış (Output) değerine ise "Kuvvet" değeri atanmıştır. Bunun sebebi işlem alanında(workspace) şekil 3.43'te belirtilen verilerin "Kara Kutu" sistemi kestirim yoluyla transfer fonksiyonu belirlenmesi için "input" değerinin giriş sinyali olması ve "Kuvvet" değerinin de çıkış sinyali olmasıdır. Sistemin zamana göre kuvvet uygulamasının verileri gerçek zamanlı olarak kayıt edilmiştir. Bu verilerde 100 saniyede 3886,528 grama kadar gerçek zamanlı olarak 100 veri alınmıştır. Bu verilere dayanarak şekil 3.44'deki "Data Information" da belirtilen, başlangıç zamanı "Starting time" veriler doğrultusunda 0'dan itibaren alınmıştır. Örnekleme zamanı "Sample Time" ise 100 saniye 100 veri ürettiği için 1 saniye olarak belirlenmiştir. Bu sayede giriş ve çıkış sinyali bilinen sistemi kara kutu modeli ile kestirim yoluyla oluşturmak için "workspace" verileri "System Identification Toolbox"'a gönderilmiştir.



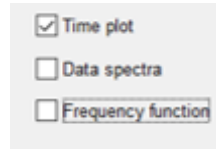
Şekil 3.44. SIT /Veri yükleme penceresi

SIT ara yüzünün şekil 3.44’de değerler. “import” sekmesi tıklandığında Şekil 3.45’de “mydata”da veri oluşturulur. System Identification Toolbox’da “mydata” seçeneğinde belirtilir.



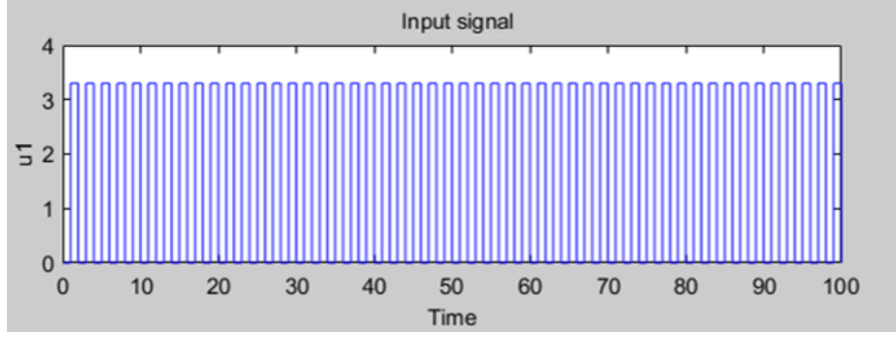
Şekil 3.45. İşlenen data

İşlenen veriler “mydata” içinde zaman ve zaman bağlı veriler belirlenerek şekil 3.45 gösterildiği şekilde sisteme yüklenir. “mydata” gönderilen verileri SIT’te bulunan şekil 3.46’da “Time Plot” seçeneğinde işlenen giriş ve çıkış verilerini “input and output signal” olarak gösterir.



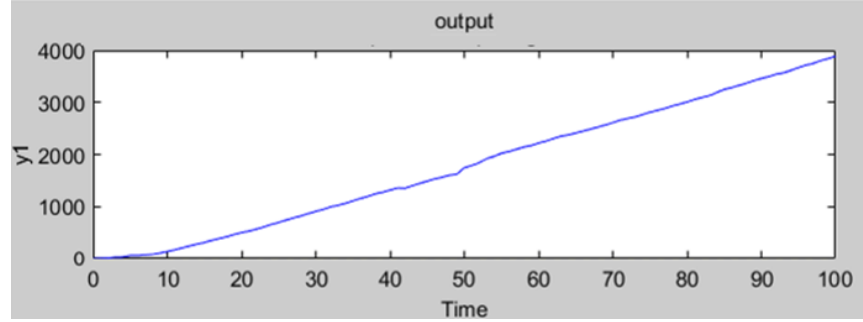
Şekil 3.46. Time Plot seçeneği

Şekil 3.46’da sonuçlar kontrol edilerek, sisteme gönderilen sinyallerin zamanla değişen kuvvet değeri gözlenmiştir. Sisteme uygulanan kuvvetin gelen sinyal ve geçen zamana göre değişimi şekil 3.47’de giriş (input) gösterilmektedir. Şekil 3.47’de görüldüğü gibi başlangıç sinyali mikroişlemciden gelen giriş sinyal olarak değerlendirilmiştir. Sistem gerçek zamanlı verilere göre ölçülmüş ve sistem giriş (input) sinyali veriye göre yapılandırılmıştır.



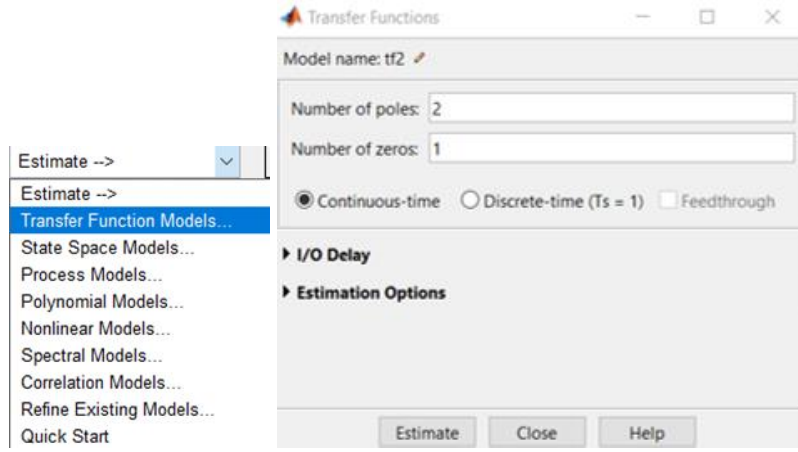
Şekil 3.47. Sisteme girilen input sinyali

Şekil 3.48’de giriş sinyaline göre zamanla değişen kuvvet değerleri gösterilmiştir. Şekil 3.47’de u1 giriş sinyali (input) ve şekil 3.48 ise y1 çıkış (kuvvet) verisi gösterilmektedir.



Şekil 3.48. Sistemden çıkan output (kuvvet) zamanla değişimi gösterilmiştir

Giriş ve çıkış verileri SIT’da tanımlandıktan sonra şekil 3.49’da görülen “Transfer Function Models” seçilmiştir ve şekil 3.49’daki sistemin pay(zeros) ve paydaları(poles) belirlenmiştir. Burada pay 1.dereceden payda 2. dereceden olarak seçilmiştir. Kutup-sıfır sayısı belirlendikten sonra “Estimate” butonuna tıklanılarak, transfer fonksiyonu tahmin etme işlemi yapılmıştır.



Şekil 3.49. Kutup, sıfır (pay, payda) derecesinin belirlenmesi

Şekil 3.50’de yapılan tahminleme işlemi görülmektedir. Bu tahmin etme sonuçları için çalışma alanında bulunana giriş ve çıkış sinyallerine karşılıklı olarak (mesela birinci giriş sinyali için birinci çıkış sinyali) örnekleyerek kıyaslamaktadır. Kıyaslamadan transfer fonksiyon modeli oluşturmak için şekil 3.49’da görüldüğü gibi “poles” ve “zero” değerleri girilmiş ve sonucunda Şekil 3.50’de gösterilen tahmini sonuç uyum oranı %98,01 olmuştur. Tahmin sonucunda transfer fonksiyon modeli verisi gerçek zamanlı veriye benzerlik-uyum oranının yüksek olduğu görülmektedir.

```

Estimation Progress
Initializing model parameters...
Initializing using 'iv' method...
done.

Initialization complete.

Nonlinear least squares with automatically chosen line search method
-----
Iteration    Cost      Norm of    First-order    Improvement (%)
            step     optimality  Expected      Achieved
            -----
0           569.152   -          9.18e+03     7.16e-05     -          -
1           568.909   0.848     1.74e+03     7.16e-05     0.0426    0
2           568.907   0.0267    34.6        4.87e-07     0.000293  0
-----

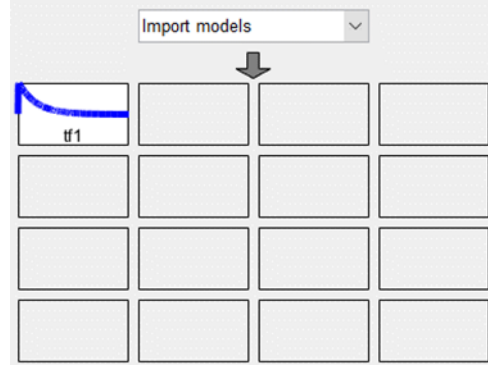
Result
Termination condition: Near (local) minimum, (norm(g) < tol).
Number of iterations: 2, Number of function evaluations: 5

Status: Estimated using TFEST
Fit to estimation data: 98.01%, FFE: 640.769

```

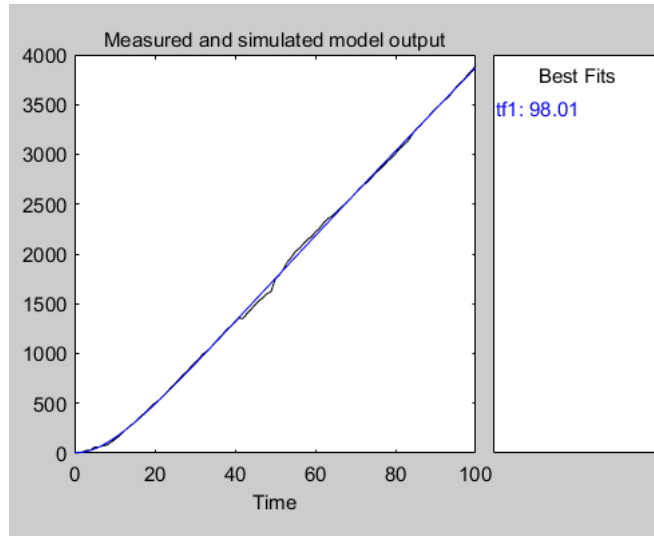
Şekil 3.50. Transfer fonksiyon tahmin verisi

Şekil 3.50'deki tahmin verileri göre Şekil 3.51'de SIT'te transfer fonksiyon modeli verisi ara yüzde tf1 olarak oluşturulmuştur. Şekil 3.51'deki tf1 transfer fonksiyonu 1'i temsil etmektedir.



Şekil 3.51. Transfer fonksiyon modeli verisi

Şekil 3.52'de verilerin uyumluluk sonuçları karşılaştırıldığı sonuç grafiği gösterilmektedir. Burada ölçülen ve simüle edilen veri arasındaki uyum %98,01 olduğu görülmektedir. Böylece elde edilen transfer fonksiyonu gerçek sistem üzerinde uygulanabilmektedir.



Şekil 3.52. Transfer fonksiyon sonucunun ölçülen veriyle kıyaslanması

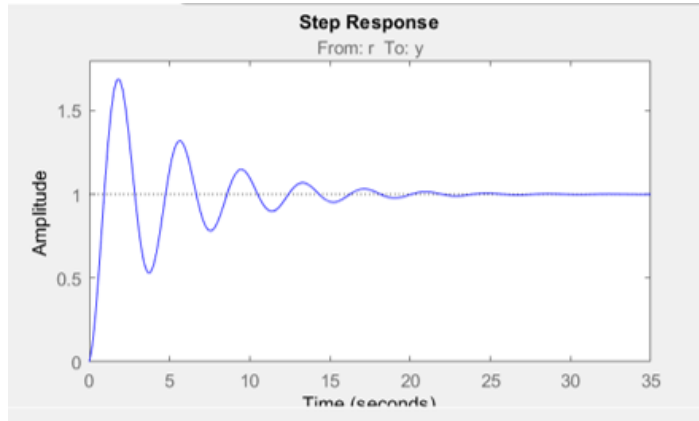
Kestirim yoluyla elde edilen veriler şekil 3.52’de görüldüğü üzere istenilen özellikte veriler oluşturmuştur. Buradaki veriler çalışma alanına (workspace) kaydedilir. Şekil 3.53’te çalışma alanı görüntüsü verilmiştir.



Name ^	Value
input	101x1 double
Kuvvet	101x1 double
tf1	1x1 idtf

Şekil 3.53. Alınan tf1 (Transfer fonksiyon) workspace’ye aktarılması

Yazılım üzerinde şekil 3.53’te gösterilen tf1 verisi doğrultusunda ana ekrandan “Control System Designer” açılır. Bu sayede Transfer fonksiyon verileri (tf1) kontrol sistem tasarımı üzerinden işlenir şekil 3.54’te görüldüğü gibi bir grafik verilir. Bu grafikte sistemin adım yanıtını gösterilmektedir. Biçimsel olarak bir sistemin kararlılığı ve optimum duruma ulaşma yeteneği hakkında bilgi verilmiştir.



Şekil 3.54. tf1 verisinin sisteminde oluşan step response sonuç

Kapalı kutu sistemine “u1” giriş sinyali olarak girilmiş ve “y1” çıkış sinyali alınmıştır. Bu sinyaller sayesinde SIT’te kestirim yoluyla transfer fonksiyon verisi oluşturulmuştur. Burada oluşturulan veriler kontrol sistem tasarımı tarafından transfer fonksiyon tespiti için kullanılmıştır. Bunun sonucunda şekil 3.55’teki görüldüğü üzere üç eksenli kaplama sisteminin kontrol tasarımı için transfer fonksiyon sonucu tespit edilmiştir.

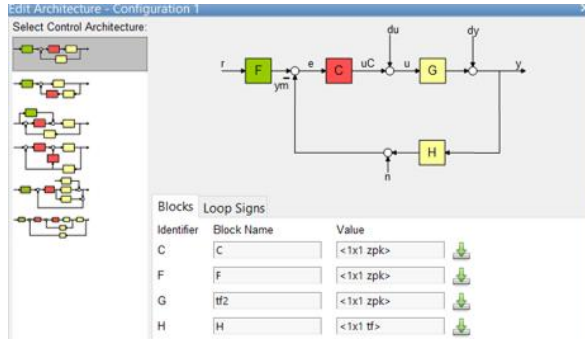
```

Fixed Block
Name: tf1
Sample Time: 0
Value:
From input "u1" to output "y1":
0.29938 (s+9.129)
-----
(s+0.09993) (s+0.0009482)

```

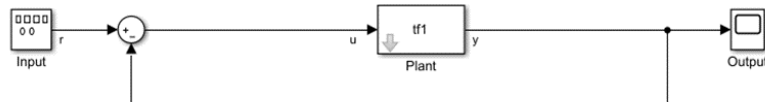
Şekil 3.55. Alınan verilere göre tahmini transfer fonksiyonu sonucu(tf1)

Şekil 3.55'te sistemin transfer fonksiyonu belirlendikten sonra sistem kontrol tasarımı için sistem mimarisi belirlenmiştir. Şekil 3.56'da görülen kontrol sistem mimarilerinden ilk kapalı çevrim kontrollü olanı tasarım, sistemin kolay elde edilmesi için seçilmiştir.



Şekil 3.56. Oluşturmak istediğimiz kontrol sistem mimarisi tercihleri menüsü

Sistem mimarisi belirlendikten sonra veriler sistem tasarım modeline gönderilir. Burada şekil 3.55'te gösterilen transfer fonksiyonu şekil 3.57'deki "tf1"de gösterilmektedir."tf1" kontrol sisteminde transfer fonksiyonu temsil etmektedir. Kontrol sistemin mimarisi, şekil 3.56'da belirlenen kapalı çevrim kontrol sistemi sayesinde şekil 3.57'de gösterilen kontrol sistemi "oluşturulmuştur.



Şekil 3 57. Veriler ile tasarlanan sistemin model gösterimi

Şekil 3.57’de gösterilen “tf1” sistemin transfer fonksiyonunu çalışma alanından (workspace) gelen hazır veriler doğrultusunda oluşturmaktadır.”tf1” şekil 3.55’teki transfer fonksiyon sonucunu temsil etmektedir. Şekil 3.58 ise “tf1” sonucu yerine şekil 3.55’teki transfer fonksiyon sonucunun kendisi yazılmıştır. Sonuç olarak şekil 3.57’deki”tf1” ve 3.58’deki resim içeriği aynıdır ve sonuçları transfer fonksiyonunu temsil etmektedir.

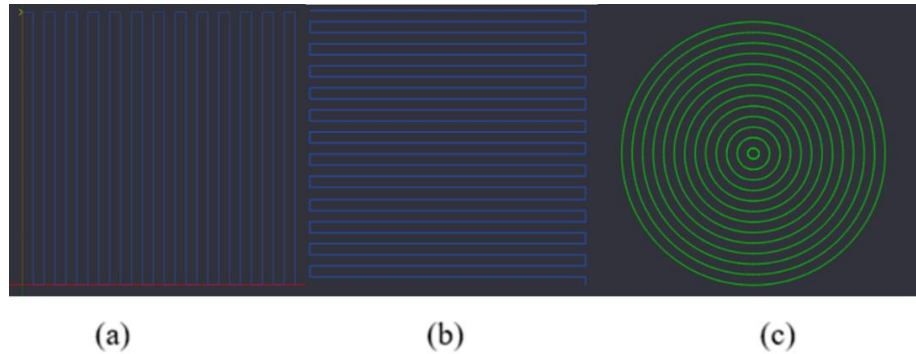
$$\frac{0.29938s + 2.73304002}{s^2 + 0.1008782s + 0.00009475362}$$

Şekil 3.58. Tasarlanan sistemin transfer fonksiyonu

Sonuçta sistemin transfer fonksiyonu şekil 3.57’de ve şekil 3.58’de gösterildiği gibi sistem içinde belirtilmiştir.

3.9. Kaplama Çalışması

Sistemde kaplanan her bir metal 30x30x1 mm’dir. 10x10 mm alanda AISI 304 paslanmaz çelik yüzeyindeki biriken maddenin yüzey kalitesini, kaplanan madde özelliklerini incelemek için üç farklı kaplama deseninde , kapasitans 100 µF, voltaj 80 V ve frekans 80 Hz olarak belirlenen parametrede, PID değerleri P:50, I:2, D:0,6 olarak belirlenmiştir. Kaplamada zemine uygulanan 100 gramlık ağırlık denge kontrolü ve PID değerleri STM32F103 ile kontrol edilmiştir. Kaplama sisteminin yüzey kaplama desenleri X ve Y eksenindeki hareketi ile Mach3 arayüzü ile kontrol edilmiştir. Kaplama desenleri sırasıyla şekil 3.59’da gösterilmektedir. Kaplama desenleri, 10x10 mm alanda kaplama yapacak şekilde belirlenmiştir.



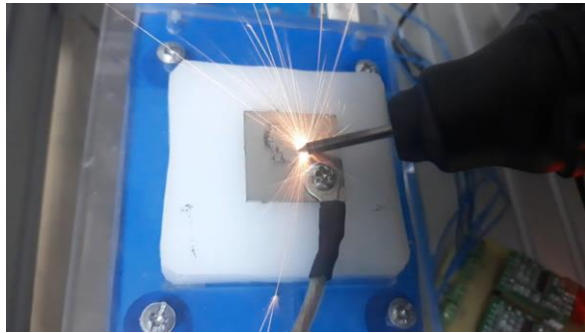
Şekil 3.59. Kaplama desenleri sırasıyla No:1, No:2 ve No:3 kaplama deseni

Şekil 3.59.(a)'daki kaplama deseni No:1 olarak belirlenmiştir. Şekil 3.59.(b)'deki kaplama deseni No:2 ve Şekil 3.59.(c)'deki kaplama deseni ise No:3 olarak belirlenmiştir. Bu desenler kullanılarak kaplama işlemini gerçekleştirmek amacıyla Mach3 ara yüzü için hazır işlem kodları oluşturulmuştur. Kuvvet dengeleyen yaylı sistemin ve kaplama işleminin gerçekleştiren kaplama tabancasının açısı 60 derece olarak belirlenmiştir. Kaplama işlemi geliştirilen üç eksenli sistemi aracılığıyla otomatik olarak gerçekleştirilmektedir. Otomatik kaplama işlemi için parametre seçimi tablo 3.4'te belirlenen kapasitans, voltaj ve frekansı aynı olan üç farklı kaplama işlemi ile gerçekleştirilmiştir. Tablo 3.4'te belirlenen parametre ayarları ve kaplama işlemi için Kanada Huys şirketinden temin edilen EKB makinası kullanılmıştır. Tüm kaplamalar argon gazı bulunana ortamda yapılmıştır.

Tablo 3.4. Kaplama parametreleri

Parametre	Kapasitans	Voltaj	Frekans	Desen	Denge gram	Kaplanan Malzeme	Kaplayan Malzeme	PID Değerleri
1	100 μ F	80 V	80 Hz	No:1	100	AISI 304	WC	P:50, I:1.2, D:0.6
2	100 μ F	80 V	80 Hz	No:2	100	AISI 304	WC	P:50, I:1.2, D:0.6
3	100 μ F	80 V	80 Hz	No:3	100	AISI 304	WC	P:50, I:1.2, D:0.6

Tablo 3.4'te belirtilen birinci parametrede otomatik kaplama şekil 3.65'te gösterilen kaplama işlemi yapılmıştır. Otomatik kaplama işlemi argon gazı bulunan ortamda AISI 304 paslanmaz çelik üzerine, PID değeri P:50, I:1.2, D:0.6 olacak şekilde 100 gram kaplanan yüzeye kuvvet kontrolü uygulanarak, WC (Tungsten Karbür) kaplayan malzemesini kapasitans 100 μ F, voltaj 80 V ve frekans 80 Hz olarak belirlenen parametrede kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir.



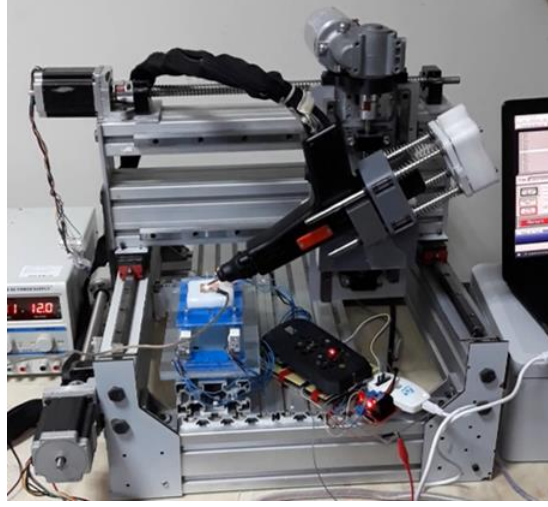
Şekil 3.60. Birinci parametrede otomatik sistemde kaplama işlemi

Tablo 3.4'teki tanımlanan ikinci parametrede. Şekil 3.61'da gösterilen otomatik kaplama işlemi yapılmıştır. Kaplama işlemi argon gazı bulunan ortamda AISI 304 paslanmaz çelik üzerine, PID değeri P:50, I:1.2, D:0.6 olacak şekilde 100 gram kaplanan yüzeye kuvvet kontrolü uygulanarak, WC (Tungsten Karbür) kaplayan malzemesini, kaplama işlemi yapan EKB makinasında parametre ayarları sırasıyla kapasitans 100 μ F, voltaj 80 V ve frekans 80 Hz olacak şekilde kaplama işlemi yapılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.61. İkinci parametrede otomatik sistemde kaplama işlemi

Tablo 3.4'te tanımlanan üçüncü parametre değerlerinde şekil 3.62'de gösterilen kaplama işlemi yapılmıştır. Otomatik kaplama işlemi argon gazı bulunan ortamda AISI 304 paslanmaz çelik üzerine, PID değeri P:50, I:1.2, D:0.6 olacak şekilde 100 gram kaplanan yüzeye kuvvet kontrolü uygulanarak, WC (Tungsten Karbür) kaplayan malzemesini kapasitans 100 μ F, voltaj 80 V ve frekans 80 Hz olarak belirlenen parametrede kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Kaplanan metallerin yüzey kalitesi incelenmiştir.



Şekil 3.62. Üçüncü parametrede otomatik sistemde kaplama işlemi

Sonuçta kaplama yüzeyleri gelişmiş aletlerle gözlemlenerek kaplama parametresi için en uygun değer olarak Kapasitans $100 \mu\text{F}$, voltaj 80 V ve frekans 80 Hz belirlenen parametreler doğrultusunda Üç farklı desende Kaplama işlemi yapılmıştır. Argon gazlı ortamda AISI 304 paslanmaz çelik üzerine WC kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

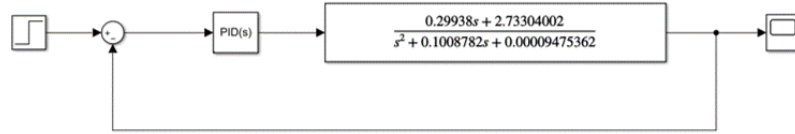
Bu tez çalışmasında EKB yöntemi ile paslanmaz çelik üzerine WC 'yi 100 gram dengede otomatik kaplama için bir mekatronik sistemi geliştirilmiştir. Çok eksenli kuvvet geri beslemeli bir sistem tasarlanmış ve kontrolü gerçekleştirilmiştir. Tasarımı için birçok farklı model konseptleri incelenmiş ve değerlendirilmiştir. Farklı birçok sistemin araştırılmasıyla tezin kapsamına uygun hareket ve kontrol modelleri tasarlanmış ve üretilmiştir. Bu tasarımlar, Z eksenli yaylı kaplama sistemi, ağırlık sensörü kontrolü için ağırlık ölçüm sistemi, tahrik sistemleri, veri toplama işleme sistemleri, model tasarlama, STM32F103 mikro denetleyici sisteminde motor ve sensor kontrolleri, PID kontrolleri yardımıyla ağırlık-kuvvet geri beslemeli bir kaplama sistemidir. Daha sonrasında üç eksenli zeminde bulunan metal yüzeylere kaplama işlemi gerçekleştiren makinenin tasarımı, imalatı ve sistem tasarımı gerçekleştirilmiştir. Uç işlevcisine Kanada Huys endüstrisinden elde edilen EKB kaplama cihazı monte edilmiştir. Bu sistemle otomatik olarak paslanmaz çelik yüzeylere WC malzemesi kaplanmıştır. Ayrıca makine birbirine uyumlu malzeme ve metalleri de kaplama işlemini yapabilmektedir.

Kaplama sisteminde gerçek zamanlı veriler bir yazılım programı tarafından kontrol sistem tasarımı yapılması için kaydedilmiştir. Daha sonra bu kayıtlı veriler kontrol sistemine aktarılmıştır. Bu veriler sayesinde sistemin transfer fonksiyonu adım cevabı elde edilmiş ve sistem kontrol tasarımı gerçekleştirilmiştir. Z eksenindeki DC motor ve ağırlık ölçme sistemi STM32F103 mikro denetleyicisinde kontrol edilmiştir. Sistemin yazılım PID'si optimum çalışma durumuna göre düzenlenmiştir. Sistemin analizleri, modellemeleri, simülasyonları ve verileri kayıt altına alınmıştır.

Üç eksenli sistemin işlem alanında, X ve Y ekseninin kontrol yazılımı olarak Mach3 programı kullanılmıştır. Makinada yüksek hızlarda hareketinde X ve Y ekseninde hafif titreşimler olmaktadır. Oluşan titreşimleri engellemek için Z ekseninde yaylı bir sistem kurulmuştur. Bu sistem titreşimleri büyük oranda engelleyip sönmölemek ve kaplama kalitesine arttırmaktadır. Ayrıca eksik görölen yerlerde üç boyutlu yazıcıdan parçalar üretilmiştir. Sonunda kaplama işleme yapan bir otomatik sistem üretilmiştir. Aynı parametrede üç farklı desende kaplama işlemi yapılarak kaplanan AISI 304 paslanmaz çelik numuneleri kesilerek mikro düzeyde kalınlıkları incelenmiş ve kıyaslanmıştır.

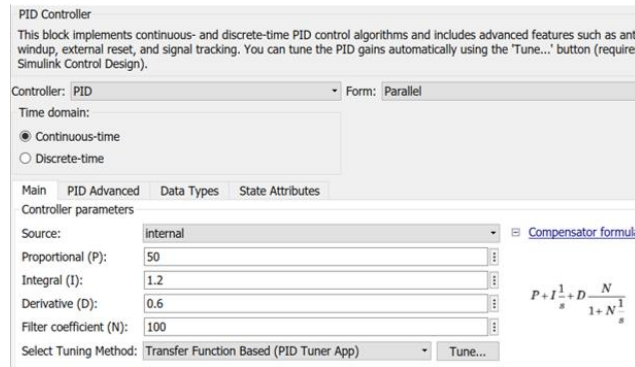
4.1. Sistem için PID Katsayılarının Belirlenmesi

Tasarlanan sistemde kaplama işleminin kaplanan malzeme üzerindeki 100 gram ağırlıkta dengelemesi amacıyla sistemin çalışma durumuna göre PID değerleri belirlenmiştir. Şekil 4.1’de tasarlanan sistemde belirlenen PID değerleri şekil 4.2’de gösterilmiştir.



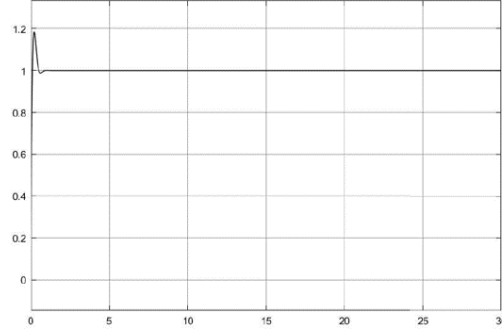
Şekil 4.1. Kayıt edilen veriler doğrultusunda oluşturulan sistem tasarımı

Buna göre sistemde kullanılan PID değerleri sistemin çalışması için optimum değerler P değeri 50 olarak belirlenmiştir. I değeri 1,2 ve D değeri ise 0,6 olarak belirlenmiştir. Filtre katsayısı varsayılan değer olan $N = 100$ alınmıştır.



Şekil 4.2. Tasarlana sistem için belirlenen PID değeri

Şekil 4.1’de kontrol sistemi tasarımı otomatik kaplama yapan sistemin çalışma hızını, reaksiyonu, kontrol edilmiştir ve sistem tasarımı gerçekleştirilmiştir. Veriler doğrultusunda tasarlanan sistemin PID değerinin sistem üzerindeki etkisi şekil 4.3’te görünen grafikteki gibidir. Grafikte sistemin PID sonrası adım yanıtını (step response) gösterilmektedir.

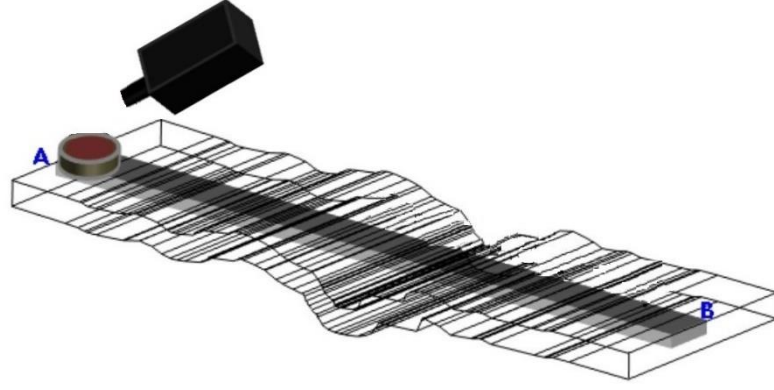


Şekil 4.3. Tasarlanan sistemin adım cevabı (Step response)

Şekil 4.3'te sistemin PID değerine göre zaman oluşan adım yanıtı (step response) gösterilmiştir. Bu yöntem ideal PID katsayılarının bulunmasında yardımcı olmuştur. Biçimsel olarak bir sistemin kararlılığı ve optimum duruma ulaşma yeteneği hakkında bilgi verilmiştir. Veriler doğrultusunda kullanılarak sistem kontrolü yapılmıştır. Sonucunda sistem yazılımında kullanılan PID değerler $P=50$, $I=1,2$ ve $D=0,6$ olarak belirlenmiştir.

4.2 Kuvvet Algılaması ve PID Kontrolü Sonrasındaki Sistem Davranışları

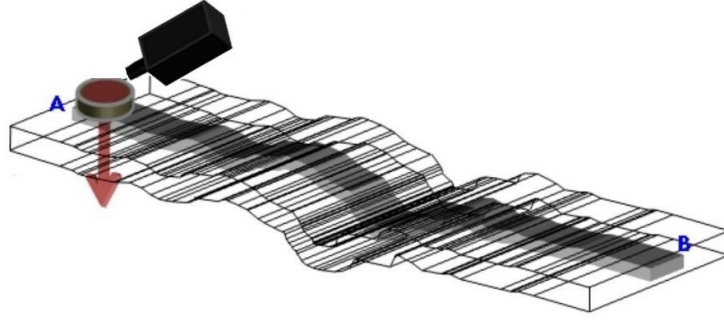
EKB elektrotunun aralıklı ve lokal temasını sağlamak için bazı küçük kuvvetler gerekir. X ve Y eksenlerinin hareketi için G-kodu verileri ile 30x30x1 mm AISI 304 paslanmaz çelik zemin üzerinde kaplama yapmak için A ve B noktaları arasındaki doğrusal mesafede hareket sağlanmıştır. Uygulanan aşırı kuvvet elektrotun kısa devre yapmasına ve ark sürecinin kesilmesine, az kuvvet ise kaplamanın istenilen özellikleri karşılamamasına sebep olmaktadır. Şekil 4.1'de sistemin kuvvet geri beslemeli PID olmadan çalışma simülasyonu gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Sistemin Kuvvet geri besleme ve PID olmadan çalışma simülasyonu

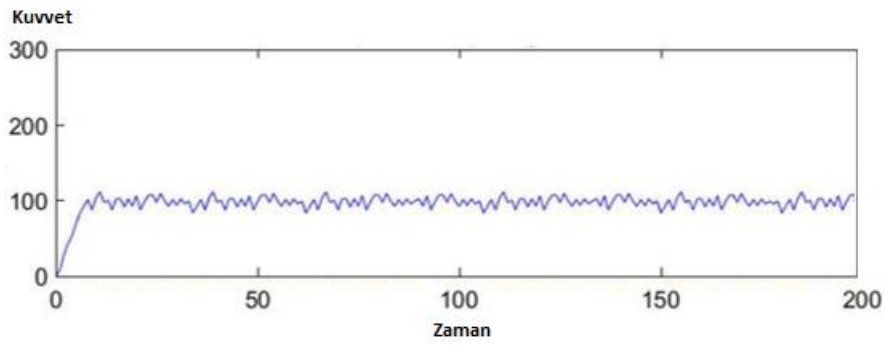
Şekil 4.4’de görüldüğü üzere kaplama zemin yüzeyine bakmaksızın belirlenen bir hat üzerinde kuvvet dengesi olmadan kaplama işlemini gerçekleştirmiştir. Bu kaplamanın bazı yerlerinde istenilen özellikte kaplama olmamasına neden olmaktadır. Bu nedenle zemine uygulanan kuvvetin algılanması ve bu yüke göre sistemin kontrol edilmesini gerekli hale gelmiştir.

Sistem 30x30x1 mm AISI 304 paslanmaz çelik yüzeyini kaplarken ağırlık sensörleri sayesinde kuvvetin belirlenmesi ve mikro işlemci sayesinde de bu etki eden kuvvetin Z ekseninde bulunan DC motor ile kontrol edilmesi gerçekleştirilmiştir. Burada işlem sonucunda anot ve katot arasında şekil 4.5’te kaplama üzerinde mikro kütle transferi gerçekleşmektedir. Ayrıca kaplamanın her türlü yüzeyde eşit olarak yapılması için Z ekseninde bulunan DC motora bağlı tahrik sistemine 60 derecelik açıyla katot montaj edilmiştir. Bu sayede DC motorun dönme kuvveti, kaplanan zemin üzerinde kuvvet oluşturmuştur. Zeminde bulunan ve kaplanan AISI 304 paslanmaz çelik altında bulunan ağırlık sensör verileri ile DC motor ağırlık sensörleri yardımı ile kuvvet kontrolü yapılarak kaplama işlem yapılmıştır. Bu sayede kaplama yüzeyinde kaplama işlem sırasında boşluklar oluşmamıştır. İstenilen hızda ve zamanda kaplama yüzeyi kaplanmıştır. Şekil 4.2’de PID kontrolü uygulanmış kuvvet dengesi ile yüzeyi kaplama davranışı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.5. Sistemin yaylı, kuvvet geri besleme ve PID sonrası çalışma simülasyonu

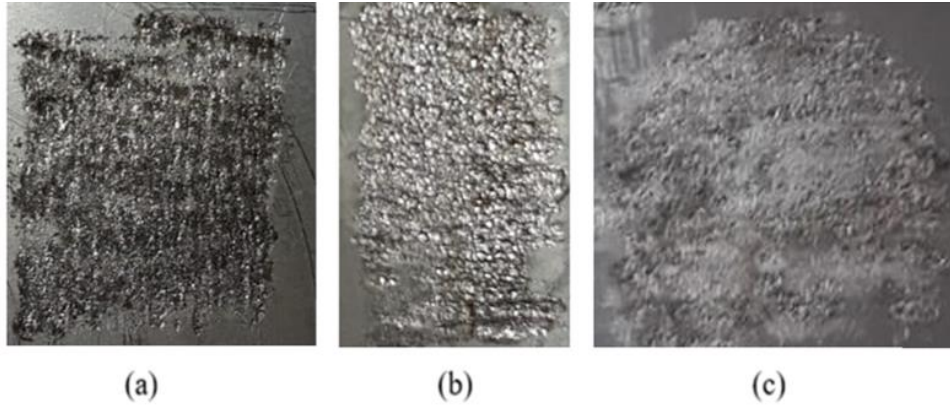
Şekil 4.6’de sistemin kararlılığı incelenmiş ve referans değerleri olan 100 gram kuvvet ile istenilen değerde kaplanan paslanmaz çelik yüzeyinde dengelemiştir. Buradaki dengede sensörlerden okunan gram değeri, yardımcı yaylı dengeleme sistemi ve belirlenen PID değerlerinde 100 granda dengelenmesi sağlanmıştır. İstenilen referans değerinde kuvvet uygulaması için bekledikten sonra kaplama makinası çalıştırılmıştır. Yani sistem dengesi 0 gramdan 100 grama geldikten sonra kaplama işlemi başlatılmaktadır. PID ve yaylı sistem sayesinde yüzeyde kaplama işlemi gerçekleştirilirken tüm kaplanan yüzeylere ortalama olarak eşit miktarda ve belirlenen sabit yük değerinde kaplama işlemini gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.6. PID sonrası 100 gr’da kaplamanın zemine uyguladığı kuvvetin zamanla değişimi

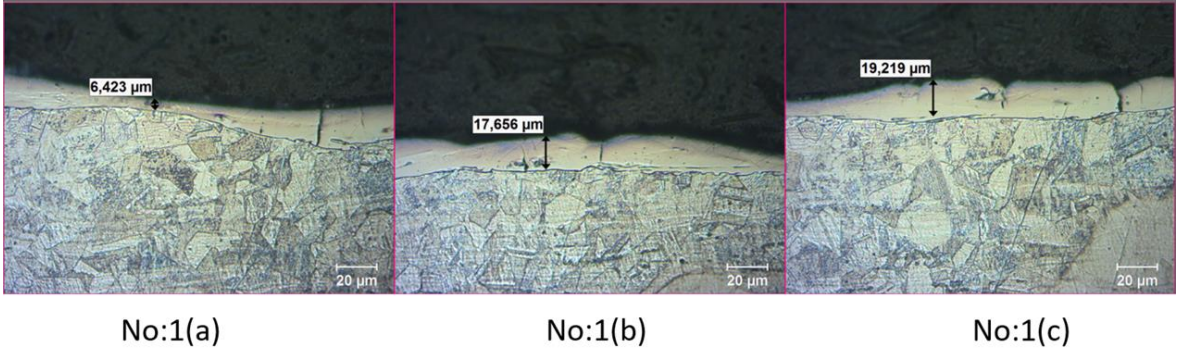
4.3. Kaplama Kalınlık Analizi

Lazer kesme yöntemi ile 30 x 30 x 1 mm ebatlarında kesilmiş olan AISI 304 çeliği üzerine yaklaşık 10x10 mm alana Tungsten karbür (WC) kaplanmıştır. Otomatik olarak yüzeye uygulanan 100 gramlık kuvvet dengesinde, üç farklı kaplama deseni ve kapasitans 100 μ F, voltaj 80 V ve frekans 80 Hz olarak belirlenen parametrede WC (Tungsten karbür) paslanmaz çelik yüzeyin üzerine EKB yardımı ile kaplanan numunelerin mikro yapı incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.7’de kaplamaların üstten görünüm makro fotoğrafları gösterilmektedir. Buna göre kaplanan numuneler sırasıyla Şekil 4.7(a), deseni No:1, Şekil 4.7(b)’de desen No:2, Şekil 4.7(c)’deki ise No:3 örüntülerinde kaplanmıştır. Her üç numunede farklı kaplama örüntülerinde kapasitans 100 μ F, voltaj 80 V ve frekans 80 Hz olarak belirlenen parametrede, PID değerleri P:50, I:2, D:0,6 olarak şekilde 100 gramlık kuvvet dengesinde kaplanmıştır.

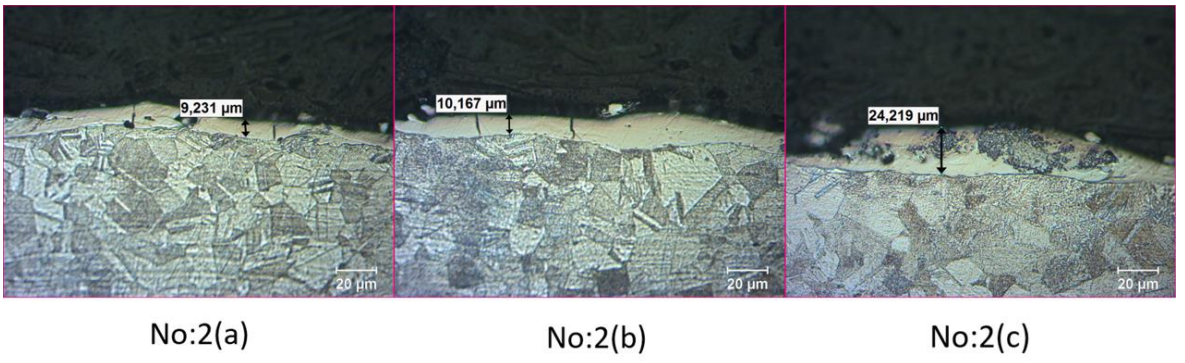


Şekil 4.7. Kaplamaların makro görüntüleri

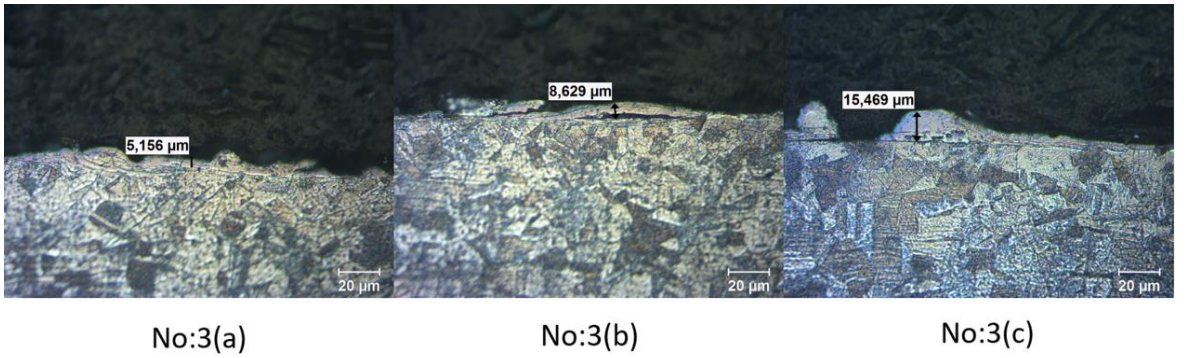
WC ile kaplanan AISI 304 paslanmaz çelik numuneler daha sonra kesilerek mikro yapısı incelenmiştir. Kaplanan numunelerin kaplama analizlerinde 500x büyütmede ölçülen mikro yapı kalınlıkları şekil 4.8, şekil 4.9 ve şekil 4.10’da gösterilmektedir.



Şekil 4.8. No:1 deseninde kaplanan numunenin 500x Tabaka Mikro yapısı 3 farklı bölgesindeki kaplama kalınlıkları



Şekil 4.9. No:2 deseninde kaplanan numunenin 500x Tabaka Mikro yapısı 3 farklı bölgesindeki kaplama kalınlıkları



Şekil 4.10. No:3 deseninde kaplanan numunenin 500x Tabaka Mikro yapısı 3 farklı bölgesindeki kaplama kalınlıkları

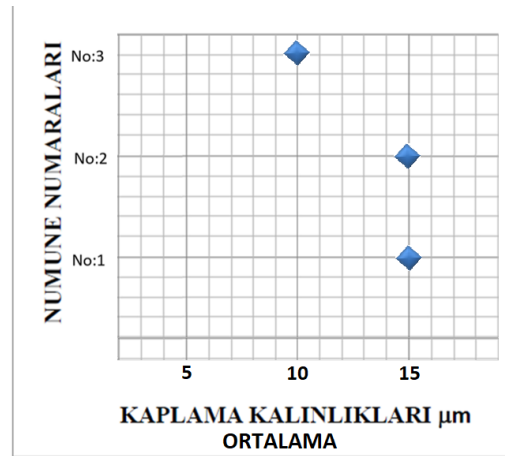
4.3.1 Kaplama analiz sonuçları

Şekil 4.8, şekil 4.9 ve şekil 4.10’da gösterilen mikro yapı özellikleri ve tüm kaplama kalınlıkları karşılaştırılması tablo 4.1’de gösterilmiştir.

Tablo 4 1. Desen numarasına göre mikro yapı özellikleri

Numune Kaplama Deseni	Kaplama Kalınlığı a (μm)	Kaplama Kalınlığı b (μm)	Kaplama Kalınlığı c (μm)	Kaplama Kalınlığı Ortalama (μm)	Kaplanan Malzeme	Kaplayan Malzeme
No:1	6,423	17,656	19,219	14.4326	AISI 304	WC
No:2	9,231	10,167	24,219	14.539	AISI 304	WC
No:3	5,156	8,629	15,469	9,7513	AISI 304	WC

Kalınlık ortalaması grafik şeklinde karşılaştırılması şekil 3.72’de verilmiştir. Kesilen numunelerin mikro yapısı incelenmeden önce dağlama yapılmıştır. Dağlama işlemi %65’lik nitrik asit ile %35’lik klorik asitli ortamda 15 saniye sürede yapılmıştır. 500x büyütmede ölçülen, WC kaplanan numunelerin mikro yapı kalınlık kıyası, tablo 3.6’daki verilere göre ortalaması alınarak kıyaslanmıştır. Buna göre 100 gramlık kuvvet dengesinde WC kaplanmış AISI 304 paslanmaz çelik üzerinde oluşturduğu mikro yapı ortalama kalınlıkları şekil 3.72’de görüldüğü üzere No:1 kaplama deseninde kaplanan metal için 14.4326 μm ’dir. No:2 kaplama deseninde kaplanan metal için 14.539 μm ’dir. No:3 kaplama deseninde kaplanan metal için 9,7513 μm ’dir.



Şekil 3.63. Kaplamaların ortalama kalınlık kıyaslamaları

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında endüstride yüksek kullanım potansiyeli olduğu düşünülen Elektro Kıvılcım Biriktirme yöntemi ile AISI 304 paslanmaz çelik üzerine WC kaplama yapılması için bir sistem tasarlanmıştır. Bu sistem için yaylı dengeleme sistemi, ağırlık ölçme sistemi, veri toplama ve kontrol devresi tasarımı ve imalatı gerçekleştirilmiştir. Bu sayede AISI 304 paslanmaz çelik yüzeylerinde istenilen kuvvet dengesinde kaplama işlemi yapabilen çok eksenli bir yardımcı sistem geliştirilmiştir.

Sistemde kullanılan yaylı dengeleme sistemi kaplama tabancası için tasarlanmıştır. Zeminde oluşabilecek kaplama hataları en aza indirilmiştir. Ayrıca uç işlevcinin zeminle paralellliğini bozmayacak şekilde kaplama yapması sağlanmıştır. Bu sayede kaplama tabancası bulunduğu yerdeki duruş pozisyonun koruyarak istenilen kaplanan yüzeyi noktasında kuvvet dengesi oluşturulmuştur. Bu yaylı sistemin farklı yüzeylerde de kullanılarak dengeleme özelliği yapabileceği keşfedilmiştir. Ayrıca bu sistem geliştirmeye açık olup farklı uygulamalarda kullanılabilir niteliktedir.

Ağırlık ölçme sisteminde zeminde istenilen kuvvet dengesini oluşturmak amacıyla kontrol devresi yapılmıştır. Bu devre kaplama işlemi yapılırken AISI 304 paslanmaz çelik zeminde 100 gram kuvvetle kaplama işlemi yapılabilmesi için ağırlık faktörünü kontrol etmiştir. Ayrıca bu devre sayesinde sistemden gerçek zamanlı veriler toplanmış, sistem testleri yapılmıştır. Kaplama sisteminin çalışması için optimum PID değerleri tespit edilmiştir. Bunun sonucunda sistemin PID değerleri P:50, I:2, D:0,6 olarak belirlenmiştir.

AISI 304 Paslanmaz çelik yüzeyde uygulanan kuvvet dengesi istenilen ağırlıkta belirlenebilmektedir. Geliştirilen bu sistemde 100 gramlık ağırlık dengesinin daha verimli kaplama yaptığı gözlemlenmiştir. 100 gramdan az kuvvet dengesinde yüzeydeki kaplama kalitesi bozulmaktadır. 100 gramdan fazla kuvvet dengesi ise kaplamanın verimli bir şekilde oluşumuna engel olmaktadır.

Bu çalışmada gözlemlenen en önemli kısıtlardan biri ise yük ölçen sensörlerinin kaplama metalinin altında olmasıdır. Bu durum geniş ve ağır parçalar için sorun olmakta ve sensöre zarar verebilmektedir. Bu durumu minimize etmek için ağırlık ölçme sistemini zemine montajlamak yerine kaplama tabancasının üzerine monte etmek daha uygun olduğu

düşünülmektedir. Bu sayede gerçek zamanlı veri sonuçları daha verimli kayıt altına alınarak sistemin kontrolcü tasarımı ve PID değerleri optimum değere ulaşabilecektir.

Üç eksenli sisteme Kanada HUYS şirketinden elde edilen kaplama cihazı monte edilerek üç farklı örüntüde kuvvet kontrollü kaplama işlemi yapılmıştır. Bu kaplama işlemleri sonunda No:1 örüntüsü 14.4326 mikron, No:2 örüntüsü 14,539 mikron ve No:3 deseni ise 9,7513 mikron yüzey kaplama kalınlığı ölçülmüştür. Bu tüm örüntüler incelendiğinde No:1 ve No:2 örüntüleri birbirine benzer olduğu için kaplama kalınlıkları da yakın çıkmıştır. No:3 örüntüsünde kaplamanın kalınlığı, diğer örüntülere göre az olduğu görülmektedir. Bu durum yüzey kalitesini olumsuz etkilemektedir. Ama bu durum No:3'teki örüntüsünün tekrar sayısını arttırarak telafi edilebilir ancak daha fazla zaman gerektirebilir.

Tasarlanan kaplama sistemi ile endüstriyel ortamda bir işçinin bir mesai süreci içerisinde yapabileceği işi daha kısa bir zamanda ve daha iyi bir standartta yapılması amacıyla kullanılabilir. Aynı zamanda iş güvenliği gerektiren tehlikeli ortamlarda otomatik olarak kullanılabilme özelliğine sahiptir. Endüstriyel ortamın ihtiyacına göre boyutsal değişim ve farklı uç işlevci uygulamaları ile her türlü işleve uygun hale getirilebilir. Ancak endüstriyel uygulamalarda kullanılabilmesi birkaç değişiklik ve geliştirilmenin yapılması uygulamada kolaylık sağlamanın yanında karşılaşılabilecek bazı sorunların çözümünü de gerçekleştirebilir.

Sistem yazılımı ve Mach3 yazılımı ayrı olarak çalışmaktadır. Bu yazılımların birleştirilmesiyle uygun kontrol ara yüzü geliştirilerek düşük toleranslar içinde kaplama işlemini gerçekleştiren hassas bir tasarım yapılabilir.

Yaylı dengeleme sistemi, kaplama tabancası ve ağırlık ölçme sistemi mekanik olarak birbirinden bağımsızdır. Bu durum kaplanan malzemenin kalitesini etkilemektedir. Bu etkenleri tek bir mekanik sistemde birleştirilerek daha uygun bir kaplama sistemi mekaniği oluşturulabilir.

Kaplama sistemi ve uç işlevci belirli bir makinaya (EKB) odaklanarak tasarım gerçekleştirilmiştir. Ancak malzeme optimizasyonu veya farklı malzemeler kullanılarak aynı işin daha kaliteli ve hassas yapılması mümkün olabilir ve daha düşük maliyetli ve daha uygun tasarım yapılarak zemine uygulanan kuvvetin optimize edilmesi imkânı sağlanabilir. Ayrıca sistemin yazılımı kullanılarak farklı mekanik tasarımlar düzenlenip endüstriyel alanda birçok proje üretilebilme imkânı vardır.

Üç eksenli sistemde işlem yapılırken argon gazının kullanılması kaplama kalitesini çok etkilemektedir. EKB kaplama sisteminin tasarımından dolayı kaplama işlemi sırasında argon gazı kayıpları olmaktadır. Bu durum kaplama kalitesine olumsuz etkilemektedir. Bu durumu çözmek amacıyla üç eksenli sistem için kapalı bir ortam oluşturularak kaplanan yüzey kalitesi arttırabilir.

KAYNAKLAR

An Introduction to Control Systems: Designing a PID Controller Using MATLAB's SISO

Tool - Technical Articles. (t.y.). 20 Ekim 2020 tarihinde

<https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/an-introduction-to-control-systems-designing-a-pid-controller-using-matlabs/> adresinden erişildi.

Applications • Electrospark Coatings/Repairs • Huys. (t.y.).*Huys.*

<http://huysindustries.com/electrospark-coatings-repairs/electrospark-deposition-applications/> adresinden erişildi.

Bingül, Z. ve Küçük, S. (2017). *Robot Kinematiği* (4.Baskı.). Kocaeli: Umuttepe Yayınları.

Bozkurt, A. (2019). *ESD İle Sert Faz Kaplanmış Titanyum Alaşımının ve Çeliklerin Lazer ile İşlenmesi ve Karakterizasyonu.*

Control Tutorials for MATLAB and Simulink—Introduction: PID Controller Design.

(t.y.). 20 Ekim 2020 tarihinde

<https://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=Introduction§ion=ControlPID> adresinden erişildi.

Coşkun, A. (2019). *Elektro kıvılcım yöntemi ile yapılan balistik amaçlı kaplamaların test edilmesi ve karakterizasyonu.*

Craig, J. J. (2005). *Mechanics and Control Third Edition.*

Denavit–Hartenberg parameters. (2020, 24 Ekim).*Wikipedia.*

https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Denavit%20%93Hartenberg_parameters&oldid=985160466 adresinden erişildi.

Electrospark Deposition • Welding Processes • Huys. (t.y.).*Huys*.

<http://huysindustries.com/welding-processes/electrospark-deposition/> adresinden erişildi.

Felix, L. M. (2018). *The effect of Electro Spark Deposition on the microstructure and mechanical properties of IN718*. (Yayımlanmamış master's thesis). University of Waterloo.

Forward and Inverse Kinematics. (2019, 17 Mart).*SlideServe*. 16 Kasım 2020 tarihinde <https://www.slideserve.com/terri/forward-and-inverse-kinematics-powerpoint-ppt-presentation> adresinden erişildi.

Galinov, I. V. ve Luban, R. B. (1996). Mass transfer trends during electrospark alloying. *Surface and Coatings Technology*, 79(1-3), 9-18.

Gs14 Kaplin. (t.y.). 26 Kasım 2020 tarihinde <https://www.cnc-marketi.com/urun/gs14-kaplin-30-mm-x-40mm-kaplin-5x12-7-mm> adresinden erişildi.

Huang, H., Liu, C. ve Guo, S. (2016). Simulation Study of Electro spark Deposition on Die Steel (ss. 728-731). 2016 4th International Conference on Mechanical Materials and Manufacturing Engineering, sunulmuş bildiri, Atlantis Press.
doi:10.2991/mmme-16.2016.174

Jiao, Z., Peterkin, S., Felix, L., Liang, R., Oliveira, J. P., Schell, N., ... Zhou, Y. (2018). Surface Modification of 304 Stainless Steel by Electro-Spark Deposition. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 27(9), 4799-4809.
doi:10.1007/s11665-018-3579-0

- Jiao, Zhen. (2016). *Surface Modification of Stainless Steel by Electro-Spark Deposition*. (Yayımlanmamış master's thesis). University of Waterloo.
- Johnson, R. N. ve Sheldon, G. L. (1986). Advances in the electrospark deposition coating process. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 4(6), 2740-2746.
- Karabey, Ö. (2016). *Prototip 3 Eksenli CNC Freze Tasarımı Ve Uygulaması*.
<https://tezarsivi.com/prototip-3-eksenli-cnc-freze-tasarimi-ve-uygulamasi>
adresinden erişildi.
- Karaca, M. M. (2020). *Endüstriyel Amaçlı Küresel Robot Kolu ve Tutucunun Tasarımı ve Kontrolü*.
- Korkmaz, K. (2008). *Elektrospark Biriktirme Yöntemiyle Mikro Alaşımli Çeliklerin Tungsten Karbür ile Kaplanması*. Doktora Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri
- Korkmaz, K. ve Yılmaz, M. S. (2017). Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 6.
- Lešnjak, A. ve Tušek, J. (2002). Processes and properties of deposits in electrospark deposition. *Science and Technology of Welding and Joining*, 7(6), 391-396.
- Linear motion. (t.y.).*Linear Motion*. 16 Kasım 2020 tarihinde <https://linearmotion.co.nz/>
adresinden erişildi.

- Liu, J., Wang, R. ve Qian, Y. (2005). The formation of a single-pulse electrospark deposition spot. *Surface and Coatings Technology*, 200(7), 2433-2437.
doi:10.1016/j.surfcoat.2004.07.104
- Młynarczyk, P., Spadło, S. ve Bartos', J. (2018). Selected properties of electro-spark deposition on carbon steel using the Alloy 400 electrodes. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 461, 012055. doi:10.1088/1757-899X/461/1/012055
- PERJU, M.-C., VIZUREANU, P. ve NEJNERU, C. (2014). The study of energy transfer on thin layers achieved by electro-spark deposition with tic electrode. *Energy (with formula $P= U \cdot I [W]$)*, 4, 5.
- Shah, B. C., Nagal, D. D. ve Sharma, D. S. (2016). COORDINATE SYSTEMS FOR INDUSTRIAL ROBOTS, 3.
- Static electricity. (2020, 11 Ekim). *Wikipedia*.
https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Static_electricity&oldid=983000420
adresinden erişildi.
- Syed, M. (2010). *Automation of Electrospark Deposition of TiCp/Ni on RSW Copper Electrodes*. (Yayımlanmamış master's thesis). University of Waterloo.
- Systems, J. (2017, 20 Nisan). Why Choose High Resolution 3D Printing vs. CNC. *Medium*. 16 Kasım 2020 tarihinde <https://medium.com/jaycon-systems/why-choose-high-resolution-3d-printing-vs-cnc-41acc83c632e> adresinden erişildi.
- Tang, S. K. (2009). *The Process Fundamentals and Parameters of Electro-Spark Deposition*. (Yayımlanmamış master's thesis). University of Waterloo.

Tb6560 3a single axis stepper motor driver board. (t.y.).*Hobby Components*. 16 Kasım 2020 tarihinde <https://hobbycomponents.com/motor-drivers/249-tb65603a-single-axis-stepper-motor-driver-board> adresinden erişildi.

Topală, P., Slătineanu, L., Dodun, O., Coteață, M. ve Pinzaru, N. (2010). Electrospark deposition by using powder materials. *Materials and Manufacturing Processes*, 25(9), 932-938.

Vidalı Mil Somun SFUR 1605. (t.y.). 16 Kasım 2020 tarihinde http://sahinmekatronik.com/index.php?route=product/product&product_id=208 adresinden erişildi.

Vidalı Mil Uç Yatakları. (t.y.). 16 Kasım 2020 tarihinde <https://www.cnc-marketi.com/urun/bf-15-vidali-mil-uc-yataklari-15-mm> adresinden erişildi.

Vizureanu, P., Perju, M.-C., Achiței, D.-C. ve Nejneru, C. (2018). Advanced Electro-Spark Deposition Process on Metallic Alloys. M. A. Chowdhury (Ed.), *Advanced Surface Engineering Research* içinde . InTech. doi:10.5772/intechopen.79450

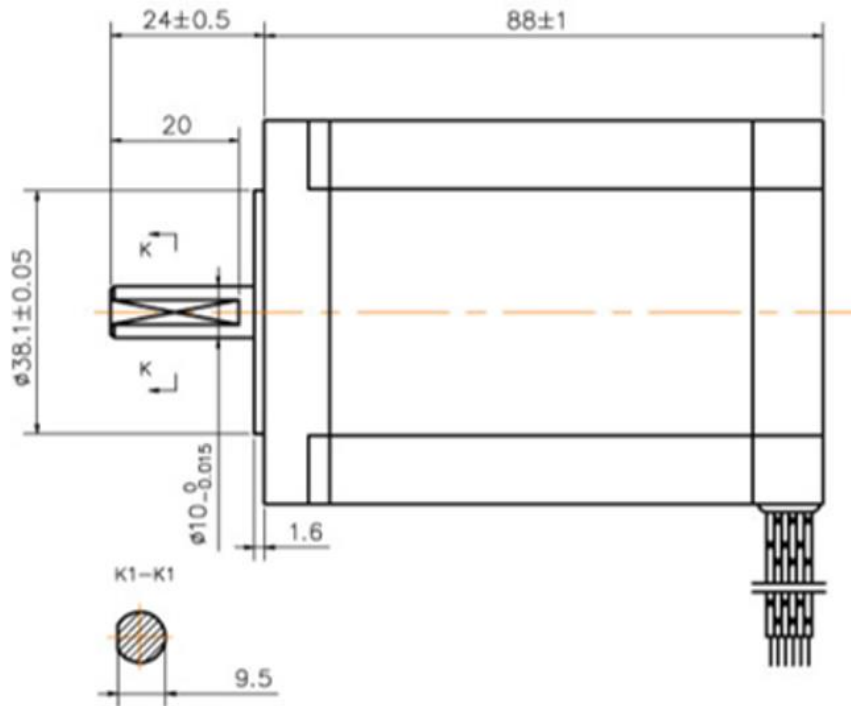
EKLER

Ek-1 Üç Eksenli Kaplama Sistemi ve Özellikleri



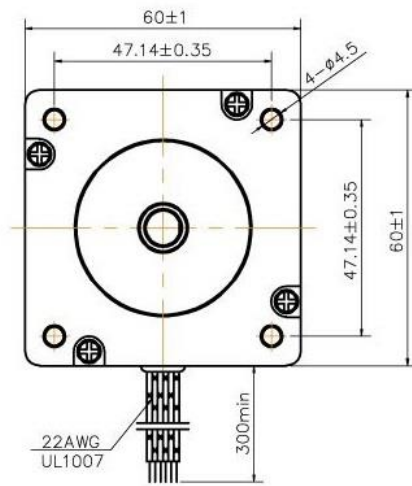
Türü	Üç eksenli hareketi sağlayan sistem
Gövde	Alüminyum ve kompozit
Tahrik Şekli	Step motor, DC motor ve vidalı mil
İşlediği Malzemeler	Birbirine uyumlu metallere.

EK-2 Step motor özellikleri jk60hs88-3008b

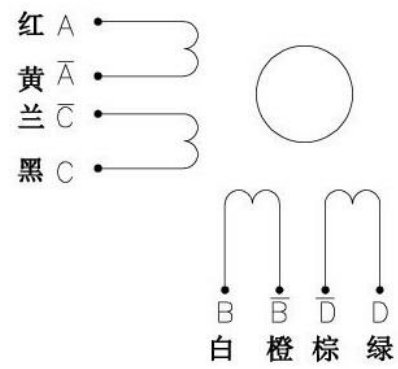


Specifications:

Phase	相 数	4			
Step Angle	步距角	1.8			deg.
	接线方式	PARALLEL	UNIPOLAR	SERIES	
Voltage	电压	2.73	3.9	5.5	V
Current	相电流	4.2	3	2.1	A
Resistance	相电阻	0.65	1.3	2.6	±10% Ω
Inductance	相电感	3.2	3.2	12.8	±20% mH
Holding Torque	静力矩	3.1	2.2	3.1	N.m
Insulation Class	绝缘等级	B			
Mass	重 量	1.4			kg



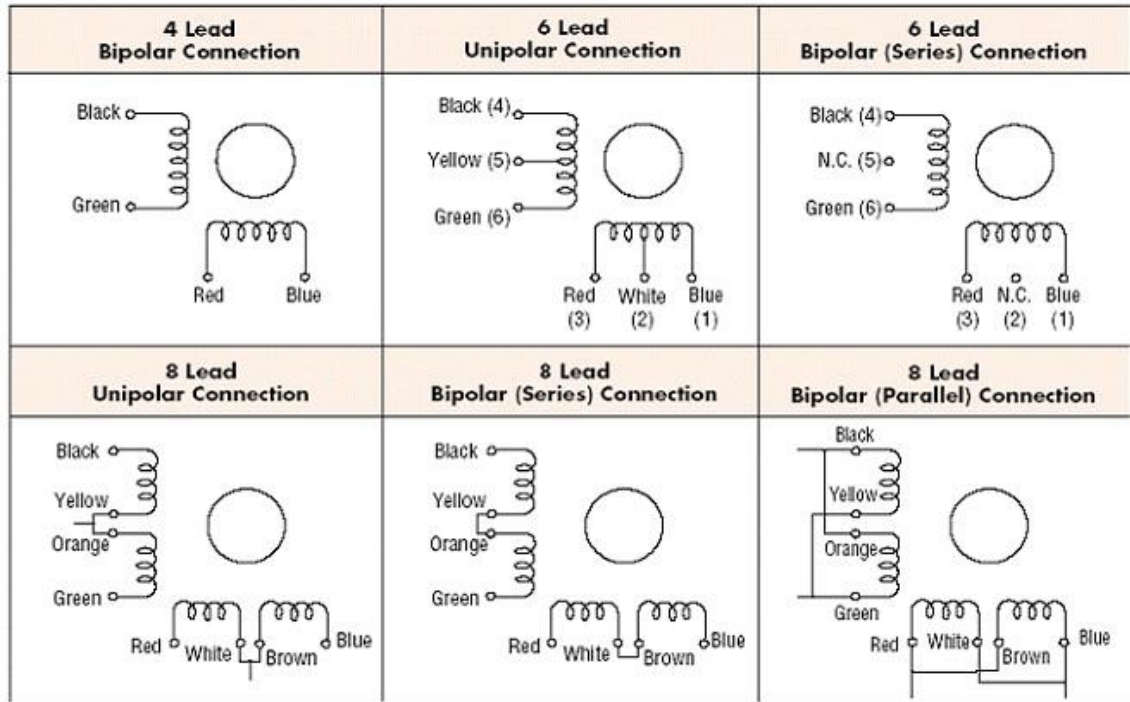
Wiring Diagram:



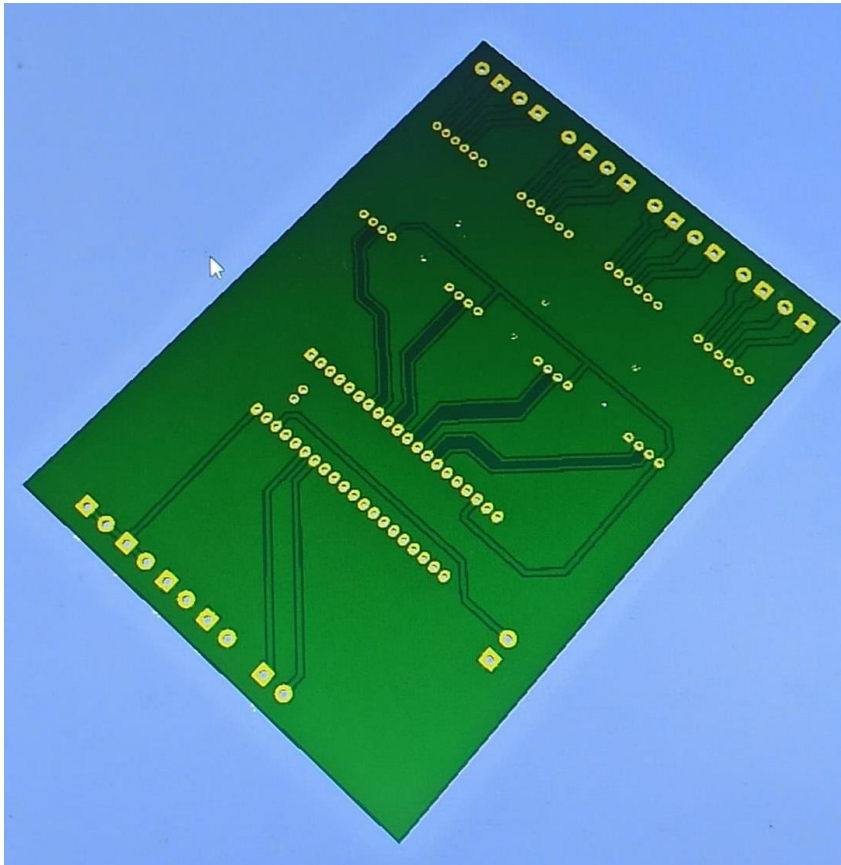
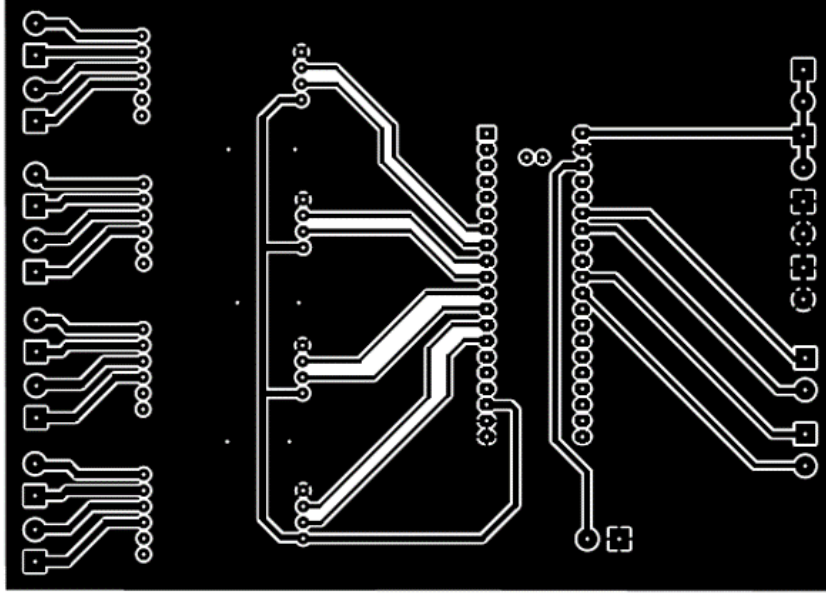
										常州精控电机电器有限公司
										JK60HS88-3008
标记	处数	分区	更改文件号	签名	年月日		阶段标记	重量	比例	
设计	蔡金龙		18.3.21	标准化						
审核										www.jkongmotor.com
工艺				批准			共	张	第	张

Ek 3 Step motor bağlantı seması

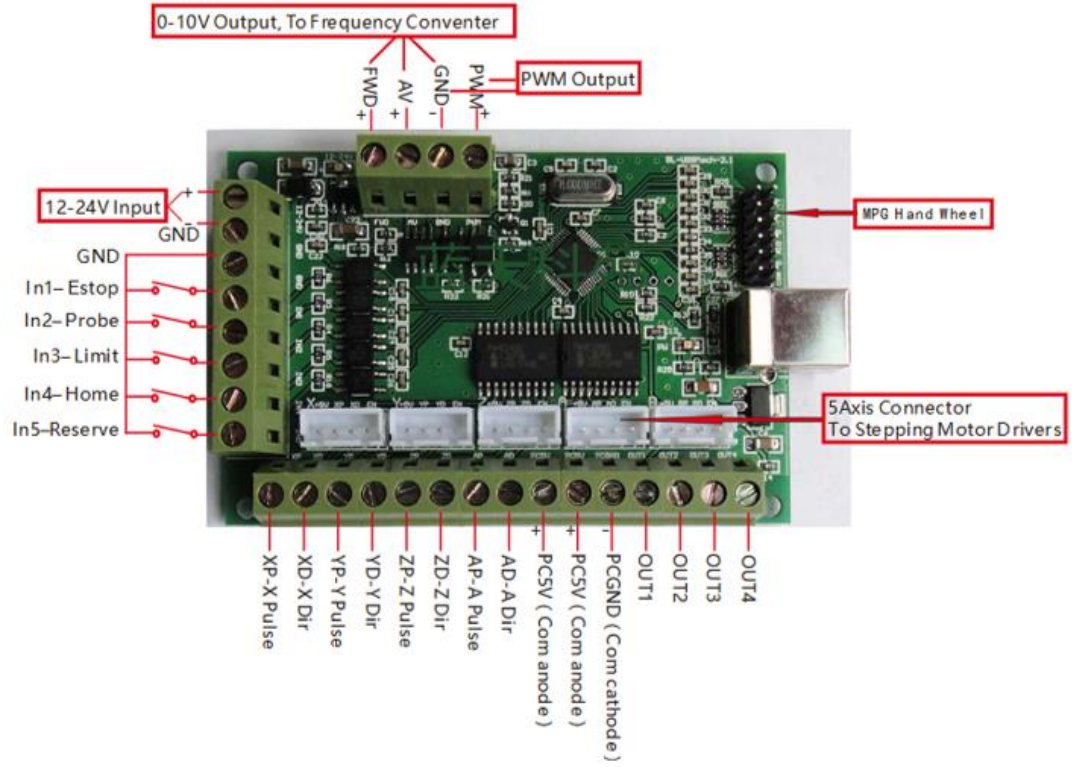
Wire Connection Diagrams



Ek-4 Devre Kart şeması

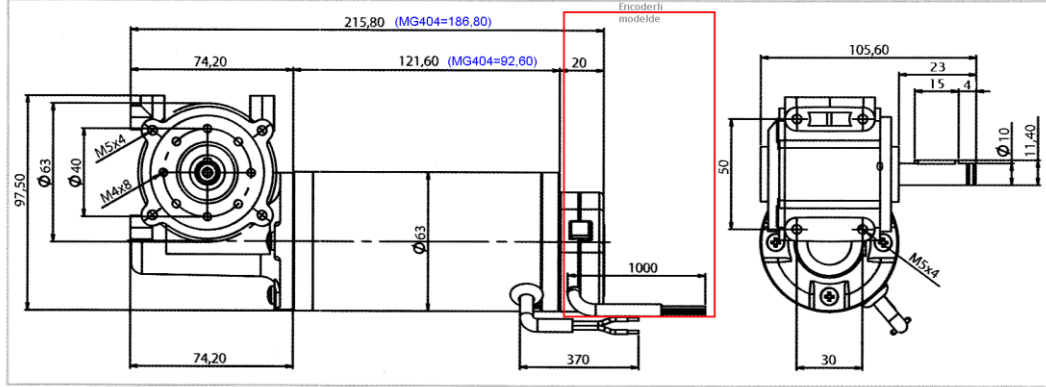


BL-USBMach3 5 Axis Interface Board



EK-6 Kullanılan DC Motor Özellikleri

	Voltaj	Anma Gücü	Devir	Akım	Nominal Çalışma Torku	Devir	Akım	Kilitleme Torku	Redüksiyon Oranı	Ağırlık
	V	W	rpm	A	Nm	rpm	A	Nm	i	kg
MG402	24	100	230	0,5	3	193	5	13	15:1	1,300
MG403	24	100	115	0,5	6	93	4,5	20	30:1	1,300
MG404	24	60	115	0,5	2	93	3,5	9	30:1	1,105



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Hasan Esat Çelik
Uyruğu : TC.
Doğum Yeri ve Tarihi : Konya 1993
Telefon :
Faks :
e-mail : hasanesata6@gmail.com

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Özel Envar Lisesi Selçuklu/Konya	2011
Üniversite 1	: Kocaeli Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği	2017
Üniversite 2	: Anadolu Üniversitesi İşletme / İşletmecilik	2019
Yüksek Lisans	: Necmettin Erbakan Üniversitesi, Meram, Konya	
Doktora	:	

YABANCI DİLLER

İngilizce