T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAFSALLI ROBOT TASARIMI VE İMALATI

Bülent KARATAŞ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ŞANLIURFA
2019

Prof. Dr. Cengiz DOĞAN danışmanlığında Bülent KARATAŞ'ın hazırladığı **"Mafsallı Robot Tasarım ve İmalatı"** konulu bu çalışma 14/11/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

İmza

Danışman: Prof. Dr. Cengiz DOĞAN .....

Üye: Doç. Dr. Kürşad GÖV .....

Üye: Doç Dr. Bülent AKTAŞ .....

Bu tezin Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yapıldığını ve enstitümüz kurallarına göre düzenlendiğini onaylıyorum.

Doç. Dr. İsmail HİLALİ

Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirimlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖZET i
ABSTRACT ii
TEŞEKKÜR iii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
ÇİZELGELER DİZİNİ vii
1. GİRİŞ 8
1.1. Robotların kontrolü ve mekaniği 9
1.2. Robotların kinematik analizi 9
1.2.1. Robotların ileri yön kinematiği 10
1.2.2. Robotların ters kinematiği 11
1.2.3. Robot dinamiği 11
1.2.4. Robotların sınıflandırılması 11
1.2.4.1. Serbestlik derecesine göre robotlar 12
1.2.4.2. Kartezyen (PPP) robotlar 12
1.2.4.3. Silindirik (RPP) robot 12
1.2.4.4. Scara (RRRP) robot 13
1.2.4.5. Küresel (RRP) robot 13
1.2.4.6. Dönel (RRR) robot 13
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR 14
3. MATERYAL ve YÖNTEM 16
3.1. Materyal 16
3.1.1. Konum, yönelim ve koordinat sistemlerinin tanımlanması 16
3.1.1.1. Bir vektörün her hangi bir koordinat sistemine göre konum tanımlanması 16
3.1.1.2. Bir vektörün her hangi bir koordinat sistemine göre yönelim tanımlanması 18
3.1.1.3. İki koordinat sisteminin bir birlerine göre konum tanımlanması 22
3.1.2. Vektörsel büyüklükler 24
3.2. Yöntem 25
3.2.1. İleri kinematik 25
3.2.1.1. Eklem değişkenlerin belirlenmesi 26
3.2.1.1.1. Denavit-hartenberg yöntemi 27
3.2.1.1.2. Eklemlere koordinat sistemi yerleştirilmesi 29
3.2.1.1.3. Eklem dönüşüm matrisleri 30
3.2.1.1.4. Robot kinematiğinin çıkarılmasında uygulanana kurallar 31
3.2.2. Ters kinematik 32
3.2.2.1. Ters kinematik problem yapısı 33
3.2.2.2. Ters kinematik çözüm yöntemleri 34
3.2.2.2.1. Analitik çözüm yaklaşımı 34
3.2.2.2.2. Sayısal çözüm yöntemleri 35
3.2.3. Yörünge planlaması 36
3.2.3.1. Eklem uzayında yörünge planlaması 36
3.2.3.2. Kartezyen uzayında yörünge planlaması 39
3.2.4. X Ekseni yönünde vidali mil hareketi 41
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA 45
4.1. Robot Tasarımı 45
4.1.1. Mekanik tasarim 45
4.1.2. Hesaplamalar 66
4.1.2.1. İleri kinematik hesaplari 67
4.1.2.2. Ters kinematik hesaplari 73

4.1.2.3. Tork hesaplari 80
4.1.3. Elektrik, elektronik ve kontrolör tasarimi 88
4.2. Robot İmalati 89
4.3.Yazılım 105
4.2.1. Matlab programinda modelin oluşturulmasi 105
4.2.2. SysmacStudio program 117
4.2.3. Ara yüz oluşturmak 119
4.3. Deneysel Çalışma 121
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER 138
KAYNAKLAR 139
ÖZGEÇMİŞ 140

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

MAFSALLI ROBOT TASARIMI VE İMALATI

Bülent KARATAŞ

Harran Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Cengiz DOĞAN
YIL: 2019, Sayfa: 140

Bu tez çalışmasında, bilgisayar kontrollü 4 serbestlik dereceli bir robot kol tasarımı, imalatı ve yazılımı gerçekleştirilerek çalıştır hale getirilmiştir. Bu kapsamda ilk olarak CATİA programında robot kolun tasarımı gerçekleştirilmiş ve Matlab yazılımı kullanılarak tasarımın kinematik hesaplamaları yapılmıştır. Kinematik hesaplamalar, Matlab ve Adams programları kullanılarak doğrulanmış ve formülüze edilmiştir. Adams kullanılarak, robot eklemlerinde gerekli olan torklar hesaplanmış ve elde edilen tork değerleri baz alınarak servo motor, step motor ve kasnak seçimleri yapılmış ve robot kolun imalatı gerçekleştirilmiştir. Robotun verilen hareket reçetesine uyarak, istenilen işi yapabilesi amacıyla, formülüze edilen kinematic hesaplamalar Sysmac Studio kullanılarak yazılım haline getirilerek Omron marka PLC cihazına yüklenmiştir. Robotun operator tarafından control edilebilmesi amacıyla JAVA yazılım dili kullanılarak kullanıcı dostu bir arayüz geliştirilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda robot, operator tarafından hazırlanan reçeteyi başarılı bir şekilde takip etmiş ve istenilen işi yerine getirmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: 4eksenli robot kolu, Matlab simülasyon, Adams simülasyon, Kullanıcı dostu ara yüz

ABSTRACT

MSc Thesis

DESIGN AND PRODUCTION OF ROBOT ARM

Bülent KARATAŞ

Harran University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Cengiz DOĞAN
Year: 2019, Page: 140

In this thesis, design, manufacturing and software preparation of computer controlled robotic arm with 4-DOF has been studied. CATIA has ben used for designing robotc arm whereas kinematic design has been carried out by using MATLAB. Calculations were verified by Matlab and ADAMS. Torques required for arm joints were evaluated by ADAMS and then servo motors, step motors and pulleys were selected. Sysmac Studio was used as a tool to formularaze kinematic equations and developed software was loaded to PLC of OMRON branch. JAVA was used to prepare user interface allowing operator's controls of robot. As a result, robot was operated and tested for kinematic requirements which user intend to follow.

ANAHTAR KELİMELER: 4 axes robot arm, Matlab simulation, Adams simulation, User firendly interface

TEŞEKKÜR

Çalışmalarımı yönlendiren araştırmalarımın her aşamasında bilgi, öneri ve yardımlarını esirgemeyerek akademik ortamda olduğu kadar beşeri ilişkilerde engin fikirleriyle yetişme ve gelişmeme katkıda bulunan Danışman Hocam Sayın Prof. Dr. Cengiz DOĞAN'a ve çalışmalarım süresinde birçok fedakârlıklar göstererek beni destekleyen aileme en derin duygularımla teşekkür ederim.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1. Seri Robot 9
Şekil 1.2. Paralel Robot 9
Şekil 1.3. Prizmatik eklem 10
Şekil 1.4. Dönel eklem 10
Şekil 1.5. Katezyen manipulator 12
Şekil 1.6. Silindirik Robotlar 12
Şekil 1.7. Scara Robot 13
Şekil 1.8. Küresel Robot 13
Şekil 1.9. Dönel Robot 13
Şekil 3.1. P noktasının {A} koordinat sistemine göre tanımlanması 17
Şekil 3.2. P noktasının {A} ve {B} koordinat sistemine göre tanımlanması 17
Şekil 3.3. A noktasının {A} koordinat sistemine göre tanımlanması 18
Şekil 3.4. Bir cismin yöneliminin referans koordinat sistemine göre tanımlanması 18
Şekil 3.5. Merkezleri çakışık yönelimleri farklı iki koordinat sistemi 20
Şekil 3.6. {B} koordinat sistemine göre tanımlanmış bir noktanın {A} koordinat sistemine göre tanımlanması 22
Şekil 3.7. Yönelimleri aynı fakat merkezleri farklı noktalarda bulunan iki koordinat sistemi 22
Şekil 3.8. Hem izledikleri yollar hem de başlangıç noktaları farklı noktalarda bulunan iki koordinat sistemi 23
Şekil 3.9. Serbest vektör 24
Şekil 3.10. {B} koordinat sistemine göre tanımlanan v1 hız vektörünün {A} koordinat sistemine göre tanımlanması. 25
Şekil 3.11. (i-1), İ bağlarının ve (İ-1), İ, (İ+1) eksenlerinin yerleşimi 27
Şekil 3.12. (i-1) ve İ eksenlerine koordinat sisteminin yerleştirilmesi 27
Şekil 3.13. Zi − 1ile Zi arasında Xi − 1boyunca uzanan ai − 1 bağ uzunluğu 28
Şekil 3.14. Xi − 1 ile Xi arasında Zi boyunca uzanan di bağ kaçıklığı. 28
Şekil 3.15. Zi − 1 ile Zi eksenleri arasındaki $\alpha i - 1$ bağ açısı. 28
Şekil 3.16. a_(i-1) ile a_i bağları arasındaki θ_i eklem açısı 29
Şekil 3.17. $\alpha(i-1)$, $\alpha(i-1)$, di ve θi eklem değişkenlerin belirlenmesi. 31
Şekil 3.18. Altı Eksenli Robotun İleri ve Ters Kinematik problem çözüm şeması 33
Şekil 3.19. Robotun 6 farklı çözümü 34
Şekil 3.20. Tek eklemli a) konum, b) hız, c) ivme grafiği 39
Şekil 3.21. Doğrusal Yörünge 39
Şekil 3.22. Parabolik Kısımlar eklenmiş doğrusal yörünge 40
Şekil 3.23. Parabolik kısımlar eklenmiş doğrusal yörüngeye ait a) konum, b) hız, c) ivme grafiği 41
Şekil 3.24. Lineer ray ve arabanın yük taşıma kapasitesi tablosu 42
Şekil 3.25. Seçilen NEMA Motorun Teknik Dataları 42
Şekil 3.26. Step MotorunPulse Hızı – Periyot Grafiği 43
Şekil 4.1. Robotun Teknik Resmi 46
Şekil 4.2. Robot Şasi Teknik Resmi 47
Şekil 4.3. Şasi Patlatılmış Teknik Resmi 48
Şekil 4.4. Şasi'nin Kesit resmi 49
Şekil 4.5. Profil Şasi_1'nin Teknik resmi 50
Şekil 4.6. SYM 2'nin Teknik Resmi SYM 5 SYM 2'nin simetriği 51
Şekil 4.7. SYM 3'in Teknik Resmi 52
Şekil 4.8. SYM 4'in Teknik Resmi 52
Şekil 4.9. SYM 6 Robot Kol Bağlantı Braket Teknik Resmi 53

Şekil 4.10. SYM 7 Vidalı Mil Teknik Resmi 53
Şekil 4.11. SYM 8 Step Motor Teknik Resmi 54
Şekil 4.12. SYM 9 Lineer Ray Teknik Resmi 54
Şekil 4.13. SYM 11 Teknik Resimleri 55
Şekil 4.14. 1 numaralı Parça Teknik Resmi 56
Şekil 4.15. 2 numaralı Parça Teknik Resmi 56
Şekil 4.16. 3 Numaralı Parça Teknik Resmi 57
Şekil 4.17. 4 Numaralı Paçanın Teknik Resmi 57
Şekil 4.18. SYM 12 T4 Kaplin Teknik Resmi 58
Şekil 4.19. SYM 13 Masuralı Araba 58
Şekil 4.20. SYM 14 Vidalı Mil Somun Teknik Resmi 59
Şekil 4.21. Robot Kolu Teknik Resmi 59
Şekil 4.22. RK1'in Teknik Resmi 60
Şekil 4.23. RK1_1'in Teknik resmi 61
Şekil 4.24. RK1_2'in Teknik Resmi 61
Şekil 4.25. RK1_3'in Teknik Resmi 62
Şekil 4.26. RK1_11'in Teknik Resmi 62
Şekil 4.27. RK2'in Teknik Resmi 63
Şekil 4.28. RK2-1'in Teknik Resmi 64
Şekil 4.29. RK2-2-3-4-5-6'nın Teknik Resmi 64
Şekil 4.30. RK3'in Teknik Resmi 65
Şekil 4.31. RK4'in Teknik Resmi 65
Şekil 4.32. RK5'in Teknik Resmi 66
Şekil 4.33. Robot Sıfır Pozisyonu 66
Şekil 4.34. Robot Sıfır Pozisyonu (Şematik Gösterim) 67
Şekil 4.35. Robotun eklemlerinin eksen Takımları 67
Şekil 4.36. Robotun Başlama noktası 81
Şekil 4.37. Robotun X hareketi 81
Şekil 4.38. Robotun X hareketi son noktası 81
Şekil 4.39. Robotun Y hareketi 82
Şekil 4.40. Robotun Z hareketi 82
Şekil 4.41. Robotun q1 açı hareketi 83
Şekil 4.42. Robotun q2 açı hareketi 83
Şekil 4.43. Robotun q3 açı hareketi 83
Şekil 4.44. Robotun q4 açı hareketi 84
Şekil 4.45. Robotun Birinci ekseninin Tork grafiği 84
Şekil 4.46. Robotun İkinci ekseninin Tork grafiği 85
Şekil 4.47. Robotun Üçüncü ekseninin Tork grafiği 85
Şekil 4.48. Robotun Dördüncü ekseninin Tork grafiği 86
Şekil 4.49. Elektronik Malzemeler 88
Şekil 4.50. İmalat Resileri-1 90
Şekil 4.51. İmalat Resimleri - 2 91
Şekil 4.52. İmalat Resimleri - 3 92
Şekil 4.53. İmalat Resimleri - 4 93
Şekil 4.54. Montaj Resimleri – 1 93
Şekil 4.55. Montaj Resimleri – 2 94
Şekil 4.56. Montaj Resimleri – 3 95
Şekil 4.57. Montaj Resimleri – 4 96
Şekil 4.58. Montaj Resimleri – 5 97
Şekil 4.59. Montaj Resimleri – 6 98

Şekil 4.60. Montaj Resimleri – 7 99
Şekil 4.61. Montaj Resimleri – 8 100
Şekil 4.62. Montaj Resimleri – 9 101
Şekil 4.63. Montaj Resimleri – 10 102
Şekil 4.64. Pano Resimleri – 1 102
Şekil 4.65. Pano Resimleri – 2 103
Şekil 4.66. Pano Resimleri – 3 104

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 3.1. D-H Değişkenlerinin Belirlenmesi 32
Çizelge 3.2. Doğrusal Yörüngeye Ait konum, hız ve ivme denklemleri 40
Çizelge 3.3. Robotun X Eksenindeki hareketi için Hesaplarında kullanılacak değerler 43
Çizelge 4.1. Profil Şasi_1 Parça Listesi 49
Çizelge 4.2. Şasi Parçaların Listesi 51
Çizelge 4.3. SYM 11 Parça Listesi 55
Çizelge 4.4. Robot Kolu Montaj Ürün Ağacı 60
Çizelge 4.5. RK1'in Parça Listesi 60
Çizelge 4.6. RK2'in Parça Listesi 63
Çizelge 4.7. D-H Değişkenlerinin Tablosu 68
Çizelge 4.8. Elektrik, Elektronik ve Kontrolör Listesi 88

1. GİRİŞ

Bilgisayar destekli tasarım ve bilgisayar destekli üretim gelişmeleriyle endüstriyel otomasyon sistemleri çok kısa bir sürede hızla yaygınlaşmaya başlamıştır. Bu süratli ilerleme, robotların endüstriyel otomasyonlarda önemli roller almasını ve kullanımını arttırmıştır. Geçmişten günümüze kadar büyük ilerleme kaydeden robotlar, konveyör sistemleri, boya, kaynak, tıp vs. gibi birçok farklı alanda uygulamaya konulmuştur.

Robot, çelik dilinde köle veya işçi anlamına gelen 'robot' kökeninden gelmektedir. Farklı görevlerii yerine getirmek üzere programlanan bir makinadır. Fakat sıradan bir makineyle arasındaki en önemli fark, robotların çoğu kez programlanabilmeleri ve bünyelerinde mekanik sistemlerin yanında bir de denetleyici olmasından kaynaklanmaktadır. Başka bir deyişle robot, genel anlamda bilgisayar kontrollü bir endüstriyel manipülatördür.

Robot bilimi kontrol, elektrik, elektronik, fizik, matematik, makine ve bilgisayar mühendisliği gibi birçok bilim dalını barındırır. Makine mühendisliği robotların statik ve dinamik yapılarını incelerken, matematik ile robotların hareket modelleri oluşturulur. Kontrol mühendisliği, kontrol algoritmaları geliştirilerek sistemin istenilen dinamiği gerçekleştirmesini sağlar. Elektrik mühendisliği, eyleyicilerin (actuators) ve algılayıcıların (sensör) tasarımları inceler. Bilgisayar mühendisliği ise gerekli robot programlarının yapılmasını sağlar.

Genellikle robotlar seri(Şekil 1.1) ve paralel(Şekil 1.2) olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Seri robotlar bir dizi eklem (joint) ve bu eklemleri birbirine birleştiren bağlardan (link) oluşur. Geniş çalışma uzayına (aktif olarak robotun ulaşabileceği uzay), az sayıda mekanik parçaya ve paralel robotlara göre daha basit kinematik denklemlere sahiptir.



Şekil 1.1. Seri Robot



Şekil 1.2. Paralel Robot

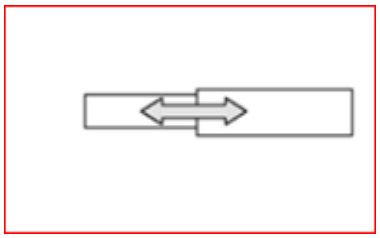
1.1. Robotların kontrolü ve mekaniği

Robot kinematiği, üç boyutlu uzay alanında robotun kendi tasarımı ve çevresindeki nesnelerin yerleşimiyle ilgilenir. Yerleşim bilgisi matematiksel olarak bir konum vektörü ve yönelim (orientation) matrisi gibi iki nitelikle tanımlanır.

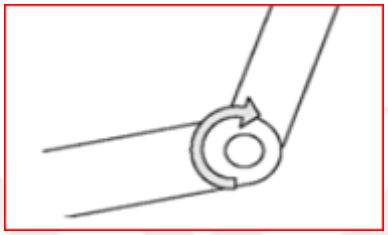
1.2. Robotların kinematik analizi

Kinematik bilimi birimlerin hareketlerini inceleyen bir hareket bilimidir. Robot kinematiği ile robotun kuvvet, konum, hız ve ivme analizi yapılır. Robot kinematiği gene olarak uç işlevci ve eklemler ile birlikte bir ilişki tanımlar. Robotların yapısı gereği birbirinden bağımsız hareket eden, itme(Prismatic-genellikle P) (Şekil 1.3) ve

dönme (Revolute-R harfi ile gösterilir)(Şekil 1.4) hareketi uygulayan eklemlerle, bu eklemleri birbirine kenetleyen bağlardan oluşur.



Şekil 1.3. Prizmatik eklem



Şekil 1.4. Dönel eklem

Her eklemin konumunu ve yönelimi bir arkadaki veya bir öndekine göre belirlenir ve bu ilişki açık kinematik zincir olarak tanımlanır. Bu ilişki robotun yer ve yönelim bilgisini içeren 4x4 homojen dönüşüm matrislerinden (transformation matrix) oluşur. Her eklem oluşturulan bu matrislerin sayısı robotun serbestlik derecesi ile belirlenir. Üç boyutlu bir uzay alanında herhangi bir konuma herhangi bir yönelimle varmak için altı serbestlik derecesi yeterlidir. Fakat, serbestlik derecesi altıdan fazla olan robotlarda artıklık (redundancy) durumu ortaya çıkar.

1.2.1. Robotların ileri yön kinematiği

Bu model robotların hız, ivme ve konum arasındaki ilişkiyi inceler. Bir robot, araç çerçevesinden başlayarak ana çerçevesine kadar birbirine prizmatik veya dönel eklemlerle bağlanmış seri bağlardan meydana gelir. Birbirine tutturulmuş bağlar arasındaki bu ilişki homojen dönüşüm matrisiyle açıklanır. Bu matrislerinin art arda çarpılmasıyla, araç çerçevesinin hedefini ve konumunu ana çerçeveye göre matematiksel olarak tanımlanır. Başka bir ifade ile ileri kinematik denklemler, eklem

değişkenlerinin belirlenmesi ile uç işlevcinin konumunu ve hedefini ana çerçeveye göre hesaplar.

1.2.2. Robotların ters kinematiği

Ters kinematik, ana çerçeveye göre uç işlevicinin konumu ve hedefi belirlendiğinde, robotun bu hedefe ve konuma ulaşması için lazım olan her bir eklemin açısal konumunun hesaplanması şeklinde tanımlanabilir. Ters kinematik denklemleri doğrusal olmayışından dolayı bu denklemlerin sonuçlanması son derce karışıktır. Elde edilen doğrusal olmayan denklemler, tek bir çözüm üretmeyip birden fazla çözümü ortaya koyabilir.

1.2.3. Robot dinamiği

Dinamik, hareketi oluşturan kuvvetlerin ve torkların incelenmesi olarak tanımlanır.

1.2.4. Robotların sınıflandırılması

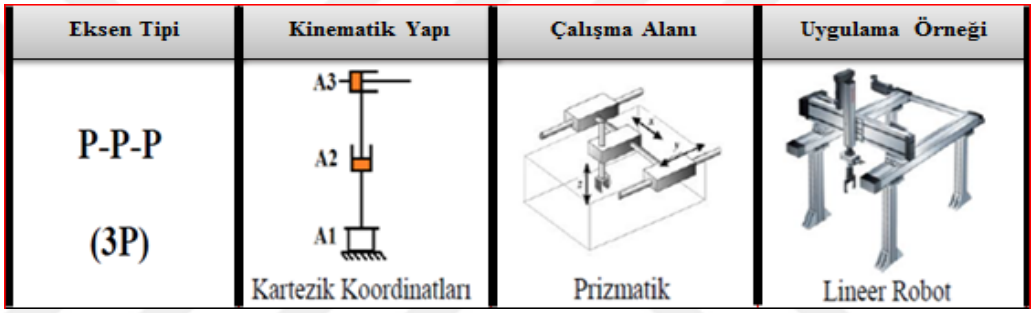
- Kontrol yöntemlerine,
  - Noktasal Kontrol Edilen Robotlar
  - Sürekli Yörünge Kontrol edilen Robotlar
- Eyleyicilerin kullandığı güç kaynağına,
  - AC-DC Servo ve Adım(step) motorlu robotlar
  - Hidrolik Robotlar
  - Pnömatik Robotlar
- Kesinlik derecelerine,
  - Çözünürlük: Çok küçük yer değiştirmeyi gerçekleştiren robotlar
  - Doğruluk: çevrim dışı uygulamalarda kullanılan robotlar
  - Yenilenme: Robotun uç işlevcisinin işlemi uyguladıktan sonra tekrardan aynı noktaya gelme robotları
- Eklem yapılarına,
- Serbestlik derecelerine göre

1.2.4.1. Serbestlik derecesine göre robotlar

Günümüzde, endüstriyel otomasyon sistemlerinde genel olarak altı serbest derecesine sahip robotlar kullanılmaktadır. Bu sınıflandırmada robotların ilk üç bağının özelliği dikkate alınarak sınıflandırma yapılır.

1.2.4.2. Kartezyen (PPP) robotlar

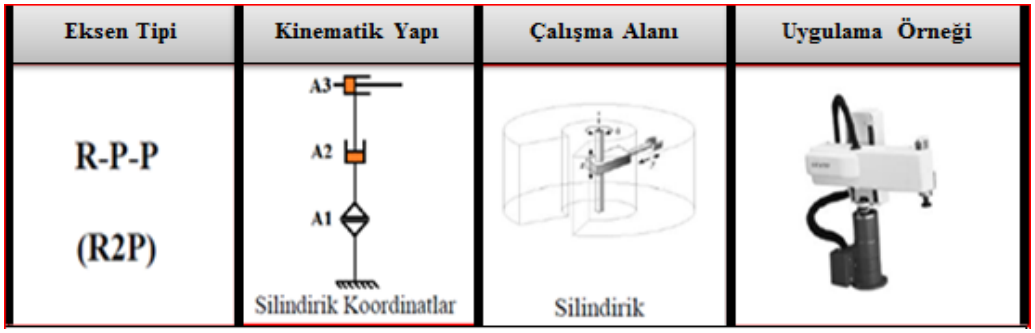
Robotun ilk üç eklemi de prizmatikse, bu robotlara Kartezyen manipülatör denir.



Şekil 1.5. Katezyen manipulator

1.2.4.3. Silindirik (RPP) robot

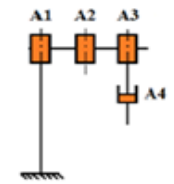
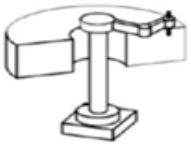
İlk eklemi dönel, ikinci eklemi birinci ekleme paralel ve prizmatik, üçüncü eklemse ikinci ekleme dik ve prizmatik robotlara denir.



Şekil 1.6. Silindirik Robotlar

1.2.4.4. Scara (RRRP) robot

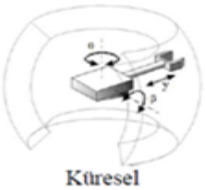
İlk üç eklemi döner dördüncü eklemi prizmatik olan robotlara denir.

Eksen Tipi	Eksen Tipi	Çalışma Alanı	Uygulama Örneği
R-R-R-P (3RP)	 Mafsal Koordinatları (Yatay)	 Döndürme Kollu Robot (SCARA)	

Şekil 1.7. Scara Robot

1.2.4.5. Küresel (RRP) robot

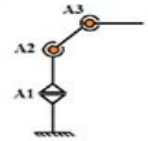
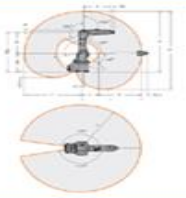
İlk iki eklemi dönel üçüncü eklemi prizmatik olan robotlara denir.

Eksen Tipi	Eksen Tipi	Çalışma Alanı	Uygulama Örneği
R-R-P (2RP)	 Küre Koordinatları	 Küresel	

Şekil 1.8. Küresel Robot

1.2.4.6. Dönel (RRR) robot

İlk üç eklemi dönel olan robotlara denir.

Eksen Tipi	Eksen Tipi	Çalışma Alanı	Uygulama Örneği
R-R-R (3R)	 Mafsal Koordinatları (Dikey)		

Şekil 1.9. Dönel Robot

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Geçmişten günümüze çok sayıda araştırmacı bilyalı vidalı mil modelinin yapı bakımından esnekliğini ortaya koymaya çalışmıştır. Bilyalı vidalı mil hareket modelinin literatürde yayımlanan çok basit bir yöntemi olan yay kütle sistemi ve buna parelel olarak daha karışıkolan model ise Sonlu Elemanlar yöntemidir.

Basit modele bir örnek verecek olursak, Chen bilyalı vidalı mil hareket modelinin yaylarla tutturulmuş rijit modeller olarak tanımlamıştır. Bu model eksenel ve burulma hareketlerini ve kızak bağlantı noktasından ortaya çıkan yalpalamayı ifade etmektedir. Bu modelle birlikte kızakların yer değiştirmesi tablanın pozisyon doğruluğuna önemli ölçüde katkı sağladığı belirtmiştir. Benzer modeller Poignet, Lee, Yang ve Kim tarafından ortaya konulmuştur.

Van Brussel bilyalı Sonlu Elemanlar Yöntemiyle vidalı mil hareket sistemini içeren 3 eksenli bir freze tezgâhını modellemiştir. Sonlu Elemanlar Yönteminin kontrol ve simülasyonu için komponent modu kullanılarak uygulanmaya hazır uzay modeli haline getirmiştir. Schafers de benzer bir şekilde modelortaya koymuştur. Sonlu elemanlar Yöntemiyle modellenmiş bir freze tezgahı ve yüksek hızlı tezgahlardaki kontrol ve dizaynının bu modelde uygulanabileceği gösterilmiştir.

Hemen hemen bütünü Sonlu elemanlar Yöntemiyle oluşturulan bilyalı vidalı mil sisteminin veya ayrık kütleli olarak oluşturulan modellemenin faydaları ve zararları vardır. Genelde ayrık kütleli modeller Sonlu Elemanlar Yöntemiyle analiz edilmiş modellerden daha kolaya indirgenmiştir. Bunun nedeni ayrık kütleli modellemelerde bilyalı vidalı mil sistemine kıyasla daha az serbestlik derecesi içermektedir. Ancak tamamen sonlu elemanlar yöntemiyle oluşturulan modelin aksine ayrık kütleli modeller tablanın vidalı mil boyunca hareketi gibi çeşitli hareket sistemini açıklayarak ortaya koyma yeteneğine sahip değillerdir.

Yukarıda bahsedilen bilyalı vidalı mil modelinin iki şekilde ortaya konulmasının faydalı taraflarını birleştirme anlayışına sahip çok sayıda araştırmacı hibrid yöntemlere yönelmiştir. Bu modelde vidalı mil ataleti ve rijitliği yayılı durumda iken diğer aletler ise kütle yay sistemiyle ifade edilmiştir. Pislaru tarafından bu çalışmaları benzer bir şekilde ortaya atılmıştır. Bu çalışmada vidalı mili temsil eden yayılmış parametreler yaylar, kütleler ve ataletler olarak vidalı milin çeşitli bölümlerine karşılık gelen bir grup oluştururlar. Ancak bu çalışma vidalı mil boyunca somunun hareketi gibi değişimleri ifade edemezler. Bunun nedeni vidalı mil parametresinin değeri sadece somunun bir pozisyonu için ele alınmıştır. Varanasi ve Nayfeh vidalı mili üniform kiriş şeklinde tanımlayarak bu sorunu çözmüşlerdir. Bu yaklaşım benzer bir şekilde Whalley tarafından benimsenmiştir. Birçok araştırmacı kiriş formülü kullanarak hibrid stratejisiyle çalışmaya yönelen sonlu elemanlar yöntemiyle vidalı mili kiriş eleman olarak ifade edilmiştir. Bu modelin kullanımı kiriş eşitliklerini kullanımına göre daha basit, pratik ve çok yönlüdür.

Jeon vd. (1993), yaptığı çalışmada yüksek hız değişimleri için etkin bir yörünge oluşturma tekniği önermiştir. Bu tekniğe göre ilk olarak bir zaman için en iyi hız profiline sahip bir hareket modeli oluşturulur. Daha sonra en iyi hız profili ile pürüzsüz bir hız profilinin her örnekleme zamanında çarpılması ile elde edilir. Önerilen tekniğin, mevcut tekniklerle karşılaştırılması da tekniğin daha verimli olduğunu ortaya konulmuştur.

Hikmet Nazım EKİCİ “Mekanik sistemlerin hareket analizlerinin ve simülasyonunun bilgisayar ortamında gerçekleştirilmesi” konusun da çalışmıştır.

Bu çalışmada Adams Programı kullanılarak 5 ayrı tasarım yapılmıştır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

Robot kendi çevrelerindeki nesnelerinde bulunduğu üç boyutlu uzay alanında hareket ederler. Bu durum robotun ve çevresindeki nesnelerin bir birine göre konum ve yönelim tanımlamaların yapılmasını gerektirir. Üç boyutlu uzayda robotun da içinde bulunduğu her nesneye konum ve yönelimlerin belirlenmesi için bir koordinat sistemi yerleştirilir.

3.1.1. Konum, yönelim ve koordinat sistemlerinin tanımlanması

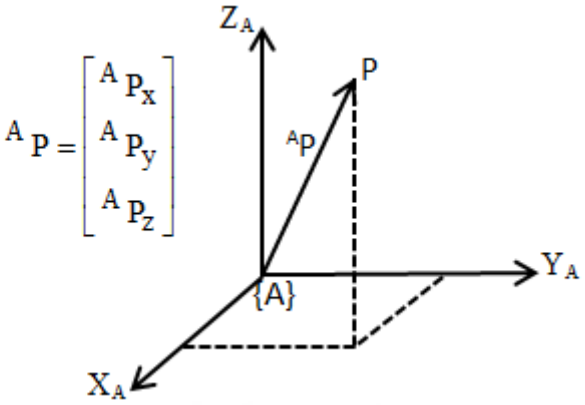
Konum, yönelim ve koordinat sistemlerinin tanımlanması nesnelerin evrensel çerçeve içerisindeki özelliğini açıklar.

3.1.1.1. Bir vektörün her hangi bir koordinat sistemine göre konum tanımlanması

Koordinat sistemini açıklamak suretiyle bir nokta evrensel alan içerisinde herhangi bir konuma yerleştirilebilir. Bu noktanın konumu evrensel koordinat sisteminin yanı sıra, evrensel koordinat sistemi ile aralarında doğrusal veya açısal farklılıklar bulunan birçok koordinat sistemi tanımlanabilir ve bu koordinat sistemlerinin merkezlerine göre tanımlanmış 3x1 boyutlu bir vektörle ifade edilebilir. Bu vektörler hangi koordinat sistemine göre tanımlanmışsa ona göre isimlendirilir. Örneğin evrensel bir alan içerisinde bulunan P noktasının {A} koordinat sistemine göre yeri ${}^{A}P$ şeklinde bir vektörle gösterilmektedir. ${}^{A}P$, P noktasının {A} koordinat sisteminin merkezine uzaklığı, x, y, z eksenlerinde sayısal olarak ifade edilir. ${}^{A}P$ vektörü işlevsel olarak denklem 3.1' deki gibi gösterilir.

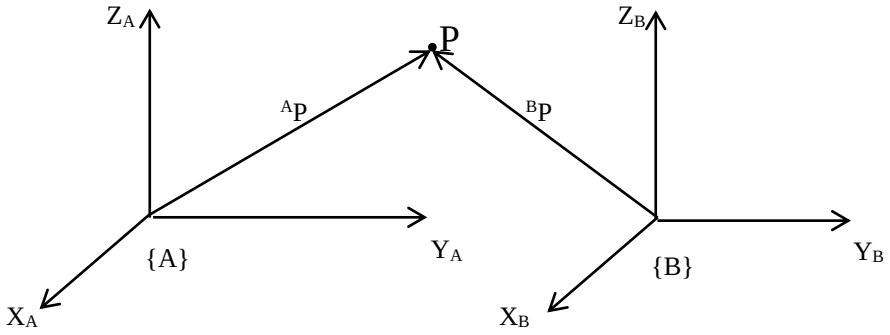
$$A_P = \begin{bmatrix} A_{P_x} \\ A_{P_y} \\ A_{P_z} \end{bmatrix} \tag{3.1}$$

Şekil 3.1' de bir birine dik üç birim vektöre sahip {A} koordinat sistemi ve P noktası birlikte gösterilmiştir.



Şekil 3.1. P noktasının {A} koordinat sistemine göre tanımlanması

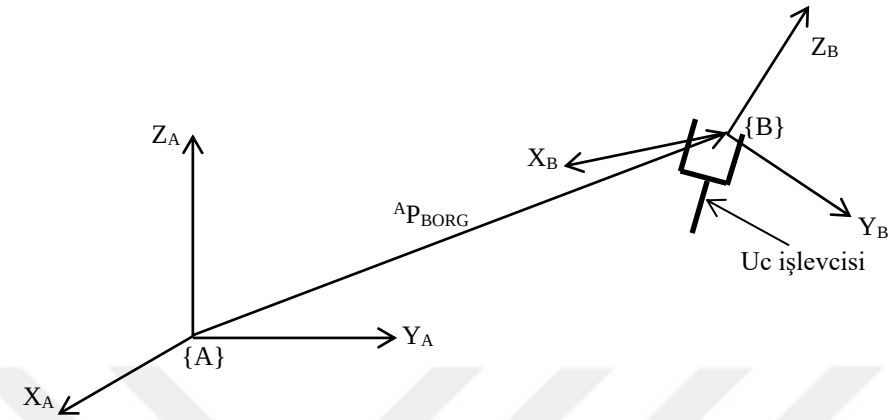
Aynı P noktası, şekil 3,2'de görüldüğü gibi hem {A}, hem de {B} koordinat sistemine göre tanımlanabilir. Dikkat edileceği gibi, P noktasının {A} koordinat sisteminin merkezine olan uzaklığı ile {B} koordinat sisteminin merkezine olan uzaklığı eşit olmak zorunda değil ($^AP \neq ^BP$).



Şekil 3.2. P noktasının {A} ve {B} koordinat sistemine göre tanımlanması

Şekil 3.3' de bir robot uç işlevcinin A noktasına uzaklığını tanımlamak için, robotun uç işlevcisine ve A noktasına birer koordinat sistemi yerleştirilir.Yerleştirilen {A} ve {B} koordinat sistemlerinin orjinleri arasındaki mesafe A noktası ile uç işlevcisi arasındaki uzaklıktır ve $^AP_{BORG}$ vektörü ile ifade edilir. $^AP_{BORG}$ vektörü, $^AP_{BORGx}$, $^AP_{BORGy}$ ve $^AP_{BORGz}$ ifadelerinden oluşur. Ve şu şekilde gösterilir;

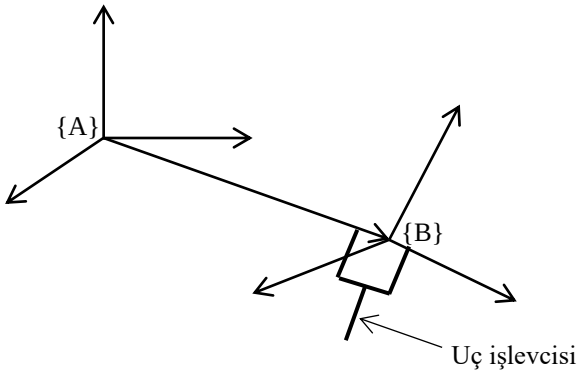
$$A_{P_{BORG}} = \begin{bmatrix} A_{P_{BORG_x}} \\ A_{P_{BORG_y}} \\ A_{P_{BORG_z}} \end{bmatrix} \tag{3.2}$$



Şekil 3.3. A noktasının {A} koordinat sistemine göre tanımlanması

3.1.1.2. Bir vektörün her hangi bir koordinat sistemine göre yönelim tanımlanması

Yönelim, üç boyutlu uzay alanda bir koordinat sisteminin başka bir koordinat sistemi ile arasındaki açısal farkı tanımlar ve 3x3 boyutlu bir matrisle ifade edilir. Bir katı cismin yönelimi, farklı bir koordinat sistemine göre tanımlanırken, katı cismin üzerine bir koordinat sistemi yerleştirilir. Bu koordinat sisteminin ({B}), referans koordinat sistemine ({A}) göre yönelimi, katı cismin yönelimini tanımlanır. (Sekil 3.4).



Şekil 3.4. Bir cismin yöneliminin referans koordinat sistemine göre tanımlanması

Uç işlevcisine oturtulan {B} koordinat sistemini, {A} referans koordinat sistemi gibi elde etmek için birim vektörü kullanılır. {B} koordinat sisteminin birim vektörü aşağıdaki gibi yazılır.

$$\{B\} = \hat{X}_B\,, \hat{Y}_B\,, \hat{Z}_B \tag{3.3}$$

{B} koordinat sisteminin birim vektörlerini {A} koordinat sistemi cinsinden ise aşağıdaki gösterilir.

$$\{A\} = A_{\hat{X}_B}\,, A_{\hat{Y}_B}\,, A_{\hat{Z}_B} \tag{3.4}$$

Denklem 3.4'teki ifadeyi 3x3 boyutlu bir matrisle denklem 3.5'deki gibi ifade edebiliriz. 3x3 şeklinde yazılabilen bu matrise dönme matrisi (rotation matrix) denir. Bu matris {A} koordinat sistemine göre {B} koordinat sisteminin yönelimini açıkladığı için ${}^{\mathrm{A}}_{\mathrm{B}}\mathrm{R}$ şeklinde gösterilir. ${}^{\mathrm{A}}_{\mathrm{B}}\mathrm{R}$, {B} koordinat sisteminin {A} koordinat sistemine göre X, Y, Z eksenlerindeki dönme miktarını gösterir.

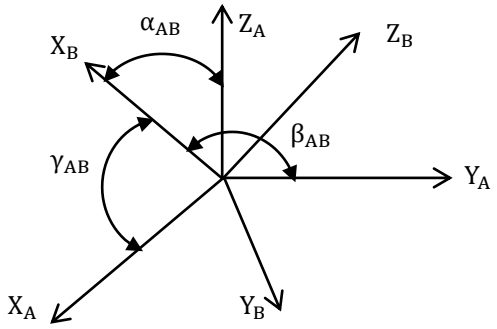
$${}^{A}_{B}R = [A_{\hat{X}_B} \quad A_{\hat{Y}_B} \quad A_{\hat{Z}_B}] = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \tag{3.5}$$

Denklem 3.5'deki matrisin her bir kolonu birer birim vektördür. Bu birim vektörler {B} koordinat sisteminin eksenlerinin doğrultusunu {A} koordinat sistemine göre tanımlar. Şekil 3.5 olduğu gibi {B} koordinat sistemi ile {A} koordinat sisteminin merkezleri çakışık olsun. Bu durumda {B} koordinat sisteminde yer alan $\widehat{\mathrm{X}}_{\mathrm{B}}$ birim vektörünün yönelimi {A} koordinat sistemine göre ${}^{\mathrm{A}}\widehat{\mathrm{X}}_{\mathrm{B}}$ gibi gösterilip aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$A_{X_B} = \begin{bmatrix} r_{11} \\ r_{21} \\ r_{31} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |X_B||X_A| \cos\gamma_{AB} \\ |X_B||Y_A| \cos\beta_{AB} \\ |X_B||Z_A| \cos\alpha_{AB} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{X}_B.\hat{X}_A \\ \hat{X}_B.\hat{Y}_A \\ \hat{X}_B.\hat{Z}_A \end{bmatrix} \tag{3.6}$$

Denklem 3.6'dan yararlanarak ${}^{\mathrm{A}}_{\mathrm{B}}\mathrm{R}$ matrisi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$${}^{A}_{B}R = [A_{X_B} \quad A_{Y_B} \quad A_{Z_B}] = \begin{bmatrix} \hat{X}_B.\hat{X}_A & \hat{Y}_B.\hat{X}_A & \hat{Z}_B.\hat{X}_A \\ \hat{X}_B.\hat{Y}_A & \hat{Y}_B.\hat{Y}_A & \hat{Z}_B.\hat{Y}_A \\ \hat{X}_B.\hat{Z}_A & \hat{Y}_B.\hat{Z}_A & \hat{Z}_B.\hat{Z}_A \end{bmatrix} \tag{3.7}$$



Şekil 3.5. Merkezleri çakışık yönelimleri farklı iki koordinat sistemi

Denklem 3.7 düzenlenerek aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$ {}^{A}_{B}R = \begin{bmatrix} |\hat{X}_B||\hat{X}_A|\gamma_{AB} & |\hat{Y}_B||\hat{X}_A|\gamma_{AB} & |\hat{Z}_B||\hat{X}_A|\gamma_{AB} \\ |\hat{X}_B||\hat{Y}_A|\beta_{AB} & |\hat{Y}_B||\hat{Y}_A|\beta_{AB} & |\hat{Z}_B||\hat{Y}_A|\beta_{AB} \\ |\hat{X}_B||\hat{Z}_A|\alpha_{AB} & |\hat{Y}_B||\hat{Z}_A|\alpha_{AB} & |\hat{Z}_B||\hat{Z}_A|\alpha_{AB} \end{bmatrix} \tag{3.8} $$

Bir dikken (ortogonal) matris olan dönme matrisi aşağıdaki gibi tanımlansın.

$$ R = [\hat{X} \quad \hat{Y} \quad \hat{Z}] = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \tag{3.9} $$

Matris elamanlarının dikenlik ve birim özellikleri aşağıda verilmiştir.

$$ \hat{X}.\hat{X} = 1 \quad , \quad \hat{X}.\hat{X} = 1 \quad , \quad \hat{X}.\hat{X} = 1 $$
$$ \hat{X}.\hat{Y} = 0 \quad , \quad \hat{X}.\hat{Z} = 0 \quad , \quad \hat{Y}.\hat{Z} = 0 $$
$$ \left|\hat{X}\right| = 1 \quad , \quad \left|\hat{Y}\right| = 1 \quad , \quad \left|\hat{Z}\right| = 1 $$

{A} koordinat sisteminin {B} koordinat sistemine göre yönelimi denklem 3.10'da görüldüğü gibi ${}^{A}_{B}R$ dönme matrisiyle gösterilir.

$$ {}^{B}_{A}R = [B_{\hat{X}_A} \quad B_{\hat{Y}_A} \quad B_{\hat{Z}_A}] \cdot \begin{bmatrix} \hat{X}_A.\hat{X}_B & \hat{Y}_A.\hat{X}_B & \hat{Z}_A.\hat{X}_B \\ \hat{X}_A.\hat{Y}_B & \hat{Y}_A.\hat{Y}_B & \hat{Z}_A.\hat{Y}_B \\ \hat{X}_A.\hat{Z}_B & \hat{Y}_A.\hat{Z}_B & \hat{Z}_A.\hat{Z}_B \end{bmatrix} \tag{3.10} $$

{A} koordinat sistemini {B} koordinat sistemine göre tanımlayan ${}^{B}_{A}R$ matrisi, ${}^{A}_{B}R$ matrisinin devriğine (transpoz) eşittir.

$$ {}^{B}_{A}R = {}^{A}_{B}R^{T} \tag{3.11} $$

${}^{B}_{A}\mathrm{R}$ dönme matrisinin tersi ${}^{B}_{A}R^{-1}$ olsun. ${}^{B}_{A}\mathrm{R}$ matrisiyle${}^{B}_{A}R^{-1}$ matrisinin çarpımı birim matrisi verir.

$${}^{B}_{A}R \cdot {}^{B}_{A}R^{-1} = I \tag{3.12}$$

Denklemde I birim matrisi göstermektedir. Denklem 3.12'nin her iki tarafını ${}^{B}_{A}R^{T}$ matrisiyle çarpalım.

$${}^{A}_{B}R^{T} \cdot {}^{A}_{B}R \cdot {}^{A}_{B}R^{-1} = {}^{A}_{B}R^{T} \cdot I \tag{3.13}$$

Denklemde,

$${}^{A}_{B}R^{T} \cdot {}^{A}_{B}R = \begin{bmatrix} B_{\hat{X}_A} \\ B_{Y_A} \\ B_{Z_A} \end{bmatrix} \cdot [B_{\hat{X}_A} \quad B_{Y_A} \quad B_{Z_A}]$$

$${}^{A}_{B}R^{T} \cdot {}^{A}_{B}R = \begin{bmatrix} B_{\hat{X}_A} \cdot B_{\hat{X}_A} & B_{\hat{X}_A} \cdot B_{\hat{Y}_A} & B_{\hat{X}_A} \cdot B_{\hat{Z}_A} \\ B_{\hat{Y}_A} \cdot B_{\hat{X}_A} & B_{\hat{Y}_A} \cdot B_{\hat{Y}_A} & B_{\hat{Y}_A} \cdot B_{\hat{Z}_A} \\ B_{\hat{Z}_A} \cdot B_{\hat{X}_A} & B_{\hat{Z}_A} \cdot B_{\hat{Y}_A} & B_{\hat{Z}_A} \cdot B_{\hat{Z}_A} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = I$$

$${}^{A}_{B}R^{T} \cdot {}^{A}_{B}R = I \tag{3.14}$$

(3.14) ifadesini, denklem (3.13)'te yerine koyalım.

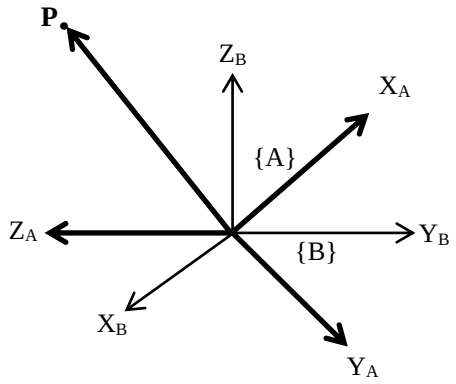
$$I \cdot {}^{A}_{B}R^{-1} = {}^{A}_{B}R^{T}$$

$${}^{A}_{B}R^{-1} = {}^{A}_{B}R^{T} \tag{3.15}$$

Denklem 3.15'ten bir dönme matrisinin tersini almak için o matrisin sadece devriğini almanın yeterli olduğu sonucunu çıkarabiliriz. Ayrıca,

1. Dönme matrisi {B} koordinat sisteminin {A} koordinat sistemine göre yönelimini açıklar.
2. Şekil 3.6'de olduğu gibi, eğer {A} ve {B} gibi iki koordinat sisteminin merkezleri üst üste çakışık ise, {B} koordinat sistemine göre tanımlanmış bir noktayı {A} koordinat sistemine göre tanımlamak mümkün olur. Bu durum matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$A_P = {}^{A}_{B}R \cdot B_P \tag{3.16}$$

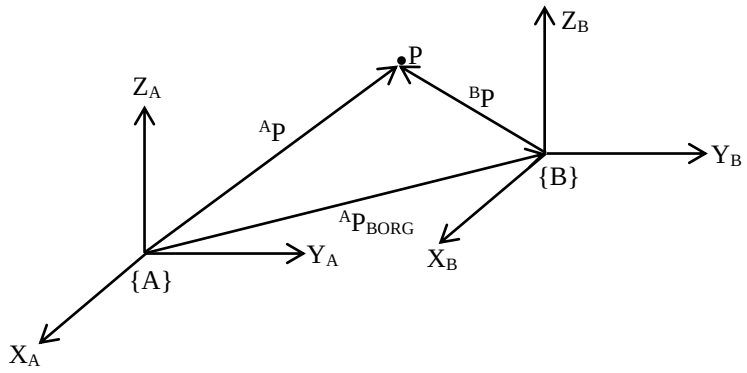


Şekil 3.6. {B} koordinat sistemine göre tanımlanmış bir noktanın {A} koordinat sistemine göre tanımlanması

3.1.1.3. İki koordinat sisteminin bir birlerine göre konum tanımlanması

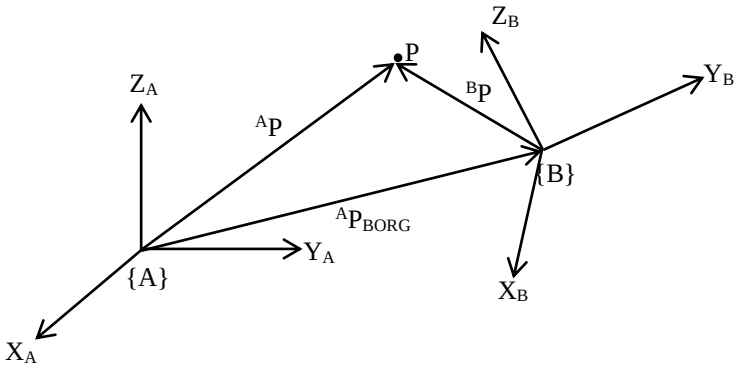
{A} ve {B} gibi iki koordinat sistemi olsun. {A} koordinat sisteminin {B} koordinat sistemine uzaklığı ${}^{A}P_{BROG}$ gibi bir vektörle gösterilir. Şekil 3.7'de yönelimleri aynı merkezleri farklı noktalarda bulunan iki koordinat sistemi görülmektedir. P noktasının {A} koordinat sitemine uzaklığını ${}^{A}P_{BROG}$ vektörünü kullanarak aşağıdaki gibi ifade edebiliriz.

$$A_P = B_P \cdot A_{P_{BORG}} \tag{3.17}$$



Şekil 3.7. Yönelimleri aynı fakat merkezleri farklı noktalarda bulunan iki koordinat sistemi

Şekil 3.8'de ise hem izledikleri yollar hem de başlangıç noktaları farklı noktalarda bulunan iki koordinat sistemi görülmektedir. Bu durumda P noktasının {A} koordinat sistemine uzaklığı denklem 3.18'teki gibi ifade edilir.



Şekil 3.8. Hem izledikleri yollar hem de başlangıç noktaları farklı noktalarda bulunan iki koordinat sistemi

$$A_P = {}^A_B R \cdot B_P + A_{P_{BORG}} \tag{3.18}$$

Eğer {A} koordinat sistemi ile {B} koordinat sisteminin yönelimleri aynı merkezleri ayrı noktalarda olması durumunda ${}^A_B R = I$ olur ve denklem 3.18 denklem 3.17'teki olduğu gibi ${}^A P = {}^B P + {}^A P_{BORG}$ şeklinde açıklanmaktadır. Aynı şekilde eğer {A}koordinat sistemi ile {B} koordinat sisteminin orjinleri çakışık hedefleri farklı ise ${}^A P_{BORG} = 0$ olur ve denklem 3.18 denklemi 3.16'daki ${}^A P = {}^A_B R.{}^B P$ şeklinde ifade edilir.

Genel olarak ${}^B P$ ile ${}^A P$ arasındaki ilişki bir matrisle ifade edilmek istenir. Bunun için denklem 3.19'de görüldüğü gibi yeni bir dönüşüm matrisi tanımlanır.

$$A_P = {}^A_B T \cdot B_P \tag{3.19}$$

Denklem 3.19 daha açık bir ifadeyle aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$\begin{bmatrix} A_P \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^A_B R & A_{P_{BORG}} \\ 0 \quad 0 \quad 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_P \\ 1 \end{bmatrix} \tag{3.20}$$

Denklem 3.19 ${}^A P$, ${}^B P$ ve ${}^A P_{BORG}$ vektörlerine 1 ve ${}^A_B R$ matrisine 0'lar eklenerek matrislerin çarpımlarının doğru bir şekilde yapılması sağlanmıştır. Denklem 3.20'daki çarpım gerçekleşirse denklem 3.18'teki ${}^A P = {}^A_B R.{}^B P + {}^A P_{BORG}$ sağlanır.

$$\begin{bmatrix} A_P \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^A_B R \cdot B_P + A_{P_{BORG}} \\ 1 \end{bmatrix} \tag{3.21}$$

${}^A P$ ile ${}^B P$ arasındaki ilişki, içerisinde dönme matrisi ve konum vektörünün olduğu 4x4 boyutunda bir matrisle açıklanabilir. Bu matrise homojen dönüşüm matrisi de denilir ve şu şekilde ifade edilir;

$$ {}^{A}_{B}T = \begin{bmatrix} {}^{A}_{B}R & A_{P_{BORG}} \\ 0 \quad 0 \quad 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.22} $$

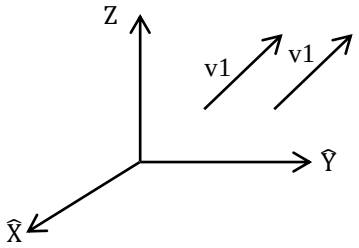
Denklemde gösterilen ${}^{A}_{B}R$ 3x3 boyutlu bir matris $A_{P_{BORG}}$ ise 3x1 boyutlu bir vektördür.

$$ {}^{A}_{B}T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & P_X \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & P_Y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & P_Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.23} $$

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 ${}^{A}_{B}R$ matrisini temsil etmektedir.

3.1.2. Vektörsel büyüklükler

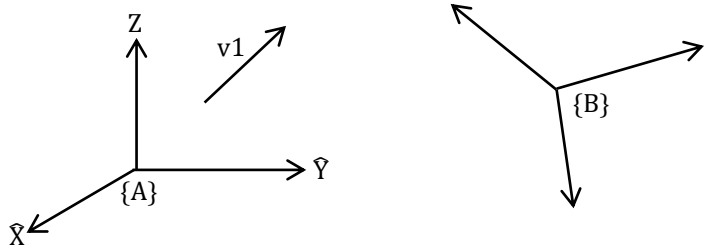
Vektörsel büyüklükler hız, moment, kuvvet ve konum gibi fiziksel büyüklükler olarak ifade edilebilir. Şu ana kadar konum vektörleri üzerini inceledik. Şimdi ise hız/moment gibi diğer vektörleri inceleyelim. Hız ve moment vektörlerine serbest vektörler denir. Serbest vektörler üç boyutlu uzayda başlangıç noktalarından bağımsız olarak taşınabilirler. Şekil 3.9'te görüldüğü gibi iki hız vektörünün büyüklüğü ve doğrultusu aynı olmasına rağmen sadece başlangıç noktaları farklıdır.



Şekil 3.9. Serbest vektör

Serbest vektörlerin dönüşümleri gerçekleştirilirken dönüşüm matrisinin içerisinde konum vektörü yer almaz. Dönüşümde sadece dönme matrisi kullanılır. Şekil 3.10'te verilen {A} ve {B} koordinat sistemleri arasındaki dönüşüm matrisi aşağıdaki gibi tanımlansın.

$$ {}^{A}_{B}T = \begin{bmatrix} {}^{A}_{B}R & A_{P_{BORG}} \\ 0 \quad 0 \quad 0 & 1 \end{bmatrix} $$



Şekil 3.10. {B} koordinat sistemine göre tanımlanan v1 hız vektörünün {A} koordinat sistemine göre tanımlanması.

Şekil 3.10'teki {B} koordinat sistemine göre tanımlanan v1 hız vektörünü {A} koordinat sistemine göre tanımlamak için aşağıdaki denklemden faydalanılır.

$$A_V = {}^{A}_{B}R \cdot B_V \tag{3.24}$$

İki koordinat sistemi arasında hız tanımlanırken konum ifadesi yer aldığından aşağıdaki denklem kesinlikle kullanılamaz.

$$A_V \neq {}^{A}_{B}T \cdot B_V \tag{3.25}$$

Konum ve kuvvet gibi fiziksel büyüklükler çizgi vektörleridir. Bunların üç boyutlu uzayda taşınmasında başlangıç noktasını içeren dönüşüm matrisi kullanılır.

3.2. Yöntem

3.2.1. İleri kinematik

Geometrik bir sistemin yapısını ve hareketini inceleyen bilim dalına kinematik denir. Bir sistemin belirli şartlar altında nasıl hareket ettiğini anlayabilmek için bu sistemin kuvvet atalet ve enerji gibi büyüklükleri yani dinamiği hakkında bilgi sahibi olmak gerekir. Robotun ileri yön kinematiği (forward kinematics), robot bağlarının yerleri, hızları ve ivmeleri arasındaki ilişkiyi inceler. Bir seri robot, ana çerçevesinden araç çerçevesine doğru birbirine prizmatik veya dönel eklemlerle bağlanmış seri bağlardan oluşur. Eğer her ekleme bir koordinat sistemi yerleştirilirse, komşu iki eklem arasındaki ilişki bit ${}^{i-1}_{i}\mathrm{T}$ dönüşüm matrisi ile tanımlanabilir. İlk ekleme ait dönüşüm matrisi, ilk eklemle ana çerçeve arasında bir ilişkiye varırken

son ekleme ait dönüşüm matrisi ise uç işlevcisi ile son eklem arasında bir ilişki tanımlar. Arka arkaya sıralanan bu eklem dönüşüm matrislerinden yararlanarak ana çerçeveyle araç çerçevesi arasında bir ilişki tanımlanır. Bu ilişkiye ileri kinematik denir ve araç çerçevesinin yönelimini ve konumunu ana çerçeveye göre ifade eder ve aşağıdaki gibi gösterilir.

$$ {}^{0}_{N}T = {}^{0}_{1}T \cdot {}^{1}_{2}T \cdot {}^{2}_{3}T \cdots\cdots {}^{N-1}_{N}T \tag{3.26} $$

Her bir eklem matrisi ${}^{i-1}_{i}\mathrm{T}$ bir eklem değişkeninin fonksiyonudur. ${}^{0}_{\mathrm{N}}\mathrm{T}$dönüşüm matrisi ise N tane eklemin birer fonksiyonudur. Bir robot uç işlevcisinin çalışma uzayında serbestçe hareket edebilmesi için 6 serbestlik derecesine sahip olması yeterlidir. Eklem matrislerine ek olarak ana çerçeve ile istasyon çerçeve (${}^{\text{istasyon}}_{0}\mathrm{T}$) ve uç işlevci ile araç çerçeve arasında (${}_{\text{araç çerçeve}}{}^{\mathrm{N}}\mathrm{T}$) dönüşüm matrisler tanımlanır. Araç çerçeve ile istasyon çerçeve ve arasındaki toplam dönüşüm ise aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$ {}^{istasyon}_{araç\ çerçeve}T = {}^{\text{istasyon}}_{0}T \cdot {}^{0}_{\mathrm{N}}T \cdot {}_{\text{araç çerçeve}}{}^{\mathrm{N}}T \tag{3.27} $$

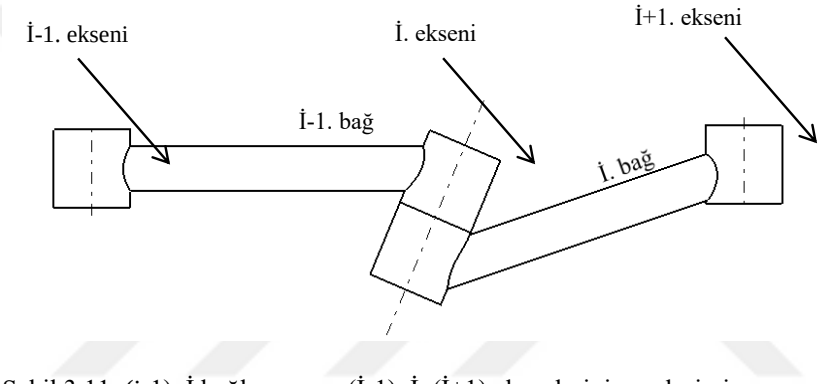
Yukarıdaki eşitlikte yer alan ana çerçeve ile istasyon çerçeve ve uç işlevci ile araç çerçeve arasındaki dönüşümler sabit olduğundan bu dönüşümler ${}^{0}_{\mathrm{N}}\mathrm{T}$ ileri kinematik matrisinin içerisinde yer alır.

3.2.1.1. Eklem değişkenlerin belirlenmesi

Robotların eklem değişkenlerini belirlemek için birçok kinematik yöntemler geliştirilmiştir. Kinematik problemlerin çözümü, kartezyen üç boyutlu ve kartonyum dört boyutlu olmak üzere iki farklı uzayda gerçekleştirilir. Kartezyen uzayda üstel yöntem (exponential method), Pieper-Roth yöntemi başvurulan yöntemlerden bazılarıdır. Fakat çoğunlukla bir robotun eklem değişkenlerinin belirlenmesinde en fazla tercih edilen yöntem kısaca D-H olarak gösterilen Denavit-Hartenberg yöntemidir.

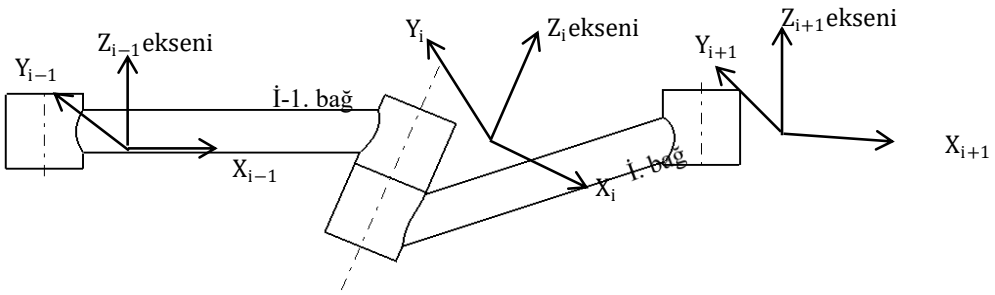
3.2.1.1.1. Denavit-hartenberg yöntemi

Denavit-Hartenberg yönteminde dört ana değişken kullanılarak robot kinematiği çıkartılır. Bu değişkenler, iki eksen arasında bağ uzunluğu (link length) a_{i-1} , (i-1) ile i eksenleri arasındaki bağ açısı (link twist) α_{i-1} , üst üste çakışan bağlar arasındaki eklem kaçıklığı (joint offset) d_i, ve iki bağ arasında oluşan eklem açısı (joint angle) θ_i'dir. Bu dört değişkene D-H değişkeni denir. Bu değişkenleri belirlemek için, öncelikle Şekil 3.11'de gösterildiği gibi robotun dönme eksenleri belirlenir ve dönme eksenleri bağlardan bir fazla olacak şekilde numaralandırılır.



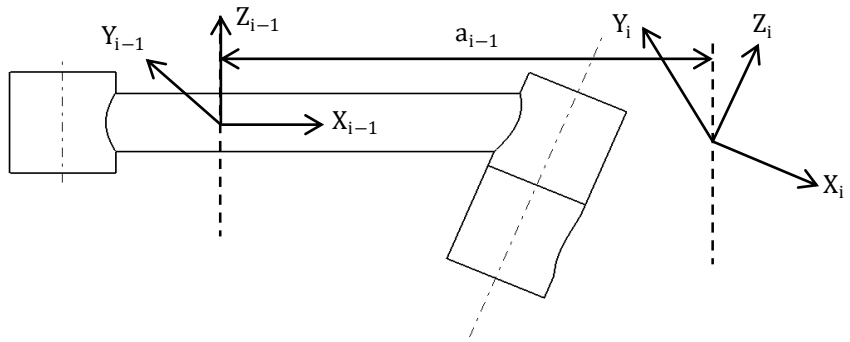
Şekil 3.11. (i-1), İ bağlarının ve (İ-1), İ, (İ+1) eksenlerinin yerleşimi

Daha sonra bu eksenlerin her birine bir koordinat sistemi konulur ve bağ dönme ekseni, Şekil 3.12'de açıklandığı gibi, koordinat sisteminin Z ekseni kabul edilir.



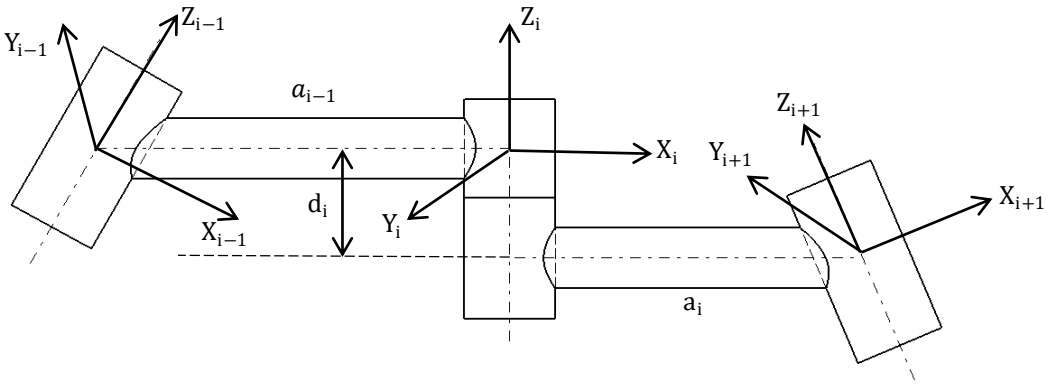
Şekil 3.12. (i-1) ve İ eksenlerine koordinat sisteminin yerleştirilmesi

Daha sonra Şekil 3.13 görüldüğü gibi $X_{İ-1}$ yönünde uzanan $Z_{İ-1}$ ile $Z_İ$ arasındaki dik uzaklık $a_{İ-1}$bağ uzunluğu olarak belirlenir.



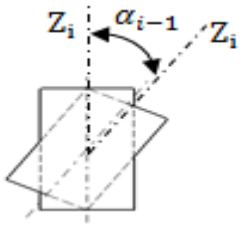
Şekil 3.13. $\mathbf{Z_{i-1}}$ile $\mathbf{Z_i}$ arasında $\mathbf{X_{i-1}}$boyunca uzanan $\mathbf{a_{i-1}}$ bağ uzunluğu

X_{i-1} ile X_i arasındaki Z_i boyunca uzanan üst üste çakışan bağlar arasındaki mesafe Şekil 3.14'te görüldüğü gibi bağ kaçıklığı $d_i$olarak belirlenir.



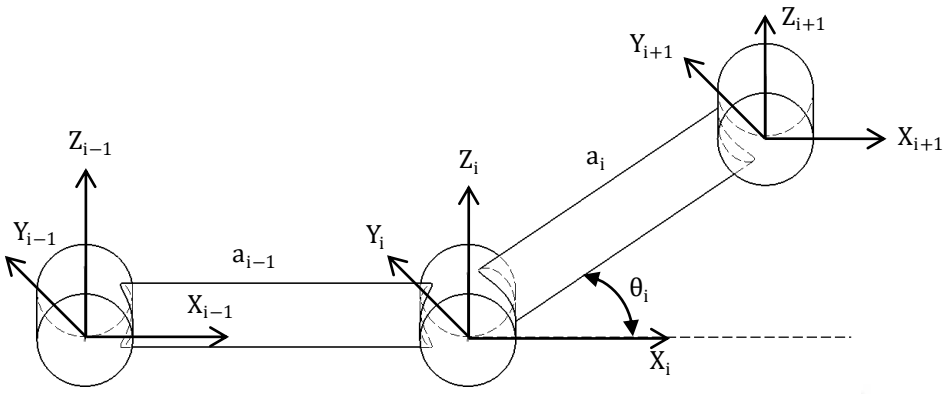
Şekil 3.14. $\mathbf{X_{i-1}}$ ile $\mathbf{X_i}$ arasında $\mathbf{Z_i}$ boyunca uzanan $\mathbf{d_i}$ bağ kaçıklığı.

Z_{i-1} ile Z_i dönme eksenleri arasında oluşan açı, Şekil 3.15'de görüldüğü gibi α_{i-1} bağ açısıdır.



Şekil 3.15. $\mathbf{Z_{i-1}}$ ile $\mathbf{Z_i}$ eksenleri arasındaki $\boldsymbol{\alpha_{i-1}}$ bağ açısı.

θ_i eklem açısı şekil 3.16'da görüldüğü gibi a_{i-1} ile a_i bağları arasında X ekseni boyunca ölçülen açıdır.



Şekil 3.16. a_(i-1) ile a_i bağları arasındaki θ_i eklem açısı

3.2.1.1.2. Eklemlere koordinat sistemi yerleştirilmesi

Eklemlere koordinat sistemi yerleştirilmesini maddeler halinde açıklayalım.

1. Öncelikli olarak eklem eksenlerinin kayma veya dönme yönleri bulunur ve bu eksene simetrik bir doğru çizilir.
2. İşlem gerçekleştirilirken eklem eksenleri, döner eksenler için dönme yönü Z, prizmatik eklemler için kayma yönü Z ekseni şeklinde ifade edilir.
3. Z eksenine dik ve kol boyunca olan bağ uzunluğu X ekseni olarak kabul edilir.
4. Z ve X eksenleri bulunduktan sonra sağ el işlemine göre Y ekseni bulunur.
5. Eğer art arda gelen iki eklemin dönme veya kayma yönleri benzer ise Z ekseni belirtildikten sonra kol boyunca X ekseni bulunur. Son olarak sağ el işlemine göre Y ekseni bulunur.
6. Sıfır ve birinci eksenler alt alta kabul edilebilir.
7. Bir seri robot eklemlerine koordinat sistemleri konulurken birinci eksendeki dönme yönü Z ekseni olarak alındıktan sonra genellikle bu ekleme X ekseni döndürüldüğünde komşu iki Z ekseni üst üste çakışacak şekilde bir X ekseni konulur.

Eklemlere yerleştirilen koordinat sistemleri yukarıda açıklanan kurallara göre belirtildikten sonra eklem değişkenleri aşağıdaki tanımlamalar göz önünde tutularak isimlendirilebilir.

1. a_{i-1}, $\hat{Z}_{i-1}$ ile $\hat{Z}_i$ arasında $\hat{X}_{i-1}$ boyunca belirlenen uzunluktur.
2. $\alpha_{i-1}\hat{Z}_{i-1}ile\hat{Z}_i$ arasında $\hat{X}_{i-1}$boyunca ölçülen açıdır.
3. d_i, $\hat{X}_{i-1}$ ile $\hat{X}_i$ arasında $\hat{Z}_i$ boyunca belirlenen uzunluktur.
4. θ_i, $\hat{X}_{i-1}$ ile $\hat{X}_i$ arasında $\hat{Z}_i$ boyunca ölçülen açıdır.

Yukarıdaki açıklanan a_{i-1},α_{i-1},d_i ve θ_i değişkenlerinden belirlenmesi daha zor olan a_{i-1} ve d_i aşağıdaki gibi bulunabilir.

a_{i-1} uzunluğu, (i=1,2,3…..N)

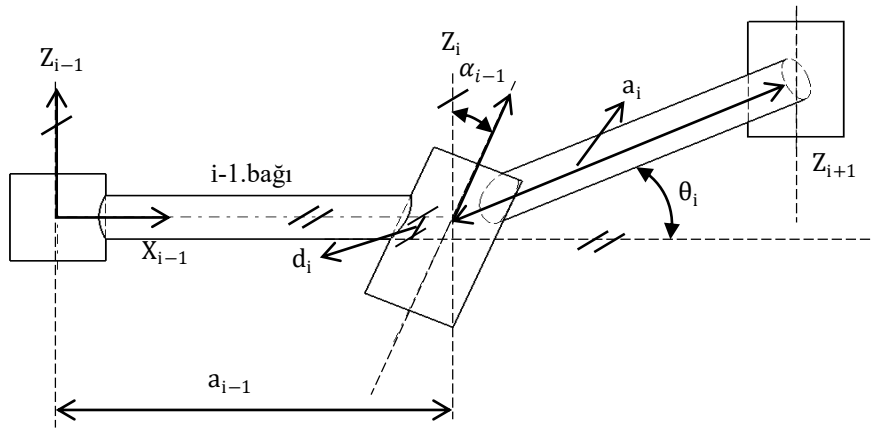
1. a_0,$\hat{Z}_0$ ile $\hat{Z}_1$ arasında $\hat{X}_0$, (i=1 için)
2. a_1,$\hat{Z}_1$ ile $\hat{Z}_2$ arasında $\hat{X}_1$, (i=2 için)
3. a_2,$\hat{Z}_2$ ile $\hat{Z}_3$ arasında $\hat{X}_2$, (i=3 için)
4. a_3,$\hat{Z}_3$ ile $\hat{Z}_4$ arasında $\hat{X}_3$, (i=4 için)
5. a_4,$\hat{Z}_4$ ile $\hat{Z}_5$ arasında $\hat{X}_4$, (i=5 için), boyunca belirlenen uzunluktur.

d_i uzunluğu, (i=1,2,3…… N)

1. d_1,X_0 ile $\hat{X}_1$ arasında $\hat{Z}_1$, (i=1 için)
2. d_2,X_1 ile $\hat{X}_2$ arasında $\hat{Z}_2$, (i=2 için)
3. d_3,X_2 ile $\hat{X}_3$ arasında $\hat{Z}_3$, (i=3 için)
4. d_4,X_3 ile $\hat{X}_4$ arasında $\hat{Z}_4$, (i=4 için), boyunca belirlenen uzunluktur.

3.2.1.1.3. Eklem dönüşüm matrisleri

i. Ekleme yerleştirilen {i.} koordinat sisteminin i-1, ekleme yerleştirilen {i-1.} koordinat sistemine göre şekil 3.17'de belirtilen a_{i-1},α_{i-1},d_i ve θ_i eklem değişikliklerindenfaydalanarak robotun bir eklemine ait dönüşüm matrisi denklem 3.37 deki gibi ifade edilir. Bu dört değişkenin meydana getirdiği matrislerin çarpımıyla, n serbestlik derecesine sahip bir robotun yalnızca bir eklemine ait dönüşüm matrisi elde edilir. Bir dönüşüm matrisi, 3x3'lük bir dönme matrisinden ve 3x1'lik bir konum vektöründen oluşur.



Şekil 3.17. $a_{(i-1)}$, $\alpha_{(i-1)}$, d_i ve θ_i eklem değişkenlerin belirlenmesi.

$$
{}^{i-1}_{i}T = R_x(\alpha_{i-1}) \cdot D_x(a_{i-1}) \cdot R_z(\theta_i) \cdot D_z(d_i)
$$

$$
{}^{i-1}_{i}T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & 0 \\ 0 & s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_{i-1} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & 0 \\ s\theta_i & c\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
$$

$$
= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_{i-1} \\ 0 & c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & 0 \\ 0 & s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & 0 \\ s\theta_i & c\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
$$

$$
{}^{i-1}_{i}T = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} d_i \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.28}
$$

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

3.2.1.1.4. Robot kinematiğinin çıkarılmasında uygulanana kurallar

Sıfır konumda bulunan bir robot manipülatörün ileri yön kinematiğini maddeler halinde sıralayalım:

1. Öncelikle robotun her eklemi belirlenerek bu eklemlere koordinat sistemi yerleştirilir.

2. Tablo 3.1 göz önünde bulundurularak her eklem için D-H değişkenleri belirlenir. Tablonun her satırında bulunana değişkenler kullanılarak bir ekleme ait dönüşüm matrisi elde edilir.

Çizelge 3.1. D-H Değişkenlerinin Belirlenmesi

Eklem No	D-H Değişkenleri				İ. Eklem Değişkenleri
İ	$\boldsymbol{\alpha_{i-1}}$	$\boldsymbol{a_{i-1}}$	$\boldsymbol{d_i}$	$\boldsymbol{\theta_i}$	$\mathbf{d_i}$ veya $\boldsymbol{\theta_i}$
1	α_0	a_0	d_1	θ_1	d_1 veya θ_1
2	α_1	a_1	d_2	θ_2	d_2 veya θ_2
3	α_2	a_2	d_3	θ_3	d_3 veya θ_3
4	α_3	a_3	d_4	θ_3	d_4 veya θ_4

3. Tablo 3.1'deki D-H değişkenlerinin belirlenmesiyle her eklem için aşağıda genel eklem dönüşüm matrisi kullanılır.

$$ {}^{i-1}_{i}T = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1}d_i \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1}d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

4. Üst tarafta dönüşüm matrislerinin çarpılma işlemiyle birlikte ana çerçeveden araç çerçeveye doğru ileri yönlü robot kinematiği çıkartılır.

$$ {}^{0}_{N}T = {}^{0}_{1}T \cdot {}^{1}_{2}T \cdot {}^{2}_{3}T \dots\dots\dots {}^{N-1}_{N}T $$

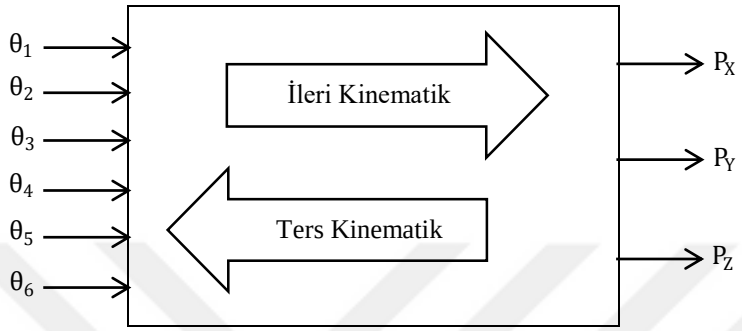
5. Dönüşüm matrislerinin çarpılmaları uç işlevcinin yeri ve yönelimi içeren ve eklem değişikliklerinin birer fonksiyonu olan genel bir dönüşüm matrisi oluşur. Bu matriste 9 adet dönme r_{11}, r_{12}, r_{13}, r_{21}, r_{22}, r_{23}, r_{31}, r_{32}, r_{33} ve 3 adet de yer P_x, P_y ve P_z belirten toplam 12 adet eleman bulunur.

3.2.2. Ters kinematik

Robot manipülatörlerinin ters kinematiği, robot kontrol işlevinin en büyük kademelerinden birini oluşturmaktadır. Altı serbestlik derecesine sahip endüstriyel robot manipülatörlerinin eklemlerin yerleşiminden kaynaklanan farlı geometriler, çok karmaşık ters kinematik denklemler denklenmeler türetmektedir. Altı serbestlik derecesine sahip bir endüstriyel robot manipülatörün son üç eklemi bir noktada kesiştiğinde, kolaylıkla ters kinematik çözüm gerçekleştirilirken, kesişmediğinde ise ters kinematik problem oldukça zor bir hal almaktadır.

Eklem açıları verildiğinde, Kartezyen uzayda bir robot manipülatörün uç işlevcinin konumunu ve yönelimini ileri kinematik denir. Ters kinematik probleme göre çok kolay olan ileri kinematik problem için her zaman bir çözüm vardır. Ters kinematik

problem ise Kartezyen uzayda, ana çerçeveye göre verilen uç işlevcinim yer ve hedef verileri yardımıyla eklem değişkenlerin bulunması şeklinde tanımlanabilir. Bir başka ifadeyle, bir robot manipülatörün uç işlevcisinin yönelimini ve konumunu Kartezyen koordinat sisteminden eklem koordinat sistemine dönüştürme işlemine ters kinematik problem denir.

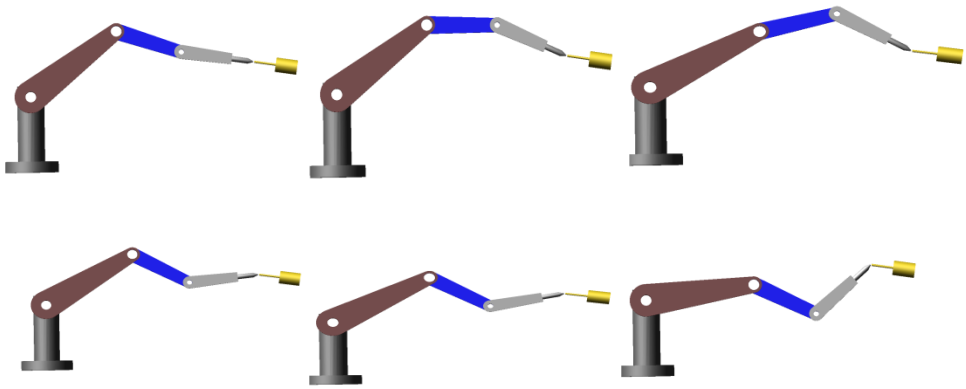


Şekil 3.18. Altı Eksenli Robotun İleri ve Ters Kinematik problem çözüm şeması

3.2.2.1. Ters kinematik problem yapısı

Ters kinematik problem, aşağıdaki sıralanan özelliklerden dolayı çözülmesi oldukça güç olan bir problemdir.

1. Analitik inceleme olarak karışık, doğrusal olmayan denklem içerir
2. Eklemlerin yapısına bağlıdır. Bir robot çoğunlukla prizmatik eklemlerden elde ediliyorsa ters kinematik çözümleri o ölçüde kolay elde edilirken dönel eklem sayısı artıkça çözüm de o ölçüde artmaktadır.
3. Her zaman matematiksel çözüm fiziksel çözümü temsil etmez.
4. Aynı uç işlevci düzenleşimi için birden fazla çözüm olabilir. Ters kinematik çözüm sayısı robotun serbestlik derecesine bağlı iken aynı zamanda eklem değişkenine de bağlıdır. Her bir eklemde a ve d parametrelerinin her ikisinin de bulunması çözüm sayısının artmasına neden olur.



Şekil 3.19. Robotun 6 farklı çözümü

5. Ters Kinematik problem,verilen bir robot düzenleşimi için tamamen analitik (closed form) olarak çözülebileceği gibi, analitik çözümün mümkün olmadığı durumlarda sayısal yöntemler kullanılarak da çözülebilir. Sayısal çözümün bilgisayar ortamında analitik çözüme göre daha yavaş çalışmasından dolayı robot tasarımcıları genellikle analitik çözümün mümkün olduğu tasarımlar üzerinde durmaktadırlar.

3.2.2.2. Ters kinematik çözüm yöntemleri

3.2.2.2.1. Analitik çözüm yaklaşımı

Craig tarafından tanımlanan altı serbestlik derecesine sahip bir robotun ileri yön kinematiği

$$ {}^{0}_{6}T = {}^{0}_{1}T \cdot {}^{1}_{2}T \cdot {}^{2}_{3}T \cdot {}^{3}_{4}T \cdot {}^{4}_{5}T \cdot {}^{5}_{6}T \qquad (3.29) $$

${}^{0}_{6}T$ ileri yön kinematik matrisi, konum ve yönelim verilerini içeren matris elemanları cinsinden Denklem 3.39'deki matris 1. kolonu uç işlevcisinin normal uç işlevcisinin normal vektörünü $(n = \begin{bmatrix} n_x & n_y & n_z \end{bmatrix}^T)$, 2.kolonu kayma (sliding) vektörünü $(s = \begin{bmatrix} s_x & s_y & s_z \end{bmatrix}^T)$ ve 3.kolonu ise yaklaşım (approaching) vektörünü $(a = \begin{bmatrix} a_x & a_y & a_z \end{bmatrix}^T)$ göstermektedir.

$$ {}^{0}_{6}T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & P_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & P_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.30} $$

$$ [{}^{0}_{1}T]^{-1} \cdot {}^{0}_{6}T = [{}^{0}_{1}T]^{-1} \cdot {}^{0}_{1}T \cdot {}^{1}_{2}T \cdot {}^{2}_{3}T \cdot {}^{3}_{4}T \cdot {}^{4}_{5}T \cdot {}^{5}_{6}T \tag{3.31} $$

Denklemde $\left[{}^{0}_{1}\mathrm{T}\right]^{-1} \cdot {}^{0}_{1}\mathrm{T} = \mathrm{I}$ olduğundan denklem 3.40 aşağıdaki gibi deha basit bir şekilde ifade edilebilir.

$$ [{}^{0}_{1}T]^{-1} \cdot {}^{0}_{6}T = {}^{1}_{2}T \cdot {}^{2}_{3}T \cdot {}^{3}_{4}T \cdot {}^{4}_{5}T \cdot {}^{5}_{6}T \tag{3.32} $$

Ters kinematik çözümü, denklem 3.41'teki eşitliğin sağ ve sol tarafında karşılıklı yer alan matris elemanlarını birbirine eşitlenmesiyle gerçekleştirilir. Kullanılan diğer denklemler aşağıdadır.

$$ [{}^{0}_{1}T \cdot {}^{1}_{2}T]^{-1} \cdot {}^{0}_{6}T = {}^{2}_{3}T \cdot {}^{3}_{4}T \cdot {}^{4}_{5}T \cdot {}^{5}_{6}T \tag{3.33} $$

$$ [{}^{0}_{1}T \cdot {}^{1}_{2}T \cdot {}^{2}_{3}T]^{-1} \cdot {}^{0}_{6}T = {}^{3}_{4}T \cdot {}^{4}_{5}T \cdot {}^{5}_{6}T \tag{3.34} $$

$$ [{}^{0}_{1}T \cdot {}^{1}_{2}T \cdot {}^{2}_{3}T \cdot {}^{3}_{4}T]^{-1} \cdot {}^{0}_{6}T = {}^{4}_{5}T \cdot {}^{5}_{6}T \tag{3.35} $$

$$ [{}^{0}_{1}T \cdot {}^{1}_{2}T \cdot {}^{2}_{3}T \cdot {}^{3}_{4}T \cdot {}^{4}_{5}T]^{-1} \cdot {}^{0}_{6}T = {}^{5}_{6}T \tag{3.36} $$

3.2.2.2.2. Sayısal çözüm yöntemleri

Gerçek zamanlı kontrol uygulamaları gerçekleştirilirken herhangi bir robota ait ters kinematik problemin kesin çözümü tercih edilir. Kesin çözüm, problemin analitik olarak çözülmesi ile elde edilir. Çoğunlukla analitik çözüm, birbirini takip eden üç eksen bir noktada kesiştiğinde (Euler bileği) veya paralel olduğunda gerçekleştirilebilir. Genellikle endüstriyel robotlar analitik çözüm gerçekleşecek şekilde tasarlanırlar bu da her koşulda Euler bileğinin kullanılması ile mümkündür.

Analitik olarak çözülmeyenler denklemler bir takım iteratifyöntemler kullanılarak çözülür. Analitik olarak çözülmeyen robotların ters kinematiğini, Pashkevich geliştirdiği sayısal yöntemden faydalanarak çözdü.Pashkevich'in gerçekleştirdiği yöntem, bilinen sayısal çözüm yöntemlerinin aksine, Jakobiyen

matrisi kullanmadan etkili tek boyutlu iteratif araştırma yaparak ters kinematik problemini çözer.

3.2.3. Yörünge planlaması

Bir robot manipülatörünün en temel sorunu uç işlevcisinin konumunu arzu edilen konuma götürmektir. Bu hareketi gerçekleştirilirken Robot yönelimini ve konumunu ana çerçeveye göre değiştirerek bir takım ara noktalardan geçerken, zamana bağlı olarak değişen belli bir hıza ve ivmeye sahip olduğundan değişen ivmeli hareketlerin titreşime neden olabilir. Robotun titreşiminden uzak, çalışma uzayındaki herhangi bir cisme çarpmadan, eyleyicilerin sınırlarını zorlamadan kontrollü ve yumuşak bir şekilde hareket edebilmesi için yörünge planlaması yapılır.

İki nokta arasını robot doğrusal, dairesel, sinusoidal veya farklı şekilde takip etmektedir. Bu hedef şekilleri süreye bağlı bir şekilde eklem açılarının veya kartezyen koordinat sisteminin birer fonksiyonlarıdır. Her ara nokta, ilk önce ana çerçeveye göre uç işlevcisinin yeri ve hedefi cinsinden ifade edilir. Daha sonra, her ara nokta, ters kinematik işlemi uygulamasıyla eklem açılarına çevrilir. Bu iki nokta arasın da seçilen bir hedef planlama metoduylan tane noktaya bölünürler. Ara noktalar tüm eklemler tarafından aynı sürede geçilmesiyleberaber her bir eklemin kat edeceği yol aynı düzeyde olmayacağından, sürat ve ivmeler farklılık göstermektedir. Dolayısıyla bir eklemin hızı ve ivmesi bir başka eklemden bağımsız olmaktadır. Sonuç olarak robottaki eyleyiciler bu açılarla çalıştığı zaman arzu edilen hedef ve yere ulaşırlar. Robot manipülatörler için Kartezyen ve eklem uzayı olmak üzere iki farklı hedefmodellemesi yapılmaktadır.

3.2.3.1. Eklem uzayında yörünge planlaması

Eklem uzayında yörünge planlaması yapılırken üç veya yüksek dereceli polinomlar kullanılır.

$$\theta(0) = \theta_0 \tag{3.37}$$

$$\theta(t_f) = \theta_f \tag{3.38}$$

$$\dot{\theta}(0) = 0 \tag{3.39}$$

$$\dot{\theta}(t_f) = 0 \tag{3.40}$$

Yukarıdaki dört koşul üçüncü dereceden bir polinomun katsayılarını bulmak için yeterlidir. 3.dereceden polinom olarak denklem 3.50'teki gibi ifade edilebilir.

$$\theta(t) = s_0 + (s_1 \cdot t) + (s_2 \cdot t^2) + (s_3 \cdot t^3) \tag{3.41}$$

Bu denklemin birinci türevini alırsak hızını ve 2.türevini alırsak ivmesini buluruz.

$$\dot{\theta}(t) = s_1 + (2s_2 \cdot t) + (3s_3 \cdot t^2) \tag{3.42}$$

$$\ddot{\theta}(t) = 2s_2 + (6s_3 \cdot t) \tag{3.43}$$

Denklem 3.46, denklem 3.50'de yerine konulursa, aşağıdaki ifadeler bulunur.

$$\theta(0) = s_0 + (s_1 \cdot 0) + (s_2 \cdot 0^2) + (s_3 \cdot 0^3) \quad \rightarrow \quad s_0 = \theta(0) = \theta_0 \tag{3.44}$$

$$\theta(t_f) = \theta_f = s_0 + (s_1 \cdot t_f) + (s_2 \cdot {t_f}^2) + (s_3 \cdot {t_f}^3) \tag{3.45}$$

Denklem 3.48 ve denklem 3.49, denklem 3.51 yerine konulursa aşağıdaki ifade elde edilir.

$$\dot{\theta}(0) = s_1 + (2s_2 \cdot 0) + (3s_3 \cdot 0^2) = 0 \quad \rightarrow \quad s_1 = \dot{\theta}(0) = 0 \tag{3.46}$$

$$\dot{\theta}(t_f) = s_1 + (2s_2 \cdot t_f) + (3s_3 \cdot {t_f}^2) = 0 \tag{3.47}$$

Polinom katsayılarını bulalım;

$s_1 = 0$

$\dot{\theta}(t_f) = 0$

$\dot{\theta}(t_f) = s_1 + (2s_2 \cdot t_f) + (3s_3 \cdot {t_f}^2) = 0$

$0 = 0 + (2s_2 \cdot t_f) + (3s_3 \cdot {t_f}^2)$

$\rightarrow \quad (2s_2 \cdot t_f) = -(3s_3 \cdot {t_f}^2)$

$\rightarrow \quad s_2 = -\dfrac{3s_3 \cdot t_f}{2} \;\; veya \;\; s_3 = -\dfrac{2s_2}{3t_f}$

$s_3 = -\frac{2s_2}{3t_f}$ ifadesi denklem 3.54'da yerine konulursa s_2 katsayısı bulunur ($s_0 = \theta_0$ ve $s_1 = 0$).

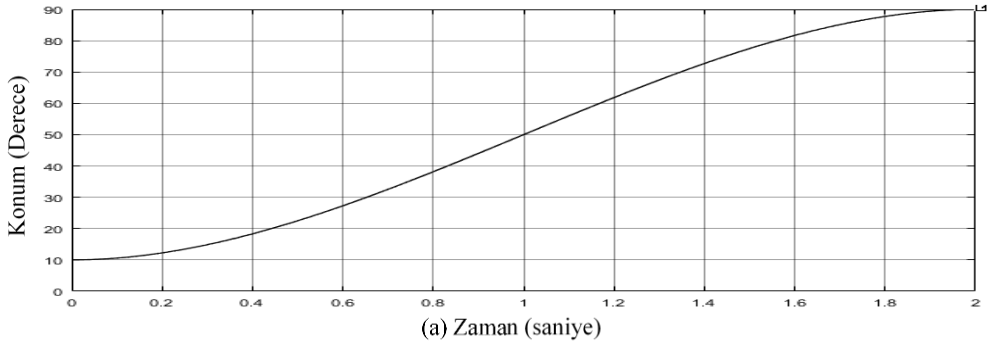
$$s_0 = s_1 = 0$$
$$\theta_f = s_0 + (s_1 \cdot t_f) + (s_2 \cdot {t_f}^2) + (s_3 \cdot {t_f}^3)$$
$$\rightarrow \quad \theta_f = \theta_0 + (0 \cdot t_f) + (s_2 \cdot {t_f}^2) + \left(\left(-\frac{2s_2}{3t_f}\right) \cdot {t_f}^3\right)$$
$$\rightarrow \quad \theta_f = \theta_0 + (0 \cdot t_f) + (s_2 \cdot {t_f}^2) + \left(\left(-\frac{2s_2}{3}\right) \cdot {t_f}^2\right)$$
$$\rightarrow \quad s_2 = \frac{3}{{t_f}^2} \cdot (\theta_f - \theta_0) \tag{3.48}$$

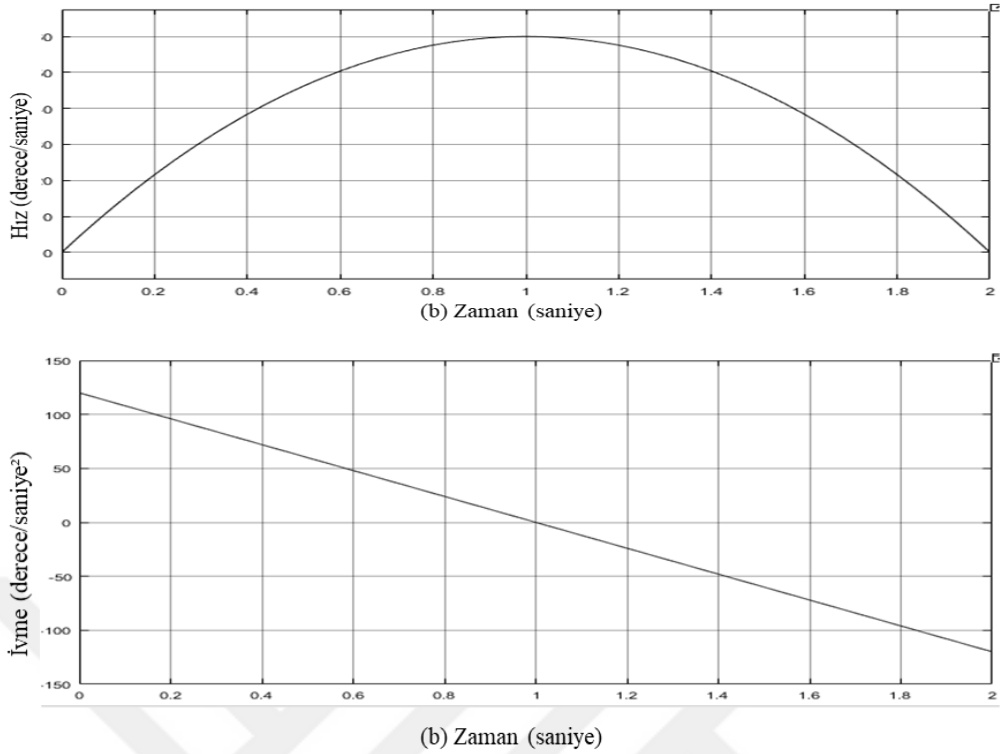
$s_2 = -\frac{3s_3 \cdot t_f}{2}$ ifadesini denklem 3.54'de yerine konulursa s_3 katsayısı aşağıdaki gibi bulunur.

$$s_0 = s_1 = 0$$
$$\theta_f = s_0 + (s_1 \cdot t_f) + (s_2 \cdot {t_f}^2) + (s_3 \cdot {t_f}^3)$$
$$\rightarrow \quad \theta_f = \theta_0 + (0 \cdot t_f) + \left(\left(-\frac{3s_3 \cdot t_f}{2}\right) \cdot {t_f}^2\right) + (s_3 \cdot {t_f}^3)$$
$$\rightarrow \quad \theta_f = \theta_0 + (0 \cdot t_f) - \left(\frac{3s_3}{2} \cdot {t_f}^3\right) + (s_3 \cdot {t_f}^3)$$
$$\rightarrow \quad s_3 = -\frac{2}{{t_f}^3} \cdot (\theta_f - \theta_0) \tag{3.49}$$

Bulunan katsayılar; $s_0 = \theta(0)$, $s_1 = 0$, $s_2 = \frac{3}{{t_f}^2}.(\theta_f - \theta_0)$, $s_3 = -\frac{2}{{t_f}^3}.(\theta_f - \theta_0)$

Konum Hız ve ivme grafikleri aşağıdaki gibi olur.

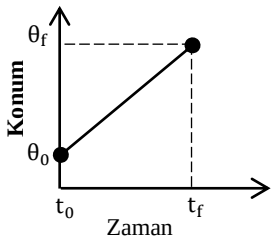




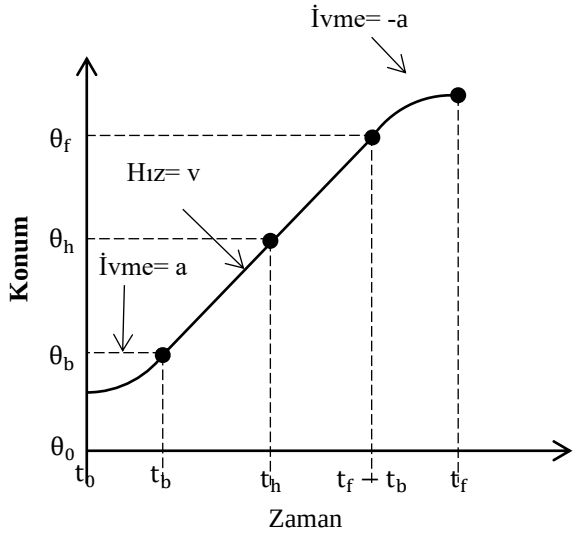
Şekil 3.20. Tek eklemli a) konum, b) hız, c) ivme grafiği

3.2.3.2. Kartezyen uzayında yörünge planlaması

Robot manipülatörün izlediği başka bir yörünge yöntemi de parabolik kısımların yerleştirildiği doğrusal yörüngedir. Bu yörünge yönteminde, n serbestlik derecesine sahip robot eklemlerin tamamı doğrusal bir yörünge takip etse dahi, uç işlevci iki nokta arasını doğrusal geçmez. Şekil 3.21'de görünen doğrusal yörüngede, hareketin başlangıcında ve bitişinde sürekli olmayan hız problemiyle karşılaşılır. Bunu engellemek için şekil 3.22'de olduğu gibi yörüngenin başlangıç ve bitişine parabolik kısımlar eklenerek konum ve hızın sürekliliği sağlanır. Ayrıca ivmeli bir hareket kullanılarak hızın pürüzsüz bir şekilde sürekli olması sağlanır.



Şekil 3.21. Doğrusal Yörünge



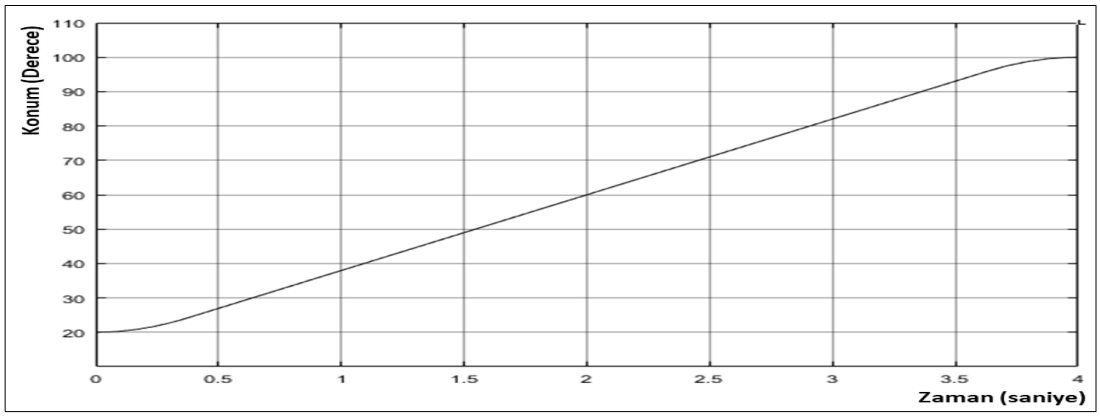
$$t_h = \frac{t_f}{2}$$

$$\theta_h = \frac{\theta_0 + \theta_f}{2}$$

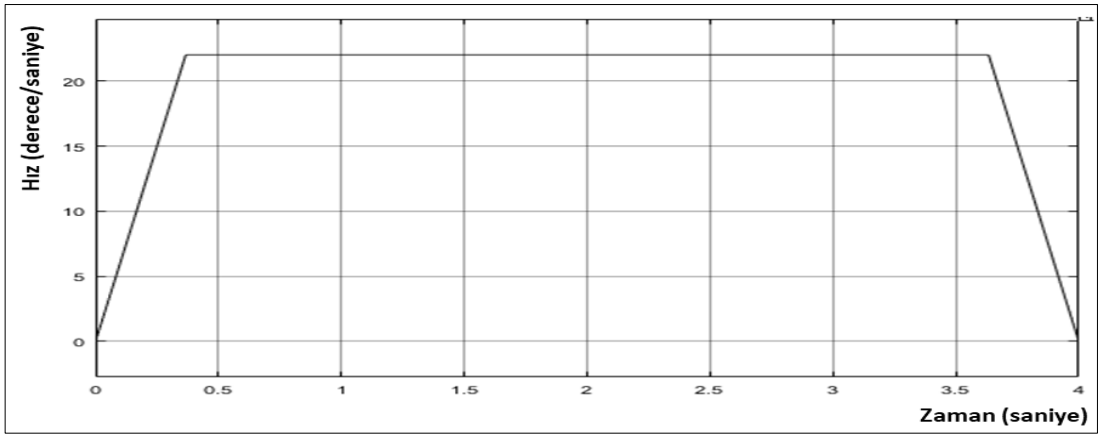
Şekil 3.22. Parabolik Kısımlar eklenmiş doğrusal yörünge

Çizelge 3.2. Doğrusal Yörüngeye Ait konum, hız ve ivme denklemleri

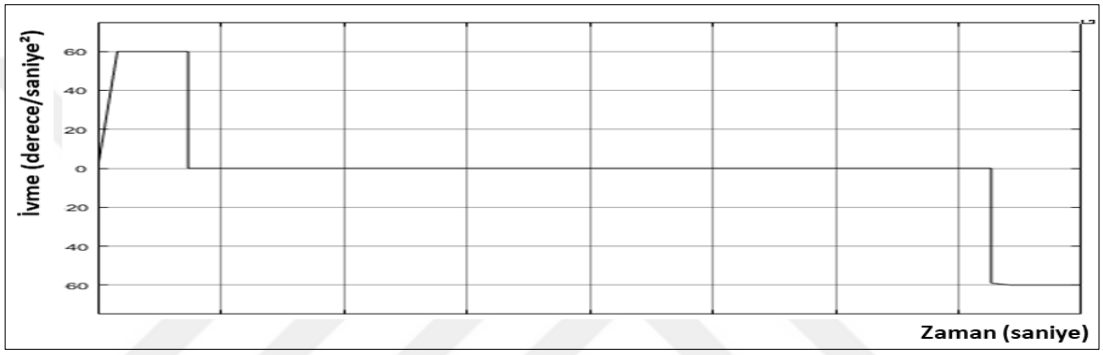
Zaman (t)	**θ(t)**	**θ̇(t)**	**θ̈(t)**
$0 \le t \le t_b$	$\theta_0 + \frac{a}{2}.t^2$	a.t	a
$t_b \le t \le t_f - t_b$	$v.t + \frac{\theta_f + \theta_0 + v.t_f}{2}$	v	0
$0 \le t \le t_b$	$\theta_f - \frac{a.t_f^{\,2}}{2} + a.t_f.t - \frac{a}{2}.t^2$	$a.t_f - a.t$	−a



(a)



(b)

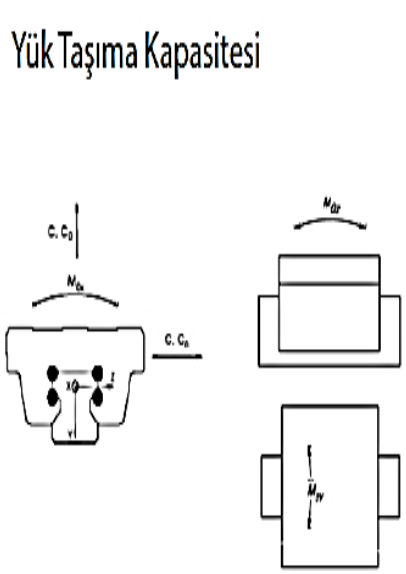


(c)

Şekil 3.23. Parabolik kısımlar eklenmiş doğrusal yörüngeye ait a) konum, b) hız, c) ivme grafiği

3.2.4. X Ekseni yönünde vidali mil hareketi

X ekseni için tasarımın ilk kademesinde gidip gelme hareketini sadece lineer ray üzerinde olmasını istemiştik. Ancak oluşturulacak sehimin lineer harekette kasmalara yol açtığı için mil alt desteği kullanılması daha uygun görülmektedir. Taşıdığı ağırlık göz önüne bulundurulduğunda ayrıca bir hesap yapmaya gerek görülmemiştir. y en kritik nokta için moment hesabı alınarak kontrol edilmiştir.



Sembol	Yük Değerleri		Momentler		
	C kN	C_0 kN	M_{ox} Nm	M_{oy} Nm	M_{ot} Nm
LCB 15	8,5	13,8	100	73	73
LCB 20	14,1	24,3	237	159	159
LCBL 20	21,28	31,77	309	269	269
LCB 25	20,3	35,1	400	272	272
LCBL 25	27,16	45,89	507	458	458
LCB 30	28,6	47,7	650	433	433
LCBL 30	37,26	62,46	860	729	729
LCB 35	52,3	81,1	1282	972	972
LCB 45	71,6	108,9	2300	1524	1524

Şekil 3.24. Lineer ray ve arabanın yük taşıma kapasitesi tablosu

Tablaya gelen maksimum yük W=80kg dır. Bu değer yer çekim ivmesiyle çarpılarak yataklara gelecek maksimum kuvvet, F_C=784.8N olarak bulunur. Vidalı mil uzunluğu L=0.95 metredir. Bu değerler denklem (3.50) 'de yerine konularak Mc, moment değeri hesaplanır. Bulunan M_C değeri göz önünde bulundurularak, bu değerden büyük en yakın moment değerlerine sahip olan LCB 20 seçilir.

$$M_C = \left(\frac{F_C}{4(araba)}\right) * \left(\frac{L}{2}\right) \tag{3.50}$$

$$= \left(\frac{784.8}{4}\right) * \left(\frac{0.95}{2}\right)$$

$= 93\ Nm$ olarak bulunur.

Nuevo modelo	Número de fase	Ángulo de paso	Voltaje	Corriente	Inductancia	Rasistance	Celebración Torque	Incercia del rotor	Peso	Longitud	Cable namber
		(°)	V	Un	Mh±20 %	Ω±10 %	Kg·cm	G·cm²	Kg	Mm	No.
86 Bhh 60 - 28E	2	1.80	2.55	3.5	4	0.73	32.5	1300	1.7	60	4
86 Bhh 65-451	2	1.80	2.7	4.5	3.5	0.6	37	1300	2	65	4
86 BHH7 6 - 400b	2	1.80	1.6	4	2.3	0.4	21	1300	2	76	4
86 BHH7 6 - 421B	2	1.80	1.26	4.2	2.3	0.3	34	1400	2.3	76	4
86BHH80-550A	2	1.80	2.475	5.5	4	0.45	45	1400	2.4	79	4
86BHH100-500B	2	1.80	2.5	5	4.2	0.5	52	2000	3	100	4
86BHH114-597B	2	1.80	2.04	6	3.5	0.34	80	2100	3.5	114	4
86BHH114-500A	2	1.80	3	5	2.2	0.6	60	2100	3.5	114	4
86BHH118-500A	2	1.80	2.85	5	6	0.57	90	2700	4	118	4
86BHH126-451	2	1.80	3.6	4.5	7.9	0.8	96	4000	4.24	126	4
86BHH150-600	2	1.80	1.8	6	3	0.3	85	4000	5.2	151	4
86BHH156-600H	2	1.80	4.08	6	9.2	0.68	132	4000	5.8	155	4

Şekil 3.25. Seçilen NEMA Motorun Teknik Dataları

Çizelge 3.3. Robotun X Eksenindeki hareketi için Hesaplarında kullanılacak değerler

Seçilen motor		NEMA 34 86BHH80	
Motorun rotor atalet momenti	J_0	0,00014	kg.m^2
Toplam Kütle		80	kg
Kayma yüzeyleri sürtünme katsayısı	μ	0,05	-
Vidalı mil verimi	η	0,9	-
Somun iç sürtünme katsayısı	μ_0	0,3	-
Vidalı milin çapı	D_b	16	mm
Vidalı milin uzunluğu	L_b	950	mm
Vidalı mil malzemesi (demir) için yoğunluk	ρ	7900	kg/m^3
Vidalı mil adımı	h	5	mm
Çözünürlük	Δl	0,025	mm/step
İlerleme	l	180	mm
Pozisyonlama periyodu	s	0,8	
Gerekli çözünürük	θ_s	2 veya daha kısa	

- **Gerekli Çözünürlüğü**

$$\theta_S = \frac{360°\text{xadım başına ilerleme } (\Delta l)}{\text{Vidalı milin adımı}} = \frac{360\text{x}0,025}{5} = 1,8$$

- **Çalışma Pulse Sayısı**

$$\text{ÇalışmaPulseSayısı} = \frac{\text{İlerlemeMiktarı}}{\text{Vidalı milin adımı}} \text{x} \frac{360}{\text{Gerekliçözünürlük}} = \frac{180}{5} \text{x} \frac{360}{1,8} = 7200$$

- **Step Motorun İvmelenme Periyodunun Belirlenmesi (s)**

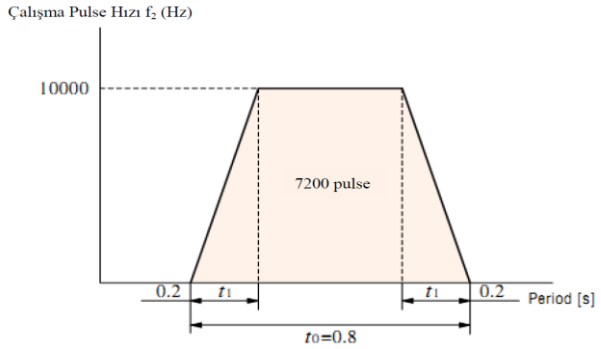
İvmelenme periyodu pozisyonlanma periyodunun %25'dir.

t1=0,25*0,8=0,2s

- **Step Motorun Çalışma Pulse Hızı f2 (Hz):**

$$\text{Çalışma Pulse Sayısı } f_2(\text{Hz}) = \frac{\text{ÇalışmaPulse Sayısı} - \text{Başlangıç PulseHızı}(f_1)\text{xivmelenme Peryodu}(t_1)}{\text{Pozisyonlama Peryodu} - \text{ivmelenme Peryodu}(t_1)}$$

$$f_2 = \frac{7200 - 0}{0,8 - 0,2} = 12000(\text{Hz})$$



Şekil 3.26. Step MotorunPulse Hızı – Periyot Grafiği

- **Yük Torkunun Hesaplanması TL (N.M)**

Mil doğrultusundaki kuvvet F= Wg(sinα +μcosα)

F=80*9,81x(sin0+0,05xcos0)=39,24N

$$\text{Pilot Basınç Yükü } F_0 = \frac{F}{3} = \frac{39,24}{3} = 13,08\text{N}$$

$$\text{YüklüTork}(T_L) = \frac{Fxh}{2\pi\eta} + \frac{\mu_0 x F_0 xh}{2\pi} = \frac{39,24x0,005}{2x3,14x0,9} + \frac{0,3x13,08}{2x3,14} = 0,6595\text{NM}$$

- **İvmelenme Torkuınun Hesaplanması T_A(N.M)**

$$\text{Vidalı Milin Atalet Momenti } J_B = \frac{\pi}{32} x\rho xLxD_B^4$$

$$J_B = \frac{3,14}{32} x7900x0,95x0,016^4 = 4,826x10^{-5}\text{kg.m}^2$$

$$\text{Toplam Kütle Atalet Momenti } J_T = m\left(\frac{h}{2\pi}\right)^2$$

$$J_T = 80x\left(\frac{0,005}{2x3,14}\right)^2 = 5.0711x10^{-5}\text{kg.m}^2$$

Toplam Atalet Momenti $J_L=J_B+J_T=4,826x10\text{-}5+5,0711x10\text{-}5=9,8971x10\text{-}5$

$$\text{İvmelenme Torku } T_A = (J_0 + J_L)\, x\, \frac{\pi.\theta_S}{180°}\, x\, \frac{f_2 - f_1}{t_1}$$

$$T_A = (14x10^{-5} + 9,8971x10^{-5})x\frac{3,14x1,8}{180}x\frac{12000-0}{0,2}$$

$$= 23,897x10^{-5}x0,0314x6000$$

T_A=0,045N.M

- **Toplam Tork**

$T_{Top}=T_L+T_A=0,6595+0,045=0,7045$N.M

- **Atalet Oranına Göre Seçilen Motorun Uygunluğu**

Seçilen motorun uygunluğu için toplam atalet momentinin seçilen motorun rotor atalet

momentine oranı 10'dan küçük olmalıdır.

$$\frac{\text{Toplam Atalet Momenti } J_L}{\text{Rotor Atalet Momenti } J_0} = \frac{9,8971x10^{-5}}{14x10^{-5}} = 0,7$$

0,7<10 olduğundan seçilen motor uygundur.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

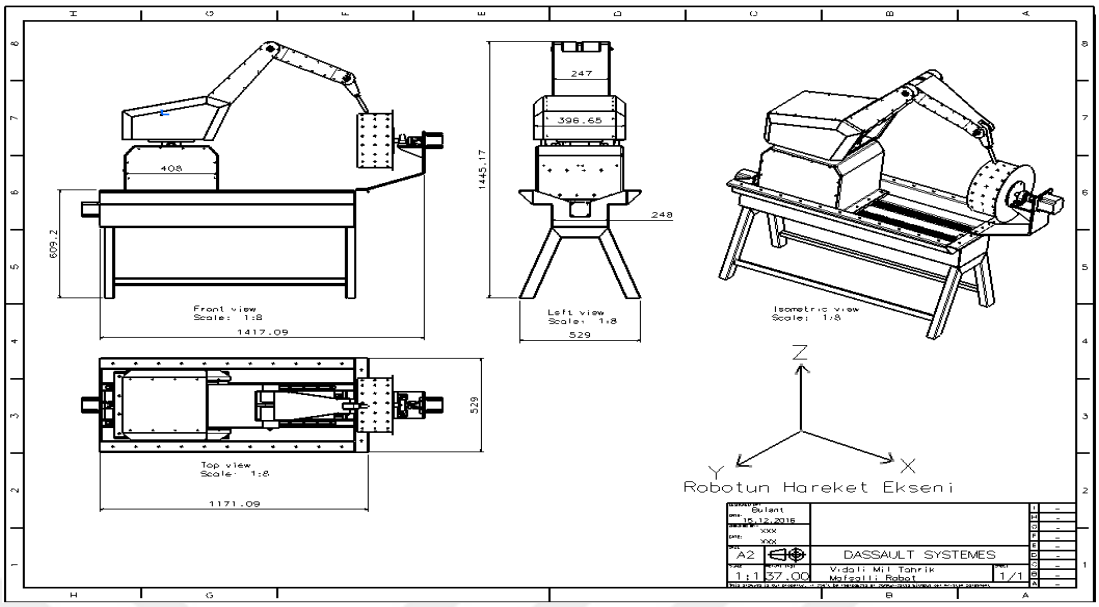
4.1. Robot Tasarımı

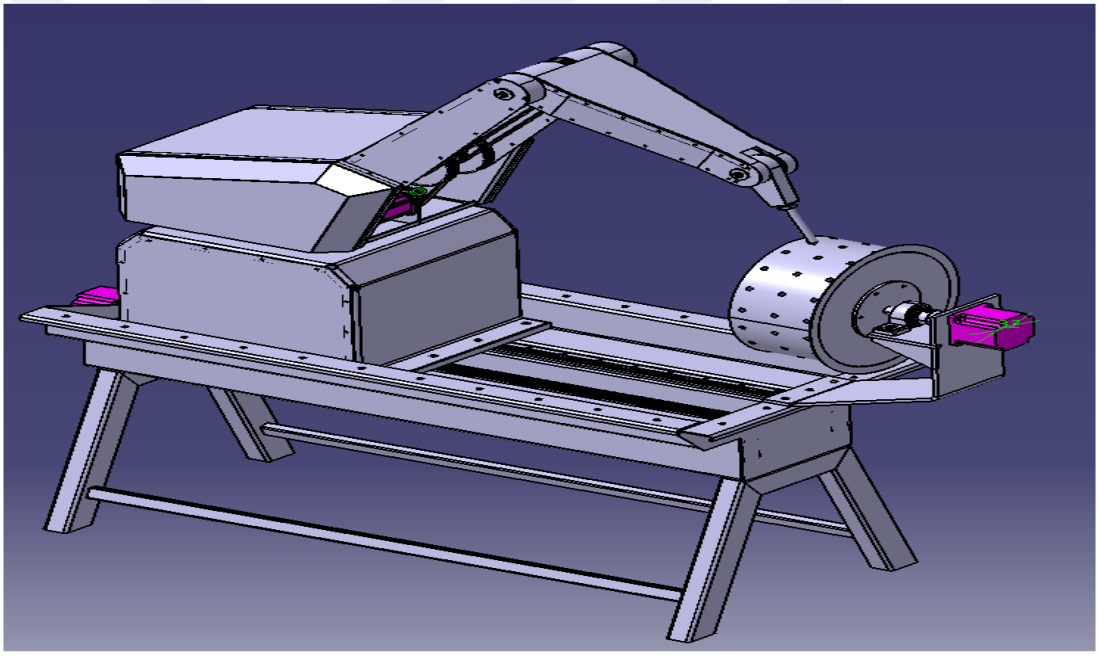
4.1.1. Mekanik tasarim

Robot, bir tablaya bağlı lineer olarak X doğrultusunda hareket etmektedir. Robot kollarında ise 4 serbestlik derecelidir. Robot kollarında 4 ve bir X doğrultuda hareket ettiğinden toplamda 5 serbestlik dereceli robottur. Robot X doğrultuda lineer olarak hareketini vidalı mil tahrikle hareket etmektedir. Robot kolları her bir eksen servo motora triger kayış kasnak bağlanarak hareketini gerçekleştirmektedir. Şekil 4.1' de robotun teknik resmi görünmektedir.

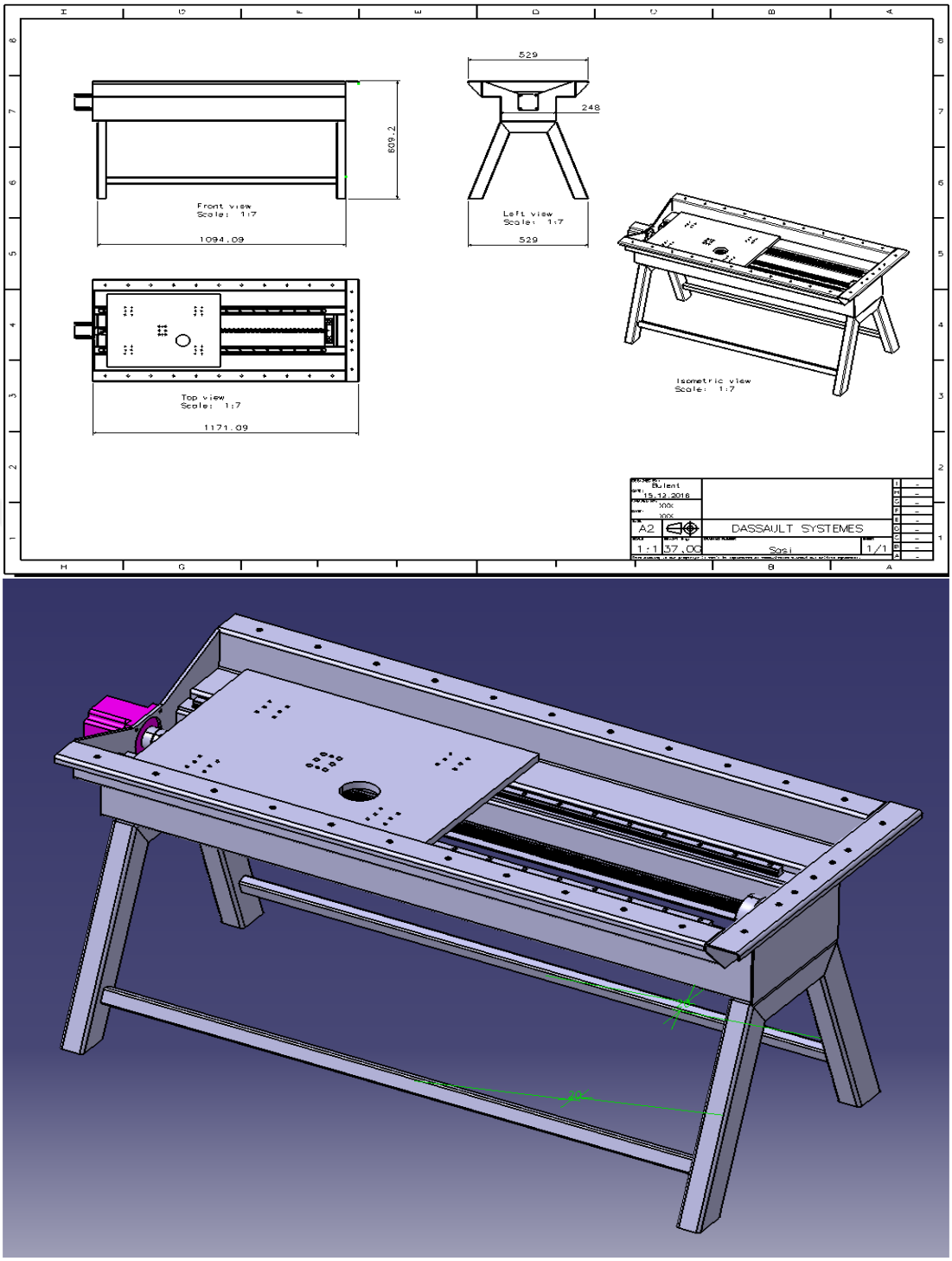
Robot Ana montaj olarak 2 bölümden oluşmaktadır. İlk bölüm, şasi kısmında robotu taşıyan mekanizmalar mevcuttur. Bir tablaya masuralı araba bağlanarak şasiye bağlanan lineer ray kızaklarda hareketi sağlanmaktadır ve vidalı mil step motor kullanılarak X eksenindeki istenilen konum hareketi gerçekleştirilmektedir.Şasi kısmın ayakları 40x60x3mm profilden üretilecek ve profilin üzerine sac kaynatılacak sonra bu kaynatılan sacı CNC Freze tezgahın da üst yüzeyi işlenerek lineer yatakların bağlama delikleri delinecektir ve bu delinen deliklere lineer ray bağlanacaktır. Robot kolu bağlantı plakası ise 15mm saçtan kesilerek iki yüzeyi CNC Freze tezgahındaişlenerek aynı zamanda masuralı araba bağlantı delikleri ve robot kol bağlantı delikleri delinecektir. Şekil 4.2'de teknik resmi görünmektedir.

İkinci bölüm, robot kollarından oluşmaktadır. Robot kolları 4 serbestlik dereceli ve her eksene triger kayış kasnak mekanizması ile servo motor tahrikle istenilen açılara hareketi sağlanmaktadır. Robot kolları Lazer makinasında kesilecektir ve bütün parçalar vidalı bağlantı olacaktır.

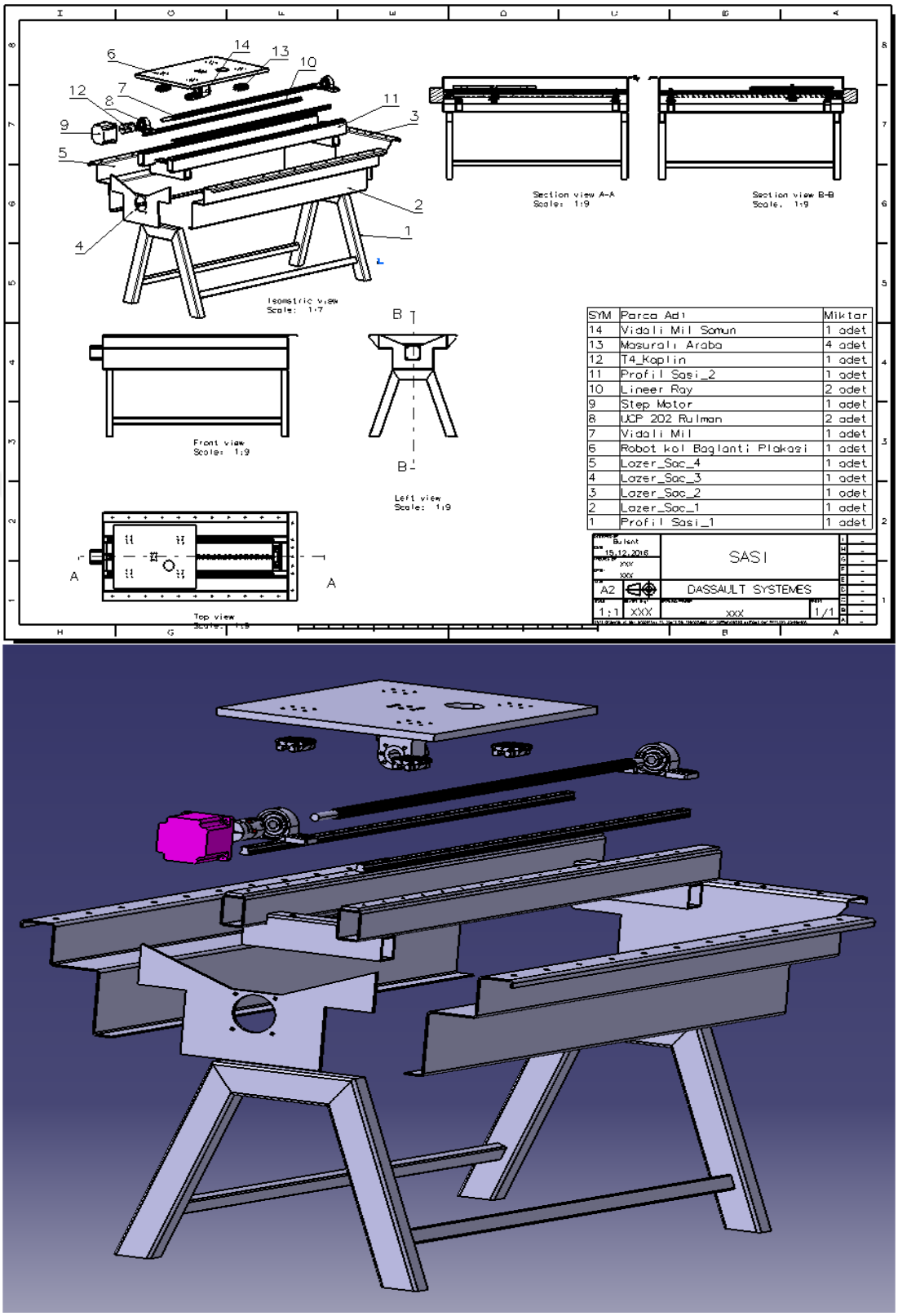




Şekil 4.1. Robotun Teknik Resmi

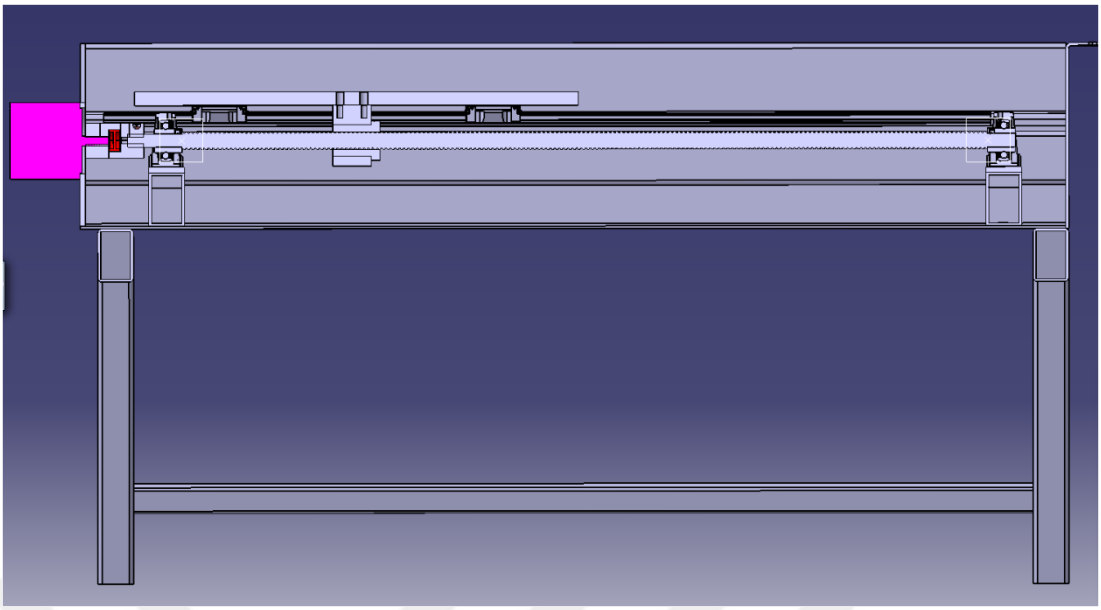


Şekil 4.2. Robot Şasi Teknik Resmi



SYM	Parca Adı	Miktar
14	Vidalı Mil Somun	1 adet
13	Masuralı Araba	4 adet
12	T4_Kaplin	1 adet
11	Profil Sasi_2	1 adet
10	Lineer Ray	2 adet
9	Step Motor	1 adet
8	UCP 202 Rulman	2 adet
7	Vidalı Mil	1 adet
6	Robot kol Baglanti Plakası	1 adet
5	Lazer_Sac_4	1 adet
4	Lazer_Sac_3	1 adet
3	Lazer_Sac_2	1 adet
2	Lazer_Sac_1	1 adet
1	Profil Sasi_1	1 adet

Şekil 4.3. Şasi Patlatılmış Teknik Resmi

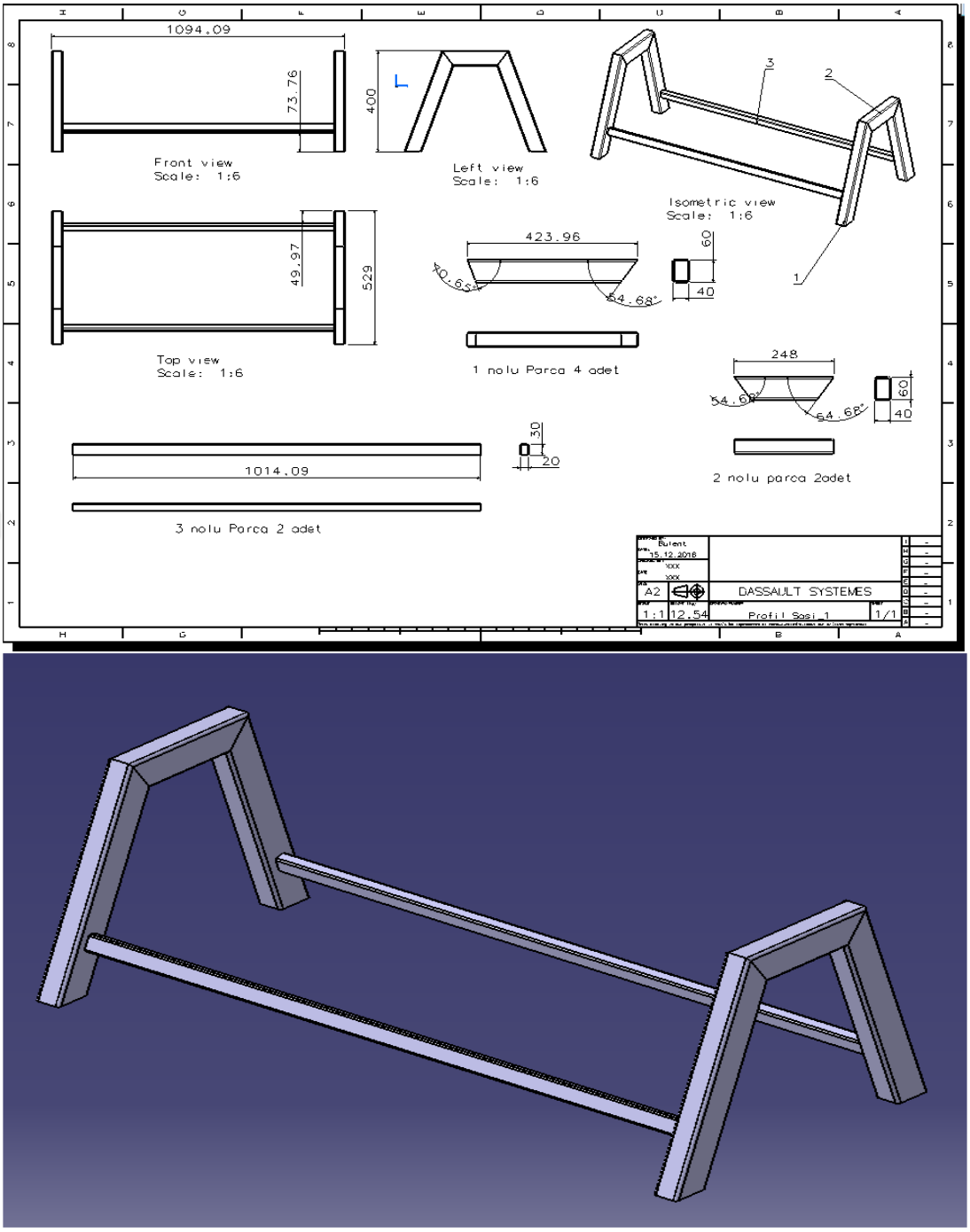


Şekil 4.4. Şasi'nin Kesit resmi

Şekil 4.4'deki ürün ağacını detaylandıralım. SYM1 numaralı parça profiller den oluşan montaj gurubudur. Bütün Robotu taşıyan taşıyıcı görevi üstlenmektedir. Tablo 4.1'de parça listelenmektedir. Şekil 4.5'deteknik resmi görüntülenmektedir.

Çizelge 4.1. Profil Şasi_1 Parça Listesi

Parça No	Ebat	Boy	Miktar	Kalite
1 Numaralı	40x60x3mm Profil	424mm	4 adet	St37
2 Numaralı	40x60x3mm Profil	248mm	2 adet	St37
3 Numaralı	20x30x3mm Profil	1015mm	2 adet	St37



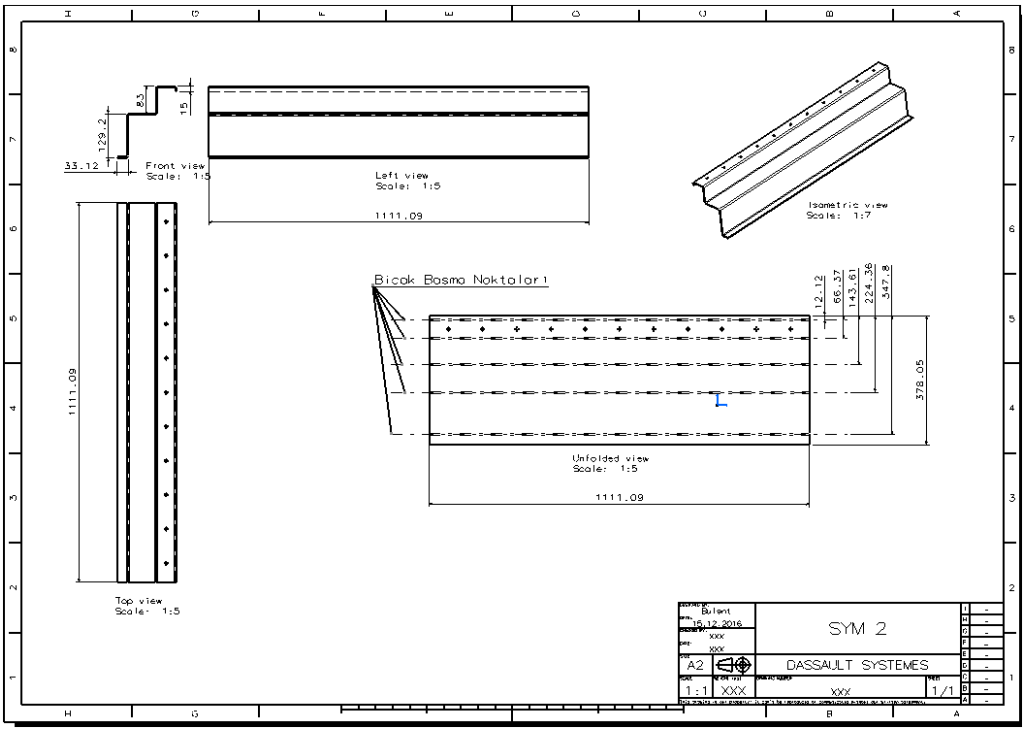
Şekil 4.5. Profil Şasi_1'nin Teknik resmi

SYM 2, SYM 3ve SYM 5 numaralı Parçalar CATİA programının sheet metal de açınımı alınarak, lazer saç kesim makinasındatansfer edilerek kesim işlemi gerçekleştirilir. SYM 4 numaralı parça ise direk resmi lazer makinasına gönderilerek kesim işlemi uygulanır. Şekillendirmek üzere SYM 2,SYM 3 ve SYM 5 numaralı parçalar Abkant makinasında bükümleri gerçekleştirilir. SYM 6 numaralı parça

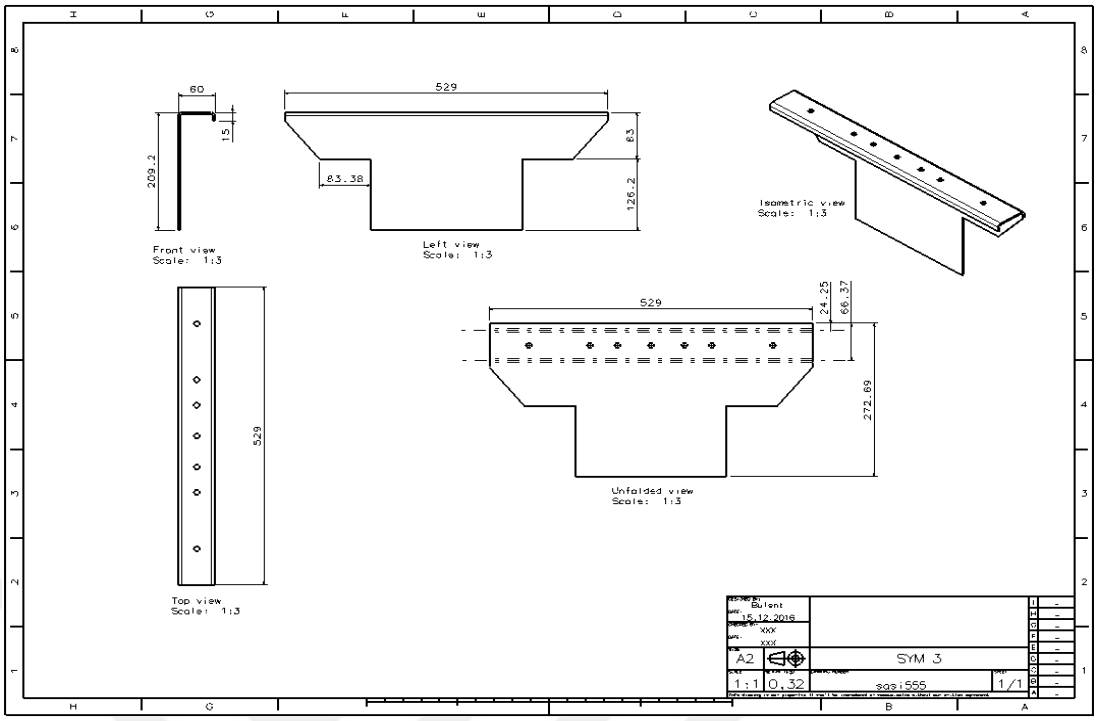
deliksiz bir şekilde Lazer sac kesim makinasında kesildikten sonra CNC Freze Tezgahında önce yüzeyleri taranır sonra delik işlemleri gerçekleştirilir.SYM 11 Profiller yatay şerit testere de kesildikten sonra birbirlerine kaynak işlemi uygulanarak CNC Freze makinasında sac yüzeyi işlendikten sonra lineer ray bağlantı delikleri delindikten sonra SYM 1 numaralı parçaya kaynak işlemi uygulanır. Tablo 4.2'deŞasi Parça listesi oluşturulmuştur.

Çizelge 4.2. Şasi Parçaların Listesi

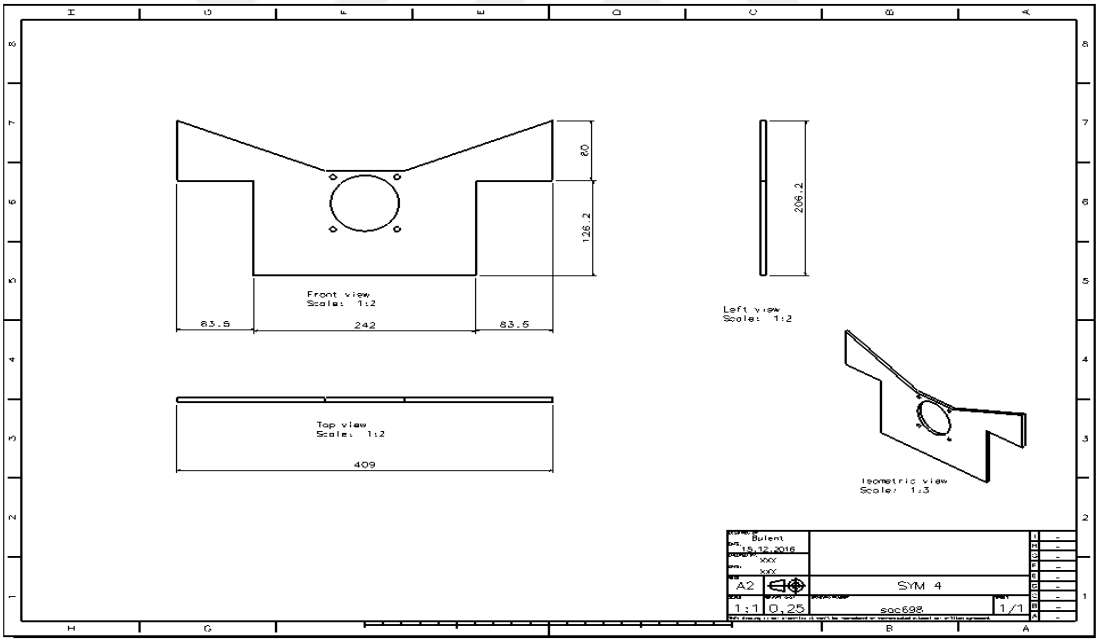
Parça No	Açıklama	Kalınlık	Miktar	Kalite
SYM 2	378x1112mm Sac	3mm	1 adet	St37
SYM 3	529x273mm Sac	3mm	1 adet	St37
SYM 4	206x409mm Sac	3mm	1 adet	St37
SYM 5	378x1112mm Sac	3mm	1 adet	St37
SYM 6	379x500mm Sac	15mm	1 adet	St37
SYM 7	Modül 5 Vidalı Mil(L=1mt)		1 adet	
SYM 9	400 Watt Step Motor(Nema 34)		1 adet	
SYM 10	Lineer Ray			
SYM 12	T4 Kaplin		1 adet	
SYM 13	Masuralı Araba		4 adet	
SYM 14	Vidalı Mil Somun		1 adet	



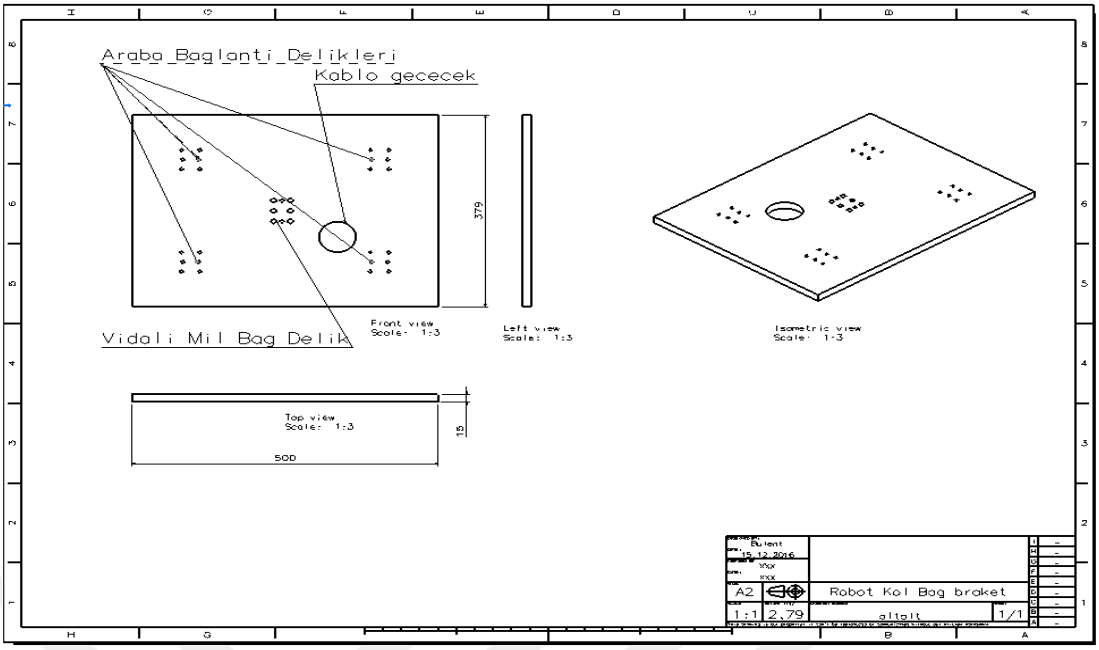
Şekil 4.6. SYM 2'nin Teknik Resmi SYM 5 SYM 2'nin simetriği



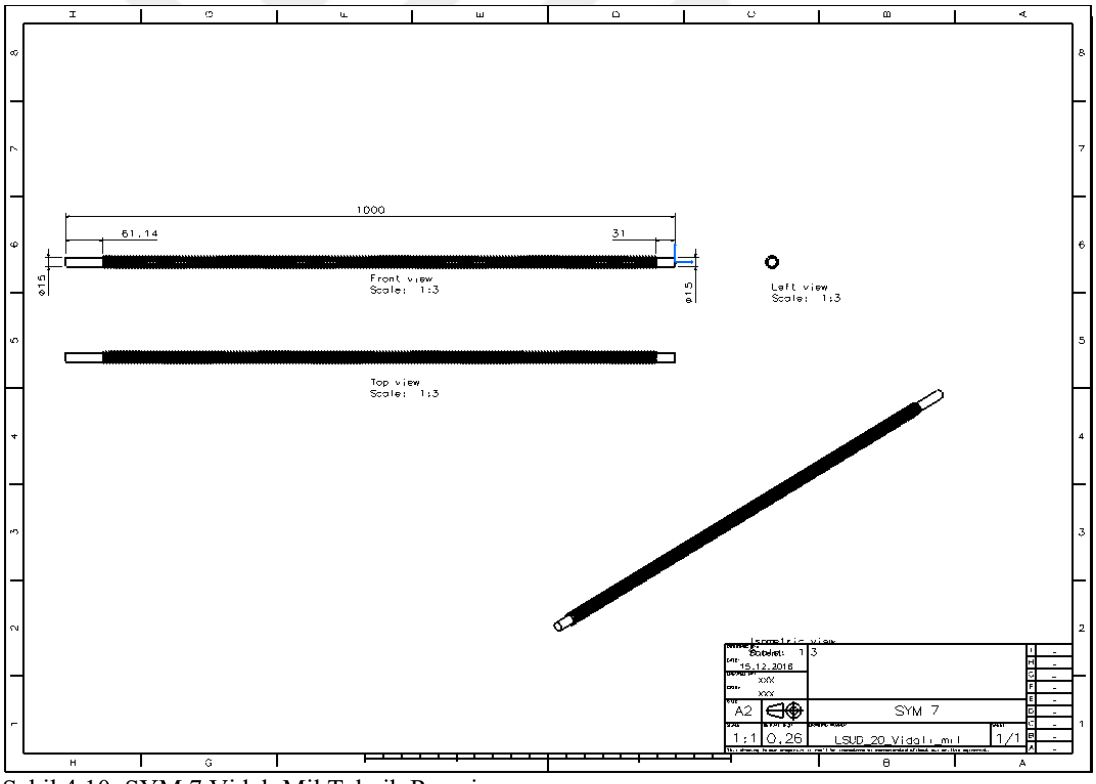
Şekil 4.7. SYM 3'in Teknik Resmi



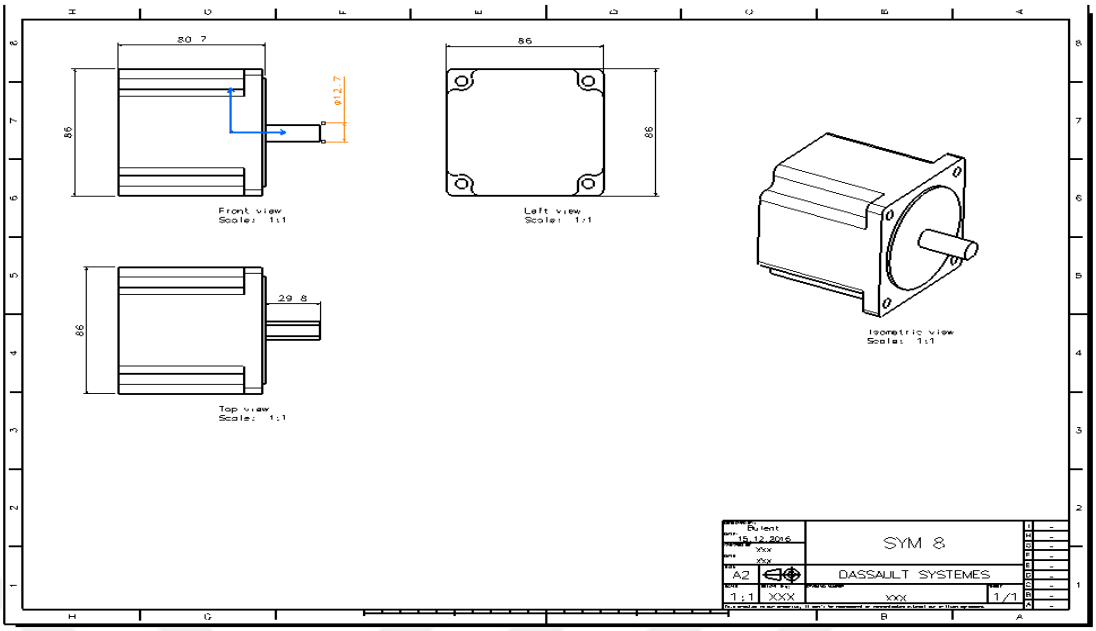
Şekil 4.8. SYM 4'in Teknik Resmi



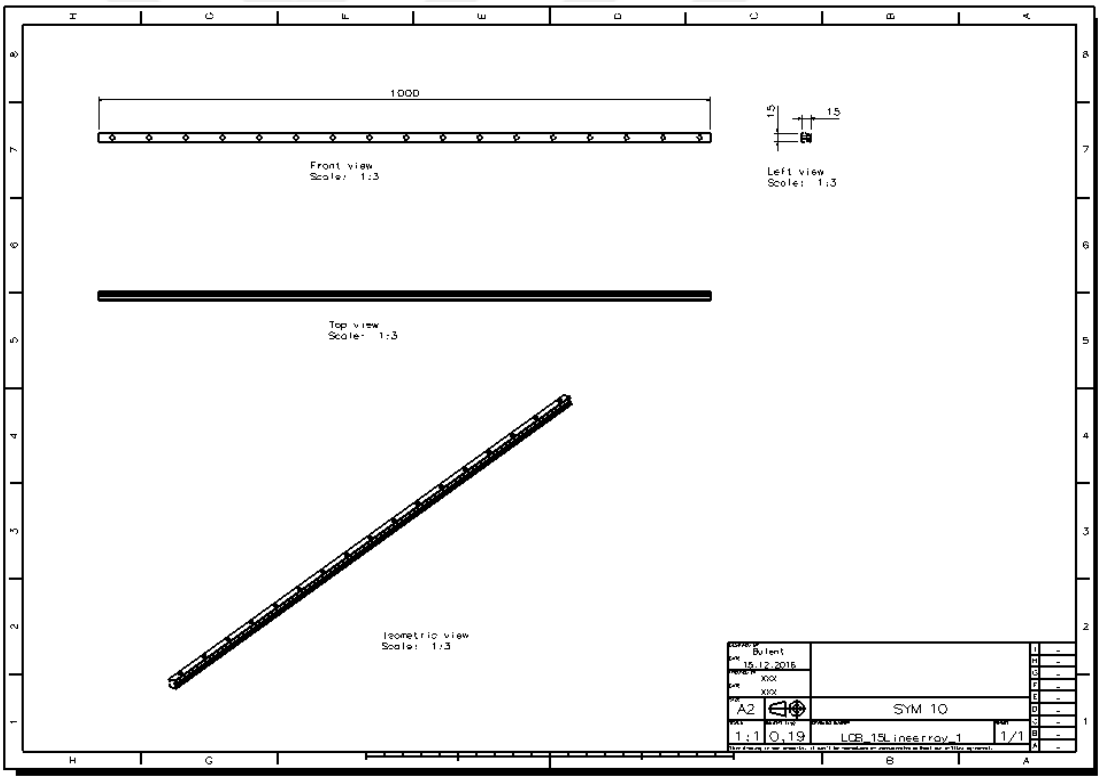
Şekil 4.9. SYM 6 Robot Kol Bağlantı Braket Teknik Resmi



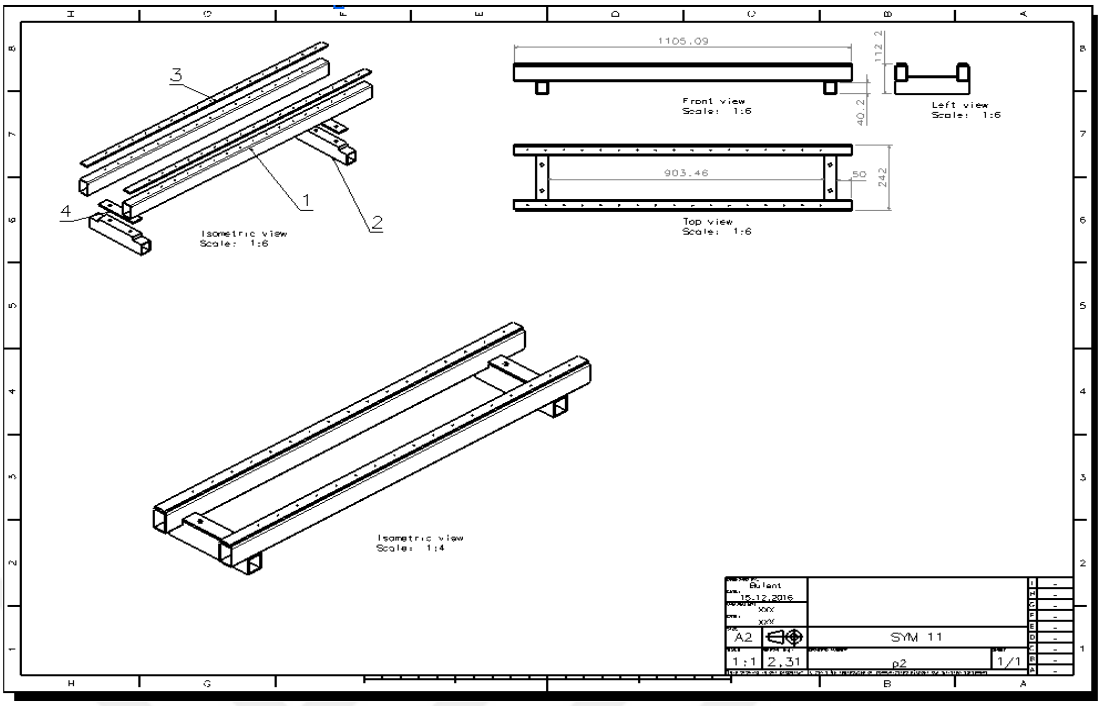
Şekil 4.10. SYM 7 Vidalı Mil Teknik Resmi



Şekil 4.11. SYM 8 Step Motor Teknik Resmi



Şekil 4.12. SYM 9 Lineer Ray Teknik Resmi

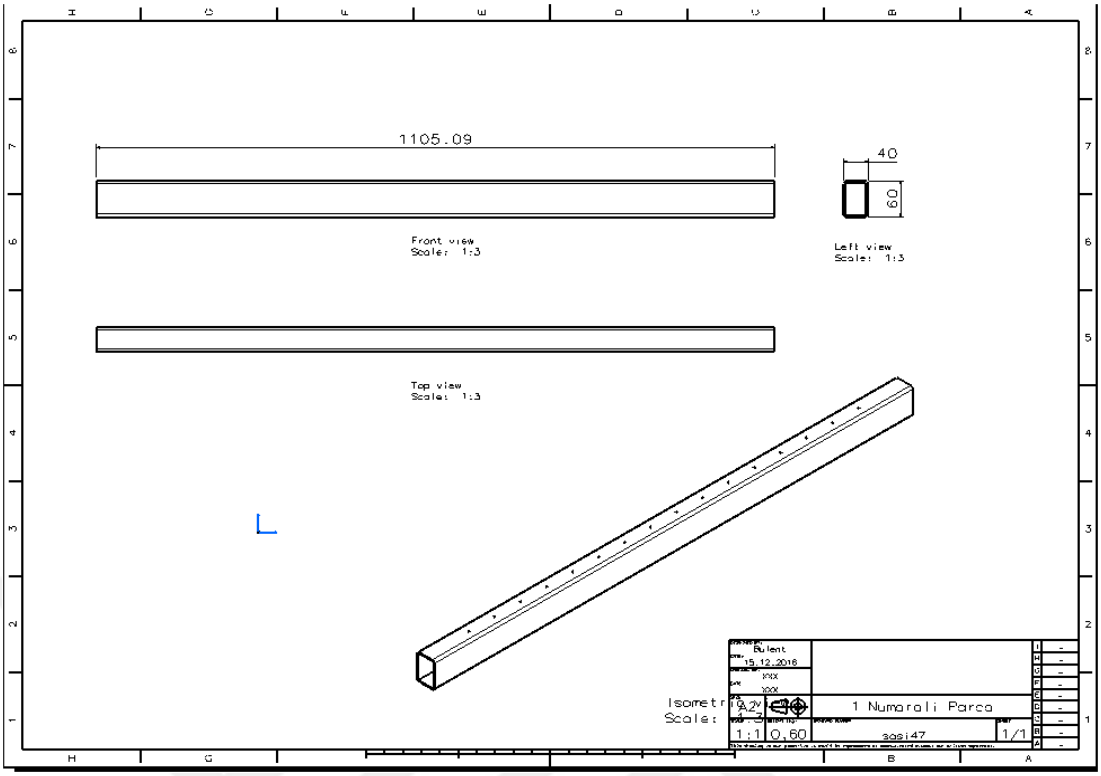


Şekil 4.13. SYM 11 Teknik Resimleri

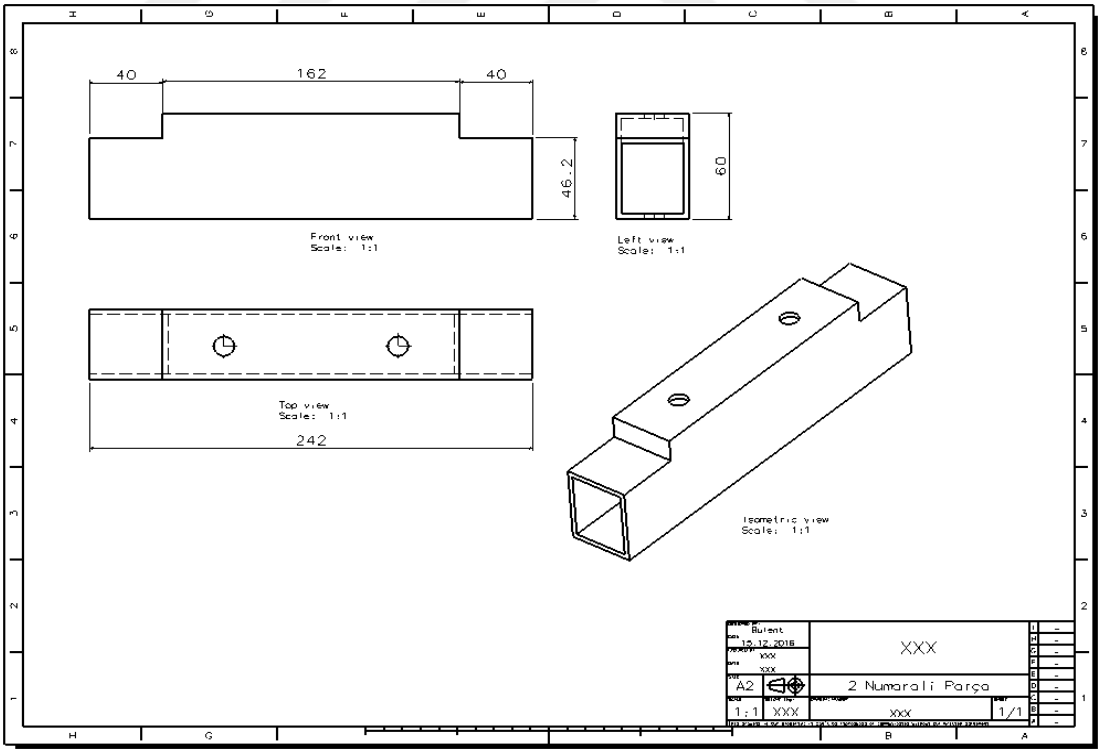
SYM 11 numaralı parçanın listesi Tablo 4.3'de verilmiştir.

Çizelge 4.3. SYM 11 Parça Listesi

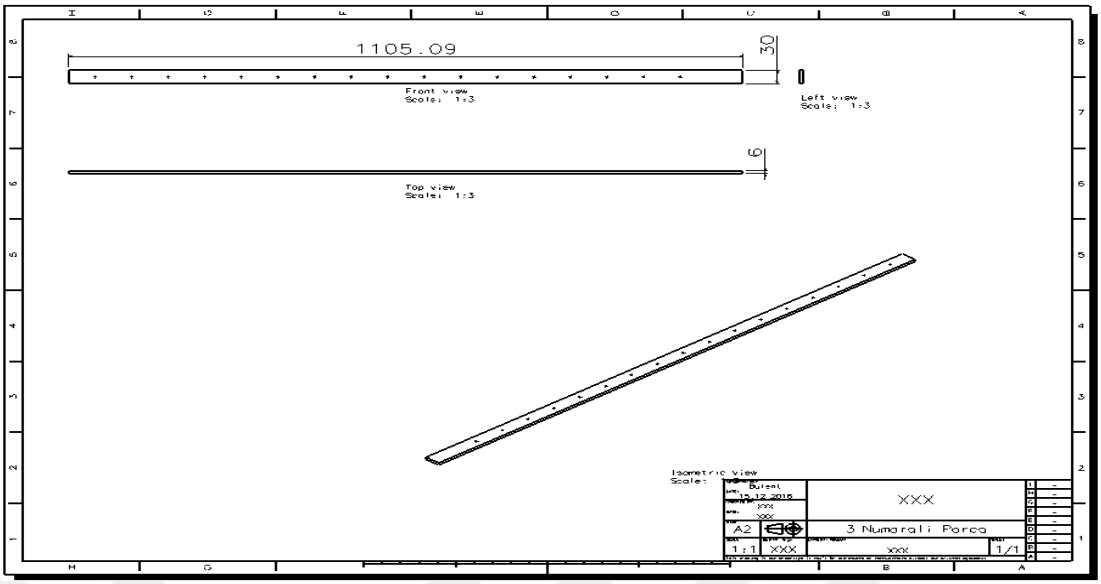
Parça No	**Açıklama**	**Kalınlık**	**Miktar**	**Kalite**
1 numaralı	40x60 Profil	3mm	2 adet	St37
2 numaralı	40x60 Profil	3mm	2 adet	St37
3 numaralı	30x1106mm Sac	6mm	2 adet	St37
4 numaralı	40x162mm Sac	6mm	2 adet	St37



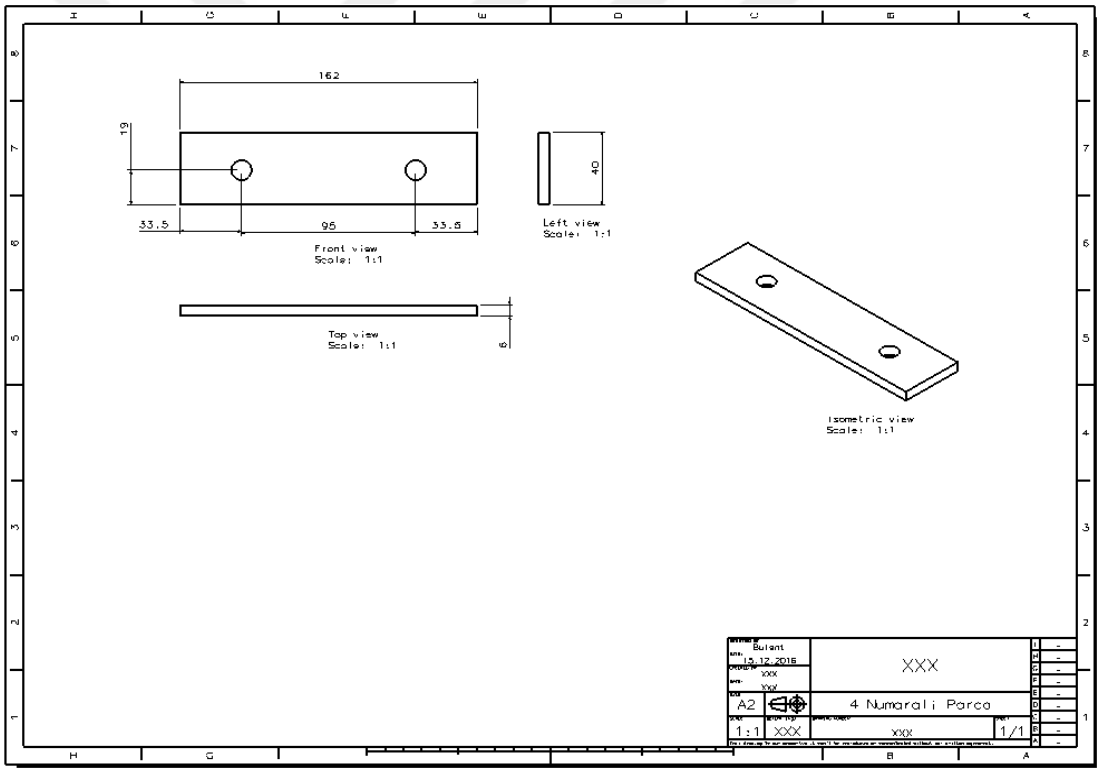
Şekil 4.14. 1 numaralı Parça Teknik Resmi



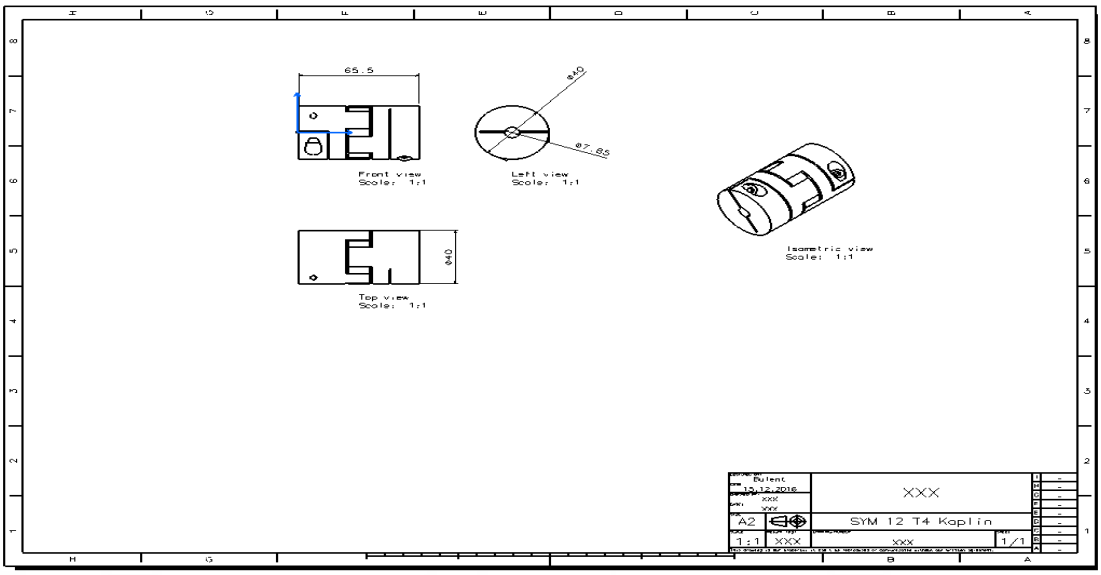
Şekil 4.15. 2 numaralı Parça Teknik Resmi



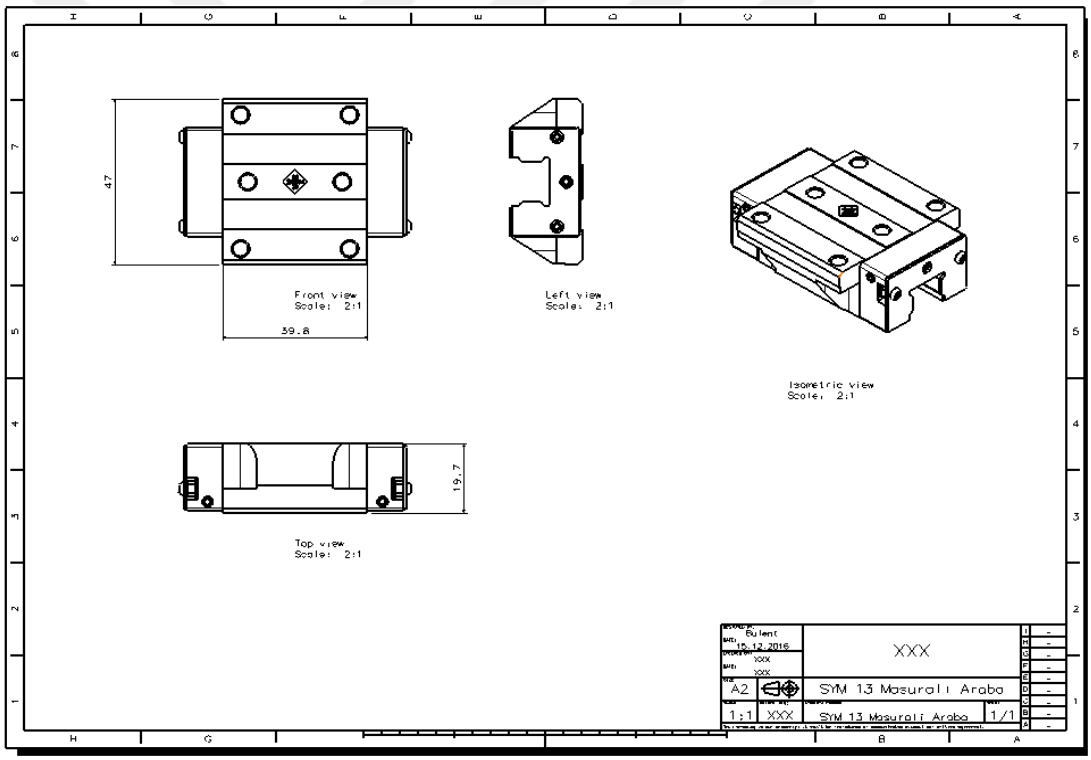
Şekil 4.16. 3 Numaralı Parça Teknik Resmi



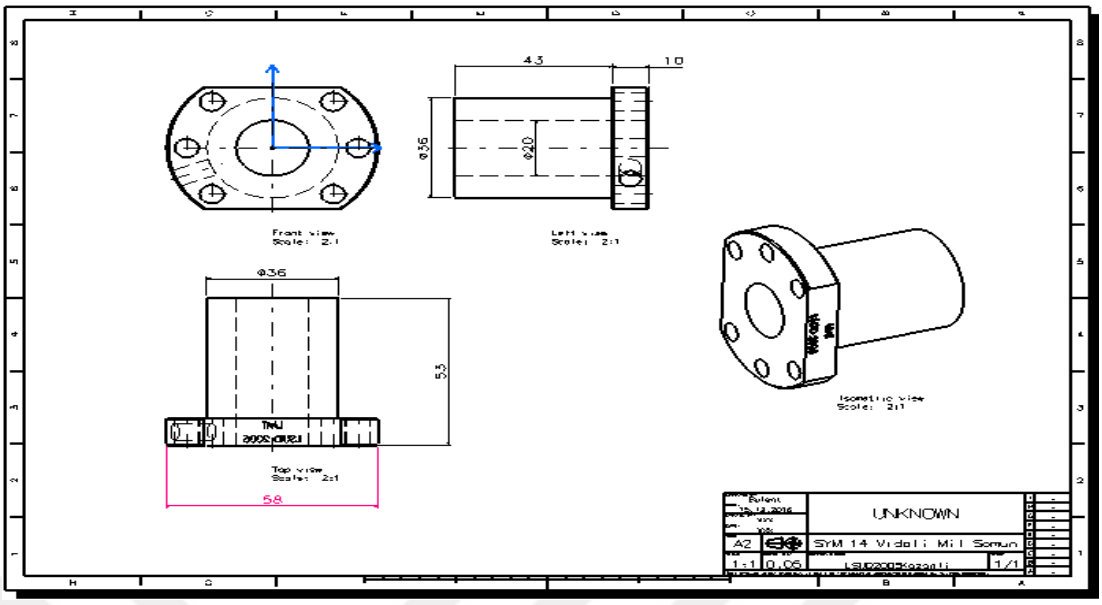
Şekil 4.17. 4 Numaralı Paçanın Teknik Resmi



Şekil 4.18. SYM 12 T4 Kaplin Teknik Resmi

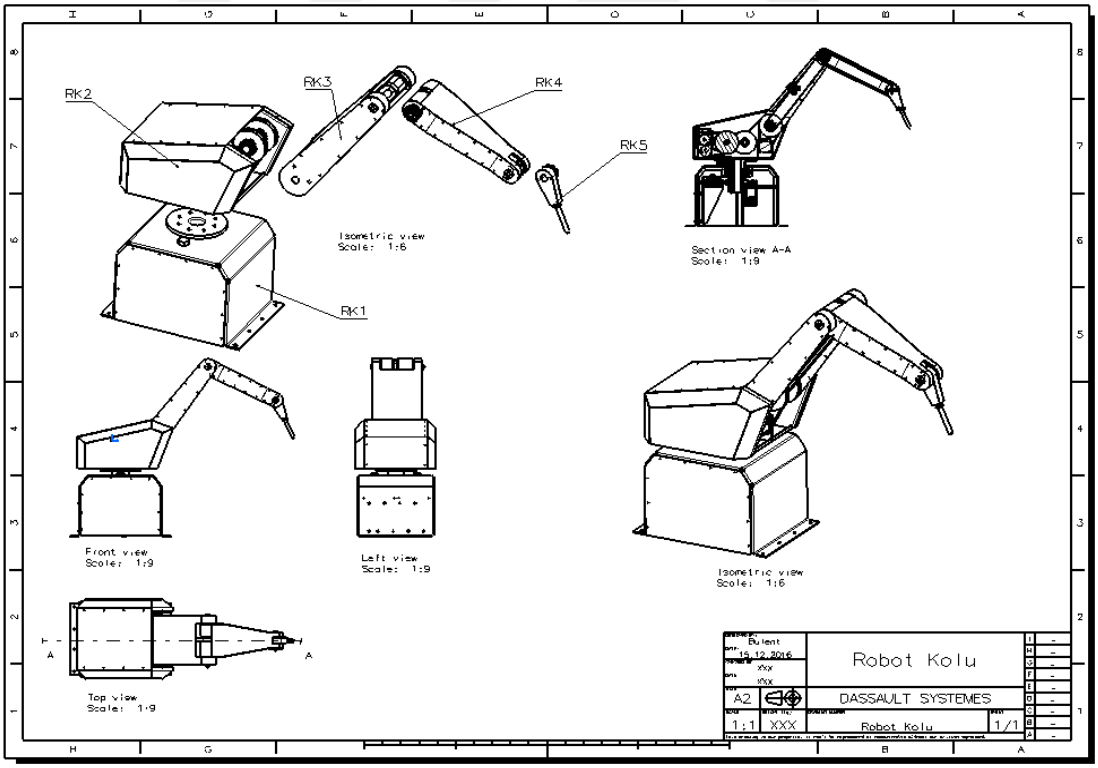


Şekil 4.19. SYM 13 Masuralı Araba



Şekil 4.20. SYM 14 Vidalı Mil Somun Teknik Resmi

2.kısım Montaj olan robot kolları teknik resim ve listesini inceleyelim. Şekil 4.21'de Robot kolu teknik resmi görüntülenmektedir.

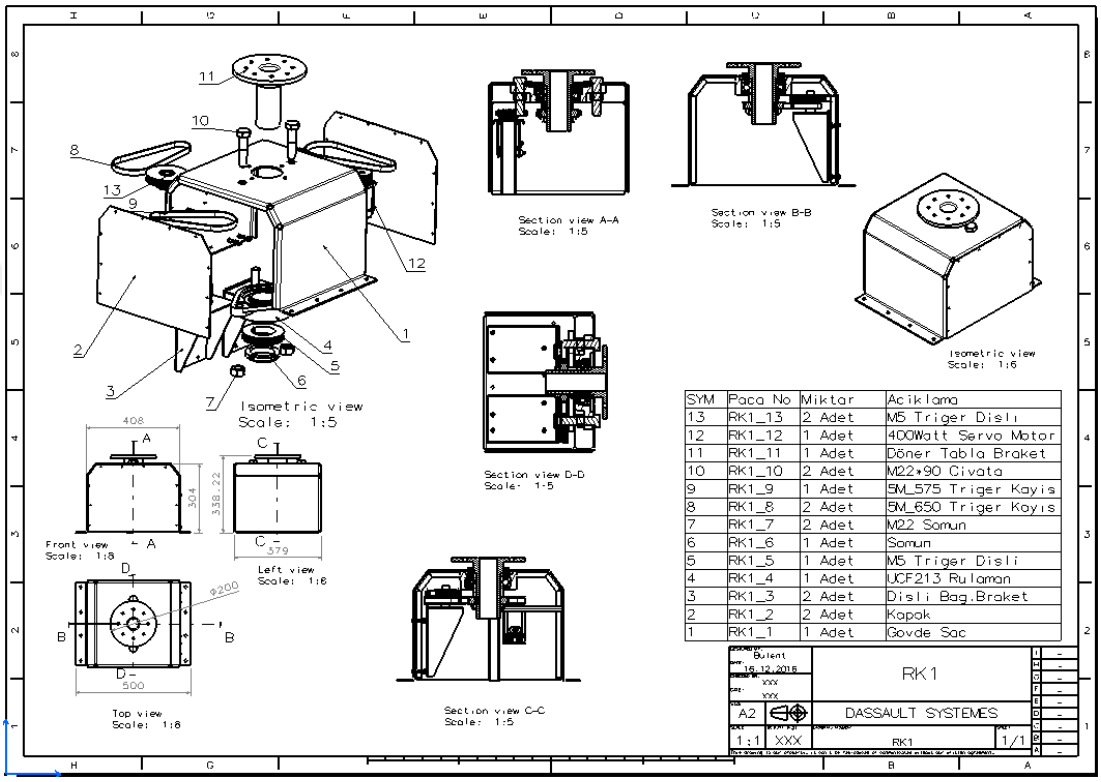


Şekil 4.21. Robot Kolu Teknik Resmi

Çizelge 4.4'de Robot kolu montaj ürün ağcı oluşturulmuştur.

Çizelge 4.4. Robot Kolu Montaj Ürün Ağacı

Ad	Miktar	Açıklama
RK1	1 Adet	Robotun Ana gövdesi
RK2	1 Adet	Gövde
RK3	1 Adet	Omuz
RK4	1 Adet	Kol
RK5	1 Adet	Bilek

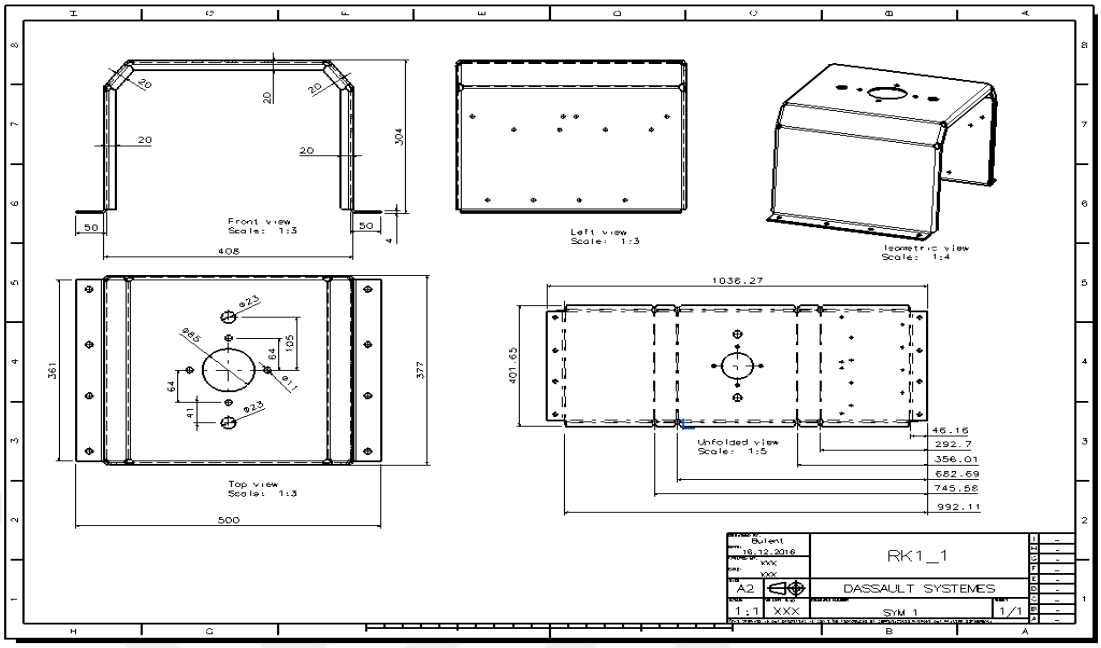


Şekil 4.22. RK1'in Teknik Resmi

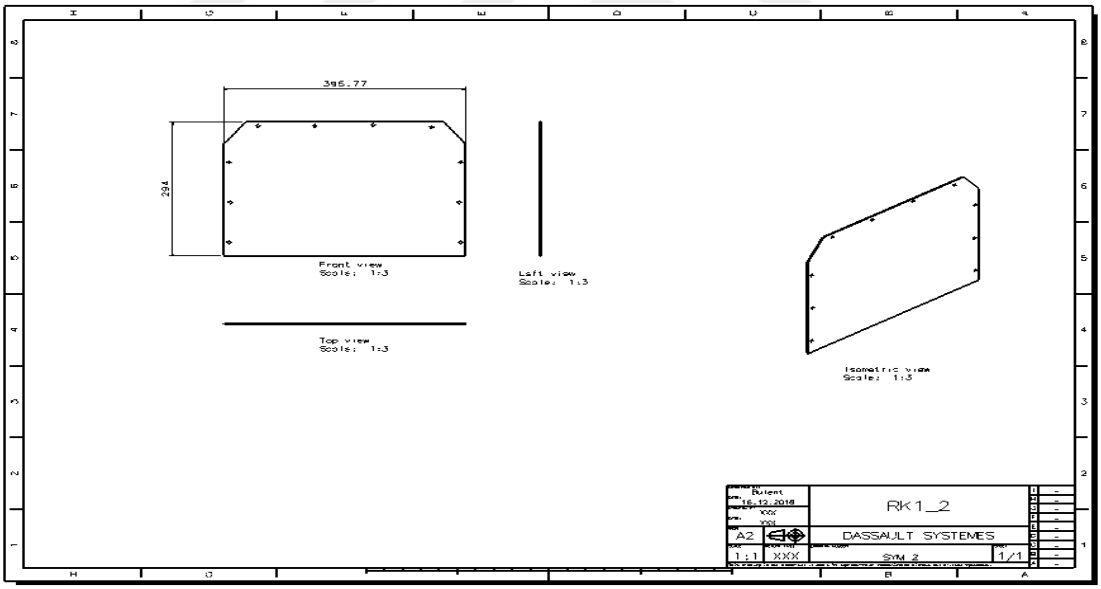
Çizelge 4.5. RK1'in Parça Listesi

Parça No	Açıklama	Kalınlık	Miktar	Kalite
RK1_1	Gövde Sacı 402x1038mm	4mm	1 adet	St37
RK1_2	Kapak Sacı 294x396mm	2mm	2 adet	St37
RK1_3	Dişli Bağlantı Baraketi	3mm	2 adet	St37
RK1_4	UCF213 Rulman		1 adet	
RK1_5	M5 Z=70 diş ,Triger Dişli		1 adet	
RK1_6	Sıkma Somunu		1 adet	St37
RK1_7	M22 Somun		2 adet	
RK1_8	M5 650 Triger Kayış		3 adet	
RK1_9	M5 575 Triger Kayış		1 adet	
RK1_10	M22x90 İmbusCivata		2 adet	
RK1_11	Döner Tabla Braketi	8.5mm	1 adet	St37
RK1_12	400 WattServo Motor		1 adet	
RK1_13	M5 Z=70 Diş , Triger Dişli		2 adet	

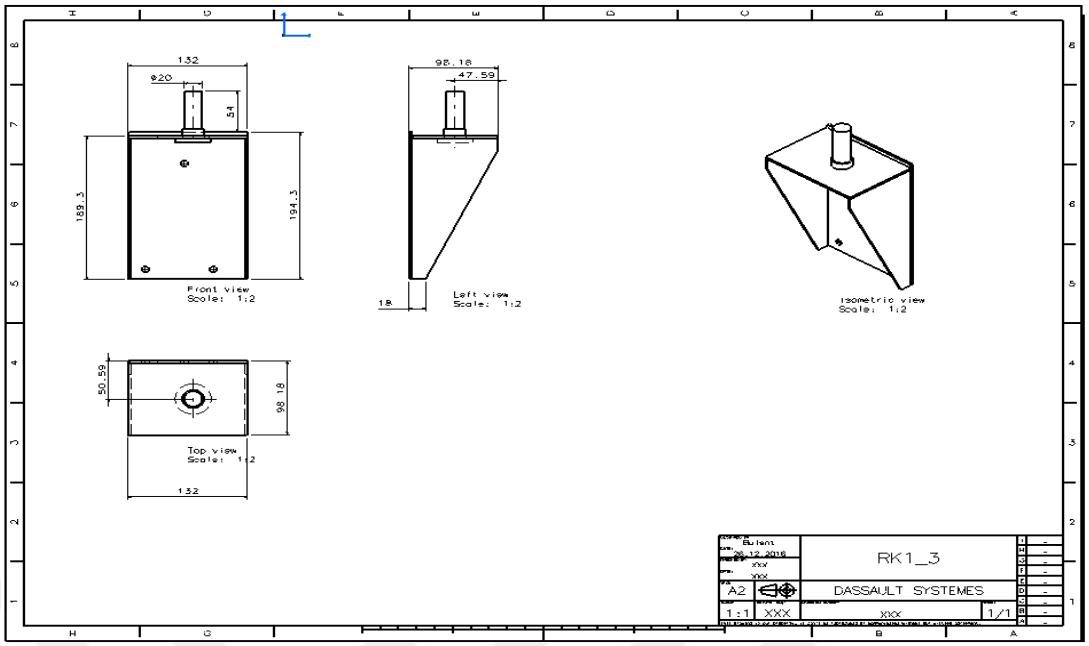
Tablo 4.5'de verilmiş olan parça listesinin teknik resimlerini inceleyelim.



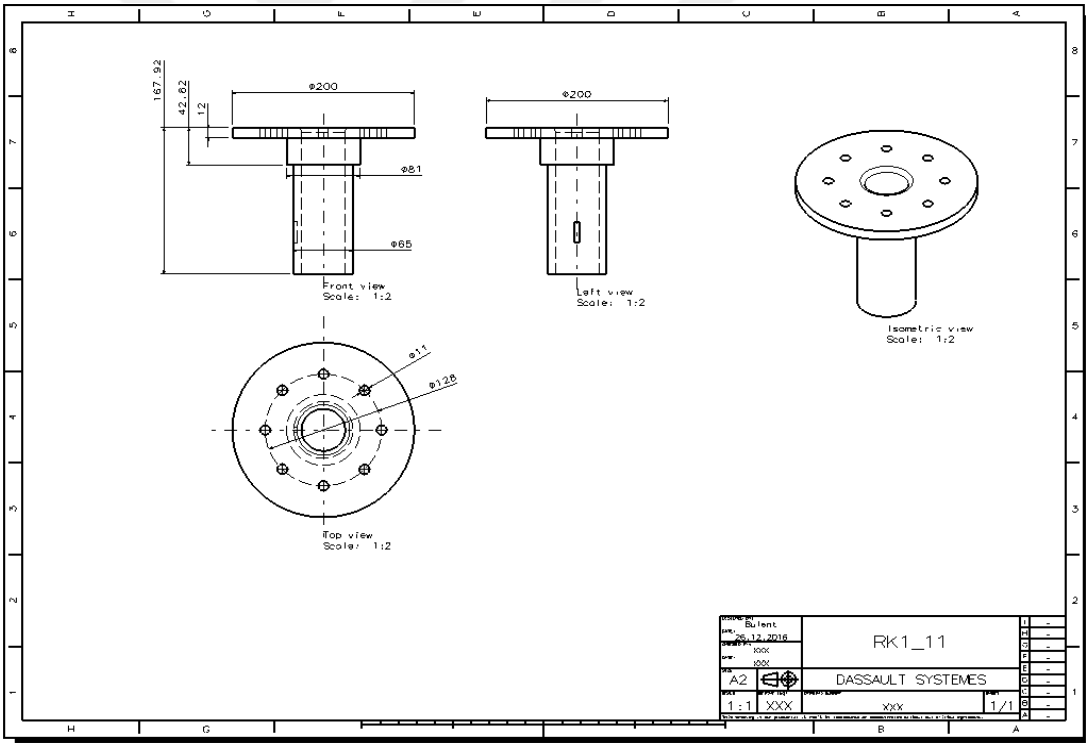
Şekil 4.23. RK1_1'in Teknik resmi



Şekil 4.24. RK1_2'in Teknik Resmi



Şekil 4.25. RK1_3'in Teknik Resmi

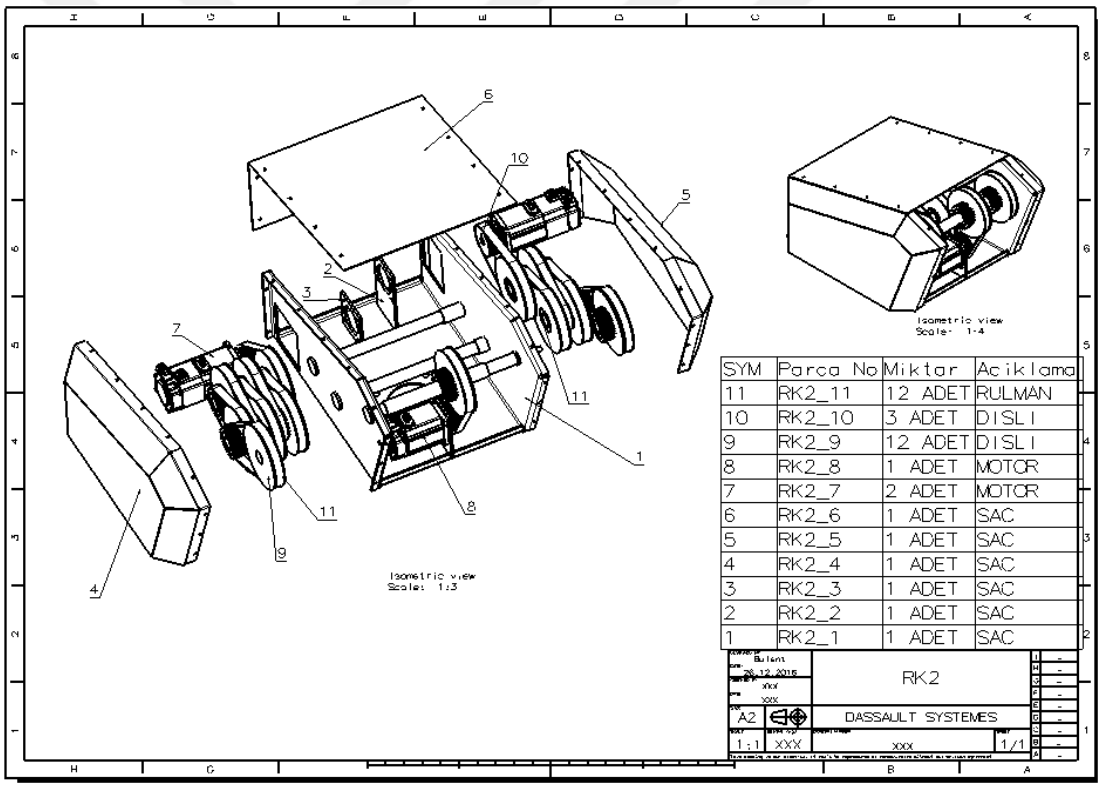


Şekil 4.26. RK1_11'in Teknik Resmi

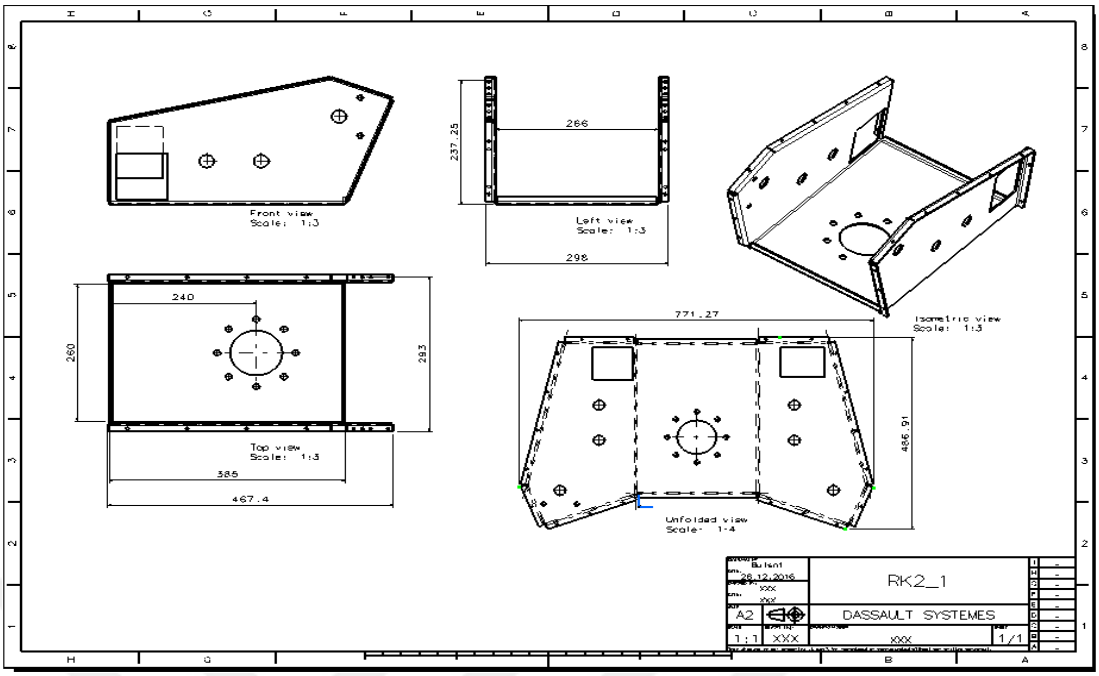
Çizelge 4.6. RK2'in Parça Listesi

Parça No	Açıklama	Kalınlık	Miktar	Kalite
RK2_1	Gövde Sacı 487x771mm	3mm	1 adet	St37
RK2_2	Servo Motor Bağlantı Sacı 69.5x129mm	4mm	1 adet	St37
RK2_3	Servo Motor Bağlantı Sacı 69.5x73mm	4mm	1 adet	St37
RK2_4	Yan Kapak Sacı 244x392mm	1.2mm	1 adet	St37
RK2_5	Yan Kapak Sacı 244x392mm	1.2mm	1 adet	St37
RK2_6	Üst Kapak 316x536mm	1.2mm	1 adet	St37
RK2_7	400 WattServo motor		2 adet	
RK2_8	400 WattServo motor		1 adet	
RK2_9	M5 Z=35 Diş , Triger Dişli		12 adet	
RK2_10	M5 Z=70 Diş , Triger Dişli		3 adet	
RK2_11	6004 Rulman		12 adet	

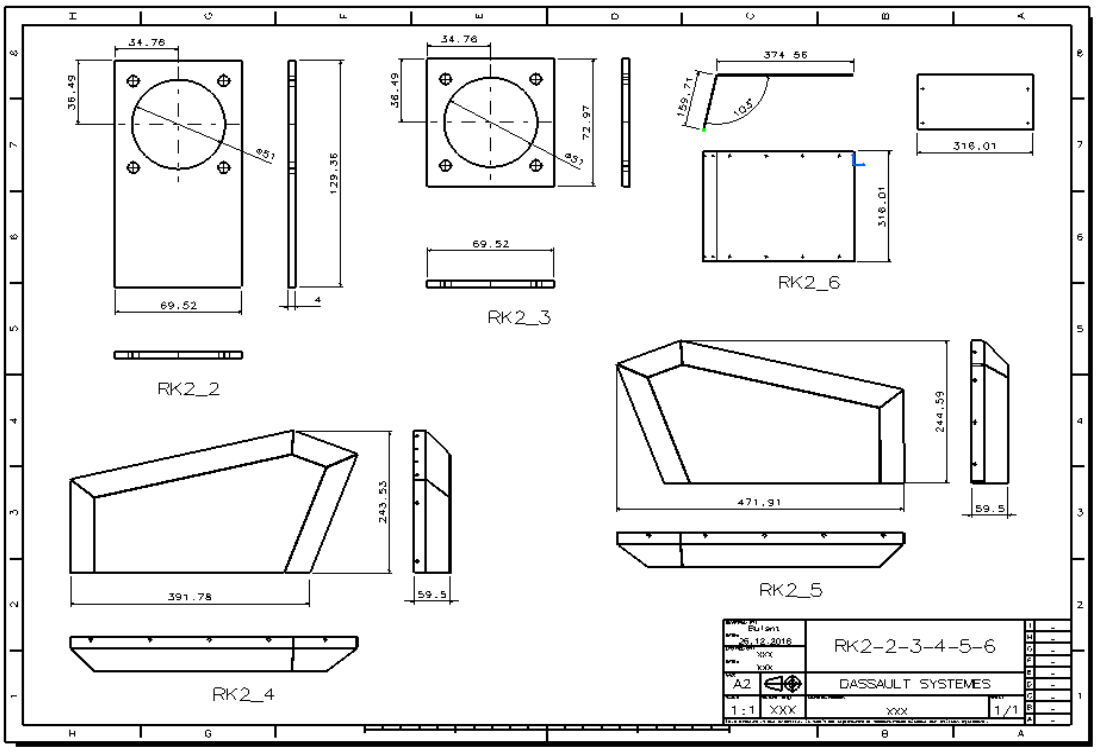
Tablo 4.6'de verilmiş olan parça listesinin teknik resimlerini inceleyelim.



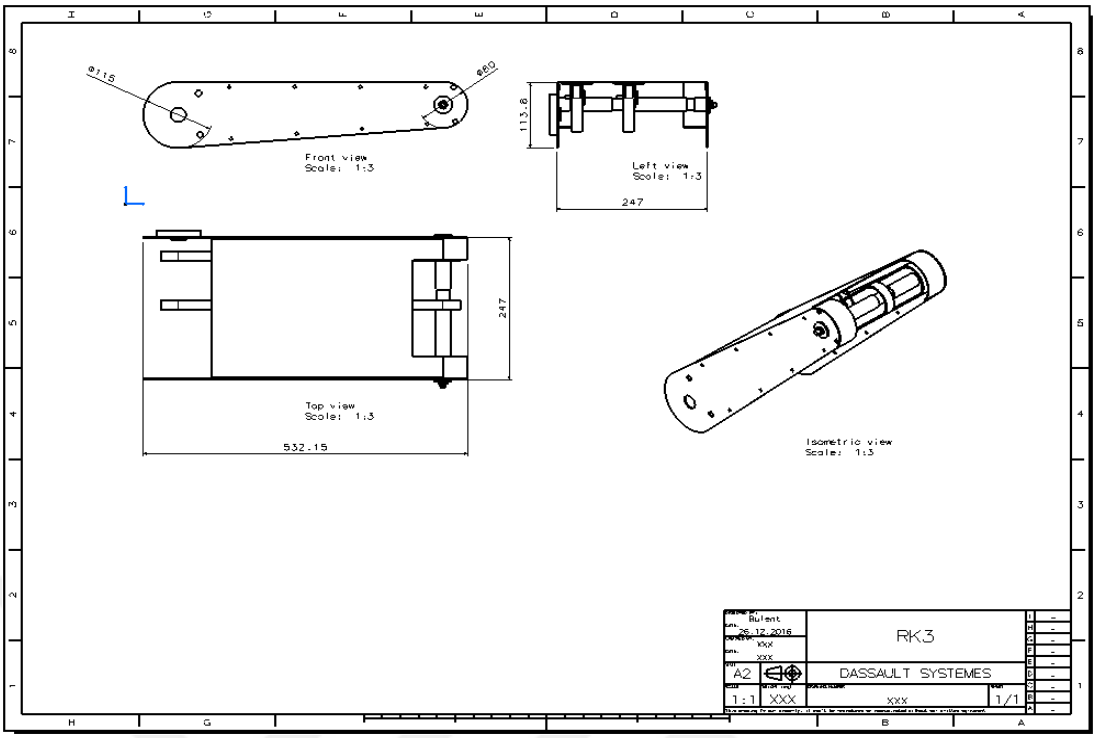
Şekil 4.27. RK2'in Teknik Resmi



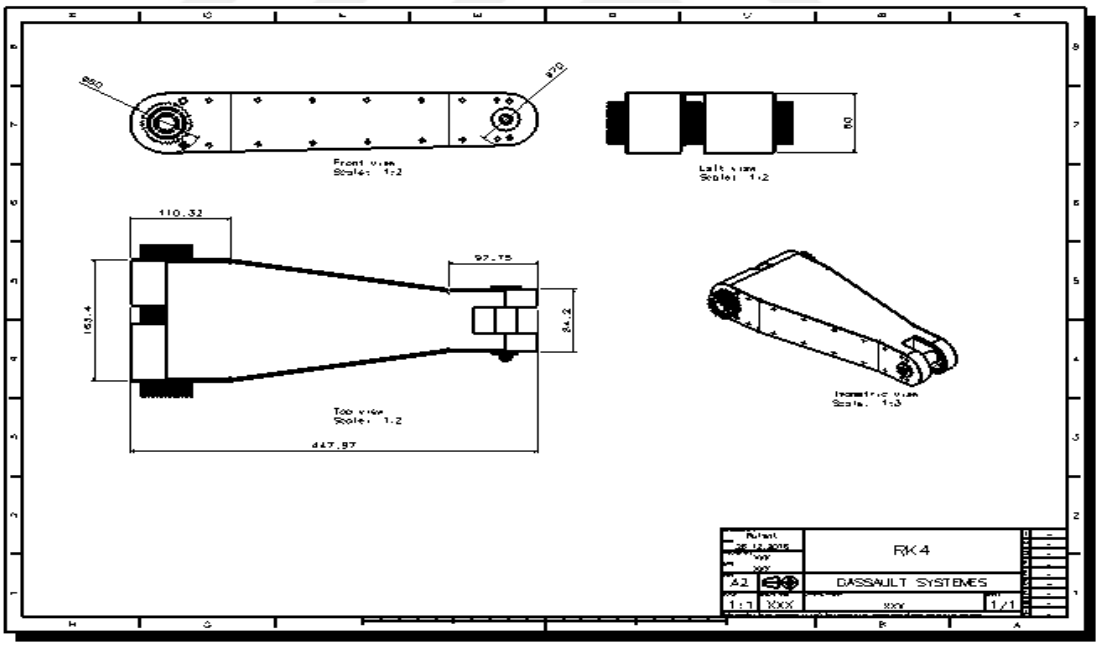
Şekil 4.28. RK2-1'in Teknik Resmi



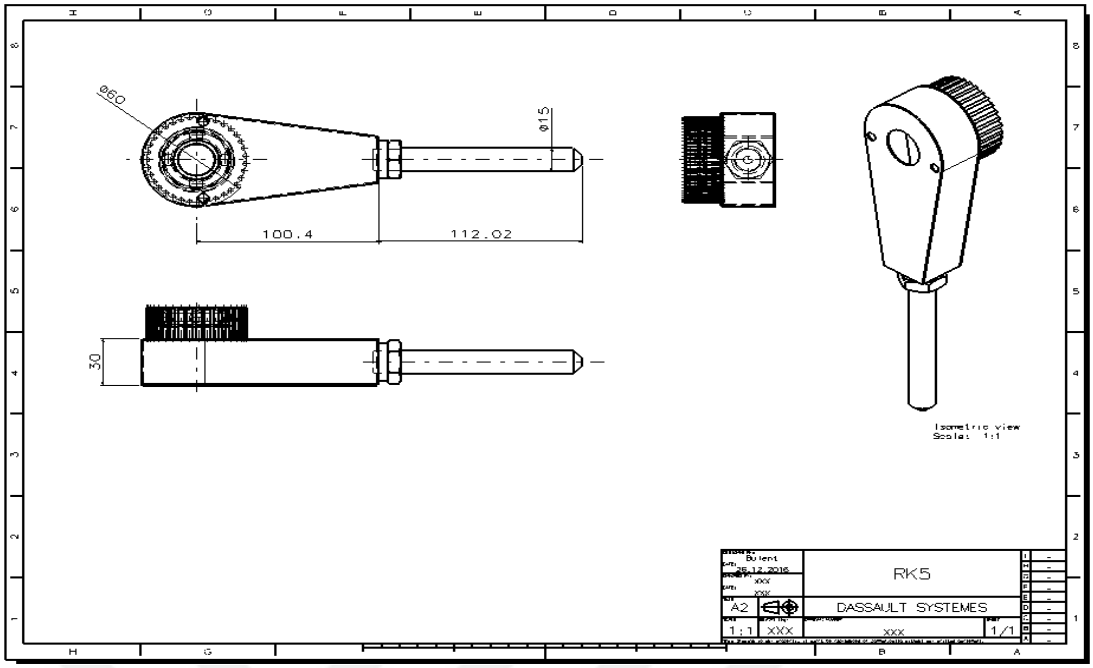
Şekil 4.29. RK2-2-3-4-5-6'nın Teknik Resmi



Şekil 4.30. RK3'in Teknik Resmi



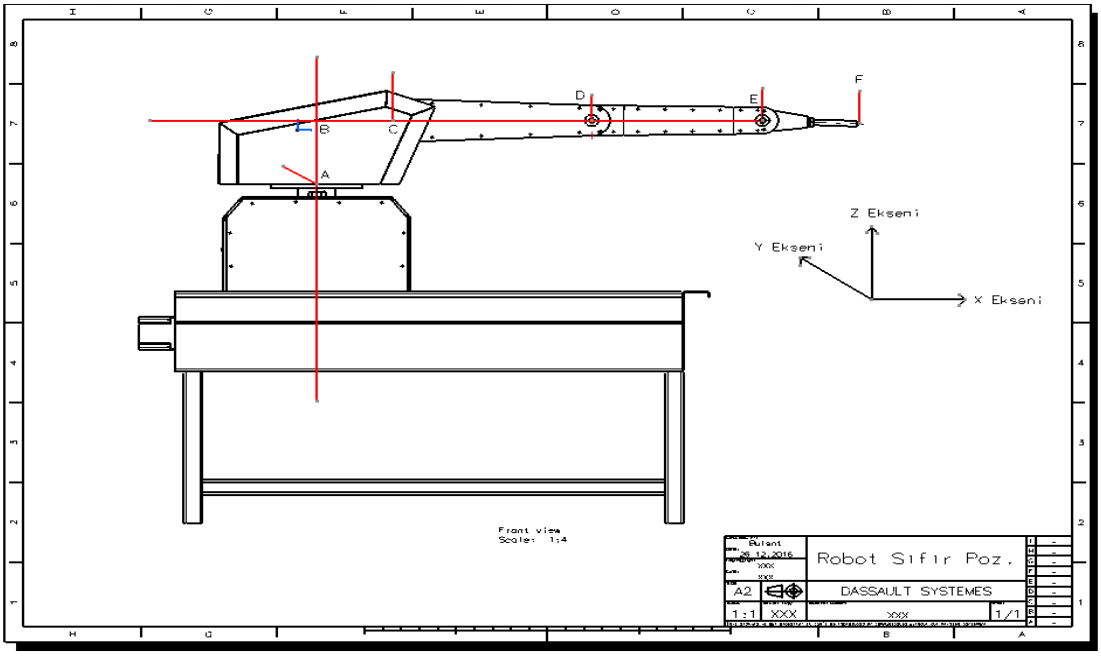
Şekil 4.31. RK4'in Teknik Resmi



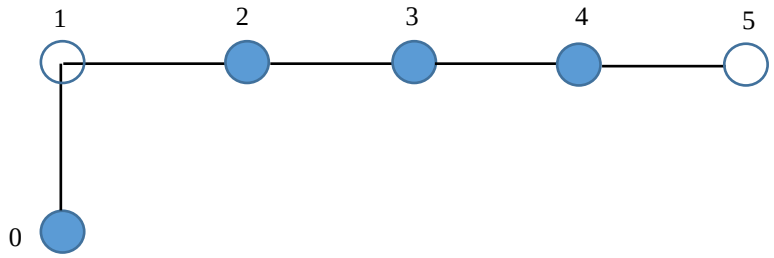
Şekil 4.32. RK5'in Teknik Resmi

4.1.2. Hesaplamalar

Robot hesaplamaları yapabilmemiz için önce robotu sıfır pozisyonuna getiripsonra kinematik hesaplamalar yapılır. Robotun sıfır pozisyonu şekil 4.33'de verilmiştir.



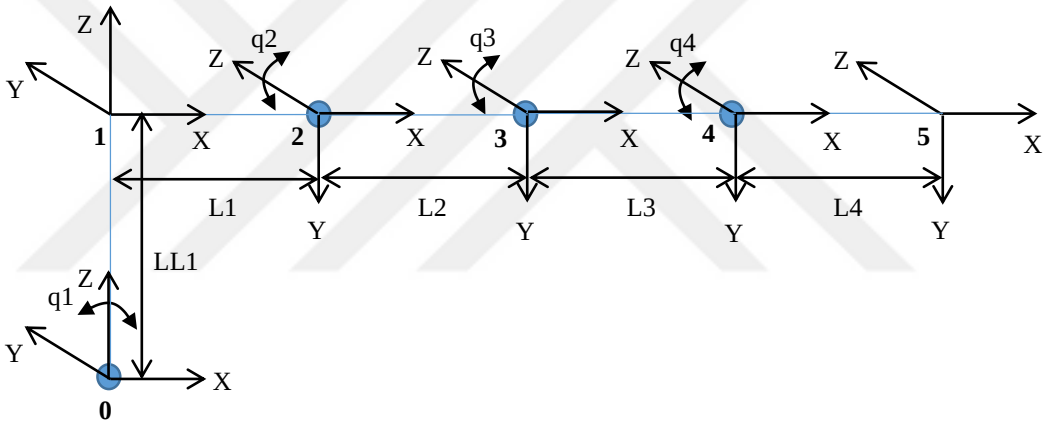
Şekil 4.33. Robot Sıfır Pozisyonu



Şekil 4.34. Robot Sıfır Pozisyonu (Şematik Gösterim)

4.1.2.1. İleri kinematik hesaplari

Kinematik hesapları yapabilmemiz için önce her ekleme bir eksen takımı yerleştirilir sonra bu eksen takımına göre D-H parametreleri belirlenerek trans form matrisleri oluşturulur. Şekil 4.34'de her eklemlere eksen takımı yerleştirilmesi gösterilmiştir.



Şekil 4.35. Robotun eklemlerinin eksen Takımları

Z_{i-1} ile Z_i dönme eksenleri arasında oluşan bağ açısını bulalım (α_{i-1}).

i = 1 için $\alpha_{i-1} = \alpha_{1-1} = \alpha_0 = 0$ (0 ile 1 arası)

i = 2 için $\alpha_{i-1} = \alpha_{2-1} = \alpha_1 = 90$ derece (1 ile 2 arası)

i = 3 için $\alpha_{i-1} = \alpha_{3-1} = \alpha_2 = 0$ (2 ile 3 arası)

i = 4 için $\alpha_{i-1} = \alpha_{4-1} = \alpha_3 = 0$ (3 ile 4 arası)

i = 5 için $\alpha_{i-1} = \alpha_{5-1} = \alpha_4 = 0$ (4 ile 5 arası)

X_{i-1} yönünde uzanan Z_{i-1} ile Z_i arasındaki dik uzaklığını bulalım (a_{i-1})

$i = 1$ için $a_{i-1} = a_{1-1} = a_0 = 0$ (0 ile 1 arası)

$i = 2$ için $a_{i-1} = a_{2-1} = a_1 = L1$ (1 ile 2 arası)

$i = 3$ için $a_{i-1} = a_{3-1} = a_2 = L2$ (2 ile 3 arası)

$i = 4$ için $a_{i-1} = a_{4-1} = a_3 = L3$ (3 ile 4 arası)

$i = 5$ için $a_{i-1} = a_{5-1} = a_4 = L4$ (4 ile 5 arası)

X_{i-1} ile X_i arasındaki Z_i boyunca uzanan üst üste çakışan bağlar arasındaki mesafe bağ kaçıklığını bulalım(d_i).

$i = 1$ için $d_i = d_1 = LL1$ (0 ile 1 arası)

$i = 2$ için $d_i = d_2 = 0$ (1 ile 2 arası)

$i = 3$ için $d_i = d_3 = 0$ (2 ile 3 arası)

$i = 4$ için $d_i = d_4 = 0$ (3 ile 4 arası)

θ_i eklem açısı bağları arasında X ekseni boyunca ölçülen açıyı bulalım.

$i = 1$ için $\theta_i = \theta_1 = q1$ (0 ile 1 arası)

$i = 2$ için $\theta_i = \theta_2 = q2$ (1 ile 2 arası)

$i = 3$ için $\theta_i = \theta_3 = q3$ (2 ile 3 arası)

$i = 4$ için $\theta_i = \theta_4 = q4$ (3 ile 4 arası)

Yukarıda bulduğumuz D-H değişkenlerini tablo 4.7'e yazalım.

Çizelge 4.7. D-H Değişkenlerinin Tablosu

Eklem No	**D-H Değişkenleri**				**İ. Eklem Değişkenleri**
İ	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i	d_i veya θ_i
1	0	0	LL1	q1	θ_1
2	90 derece	L1	0	q2	θ_2
3	0	L2	0	q3	θ_3
4	0	L3	0	q4	θ_4
5	0	L4	0	0	0

Denklem 3.37 kullanılarak her bir eklemin Homojen dönüşüm matrisini yazalım. Denklem 3.37 aşağıda görünmektedir.

$$ {}^{i-1}_{i}T = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1}d_i \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1}d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

i=1 için;

$$ {}^{0}_{1}T = \begin{bmatrix} cq1 & -sq1 & 0 & 0 \\ sq1c0 & cq1c0 & -s0 & -s0LL1 \\ sq1s0 & cq1s0 & c0 & c0LL1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

c0=cos(0)=1 , s0=sin(0)=0 yerlerine koyalım , ve cq1=C1 , sq1=S1 yazalım.

$$ {}^{0}_{1}T = \begin{bmatrix} C1 & -S1 & 0 & 0 \\ S1 & C1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & LL1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

i=2 için;

$$ {}^{1}_{2}T = \begin{bmatrix} cq2 & -sq2 & 0 & L1 \\ sq2c90 & cq2c90 & -s90 & -s90*0 \\ sq2s90 & cq2s90 & c90 & c90*0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

c90=cos(90)=0 , s90=sin(90)=1 yerlerine koyalım , ve cq2=C2 , sq2=S2 yazalım.

$$ {}^{1}_{2}T = \begin{bmatrix} C2 & -S2 & 0 & L1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ S2 & C2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

i=3 için;

$$ {}^{2}_{3}T = \begin{bmatrix} cq3 & -sq3 & 0 & L2 \\ sq3c0 & cq3c0 & -s0 & -s0*0 \\ sq3s0 & cq3s0 & c0 & c0*0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

c0=cos(0)=1 , s0=sin(0)=0 yerlerine koyalım , ve cq3=C3 , sq3=S3 yazalım.

$$ {}^{2}_{3}T = \begin{bmatrix} C3 & -S3 & 0 & L2 \\ S3 & C3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

i=4 için;

$$ {}^{3}_{4}T = \begin{bmatrix} cq4 & -sq4 & 0 & L3 \\ sq4c0 & cq4c0 & -s0 & -s0*0 \\ sq4s0 & cq4s0 & c0 & c0*0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

c0=cos(0)=1 , s0=sin(0)=0 yerlerine koyalım , ve cq4=C4 , sq4=S4 yazalım.

$$ {}^{3}_{4}T = \begin{bmatrix} C4 & -S4 & 0 & L3 \\ S4 & C4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

i=5 için;

$$ {}^{4}_{5}T = \begin{bmatrix} cq5 & -sq5 & 0 & L4 \\ sq5c0 & cq5c0 & -s0 & -s0*0 \\ sq5s0 & cq5s0 & c0 & c0*0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

c0=cos(0)=1 , s0=sin(0)=0 yerlerine koyalım , ve cq5=C5 , sq5=S5 yazalım.

$$ {}^{4}_{5}T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L4 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

İleri kinematik hesaplarken aşağıdaki formül uygulanır.

$$ {}^{0}_{N}T = {}^{0}_{1}T.{}^{1}_{2}T.{}^{2}_{3}T.\ldots\ldots\ldots{}^{N-1}_{N}T $$

N=i=5;

$$ {}^{0}_{5}T = {}^{0}_{1}T.{}^{1}_{2}T.{}^{2}_{3}T.{}^{3}_{4}T.{}^{4}_{5}T $$

$$ {}^{0}_{5}T = \begin{bmatrix} C1 & -S1 & 0 & 0 \\ S1 & C1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & LL1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} C2 & -S2 & 0 & L1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ S2 & C2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} C3 & -S3 & 0 & L2 \\ S3 & C3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} C4 & -S4 & 0 & L3 \\ S4 & C4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L4 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

$$ {}^{0}_{5}T = \begin{bmatrix} r11 & r12 & r13 & r14 \\ r21 & r22 & r23 & r24 \\ r31 & r32 & r33 & r34 \\ r41 & r42 & r43 & r44 \end{bmatrix} $$

r11=C4*(C1*C2*C3 - C1*S2*S3) - S4*(C1*C2*S3 + C1*C3*S2);

r11=C4*C1*C23-S4*C1*S23;

r11=C1*C234;

r12=- C4*(C1*C2*S3 + C1*C3*S2) - S4*(C1*C2*C3 - C1*S2*S3);

r12=-(C4*C1*S23 + S4*C1*C23);
r12=-C1*S234;

r13=S1;

r14=C1*L1+L4*(C4*(C1*C2*C3-C1*S2*S3)-S4*(C1*C2*S3+C1*C3*S2))+L3*(C1*C2*C3-C1*S2*S3)+ C1*C2*L2;
r14=C1*L1 + L4*(C4*C1*C23-S4*C1*S23) + L3*C1*C23 + L2*C1*C2;
r14=L1*C1 + L2*C1*C2 + L3*C1*C23 + L4*C1*C234;

r21=C4*(C2*C3*S1 - S1*S2*S3) - S4*(C2*S1*S3 + C3*S1*S2);
r21=C4*S1*C23 – S4*S1*S23;
r21=S1*C234;

r22=- C4*(C2*S1*S3 + C3*S1*S2) - S4*(C2*C3*S1 - S1*S2*S3);
r22=- (C4*S1*S23 + S4*S1*C23);
r22= - S1*S234;

r23=-C1;

r24=S1*L1 + L4*(C4*(C2*C3*S1 - S1*S2*S3) - S4*(C2*S1*S3 + C3*S1*S2)) + L3*(C2*C3*S1 - S1*S2*S3) + C2*S1*L2;
r24=L1*S1 + L4*(C4*S1*C23 – S4*S1*S23) + L3*S1*C23 + L2*S1*C2;
r24=L1*S1 + L2*S1*C2 + x3*S1*C23 + L4*S1*C234;

r31=C4*(C2*S3 + C3*S2) - S4*(S2*S3 - C2*C3);
r31=C4*S23 + S4*C23;
r31=S234;

r32=- C4*(S2*S3 - C2*C3) - S4*(C2*S3 + C3*S2);
r32= C4*C23 – S4*S23;
r32=C234;
r33=0;

r34=LL1 + L4*(C4*(C2*S3 + C3*S2) - S4*(S2*S3 - C2*C3)) + L3*(C2*S3 + C3*S2) + S2*L2;
r34=LL1 + L4*(C4*S23 + S4*C23) + L3*S23 + L2*S2;
r34=LL1 + L2*S2 + L3*S23 +L4*S234;

r41=0;

r42=0;

r43=0;

r44=1;

r'leri yerlerine yazalım.

$$ {}^{0}_{5}T = \begin{bmatrix} C1*C234 & -C1*S234 & S1 & L1*C1+L2*C1*C2+L3*C1*C23+L4*C1*C234 \\ S1*C234 & -S1*S234 & -C1 & L1*S1+L2*S1*C2+L3*S1*C23+L4*S1*C234 \\ S234 & C234 & 0 & LL1+L2*S2+L3*S23+L4*S234 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

X Y ve Z koordinatlarını yazalım dördüncü sütunun ilk üç satırı X, Y ve Z koordinatlarını verir.

Px= L1*C1 + L2*C1*C2 + L3*C1*C23 + L4*C1*C234;

Py= L1*S1 + L2*S1*C2 + L3*S1*C23 + L4*S1*C234;

Pz= LL1 + L2*S2 + L3*S23 +L4*S234 ;

X,Y ve Z koordinatların doğruluğunu kontrol edelim, Kontrol etmek için bütün açılara sıfır verelim robotun sıfır pozisyonundaki X,Y ve Z koordinatlarını sağlarsa denklemimiz doğru demektir.

q1=0;

q2=0;

q3=0;

q4=0;

Px=L1*cos(0) + L2*cos(0)*cos(0) + L3*cos(0)*cos(0) + L4*cos(0)*cos(0);

Px = L1*1 + L2*1*1 + L3*1*1 + L4*1*1;

Px = L1 + L2 + L3 + L4;

Şekil 4.34'de bakılırsa robotun sıfır pozisyondaki X ekseni ana koordinat çerçevesine göre aynı çıkmıştır.

Py = L1*sin(0) + L2*sin(0)*cos(0) + L3*sin(0)*cos(0) + L4*sin(0)*cos(0);

Py = L1*0 + L2*0*1 + L3*0*1 + L4*0*1;

Py=0;

Şekil 4.34'de bakılırsa robotun sıfır pozisyondaki Y ekseni ana koordinat çerçevesine göre aynı çıkmıştır.

Pz = LL1 + L2*sin(0) + L3*sin(0) + L4*sin(0);

Pz = LL1 + L2*0 + L3*0 + L4*0;

Pz = LL1;

Şekil 4.34'de bakılırsa robotun sıfır pozisyondaki Z ekseni ana koordinat çerçevesine göre aynı çıkmıştır.

4.1.2.2. Ters kinematik hesaplari

İleri kinematikte bulduğumuz her eklem için homojen matrislerini yazalım.

$$^{0}_{1}T = \begin{bmatrix} C1 & -S1 & 0 & 0 \\ S1 & C1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & LL1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$^{1}_{2}T = \begin{bmatrix} C2 & -S2 & 0 & L1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ S2 & C2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$^{2}_{3}T = \begin{bmatrix} C3 & -S3 & 0 & L2 \\ S3 & C3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$^{3}_{4}T = \begin{bmatrix} C4 & -S4 & 0 & L3 \\ S4 & C4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$^{4}_{5}T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L4 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$^{0}_{5}T$ 'i değişken cinsinden yazalım.

$$ {}^{0}_{5}T = \begin{bmatrix} r11 & r12 & r13 & Px \\ r21 & r22 & r23 & Py \\ r31 & r32 & r33 & Pz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

İleri kinematikteki ${}^{0}_{1}T$'in terslerini alalım.

$$ {}^{0}_{1}T^{-1} = \begin{bmatrix} C1 & S1 & 0 & 0 \\ -S1 & C1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -LL1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

$$ {}^{0}_{1}T^{-1}.{}^{0}_{5}T = {}^{0}_{1}T^{-1}.{}^{0}_{1}T.{}^{1}_{2}T.{}^{2}_{3}T.{}^{3}_{4}T.{}^{4}_{5}T $$

${}^{0}_{1}T^{-1}.{}^{0}_{1}T = I$ olduğundan sadeleştirilir.

$$ {}^{0}_{1}T^{-1}.{}^{0}_{5}T = {}^{1}_{2}T.{}^{2}_{3}T.{}^{3}_{4}T.{}^{4}_{5}T $$

$$ {}^{0}_{1}T^{-1}.{}^{0}_{5}T = \begin{bmatrix} C1 & S1 & 0 & 0 \\ -S1 & C1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -LL1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} r11 & r12 & r13 & Px \\ r21 & r22 & r23 & Py \\ r31 & r32 & r33 & Pz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = $$

$$ \begin{bmatrix} C2 & -S2 & 0 & L1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ S2 & C2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} C3 & -S3 & 0 & L2 \\ S3 & C3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} C4 & -S4 & 0 & L3 \\ S4 & C4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L4 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

$$ {}^{0}_{1}T^{-1}.{}^{0}_{5}T = \begin{bmatrix} C1*r11+S1*r21 & C1*r12+S1*r22 & C1*r13+S1*r23 & Py*S1+C1*Px \\ C1*r21-S1*r11 & C1*r22-S1*r12 & C1*r23-S1*r13 & C1*Py-Px*S1 \\ r31 & r32 & r33 & Pz-LL1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T11 & T12 & T13 & T14 \\ T21 & T22 & T23 & T24 \\ T31 & T32 & T33 & T34 \\ T41 & T42 & T43 & T44 \end{bmatrix} $$

Matematik işlemlerden fazla uğraşmamak için değişken cinsinden yazalım (T11 T12…T44)

T11 = - C4*(S2*S3 - C2*C3) - S4*(C2*S3 + C3*S2);
T11 = C4*C23 – S4*S23;
T11 = C234;
T12 = S4*(S2*S3 - C2*C3) - C4*(C2*S3 + C3*S2);
T12 = - S4*C23 – C4*S23;
T12 = - (S4*C23 + C4*S23);
T12 = - S234;
T13 = 0;

T14 = L1 + C2*L2 - L4*(C4*(S2*S3 - C2*C3) + S4*(C2*S3 + C3*S2)) - L3*(S2*S3 - C2*C3);
T14 = L1 + L2*C2 – L4*(-C4*C23 + S4*S23) + L3*C23;
T14 = L1 + L2*C2 + L3*C23 + L4*C234;
T21 = 0;
T22 = 0;
T23 = -1;
T24 = 0;

T31 = C4*(C2*S3 + C3*S2) - S4*(S2*S3 - C2*C3);
T31 = C4*S23 + S4*C23;
T31 = S234;
T32 = - C4*(S2*S3 - C2*C3) - S4*(C2*S3 + C3*S2);
T32 = C4*C23 – S4*S23;
T32 = C234;

T33 = 0;

T34 = L4*(C4*(C2*S3 + C3*S2) - S4*(S2*S3 - C2*C3)) + L3*(C2*S3 + C3*S2) + L2*S2;
T34 = L4*(C4*S23 + S4*C23) + L3*S23 + L2*S2;
T34 = L2*S2 + L3*S23 + L4*S234;

T41 =0;
T42 = 0;
T43 = 0;
T44 = 1;

Yerlerine yazalım;

$$ {}^{0}_{1}T^{-1}\,{}^{0}_{5}T = \begin{bmatrix} C1*r11+S1*r21 & C1*r12+S1*r22 & C1*r13+S1*r23 & Py*S1+C1*Px \\ C1*r21-S1*r11 & C1*r22-S1*r12 & C1*r23-S1*r13 & C1*Py-Px*S1 \\ r31 & r32 & r33 & Pz-LL1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = $$

$$ \begin{bmatrix} C234 & -S234 & 0 & L1 + L2*C2 + L3*C23 + L4*C234 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ S234 & C234 & 0 & L2*S2 + L3*S23 + L4*S234 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

Eşitliğin sağını ve soldaki matris elemanları birbirine eşittir.

1. $C1*r11+S1*r21 = C234;$
2. $C1*r12+S1*r22 = -S234;$
3. $C1*r13+S1*r23 = 0;$
4. $Py*S1+C1*Px = L1 + L2*C2 + L3*C23 + L4*C234;$
5. $C1*r21-S1*r11 = 0;$
6. $C1*r22-S1*r12 = 0;$

7. $C1*r23 - S1*r13 = 1;$

8. $C1*Py - Px*S1 = 0;$

9. $r31 = S234;$

10. $r32 = C234;$

11. $r33 = 0;$

12. $Pz - LL1 = L2*S2 + L3*S23 + L4*S234;$

8. denklemde bir bilinmeyen olduğundan q1 bulunur.

$(-P_X)*\sin(q1) + (P_Y)*\cos(q1) = 0;$

$a = -P_X$, $b = P_Y$ dersek denklem;

$a*\sin\theta + b*\cos\theta = 0$ olur trigonometrik dönüşümlerden

$\theta = Atan2(-b, a)$ veya $\theta = Atan2(b, -a)$

Robotun birinci açısı q1=Atan2(-b, a) veya Atan2(b, -a) bulunur.

q1=Atan2(-b, a); (Robotun Birinci acısı bulundu)

Diğer açıları bulalım;

İleri kinematikteki ${}^{0}_{1}T$ ve ${}^{1}_{2}T$ liri birbirleriyle çarpalım ve tersini alalım

$$ {}^{0}_{2}T = {}^{0}_{1}T \cdot {}^{1}_{2}T = \begin{bmatrix} C1 & -S1 & 0 & 0 \\ S1 & C1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & LL1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} C2 & -S2 & 0 & L1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ S2 & C2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C1*C2 & -C1*S2 & S1 & C1*L1 \\ C2*S1 & -S1*S2 & -C1 & L1*S1 \\ S2 & C2 & 0 & LL1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

Yukardaki denklemin tersini alalım;

$$ [{}^{0}_{1}T \cdot {}^{1}_{2}T]^{-1} = \begin{bmatrix} C1*C2 & C2*S1 & S2 & -C2*L1 - LL1*S2 \\ -C1*S2 & -S1*S2 & C2 & L1*S2 - C2*LL1 \\ S1 & -C1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

$$ [{}^{0}_{1}T \cdot {}^{1}_{2}T]^{-1} \cdot {}^{0}_{5}T = {}^{0}_{1}T^{-1} \cdot {}^{0}_{1}T \cdot {}^{1}_{2}T^{-1} \cdot {}^{1}_{2}T \cdot {}^{2}_{3}T \cdot {}^{3}_{4}T \cdot {}^{4}_{5}T $$

${}^{0}_{1}T^{-1} \cdot {}^{0}_{1}T = I$, ${}^{1}_{2}T^{-1} \cdot {}^{1}_{2}T = I$ olduğundan sadeleştirilir.

$$ [{}^{0}_{1}T \cdot {}^{1}_{2}T]^{-1} \cdot {}^{0}_{5}T = {}^{2}_{3}T \cdot {}^{3}_{4}T \cdot {}^{4}_{5}T $$

$$[{}^0_1T.{}^1_2T]^{-1}.{}^0_5T = \begin{bmatrix} C1*C2 & C2*S1 & S2 & -C2*L1 - LL1*S2 \\ -C1*S2 & -S1*S2 & C2 & L1*S2 - C2*LL1 \\ S1 & -C1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} r11 & r12 & r13 & Px \\ r21 & r22 & r23 & Py \\ r31 & r32 & r33 & Pz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} C3 & -S3 & 0 & L2 \\ S3 & C3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} C4 & -S4 & 0 & L3 \\ S4 & C4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L4 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} =$$

Matematiksel denklem çok uzun olduğundan değişkenlerde gösterelim. Denklemin sol kısmını K değişkeni ile sağ kısmını ise M değişkeni ile gösterelim.

$$[{}^0_1T.{}^1_2T]^{-1}.{}^0_5T = \begin{bmatrix} K11 & K12 & K13 & K14 \\ K21 & K22 & K23 & K24 \\ K31 & K32 & K33 & K34 \\ K41 & K42 & K43 & K44 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M11 & M12 & M13 & M14 \\ M21 & M22 & M23 & M24 \\ M31 & M32 & M33 & M34 \\ M41 & M42 & M43 & M44 \end{bmatrix}$$

K11 = S2*r31 + C1*C2*r11 + C2*S1*r21;
K12 = S2*r32 + C1*C2*r12 + C2*S1*r22;
K13 = S2*r33 + C1*C2*r13 + C2*S1*r23;
K14 = P_Z*S2 - C2*L1 - LL1*S2 + C1*C2*P_X + C2*P_Y*S1;
K21 = C2*r31 - C1*S2*r11 - S1*S2*r21;
K22 = C2*r32 - C1*S2*r12 - S1*S2*r22;
K23 = C2*r33 - C1*S2*r13 - S1*S2*r23;
K24 = C2*P_Z - C2*LL1 + L1*S2 - C1*P_X*S2 – P_Y*S1*S2;
K31 = S1*r11 - C1*r21;
K32 = S1*r12 - C1*r22;
K33 = S1*r13 - C1*r23;
K34 = P_X*S1 - C1*P_Y;
K41 = 0;
K42 = 0;
K43 = 0;
K44 = 1;
M11 = C3*C4 - S3*S4;
M12 = - C3*S4 - C4*S3;
M13 = 0;
M14 = L2 + C3*L3 - L4*(S3*S4 - C3*C4);
M21 = C3*S4 + C4*S3;
M22 = C3*C4 - S3*S4;
M23 = 0;
M24 = L4*(C3*S4 + C4*S3) + L3*S3;
M31 = 0;
M32 = 0;
M33 = 1;
M34 =0;

M41 = 0;
M42 = 0;

M43 = 0;
M44 =1;

Eşitliğin sağını ve solunun birim elemanlarını birbirine eşitleyelim.

1. S2*r31 + C1*C2*r11 + C2*S1*r21 = C3*C4 - S3*S4
2. S2*r32 + C1*C2*r12 + C2*S1*r22 = - C3*S4 - C4*S3
3. S2*r33 + C1*C2*r13 + C2*S1*r23 = 0
4. P_Z*S2 - C2*L1 - LL1*S2 + C1*C2*P_X + C2*P_Y*S1 = L2 + C3*L3 - L4*(S3*S4 - C3*C4);
5. C2*r31 - C1*S2*r11 - S1*S2*r21 = C3*S4 + C4*S3
6. C2*r32 - C1*S2*r12 - S1*S2*r22 = C3*C4 - S3*S4
7. C2*r33 - C1*S2*r13 - S1*S2*r23 = 0
8. C2*P_Z - C2*LL1 + L1*S2 - C1*P_X*S2 – P_Y*S1*S2 = L4*(C3*S4 + C4*S3) + L3*S3
9. S1*r11 - C1*r21 = 0;
10. S1*r12 - C1*r22 = 0;
11. S1*r13 - C1*r23 = 1;
12. P_X*S1 - C1*P_Y = 0;

Yukarıdak 4. denklemi sadeleştirelim;

P_Z*S2 - C2*L1 - LL1*S2 + C1*C2*P_X + C2*P_Y*S1 = L2 + C3*L3 - L4*(S3*S4 - C3*C4);

(P_Z – LL1)*S2 + (P_X*C1 + P_Y*S1 – L1)*C2 = L2 + L3*C3 + L4*C34;

8. denklemi sadeleştirelim;

C2*P_Z - C2*LL1 + L1*S2 - C1*P_X*S2 – P_Y*S1*S2 = L4*(C3*S4 + C4*S3) + L3*S3;

(P_Z – LL1)*C2 - (P_X*C1 + P_Y*S1 – L1)*S2 = L3*S3 + L4*S34;

P_Z – LL1 = A

P_X*C1 + P_Y*S1 – L1 = B dersek denklemi alt alta yazalım

A*S2 + B*C2 = L2 + L3*C3 + L4*C34; (4. denklem)

A*C2 – B*S2 = L3*S3 + L4*S34; (8. denklem)

4. ve 8. her iki tarafın karelerini alıp alt alta toplayalım.

$A*S2 + B*C2 = L2 + L3*C3 + L4*C34;$ (4. denklem)

$+\quad A*C2 - B*S2 = L3*S3 + L4*S34;$ (8. denklem)

$(A*S2)^2 + (B*C2)^2 + 2*A*S2*B*C2 = L2^2 + (L3*C3)^2 + (L4*C34)^2 + 2*L2*L3*C3 + 2*L2*L4*C34 + 2*L3*C3*L4*C34$

$(A*C2)^2 + (B*S2)^2 - 2*A*C2*B*S2 = (L3*S3)^2 + (L4*S34)^2 + 2*L3*S3*L4*S34;$

Denklemin sol tarafı;

$A^2*(S2^* + C2^2) + B^2*(S2^2 + C2^2) = A^2*1 + B^2*1 = A^2 + B^2$ bulunur.

$A^2 + B^2 = L2^2 + L3^2*(S3^2 + C3^2) + L4^2*(S34^2 + C34^2) + 2*L2*L3*C3 + 2*L2*L4*C34 + 2*L3*C3*L4*C34 + 2*L3*S3*L4*S34$

$A^2 + B^2 = L2^2 + L3^2 + L4^2 + 2*L2*L3*C3 + 2*L2*L4*C34 + 2*L3*C3*L4*C34 + 2*L3*S3*L4*S34$

$A^2 + B^2 - L2^2 - L3^2 - L4^2 = 2*(L2*L3*C3 + L2*L4*C34 + L3*L4*(C3*C34 + S3*S34)$

$C3*C34 + S3*S34 = C3*(C3*C4 - S3*S4) + S3*(C3*S4 + C4*S3)$
$= C3^2*C4 - C3*S3*S4 + C3*S3*S4 + S3^2*C4$
$= C4$ olur.

$A^2 + B^2 - L2^2 - L3^2 - L4^2 = 2*(L2*L3*C3 + L2*L4*C34 + L3*L4*C4)$

$$\frac{A^2 + B^2 - L2^2 - L3^2 - L4^2}{2} = L2*L3*C3 + L2*L4*C34 + L3*L4*C4$$

$$\frac{A^2 + B^2 - L2^2 - L3^2 - L4^2}{2} = K \quad \text{Dersek}$$

q4 Robot uçunun konumu, biliniyor kabul edilir.Denklemin son hali;

$K = L2*L3*C3 + L2*L4*C34 + L3*L4*C4;$ olur.

$K - L3*L4*C4 = L2*L3*C3 + L2*L4*(C3*C4 - S3*S4)$;

$K - L3*L4*C4 = L2*L3*C3 + L2*L4*C3*C4 - L2*L4*S3*S4;$

$K - L3*L4*C4 = (L2*L3 + L2*L4\text{-}C4)*C3 + (- L2*L4*S4)*S3$

$c = K - L3*L4*C4;$

$a = - L2*L4*S4;$

$b = L2*L3 + L2*L4\text{-}C4$ dersek denklemin son hali; $a\sin\theta + b\cos\theta = c$ olur.

Trigonometrik eşitlikten 3.eklemin açısı aşağıdaki gibi olur.

$$q3 = A\tan 2(\pm\sqrt{a^2 + b^2 - c^2}, c)$$

q3 ve q4 bilindiğinden 8. denklem çözülürse q2 bulunur.

8. denklemin sadeleştirilmiş hali aşağıdadır.

A*C2 – B*S2 = L3*S3 + L4*S34; (8. denklem)

a = -B;

b= A;

c= L3*S3 + L4*S34; dersek denklem aşağıdaki gibi olur.

asinθ + bcosθ = c

trigonometrik eşitliklerden ;

$$\theta = A\tan 2(\pm\sqrt{a^2 + b^2 - c^2}, c)$$

Robotun 2 eklem açısı aşağıdaki gibi olur.

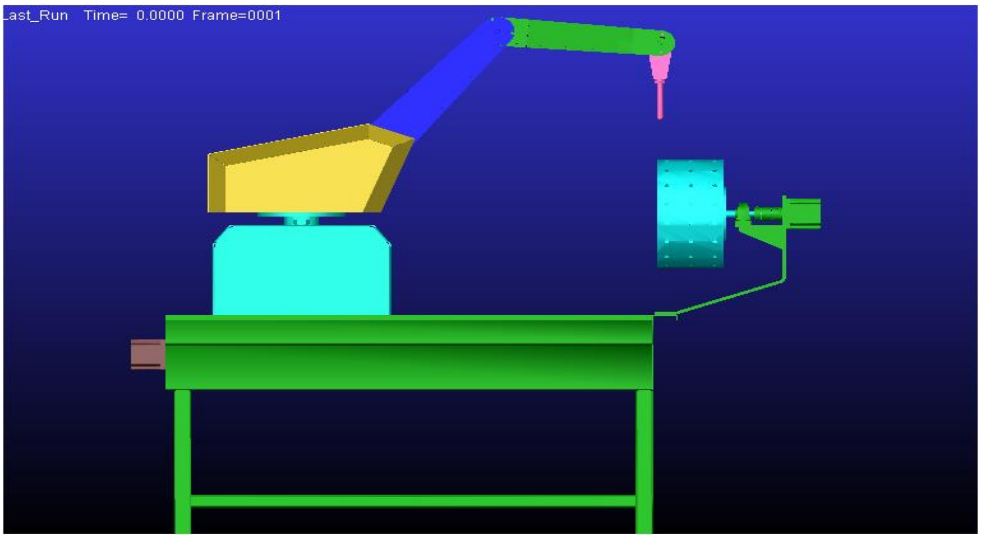
$$q2 = A\tan 2(\pm\sqrt{a^2 + b^2 - c^2}, c)$$

Sonuç olarak ileri ve ters kinematikten bulunan denklemleri aşağıya yazalım;

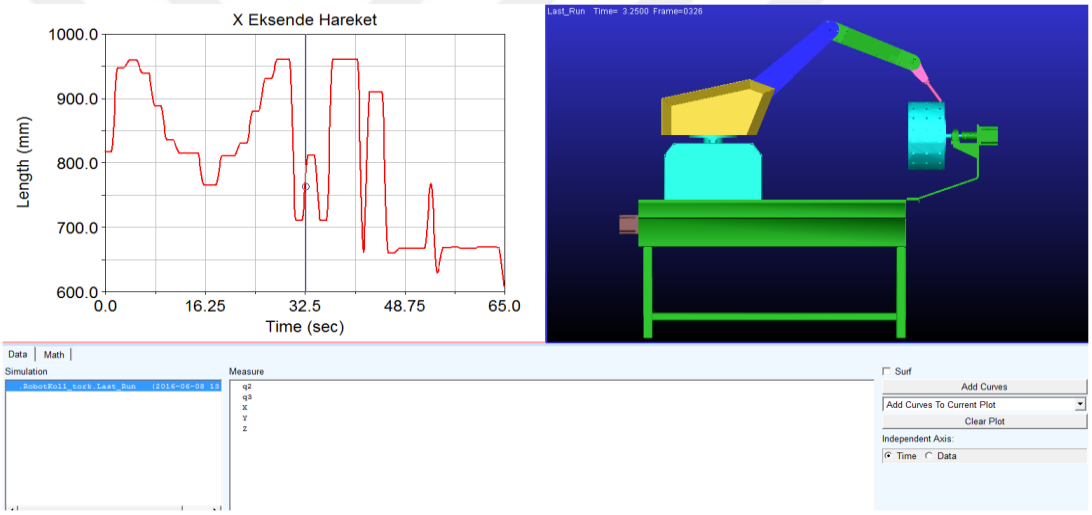
- Px = L1*C1 + L2*C1*C2 + L3*C1*C23 + L4*C1*C234;
- Py = L1*S1 + L2*S1*C2 + L3*S1*C23 + L4*S1*C234;
- Pz = LL1 + L2*S2 + L3*S23 +L4*S234;
- q1=Atan2(-b, a);
- $q2 = A\tan 2(\pm\sqrt{a^2 + b^2 - c^2}, c)$
- $q3 = A\tan 2(\pm\sqrt{a^2 + b^2 - c^2}, c)$
- q4 biliniyor kabul edilir.

4.1.2.3. Tork hesaplari

Robot modelini Adams programında modelleyerek ve belirlenen bir yörüngede hareket ettirilerek her eklemin zaman bağlı grafiği çizdirilerek motor seçimleri ve şanzıman dişli oranları bu grafiklere göre belirlenecek.



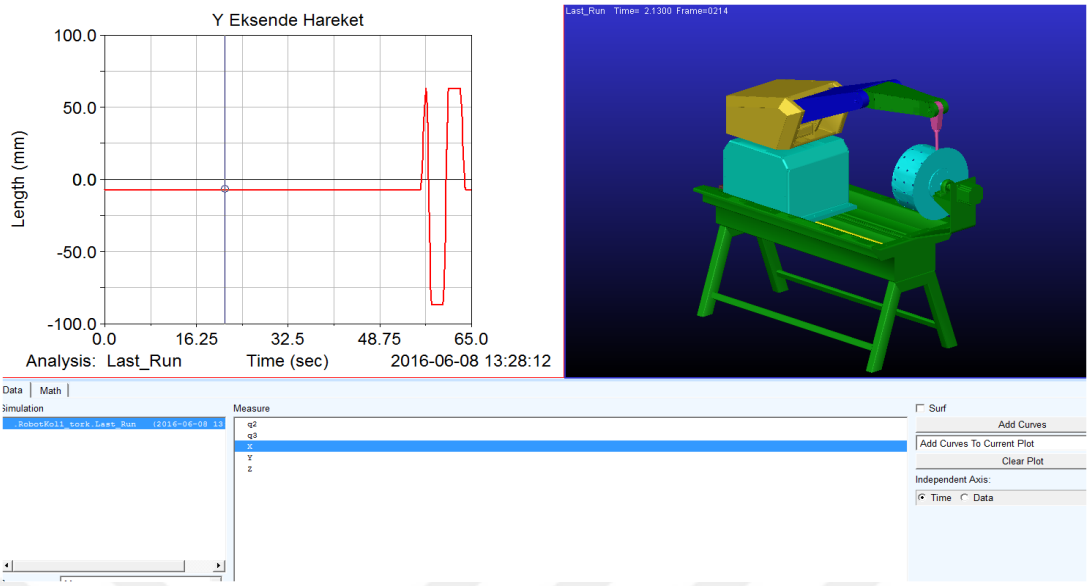
Şekil 4.36. Robotun Başlama noktası



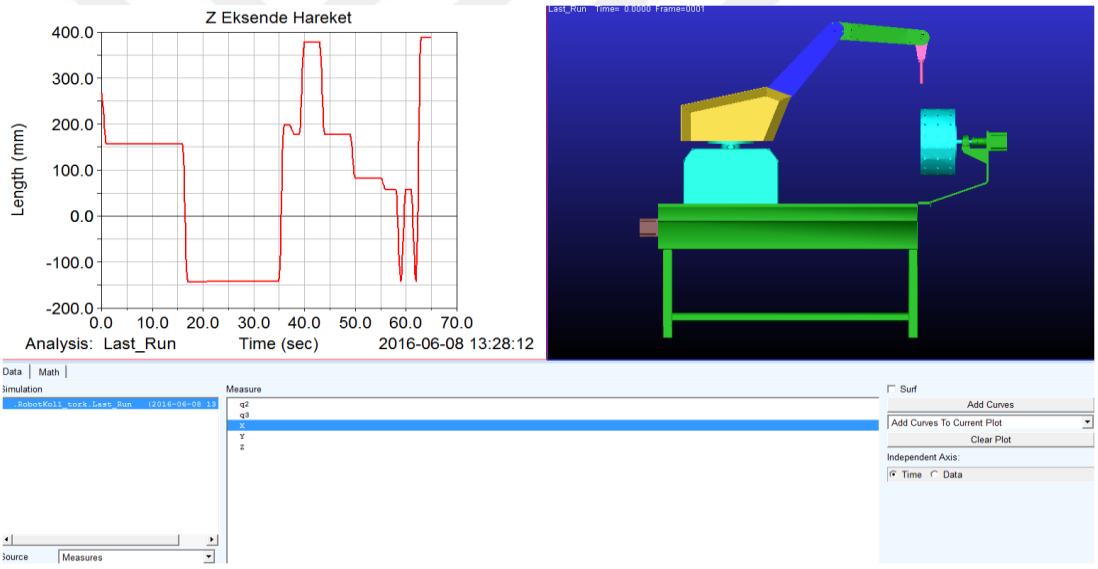
Şekil 4.37. Robotun X hareketi



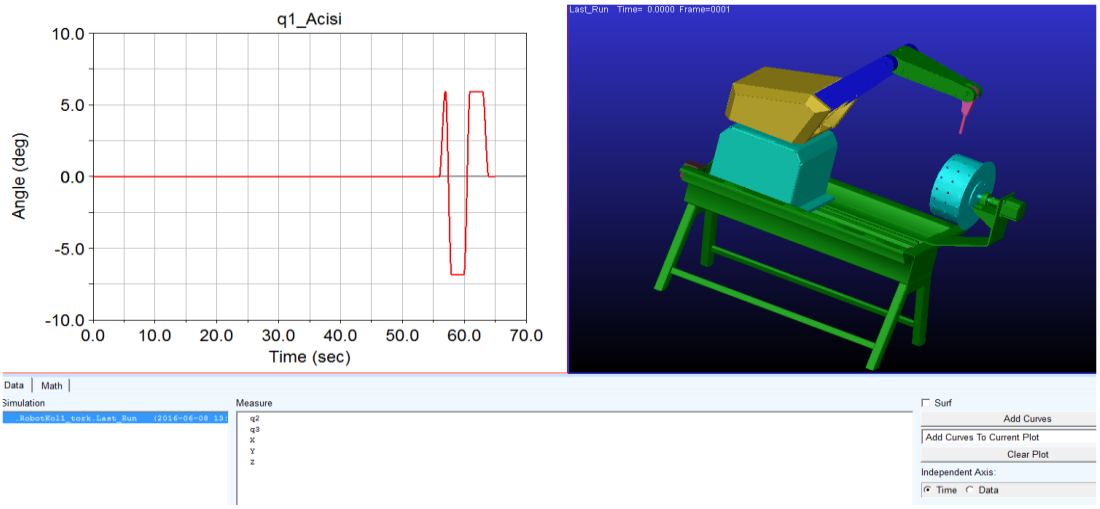
Şekil 4.38. Robotun X hareketi son noktası



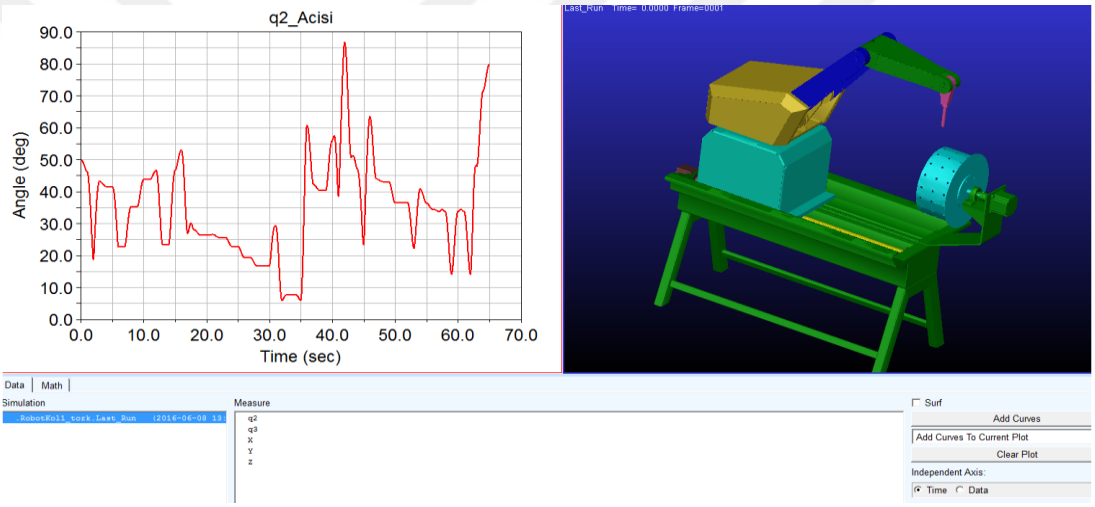
Şekil 4.39. Robotun Y hareketi



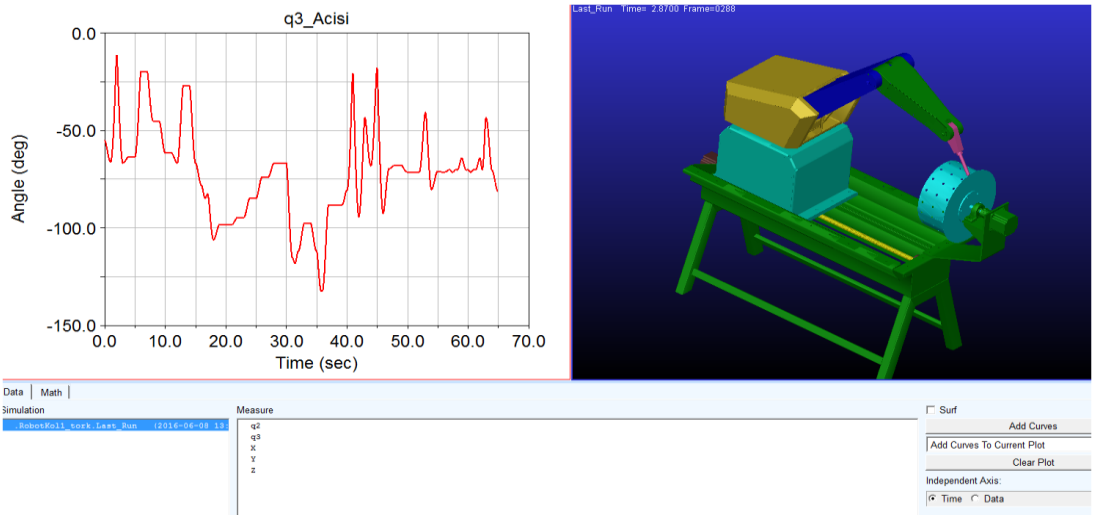
Şekil 4.40. Robotun Z hareketi



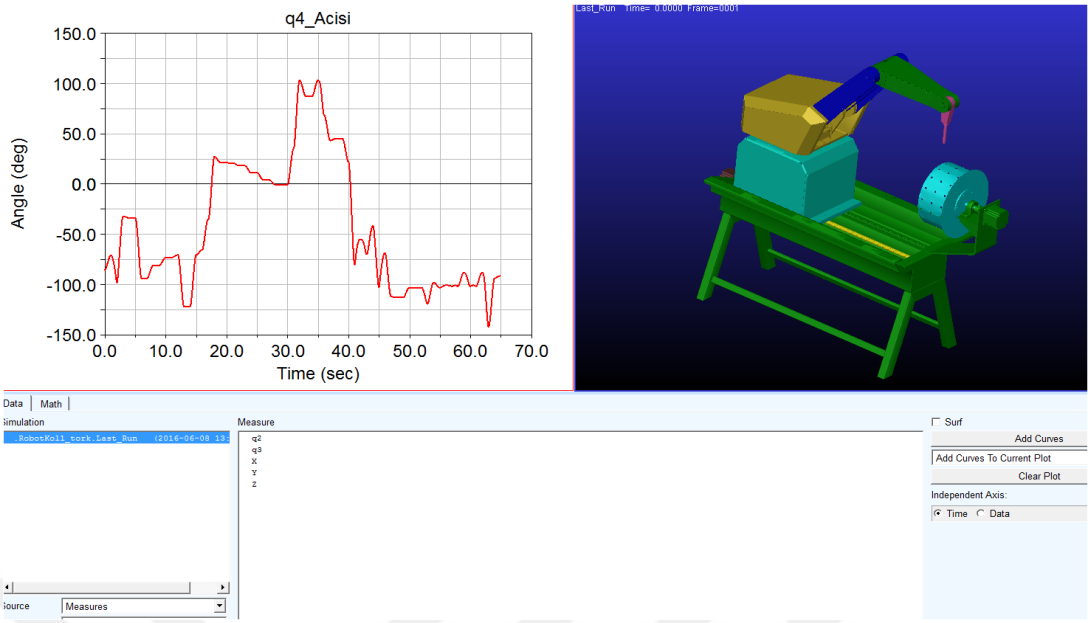
Şekil 4.41. Robotun q1 açı hareketi



Şekil 4.42. Robotun q2 açı hareketi

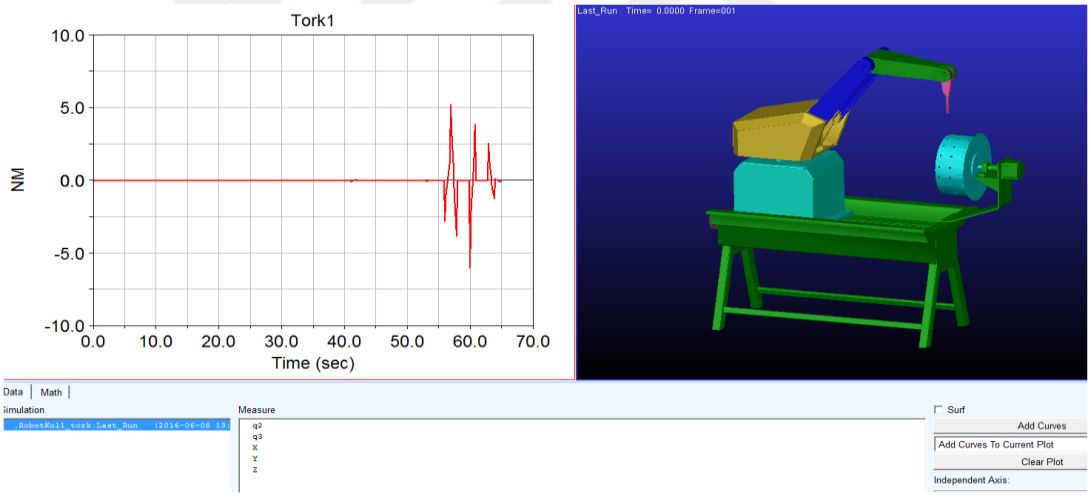


Şekil 4.43. Robotun q3 açı hareketi

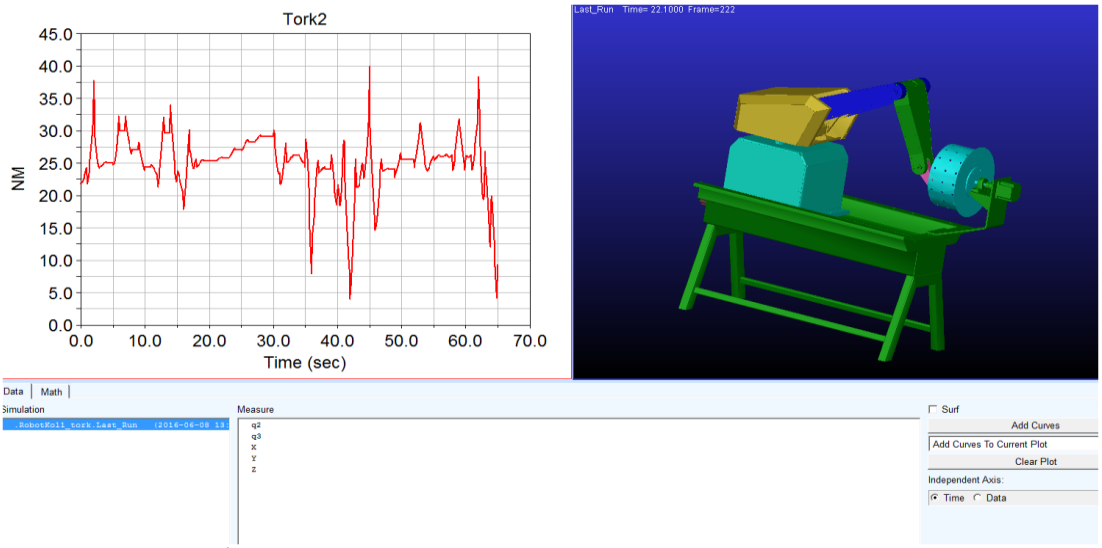


Şekil 4.44. Robotun q4 açı hareketi

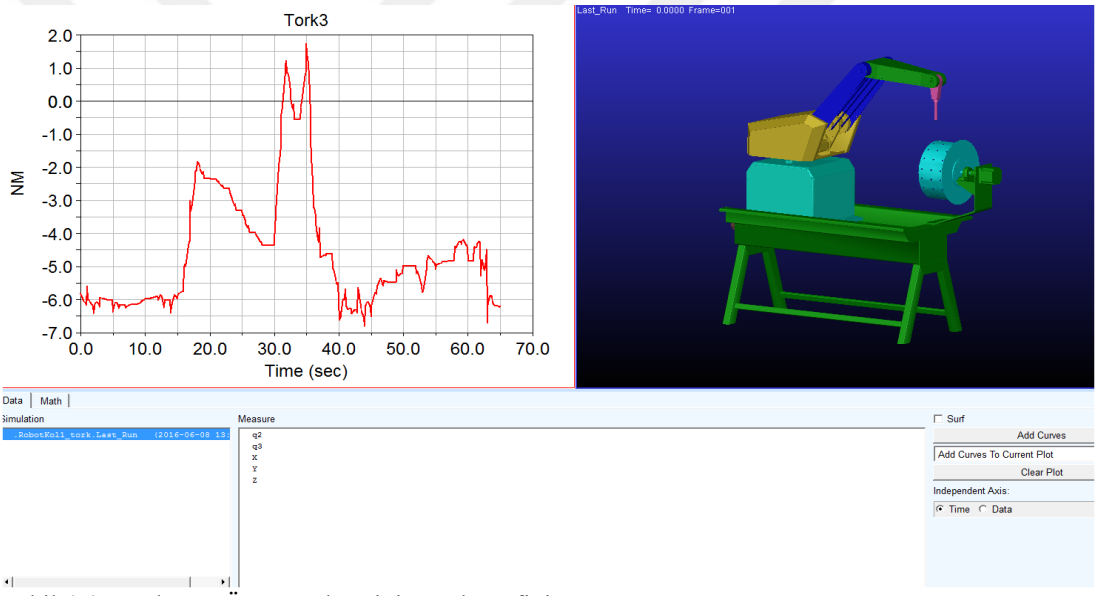
Yukarıdaki hareketlere göre tork grafiklerini çizdirelim.



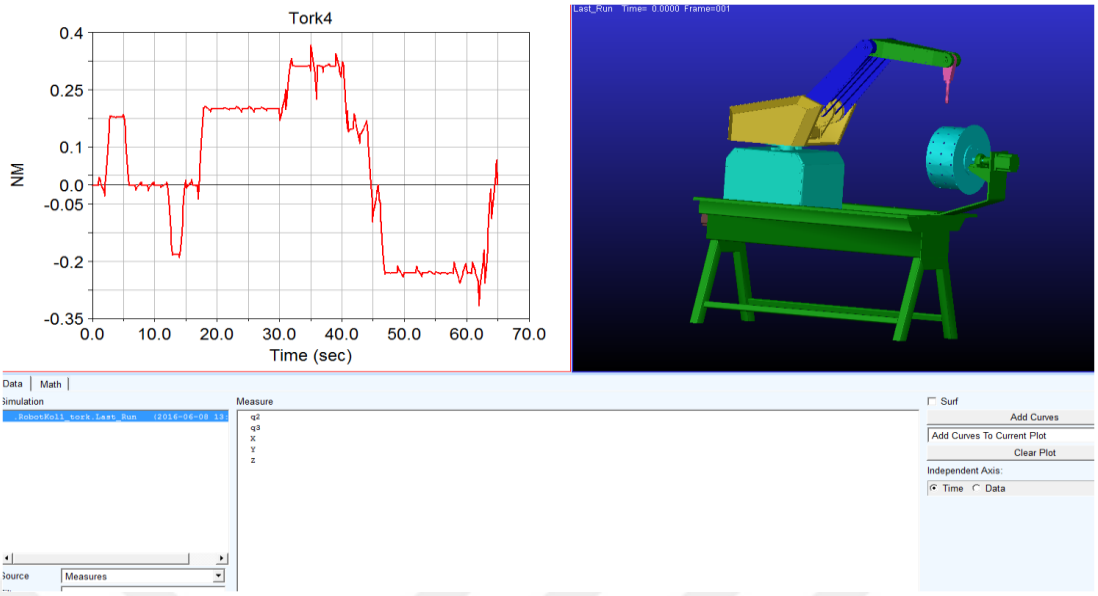
Şekil 4.45. Robotun Birinci ekseninin Tork grafiği



Şekil 4.46. Robotun İkinci ekseninin Tork grafiği



Şekil 4.47. Robotun Üçüncü ekseninin Tork grafiği



Şekil 4.48. Robotun Dördüncü ekseninin Tork grafiği

Şekil 4.44 - 4.45 - 4,46 - 4.47'deki grafiklere göre tork değerlerini yazalım.

T1 = 6 NM,

T2 = 40 NM,

T3 = 7 NM,

T4 = 0.4 NM

Max 60RPM dönme gerçekleştiğini farz ederek motor güçlerini hesaplayalım.

Güç formülü aşağıdaki formüle göre hesaplayalım.

$$P = \frac{TxN}{9550x\eta}(KW);$$

T= Tork (NM);

N = Hız (dev/dak);

$\eta = 0.85$ Motor verimi

$$P_1 = \frac{6x60}{9550x0.85} * 1000 \; ; \; 50Watt$$

$$P_2 = \frac{40x60}{9550x0.85} * 1000 \; ; \; 300Watt$$

$$P_3 = \frac{7x60}{9550x0.85} * 1000 \; ; \; 60Watt$$

$$P_4 = \frac{0.4x60}{9550x0.85} * 1000 \; ; \; 3Watt$$

Dört servo Motor'u 400watt, 3000 RPM seçelim ve 400watt'lık motorun torku nu hesaplayalım bu torklara göre de şanzıman oranımızı bulalım.

$$400 = \frac{T_{Motor} x 3000}{9550 x 0.95} * 1000$$

$$T_{Motor} = \frac{400 * 9550 * 0,95}{3000 * 1000}$$

T_{Motor} ; 1.3NM

Triger dişlileri 2 kat oranında yapılacak

Birinci eklemin Şanzıman oranını bulalım;

- T1=6N.M olabilmesi için;

  $T1 = T_{Motor} * i_1$;

  $i_1 = \frac{T1}{T_{Motor}} = \frac{6}{1.3} = 4.7$ Çevrimoranlı Şanziman gerekir.

  Üç dişliden 2/1 oranında tork arttırılarak çevrim oranı $2^3 = 8$ olur.

  T1 = 8*1.3 = 10.4 N.M olur

- T2=40N.M olabilmesi için;

  $T2 = T_{Motor} * i_2$;

  $i_2 = \frac{T2}{T_{Motor}} = \frac{40}{1.3} = 30.8$ Çevrimoranlı Şanziman gerekir.

  Altı dişliden 2/1 oranında tork arttırılarak çevrim oranı $2^6 = 64$ olur.

  T2 =64*1,3 = 83 N.M olur.

- T3=7N.M olabilmesi için;

  $T3 = T_{Motor} * i_3$;

  $i_3 = \frac{T3}{T_{Motor}} = \frac{7}{1.3} = 5.4$ Çevrimoranlı Şanziman gerekir.

  Üç dişliden 2/1 oranında tork arttırılarak çevrim oranı $2^3 = 8$ olur.

  T3 = 8*1.3 = 10.4 N.M olur

- T4=0.4N.M olabilmesi için motorun torku 1.3N.M olduğundan T4 Şanzımana gerek yok.

4.1.3. Elektrik, elektronik ve kontrolör tasarimi

Robotumuzda kullanılacak elektrik, elektronik ve kontrolör malzemeleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Çizelge 4.8. Elektrik, Elektronik ve Kontrolör Listesi

No	Ad	Adet	Marka	Açıklama
1	400 WattServo Motor	4 adet	Omron	Robot Kollarda
2	400 WattServo Motor Sürücüsü	4 adet	Omron	
3	400 Watt Step Motor	1 adet		Vidalı Milde
4	400 Watt Step Motor Sürücüsü	1 adet		Vidalı Milde
5	8 eksenli Nj Kontrolör PLC	1 adet	Omron	
6	Dijital in put giriş	1 adet	Omron	
7	Dijital out put çıkış	1 adet	Omron	
8	Palse Kartı	1 adet	Omron	
9	Haberleşme Kabloları	1 adet	Omron	
10	Acil Stop Anahtar	1 adet	Omron	
11	Sysmacstudio Program	1 adet	Omron	
12	Aç kapama Anahtarı	1 adet		
13	Pano	1 adet		

Çizelge 4.8'deki listede gösterilen malzemelerin resimlerini gösterelim.



Şekil 4.49. Elektronik Malzemeler

Panonun içerisine Tablo 4,8'deki malzemeler montajlanırlar. Sonra Sysmacstudio programı kullanılarakhesaplamış olduğumuz formülleri STL dilde yazarak kontrolörün içerisine inport edilir.

4.2. Robot İmalati

Tasarımı ve hesaplamaları yapılan robot aşağıdaki sıralamayı takip edilerek imalatı gerçekleştirilir.

1. Çizilen teknik resimlerin imalatı gerçekleştirmek üzere aşağıdaki sıralama uygulanır.
   a. Kesim İşlemleri
      i. Sac malzemelerin açınımları alınarak lazer kesim tezgâhına gönderilerek kesim işlemi gerçekleştirilir
      ii. Profil malzemelerin teknik resimleri testere kesim makinasına gönderilerek kesim işlemi yapılır.
      iii. Mil ve boru malzemelerin teknik resimleri testere kesim makinasına gönderilerek kesim işlemi gerçekleştirilir.
   b. Şekillendirme İşlemleri
      i. Büküm işlemi olan sac malzemeler Abkant makinasına gönderilerek bükme işlemi gerçekleştirilir.
   c. Talaşlı İmalat
      i. Mil ve boru malzemelerin teknik resimlere göre CNC torna makinasında işlenmesi gerçekleştirilir.
      ii. Rulman yerleri CNC Frezelerde işlenir.
   d. Kaynak İşlemleri
      i. Bükülen saclar kesilen profiller teknik resimlere göre kaynak işlemleri gerçekleştirilir.
   e. Talaşlı İmalat
      i. Kaynak işlemi gören örneğin şasinin vidalı mil yatak yerleri ve hassas olan yüzeyler CNC Freze de işlenir.
   f. Montaj işlemleri
      i. Bütün hazırlanan yarı mamul parçalar birbirleriyle montajlanarak son kontrol gerçekleştirilir.
      ii. Elektrik ve elektronik parçalarda montajlanarak kontrol edilir.

2. Boya İşlemi
   a. Montajlanan parçalar sökülerek boyanmak üzere boyahaneye gönderilir.

3. Montaj İşlemi

a. Üretilen, boyanan parçaların komplesi montajlanır.

b. Servo ve step motorlar montajlanır.

c. Panoya elektronik parçalar montajlanırlar.

d. Panonun Robota montajı gerçekleştirilir.

e. Elektrik tesisatı çekilir.

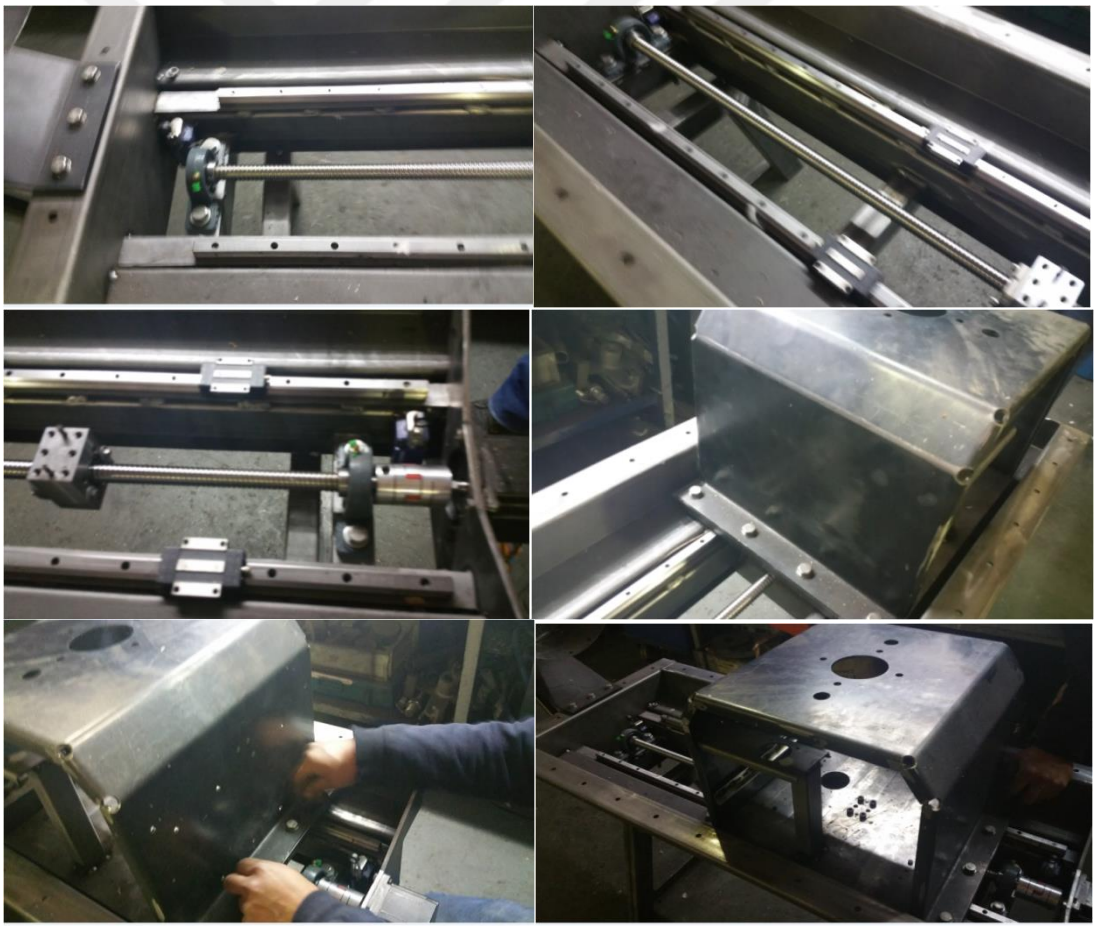
f. Haberleşme kablolama işlemleri yapılır.

g. Robotun topraklama hattı çekilir.

h. Kontrolöre yapmış olduğumuz yazılım yüklenir.

i. İlk denemeler küçük hızlarda gerçekleştirilir.

Aşağıda boyadan önceki imalat resimlerini gösterelim.



Şekil 4.50. İmalat Resileri-1



Şekil 4.51. İmalat Resimleri - 2

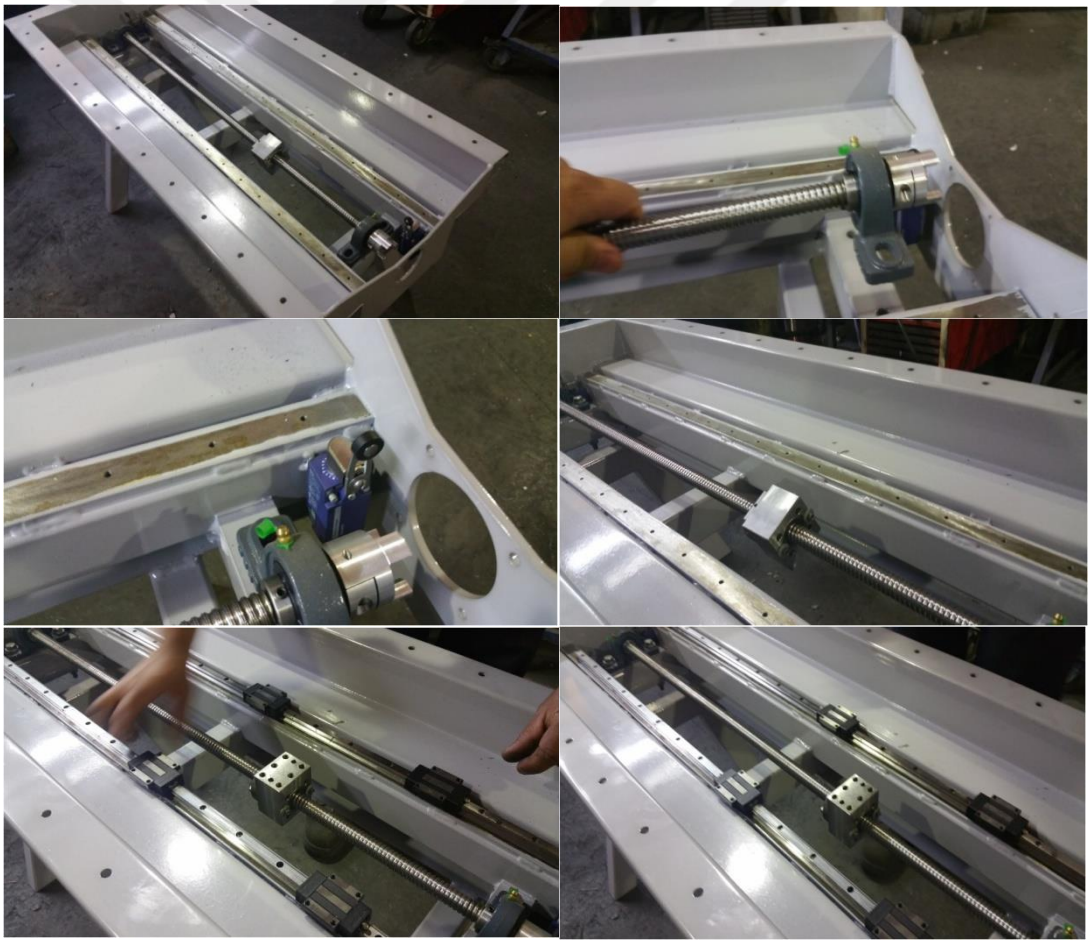


Şekil 4.52. İmalat Resimleri - 3



Şekil 4.53. İmalat Resimleri - 4

Boyadan sonraki montaj resimleri aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 4.54. Montaj Resimleri – 1



Şekil 4.55. Montaj Resimleri – 2



Şekil 4.56. Montaj Resimleri – 3



Şekil 4.57. Montaj Resimleri – 4



Şekil 4.58. Montaj Resimleri – 5



Şekil 4.59. Montaj Resimleri – 6



Şekil 4.60. Montaj Resimleri – 7



Şekil 4.61. Montaj Resimleri – 8



Şekil 4.62. Montaj Resimleri – 9



Şekil 4.63. Montaj Resimleri – 10

Robotun pano resimleri aşağıdadır.



Şekil 4.64. Pano Resimleri – 1



Şekil 4.65. Pano Resimleri – 2



Şekil 4.66. Pano Resimleri – 3

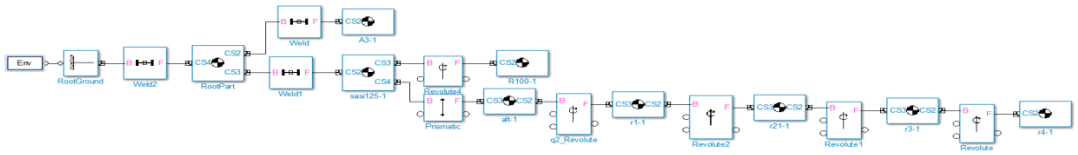
4.3.Yazılım

Hesaplamalardaki çıkartılan formüllerin doğruluğunu ispatlamak için öncelikle Adams programında modelini oluşturduğumuz modeli birde matlab programında oluşturulur. Aynı inputla çıktılar birbirinden çıkartılarak kontrol edilir. Hatalar var ise düzeltilir sonra aşağıdaki sıralamalar uygulanarak yazılım işlemi gerçekleştirilir.

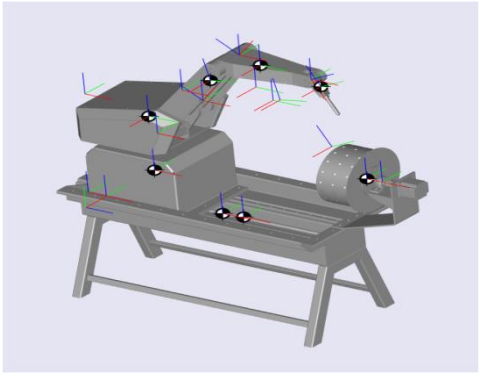
1. SysmacStudio programında STL veya lader dilde yazılımı yazılarak kontrolöre inport edilir.
2. Haberleşme protokolü Java dilinde yazılır.
3. Operatörün daha kolay programını yapması için kullanıcı dostu bir ara yüz programı yazılır.(Java programında)

4.2.1. Matlab programinda modelin oluşturulmasi

Matlab programında modelin üç boyutlu görsel olarak görebilmemiz için Matlab Simukinkte SimMechanics toolbox ında aşağıdaki blok diyagramları oluşturulur.

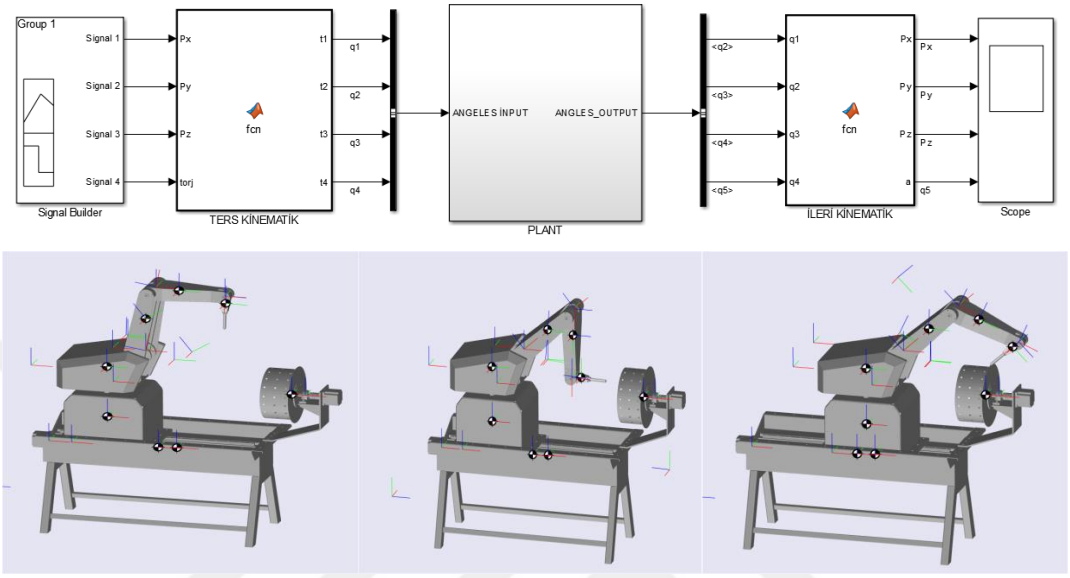


Simülasyonu başlattığımız zaman aşağıdaki gibi bir görüntü oluşur.



Şekil 4.67. Matlab ta Robot Plant Model Blok Diyagramı

Matlabta model oluştuktan sonra ileri kinematik ve ters kinematik formüllerini fonksiyon blok halinde oluşturularak Adams'ta verdiğimiz input değerleri verilerek grafiği çizdirilir.



Şekil 4.68. MatlabSimulink Model Blok Diyagramı

```
function [t1,t2,t3,t4] = fcn(Px,Py,Pz,torj)
%% TERS KİNEMATİK

q4=torj*pi/180;
%% sabitler
x1=135;
x2=435;
x3=373;
x4=212;
y1=165;
y2=0;
y3=0;
y4=0;
y5=0;
%% q1 bulalım
a=-Px;
b=Py;
q1=atan2(b,-a);
%% q2 bulalım
A=Pz-y1;
B=Px*cos(q1)+Py*sin(q1)-x1;
K=x3+x4*cos(q4);
L=x4*sin(q4);
a=A;
b=B;
c=((a^2)+(b^2)+(x2^2)-(K^2)-(L^2))/(2*x2);
q2=atan2(a,b)+atan2(+sqrt((a^2)+(b^2)-(c^2)),c);
%% q3 bulalım
c=((a^2)+(b^2)-(K^2)-(L^2)-(x2^2))/(2*x2);
a=-L;
b=K;
q3=atan2(a,b)+atan2(-sqrt((a^2)+(b^2)-(c^2)),c);
t1=q1*180/pi
t2=q2*180/pi
t3=q3*180/pi
t4=q4*180/pi
```

Şekil 4.69. Matlab ta Ters Kinematik Kodları

```
function [Px,Py,Pz,a] = fcn(q1,q2,q3,q4)
%% İLERİ KİNEMATİK

x1=135;
x2=435;
x3=373;
x4=212;
y1=167;
y2=0;
y3=0;
y4=0;
y5=0;

% q1=0;
% q2=0;
% q3=0;
% q4=0;

C1=cosd(q1);
C2=cosd(q2);
C3=cosd(q3);
C4=cosd(q4);
S1=sind(q1);
S2=sind(q2);
S3=sind(q3);
S4=sind(q4);

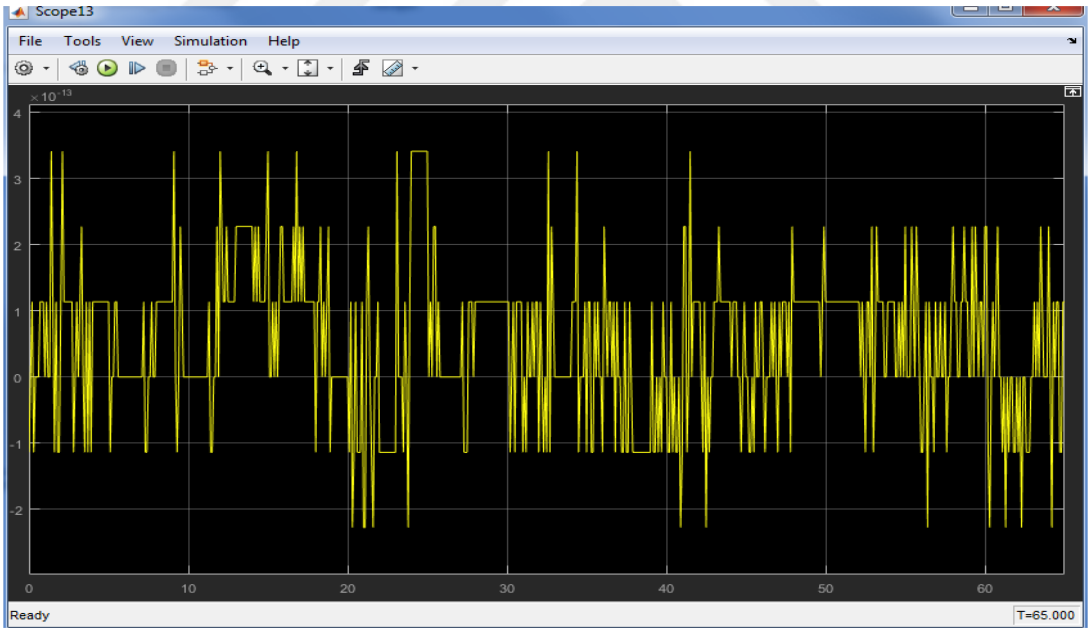

Px=C1*x1 + x4*(C4*(C1*C2*C3 - C1*S2*S3) - S4*(C1*C2*S3 + C1*C3*S2)) + x3*(C1*C2*C3 - C1*S2*S3) + C1*C2*x2

Py=S1*x1 + x4*(C4*(C2*C3*S1 - S1*S2*S3) - S4*(C2*S1*S3 + C3*S1*S2)) + x3*(C2*C3*S1 - S1*S2*S3) + C2*S1*x2

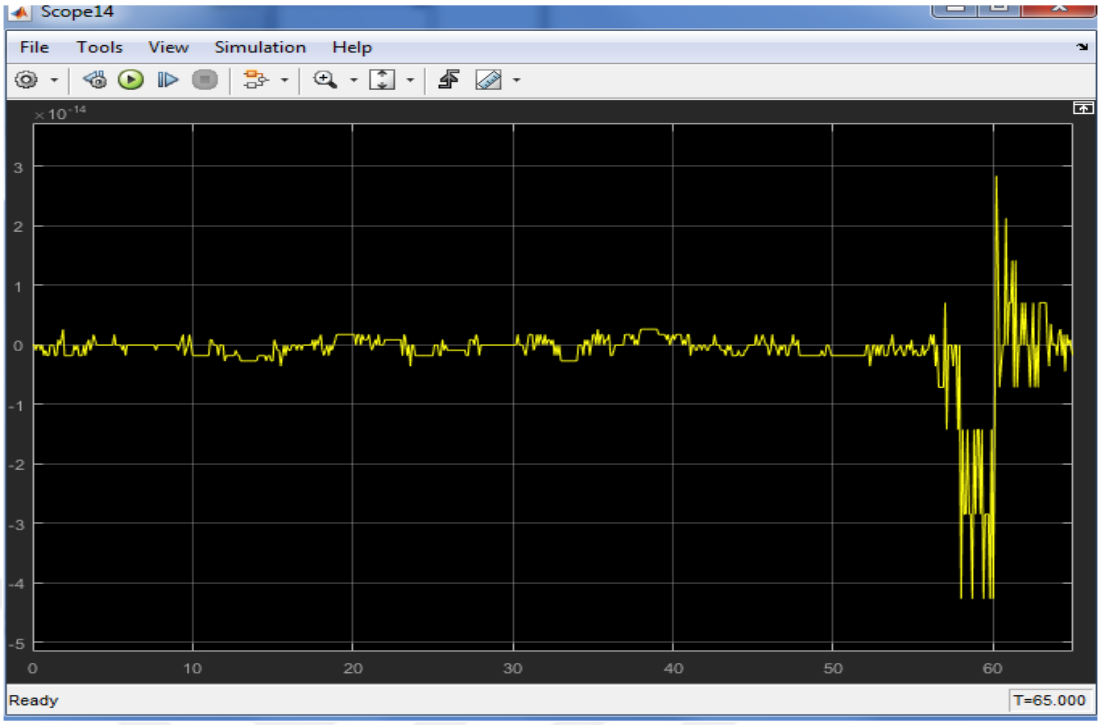
Pz=y1 + x4*(C4*(C2*S3 + C3*S2) - S4*(S2*S3 - C2*C3)) + x3*(C2*S3 + C3*S2) + S2*x2

a=q4;
```

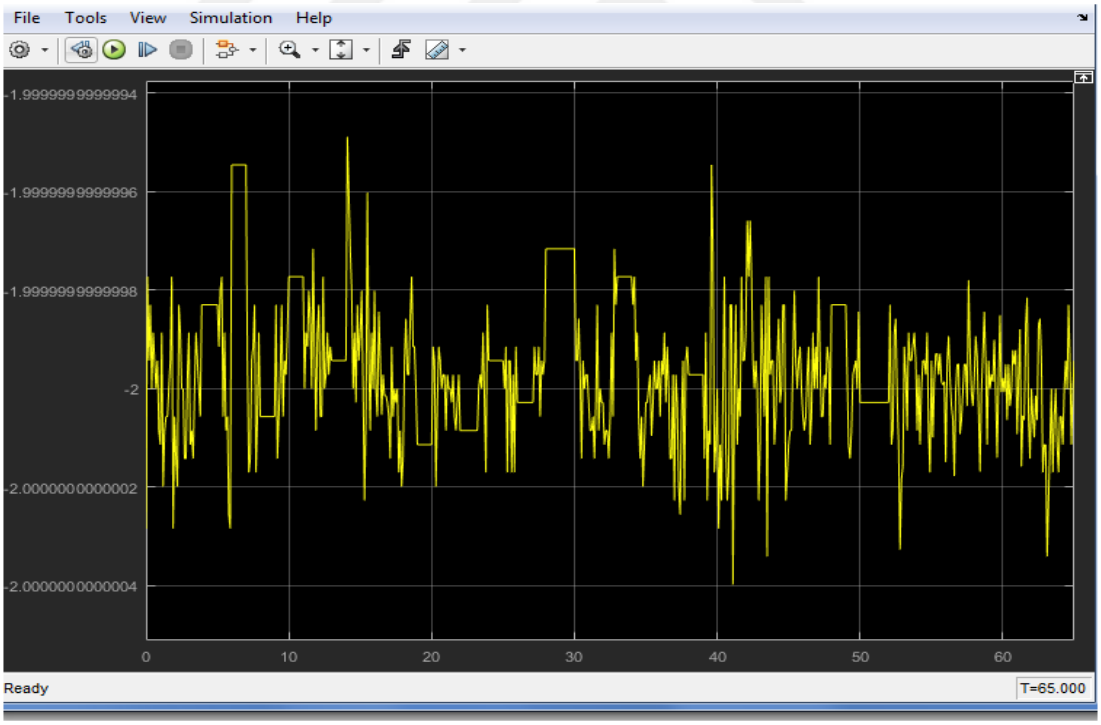
Şekil 4.70. Matlab ta İleri Kinematik Kodları



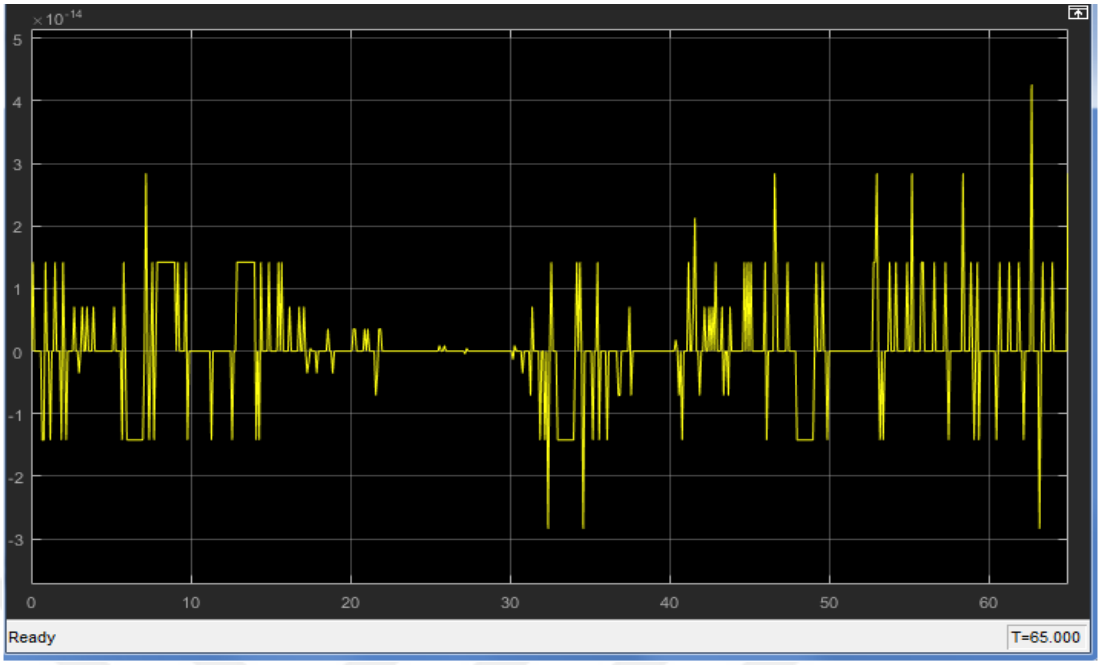
Şekil 4.71. q1 Açısı Hatası



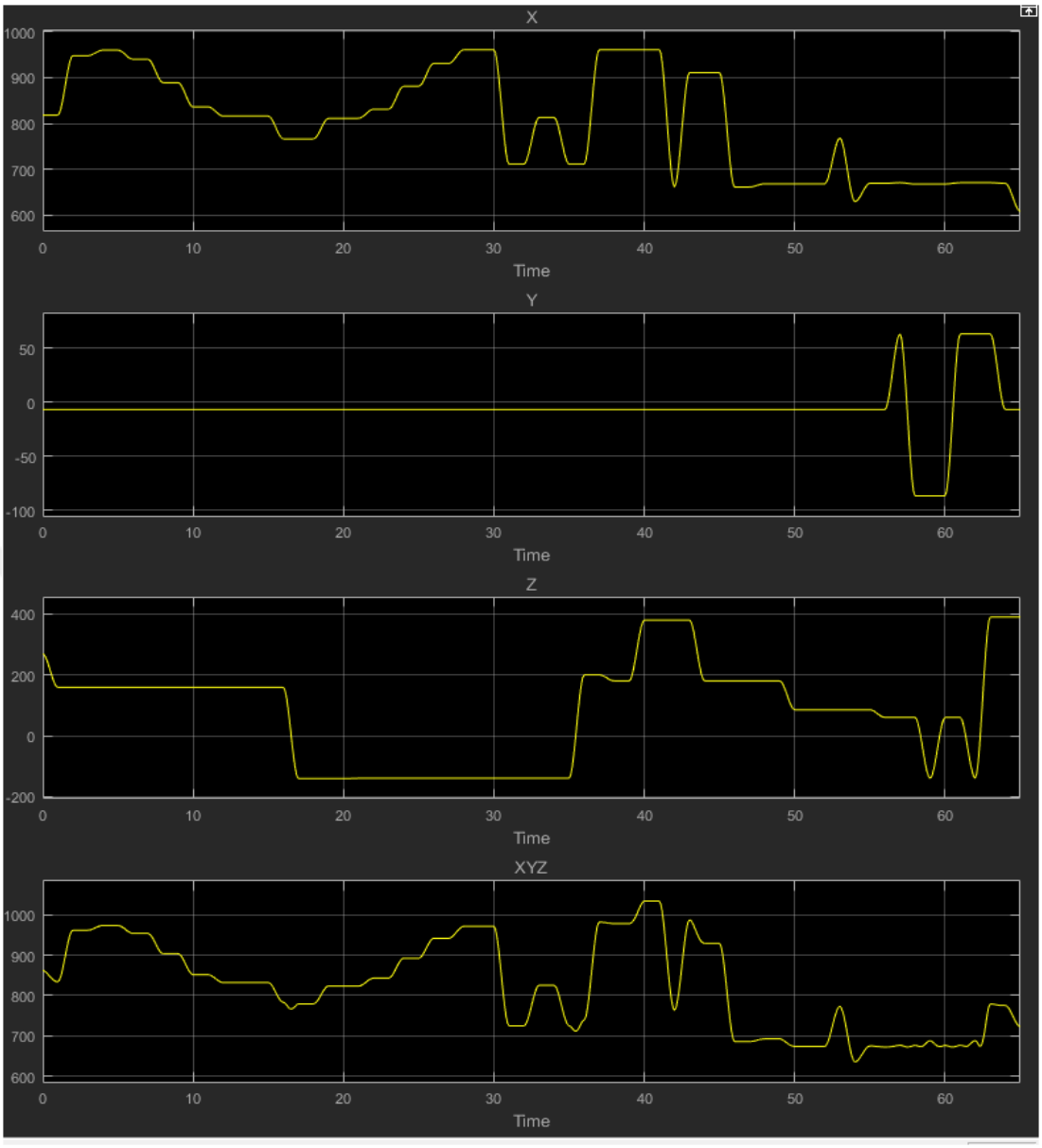
Şekil 4.72. q2 Açısı Hatası



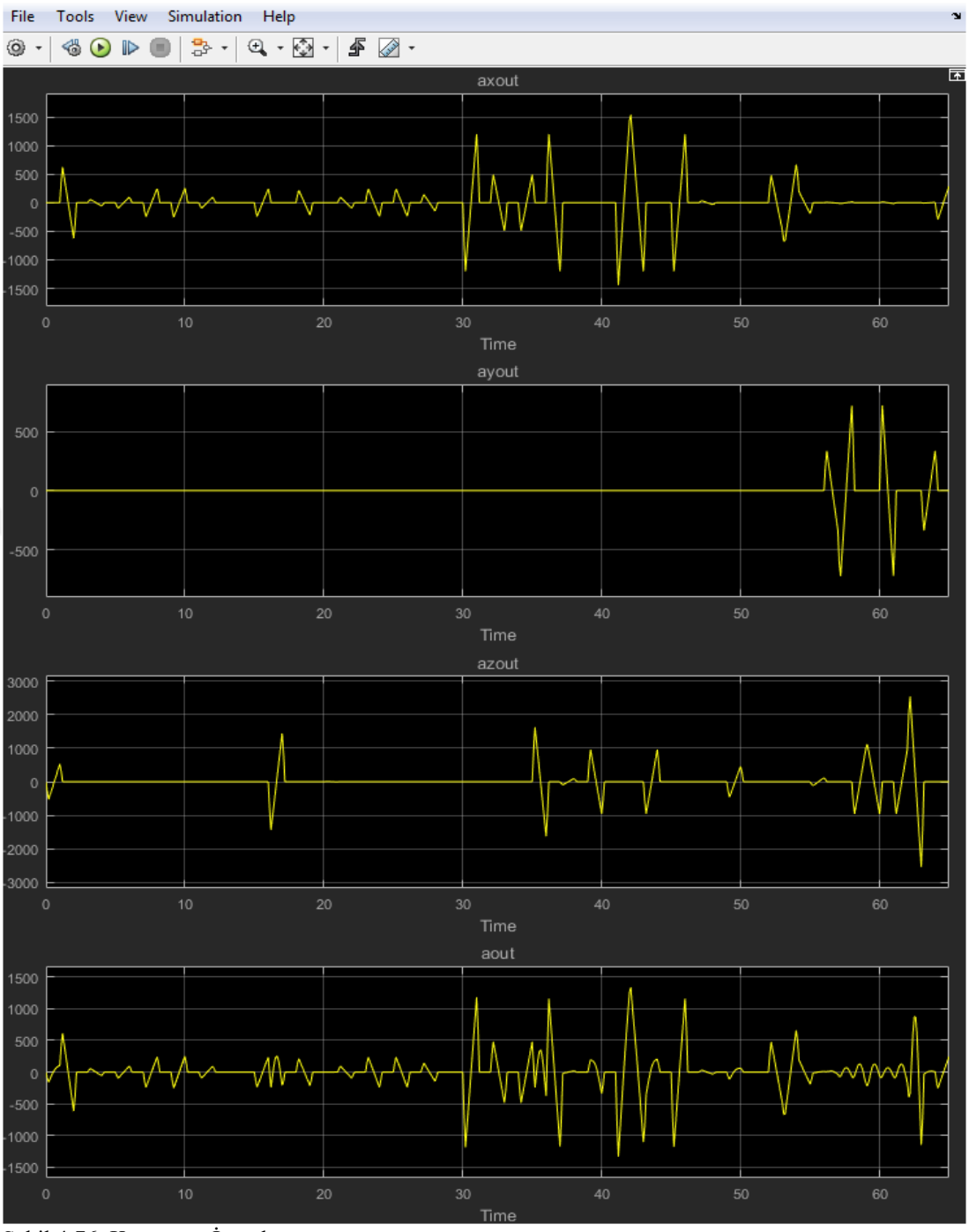
Şekil 4.73. q3 Açısı Hatası



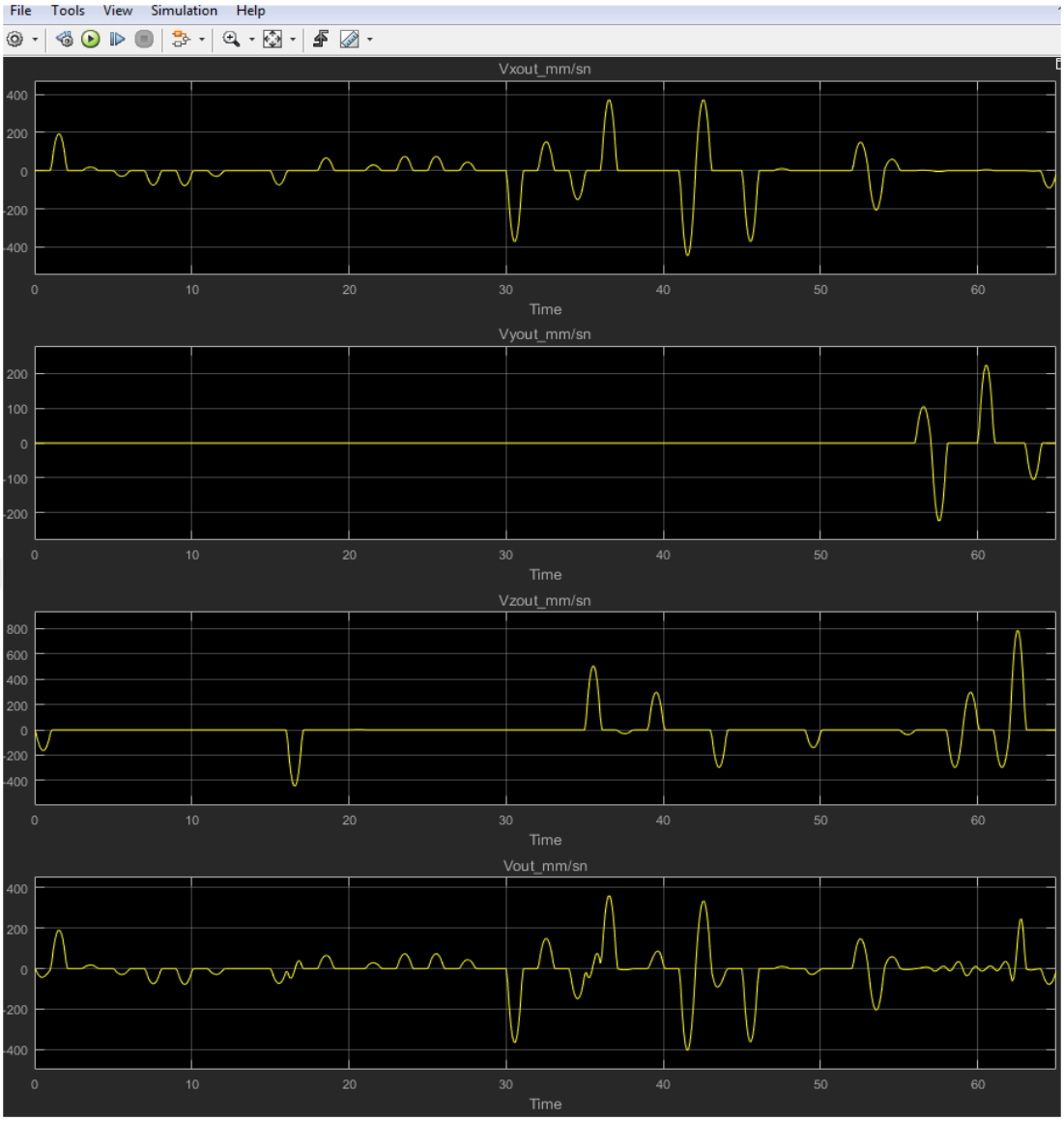
Şekil 4.74. q4 Açısı Hatası



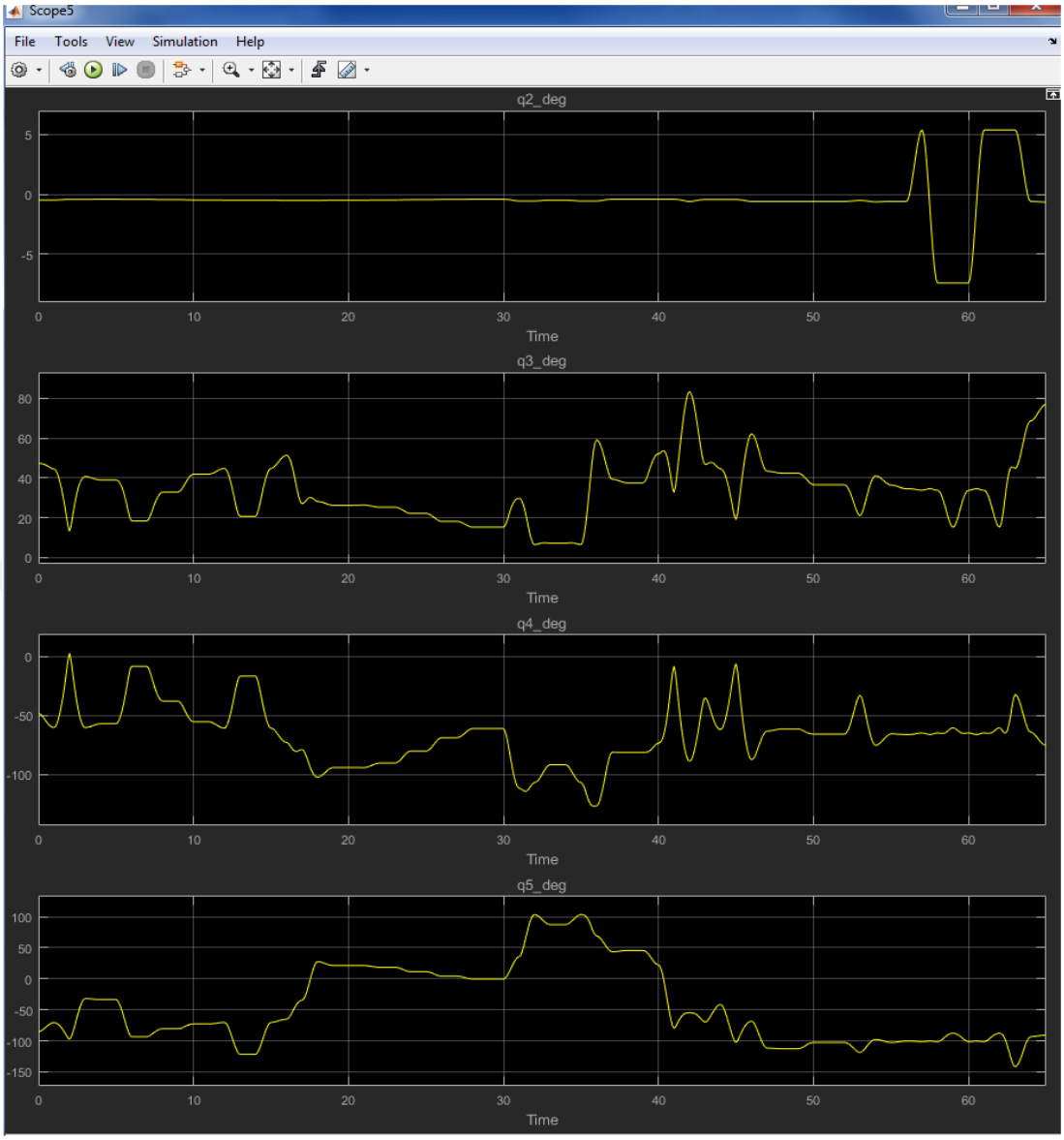
Şekil 4.75. Kartezyen Hareketler



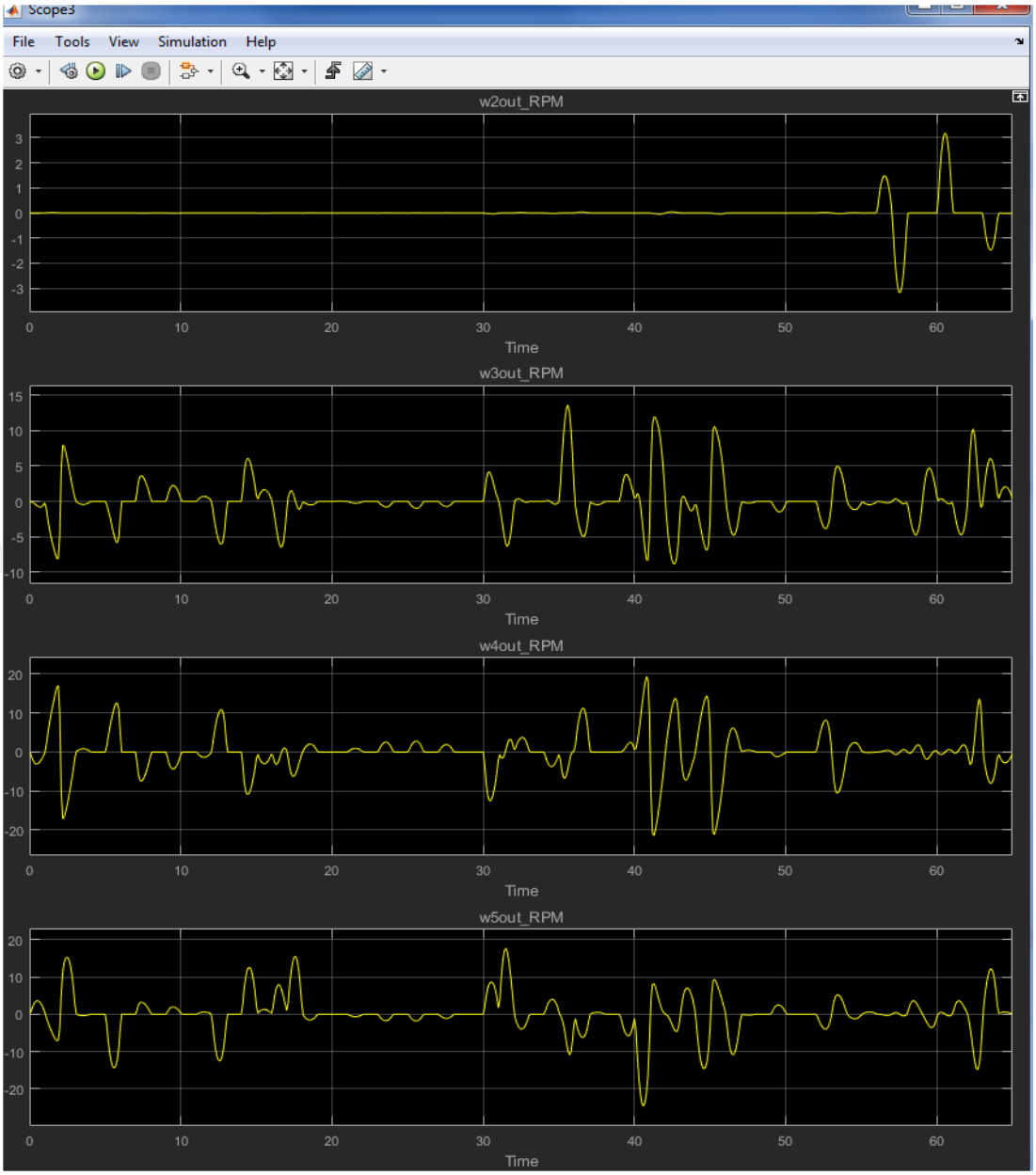
Şekil 4.76. Kartezyen İvmeler



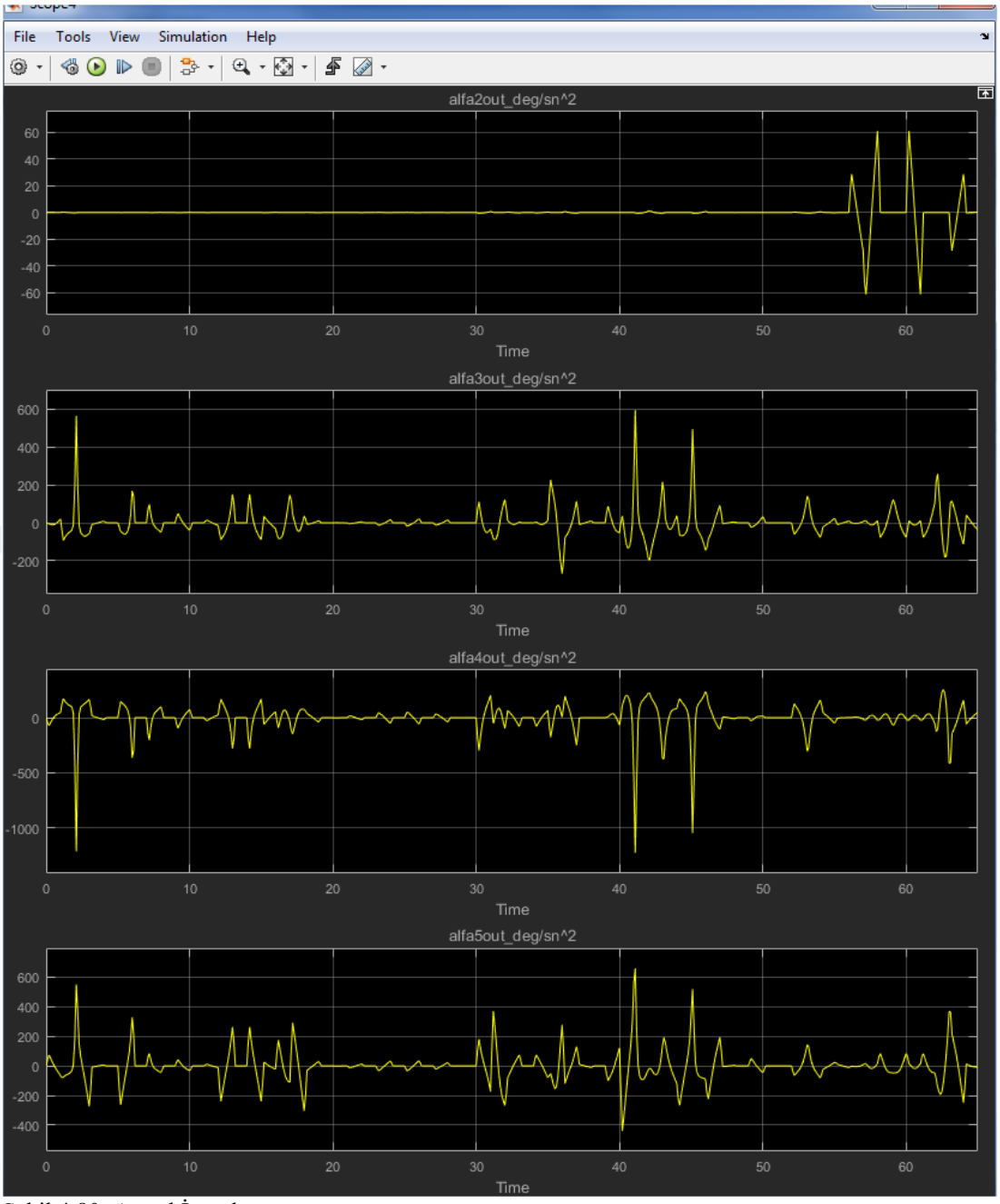
Şekil 4.77. Kartezyen Hızlar



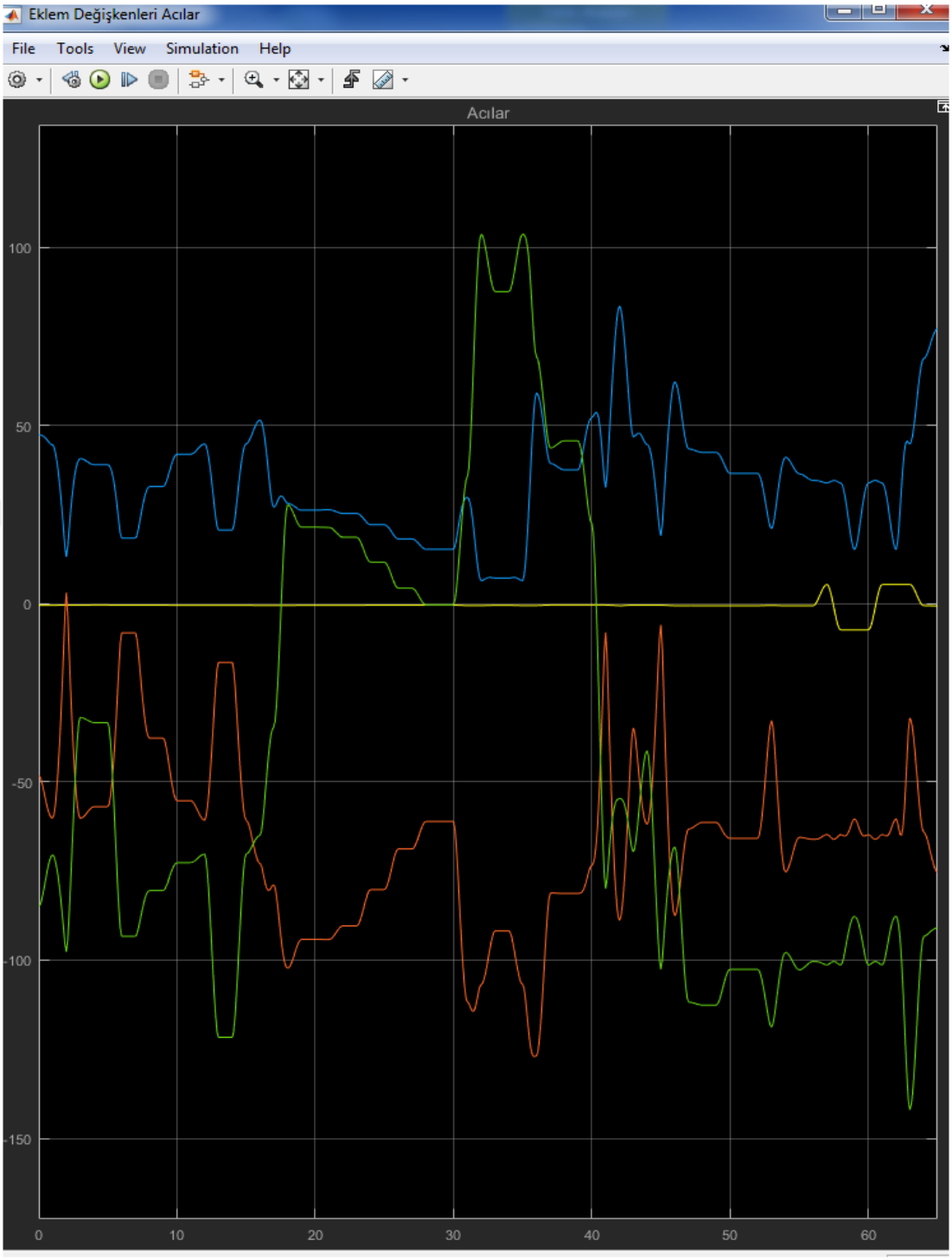
Şekil 4.78. Açısal Hareketler



Şekil 4.79. Açısal Hızlar



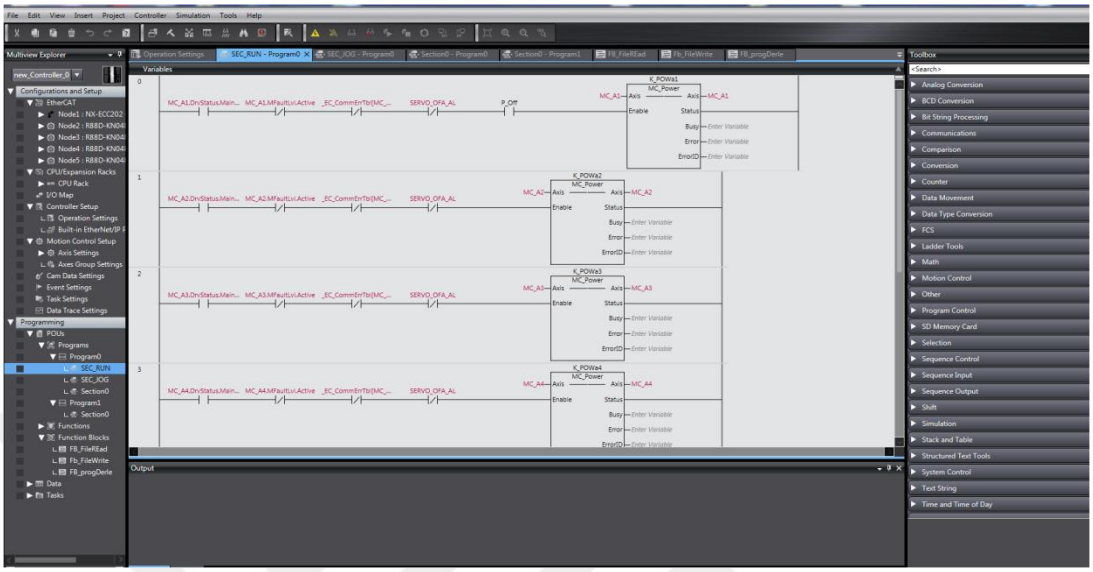
Şekil 4.80. Açısal İvmeler



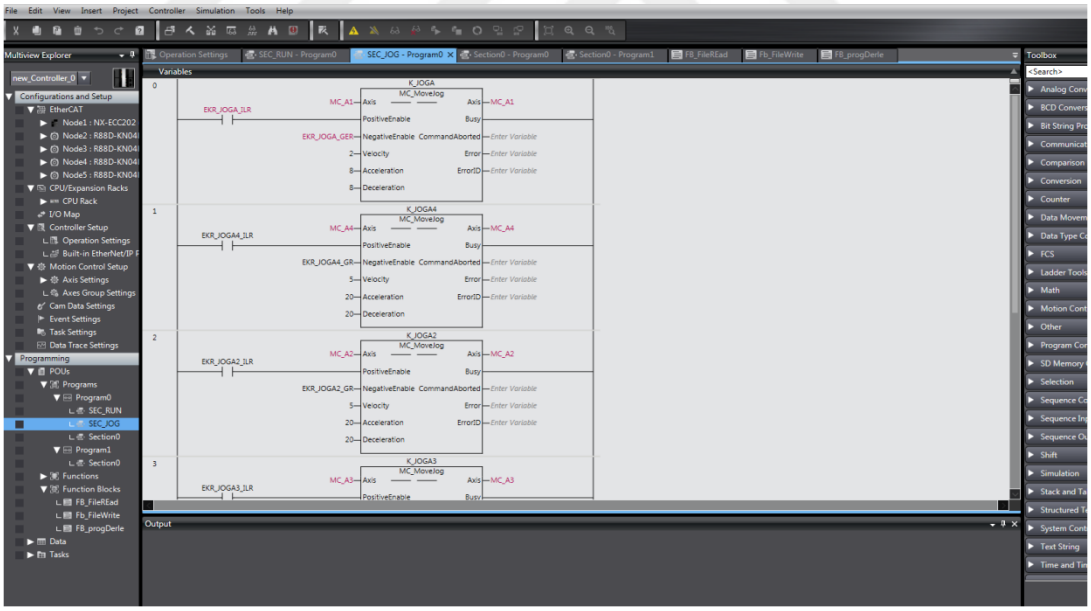
Şekil 4.81. Acılar üst üste görünümü

4.2.2. SysmacStudio program

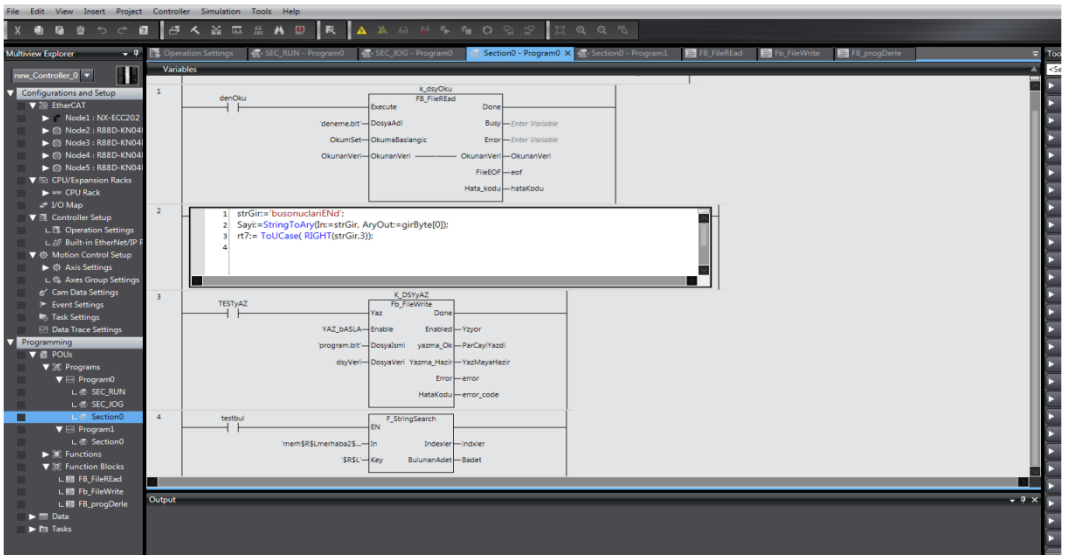
Aşağıda program ile ilgili çıktılar görünmektedir.



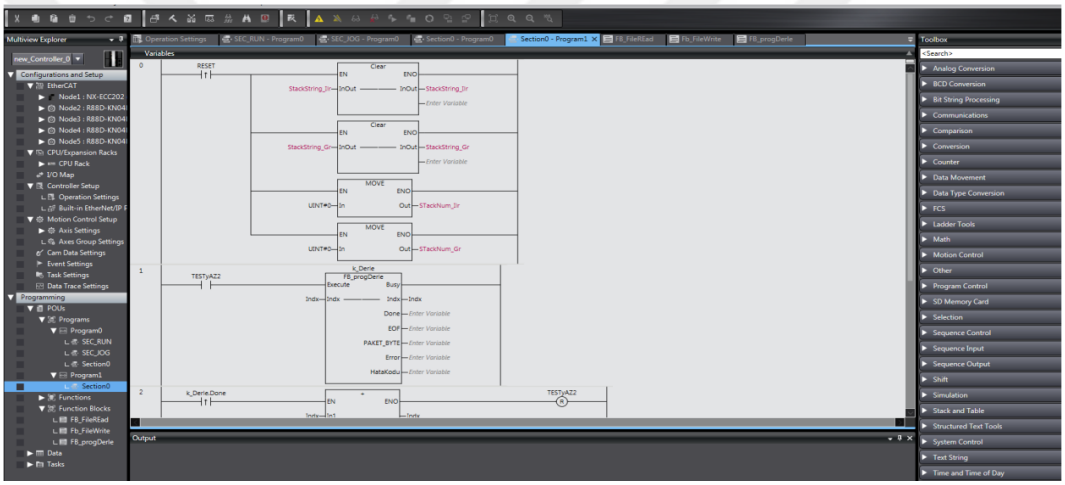
Şekil 4.82. Servoları Run alma



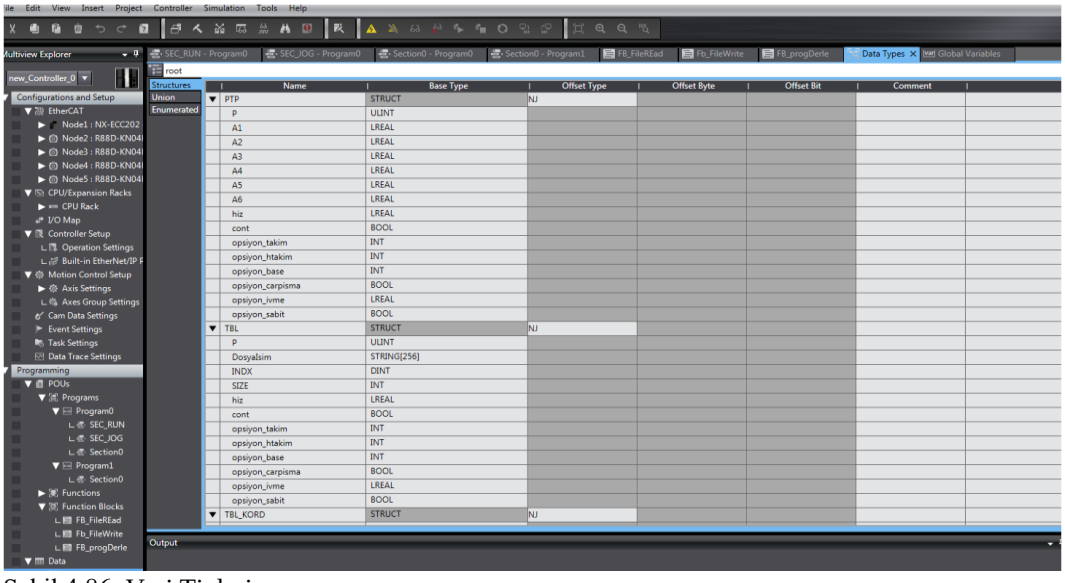
Şekil 4.83. JogMod



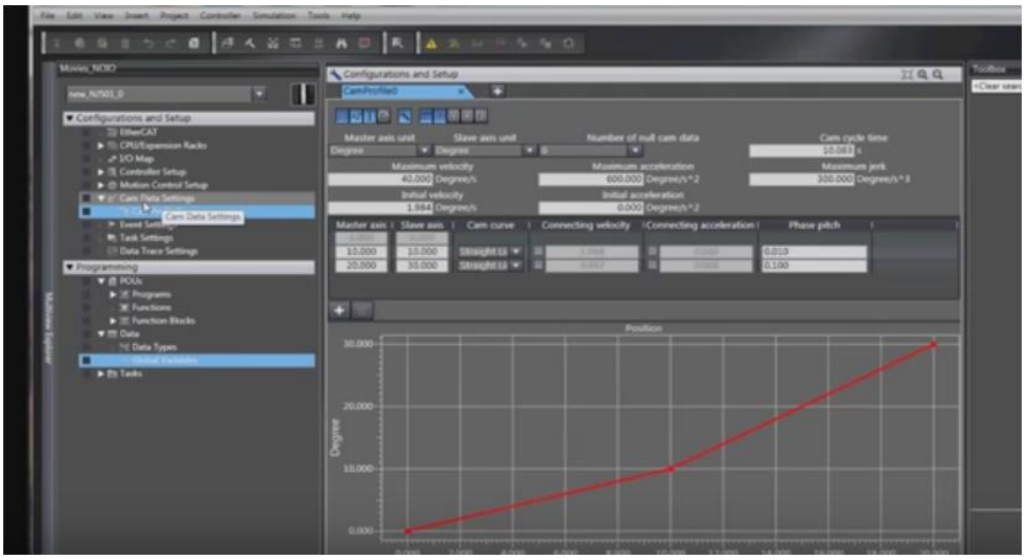
Şekil 4.84. Program



Şekil 4.85. Program (devam)



Şekil 4.86. Veri Tipleri

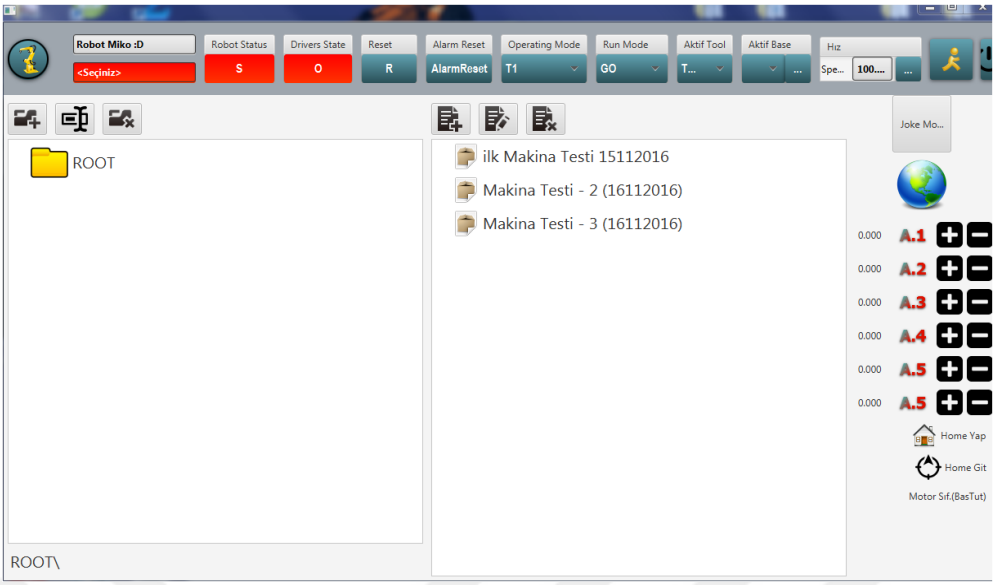


Şekil 4.87. SysmacStudio'nun Grafik Ara yüzü

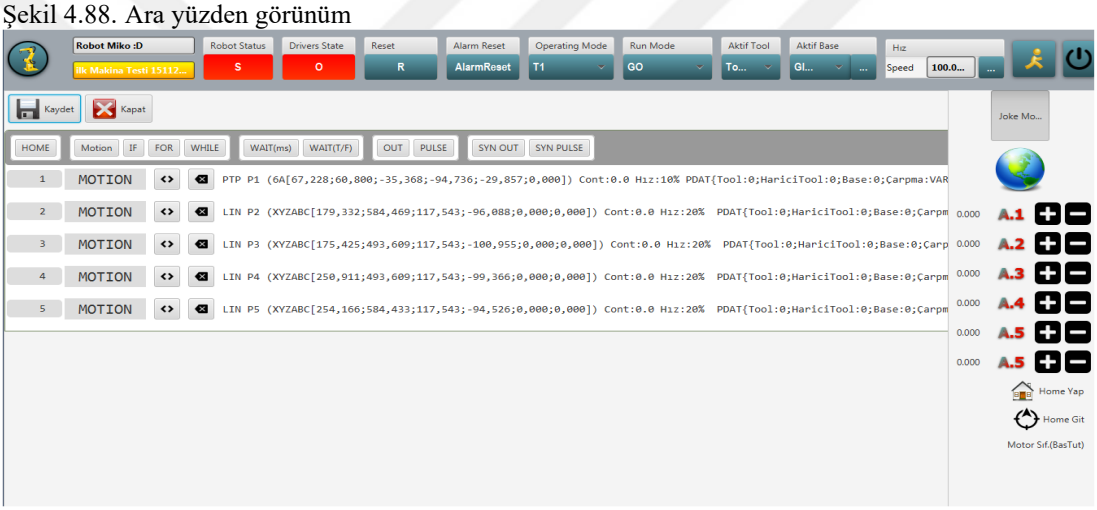
4.2.3. Ara yüz oluşturmak

Ara yüz Java programında oluşturuldu ve Şekil 4,85'de görünmektedir. Operatör programı farklı hareket seçerek oluşturabilir. Hareket türleri aşağıda sıralanmıştır.

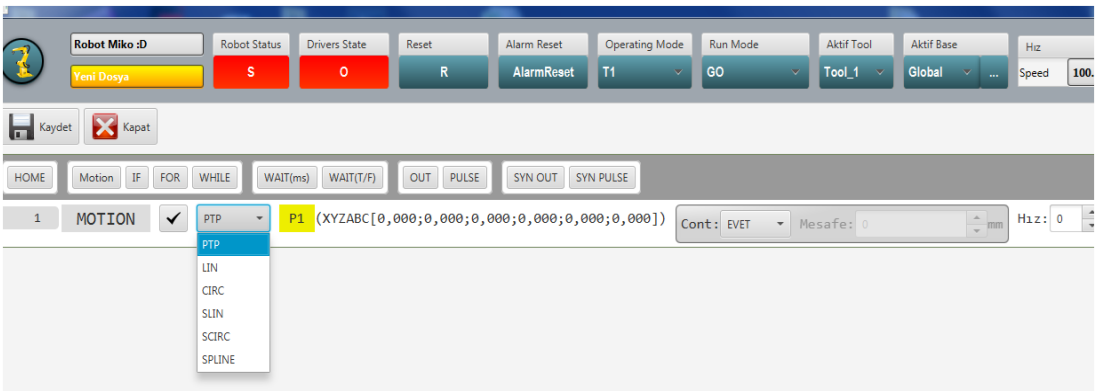
1. PTP (Point to Point) noktadan noktaya hareket türü ve iki nokta arsını acısal olarak hareket eder.
2. LIN (Lineer) iki nokta arasını N tane noktaya bölerek ve her bir N nokta ters kinematiğe girerek acılara döndürülerek servo motor sürücülerine iletilir.
3. CIRC (Circle) 3 noktadan gecen daire takip eder



Şekil 4.88. Ara yüzden görünüm



Şekil 4.89. Arayüz kullanılarak hazırlanan bir hareket reçetesi.



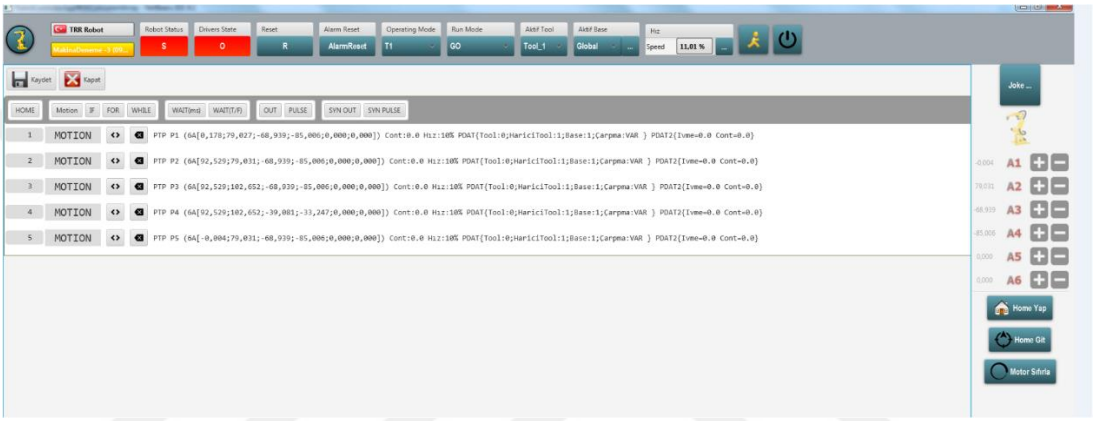
Şekil 4.90. Arayüzde kullanılabilecek hareket türleri..

4.3. Deneysel Çalışma

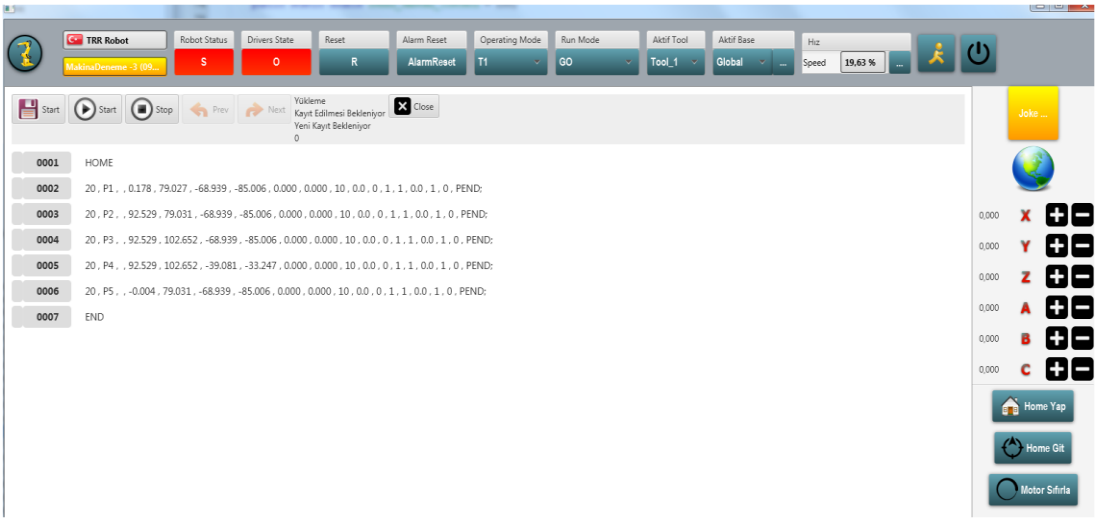
Hareket Türleri

1. PTP Hareket
2. LIN Hareket
3. CIRC Hareket
4. SPLINE Hareket olarak 4 çeşit hareket türü vardır.

   Bu deneysel çalışmada 5 adet PTP hareket incelenecek.

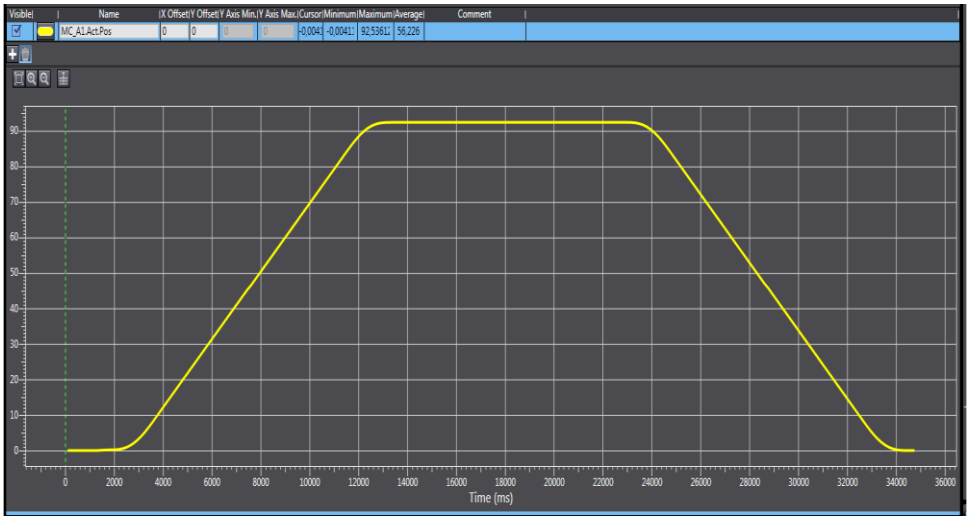


Şekil 4.91. Deneysel çalışma için arayüzde hazırlanan hareket reçetesi.



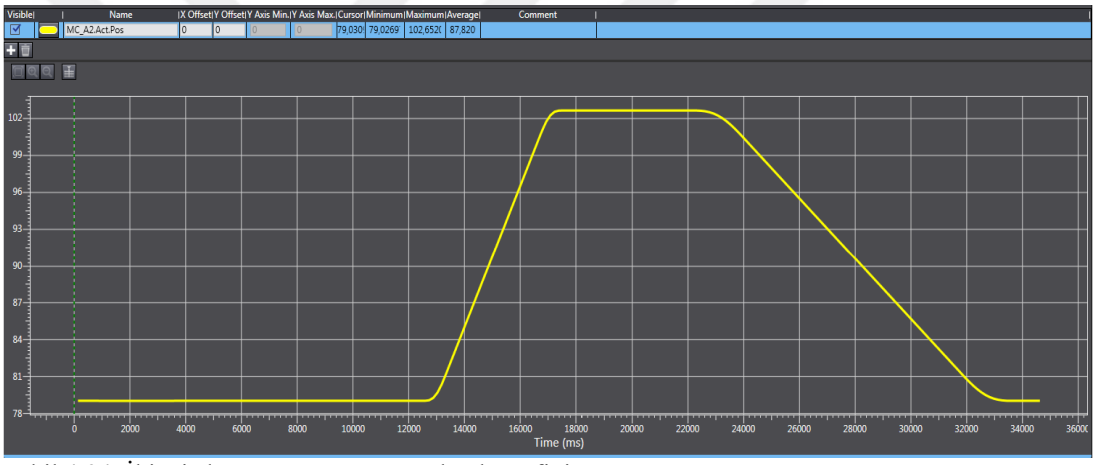
Şekil 4.92. Deneysel çalışma hazırlanan hareket reçetesinin robota gönderilecek formatı.

Aşağıdaki grafikte birinci eksenin açının zamana bağlı grafiği görünmektedir. (Dikey eksen acı(deg), yatay eksen zamanı(ms) vermektedir.)



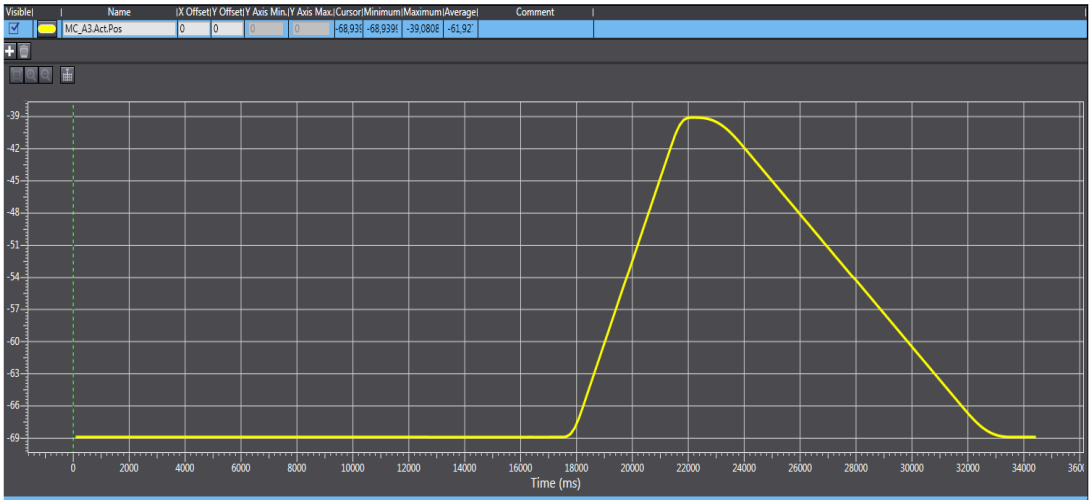
Şekil 4.93. Birinci eksen açısının zamana bağlı grafiği

Aşağıdaki grafikte ikinci eksenin açının zamana bağlı grafiği görünmektedir. (Dikey eksen acı(deg), yatay eksen zamanı(ms) vermektedir.)



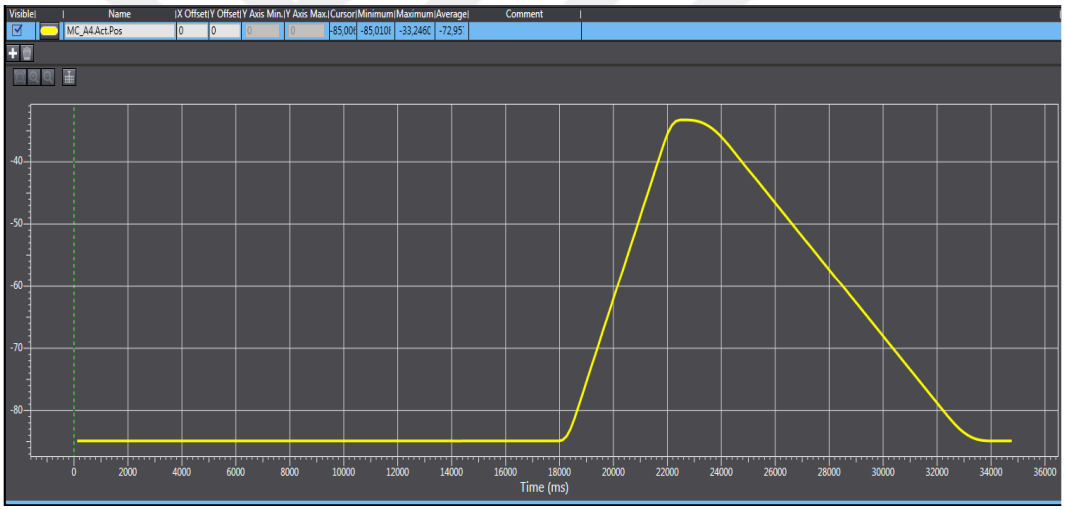
Şekil 4.94. İkinci eksen açısının zamana bağlı grafiği

Aşağıdaki grafikte üçüncü eksenin açının zamana bağlı grafiği görünmektedir. (Dikey eksen acı(deg), yatay eksen zamanı(ms) vermektedir.)



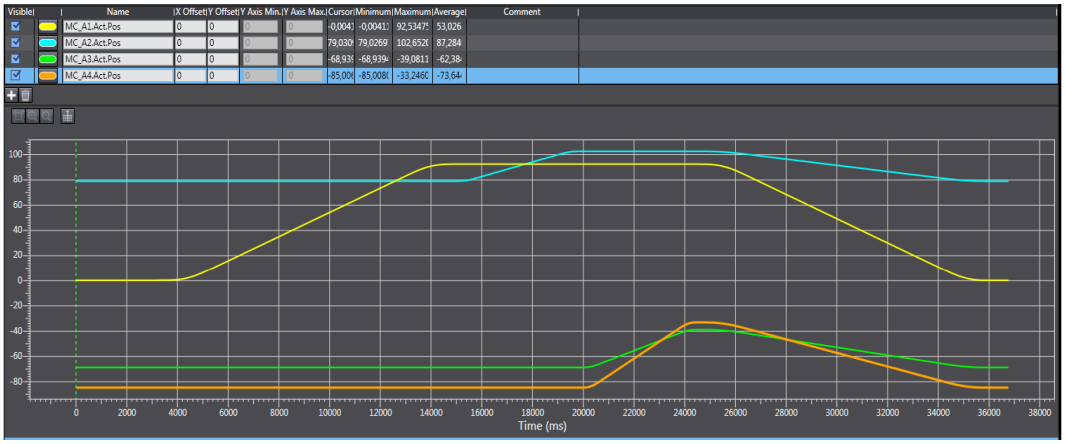
Şekil 4.95. Üçüncü eksen açısının zamana bağlı grafiği

Aşağıdaki grafikte dördüncü eksenin açının zamana bağlı grafiği görünmektedir. (Dikey eksen acı(deg), yatay eksen zamanı(ms) vermektedir.)



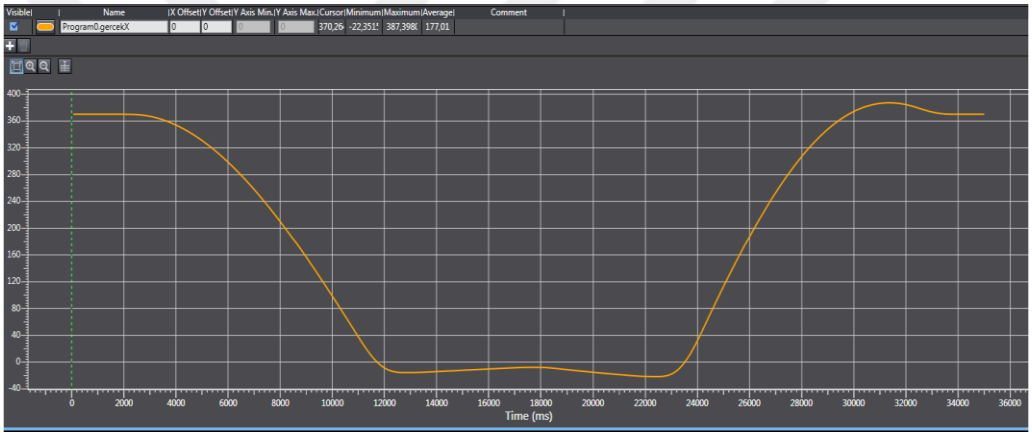
Şekil 4.96. Dördüncü eksen açısının zamana bağlı grafiği

Aşağıdaki grafikte dört ekseninde açılarının zamana bağlı grafiği görünmektedir. (Dikey eksen açı(deg), yatay eksen zamanı(ms) vermektedir.)



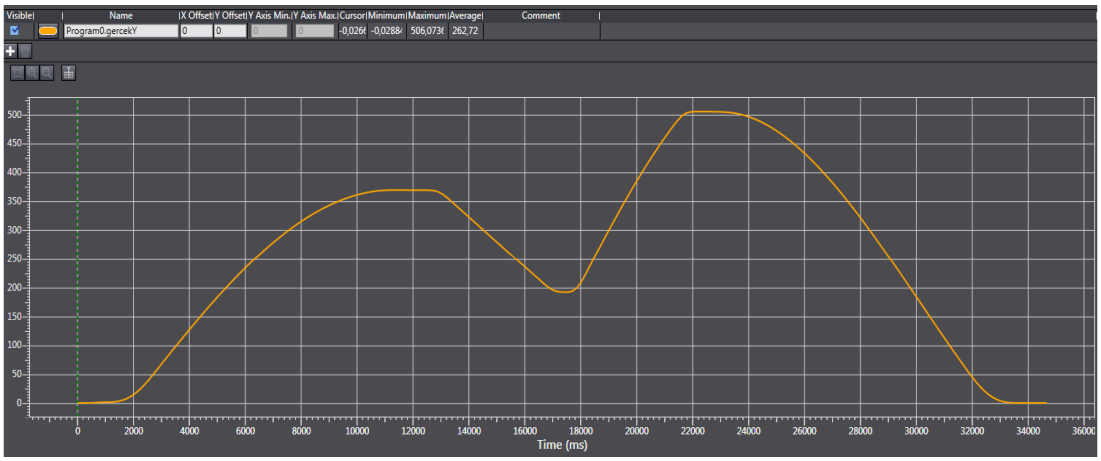
Şekil 4.97. Dört eksenin acılarının zamana bağlı grafiği

Aşağıdaki grafikte Kartezyen X eksenin zamana bağlı grafiği görünmektedir. (Dikey eksen acı(mm), yatay eksen zamanı(ms) vermektedir.)



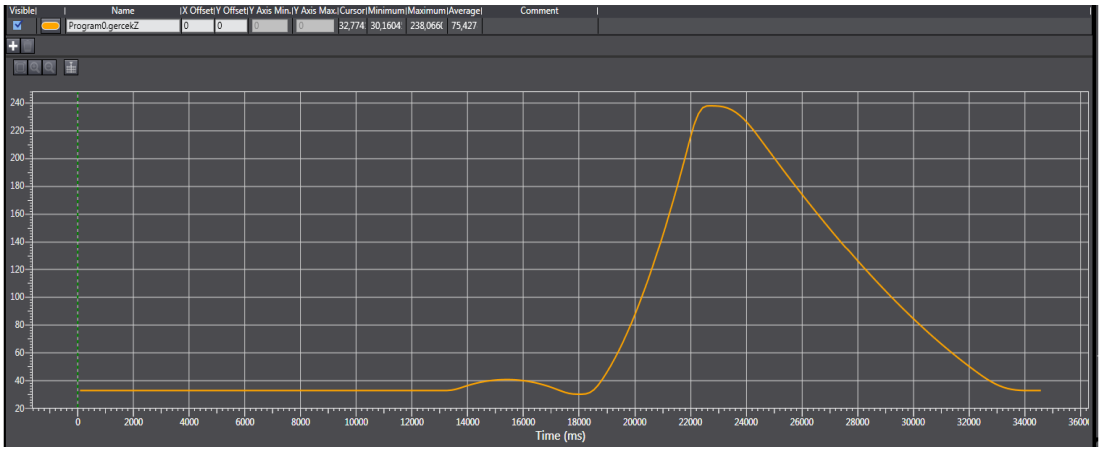
Şekil 4.98. Kartezyen X eksenin zamana Bağlı Grafiği

Aşağıdaki grafikte Kartezyen Y eksenin zamana bağlı grafiği görünmektedir. (Dikey eksen acı(mm), yatay eksen zamanı(ms) vermektedir.)



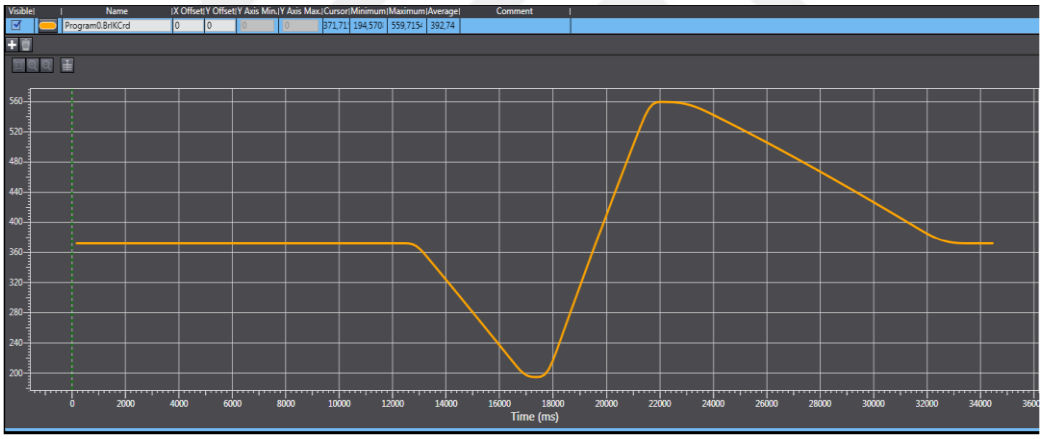
Şekil 4.99. Kartezyen Y eksenin zamana Bağlı Grafiği

Aşağıdaki grafikte Kartezyen Z eksenin zamana bağlı grafiği görünmektedir. (Dikey eksen açı (mm), yatay eksen zamanı (ms) vermektedir.)



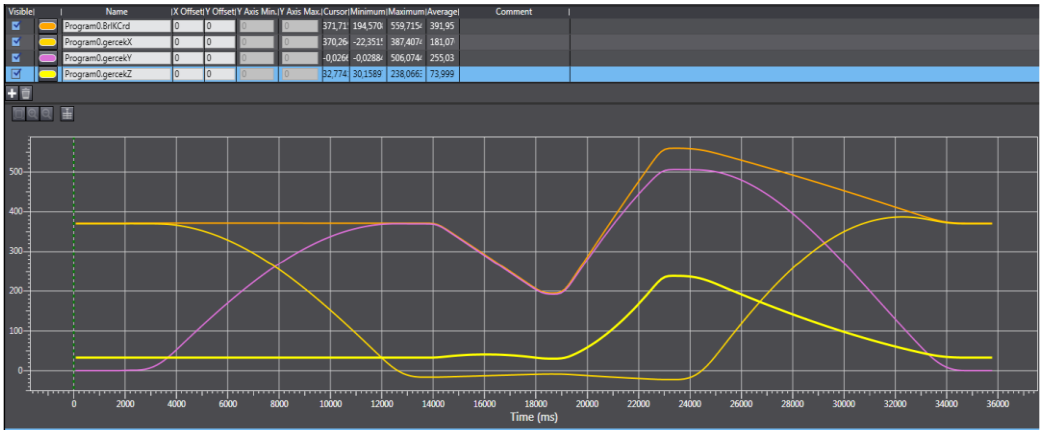
Şekil 4.100. Kartezyen Z eksenin zamana Bağlı Grafiği

Aşağıdaki grafikte Kartezyen X, Y, Z eksenlerinin bileşke konumun zamana bağlı grafiği görünmektedir. (Dikey eksen acı (mm), yatay eksen zamanı (ms) vermektedir.)



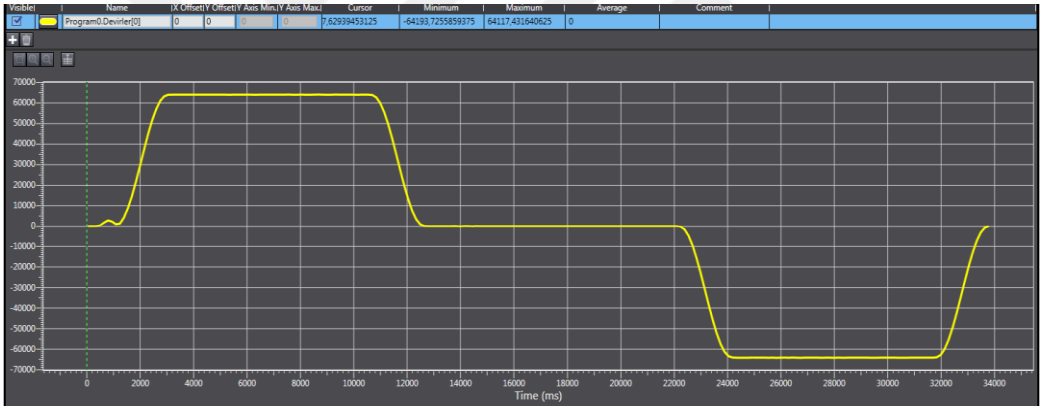
Şekil 4.101. Kartezyen X,Y,Z eksenin bileşke konumunun zamana Bağlı Grafiği

Aşağıdaki grafikte Kartezyen X, Y, Z eksenleri konumun zamana bağlı grafiği görünmektedir. (Dikey eksen açı (mm), yatay eksen zamanı (ms) vermektedir.)



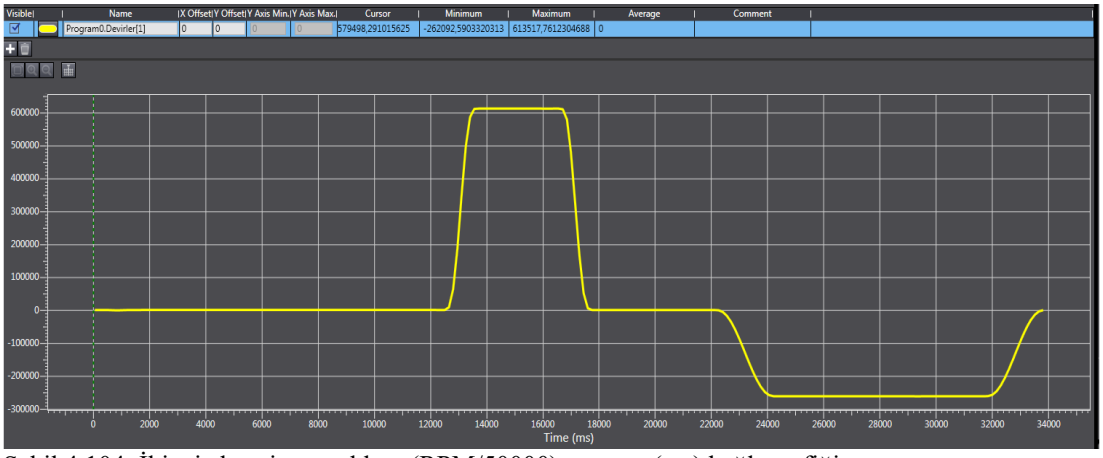
Şekil 4.102. Kartezyen X,Y,Z eksenin konumun zamana Bağlı Grafiği

Aşağıdaki grafikte birinci eksenin acısal hızı zamana bağlı olarak verilmektedir. (Dikey eksen acısal (RPM), yatay eksen zamanı (ms)). Grafik daha iyi görünmesi için yatay eksendeki hızlar 5000 kat daha büyütülmüştür. Gerçek hız=70000/5000=14RPM.



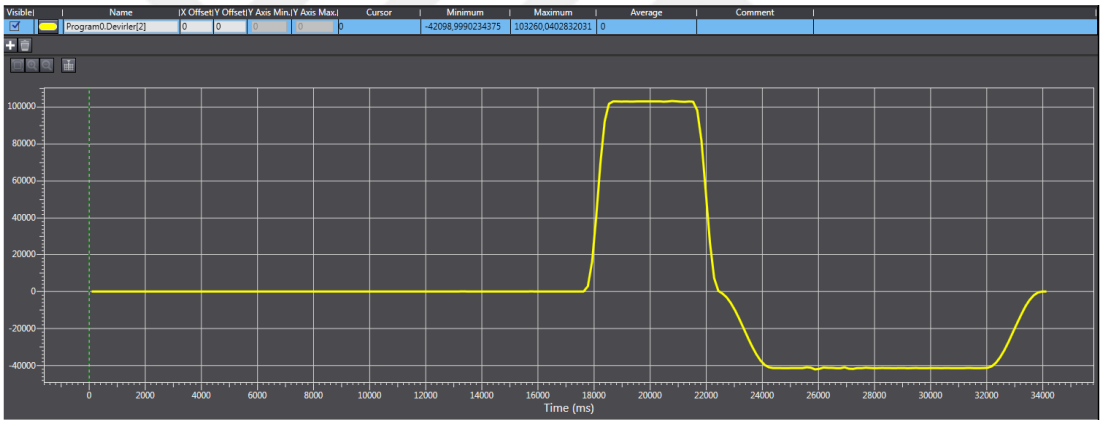
Şekil 4.103. Birinci eksenin acısal hızı (RPM/5000) zamana (ms) bağlı grafiği

Aşağıdaki grafikte ikinci eksenin Acısal hızı zamana bağlı olarak verilmektedir. (Dikey eksen açısal(RPM), yatay eksen zamanı(ms)). Grafik daha iyi görünmesi için yatay eksendeki hızlar 5000 kat daha büyütülmüştür. Gerçek hız=600000/50000=12RPM.



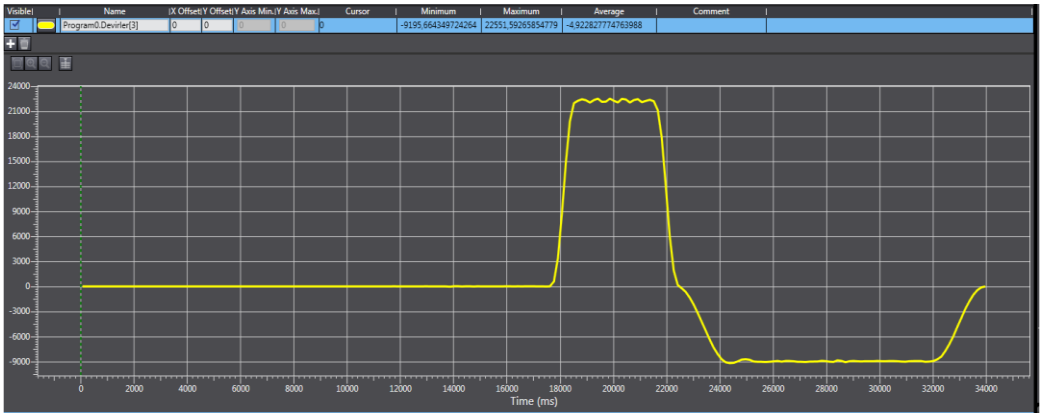
Şekil 4.104. İkinci eksenin acısal hızı (RPM/50000) zamana (ms) bağlı grafiği

Aşağıdaki grafikte ücüncü eksenin Acısal hızı zamana bağlı olarak verilmektedir. (Dikey eksen acısal(RPM), yatay eksen zamanı(ms)). Grafik daha iyi görünmesi için yatay eksendeki hızlar 5000 kat daha büyütülmüştür. Gerçek hız=100000/5000=20RPM.



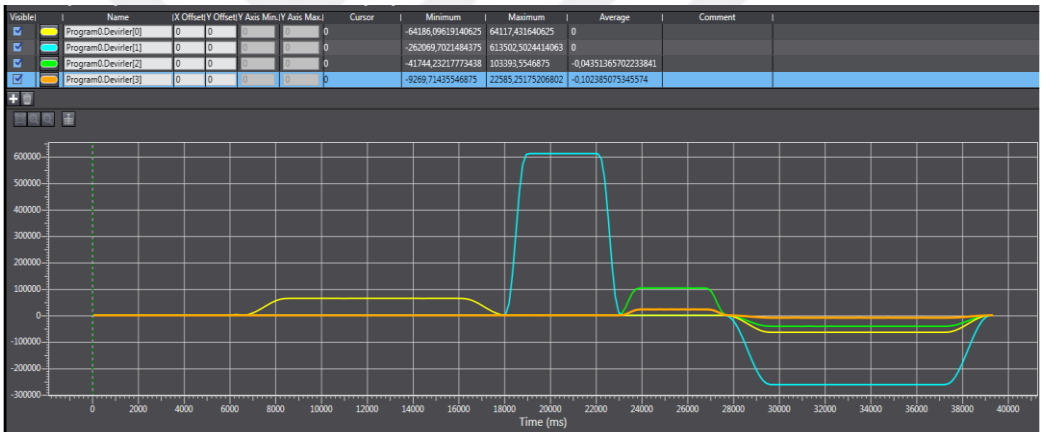
Şekil 4.105. Üçüncü eksenin acısal hızı (RPM/5000) zamana (ms) bağlı grafiği

Aşağıdaki grafikte dördüncü eksenin açısal hızı zamana bağlı olarak verilmektedir. (Dikey eksen acısal(RPM), yatay eksen zamanı(ms)). Grafik daha iyi görünmesi için yatay eksendeki hızlar 5000 kat daha büyütülmüştür. Gerçek hız=24000/5000=4.8RPM.



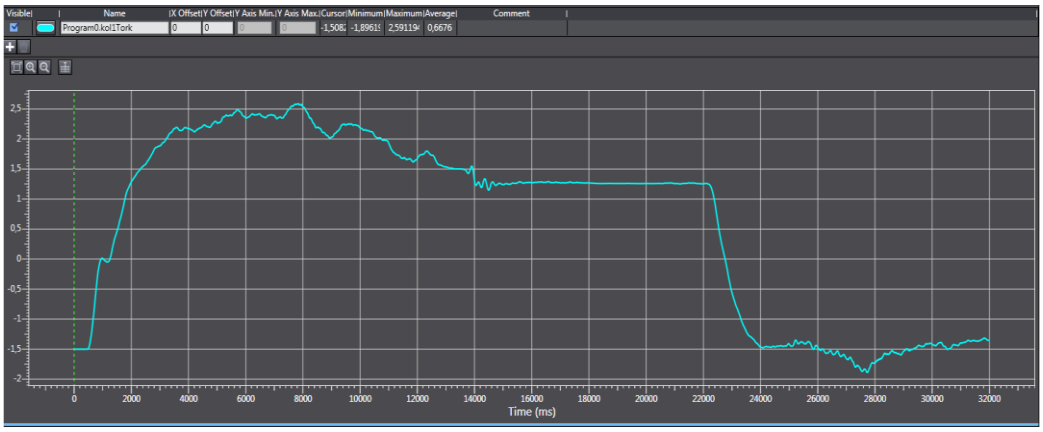
Şekil 4.106. Dördüncü eksenin acısal hızı(RPM/5000) zamana(ms) bağlı grafiği

Aşağıdaki grafikte tüm eksenlerin Acısal hızları zamana bağlı olarak verilmektedir. (Dikey eksen açısal(RPM), yatay eksen zamanı(ms)). Grafik daha iyi görünmesi için yatay eksendeki hızlar 5000 kat daha büyütülmüştür. Gerçek hız=24000/5000=4.8RPM.



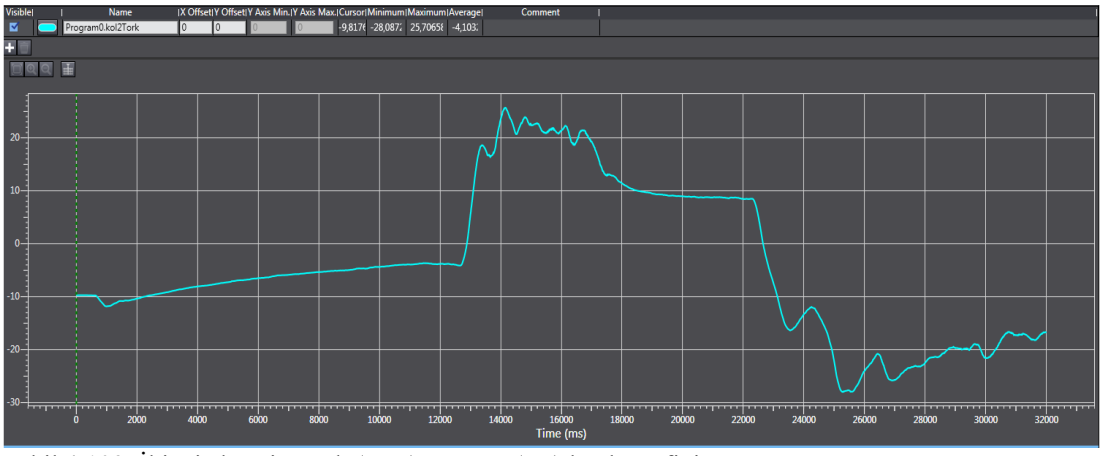
Şekil 4.107. Tüm eksenlerin acısal hızları (RPM) zamana (ms) bağlı grafiği

Aşağıdaki grafikte birinci eksenin torku, zamana bağlı olarak verilmektedir. (Dikey eksen tork(N.m), yatay eksen zamanı(ms)).



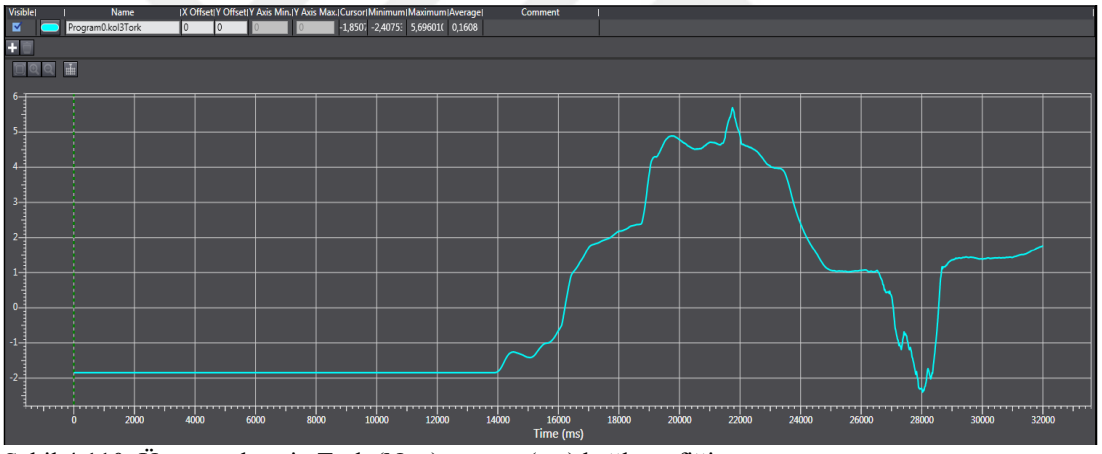
Şekil 4.108. Birinci eksenin Tork (N.m) zamana (ms) bağlı grafiği

Aşağıdaki grafikte ikinci ekseninin torkun zamana bağlı olarak verilmektedir. (Dikey eksen tork(N.m), yatay eksen zamanı(ms)).



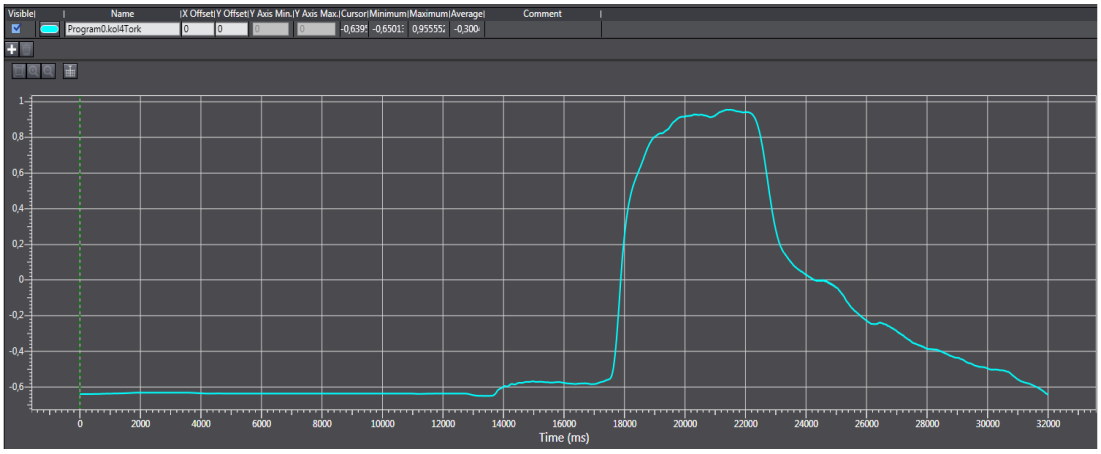
Şekil 4.109. İkinci eksenin Tork (N.m) zamana (ms) bağlı grafiği

Aşağıdaki grafikte üçüncü ekseninin torkun zamana bağlı olarak verilmektedir. (Dikey eksen tork(N.m), yatay eksen zamanı(ms)).



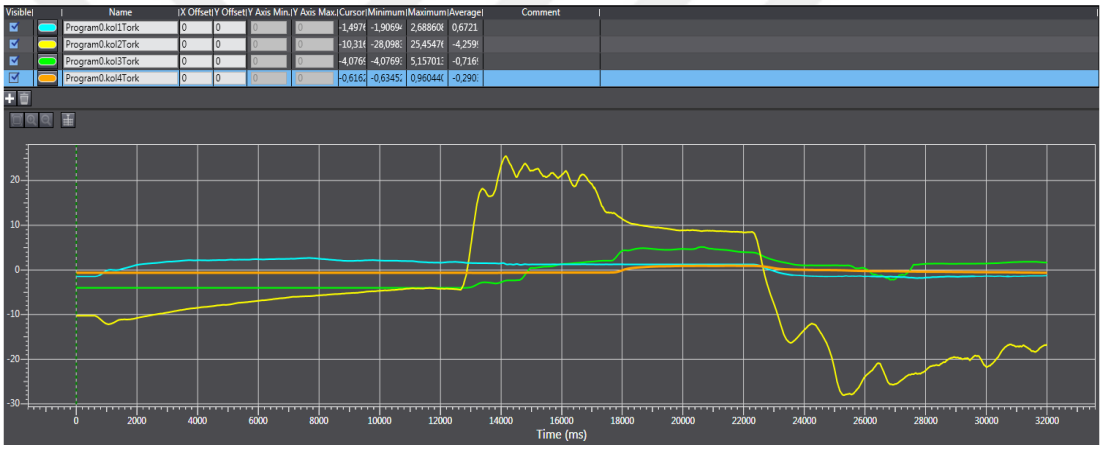
Şekil 4.110. Üçüncü eksenin Tork (N.m) zamana(ms) bağlı grafiği

Aşağıdaki grafikte dördüncü ekseninin torkun zamana bağlı olarak verilmektedir. (Dikey eksen tork(N.m), yatay eksen zamanı(ms)).



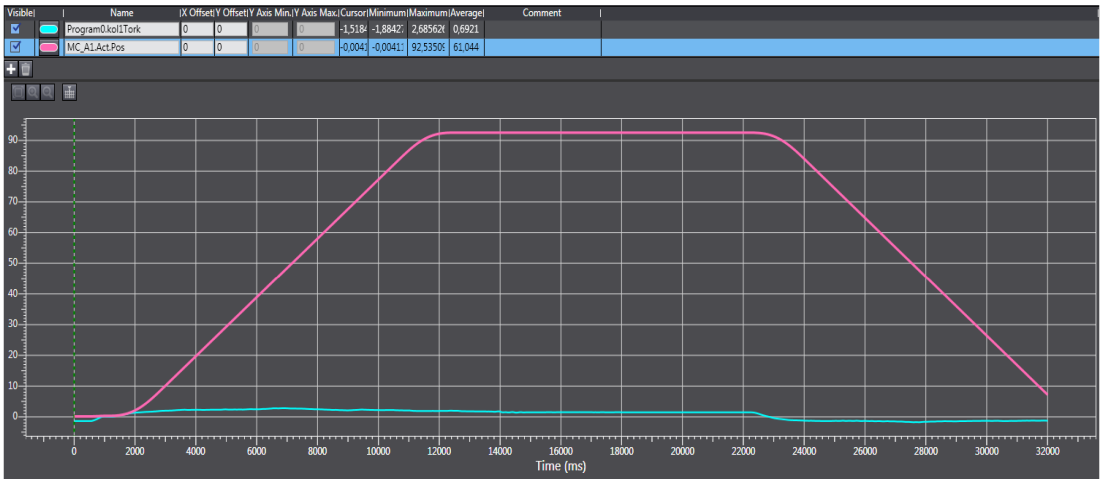
Şekil 4.111. Dördüncü eksenin Tork (N.m) zamana (ms) bağlı grafiği

Aşağıdaki grafikte tüm eksenlerin torkunun zamana bağlı olarak verilmektedir. (Dikey eksen tork(N.m), yatay eksen zamanı(ms)).



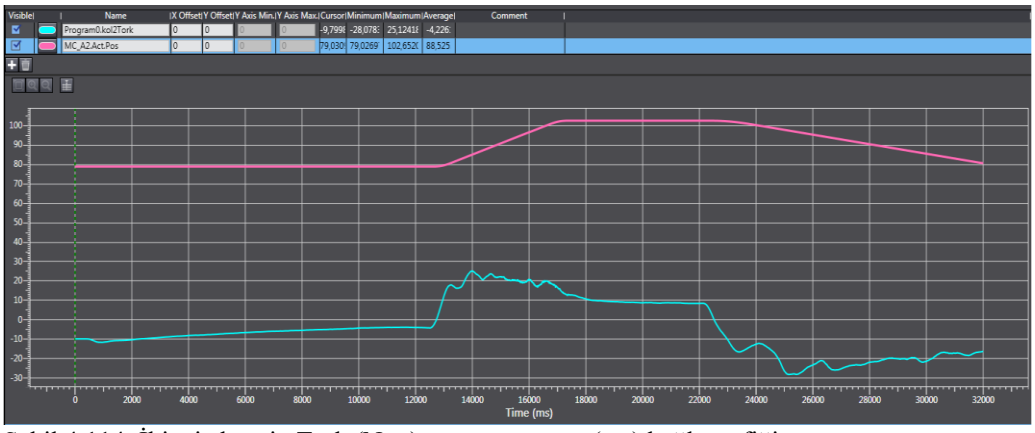
Şekil 4.112. Tüm eksenlerin Tork (N.m) zamana (ms) bağlı grafiği

Aşağıdaki grafikte birinci eksenin tork ve acının zamana bağlı olarak verilmektedir.



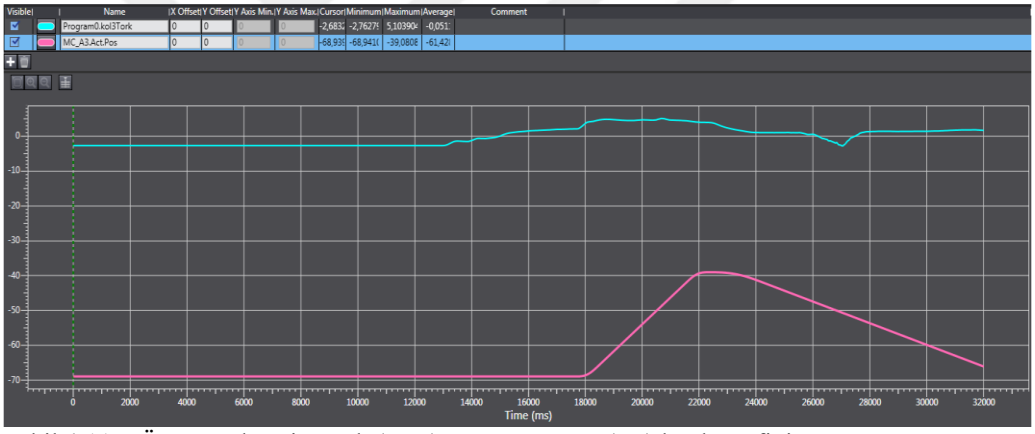
Şekil 4.113. Birinci eksenin Tork (N.m), acının zamana (ms) bağlı grafiği

Aşağıdaki grafikte ikinci eksenin tork ve acının zamana bağlı olarak verilmektedir.



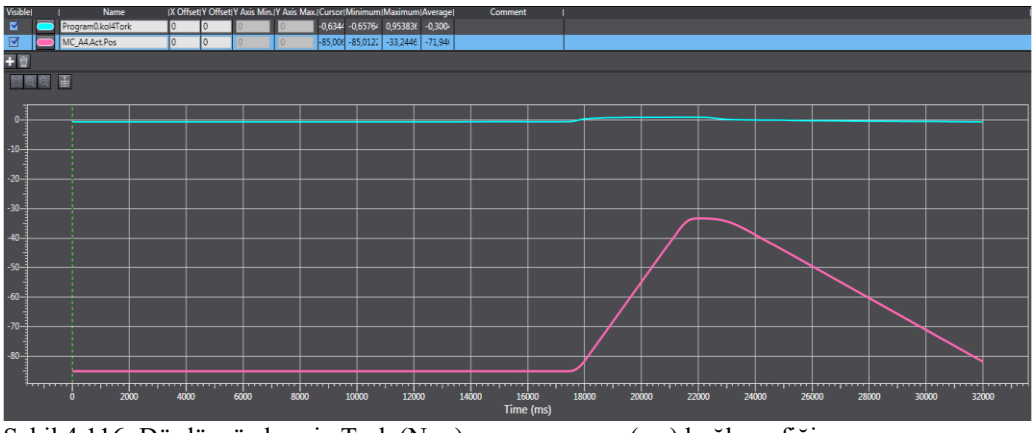
Şekil 4.114. İkinci eksenin Tork (N.m), acının zamana (ms) bağlı grafiği

Aşağıdaki grafikte üçüncü eksenin tork ve acının zamana bağlı olarak verilmektedir.



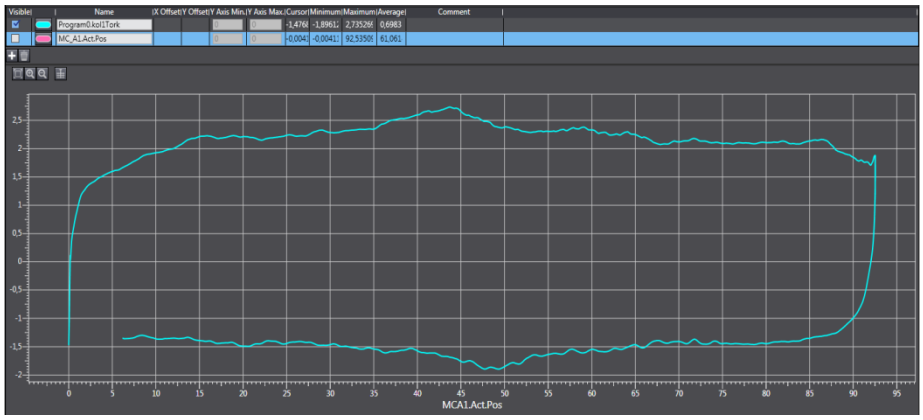
Şekil 4.115. Üçüncü eksenin Tork (N.m), acının zamana(ms) bağlı grafiği

Aşağıdaki grafikte dördüncü eksenin tork ve acının zamana bağlı olarak verilmektedir.



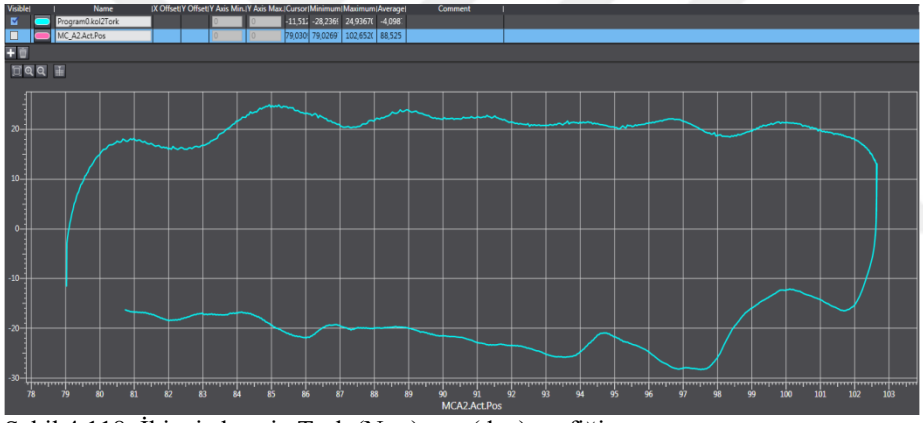
Şekil 4.116. Dördüncü eksenin Tork (N.m), acının zamana(ms) bağlı grafiği

Aşağıdaki grafikte birinci eksenin tork, açı grafiği (Dikey eksen Tork(N.m), Yatay eksen acı(deg)).



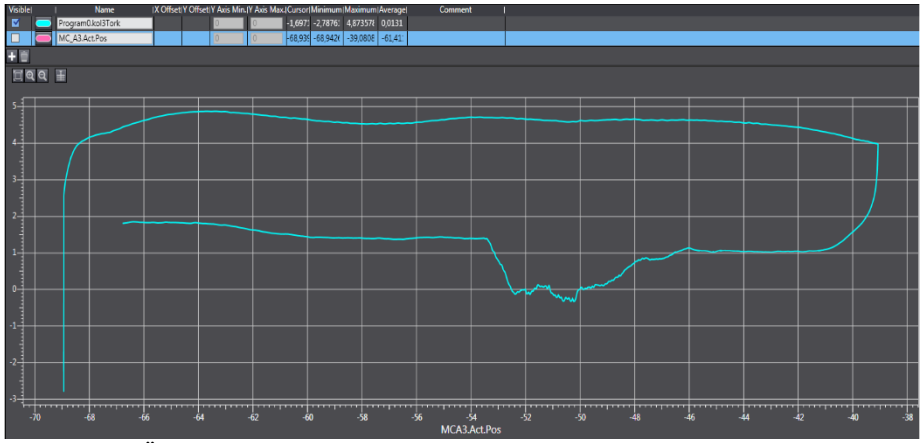
Şekil 4.117. Birinci eksenin Tork (N.m), acı (deg) grafiği

Aşağıdaki grafikte ikinci eksenin tork, açı grafiği (Dikey eksen Tork(N.m), Yatay eksen acı(deg)).



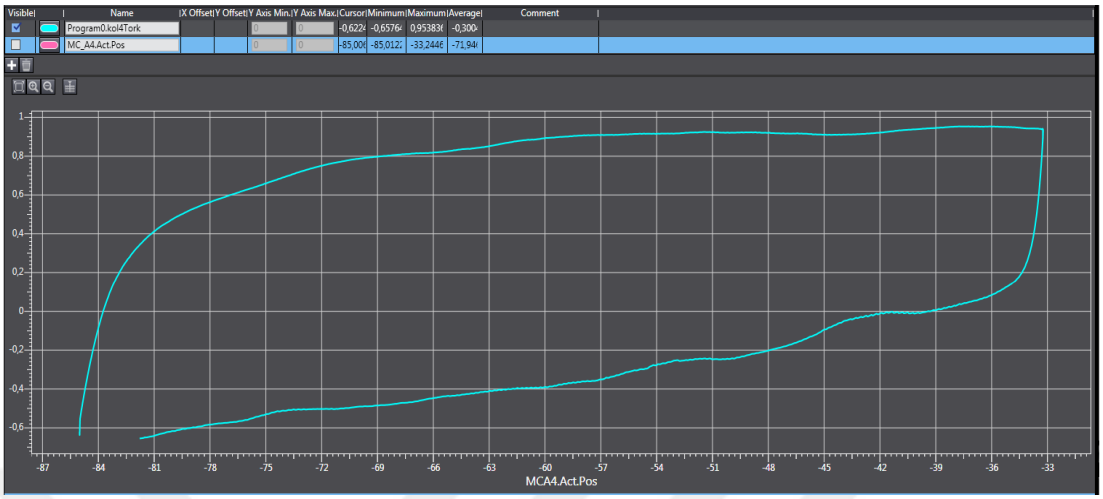
Şekil 4.118. İkinci eksenin Tork (N.m), acı (deg) grafiği

Aşağıdaki grafikte üçüncü eksenin tork, açı grafiği (Dikey eksen Tork(N.m), Yatay eksen acı(deg)).



Şekil 4.119. Üçüncü eksenin Tork (N.m), acı (deg) grafiği

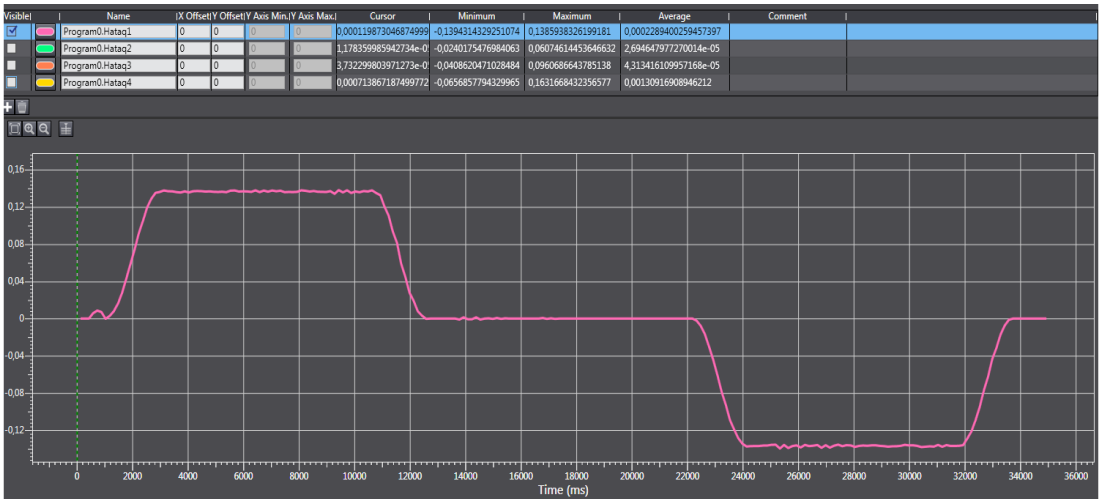
Aşağıdaki grafikte dördüncü eksenin tork, açı grafiği (Dikey eksen Tork(N.m), Yatay eksen acı(deg))



Şekil 4.120. Dördüncü eksenin Tork (N.m), acı (deg) grafiği

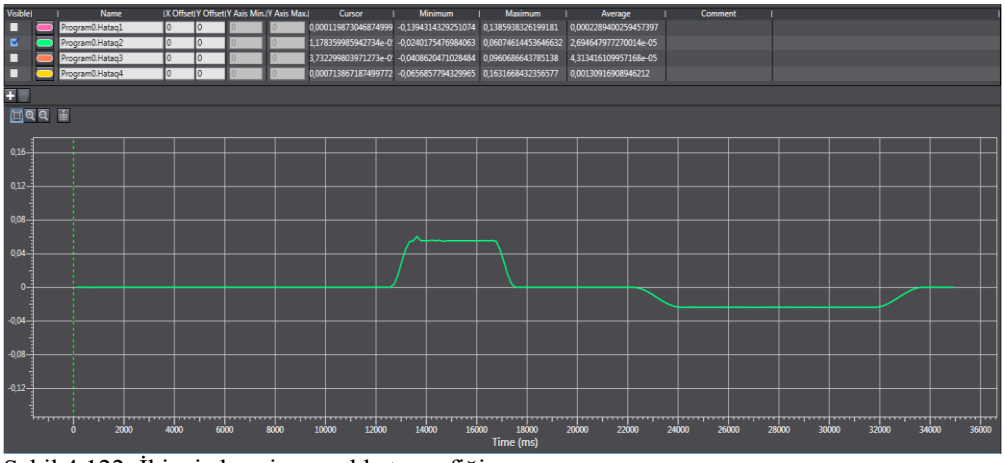
Robotu belirli bir yörüngede çalıştırdıktan ve yukarıdaki grafikleri aldıktan sonra şimdide robotumuzun hassasiyetini kontrol edelim. Bunu yapmak için robot çalıştırıldığı sırada hatalarını inceleyelim.

Aşağıdaki grafikte birinci eksenin acısal olarak hata grafiği (Düşey eksen acısal(deg) hata, yatay eksen zaman(ms)).



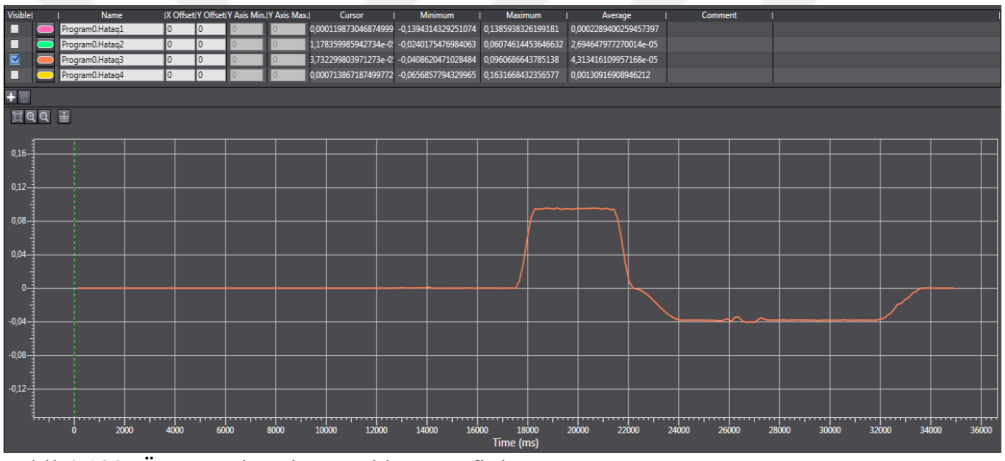
Şekil 4.121. Birinci eksenin acısal hata grafiği

Aşağıdaki grafikte ikinci eksenin acısal olarak hata grafiği (Düşey eksen acısal(deg) hata, yatay eksen zaman(ms)).



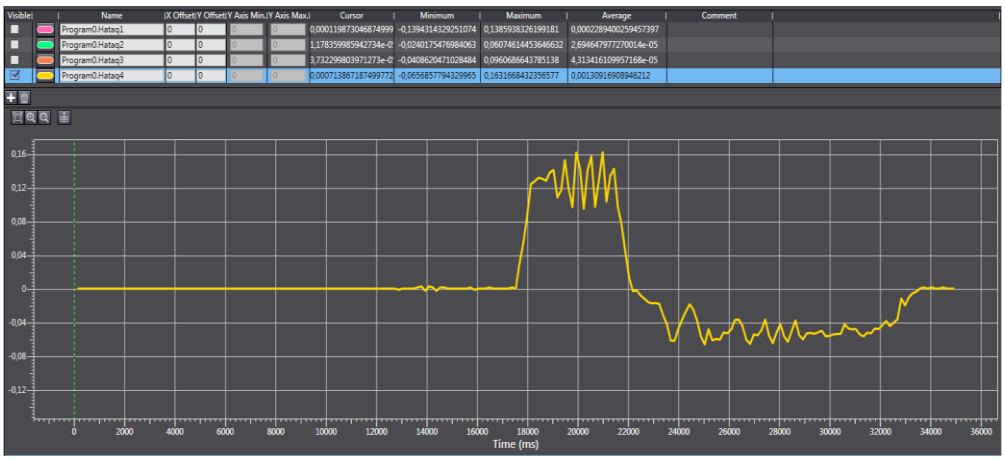
Şekil 4.122. İkinci eksenin acısal hata grafiği

Aşağıdaki grafikte üçüncü eksenin acısal olarak hata grafiği (Düşey eksen acısal(deg) hata, yatay eksen zaman(ms)).



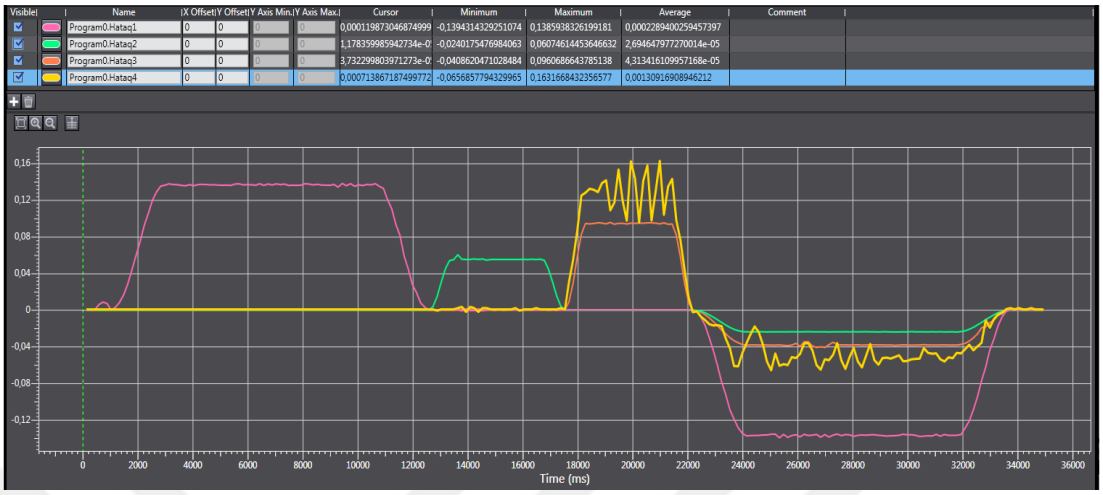
Şekil 4.123. Üçüncü eksenin acısal hata grafiği

Aşağıdaki grafikte dördüncü eksenin acısal olarak hata grafiği (Düşey eksen acısal(deg) hata, yatay eksen zaman(ms)).



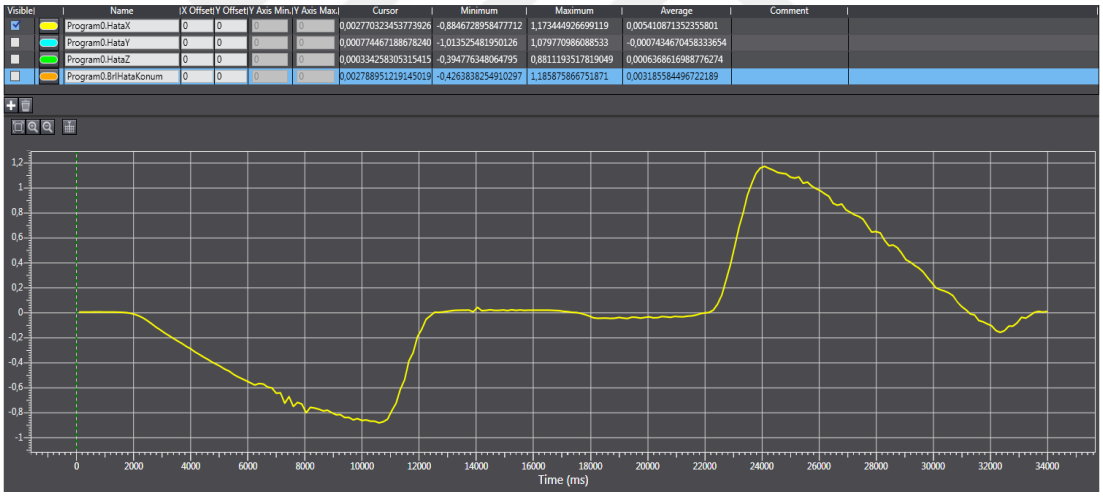
Şekil 4.124. Dördüncü eksenin acısal hata grafiği

Aşağıdaki grafikte tüm eksenlerin acısal olarak hata grafiği (Düşey eksen acısal(deg) hata, yatay eksen zaman(ms)).



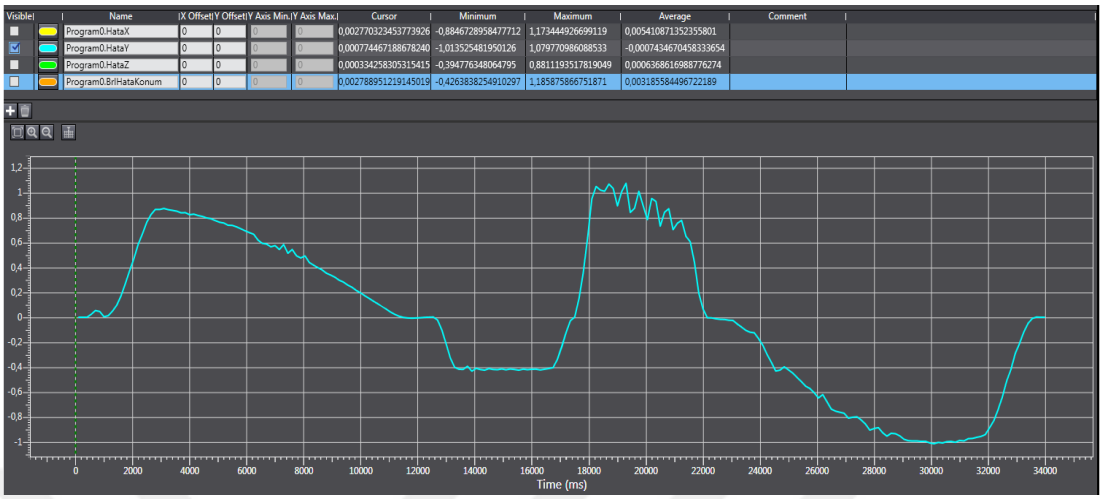
Şekil 4.125. Tüm eksenlerin acısal olarak hata grafiği

Aşağıdaki grafikte Kartezyen X eksenindeki hata grafiği (Düşey eksen(mm),Yatay eksen(ms)).



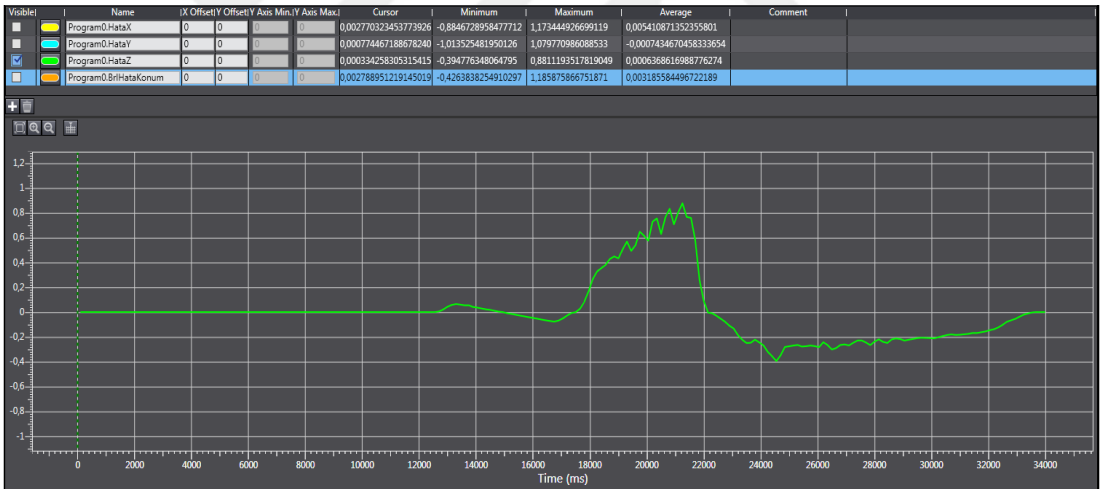
Şekil 4.126. Kartezyen X eksenindeki hata grafiği

Aşağıdaki grafikte Kartezyen Y eksenindeki hata grafiği (Düşey eksen (mm), Yatay eksen(ms)).



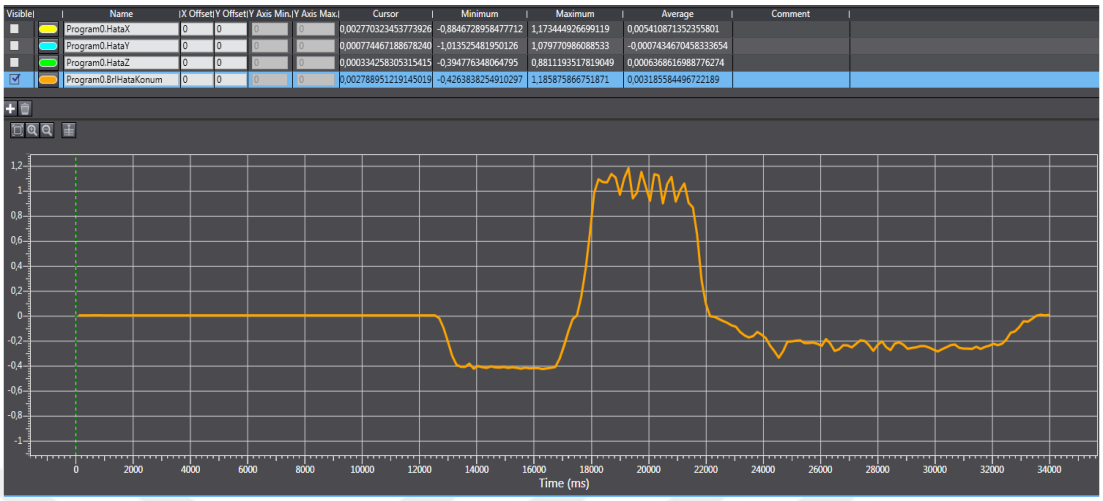
Şekil 4.127. Kartezyen Y eksenindeki hata grafiği

Aşağıdaki grafikte Kartezyen Z eksenindeki hata grafiği (Düşey eksen (mm), Yatay eksen(ms)).



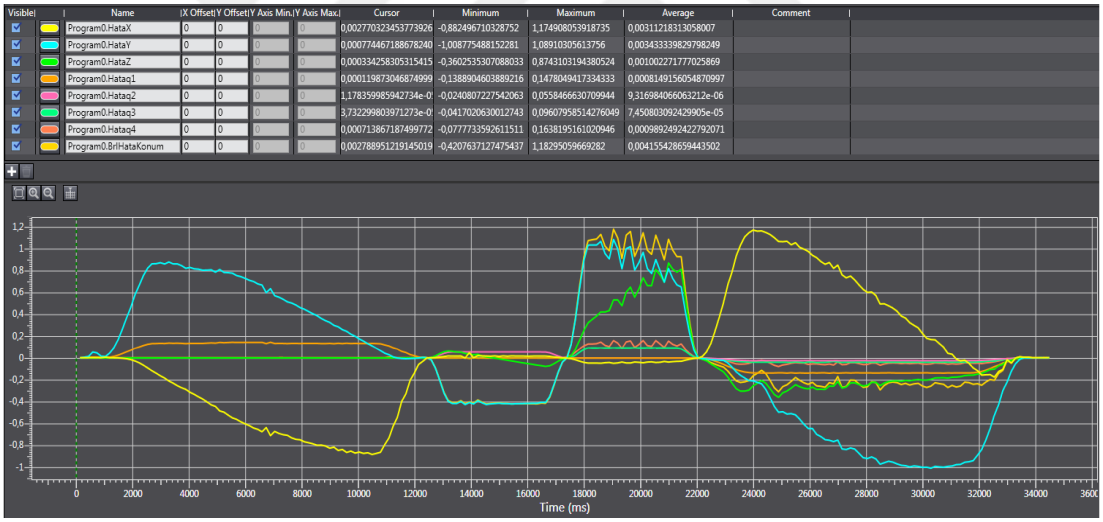
Şekil 4.128. Kartezyen Z eksenindeki hata grafiği

Aşağıdaki grafikte Kartezyen X, Y, Z Bileşke konumların hata grafiği (Düşey eksen(mm), Yatay eksen(ms)).



Şekil 4.129. Kartezyen X,Y,Z Bileşke konumların hata grafiği

Aşağıdaki grafikte Kartezyen X,Y,Z' lerin hata grafiği (Düşey eksen(mm),Yatay eksen(ms)).



Şekil 4.130. Kartezyen komple konumların hata grafiği.

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, robot kolunda 4 serbestlik derecesi ve yatay X doğrultusunda lineer vidalı milde bir serbestlik dereceli bir robot kolu tasarımı, imalatı ve yazılımı gerçekleştirilerek robot çalıştırılmıştır.

Endüstriyel robot kollarında torku arttırmak için şanzıman kullanılır. Bu şanzımanlar çok pahalı olduğundan bu tezde triger kayış kasnak kullanılarak robotlarda kullanılması test edilmiştir.

Yapılan bu çalışmada ilk olarak CATİA programında tasarım gerçekleştirilmiş ve bu tasarımın kinematik hesaplamaları yapılmıştır. Bu yapılan kinematik hesaplamaların doğruluğunu kanıtlamak için bilgisayarlar yardımı ile Matlab ve Adams programları kullanılarak bilgisayarda çalıştırılmıştır ve çıkarılan formüllerde hata kontrolü yapılmıştır. Hatalar düzeltilerek formülüze edilmiştir. Ayrıca bu programlar kullanılarak gerekli olan robot kollarındaki tork hesaplamaları yapılmıştır. Bu yapılan torklara göre servo motor ve step motor secimi yapılmıştır. Bu motorlara ve tork oranlarına göre kasnak sayısı belirlenerek bu sayıda kasnak yaptırılmıştır.

Bu kinematik hesapla çıkarılan denklemler Sysmac programı kullanılarak yazılımı gerçekleştirilmiştir. Sysmac programıyla yazılan yazılım Omron markası PLC kontrolöre yüklenmiştir.

Yapmış olduğumuz çalışmada operatörün robotu kullanabilmesi için kullanıcı dostu bir ara yüz geliştirilmiştir. Bu yazılan ara yüz JAVA programlama dilinde yazılmıştır. Bu ara yüz programını PLC kontrolöre göndere bilmemiz için JAVA dilinde EtherCAT haberleşme protokolü yazılmıştır. Bu haberleşme protokolü sayesinde ara yüzde yazdığımız ve tıkladığımız butonu PLC kontrolöre göndermektedir.

KAYNAKLAR

ALP, O. E., 2012. Genel Amaçlı Robot Kolu Tasarımı. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İzmir, 108s.

BAYRAK, A., 2007. Beş Eksenli Bir Robot Kolunun Simülasyonu ve Kontrolü. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 118s.

BİRGÜL, Z., ve KÜÇÜK, S., 2009. Robot Kinematiği. Birsen Yayınevi, İstanbul, 337s.

CHOSET, H., LYNCH, K. M., HUTCHINSON, S., KANTOR, G. A., BURGARD, W., KAVRAKI, L. E. ve THRUN S., 2005. Principles of Robot Motion Theory, Algorithms and Implementation. MIT Press, USA, 625s.

ERDOL, M., ve KURTARAN H., 2014. Bilyalı Vidalı Mil Hareket Sisteminin Matematiksel Modellenmesi Ve Titreşim Analizi. Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Gebze, 67s.

HAVUŞOĞLU, H., 2014. Robot Kol Tasarımı, Kinematik Analizi ve Etkileşimli Kontrolü. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İzmir, 62s.

KUO, C. B., 1999. Otomatik Kontrol Sistemleri. Literatür Yayınları, İstanbul, 960s.

KURTOĞLU, A., 2011. Robot Tekniği. Papatya Yayınevi, İstanbul, 288s.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Bülent KARATAŞ
Uyruğu : TC
Doğum Yeri ve Tarihi : Gaziantep – 10.09.1974
Telefon : 0 543 739 10 33
e-mail : bulentkar74@gmail.com

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Şehit Şahin Lisesi, Şahibey, Gaziantep	1999
Üniversite	: Erciyes Üniversitesi, Kayseri	2004
Yüksek Lisans	: Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Şanlıurfa	2019

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2004	Ritaş Tekstil	Makine Mühendisi
2005	Bcs Metal	Arge Departman Müdürü

UZMANLIK ALANI :

Makine Tasarım ve İmalat Uygulamaları, Robotik Uygulamalar, Mühendislik Uygulamaları

YABANCI DİLLER :

İngilizce

BİLİNEN PROGRAMLAR :

AutoCAD, CATIA, SolidWorks, SimeXpert, Marc, Adams, nCode, Solid Edge, MatLab (Script – Simulink – Simscape – SimMechanical – Controller – Controller Optimization), Sysmac Studio

YAYINLAR:

YILDIRIM Ö., AKPOLAT A., ŞAHİN B., KARATAŞ B., (2016). Düz Dişli Çarklarda Diş Sehim / Direngenliğin İnce Dilim Yöntemi ile Hesaplanması ve Mikro Geometri Tasarımı Üzerindeki Etkileri. SAVTEK. Ankara.

YILDIRIM N., AKPOLAT A., ŞAHİN B., YILDIRIM Ö., KARATAŞ B., (2017). The Effect of Asymmetric Cutter Tip Radius on Gear Tooth Root Bending Stress. AGMA FTM 2017.

UCTU, O.,KARATAŞ K., ŞAHİN B., SEVİM İ., (2017). Research and Optimizing of Effect of Mesh Size Parameters on Tooth Root Stress of Spur Gear Designed for Definite Module and Teeth Number by Applying Different Design Loads on Pitch Circle. Turkish Journal of Engineering: (37-43).