

**ÜÇ SERBESTLİK DERECELİ MANİPULATÖR MEKANİZMASININ  
PROTOTİPİNİN KURULMASI ve KİNEMATİĞİNİN İNCELENMESİ**

TC YÜKSEK LİSANS  
ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Uçak Müh. Hüseyin SALİH**

98484

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 11 Ocak 1999**

**Tezin Savunulduğu Tarih : 8 Şubat 1999**

**Tez Danışmanı**

**: Doç. Dr. Ramazan TAŞALTIN**

**Diğer Juri Üyeleri**

**: Prof. Dr. M. Fevzi ÜNAL**

**Doç. Dr. Metin GÖKAŞAN**

*Y. Salih*  
*M. Fevzi Ünal*  
*Metin Gökaşan*

**ŞUBAT 1999**

## ÖNSÖZ

1994 yılında lisansımı uçak mühendisliği bölümünden aldığımda, henüz bölümümüzde kumanda ve kontrol sistemleri ile ilgili deneysel olarak kullanılabilecek yeterince alet edevat ve deney düzeneği yoktu. İlerideki iş hayatını ve akademik çalışmalarını da robot ve kontrol sistemleri üzerinde çalışmak isteyen bir kişi olarak ilk önce yapmam gerekenin aynı konu ile ilgilenecek arkadaşlara faydalı olabilecek bir sistemi kurabilmektir. Akademik araştırmalarımı bu konular üzerinde yoğunlaşarak sürdürmek istedim ve bana göre uygun konunun robot ve kontrol sistemleri olduğuna karar vererek üç serbestlik dereceli bir manipulatörün incelenmesini tez konusu olarak seçtim. Bunun üzerine robot ve kontrol sistemleri ile ilgili olarak Uçak Mühendisliği Programı yanında Uzay Mühendisliği ve Makine Mühendisliği Programlarından Uzay Araçlarının Kontrol ve Dinamiği, Yapay Zeka, Bilgisayar Destekli Tasarım ve İleri Bilgisayar Grafik dersleri alarak tez çalışmalarına başladım. İlk önce deneysel olarak incelemek amacıyla piyasadan temin ettiğimiz malzemeleri kullanarak manipulatör mekanizmasını kurdum. Kurulan deneysel mekanizmanın kontrol edilebilmesi için ilk aşamada gerekli olan, karmaşık sayılabilecek kinematik ve dinamik denklemlerinin elde edilmesi idi. Bu nedenle deney amacı ile kurulan sistemin kinematiğinin incelenmesi tezin ana konusu olarak seçilmiştir.

Bu çalışmalarım boyunca gerek yönlendirmeleri gerekse doğrudan katkılarıyla yardımcı olan sayın Prof. Dr. M. Fevzi ÜNAL' a , Prof. Dr. Elburus CAFEROV' a, Doç. Dr. Hamza DİKEN' e, Arş. Grv. Sait N. YURT' a. ve danışmanım sayın Doç. Dr. Ramazan TAŞALTIN' a teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca tezin organizasyonu ve yazımı aşamasında teknik yardımlarını esirgemeyen değerli arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Müh. Hüseyin SALİH

7 Ocak 1999

## İÇİNDEKİLER

|                                                                    |     |
|--------------------------------------------------------------------|-----|
| ÖNSÖZ .....                                                        | ii  |
| İÇİNDEKİLER .....                                                  | iii |
| SEMBOL LİSTESİ .....                                               | vi  |
| ŞEKİL LİSTESİ .....                                                | vii |
| TABLO LİSTESİ .....                                                | x   |
| ÖZET .....                                                         | xi  |
| SUMMARY .....                                                      | xii |
| <br>                                                               |     |
| 1. BÖLÜM      GİRİŞ .....                                          | 1   |
| <br>                                                               |     |
| 2. BÖLÜM      GENEL KAVRAMLAR .....                                | 3   |
| 2.1      Mekanizma Kavramları .....                                | 3   |
| 2.2      Ters ve Düz Kinematik Kavramları .....                    | 5   |
| 2.3      Paralel ve Seri Mekanizmaların Karşılaştırılması .....    | 5   |
| 2.4      Paralel Platform Mekanizmalarının Kullanım Alanları. .... | 5   |
| 2.5      Paralel Platform Dizaynı .....                            | 10  |
| <br>                                                               |     |
| 3. BÖLÜM      STEWART PLATFORMU .....                              | 14  |
| 3.1      Giriş .....                                               | 14  |
| 3.2      Stewart Platformu .....                                   | 14  |
| 3.3      Stewart Platformunun Kinematiği .....                     | 15  |
| 3.4      Stewart Platformunun Dinamiği .....                       | 17  |
| 3.5      Konu ile İlgili Daha Önce Yapılan Araştırmalar .....      | 19  |
| <br>                                                               |     |
| 4. BÖLÜM      PNÖMATİK SİSTEMLER .....                             | 21  |
| 4.1      Pnömatiğe Giriş .....                                     | 21  |
| 4.2      Pnömatik Sistemlerin Kullanım Alanları .....              | 21  |
| 4.3      Pnömatiğin Faydalı Özellikleri .....                      | 24  |
| 4.4      Pnömatik Sistem Elemanları .....                          | 27  |

|          |                                                                           |    |
|----------|---------------------------------------------------------------------------|----|
| 5. BÖLÜM | KONTROL YÖNTEMLERİ .....                                                  | 41 |
| 5.1      | Giriş .....                                                               | 41 |
| 5.2      | Kontrol İle İlgili Temel Kavramlar .....                                  | 42 |
| 5.3      | Programlanabilir Lojik Kontrolörler .....                                 | 50 |
| 6. BÖLÜM | DENEYSEL PLATFORM MEKANİZMASININ<br>İNCELENMESİ .....                     | 62 |
| 6.1      | Deneysel Mekanizma İçin Kullanılan Elemanlar .....                        | 62 |
| 6.2      | Prototipin Montajı .....                                                  | 74 |
| 6.2.1    | Platform ve Silindirlerin Montajı .....                                   | 74 |
| 6.2.2    | Pnömatik Düzeneğin Kurulması .....                                        | 75 |
| 6.2.3    | Elektrik ve Diğer Bağlantıları .....                                      | 76 |
|          | Pnömatik Sistemin Devre Şeması .....                                      | 77 |
|          | Kurulan Düzenekten Bir Görünüş .....                                      | 77 |
| 7. BÖLÜM | DENEYSEL PLATFORM MEKANİZMASININ<br>KİNEMATİK ANALİZİ .....               | 78 |
| 7.1      | Giriş .....                                                               | 78 |
| 7.2      | Sadece Tek Pistonun Hareket Etmesi Durumunda<br>Kinematik Analiz .....    | 79 |
| 7.3      | Platform Merkezinin Sabit Kalması Durumunda Ters<br>Kinematik Çözüm ..... | 81 |
| 7.4      | Deneysel Platform Mekanizmasının Kinematik Çözümü .....                   | 84 |
| 7.4.1    | Giriş .....                                                               | 84 |
| 7.4.2    | Tanımlamalar .....                                                        | 85 |
| 7.4.3    | Ana Denklemlerin Elde Edilmesi .....                                      | 86 |
| 7.4.4    | Ters Kinematik Denklemlerin Elde Edilmesi .....                           | 92 |
| 7.4.5    | Düz Kinematik Denklemlerin Elde Edilmesi .....                            | 95 |

|          |                                 |     |
|----------|---------------------------------|-----|
| 8. BÖLÜM | ÖRNEKLER VE SİMÜLASYONLAR ..... | 98  |
| 9. BÖLÜM | DEĞERLENDİRME .....             | 112 |
| 10.BÖLÜM | KAYNAKLAR .....                 | 114 |
|          | EKLER .....                     | 117 |
|          | ÖZGEÇMİŞ                        |     |



## SEMBOL LİSTESİ

|                    |                                                                                                    |
|--------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $A, B, C$          | : Başlangıç konumunda hareketli üst platformun köşe noktaları                                      |
| $D, E, F$          | : Sabit taban platformun köşe noktaları                                                            |
| $A', B', C'$       | : Oryantasyona uğramış hareketli üst platformun köşe noktaları                                     |
| $A_x, B_x, C_x$    | : Başlangıç konumunda hareketli üst platformun köşe noktalarının X eksenindeki konum koordinatları |
| $A_y, B_y, C_y$    | : Başlangıç konumunda hareketli üst platformun köşe noktalarının Y eksenindeki konum koordinatları |
| $A_z, B_z, C_z$    | : Başlangıç konumunda hareketli üst platformun köşe noktalarının Z eksenindeki konum koordinatları |
| $A'_x, B'_x, C'_x$ | : Oryantasyona uğramış üst platformun köşe noktalarının X eksenindeki konum koordinatları          |
| $A'_y, B'_y, C'_y$ | : Oryantasyona uğramış üst platformun köşe noktalarının Y eksenindeki konum koordinatları          |
| $A'_z, B'_z, C'_z$ | : Oryantasyona uğramış üst platformun köşe noktalarının Z eksenindeki konum koordinatları          |
| $O_1$              | : Başlangıç konumundaki üst platformun merkezi                                                     |
| $O_2$              | : Taban platformun merkezi                                                                         |
| $M$                | : Oryantasyona uğramış hareketli üst platformun merkezi                                            |
| $M_x, M_y, M_z$    | : Oryantasyona uğramış hareketli üst platformun merkezinin konum koordinatları                     |
| $k, l, m$          | : Manipulatör mekanizmasının bacak uzunlukları                                                     |
| $\rho$             | : Hareketli üst platformun Z eksenini boyunca ötelenmesi                                           |
| $\phi$             | : Hareketli üst platformun X eksenini etrafındaki dönmesi                                          |
| $\theta$           | : Hareketli üst platformun Y eksenini etrafındaki dönmesi                                          |
| $\psi$             | : Hareketli üst platformun Z eksenini etrafındaki dönmesi                                          |
| $p$                | : Alt ve üst platformu oluşturan eşkenar üçgenin kenar uzunluğu                                    |
| $r$                | : Eşkenar üçgenin merkezi ile köşeleri arasındaki uzaklık                                          |

## ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No:

|            |                                                                  |    |
|------------|------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1  | Genel bir paralel mekanizma .....                                | 3  |
| Şekil 2.2  | Seri mekanizma .....                                             | 4  |
| Şekil 2.3  | Hibrit mekanizma .....                                           | 4  |
| Şekil 2.4  | Günümüzde kullanılan bir simülatör ve hareketleri .....          | 6  |
| Şekil 2.5  | Uçuş Simulatörü olarak kullanılan Stewart Platformu .....        | 7  |
| Şekil 2.6  | Paralel platform tabanlı 6 serbestlik dereceli manipulatör ..... | 8  |
| Şekil 2.7  | NSF Simulator (Hollanda) .....                                   | 9  |
| Şekil 2.8  | Paralel platform geometrisi .....                                | 10 |
| Şekil 2.9  | Paralel platformun bacak yapısı .....                            | 11 |
| Şekil 2.10 | Dört serbestlik dereceli paralel platform konfigürasyonu .....   | 12 |
| Şekil 2.11 | Düzlemsel mafsalların platform hareketine etkisi .....           | 12 |
| Şekil 2.12 | 6-3 Tipi paralel platform .....                                  | 13 |
| Şekil 3.1  | 6-6 Bir Stewart platformu .....                                  | 15 |
| Şekil 4.1  | Solenoid kumandalı 3-yollu valf için ISO sembolü .....           | 32 |
| Şekil 4.2  | Solenoid kumandalı 3-yollu valf kesiti .....                     | 32 |
| Şekil 4.3  | Tek-etkili silindirin solenoid valf ile kontrolü .....           | 34 |
| Şekil 4.4  | Çift-etkili silindirin solenoid valfi ile kontrolü .....         | 34 |
| Şekil 4.5  | Çift-etkili silindirin iki solenoid valfle kontrolü .....        | 35 |
| Şekil 4.6  | Pnömatik sayıcının ISO sembolü .....                             | 36 |
| Şekil 4.7  | Tek etkili silindir .....                                        | 37 |
| Şekil 4.8  | Çift etkili silindir .....                                       | 37 |
| Şekil 5.1  | Genel bir pnömatik kontrol sisteminin blok diagramı .....        | 42 |
| Şekil 5.1a | Kontrolör devresinin (Gc) sisteme bağlanış şekilleri .....       | 43 |
| Şekil 5.1b | Kontrolör devresinin (Gc) sisteme bağlanış şekilleri .....       | 43 |
| Şekil 5.1c | Kontrolör devresinin (Gc) sisteme bağlanış şekilleri .....       | 43 |
| Şekil 5.1d | Kontrolör devresinin (Gc) sisteme bağlanış şekilleri .....       | 43 |

|              |                                                                         |    |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 5.2    | Birim basamak girişi .....                                              | 44 |
| Şekil 5.3    | $G(s)$ 'nin birim basamak cevabı .....                                  | 44 |
| Şekil 5.4a   | Kontrol sisteminde aranan özellikler ( yükselme zamanı ) .....          | 46 |
| Şekil 5.4b   | Kontrol sisteminde aranan özellikler ( tepe değeri ) .....              | 46 |
| Şekil 5.4c   | Kontrol sisteminde aranan özellikler ( $T_s$ ) .....                    | 46 |
| Şekil 5.4d   | Kontrol sisteminde aranan özellikler ( $e_{ss}$ ) .....                 | 47 |
| Şekil 5.4e   | Kontrol sisteminde aranan özellikler ( $C(t)$ ' deki dalgalanma ) ..... | 47 |
| Şekil 5.5    | Bir dinamik sistemde sinüzoidal giriş ve çıkış .....                    | 47 |
| Şekil 5.6    | Bir dinamik sisteme ait bant genişliği .....                            | 48 |
| Şekil 5.7    | Bir dinamik sisteme ait kazanç payı ve faz payı .....                   | 48 |
| Şekil 5.3.1  | PLC ' nin bağlantıları .....                                            | 52 |
| Şekil 5.3.2  | PLC ' nin iç yapısı .....                                               | 53 |
| Şekil 5.3.3  | ADC basit blok şeması .....                                             | 54 |
| Şekil 5.3.4  | 3 Bitlik bir ADC 'nin geçiş karakteristiği .....                        | 55 |
| Şekil 5.3.5  | Reed Röleler .....                                                      | 57 |
| Şekil 5.3.6  | 8 Bit Paralel Portu .....                                               | 58 |
| Şekil 5.3.7  | Kontrol rölesi olarak kullanılan bir selenoid .....                     | 58 |
| Şekil 5.3.8  | Üç fazlı kontaktör .....                                                | 59 |
| Şekil 5.3.9  | Pnömatik pistonun kontrolü .....                                        | 60 |
| Şekil 5.3.10 | 5/2 yön kontrol valfi .....                                             | 61 |
| Şekil 6.1    | Silindirin kesiti ve parça numaraları .....                             | 62 |
| Şekil 6.2    | Silindirin boyutlandırılması .....                                      | 64 |
| Şekil 6.3    | Tespit elemanının pistona oturan parçası .....                          | 65 |
| Şekil 6.4    | Tespit elemanının levhaya oturan parçası .....                          | 65 |
| Şekil 6.5    | Elektro-Pnömatik regülatörün blok diagramı .....                        | 66 |
| Şekil 6.6    | Elektro-Pnömatik regülatörün boyutlandırılması .....                    | 67 |
| Şekil 6.7    | Doğrusallık .....                                                       | 68 |
| Şekil 6.8    | Regülatörün parça numaraları .....                                      | 69 |
| Şekil 6.9    | Regülatörün boyutlandırılması .....                                     | 70 |

|            |                                                                       |     |
|------------|-----------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 6.10 | Hassas regülatörün boyutlandırılması .....                            | 71  |
| Şekil 6.11 | Patlama basıncı eğrisi .....                                          | 73  |
| Şekil 6.12 | Üç serbestlik dereceli manipulator mekanizmasının genel görünüşü .... | 76  |
| Şekil 6.13 | Kurulan düzenden bir görünüş .....                                    | 77  |
| Şekil 6.14 | Sistemin Pnömatik Devre Şeması .....                                  | 77  |
| Şekil 7.1  | Tek pistonun hareket etmesi durumu .....                              | 79  |
| Şekil 7.2  | Sabit merkezli platform mekanizmasının koordinat eksenleri .....      | 81  |
| Şekil 7.3  | Deneysel Platform Mekanizması İçin Seçilen Koordinat Eksenleri .....  | 84  |
| Şekil 7.4  | A' ve C' noktaları arasındaki lineer bağıntının çıkarılması .....     | 88  |
| Şekil 7.5  | Üst platformun dönme hareketinin tanımlanması ve $\rho$ .....         | 89  |
| Şekil 7.6  | $\phi$ açısının tanımlanması .....                                    | 90  |
| Şekil 7.7  | $\theta$ açısının tanımlanması .....                                  | 91  |
| Şekil 8.1  | Örnek 8.1.1 ' e ait grafikler .....                                   | 104 |
| Şekil 8.2  | Örnek 8.1.2 ' e ait grafikler .....                                   | 105 |
| Şekil 8.3  | Örnek 8.1.3 ' e ait grafikler .....                                   | 106 |
| Şekil 8.4  | Örnek 8.1.4 ' e ait grafikler .....                                   | 107 |
| Şekil 8.5  | Örnek 8.2.1 ' e ait grafikler .....                                   | 108 |
| Şekil 8.6  | Örnek 8.2.2 ' e ait grafikler .....                                   | 109 |
| Şekil 8.7  | Örnek 8.2.3 ' e ait grafikler .....                                   | 110 |
| Şekil 8.8  | Örnek 8.2.4 ' e ait grafikler .....                                   | 111 |

## TABLO LİSTESİ

Sayfa No:

|           |                                                                     |    |
|-----------|---------------------------------------------------------------------|----|
| Tablo 6.1 | Silindir parçalarının listesi .....                                 | 63 |
| Tablo 6.2 | Silindirin boyutlandırılması .....                                  | 64 |
| Tablo 6.3 | Tespit elemanının pistona oturan parçasının boyutlandırılması ..... | 65 |
| Tablo 6.4 | Tespit elemanının levhaya oturan parçasının boyutlandırılması ..... | 65 |
| Tablo 6.5 | Elektro-Pnömatik regülatörün özellikleri .....                      | 67 |
| Tablo 6.6 | Regülatör parçalarının listesi .....                                | 70 |
| Tablo 6.7 | Regülatör boyutları .....                                           | 71 |
| Tablo 6.8 | Hassas regülatöre ait teknik bilgiler .....                         | 72 |
| Tablo 6.9 | Hortum ile ilgili teknik bilgiler .....                             | 73 |

## ÖZET

Paralel platform mekanizmaları, paralel hareket eden prizmatik bağlantılara sahip üç ya da daha fazla bacak ile birbirine bağlanmış ve paralel eyleyicilerle hareket ettirilen iki adet platformdan oluşan mekanizmalar olup bu konu ile ilgili son yıllarda daha yüksek rijitlik ve yüksek yük taşıma kapasiteleri ve diğer avantajları dolayısıyla yoğun olarak araştırılmaya başlanmıştır. Karmaşık kinematik zincire sahip paralel platform mekanizmaları robot uç organlarında, uçuş simülatörlerinde kullanılmıştır.

Biz bu çalışmada üç serbestlik dereceli paralel manipulatör mekanizmasını incelemiş, deneysel amaçlı kullanılmak üzere bir prototipini dizayn ederek uçuş simülatörlerinde , tank ve gemilerin namli sistemlerinde ve robotlarda kullanılabilecek bir mekanizma için öncülük etmiş bulunmaktayız.

Tez konusu olarak kurduğumuz sistemin kinematiği detaylı olarak incelenmiş, ters ve düz kinematik denklemleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçların çeşitli hareket durumları için bilgisayar programları yardımıyla simülasyonları yapılmış, sistemin simülasyona uygun olduğu görülmüştür. Ayrıca elde edilen ters ve düz kinematik denklemler MATLAB programıyla birbirine uygulanmış ve denklemlerin doğruluğu görülmüştür. Analitik çözüm elde edebilmek için sembolik çözüm yapabilen MAPLE programı kullanılmış ancak sonuç elde edilememiştir.

## **SUMMARY**

### **CONSTRUCTION and KINEMATIC ANALYSIS of THREE DEGREES of FREEDOM PARALLEL MANIPULATOR**

This thesis investigates an experimental manipulator which is designed for real time simulation purpose. An experimental manipulator is designed and constructed at trisonic laboratory of Istanbul Technical University Aeronautical and Astronautical Faculty. The manipulator has three degrees of freedom, angular movement around X and Y direction and longitudinal movement in Z direction in cartesian axes system.

Chapter 2 examines basic concepts of parallel and serial mechanisms that are used for simulation and automation purposes. Different types of simulators, currently used for various purposes are briefly introduced. Industrial applications of parallel and serial mechanisms are also examined in this chapter.

Chapter 3 is devoted to literature surveys about the parallel manipulators. Works of different researches are briefly examined in this chapter. Stewart platform, widely used parallel manipulator in industry, is studied in this chapter. Kinematic and dynamic analysis of Stewart platform are briefly introduced.

Chapter 4 introduces pneumatic elements used for industrial purposes. Working principles and peripheral devices for pneumatic elements are investigated. Advantages and difficulties of using pneumatic elements are examined. Control organs such as solenoid valves, flow control valves etc. are introduced. Working principles of electro-pneumatic valves which is the basic control element in any pneumatic control system, is studied.

Pneumatic control systems are briefly surveyed in Chapter 5. PLC which is widely used in pneumatic control systems is described in this chapter. PLC is suitable for on-off control purposes. In this type of control strategy the system controlled by the pneumatic devices have certain reassigned static positions. The system is designed in such a way that no control action needed between these static positions.

Contrary to the on-off control strategy, dynamic controller is needed if the controlled process elements should follow a reference trajectory. In this type of control strategy dynamic controller compares the desired reference trajectory with that of the actual system output, and produces the control action to reduce the error between them. Thus dynamic control needed to satisfy this criteria. Dynamic control strategies such as time domain analysis and frequency domain analysis are briefly introduced in this chapter. Pneumatic control elements are also examined in this chapter.

Experimental manipulator is described in Chapter 6. The photograph and the schematic diagram of the experimental manipulator is shown in Fig. (I.1). The manipulator consists of two plates and three legs connecting these two plates. The legs can be extended and shortened by pneumatic control elements. Each leg's bottom positions are fixed and can have a movement in the direction shown in Fig (I.1). The top positions of the legs can not slide but they can rotate in any direction. The manipulator is designed to simulate yaw and pitch rate of movement of a simple flight simulator.

The experimental manipulator can be divided into four parts. The bottom and top plates, pneumatic pistons between these plates, a constant pressure valve and a voltage controlled pressure valve, electrical and mechanic accessories. Details of each part are described in Chapter 6.

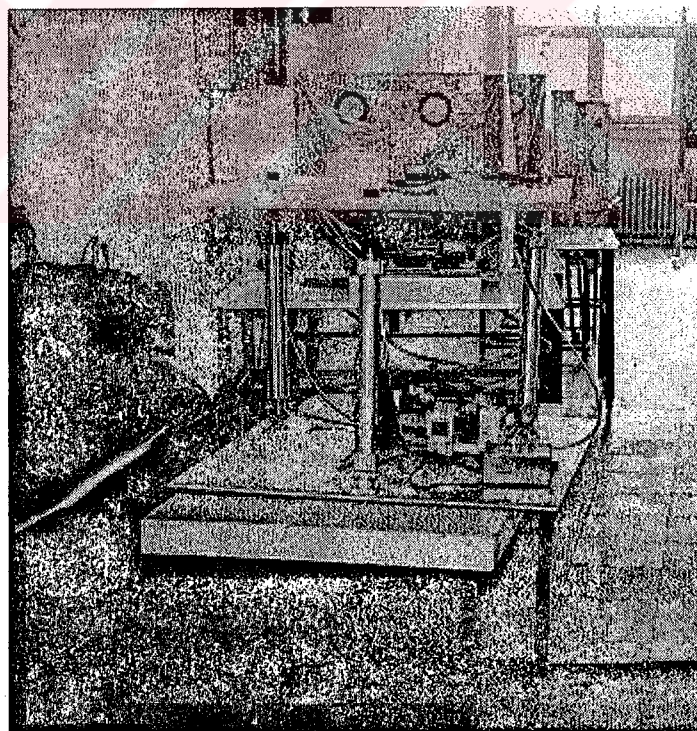
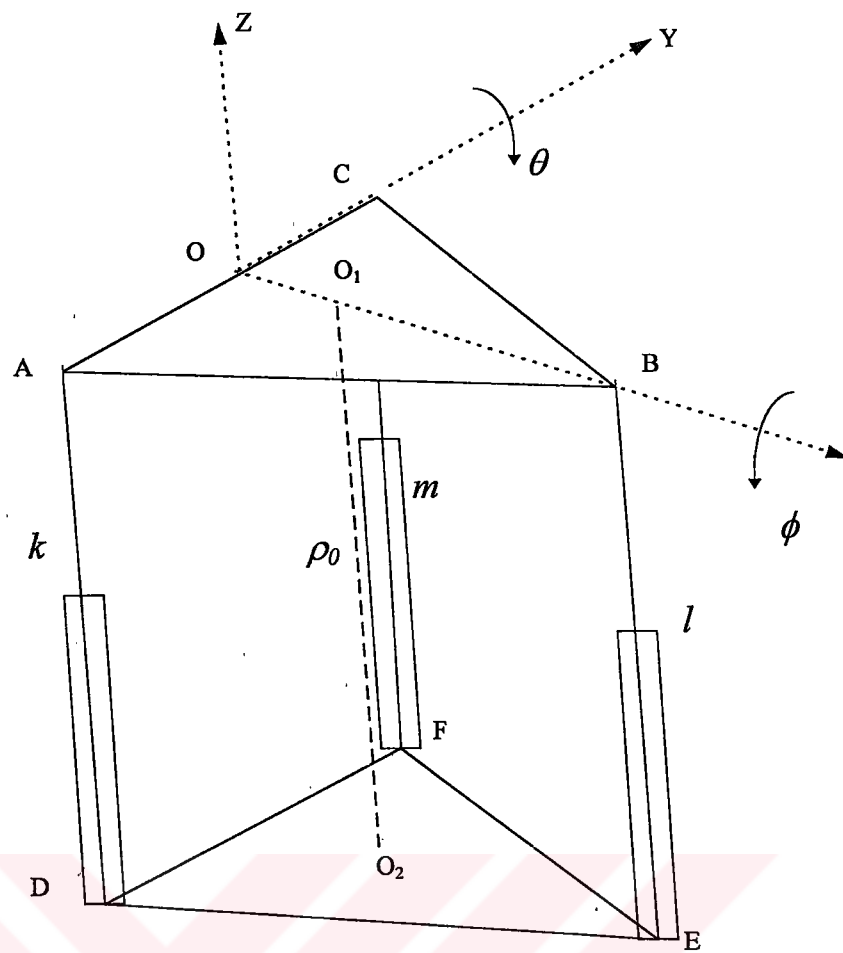


Fig I.1 The schematic diagram and the photograph of the experimental manipulator

Chapter 7 examines kinematics behavior of the experimental parallel manipulator system. In this chapter direct kinematics and inverse kinematics problems are stated. The main purpose of the experimental manipulator is to bring the top plate position to a prescribed orientation, i.e. to bring the manipulator to given angles  $\phi$ ,  $\theta$  and height  $\rho$ .

There is a nonlinear relationship between angles  $\phi$ ,  $\theta$  and height  $\rho$  (top plate orientation) and  $k$ ,  $l$ ,  $m$  (lengths of the manipulator legs). Calculation of  $k$ ,  $l$ ,  $m$  values when angles  $\phi$ ,  $\theta$  and height  $\rho$  are known is described as an inverse kinematics problem, Whereas calculation of  $\phi$ ,  $\theta$  and  $\rho$  values when  $k$ ,  $l$ ,  $m$  are known is described as a direct kinematics problem.

As stated above the relationship between  $\phi$ ,  $\theta$  and  $\rho$  and  $k$ ,  $l$ ,  $m$  are nonlinear. In fact there are three strongly coupled nonlinear equations that represent this relationship. Direct analytical formula does not exist to solve the inverse kinematics or direct kinematics problem. Therefore numerical procedures have to be used.

Numerical nonlinear equation solver routines from MATLAB were used to solve the above nonlinear equation set. The routines need an initial guess and find a solution. If the initial guess is too far from the solution the iteration may not converge. For this reason an approximate solution is developed to solve to the inverse and direct kinematics problem.

The approximate case assumes that the center of the top plate does not move in X and Y directions. Of course this is not true when the top plate rotates about X and Y axes, i.e  $\theta$  and  $\phi$  angles are different from zero. However this is a good approximation in most cases. The advantage of the approximate case is that it has an explicit analytical solution for direct and inverse kinematics problem. Therefore the calculation is straightforward. For this reason approximate case is

used to be an initial guess for the nonlinear equation solver to find the numeric solution.

Since there are many routes to take the manipulator from one position to another the difference between these roots are examined for some eminent initial and final positions. One purpose of the manipulator is to keep  $\phi$ ,  $\theta$  and  $\rho$  values in a pre-assigned trajectory. For this reason possible scenarios such as to compress a high amplitude vibration are also given in Chapter 8.

Conclusions and future work are given in Chapter 9. Software written in MATLAB to calculate the direct and inverse kinematic are given in the appendices.



# 1. BÖLÜM

## GİRİŞ

Uçak mühendisliği açısından büyük bir öneme sahip olan simülatörler sözlük anlamı olarak, incelenmesi istenen bir cihazın veya gelişmeleri izlenecek bir cismin davranışlarını yapabilen bir cihaz şeklinde ifade edilirler. Uçuş simülatörü, gerçek bir uçuşun bütün şartlarını yerde aynen tekrarlayarak asıl uçağa geçmeden özellikle büyük bir yolcu uçağını daha uçak şirketine teslim etmeden önce personelin manevralara alışmasını sağlar. Böylece uçak teslim edilir edilmez hemen işletmeye konulabileceği için uçuş, simülatörün veriminin artmasında önemli bir etkidir. Personeli eğitmek ve uçağı idare edebilecek duruma getirmek için birkaç saatlik uçuş yeterli gelir. Uçuş simülatörü, uçaktaki pilot kabininin aynı büyüklükte bir modelidir ve elektronik ve mekanik düzenekler sayesinde bir uçağın uçuş anında göstereceği bütün tepkileri personele eksiksiz olarak yansıtır. Pilot kabininin ön kısmına yerleştirilen bir ekran, dünyanın hangi havaalanı olursa olsun inişe geçerken bir pilotun görebileceği manzarayı aynen yansıtır. Bir sinema makinesi ( kamera ) alanın havadan görünüşünü izleyerek uçağın hareketlerini kaydeder.

Son yıllarda üzerinde yapılan araştırmalarla bir hayli gelişme kaydeden uçuş simülatörleri birer paralel platform mekanizmasıdır. Paralel platform mekanizması, birbirine paralel olan iki düzlemin, aralarındaki kollar vasıtasıyla hareket ettirilmesi prensibine dayanan altı serbestlik dereceli manipulatör mekanizmasıdır. En genel halde paralel platform mekanizması, paralel hareket eden prizmatik bağlantılara sahip üç ya da daha fazla bacak ile birbirine bağlanmış ve paralel eyleyicilerle hareket ettirilen iki adet platformdan oluşan mekanizmadır. Tavan platformu denilen platform, taban platforma nazaran altı serbestlik derecesine (x,y,z eksenleri etrafında üç adet dönme hareketi ve x,y,z eksenleri üzerinde üç adet öteleme hareketi ) sahiptir.

Son yıllarda daha yüksek rijitlik ve yüksek yük taşıma kapasiteleri ve diğer avantajları dolayısıyla yoğun olarak araştırılmaya başlanmıştır. Kolay ters kinematikleri yanında hayli karmaşık düz kinematiğiyle paralel mekanizmalar robot uç organlarında ve uçuş simülatörlerinde kullanılmıştır.

D. Stewart bu prensibe dayanarak adına Stewart Platformu denilen 6 serbestlik dereceli bir platform icat etmiştir. Bu manipulatör, her biri birer prizmatik silindir ile taban platformuna üniversal olarak bağlanmış altı adet bacağa sahip ve her bir bacak tavan platformu denilen hareketli platforma küresel mafsallarla bağlanmıştır. Stewart platformu hidrolik tahriklidir ve ilk olarak pilotlar için uçuş simulatörü amacıyla kullanılmak üzere tasarlanmıştır.

Bu çalışmada 3 - serbestlik dereceli ( x ve y eksenleri etrafında dönme z eksenı boyunca öteleme ) bir platformun kontrolü için gerekli ters, düz kinematik çözümleri ve basitleştirilmiş dinamik analizleri yapılmış, deney düzeneği olarak hazırlanan 3-serbestlik dereceli ve pnömatik tahrikli bir mekanizmaya uygulanmıştır.

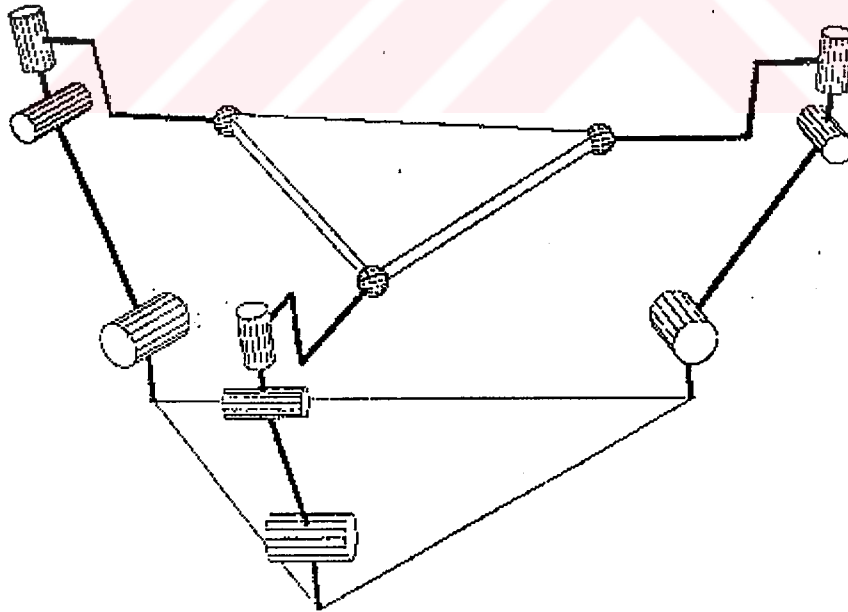
## 2. BÖLÜM

### GENEL KAVRAMLAR

#### 2.1. MEKANİZMA KAVRAMLARI

##### 2.1.1 Paralel Mekanizmalar

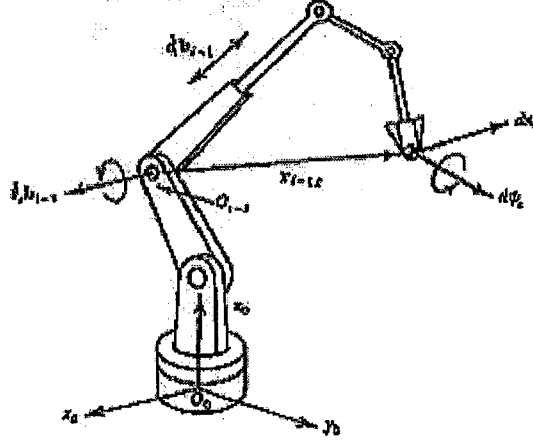
Taban platformu, hareketli platform ve bunları birbirine bağlayan mafsal ve bağlantı ayakları dizilerini içeren yapılara paralel mekanizmalar denir . Bağlantı dizileri iki veya daha fazla mafsal ve bağlantı elemanı içerebilir. Seçilen mafsal tipine göre değişmekle beraber genellikle bağlantı elemanlarına eğilme momenti etkimez. Sadece bağlantı elemanının boylamasına eksenini boyunca bir kuvvet etkiler. Bu sebeple bağlantı elemanları , hafif yapıda , daha rijit ve daha hızlı bir manipülasyon oluşturmak amacıyla içi boş silindirik çubuklar şeklinde yapılabilirler. Paralel mekanizmalar kullanılacakları alanlara göre 2,3,6 serbestlik dereceli olarak tasarlanabilirler.



Şekil 2.1 Genel bir paralel mekanizma

### 2.1.2 Seri Mekanizmalar

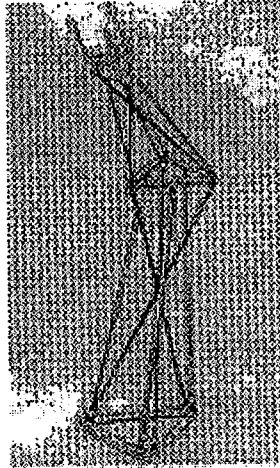
Bir veya daha fazla serbestlik dereceli bağlantı elemanların seri olarak birleştirilmesi ile oluşan mekanizmalardır. 2,3,...,6 serbestlik dereceli olarak tasarlanabilirler. Çalışma alanları paralel mekanizmalara göre daha geniştir.



Şekil 2.2 Seri Mekanizma

### 2.1.3. Hibrit Mekanizmalar

Seri mekanizmaların paralel mekanizmalarla birleştirilmesi veya birden fazla paralel mekanizmanın seri olarak bağlanması sonucu oluşturulan yapılardır. Çok işlemlili manipulatörler, yürüyen mekanizmalar ve çok parmaklı tutucular bu sınıftandır.



Şekil 2.3 Hibrit mekanizma

## 2.2. TERS ve DÜZ KİNEMATİK KAVRAMLARI

### 2.2.1 TERS KİNEMATİK

Ters kinematik probleminde üst platformun konumu verilir ve bacakların uzunlukları bulunur. Üç serbestlik dereceli bir manipulatörde üst platform her hareketi yapamadığı için yani sınırlı harekete sahip olduğu için ters kinematik çözümü analitik olarak bazı aralıklarda kesin çözümü sağlayamamaktadır. Bu çalışmada ters kinematik olarak üst platformun konumu  $\rho$ ,  $\phi$  ve  $\theta$  büyüklükleri şeklinde verilerek  $k$ ,  $l$  ve  $m$  bacak uzunlukları hesaplanmıştır.

### 2.2.2 DÜZ KİNEMATİK

Düz kinematik probleminde ise mekanizmanın bacak uzunlularından üst platformun konumu bulunmaktadır. Yine bu çalışmada  $k$ ,  $l$  ve  $m$  bacak uzunluklarının değerleri girilerek üst platformun konumunu belirten  $\rho$ ,  $\phi$  ve  $\theta$  değerleri hesaplanmış böylece düz kinematik çözüm elde edilmiştir.

## 2.3. PARALEL ve SERİ MEKANİZMALARIN KARŞILAŞTIRILMASI

Paralel mekanizmaların seri mekanizmalara göre ;

- yüksek yapısal rijitlik ( dolayısıyla yüksek yapısal frekans),
- yüksek yük taşıma kapasitesi,
- daha iyi bir dinamik performans,
- daha kolay bir ters kinematik,
- konum doğruluğunun dış yükün değişimine çok az bağlı olması gibi iyi

yanlarının yanında,

- çalışma uzayının sınırlı olması,
- düz kinematiğinin karmaşık ve çok çözümlü alınması,
- çalışma uzayında bacakların kesişmesinden dolayı tekil noktaların bulunması,

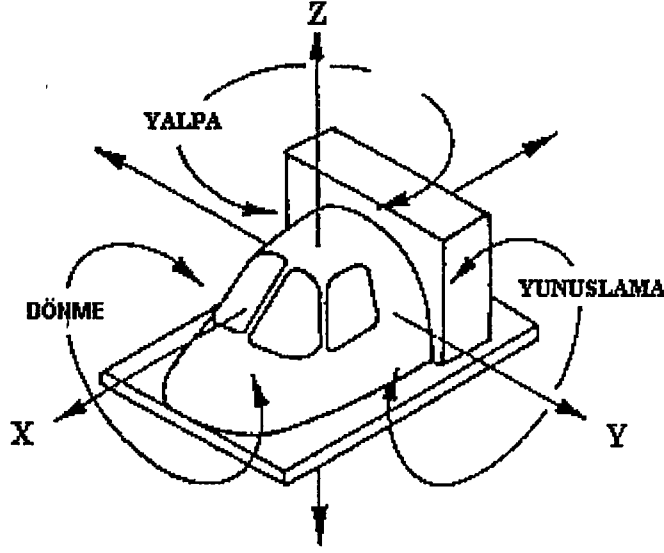
gibi kötü yanları da vardır.

## 2.4. KULLANIM ALANLARI

### 2.4.1. SİMÜLATÖRLER

- Uçuş Simülatörleri

İlk olarak 1965 de D. Stewart tarafından tasarlanan uzaysal platform kullanılarak tasarlanan uçuş simülatörü günümüzde pilotların eğitimi için yaygın şekilde kullanılmaktadır. [12]



Şekil 2.4 6 Serbestlik Dereceli Bir Simülatörün Hareketleri

Pilot adayının verdiği komutlara göre 3 eksenindeki ivmelenmeyi ve açısal ivmelenmeyi oluşturacak uzaysal bir yapıdır. Örneğin dönme ( yaw,) , yalpalama (roll) ve yunuslama (pitch) hareketlerini belli sınırlar içerisinde simüle ederek pilot adayında bir uçağın içinde olduğu hissini uyandırır. Şekil 2.4 ' te günümüzde kullanılan bir simülatör ve hareketleri görülmektedir.

#### •Sürüş Simülatörü

Bir yer aracında seyahat edenlerin konforunu sağlamak amacıyla tasarlanan paralel mekanizmalardır. Üç serbestlik dereceli hareket edebilen ucuz bir sürüş simülatörü 1996 P-H. YANG ve K. J. WALDRON tarafından tasarlanmıştır.

#### 2.4.2. DENİZ ÜSTÜ PETROL PLATFORMLARINDA

- Taban platformu hareketli iken üst platformun delme doğrultusuna dik olmasını sağlamak , ayrıca deniz tabanının hareketli olmasına karşın petrol platformunu yerçekimi doğrultusuna dik olarak tutmak amacıyla kullanılırlar.

#### 2.4.3. TORK KUVVET SENSÖRÜ OLARAK

• Bu düzenekte kararlı bir sabit platform ters olarak kullanılmış ve alt tarafa salınım yapan bir pendulum bağlanmıştır. platformun bacaklarındaki sensörlerle ölçümler yapılmıştır [8].

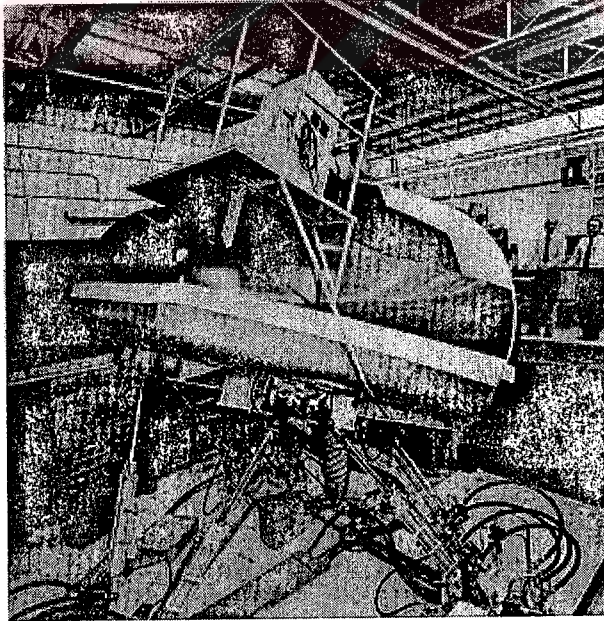
#### 2.4.4. ROBOT KOLLARIN UÇ ORGANLARINDA

• Paralel mekanizmalar buralarda daha çok seri mekanizmalarla birlikte hibrit bir yapı oluştururlar [4].

#### 2.4.5. KARARLI SABİT PLATFORM OLARAK

• Taban platformu hareketli iken üst platformu kararlı bir şekilde sabit tutmaktır.

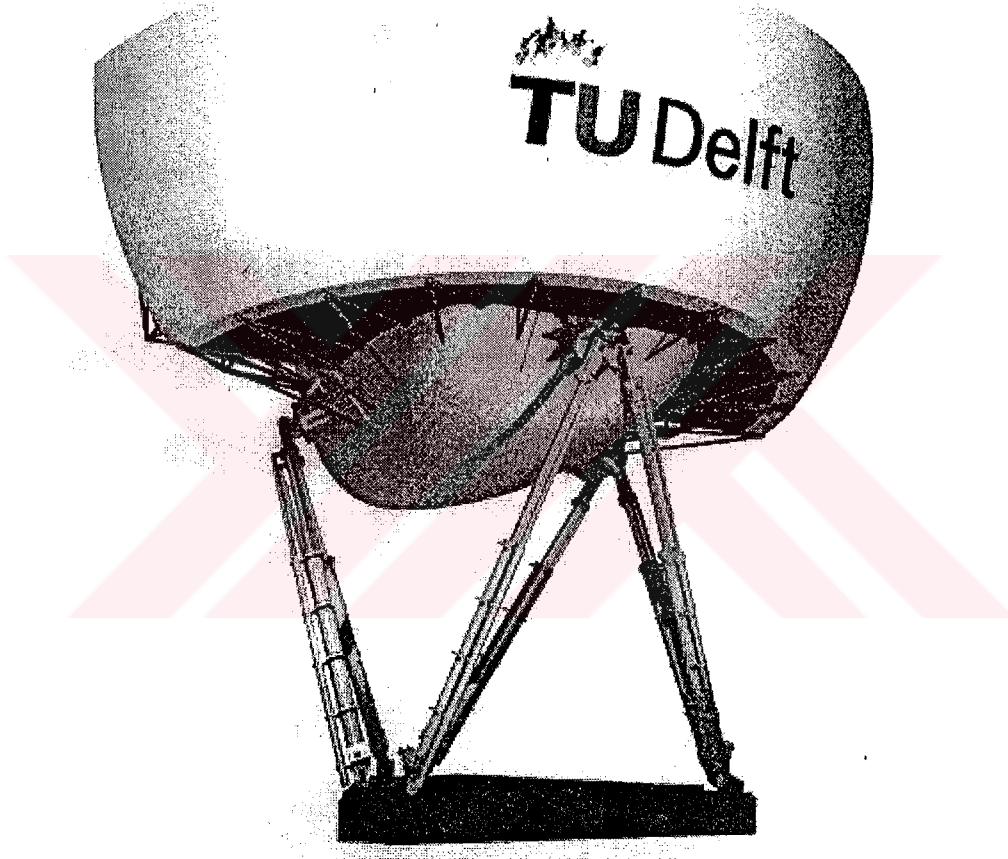
1965' te uçuş simulatörü olarak yapılan Stewart Platformu ile birlikte artan araştırmalar, paralel platformlar konusunda başarı kaydetmeye başlamıştır (Stewart,D.1965). Seri manipulatörler, zincir görünümlü yapıları ve az yer kaplamaları sebebiyle küçük boşluklara girebilirler. Dolayısıyla geniş çalışma zarfına sahiptir. Bununla birlikte paralel platformlarla mukayese edince birçok dezavantaj gösterirler. Özellikle dirsek görünümlü yapıları sebebiyle düşük kuvvet ağırlık oranına sahiptirler. Yüksek hız gerektiren uygulamalarda istenmeyen dinamik karakteristikler gösterirler. Ve en önemlisi kavrama hataları mekanizma boyunca artar ve son bağlantıda konumlama hatası oluşur.



Şekil 2.5 Uçuş Simulatörü Olarak Kullanılan Stewart Platformu

Bu yüzden paralel platformlar, küçük çalışma aralığına ve düşük manevra kabiliyetine karşılık yüksek kuvvet-ağırlık oranı, çoğalmayan eyleyici hataları, ağır yüklere karşı dayanımı ve hassas konumlama gibi özellikleriyle iyi bir alternatif olmuştur.

Paralel manipulatör kavramının esas tanımı, Stewart Platformunun icadı ile olmuştur. Paralel manipulatörler, seri manipulatörlere nazaran yukarıda sayılan bu üstünlükleriyle hassasiyet gerektiren işlerde kullanım alanı bulmuştur.



Şekil 2.6 Paralel Platform Tabanlı 6 Serbestlik Dereceli Manipulatör  
( SIMONA )

Paralel platformlar birçok konfigürasyonda ( genellikle 6 serbestlik dereceli sistemler olarak ) yapılabilir. Uçuş simulatörlerine ilave olarak (robotik kollarda, robot manipulatörlerinde, kuvvet-tork sensörlerinde [8] ve ayak mekanizmalarında v.s.) çeşitli uygulamalarda kullanılabilmesi için birçok araştırmalar yapılmıştır. Bazı uygulamalarda

seri ve paralel manipulatörler beraber kullanılmıştır. [16] manipulatör işlem sırasında kaba hareketlerden sorumluyken, hassas hareketi yapabilmek için seri manipulatöre monte edilen bir paralel manipulatör kullanılır. Bu uygulamaya uzayda montaj maksadıyla kullanılan Cincinnati T-3 robotu örnek gösterilebilir.



Şekil 2.7 NSF Simulator (Hollanda)

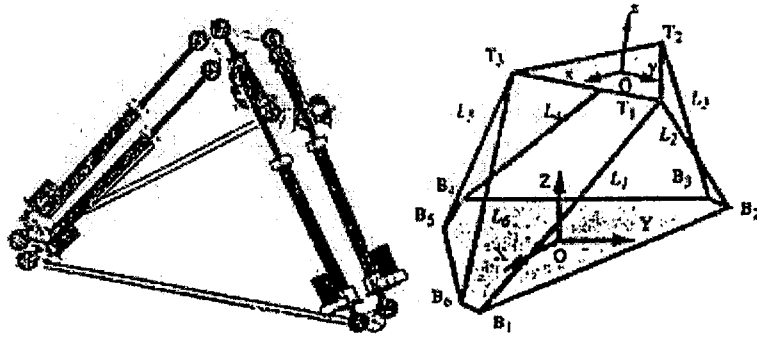
Paralel platformlar, endüstride yüksek kuvvet ve güç çıktısı gereken presleme, malzeme işleme gibi işlemlerin uygulanmasında kullanılmışlardır. Bu gibi işlemlerde bıçağın düzgün hareket etmesi, parçaya temas ettiğinde oluşacak şoka dayanabilmesi için kalemin bağlı olduğu kolun kuvvetli olması ve bazen karmaşık işlemlerin yapılabilmesi için değişik konfigürasyonlara sahip kalemlerin kullanılması gerekir. Paralel platform tabanlı manipulatörler bu tür işlemlerde kullanılmak için oldukça uygundur.

Şekil 2.7 ' de paralel platform destekli bir simulatör görülmektedir (NSF). Deneysel amaçlı olarak paralel platform tabanlı uçak sarsıntı hareketi simulatörü düşünülmüş, imal edilmiş ve NASA Langley Araştırma Merkezi 'nde test edilmiştir. Bugün, helikopterlerin, tankların ve otomobillerin simulasyonları için birçok sayıda paralel platform uygulamaları mevcuttur.

Eklem bağlantılarının basit olması sebebiyle ağırlık ve boyuna oranla, her hangi bir seri manipulatörden çok daha fazla dayanıklılık göstermektedir. Paralel bağlantılı olan yapısı sebebiyle yüksek kuvvet-ağırlık oranı vermekle kalmaz aynı zamanda seri bağlantılı manipulatörlere nazaran çok daha fazla hassasiyet özelliğine sahiptir. Bu hassasiyetin sebebi, paralel bağlantı sonucu bağlantı hatalarının dağıtılmış ve kümülatif olmasıdır.

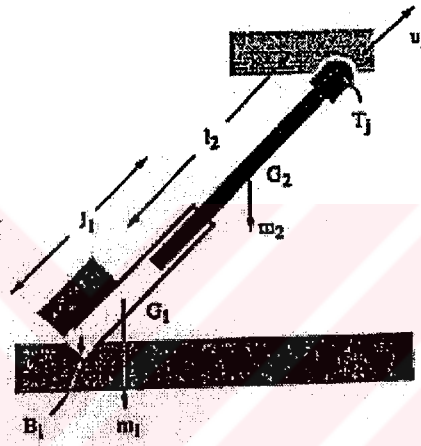
## 2.5. PARALEL PLATFORM DİZAYNI

Genel olarak bir paralel platform her biri paralel olarak görev yapan altı prizmatik bağlantı ile birbirine bağlanmış olan iki platformdan oluşur. Tavan platform denen üst platform taban platforma nazaran altı serbestlik derecesine sahiptir. Bu platformlar paralel eyleyicilerle hareket ettirilir. Platformun altı serbestlik dereceli hareketini sağlamak için, eyleyici prizmatik kollar küresel bağlantı (mafsal) ile tavan platforma ve üniversal bağlantı ile tabana birleştirilmiştir. Manipulatörlerin gerçekleştirmesi gereken belirli görevler, dizayn ve inşasından önce tam olarak belirgin olmadığı için, görev alanındaki bu belirsizlik, manipulatörün inşası sırasında bir takım genel özelliklere sahip olması gerekliliğini doğurur. Bundan dolayı manipulatör dizaynında ilk olarak mümkün olan en yüksek geometrik simetri sağlanılmaya çalışılır. Bu simetriye ulaşmak için taban ve tavan platformda yarı düzenli hegzagonal yüzey şeklinde biçimlenmiş altı eyleyici bağlantı noktasının bulunduğu paralel platformlar tercih edilir.



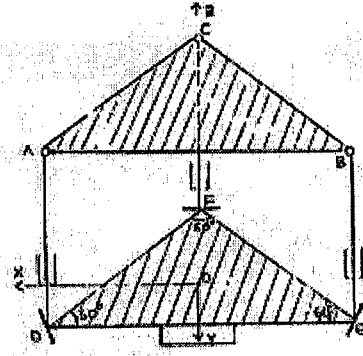
Şekil 2.8 Paralel Platform Geometrisi

Endüstriyel manipulatör dizaynı 1960' lı yıllardan beri çok az değişmiştir. Günümüzde en çok kullanılan manipulatörler, aynı seri kinematik yapıyı kullanmaktadır. Tek değişiklik, paralel ve dik komşu kolların düzen ve sırasında yapılmaktadır. Fakat seri yapının birtakım dezavantajları mevcuttur. Bu sistemler yüksek bir esnekliğe sahiptir. Her eyleyicinin bir sonraki bağlantı ve eyleyiciyi sürmek zorunda olması sebebiyle, bunlar göreceli olarak tepki vermekte ağır kalmaktadırlar. Seri yapının mekanik dizaynındaki son ilerlemeler, daha çabuk tepki veren sistemlerin ortaya çıkmasıyla sonuçlanmıştır.



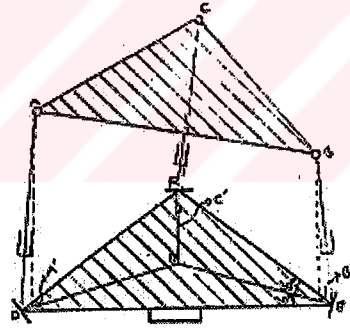
Şekil 2.9 Paralel Platformun Bacak Yapısı

Seri dizaynın alternatifi ise paralel aktivasyon ve kinematik yapının kullanılmasıdır. Manipulatör dizaynında paralel yapılar kullanmanın bazı önemli avantajları vardır. Paralel yapıda sistem yükleri, eyleyici ve eklemlere daha eşit dağılmaktadır. Bu da sonuçta daha gelişmiş bir genel sağlamlık ve cevap karakteristiği sağlamaktadır. Seri yapıyla karşılaştırılacak olursa, paralel yapı genellikle, eyleyicilerin zincirde daha geriye, yani yere veya taban bağlantılarına daha yakın yerleştirilmeleri sonucunu doğurmaktadır. Bu da daha büyük eyleyicilere olanak tanır. Sürülen bağlantılar hafifler ve böylece sağlamlık ve cevap karakteristiği daha iyileştirilebilir.



Şekil 2.10 Dört Serbestlik Dereceli Paralel Platform Konfigürasyonu

Platform tasarımında, platformun geometrisi, bacak yapıları, eyleyicilerin türü ve yerleştirilmesi, bacakların taban ve tavan platforma bağlantısı, kullanılan bacak sayısı gibi konular önemli yer teşkil eder. Ama asıl önemli olan, bu konular düşünüldükten sonra tasarlanan platformun istenilen işlevleri yerine getirebilmesidir. Yani, hassas konumlama yüksek kuvvet-ağırlık oranı, büyük yüklere dayanım gibi özellikleri bünyesinde bulundurabilmesidir.



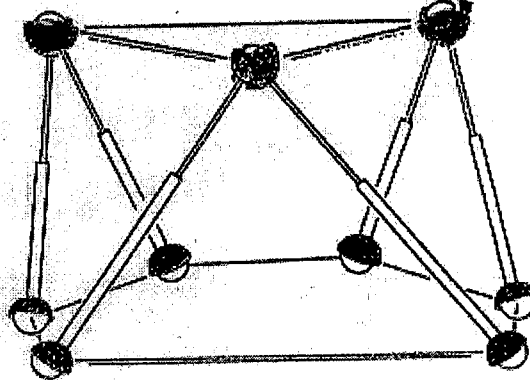
Şekil 2.11 Düzlemsel Mafsalların Platform Hareketine Etkisi

Dört serbestlik dereceli paralel bir platform  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  eksenleri etrafında roll, pitch ve yaw gibi dönmeler ve  $Z$  eksenini boyunca öteleme yapabilir.

Şekil 10 ' da gösterilen dört serbestlik dereceli paralel platformda, bu üç dönmeden  $X$  ve  $Y$  etrafında olan ikisi bacak hareketleriyle,  $Z$  etrafındaki dönme ise taban platforma monte edilmiş olan motor vasıtası ile gerçekleştirilir. Öteleme ise yine bacak deplasmanlarıyla sağlanır.

Şekil 11 ' deki bacaklardan her birinin üst platformdaki bağlantı noktasının alt platform üzerine izdüşümü, bacakların taban platformdaki bağlantı noktalarından başlayıp taban platformun geometrik merkezine giden doğru üzerindedir.

Bacaklar taban platforma yukarıda açıklanan şart sağlanacak şekilde düzlemsel mafsallanmıştır. Bu noktalarda kullanılan düzlemsel mafsallar, bacakların çalışma uzayındaki zarfını bir düzlem ile sınırlar.



Şekil 2.12 6-3 Tipi Paralel Platform

Bacakların tavan platformuna bağlantısında ise küresel (spherical) mafsallar kullanılır. Küresel mafsallar tavan platformun serbest bir şekilde dönmelerini oluşturmasına izin verir, sınırlayıcı bir rolü yoktur.

Eklem yerlerindeki mafsalların bu şekilde seçilmesi sayesinde platform rijit bir hale gelmiştir. Bütün mafsalların küresel seçilmesi durumunda platform kararsız bir yapıya sahip olur.

Yapılan bu platform rijit olmakla beraber verilen bacak deplasmanlarıyla önceden düşünülmüş olan oryantasyona gelecek şekilde dizayn edilmiş haldedir.

Paralel mekanizmalar için yapılan tip tanımlamalarında “N-n” çeşidi; mekanizmanın taban ve tavan platformlarının poligon ve tabanın N, tavanın ise n adet kenara sahip olduğunu gösterir. “M-m” tipinde ise taban ve tavan platformlarının sırasıyla M ve m adet bağlantı merkezi olduğunu gösterir.

### 3. BÖLÜM

#### STEWART PLATFORMU

##### 3.1. GİRİŞ

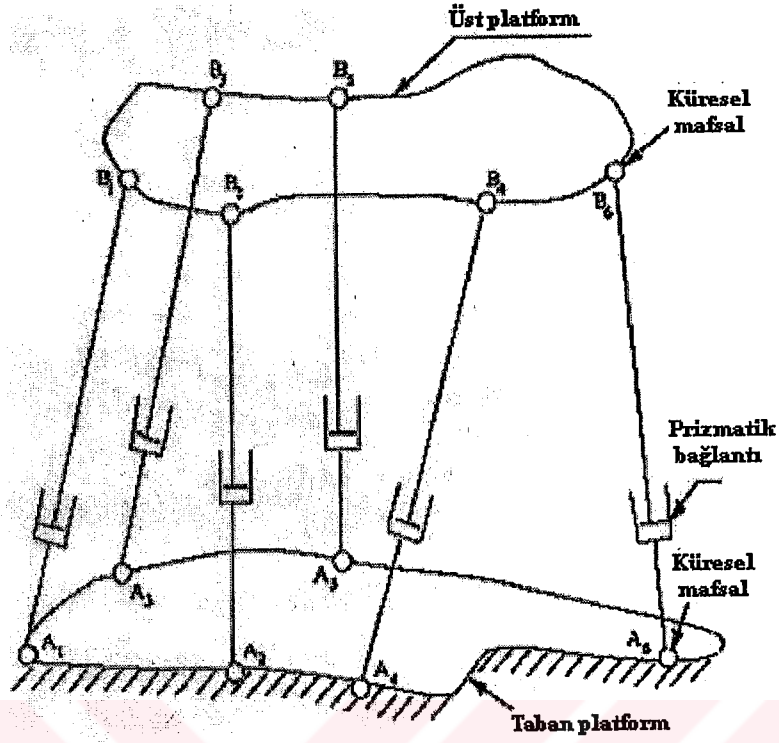
Dinamik problemlerin tarifinde cisimlerin hareketini anlayabilmek için çeşitli büyüklüklerin anlaşılması ve doğru bir şekilde açıklanması büyük önem arz eder. Bu tarifler genellikle matematikselidir ve dinamik davranışın tahmin edilmesini sağlar. Dinamik davranışı formüle etmek için fiziksel durum ve buna karşılık gelen matematiksel tarif birlikte düşünülmelidir. Her problemin incelenmesi fiziksel ve matematiksel düşünce arasındaki geçişi gerektirmektedir. Bu hususlar göz önüne alınarak ileride yapılacak kinematik ve dinamik incelemelere ışık tutması açısından Stewart platformu tanıtılmış literatürde yer aldığı şekliyle kinematik ve dinamik bağlantılarının verilmesi uygun görülmüştür. [1], [4], [21]

##### 3.2 STEWART PLATFORMU

Daha önceleri tekerlek test aracı olarak kullanılan uzaysal yapı 1965 'de D. Stewart tarafından düzenlenerek altı serbestlik dereceli bir uçuş simulatörü olarak tasarlanmıştır.

Tam bir paralel mekanizma olan Stewart Platformu genel olarak bir alt platformu, bir üst platform ve bunları birleştiren uçlarında küresel mafsallar bulunan 6 adet uzayıp kısalabilen ayaktan oluşur. Ayakların bir ucunda küresel diğer ucunda üniversal mafsall bulunabilir. Altı ayağın uzunluğu tanımlandığında belirlenmiş bir yapı oluşur.

Stewart platformu üst ve alt platformun şekline göre birçok sınıfa ayrılabilir. Bunlardan birisi ve son yıllarda yoğun olarak incelenmiş olanı , ayakların alt ve üst platforma bağlandığı yerlerin eşdüzeyli (coplanar) olması halidir. Stewart platformunun bu sınıfında küresel mafsalların bağlantı noktaları alt ve üst platformda birer altıgen oluşturur. Eğer bir platformdaki iki bağlantı noktası birbirine birleştirilirse bağlantı noktası sayısı azalır . Üst platformdaki bağlantı noktası sayısı 'm' ve alt platformdaki bağlantı noktası sayısı 'M' ise Stewart platformuna Tip M-m Stewart Platformu denir. Ayrıca bağlantı ayaklarını oluşturan elemanların durumuna göre de RPR , RRR, RP, RR, SPS bağlantı ayaklı olarak da isimlendirilir. R (revolute joint ) , P (Prismatic joint), S (Spherical joint). [12]



Şekil 3.1 6-6 Bir Stewart platformu

### 3.3 STEWART PLATFORMUNUN KİNEMATİĞİ

#### Düz Kinematik :

Ayakların alt platforma bağlantı noktalarını sırasıyla  $A_i$   $i=1,2,...,6$  üst platforma bağlantı noktaları  $B_i$  ,  $i=1,2,...,6$  olarak isimlendirelim.

Sabit platforma ait sabit koordinat sistemi  $X_1Y_1Z_1$  ' in merkezi 1 no' lu ayağın alt ucuna, hareketli platforma ait olan yerel koordinat sistemi  $X_2Y_2Z_2$  ' nin merkezi aynı ayağın üst ucuna yerleştirilmiş olsun. Alt platform  $X_1Y_1$  düzlemiyle , üst platform ise  $X_2Y_2$  düzlemiyle aynı düzlemde bulunsun .  $X_1$  eksen  $A_1 - A_2$  doğrultusunda ,  $X_2$  eksen  $B_1 - B_2$  doğrultusunda seçilsin.  $A_2$  ve  $A_3$  bağlantı noktalarının konum vektörleri  $\{\vec{a}_2, \vec{a}_3\}$  birbirinden lineer bağımsız olsun.

Lokal koordinat sistemindeki  $B_i$  bağlantı noktasının konum vektörü  $b_i$  ile gösterilsin. Eğer platformlar benzer altıgenler şeklinde seçilirse  $a_i = kb_i$  ;  $i=1,2,...,6$  olarak ifade edilebilir. Buradaki  $k$  altıgenlerin benzeşim oranıdır.

Düz kinematik probleminde ayak uzunlukları verilip üst platformun konumu istendiğinden ayak uzunlukları için  $l_i = A_i B_i$  yazılır. Burada  $B_i$  noktasının sabit eksen

takımındaki konum vektörü  $p$  ve yerel eksen takımından sabit eksen takımına dönüştüren  $R$  matrisi bilinmeyenlerdir.

$$p = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ (r_{12}r_{23} + r_{22}r_{13}) & (r_{21}r_{13} + r_{11}r_{23}) & (r_{11}r_{22} + r_{21}r_{12}) \end{bmatrix}$$

$R$  dönüşüm matrisinin üçüncü satırı ilk iki satırının vektörel çarpımıdır.

Böylelikle verilen  $l_i$  için bilinmeyen kümesi;

$$V = \{p_1, p_2, p_3, r_{11}, r_{12}, r_{13}, r_{21}, r_{22}, r_{23}\}$$

şeklindedir. Bilinmeyenlerle ilgili altı adet denklem verilen ayak uzunluklarından elde edilebilir.

$$\|A_i B_i\| = l_i^2$$

Birinci ayak için bu denklem ;

$$p_1^2 + p_2^2 + p_3^2 = l_i^2 \quad 3.1$$

şeklinde ,diğer ayaklar için ise;

$$b_i^T R^T (p - a_i) - p^T a_i = c_i \quad 3.2$$

$$c_i = \frac{1}{2} (l_i^2 - l_1^2 - \|a_i\|^2 - \|b_i\|^2)$$

$$r_{11}^2 + r_{12}^2 + r_{13}^2 = 1 \quad 3.3$$

$$r_{21}^2 + r_{22}^2 + r_{23}^2 = 1 \quad 3.4$$

$$r_{11} \cdot r_{21} + r_{12} \cdot r_{22} + r_{13} \cdot r_{23} = 0 \quad 3.5$$

şeklindedir.

(3.1),(3.2),(3.3),(3.4),(3.5) 'den 9 tane nonlinear denklem takımı elde edilir. Bu 9 adet nonlinear denklem takımı dekupe edilip ayrıştırıldıktan sonra 8 adet olası  $R$  dönüşüm matrisi için 16 adet  $p$  vektörü elde edilir. Buradan da görüldüğü gibi düz kinematikte olası çözüm sayısı çoktur ve karmaşıktır [1].

#### Ters kinematik :

Ters kinematik probleminde üst platformun konumu verilip ayakların uzunlukları bulunacağından Stewart platformundaki eksen takımlarını aşağıdaki gibi yerleştirebiliriz.

Sabit koordinat eksen takımına ait  $X_1, Y_1$  eksenleri taban düzleminde ve  $X_1$  eksen  $OA_1$  doğrultusunda,  $X_2, Y_2$  eksenleri hareketli platform düzleminde ve  $X_2$  eksen  $OB_1$  doğrultusundadır.  $Z_1$  ve  $Z_2$  eksenleri sağ el kuralı ile bulunmaktadır.

Ayakların taban platformuna bağlantı noktalarını sabit koordinat merkezine birleştiren vektöre sabit koordinat sisteminde  $a_i = (a_{iX1}, a_{iY1}, a_{iZ1})$ , üst uçlardaki mafsalları hareketli platformun koordinat sisteminin merkezine birleştiren vektörü hareketli koordinat sisteminde  $b_i = (b_{iX2}, b_{iY2}, b_{iZ2})$   $i = 1, 2, \dots, 6$  ile ifade edelim.

Sabit eksen takımının merkezini, hareketli eksen takımının merkezine birleştiren vektörü de sabit eksen takımında  $p = (p_{X1}, p_{Y1}, p_{Z1})$  ile ifade edelim. Hareketli eksen takımını sabit eksen takımına dönüştüren dönüşüm matrisine ise  $R$  diyelim.

Burada  $l_i$  ayak uzunluklarını göstermek üzere;

$$(p + R.b_i - a_i)^T . (p + R.b_i - a_i) = l_i^2$$

eşitliği yazılabilir.[13]

Ters kinematik problemi, dönüşüm matrisi  $R$  ve hareketli eksenin sabit eksenlerdeki koordinat vektörü verildiğinde  $l_i$   $i = 1, 2, \dots, 6$  ayak uzunluklarını bulmak olduğundan;

$$l_i = \pm \sqrt{(p + R.b_i - a_i)^T . (p + R.b_i - a_i)} \quad i = 1, 2, \dots, 6 \quad 3.6$$

Verilen bir hareketli platformun konumu için problemin iki çözümü vardır. Ayak uzunluğu negatif olamayacağından negatif çözüm geçersizdir.

### 3.4 STEWART PLATFORMUNUN DİNAMİĞİ

$T$  sistemin toplam kinetik enerjisi,  $V$  sistemin toplam potansiyel enerjisi,

$P$  sistemin toplam dissipatif ( açığa çıkan ) enerjisi olmak üzere;

$\{x, y, z, q, \gamma, f, l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6\}$  genelleştirilmiş koordinatlar,

$\{F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_6\}$  genelleştirilmiş kuvvetler,

$R$  Dönüşüm matrisi

$I_P$  Platformun Eylemsizlik momenti

$w_P$  Platformun Açısal Hızı

$m_P$  Platformun Kütlesi

$I_i$  Her bir ayağın Eylemsizlik momenti

$w_i$  Her bir Ayağın Açısal hızı

$m_i$  Her bir Ayağın Kütlesi

$t_P$  Platformun Kütle merkezinin Yer değiştirmesi

$a_{ci}$  Ayağın Kütle merkezinin yerine ait katsayı

$\mu$  Viskoz sürtünme katsayısı

$v_i$  Her bir ayağın hareket eksenindeki relatif hızı

olmak üzere sistemin toplam kinetik enerjisi;

$$T = T_p + \sum_{i=1}^6 T_i$$

$$T = \frac{1}{2} w_p \cdot I_p \cdot \omega_p + \frac{1}{2} m_p \cdot \dot{l}_p \cdot \dot{l}_p + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^6 (w_i \cdot I_p \cdot \omega_p) \quad 3.7$$

şeklinde yazılabilir. [4] Sistemin toplam potansiyel enerjisi;

$$V = V_p + \sum_{i=1}^6 V_i$$

$$V = m_p \cdot g \cdot z + \sum_{i=1}^6 \alpha_{ci} \cdot m_i \cdot g \cdot S_{iz} \quad 3.8$$

Pnömatik silindirlere bağlantı noktaları göz önüne alınarak sistemin dissipatif enerjisi;

$$P = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^6 \mu \cdot v_i^2 \quad 3.9$$

ve virtüel iş prensibinden enerjisi;

$$dW = F_{11} \cdot \delta l_1 + F_{12} \cdot \delta l_2 + F_{13} \cdot \delta l_3 + F_{14} \cdot \delta l_4 + F_{15} \cdot \delta l_5 + F_{16} \cdot \delta l_6 \quad 3.10$$

olarak ifade edilebilir. Ayrıca kısıt fonksiyonları;

$$g_i = l_i^2 - S_i \cdot S_i \quad i = 1, 2, \dots, 6 \quad 3.11$$

şeklinde dir. Buradan Lagrange denklemleri yazılırsa;

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial T}{\partial q} + \frac{\partial V}{\partial q} + \frac{\partial P}{\partial \dot{q}} + \sum_{r=1}^6 \lambda_r \frac{\partial g_r}{\partial q} = Q_q \quad 3.12$$

sırasıyla  $T$  ,  $V$  ,  $g_i$  ,  $Q$  ifadeleri yerlerine konular ve  $l_i$  ' ler bulunur . Bu denklem takımı çözülerek sistemin dinamik denklemi elde edilir.

Buraya kadar anlatılanları Platform Mekanizmasının hareketini ve dinamik modelini incelemek için kullanabiliriz. Konu ile ilgili ayrıntılı bilgiler için kaynaklar bölümünde [1], [4] , [21] ile verilen eserlere bakabilirsiniz.

### 3.5 KONU İLE İLGİLİ OLARAK DAHA ÖNCE YAYINLANMIŞ MAKALELER ve İÇERİKLERİ

Kaynaklar bölümünde [1] ve [2] ile belirtilen makalelerde 6-6 ' lık bir Stewart platformunun kapalı formda direkt deplasman analizi yapılmış, normalinin denklemleri ve kapalı formda kinematik denklemleri elde edilmiştir.

[3] nolu makalede 6-6 ' lık bir Stewart platformunun deplasman analizi incelenmiş, platformun yapısal parametreleri, koordinat tanımlamaları (taban, üst) yapılarak, giriş ve bilinmeyen değişkenleri bulunmuş daha sonra bacak uzunlukları hesaplanmıştır.

[4] ile belirtilen H. PANG ve M. SHAHINPOOR ' un yaptığı araştırmada , bir paralel manipulatörün kapalı formda kinematik denklemleri gösterilerek Lagrange metodu ile ters dinamiğinin denklemleri elde edilmiştir.

[5] nolu makalede altı serbestlik dereceli bir paralel mini manipulatörün tanımı yapılmış ve buna ait Jacobian matrisi (J), boyutsal olarak uniform Jacobian matrisi ve katılık matrisi elde edilmiştir.

[6] ' da Robot manipulatorları için optimizasyon kriterleri incelenmiş ve kapalı formda kinematik analizi yapılmıştır.

[7] ve [8] nolu makalelerde sensör yapısı ve statik karakteristikleri, kuvvet bileşenleri ve moment bileşenleri incelenmiş, platforma bağlı ve salınım yapan bir pendulumun karakteristikleri araştırılmış ve frekans testleri (düşük ve yüksek) yapılmıştır.

[9] ' da Three-branch manipulator tanıtılmış ( bacakların ortasındaki mafsallar sabitlenirse bizimkine benziyor), kapalı formda ters deplasman problemi incelenmiştir.

[10] nolu makalede Stewart platformunun ters kinematiği için hızlı ve robust çözüm araştırılmıştır.

[11] ile belirtilen makalede Stewart platformu tabanlı paralel manipulatörlerin kalibrasyonu ele alınmıştır.

[12] D. STEWART 'ın bu konu ile ilgili yayınlamış olduğu ilk makale olup 6 serbestlik dereceli kendi adını vermiş olduğu platformu tanıtarak kinematik analizini yapmış, serbestlik derecelerini göstermiş ve bacak uzunluklarını hesaplamıştır.

[13] ile belirtilen makalede küresel merkezli ( Spherical Stewart Platform ) platformun tanıtımı yapılmış ve kinematik karakteristikleri incelenmiştir.

[14] ' de son 15 yıldaki modern kinematik gelişmeler incelenmiş ve paralel manipulatörlere yer verilmiştir.

[15] nolu makalede robot kinematığındeki son gelişmelere yer verilmiştir.

[16] ' da Uzay aracı üzerine bağlanan bir manipulatörün şematik şekli, 3 serbestlik dereceli platforma ait pozisyon analizleri, bacak uzunluklarının analitik hesapları, hız ivme analizleri, etkiyen torklar, momentler, dizayn ve simulasyon konuları işlenmiştir.

[17] nolu makalede beş serbestlik derecesine sahip bir manipulatörün kinematik analizleri incelenerek, geometrik modeli, kinematik denklemleri ve hız denklemleri elde edilmiş, prizmatik ve küresel aktuatörlerle dizaynı karşılaştırılmış deha sonra vektör formulasyonları ve simülasyon örnekleri gösterilmiştir.

[18] ile belirtilen makalede paralel manipulatörlerin genetik algoritmalar yardımıyla ters kinematik çözümünün elde edilmesi konuları işlenmiştir.

[19] nolu makalede bilgisayar kontrollü robotlar için kullanılan pnömatik servo sistemler incelenmiş, servo motorun şematik şekli ve matematik modeli verilmiş daha sonra hal denklemleri türetilerek lineerleştirilmiş bir akışın deneysel olarak incelenmesi konuları işlenmiştir.

Son olarak [20] nolu makalede ise pozisyon kontrollü bir robotun dinamik modeli elde edilmiş, çevrenin dinamik davranışı, robot ve çevrenin non-linear dinamik davranışı, kapalı döngü ve kararlılık analizi , rijit çevre için kararlılık analizi konuları işlenerek kararlılık kriterine örnek bir deneysel çalışma yapılmıştır.

## 4. BÖLÜM

### PNÖMATİK SİSTEMLER

#### 4.1. PNÖMATİĞE GİRİŞ

Atmosferden alınarak küçük bir hacme kuvvet uygulanarak doldurulan hava, sıkıştırılmış havadır. Herhangi bir aracın lastiğine hava pompaladığımızda havayı sıkıştırırız. Birçok sistemde yüksek basınçta sıkıştırılmış hava kullanıldığı için büyük kuvvetlere ihtiyaç vardır. Sıkıştırılmış hava depolanmış enerjidir. Yararlı iş yapabilmek için sıkıştırılmış hava içine depolanan bu enerjiyi kullanan sisteme PNÖMATİK SİSTEM denir. ( Pneumatic Latince’ de ‘rüzgar’ veya ‘ hava’ kelimesinin karşıtıdır.)

Endüstride, atmosferik hava, motorla çevrilen ve kompresör adı verdiğimiz özel bir pompa ile sıkıştırılmaktadır. Kompresör, havayı hazne adı verilen mukavemeti yüksek bir depolama tankına doldurur. Motor yapılan bu işte elektrik enerjisi kullanmaktadır. Bu enerji kompresörü çalıştırır ve enerjinin çoğu haznede sıkıştırılmış hava olarak depolanmıştır. Böylece faydalı iş yapacak tank dolusu enerji sağlanmış olur.

#### 4.2. SIKIŞTIRILMIŞ HAVANIN ENDÜSTRİYEL KULLANIM ALANLARI

Her gün sıkıştırılmış hava ile çalışan birçok araç kullanıyoruz. Bir garajda sıkıştırılmış hava ile çalışan matkap, otomobil yada uçak lastiklerindeki somunları söküp sıkıan takımlar, uçak kanat veya gövdesine perçin takma ve sökmede kullanılan el aletleri, boya tabancaları gibi çeşitli hava basınçlı avadanlıklar bulunabilir. Sıkıştırılmış hava, yol tamiri ve bina inşa işlemleri için havalı matkaplarda kullanılmaktadır. Diş hekimleri sıkıştırılmış hava matkabını, dişleri yüksek hızda delmek için kullanırlar. Araba, otobüs gibi birçok aracın kapıları da pnömatik kumandalıdır. Raylı araçlarda pnömatik frenlere çok rastlanır ve ticari araçların birçoğunun frenlerinde yada debriyajlarında sıkıştırılmış havadan yararlanılır. Bazı modern motorlu araçların süspansiyonunda yine sıkıştırılmış hava kullanılmaktadır.

Endüstrideki otomasyon sistemleri ve üretim hatlarında da pnömatik elemanlara sıkça rastlanmaktadır. Bu elemanlar malzeme aktarımı, parça işlenmesi, montaj ve paketleme gibi otomatik üretim işlemlerine imkan sağlarlar. Elle yapılan birçok üretim işlemlerindeki kontrol ve emniyet sistemleri pnömatik cihazlardan yararlanırlar.

Pnömatik, otomasyonda şu işlerin yürütülmesinde kullanılmaktadır:

- Sistemin durumunun pnömatik algılayıcılarla saptanması,
- Algılayıcılardan gelen bilgilerin işlenmesi,
- Kumanda elemanları ile eyleyicilerin harekete geçirilmesi,
- Eyleyicilerle bir işin gerçekleştirilmesi,

Herhangi bir sistemin kontrolü için, sistem durumunun ve anahtarlama koşullarının, karmaşık makine devrelerinde değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu görev algılayıcılar, işlemciler, kumanda ve eyleyici elemanların tamamen pnömatik ya da kısmen pnömatik sistemlerde birlikte çalışmalarıyla yürütülmektedir.

Malzeme, üretim ve tasarım yöntemlerindeki teknolojik gelişmeler pnömatik elemanların kalitesini ve çeşitliliğini arttırmıştır. Bu gelişmeler otomasyon işlemlerinde pnömatik elemanların kullanılmasının yaygınlaşmasına katkıda bulunmuştur.

Pnömatik silindir, bağıl olarak ucuz, bağlantısı kolay, basit ve dayanıklı konstrüksiyonu, değişik boyutlarda bulunabilir olması nedeniyle doğrusal tahrik elemanı olarak önemli bir yere sahiptir.

Pnömatik eyleyicilerle doğrusal hareket, salınım hareketi dönme hareketi gerçekleştirilebilir.

Endüstride pnömatiğin bazı uygulama alanları aşağıdaki gibi özetlenebilir.

1 ) Genel olarak iş parçalarının hareketinde :

İş parçalarının,

- bağlanması,
- ilettilmesinde,
- sürülmesinde,
- konumlandırılmasında,
- sistem içinde yönlendirilmesinde ve malzeme akışının yönlendirilmesinde

kullanıldığı gibi,

2 ) Genel olarak değişik alanlarda :

- Paketleme,
- Sürme,
- Oranlama,
- Kapı, menfez kontrolü,
- Malzeme taşıma,
- İş parçalarının döndürülmesi, çevrilmesi,

- Yığma,
- İstifleme,
- İş parçalarının birbirinden ayrılması,
- İş parçalarının basılması ve damgalanması işlemlerinde de kullanılmaktadır.

Havacılık sektöründe birçok takım ve avadanlıkta pnömatik sistem mevcut olduğu gibi uçakların ve uzay araçlarının birçok kumanda sistemi de pnömatik olarak kontrol edilmektedir.

Pnömatik sistemler aynı zamanda hidrolik sistemler ile birlikte de kullanılmaktadırlar. Böyle sistemlere İngilizce olarak pnömatik ve hidrolik kelimelerinden oluşan 'PNEUDRAULIC' sistem adı verilir. Bu gibi sistemlere F-4 E PHANTOM II uçaklarının acil durum sistemlerini örnek gösterebiliriz. Tehlike durumlarında, örneğin yere inişte hidrolik sistemdeki bir arızadan dolayı iniş takımları açılmıyorsa pnömatik sistem otomatik olarak devreye girer ve iniş takımlarının açılmasını sağlayarak uçağın yere inişine izin verir.

Bu uçaklara ait pnömatik sistem, kanopilerin normal veya acil durumlarda açılıp kapanmasını, iniş takımları, flap ve slatların acil durumlarda açılıp kapanmasını kontrol eden ve yüksek basınçlı ( 3000 Psi ) hava sağlayan bir sistemdir. Sistem üzerinde bulunan manometreler manifold basınçlarını göstermektedirler. Sistemin temel elemanları hava kompresörü, nem seperatörü, kimyasal kurutucu, hava şarj valfi, basınç transmitteri, basınç saatleri, hava tüpleri ve selektör valflerden oluşur.

Genel bilgi olarak kısaca F-4E uçağına ait pnömatik sistemin çalışmasını şu şekilde ifade edebiliriz:

İlk önce kompresör sıkıştırılacak havayı motor taze hava sisteminden alır. Bu hava kompresör tarafından sıkıştırılır. Kompresörün çalışması otomatik olmaktadır. Manifold basıncı 2750 Psi ' nin altına düştüğünde çalışmaya başlar. 3200 Psi ' da çalışması otomatik olarak durur. Kompresörü, hidrolik basıncı ile çalışan bir motor döndürmektedir. Sistemin devreye girmesi için motorların çalışır durumda olması ve pnömatik sistem basıncının 2750 Psi ' nin altına düşmesi gerekir. Burada mevcut olan kompresör basınç butonu, kompresörün 2750 - 3200 Psi ' lik basınçlar arasında çalışmasını temin eder. Yine bu sistemde Dump Valf adı verilen bir aparat, kompresör durduğunda enerjisi kesilerek açılır ve seperatör içinde biriken su yada nemi dışarı atar. Nem seperatörü, kompresörün basmış olduğu havanın içindeki nemin yaklaşık % 95 ' ini alır. Daha sonra, geriye kalan % 5 nem de kimyasal kurutucu tarafından alınır.

Basınç butonunun arızalanması durumunda da, 3250 - 3500 Psi basınca ayarlanmış olan Relief Valf adı verilen bir aparat sistemi korur.

#### 4.3. PNÖMATİĞİN OLUMLU ÖZELLİKLERİ

Miktar : Hava her yerde sınırsız şekilde kullanıma hazırdır.

Dağıtım : Hava boru hatları ile çok uzağa bile boru hatları ile taşınabilir.

Depo edilebilirlik : Basınçlı hava bir hava kazanı içinde depolanır ve istenildiği zaman alınıp kullanılabilir. Hava kazanı ayrıca taşınabilir şekilde tasarlanabilir.

Sıcaklık : Basınçlı hava sıcaklık değişmelerine karşı hemen hemen duyarsızdır. Bu özellik geniş bir aralıkta güvenli bir çalışma sağlar.

Güvenlik : Basınçlı hava patlamaya ve yanmaya karşı son derece güvenlidir.

Temizlik : Yağlanmış hava temizdir. Çevre kirlenmesine neden olmaz bu özellik gıda, ilaç ve tekstil sanayiinde son derece önemlidir.

Elemanlar : Elemanların konstrüksiyonu basittir. Bu nedenle bağl olarak pahalı değildirler.

Hız : Basınçlı hava hızlı bir çalışma ortamıdır. Bu nedenle yüksek piston hızı ve kısa anahtarlama zamanı sağlanabilir.

Aşırı yük emniyeti : Pnömatik aletler ve elemanlar durma noktasına kadar yüklenebilirler.

Pnömatiğin uygulama alanlarını doğru bir şekilde saptayabilmek için kuşkusuz olumsuz yanlarını da bilmek gerekir.

Bunlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

Hazırlama : Basınçlı havanın kullanılmadan önce belli koşulları yerine getirecek şekilde hazırlanması gerekir. Bu yapılmadığı takdirde devre elemanlarında yabancı parçacıklar ve yoğunlaşan sudan dolayı normalden daha fazla aşınmalar görülür.

Sıkıştırılabilirlik : Havanın sıkıştırılabilir olması nedeniyle düzgün ve sabit bir piston hızı elde edilemez.

Kuvvet : Basınçlı hava belirli bir kuvvet gereksinimine kadar ekonomiktir. Normal koşullarda çalışma basıncı 6 - 7 bardır ( 600 - 700 kpa ). Strok ve hıza bağlı olarak elde edilebilecek kuvvet sınırı yaklaşık 20.000 - 30.000 Newton arasındadır.

Gürültü : Havanın dışarı atılması esnasında gürültü meydana gelir. Günümüzde bu sorun ses yalıtım elemanları ve susturuculardaki gelişmeler sayesinde önemli ölçüde çözülmüştür.

Pnömatiğin kontrol ve iş ortamı olarak seçiminde, karar etkenlerinin en önemlilerinden birisi de, diğer iş ve kontrol ortamları ile karşılaştırılmasıyla elde edilecek olumlu ve olumsuz yönlerin dikkatli bir şekilde incelenmesidir. Bu değerlendirme işaret algılanmasından çıkışa kadar bütün elemanlar için bütün sistem bölümlerinde yapılmalıdır. Bunun yardımı ile ayrıca aşağıdaki noktalarda dikkate alınmalıdır.

- İşletmede var olan sistemler,
- İşletmede var olan donanım
- Çalışanların teknik bilgisi
- Tercih edilen kontrol yöntemleri

İş ortamları :

- Elektrik
- Pnömatik
- Hidrolik
- Bu üç ortamın değişik şekillerde birlikte kullanılması

İş ortamının seçiminde dikkat edilmesi gereken hususlar :

- Kuvvet
- Strok
- Hareket şekli ( doğrusal, salınımlı, rotasyonel )
- Hız
- Duyarlık
- Kontrol edilebilirlik
- Çalışma süresi
- Emniyet ve güvenilirlik
- Enerji maliyeti
- Kullanılabilirlik
- Depo edilebilirlik

Kontrol ortamları :

- Mekanik
- Elektrik

- Elektronik
- Pnömatik
- Düşük basınç pnömatiği
- Hidrolik
- Yukarıdaki ortamların uygun şekilde birleşimi

Kontrol ortamının seçilmesinde dikkat edilmesi gereken hususlar :

- Devre elemanlarının güvenilirliği
- Çevre etkilerine karşı duyarlılık
- Bakım ve tamir kolaylığı
- Elemanların anahtarlama zamanı
- İşaret hızı
- Yer gereksinimi
- Çalışma süresi
- Sistemin değiştirilebilirliği, esnekliği
- Çalışanların eğitimi için gereken harcama

Pnömatik devre elemanlarını aşağıdaki şekilde gruplandırabiliriz :

- Eyleyiciler
- Algılayıcılar ve giriş elemanları
- İşlemciler
- Yön donatım elemanları
- Kontrol sistemleri

Pnömatik kontrol sistemlerinin tasarlanması ve kurulmasında aşağıdaki noktalar göz önünde tutulmalıdır :

- Güvenilirlik
- Bakıma elverişlilik
- Yedek parça maliyeti
- Kurma ve bağlantı olanakları
- Bakım maliyeti
- Değişebilirlik.

- Az uyumluluk
- Ekonomiklik
- Dökümantasyon

#### 4.4. PNÖMATİK SİSTEM ELEMANLARI

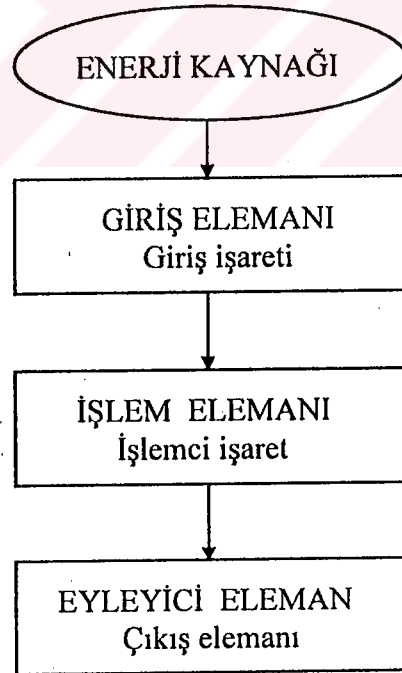
Pnömatik kontrol sistemleri, çeşitli eleman gruplarının biraraya gelmesinden meydana gelmektedir. Bu eleman grupları işaret giriş noktasından tahrik elemanı dediğimiz eyleyiciye kadar uzanan bir kontrol hattı oluştururlar. Kumanda elemanı, işlemciden gelen işaretlere uygun olarak eyleyici elemene kumanda gönderen, kontrolü sağlayan elemanlardır.

##### 4.4.1. Pnömatik Sistemlerin Yapısı ve İşaret Akışı

Pnömatik kontrol sistemlerinin ana elemanları şunlardan oluşmaktadır :

- Enerji kaynağı
- Algılayıcılar ( Algılayıcılar )
- İşleme elemanı ( İşlemciler )
- İş ve tahrik elemanları ( Eyleyiciler )

Buna göre akış diagramını şu şekilde gösterebiliriz



Pnömatik sistem devrelerindeki semboller, gerekli elemanları ve bunların nasıl bağlandıklarını göstermek için kullanılırlar. Herbiri işlevini temsil eden sembollerle gösterilirler. Bunların bir görevi yerine getirecek şekilde birbirine bağlanması ile

pnömatik devre şeması elde edilir. Bu devre şeması yukarıda gösterilen işaret akış şemasındaki sıraya göre çizilir.

Yönlendirme valfi işaret, işlem ve kumanda elemanı olarak kullanılabilir. Bu durumda valfin hangi eleman grubuna bağlı olduğu elemanın sistem içindeki yerine bakılarak saptanabilir.

#### 4.4.2. Basınçlı Havanın Hazırlanması ve Dağıtılması

Pnömatik sistemin basınçlı hava gereksinimi yeterli ve kaliteli bir şekilde sağlanmalıdır.

Basınçlı hava hazırlama sistemi bu gereksinimlere cevap verecek şekilde tasarlanmalı ve boyutlandırılmalıdır.

Bilindiği gibi hava kompresör tarafından sıkıştırılır ve hava dağıtım sistemine gönderilir.

Basınçlı havanın istenilen kalitede kontrol sistemine gönderilebilmesi için kontrol sisteminden önce bir koşullandırıcı bulunur.

Sistem arızalarından mümkün olduğunca kaçınmak amacı ile basınçlı hava hazırlama sisteminin tasarlanmasında aşağıdaki şartlara dikkat edilmelidir :

- Hava tüketimi
- Kompresör tipi
- Gerekli sistem basıncı
- Gerekli kazan kapasitesi
- Gerekli temizlik derecesi
- Hava neminin mümkün olduğu kadar düşük olması
- Yağlama gereksinimi
- Hava sıcaklığı ve sistem üzerindeki etkileri
- Dağıtım hattı ve valf büyüklükleri
- Çevre ve sistem koşullarına uygun malzeme seçimi
- Dağıtım sisteminde hava ve su boşaltma yerleri
- Dağıtım sisteminin hava gereksinimini karşılayacak şekilde düzenlenmesi

Genel olarak pnömatik devre elemanları 8 - 10 barlık işletme basıncına göre tasarlanırlar.

Bununla birlikte ekonomik faktörlerden dolayı 5 - 6 bar basınçta çalıştırılmaları uygundur. İletim hattındaki sürtünme kayıpları da hesaba katılırsa kompresörün 6.5 - 7 bar basınçta çalıştırılması önerilir.

Sistemde basınç salınımlarını önleyebilmek için kompresörden sonra bir hava kazanı konulmalıdır. Kompresörün çalışması esnasında hava kazanı basınçlı hava ile doldurulur. Basınçlı hava, bu kazandan istenildiği zaman alınarak kullanılabilir.

Eğer pnömatik sistem için havanın yağlanması gerekiyor ise havaya koşullandırıcıda yağ ilave edilmelidir. Normal koşullarda kontrol sistemi için yağlama gerektirmeyen elemanlar seçilmelidir.

Hava dağıtım sisteminin belli noktalarında fazla hava gereksinimi varsa, sistemdeki basınç salınımlarını azaltmak için ana dağıtım hattı belli noktalarda çapraz hatlarla birbirine bağlanmalıdır. Hava dağıtım hattı kompresörden belli uzaklıklarda yoğunlaşma suyunu tahliye edebilmek amacı ile % 1 - 2 eğimle kurulmalıdır. Eğer yoğunlaşma suyu fazla ise sisteme bir kurutucu eklenmesi gereklidir. Çünkü yoğunlaşma, pnömatik sistemlerin arıza sebeplerinin başında gelir.

Koşullandırma birimi olarak adlandırdığımız kısım aşağıda belirtilen elemanlardan meydana gelmektedir.

- Basınçlı hava filtresi
- Basınç ayarlayıcı
- Yağlayıcı

Koşullandırıcının hangi özellikleri içermesi gerektiği, büyüklüğü ve tipi sistemin gereksinimlerine göre belirlenir. Hava kalitesinin istenilen özelliklerde olmasını sağlamak için, sistemdeki her kontrol elemanının başına bir koşullandırıcı konulmalıdır.

Hava Filtresi :

Bilindiği gibi filtrenin görevi, havanın içinde bulunan kirletici maddeleri ve yoğunlaşma suyunu tutmaktır. Hava, filtre içinde bulunan yönlendirici kanallar ile filtre elemanı içine alınır. sıvı ve büyük parçacıklar merkezkaç kuvveti etkisi ile havadan ayrılırlar ve filtre tabanında toplanırlar. Filtrede toplanan yoğunlaşma suyu, işaretlenmiş en yüksek seviyeye ulaşmadan boşaltılmalıdır. Aksi takdirde suyun tekrar havaya karışması söz konusudur.

Basınç Ayarlayıcı :

Pnömatik sistemde basınç ayarlayıcısının görevi, dağıtım hattındaki basınç dalgalanmalarına ve kontrol sistemindeki değişen hava tüketimine göre, kontrol sistemindeki basıncı belli bir sınır içinde sabit tutmaktır.

Hava Yağlayıcı :

Hava yağlayıcısının asıl fonksiyonu, pnömatik sistem elemanlarının yağlanması için gereken yağı uygun oranda havaya karıştırmaktır.

#### 4.4.3. Valfler

Valfler, işlerine, kumanda tiplerine ve tasarımlarına göre çeşitli gruplara ayrılırlar. Bunları aşağıdaki gruplar gibi sıralayabiliriz.

##### 1 ) Yönlendirme valfleri.

- İşaret elemanı,
- İşlem elemanı,
- Kumanda elemanı olarak görev yaparlar

##### 2 ) Geri döndürmez valfler

##### 3 ) Akış kontrol valfler

##### 4 ) Basınç kontrol valfleri

##### 5 ) Değişik işlevleri bir arada içeren valfler

##### Yönlendirme Valfleri :

Bu valfler hava akımının yönünü kontrol ederler. Aynı zamanda hava akış yolunu kapatabilirler, açabilirler veya akış yönünü değiştirebilirler.

İşaret elemanı işlevini gören yönlendirme valfine örnek olarak, bir silindirin piston konumunu algılamak için kullanılan makaralı valf gösterilebilir. İşlem elemanı olarak çalışan yönlendirme valfine örnek olarak ta, işaret sağlayan, işaret silen veya işaret gönderen valfler gösterilebilir. İşlem eleman, bu işlevini kumanda elemanına bağlı olarak gerçekleştirir. Kumanda elemanı olarak çalışan bir yönlendirme valfi, iş elemanı için gerekli havanın girişine müsaade edecek büyüklükte olmalıdır.

##### Geri Döndürmez Valfler :

Geri döndürmez valfler adından da anlaşıldığı gibi akışa bir yönde izin verir. Bu valflerle benzer görevleri yapan diğer bazı valfler de mevcuttur. Bunlar, tek yönlü akış kontrol valfi, VE valfi, VEYA valfi, çabuk atış valfleridir.

##### Akış Kontrol Valfleri :

Akış kontrol valfi akış kesitini daraltır veya tamamen kapatabilir. Böylelikle akış hızı kontrol edilmiş olur. İdeal durum, akış kontrol valfinin kademesiz olarak akışı, tam açık durumdan tam kapalı duruma kadar kontrol edilebilmesidir. Akış kontrol valfi mümkün olduğunca eyleyici elemanın yakınına konulmalı ve kullanma durumuna göre

ayarlanabilmelidir. Eğer akış kontrol valfine paralel olarak, geri döndürmez valf de kullanılırsa sadece bir yönde akış kontrol edilir.

#### Basınç Kontrol Valfleri :

Bu valfleri üç ana grupta incelemek mümkündür :

1. Basınç sınırlama valfleri
2. Basınç ayar valfleri
3. Basınç anahtarlama valfleri

Bunlardan basınç sınırlama valfleri, sistem basıncının istenen değerin üstüne çıkmasını engeller. Bu, sistem güvenliği açısından önemli bir yer teşkil eder.

Basınç ayar valfleri, çalışma basıncını, sistemdeki basınç salınımlarından bağımsız olarak, belli sınırlar içerisinde sabit tutar.

Basınç anahtarlama valfleri ise, bir kontrol sisteminde basınç bağımlı bir işaret ile bir devrenin anahtarlama gereken yerlerde kullanılır.

Uygulanan basınç, arzu edilen ve daha önceden ayarlanan basınç değerine ulaştığında 3/2 yönlendirme valfi kumanda alır ve işaret verir. Eğer uygulanan basınç, ayarlanan basınç değerinin altına düşerse valf tekrar normal konumuna geri döner.

#### Birleşik Valfler :

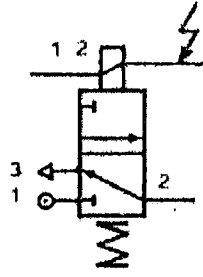
Değişik işlevli elemanların bir arada kullanılması ile yeni işlevli bir eleman elde edilebilir.

Yeni işlevli eleman, ilgili elemanların bir arada kullanılması ile elde edilebileceği gibi, yer tasarrufu yapmak ve basitleştirmek amacı ile bir bütün olarak tek bir blok şeklinde de üretilebilirler. Buna örnek olarak zaman geciktirme valfi gösterilebilir. Zaman geciktirme valfi, bir tek akış kontrol valfi, bir biriktirici ve 3/2 yönlendirme valfinin bir araya getirilmesinden meydana gelir.

Kumanda işareti gönderildiğinde valf ancak daha önceden ayarlanan süre dolduğunda anahtarlınır. Kumanda işareti var olduğu sürece valf anahtarlınmış olarak kalır. Diğer birleşik valfler, tek yönlü akış kontrol valfi, iki el emniyet valfi ve impuls valfleridir.

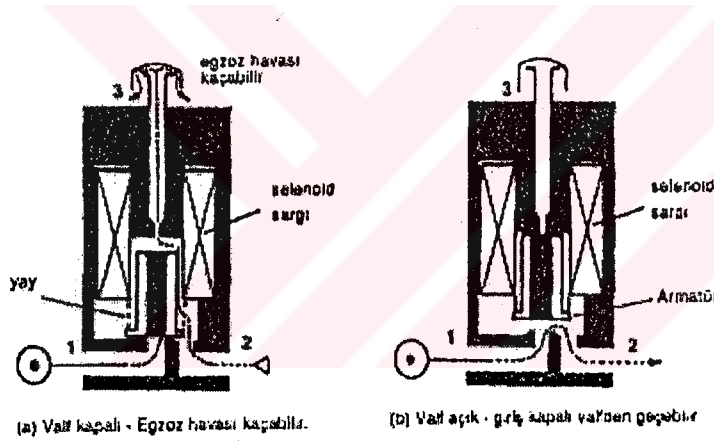
#### Solenoid Valfler :

Pnömatik devre kontrolünde elektrik devreleri kullanılabilir. Buna solenoid valf gibi bir elektro-pnömatik valf olarak sağlar. Solenoid valf 3 veya 5 yollu olabilir. Solenoid üzerinde tel sargı bulunur. Sargıdan elektrik akımı geçirilince, sargı etrafında manyetik alan oluşur. Enerjilenmiş sargı önüne demir bir armatür yerleştirilirse, demir armatür sargıya doğru çekilir. Demir armatürün bu hareketi valfin kumandasında kullanılır.



Şekil 4.1 Selenoid kumandalı 3-yollu valf için ISO sembolü

3-yollu valf kesiti Şekil 4.2 'de gösterilmiştir. Ana hava 1 no' lu girişe bağlıdır. Sargıdan elektrik akımı geçmediği zaman yay yüklü demir armatürlü valf içinden hava geçmesine izin vermez. Selenoid sargı enerjilenince armatür sargı merkezine doğru çekilir. Böylece ana giriş havasının 2 no' lu delikten geçmesi sağlanmış olur.



Şekil 4.2 Selenoid kumandalı 3-yollu valf kesiti

Selenoid Valflerin Kullanım Yerleri :

Selnoid valfin kullanımındaki faydaları kısaca aşağıdaki gibi sıralayabiliriz :

- Elektrik sinyalleri, pnömatik sinyallere göre daha uzak mesafelere, daha az kayıpla taşınabilirler.

- Elektrik sinyaller pnömatik sinyallere göre daha çabuk sinyal verirler.

- Elektrik sinyallerinde enerji kullanımı pnömatik sinyallere göre daha azdır.

(Kontrol sinyallerinin kullanımında sıkıştırılmış hava pahalı çözümdür. )

- Elektrik ve elektronik sinyalleme pnömatik sinyallemeye göre daha yüksek verimlidir.
- Elektrik ve elektronik kontrol devrelerinde kullanılan elemanlar, pnömatik elemanlara göre daha ucuz ve daha az yer kaplarlar.

Solenoid valf sargıları değişik voltajlarda çalışabilir

Örneğin :

12 Volt DC

24 Volt DC

50 Volt DC

110 Volt AC

240 Volt AC ( En yaygın kullanılan akım voltajı )

440 Volt AC

Emniyet düşünüldüğü sürece düşük voltajlı valfler tercih edilmelidir. Pnömatik avadanlıklardaki solenoid valfler 12 Volt DC 'de çalışırlar.

Solenoid valf tek-etkili silindir kontrolünde kullanılabilir. (Şekil 4.3)

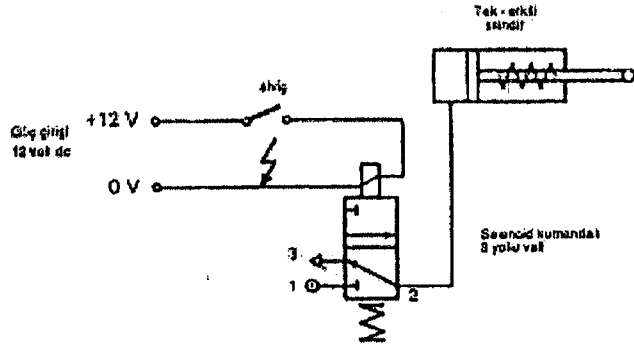


Sembolü güç kaynağı ile solenoid valf arasındaki elektrik hattını temsil eder.

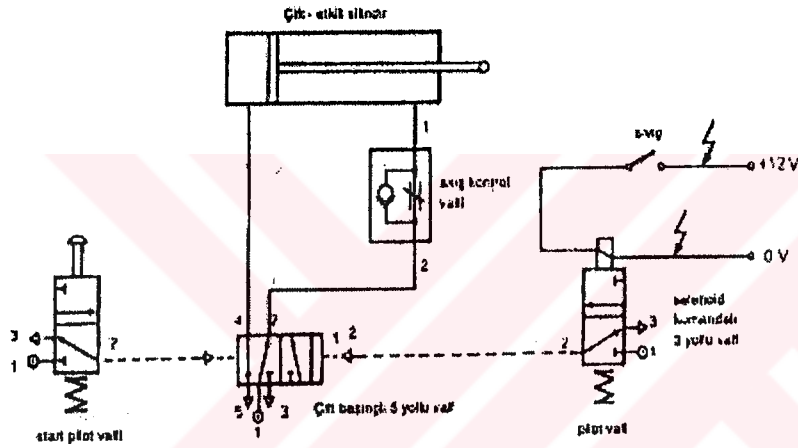
Anahtar kapalı iken, solenoid sargı enerjilidir. Hava, valfin 2 no' lu deliğinden geçip tek-etkili silindire pozitif hareket yaptırır. Uzaktaki bir noktadan yapılacak kontrolde hızlı cevap veren solenoid valf daha yararlıdır.

Solenoid valf çift-etkili silindir kontrolünde pilot valfi gibi kullanılabilir. ( Şekil 4.4 )

anahtar kapalı iken, solenoid valf pilot hava sinyalini gönderir. Bu hava sinyali kontrol valfini çalıştırır ve çift-etkili silindir pozitif hareket yapar. Butonlu 3-yollu pilot valfi devreye sokularak silindirin tekrar negatif konuma getirilmesi sağlanmış olur. Piston hızı, çıkış kursu yönünde kontrol edilir.



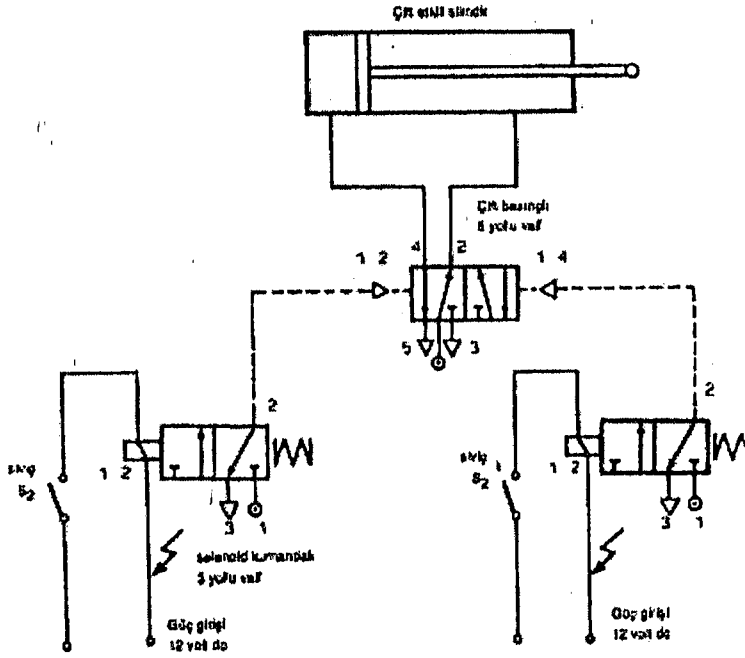
Şekil 4.3 Tek-etkili silindirin selenoid valf ile kontrolü



Şekil 4.4 Çift-etkili silindirin selenoid valfi ile kontrolü

Endüstriyel kimya tesislerinde ve tehlikeli sıvı taşıyan borulardaki valfler, uzaktan kumandalı pnömatik silindirle açılıp kapatılabilir.

Şekil 4.4 ' te gösterilen selenoid valf devresi bu türdeki uygulama için uygundur.



Şekil 4.5 Çift-etkili silindirin iki selenoid valfle kontrolü

Şekil 4.5 ' da çift-etkili silindirin kontrolünde iki selenoid valfin pilot valf olarak nasıl kullanılabileceği gösterilmiştir. S<sub>2</sub> elektrik anahtarı kapalı iken silindir pozitif hareket yapar. S<sub>2</sub> anahtarı açılınca ve S<sub>1</sub> kapatılınca silindir negatif harekete geçer.

S<sub>2</sub> anahtarı kapalı iken, çift basınçlı 5-yollu valf aynı anda her iki ucundan sinyallenemediği için silindir negatif hareket yapamaz.

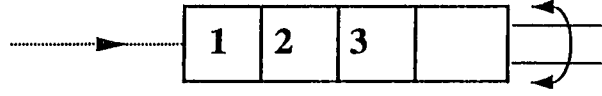
5-yollu valfte iki ayrı anahtar kullanımı uygun değildir. Çünkü hatta sinyalleme problemleri çıkabilir. Bu problemleri yenebilmek için tek kutuplu çift kademeli elektrik anahtarı kullanılarak her iki selenoid valfe sırayla kontrol sağlanabilir.

#### 4.4.4. Pnömatik Sayıcı

Pnömatik sayıcı hava sinyallerini sayar. Hava sinyalleri gösterge paneline kaydedilir. Sayıcının sıfırlanması tuşla yapılabilir. Pnömatik sayıcı elektrik sayıcısına benzese de, patlayıcı madde endüstrisi veya petro-kimya tesisleri gibi tehlikeli ortamlarda kullanımı elektrik sayıcısına göre daha emniyetlidir. Şekil 4.6 ' de pnömatik sayıcının sembolü gösterilmiştir.

Pnömatik sayıcı hava tahliye devresi ile de kullanılabilir. Hava tahliyesi kapatıldığında veya açıldığında hava sinyali gösterge paneline kaydedilir. Hava tahliyesi açıldığında, sayıcıya gönderilen hava sinyali basınca duyarlı valften atmosfere atılır. Bu devre hava

tahliyesinden geçen nesnelerin sayımında kullanılabilir. Örneğin hava tahliyesine esnek tüp bağlı ise, tüpün her seferinde sıkışması ve serbest bırakılması sayıcıda bir vuruş olarak kaydedilir. Sayma devresi yoldan geçen araçların sayımında da kullanılabilir.



Şekil 4.6 Pnömatik sayıcının ISO sembolü

#### 4.4.5. İşlemciler

İşlemci olarak yönlendirme valflerini kullanabilmek ve kumanda edebilmek için çeşitli mantık elemanları vardır. Mantık elemanları algılayıcılardan gelen işaretleri mantık ifadelerine göre işlerler. Mantık elemanları şunlardır :

- VE elemanı
- VEYA elemanı

VE valfi ancak bir giriş işaretinin de var olması durumunda çıkış vermektedir. Eğer iki girişte farklı basınçlar var ise, düşük basınçlı olan giriş çıkışa bağlanır. Bu açıklamadan da anlaşılacağı gibi VE valfi iki girişe ve bir çıkışa sahiptir.

Pnömatik işlemcilerin geliştirilmesine yönelik çalışmalar sonucu modüler sistemler gerçekleştirilmiştir. Modüler sistemlerde, sistem aynı zamanda yönlendirme valfi işlevlerini ve mantık işlevlerini, bir görevi yerine getirecek şekilde, belli bir amaca yönelik olarak tasarlanırlar ve imal edilirler. Bu çözüm şekli, boyutları ve maliyeti düşürdüğü gibi aynı zamanda karmaşıklığı da önler.

#### 4.4.6. Tahrik Elemanları ( Eyleyiciler ve Kumanda Valfleri )

Eyleyiciler değişik büyüklük ve tasarımlarda olmak üzere başlıca doğrusal ve döner tahrik elemanları şeklinde sınıflandırılabilirler. Eyleyiciler kontrol sistemlerinin son kumanda elemanı görevini yerine getiren yönlendirme valfleri ile kumanda edilirler. Normal koşullarda bu valf akış kayıplarını mümkün olduğunca azaltabilmek için doğrudan ana hava dağıtım hattına bağlanırlar.

Eyleyiciler aşağıdaki gibi iki grup içinde ayrıca alt gruplara ayrılırlar :

##### 1 ) Doğrusal eyleyiciler

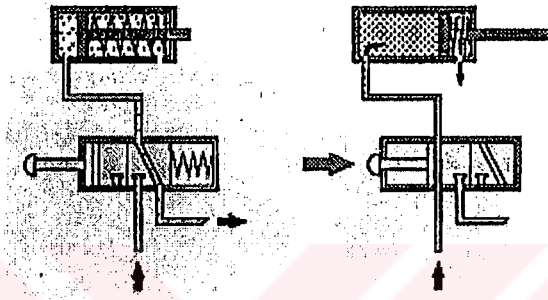
- Tek etkili silindir
- Çift etkili silindir

## 2 ) Döner eyleyiciler

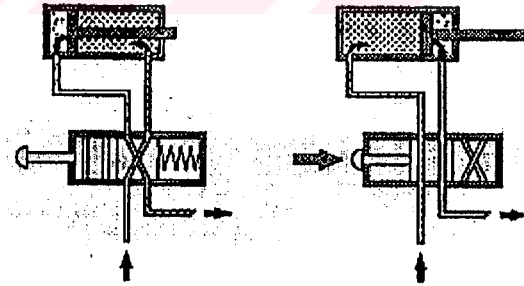
### Salınımlı tahrik elemanları

- Hava motoru

Aşağıdaki şekilde tek ve çift etkili silindirlerin şematik şekli görülmektedir.



Şekil 4.7 Tek etkili silindir



Şekil 4.8 Çift etkili silindir

#### 4.4.7. Tahrik Elemanlarında Doğrusal Hareket

Pnömatik silindirlerin itme veya çekme kuvveti üretebilmeleri için belli basınçta beslenmeleri gereklidir. Üretilecek kuvvetin şiddeti bu basınca ve piston alanına bağlıdır. Piston ile silindir iç yüzeyi arasında mevcut olan sürtünme kuvveti de silindirden elde etmek istediğimiz kuvveti olumsuz yönde etkilemektedir.

Bu durumda pistonun tam yüzey alanına etkiyen kuvveti basitçe,

$$F = \int P.dA$$

şeklinde ifade edebiliriz.

Burada,

F : Kuvvet ( N )

P : Basınç ( N/m<sup>2</sup> )

A : Alan ( m<sup>2</sup> )

'dir.

#### 4.4.8 . Kontrol Sistemleri

Genel bir silindirin kumandası yönlendirme valfi ile yapılır. Bu yönlendirme valfinin seçimi ( yol ve konum sayısı, kumanda şekli ) kullanma yerine göre değişir.

Tek etkili bir silindirin kumandası :

Bu silindirin kumandasını bir örnekle açıklayalım. Bilindiği gibi tek-etkili bir silindire basınç uygulandığında piston ileri doğru ötelenir. Kumanda valfi silindire giden hava akışını kesecek konuma getirildiğinde, piston kendiliğinden tekrar başlangıç konumuna döner. Tek etkili bir silindirin kumandası 3/2 yönlendirme valfi ile gerçekleştirilir. Bu örnek için elle kumandalı valf kullanacak olursak, kumanda düğmesine basıldığında valf normal konumdan akışı sağlayacak konuma geçecek şekilde anahtarlanır. Düğme serbest bırakıldığında yayın geri getirme etkisi ile valf tekrar normal konuma döner. Devre şeması aşağıdaki elemanlardan meydana gelmektedir.

- Yay geri getirmeli tek etkili silindir
- 3/2 - yönlendirme valfi, elle kumandalı
- Yönlendirme valfine bağlanmış basınçlı hava beslemesi
- Yönlendirme valfi ile silindir arasında basınçlı hava bağlantısı

3/2-yönlendirme valfinin bağlantıları basınçlı hava bağlantısı, silindire giden çıkış bağlantısı ve hava tahliye bağlantılarıdır. Bu bağlantıların, aralarında birbirine bağlanma durumları valf konum sayısını belirtir. Bu durumda anahtarlama konumu ikidir.

Başlangıç konumu, bütün bağlantılar yapılmış ve sistem üzerinde dışarıdan verilmiş bir kumanda yok iken sistemin aldığı konumdur. Kumandasız durumda, bir başka ifade ile normal konumda, basınçlı havanın akış kesiti kapatılmıştır. Bu durumda silindir pistonu, yayın geri getirme etkisi ile geri konumdadır.

Kumanda düğmesinin basılı olduğu durumda, 3/2-yönlendirme valfi yaya karşı çalışarak valfi diğer konuma getirir. Valfin çalışma konumunda ise, basınçlı hava bağlantısı valf üzerinden silindire, pistonu ileri itecek şekilde bağlanmıştır. Silindir son konuma ulaştığında, maksimum sistem basıncı elde edilir.

Buton üzerindeki kumanda kaldırıldığında, geri getirme yayı valfi normal konumuna getirir. Valfin normal konuma getirilmesi ile silindire uygulanan basınç ortadan kalkar ve silindir pistonu tekrar geri döner.

Silindir pistonunun ileri ve geri gidiş hızları genel olarak birbirine eşit değildir. Çünkü ;

- 1 ) Pistonun ileri doğru hareketinde yay karşı bir kuvvet oluşturur
- 2 ) Pistonun geriye doğru hareketinde valf üzerinden dışarı atılan havaya karşı bir direnç oluşur.

Normal koşullar altında pistonun ileri ve geri yöndeki hızları farklıdır. Piston mili ileri hareket ederken basınç kuvvetinin etkisi altındadır. Oysa geri dönüş yay kuvvetinin etkisi ile sağlanmaktadır. Bu yüzden ileri gitme hızı, geri dönme hızından yüksektir.

#### Çift - Etkili Silindirin Kumandası

Bu tip silindirin kumandasını da yine bir örnekle açıklayalım. Çift-etkili silindir kumanda düğmesinin basılması ile ileri ötelensin ve tekrar düğmenin serbest bırakılması ile tekrar geri dönsün. Çift -etkili silindire hem ileri hem de geri dönüşte iş yapabilmesi için iki yönde basınç uygulansın. Bu durumda çift-etkili silindirin kumandası el kontrollü bir 4/2-yönlendirme valfi ile gerçekleştirilir. Düğmenin basılması ile valfe kumanda işareti uygulanırt, serbest bırakılması ile de işaret kaldırılır. Devre aşağıdaki elemanlardan meydana gelir :

- 1 ) Çift etkili silindir
- 2 ) 4/2- yönlendirme valfi ( yay geri getirmeli,elle kumandalı )
- 3 ) 4/2- yönlendirme valfinin basınç bağlantısına bağlanmış basınçlı hava hattı
- 4 ) Valf ile silindir arasındaki bağlantı hortumu

Başlangıç konumu bütün bağlantılar yapılmış ve sistem üzerinde hiçbir kumandanın bulunmadığı durumda sistemin aldığı konumdur. Valf, kumandasız durumda iken silindirin piston halka yüzeyine basınç uygulanmaktadır. Diğer taraf ise valf üzerinden atmosfere açılmıştır.

Düğmenin basılması ile 4/2- yönlendirme valfini normal konumda etkileyen yay kuvveti yenilerek valf kumandalı konuma geçirilir. Bu konumda basınçlı hava pistonun tam yüzeyine uygulanır. Pistonun tam yüzeyine basınç uygulanması ile ileri doğru hareket eder. Piston son konuma ulaştığında, uygulanan basınç maksimum sistem basıncına ulaşır.

Düğmeye basılmadığı zaman, valf yayın geri getirme etkisi ile normal konumda bulunur. Valf bu konumda iken piston halka yüzeyine basınç uygulanır ve piston geriye doğru hareket eder. Piston tam yüzeyindeki hava valf üzerinden dışarı atılır. [22]

## 5. BÖLÜM

### KONTROL YÖNTEMLERİ

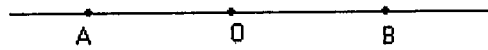
#### 5.1. GİRİŞ

Daha önce 3. BÖLÜM 'de dinamik bir sistem olan Manipulatör Mekanizmasının incelenmesinde kullanılacak dinamik denklemler verilmişti. Dinamik denklemlerinin elde edilmesi direkt olarak bu çalışmanın konusu olmamakla beraber konuya uzak olanların daha iyi kavrayabilmeleri açısından önemli olacağı düşünülmüştür. Bu tezin konusu 3 Serbestlik Dereceli Manipulatör Mekanizmasının incelenmesi olmakla beraber, bilgi açısından bir referans oluşturmak üzere bu bölümde genel olarak Pnömatik kontrol için gerekli klasik kontrol yöntemleri ve PLC ile kontrol konuları ele alınmıştır. [25] , [26] , [27] , [28]

#### Pnömatik Kontrol :

Pnömatik sistemler bir önceki bölümde detaylı olarak bahsedildiği gibi endüstride iş parçalarının sıralanması, sürülmesi, yürütülmesi, kaldırılması, sıkıştırılması ve paketlenmesi gibi bir çok işlerde geniş kullanım alanına sahiptir. Büyük güç gerektiren işlerde hidrolik kontrol kullanılırken düşük güçlerde ve daha hassas işlerin yürütülmesinde pnömatik kontrol kullanılmaktadır. Pnömatik kontrol hidrolik kontrolden daha ucuz, daha hızlı ve daha hassas olmasının yanında kontrol zorluğu gibi dezavantajlara sahiptir.

Pnömatik kontrolün en yaygın kullanım şekli *on-off* kontrolüdür. *On-off* kontrolünü bir örnekle şu şekilde açıklayabiliriz. Bir pistonun A noktasından B noktasına getirilmesi istendiğini düşünecek olursak bunu şu şekilde sağlayabiliriz ;



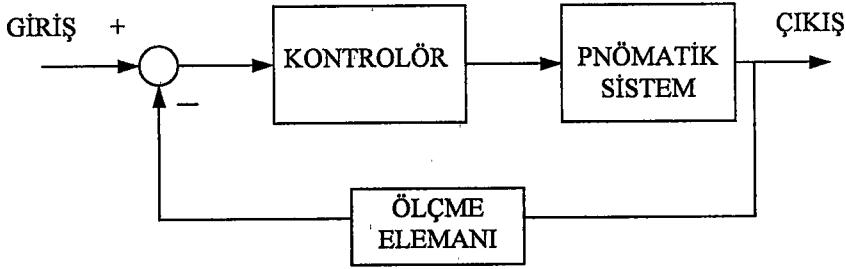
İlk önce piston A noktasından başlayarak O noktasına kadar hızlanır O noktasından itibaren yavaşlayarak B noktasında durur. Bu tip kontrolde sistemi B ' de durduracak (pnömatik sistem dışında) bir fren sistemine ihtiyaç vardır. (örneğin kanca , çivi v.b. ) Pnömatik sistem bu ani duruştan etkilenmeyecek şekilde olmalıdır. Yani ani durdurma esnasında kırılma , hasarlanma, aşırı hava sıkışması v.b. olaylar meydana gelebilir.

*On - off* ( aç-kapa) mantığına göre çalışan sistemler için genellikle PLC (Programlanabilir Lojik Kontrol ) ile kontrol kullanılır. PLC kontrolü *bool cebri* mantığına

göre çalıştığından pnömatik sistemin belirli anlardaki değerlerinin bir anlamı vardır. Bunun yanında ara değerlerin anlamı yoktur ve kontrolü de söz konusu değildir.

### Dinamik Kontrol Ünitesi :

Bir pnömatik sistemin her  $t$  anı için aldığı değerlerin önemi büyük ise uygun bir dinamik kontrolör yapılması gerekmektedir. Örneğin bir platformu bir konumdan başka bir konuma düzgün ve sarsıntısız bir şekilde getirilebilmesi için sisteme dinamik kontrolör ilave ederek geri besleme tekniklerinin uygulanması gereklidir. Genel bir dinamik kontrolör aşağıdaki şekilde gösterildiği gibidir.

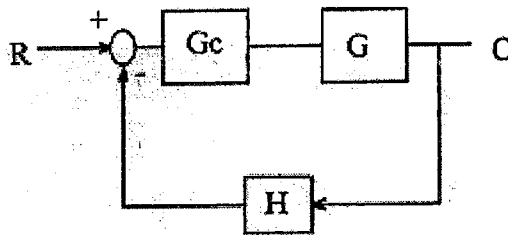


Şekil 5.1 Genel bir pnömatik kontrol sisteminin blok diagramı

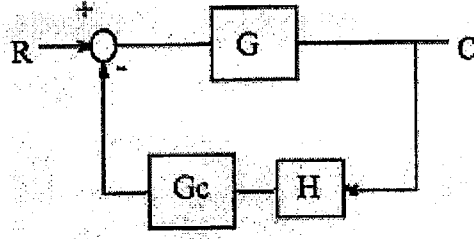
Bu şekildeki bir sistemin tasarlanması için pnömatik sistemin dinamik modelinin bilinmesi gerekmektedir. Sistemin dinamik modeli bilinirse kontrolör tasarımı çeşitli şekillerde yapılabilir. Kontrolör tasarımı için klasik yöntemlerin yanında modern yöntemler de kullanılabilir. ( Yapay sinir ağları, Genetik algoritmalar, Fuzzy lojik v.b. )

## 5.2. KONTROL İLE İLGİLİ TEMEL KAVRAMLAR

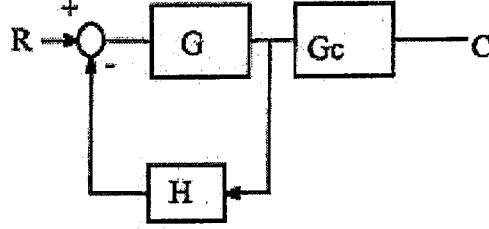
Kontrolörün görevi sistem referans girişi ile sistem çıkışı arasındaki farkı minimuma indirmek ve sistemi kararlı yapmak olarak özetlenebilir. Kontrolör devresi ( $G_c$ ) sisteme aşağıdaki şekillerde bağlanabilir.



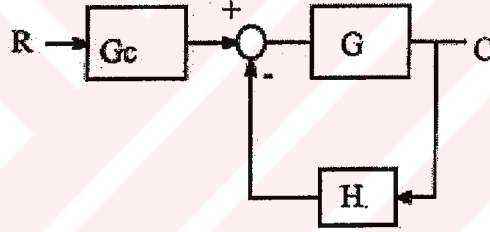
Şekil 5.1 a



Şekil 5.1 .b



Şekil 5.1.c



Şekil 5.1.d

Yukarıdaki ifadelerde ;

$G_c$  = Kompanzatör (kontrolör )devresi

$G$  = Kontrol edilen pnömatik sistem

$H$  = Ölçme elemanı

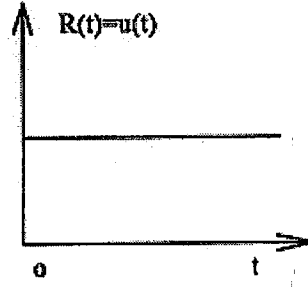
$C$  = Çıkış

$R$  = Referans giriş

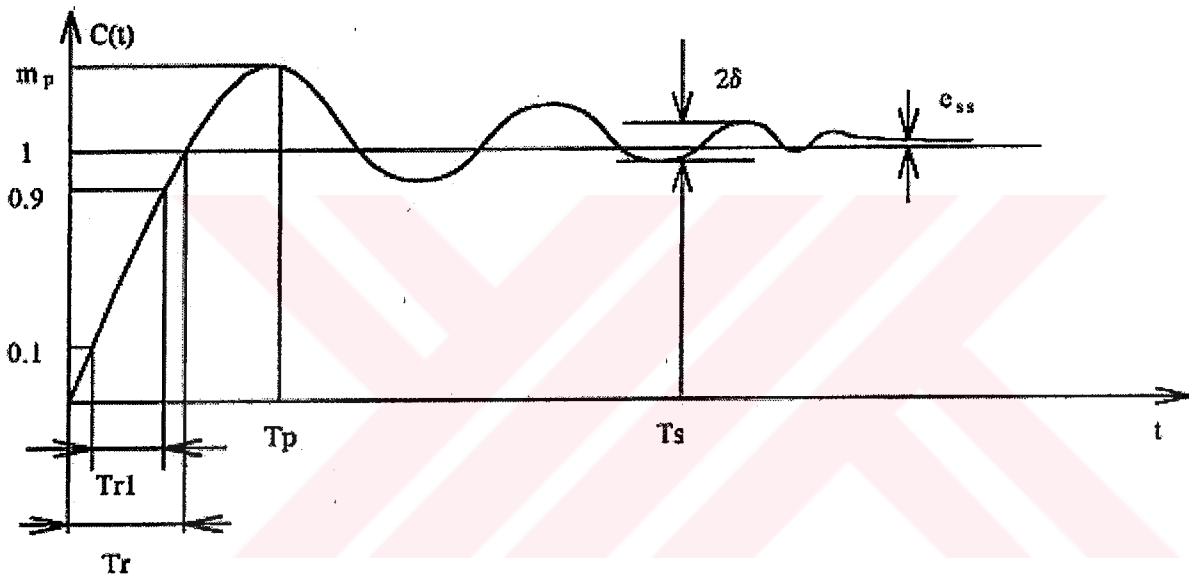
olarak adlandırılmıştır.

Lineer sistemlerde  $G$ ,  $G_c$  ve  $H$  ile gösterilen bloklar transfer fonksiyonu cinsinden ifade edilebilir . Lineer sistemlerin etüdü, ya sisteme basamak şeklinde değişen bir girişin uygulanması neticesi sistemin geçici hal davranışı veya zaman cevabı, ya da sinüs

biçiminde değişen bir girişin uygulanması neticesi sistemin frekans analizindeki cevabı incelenerek yapılır.



Şekil 5.2 Birim basamak girişi



Şekil 5.3  $G(s)$ 'nin birim basamak cevabı

Dinamik bir sistemin girişine şekil 5.2 'deki gibi birim basamak fonksiyonu uygulandığında sistem çıkışı en genel halde şekil 5.3 'deki gibi olur. Burada çıkışın aldığı şekle göre davranış kriterleri tanımlanmıştır. Bu davranış kriterleri şu şekilde özetlenebilir.

**$T_r$ ,  $T_{r1}$  Yükselme Zamanı :** Yükselme zamanı pratikte pek çok şekillerde tanımlanabilir. Bunlardan birbirlerinden pek farklı sonuç vermeyen ve çok kullanılan ikisi şunlardır :

a)- Bir kontrol sistemine basamak şeklinde bir giriş uygulandığı takdirde elde edilen ortalama cevap eğrisinin yüzde 10 ile yüzde 90 arasındaki zaman aralığı yükselme zamanıdır.(Şekil 5.3 )

b)- Bir kontrol sistemine basamak şeklinde bir giriş uygulandığı takdirde elde edilen ortalama cevap eğrisinin  $(C(t)/R(t))=0.5$  noktasına tekabül eden yerden çizilen teğetin, cevabın sıfır ile bir değerleri arasında kalan parçasının zaman eksenindeki iz düşümüne tekabül eden zaman aralığı yükselme zamanıdır.

**$T_s$  Yerleşme Zamanı :** Bir kontrol sistemine basamak şeklinde bir giriş uygulandığı takdirde elde edilen ortalama cevap eğrisinin, nihai değerin % - X bölgesine, bundan sonraki değişimi bu bölge içerisinde kalmak koşulu ile ilk girdiği ana kadar geçen zamana  $T_s$  yerleşme zamanı denir. Burada X değeri ele alınan sisteme göre değişir, fakat  $X=5$  tipik bir değerdir.

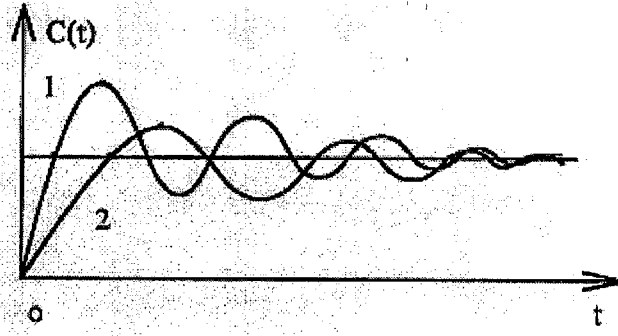
**$T_p$  Tepeye varma Zamanı :** Bir kontrol sistemine basamak şeklinde bir giriş uygulandığı takdirde elde edilen ortalama cevap eğrisinin maksimum değerine erişmesine kadar geçen zamana tepeye varma zamanı denir.

**$m_p$  Tepe Değeri :** Bir kontrol sistemine basamak şeklinde bir giriş uygulandığı, takdirde elde edilen ortalama cevap eğrisinin maksimum değeri ile nihai değeri farkının nihai değere oranının yüzdesine yüzde aşımı denir.

**$e_{ss}$  Sürekli Hal hatası :** Sisteme herhangi bir giriş uygulandıktan sonra meydana gelen geçici hal söner ve geriye kararlı hal hataları kalır. Bu hataların sistemin davranışı bakımından çok önemli oldukları şüphesizdir. Eğer nihai çıkış şu veya bu sebepten dolayı arzu edilen değerden çok sapıyorsa, bir dinamik doğruluğun sağlanması için hesap ve konstrüksiyon yapılması gereksiz olur. Kararlı hal hatası çeşitli sebeplerden meydana gelebilir. Bunlardan biri ve en önemlisi kapalı çevrim transfer fonksiyonunun doğasıdır ve bu bazı tip girişler için belirli bir hata verir. İdealde sürekli hal hatasının sıfır olması istenir.

Bir kontrol sisteminde aranan özellikler ise şu şekilde özetlenebilir ;

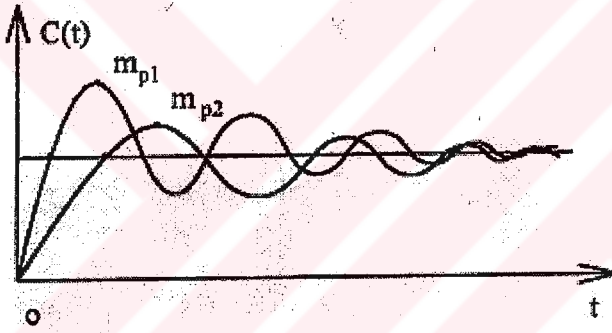
1. Yükselme Zamanı küçük olmalı. (Şekil 5.4 a )



Şekil 5.4 a

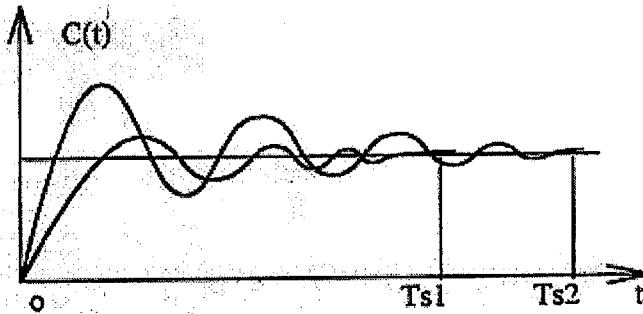
( 1 )' de yükselme zamanı (2)' ye göre küçüktür, fakat tepe değeri ( 1 ) 'de daha fazladır.

2. Tepe değeri mümkün olduğu kadar küçük olmalı.



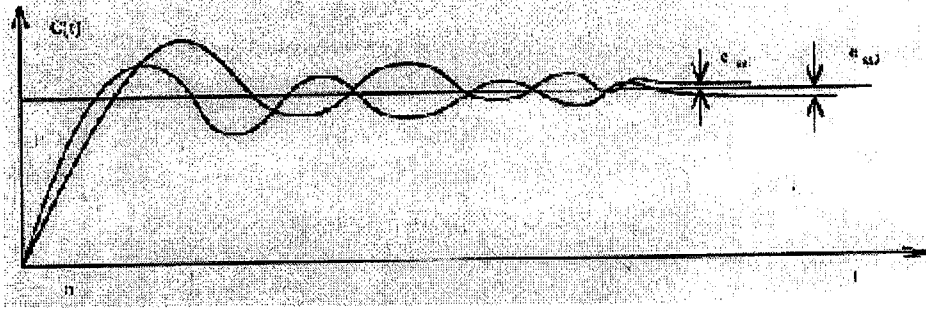
Şekil 5.4 b

3.  $T_s$  mümkün olduğu kadar küçük olmalı.



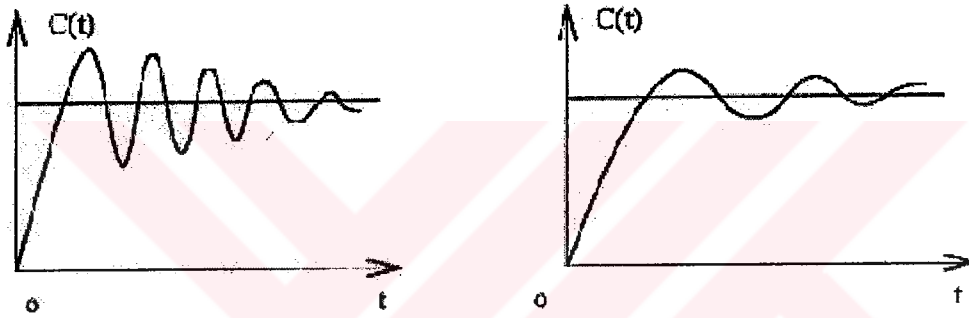
Şekil 5.4 c

4.  $e_{ss}$  mümkün olduğunca küçük olmalı, idealde sıfır olmalı.



Şekil 5.4 d

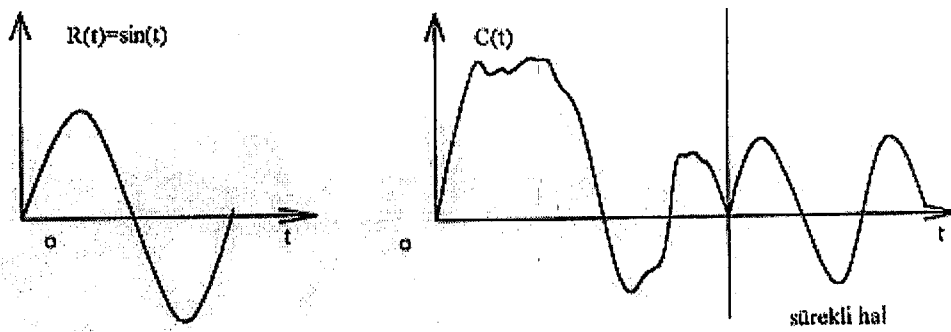
5.  $C(t)$  'deki dalgalanma minimum olmalı.



Şekil 5.4 e

Yukarıdaki koşulların hepsini bir anda gerçekleştirmek mümkün olmayabilir. Hangisinin ne kadar gerçekleştirileceği sistemin durumuna bağlıdır.

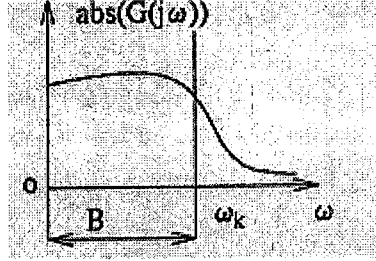
Frekans analizi yöntemlerinde ise dinamik sisteme sinüzoidal giriş uygulandığında sistem çıkışının geçici rejimi aştıktan sonraki durumu ( sürekli rejim hali ) incelenir.



Şekil 5.5 Dinamik sistemde sinüzoidal giriş ve çıkış

Şekil 5.5 ' de görüldüğü gibi sinüzoidal girişe karşılık dinamik sistemin çıkışı yine sinüzoidaldir. ( Burada sistemin doğrusal ve kararlı olduğu kabul edilmektedir. )

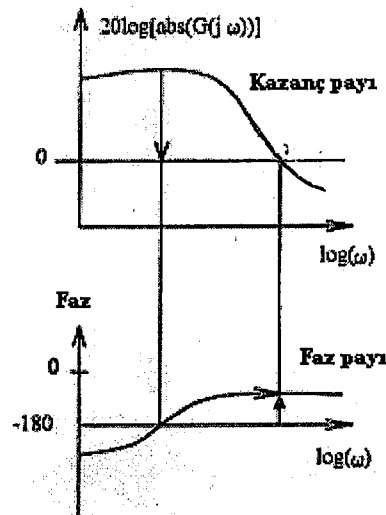
Pratikteki dinamik sistemler genel olarak alt geçiren filtre karakteristiği gösterirler. Sistem kazancının alçak frekanslardaki değerinin  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  'sine düştüğü frekans **kesim frekansı** olarak adlandırılır.



Şekil 5.6 Bir dinamik sisteme ait bant genişliği

0 Hz ile  $\omega_k$  arası da **bant genişliği** olarak adlandırılır. AGF (alçak geçiren filtre de  $B = \omega_k$  olacaktır.)

Kazanç payı ve faz payı sistemin genlik fonksiyonu olarak çizilmiş olsun. Kazancın sıfır olduğu yerdeki frekanstaki  $180 - \angle G(j\omega)$  açısına **faz payı**, fazın -180 olduğu yerdeki frekanstaki kazancına **kazanç payı** denir. Bir sistemde kararlılık için kazanç payı ve faz payı sıfırdan büyük olmalıdır. Kazanç payı ve faz payı ne kadar büyük ise sistem o kadar kararlıdır.



Şekil 5.7 Bir dinamik sisteme ait kazanç payı ve faz payı

Bu yöntemde amaç,

a)- Sistemin bant genişliğini arttırmak veya istenen şekle getirmek (düzgün hale getirmek)

b)- Kazanç payı ve Faz payını arttırmaktır.

Çıkışın girişi aynen takip edebilmesi için bütün frekanslarda  $\frac{C_{(jw)}}{R_{(jw)}} = 1$  olmalıdır.

Bu da bant genişliğinin sonsuz olması anlamına gelir ki fiziksel bir sistem için imkansızdır. Öte yandan  $\frac{C_{(jw)}}{R_{(jw)}}$  oranı yüksek frekanslarda çok küçük olmazsa gürültüye

karşı sistemin duyarlılığı artar, bu da istenmeyen bir durumdur.

Bu bölümde buraya kadar mümkün olduğunca kısa olarak klasik kontrol yöntemlerinden bahsedilmiştir. Daha ayrıntılı bilgi ve PID, PI ve P kontrol teknikleri için [25] , [26] , [27] ile Kaynaklar bölümünde verilen kaynaklara bakılabilir.

### 5.3. PROGRAMLANABİLİR LOJİK KONTROLÖRLER (PLC)

#### 5.3.1. Giriş

Programlanabilir Lojik Kontrolörler (PLC) , kontrol sistemleri için geliştirilmiş özel amaçlı sayısal kontrolör veya endüstriyel bilgisayarlardır. İlk olarak endüstriyel otomasyon alanlarında kullanılmalarına karşın, günümüzde endüstriyel tesislerin kumanda devreleri ve geri beslemeli kontrol devrelerinin gerçekleştirilmesinde kullanılmaktadır. Zamanlayıcı, sayıcı ve aritmetik kontrol prosesleri içerir. Ayrıca programlanabilir ve saklanabilir hafıza içeren dijital elektronik devrelerden oluşur.

#### 5.3.2. Genel Özellikler

Günümüzde PLC' ler lojik işlemlerin yanı sıra aritmetik ve özel matematiksel işlemler yapılabilir. Bunun sonucunda daha kompleks kontrol ve kumanda işlevleri gerçekleştirilebilmektedir. Birçoğunun kontrol devrelerinde yaygın olarak kullanılan PID kontrolörü işlevini yerine getiren hazır programlar ve fonksiyonlar vardır.

PLC' ler ile mikrobilgisayarlar arasındaki ana farklar şöyle sıralanabilir:

1. Programlama baskın olarak lojik ve anahtarlama ile yapılır.
2. Giriş (input) ve çıkış (output) arasındaki arabirim kontrolörün içerisindedir.
3. PLC' ler titreşim, ısı, nem ve gürültü gibi dış etkenlere karşı muhafazalı bir şekilde tasarlanmışlardır.

Lojik teriminin PLC ismi içerisinde geçmesinin sebebi olarak; programlamanın lojik gerektirmeler ve giriş elemanlarından oluşmasıdır. Lojik mantık kullanılarak programlama yapılır.

Programlanabilir Lojik Kontrolörler geri beslemeli kontrol devrelerinde kullanılmaya başlanması ile alışlagelmiş PLC adının tartışılmasına sebep olmuştur. Birçok üretici firma bu kontrolörlerin hem lojik temelli kumanda devrelerinde kullanılmaları sebebiyle PLC yerine programlanabilir kontrolör adını kullanmayı daha uygun görmüştür. Ayrıca kişisel bilgisayarlardan ayırmak üzere PC yerine PCs olarak isimlendirilmişlerdir.

Günümüzde üretilen bütün PLC modellerinde, bir kontrol algoritması yazmak için gerekli basit işlemler yapılabilir. Bir PLC ' nin endüstriyel otomasyon sistemlerinde

kullanılması, PLC' lerin işlem yeteneğinden çok amaca uygun giriş-çıkış birimlerinin varlığı ile ilgilidir.

Eğer bir PLC' de analog işaretleri sayısal işaretlere (ADC) ve sayısal işaretleri analog işaretlere (DAC) dönüştüren giriş-çıkış birimleri yoksa işlem yeteneği ne olursa olsun PLC sayısal kontrolör olarak kullanılamaz. Yani PLC ' nin sayısal kontrolör olarak kullanılması için ana birime ilave olarak ADC ve DAC birimlerine ihtiyaç vardır. ADC' ler ( analog dijital çeviriciler ) daha sonra anlatılacaktır.

PLC ' lerin en yaygın olarak kullanıldığı alanlar endüstriyel otomasyon devreleridir. Bunlar lojik fonksiyonlarla ifade edilebilmektedir. Geleneksel olarak yardımcı röle, sayıcı, zaman rölesi gibi elemanlarla gerçekleştirilen endüstriyel otomasyon sistemleri günümüzde yerini PLC ' li devrelere bırakmıştır.

### 5.3.3. Kumanda Devrelerinin PLC ' de gerçekleştirilmesi

Endüstriyel kumanda devreleri lojik temele dayalı aç-kapa (on-off) ya da çalış-dur biçiminde çalışan geleneksel olarak kontak , yardımcı röle ve zaman rölesi gibi elemanlarla gerçekleştirilen devrelerdir.

Yeterli miktarda giriş-çıkış birimleri lojik komutları, zamanlayıcılar, sayıcılar bulunan bir PLC ile geleneksel kumanda devrelerinin işlevine sahip kumanda devreleri elde edilebilir.

Bu şekilde endüstriyel kumanda devrelerinin PLC' ler ile gerçekleştirilmesi iki adımdan oluşur:

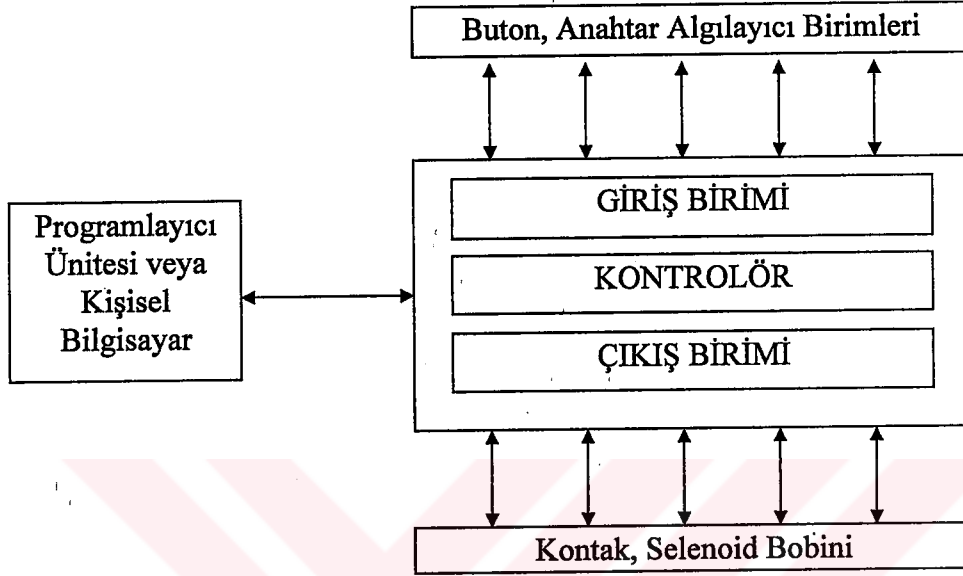
1. Kumanda probleminin çözümü için gerekli lojik fonksiyonun veya kontaklı kumanda devresinin tasarımı,
2. Elde edilen lojik fonksiyonun veya kontaklı kumanda devresinin programlanması ve PLC' ye yüklenmesi.

Kumanda probleminin çözümüne ilişkin lojik fonksiyonun veya devrenin tasarlanması için lojik devre tasarım yöntemlerinden veya varolan endüstriyel kumanda devrelerinden faydalanılır.

PLC ' ler belirli bir işlem için tasarlanmış kumanda devresini programlamaya uygun yapıdadır. Tasarlanan bu kumanda devrelerinin programlanması ve PLC ' ye aktarılması ile tasarım işlemi tamamlanır. Programlama için özel programlayıcı birim kullanılır. Ayrıca PLC' leri programlama amacı ile yazılmış kişisel bilgisayarlarda çalışan paket programlar kullanılabilir.

#### 5.3.4. Programlanabilir Lojik Kontrolörlerin (PLC) Temel Birimleri

PLC' ler doğrudan kullanıma uygun giriş çıkış birimleri ile donatılmışlardır. Bu birimlere iki değerli lojik işaret ( 1 veya 0 ) (aktif-pasif ) taşıyan elemanlar, kontak selenoid gibi kumanda devrelerinin elemanları doğrudan bağlanırlar.



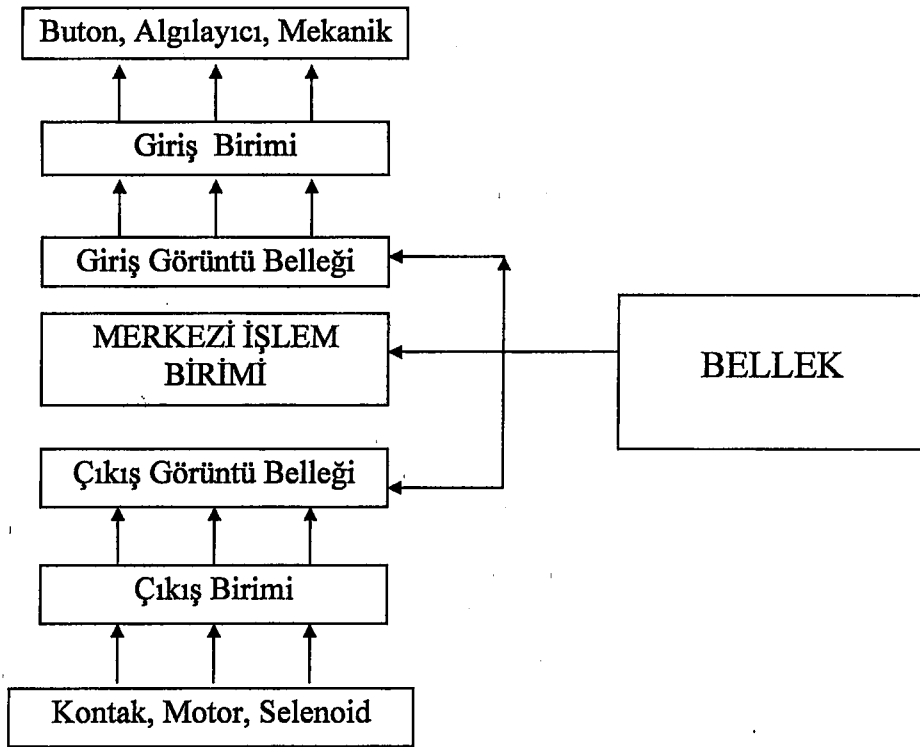
Şekil 5.3.1 PLC ' nin bağlantıları

PLC, bir mikrobilgisayar ( mikroişlemci+bellek+giriş-çıkış arabirimi ), giriş-çıkış birimleri, programlayıcı birimleri, besleme güç kaynağı gibi temel kısımlardan oluşur.

Programı yedeklemek için ya da başka bir PLC' ye aktarmak için EEPROM, giriş-çıkış birimlerini arttırmak için genişleme birimi, enerji kesilmelerinde PLC' yi besleyen yedek güç kaynağı ve seri haberleşme arabirimi gibi elemanlar bulunur.

Giriş-çıkış işaret durumlarının tutulduğu özel bellek alanına giriş-çıkış görüntü belleği denir. Giriş-çıkış arabirimi , bir giriş-çıkış birimi üzerinden kumanda elemanlarına bağlanır.

Mikrobilgisayar veya mikrokontrolör, PLC işletim sistemi altında yürüten, PLC' nin çalışmasını düzenleyen ve bu işlemleri yapmak için birimlere sahip olan elemanlardır. Bütün sayısal bilgisayarlar gibi PLC , mikroişlemci, bellek ve giriş-çıkış ara birimlerinden oluşmakta olup iç yapısı şekil 5.3.2 'de gösterilmiştir.



Şekil 5.3.2 PLC 'nin iç yapısı

#### 5.3.5. Çıkış Birimleri ( Analog Çıkış )

Birçok çevirici analog sinyal üretirler. Değişken hızlı motor devreleri analog sinyallerle kontrol edilir, analog sinyallerle hız verilir. PLC üreticileri buna benzer uygulamalardan dolayı analog-dijital çevirici sistemlerini PLC ile beraber vermektedirler. Bu birim analog-dijital çevirici (ADC) ve dijital-analog çevirici (DAC) olarak kullanılırlar.

##### Analog Dijital Çeviriciler:

Bir ADC 'nin işlevi, gerilim ya da akım gibi analog büyüklükleri sayısal kelime haline getirmektir. ADC 'nin yapısı, basit bir blok olarak şekil 2.8' de gösterilmiştir. ADC çevirme işlemini seri olarak gerçekleştirebileceği gibi bu işlemi paralel olarak da yerine getirebilir. Seri formatta sayısal kelimelerin bitleri, en anlamlı veya en az anlamlı bittten itibaren ard arda çıkışa aktarılır. Paralel formatta ise, sayısal kelime, N adet paralel terminalden oluşan çıkışa ikilik düzende aktarılır. Seriye göre hızlı olan bu formatın dezavantajı, kullanılan devrelerin büyümesidir.

ADC ' leri dört ana başlık altında toplamak mümkündür:

1. Dönüştürme adımı sırasında bir zamanlama kondansatörünü dolduran ya da boşaltan integrasyon tipi çeviriciler,
2. Bir geri besleme çevrimi içinde ikili kodda sayıcı ve D/A çevirici kullanan sayısal rampa tipi çeviriciler,
3. Birbirini izleyen deneme ve yanılma adımları sonrasında sayısal bir çıkış üreten ardışık yaklaşımlı çeviriciler,
4. Çevirme işlemini tek adımda yapan paralel çeviriciler.

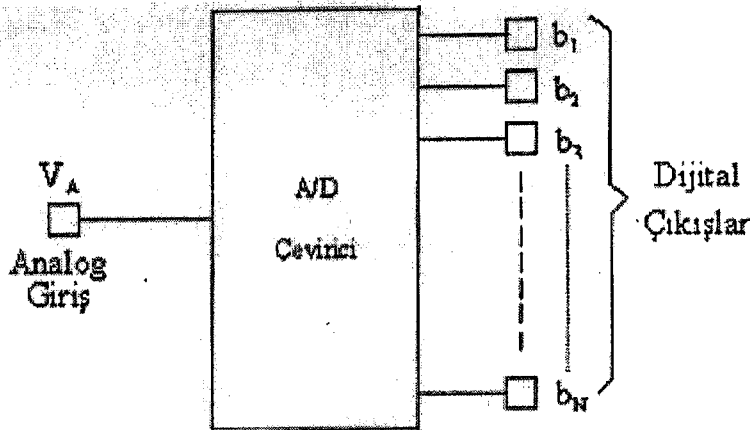
A/D Çevirme işleminin Temelleri:

ADC düzeni girişi belirli sayıda bitten oluşan bir sayısal çıkış biçiminde kodlamaktır. Şekil 5.3.3 'deki devrenin  $V_a$  analog giriş gerilimi, tam ölçek  $V_{fs}$  çıkış geriliminin bir ikili kesri olacak şekilde belirlenir. Buna göre çeviricinin çıkışı;

$$D = \frac{V_a}{V_{FS}} = \frac{b_1}{2^1} + \frac{b_2}{2^2} + \frac{b_3}{2^3} + \dots + \frac{b_N}{2^N}$$

şeklinde olur.

Bir ADC ' nin ideal durumdaki geçiş karakteristiği şekil 5.3.4 ' de görülmektedir. Transfer fonksiyonu süreksizdir ve analog giriş ile sayısal çıkış arasında birebirlik yoktur. Çıkışın sürekli olan giriş işaretini kuantalanmış hali olduğu söylenebilir. Her çıkış kodu, küçük bir analog giriş işareti aralığına karşı düşer. N bitlik bir ADC düzeni, analog giriş işaretinin sıfırdan tam ölçek gerilimine kadar değiştirilmesi durumu için  $2^N$  çıkış durumu ve  $2^{N-1}$  durum geçişi gösterir.

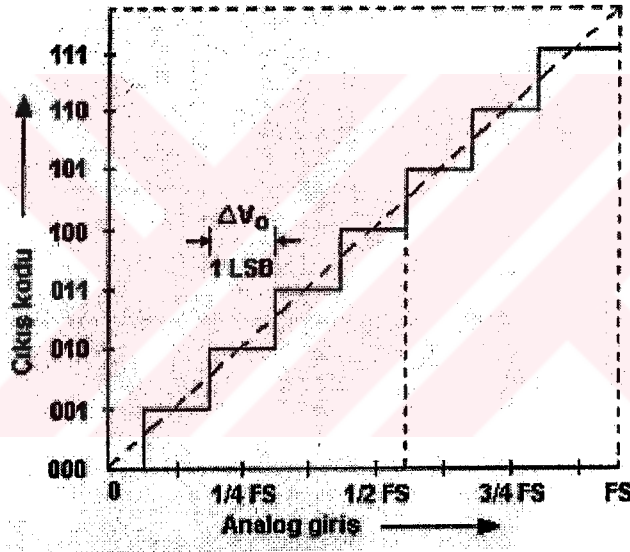


Şekil 5.3.3 ADC basit blok şeması

Ayrık çıkış seviyeleri arasındaki en küçük  $\Delta V$  kuantalama adımı en az anlamlı bite (LSB) karşı düşer ve;

$$\Delta V = 1LSB = \frac{V_{FS}}{2^N}$$

bağıntısı ile ifade edilir. Bu değer, çeviricinin üretebileceği en küçük koddan farklıdır. Bir ADC 'nin transfer fonksiyonu, tam ölçek değerinden 1LSB kadar önce sona erer, zira analog sıfır büyüklüğü de  $2^N$  çıkış durumundan biridir ve bu da çevirici çıkışının sıfırdan yüksek değerleri için geride  $2^{N-1}$  durum bırakır. Ancak kolaylık sağlamak amacıyla analog aralık her zaman  $V_{FS}$  tam ölçek gerilimi ile tanımlanır. Bu aralığın gerçekte 1LSB kadar daha az olacağı açıktır.



Şekil 5.3.4 3 Bitlik bir ADC 'nin geçiş karakteristiği

### 5.3.6. PLC PROGRAMLANMASI

#### Lojik Programlama:

Kumanda devrelerinin tasarımı için temel lojik işlemleri yeterlidir. Bunlara zamanlayıcı işlemleri ve sayıcı işlemleri eklenirse tüm kontaklı kumanda devrelerinin kontrolü gerçekleştirilebilir. Burada bir kontaklı kumanda devresinin gerçekleştirilmesi için gerekli PLC temel lojik işlem komutları, bunların işlevleri deyim listesi ve merdiven diyagramı örnekleri anlatılacaktır. Herhangi bir kontaklı kumanda devresi bir lojik

fonksiyon ile ifade edilebilir. Böyle bir lojik fonksiyonun PLC 'de gerçekleşmesi için gerekli temel komutlar dörde ayrılır.

- 1- Lojik işleme başlama komutları ( Load, Load not )
- 2- Temel lojik işlem komutları ( And, Or, Not, And not, Or Not ),
- 3- İşlem sonu komutları ( And Block, Or Block )
- 4- Çıkışa atama komutları ( Out )

Bunlara ek olarak zamanlayıcı ( timer ), sayıcı (counter) ve program denetim komutları vardır. Bütün PLC 'lerde temel lojik işlemleri gerçekleyen komutlar benzer özellik taşırlar. Benzer biçimde programlanırlar ve aynı işlevi sağlarlar.

Bazen zamanlayıcı ( timer ), sayıcı ( counter) ve program denetim komutları farklı özellik gösterebilir. Bazı PLC ' lerde daha fazla komut bulunabilir fakat biz ana kumanda devrelerinin gerçekleştirilebilmesi için gerekli komutları inceleyelim.

Programlanabilir lojik kontrolcülere ilişkin temel komutları üç grupta toplayabiliriz. Bunların yürütülme farklıdır. Burada bu komutların yürütülmesi durumunda gerçekleşen işlemler anlatılacaktır. Bir çok PLC için geçerli olan bu işlemler anlatılırken lojik işlemlerin bir yığın belleği kullanılarak yapıldığı varsayılacaktır. PLC ' lerde tüm yapılarda bu varsayım söz konusudur. Yığının birinci seviyesi akümülatör işlevi gördüğünden (işlemler ve sonuçlar burada saklanıyor. ), seviye akümülatör olarak adlandırılacaktır.

### 5.3.7. PNÖMATİK UYGULAMALARI

Bu bölümde pnömatik sistemlerin PLC ile kontrolünün uygulamaları anlatılacaktır. Bunun için önce kullanılan kontrol elemanlarına göz atalım.

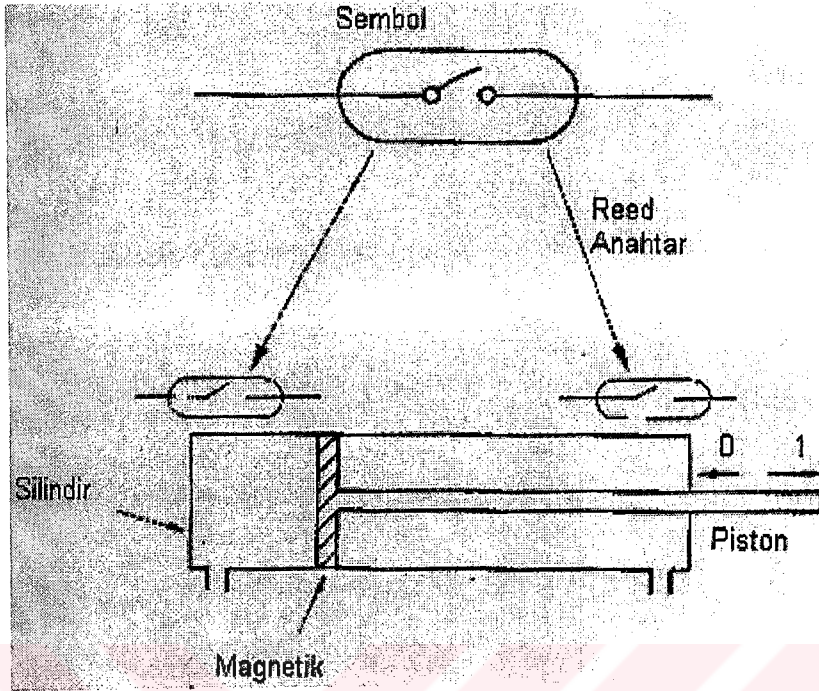
#### Pnömatik Sistem Kontrol Elemanları:

Pnömatik sistemlerde PLC kontrollü otomasyonlarda kullanılan kontrol elemanlarının bir kısmı aşağıda anlatılacaktır. Teknolojinin gelişimi ile bu elemanlar yerlerini daha çok işlevli olanlara bırakmaktadır. Burada enerjilenme genel olarak kullanılan kontrol elemanları anlatılacaktır.

#### Reed Röleler (Reed Relays):

Reed röleler manyetik olarak işlem yapan elemanlardır. Manyetik alan etkisi ile kontaklar kapanır ve röle geçiş verir: Eğer bir bobin reed rölesi kullanırsa buna reed

devresi denir. Reed devreleri yüksek işlem hızına sahiptir fakat bunun yanında düşük anahtarlama direnci bu rölelerin dezavantajıdır.

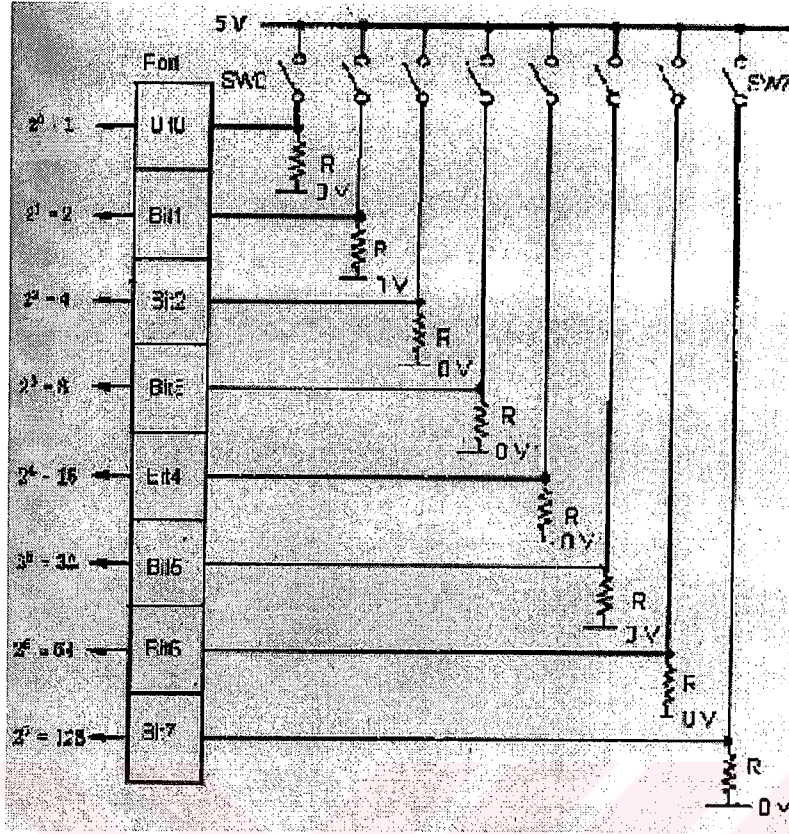


Şekil 5.3.5 Reed Rölöler

Reed rölöleri genellikle pnömatis pistonun dışına monte edilir. Buradan silindirin durumunu manyetik olarak algılar (şekil 5.3.5). Sistemde manyetik etkili makara, silindirin pistonun sonuna ya da başına geldiğinde reed röle çıkış verir ve pistonun durumu algılanır.

#### Sekiz-bit Paralel Port:

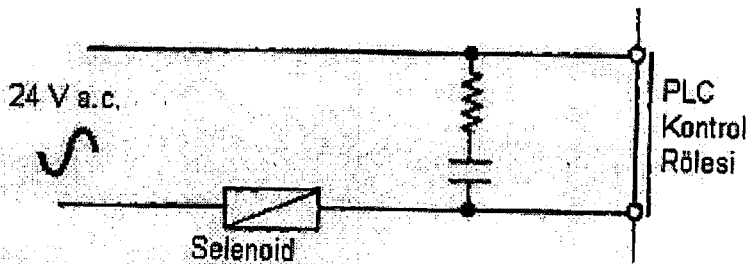
Kişisel bilgisayarlarla PLC anahtarlarını tetiklemek için 8-bit paralel port kullanılabilir. SW0-SW7 isimleriyle anılan anahtarlar portun 0-7 bitleri ile kontrol edilir. Tüm anahtarların aktif (lojik 1) olması için çıkışa 255 sayısının gönderilmesi gerekir. Tüm anahtarların pasif (lojik 0) konumunda olması için 0 değeri çıkışa gönderilir. Sadece SW7 aktif (lojik 1) olması isteniyorsa çıkışa 128 değeri gönderilmelidir. SW0 ve SW7 anahtarlarının aktif (lojik 1) olması için 129 değeri çıkışa gönderilmelidir.



Şekil 5.3.6 8 Bit Paralel Portu

#### Solenoidler:

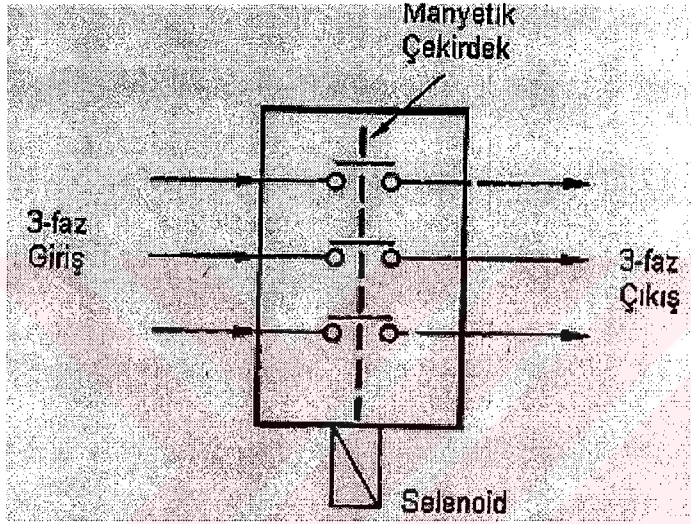
Solenoidler elektrik sinyallerini mekanik harekete çeviren elektromanyetik cihazlardır. Genellikle bir bobin ve hareketli kol kısmından oluşurlar. Bobin enerjilendiğinde kol hareket eder. Hareket edilen uzaklığa belli bir sabit değer karşılık gelir. Genellikle bu vuruş değeri 4 ile 20 mm arasında değişir. İşlem için gerekli besleme 12 V d.c. , 24 V d.c./a.c. ve 240 V a.c. olabilir. Şekil 5.3.7 ' de 24 V a.c. solenoidin bir röle süren çıkış portunda kullanılması görülmektedir.



Şekil 5.3.7 Kontrol rölesi olarak kullanılan bir solenoid

### Kontaktör:

Kontaktör yüksek akım anahtarlama devresidir. Mekanik veya elektriksel olarak anahtarlama yapar. Elektrik eyleyicili kontaktör şekil 5.3.8 'de gösterilmiştir. İçerik olarak selenoid, manyetik çekirdek ve anahtardan oluşur. Selenoid enerjilendiğinde manyetik çekirdek ötelenir ve yüksek akım yüklü anahtarlar kapanarak geçiş verir. Kontaktörler yalnız anahtar olarak veya üç fazlı gereç olarak kullanılır. Büyük bir oranda endüstriyel kontrol proseslerinde kullanılır.

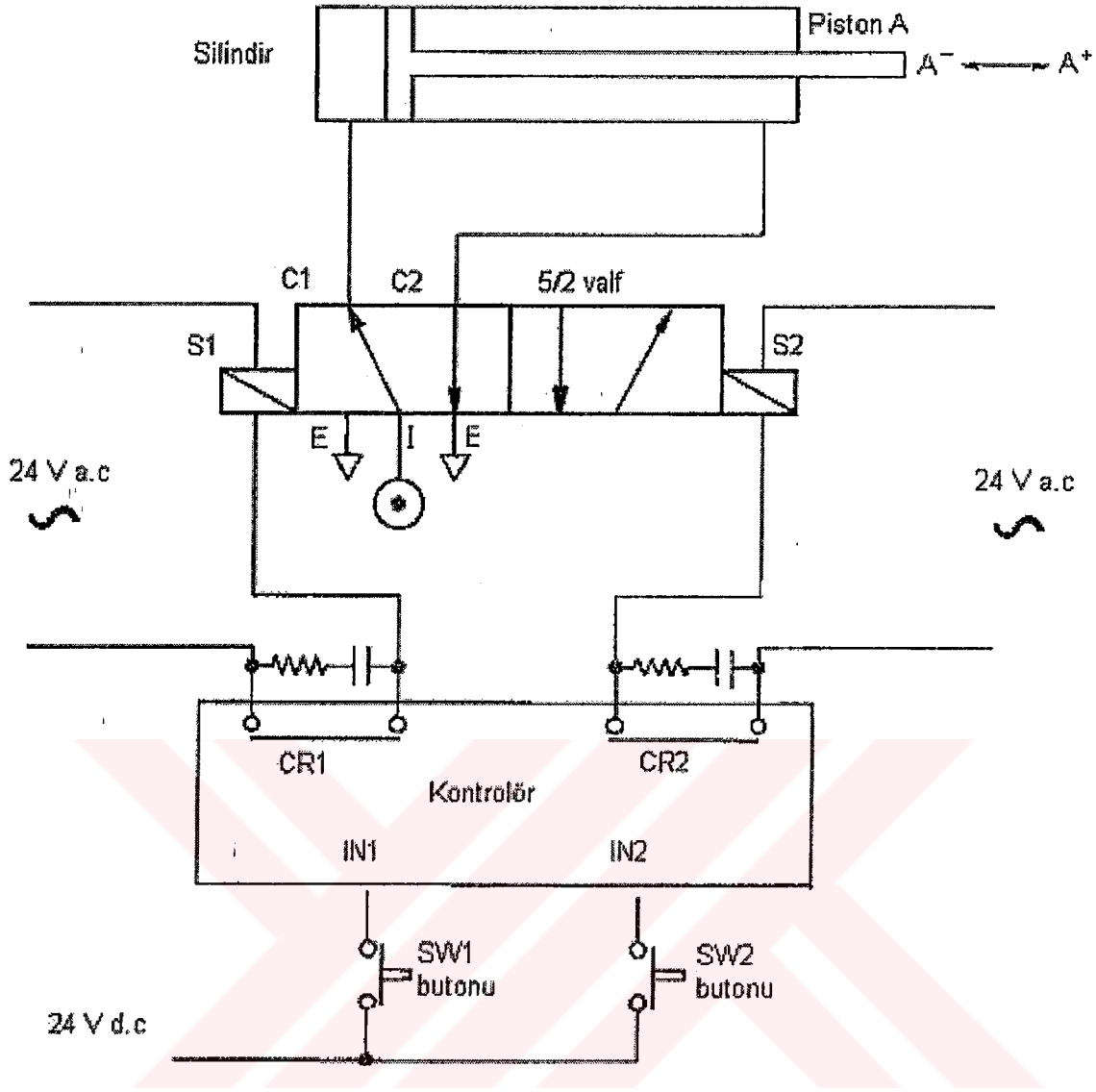


Şekil 5.3.8 Üç fazlı kontaktör

### Bir Pnömatik Pistonun Hareket Ettirilmesi

PLC 'nin görevi pnömatik silindirdeki pistonun hareket etmesini sağlamaktır. Aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi SW1 anahtarının tetiklenmesi ile A pistonu silindirin dışına çıkar. ( A+ yönünde ). SW2 anahtarının tetiklenmesi ile A pistonu tekrar silindirin içine döner. ( A- yönünde )

Pnömatik silindir basınçlı hava ile sürülen bir pistonu sıkıştırır. Silindire akan hava 5/2 yön kontrol valfi ile kontrol edilir. (5/2 yön kontrol valfi için 4. Bölüme bakınız.) sistem öyle ayarlanır ki S1 selenoidi enerjilendiğinde ( S2 selenoidi enerjisini boşaltır.) hava C1 yönünde girer.

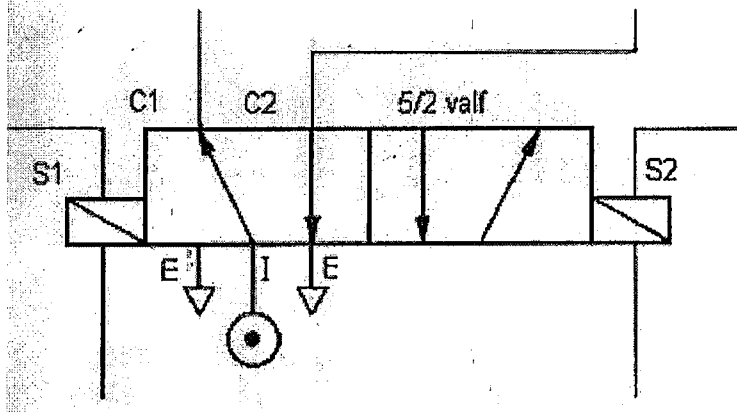


Şekil 5.3.9 Pnömatik Pistonun Kontrolü

Çıkış C2 yönünde olur ve pistonun A<sup>+</sup> yönünde ilerlemesini sağlar. S2 selenoidi enerjilendiğinde ( S1 selenoidi enerjisini boşaltır.) hava C2 yönünde akar ve C1 yönünde çıkış olur. Buna bağlı olarak piston silindir içine hareket eder.( A<sup>-</sup> yönünde)

5/2 yön kontrol valfi standart yön kontrol valfidir. İç kontrol ile içerisinde akan havanın yönünü değiştirebilir. Daha önceki konularda bahsedildiği gibi valflerin tanımlarında pnömatikte özel semboller kullanılmaktadır.

Bu kutular şeklinde çizilen , havanın akış yönünü gösteren ve giriş-çıkışları olan çizimlerdir. 5/2 valfinde 5 tane giriş ve 2 tane yön konumu olduğu için 5/2 valfi denir. ( işareti 2 kutuludur). Valf selenoidleri valfi aynı yön konumunda tutmak için kullanılırlar.



Şekil 5.3.10 5/2 yön kontrol valfi

E şeklinde sembolize edilen pnömatik çıkışların görevi kullanılmayan havayı atmosfere atmaktır. I girişleri de kompresöre bağlıdır ve basınçlı hava ile beslenmektedir. 24 V ac selenoidlerin kontrolörle arabirimi çıkış portlarındaki rölelerle olur. Şekil 5.3.9 ' da görüldüğü gibi tetiklenen röleler selenoidin enerjilenmesine sebep olur.

Anahtarların aktif hale geçmesi pistonun hareketi ya da kullanıcının isteğine bağlıdır. Eğer pistonun hareketine bağlanırsa piston sonuna manyetik algılayıcı ya da reed anahtarı ( mıknatıs etkisi ile tetiklenen anahtar) konulabilir. Böylece pistonun silindirin sonuna geldiği algılanıp ikinci tetikleme yapılabilir.

## 6. BÖLÜM

### DENEYSEL PLATFORM MEKANİZMANIN İNCELENMESİ

#### 6.1. DENEYSEL MEKANİZMA İÇİN KULLANILAN ELEMANLAR

##### 6.1.1. Platform :

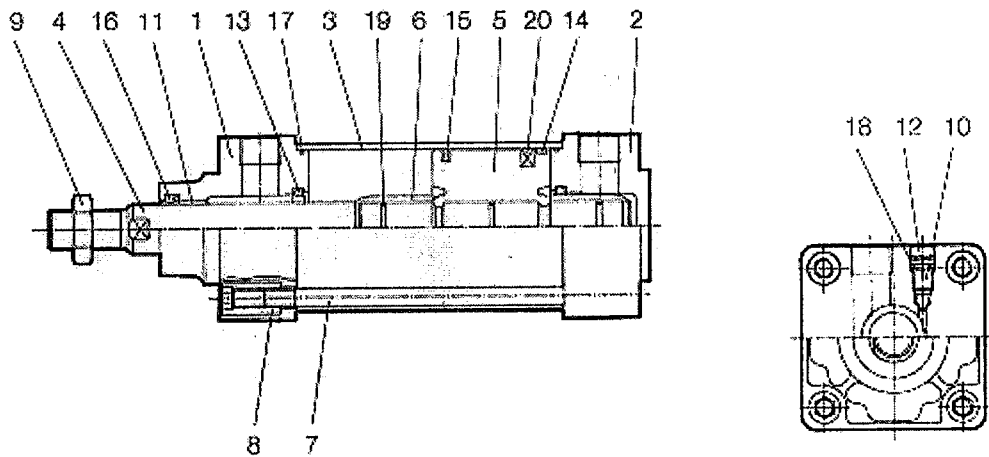
Deney amacı ile prototipini dizayn ettiğimiz manipulatör mekanizmasının taban platformunu 8 mm' lik alüminyum levha, hareketli olan üst platformu da ağırlıktan tasarruf etmek amacı ile 20 mm' lik sunta oluşturmaktadır.

##### 6.1.2. Silindirler ( Tahrik Elemanları ) :

Prototipin montajında , platformu tahrik etmek amacı ile üç adet pnömatik silindir kullanılmıştır. Bunlar, 7500 Newton' a kadar kuvvet elde etmek için kullanılabilecek , ayarlanabilir, çift-etkili silindirlerdir.

Konumlandırma sistemi kullanıldığında , dış yükten bağımsız olarak piston değişik konumlarda hassas olarak durdurulabilir. Bunların manyetik başlıklı modellerinde bulunan manyetik algılayıcılar strok sonunu algılamak veya silindiri belirli bir konumda durdurmak için kullanılır.

Bu silindirler, özel sızdırmazlık elemanları sayesinde yağlı veya yağsız kuru hava ile çalışabilirler. Sürtünme son derece düşüktür. ( max. 8 N ). Minimum çalışma basıncı sadece 0.5 bardır. Düşük sürtünme silindirleri konumlandırmada önemli rol oynar. Montajda da özel gresin kullanılması ile sürtünme minimuma indirilmiştir.



Şekil 6.1

Silindirin kesiti ve parça numaraları

Standart olarak kullanılan piston yataklama halkası yan yüklere maruz kaldığı durumlarda çalışma ömrünü arttırmaktadır. Bu durum aynı zamanda düzgün ve kararlı harekete izin vermektedir. Fakat , prototipte kullanılmasına ihtiyaç duyulmamıştır.

Şekil 6.1 silindirin kesitini ve parça numaralarını göstermektedir.

Tablo 6.1 Silindir parçalarının listesi

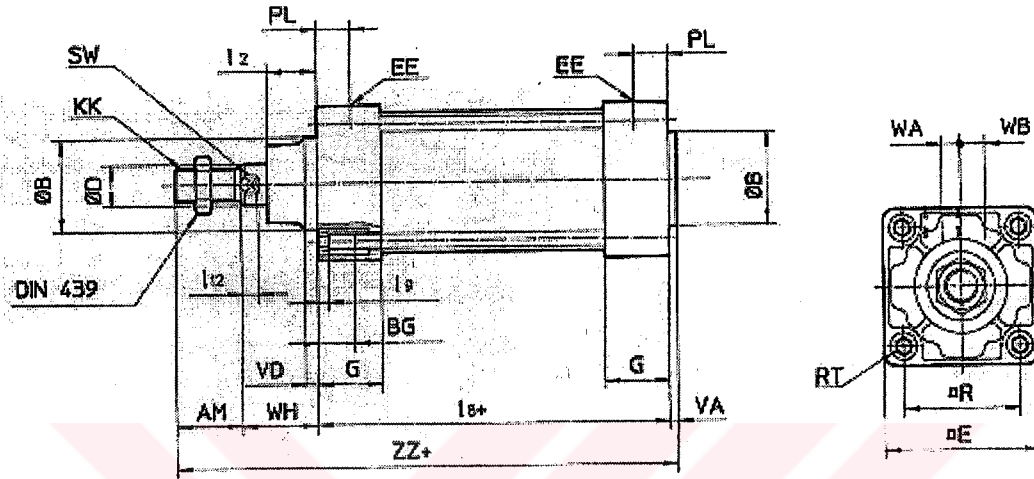
| No | Parça adı                 | Malzeme              |
|----|---------------------------|----------------------|
| 1  | Silindir kapağı           | Hafif metal          |
| 2  | Silindir kapağı           | Hafif metal          |
| 3  | Silindir borusu           | Hafif metal          |
| 4  | Mil                       | C 45 Sert krom kaplı |
| 5  | Piston                    | Hafif metal          |
| 6  | Yastıklama parçası        | Pirinç               |
| 7  | Kapak tutturma mili       | Çelik, krom kaplı    |
| 8  | Somun                     | Çelik, krom kaplı    |
| 9  | Somun                     | Çelik, krom kaplı    |
| 10 | Yastıklama ayar vidası    | Çelik, nikel kaplı   |
| 11 | Boğaz yatağı              | Özel yatak malzemesi |
| 12 | Segman                    | Çelik, krom kaplı    |
| 13 | Yastıklama keçesi         | Elastomer malzeme    |
| 14 | Piston yastıklama halkası | Özel yatak malzemesi |
| 15 | Sızdırmazlık elemanı      | NBR                  |
| 16 | Toz keçesi / Sızdırmazlık | NBR                  |
| 17 | O-Ring ( silindir )       | NBR                  |
| 18 | O-Ring ( yastıklama )     | NBR                  |
| 19 | O-Ring ( piston / rot )   | NBR                  |
| 20 | Manyetik başlık           |                      |

Yeni tasarlanan yastıklama keçeleri minimum ölü hacimde mükemmel yastıklama sağlamaktadır. Keçelerin tasarımı düşük basınçta bile pistonun yastıklama bölgesinden

hızlı ve tutukluk yapmadan çıkmasını sağlar. Yastıklama ayar vidası ayarlama durumunda yerinden çıkmayacak şekilde yapılmıştır.

Silindir borusu 30 µm derinliğinde sertleştirilmiştir. C 45 çeliğinden imal edilmiş piston mili 25 µm derinliğinde sert krom ile krom kaplıdır.

Prototipte kullanılan silindirin boyutları da aşağıdaki şekil ve tabloda verilmiştir.



Şekil 6.2 Silindirin boyutlandırılması

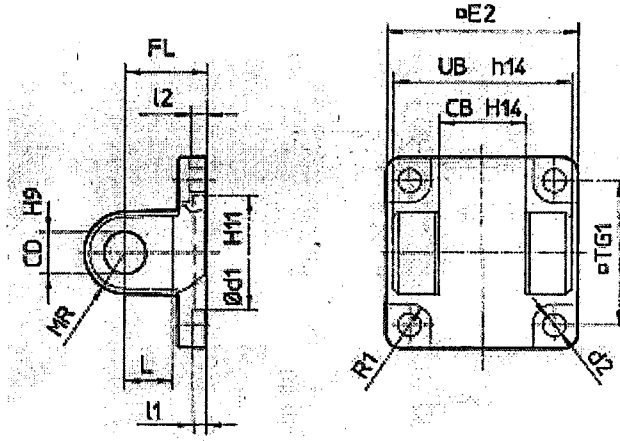
| Ø B | piston<br>Ø | AM | ØD | EE   | PL | RT | l 12 | KK       | SW | G  | BG |
|-----|-------------|----|----|------|----|----|------|----------|----|----|----|
| 30  | 32          | 22 | 12 | G1/8 | 13 | M6 | 6    | M10X1.25 | 10 | 27 | 16 |

| l 8 | VD | VA | WA | WB  | WH | ZZ  | ZY  | ØE | ØR   | l 12 | l 9 |
|-----|----|----|----|-----|----|-----|-----|----|------|------|-----|
| 94  | 4  | 4  | 4  | 6.5 | 26 | 146 | 190 | 46 | 32.5 | 15   | 4   |

Tablo 6.2 Silindirin boyutlandırılması

### 6.1.3. Tespit elemanı

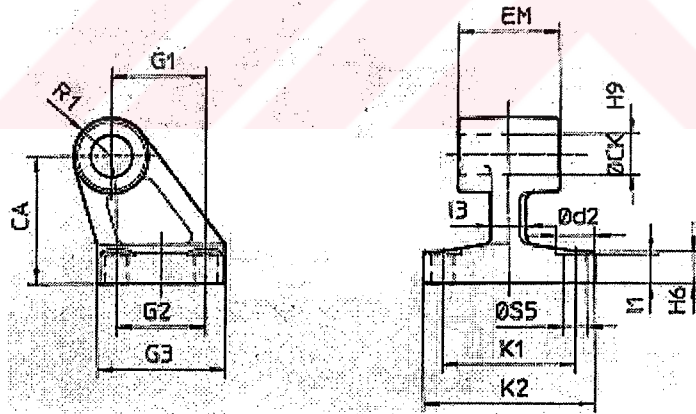
Pnömatik silindirleri tabandaki alüminyum levhaya monte edebilmek için bu silindirler için özel imal edilmiş üç adet tespit elemanı kullanılmıştır. Bu tespit elemanının tabana ve pistonu oturan iki ana parçası vardır . Aynı zamanda, pistonun levha üzerinde açisal hareket yapabilmesine de olanak sağlar.



Şekil 6.3 Tespit elemanının pistona oturan parçası

| Piston Ø | FL | / 1 | L  | / 2 | Ø d1 | CD | MR  | d2  | R 1 | ØE2 | UB | CB |
|----------|----|-----|----|-----|------|----|-----|-----|-----|-----|----|----|
| 32       | 22 | 5   | 12 | 5.5 | 30   | 10 | 0.5 | 6.6 | 6.5 | 48  | 45 | 26 |

Tablo 6.3 Tespit elemanının pistona oturan parçasının boyutlandırılması



Şekil 6.4 Tespit elemanının levhaya oturan parçası

| Piston<br>Ø | Ød2 | ØCK | ØS5 | K1 | K2 | / 3 | G1 | / 1 | G2 | EM | G3 | CA | H6 | R1 |
|-------------|-----|-----|-----|----|----|-----|----|-----|----|----|----|----|----|----|
| 32          | 11  | 10  | 6.6 | 38 | 51 | 10  | 21 | 7   | 18 | 26 | 31 | 32 | 8  | 10 |

Tablo 6.4 Tespit elemanının levhaya oturan parçasının boyutlandırılması

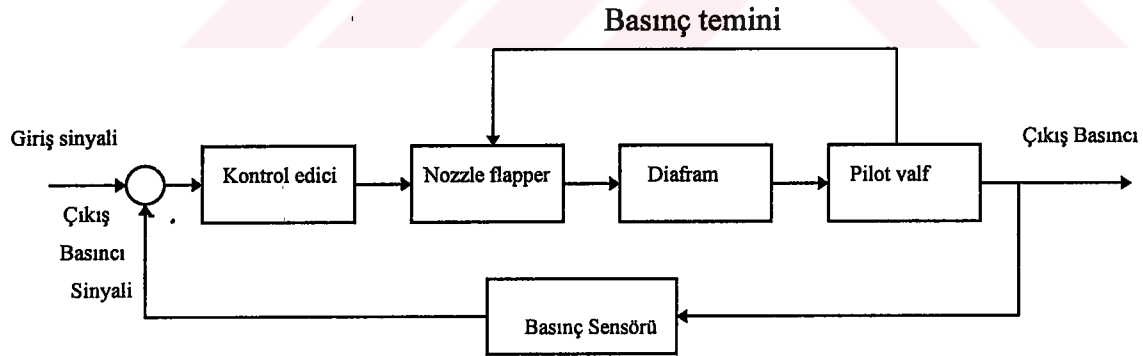
#### 6.1.4. Üniversal Mafsal :

Mekanizmanın üç serbestlik dereceli hareketi yapabilmesi için pistonların üst levhaya uygun elemanlar ile bağlanması gereklidir. Pistonların üst levhaya göre serbest hareket edebilmesi için üniversal mafsal ve rulmandan meydana gelen bir kombinasyon kullanılmalıdır. Mafsal, pistonun iki ekseninde hareketini sağlar. Üçüncü eksenindeki hareketi sağlamak için piston milinin dönme hareketi kabiliyetinden dolayı rulman kullanılmasına ihtiyaç yoktur.

Üniversal mafsal olarak Peugeot J9' a ait üç adet direksiyon mafsalı kullanılmıştır. Bu mafsallar pistonların millerine sıkı-geçme şeklinde bağlanmışlardır. Daha sonra mafsalların diğer uçları da üst levhaya saplamalar ile bağlanmıştır.

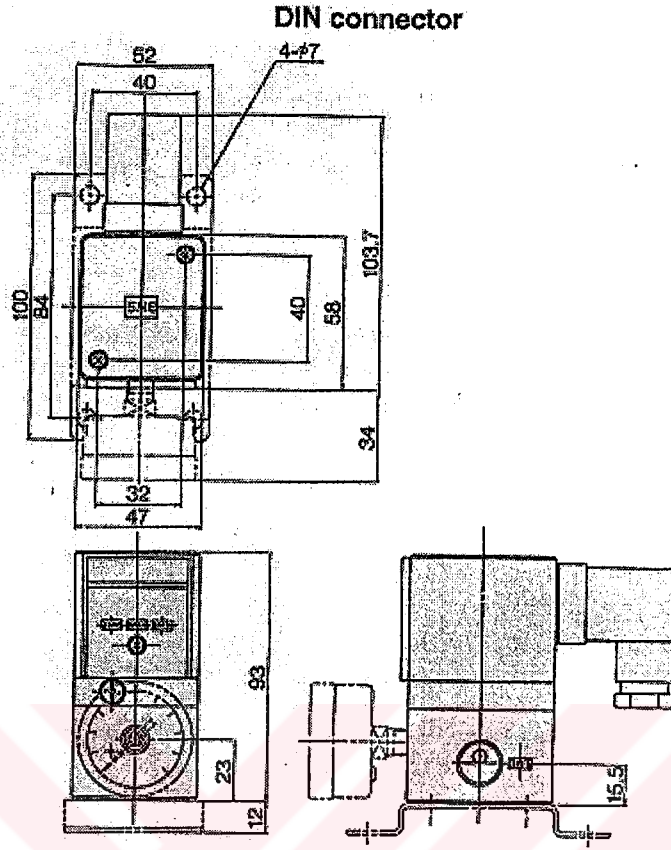
#### 6.1.5. Elektro-Pnömatik Regülatörler

Silindirlere uygulanan hava basıncı, oransal valf adı da verilen elektro-pnömatik regülatörler tarafından kontrol edilmektedir. Bu regülatörlere gönderilen elektrik sinyalleri ile orantılı olarak hava basıncı artırılır veya azaltılır. Elektro-pnömatik regülatörler, tahrik elemanı olan silindirlere mümkün olduğunca kısa sürede kumanda işareti gönderebilmesi için amaca uygun bir şekilde pistonların yakınına monte edilmelidirler. Böylelikle hem kullanılacak hortum boyutundan tasarruf sağlanır hem de anahtarlama zamanı kısıtlanmış olur.



Şekil 6.5 Elektro-Pnömatik regülatörün blok diagramı

Elektro-pnömatik regülatörlere elektrik sinyali bilgisayar aracılığı ile verilir. Böylece üst platformun istenilen konumda ve dengede durdurulabilmesi için silindirlere uygulanması gereken basınçlar otomatik olarak kontrol edilmiş olur.

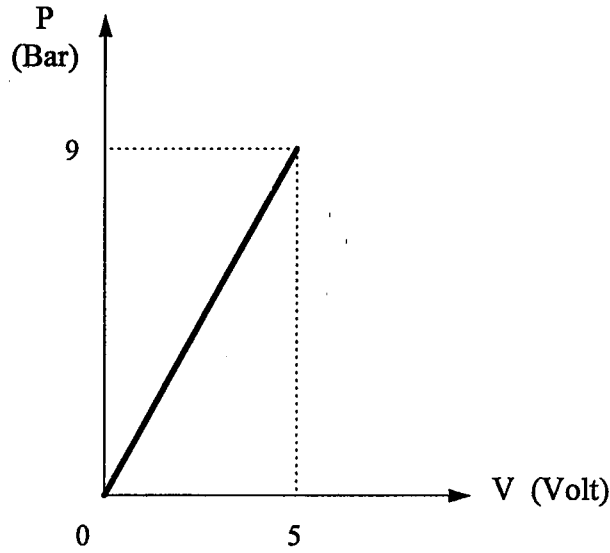


Şekil 6.6 Elektro-Pnömatik regülatörün boyutlandırılması

Tablo 6.5 Elektro-Pnömatik regülatörün özellikleri

|                                   |                                            |
|-----------------------------------|--------------------------------------------|
| Giriş sinyali (volt)              | 0-5 VDC, 10 VDC Max. (2 mA ya da daha az ) |
| Voltaj                            | 12 VDC Max. (11 mA yada daha az )          |
| Eşdeğer giriş empedansı (4-20 mA) | 500Ω                                       |
| Empedans (0-20 mA)                | 200 Ω                                      |
| (0-5, 10 V)                       | 30 kΩ                                      |
| Doğrusallık                       | % 1 yada daha az                           |
| Histerisiz                        | % 0.5 yada daha az                         |
| Tekrarlanabilirlik                | % 0.5 yada daha az                         |
| Isı karakteristikleri             | % 0.12 yada daha az                        |
| Çalışma sıcaklığı aralığı         | 0 - 50 C <sup>0</sup>                      |
| Elektrik bağlantı                 | DIN bağlantı                               |

Elektro -pnömatik regülatörün doğrusallığı da aşağıda verilen grafik ile gösterilebilir.



Şekil 6.7 Doğrusallık

#### 6.1.6. Havanın hazırlanması

Bilindiği gibi atmosfer havasının içinde pnömatik sistemi olumsuz yönde etkileyen, belirli oranlarda nem ve toz parçacıkları mevcuttur. Hava sıkıştırıldıktan sonra içinde bulundurduğu nem soğutucuda veya tankta yoğunlaşır. Bununla birlikte azda olsa belirli bir miktar nem ve yabancı maddeler sisteme taşınır. Ayrıca borulardan kopan pullar ve aşınmış sızdırmazlık maddesi gibi yabancı cisimler de söz konusudur. Bütün bunların pnömatik elemanlar üzerinde olumsuz etkileri vardır çünkü sızdırmazlık elemanlarının ve komponentlerin daha fazla aşınmasına, sızdırmazlık elemanlarının açılıp yayılmasını, korozyona ve valflerin yapışmasına neden olurlar.

Bu, sistemi olumsuz yönde etkileyen tüm kirletici maddeleri uzaklaştırmak için hava, kullanma noktası olan platforma yakın olan bir noktada temizlenmelidir.

Havanın hazırlanması işleminde bir adet filtre, bir adet regülatör ve de bir adet hassas basınç regülatörü kullanılmıştır.

#### Filtre :

Havanın nemi daha önce alınmamış ise, önemli ölçüde su toplanacak, filtre toz ve pas gibi parçacıkları tutacaktır.

Suyun ayrılması esas olarak havanın girişteki saptırıcı tarafından oluşturulan hızlı dönme hareketi ile gerçekleşir. Kir, su ve yağ parçacıklarının daha ağır olanları dışarıya doğru fırlatılarak filtre kavanozunun çeperlerine çarpar ve aşağıya düşerek dipte

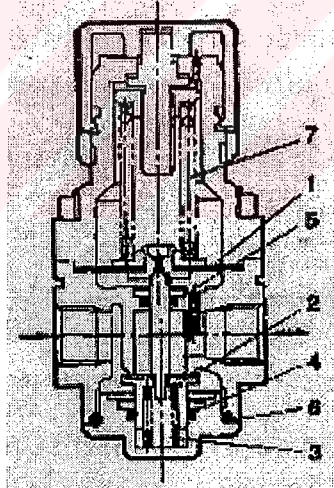
toplanır. Sıvı ortadan bir boşaltma musluğu veya otomatik boşaltıcı ile tahliye edilebilir. Bölme plakası girdap hareketi yapan havanın altında hareketsiz bir bölge meydana getirir ve ayrılan sıvının tekrar hava akımına karışmasını önler.

Filtre elemanı hava çıkışa doğru akarken, daha ince toz parçacıklarını, pas pullarını ve pislenmiş yağları uzaklaştırır.

Filtrenin kavanozu normal olarak polikarbonattan yapılmıştır. Emniyet için metal bir koruyucu ile muhafaza edilir. Kimyasal açıdan tehlikeli ortamlarda özel kavanoz malzemeleri kullanılır. Kavanoz, ısıya veya kıvılcımlara maruz kalıyor ise metal malzemelerden yapılır.

#### Regülatör :

Sisteme uygulanan basıncın ayarlanması gereklidir. Çünkü, optimum değer üzerindeki basınçlarda verim az artarken veya hiç artmaz iken hızlı yıpranmalar olmaktadır. Çok düşük basınç ise ekonomik değildir, çünkü verim çok azdır. Basıncı optimum değerde sağlamak için sistemde hassas regülatör kullanılmıştır.

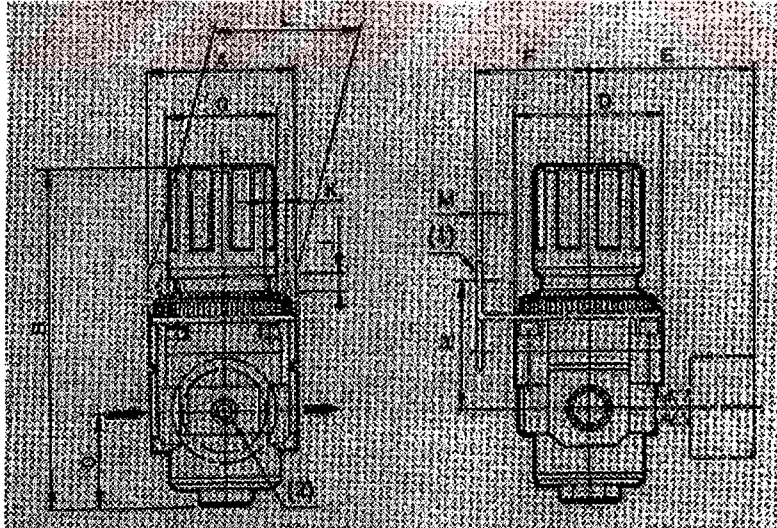


Şekil 6.8 Regülatörün parça numaraları

Tablo 6.6 Regülatör parçalarının listesi

| No | Tanım            | Malzeme |
|----|------------------|---------|
| 1  | Diyafram         | NBR     |
| 2  | Valf diski       | NBR     |
| 3  | Valf yayı        | Çelik   |
| 4  | O-ring           | NBR     |
| 5  | O-ring           | NBR     |
| 6  | O-ring           | NBR     |
| 7  | Basınç ayar yayı | Çelik   |

Basınç regülatörlerinde, çıkış basıncını ayarlayabilen ve yay kuvvetine karşı dengeleyen bir piston veya diyafram bulunur. Çıkış basıncı ayar vidası ile ayarlanır. Yüklenen ayar yayı ana valfi açık tutar . Böylece girişten çıkışa doğru hava akımına müsaade eder Basınç çıkışa bağlanan devrede artmaya başlar ve diyaframa etki ederek yay yüküne karşı bir kaldırma kuvveti oluşturur.



Şekil 6.9 Regülatörün boyutlandırılması

**Tablo 6.7** Regülatör boyutları

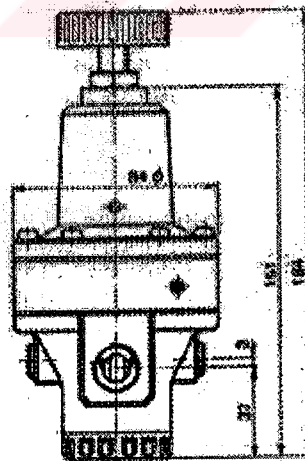
| Büyük­lük | Bağ­lantı dişi | A  | B     | C    | ØD | E    | F  | G  | H  | J   | K    | L  | M   | ØN   |
|-----------|----------------|----|-------|------|----|------|----|----|----|-----|------|----|-----|------|
| 4000      | G1/2           | 70 | 149.5 | 37.5 | 70 | 65.5 | 50 | 54 | 54 | 8.5 | 10.5 | 70 | 2.3 | 52.5 |

**Tespit elemanlı ara parça :**

Filtre ve regülatörü birleştirmeye yarayan bu ara parça aynı zamanda cihazın herhangi bir yere tespiti için de kullanılır. Elemanlardan birini değiştirmek gerektiğinde tespit elemanlı ara parça, monte edildiği yerden sökülmeden istenilen değişikliği yapabilmek mümkündür.

### Hassas Regülatör :

Regülatörden çıkan basınçlı hava üç adet elektro-pnömatik regülatöre ve bir adet hassas regülatöre gönderilir. Elektro-pnömatik regülatörlerden çıkan basınçlı hava silindirlerin birer ucundan girer. Hassas regülatörden çıkan basınçlı hava ise silindirlerin diğer uçlarından girer. Silindirler için gerekli olan basınç ayarı hassas regülatör ile yapılır.



**Şekil 6.10 Hassas regülatörün boyutlandırılması**

Tablo 6.8 Hassas regülatöre ait teknik bilgiler

|                      |                                   |
|----------------------|-----------------------------------|
| Tip                  | EIR 400                           |
| Havanın özelliği     | 5 mikron filtrelenmiş yağsız hava |
| Bağlantı dişi        | G 1/4                             |
| Max. İşletme basıncı | 10 bar                            |
| Çıkış basınç aralığı | 0.1 - 2 bar                       |
| Egzos bağlantı dişi  | G 3/8                             |
| Manometre bağlantısı | G 1/4                             |
| İşletme sıcaklığı    | 5 - 60 C°                         |
| Duyarlılık seviyesi  | 0.02 bar                          |
| Tekrarlanabilirlik   | ± 0.05 bar                        |
| Malzeme              | Alüminyum pres döküm              |
| Ağırlık              | 1.0 Kg                            |
| Montaj konumu        | istenildiği gibi                  |

#### 6.1.7 Kullanılan Diğer Elemanlar :

##### *Manometre*

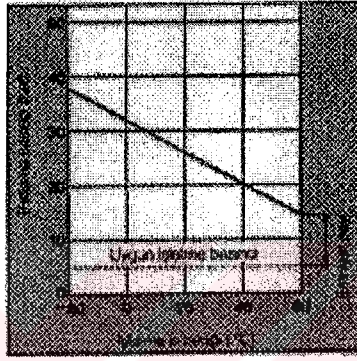
Bu sistem için iki adet manometre kullanılmıştır. Bunlardan biri regülatörün, diğeri de hassas regülatörün basıncını ölçmeye yaramaktadır. Basınç aralığı 0 - 10 bar ve bağlantı dişi R 1/16 ' dır.

##### *Hortum*

Pnömatik elemanlar arasındaki basınçlı hava nakliyesi için 10 mm ve 5 mm çaplara sahip yeteri uzunluklarda hortumlar kullanılmıştır. Yine bunlara ait teknik bilgiler aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 6.9 Hortum ile ilgili teknik bilgiler

|                      |                             |
|----------------------|-----------------------------|
| Max. İşletme basıncı | 5 bar                       |
| İşletme sıcaklığı    | - 20 ile 60 C°              |
| Bükülme yarıçapı     | 10 20                       |
| Malzeme              | Poliüretan                  |
| Patlama basıncı      | Şekil 6.11 ' de verilmiştir |



Şekil 6.11 Patlama basıncı eğrisi

#### *Susturucu*

Elektro-pnömatik regülatörlerde havanın dışarı atıldığı yerlere gürültüyü azaltmak amacı ile susturucu monte edilmiştir. Susturucular atık havasının dışarı çıkış hızını azaltarak meydana getirilen gürültüyü minimuma indirirler. Bu, gürültüyü azaltma açısından istenen bir durum iken susturucular az da olsa piston hızını etkilerler.

#### *Düz Rakor, Dirsek ve T-dağıtıcı*

Hortumları silindirlere bağlamak için 6 adet dirsek , regülatörlere ve elektro-pnömatik regülatörlere bağlamak için 9 adet otomatik düz rakor kullanılmıştır. Ayrıca hortumlar arasındaki bağlantıları sağlamak amacı ile de 4 adet T-dağıtıcı kullanılmıştır.

## 6.2 PROTOTİPİN MONTAJI

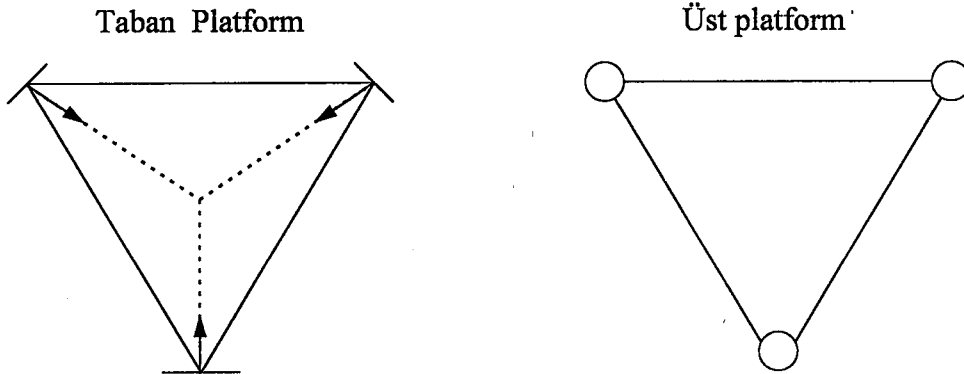
### 6.2.1 Platform Ve Silindirlerin Montajı

Prototipin montajı için, daha önce temin ettiğimiz alüminyum ve sunta levhalar üzerine birer tane, 60 cm kenarlara sahip eşkenar üçgen çizilmiştir. İlk önce hareketli üst platformu teşkil edecek olan sunta levha üzerine çizilen eşkenar üçgenin köşelerine 2 cm çaplı saplamaların yerleştirilebileceği şekilde uygun bir matkapla delikler açılmıştır.

Yine buna benzer olarak, alüminyum levha üzerinde bulunan eşkenar üçgenin köşelerine de mevcut olan tespit elemanlarının oturacağı şekilde (aynı zamanda üçgenin köşesi ile merkezinden geçen düz doğruya dik olacak şekilde) delikler açılarak tespit elemanları bu köşelere civata ve somunlar vasıtası ile uygun şekilde sabitlenmiştir. Daha sonra pistonlar bu tespit elemanlarının pistona tekabül eden kısımlarına yerleştirilerek yine uygun civatalar ile tutturulmuştur. Pistonların alt tarafına bağlanan tespit elemanları aynı zamanda aksel mafsalları görevini de sağlamaktadırlar. Alt ve üst platformlarda kullanılan mafsallar aşağıdaki şekilde gösterilebilir. Burada ok işareti hareketin yönünü göstermektedir. Buna göre ;



olmak üzere şu şekildedir :



Daha önceden temin ettiğimiz üç adet üniversal mafsalları pistonların millerine uygun bir şekilde tutturularak mafsalların diğer uçlarına da 2 cm çaplı saplamalar

yerleştirilmiştir. Mafsalların mil başlarına gelen yerlerdeki ve saplamaların oturduğu kısımlarda bulunan somun ve civatalarda emniyet açısından iyice sıkılmıştır.

Son olarak,mafsalların saplamaları üst platformun deliklerine oturacak şekilde yerleştirilerek ve 2 cm çapındaki somunlar da uygun bir biçimde sıkılarak platform yerleştirilmiştir.

#### 6.2.2 Pnömatik Düzeneğin Kurulması

Sistemin kontrol edilebilmesi için gerekli en önemli eleman olan elektro-pnömatik regülatörlere hortumların uygun bir şekilde bağlanması gerekir. Bunun için, her bir silindirin alt ve üst tarafında mevcut olan giriş çıkışlara uygun dirsekler yerleştirilmiştir. Daha sonra, yeteri uzunluklarda kesilen ince çaplı hortumlar bu dirseklere monte edilmiştir. Üst taraftaki dirseklere bağlı olan ve aynı zamanda pistonların kontrol basıncı girişlerini teşkil eden hortumlar elektro-pnömatik regülatörlerin çıkışlarına uygun rakorlar ile bağlanmıştır.

Pistonların alt kısmına daha önce yerleştirmiş olduğumuz dirseklerden gelen üç hortum, uygun T bağlantıları ile birleştirilerek tek bir hortuma bağlanmıştır. Çünkü bu kısım, sistemin sabit basıncını teşkil edecektir. Daha sonra bu hortum da uygun bir rakor yardımı ile hassas basınç regülatörünün çıkışına bağlanmıştır.

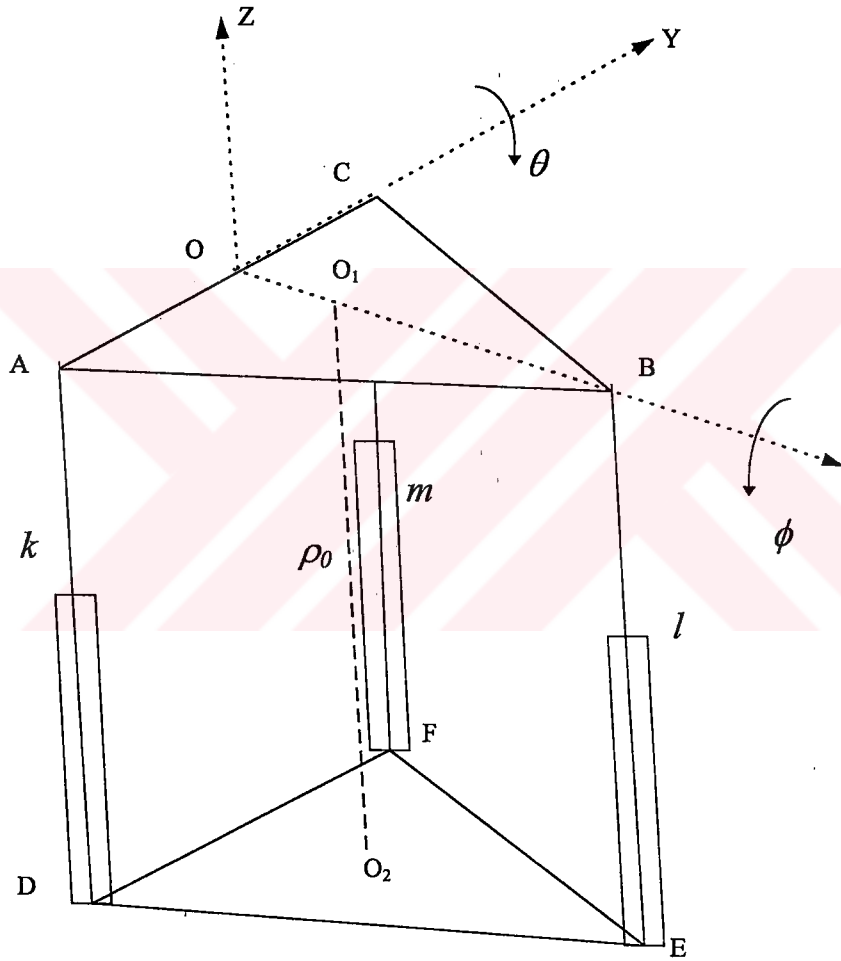
Aynı şekilde elektro-pnömatik regülatörlerin giriş kısımlarına da, yeteri uzunluklardaki büyük çaplı hortumlar uygun rakorlar ile bağlanmıştır. Elde edilen bu üç hortum, yine uygun T dirsekler yardımı ile birleştirilerek tek bir hortuma bağlanmıştır. Daha sonra da bu hortum bir rakor yardımı ile basınç regülatörünün çıkışına bağlanmıştır.

Basınç regülatörünün ve hassas basınç regülatörünün girişleri de yine uygun elemanlar ile birleştirilerek tek bir hortum haline getirilmiştir. Sisteme verilecek olan basınçlı havanın nemsiz ve temiz olabilmesini sağlamak için de bu tek hortum uygun bir rakor ile filtrenin çıkışına bağlanmıştır. Filtrenin girişi de uygun elemanlar yardımı ile kompresöre bağlanmıştır.

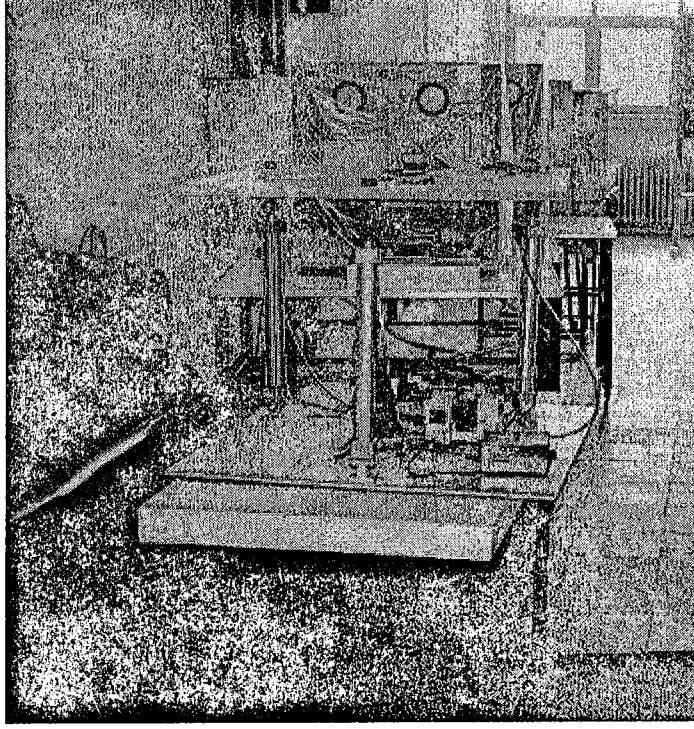
Son olarak hassas basınç regülatörüne ve basınç regülatörüne, basınç değerlerinin rahat bir şekilde kontrol edilmesi amacı ile manometreler takılmıştır.

### 6.2.3. Elektrik ve Diğer Bağlantıların Yapılması:

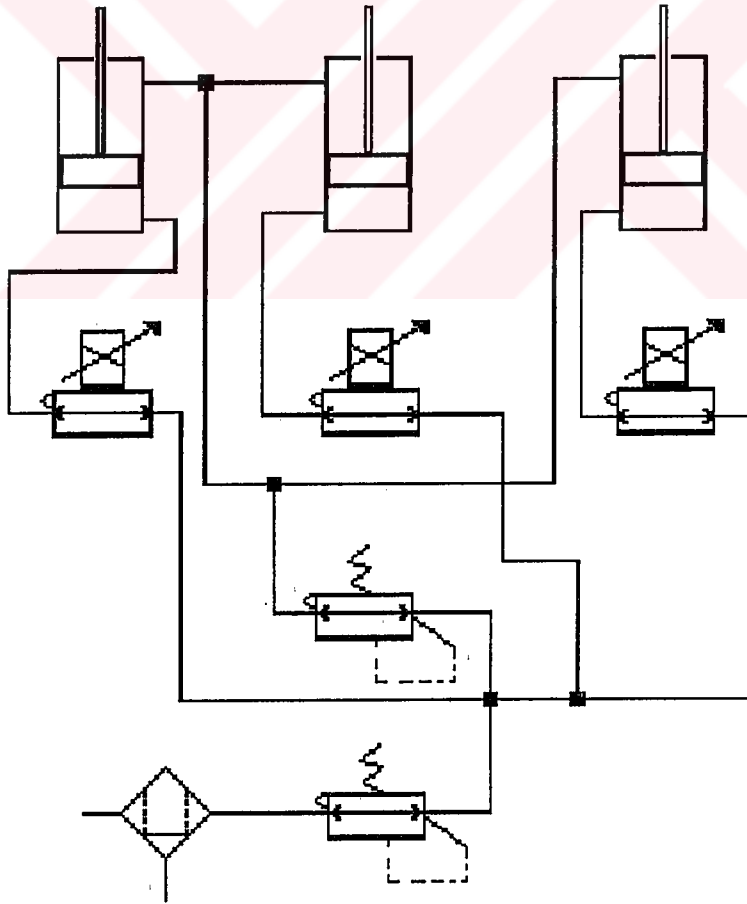
Sistemin elektrik bağlantılarını yapmak için değişik renklere sahip ince kablolar elektro-pnömatik regülatörlerin elektrik giriş soketlerine bağlanmıştır. Her bir regülatörün soketinde dört giriş vardır. Bunlardan ikisi regülatörü besleme girişi, diğer ikisi de kontrol girişidir. Regülatörlerin besleme girişlerine bağlanmış olan belirli renkteki kablolar 12 V DC ' lik bir bataryadan beslenmektedir.



Şekil 6.12 Üç serbestlik dereceli paralel manipulatör mekanizmasının genel görünüşü



Şekil 6.13 Kurulan düzenden bir görünüş



Şekil 6.14 Sistemin Pnömatik Devre Şeması

## 7. BÖLÜM

### DENEYSEL PLATFORM MEKANİZMASININ KİNEMATİK ÇÖZÜMLERİ

#### 7.1. GİRİŞ

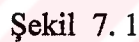
Dizayn aşamasından sonra montajı yapılan platformun hareket denklemleri, ters veya düz kinematik yöntemler ile çözülmektedir. Paralel manipulatörlerde ters kinematik çözüm, seri manipulatörlerdekine göre daha basit ve kolaydır. Paralel platformlarda ters kinematik çözüm, tavan platformun belli bir oryantasyona gelebilmesi için gerekli bacak deplasmanlarının bulunması şeklindedir.

Paralel manipulatör mekanizmasının ters kinematik probleminin basit kapalı-şekilli çözümleri vardır. Paralel manipulatör mekanizması kavramının tamamlanması tam olarak Stewart Platformu ile olmuştur. Stewart Platformu' nun icadı robot tasarımcılarının dikkatini çekmiş ve mekanizması pek çok robot uygulamalarında kullanılmıştır.

Charles Nguyen ve Sami Antrazi (1991) tarafından yapılan çalışmalarda vektör analizini ve koordinat düzlemini kullanarak, kartezyen koordinatlardaki değişkenleri gerekli bacak (eyleyici) uzunluklarına çevirmek amacı ile ters kinematik dönüşüm için kapalı formda bir çözüm elde edilmiştir. Bu durumda ters kinematik eşitlikler olabildiğince sadeleştirilmiş ve daha sonra Newton-Raphson metodunu kullanarak kartezyen değişkenlerine bacak uzunluklarını çeviren ileri kinematik dönüşüm için tekrarlanabilen bir çözüm geliştirmek amacı ile tatbik edilmiştir.

Bu tezin ana konusu olan deneysel amaçlı üç serbestlik dereceli manipulatör mekanizmasının kinematiği için ilk önce fikir vermesi açısından iki boyutlu durum göz önüne alınarak inceleme yapılmış daha sonra hareketli üst platformun merkezinin X ve Y eksenlerinde sabit kaldığı kabul edilerek çözüme gidilmiş bunu takiben mekanizmanın kesin kinematik çözümü için sistemin daha kolay tanınması açısından basit tanımlamalar yapılarak ters ve düz kinematik çözümler elde edilmiştir. Üç serbestlik dereceli manipulatör mekanizmasının ters ve düz kinematik çözümleri için ikinci dereceden olmak üzere üç bilinmeyenli üç denklem elde edilmiş ve bu denklemlerin çözümü de bilgisayar programı ile yapılmıştır.

Mekanizmanın iki boyutlu durumda kinematik çözümlerinin doğruluğunu göstermek ve fikir vermesi açısından ilk olarak söz konusu durumun kinematik analizinin yapılması uygun görülmüştür.


$$|AB| = |AB'| = R \quad \text{ve} \quad |EB| = \rho_0 \quad \text{olmak üzere ;}$$

'dir ve dik üçgende PİSAGOR bağıntısından;

79

elde edilir. Burada  $R$  ve  $\rho_0$  sabit değerler olduğundan  $K$  uzunluğu ve  $\alpha$  açısı da bunlara bağlı olarak birer sabit değerdir.

$l$  bacak uzunluğunu  $\theta$  değişkenine bağlı olarak elde edebilmek için AB'C üçgenine COSİNÜS teoremini uygulamamız yeterli olacaktır. O halde

$$l^2 = R^2 + K^2 - 2RK \cdot \cos(\alpha + \theta) \quad 7.1$$

şeklinde olup, daha açık bir ifade ile bacak uzunluğu ;

$$l = \left\{ 2R^2 + \rho_0^2 - 2R\sqrt{(R^2 + \rho_0^2)} \cdot \cos\left(\arctan\frac{\rho_0}{R} + \theta\right) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad 7.2$$

olarak elde edilir.

Bunun tam tersi olmak üzere  $\theta$  değişken platform açısını  $l$  bacak uzunluğuna bağlı olacak şekilde bulmak için denklem 7.1 ' de  $\theta$  ' yı çekmemiz yeterlidir. Buna göre ;

$$\theta = \arccos\left(\frac{R^2 + K^2 - l^2}{2RK}\right) - \alpha \quad 7.3$$

olup daha açık bir ifade ile  $K$  ve  $\alpha$  sabit değerlerinin eşitini yerine koyarak;

$$\theta = \arccos\left(\frac{2 \cdot R^2 + \rho_0^2 - l^2}{2R \cdot \sqrt{R^2 + \rho_0^2}}\right) - \arctan\left(\frac{\rho_0}{R}\right) \quad 7.4$$

ifadesi elde edilir.

$\gamma$  açısını bulmak için yukarıdaki şekilde belirtilen izafi bir D noktasından eksenlere çizilen dikmelerin oluşturduğu üçgenler yardımıyla ;

$$|B'D| = l \cdot \sin \gamma \quad \text{ve} \quad |B'D| = R - R \cdot \cos \theta$$

olduğu kolayca görülebilir. Bu iki ifadeyi eşitleyerek ;

$$l \cdot \sin \gamma = R - R \cdot \cos \theta \quad 7.5$$

bağıntısını yazabiliriz.

Buradan  $\gamma$  ' yı çekersek C noktası etrafındaki dönmeyi ;

$$\gamma = \arcsin \left\{ \frac{R}{l} (1 - \cos \theta) \right\} \quad 7.6$$

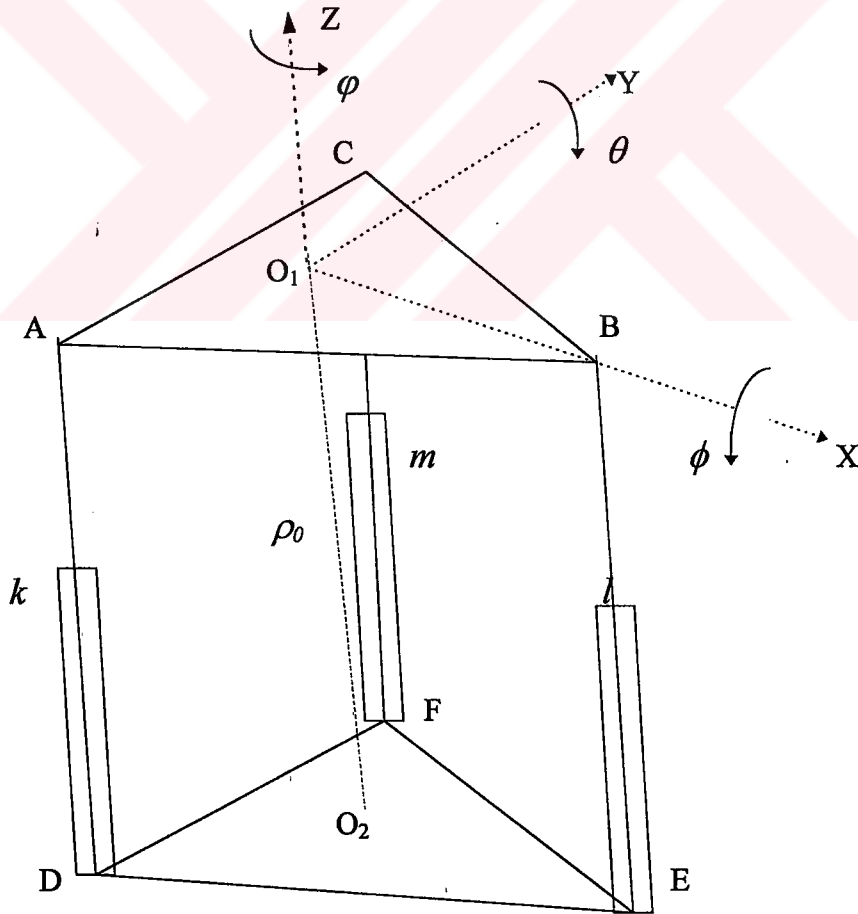
$l$  'nin eşitini de yerine yazarsak, ifade daha açık bir şekilde ;

$$\gamma = \text{Arcsin} \left\{ \frac{R}{\left\{ 2R^2 + \rho_0^2 - 2R\sqrt{(R^2 + \rho_0^2)} \cdot \text{Cos} \left( \text{Arctan} \left( \frac{\rho_0}{R} \right) + \theta \right) \right\}^{\frac{1}{2}}} \cdot (1 - \text{Cos} \theta) \right\} \quad 7.7$$

olarak elde edilir.

### 7.3. PLATFORM MERKEZİNİN SABİT KABUL EDİLMESİ DURUMUNDA TERS KİNEMATİK ÇÖZÜM

Bu durum incelemesini yapacağımız manipulatör mekanizmasının yaklaşık çözümüdür. Platform merkezinin sabit kalabilmesi için pistonların farklı monte edilmesi gerekmekte olup, bağlantı noktalarının mukavemeti açısından dezavantajları da beraberinde getirdiğinden bu montaj şekli dizaynda kullanılmamış ancak fikir vermesi açısından sadece ters kinematik çözümüne yer verilmiştir. Bu durum için mafsal bağlantılarının şekilleri ileride DEĞERLENDİRME bölümünde verilecektir.



Şekil 7.2 Sabit merkezli platform mekanizmasının koordinat eksenleri

Şekil 7.2 ' de gösterilen eksen takımında ilk pozisyonda, üst platformun geometrik merkezi, eksen takımının orijini olacak şekilde gösterilmiştir. Bu eksen takımında rotasyon açıları da sırası ile, X eksen etrafında  $\phi$  , Y eksen etrafında  $\theta$  , ve Z eksen etrafında  $\varphi$  , ile verilmiştir. Prototipini dizayn ettiğimiz üç serbestlik dereceli manipulator mekanizması Z eksen etrafında dönme hareketi yapamadığından dolayı  $\varphi$  değeri sıfırdır. Dolayısıyla üst platformun bu eksenler etrafındaki dönmelerini de bu açılar ile tanımlayabiliriz. Bu ifadeler doğrultusunda üst platform için transformasyon matrisini aşağıdaki gibi verebiliriz.

$$T_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix}$$

$$T_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}$$

$$T_3 = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

ve toplam transformasyon matrisi ise;

$$T = T_1 \times T_2 \times T_3$$

şeklinde elde edilir. Prototipimizin  $\varphi$  açısı sıfır olduğu için  $T_3$  matrisi birim matris olacaktır.

Yine bu eksen takımında taban platformunun köşe noktaları D, E, F ile, oryantasyona uğramış üst platformun merkezi M ile gösterilecektir. Başlangıç konumu olarak tüm pistonların orta strokta olduğunu kabul edersek (  $|O_1O_2| = \rho_0 = 45$  cm silindir boyu + 16 cm piston mili orta strok uzunluğu = 61 cm ), taban platformunun geometrik merkezi Z eksen boyunca orijinden  $\rho_0$  kadar aşağıdadır. Merkezin Z eksen boyunca ötelenmesi  $\rho$  ile ifade edilecek olursa  $|O_1M| = \rho$  şeklindedir. Piston mili 32 cm strok uzunluğuna sahip olduğundan ( $-16 \leq \rho \leq 16$  ) aralığındadır. Buradan üst platformun merkezinin yüksekliği Z ekseninde 45 cm ile 77 cm arasında olduğu görülebilir.

Burada üst platformun başlangıç konumu için, A noktasının koordinatları ( $A_x, A_y, A_z$ ), B noktasının koordinatları ( $B_x, B_y, B_z$ ) ve C noktasının koordinatları

$(C_x, C_y, C_z)$  şeklinde gösterilirken, taban platformunun koordinatları ise sırası ile, D noktasında  $(D_x, D_y, D_z)$ , E noktasında  $(E_x, E_y, E_z)$  ve F noktasında  $(F_x, F_y, F_z)$  şeklinde gösterilmektedir. Bu koordinatların değerleri sabit olduğu için değerleri bellidir. Bu değerler daha ileri sayfalarda bilgisayar programı içerisinde verilmiştir.

Üst platform, eksenler etrafında  $\phi$ ,  $\theta$  ve  $\varphi$  dönmelerine ve merkezi Z ekseninde  $\rho$  ötelemesine maruz kalırsa platformun köşelerinin yeni konumu  $A'$ ,  $B'$  ve  $C'$  noktaları olmak üzere koordinatları sırası ile  $(A'_x, A'_y, A'_z)$ ,  $(B'_x, B'_y, B'_z)$  ve  $(C'_x, C'_y, C'_z)$  şeklindedir.

Bu ifadeleri kullanarak üst platformun dönmelere ve ötelenmeye maruz kaldığı durumdaki yeni koordinatları aşağıdaki gibi matris işlemleri ile hesaplanabilir.

$$\begin{bmatrix} A'_x \\ A'_y \\ A'_z \end{bmatrix} = [T] \cdot \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \rho \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} B'_x \\ B'_y \\ B'_z \end{bmatrix} = [T] \cdot \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \rho \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} C'_x \\ C'_y \\ C'_z \end{bmatrix} = [T] \cdot \begin{bmatrix} C_x \\ C_y \\ C_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \rho \end{bmatrix}$$

Bu dönüşümler sayesinde bulunan üst platformun  $A'$ ,  $B'$ ,  $C'$  noktalarına ait koordinatların, sırası ile taban platformunun D, E, F noktalarının koordinatları ile aralarındaki uzaklıklar mekanizmanın bacak uzunluklarını oluşturur.

Uzay analitik geometrisinden de bilindiği gibi, uzayda koordinatları belli iki nokta arasındaki uzaklık aşağıda gösterildiği gibi hesaplanabilir.

Buna göre;

$A'$  ve D noktaları arasındaki uzaklık  $k$ ,  $B'$  ve E noktaları arasındaki uzaklık  $l$ ,  $C'$  ve F noktaları arasındaki uzaklıkta  $m$  ile gösterilecek olursa;

$$k = ((A'_x - D_x)^2 + (A'_y - D_y)^2 + (A'_z - D_z)^2)^{1/2} \quad 7.8$$

$$l = ((B'_x - E_x)^2 + (B'_y - E_y)^2 + (B'_z - E_z)^2)^{1/2} \quad 7.9$$

$$m = ((C'_x - F_x)^2 + (C'_y - F_y)^2 + (C'_z - F_z)^2)^{1/2} \quad 7.10$$

şeklindedir.

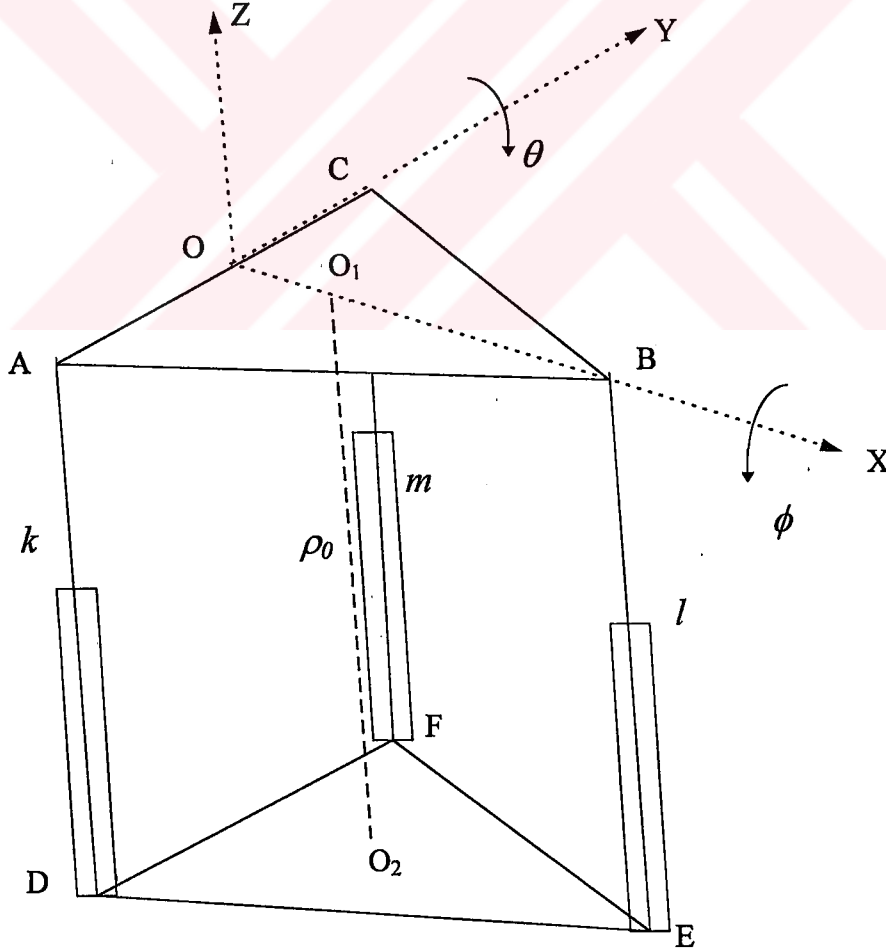
Bütün bu işlemler sonucunda  $\phi, \theta, \varphi$  dönmelerine ve  $\rho$  ötelenmesine karşılık mekanizmanın yeni konumuna ait bacak uzunlukları hesaplanmış olur. Yani platformun belli bir oryantasyona gelebilmesi için gerekli bacak uzunlukları bulunmuş olur.

Yukarıda bulunan bu ifadeleri sayısal olarak hesaplayabilmek için ileri sayfalarda MATLAB' da yazılmış bilgisayar programı verilmiş ve bu denklemlerin geçerliliğini göstermek için uzayda iki nokta arası uzaklık formülü kenar uzunluklarına uygulanmıştır.

#### 7.4. DENEYSEL PLATFORM MEKANİZMASININ KİNEMATİK ÇÖZÜMÜ

##### 7.4.1 Giriş

İncelemesini yapacağımız üç serbestlik dereceli manipulatörde gerçek durumda üst platformun merkezi mafsalları bağlamlarının getirdiği sınırlamadan dolayı sabit kalmamaktadır. Bu istenmeyen bir durumdur ve bazı hareketleri kısıtlamaktadır. Ayrıca Z ekseninde dönme



Şekil 7.3 Deneysel Platform Mekanizması İçin Seçilen Koordinat Eksenleri ve Tanımlamalar

olmadığı gibi bu durumda daha önce yapılan açı tanımlamaları kullanılacak olursa ters kinematik çözüm sağlanamayacaktır. Bu sebeplerden dolayı gerçek durumda,merkezin sabit kalması durumunda verilen açılardan farklı olarak açı tanımlamaları yapılmış ve farklı koordinat eksenini seçilmiştir. ( Şekil 7.3 ) Başlangıç pozisyonu yine pistonların orta strokta olduğu durumdur. Yani başlangıç pozisyonunda  $\rho_0$  üst platform merkezinin taban platformdan uzaklığı olmak üzere  $\rho_0 = 61$  cm olarak seçilmiştir.

#### 7.4.2. TANIMLAMALAR

Ters ve düz kinematik denklemleri elde edebilmek için ilk önce sabit ve değişken değerleri daha sonra oryantasyon için öteleme ve dönmeleri tanımlamamız gerekecektir. Başlangıç durumunda üst platform A, B, C noktalarında iken oryantasyona uğradıktan sonra A', B', C' noktalarına geldiği düşünülmüştür. Bir önceki kabulde olduğu gibi oryantasyona uğramış üst platformun merkezinin konumu M noktası olup, Z eksenini boyunca ötelenmesi  $\rho$  ile ifade edilecektir ( $-16 \leq \rho \leq 16$ ). Buna göre yapılacak tanımlamalar şöyledir;

Uzunlukların tanımlanması :

$$\begin{array}{lll} |A'B'| = p & |A'D'| = k & |DF'| = p \\ |A'C'| = p & |B'E'| = l & |DE'| = p \\ |B'C'| = p & |C'F'| = m & |FE'| = p \end{array}$$

$$\begin{array}{lll} |OA| = p/2 & |MA'| = r & |O_1O_2| = \rho_0 \\ |OC| = p/2 & |MB'| = r & |O_1M| = \rho \\ |OB| = p \cdot \sqrt{3}/2 & |MC'| = r & \end{array}$$

Sabit alt platformun koordinatlarının tanımlanması :

$$D (D_x, D_y, D_z), \quad E (E_x, E_y, E_z), \quad F (F_x, F_y, F_z)$$

Sabit alt platformun koordinatlarının değerleri ;

$$\begin{array}{lll} D_x = 0 & E_x = p \sqrt{3}/2 & F_x = 0 \\ D_y = -p/2 & E_y = 0 & F_y = p/2 \\ D_z = -\rho_0 & E_z = -\rho_0 & F_z = -\rho_0 \end{array}$$

Üst platformun oryantasyona uğradıktan sonraki koordinatları:

$$A' (A'_x, A'_y, A'_z)$$

$$B' (B'_x, B'_y, B'_z)$$

$$C' (C'_x, C'_y, C'_z)$$

Üst platformun oryantasyona uğradıktan sonra merkezinin koordinatları:

$$M (M_x, M_y, M_z)$$

şeklinde gösterilecektir.

#### 7.4.3 ANA DENKLEMLERİN ELDE EDİLMESİ

Üç serbestlik dereceli deneysel platform mekanizmamızın kinematik denklemlerini elde edebilmek için ilk önce uzay analitik geometrisinden iki nokta arasındaki uzaklık formülünün ;

$$P^2 = (A'_x - B'_x)^2 + (A'_y - B'_y)^2 + (A'_z - B'_z)^2$$

olduğunu hatırlamamız gerekmektedir. [9]

Taban platforma D, E ve F noktalarında bağlanmış olan ve  $k$ ,  $l$ ,  $m$  bacak uzunlukları ile belirtilen pistonlar sadece bağlandıkları nokta etrafında tek eksenli hareket edebilmektedirler. (tek eksenli mafsal özelliği). Bundan dolayı seçilen eksen takımında B' noktasının Y eksenini boyunca hareketi kısıtlanmış olacaktır. Böylece  $B'_y = 0$  olmaktadır. [9]

Ayrıca A' ve C' noktaları X ve Y eksenlerinde birbirleri ile doğrusal orantılı olarak hareket etmektedirler. [9]

Buradan hareketle ;

$$B'_y = 0, \quad A'_x \approx A'_y, \quad C'_y \approx C'_x$$

olacaktır.

Uzay analitik geometrisinden bacak uzunlukları denklemleri ;

$$k^2 = (A'_x - D_x)^2 + (A'_y - D_y)^2 + (A'_z - D_z)^2 \quad 7.11$$

$$l^2 = (B'_x - E_x)^2 + (B'_y - E_y)^2 + (B'_z - E_z)^2 \quad 7.12$$

$$m^2 = (C'_x - F_x)^2 + (C'_y - F_y)^2 + (C'_z - F_z)^2 \quad 7.13$$

şeklindedir. [9]

Buna benzer olarak üçgen platformun kenar uzunlukları denklemleri de ;

$$P^2 = (A'_x - B'_x)^2 + (A'_y - B'_y)^2 + (A'_z - B'_z)^2 \quad 7.14$$

$$P^2 = (A'_x - C'_x)^2 + (A'_y - C'_y)^2 + (A'_z - C'_z)^2 \quad 7.15$$

$$P^2 = (B'_x - C'_x)^2 + (B'_y - C'_y)^2 + (B'_z - C'_z)^2 \quad 7.16$$

olacaktır.

Eşkenar üçgende merkez-köşe arası uzaklıklar birbirine eşit olduğundan iki nokta arası uzaklık denklemi burada da uygulanabilir. Böylece uzunluk denklemlerinin doğruluğunu gösterebilmek için fazladan üç denklem daha yazmış oluruz. Bu denklemleri kontrol denklemleri olarak kullanmamız mümkündür. Buna göre üst platformun merkezi ile köşeleri arasındaki bağıntılar aşağıdaki gibi elde edilebilir:

$$r^2 = (M_x - A'_x)^2 + (M_y - A'_y)^2 + (M_z - A'_z)^2 \quad 7.17$$

$$r^2 = (M_x - B'_x)^2 + (M_y - B'_y)^2 + (M_z - B'_z)^2 \quad 7.18$$

$$r^2 = (M_x - C'_x)^2 + (M_y - C'_y)^2 + (M_z - C'_z)^2 \quad 7.19$$

Hareketli üst platformun merkezinin koordinatları eşkenar üçgen özeliğinden dolayı ;

$$\begin{aligned} M_x &= \frac{A'_x + B'_x + C'_x}{3} \\ M_y &= \frac{A'_y + B'_y + C'_y}{3} \\ M_z &= \frac{A'_z + B'_z + C'_z}{3} \end{aligned} \quad 7.20$$

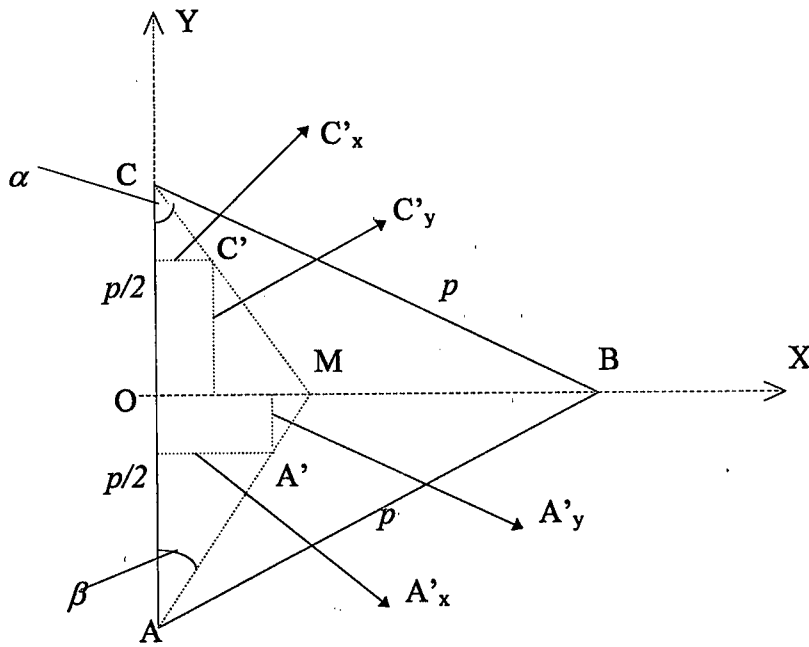
şeklindedir.(Ref. [9] Journal of Rob. Syst. Leila Notash)

Burada merkez-köşe arası uzunluğu gösteren  $r$  ile kenar uzunluğu  $p$  arasında ;

$$r = p \cdot \frac{\sqrt{3}}{3}$$

bağıntısı vardır. ( Eşkenar üçgen özelliğinden )

Daha önce  $A'$  ve  $C'$  noktaları arasında lineer bir bağıntı olduğu belirtilmişti. Buna göre bağıntılar aşağıda verilen şekil 7.4 yardımı ile şu şekilde çıkartılabilir ;



Pistonlar D, E, F noktalarına ekstenel mafsallarla bağlanmış olduğundan, üniversal mafsallarla bağlanmış olan A, B, C noktaları sadece M noktasına doğru hareket etmektedirler. Buna göre yukarıdaki şekle dikkatlice bakılacak olursa ; ( burada işaret karışıklığına neden olmaması için A'y (-) işaret almalıdır.)

$$\tan \beta = \frac{A'_x}{\frac{p}{2} - (-A'_y)}$$

bağıntıları yazılabilir. Buradan hareketle  $C'_x$  ve  $A'_x$  çekilirse ;

$$A'_x = \left\{ \frac{p}{2} - (-A'_y) \right\} \cdot \tan \beta$$

elde edilir.

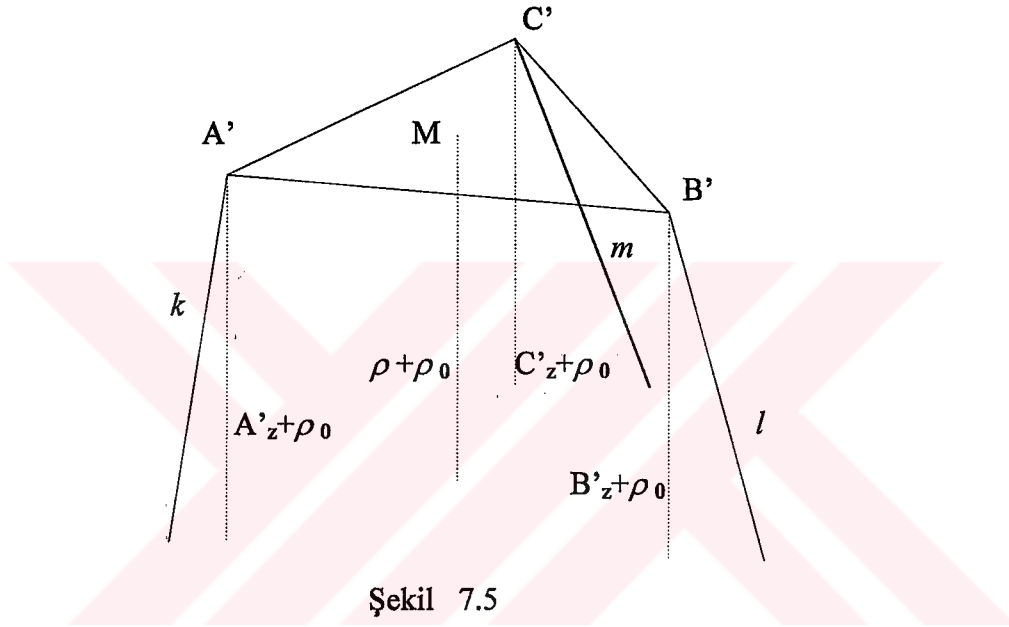
$\beta$  açılarının değerleri radyan cinsinden yerlerine konur ve ifadeler açık bir şekilde yazılır ise ;

$$C'_y = \frac{p}{2} - C'_x / \tan \frac{\pi}{6} \Rightarrow \underline{C'_y = \frac{p}{2} - C'_x \cdot \tan \frac{\pi}{3}} \quad 7.21$$

$$A'_y = -\frac{p}{2} + A'_x / \tan \frac{\pi}{6} \Rightarrow \underline{A'_y = -\frac{p}{2} + A'_x \cdot \tan \frac{\pi}{3}} \quad 7.22$$

bağıntıları elde edilir.

Üst platformun dönme hareketinin tanımlanması :



Şekil 7.5

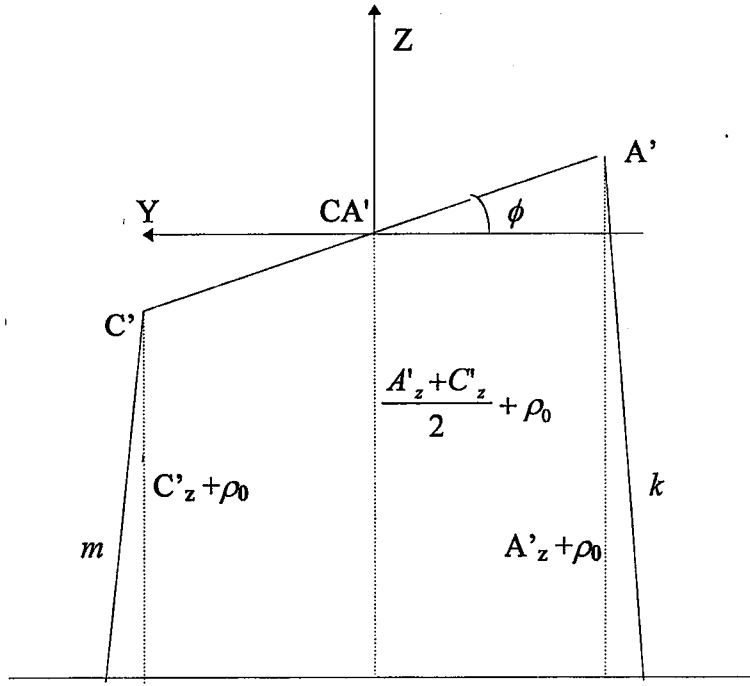
$\rho$  , oryantasyona uğramış üst platformun merkezinin Z eksenine boyunca ötelenmesi olmak üzere üst platformun merkezinin tabandan yüksekliği  $(\rho + \rho_0)$  'dır. Bu uzunluk da platform köşelerinin yüksekliklerinin aritmetik ortalaması olarak tanımlanabilir. ( Şekil 7.5 ) [9] Buna göre ;

$$\underline{\frac{1}{3} \cdot [(A'_z + \rho_0) + (B'_z + \rho_0) + (C'_z + \rho_0)] = (\rho + \rho_0)}$$

şeklinde olup gerekli düzenlemeler yapılırsa ;

$$\underline{\frac{1}{3} \cdot (A'_z + B'_z + C'_z) = \rho} \quad 7.23$$

elde edilir. (Eşkenar üçgen özelliğinden de bu sonuç çıkarılabilir.)



Şekil 7.6

Yukarıdaki şekilde görüldüğü gibi mekanizmaya arka profilden Y-Z düzlemine doğru bakıldığında A' ve C' noktalarının tabandan yükseklikleri ile  $\phi$  açısı arasında  $|A'C'| = p$  olmak üzere ;

$$(C'_z + \rho_0) - (A'_z + \rho_0) = p \cdot \sin \phi$$

şeklinde bir bağıntı kurmak mümkündür. Bu bağıntıyı düzenlersek ;

$$C'_z - A'_z = p \cdot \sin \phi \quad 7.24$$

denklemini elde edilir. ( Şekil 7.6 )

Şekil 7.7 incelendiğinde ise ( mekanizmanın Z-X profili ) yine şekil 7.6 ' ya benzer olarak B' ve AC' noktalarının tabandan yükseklikleri ile  $\theta$  açısı arasında,

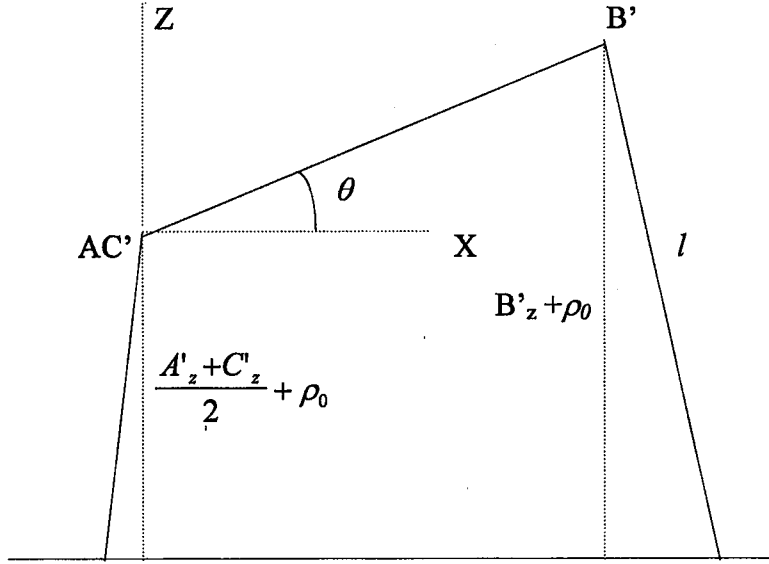
$|AC'B'| = p \frac{\sqrt{3}}{2}$  olmak üzere ;

$$\left( \frac{A'_z + C'_z}{2} + \rho_0 \right) - (B'_z + \rho_0) = p \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \sin \theta$$

bağıntısı yazılabilir. Yine bu denklemi de düzenlersek ;

$$\frac{A'_z + C'_z}{2} - B'_z = p \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \sin \theta \quad 7.25$$

denklemini elde edilir.



Şekil 7.7

Yukarıda verilen üç denklemi uygun şekilde düzenleyerek  $A'_z$ ,  $B'_z$  ve  $C'_z$  değerlerini  $\rho$ ,  $\phi$  ve  $\theta$  'ya bağlı olarak yazmak mümkündür. Buna göre ;

7.24 denkleminde  $A'_z$  'i sağ tarafa çekersek ;

$$C'_z = A'_z + p \cdot \sin \phi \quad 7.26$$

7.25 denklemini 2 ile genişletirsek ;

$$A'_z + C'_z - 2 \cdot B'_z = p \cdot \sqrt{3} \cdot \sin \theta \quad 7.27$$

7.23 denklemini de 3 ile genişlettiğimizde

$$A'_z + B'_z + C'_z = 3\rho \quad 7.28$$

elde edilir.

7.28 ve 7.27 denklemlerinde 7.26 yerlerine konur ise;

$$A'_z + B'_z + (A'_z + p \cdot \sin \phi) = 3\rho \quad 7.29$$

$$A'_z + (A'_z + p \cdot \sin \phi) - 2 \cdot B'_z = p \cdot \sqrt{3} \cdot \sin \theta \quad 7.30$$

bulunur.

7.29 denkleminde 7.30 denklemi çıkarılır ise;

$$3 \cdot B'_z = 3\rho - p \cdot \sqrt{3} \cdot \sin \theta$$

buradan,

$$\underline{B'_z = \rho - p \cdot \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \sin \theta} \quad 7.31$$

elde edilir.

Bulunan  $B'_z$  'in eğiti 7.29 denkleminde yerine yazılır ise;

$$A'_z + (\rho - p \cdot \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \sin \theta) + A'_z + p \cdot \sin \phi = 3\rho$$

son bulunan bu denklem tekrar düzenlenir ise;

$$2 \cdot A'_z = 2 \cdot \rho + p \cdot \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \sin \theta - p \cdot \sin \phi$$

buradan;

$$A'_z = \rho + p \cdot \frac{\sqrt{3}}{6} \cdot \sin \theta - \frac{p}{2} \cdot \sin \phi \quad 7.32$$

elde edilir.

Yine bulunan  $A'_z$  'in eğiti 7.26 denkleminde yerine yazılır ise;

$$C'_z = A'_z + p \cdot \sin \phi$$

$$C'_z = (\rho + p \cdot \frac{\sqrt{3}}{6} \cdot \sin \theta - \frac{p}{2} \cdot \sin \phi) + p \cdot \sin \phi$$

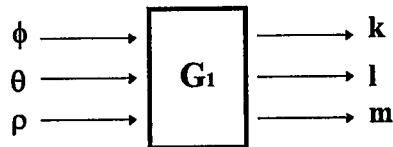
tekrar düzenlenir ise;

$$C'_z = \rho + p \cdot \frac{\sqrt{3}}{6} \cdot \sin \theta + \frac{p}{2} \cdot \sin \phi \quad 7.33$$

elde edilir.

#### 7.4.4. TERS KİNEMATİK DENKLEMLERİN ELDE EDİLMESİ

Bölüm 2 ' de de belirtildiği gibi ters kinematik probleminde üst platformun konumu verilerek bacakların uzunlukları hesaplanıyordu. Üç serbestlik dereceli bir manipulatörde üst platform her hareketi yapamadığı için yani sınırlı harekete sahip olduğu için ters kinematik  z m  analitik olarak bazı aralıklarda kesin  z m  sağlayamamaktadır. Bu çalışmada ters kinematik olarak üst platformun konumu  $\rho$ ,  $\phi$  ve  $\theta$  büyüklükleri şeklinde verilerek  $k$ ,  $l$  ve  $m$  bacak uzunlukları hesaplanmıştır. Buna göre  $k$ ,  $l$ ,  $m$  bacak uzunluklarının bulunması ;



şeklinde olacaktır.

Uzay analitik geometrisinden elde edilen 7.11, 7.12, 7.13 ile belirtilen bacak uzunlukları denklemlerinde daha önce ;

$$A'_z = \rho + p \cdot \frac{\sqrt{3}}{6} \cdot \sin \theta - \frac{p}{2} \cdot \sin \phi$$

$$B'_z = \rho - p \cdot \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \sin \theta$$

$$C'_z = \rho + p \cdot \frac{\sqrt{3}}{6} \cdot \sin \theta + \frac{p}{2} \cdot \sin \phi$$

şeklinde bulunan ifadeler ve  $D_z=E_z=F_z=-\rho_0$  değerleri yerlerine yazılır ise bacak uzunlukları denklemleri ;

$$k^2 = (A'_x - 0)^2 + \left(-\frac{p}{2} + A'_x \cdot \tan \frac{\pi}{3} - \left[-\frac{p}{2}\right]\right)^2 + \left(\rho + \frac{\sqrt{3}}{6} \cdot p \cdot \sin \theta - \frac{p}{2} \cdot \sin \phi + \rho_0\right)^2 \quad 7.34$$

$$l^2 = (B'_x - p \cdot \frac{\sqrt{3}}{2})^2 + (0 - 0)^2 + \left(\rho - \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot p \cdot \sin \theta + \rho_0\right)^2 \quad 7.35$$

$$m^2 = (C'_x - 0)^2 + \left(\frac{p}{2} - C'_x \cdot \tan \frac{\pi}{3} - \frac{p}{2}\right)^2 + \left(\rho + \frac{\sqrt{3}}{6} \cdot p \cdot \sin \theta + \frac{p}{2} \cdot \sin \phi + \rho_0\right)^2 \quad 7.36$$

şeklini alır.

Görüldüğü gibi  $k, l, m$  değerlerini elde edebilmek için sadece  $A'_x, B'_x$  ve  $C'_x$  'in değerlerini bulmamız yeterli olacaktır.

Bu üç değeri bulmak için ilk önce 7.14, 7.15, 7.16 ile verilen kenar uzunlukları denklemlerinde 7.31, 7.32, 7.33 ve 7.21 , 7.22 denklemlerinin eşitini yerlerine yazmamız gerekir. Buna göre  $B'_y=0$  olduğu tekrar belirtilirse yeni kenar uzunlukları denklemleri;

$$p^2 = (A'_x - B'_x)^2 + \left(-\frac{p}{2} + A'_x \cdot \tan \frac{\pi}{3} - 0\right)^2 + \left(\rho + \frac{\sqrt{3}}{6} \cdot p \cdot \sin \theta - \frac{p}{2} \cdot \sin \phi - \left[\rho - \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot p \cdot \sin \theta\right]\right)^2 \quad 7.37$$

$$p^2 = (A'_x - C'_x)^2 + \left(-\frac{p}{2} + A'_x \cdot \tan \frac{\pi}{3} - \left[\frac{p}{2} - C'_x \cdot \tan \frac{\pi}{3}\right]\right)^2 + (-p \cdot \sin \phi)^2 \quad 7.38$$

$$p^2 = (B'_x - C'_x)^2 + \left(0 - \left[\frac{p}{2} - C'_x \cdot \tan \frac{\pi}{3}\right]\right)^2 + \left(\left[\rho - \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot p \cdot \sin \theta\right] - \left[\rho + \frac{\sqrt{3}}{6} \cdot p \cdot \sin \theta + \frac{p}{2} \cdot \sin \phi\right]\right)^2 \quad 7.39$$

şeklinde elde edilir.

Görüldüğü gibi  $A'_x, B'_x$  ve  $C'_x$  bilinmeyenlerine karşılık üç adet ikinci dereceden denklem elde edilmiştir. Bu da üç bilinmeyenli üç denklemdir ki nümerik çözümü de bilgisayar programı ile basitçe bulunabilir.

Buna ilave olarak sağlama amacı ile köşe-merkez arası uzaklık denklemlerinde  $A'_x, B'_x$  ve  $C'_x$  değerlerini benzer şekilde yerlerine koyarak yukarıda bulunan değerlerin doğruluğu kontrol edilmiş olur. Buna göre ;

Köşe-merkez arası uzaklık denklemleri ;

$$r^2 = \left( \frac{A'_x + B'_x + C'_x}{3} - A'_x \right)^2 + \left( \frac{A'_y + B'_y + C'_y}{3} - A'_y \right)^2 + (\rho - A'_z)^2 \quad 7.40$$

$$r^2 = \left( \frac{A'_x + B'_x + C'_x}{3} - B'_x \right)^2 + \left( \frac{A'_y + B'_y + C'_y}{3} - B'_y \right)^2 + (\rho - B'_z)^2 \quad 7.41$$

$$r^2 = \left( \frac{A'_x + B'_x + C'_x}{3} - C'_x \right)^2 + \left( \frac{A'_y + B'_y + C'_y}{3} - C'_y \right)^2 + (\rho - C'_z)^2 \quad 7.42$$

şeklindedir.

7.34, 7.35, 7.36 ile verilen bacak uzunlukları denklemleri yeniden düzenlenirse;

$$k^2 = (1 + \tan^2 \frac{\pi}{3}).(A'_x)^2 + \left( \rho + \frac{\sqrt{3}}{6}.p.\sin \theta - \frac{p}{2}.\sin \phi + \rho_0 \right)^2 \quad 7.43$$

$$l^2 = (B'_x - p.\frac{\sqrt{3}}{2})^2 + \left( \rho - \frac{\sqrt{3}}{3}.p.\sin \theta + \rho_0 \right)^2 \quad 7.44$$

$$m^2 = (1 + \tan^2 \frac{\pi}{3}).(C'_x)^2 + \left( \rho + \frac{\sqrt{3}}{6}.p.\sin \theta + \frac{p}{2}.\sin \phi + \rho_0 \right)^2 \quad 7.45$$

elde edilir.

7.37, 7.38, 7.39 ile verilen kenar uzunlukları denklemleri de yeniden düzenlenirse;

$$p^2 = (A'_x - B'_x)^2 + \left( -\frac{p}{2} + A'_x.\tan \frac{\pi}{3} \right)^2 + \left( \frac{\sqrt{3}}{2}.p.\sin \theta - \frac{p}{2}.\sin \phi \right)^2 \quad 7.46$$

$$p^2 = (A'_x - C'_x)^2 + \left( -p + [A'_x + C'_x].\tan \frac{\pi}{3} \right)^2 + (-p.\sin \phi)^2 \quad 7.47$$

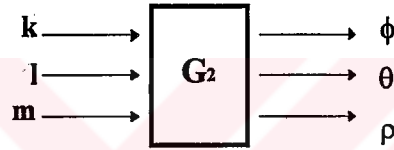
$$p^2 = (B'_x - C'_x)^2 + \left( -\frac{p}{2} + C'_x.\tan \frac{\pi}{3} \right)^2 + \left( \frac{p}{2}.\sin \phi + \frac{\sqrt{3}}{2}.p.\sin \theta \right)^2 \quad 7.48$$

elde edilir.

Son bulunan 7.46, 7.47, 7.48 kenar uzunlukları denklemlerinde  $\rho$ ,  $\phi$  ve  $\theta$  değerleri girilerek bilgisayar programı yardımı ile  $A'_x$ ,  $B'_x$ ,  $C'_x$  değerleri bulunur. Bulunan bu  $A'_x$ ,  $B'_x$ ,  $C'_x$  değerleri de 7.43, 7.44, 7.45 denklemlerinde yerine yazılarak  $k$ ,  $l$  ve  $m$  bacak uzunlukları elde edilmiş olur. Bunun çözümü ilerde daha açık bir şekilde *Ters Kinematik* adlı MATLAB programı ile verilmiştir. Analitik çözüm için MAPLE kullanılmış fakat çözüm bulunamamıştır.

#### 7.4.5. DÜZ KİNEMATİK DENKLEMLERİN ELDE EDİLMESİ

Düz kinematik probleminde mekanizmanın bacak uzunluklarından üst platformun konumu bulunacaktır. Yine bu çalışmada  $k$ ,  $l$  ve  $m$  bacak uzunluklarının değerleri girilerek üst platformun konumunu belirten  $\rho$ ,  $\phi$  ve  $\theta$  değerleri hesaplanacaktır. Buna göre  $k$ ,  $l$ ,  $m$  bacak uzunluklarından  $\rho$ ,  $\phi$  ve  $\theta$  büyüklüklerinin bulunması ;



şeklinde olacaktır.

Düz kinematik çözümde denklemleri elde etmek için giriş değişkenlerini yani bacak uzunlukları belli olan mekanizmanın üst platformunun konumunun bulunması için  $k$ ,  $l$ ,  $m$  ' ye bağlı değişkenlerin bulunması gerekmektedir. Bunun için ilk olarak 7.11, 7.12, 7.13 denklemlerinde  $k$ ,  $l$ ,  $m$  değerleri sağ tarafa alınarak  $A'_z$ ,  $B'_z$ ,  $C'_z$  çekilmelidir. Daha önce  $\rho$ ,  $\phi$ ,  $\theta$  ile  $A'_z$ ,  $B'_z$ ,  $C'_z$  değerleri arasındaki bağıntılar 7.26, 7.27, 7.28 denklemleri ile verilmişti. Bu denklemlerden  $\rho$ ,  $\phi$ ,  $\theta$  değişkenleri  $A'_z$ ,  $B'_z$  ve  $C'_z$  değerlerine bağlı olarak ;

$$\rho = \frac{1}{3} \cdot (A'_z + B'_z + C'_z) \quad 7.49$$

$$\phi = \text{Arc sin} \left[ \frac{1}{p} (C'_z - A'_z) \right] \quad 7.50$$

$$\theta = \text{Arc sin} \left[ \frac{2}{\sqrt{3} \cdot p} \cdot \left( \frac{A'_z + C'_z}{2} - B'_z \right) \right] \quad 7.51$$

şeklinde yazılabilir.

Buna göre yapılması gereken ilk işlem  $A'_z$ ,  $B'_z$ ,  $C'_z$  değerlerinin hesaplanmasıdır. Bu değerleri elde edebilmek için 7.11, 7.12, 7.13 denklemlerinde sırasıyla  $k$ ,  $l$ ,  $m$

ifadelerini denklemlerin sağına alıp  $A'_z, B'_z, C'_z$  ifadelerini bunların fonksiyonları olarak yazacak olursak ;

$$A'_z = \{k^2 - [(A'_x - D_x)^2 + (A'_y - D_y)^2]\}^{1/2} + D_z \quad 7.52$$

$$B'_z = \{l^2 - [(B'_x - E_x)^2 + (B'_y - E_y)^2]\}^{1/2} + E_z \quad 7.53$$

$$C'_z = \{m^2 - [(C'_x - F_x)^2 + (C'_y - F_y)^2]\}^{1/2} + F_z \quad 7.54$$

formu elde edilir. Sabit değerleri (  $D_x=0, E_x=p.\sqrt{3}/2, F_x=0, D_y=-p/2, E_y=0, F_y=p/2, D_z=E_z=F_z=-\rho_0, B'_y=0$  ) ve birbirine bağımlı değerleri (  $A'_y = -\frac{p}{2} + A'_x.\tan\frac{\pi}{3},$

$C'_y = \frac{p}{2} - C'_x.\tan\frac{\pi}{3}$  ) bu denklemlerde yerlerine yazarsak ;

$$A'_z = [k^2 - 4.(A'_x)^2]^{1/2} - \rho_0 \quad 7.55$$

$$B'_z = [l^2 - (B'_x - p.\frac{\sqrt{3}}{2})^2]^{1/2} - \rho_0 \quad 7.56$$

$$C'_z = [m^2 - 4.(C'_x)^2]^{1/2} - \rho_0 \quad 7.57$$

denklemlerini elde edebiliriz. Son olarak bulunan bu  $A'_z, B'_z, C'_z$  ifadelerinin eşiti ve sabit değerler 7.14, 7.15, 7.16 denklemlerinde yerine yazılırsa ;

$$P^2 = (A'_x - B'_x)^2 + (-\frac{p}{2} + A'_x.\tan\frac{\pi}{3})^2 + \{ [k^2 - 4.(A'_x)^2]^{1/2} - [l^2 - (B'_x - p.\frac{\sqrt{3}}{2})^2]^{1/2} \}^2 \quad 7.58$$

$$P^2 = (A'_x - C'_x)^2 + (-p + [A'_x + C'_x].\tan\frac{\pi}{3})^2 + \{ [k^2 - 4.(A'_x)^2]^{1/2} - [m^2 - 4.(C'_x)^2]^{1/2} \}^2 \quad 7.59$$

$$P^2 = (B'_x - C'_x)^2 + (-\frac{p}{2} + C'_x.\tan\frac{\pi}{3})^2 + \{ [l^2 - (B'_x - p.\frac{\sqrt{3}}{2})^2]^{1/2} - [m^2 - 4.(C'_x)^2]^{1/2} \}^2 \quad 7.60$$

denklemleri elde edilir. Burada görüldüğü gibi yine  $A'_x, B'_x, C'_x$  ifadelerinden oluşan ikinci dereceden üç bilinmeyenli üç denklem elde edilmiştir. Aynı şekilde bu denklemlerden bilgisayar programı yardımı ile sayısal çözümü yani  $k, l, m$  şeklinde istenen bacak uzunluklarının değerlerini girerek  $A'_x, B'_x, C'_x$  ifadeleri rahatlıkla bulunabilir. (Programlar kısmında  $A'_x, B'_x, C'_x$  değerlerinin bulunması ve çözümü ile ilgili yazılım *Düz Kinematik* adlı MATLAB programında verilmiştir.)

Programlar yardımı ile bulunan  $A'_x$ ,  $B'_x$ ,  $C'_x$  değerleri 7.55, 7.56, 7.57 denklemlerinde yerine yazılarak  $A'_z$ ,  $B'_z$ ,  $C'_z$  sayısal değerleri bulunur. Daha sonra hesaplanan  $A'_z$ ,  $B'_z$ ,  $C'_z$  değerleri 7.49, 7.50, 7.51 denklemlerinde yerine yazılarak hareketli platformun konumunu belirleyen  $\rho$ ,  $\phi$ ,  $\theta$  ifadelerini yani düz kinematik çözümünü elde etmiş oluruz.



## 8. BÖLÜM

### ÖRNEKLER ve SİMÜLASYONLAR

Bu bölümde daha önceki bölümde açıklandığı gibi amaç verilen  $\rho$  ötelenmesi ve  $\phi$ ,  $\theta$  dönmeleri için gerekli  $k$ ,  $l$ ,  $m$  bacak uzunluklarının bulunmasıdır. Platformda istenen harekete göre  $\rho$ ,  $\phi$ ,  $\theta$  değerleri zamana göre değişik konumlar alacak dolayısıyla  $k$ ,  $l$ ,  $m$  bacak uzunlukları da  $\rho$ ,  $\phi$ ,  $\theta$  değerlerine göre değişecektir. Bu amaçla yapılacak örneklerde 7. BÖLÜM, paragraf 7.4.4 ' de elde edilen çözümler kullanılmış, verilen  $\rho$ ,  $\phi$ ,  $\theta$  değerleri için MATLAB programı yardımıyla nümerik çözümler elde edilmiştir.

7. BÖLÜM' de anlatıldığı gibi ters ve düz kinematik denklemlerin çözümü prensip olarak üç bilinmeyenli üç nonlineer denklem takımının çözümü olmaktadır. Kullanılan nümerik çözüm yöntemi bir başlangıç değer takımı istemekte ve bu başlangıç değeri etrafında iterasyon ile hassas çözüm elde edilmektedir. Başlangıç değeri istenen çözümden uzak seçilirse iterasyon ıraksayabilir veya istenen çözümden başka çözümler elde edilebilir. Bu yüzden başlangıç değerinin önemi büyüktür. Ayrıca 7. BÖLÜM' ün ikinci paragrafında platform merkezi sabit kabul edildiğinde ters ve düz kinematik çözüm analitik olarak elde edilmiştir. Buradan elde edilen analitik çözüm gerçek sistemin ters ve düz kinematığının nümerik olarak çözümünde başlangıç değerleri olarak kullanılmıştır. Bu şekilde kullanılan yöntemle yaptığımız iterasyonlar daima yakınsadığından çözüm kolayca elde edilmiştir.

Ters kinematik denklemler sonucu elde edilen  $k$ ,  $l$ ,  $m$ , bacak uzunlukları Paragraf 7.4.5 ' te elde edilen Düz Kinematik denklemlerine giriş değişkenleri olarak uygulanmış sonuçların doğruluğu görülmüştür.

Aşağıdaki örneklerde çeşitli değerler verilerek simülasyonlar yapılmış ve grafikler elde edilmiştir. Bu grafiklerde yatay eksenler zaman aralıklarını göstermekte olup grafikler üç farklı zaman aralığına bölünerek grafiklerin her biri 1. adım, 2. adım ve 3. adım olarak incelenmiştir. Soldaki grafikler  $\rho$ ,  $\phi$ ,  $\theta$  değerlerinin getirilmesi istenen pozisyonlar, sağdaki grafikler ise bu pozisyonda olması için  $k$ ,  $l$  ve  $m$  bacak uzunluklarının alması gereken konumları göstermektedir.

Bir noktadan diğ er bir noktaya 'sonsuz yolla gidilebilir. Burada hangi yolla gidileceğ i konusu iş lenmemiş ancak bir A noktasından B noktasına gitmek için gerekli ç özümlerin elde edilip edilemeyeceğ i incelenmiştir. Verilen değ iş ik hareketler için nümerik ç özümler elde edilmiştir. Kullanılan MATLAB paketindeki nümerik ç özümler  $10^{-12}$  doğruluk derecesine çıkabilmektedir. Elde edilen ç özümlerde bu doğruluk derecesine ulaşılmıştır. Pistonların orta stroktaki konumu başlangıç pozisyonu ( $\rho = 0, \phi = 0, \theta = 0$ ) olarak alınmıştır.

## 8.1 TEMEL HAREKETLERE AİT ÖRNEKLER

### Örnek 8.1.1 :

İlk olarak başlangıç pozisyonundan yani  $\rho = 0, \phi = 0, \theta = 0$  konumundan başlamak üzere eş zamanlı olarak üç kademeli biçimde  $\rho, \phi, \theta$  değ erlerinin sırasıyla 1. , 2. ve 3. adımdaki gibi istenildiğ i düşünölmüş ve şek il 8.1' de gösterilmiştir. O halde ;

1. adım : önce başlangıç konumundan  $\rho = 10, \phi = 0, \theta = 0$  pozisyonuna gelebilmesi için  $k, l$  ve  $m$  değ erleri doğ rusal olarak 10 cm artırılmalıdır. Bu ,  $\rho$  ' nun 10 cm ötelenebilmesi için  $k, l$  ve  $m$  bacak uzunluklarının da 10 cm uzaması gerektiğ ini göstermektedir.

2. adım  $\rho = 10, \phi = 10, \theta = 0$  pozisyonuna gelebilmesi için  $k$  uzunluğ u 71 cm' den 66 cm ' ye doğ ru azalmalı,  $l$  uzunluğ u yaklaşık sabit ve  $m$  bacak uzunluğ unun da 71 cm ' den 77 cm ' ye doğ ru gelmesi gerekmektedir.

3. adım  $\rho = 10, \phi = 10, \theta = -10$  pozisyonuna gelebilmesi için  $k$  uzunluğ u 66 cm' den 62 cm ' ye ,  $l$  uzunluğ u 71 cm ' den 77 cm ' ye ve  $m$  bacak uzunluğ unun da 76 cm ' den 73 cm ' ye getirilmesi gerektiğ i sonucu çıkarılmış tır.

### Örnek 8.1.2:

Yine başlangıç pozisyonundan yani  $\rho = 0, \phi = 0, \theta = 0$  konumundan başlamak üzere eş zamanlı olarak üç kademeli biçimde  $\rho, \phi, \theta$  değ erlerinin sırasıyla aşağıda verilen 1. , 2. ve 3. adımdaki gibi istenildiğ i düşünölmüş ve şek il 8.2 ' de gösterilmiştir. Buna göre ;

1. adım : Başlangıç konumundan  $\rho = 0, \phi = 10, \theta = 0$  pozisyonuna gelebilmesi için ilk önce  $k$  61 cm 'den 56 cm ' ye ,  $l$  yaklaşık olarak 61 cm ' de sabit ve  $m$  değ eri de doğ rusal olarak artarak 61 den yaklaşık 66 cm uzunluğ a getirilmesi gerekmektedir.

2. adım  $\rho=10$ ,  $\phi=10$ ,  $\theta=0$  pozisyonuna gelebilmesi için  $k$  uzunluğun 56 cm' den 66 cm ' ye doğru artmalı,  $l$  uzunluğunun 61 cm ' den 71 cm ' ye ,  $m$  bacak uzunluğunun da 77 cm ' den 74 cm ' ye doğru gelmesi gerekmektedir.

3. adım  $\rho=10$ ,  $\phi=10$ ,  $\theta=-10$  pozisyonuna gelebilmesi için  $k$  uzunluğu 66 cm' den 63 cm ' ye ,  $l$  uzunluğu 71 cm ' den 77 cm ' ye ve  $m$  bacak uzunluğunun da 76 cm ' den 74 cm ' ye getirilmesi gerektiği görülmektedir.

### Örnek 8.1.3 :

Başka bir örnek olarak başlangıç pozisyonundan yani  $\rho=0$ ,  $\phi=0$ ,  $\theta=0$  konumundan başlamak üzere eş zamanlı olarak üç kademeli biçimde  $\rho$ ,  $\phi$ ,  $\theta$  değerlerinin sırasıyla aşağıda verilen 1., 2. ve 3. adımdaki gibi istenildiği düşünülmüş ve şekil 8.3 ' de gösterilmiştir. O halde ;

1. adım : Yine başlangıç konumundan  $\rho=0$ ,  $\phi=0$ ,  $\theta=10$  pozisyonuna gelebilmesi için ilk önce  $k$  61 cm 'den 64 cm ' ye ,  $l$  yaklaşık olarak 61 cm ' den 55 cm ' ye ve  $m$  değeri de doğrusal olarak artarak 61 den yaklaşık 63 cm uzunluğa getirilmesi gerekmektedir.

2. adım  $\rho=0$ ,  $\phi=10$ ,  $\theta=10$  pozisyonuna gelebilmesi için  $k$  uzunluğunun 64 cm' den 58 cm ' ye doğru lineer bir şekilde azalması ,  $l$  uzunluğu yaklaşık sabit ,  $m$  bacak uzunluğunun da 64 cm ' den 68 cm ' ye doğru uzatılması gerekmektedir.

3. adım  $\rho=10$ ,  $\phi=10$ ,  $\theta=10$  pozisyonuna gelebilmesi için  $k$  uzunluğu 58 cm' den 68 cm ' ye ,  $l$  uzunluğu 55 cm ' den 65 cm ' ye ve  $m$  bacak uzunluğu da 68 cm ' den 77 cm ' ye getirilmelidir.

### Örnek 8.1.4 :

Değişik bir örnek olarak başlangıç pozisyonundan itibaren  $\rho=10$ ,  $\phi=10$ ,  $\theta=10$  konumuna eş zamanlı olarak üç kademeli biçimde lineer bir şekilde artarak gelmesi istenecek olursa yani 1., 2. ve 3. adımlarda  $\rho$ ,  $\phi$ ,  $\theta$  değerlerinin lineer bir şekilde istenildiği düşünülmüş ve şekil 8.4 ' de gösterilmiştir. Buna göre ;

1., 2. ve 3. adım birleşmiş bir şekilde olacak ve  $k$  61 cm 'den 68 cm ' ye,  $l$  61 cm ' den 55 cm ' ye ve  $m$  değeri de 61 cm ' den yaklaşık 79 cm uzunluğa lineer bir şekilde getirilmesi gerektiği görülecektir.

Burada pistonlarımızın en fazla 77 cm ' ye uzatılabildiği göz önüne alınırsa bu şekilde bir artışın mümkün olmadığı anlaşılmaktadır. Ancak  $\rho$  ötelenmesinin zaten -16 cm ve +16 cm aralığında olduğu hatırlatılırsa bu sonucun anormal olmadığı görülebilir.

## 8.2 KARMAŞIK HAREKETLER İLE İLGİLİ ÖRNEKLER

Daha önceki örneklerde değişkenlerin doğrusal verildiği görülmektedir. Gerçekte her zaman lineer bir etkinin olması söz konusu değildir. Genellikle sistemler değişken etkilere maruz kalmaktadırlar. Bu nedenle değişken fonksiyonlar kullanarak sistemimizin gerçekte ne gibi davrandığını görmemiz açısından aşağıdaki örneklerin verilmesi yerinde olacaktır. Burada büyük adımlar olarak değil de 0 ve 1 saniye zaman aralığında  $\rho$  ,  $\phi$  ,  $\theta$  değerlerinin verilen fonksiyonlara uyacak şekilde küçük adımlarla değişmesi istendiği varsayılmıştır. Buna göre 0 ve 1 saniye zaman aralığında  $k$ ,  $l$  ve  $m$  bacak uzunluklarının alması gereken büyüklükler hesaplanmış ve grafikler çizilmiştir.

### Örnek 8.2.1 :

Değişken fonksiyonlar için bir örnek olarak başlangıç pozisyonundan itibaren 0 ve 1 saniye zaman aralığında  $\rho=0$ ,  $\phi=0$  ve  $\theta=10.[ ( 1- e^{-2.t} . (\cos t + \sin t) ) ]$  şeklinde değişen bir fonksiyon olarak istenmiş olsun. Buna göre  $k$  61 cm ' den 58 cm 'ye,  $l$  61 cm ' den 63 cm 'ye ve  $m$  ise 61 cm ' den 58 cm 'ye Şekil 8.5 ' te gösterildiği gibi sinüzoidal olarak sönümlenen değişken bir fonksiyon şeklinde getirilmelidir.

### Örnek 8.2.2 :

Değişken fonksiyonlar için başka bir örnek verecek olursak, başlangıç pozisyonundan itibaren 0 ve 1 saniye zaman aralığında  $\rho$  ,  $\phi$  ,  $\theta$  değerlerinin sırasıyla ;

$$\rho = 0 ,$$

$$\phi = -10.[ ( 1- e^{-2.t} . (\cos t + \sin t) ) ] ,$$

$$\theta = 10.[ ( 1- e^{-2.t} . (\cos t + \sin t) ) ] ,$$

şeklinde verilen fonksiyonlara göre değişmesi istensin. Buna göre  $k$  61 cm ' den 69 cm 'ye,  $l$  61 cm ' den 55 cm 'ye ve  $m$  ise 61 cm ' den 59 cm 'ye Şekil 8.6 ' da gösterildiği gibi sinüzoidal olarak sönümlenen değişken bir fonksiyon şeklinde getirilmelidir.

### Örnek 8.2.3 :

Değişken fonksiyonlar için başka bir örnek verecek olursak, başlangıç pozisyonundan itibaren 0 ve 1 saniye zaman aralığında  $\rho$  ,  $\phi$  ,  $\theta$  değerlerinin sırasıyla ;

$$\rho = 5.[ (1 - e^{-2.t} . (\cos t + \sin t) ) ],$$

$$\phi = -5.[ (1 - e^{-2.t} . (\cos t + \sin t) ) ],$$

$$\theta = 5.[ (1 - e^{-2.t} . (\cos t + \sin t) ) ],$$

şeklinde verilen fonksiyonlara göre değişmesi istensin. Buna göre  $k$  61 cm ' den 70 cm 'ye,  $l$  61 cm ' den 63 cm 'ye ve  $m$  ise 61 cm ' den 65 cm 'ye Şekil 8.7 ' de gösterildiği gibi sinüzoidal olarak sönümlenen değişken bir fonksiyon şeklinde getirilmelidir.

### Örnek 8.2.4 :

Değişken fonksiyonlar son bir örnek verecek olursak, başlangıç pozisyonundan itibaren 0 ve 1 saniye zaman aralığında  $\rho$  ,  $\phi$  ,  $\theta$  değerlerinin sırasıyla ;

$$\rho = -10.[ (1 - e^{-2.t} . (\cos t + \sin t) ) ],$$

$$\phi = -10.[ (1 - e^{-2.t} . (\cos t + \sin t) ) ],$$

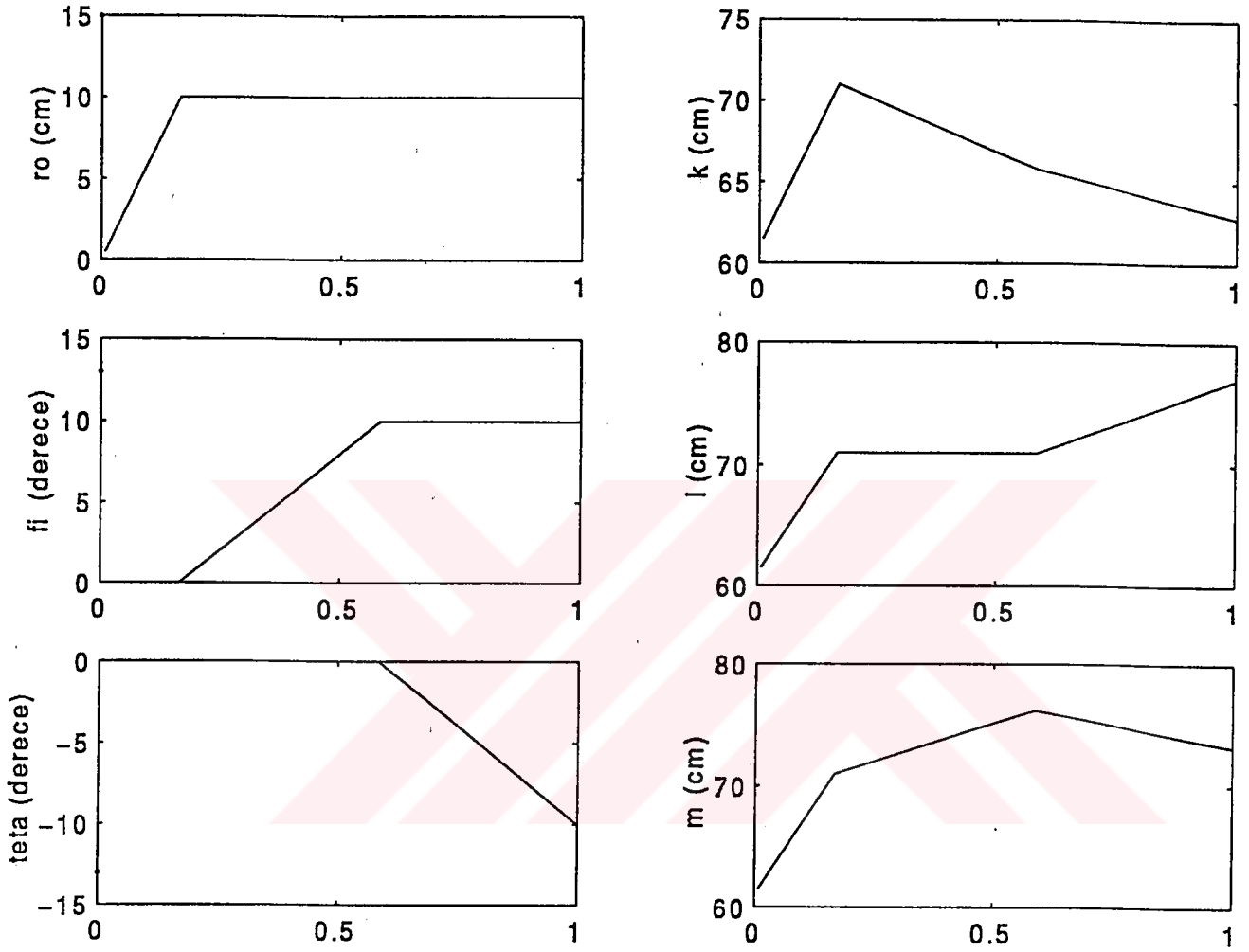
$$\theta = 20.[ (1 - e^{-2.t} . (\cos t + \sin t) ) ],$$

şeklinde verilen fonksiyonlara göre değişmesi istensin. Buna göre  $k$  61 cm ' den 62 cm 'ye,  $l$  61 cm ' den 40 cm 'ye ve  $m$  ise 61 cm ' den 51 cm 'ye Şekil 8.8 ' de

gösterildiği gibi sinüzoidal olarak sönümlenen değişken bir fonksiyon şeklinde getirilmelidir.

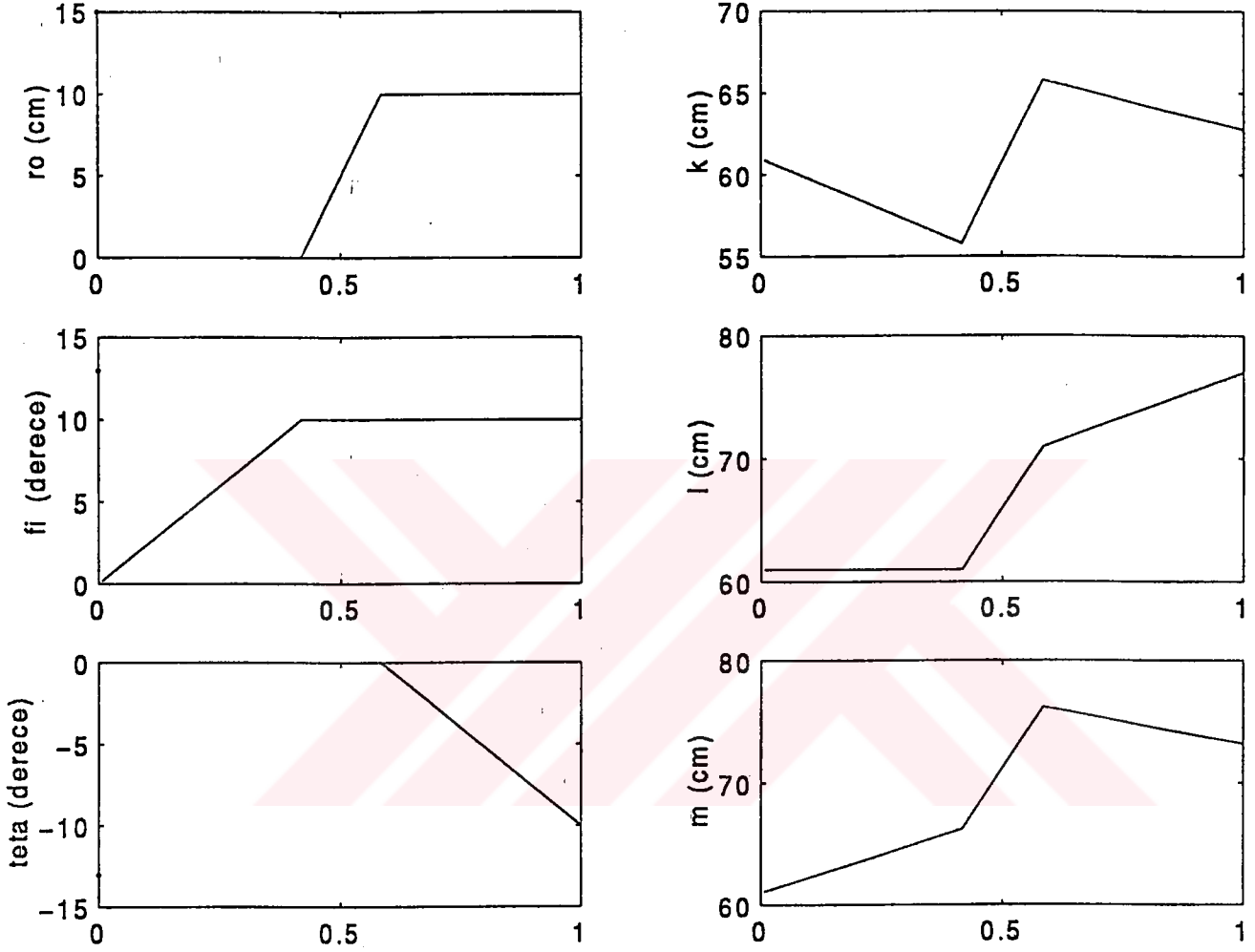
Bu yapılan nümerik sonuçlardan başka  $\rho$ ,  $\phi$ ,  $\theta$  değerleri verildiğinde  $k$ ,  $l$ ,  $m$ , bacak uzunluklarının analitik olarak hesaplanması istenmiş, yardımcı olarak sembolik işlem yapabilen MAPLE programı kullanılmış ancak analitik sonuç elde edilememiştir. Bu nedenle 7. BÖLÜMDE elde edilen denklemler MATLAB programı yardımıyla başlangıç değerleri verilerek iterasyonla gerçek çözümler bulunmuştur. Başlangıç değerleri gerçekten uzak verildiğinde iterasyon ıraksamakta ve çözüm bulunamamaktadır.





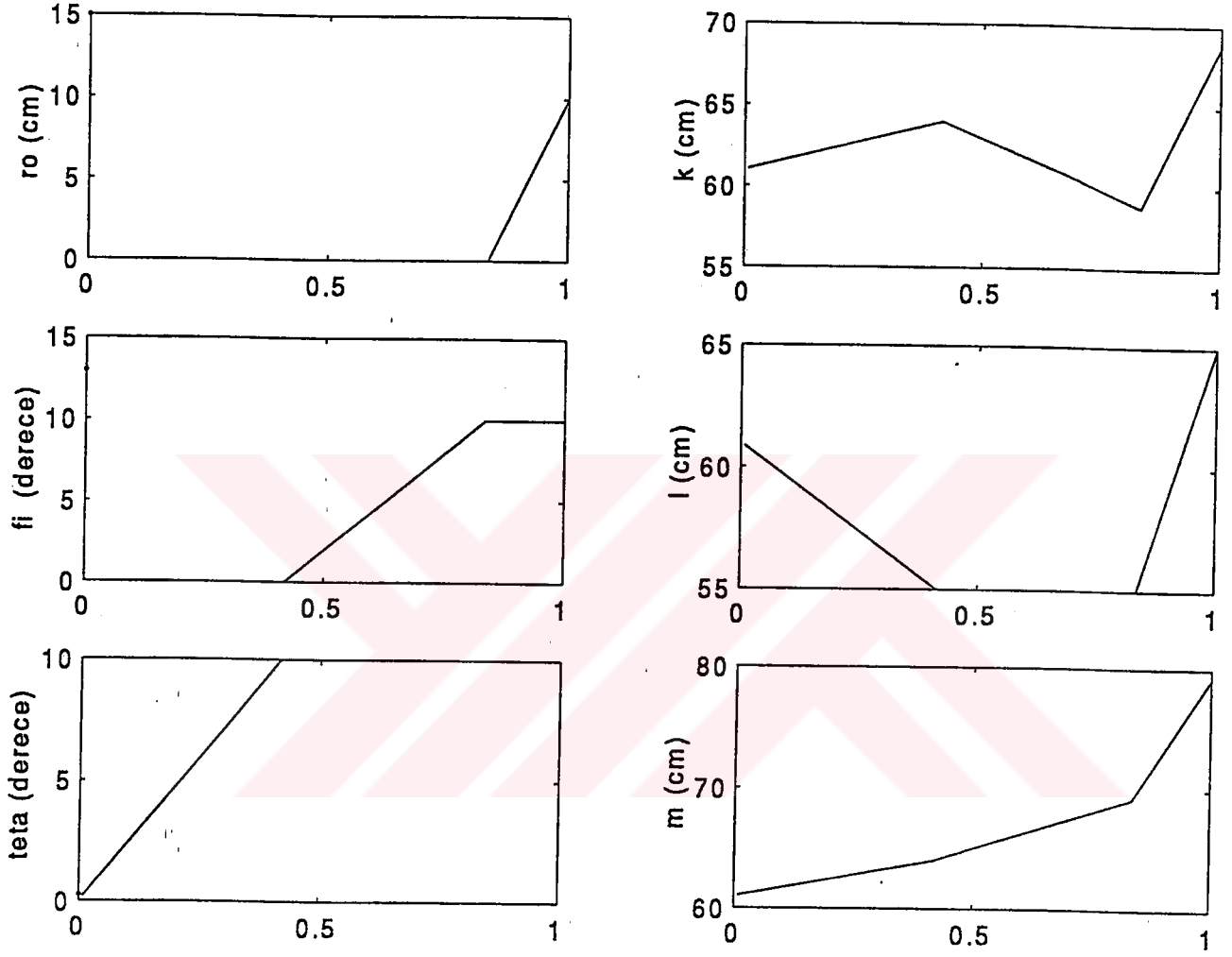
Şekil 8.1 Başlangıç pozisyonundan itibaren önce  $\rho = 10$  , sonra  $\phi = 10$  daha sonra  $\theta = -10$  değerlerine ulaşabilmesi için gereken  $k$  ,  $l$  ,  $m$  bacak uzunluklarının değişimi.

Not : Yatay eksen  $t = \text{saniye}$  olmak üzere zamanı göstermektedir.



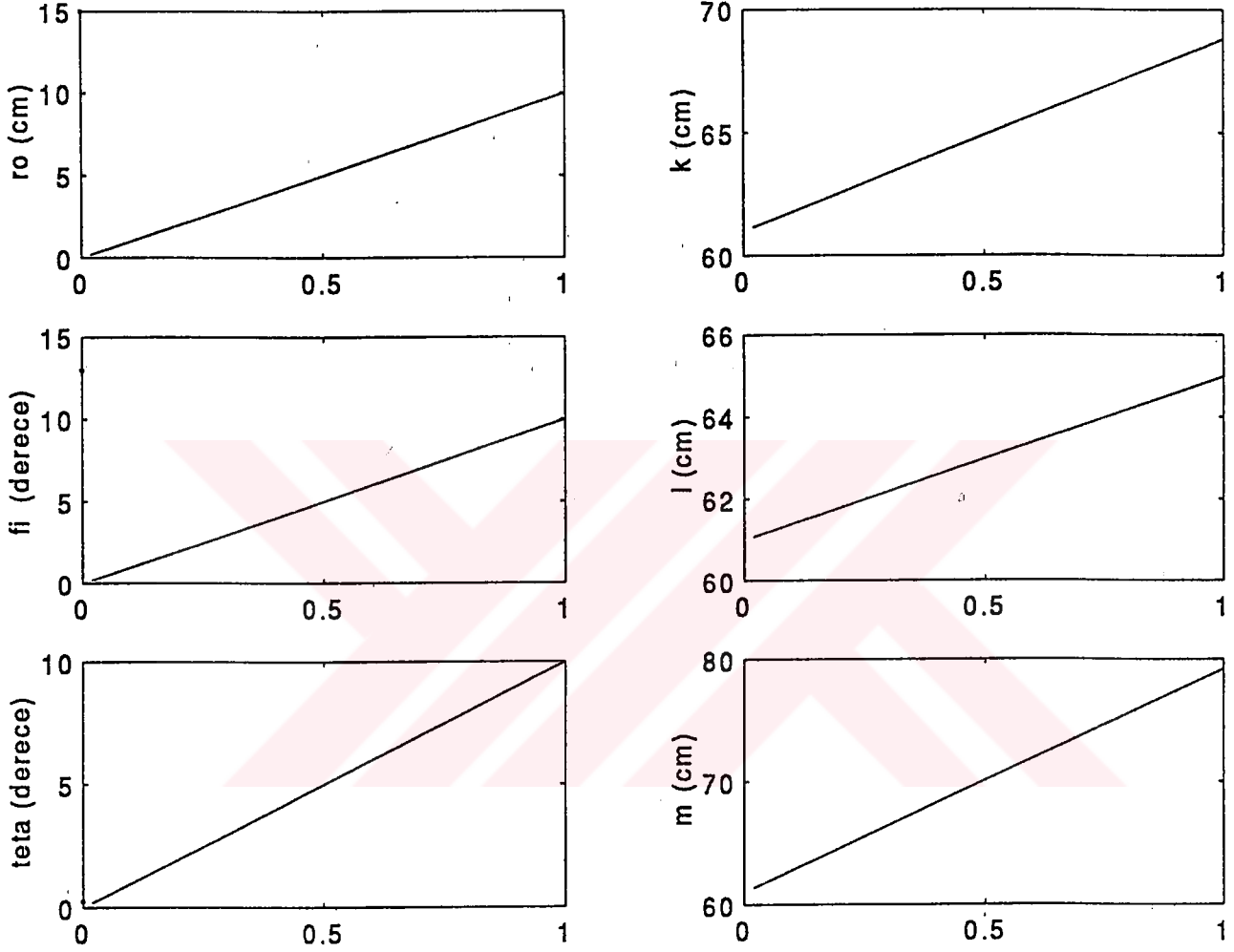
Şekil 8.2 Başlangıç pozisyonundan itibaren önce  $\phi = 10$  , sonra  $\rho = 10$  daha sonra  $\theta = -10$  değerlerine ulaşabilmesi için gereken  $k, l, m$  bacak uzunluklarının değişimi.

Not : Yatay eksen  $t = \text{saniye}$  olmak üzere zamanı göstermektedir.



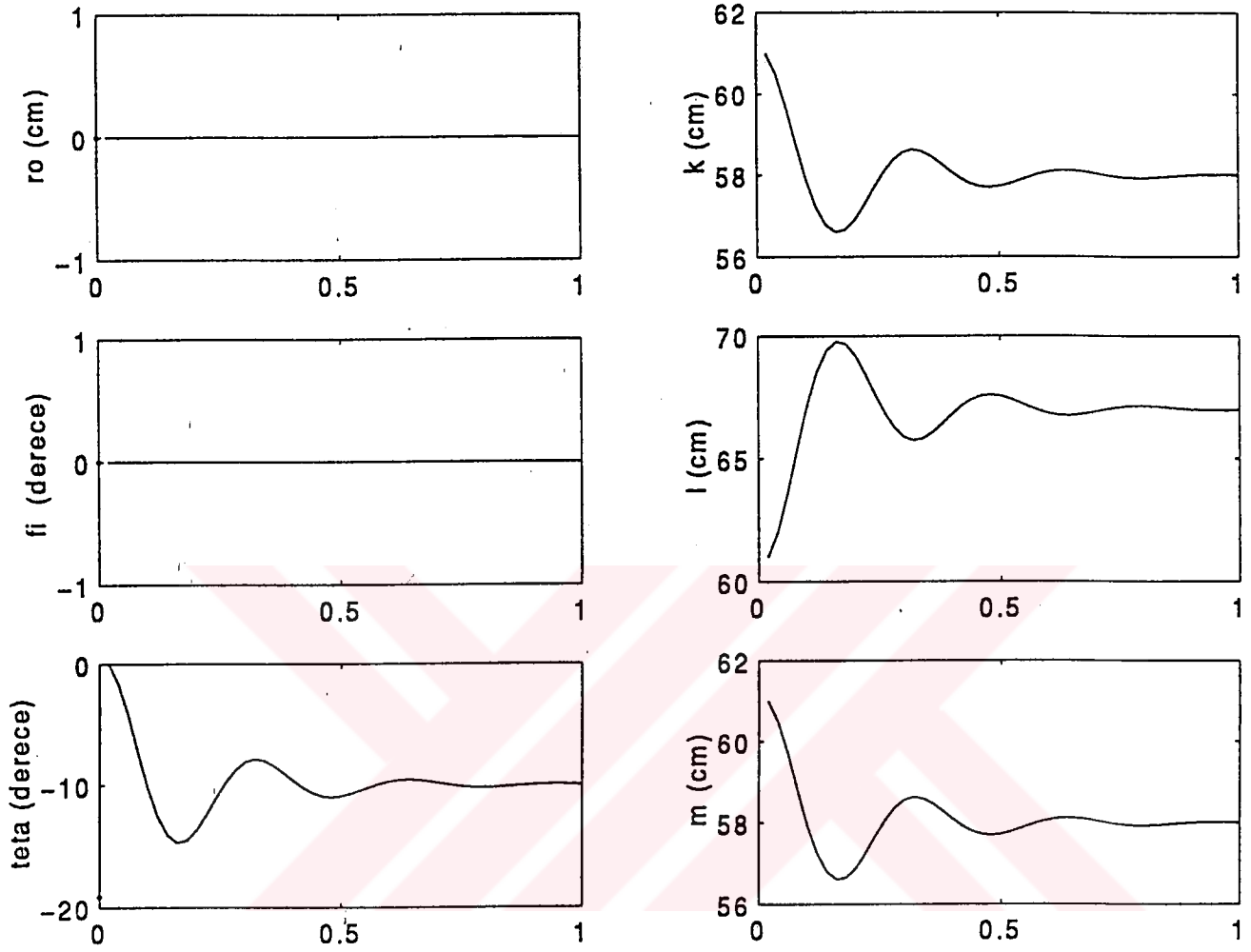
Şekil 8.3 Başlangıç pozisyonundan itibaren önce  $\theta = 10$  , sonra  $\phi = 10$  , daha sonra  $\rho = 10$  değerlerine ulaşabilmesi için gereken  $k$  ,  $l$  ,  $m$  bacak uzunluklarının değişimi.

Not : Yatay eksen  $t = \text{saniye}$  olmak üzere zamanı göstermektedir.



Şekil 8.4 Başlangıç pozisyonundan itibaren  $\rho, \phi, \theta$  değerlerinin eşzamanlı olarak artması durumunda gereken  $k, l, m$  bacak uzunluklarının değişimi.

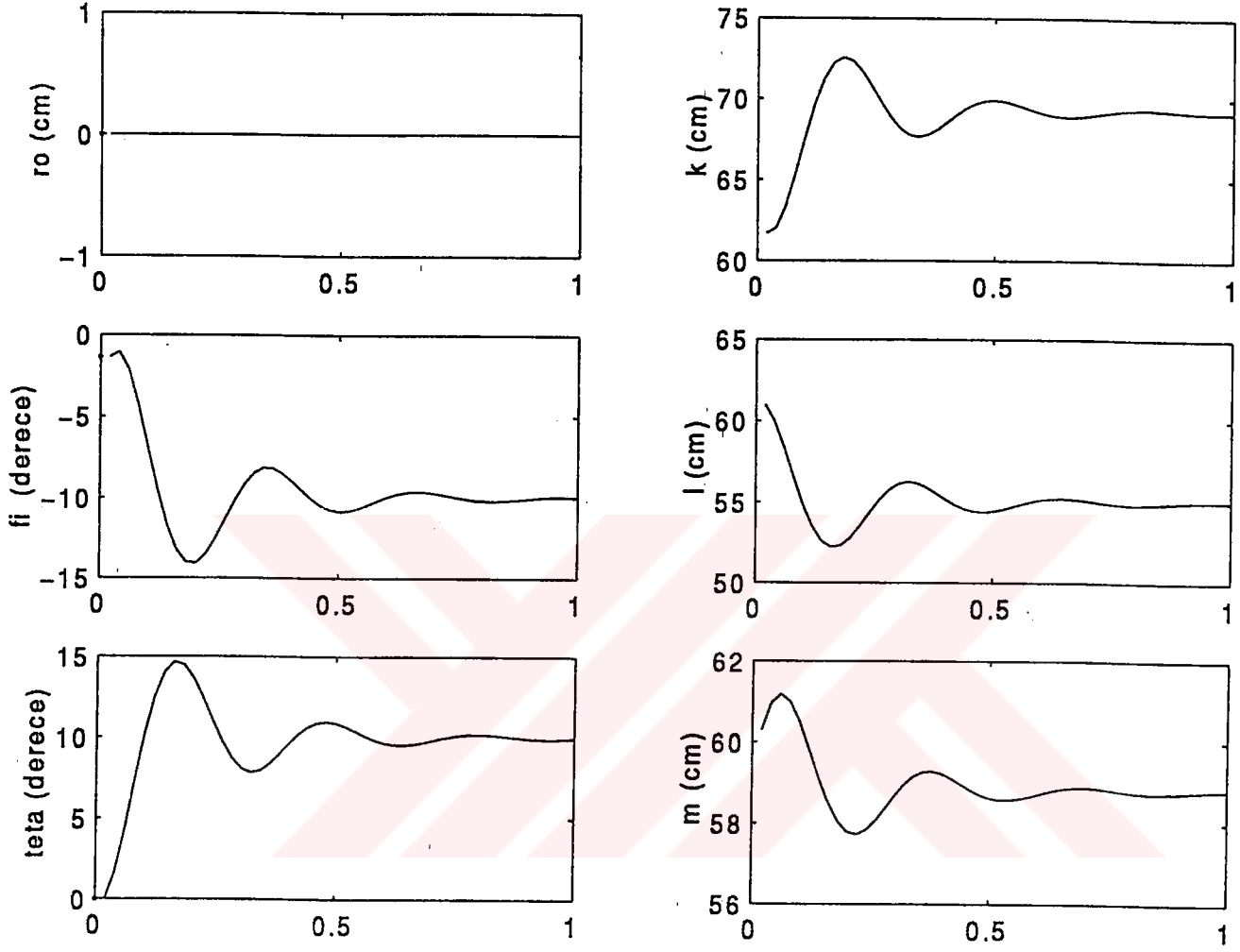
Not : Yatay eksen  $t = \text{saniye}$  olmak üzere zamanı göstermektedir.



Şekil 8.5

Başlangıç pozisyonundan itibaren  $\rho = 0$ ,  $\phi = 0$  ve  $\theta = 10. [ (1 - e^{-2t}) \cdot (\cos t - \sin t) ]$  şeklinde değişmesi durumunda gereken  $k$ ,  $l$ ,  $m$  bacak uzunluklarının değişimi.

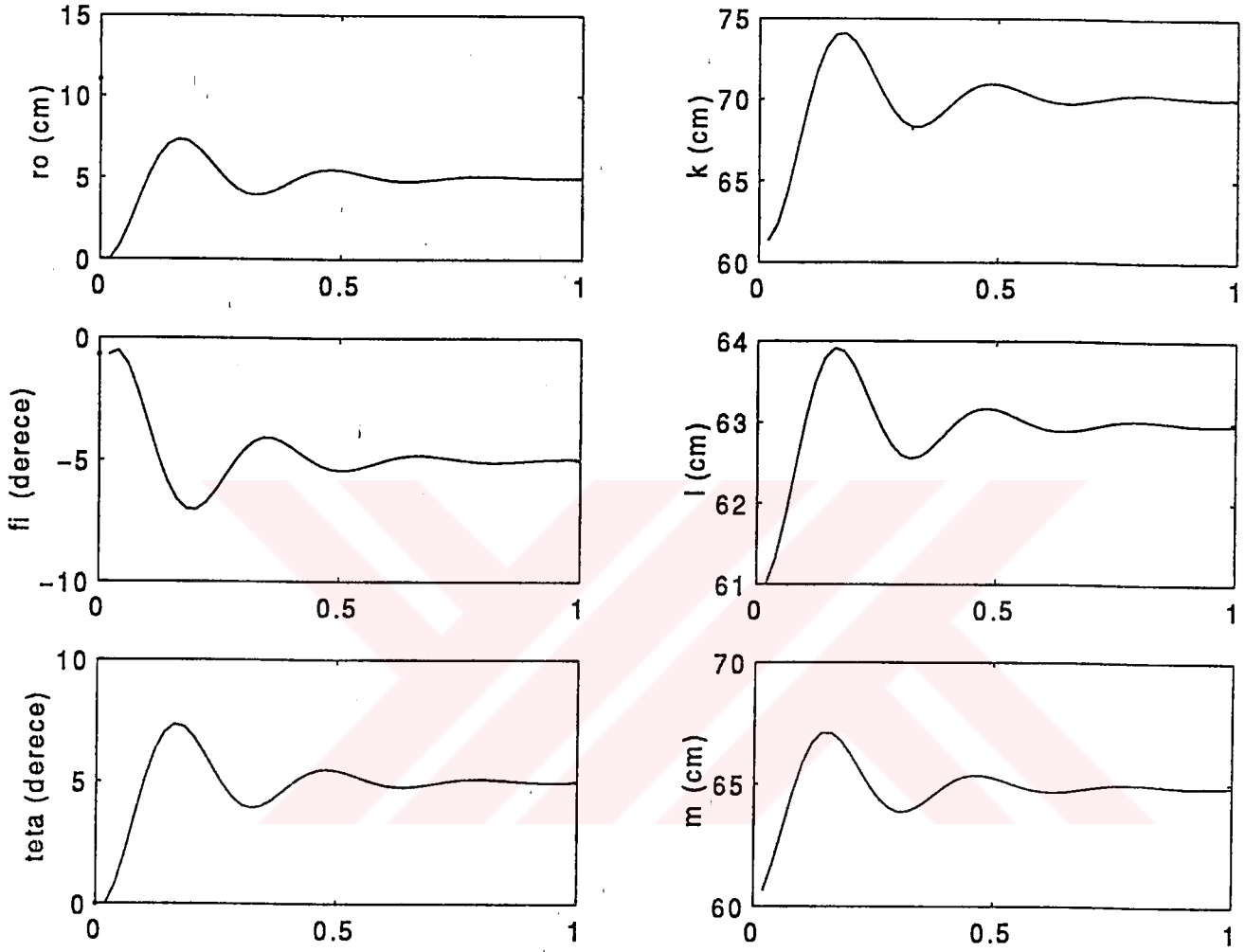
*Not : Yatay eksen  $t = \text{saniye}$  olmak üzere zamanı göstermektedir.*



Şekil 8.6

Başlangıç pozisyonundan itibaren  $\rho = 0$ ,  $\phi = -10 \cdot [ (1 - e^{-2t}) \cdot (\cos t + \sin t) ]$ ,  
 $\theta = 10 \cdot [ (1 - e^{-2t}) \cdot (\cos t + \sin t) ]$  şeklinde değişmesi durumunda gereken  $k$ ,  $l$ ,  $m$   
 bacak uzunluklarının değişimi.

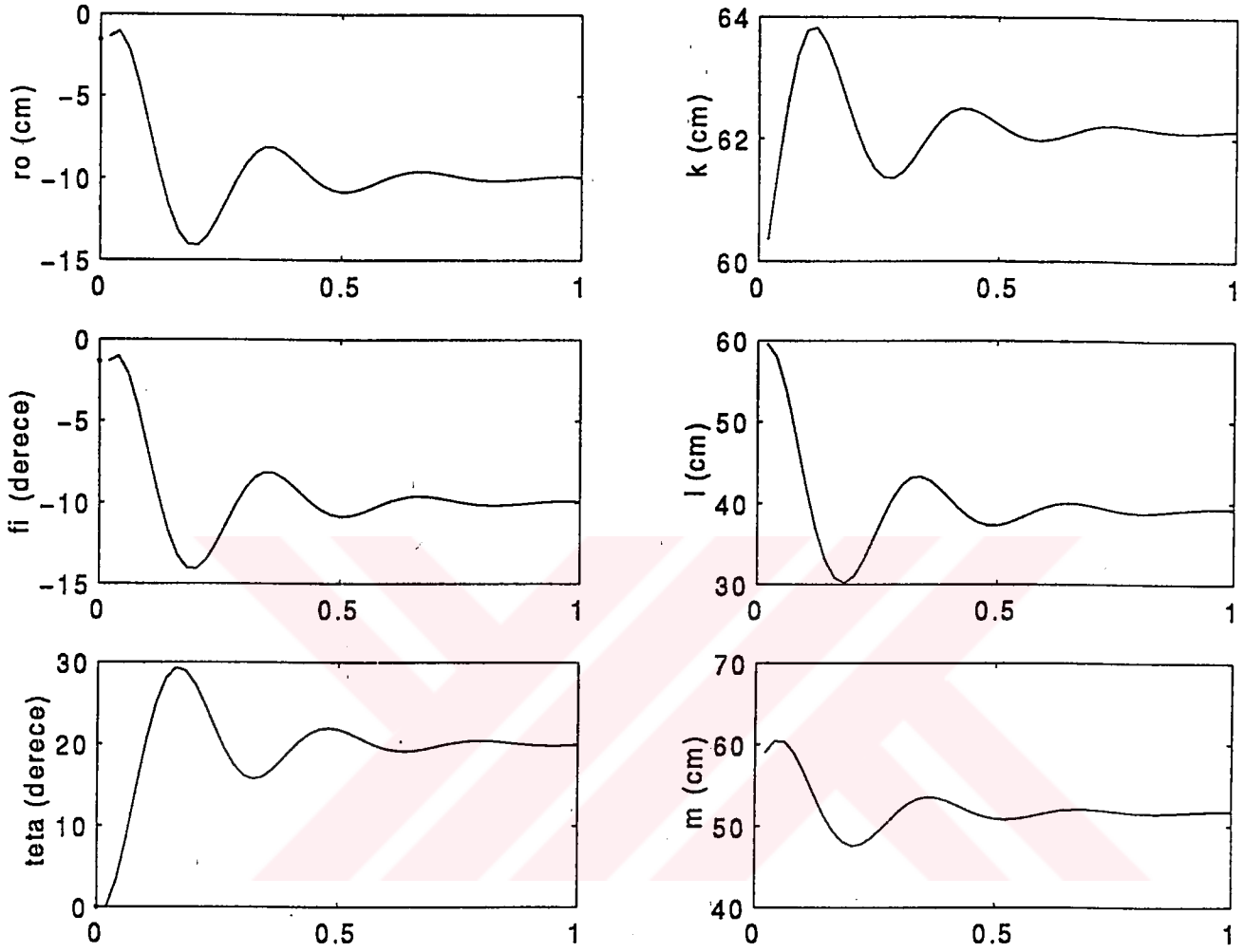
Not : Yatay eksen  $t = \text{saniye}$  olmak üzere zamanı göstermektedir.



Şekil 8.7

Başlangıç pozisyonundan itibaren  $\rho = 5.[ (1 - e^{-2.t}).(\cos t + \sin t) ]$ ,  
 $\phi = -5.[ (1 - e^{-2.t}).(\cos t + \sin t) ]$ ,  $\theta = 5.[ (1 - e^{-2.t}).(\cos t + \sin t) ]$   
 şeklinde değişmesi durumunda gereken  $k$ ,  $l$ ,  $m$  bacak uzunluklarının değişimi.

*Not : Yatay eksen  $t = \text{saniye}$  olmak üzere zamanı göstermektedir.*



Şekil 8.8

Başlangıç pozisyonundan itibaren  $\rho = -10.[(1 - e^{-2.t}).(\cos t + \sin t)]$ ,  
 $\phi = -10.[(1 - e^{-2.t}).(\cos t + \sin t)]$ ,  $\theta = 20.[(1 - e^{-2.t}).(\cos t + \sin t)]$ ,  
 şeklinde değişmesi durumunda gereken  $k$ ,  $l$ ,  $m$  bacak uzunluklarının değişimi.

*Not : Yatay eksen  $t = \text{saniye}$  olmak üzere zamanı göstermektedir.*

## 9. BÖLÜM

### DEĞERLENDİRME

Kontrol edilmesi istenen sistemin matematik modelini kurmak çok önemlidir ve bazı sistemlerin tam matematik modelini oluşturmak zor hatta bazen imkansızdır. Özellikle prototipini dizayn ettiğimiz manipulatör mekanizması gibi karmaşık hareketlere sahip sistemlerde tam matematik modeli elde edebilmek için mekanizmanın hareketlerinin çok iyi bilinmesi gerekmektedir. Mekanizmanın hareketleri için de sistemin kinematiğinin kesin bir şekilde bulunması gerektiği aşıkardır. Bu çalışmada deney amaçlı olarak kullanılabilecek ayrıca bir çok sistemde kullanılabilecek üç serbestlik dereceli bir manipulatörün prototipi dizayn edilerek dinamik kontrolünün yapılabilmesi için gerekli olan kinematik çözümleri elde edilmiştir.

Prototipini kurduğumuz üç serbestlik dereceli manipulatör mekanizmasının mafsal bağlantılarının şekillerini daha önce 6. BÖLÜM içinde paragraf 6.2 ' de vermiştik. Buna alternatif olarak daha basit kinematik zincire sahip ve merkezi oynamaması için gerekli platform konfigürasyonunu taban platform köşelerinde iki üniversal mafsal, bir eksenel mafsal ve merkezinde sabitlenmiş fazladan bir piston ile üst platformda ise köşelerine üç adet üniversal mafsal ve alt platformdan gelen pistonun diğer ucunu üniversal mafsalla üst platformun merkezine bağlayarak sağlayabiliriz. Bu dizayn şeklinde platformların merkezlerine fazladan bir silindire ihtiyaç vardır ve merkezdeki silindirin sabitleme noktalarına hareket esnasında aşırı yük geldiğinden dolayı mukavemet sağlaması mümkün olmayacaktır. Biz söz konusu dezavantajlar nedeniyle kurduğumuz sistemin bu şekilde monte edilmesini uygun görmedik.

Bu çalışmanın sonucunda günümüzde kullanılan uçuş simülatörlerinde, tankların ve savaş gemilerinin hatta savaş uçaklarının namlu sistemlerinde kullanılabilecek bir manipulatör mekanizmasını kurulabilmesi artık hiçte zor olmayacaktır. Kurduğumuz mekanizmayı namlu sistemlerinde kullanarak çeşitli bozuntularda namlunun sabit kalarak hedeften sapmamasını sağlayacak bir sistem, rijit bir şekilde hareket eden robotların eklem yerlerinde kullanılması ile daha narin hatta insan gibi hareket edebilecek bir robot ve bunlar gibi bir çok sistem kurmak artık mümkün olacaktır.

Kurulan sistemin kontrol edilebilmesi için gerekli olan bağıntılar için ters ve düz kinematik denklemler elde edilmiştir. Çeşitli öteleme ve dönme durumları için nümerik simülasyonlar yapılarak elde edilen sonuçlar grafiklerde gösterilmiş olup sistemin simülasyona uygun olduğu görülmüştür. Elde edilen ters ve düz kinematik denklemlerin nümerik simülasyonundan başka analitik çözüm için MAPLE programı kullanılmış bir sonuç elde edilememiştir. Bu sistemin dinamiğinin incelenmesi için gerekli yardımcı bağıntılar 3. BÖLÜM ' ün sonunda verilmiş olup başka bir araştırmaya bırakılmıştır.



## 10. BÖLÜM

### KAYNAKLAR

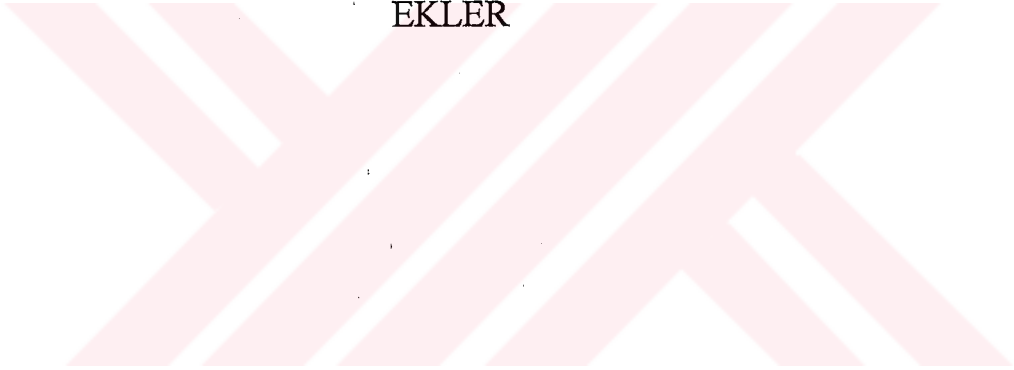
- [1] SREENIVASAN S. V. , WALDRON K.J. , NANLTA P. , ‘ Closed-Form direct displacement analysis of 6-6 Stewart Platform’, Mechanism and Machine Teory , Vol. 29 , No.6 , pp. 855-864 , 1994.
- [2] DASGUPTA B. ve MRUTHUNJAYA T. S. , ‘ A Canonical Formulation of The Direct Position Kinematics problem for A General 6-6 Stewart Platform’, Mechanism and Machine Teory , Vol. 29 , No. 6 , pp. 819-827 , 1994.
- [3] WEN F. ve LIANG C. , ‘ Displacement Analysis of The 6-6 Stewart Platform Mechanism’ , Mechanism and Machine Teory , Vol.29, No.4, pp.547-557, 1994.
- [4] PANG H. ve SHAHINPOOR M. , ‘ Invers Dynamics of a Paralel Manipulator’, Journal of Robotic Systems, Vol. 11, No. 8, pp. 693-702, 1994.
- [5] TAHMASEBİ F. ve TSAİ L.W. , ‘On The stiffness of a Novel Six-Degree-of Freedom Paralel Minimanipulator’ , Journal of Robotic Systems, Vol. 12 , No.12, pp. 845-856, 1995.
- [6] STOUGHTON R.S. ve ARAİ T. , ‘A Modified Stewart Platform Manipulator wiht Improved Dexterity’, IEEE Transactions On Robotics and Automation, Vol. 9, No. Z, pp. 166-172,, 1993.
- [7] MASORY O. ve JIAHUA Y. , ‘Measurement of Pose Repeatability of Stewart Platform’, Journal of Robotic System, Vol.12, No.12, pp.821-832, 1995.
- [8] FERRARESI C. , PASTORELLI S. , SORLI M. , ZHMUD N. , ‘Static and Dinamic Behavior of a Stiffness Stewart Platform-Based Force Torque Sensor’, Journal of Robotic System, Vol.12, No.12, pp.883-893 , 1995.
- [9] NOTASH L. ve PODHORODESKI R.P. , ‘ On The Forward Displacement Problem of Three-Branch Parallel Manipulators’, Mechanism and Machine Teory , Vol.30, No.3, pp.391-404, 1995.

- [10] MCAREE P.R., DAMEL R.W. , ' A Fast, Robust Solution to The Stewart Platform Forward Kinematics', Journal of Robotic System, Vol.13 No.7, pp.407-427 , 1996.
- [11] ZHUANG H., ' Self Calibration of Paralel Mechanisms with a Case Study on Stewart Platforms', IEEE Transactions On Robotics and Automation, Vol. 13, No. 3, pp. 387-397 , 1997.
- [12] STEWART D. , ' A Platform with Six Degrees Of freedom' , Proceedings of Inst. Mechanical Engineers Vol. 180, pt.15 , No. 1 , pp. 371-386, 1965.
- [13] WOHLHART K. , ' Displacement Analysis of General Spherical Stewart Platform', Mechanism and Machine Teory , Vol.30, No.3, pp.391-404, 1995.
- [14] ERDMAN A.G. , ' Modern Kinematics Developments in The last Forty Years' , Wiley Series in Design Engineering , pp. 139-186,1993.
- [15] LENARCIC J. , PARENTI-CASTELLI V. , ' Recent Advances in Robot Kinematics' , Kluwer Academic Publishing, pp. 89-99, 339-461 1996.
- [16] SONG Shin-Min and ZHANG Ming- Dong , ' A study of reactional force compensation based on 3 DOF paralel platforms '. Journal of Robotic Systems, Vol. 12, No.12, pp. 783 -794, 1995.
- [17] LENARCIC J. ' Kinematics analysis and singularite representation of spatial 5 DOF parallel mechanism '. Journal of Robotic Systems, Vol. 12, No. 14 , 1997.
- [18] TSAI L.W. ' Solving the forward kinematics of paralel manipulation '. Journal of Robotic Systems, Vol. 13, No. 2 , 1996.
- [19] LUI S. , BOBROW J.E. , 'An analysis of a pneumatic servo system and its appl. To comp. Cont. Robot '. Journal of Dynamics System Measurement and Control. ASME Transaction 228. Vol 110. Sept. 1988.
- [20] KAZEROONI H. , ' On the robot compliant motion control '. Journal of Dynamics System Measurement and Control ,ASME Transaction 416. Vol 111. Sept. 1989.
- [21] MERIAM J.L. , DYNAMICS , ' California Politechnic University Mechanical Engineering Department '. Jhon Wiley and Sons 1975

- [22] FESTO , PNEUMATICS Ltd. Şti. 1991
- [23] OGATA , SYSTEM DYNAMICS , ‘ Mathematical modelling of Pneumatics systems ’. . Jhon Wiley and Sons 1989
- [24] AGARD CP-198\_CP-577 , ‘ 4 DOF' lık bir simulatorün incelenmesi ’. 1. H.İ.B.M. K. ' lığı Kütüphanesi. 1992
- [25] KUO B.C., AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS , ‘ Prentice Hall ’. 1991
- [26] BORRIE J. A. , MODERN CONTROL SYSTEMS and a MANUAL of DESIGN METHODS , ‘ Prentice Hall ’. 1986
- [27] DORF R.C. , MODERN CONTROL SYSTEMS , University of California, ‘ Davis ,Addison Wesley Publishing ’. 1986
- [28] MOUMIN Ali , YAPAY SİNİR AĞLARI VE GENETİK ALGORİTMALARIN UÇUŞ KONTROL SİSTEMLERİNE UYGULANMASI ‘ İTÜ Fen. Bil. Enst. Master Tezi ’. 1995



EKLER



```

% Üst platform merkezinin sabit kalması durumunda ters
kinematik çözüm
% Seçilen eksen takımının orijini hareketli üst platformun
başlangıç pozisyonundaki merkezidir
% Başlangıç pozisyonunda ( home position )Taban platform
orijinden 61 cm aşağıdadır
% Başlangıç pozisyonunda ( home position )Üst platformun
konum koordinatları aşağıdaki gibidir
% Ax=-17.3200 Ay=-30.0000 Az = 0
% Bx= 34.6400 By= 0 Bz = 0
% Cx=-17.3200 Cy= 30.0000 Cz = 0

fi=input ( 'x eksenini etrafındaki dönme açısını
giriniz.....fi(deg)?=' );
teta=input ( 'y eksenini etrafındaki dönme açısını
giriniz.....teta(deg)?=' );
% ( z eksenini etrafındaki dönme yoktur )
zeta=0;
ro=input ( 'Üst platformun merkezi ne kadar ötelensin (-
16<ro<16)...ro(cm)?=' );

% Açıları radyana çevirme
fi=fi*3.141529/180;
teta=teta*3.141529/180;
zeta=zeta*3.141529/180;

% Transformasyon matrisleri
t1=[1 0 0;0 cos(fi) -sin(fi);0 sin(fi) cos(fi)];
t2=[cos(teta) 0 sin(teta);0 1 0;-sin(teta) 0 cos(teta)];
t3=[cos(zeta) -sin(zeta) 0;sin(zeta) cos(zeta) 0;0 0 1];

% Toplam Transformasyon matrisi
T= t1 * t2 * t3

% Üst platformun ilk konumdaki koordinatları
xa=-17.32;ya=-30;za=0;
xb=34.64 ;yb=0 ;zb=0;
xc=-17.32;yc=30 ;zc=0;

% Taban platformun konum koordinatları
xd=-17.32 ;yd=-30 ;zd=-61;
xe=34.64 ;ye=0 ;ze=-61;
xf=-17.32 ;yf=30 ;zf=-61;

```

% Transformasyona uğrayan üst platformun konum koordinatları

```
AA=T*[xa;ya;za]+[0;0;ro];
BB=T*[xb;yb;zb]+[0;0;ro];
CC=T*[xc;yc;zc]+[0;0;ro];
```

% şeklindedir.

```
xaa=AA(1,1);yaa=AA(2,1);zaa=AA(3,1);
xbb=BB(1,1);ybb=BB(2,1);zbb=BB(3,1);
xcc=CC(1,1);ycc=CC(2,1);zcc=CC(3,1);
Tabc=[xaa yaa zaa;xbb ybb zbb;xcc ycc zcc]
```

% Bacak uzunluklarının hesabı

```
k=sqrt((xaa-xd)^2+(yaa-yd)^2+(zaa-zd)^2)
l=sqrt((xbb-xe)^2+(ybb-ye)^2+(zbb-ze)^2)
m=sqrt((xcc-xf)^2+(ycc-yf)^2+(zcc-zf)^2)
```

% Değerlerin kontrolü için hareketli üst platformu teşkil

% eden eşkenar üçgenin kenarlarını p1, p2, p3, ile göstererek

% bunların 60 cm uzunluğa sahip olduklarını göstermeliyiz.

% p1=p2=p3=60 sağlanıyorsa bulunan k, l, m bacak uzunlukları doğrudur.

```
p1=sqrt((xaa-xbb)^2+(yaa-ybb)^2+(zaa-zbb)^2)
p2=sqrt((xaa-xcc)^2+(yaa-ycc)^2+(zaa-zcc)^2)
p3=sqrt((xbb-xcc)^2+(ybb-ycc)^2+(zbb-zcc)^2)
```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Teztk1.m %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Ters Kinematik %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% teta, fi,ro verildiginde k,l,m bacak uzunluklarinin
% bulunmasi

% Bu program verilen teta(t), fi(t), ro(t) degerleri
% icin
% k(t), l(t), m(t) bacak uzunluklarinin almasi gereken
% degerleri
% hesaplar.

global sabit_ro sabit_p sabit_q2 sabit_teta sabit_fi
sabit_tp sabit_q3

%
% sabit degerler
%
tp=tan(pi/3);
q2=sqrt(3)/6;
q3=q2*2;
p=60;
roo=61;
byy=0;
ro=0;
teta=0;
fi=0;

sabit_ro=ro;
sabit_p=p;
sabit_q2=q2;
sabit_teta=teta;
sabit_fi=fi;
sabit_tp=tp;
sabit_q3=q3;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Once fi acisini degistir, sonra ro'yu degistir, sonra %
% teta'yi degistir. %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

inx=0;
xdepo=[];
dfi=0; dteta=0; ro=0;

```

```

% Once fi acisini 10 derece degistir, k,l,m yi hesapla
%
for jj=1:50, dfi=jj*0.2;    hustkla; end;
%
% Sonra ro'yu 20cm yükselt, k,l,m yi hesapla
for kk=1:20, ro=kk*0.5; hustkla; end;
%
% sonra teta acisini 10 derece degistir, k,l,m yi
hesapla
%
for jj=1:50, dteta=jj*0.2;    hustkla; end;

% Sonuclari cizdir.
%
tezcizl
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% Once teta acisini degistir, sonra fi'yi degistir, %
% sonra ro'u degistir. %
% %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
inx=0;
xdepo=[];
dfi=0; dteta=0; ro=0;
%
% Once teta acisini 10 derece degistir, k,l,m yi
hesapla
%
for jj=1:50, dteta=jj*0.2;    hustkla; end;
%
% sonra fi acisini 10 derece degistir, k,l,m yi
hesapla
%
for jj=1:50, dfi=jj*0.2;    hustkla; end;
%
% Sonra ro'yu 20cm yükselt, k,l,m yi hesapla
%
for kk=1:20, ro=kk*0.5; hustkla; end;
%
%
% Sonuclari cizdir.
%
tezcizl

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% Once ro'yu degistir, sonra fi'yi degistir,
% sonra teta'yi degistir.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

inx=0;
xdepo=[];
dfi=0; dteta=0; ro=0;
%
% Sonra ro'yu 20cm yukselt. k,l,m yi hesapla
%
for kk=1:20, ro=kk*0.5; hustkla; end;
%
% sonra fi , acisini 10 derece degistir. k,l,m yi
hesapla
%
for jj=1:50, dfi=jj*0.2; hustkla; end;
%
% Once teta acisini 10 derece degistir. k,l,m yi
hesapla
%
for jj=1:50, dteta=jj*0.2; hustkla; end;
%
% Sonuclari cizdir.
%
tezcizl
%
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% ro, fi, teta yi adim adim eszamanli olarak ayni
% anda arttir.
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

inx=0;
xdepo=[];
dfi=0; dteta=0; ro=0;

% Nonlinear denklemi coz ve k,l,m bacak uzunluklarini
bul

for jj=1:50,
    ro=jj*0.2;
    dfi=jj*0.2;
    dteta=jj*0.2;
    hustkla;

```

```

end;
%
% Sonuclari cizdir.
%
tezciz1

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% ro, fi, teta yi verilen bir yorungeyi takip
% edecek sekilde degistir.
% teta = 10*(1 - cos(2*t)*exp(-0.5*t) ); seklinde
% olsun.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% ro ve fi acilari sifir olarak kaliyor.
%

inx=0;
xdepo=[];
dfi=0; dteta=0; ro=0;
%
% yorungeyi elde et.
%
for jj=1:50,
    t=0.2*(jj-1);
    ee(jj)=10*(1 - cos(2*t)*exp(-0.5*t) );
end;
% Nonlinear denklemleri coz ve k,l,m bacak uzunluklarini
bul
ro=0; dfi=0;
for jj=1:50,
    dteta=ee(jj);
    hustkla;
end;
%
% Sonuclari cizdir.
%
tezciz1

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% ro, fi, teta yi verilen bir yorungeyi takip
% edecek sekilde degistir.
% teta = 10*(1 - cos(2*t)*exp(-0.5*t) ); seklinde
% olsun.
% fi = 10*(1 - cos(2*t-pi/6)*exp(-0.5*t) ); seklinde
% olsun
% ro sifir olarak kaliyor.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

inx=0;
xdepo=[];
dfi=0; dteta=0; ro=0;
%
% yorungeyi elde et.
%
    for jj=1:50,
        t=0.2*(jj-1);
        ee(jj)=10*(1 - cos(2*t)*exp(-0.5*t) );
        ff(jj)=10*(1 - cos(2*t-pi/6)*exp(-0.5*t) );
    end;
%
% Nonlinear denklemi coz ve k,l,m bacak uzunluklarini
% bul
%
    for jj=1:50,
        dteta=ee(jj);
        dfi=fi(jj);
        hustkla;
    end;
%
% Sonuclari cizdir.
%
    tezciz1
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% ro, fi, teta yi verilen bir yorungeyi takip
% edecek sekilde degistir.
% teta = 10*(1 - cos(2*t)*exp(-0.5*t) ); seklinde
% olsun.
% fi = 10*(1 - cos(2*t-pi/6)*exp(-0.5*t) ); seklinde
% olsun
% ro = 5*(1 - cos(2*t-pi/8)*exp(-0.5*t) ); seklinde
% olsun
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

inx=0;
xdepo=[];
dfi=0; dteta=0; ro=0;
%
% yorungeyi elde et.
%
    for jj=1:50,
        t=0.2*(jj-1);
        ee(jj)=10*(1 - cos(2*t)*exp(-0.5*t) );
        ff(jj)=10*(1 - cos(2*t-pi/6)*exp(-0.5*t) );
        dro=5*(1 - cos(2*t-pi/8)*exp(-0.5*t) );
    end;

```

```
%  
% Nonlineer denklemi coz ve k,l,m bacak uzunluklarini  
bul  
%  
for jj=1:50,  
    dteta=ee(jj);  
    dfi=fi(jj);  
    ro(jj)=dro(jj);  
    hustkla;  
end;  
%  
% Sonuclari cizdir.  
%  
tezviz1  
%  
%
```



```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Teztkla.m %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%   Bu program teztkl.m tarafından kullanılmaktadır.
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Acilarin degerini radyanacevir.
%
%       fi=dfi*pi/180;
%       teta=dteta*pi/180;
%
% nonlinear denklem cozucu icin parametreleri ayarla
%
%       xparam=foptions;
%       xparam(2)=0.00000001;
%       xparam(3)=0.00000001;
%       xparam(14)=3000;
%       xparam(5)=1;
%
% Son cevrimden cikan sonuclari ilk baslangic degerleri
%   olarak ver.
%
%       baskok=sonkok;
%
% fsolve.m "matlab m file" olup MATLAB paketi ile
%   verilmektedir.
%
% [sonkok yparam]=fsolve('hustxyz',baskok,xparam);
%
%
% cozumun dogrulugunun kontrolu.
%
% snorm=norm(hustxyz(sonkok));
%
%       axx=sonkok(1); bxx=sonkok(2); cxx=sonkok(3);
%       ayy=-p/2+axx*tp; cyy=p/2-cxx*tp;
%
% Bulunan Ax, Bx, Cx degerlerinden k,l,m degerlerinin
%   hesaplanmasi.
%
%
% k =( ( 1+tp^2 )*axx^2 + (ro + q2*p*sin(teta) -
%   p*sin(fi)/2 +roo)^2)^.5;
% l = (( bxx-p*sqrt(3)/2 )^2 + (ro -
%   q3*p*sin(teta)+roo)^2)^.5;

```

```

m =( ( 1+tp^2 )*cxx^2 + (ro + q2*p*sin(teta) +
p*sin(fi)/2 +roo)^2)^.5;

%
% Yorumge cizimi icin sonuclarin depolanmasi
%
inx=inx+1;
xdepo(inx,:)=[snorm ro fi teta k l m];
clg;

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Nonlineer denklem takımın çözümü için kullanılır.      %
% hustkla.m tarafından çağrılır.                        %
% f(x1,x2,x3,...) fonksiyonunu hesaplar.                %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

function fabc=husxyz(xabc)
global sabit_ro sabit_p sabit_q2 sabit_teta sabit_fi
sabit_tp sabit_q3
axx=xabc(1); bxx=xabc(2); cxx=xabc(3);
azz=sabit_ro + sabit_p*sabit_q2*sin(sabit_teta) -
sabit_p*sin(sabit_fi)/2 ;
czz=sabit_ro + sabit_p*sabit_q2*sin(sabit_teta) +
sabit_p*sin(sabit_fi)/2;
bzz=sabit_ro - sabit_p*sabit_q3*sin(sabit_teta);
fabc(1,1)=sabit_p^2- (axx-bxx)^2 - (-sabit_p/2 +
axx*sabit_tp)^2 - (azz-bzz)^2;
fabc(2,1)=sabit_p^2- (axx-cxx)^2- (-sabit_p +
(axx+cxx)*sabit_tp)^2 - (azz-czz)^2;
fabc(3,1)=sabit_p^2- (bxx-cxx)^2- (-sabit_p/2 +
cxx*sabit_tp)^2- (bzz-czz)^2;

```

% Nonlinear denklem takımının jakobiye matrisi hesabı

```
function gg=hustgrad(xyz);  
global sabit_p sabit_tp  
tp=sabit_tp; p=sabit_p;  
ax=xyz(1); bx=xyz(2); cx=xyz(3);  
  
gg(1,1)=-2*(ax-bx) - 2*tp*(p/2+ax*tp);  
gg(1,2)=2*(ax-bx);  
gg(1,3)=0;  
  
gg(2,1)=-2*(ax-cx) - 2*tp*(-p +(ax+cx)*tp);  
gg(2,2)=0;  
gg(2,3)=2*(ax-cx) - 2*tp*(-p +(ax+cx)*tp);  
  
gg(3,1)=0;  
gg(3,2)=-2*(bx-cx);  
gg(3,3)=2*(bx-cx) - 2*tp*(p/2+tp*cx);  
gg=gg';  
  
%disp('dddd'); terslll=inv(gg)
```

```
% Bu program teztck1.m tarafından çağrılmaktadır.
%
% Sonuçları ekrana çizdir.
%
subplot(321);
plot(xdepo(:,2)); title(' ro uzunlugu');
subplot(323);
plot(180/pi*xdepo(:,3)); title(' fi acisi ');
subplot(325);
plot(180/pi*xdepo(:,4)); title(' teta acisi');

subplot(322);
plot(xdepo(:,5)); title(' k ayagi');
subplot(324);
plot(xdepo(:,6)); title(' l ayagi');
subplot(326);
plot(xdepo(:,7)); title(' m ayagi');
```

## ÖZGEÇMİŞ

Hüseyin SALİH 1972 yılında İSTANBUL ' da doğdu. İlk ve orta öğretimini BEYLERBEYİ ' nde tamamladı. 1989 yılında BEYLERBEYİ LİSESİ ' ni bitirdikten sonra aynı yıl İ.T.Ü. Makine Mühendisliğini kazandı. 1991 yılında Uçak Mühendisliğine yatay geçiş yaparak 1994 kış yarısında iyi derece ile mezun oldu. Yine aynı yıl İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Uçak Mühendisliği Programında yüksek lisans eğitimine başladı. Ayrıca üç yıl güneş enerjisi ve ısı sistemleri üzerinde çalıştıktan sonra 1996 yılında ESKİŞEHİR 1. Hava İkmal Bakım Merkezi Komutanlığı ' nda F-4E Uçakları bakım mühendisi olarak göreve başladı. Halen 1. Hava İkmal Bakım Merkezi Komutanlığı ' nda F-4E ve F-16 Uçş. Kum. Sist. Müh. olarak görev yapmakta olup yüksek lisans çalışmalarına etmektedir.