

169400

T.C  
FIRAT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PIC MİKRODENETLEYİCİ YARDIMI İLE  
ADIM MOTORUNUN  
KONUM KONTROLÜ**

Reşat ÇELİKEL

Tez Yöneticisi  
Yrd. Doç. Dr. Hüseyin ALTUN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ELEKTRİK EĞİTİMİ ANABİLİM DALI**

**ELAZIĞ, 2005**

T.C  
FIRAT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PIC MİKRODENETLEYİCİ YARDIMI İLE  
ADIM MOTORUNUN  
KONUM KONTROLÜ**

Reşat ÇELİKEL

Yüksek Lisans Tezi  
Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı

Bu tez 05.09.2005 tarihinde aşağıda belirtilen jüri tarafından oybirliği / ~~oyçokluğu~~ ile başarılı / ~~başarısız~~ olarak değerlendirilmiştir.

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Hüseyin Altun

Üye: Doç. Dr. Harifi Güdemir

Üye: Doç. Dr. Z. Hakan AKPOLAT

Üye:

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu 'nun 09.09.2005 tarih ve 2005-30.18 sayılı kararıyla onaylanmıştır

## TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren kıymetli hocam Yrd. Doç. Dr. Hüseyin ALTUN 'a ve çalışmam süresince bana her yönden destek olan aileme teşekkür ederim.

Ayrıca Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi Bölümü hocalarına ve çalışmalarında bana destek olan arkadaşım Arş.Gör. Ömür AYDOĞMUŞ 'a teşekkür ederim.



## İÇİNDEKİLER

|                          |      |
|--------------------------|------|
| ŞEKİLLER LİSTESİ.....    | III  |
| TABLOLAR LİSTESİ .....   | VI   |
| SİMGELER LİSTESİ.....    | VII  |
| KISALTMALAR LİSTESİ..... | VIII |
| ÖZET.....                | IX   |
| ABSTRACT .....           | X    |

|                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. GİRİŞ.....                                                                                              | 1  |
| 2. ADIM MOTORLARI.....                                                                                     | 7  |
| 2.1 Adım Motoru Türleri.....                                                                               | 8  |
| 2.1.1 Değişken Relüktanslı Adım Motorları .....                                                            | 9  |
| 2.1.2 Sabit Mıknatıslı Adım Motorları.....                                                                 | 11 |
| 2.1.3 Hibrit Adım Motorları .....                                                                          | 12 |
| 2.2 Sabit Mıknatıslı Adım Motorlarında Kullanılan Sargı Türleri.....                                       | 13 |
| 2.2.1 Unipolar Adım Motorları .....                                                                        | 13 |
| 2.2.2 Bipolar Adım Motorları.....                                                                          | 15 |
| 2.2.3 Bifilar Adım Motorları .....                                                                         | 20 |
| 2.3 Adım Motoru Seçimi.....                                                                                | 21 |
| 2.3.1 Değişken Relüktanslı Adım Motorları İle Sabit Mıknatıslı Adım Motorlarının<br>Karşılaştırılması..... | 21 |
| 2.3.2 Bipolar Adım Motoru İle Unipolar Adım Motorunun Karşılaştırılması .....                              | 22 |
| 2.3.3 Sabit Mıknatıslı Adım Motoru İle Hibrit Adım Motorunun Karşılaştırılması .....                       | 23 |
| 2.3.4 Fonksiyonel Karakteristikler .....                                                                   | 23 |
| 2.4 Mikro Adımlama .....                                                                                   | 25 |
| 2.4.1 Mikro Adımlamanın Sınırları .....                                                                    | 26 |
| 2.5 Adım Motoru Sürücü Devreleri.....                                                                      | 28 |
| 2.5.1 Tek Kutuplu Sürücü Devreler .....                                                                    | 28 |
| 2.5.2 İki Kutuplu Sürücü Devreler .....                                                                    | 29 |
| 2.5.3 İki Gerilim Seviyeli Sürücü.....                                                                     | 30 |
| 2.5.4 Kıyıcı (Chopper) Sürücü Devreler .....                                                               | 32 |
| 2.6 Yüksek Hızda Çalışma .....                                                                             | 33 |
| 2.6.1 Zaman Sabitinin Ayarlanması .....                                                                    | 36 |

|         |                                                      |    |
|---------|------------------------------------------------------|----|
| 3.      | PIC MIKRODENETLEYİCİSİ .....                         | 38 |
| 3.1     | Mikroişlemciler .....                                | 38 |
| 3.2     | PIC Mikrodenetleyiciler .....                        | 39 |
| 3.2.1   | PIC Mikrodenetleyicilerinin Özellikleri .....        | 39 |
| 3.3     | PIC Mikrodenetleyicilerinin Donanımı .....           | 40 |
| 3.3.1   | PIC 16F877 .....                                     | 40 |
| 3.3.2   | Giriş/Çıkış Portları .....                           | 45 |
| 3.3.2.1 | PortA ve TrisA Register .....                        | 45 |
| 3.3.2.2 | PortB ve TrisB Register .....                        | 46 |
| 3.3.2.3 | PortC ve TrisC Register .....                        | 46 |
| 3.3.2.4 | PortD ve TrisD Register .....                        | 47 |
| 3.3.2.5 | PortE ve TrisE Register .....                        | 47 |
| 3.4     | Bellek Yapısı .....                                  | 48 |
| 4.      | UYGULAMA DEVRESİ TASARIMI .....                      | 49 |
| 4.1     | Tuş Takımı .....                                     | 50 |
| 4.2     | Adım Motoru Konum Bilgisi .....                      | 52 |
| 4.3     | Adım Motoru Başlama, Durma, Hız ve Yön Bilgisi ..... | 53 |
| 4.4     | Besleme Gerilimi ve Osilatör .....                   | 54 |
| 4.5     | Adım Motorları Sürme Devreleri .....                 | 56 |
| 4.5.1   | Unipolar Adım Motoru Sürme Devresi .....             | 56 |
| 4.5.2   | Bipolar Adım Motoru Sürme Devresi .....              | 60 |
| 4.6     | LCD ve Analog Girişi .....                           | 64 |
| 5.      | SONUÇ .....                                          | 73 |
|         | KAYNAKLAR .....                                      | 75 |
|         | ÖZGEÇMİŞ .....                                       | 78 |

## ŞEKİLLER LİSTESİ

| Şekil                                                                                                        | Sayfa |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 2.1. Statoru 4 faz sargılı ve rotoru 2 kutuplu sabit mıknatıslı adım motorunun elektriksel şeması..... | 8     |
| Şekil 2.2. Değişken relüktanslı adım motoru.....                                                             | 9     |
| Şekil 2.3. Dört faz sargılı, altı rotor dişli değişken relüktanslı adım motoru.....                          | 10    |
| Şekil 2.4. İki faz sargılı, rotoru iki kutuplu sabit mıknatıslı adım motorunun çalışma prensibi .....        | 11    |
| Şekil 2.5. Statoru dört kutuplu , rotoru beş kutuplu hibrit adım motoru.....                                 | 12    |
| Şekil 2.6. Adım açısı 30° olan unipolar adım motorunun kesiti.....                                           | 14    |
| Şekil 2.7. Adım açısı 30° olan bipolar adım motoru.....                                                      | 16    |
| Şekil 2.8. İki kutuplu bipolar sarımlı bir hibrit motor.....                                                 | 16    |
| Şekil 2.9. Bipolar adım motorunun stator sargılarının bir DC kaynağa Q1-Q8 anahtarları ile bağlantısı.....   | 17    |
| Şekil 2.10. Dalga sürücü için akım darbeleri ve manyetik akı pozisyonu .....                                 | 18    |
| Şekil 2.11. Normal sürücü için akım darbeleri ve manyetik akı pozisyonu .....                                | 19    |
| Şekil 2.12. Yarım dalga sürücü için akım darbeleri ve manyetik akı pozisyonu.....                            | 20    |
| Şekil 2.13. Bifilar adım motoru .....                                                                        | 21    |
| Şekil 2.14. İdeal iki sargılı adım motoru için moment – açısal konum eğrisi.....                             | 25    |
| Şekil 2.15. Sadece bir sargının, moment – açısal konum eğrisi ile statik sürtünmenin eğrisi.....             | 27    |
| Şekil 2.16. Sargı momentinin statik sürtünme çıkarıldıktan sonra elde edilen son hali .....                  | 27    |
| Şekil 2.17. Rotorun gerçek konumu ile olması beklenen konumunun şekli.....                                   | 27    |
| Şekil 2.18. Tek stator sargısı için tek kutuplu sürme devresi .....                                          | 28    |
| Şekil 2.19. Dört fazlı bir hibrit adım motoru için tek kutuplu sürücü devre.....                             | 29    |
| Şekil 2.20. İki kutuplu adım motoru için iki kutuplu sürücü devre .....                                      | 30    |
| Şekil 2.21. İki gerilim seviyeli devre ve uyartım aralığında değişken devre şekilleri .....                  | 31    |
| Şekil 2.22. Kıyıcı devre ve uyartım aralığında değişken devre şekilleri .....                                | 32    |
| Şekil 2.23. Kıyıcı devre akım dalga şekilleri.....                                                           | 33    |
| Şekil 2.24. Zaman sabitinin devreye olan etkisi .....                                                        | 34    |
| Şekil 2.25. Bir sargının kontrolü ve akım dalga şekilleri.....                                               | 35    |
| Şekil 2.26. Zaman sabiti ayarlama devresi ve akımının dalga şekli .....                                      | 37    |
| Şekil 3.1. PIC 16F877 'nin bacak bağlantıları.....                                                           | 42    |

|             |                                                                                                                                        |    |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 3.2.  | PIC 16F877 blok diyagramı.....                                                                                                         | 43 |
| Şekil 3.3.  | Program bellek yapısı .....                                                                                                            | 48 |
| Şekil 4.1.  | Yazılımın genel blok diyagramı .....                                                                                                   | 49 |
| Şekil 4.2.  | Tuş takımı alt blokları.....                                                                                                           | 50 |
| Şekil 4.3.  | Tuş takımının bağlantı şeması .....                                                                                                    | 51 |
| Şekil 4.4.  | Konum bilgisi alt blokları.....                                                                                                        | 53 |
| Şekil 4.5.  | 7805 gerilim regülatörünün devreye bağlanması .....                                                                                    | 54 |
| Şekil 4.6.  | Kristal osilatörün ve besleme geriliminin PIC 'e bağlantısı .....                                                                      | 55 |
| Şekil 4.7.  | Uygulama devresinde kullanılan unipolar adım motorlarının resmi .....                                                                  | 56 |
| Şekil 4.8.  | PM 35L Unipolar adım motorunun moment grafiği.....                                                                                     | 57 |
| Şekil 4.9.  | ULN 2003 entegresinin iç yapısı ve bağlantı örneği .....                                                                               | 57 |
| Şekil 4.10. | ULN 2003 entegresindeki her bir darlington bağlantısının açık şeması.....                                                              | 58 |
| Şekil 4.11. | X ve Z yönünde hareketi sağlayan motorların sürme devresi.....                                                                         | 59 |
| Şekil 4.12. | Unipolar adım motorlarının sürme devresi ve ULN 2003 entegrelerinin görünüşü .....                                                     | 60 |
| Şekil 4.13. | Bipolar adım motorunun resmi.....                                                                                                      | 60 |
| Şekil 4.14. | Airpax S42M100 bipolar adım motorunun Pull-In ve Pull-Out grafikleri.....                                                              | 61 |
| Şekil 4.15. | Bipolar adım motorunun sürme devresi.....                                                                                              | 62 |
| Şekil 4.16. | Bipolar adım motorunun besleme gerilimini sağlayan devre .....                                                                         | 63 |
| Şekil 4.17. | Bipolar adım motorunun besleme ve sürme devresi.....                                                                                   | 63 |
| Şekil 4.18. | LCD ve analog girişin devreye bağlanması.....                                                                                          | 64 |
| Şekil 4.19. | Besleme devreleri, sürme devreleri, LCD ve analog giriş devrelerinin tamamı .....                                                      | 66 |
| Şekil 4.20. | x, y ve z kartezyen düzlemde hareket eden ve belirlenen noktayı delen matkap .....                                                     | 67 |
| Şekil 4.21. | Matkabın delme yüzeyi ve delinen noktalar .....                                                                                        | 68 |
| Şekil 4.22. | Unipolar ve bipolar adım motorlarının akımlarının iletim ve kesim anındaki dalga şekilleri.....                                        | 69 |
| Şekil 4.23. | Unipolar ve bipolar adım motorlarının bir sargısının enerjisi kesildiğinde sargı üzerinde oluşan ters yöndeki akımın dalga şekli ..... | 69 |
| Şekil 4.24. | Bipolar adım motorunun sargıları üzerindeki gerilim dizisi.....                                                                        | 70 |
| Şekil 4.25. | Daha yüksek bir hız değerinde bipolar adım motorunun sargıları üzerindeki gerilim dizisi .....                                         | 70 |

|             |                                                                                                  |    |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 4.26. | Bipolar adım motorunun bir sargısı üzerindeki gerilimin ve akımın anlık değişimi .....           | 71 |
| Şekil 4.27. | Unipolar adım motorunun sargıları üzerindeki gerilim dizisi.....                                 | 71 |
| Şekil 4.28. | Daha düşük bir hız değeri için unipolar adım motorunun sargıları üzerindeki gerilim dizisi ..... | 72 |
| Şekil 4.29. | Unipolar adım motorunun bir sargısı üzerindeki gerilimi ve akımın anlık değişimi .....           | 72 |





## TABLÖLAR LİSTESİ

| Tablo                                                                                                                                                                                      | Sayfa |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Tablo 2.1. Adım açısı 30° olan değişken relüktanslı adım motorunun saat ibresi yönünde bir tur hareketi için uygulanması gereken kontrol sinyali sırası .....                              | 9     |
| Tablo 2.2. Adım açısı 30° olan bipolar adım motorunun her an için bir sargının yarı bobinin enerjilenmesi ile bir tur hareket etmesi için uygulanması gereken kontrol sinyali sırası ..... | 14    |
| Tablo 2.3. Adım açısı 30° olan bipolar adım motorunun her an için iki sargının yarı bobinin enerjilenmesi ile bir tur atması için uygulanması gereken kontrol sinyali sırası .....         | 14    |
| Tablo 2.4. Adım açısı 30° olan bipolar adım motorunun iki enerjilenme sırası bir araya getirilerek yarım adımlarla bir tur hareketi için gereken kontrol sinyali sırası .....              | 15    |
| Tablo 2.5. Bipolar adım motorunda dalga sürücü için anahtarlama sırası .....                                                                                                               | 17    |
| Tablo 2.6. Bipolar adım motorunda normal sürücü için anahtarlama sırası .....                                                                                                              | 18    |
| Tablo 2.7. Bipolar adım motorunda yarım dalga sürücü için anahtarlama sırası .....                                                                                                         | 19    |
| Tablo 3.1. PIC16F877 'nin donanım özellikleri .....                                                                                                                                        | 41    |
| Tablo 3.2. PIC16F877 hafıza özellikleri .....                                                                                                                                              | 42    |
| Tablo 3.3. PIC16F877 bacak adları ve görevleri .....                                                                                                                                       | 44    |
| Tablo 3.4. PORTA pinlerinin fonksiyonları .....                                                                                                                                            | 45    |
| Tablo 3.5. PORTB pinlerinin fonksiyonları .....                                                                                                                                            | 46    |
| Tablo 3.6. PORTC pinlerinin fonksiyonları .....                                                                                                                                            | 46    |
| Tablo 3.7. PORTD pinlerinin fonksiyonları .....                                                                                                                                            | 47    |
| Tablo 3.8. PORTE pinlerinin fonksiyonları .....                                                                                                                                            | 47    |
| Tablo 4.1. Osilatör hızları ve kullanılacak kondansatör değerleri .....                                                                                                                    | 56    |

## SİMGELER

|           |                                        |          |
|-----------|----------------------------------------|----------|
| $T_1$     | Birinci sargının tutma momenti         | Nm       |
| $T_2$     | İkinci sargının tutma momenti          | Nm       |
| $H$       | Tutma momenti                          | Nm       |
| $I_a$     | Motorun A fazının akımı                | A        |
| $I_b$     | Motorun B fazının akımı                | A        |
| $I_{max}$ | Akımın ulaşabileceği maksimum değer    | A        |
| $S$       | Adım açısı                             | Radyan   |
| $\theta$  | Rotor dönme açısı                      | Radyan   |
| $L$       | Herhangi bir faz sargısının indüktansı | H        |
| $R$       | Direnç                                 | $\Omega$ |
| $D$       | Diyot                                  |          |
| $T_o$     | Zaman sabiti                           | sn       |
| $t$       | Zaman                                  | sn       |
| $V$       | Gerilim                                | V        |
| $V_H$     | Yüksek seviyeli gerilim                | V        |
| $V_L$     | Düşük seviyeli gerilim                 | V        |

## KISALTMALAR

|        |                                                                             |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------|
| ALU    | : Aritmetik lojik işlem birimi                                              |
| A/D    | : Analog / Dijital                                                          |
| BUS    | : Veri yolu                                                                 |
| CCP    | : Yakalama / Karşılaştırma / PWM                                            |
| CNC    | : Merkezi sayısal kontrol (Central Numerik Control)                         |
| CPU    | : Merkezi işlem birimi                                                      |
| DSP    | : Sayısal sinyal işlemcisi                                                  |
| EEPROM | : Elektriksel olarak silinebilen, programlanabilen sadece okunabilir bellek |
| LCD    | : Likid kristal ekran (Liquid Crystal Display)                              |
| MSSP   | : Yönetici senkron seri port                                                |
| OTP    | : Bir kere programlanabilir                                                 |
| PIC    | : Çevresel arabirim kontrolcüsü                                             |
| PM     | : Sabit mıknatıslı                                                          |
| PWM    | : Darbe genişlik modülasyonu                                                |
| RAM    | : Rastgele erişimli bellek                                                  |
| RISC   | : İndirgenmiş bilgisayar komut seti                                         |
| ROM    | : Sadece okunabilir bellek                                                  |
| SDI    | : Seri veri girişi                                                          |
| SDK    | : Seri veri çıkışı                                                          |
| SDO    | : Seri saat girişi                                                          |
| SPI    | : Seri çevresel arayüz                                                      |
| SRAM   | : Statik sıradan erişilebilir bellek                                        |
| ST     | : Schmitt Trigger girişi                                                    |
| TRIS   | : Port yön yazmacı                                                          |
| USART  | : Genel seri senkron / asenkron verici alıcı                                |
| VR     | : Değişken relüktanslı                                                      |

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### PIC MİKRODENETLEYİCİ YARDIMI İLE ADIM MOTORUNUN KONUM KONTROLÜ

Reşat ÇELİKEL

Fırat Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı

2005, Sayfa : 78

Adım motorlarının, endüstriyel uygulamadaki önemi yarıiletken teknolojinin gelişimine paralel olarak artmıştır. Adım motorları sayısal kontrol sistemlerinde, makine tablalarının kontrolünde, yazıcılarda, valflerde, disk sürücülerinde ve daha birçok uygulamalarda kullanılmaktadır.

PIC mikrodeneleyicileri Microchip firması tarafında üretilmektedir. PIC16F877 mikrodeneleyicisi yüksek çalışma frekansına sahiptir. Ayrıca fiyatı da oldukça ucuzdur. Bununla beraber bir yazılım ile birlikte çevresel birimleri kontrol edebilen çok yönlü bir mikrodeneleyicidir.

Bu tez çalışmasında, x, y, ve z koordinatlarında hareket kabiliyeti olan bir sistem gerçekleştirilmiştir. Sistemin görevi x ve y yönündeki koordinatları bilinen noktanın z yönünde hareket eden bir matkap ile delinmesidir.

Bu projede ilk olarak adım motorları seçilmiş ve adım motorlarına uygun kontrol devreleri tasarlanmıştır. Daha sonra donanıma uygun olarak, sistemin çalışması için gerekli yazılım yapılmıştır. Bu proje içerisinde tuş takımı bir giriş birimi olarak ve LCD bir çıkış birimi olarak kullanılmıştır.

Son olarak x ve y koordinatları girilen noktanın bir matkap ile delinmesi olayı gerçekleştirilmiştir. Böylece bu tez çalışması ile mikrodeneleyici ve adım motoru ile endüstriyel uygulamalarda yapılabilecekler hakkında bir fikir sahibi olunmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Adım motoru, Mikrodeneleyici, PIC

## **ABSTRACT**

Master Thesis

# **POSITION CONTROL OF STEPPER MOTOR USING PIC MICROCONTROLLER**

**Reşat ÇELİKEL**

Firat University

Graduate School of Natural Applied Science

Department of Electrical Education

2005, Page:78

Importance of stepper motors have increased in parallel with the improvement in semiconductor technology. Stepper motors are used in numerical control systems, control of machine tools, printers, valves, disc drivers and etc.

PIC microcontrollers are produced by Microchip Company. PIC16F877 microcontroller has a high operating frequency. And its price is also very cheap. However, it is a may directional microcontroller that can control the circumferencal units, with a software.

In this thesesis project, a system which has a moving capability through x, y and z axes has been realized. Mission of the system is to drill a point on the x-y plane of which its coordinates are already known.

In this project, firstly the stepper motors used in the system have been choosed, and then appropriate control circuits for these motors have been designed. A software has been built for the system working and fits the hardware. In addition, a keyboard and LCD display have been used as parts of the system and input/output units.

Finally, for certain points on the x-y plane of which their x and y coordinates are given have been drilled using the desired system. Thus, by designing such a system some ideas have been gained about microcontroller and stepper motors' applications in industry.

**Keywords:** Stepper motor, Microcontroller, PIC

## 1. GİRİŞ

Teknolojinin çok hızlı geliştiği günümüzde elektrik motorları endüstride, bilgisayarlarda ve evlerde kullanılan birçok cihazda kullanılmaktadır. Elektrik motorlarının kullanılması alanlarının bu kadar yaygınlaşmasından dolayı hız ve konum kontrolünün önemi daha da artmıştır. Günlük hayatımıza bu kadar çok giren elektrik motorlarının hız ve konum kontrollerinin ihtiyaca cevap verebilecek hassasiyette yapılabilmesi için oldukça karmaşık ve pahalı sistemler gerekmektedir. Çünkü elektrik motorlarının hız ve konum kontrolü yapılırken geri beslemeli sistemlere ihtiyaç duyulur. Geri besleme için takometre veya encoder gibi elemanlara ve bu elemanların gönderdiği sinyalleri işleyip, sinyallerden elde edilen sonuçların sisteme yansıtılmasını sağlayan ara birimlere ihtiyaç duyulur.

Bu noktada diğer elektrik motorlarından farklı olarak yön, hız ve konum kontrolünün daha basit ve ucuz sistemlerle gerçekleştirilebileceği adım motorları karşımıza çıkmaktadır. Çünkü adım motorları yapısı gereği diğer elektrik motorlarının kontrolü için ihtiyaç duyulan geri besleme sistemlerine ihtiyaç duymazlar. Geri beslemesiz kontrolü bir PC veya daha basit olarak bir mikroişlemci tarafından yapılabilir. Adım motorlarının birçok özel uygulama için kullanım alanları vardır. Çünkü adım motorları, gerçekte sayısal formdaki giriş bilgisini mekanik harekete dönüştürür [Toro, 1990].

Adım motorları endüstride, dijital kontrol sistemleri ile donatılan endüstriyel makinelerde iş parçasının belirli bir programa uygun olarak işlenmesi, delinmesi ve benzeri işlemler için kullanılır. Yine endüstriyel makinelerde, makine tablasının iki eksenli konum kontrolünde, endüstriyel fırınlarda yakıt miktarının kontrolünde, direnç kademelerinin veya elektrot konumunun kontrolü gibi işlemlerin yapılmasında oldukça geniş bir kullanım alanı vardır. Adım motorlarının diğer kullanım alanlarından bahsedilecek olunursa; çok hassas pozisyon kontrolü gerektiren bir robot kolunun hareketinde, yazıcıda kâğıdın yazıcı tarafından alınmasında, kartuş kafasının hareketinde ayrıca çiziciler, teypler, valfler ve CD-ROM 'lar da kullanılmaktadır [Humphries, 1988].

Teknolojideki hızlı gelişmeler elektrik motorlarının ve dolayısıyla adım motorunun kontrolündeki zorlukların giderilmesine katkıda bulunmuştur. Karmaşık ve pahalı olan bu kontrol sistemleri, mikrodenetleyici tabanlı kontrol sistemlerinin geliştirilmesiyle yüksek performanslı ve daha basitleştirilmiş şekilde yapılabilir. Bu özellik aynı zamanda kontrol sisteminin maliyetini de önemli ölçüde etkilemektedir.

Teknolojinin bu hızlı gelişimine paralel olarak mikrodenetleyicilerin hızları ve teknik özellikleri de çok hızlı bir değişime uğramıştır. Hatta bu hızlı değişimi takip etmek neredeyse imkansız hale gelmiştir. Mikrodenetleyiciler bu değişim hızı sonucunda DSP (sayısal sinyal

işlemci) 'nin çalışma hızı ve işlem yapma yeteneklerine yaklaşmıştır. Çok yakın zamanda, fiyatının ucuz olması ve sinyal işleme yeteneklerinin hızla artması gibi özelliklerinden dolayı DSP 'lerin yerlerine kullanılmaya başlanırsa hiç şaşdırmamak gerekir. Aynı zamanda mikrodnetleyicilerin bu özellikleri ile motor kontrol sistemlerine ve yapılmak istenen çeşitli endüstriyel çalışmalara katkısı çok fazla olacaktır. Bu tez çalışması günümüzde önemini bu kadar artıran mikrodnetleyicilerin kullanım alanlarıyla ilgilidir.

Son yıllarda Microchip firması tarafından üretilen PIC mikrodnetleyicileri özelliklerinin gelişmesi ve fiyatlarının oldukça düşmesiyle, motor kontrol uygulamalarında kendisine yer edinmiştir. Bu mikrodnetleyiciler normalde kontrol sisteminde bulunması gereken birçok ara birimi bünyesinde bulundurduğu için uygun bir yazılım doğrultusunda bu ara birimleri aktif hale getirir ve bu birimlerin kontrol sistemine eklenmesine gerek kalmaz. Bununla birlikte yine yapılabilecek uygun bir yazılım doğrultusunda, blok halinde bir sistemin kontrolü de sağlanabilir. Mikrodnetleyicilerin kullanım alanları düşünülecek olunursa bunun neredeyse sınırı yoktur. Çünkü kullanım alanı tamamen yazılımı ve tasarımı yapacak kişinin düşünme yeteneğine kalmıştır. Mesela bir şebekede akım gerilim bilgileri alınarak güç hesabında, üç fazlı bir asenkron motorun aşırı akım, gerilim koruma gibi kontrol birimlerinin içinde bulunduğu koruma gurubunda veya bilgisayar ile haberleşen bir ara işlem biriminde kullanılabilir.

Adım motorlarının ve mikrodnetleyicilerin gelişimine paralel olarak son yıllarda yapılan uygulamalar ve geliştirilen prototipler oldukça artmıştır. Genellikle robotik, konum kontrolünün önem kazandığı taşıyıcı araç, takım tezgahları ve değişik araçların hassas hareketi gibi alanlarda çalışmalar yapılmıştır. Aşağıda tarihsel süreç içerisinde adım motorları ve mikrodnetleyiciler ile ilgili farklı uygulama alanlarında yapılan çalışmalar verilmiştir.

1989 'da Türay, x ve y düzleminde hareket için adım motorunu yarım adım ve mikroadımlarla çalıştırmıştır [Türay, 1989].

1991 'de Zhibi, sabit mıknatıslı adım motorunun konum kontrolünü, kesin doğrusallaştırıcı yöntemi ile d-q dönüşümlerini gerçekleştirerek incelemiştir [Zribi ve Chiasson].

1993 'de Chiasson, sabit mıknatıslı adım motorunun doğrusal olmayan hızda çalışmasını incelemiştir [Chiasson ve Novotnak, 1993].

1996 'da Gürbüz, genel özellikleri olan bir torna tezgahını bilgisayar kontrollü bir CNC torna tezgahına dönüştürürken x ve z yönlerindeki hareketi sağlayan adım motorlarının seçimi ile ilgili bir çalışma yapmıştır [Gürbüz, 1996].

1997 'de Caldwell, yakın zaman içinde mikrodnetleyicilerin ticari amaçla nerelerde ve nasıl kullanılacağı ile ilgili bir çalışma yapmıştır [Caldwell ve Rennelsi 1997].

1997 'de Williams, bir teleskopun iki yöndeki hareketi ve teleskop üzerindeki bir aynanın kontrolü için adım motorları ve bir ara işlem birimi olarak ta PIC kullanılmıştır. Teleskop ile aynı noktalara bakıldığında eskisine göre daha iyi bilgiler elde edilmiştir [Williams, 1997].

1998 'de Etienne, etrafına yerleştirilen algılayıcılar ile aracın kendisini iki engel arasında merkeze yerleştirecek şekilde hareket etmesini sağlayan taşıtı tasarlamıştır. Hareketi sağlayan adım motorlarıdır. Kontrolü ise PIC 16C74 ile sağlanmıştır [Etienne ve diğ., 1998].

1998 'de McNeill, algılayıcılar ile gideceği yönü belirleyen bir robot geliştirmiştir. Öğrenen algoritmayı simülasyonla beraber uygulamasını da yaparak farkları izlenmiştir [McNeill ve diğ., 1998].

1999 'da Billingsley, etrafına yerleştirilen algılayıcılar ile yönünü kaybetmeden yol çizgisini takip eden bir robot tasarlamıştır. Robotun hareketini adım motorları, kontrolünü ise PIC sağlıyor [Billingsley ve Phiythan, 1999].

1999 'da Saliah, adım motorunun internet ve bilgisayar ağları yardımıyla uzaktan kontrolünü sağlamış ve laboratuardaki cihazlar yardımıyla verileri incelenmiştir [Saliah, Nurse ve Abecassis, 1999].

1999 'da Chirikjian, Küresel koordinatlarda hareket yeteneği olan bir adım motorun tasarlamış ve kullanım alanlarını göstermiştir [Chirikjian ve Stein, 1999].

2000 'de Shah, sensorless adım motoru kontrolü üzerinde çalışmalar yapmıştır. PIC 16F877 kullanarak uygulaması gerçekleştirilip, matlabda yapılan simülasyon sonuçları ile uygulama sonuçları karşılaştırılmıştır [Shah, 2000].

2000 'de Birch, yüksek hızlara ulaşabilen bir adım motoru ve küçük valfler kullanarak bir mikro robot tasarlamıştır. Robotun kontrolü PIC 16C77 kullanılarak yapılmıştır [Birsh ve diğ., 2000].

2001 'de Doğançay, metal işlemede kullanılan bir torna tezgahının eeprom kontrolü ile seri üretim için modernizasyonu sağlanmıştır. Adım motorları x ve y hareketini eeprom hafızasındaki bilgileri kullanarak otomatik olarak yapar [Doğançay ve Çolak, 2001].

2001 'de Grove, PIC mikrodenetleyicisini kullanarak dikey vertical integrasyon yöntemi ile dc motorun hız kontrolünü gerçekleştirmiştir [Grove ve diğ., 2001].

2002 'de Obuchowski, su altı taşıma aracı tasarlamıştır. Bu araçta hareketin yönü iki adet adım motoru ile sağlanmıştır. Adım motorlarının kontrolü ve algılayıcılardan gelen sinyallerin işlenmesi amacıyla PIC kullanılmıştır. Kamera ile görüntünün aktarılabilmesi için ise PC ana kartı kullanılmıştır [Obuchowski ve diğ., 2002].



2002 'de Smith, resim stüdyolarında kullanılması amacıyla bir robot tasarlamıştır. Robotun hareketi adım motorları ile, adım motorlarının kontrolü PIC ile sağlanmıştır. Ayrıca PC ile haberleşme amacıyla da PIC kullanılmıştır [Smith ve Resnik, 2000].

2003 'de Walker, IR sinyali takip eden hedef izleme sistemi yapmıştır. IR sinyalinin yönüne göre adım motorun her iki yönde hareketi mikrodenetleyici yardımı ile sağlanarak hareket gerçekleştirilmiştir [Walker ve Aström, 2003].

2003 'de Royston, bulunduğu odanın veya yerin kendisinden olan uzaklıkların ölçen ve bu sayede proje çizimlerini kolaylaştıran bir sistem kurmuştur. Sistemin hareketi adım motoru ile kontrolü ise PIC mikrodenetleyici ile sağlanmaktadır [Royston, 2003].

2004 'de Youngblood, algılayıcıların gönderdiği sinyalleri işlemek ve bilgisayar ile haberleşmeyi sağlamak için PIC 16F877 'nin, hareketli kısımların hareketi içinde adım motorlarının kullanıldığı birçok yönden kontrol edilebilen akıllı ev uygulamasını gerçekleştirmiştir [Youngblood ve diğ., 2004].

2004 'de Radmamesh, hareketinin kontrolü PIC ve adım motorları ile sağlanan, üzerindeki kamerayla CPU 'ya yön bilgisini gönderen bir robot tasarlamıştır [Radmamesh ve diğ., 2004].

2004 'de Al-Sayed, PIC 16F874 ile DC motorun hız kontrolünü, kablosuz olarak ve hız değerinin PC 'den girileceği şekilde yapmıştır. Hız kontrolü PWM yöntemi ile yapılmıştır. PWM 'nin değeri bilgisayardaki fuzzy lojik sistem ile belirlenmiş ve encoder vasıtası ile alınan hız bilgisi PIC tarafından işlenerek PC 'ye kablosuz olarak gönderilmiştir [Al-Sayed ve Khacha, 2004].

2004 'de Sutphen, bir ışık kümesini algılayan ve o noktaya en kısa yoldan giden bir robot ekibi tasarlamıştır [Matson ve diğ., 2004].

2004 'de Weintraub, bir lazer tabancadan çıkan Infra red ışınını takip eden bir robot tasarlamıştır. Hareket adım motorları ve DC motor ile sağlanmıştır. Sistemin kontrolü için ise PIC 16F877 kullanılmıştır [Weintraub ve diğ., 2004].

2004 'de Piraud, adım motorları ve PIC kullanarak yüksek gerilim hatlarına ulaşmak amacıyla bir alet tasarlamıştır [Piraud, ve diğ., 2004].

2004 'de Crespi, PIC mikrodenetleyicisi kullanarak karada sürünen ve suda yüzen bir robot yılan tasarlamıştır [Crespi ve diğ., 2004].

2005 'de Fitzpatrik, klinik bir deneyin simülasyonunu yapmak amacıyla adım motoru kullanılmıştır. Deney düzgün olmayan soluk alış verişin temsil edildiği bir deneydir [Fitzpatrik, 2005].

Yapılan çalışmalara genel olarak bakılırsa adım motorlarının ve mikrodenetleyicilerin kullanıldığı sistemler daha çok endüstriye yönelik çalışmalardır. Bu çalışmalarda sistemlerin

daha kullanışlı ve ucuz yöntemlerle kontrol edilmesi istenmiştir. Ayrıca bilgisayar kontrollü sistemlerin bilgisayar ile haberleşmesinde veya bilgisayarın verdiği komutları yerine getiren bir ara işlem birimi gibi yerlerde mikrodeneleyiciler görev yapmıştır.

Bu çalışmada yukarıda belirtildiği gibi endüstride bu kadar yoğun kullanım alanı bulunan adım motorlarının devir yönünü, hızını ve konumunu mikrodeneleyici mantığıyla kontrol etmek amacıyla gerekli yazılım ve donanım arabirimleri tasarlanmıştır.

Öncelikle adım motorunun kontrol edilebilmesi için adım motorunun tanınması gerektiğinden, gerekli araştırmalar yapılmış ve araştırmalar doğrultusunda en uygun motorlar seçilmiştir. Bir sonraki adım olarak amaca hizmet edebilecek yeteneklere sahip ve fiyat yönünden en uygun mikrodeneleyici araştırılmış, PIC 16F877 'de karar kılınmıştır ve bu mikrodeneleyici her yönüyle incelenmiştir.

Uygulama başlangıcında ilk olarak motorlardan bir tanesi için gerekli kontrol devresi ve yazılım yapılarak motorun çalıştırılması ve verilen komutlara uyması sağlandı. Bu gerçekleşince bir çıkış birimi olarak LCD 'ye veri gönderilmesi ve motorun konumunun LCD 'de gösterilmesi gerçekleştirilerek bir sonraki adıma geçildi ve motora hangi konuma gideceğini bir bilgi olarak gönderen tuş takımı uygulaması tamamlandı. Daha sonra kullanılan mikrodeneleyicinin özelliklerinden ve avantajlarından faydalanılarak neler yapılabileceğine dair bir örnek teşkil etmesi amacıyla X-Y-Z düzleminde hareket yeteneği olan bir deney düzeneği hazırlandı. Bu düzeneğe üzerine X yönünde hareket için iki adet unipolar adım motoru, Y yönünde hareket için bir adet bipolar adım motoru ve Z yönünde hareketi sağlayacak olan bir adet unipolar adım motoru yerleştirildi.

Bir sonraki aşama olarak motorların hareketini, mikrodeneleyicinin, LCD' nin ve tuş takımının çalışmasını sağlayacak olan devreler bir kart üzerinde toplandı ve bunların çalışmasını sağlayacak yazılım yapılarak mikrodeneleyiciye yüklendi. Bu deney düzeneği artık kullanılacak hale gelmiştir. Üç ekseninde hareket sağlayarak X-Y yönünde belirtilen noktalara gidip, bu noktada üçüncü ekseninde işlem yapma yeteneğine sahiptir.

Yapılan tez çalışmasında mikrodeneleyici yardımı ile adım motorunun hız, konum ve dönüş yönü kontrolüyle uygulamada neler yapılabileceği ve PIC 16F877 mikrodeneleyicisinin özellikleri ile bu özelliklerin hangi amaçlar doğrultusunda kullanılabileceği gösterilmek istenmiştir. Bu amaçla yapılan tezin yeni çalışmalara bir zemin oluşturabileceği düşünülmüştür.

Tezin giriş bölümünde konu ile ilgili olarak yapılan çalışmalara yer verilmiş ve tezin genel bir tanıtımı yapılmıştır.

İkinci bölümde adım motorlarının yapısı, çeşitleri ve çalışma prensibi ile ilgili bilgiler ile beraber adım motorlarının çalışma modları ve sürme devreleri ile ilgili gerekli olan bilgiler verilmiştir.

Üçüncü bölümde kontrol devresinin temelini oluşturan PIC mikrodeneleyicilerin yapısı, çalışması ve özellikleri ile ilgili bilgiler verilmiştir.

Dördüncü bölümde ise iki ve üçüncü bölümde verilen bilgileri kullanarak sistemin donanımsal birimleri tasarlanmış ve yazılımı gerçekleştirilmiştir.



## 2. ADIM MOTORLARI

Bütün döner elektrik motorları temel olarak bir stator, bir rotor ve sargılardan oluşur. Geleneksel bir elektrik motoruna enerji verildiği zaman, rotor güç kesilene kadar kesintisiz olarak döner. Adım motorunun çalışması bundan farklıdır. Çünkü adım motoru sargılarına uygulanan darbe gerilimi ile çalışır, bir adım hareketini tamamladıktan sonra sargı uçlarında enerji olmasına rağmen motor dönmez. Adım motoru tahrik devresinden bir adım darbesi aldığı zaman, motorun özelliğine göre rotor belli bir açıda döner ve bir sonraki adım darbesini alana kadar durur. Dolayısıyla maksimum motor yükünün aşılması koşuluyla milin toplam açısal yer değiştirmesi, adım açısı ile verilen darbe sayısının çarpımına eşittir. Mil konumunun, adım darbelerinin sayısı ile orantılı olduğu söylenirse bu ilişki daha da basitleşir, çünkü adım motorundaki adım açısı sabittir.

Adım motorları motor kontrolü sahasında özel bir yere sahiptirler. Bu motorlar en çok ölçme tekniğinde ve kontrol uygulamalarında kullanılır. Kullanım alanlarına mürekkep püskürtmeli yazıcılar, CNC makineleri ve volumetrik pompalar şeklinde birkaç örnek verilebilir. Bütün adım motorlarında ortak birçok özellik bulunması, bu tür uygulamalara en uygun motorlar olmalarını sağlamaktadır. Bu ortak özellikler maddeler halinde şu şekilde sıralanabilir.

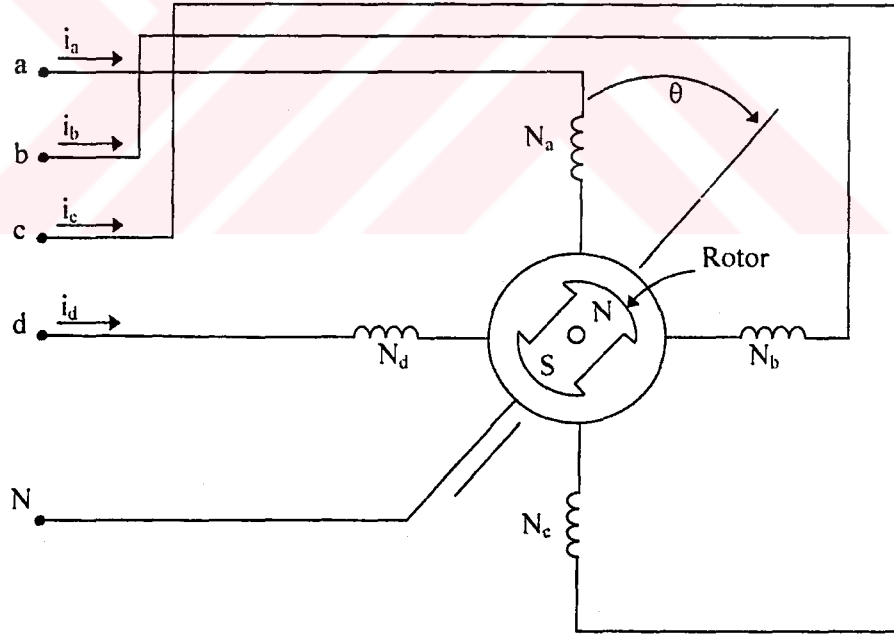
1. Fırçasız Olmaları. Adım motorlarında fırçalar bulunmamaktadır. Geleneksel bazı motorlarda fırça ve komutator elemanlarının bulunması istenmeyen elektriksel ark 'a neden olmaktadır. Bu da motorun çalıştığı çevre ortamına bağlı olarak bazen tehlike arz etmektedir.
2. Yükten Bağımsız Olmaları. Motorun yük momenti anma momentini geçmediği sürece adım motorlarının yer değiştirme (konum) hareketi yükten bağımsızdır.
3. Açık Çevrimle Konum Almaları. Adım motorları sayılı adımlarla hareket ederler. Motor moment sınırlamaları içerisinde hareket ettiği sürece, her an için motor milinin konumu, bir geri besleme mekanizmasına gerek kalmadan bilinmektedir.
4. Tutma Momentinin Bulunması. Adım motorları motor milinin durağan (sabit) konum almasını sağlayabilmektedir.
5. Kontrol Cevabının İyi Olması. Adım motorları yol almaya, durmaya ve ters yönde dönmeye karşı çok iyi cevap vermektedir.

## 2.1 Adım Motoru Türleri

Sabit mıknatıslı, değişken relüktanslı (VR) ve hibrit adım motorları olmak üzere üç temel adım motor türü bulunmaktadır. Değişken relüktanslı adım motorunda yumuşak demirden dişli rotor bulunurken, sabit mıknatıslı adım motorunda sabit mıknatıslı bir rotor bulunmaktadır. Hibrit adım motorlarında ise rotor, hem değişken relüktanslı adım motorundaki rotorun hem de sabit mıknatıslı adım motorundaki rotorun özelliklerini taşımaktadır.

Adım motorunun stator veya durağan kısmı üzerinde çeşitli sargılar bulunmaktadır. Elektriksel bakış açısından statordaki bu çok fazlı sargıların statora yerleştirilmesi veya statorda düzenlenmesi, adım motorlarının çeşitli türlerini birbirinden ayıran birinci faktördür. Elektriksel ve kontrol sistemi perspektifinden, değişken relüktanslı adım motorları diğer adım motorlarından farklıdır. Hem sabit mıknatıslı hem de hibrit adım motorlarında stator sargıları “unipolar”, “bipolar” veya “bifilar” olacak şekilde yerleştirilebilir.

Şekil 2.1 'de statoru 4 faz sargılı, rotoru 2 kutuplu sabit mıknatıslı bir adım motoruna ait elektriksel prensip bağlantı şeması görünmektedir. Rotoru 2 kutuplu adım motorunda stator sargıları  $N_a$ ,  $N_b$  ve  $N_c$  aynı anda ve  $N_d$  sırasına göre uyarılarak  $\theta=0^\circ$ ,  $\theta=45^\circ$ ,  $\theta=90^\circ$  'lik dönme açıları elde edilebilir [Fitzgerald, 1992].



Şekil 2.1: Statoru 4 faz sargılı ve rotoru 2 kutuplu sabit mıknatıslı adım motorunun elektriksel şeması.

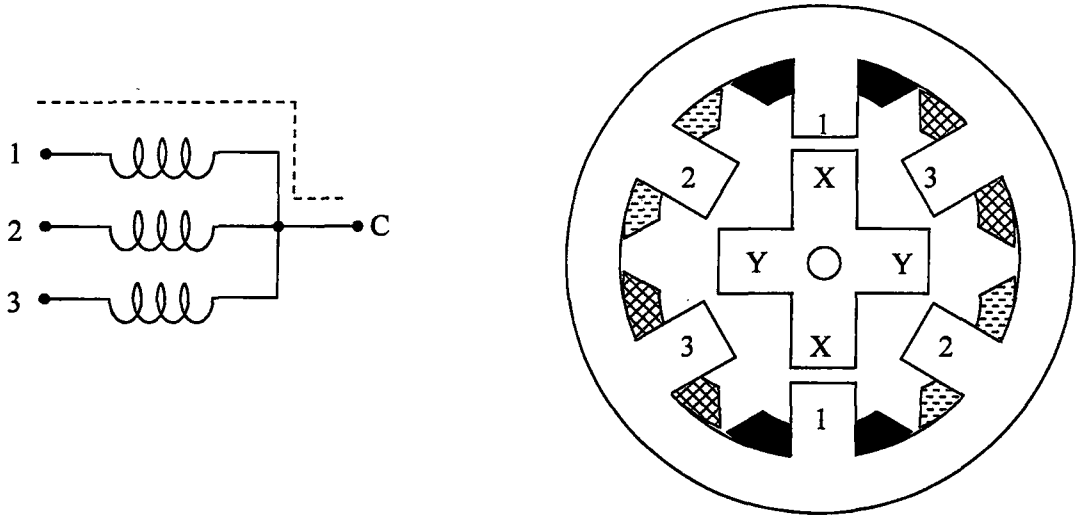
### 2.1.1 Değişken Relüktanslı Adım Motorları

Değişken relüktanslı veya anahtarlamalı değişken relüktanslı adım motorlarının ortak bir uca bağlı üç ile beş arasında değişen sargıları bulunmaktadır. Şekil 2.2 'de adım açısı  $30^\circ$  olan değişken relüktanslı bir adım motorunun statorundaki 3 faz sargısının kesiti verilmektedir. Bu motorun rotorunda dört diş ve statorunda altı kutup bulunmaktadır. Aynı zamanda bu motorda her bir sargı karşılıklı duran kutuplar üzerine sarılmıştır. X ile işaretlenen rotor dişleri, 1 numaralı faz sargısı enerjilendiği takdirde birinci sargıya doğru çekilirler. Rotor dişlerinin birinci sargıya doğru çekilmesinin nedeni, sargının ve rotorun etrafında meydana gelen manyetik akıdır. Böylece rotor, üzerinde meydana gelen bir moment sayesinde en kısa akı yolu oluşacak şekilde enerjilenmiş bulunan sargıların hizasına doğru hareket eder. 1 no 'lu sargının enerjisi kapalı ve 2 no 'lu sargının enerjisi açık tutulduğunda motor saat ibresi yönünde hareket edecektir. Böylece, y ile işaretlenen rotor dişleri 2 no 'lu sargıya doğru çekilir. Y ile işaretli rotor dişleri 2 no 'lu sargının hizasına geldiğinde ise motor saat ibresi yönünde  $30^\circ$  lik açısal yol kat etmiş olacaktır. Saat ibresi yönünde sürekli bir hareket elde etmek için, stator çevresinde bulunan sargıların enerjisi sıralı bir şekilde açılıp kapanması gerekir. Tablo 1.1 'de verilen kontrol sinyali sırası, şekil 2.2 'de verilen motoru saat ibresi yönünde 12 adım veya bir tur hareket ettirecektir.

Tablo 1.1: Adım açısı  $30^\circ$  olan değişken relüktanslı adım motorunun saat ibresi yönünde bir tur hareketi için uygulanması gereken kontrol sinyali sırası.

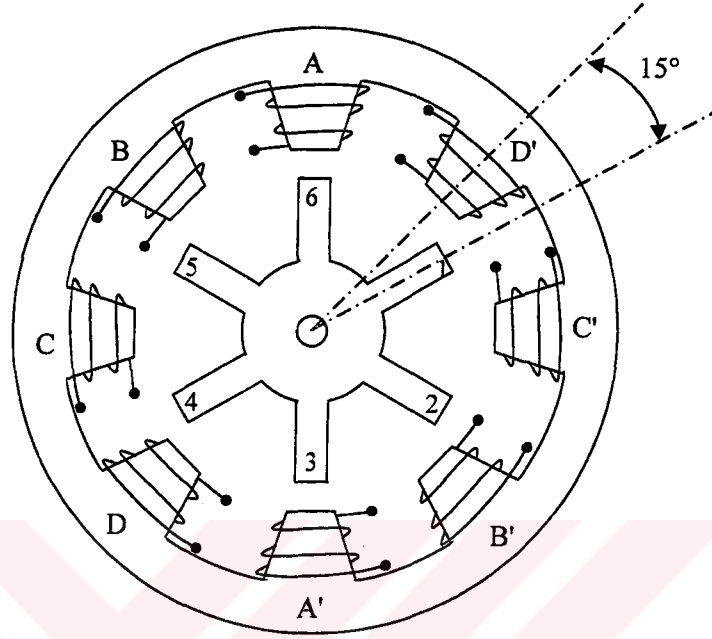
|        |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|--------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Sargı1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| Sargı2 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| Sargı3 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |

→ Zaman



Şekil 2.2: Değişken relüktanslı adım motoru.

Şekil 2.3 'de dört faz sargılı değişken relüktanslı adım motorunun şekli görülmektedir. Statorda 8 diş ve rotorda ise 6 diş bulunmaktadır [Toro, 1990]. Bu da, iki stator dişi ile iki rotor dişi aynı hizaya gelecek şekilde ayarlandığı zaman, diğer bütün stator dişlerinin ekseni ile, rotor dişlerinin ekseni arasındaki açı farkı  $15^\circ$  olacağı anlamına gelir.



Şekil 2.3: Dört faz sargılı, altı rotor dişli değişken relüktanslı adım motoru.

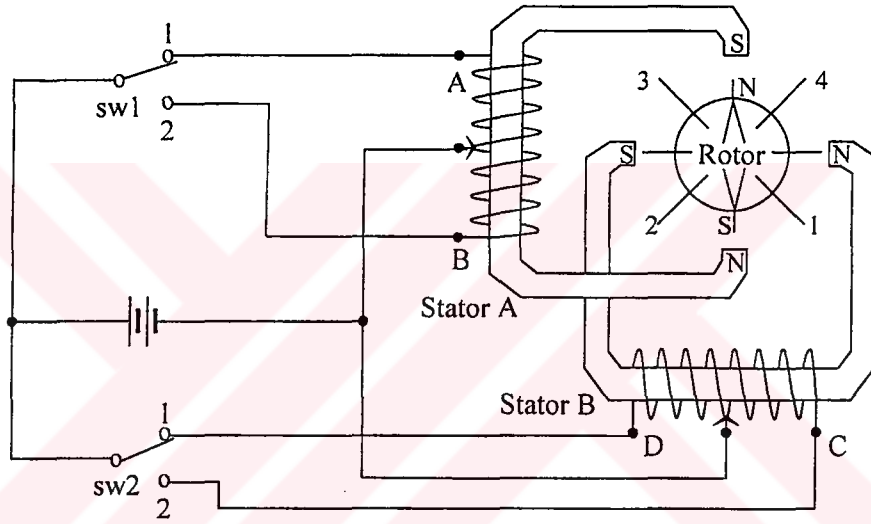
Şekil 2.3 'deki adım motorunun A fazı enerjilendiği zaman rotor, stator alanıyla şemada gösterildiği gibi bir konuma ayarlanacaktır. Bu noktada DC kaynağın B fazına anahtarlanması durumunda rotor, saat ibresi yönünde adımlanarak  $15^\circ$  adım hareketi yapacaktır. Rotorun bulunduğu konumda iken B fazı yerine D fazı enerjilendirilirse, bu durumda rotor saat ibresinin tersi yönünde  $15^\circ$  'lik adım hareketi yapacaktır. Dolayısıyla, saat ibresinin tersi yönünde dönüş için faz sargılarının enerjilenme sırası A,D,C,B,A şeklinde iken saat ibresi yönünde dönüş için faz sargılarının enerjilenme sırası A,B,C,D,A şeklindedir.

Şekil 2.2 'deki motor en temel değişken relüktanslı adım motorudur. Pratikte daha küçük adımlarla hareket edebilmek için, bu motorların daha çok stator kutupları ve rotor dişleri bulunmaktadır. Statordaki kutup sayısını arttırmak için stator sargı sayısını 4 veya 5 'e çıkarmak mümkündür ancak, genellikle buna çözüm olarak yani daha küçük adımlı hareket için dişli rotora göre çalışan dişli stator kutupları kullanılır. Bu yaklaşıma göre çalışan ve piyasada bulunan değişken relüktanslı adım motorlarının adım açısı yaklaşık olarak  $1^\circ$  olabilmektedir.



### 2.1.2 Sabit Mıknatıslı Adım Motorları

Sabit mıknatıslı (PM) adım motoru, sabit mıknatıslı bir rotordan ve sargılı bir statordan oluşur. Herhangi bir faz sargısı enerjilendiğinde rotor, stator sargısında oluşan manyetik kutuplanmaya uyum sağlayacak şekilde açısal bir dönme hareketi yapar. Statorun diğer faz sargıları da belli bir sıraya göre uyarılarak sürekli bir dönme hareketi gerçekleştirilir. Stator sargılarından belli bir faz sargısına gerilim uygulandığında rotor adım hareketi yaparak belli bir sabit pozisyonda kalır. Rotorun bulunduğu konumda üretilen momente “tutma momenti” denilir. Aynı zamanda rotoru bulunduğu konumdan koparmak için gerekli moment değeri de tutma momenti kadardır. Sabit mıknatıslı adım motoruna ait devre şeması şekil 2.4 'de verilmektedir.



Şekil 2.4: İki faz sargılı, rotoru iki kutuplu sabit mıknatıslı adım motoru.

Şekil 2.4 'te, sw1 ve sw2 anahtarlarının bulundukları konuma göre sabit mıknatıslı adım motorunun, stator A ve D faz sargılarının enerjili olduğu görülmektedir. Böyle olduğu takdirde rotor şekil üzerinde gösterilen 1 konumundadır. Rotorun bulunduğu 1 konumunda iken sw2 anahtarı konum değiştirilerek C faz sargısını beslemesi durumunda, stator sargılarındaki manyetik kutuplanma değişeceğinden rotor  $90^\circ$  'lik adım hareketi yaparak 2 konumuna geçecektir. Daha sonra rotor bu konumda iken sw1 anahtarı ile B faz sargısı enerjilenecek olursa rotor yine  $90^\circ$  'lik adım hareketi yaparak 3 konumuna geçecektir. Son olarak rotor 3 konumunda iken sw2 anahtarı yardımıyla yine D faz sargısı enerjilenecek olursa, rotor 3 konumundan  $90^\circ$  'lik açısal yol alarak 4 konumuna geçecek ve daha sonra sw1 anahtarı ile tekrar A faz sargısı enerjilenirse rotor 4 konumundan 1 konumuna geçerek bir turunu tamamlamış olacaktır. Görüldüğü gibi bu anahtarlama sırasına göre rotor saat ibresi yönünde dönmektedir.



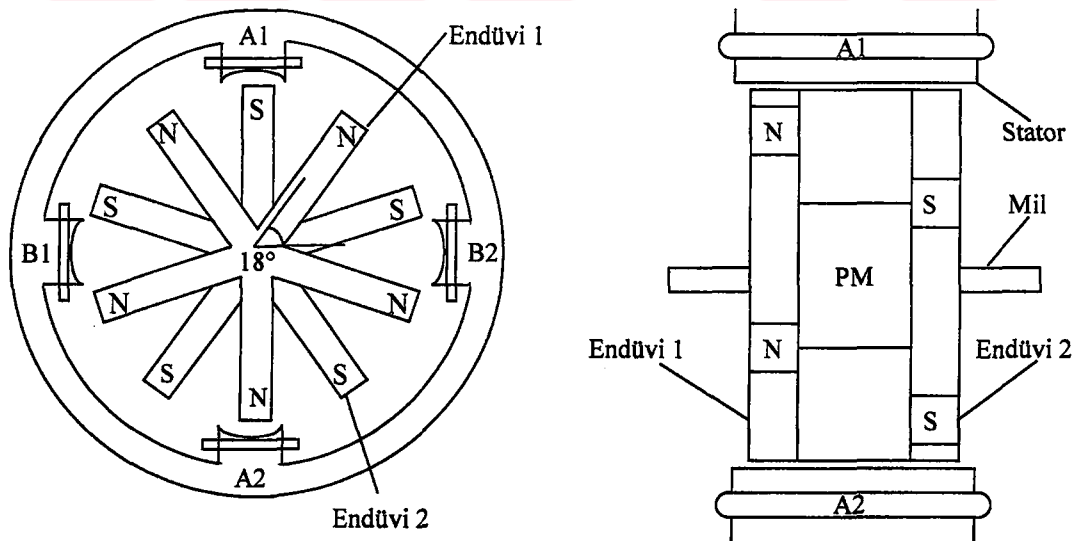
Anahtarlama sırası değiştirilerek motorun saat ibresinin tersi yönünde dönmesi sağlanabilmektedir.

Şekil 2.4 'teki adım motorunun adım açısı  $90^\circ$  olmasına rağmen sw1 ve sw2 anahtarlarının, aynı anda A ve B veya C ve D faz sargılarının enerjisini kesmek için üçüncü kontakları bulunacak olursa, bu motoru yarım adım, yani  $45^\circ$  'lik açılarla hareket ettirmek mümkündür. Örneğin motor 1 konumunda iken sw2 anahtarı ile hem C hem de D sargılarının enerjisi kesildiği kabul edilirse bu durumda, manyetik alan oluşturmada etkili olabilecek statorun A veya B faz sargıları olduğundan rotor  $45^\circ$  'lik açı yaparak 1 ile 2 konumlarının ortasına çekilecektir. Daha sonra yine sw2 anahtarı yardımı ile C faz sargısı enerjilenecek olursa, rotor bu sefer tam adımı tamamlayarak 2 konumuna geçecektir.

### 2.1.3 Hibrit Adım Motorları

Hibrit adım motorunun çalışma prensibi hem sabit mıknatıslı adım motorunun hem de değişken relüktanslı adım motorunun çalışma prensibine dayanmaktadır. Hibrit adım motorunda rotor, değişken relüktanslı adım motorundaki gibi çok dişlidir. Ayrıca hibrit adım motorunda rotorun mili çevresinde aksel yol boyunca bir sabit mıknatıs bulunmaktadır. Hibrit adım motorunun rotorundaki dişler sayesinde hava aralığında akı çizgilerinin nerelerden geçmesi, gerektiği belirlenir. Rotor üzerindeki konsantrik sabit mıknatıs ile, değişken relüktanslı ve sabit mıknatıslı adım motorlarına göre hibrit adım motorunun karakteristikleri artmaktadır.

Adım adım hareket ettirmek için, hibrit adım motorları da unipolar veya bipolar adım motorları gibi kontrol edilirler.



(a) Hibrit adım motorunun kutuplarının görünüşü (b) Sabit mıknatısın armatürler arasına yerleştirilmesi

Şekil 2.5: Statoru dört kutuplu, rotoru beş kutuplu hibrit adım motoru.

Şekil 2.5(a) 'da statoru 4 kutuplu rotoru 5 kutuplu hibrit adım motoru görülmektedir. Birinci armatür tamamen N kutbunu ikinci armatür ise tamamen S kutbunu oluşturmaktadır. Şekil 2.5(b) 'de görüldüğü gibi sabit mıknatıs iki armatür arasına yerleştirilmiştir. Bu hibrit adım motorunun adım açısı  $18^\circ$  dir [Wildi, 2002].

## 2.2 Sabit Mıknatıslı Adım Motorlarında Kullanılan Sargı Türleri

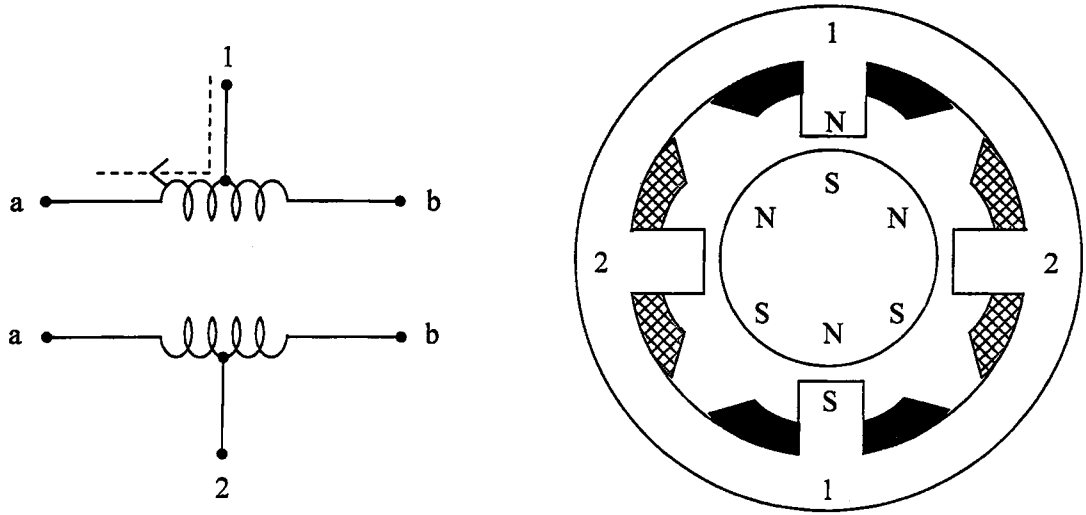
Sabit mıknatıslı adım motorlarında unipolar, bipolar ve bifilar olmak üzere üç tip sargı kullanılmaktadır.

### 2.2.1 Unipolar Adım Motorları

Unipolar adım motorlarında, her biri orta uçlu olmak üzere iki faz sargısı bulunmaktadır. Şekil 2.6 'da görüldüğü gibi iki faz sargısının orta uçları ayrı ayrı iki iletken halinde dışarıya alınabildiği gibi, içten birbirlerine bağlanarak tek bir iletken halinde de dışarıya alınabilmektedir. Sonuç olarak unipolar adım motorlarının 5 veya 6 iletkeni bulunmaktadır. Dışarıya alınan bu iletken sayısından bağımsız olarak unipolar adım motorları aynı şekilde tahrik edilirler. Sargıların orta uçları bir güç kaynağına bağlanarak ve son uçlar ise sıra ile topraklanarak motorun adımli bir şekilde hareket etmesi sağlanır.

Unipolar adım motorları, bütün sabit mıknatıslı ve hibrit adım motorlarında olduğu gibi değişken relüktanslı adım motorlarından farklı şekilde çalışır. Bu adım motorları, stator kutupları ile rotor dişleri arasındaki akı yolunu kısaltmak prensibi üzerine değil, sabit mıknatıslı rotorun N veya S kutuplarını stator kutuplarına doğru çekmesi prensibi üzerine çalışır. Böylece, bu adım motorlarında stator sargılarından geçen akımların yönü hangi rotor kutuplarının hangi stator kutuplarına doğru çekileceğini belirler. Unipolar adım motorlarında akımın yönü, orta uçlu sargının hangi yarı bobinin enerjili olmasına bağlıdır. Fiziksel olarak, yarı bobinler birbirlerine paralel sarılırlar. Bu nedenle adım motorunun faz sargısı, hangi yarı bobinin enerjilendiğine bağlı olarak hem N kutbu hem de S kutbu olarak görev yapabilir.

Şekil 2.6 'da adım açısı  $30^\circ$  olan bir unipolar adım motorunun bir kesiti verilmektedir. 1 no 'lu sargının yarı bobini üst stator kutbuna ve diğer yarı bobini alt stator kutbu üzerine sarılmıştır. 2 no 'lu sargının ise yarı bobini sol stator kutbu üzerine ve diğer yarı bobini sağ stator kutbu üzerine sarılmıştır. Bu adım motorunun rotorunda ise 6 adet sabit kutup bulunmaktadır. Bu kutupların, şekil 2.6 'da görüldüğü gibi üçü N kutbu ve diğer üçü S kutuplarıdır.



Şekil 2.6: Adım açısı 30° olan unipolar adım motorunun kesiti.

Sabit mıknatıslı adım motoru ile hibrit adım motoru arasındaki fark, çok kutuplu rotor ile çok kutuplu statorun yapısına bağlıdır. Aradaki bu yapısal farklılığa daha sonra değinilecektir.

**Tablo 2.2:** Adım açısı 30° olan unipolar adım motorunun her an için bir sargının yarı bobinin enerjilenmesi ile bir tur hareket etmesi için uygulanması gereken kontrol sinyali sırası.

|          |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|----------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Sargı 1a | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| Sargı 1b | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| Sargı 2a | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| Sargı 2b | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |

→ Zaman

Tablo 2.2 'de verilen sargıların enerjilenme sırasında her an için bir sargının yarı bobini enerjilenmiştir. Tablo 2.2 'deki gibi, tablo 2.3 'deki enerjilenme sırası da motoru saat ibresi yönünde 12 adım veya bir tur hareket ettirecektir.

**Tablo 2.3:** Adım açısı 30° olan unipolar adım motorunun her an için iki sargının yarı bobinin enerjilenmesi ile bir tur hareket etmesi için uygulanması gereken kontrol sinyali sırası.

|          |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|----------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Sargı 1a | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| Sargı 1b | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| Sargı 2a | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| Sargı 2b | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |

→ Zaman

Birinci enerjilenme sırasından farklı olarak tablo 2.3 'de görülen ikinci enerjilenme sırasında görüldüğü gibi, her an için sargıların iki yarı bobini enerjilenmiştir. Bu şekilde motor

hareket ettirilecek olunursa, motor daha büyük moment üretecek ancak daha fazla güç çekecektir. Yukarıda verilen enerjilenme sıralarının her ikisinde de motor, tam adımı  $30^\circ$  olan adımlarla hareket edecektir. Bu iki enerjilenme sırası bir araya getirilerek motorun yarım adımlarla hareketi sağlanabilir. Bu durumda motor bir tur hareket ettiğinde, 12 değil 24 adımlık yol almış olacaktır.

**Tablo 2.4:** Adım açısı  $30^\circ$  olan unipolar adım motorunun iki enerjilenme sırası bir araya getirilerek yarım adımlarla bir tur hareketi için gereken kontrol sinyali sırası.

|          |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|----------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Sargı 1a | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| Sargı 1b | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Sargı 2a | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Sargı 2b | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |

—————→ Zaman

Tablo 2.4 'deki sıraya göre motor kaynaktan beslendiği zaman bir tur için 24 adımlık yol alacaktır, ve bir an için bir yarı bobin diğer an için iki yarı bobin enerjilendiğinden dolayı, motor tarafından üretilen moment sabit olmayacaktır.

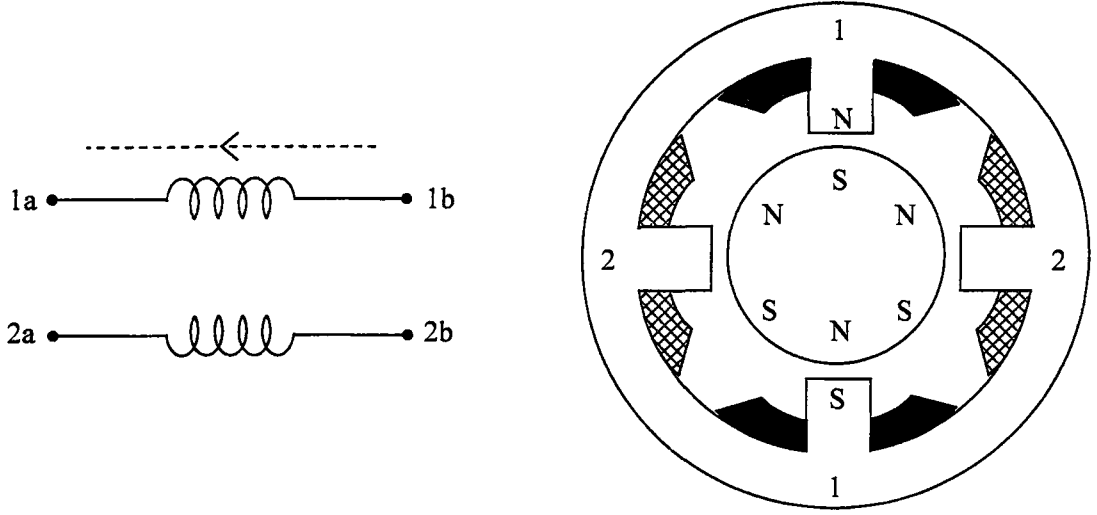
Şekil 2.6 'da verilen adım motoru en temel unipolar adım motorudur. Daha hassas açısal adımlarla hareket için adım motorunun rotorunda daha fazla kutup bulunmalıdır. Uygulamada rotorunda 100 kutbu bulunan adım motorları bulunabilmektedir. Bu sayıda kutba sahip adım motorları genellikle hibrit adım motorlarıdır ve rotorda çok kutup oluşturabilmek için basit bir bipolar sabit mıknatıs üzerinde dişli uç kapaklar kullanılır. Rotorda çok sayıda kutup bulunduğu durumda stator kutupları, her bir stator kutbu çok sayıda rotor kutbuna karşı çalışacak şekilde dişli yapılır.

### 2.2.2 Bipolar Adım motorları

Bipolar adım motorlarında iki sargı bulunmaktadır ve bu sargıların uçları dört iletken halinde dışarıya alınmıştır. Unipolar adım motorlarından farklı olarak, bipolar adım motorlarında orta uç bulunmamaktadır. Orta uçların bulunmamasının avantajı sargı enerjilendiği zaman sargıdan geçen akım, sargının bir yarı bobininin sarımlarından değil bütün sarımlardan geçmesidir. Böyle olunca, aynı büyüklükte bir unipolar adım motoruna göre, bipolar adım motoru daha fazla moment üretir. Unipolar motorlara göre bipolar motorların dezavantajı, daha karmaşık kontrol devrelerine ihtiyaç duymalarıdır.

Bipolar adım motorunun sargısından çift yönlü akım geçmesi gerektiği için, sargıların uçları sürekli kutup değiştirmelidir. Şekil 2.7 'de görüldüğü gibi 1a ucu pozitif ve 1b ucu negatif olduğu zaman akım sargı 1 'den soldan sağa doğru, ve 1a ucu negatif ve 1b ucu pozitif olduğu zaman akım sargı 1 'den sağdan sola doğru akacaktır. H – köprü devresi olarak bilinen bir

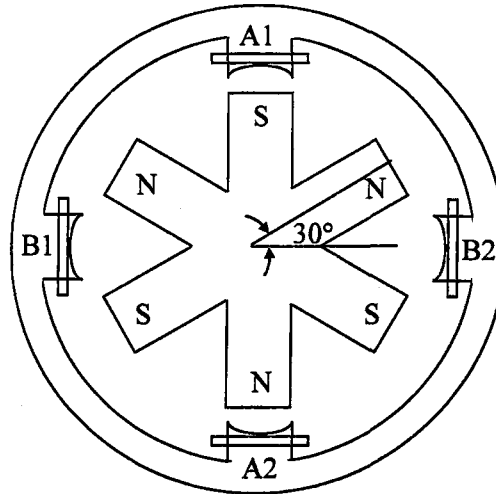
kontrol devresi sargı uçlarındaki kutuplanmayı değiştirmek için kullanılır. Her bipolar adım motorunun iki sargısı bulunduğundan, her bipolar adım motorunu beslemek için iki adet H – köprü devresine ihtiyaç duyulur.



Şekil 2.7: Adım açısı 30° olan bipolar adım motoru.

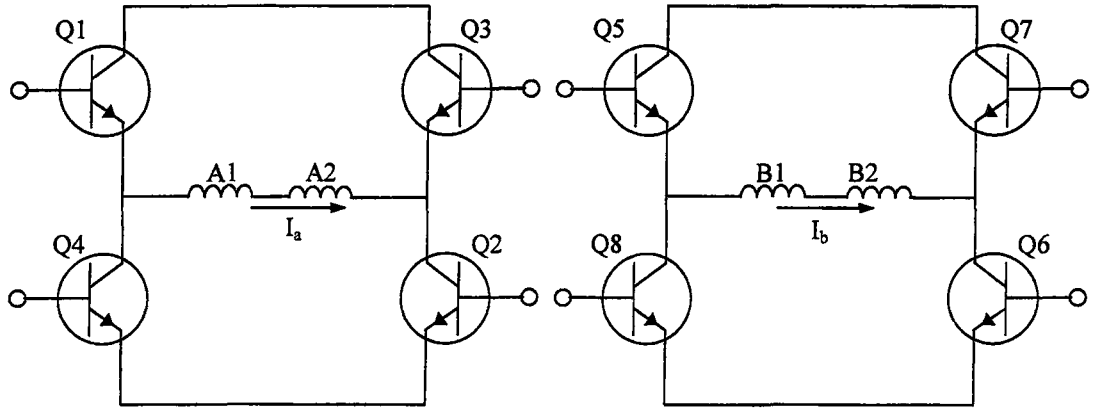
Şekil 2.7 'de adım açısı 30° olan bir bipolar adım motoru gösterilmiştir. Motorda sargı 1 'in sarımları hem alt hem de üst stator kutupları üzerine sarılmıştır. Sargı 2 'nin sarımları ise statorun sol ve sağ kutupları üzerine sarılmıştır. Bu adım motorunun rotorunda ise 6 adet kutbu olan bir sabit mıknatıs bulunmaktadır. 3 'ü N ve 3 'ü S olan bu sabit mıknatısın kutupları rotor çevresi boyunca yerleştirilmiştir [Microchip, AN 907, Jones, D., W., 1998].

Dört kutuplu bir statorda iki kutuplu bir sargı tipi Şekil 2.8 'deki gibi A1-A2 ve B1-B2 sargılarından oluşur.



Şekil 2.8: İki kutuplu bipolar sarımlı bir hibrit motor.

Burada A sargısındaki  $I_a$  akımı ve B sargısındaki  $I_b$  akımı periyodik olarak ters çevrilir. Yani (+) ve (-) yapılır. Sargılar ortak bir DC kaynaktan uyarılmaktadır.



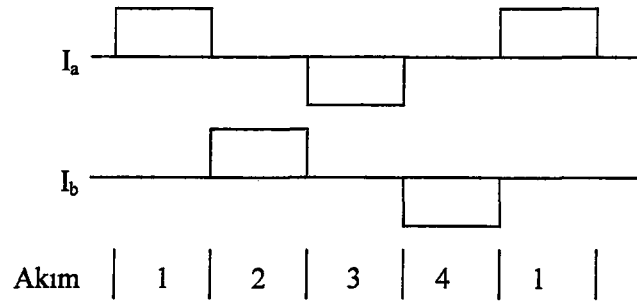
Şekil 2.9 : Bipolar adım motorunun stator sargılarının bir DC kaynağa Q1-Q8 anahtarları ile bağlantısı.

Sargılar sırasıyla üç değişik sürücüyle uyarılabilirler.

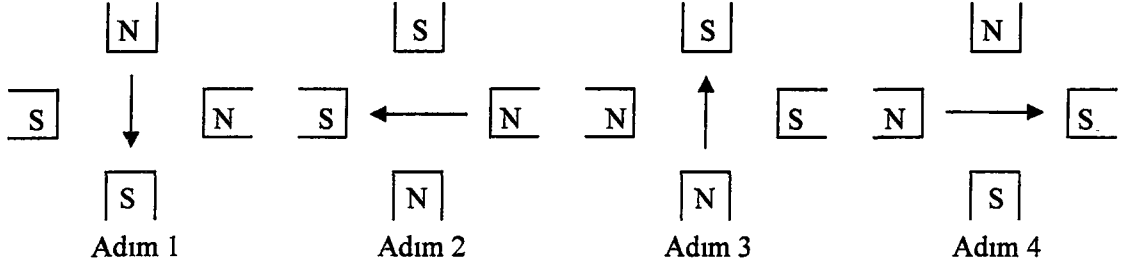
- Dalga Sürücü
- Normal Sürücü
- Yarım-Dalga Sürücü

Tablo 2.5: Bipolar adım motorunda dalga sürücü için anahtarlama sırası

| Adım  | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 |
|-------|---|---|---|---|---|
| Q1 Q2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Q3 Q4 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| Q5 Q6 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| Q7 Q8 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |



(a) Dalga sürücü için akım darbeleri.



(b) Akımlara göre her adımdaki manyetik akının pozisyonu (saat yönü dönüş).

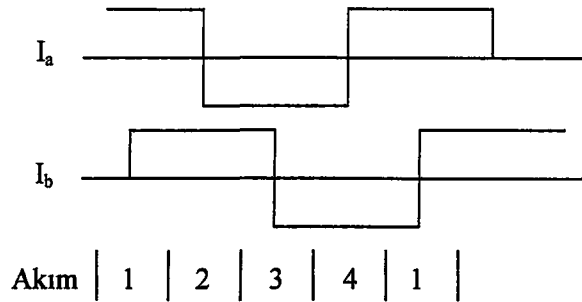
Şekil 2.10 : Dalga sürücü için akım darbeleri ve manyetik akı pozisyonu.

Dalga sürücülerde, faz sargısı gruplarından sadece biri, yani A1-A2 veya B1-B2 gruplarından biri belirli bir zaman aralığında uyarılır. Saat yönündeki hareket için anahtarlama sırası tablo 2.5 'de verilmiştir.  $I_a$  ve  $I_b$  akımları ise Şekil 2.10(a) 'da görüldüğü gibidir.  $I_a$  ve  $I_b$  akımları tarafından üretilen manyetik akının bir adımda  $90^\circ$  dönmekte olduğuna dikkat edilmelidir.

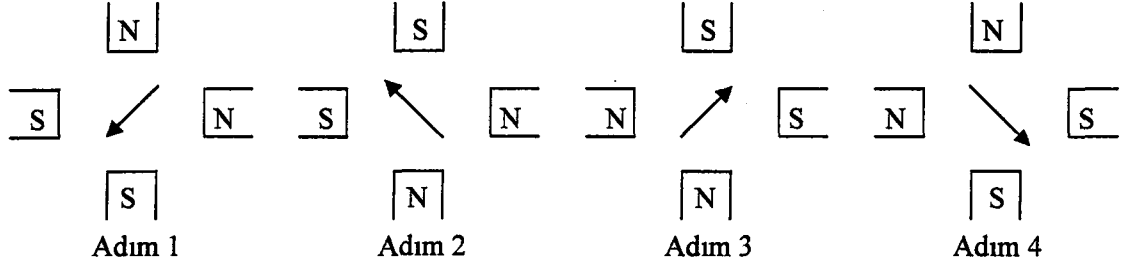
Normal sürücüde, her iki faz sargısı grubu da aynı zamanda uyarılır. Saat yönünde dönüş için anahtarlama sırası tablo 2.6 'da, akımlar ( $I_a$  ve  $I_b$ ) ise şekil 2.11(a) 'da gösterilmiştir. Manyetik akının her adımda  $90^\circ$  döndüğüne, fakat kutuplar arasında hareket ettiğine dikkat edilmelidir.

Tablo 2.6: Bipolar adım motorunda normal sürücü için anahtarlama sırası

| Adım  | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 |
|-------|---|---|---|---|---|
| Q1 Q2 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| Q3 Q4 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| Q5 Q6 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| Q7 Q8 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |



(a) Normal sürücü için akım darbeleri.



(b) Akımlara göre her adımdaki manyetik akının pozisyonu (saat yönü dönüş).

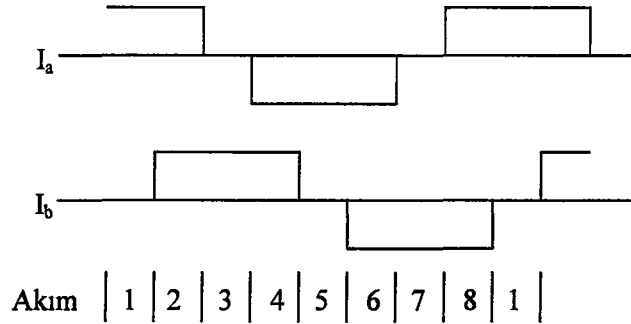
Şekil 2.11 : Normal sürücü için akım darbeleri ve manyetik akı pozisyonu.

Dalga sürücü şeklinde enerjilenme sırasında her an için bir faz sargısı enerjili olduğundan güç tüketimi normal sürücü yöntemi ile enerjilenme sırasına göre daha azdır. Çünkü normal enerjilenme sırasında her an için motorun her iki faz sargısı da akım çekmektedir. Ancak, motor normal sürücü sırasına göre çalıştığında daha büyük moment üretir.

Yarım-dalga sürücü, dalga sürücü ile normal sürücünün birleştirilmesinden oluşur. Saat yönünde dönüş için anahtarlama sırası tablo 2.7 'de  $I_a$  ve  $I_b$  akımlarının dalga şekilleri şekil 2.12(a) 'da, manyetik akı ise Şekil 2.12(b) 'de gösterilmiştir. Manyetik akının her adımda  $45^\circ$  döndüğüne dikkat edilmelidir.

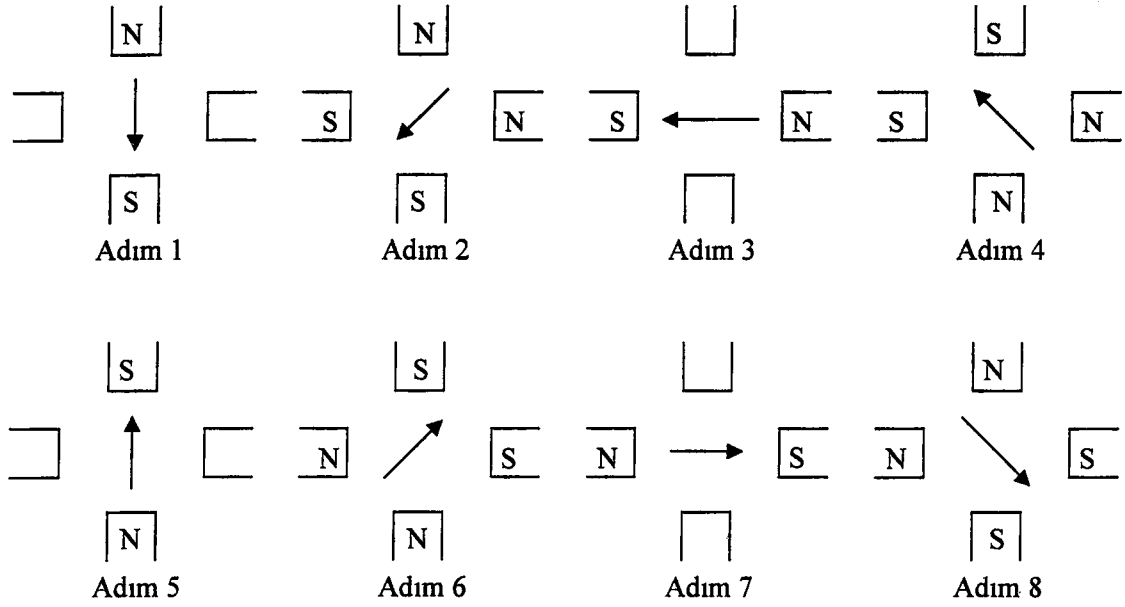
Tablo 2.7: Bipolar adım motorunda yarım dalga sürücü için anahtarlama sırası

| Adım  | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 1 |
|-------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Q1 Q2 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| Q3 Q4 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| Q5 Q6 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Q7 Q8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |



(a) Yarım dalga sürücü için akım darbeleri.





(b) Her adımdaki manyetik akı pozisyon.

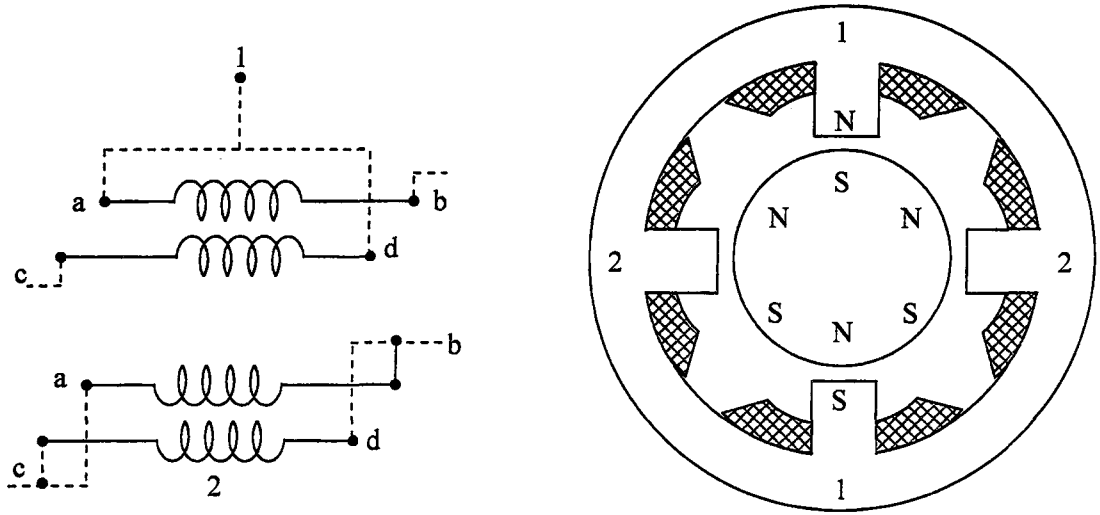
Şekil 2.12 : Yarım dalga sürücü için akım darbeleri ve manyetik akı pozisyonu.

Bu sıraya göre motor beslenecek olunursa her an için farklı sayıda faz sargısı enerjili bulunduğu, motor tarafından üretilen moment sabit değildir.

### 2.2.3 Bifilar Adım Motorları

Bu adım motorları bipolar adım motorlarına benzemektedir ancak, burada her bir faz sargısı birbirlerine paralel sarılan iki iletkenin oluşmaktadır. Böylece bu adım motorunda bipolar adım motoruna kıyasla dışarıya alınmış dört iletken ucu değil sekiz iletken ucu bulunmaktadır.

Bifilar adım motorları bipolar veya unipolar adım motorları gibi beslenebilirler. Bifilar adım motorunu unipolar adım motoru gibi kullanmak için, her bir faz sargısının iki iletkeni birbirlerine seri bağlanarak seri bağlantı noktası sargının orta ucuymuş gibi kullanılır. Şekil 2.13 'de adım motorunun unipolar çalışması için 1 no 'lu sargının bağlantısı görülmektedir. Bifilar adım motorunu bipolar adım motoru olarak kullanmak için ise her faz sargısının iki iletkeni birbirlerine seri veya paralel bağlanır. Şekil 2.13 'de 2 no 'lu faz sargısının, bipolar çalışma için, iletkenlerinin paralel bağlı olduğu görülmektedir. Faz sargısının iletkenleri paralel bağlandığında motor yüksek akımla ve seri bağlandığında ise motor yüksek gerilimde çalışabilir.



Şekil 2.13: Bifilar adım motoru.

Unipolar adım motorlarında, motor sargıları genellikle bifilar adım motorundaki gibi sarılırlar. Ancak burada her bir sargı şekil 2.13 'deki 1 no 'lu sargı gibi bağlanmıştır. Böyle olunca unipolar adım motoru, anma geriliminde ve yarı anma akımında bipolar adım motoru olarak kullanılabilir [Jones, D., W., 1998]. Motoru bu şekilde kullanmak sıcaklığa ve güç sınırlamalarına bağlıdır.

### 2.3 Adım Motoru Seçimi

Herhangi bir uygulama için adım motoru seçimi yapılacağı zaman, çeşitli faktörlerin göz önünde bulundurulması gerekir. Sistem için hangi tür motor kullanılması gerektiği, motorun içinde kullanacağı sistemin moment ihtiyacı, kontrolörün karmaşıklığı ve motorun fiziksel karakteristikleri göz önünde bulundurulması gereken faktörlerden birkaç tanesidir. Bunun için adım motorlarının birbirlerine göre kıyaslanmasında fayda vardır.

#### 2.3.1 Değişken Relüktanslı Adım Motoru İle Sabit mıknatıslı veya Hibrit Adım Motorlarının Karşılaştırılması

Değişken relüktanslı adım motorlarının basit yapıda olma avantajı bulunmaktadır. Bu motorlar rotor üzerinde karmaşık sabit mıknatıslara gerek duymamaktadır. Bu nedenle sabit mıknatıslı adım motorlarına göre daha sağlamdır. Bütün adım motorlarında artan hıza karşı moment düşmektedir. Ancak değişken relüktanslı adım motorları için momentteki bu düşme, çok daha az telaffuz edilir. Uygun bir tasarımla değişken relüktanslı motorlarla 10.000 adım/s üzerinde hıza ulaşmak mümkündür. Sabit mıknatıslı ve hibrit adım motorlarında ise nadiren

5.000 adım/s hıza ulaşılır. Çünkü, bu hız seviyesinde bu motorların ürettiği moment çok az ve bu nedenle de sabit mıknatıslı ve hibrit adım motorlarının hızı genellikle 1000 adım/s 'nin altındadır. Değişken relüktanslı adım motorlarında hızla karşı momentte az düşme meydana geldiği için, diğer adım motorlarının dişli takımına ihtiyaç duyduğu uygulamalarda bu adım motorları kullanılacak olursa, dişli takımı kullanımına gerek kalmamaktadır. Örneğin günümüzde kullanılan çok yeni çamaşır makinalarında tamburu sürmek için değişken relüktanslı adım motoru kullanılmaktadır. Bu adım motoru sayesinde tamburun, hem çift yönlü yavaş çalışmada hem de tek yönlü hızlı çalışmada doğrudan tahrik edilmesi mümkündür.

Değişken relüktanslı adım motorlarının dezavantajı da bulunmaktadır. Sinüzoidal uyarım akımlarıyla bile sabit mıknatıslı adım motorları çok sessiz çalışırken değişken relüktanslı adım motorları, tahrik için kullanılan dalga şekli nasıl olursa olsun genellikle gürültülü çalışırlar. Bu nedenle, genellikle gürültünün ve vibrasyonun istenmediği ortamlarda sabit mıknatıslı veya hibrit adım motorları kullanılır.

Değişken relüktanslı motorlardan farklı olarak, sabit mıknatıslı ve hibrit adım motorları bir kaynak tarafından beslenmedikleri zaman el ile döndürüldüklerinde dönmeye karşı bir zorluk gösterirler. Bunun sebebi, motor enerjili olmadığı halde bu motorlarda sabit mıknatıslar stator kutuplarını çekmektedir. Bu motorlardaki manyetik artık tutma momenti bazı durumlarda arzu edildiği halde bazı durumlarda da kesiksiz hareket istendiği için problem olmaktadır. Uygun kontrol sistemleriyle hem sabit mıknatıslı hem de hibrit adım motorları mikro adımlarla hareket ettirilebilirler. Genel olarak değişken relüktanslı adım motorları mikro adımlarla hareket ettirilemezler. Değişken relüktanslı adım motorları genellikle tam adımlarla hareket ettirilirler ve bu motorlar da yüksek hızlara ulaşmak için karmaşık akım sınırlama kontrolü gerekir.

### **2.3.2 Bipolar Adım Motorun İle Unipolar Adım Motorunun Karşılaştırılması**

Sabit mıknatıslı adım motorları unipolar, bipolar veya bifilar sargılara sahip olabilirler. Motor bifilar sargılı olduğu takdirde unipolar veya bipolar motor olarak kullanılabilir. Bir unipolar veya bipolar sürücü sistem arasında tercih yapmak işlemin basitliğine güç/ağırlık oranına bağlıdır. Bipolar adım motorları aynı hacimde eşdeğer unipolar adım motorlarından yaklaşık olarak %30 daha fazla momente sahiptir. Bunun sebebi, herhangi bir anda unipolar motorda sargının sadece yarı bobini enerjilenmektedir. Bipolar motor ise, enerjilendiği zaman tüm sargıyı kullanmaktadır.

Bipolar motor ile üretilen yüksek momentin bir maliyeti bulunmaktadır. Bipolar motorlar unipolar motorlara göre daha karmaşık kontrol devreleri gerektirir. Bu da uygulamanın maliyetini etkilemektedir.

### 2.3.3 Sabit Mıknatıslı Adım Motoru İle Hibrit Adım Motorunun Karşılaştırılması

Hibrit ve sabit mıknatıslı adım motorları arasında bir tercih yapmak için, maliyet ve çözünürlük gibi iki önemli hususu dikkate almak gerekir. Bu motorları sürmek için kurulan veya tasarlanan elektronik ve bağlantı opsiyonları genellikle her iki motor tipi içinde uygulanabilmektedir.

Sabit mıknatıslı motorlar şüphesiz imal edilen en ucuz motorlardandır. Bu motorlar bazen teneke yığınları olarak da bilinirler. Çünkü bu motorların statoru, basılmış metal içerisine yerleşik iki sargıdan ibarettir. Karşılaştırılacak olursa, hibrit ve değişken relüktanslı adım motorları yalıtılmış ince sac levhalardan ve sarılması daha zor olan motor sargılarından yapılırlar.

Sabit mıknatıslı adım motorları genellikle adım aralığı  $30^\circ$  den  $3.6^\circ$  ye kadar değişecek şekilde yapılırlar. Sabit mıknatıslı adım motorunun rotorundaki mıknatıslar rotorun 50 kutuptan fazla olmasına engel olur. Bu nedenle, sabit mıknatıslı adım motorlarında adım açısı daha küçük olduğu nadiren görülür. Hibrit motorlarda sabit mıknatıslı rotorun üzerine ve karşılıklı iki ucuna, çok ince ve düzenli bir biçimde dişler açılarak çok kullanılan bir adım büyüklüğü olan  $1.8^\circ$  adım açısı elde edilir ve bu yöntem ile daha küçük adım büyüklükleri de elde etmek mümkündür.

### 2.3.4 Fonksiyonel Karakteristikler

Bir adım motoru seçileceği zaman motorun belirli özelliklerinin kararlılık durumlarına bakılır. Motor seçimine etki eden bazı önemli faktörler moment, çalışma ortamı, uzun ömür, fiziksel büyüklük, adım büyüklüğü ve maksimum hızdır.

**Adım açısı:** Bir motorun adım açısının büyüklüğüne karar vermek çok önemlidir. Adım açısı çözünürlüğü, bir uygulamada adım motorunun kullanıldığı kısımda olması gereken hareketin çözünürlüğüdür. Sabit mıknatıslı adım motorlarında en çok kullanılan adım açısı  $7.5^\circ$  ve  $3.6^\circ$  dir. Bu adım açıları sırayla bir turda 48 adım ve 100 adıma karşılık gelir. Hibrit adım motorlarında kullanılan tipik adım açısı aralığı  $3.6^\circ$  (bir turda 100 adım) ve  $0.9^\circ$  (bir turda 400 adım) arasındadır. Bazı adım motorları ile birlikte dişli düşürücüler kullanılarak adım açısının düşürülmesi sağlanır. Bu da, çok küçük ve düzgün adımlara olanak tanır. Dişli düşürücüler ile yüksek moment elde edilebilir fakat maksimum adım oranı ve buna bağlı olarak maksimum dönüş hızı düşer. Doğrusal hareket elde etmek için motorun miline bağlı vidalar kullanılır. Burada adım açısının özelliği ve dişli düşürücü mekanizmasının birlikte kullanılması ile vidanın hareketi basit ve çok iyi bir şekilde kontrol edilebilir.

**Moment:** Adım motoru seçileceği zaman dikkat edilmesi gereken en önemli özelliklerden birisi momenttir. Adım motorlarında farklı tipte moment değerleri vardır. Bunlar;

**Tutma Momenti:** Motor sargısı enerjilendiği zaman motor milinin hareket etmesi için gereken moment değeridir.

**Pull-In Momenti:** Sabit bir sürme yöntemi ve adım oranında, motorun adım kaybı olmaksızın rotorun durgun halde iken hızlanmasını sağlayan momenttir.

**Pull-Out Momenti:** Motor yüklü iken normal çalışma hızında ürettiği moment değeridir.

**Tutma (Alıkoyma) Momenti:** Motor sargıları enerjili değilken motorun milini döndürmek için gerekli olan momenttir.

Adım motorlarının moment değerleri ve diğer farklı özellikleri, imalatçı firmaların vermiş olduğu veri kataloglarında bulunmaktadır.

Dinamik momentler olan Pull-in ve Pull-out momentleri adım oranının bir fonksiyonudur. Adım motorunda bu momentler belirli bir çalışma aralığındaki kayma aralığının tespiti için kullanılır. Kayma aralığı motorun hareketsiz halden hareketlenmesi ve durması ile ilgilidir. Bu olay açık döngülü kontrol sistemlerinin başarılı bir şekilde çalışmasını engeller. Bunun önüne geçmek için uygun olan kontrol sistemi, geri beslemeli ve kapalı döngülü bir kontrol sistemidir.

Pull-in momentinde, motora bağlanan yükün ve atalet momentinin hiç değişmemesi ve yükün motora sağlam bir şekilde bağlanması önerilir. Burada atalet momentinin şekli tam olarak belirlenmemiştir. Çünkü, veri kataloglarında imalatçıların belirlediği atalet momentinin ölçüldüğü nadiren görülür. Genellikle uygulamada kullanılacak olan sürücü devresi ile birlikte yükün momenti ile atalet momenti birlikte verilir.

**Uzun Ömür:** Motor seçimine etki eden diğer bir faktör ise motorun ömrüdür. Burada bazı sorulara cevap aramak gerekir.

- Motorun uygun çalışma biçiminde, uzun bir süre çalışması nasıldır?
- Çevresel tehlikeler nelerdir?
- Motorun çalışma sıcaklığı ne kadardır?
- Motor sürekli ve kesik kesik çalışma özelliğine sahip midir?

Adım motorları diğer motor türlerine göre daha sağlamdır. Çünkü, bu motorlarda fırçalar yoktur böylece aşınmalar çok uzun süreden sonra olur. Tipik olarak makinenin diğer parçaları uzun zaman içinde aşınır.

Bununla beraber adım motorları uygun bir biçimde yapılmış ise çok iyi motorlardır. Yani bütün şartlar uygun ise adım motorunun görevinde başarısızlık olmayacaktır. Aşağıda tasarımda motorun uzun ömürlü olmasını sağlayan bazı faktörler verilmiştir.

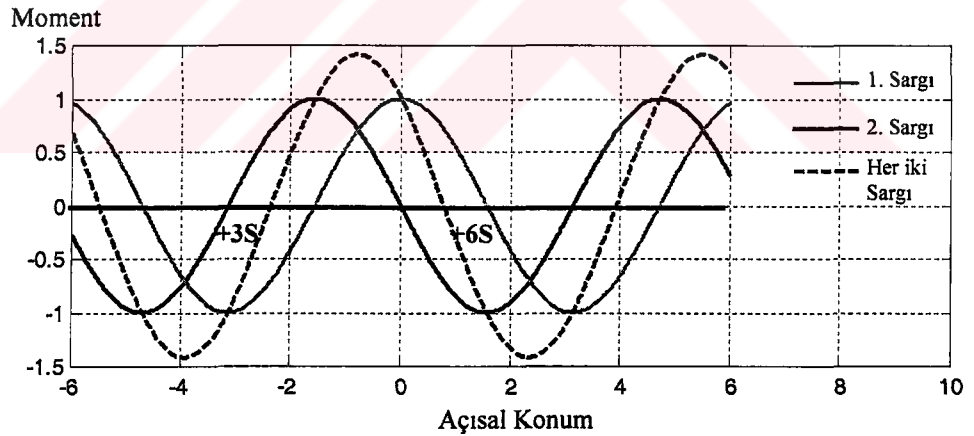
- Motorda yataklama için kullanılan bilyeler bronz yataktan daha az ısınır ve daha dayanıklıdır fakat bilyeler daha pahalıdır.

- Motorlar seçilirken çalışma momentleri diğer moment değerlerinin yaklaşık %40 - %60 'ı arasında olmasına dikkat edilmelidir.
- Motorun sert ortam şartlarından korunması gerekir. Korunmasız olduğu şartlar nem oranı, yıpratıcı kimyasal maddeler, kir ve diğer etkenlerdir. Bunlar motor üzerinde olumsuz etkilere yol açar.
- Motor çalışırken ısı açığa çıkarır. Motor için soğutmanın hesaba katılması ve kesinlikle soğutma işleminin yapılması gerekir.
- Son olarak motorun uygun bir biçimde sürülerek sargıların uyarılmasında akımların değerleri iyi bir şekilde kontrol edilmelidir.

## 2.4 Mikro Adımlama

Adım motorunun düşük hızlarda sert ve ani hareket etmesi normal adımlamanın bir sonucudur. Mikro adımlama yönteminde adım çözünürlüğü artırılır ve adımlar arasında yumuşak ve düzgün geçişler sağlanır. Uygulamada mikro adımlama yöntemi ile gürültü ve rezonans problemlerinin sınırları ve dolayısıyla sistemin performansı artırılır.

Adım motorunun hareketinin doğrusal olması istenir. Bu da, motorun mili döndürüldüğü zaman hızlanmalarda ve yavaşlamalarda adım büyüklüğünün eşit olması ile sağlanır.



Şekil 2.14: İdeal iki sargılı adım motoru için moment – açılal konum eğrisi.

İdeal iki sargılı adım motoru için moment – açılal konum eğrisi şekil 2.14 'de görülmektedir. Moment – açılal konum eğrisinde bir sargının momentinin matematiksel ifadesi aşağıdaki denklemde verilmiştir.

$$T_1 = H \sin \left\{ \left[ \left( \frac{\pi}{2} \right) / s \right] \theta \right\} \quad (2.1)$$

Burada,  $T_1$  bir sargının moment (N.m),  $H$  tutma moment (N.m),  $S$  radyan olarak adım açısı,  $\theta$  raydan olarak mil açısıdır.

Şekil 2.14 'deki eğrinin şekli sinüsoidaldır. Gerçekte de motorun moment – açıl konum eğrisinin şekli yaklaşık sinüsoidal olur. İki sargının momentlerinin toplamında, sargıların herhangi birisinin gücü tam olmayınca momentlerin toplamı da sayısal olarak kusursuz olmayacaktır. Aşağıdaki eşitlikte ikinci sargının momentinin ifadesi verilmektedir.

$$T_2 = H \cos \left\{ \left[ \left( \frac{\pi}{2} \right) / s \right] \theta \right\} \quad (2.2)$$

Sinüs – Kosinüs mikro adımlandırma teknik olarak, her sargının akımlarının ayarlanması ile momentin sabit tutulması demektir. İdeal motorda üretilen moment her bir sargıdan geçen akımlarla orantılıdır ve toplam moment doğrusaldır. Gerçekte doyum ve kaçak alanlardan dolayı motor ideal değildir. Fakat pratikte çok küçük olan doğrusal olamama durumu ihmal edilebilir. Bu sonuçlar ile beraber motorun rotorunun durduğu açı  $\theta$  ise, denklem 2.3 ve 2.4 'de motor sargılarından geçen akımlar denklemlere yerleştirilmiştir. Bu denklemlerde akımların ulaşabileceği son değer  $I_{MAX}$  dır.

$$I_1 = I_{MAX} \sin \left\{ \left[ \left( \frac{\pi}{2} \right) / s \right] \theta \right\} \quad (2.3)$$

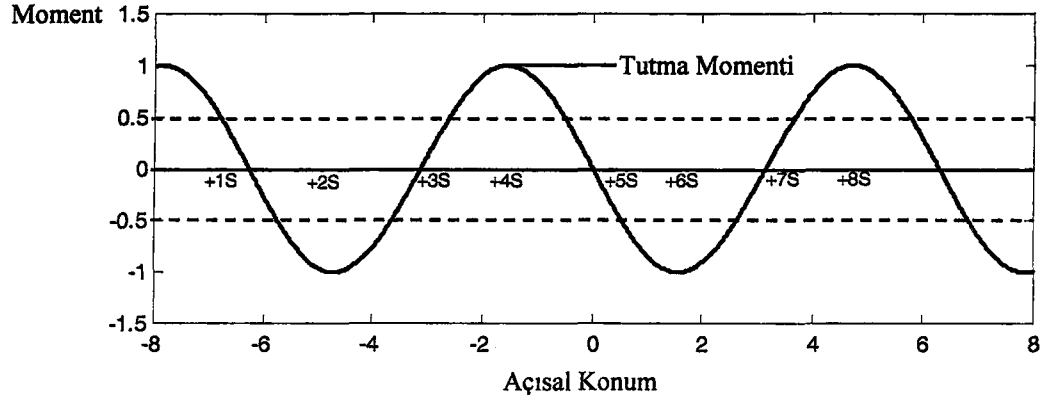
$$I_2 = I_{MAX} \cos \left\{ \left[ \left( \frac{\pi}{2} \right) / s \right] \theta \right\} \quad (2.4)$$

İdeal bir adım motorunda mikro adımlandırma yöntemi ile istenilen açısal çözünürlük elde edilir. Fakat pratikte sürtünme ve kalkıştaki sinüsoidal moment – mil açısı eğrisinden dolayı istenilen çözünürlüğün elde edilmesi zorlaşır. Uygulamada yapılan işin uygun olması için genelde her bir adım açısı en az 32 adıma bölünmelidir.  $7.5^\circ$  adım açısı olan ucuz bir sabit mıknatıslı adım motoru adım başına 32 mikro adıma bölünürse adım açısı  $0.23^\circ$  olur. Aynı çözünürlüğü 1:32 oranında dişli küçültücü ile yapmakta mümkündür. Fakat bu maksimum hızı düşürür ve ani geriye dönüşlere cevap veremez.

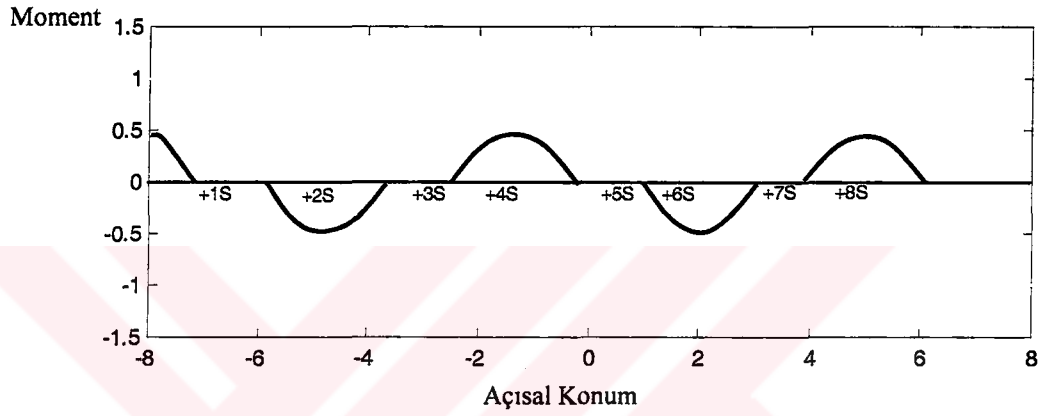
#### 2.4.1 Mikro Adımlamanın Sınırları

Buradaki anlatımlar iki sargılı adım motoru düşünülerek yapıldı. Gerçekte mikro adımlandırmayı etkileyen birkaç faktör vardır. Bunlardan birincisi sistemin sınırlarını etkileyen statik sürtünmedir. Şekil 2.14 'de motorun moment – açısal konum eğrisi görülmektedir. Bir sargı momentinin grafiği ile beraber statik sürtünmenin olduğu eğri şekil 2.15 'de görülmektedir. Statik sürtünme kesik çizgilerle gösterilen kısımdır. Şekil 2.16 'da sargı momentinin elde edilen son hali görülmektedir.

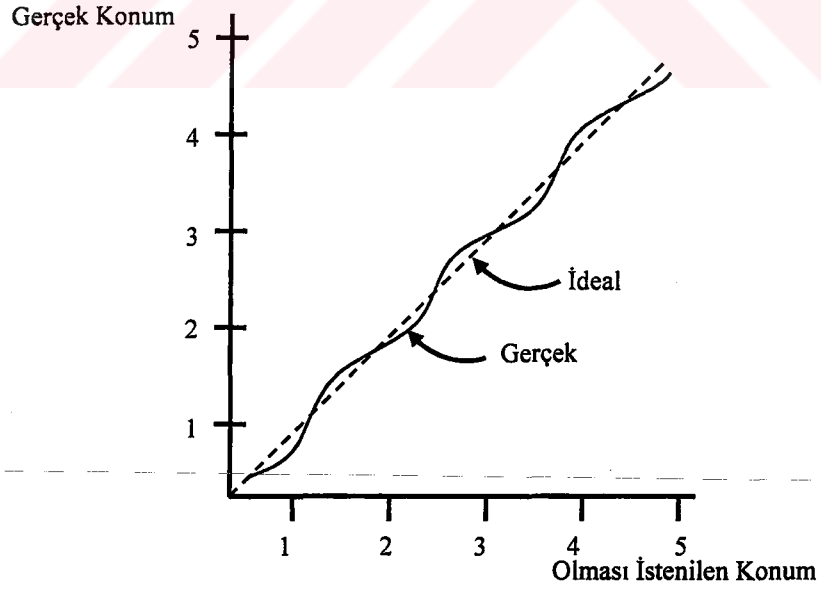




Şekil 2.15: Sadece bir sargının, moment – açısai konum eğrisi ile statik sürtünmenin eğrisi.



Şekil 2.16: Sargı momentinin statik sürtünme çıkarıldıktan sonra elde edilen son hali.



Şekil 2.17: Rotorun gerçek konumu ile olması beklenilen konumunun şekli.



Bu şekilde elde edilen bölge, motor momentinin bölgesi ile ölü bölge arasındaki sonuç bölgesidir. Bu ölü bölgenin mikro adımlama üzerinde etkisi vardır. Çünkü, adım motorundaki açısal çözünürlüğün sınırlarını belirler. Burada adımlar arası yumuşak geçiş mümkün olmayabilir.

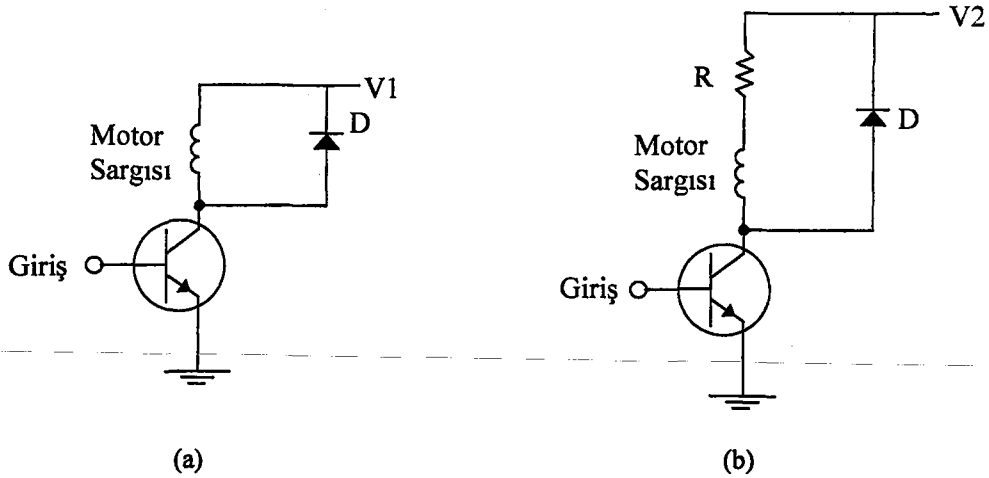
Mikro adımlamanın sınırlarını etkileyen diğer bir faktör ise moment – açısal konum eğrisinin kusursuz olmamasıdır. Motorun rotor diş şekilleri ve diğer fiziksel karakteristikleri de mikro adımlamanın sınırlarının belirlenmesinde etkili olur. Şekil 2.17 'de rotorun gerçek konumu ile olması beklenen konumunun şekli görülmektedir.

## 2.5 Adım Motoru Sürücü Devreleri

Temelde bir adım motoru, bir adım konumundan diğerine, bir stator faz sargısından diğerine DC güç kaynağının anahtarlanması suretiyle hareket ettirilir. Stator sargıların beslemek amacıyla kullanılan değişik birçok sürme devreleri mevcuttur. Bunlar tek kutuplu (unipolar) sürücü devreler, iki kutuplu (bipolar) sürücü devreler, iki seviyeli (bilevel) sürücü devreler ve kıyıcı sürücü devreleridir.

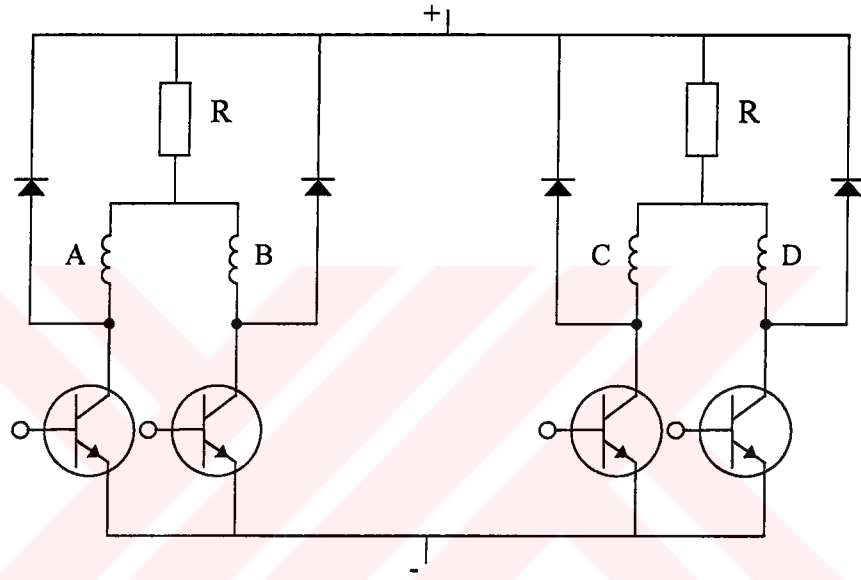
### 2.5.1 Tek Kutuplu Sürücü Devreler

Stator sargılarını sürmenin en basit ve en ucuz yolu şekil 2.18(a) 'da gösterildiği gibi tek bir sürücü transistör kullanmaktır. Transistör iletime girdiği zaman, kaynak gerilimi  $V_1$ , nominal sargı akımını üretecektir. Diyot, transistör kesime geçtiği zaman adım motorunun sargısından dolayı meydana gelen ters yönlü akımların, transistöre zarar vermeden zayıflayabileceği bir yol sağlar.



Şekil 2.18 : Tek stator sargısı için tek kutuplu sürme devreleri.

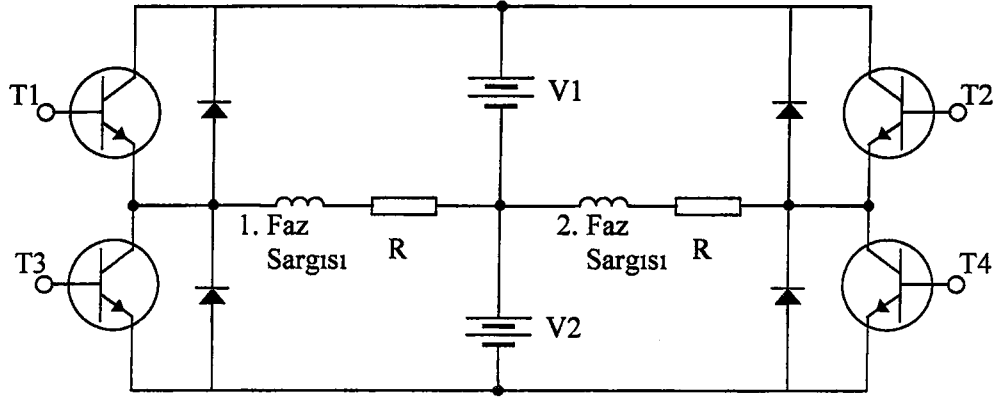
Adım motorunu hareket ettirmek amacıyla adım motoruna belli bir sırayla uygulanan darbeler arasındaki zaman aralığı, faz sargısının zaman sabiti olan  $L/R$  'den az olmadığı sürece bu devre son derece uygundur. Bundan daha yüksek adım hızlarında moment azalır, çünkü nominal sargı akımlarına hiç ulaşamaz. Yüksek hızlarda motor momentini arttırmanın en iyi ve yaygın yolu, her sargıya seri bir direnç bağlayıp kaynak gerilimini arttırmak yolu ile akımın nominal değere ulaşmasını sağlamaktır. Şekil 2.18(b) 'de bu durum gösterilmektedir. Stator sargısına seri direnç eklemekten ibaret olan bu teknik, şekil 2.19 'da verilen standart tek kutuplu sürücü devrelerinde kullanılır. A ve B veya C ve D fazları hiçbir zaman aynı anda anahtarlanmadığı için, her faz çifti tek bir direnci paylaşabilir.



Şekil 2.19 : Dört fazlı hibrit adım motoru için tek kutuplu sürücü devre.

### 2.5.2 İki Kutuplu Sürücü Devreler

Bu devre hibrit adım motorlarında veya sürekli mıknatıslı adım motorlarında kullanılmaya uygundur. Bu devrede iki kaynak kullanılır. Şekil 2.20 'deki birinci faz sargısının enerjilenmesi incelenecek olunursa T1 taransistörü iletime girdiğinde V1 kaynak geriliminin oluşturduğu sargı akımı birinci faz sargısı üzerinden soldan sağa doğru geçer. T3 iletime girdiğinde yine birinci faz sargısı üzerinden akım akacaktır fakat kaynak gerilimi V2 'dir. Sargıdan geçen akımın yönü ise sağdan sola doğru olur. Aynı olay ikinci faz sargısı içinde geçerlidir. Böylece dört transistör kullanmak yerine iki transistör kullanarak bir sargı üzerinden geçen akımın yönü değiştirilmiş olur.



Şekil 2.20 : İki kutuplu adım motoru için iki kutuplu sürücü devre.

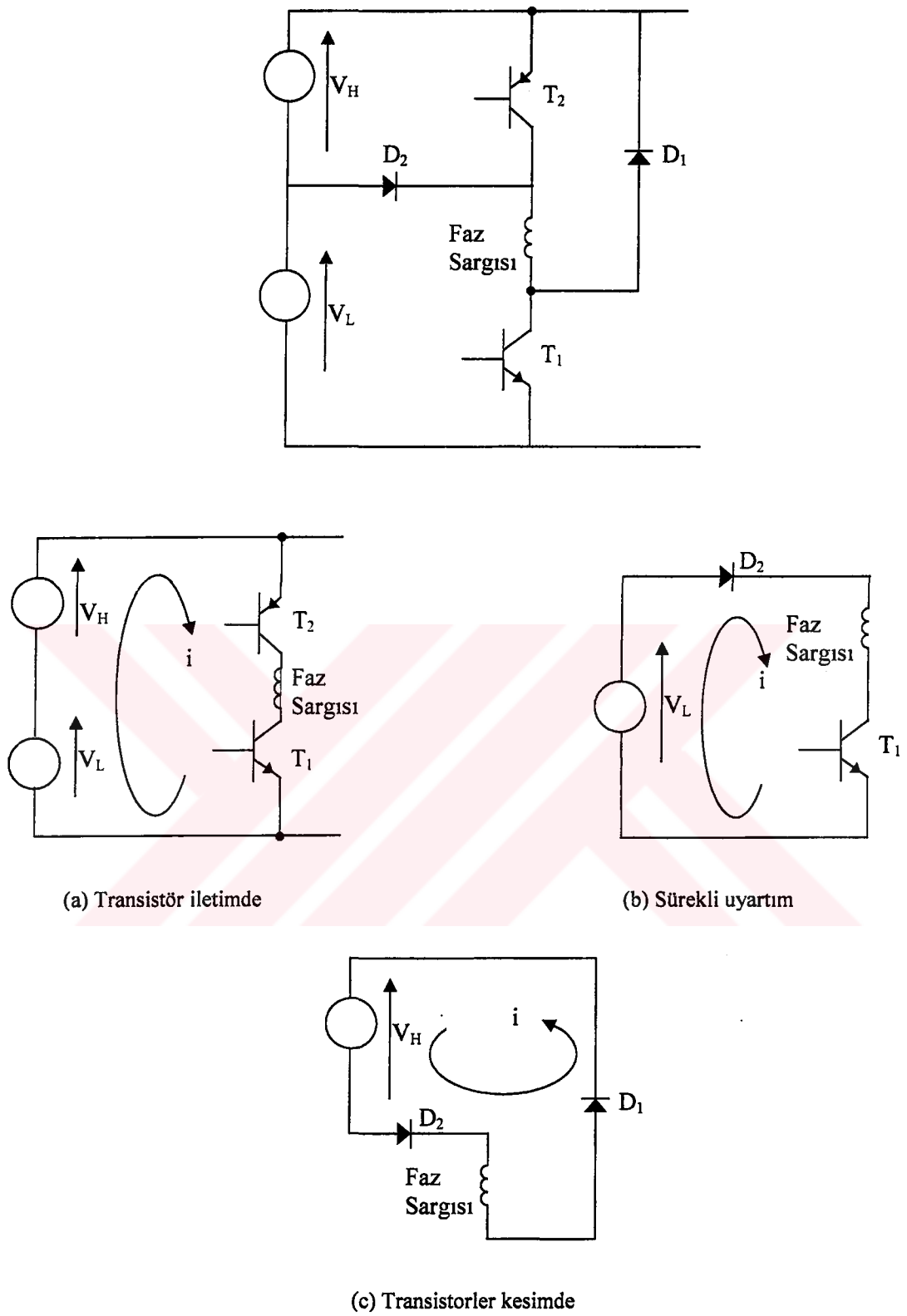
Dört diyottan oluşan köprü, serbest dolaşım akımlarına yol sağlamak için ve transistörleri ters yönlü akımlardan korumak için, transistörlere ters bir şekilde bağlanmıştır.

İki kutuplu bipolar adım motorunu sürmek için sekiz adet anahtarlama elemanı kullanılmıştır. Burada aynı bipolar adım motorunu sürmek için dört adet anahtarlama elemanı yeterli olur fakat bu devrenin dezavantajı iki kaynak kullanılmasıdır. İki kaynak kullanılmasından dolayı bipolar sürücü devreler unipolar sürücü devrelere göre daha pahalıya mal olmaktadır.

### 2.5.3 İki Gerilim Seviyeli Sürücü

İki seviyeli sürme yönteminde iki besleme gerilimi vardır. Büyük gerilim ( $V_H$ ) transistörler iletimde yada kesimde iken kullanılır. Daha küçük gerilim ( $V_L$ ) ise sürekli uyarımda akımın, akış değerinde kalmasını sağlar [Wildi, 2002]. Şekil 2.21 'de adım motorunun bir faz sargısı için tek kutuplu iki seviyeli sürücü devresi görülmektedir.

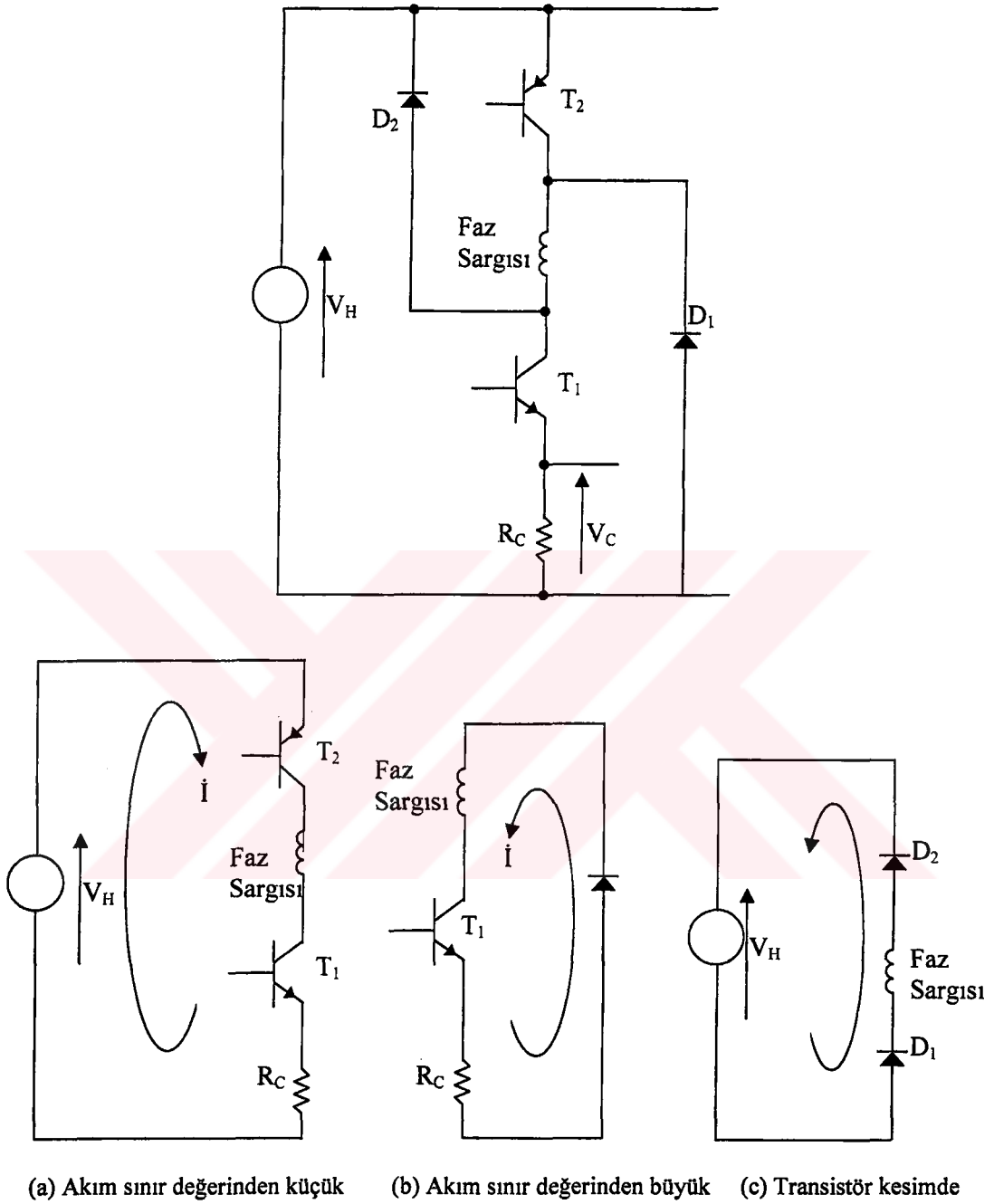
İki transistörde anahtarlendiğinde sargı uyarılır ve uygulanan gerilim iki besleme geriliminin toplamıdır yani  $V_H + V_L$  'dir. Bu devrede, akımı sınırlamak için seri direnç kullanılmamıştır. Bu yüzden akım, faz sargısının akımı için sınırlanmış değere kadar artmaya devam eder. Kısa süre sonra  $T_2$  transistörü kesime geçer ve sargı akımı  $V_L$  besleme gerilimi üzerinden,  $V_H$  besleme gerilimiyle ters kutuplanmış  $D_2$  diyotu üzerinden ve  $T1$  transistörü üzerinden akar. Adım motorunun faz sargısının akım değeri  $V_L$  gerilimi tarafından sağlanır. Bu akımın değeri,  $V_L/R$  kadar olur.  $T1$  transistörünün iletim aralığında faz sargısı uyarıtımı sağlandıktan sonra,  $T1$  transistörü kesime geçer ve akım sola doğru  $D_1$  ve  $D_2$  yolu üzerinden akmaya başlar. Besleme gerilimi  $V_H$  büyük olduğu için bu yol üzerinde akım hızla azalır.



Şekil 2.21 : İki gerilim seviyeli devre ve uyartım aralığında değişken devre şekilleri.

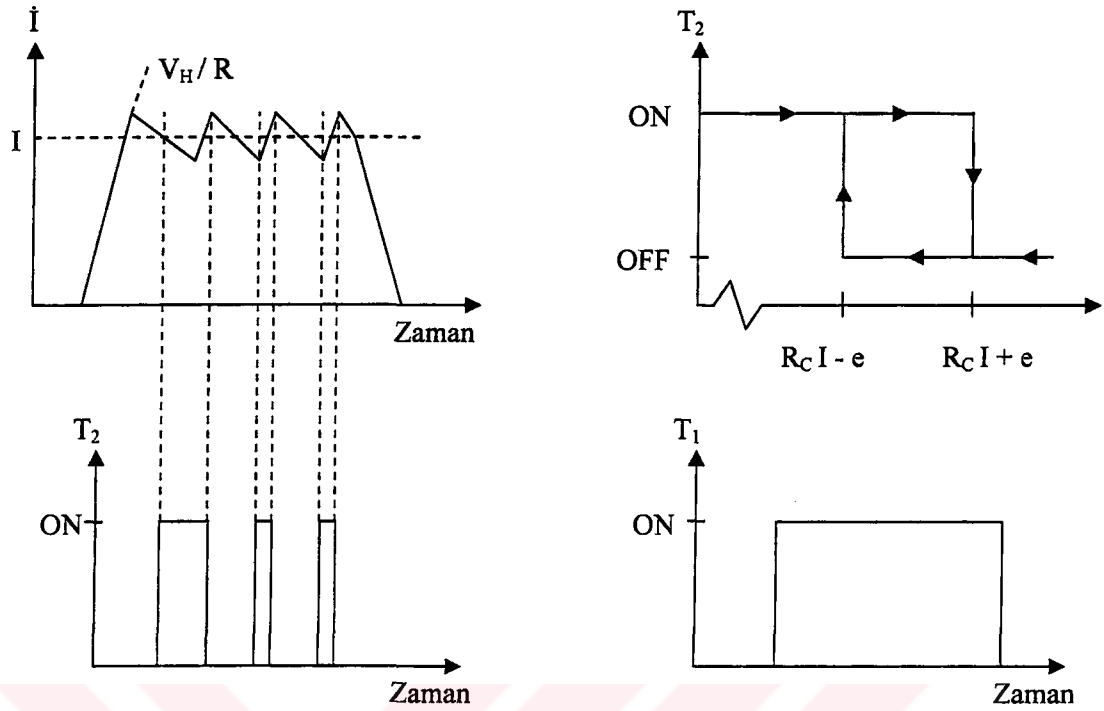
### 2.5.4 Kıyıcı (Chopper) Sürücü Devreler

Bu devreler yüksek besleme gerilimine sahiptir. Devrenin şekli şekil 2.22 'deki gibidir.



Şekil 2.22: Kıyıcı devre ve uyarım aralığında değişken devre şekilleri.

$T_2$  transistörünün baz devresi küçük  $R_C$  direncinden oluşan  $V_C$  gerilimiyle kontrol edilir. Faz sargısına uyarım işareti verildiğinde  $T_1$  transistörü anahtarlanır. Faz akımının başlangıç değeri sıfır olduğu için  $R_C$  üzerinde gerilim düşümü yoktur ve  $T_2$  transistörü de anahtarlanır. Besleme gerilimi faz sargısına uygulanır.



Şekil 2.23 : Kıyıcı devre akım dalga şekli.

Faz akımı, belirlenmiş değerine ulaşınca kadar hızla artar. Bunun doğal sonucu olarak kontrol gerilimi  $R_C I + e$  olur ve bu değer  $T_2$  transistörünü kesime götürür. Bu sırada faz sargısına hiçbir gerilim uygulanmamıştır ve akım,  $R_C$  ve  $D_1$  diyotunun oluşturduğu yoldan hızla ters yönde akmaya başlar. Kontrol gerilimi  $R_C I - e$  değerine düştüğü zaman  $T_2$  transistörü tekrar ilettime geçer. Toplam besleme gerilimi sargıya uygulanır ve akım belirlenmiş değer üstüne doğru hızla yükselir. Bu çevrim uyarım zamanına ulaşınca kadar devam eder. “On-Off” kapalı döngü kontrolüyle sargı akımı belirlenmiş değer etrafında sürekli şekilde kalır. Uyarım aralığının sonunda transistörlerin her ikisi de kesime gider ve akım serbest olarak  $D_1$  ve  $D_2$  diyotları üzerinden akar, hızla sıfıra doğru düşer. Transistörler kesimdeyken enerjinin büyük bölümü sargı indüktansında depolanır ve bu enerji beslemeye dönüşerek sistem için yüksek verim sağlanır. Şekil 2.23 'de kıyıcı devrenin akım dalga şekli ve transistörlerin anahtarlanma zamanları görülmektedir

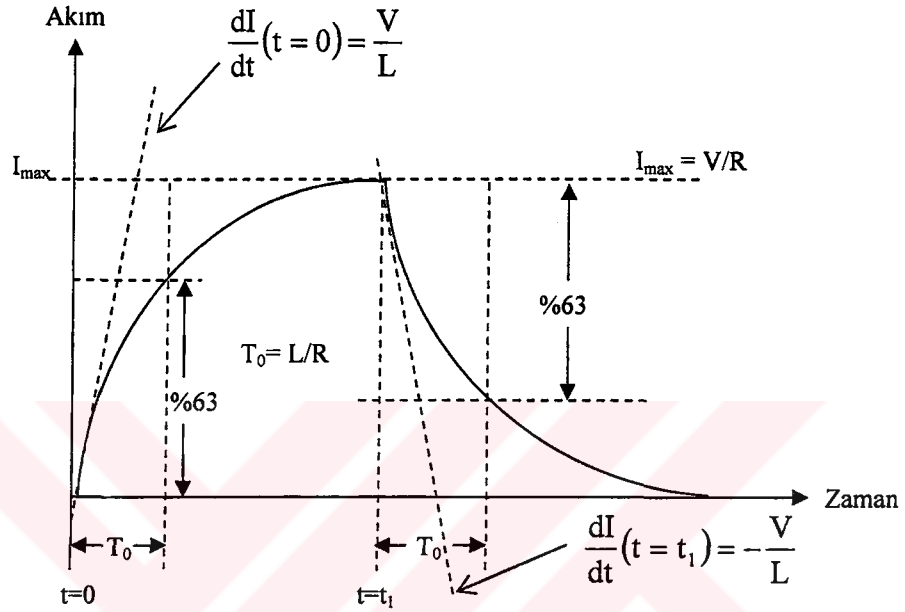
## 2.6 Yüksek Hızda Çalışma

Şimdiye kadar yapılan açıklamalarda, akımın darbe başlangıcında aniden gerekli değere yükseldiği ve darbe sonunda ise aniden sıfıra düştüğü kabul edilmişti.

Şekil 2.24 'de sargı akımının değişimi gösterilmiştir. Sargı akımı doğrusal bir değişim göstermiyor çünkü, akımın geçtiği sargının bir indüktansı (L) ve bir iç direnci (R) bulunur. Eğer

faz sargısının bağlantı uçlarına gerilim uygulanırsa akımın değişimi, zamanın bir fonksiyonu olarak, denklem 2.5 'deki gibi olur.

$$i(t) = \left(\frac{V}{R}\right) \left(1 - e^{-t\left(\frac{R}{L}\right)}\right) \quad (2.5)$$



Şekil 2.24: Zaman sabitinin devreye olan etkisi.

Gerilimin ilk uygulandığı anda sargı akımının ilk aldığı değer denklem 2.6 'da verilmiştir.

$$\frac{di(0)}{dt} = \frac{V}{L} \quad (2.6)$$

Daha sonra akım ohm yasasına göre belirli bir oranda artarak maksimuma değerine ulaşır.

$$I_{\max} = \frac{V}{R} \quad (2.7)$$

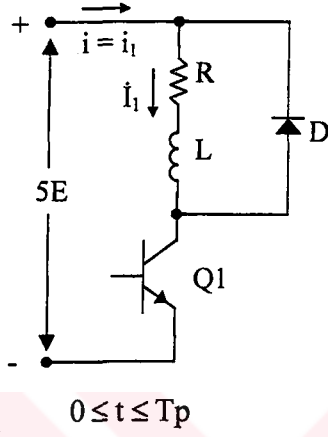
Devrenin enerjisi  $t = t_1$  anında kesildiği zaman sargı akımı, zamanın bir fonksiyonu olarak, ilk andaki değerine doğru düşmeye başlar.

$$i(t) = \left(\frac{V}{R}\right) e^{-(t-t_1)\left(\frac{R}{L}\right)} \quad (2.8)$$

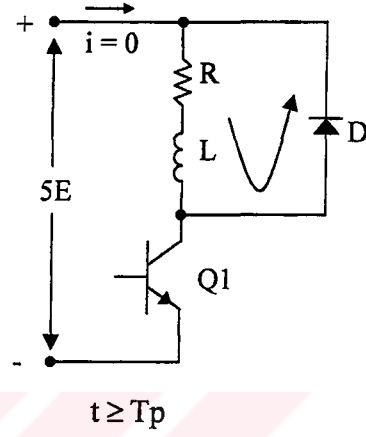
Gerilimin kesildiği andan itibaren akımın anlık değişimi denklem 2.9 'da verilmiştir.

$$\frac{di(t_1)}{dt} = -\frac{V}{L} \quad (2.9)$$

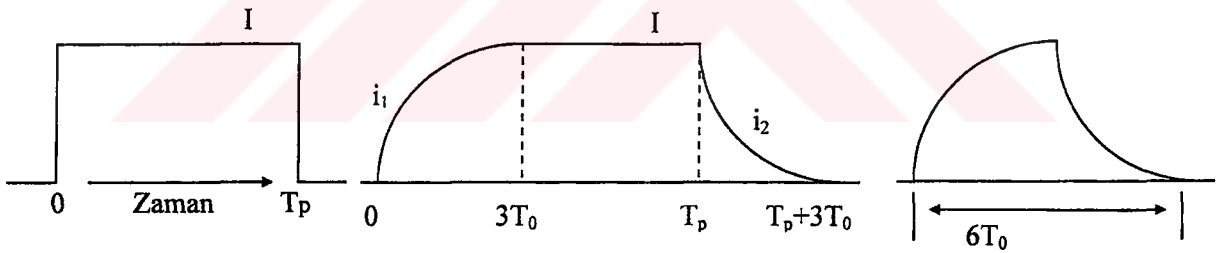
Şekil 2.25 'de  $T_0 = L/R$  'yi devrenin zaman sabiti olarak tanımlarız. Bu zaman sabitinin değeri akımın maksimum değerinin yaklaşık %63 üne kadar artabilmektedir.



(a) Bir sargının kaynağa bağlantısı.



(b) Transistör kesimde iken akımın yönü.



(c) İdeal akım dalga şekli.

(d) Gerçek akım dalga şekli.

(e) Olabilecek en kısa akım dalga şekli.

Şekil 2.25 : Bir sargının kontrolü ve akım dalga şekilleri.

Faz sargısı bir transistör ile DC kaynağa şekil 2.25(a) 'daki gibi bağlanırsa sargı uçlarına da bir diyot (D) bağlanacaktır. Bu diyotun görevi transistör kesime geçtiği zaman sargıda indüklenen ters gerilimlerin transistörü bozmasını önlemektir. Bu sargıdan geçecek gerçek akımın dalga şekli şekil 2.25(d) 'de görüldüğü gibi olacaktır.

Eğer gerçek akım dalga şekli, ideal akım dalga şekli karşılaştırılır ise üç önemli sonuca ulaşılır. Bunlar:



- Transistör tetiklendiği zaman, sargı akımı son alacağı değere aniden yükselmediği için adım motorunun üreteceği başlangıç momenti üretmesi gereken normal momentten daha küçük olacaktır.
- Transistör tetiklendiği zaman transistör akımı ( $i_1$ ), ulaşması gereken  $I = E/R$  değerine yaklaşık  $3T_0$  (saniye) sonra ulaşabilecektir.
- Transistör kesime geçtiği zaman,  $i_2$  akımı şekil 2.25(b)' deki yönde diyot-sargı kapalı devresinden geçmeye başlar. Bunun sonucu darbenin etkin periyodu  $T_p$ 'den  $T_p+3T_0$  değerine uzayacaktır. Bunun anlamı bir sargıdan başka bir sargıya anahtarlama işlemi ideal bir şekilde düşünüldüğü kadar kısa sürede mümkün değildir. Böylece, mümkün olan en kısa darbe uzunluğu, akımın darbe değerine yükselme zamanı olan  $3T_0$  ile akımın darbe değerinden sıfıra düşme zamanı  $3T_0$ 'ın toplamı olan  $6T_0$  (saniye) olacaktır. Şekil 2.25(e)' de bu durum görülmektedir. Adım motorlarının zaman sabiti genelde  $1\text{ms} < T_0 < 8\text{ms}$  arasında değişmektedir. Eğer  $T_0 = 1\text{ms}$  ise, bir adım süresi  $6 \times 1\text{ms} = 6\text{ms}$ 'den daha kısa olamaz. Bu ise maksimum adım oranını

$$\frac{1000}{6} = 166 \text{ adım/saniye}$$

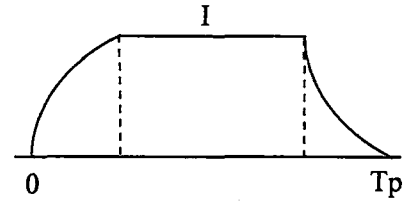
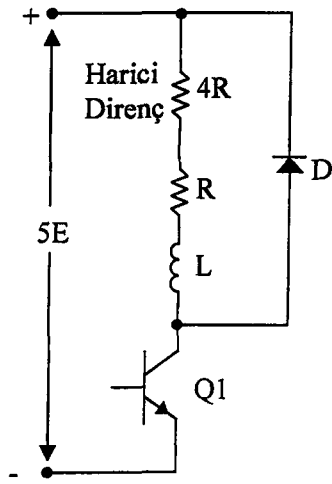
olarak belirler.

### 2.6.1 Zaman Sabitinin Ayarlanması

Adım motorlarında, adım oranını arttırmanın yolu zaman sabiti ( $T_0$ ) değerini azaltmaktır. Motor sargısına harici bir direnç ekleyip, aynı zamanda DC kaynağın gerilim değerini de eklenen direnç değerinin oranında arttırarak bu işlem gerçekleştirilebilir. Böyle bir düzenleme Şekil 2.26 'da gösterilmiştir. Harici direnç değeri ( $4R$ ) sargı direnci değerinin ( $R$ ) dört katıdır. DC gerilim değeri, artırılan direnç değerinin oranında artırılarak  $E$ 'den  $5E$ 'ye yükseltilmiştir.

Böylece zaman sabiti  $T_0 = L/R$  'den  $T_0 = L/(4R + R) = L/5R$  değerine indirilmiştir. Bunun sonucunda adım oranı 5 kat arttırılabilirken, gerilimin değeri artırılan direnç değerinin oranında artırıldığı için motor akımı aynı kalmış olur. Bu yöntemin iki temel sakıncası vardır:

- Güç kaynağı  $5E$  değerine sahip olacak ve güç harcaması  $5E \times I$  değeri kadar artacaktır.
- Harici dirençte büyük kayıplar ( $4R \times I^2$ ) meydana gelecek, buda verimi düşürecektir.



(a) Zaman sabiti ayarlama devresi.

(b) Azaltılmış zaman sabiti için akım dalga şekli.

Şekil 2.26 : Zaman sabiti ayarlama devresi ve akımının dalga şekli.

### 3. PIC MİKRODENETLEYİCİSİ

PIC serisi mikrodnetleyici Microchip firması tarafından geliştirilen bir mikrodnetleyici ürünüdür. Üretilmesindeki amaç, çok fonksiyonlu sayısal uygulamaların hızlı ve ucuz bir mikroişlemci ve yazılım yoluyla gerçekleştirilmesidir.

PIC (Peripheral Interface Controller) çevresel arabirim kontrolörü anlamına gelmektedir. İlk olarak 1994 yılında 16 bitlik ve 32 bitlik büyük işlemcilerin giriş ve çıkışlarındaki yükü azaltmak ve denetlemek amacıyla çok hızlı ve ucuz bir çözüme ihtiyaç duyulduğu için geliştirilmiştir. Çok geniş bir ürün ailesinin ilk üyesi olan PIC16C54 bu ihtiyacın ilk ürünüdür. PIC işlemcileri RISC benzeri işlemciler olarak anılmaktadır.

PIC16C54 12 bitlik komut hafıza genişliği olan, 8 bitlik bir CMOS işlemcisidir. 18 bacaklı ve dip kılıfta olup 13 adet giriş veya çıkışa (I/O) sahiptir. En fazla 20 MHz osilator hızına kadar kullanılabilir. 33 adet program komutu, 512 byte program EPROM 'u ve 25 byte RAM 'ı bulunmaktadır.

PIC serisi tüm işlemciler, herhangi bir ek bellek veya giriş/çıkış arabirim devresi gerektirmeden sadece 2 adet kondansatör, 1 adet direnç ve bir kristal ile çalıştırılabilir. Tek bacadan 25 mA akım olmak üzere, tümdevre toplam olarak 300 mA akım verebilme gücüne sahiptir. Tümdevre 4 MHz osilator frekansında çektiği akım, çalışırken 2 mA, stand-by durumunda ise 20µA kadardır.

Görüldüğü gibi mikroişlemcilerin, PIC mikrodnetleyici gibi bünyesinde RAM, ROM, EPROM gibi gerekli çevrebirimlerinin bulunmaması kontrol aşamasında uygulamada maliyeti arttırdığı gibi sistemin tasarımını zorlaştırır.

#### 3.1 Mikroişlemciler

Ön belleğine yazılmış programı işleyerek, programda belirtilen çıkışlara yönlendiren ve belirtilen girişlerden bilgi alarak işlem yapan bir tümdevredir. Mikroişlemcilerde üç temel ünite bulunmaktadır. Bunlar merkezi işlem birimi (CPU), I/O, hafızalar ve ek olarak bazı destek birimlerinden oluşur.

I/O sayısal analog ve özel fonksiyonlardan oluşur. Mikroişlemcinin dış dünya ile ilişkisini sağlar. Bu hat üzerinden, mikroişlemciye verilen ve işlemlerden alınan veriler sağlanır.

CPU program içinde belirtilen hesaplamaları yapmak ve verileri işlemek için kullanılır. 32 bit, 16 bit ve 8 bit verilerle çalışır. Bir mikroişlemcide temelde kullanılan üç farklı işlem yolu (BUS) vardır.

- Bellek ve çevre birimleri arasında veri iletmek için kullanılan "Veri Yolu",

- İşlemcinin program komutlarına ve veri saklama alanlarına erişimi sağlayan bellek adreslerini, ROM ve RAM belleklerine göndermek için kullanılan “Adres Yolu”,
- RAM belleğine veri yazıldığı veya ondan veri okunduğuna dair bilgi vermek gibi, denetim amaçları için kullanılan “Denetim Yolu” dur. Bu yol aynı zamanda kesmelerin kullanımına olanak tanıyan bağlantıları da içerir.

### 3.2 PIC Mikrodenetleyiciler

Bir mikroişlemcinin çalışabilmesi için gerekli temel birimlerden RAM, I/O ünitelerinin tek bir chip içerisinde üretilmiş biçimine mikrodenetleyici denilmektedir. Mikroişlemcilere göre daha kolay kullanım olanaklarına sahiptirler. Ayrıca ucuz ve kolay temin edilebilmelerinden dolayı otomobillerde, kameralarda v.b. gibi birçok elektronik cihazda kullanılmaktadır.

PIC mikrodenetleyicilerin avantajları veya tercih edilmelerinin nedenleri aşağıdaki gibi maddeler halinde sıralanabilir.

- Sayısal uygulamalarda hızlı ve pratik, fiyatının oldukça ucuz olması
- Bellek ve veri için ayrı yerleşik işlem yollarının bulunması
- Veri ve belleğe hızlı bir şekilde erişilebilmesi
- PIC 'e göre diğer Mikrodenetleyicilerde veri ve programı taşıyan bir tek BUS bulunması, dolayısıyla PIC 'in bu özelliği ile diğer mikrodenetleyicilerden iki kat daha hızlı olması.
- Herhangi bir ek bellek veya giriş/çıkış elemanı gerektirmeden sadece 2 kondansatör ve bir direnç ile çalışabilmeleri.
- Yüksek frekanslarda çalışabilme özelliği
- Uyku modu (Sleep Mode) durumunda çok düşük akım çekmesi.
- Kesme kapasitesi ve 14 bit komut işleme hafızası.

#### 3.2.1 PIC Mikrodenetleyicilerinin Özellikleri

PIC komutları bellekte çok az yer kaplarlar. Dolayısıyla bu komutlar 12 veya 14 bitlik bir program bellek sözcüğüne sığarlar. Harward mimari teknolojisi kullanılmayan

mikrodenetleyicilerde, yazılım programda veri kısmına atlama yapılarak, verilerin komut gibi çalıştırılması sağlanmaktadır. Bu da büyük hatalara yol açmaktadır. PIC 'lerde ise bu durum söz konusu değildir.

PIC oldukça hızlı bir mikrodenetleyicidir. Her bir komut döngüsü 1µs kadardır. Örneğin 5 milyon komutluk bir programın 20MHz 'lik bir kristalle döngüsü yalnızca 1 saniye sürer. Bu süre 386SX33 bilgisayar işlemcisi hızının yaklaşık 2 katıdır. RISC işlemcisi olması nedeniyle PIC işlem hızını arttırmıştır.

PIC tamamıyla statik bir işlemcidir, yani saat durdurulduğunda da tüm yazmaç (Register) içeriğindeki bilgi korunur. Programı çalışmadığı zaman PIC uyuma moduna geçerek çok düşük akım çekmesi sağlanabilir. PIC uyuma moduna geçtiğinde, saati (clock) durur ve uyuma işleminden önce hangi durumda olduğunu çeşitli bayraklarla (flag) ifade eder.

PIC 'lerde her türlü ihtiyaçlara cevap verebilen çeşitli hız, sıcaklık, kılıf, I/O, zamanlayıcı (timer), iletişim portları, analog sayısal dönüştürücü (A/D) ve bellek seçenekleri bulunmaktadır.

Tümdevre endüstrisinde en üstünler arasında yer alan bir kod koruma özelliğine sahiptir. Koruma biti programlandıktan sonra program belleği içindeki bilginin okunmasını önlenir.

PIC program geliştirme amacıyla programlanabilir ve tekrar silinebilir özelliğe sahiptir. Aynı zamanda seri üretim amacıyla bir kere programlanabilir (OTP) özelliği de mevcuttur (Gardner, 1998).

### **3.3 PIC Mikrodenetleyicilerin Donanımı**

PIC mikrodenetleyicisinin en önemli kısmı olan aritmetik sayısal ünitesi (ALU) bir yazmaç (W) içerir. PIC, diğer mikro işlemcilerden farklı olarak aritmetik ve mantık işlemleri için bir tek ana yazmacı olmasıdır. W yazmacı 8 bit genişliğinde olup, CPU 'daki herhangi bir veriyi başka bir adrese transfer etmek için kullanılır. CPU alanında ayrıca iki kategoriye ayırabileceğimiz veri dosya listeleri bulunur. Bu veri dosya listelerinden biri, I/O ve diğeri kontrol işlemlerinde kullanılan RAM dır.

#### **3.3.1 PIC16F877**

Yüksek performanslı RISC CPU 'su olan 16F877 'de 35 tane komut vardır. Bu komutların çoğu, 2 çevrim süren dallanma komutları hariç, 1 çevrimde işletilmektedir. İşletim hızı 20 MHz 'dir (200 ns). 8kбайt x 14 kelimelik FLASH program, 368x8 baytlık veri ve 256x8

baytlık EEPROM hafızaları vardır. Ayrıca 14 tane dahili ve harici kesme, 8-seviyeli donanım yığını vardır. Doğrudan, dolaylı ve bağıl adres modlarına sahiptir. Programlama ve çalışma esnasında sadece 5V 'luk besleme gerilimine ihtiyaç duymaktadır.

PIC16F877 düşük maliyetli, yüksek performanslı, CMOS, full-statik bir mikrodenetleyicidir. 8 seviyeli, derin küme ve çoklu iç ve dış kesme kaynaklarına sahiptir. Harvard Mimarisinin ayrı komut ve veri taşıyıcısıyla 8 bitlik veri taşınmasına ve 14 bitlik komut kelimesine imkân vermektedir. İki aşamalı olarak birçok komutun tek bir çevrimle işlenmesini sağlamaktadır. PIC16F877 mikrodenetleyicileri tipik olarak 2/1 oranında sıkıştırılmış kodlara erişmektedir ve aynı türden 8 bit mikrodenetleyicilerden 2/1 oranında daha hızlıdır. PIC16F877 36 bitlik RAM belleğine, 256 bayt EEPROM belleğine ve 33 I/O bacağına sahiptir. Bunun yanı sıra zamanlayıcı ve sayaç ta (counter) mevcuttur. Bu bilgiler Tablo 3.1 'de kısa bir şekilde özetlenmiştir.

**Tablo 3.1.** PIC16F877 'nin donanım özellikleri.

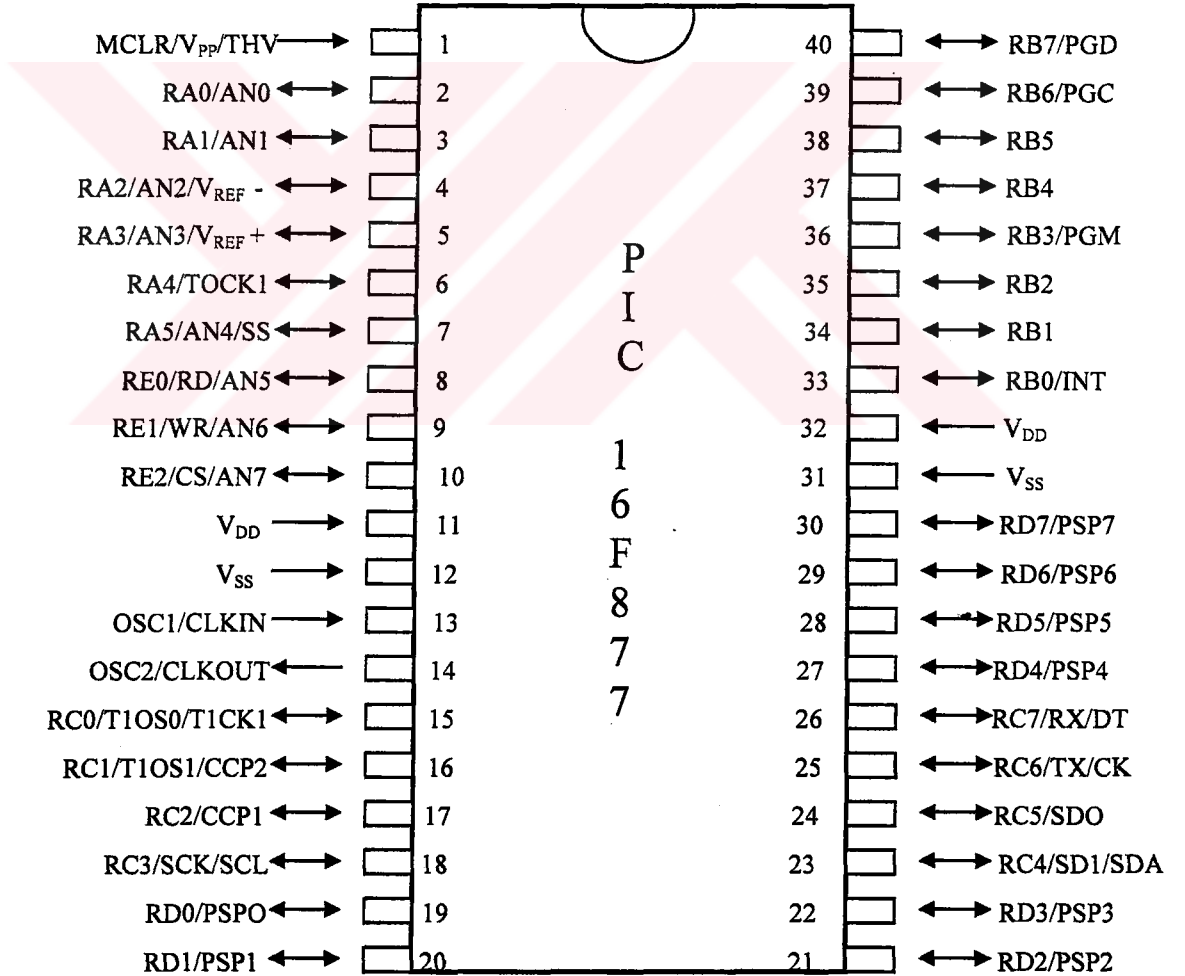
| Özellik                               | Açıklama             |
|---------------------------------------|----------------------|
| Çalışma Frekansı                      | DC - 20 MHz          |
| RESET (ve Gecikmeler)                 | POR, BOR (PWRT, OST) |
| FLASH Program Hafızası(14-bit kelime) | 8K                   |
| Veri Hafızası (bayt)                  | 368                  |
| EEPROM Veri Hafızası (bayt)           | 256                  |
| Kesmeler                              | 15                   |
| I/O Portları                          | Port A,B,C,D,E       |
| Zamanlayıcı                           | 3                    |
| Seri Haberleşme                       | MSSP, USART          |
| Paralel Haberleşme                    | PSP                  |
| 10 bit Analog-Sayısal Modül           | 8 giriş kanalı       |
| Analog Karşılaştırıcı                 | 2                    |

PIC, özellikle PIC16F877 serisi otomobillerde, motor kontrolü uygulamalarında, düşük enerji sarfiyatlı uzaktan çalışan alıcılarda, elektronik kilitlerde, güvenlik aygıtlarında ve akıllı kartlar gibi birçok uygulamalarda kullanılır. EEPROM teknolojisi uygulama programlarının (Transmitter kodları, motor hızları, alıcı frekansları, güvenlik kodları vb.) uygulanmasını son derece hızlı ve uygun hale getirmektedir.

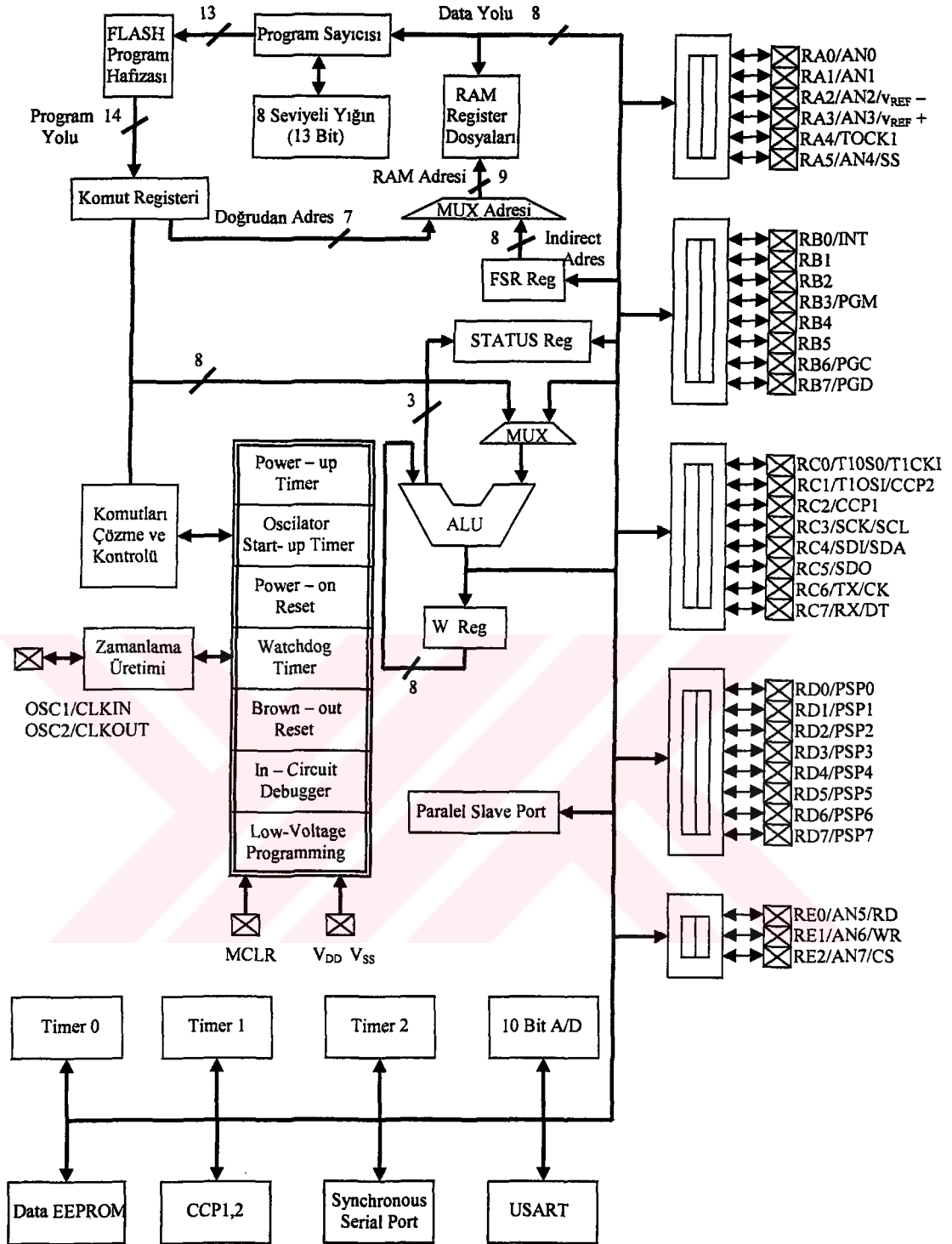
PIC16F877’de 8 bit ve 16 bit olmak üzere 3 adet zamanlayıcı/sayıcı, ve iki adet PWM modülü bulunmaktadır. 10 bitlik ve 8 kanallı analog-sayısal dönüştürücü, iki adet karşılaştırıcı ve chip üzerinde programlanabilen gerilim referans birimleri vardır. FLASH program hafızası 100.000 defa yazılıp silinebilir. EEPROM hafızası 1.000.000 defa yazılıp silinebilir. EEPROM, içindeki bilgileri 40 yıl hafızada tutabilir. Bu bilgiler Tablo 3.2 ’de özetlenmiştir.

**Tablo 3.2.** PIC16F877 hafıza özellikleri.

| Data<br>SRAM<br>(Bytes) | EEPROM<br>(Bytes) | 10-Bit<br>A/D Kanal | CCP<br>(PWM) | MSSP |                            | USART | Timer<br>8/16 bit | Karşılaştırıcı |
|-------------------------|-------------------|---------------------|--------------|------|----------------------------|-------|-------------------|----------------|
|                         |                   |                     |              | SPI  | Master<br>I <sup>2</sup> C |       |                   |                |
| 368                     | 256               | 8                   | 2            | VAR  | VAR                        | VAR   | 2/1               | 2              |



**Şekil 3.1:** PIC16F877 ’nin bacak bağlantıları.



Şekil 3.2: PIC16F877 blok diyagramı.

Sonuç olarak Şekil 3.1 'de bacak bağlantı adları verilen PIC16F877 'nin bacak bağlantı görevleri de Tablo 3.3 'de verilmiştir. Şekil 3.2 'de PIC16F877 'nin blok diyagramından görüldüğü gibi bir donanım yapısı bulunmaktadır, ayrıca iç yazmaçları ve port bağlantıları gösterilmiştir [ PIC 16F87XA Data Sheet, 2001].



**Tablo 3.3 PIC16F877 bacak adları ve görevleri.**

| Pin Adı            | DIP Pin# | Buffer Tipi | Görevi                                                                                                                                                                                                  |
|--------------------|----------|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| OSC1/CLKIN         | 13       | ST/CMOS(4)  | Kristal osilatör girişi/Harici CLK girişi                                                                                                                                                               |
| OSC2/CLKOUT        | 14       | -           | Kristal osilatör modunda kristal osilatör çıkışı, kristal ya da rezonatöre bağlanır. RC modunda, OSC1'in ¼ frekansına sahip CLKOUT çıkışıdır. Bu frekans aynı zamanda komut çevrim frekansını gösterir. |
| MCLR/Vpp/THV       | 1        | ST          | Ana reset gerilimi veya programlama gerilim girişi veya yüksek gerilim test mod kontrolü. Reset etmek için bu pin "0" (LOW) seviyesine getirilmelidir.                                                  |
| RA0/AN0            | 2        | TTL         | PORTA iki yönlü bir I/O portudur. RA0 aynı zamanda analog giriştir.                                                                                                                                     |
| RA1/AN1            | 3        | TTL         | RA1 aynı zamanda analog giriş (AN1) olabilmektedir.                                                                                                                                                     |
| RA2/AN2/VREF-      | 4        | TTL         | RA2 aynı zamanda analog giriş (AN2) olabilmektedir veya negatif analog referans gerilimi olur.                                                                                                          |
| RA3/AN3/VREF+      | 5        | TTL         | RA3 aynı zamanda analog giriş (AN3) olabilmektedir veya pozitif analog referans gerilimi olur.                                                                                                          |
| RA4/T0CKI          | 6        | ST          | RA4 aynı zamanda TIMER0 'ın clock girişi olur.                                                                                                                                                          |
| RA5/SS/AN4         | 7        | TTL         | RA5 analog giriştir (AN4) ya da senkronize seri port için slave seçicidir.                                                                                                                              |
| RB0/INT            | 33       | TTL/ST(1)   | PORTB iki yönlü I/O portudur. RB0 aynı zamanda external kesme pini olmaktadır                                                                                                                           |
| RB1                | 34       | TTL         |                                                                                                                                                                                                         |
| RB2                | 35       | TTL         |                                                                                                                                                                                                         |
| RB3/PGM            | 36       | TTL         | RB3 aynı zamanda düşük gerilim programlama girişi olabilmektedir.                                                                                                                                       |
| RB4                | 37       | TTL         | Pin değişiminde kesme                                                                                                                                                                                   |
| RB5                | 38       | TTL         | Pin değişiminde kesme                                                                                                                                                                                   |
| RB6/PGC            | 39       | TTL/ST(2)   | Pin değişiminde kesme veya seri program saati                                                                                                                                                           |
| RB7/PGD            | 40       | TTL/ST(2)   | Pin değişiminde kesme veya seri program saati                                                                                                                                                           |
| RC0/T1OSO/T1CKI    | 15       | ST          | PORTC iki yönlü I/O portudur. RC0 aynı zamanda Timer1'in osilatör çıkışı yada Timer1 clock girişi olabilmektedir.                                                                                       |
| RC1/T1OSI/CCP2     | 16       | ST          | RC1 aynı zamanda Timer1'in osilatör girişi yada Capture2 girişi/Compare2 çıkışı/PWM2 çıkışı olabilmektedir.                                                                                             |
| RC2/CCP1           | 17       | ST          | RC2 aynı zamanda Capture1 girişi/Compare1 çıkışı/ PWM1 çıkışıdır.                                                                                                                                       |
| RC3/SCK/SCL        | 18       | ST          | RC3 aynı zamanda Senkronize Seri clock girişi/ SPI ve I <sup>2</sup> C' nin her ikisi için çıkış olabilmektedir.                                                                                        |
| RC4/SDI/SDA        | 23       | ST          | RC4 aynı zamanda SPI modda SPI veri girişi yada I <sup>2</sup> C modda data I/O'sudur.                                                                                                                  |
| RC5/SDO            | 24       | ST          | RC5 aynı zamanda SPI data çıkışı olabilmektedir.                                                                                                                                                        |
| RC6/TX/CK          | 25       | ST          | RC6 aynı zamanda USART asenkron verici veya senkron clock olabilmektedir.                                                                                                                               |
| RC7/RX/DT          | 26       | ST          | RC7 aynı zamanda USART asenkron alıcı veya senkron veri olabilmektedir.                                                                                                                                 |
| RD0/PSP0           | 19       | ST/TTL(3)   | PORTD iki yönlü I/O portudur veya paralel slave porttur.                                                                                                                                                |
| RD1/PSP1, RD2/PSP2 | 20,21    | ST/TTL(3)   |                                                                                                                                                                                                         |
| RD3/PSP3, RD4/PSP4 | 22,27    | ST/TTL(3)   |                                                                                                                                                                                                         |
| RD5/PSP5, RD6/PSP6 | 28,29    | ST/TTL(3)   |                                                                                                                                                                                                         |
| RD7/PSP7           | 30       | ST/TTL(3)   |                                                                                                                                                                                                         |
| RE0/RD/AN5         | 8        | ST/TTL(3)   | PORTE iki yönlü I/O portudur.RE0 aynı zamanda paralel slave port için read kontrolü veya analog giriş (AN5) olabilmektedir.                                                                             |
| RE1/WR/AN6         | 9        | ST/TTL(3)   | RE1 aynı zamanda paralel slave port için write kontrolü veya analog giriş (AN6) olabilmektedir                                                                                                          |
| RE2/CS/AN7         | 10       | ST/TTL(3)   | RE3 aynı zamanda paralel slave port için chip seçme kontrolü veya analog olur.                                                                                                                          |
| VSS                | 12,31    | -           | Lojik ve I/O pinleri için toprak referans                                                                                                                                                               |
| VDD                | 11,32    | -           | Lojik ve I/O pinleri için pozitif beslemedir.                                                                                                                                                           |

I : giriş, O : çıkış, I/O : giriş/çıkış, - : kullanılmıyor, TTL : TTL giriş, ST : Schmitt Trigger giriş

### 3.3.2 Giriş/Çıkış Portları

I/O portlarındaki bazı pinler, devredeki çevresel özellikler için alternatif bir fonksiyonla çoklanmıştır. Genelde bir çevresel fonksiyon aktif olduğunda, bu fonksiyon ile ilgili bacaklar genel amaçlı I/O hattı gibi kullanılmayabilir.

#### 3.3.2.1 PortA ve Trisa Register

PORTA, 6-bit genişliğinde çift yönlü bir portdur. TRISA, veri yön saklayıcısıdır. TRISA yazmacının bitlerinden biri “1” yapıldığında, PORTA’ da bu bite tekabül eden bit giriş olarak ayarlanmış olur. TRISA yazmacının bitlerinden biri “0” yapıldığında, PORTA’ da bu bitine tekabül eden bit çıkış olarak ayarlanmış olur.

PORTA yazmacının okunmasında pinlerin durumu belirlenir, oysa yazma işlemi port latch ’e yazmayla gerçekleşir. Tüm yazma işlemleri sırasıyla okuma, değiştirme ve yazma işlemlerinin yapılmasıyla gerçekleştirilir. PORT’ a bir yazma işlemi; port pinlerinin okunması, sonra bu değerlerin değiştirilmesi ve daha sonra port veri latch ’ine yazılmasıyla sonuçlandırılır.

PORTA ’nın RA4 pini aynı zamanda TIMER0 ’ın saat girişidir (RA4/T0CKI). RA4/T0CKI pini, Schmitt Trigger girişi ve açık drain çıkışı şeklinde kullanılabilir. Diğer tüm PORTA pinleri TTL giriş seviyelerine ve CMOS çıkış sürücülerine sahiptir. Ayrıca analog girişler ve analog VREF girişine sahiptir. Analog ya da sayısal her bir pinin işlevi, ADCON1 (A/D Control Register1) hafızasındaki kontrol bitlerinin set/clear şeklinde seçilmesiyle belirlenir. Ayrıca bu pinler, devrenin her RESET edilmesinden sonra analog giriş olarak ayarlanır.

Aşağıda Tablo 3.4 ’te PORTA pinlerinin fonksiyonları özetlenmiştir.

**Tablo 3.4:** PORTA pinlerinin fonksiyonları.

| Pin Adı                   | Bit# | Buffer | Fonksiyonu                                                                       |
|---------------------------|------|--------|----------------------------------------------------------------------------------|
| RA0/AN0                   | Bit0 | TTL    | Giriş/Çıkış ya da analog giriş                                                   |
| RA1/AN1                   | Bit1 | TTL    | Giriş/Çıkış ya da analog giriş                                                   |
| RA2/AN2                   | Bit2 | TTL    | Giriş/Çıkış ya da analog giriş                                                   |
| RA3/AN3/VREF              | Bit3 | TTL    | Giriş/Çıkış ya da analog giriş ya da VREF                                        |
| RA4/T0CKI                 | Bit4 | ST     | Giriş/Çıkış ya da TIMER0 için harici saat girişi                                 |
| RA5/ $\overline{SS}$ /AN4 | Bit5 | TTL    | Giriş/Çıkış ya da analog giriş veya senkronize seri port için slave seçme girişi |

### 3.3.2.2 PortB ve TrisB Register

PORTB, 8-bit genişliğinde çift yönlü bir portdur. TRISB, veri yön saklayıcısıdır. TRISB yazmacının bitlerinden biri "1" yapıldığında, PORTB' de bu bite tekabül eden bit giriş olarak ayarlanmış olur. TRISB yazmacının bitlerinden biri "0" yapıldığında, PORTB' de bu bite tekabül eden bit çıkış olarak ayarlanmış olur. PORTB 'nin üç pini RB3/PGD, RB6/PGC ve RB7/PGD, düşük voltaj programlama fonksiyonlarıyla çoklanmıştır.

Tablo 3.5: PORTB pinlerinin fonksiyonları.

| Pin adı | Bit# | Buffer              | Görevi                                         |
|---------|------|---------------------|------------------------------------------------|
| RB0/INT | Bit0 | TTL/ST <sup>1</sup> | Giriş/çıkış pini ya da harici kesme girişi.    |
| RB1     | Bit1 | TTL                 | Giriş/çıkış pini                               |
| RB2     | Bit2 | TTL                 | Giriş/çıkış pini                               |
| RB3/PGM | Bit3 | TTL                 | Giriş/çıkış pini ya da LVP modunda programlama |
| RB4     | Bit4 | TTL                 | Giriş/çıkış pini                               |
| RB5     | Bit5 | TTL                 | Giriş/çıkış pini                               |
| RB6/PGC | Bit6 | TTL/ST <sup>2</sup> | Giriş/çıkış pini                               |
| RB7/PGD | Bit7 | TTL/ST <sup>2</sup> | Giriş/çıkış pini                               |

TTL = TTL girişi ST = schmitt trigger girişi

1: Bu buffer harici kesme olarak ayarlandığında schmitt trigger girişidir.

2: Bu buffer seri programlama modunda kullanıldığında bir TTL girişidir.

### 3.3.2.3 PortC ve TrisC Register

PORTC, 8-bit genişliğinde çift yönlü bir portdur. TRISC, veri yön saklayıcısıdır. TRISC yazmacının bitlerinden biri "1" yapıldığında, PORTC 'de bu bite tekabül eden bit giriş olarak ayarlanmış olur. TRISC yazmacının bitlerinden biri "0" yapıldığında, PORTC 'de bu bite tekabül eden bit çıkış olarak ayarlanmış olur.

Tablo 3.6: PORTC Pinlerinin Fonksiyonları.

| Pin adı         | Bit# | Buffer | Görevi                                                                                         |
|-----------------|------|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| RC0/T1OSO/T1CKI | Bit0 | ST     | Giriş/Çıkış pini yada timer1 osilatör çıkışı/timer1 saat girişi                                |
| RC1/T1OSI/CCP2  | Bit1 | ST     | Giriş/Çıkış pini yada timer1 osilatör girişi veya capture2 girişi /compare2 çıkışı/PWM2 çıkışı |
| RC2/CCP1        | Bit2 | ST     | Giriş/Çıkış pini yada capture1 girişi/compare1 çıkışı/PWM1 çıkışı                              |
| RC3/SCK/SCL     | Bit3 | ST     | Giriş/Çıkış pini yada SPI ve I <sup>2</sup> C modları için senkronize seri saat                |
| RC4/SCI/SDA     | Bit4 | ST     | Giriş/Çıkış pini yada SPI data girişi veya I <sup>2</sup> C                                    |
| RC5/SDO         | Bit5 | ST     | Giriş/Çıkış pini yada senkronize seri port çıkışı                                              |
| RC6/TX/CK       | Bit6 | ST     | Giriş/Çıkış pini yada USART asenkronize verici veya senkronize saat                            |
| RC7/RX/DT       | Bit7 | ST     | Giriş/Çıkış pini yada USART asenkronize alıcı veya senkronize data                             |

### 3.3.2.4 PortD ve TrisD Register

PORTD 8-bit genişliğindedir, giriş olarak kullanıldığında Schmitt Trigger 'li ve buffer 'lıdır. Her bir pin ayrı ayrı giriş çıkış olarak ayarlanabilir. PORTD 8-bit genişliğinde paralel slave port olarak da ayarlanabilir.

**Tablo 3.7:** PORTD pinlerinin fonksiyonları.

| Pin adı  | Bit# | Buffer | Görevi                                         |
|----------|------|--------|------------------------------------------------|
| RD0/PSP0 | Bit0 | ST/TTL | Giriş/Çıkış pini ya da paralel slave port bit0 |
| RD1/PSP1 | Bit1 | ST/TTL | Giriş/Çıkış pini ya da paralel slave port bit1 |
| RD2/PSP2 | Bit2 | ST/TTL | Giriş/Çıkış pini ya da paralel slave port bit2 |
| RD3/PSP3 | Bit3 | ST/TTL | Giriş/Çıkış pini ya da paralel slave port bit3 |
| RD4/PSP4 | Bit4 | ST/TTL | Giriş/Çıkış pini ya da paralel slave port bit4 |
| RD5/PSP5 | Bit5 | ST/TTL | Giriş/Çıkış pini ya da paralel slave port bit5 |
| RD6/PSP6 | Bit6 | ST/TTL | Giriş/Çıkış pini ya da paralel slave port bit6 |
| RD7/PSP7 | Bit7 | ST/TTL | Giriş/Çıkış pini ya da paralel slave port bit7 |

### 3.3.2.5 PortE ve TrisE Register

PORTE ayrı ayrı giriş ve çıkış olarak ayarlanabilen 3 pine sahiptir. Bu pinler Schmitt Trigger buffer 'ına sahiptir. PORTE 'nin I/O'ları PSP moduna ayarlandığında mikroişlemci kontrol girişleri olmaktadır.

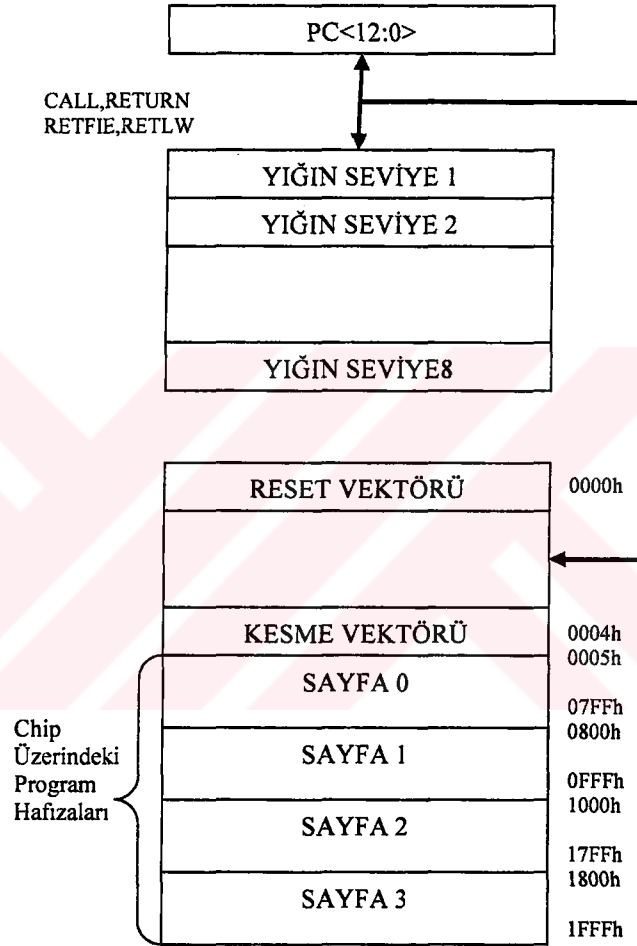
**Tablo 3.8:** PORTE pinlerinin fonksiyonları.

| Pin adı                   | Bit# | Buffer | Görevi                                                                                                                                                                            |
|---------------------------|------|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| RE0/ $\overline{RD}$ /AN5 | Bit0 | ST/TTL | Giriş çıkış pini ya da PSP modunda read (okuma) kontrolü<br>veya analog giriş $\overline{RD}$ 1 = bir read (okuma) işlemi değil<br>0 = okuma işlemi. PORTD saklayıcısından okunur |
| RE1/ $\overline{WR}$ /AN6 | Bit1 | ST/TTL | Giriş çıkış pini ya da PSP modunda write(yazma) kontrolü<br>veya analog giriş $\overline{WR}$ 1 = bir write (yazma)işlemi değil<br>0 = yazma işlemi. PORTD saklayıcısına yazılır  |
| RE2/ $\overline{CS}$ /AN7 | Bit2 | ST/TTL | Giriş çıkış pini ya da PSP modunda seçme kontrolü veya<br>analog giriş $\overline{CS}$ 1 = devre seçilmemiştir.<br>0 = devre seçilmiştir.                                         |

### 3.4 Bellek Yapısı

PIC16F877 'de üç tane bellek bloğu vardır. Program belleği ve veri belleği ayrı ayrı yollara sahiptir. Bu nedenle iki belleğe de aynı anda giriş mümkün olmaktadır.

PIC16F877 8Kx14 kelimelik program bellek alanını adreslemek için 13-bit 'lik program sayacına sahiptir. PIC16F877 8Kx14 kelimelik FLASH program belleğine sahiptir. RESET vektörü 0000h ve kesme vektörü 0004h adreslerindedir [ PIC 16F87XA Data Sheet, 2001].



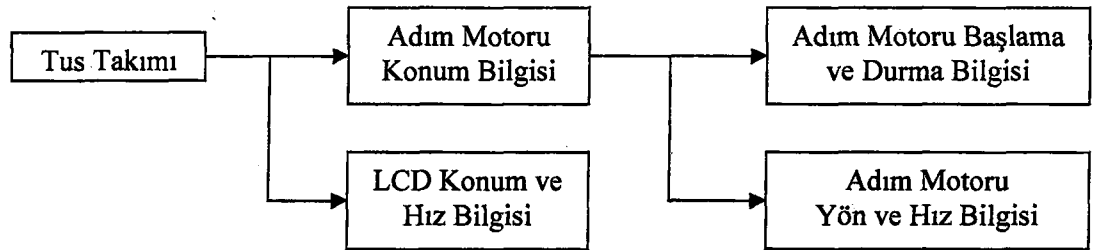
Şekil 3.3: Program bellek haritası.

#### 4. UYGULAMA DEVRESİ TASARIMI

Bundan önceki iki bölümde adım motorları ve PIC mikrodenetleyiciler incelendi. Bu bölümde ise incelenen bölümlerdeki bilgilerden faydalanarak adım motoru sürme devresi, tuş takımı ve LCD devreleri oluşturulacaktır. Adım motoru sürme devresi oluşturulurken çeşitli anahtarlama elemanları kullanılacaktır. Sürme devresinin verimli çalışabilmesi için sürme devresinde kullanılan elemanların karakteristikleri ve teknik verileri çok iyi bilinmelidir. PIC 16F877 'yi beslemek için ayrı bir regülatör devresi oluşturulmalıdır. Çünkü uygulama devresinin giriş gerilimi 12V 'dur. Fakat PIC 16F877 'nin çalışma gerilimi 5V dur. Ayrıca bipolar adım motorunu beslemek amacıyla da ayrı bir besleme devresi oluşturulmalıdır. Çünkü bu motorun nominal çalışma gerilimi 5V dur. PIC 'i besleyen regülatör devresinin gerilimi ile bipolar adım motorunu besleyen devre gerilimleri aynıdır. Bu iki besleme devresini birbirinden ayırmaktaki amaç herhangi bir nedenden dolayı, bipolar adım motorunun kendisinde veya sürme devresinde oluşabilecek bir hatadan PIC besleme devresinin etkilenmesini önlemektir. Daha sonra adım motorlarının gideceği pozisyonların girilebileceği bir giriş devresi olarak tuş takımının, motor hızlarını belirtmek amacıyla bir analog girişin, motorların gittiği ve gitmesi gereken konumların görülebilmesi için bir LCD 'nin (Liquid Crystal Display) ve adım motorlarının dönüş yönünü dikkate almak şartıyla, gerekli darbe dizisini üreten kısımların donanıma uygun yazılımı yapılacaktır.

Şekil 4.1 'de görüldüğü gibi istenilen çalışma koşulları göz önünde bulundurulacak olursa yazılım kısmı beş ana başlık altında düşünülebilir. Bu başlıkları oluşturabilmek amacıyla her bir başlık için yazılım blokları oluşturulmalıdır. Daha sonra bu bloklar birleştirilerek programın bir bütün halde çalışması sağlanmalıdır.

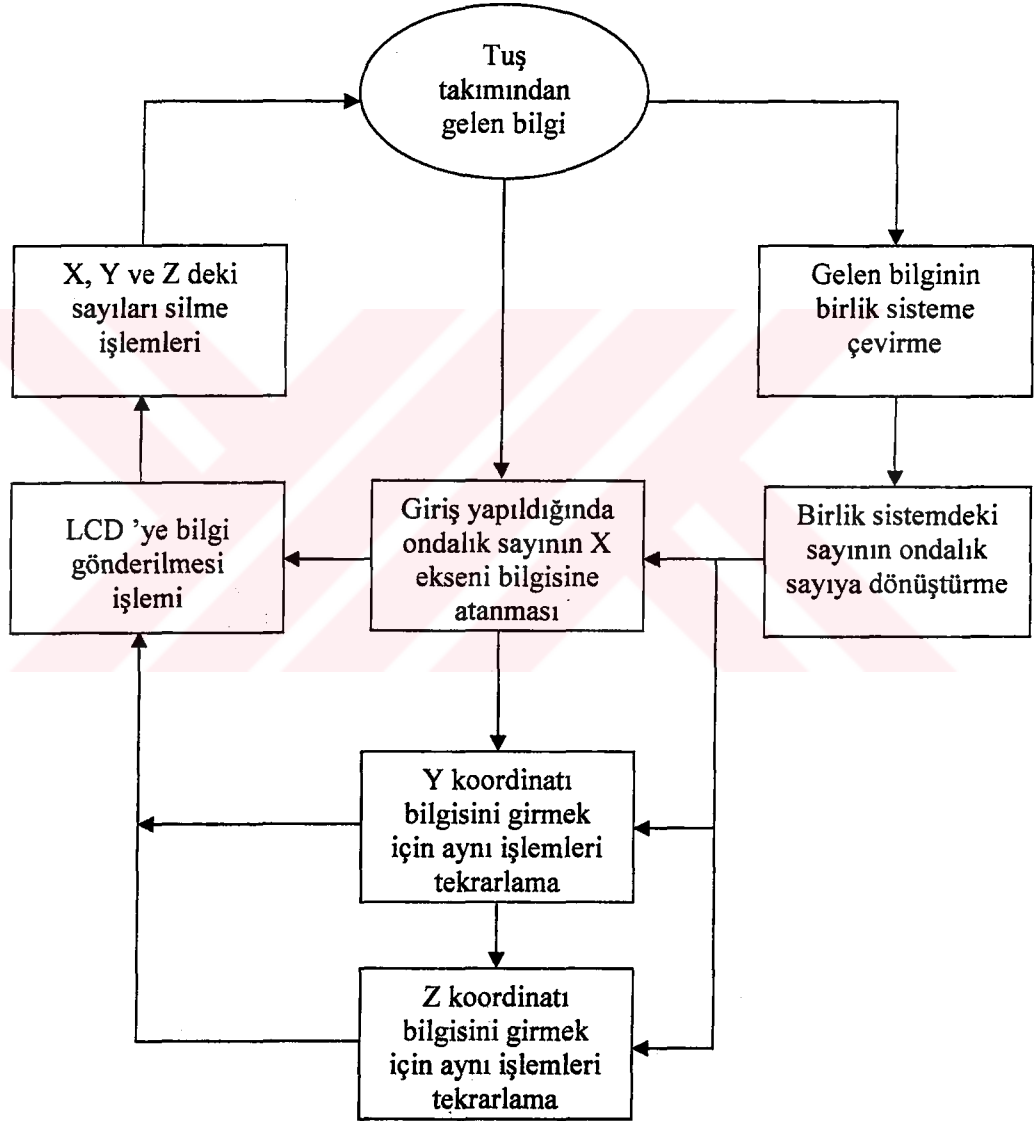
Yazılım yapılırken bilinmesi gereken en önemli noktalardan biride kullanılan mikrodenetleyicinin donanımsal özellikleridir. Bu özelliklerin iyi derecede bilinmesinin yazılımda oluşabilecek hataları en aza indirmede çok önemli etkisi olacaktır.



Şekil 4.1: Yazılımın genel blok diyagramı.

#### 4.1 Tuş Takımı

Tuş takımını kullanılmasıdaki amaç x, y ve z yönünde hareketi sağlayan adım motorlarının gideceği noktaların belirlenmesidir. Tuş takımında dikkate alınması gereken ilk nokta herhangi bir tuşa basıldığında bilginin mikrodenetleyiciye sayısal bilgi olarak gönderildiğidir. Yani herhangi bir tuşa basıldığında tuş mikrodenetleyicinin hangi pinine ait ise o pinin bir olduğu aksi durumda ise sıfır olduğudur. Bu nedenle yazılım içerisinde oluşturulan kısımlarla pinlerden gelen sayısal bilgi ondalık sayıya çevrilmelidir. Bu işlemin her üç yönde gidilecek noktaların koordinatları yazılırken tekrarlanması gerekir.

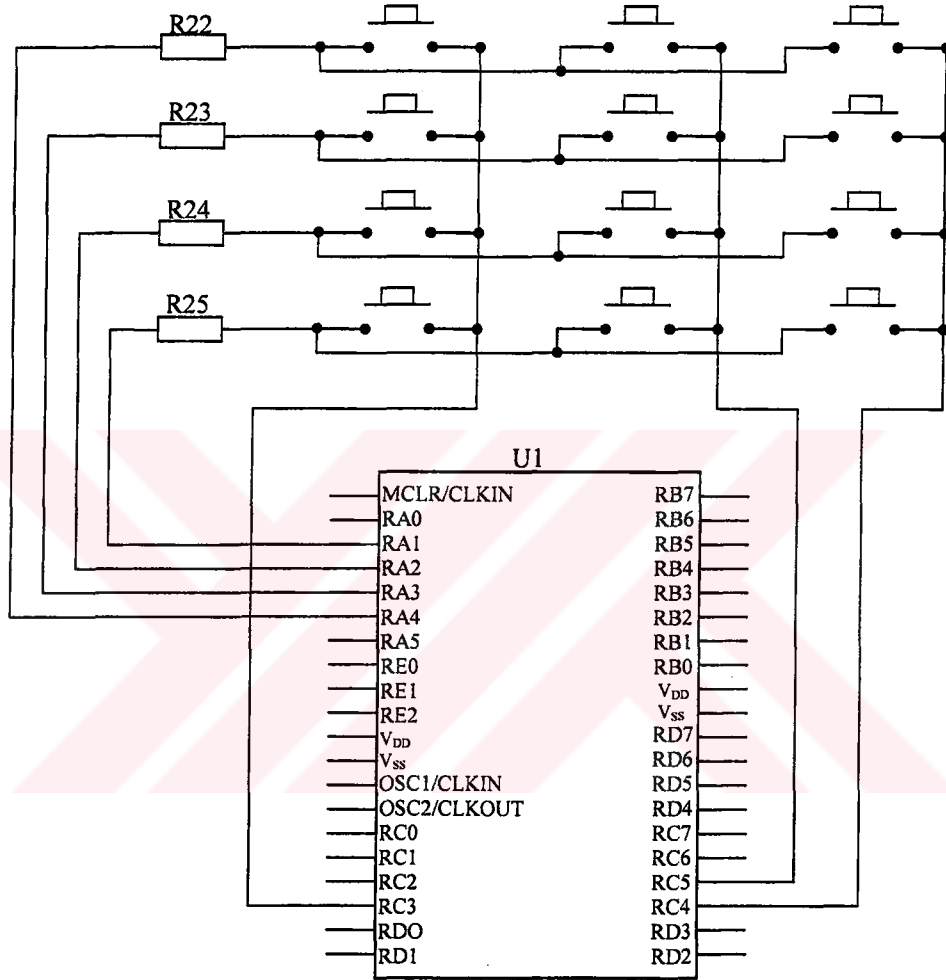


Şekil 4.2: Tuş takımı alt blokları.

Bu şekilde x yönündeki adım motorunun gideceği koordinat girildikten sonra y yönündeki adım motorunun da gideceği koordinat girilmelidir. Bunun için, x yönündeki adım



motorunun gideceği koordinatı kabul ettirme tuşu bulundurulmalıdır. X yönündeki hareketi belirleyen koordinat kabul ettirildikten sonra y yönündeki hareket için koordinat girişi yapılmalıdır. Bunun için x yönündeki koordinat girilirken yapılan işlemler resetlenerek y yönündeki hareketi belirleyen koordinatın girilmesi için aynı işlemler tekrarlanmalıdır. Bu işlemleri yapabilecek yazılım yapıldıktan sonra x ve y yönündeki koordinatların girilebileceği bir sistem oluşmuş olacaktır.



Şekil 4.3: Tuş takımının bağlantı şeması.

Diğer bir motor ise z yönünde hareketi sağlayacak olan adım motorudur. Bu adım motorunun konum bilgisinin girilmesi gereklidir. Çünkü z yönünde hareketi sağlayan adım motorunun mekanizmasına bağlı olan ve bu eksen üzerinde hareket eden bir matkap bulunmaktadır ve bu matkabin delediği yüzeyin yerden olan yüksekliği değişken olabilir. Dolayısıyla matkabin aşağıya iniş mesafesi de değişken olmak zorundadır. Fakat sürekli olarak delinecek yüzeyin yerden olan yüksekliği değişmeyecektir. Bu nedenden dolayı her defasında matkabin gideceği koordinatlar belirlenirken iniş mesafesini de girmenin hiçbir faydası



olmayacaktır. Sadece delinecek olan yüzeyin yerden olan yüksekliği değiştiği zaman matkabın iniş mesafesi değişmelidir. Tuş takımı tasarlanırken silme tuşuna belirli bir süre basıldığında z yönündeki hareketin girileceği ve silme tuşuna tekrar belirli bir süre basılınca yeniden değiştirilene kadar bu mesafenin sabit kalacağı bir giriş sistemi sağlanmalıdır. Bu giriş yapılırken z yönündeki giriş aktif ise x veya y yönündeki koordinatların girişinde yapılan işlemler resetlenir ve z yönündeki koordinatın girilmesi için giriş işlemleri tekrarlanır. Adım motorlarının çalışması için start ve stop butonları olmalıdır. Sıfır tuşu, sistemin çalıştırması istenildiğinde bir süre basılı tutulduğunda start, sistemin durdurulması istenildiğinde motorlar çalışırken basıldığında stop görevi yapmaktadır.

Sistemin el ve otomatik çalışma gibi bir özelliği bulunmaktadır. Sistemi el konumuna alma için belirli bir süre kabul ettirme tuşuna basmak yeterlidir. Sistemi tekrar otomatik konumuna almak için ise aynı işlem tekrarlanır.

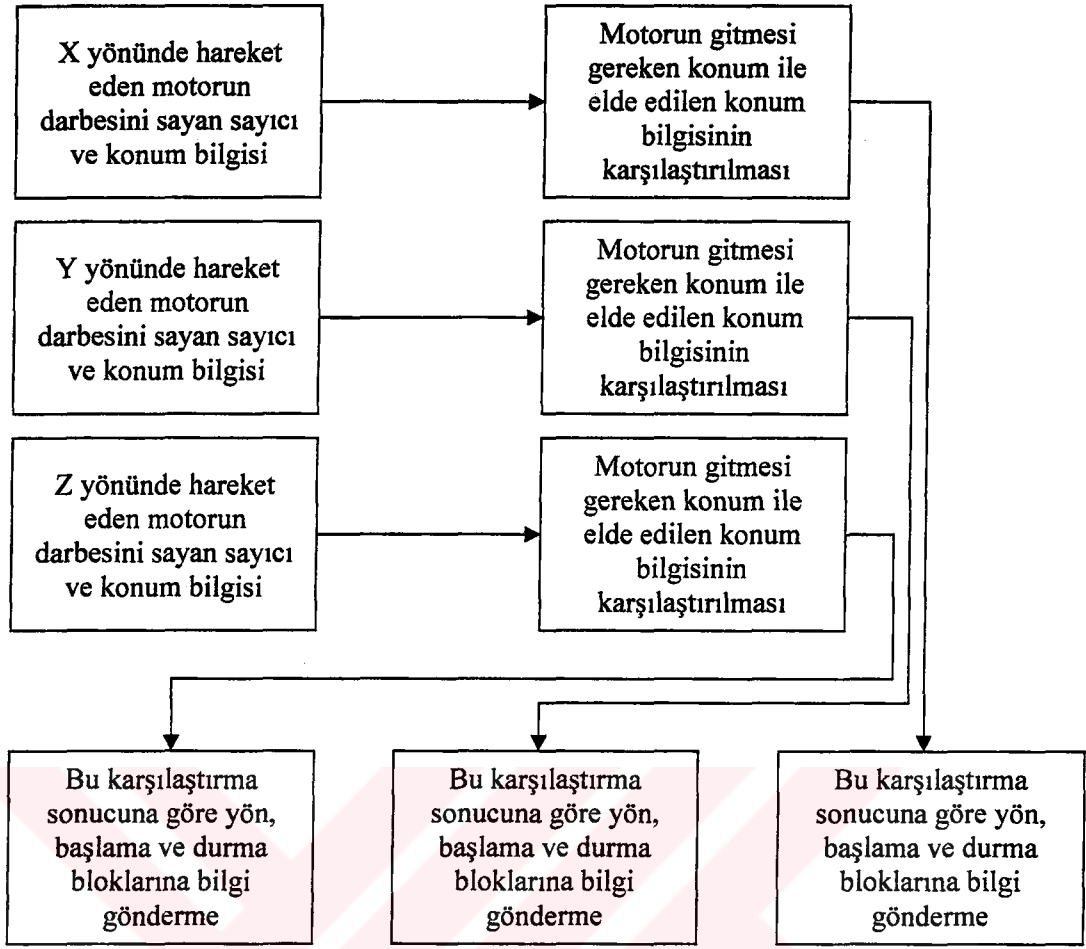
Tuş takımında son olarak yapılması gereken olay girilen konum bilgisinin silinmesi yani delete tuşudur. Burada delete tuşuna bastığımızda x, y ve z yönünde girilen koordinat değerlerinin yazıldığı kısımların içeriklerinin sıfırlanması ile sağlanmalıdır.

Şekil 4.2 'de yukarıda anlatılan sistemin çalışması için program içerisinde oluşturulması gereken bloklar ve çalışma düzeni görülmektedir. Şekil 4.3 'devrenin bağlantı şeması görülmektedir.

#### **4.2 Adım Motoru Konum Bilgisi**

Adım motorlarının gitmesi gereken noktaları belirleyen girişleri elde ettikten sonra sıra bu girişleri kullanarak motoru kontrol etme kısmına geldi. Daha önceki bilgilerden faydalanılacak olunursa adım motorunun konumunun sargı uçlarına uygulanan gerilimle değiştiği biliniyor. O halde adım motorunun bir sargısına uygulanan gerilimle meydana gelen konum değişimi yani adım açısı biliniyorsa ve mikrodenetleyici içerisinde adım motorunun sargılarına sırayla uygulanan darbe sayısı hesaplanırsa adım motorunun konum değişimi hesaplanabilir. Bu amaçla adım motorlarına uygulanan darbelerin sayısını bilmek amacıyla her adım motoru için sayıcı yazılımı gerçekleştirilmelidir.

Daha sonra giriş bilgileri ile adım motorunun bulunduğu veya gideceği noktalar karşılaştırılırsa başlama, durma ve hareket yönü bilgileri elde edilir. Bu işlemler her üç yönde hareket eden adım motorları için yapılmalıdır. Bu bilgiler bir sonraki kısımda kullanılmak üzere düzenlendiğinde konum bilgileri elde edilmiş olunur. Şekil 4.4 'de adım motorlarının konum bilgisi ile ilgili alt bloklar görülmektedir.



Şekil 4.4 : Konum bilgisi alt blokları.

### 4.3 Adım Motoru Başlama, Durma, Hız ve Yön Bilgisi

Bu kısımda elde edilen konum bilgilerinin ışığında adım motorunun hız kontrolü yapılarak başlama, durma ve yön bilgileri gönderilecektir.

Adım motorunun hızından başlanacak olunursa, hızın motor sargılarına uygulanan darbelerin hızıyla doğru orantılı olduğu söylenmişti. Burada darbe hızı, mikrodnetleyicinin analog girişine bağlanan bir potansiyometre ile belirleniyor. Dikkat edilmesi gereken en önemli nokta belirli bir darbe hızının üzerine çıktığında motorların bu darbeye tepki veremeyeceğidir. Yani darbe sayısı ile konum arasındaki doğrusal ilişki kaybolacaktır. Kullanılan adım motorlarında maksimum darbe hızı 8 ms 'dir.

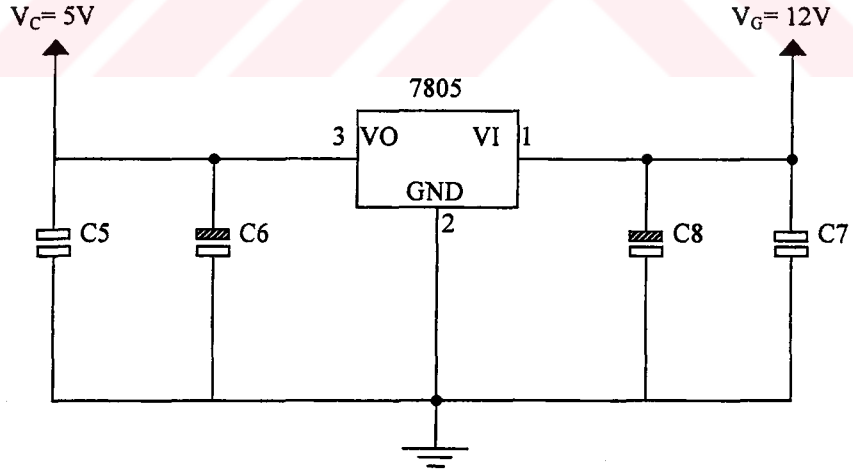
Adım motoruna başlama komutunun verilmesi için start butonuna basılması gerekmektedir. Eğer start butonuna basılmış ise ve motorların x, y ve z yönünde gideceği koordinatlar biliniyorsa motorlar hareket edecektir. Fakat hangi yönde hareket edeceğini belirlemek amacıyla bir karşılaştırma işlemi yapılmalıdır. Örneğin x yönünde girdiğimiz koordinat motorun bulunduğu noktadan büyük ise motor ileri yönde, değil ise geri yönde

hareket etmelidir. Tabi ki bu bilgiden faydalanılarak motora uygulanması gereken darbelerin yönü de ayarlanmalıdır.

Karşılaştırma işlemi sonucunda adım motorunun bulunduğu konum ile gitmesini istenilen konum aynı olunca motora dur bilgisi gitmeli ve darbe üretimi durmalıdır. Aynı zamanda hareket anında stop butonuna bastığımızda motorlar yine durmalıdır. Program mantığının en son kısmında ise z yönündeki hareketin yapılmasıdır. x ve y yönündeki hareket tamamlandıktan sonra diğer adım motoru z yönünde girilen mesafe kadar hareketini yapar ve matkap aşağıya iner, orada kısa bir süre bekledikten sonra adım motoru aksi yönde hareket eder ve başlangıç noktasına gelince durur. Bu hareket tamamlandıktan sonra yeni koordinatların girilmesi ve işlemlerin tekrarlanması için düzenek hazırdır. Yeni koordinat değerleri girildiğinde, adım motorları son bulunduğu konumları referans alarak yeni girilen değerlere göre yön bilgilerini belirleyecektir.

#### 4.4 Besleme Gerilimi ve Sistem Osilatörü

PIC 16F877 'nin çalışma gerilimi 5V 'dur. Uygulamada bu gerilimin daha altında gerilimlerde de çalıştığı görülmektedir fakat yine de çalışma gerilimini 5V olarak ayarlamak en uygun olanıdır. Bunu sağlamak için giriş gerilimi olan 12V 'u düşürmek gerekir. 7805 regülatörü ile bu gerilim düşümü sağlanabilir. Şekil 4.5 'de 7805 regülatörünün bağlantı şeması görülmektedir.

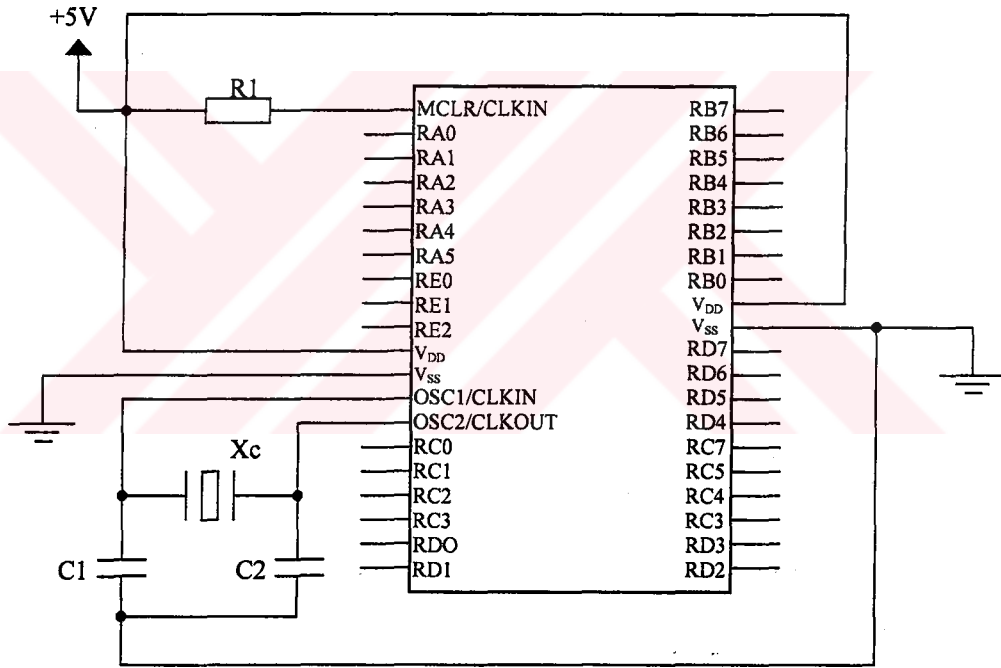


Şekil 4.5: 7805 gerilim regülatörünün devreye bağlantısı.

Sabit gerilim regülatörü, uçlardan birine uygulanan regülasyonsuz bir gerilimi ( $V_G$ ) alır, ikinci uçtan regülasyonlu bir gerilim ( $V_C$ ) verir; üçüncü uç ise toprağa bağlıdır. Regülatörün eleman özellikleri verilirken bir gerilim aralığı belirtilir. Giriş gerilimi; bu gerilim aralığı içinde,

bir yük akımı aralığında regülasyonlu çıkış gerilimi korunacak şekilde değişebilir. Çıkış gerilimindeki değişim giriş gerilimindeki değişimlere ve yük akımındaki değişimlere bağlıdır. Giriş veya çıkışla toprak arasına bağlanan kondansatörler, dc gerilim düzeyinin korunmasına ve yüksek frekanslı gerilim değişimlerinin filtrelenmesine yardımcı olur (Nashelsky, 1994). Bu regülatör devresinde kullanılan 7805 gerilim regülatörünün çıkış verebilmesi için giriş geriliminin en az 7.3V olması gereklidir. Maksimum giriş gerilimi ise 35V 'dur. Maksimum çıkış akımı 1A 'dır.

Besleme gerilimindeki bu özellikleri ile birlikte PIC 'lerde değişik osilatör devreleri kullanılmaktadır. Bunlardan birincisi RC osilatördür. RC osilatörü bir direnç ve kondansatör devresinin dolma boşalma ilkesine göre çalışır. Bu osilatör türü hassas zamanlamanın kritik olmadığı yerlerde kullanılmaktadır. RC osilatör devresinde kullanılacak direnç ve kondansatör değerlerinin belirlenebileceği herhangi bir formülasyon kullanılmamaktadır. Bu kondansatör değerlerini PIC 'lerin veri tablolarından almak gerekir.



Şekil 4.6: Kristal osilatörün ve besleme geriliminin PIC 'e bağlantısı.

Kullanılan osilatör türü programlayıcı ayarlarında ve programın kaynak kodlarında belirtilmelidir. Diğer kullanılan osilatör türleri ise kristal ve seramik osilatörlerdir. Seramik osilatörler RC osilatörüne göre oldukça hassastır ve birçok uygulama için yeterlidir. Uygulama devresinde kullanılan osilatör ise kristal osilatör türüdür. Hassas zamanlamanın gerekli olduğu yerlerde kullanılmaktadır. Şekil 4.6 'da kristal osilatörün devreye bağlantısı görülmektedir.

Kristal osilatör bağlanırken kullanılacak kapasitörlerin değerleri PIC 'lerin veri tablolarından öğrenilebilir [Gardner, 1998].

**Tablo 4.1 :** Osilatör hızları ve kullanılacak kondansatör değerleri.

| OSİLATÖR | FREKANS | OSC1      | OSC2     |
|----------|---------|-----------|----------|
| XT       | 100 KHz | 47-100 pF | 47-100pF |
| XT       | 500 KHz | 20-68 pF  | 20-68pF  |
| XT       | 1 MHz   | 15-68 pF  | 15-68pF  |
| XT       | 2 MHz   | 15-47 pF  | 15-47pF  |
| XT       | 4 MHz   | 15-33 pF  | 15-33pF  |
| HS       | 8 MHz   | 15-47 pF  | 15-47pF  |
| HS       | 20 MHz  | 15-47 pF  | 15-47pF  |

**XT:** Kristal osilatör

**HS:** Seramik osilatör

Tablo 4.1 'de PIC veri tablolarından derlenmiş bazı osilatör türleri ile beraber değişik frekanslardaki kondansatör değerleri gösterilmiştir. Tablo 4.1 'de görüldüğü gibi kondansatör değerleri belirli bir aralık içinde verilmiştir. Prensi olarak bu tabloların çizdiği sınır değerler arasında en küçük kapasitör değerini kullanmak elde edilen dalganın düzgünlüğünü artıracaktır.

#### 4.5 Adım Motorları Sürme Devreleri

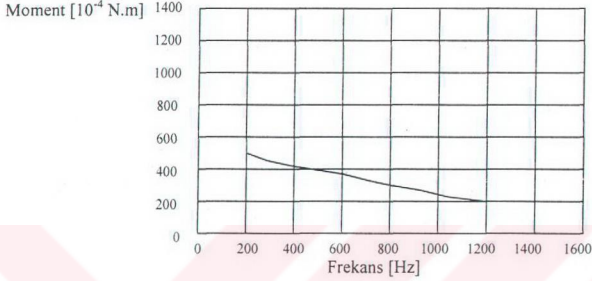
Uygulama devresinde dört adet adım motoru ve sürme devreleri bulunmaktadır. Kullanılan adım motorlarından üç tanesi unipolar bir tanesi ise bipolar adım motorudur. Daha önceki bölümlerde incelendiği gibi unipolar ve bipolar adım motorlarının sürme devreleri birbirinden farklıdır.

##### 4.5.1 Unipolar Adım Motoru Sürme Devresi



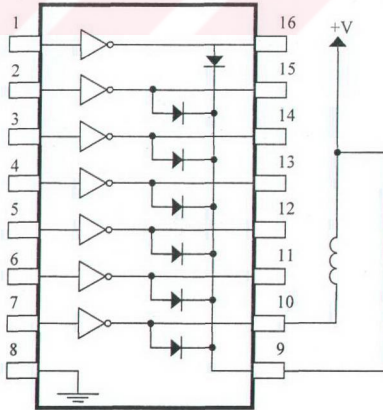
**Şekil 4.7:** Uygulama devresinde kullanılan unipolar adım motorlarının resmi.

Bölüm 2.2.1 'de unipolar adım motorları ve özellikleri incelenmişti. Uygulama düzeneğinde kullanılan unipolar adım motorlarının kodu PM35L dir. Şekil 4.7 'de bu adım motorlarının resmi görülmektedir. Bu adım motorlarının adım açısı  $7.5^\circ$  dir. Çalışma gerilimi 12V, sargı akımı 500 mA, sargı direnci 5.5  $\Omega$ , çalışma sıcaklığı  $-10^\circ\text{C}$  ile  $+50^\circ\text{C}$  arasında ve atalet momenti  $5.15\text{ g.cm}^2$  'dir [Minebea – Matsushita Motor Cor., PM35L Data Sheet, 2004].



Şekil 4.8: PM 35L Unipolar adım motorunun moment grafiği.

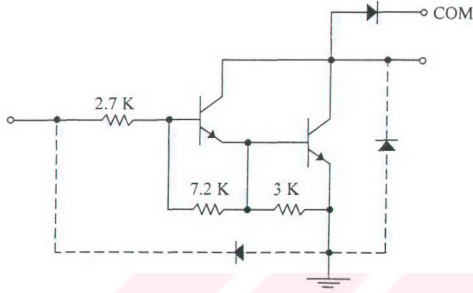
Unipolar adım motorunu sürmek amacıyla ULN 2003 entegresi kullanılmıştır. ULN 2003 entegresi baz ve kolektör uçları dışarıya çıkartılmış yedi adet darlington transistörden oluşmuştur. Her bir transistorün; kolektör – emiter arası gerilimi ( $V_{CE}$ ) 50V, sürekli durumda kolektör akımı ( $I_C$ ) 500 mA, kolektör pik akımı 600 mA ve çalışma sıcaklığı  $-20^\circ\text{C}$  ile  $+85^\circ\text{C}$  arasındadır. Şekil 4.9 'da ULN 2003 entegresinin iç yapısı ve bir sargının nasıl bağlanması gerektiği gösterilmiştir [Allegro Microsystems, ULN 2003 Data Sheet, 1999].



Şekil 4.9: ULN 2003 entegresinin iç yapısı ve bağlantı örneği.



Şekil 4.10 'da ise ULN 2003 entegresindeki her bir darlington bağlantısının açık şeması gösterilmiştir. Bu şekle göre eğer bir sargının sürülmesi gerekiyorsa, transistör kesime girdiğinde ters yönde oluşan ve sargıdan kaynaklanan akımların transistörlere zarar vermesini engellemek amacıyla entegrenin COM ucuna besleme geriliminin pozitif ucu bağlanmalıdır.

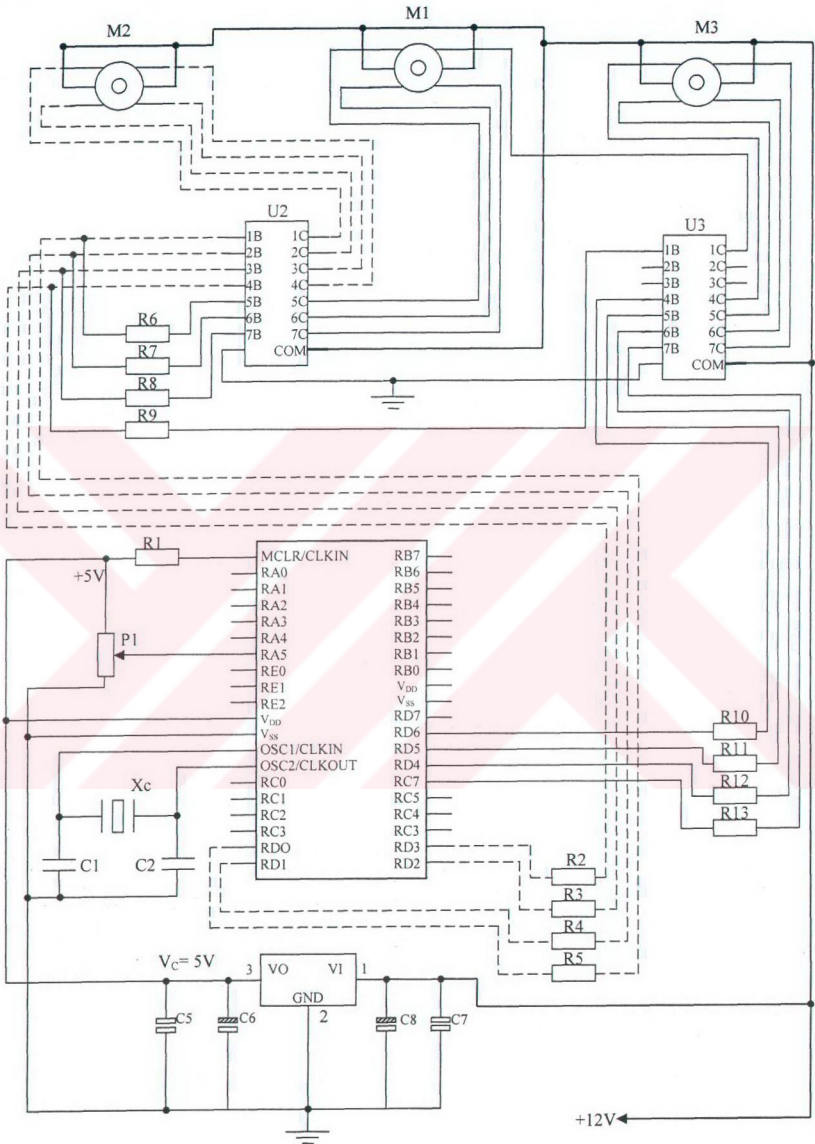


Şekil 4.10: ULN 2003 entegresindeki her bir darlington bağlantısının açık şeması.

Unipolar adım motorlarının sürülmesinden bahsedilirken adım motorunun dışarıya çıkartılan uçlarından bağımsız olarak sürme yönteminin hepsinde aynı olduğu söylenmişti. Bu bağlantı şeklinde adım motorunun ortak ucuna besleme geriliminin pozitif ucu bağlanırken diğer sargı uçlarının çıkışları sıra ile toprağa bağlanır. Bu şekilde adım motorunun hareketi sağlanmış olur. Yapılan sistem üzerinde x yönündeki hareketi sağlayan adım motoru iki adet unipolar adım motordur. Bu adım motorlarının hareketi aynı olduğu için sıralı darbeleri PIC 'in aynı bacaklarından alınır fakat sürme devreleri farklıdır. Bu durum şekil 4.11 'de görülmektedir. Burada R2, R3, R4, R5 dirençlerinin bulunduğu hatlar, şekilde kesik çizgilerle gösterilen kısım, ikinci adım motorunu, R6, R7, R8, R9 dirençlerinin bulunduğu hatlar ise birinci adım motorunu beslemektedir.

Her iki besleme devresi de girişlerini PIC 'in RD0, RD1, RD2, RD3 pinlerinden almaktadır. Her motor için dört adet transistör devresi gerekli olduğu için iki adet ULN 2003 entegresi kullanılmıştır. İkinci entegrenin boşa kalan transistör devreleri z yönünde hareketi sağlayan adım motorunun kontrolünde kullanılacaktır.

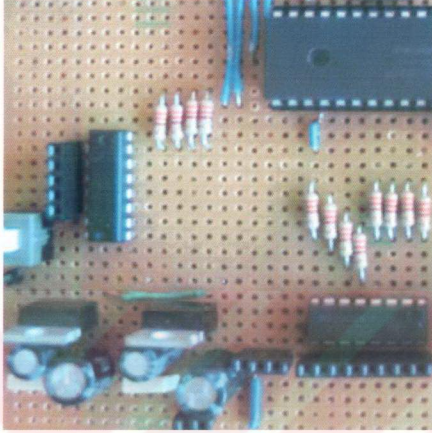
Şekil 4.11 'de z yönünde çalışan unipolar adım motorunun sürme devresi de bulunmaktadır. ULN 2003 'te her bir darlington bağlantılı transistör diğerlerinden bağımsız çalıştığı için daha önce x yönünde hareket eden birinci motorun sürülmesinde bir transistörü kullanılan ULN 2003 ile z yönünde çalışan unipolar adım motorunun sürülmesi sağlanmıştır.



Şekil 4.11: X ve Z yönündeki hareketini sağlayan motorların sürme devresi.



Şekil 4.12 'de unipolar adım motorlarının, ULN 2003 ile sürme devresi görülmektedir. x yönünde hareketi sağlayan adım motorları yarım adım yöntemi ile sürülmüştür. Adım açısı  $7.5^\circ$  olan adım motorları yarım adım sürülüşü takdirde adım açısı  $3.75^\circ$  olacaktır.



Şekil 4.12: Unipolar adım motorlarının sürme devresi ve ULN 2003 entegrelerinin görünüşü.

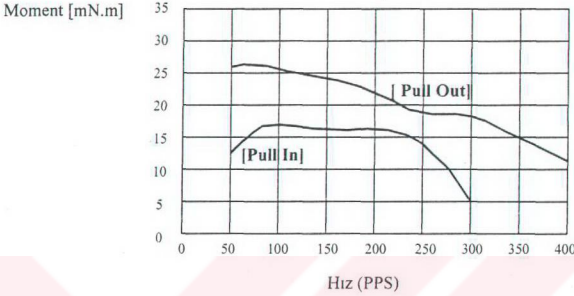
#### 4.5.2 Bipolar Adım Motoru Sürme Devresi

Bölüm 2.2.2 'de bipolar adım motorları ve özellikleri incelenmişti. Bipolar adım motorlarının sürülmesi için faz sargılarından geçen akımın yönünün değiştirilmesi gerektiği ve bunu sağlamak için ise H köprüsü denilen sürme devrelerinin kullanıldığı bilinmektedir.



Şekil 4.13 : Bipolar adım motorunun resmi.

Kullanılan adım motorunun markası Airpax ve kodu S42M100 'dür. Adım açısı  $3.6^\circ$ , sürme gerilimi 5V, sargı akımı 800 mA, sargı direnci  $10.5 \Omega$ , atalet momenti  $11.8 \text{ g.cm}^2$  ve çalışma sıcaklığı  $-20^\circ\text{C}$  ile  $+70^\circ\text{C}$  arasındadır. Şekil 4.13 'de bipolar adım motorunun resmi görülmektedir. Şekil 4.14 'de adım motorunun moment grafikleri görülmektedir.

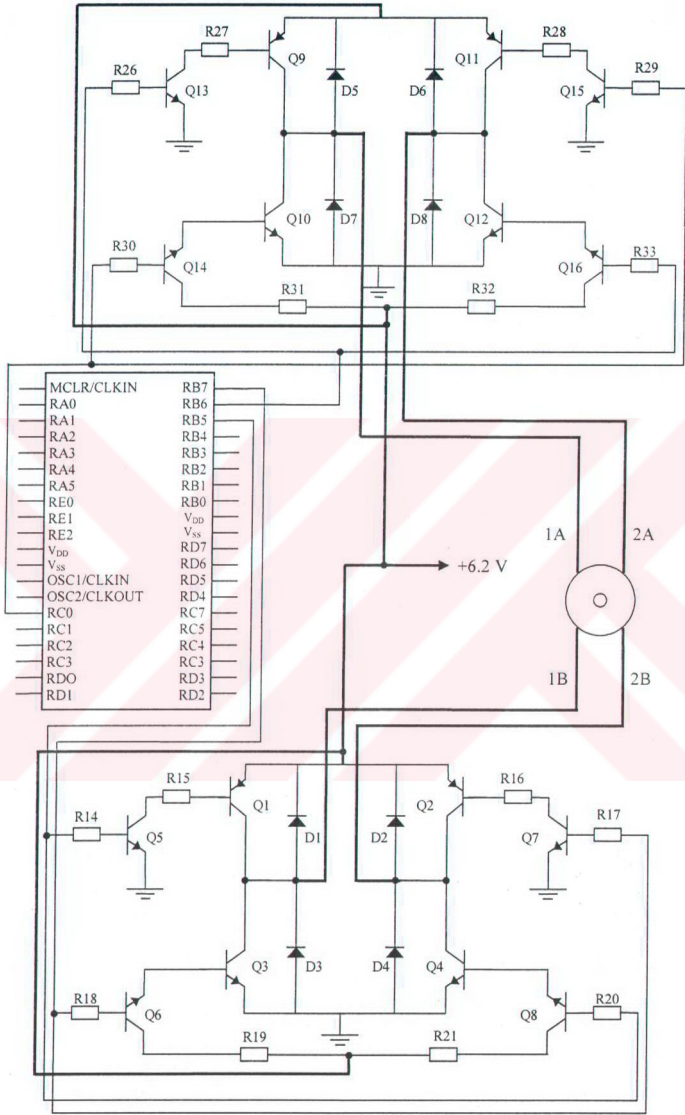


Şekil 4.14: Airpax S42M100 bipolar adım motorunun Pull-In ve Pull-Out moment grafikleri.

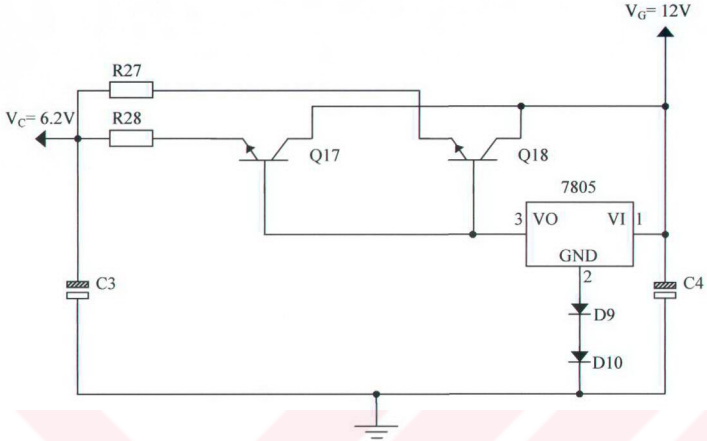
Bipolar adım motorunun sürme devresi şekil 4.15 'de görülmektedir. Bu sürme devresinde her faz sargısının akımını taşımak için dört adet anahtarlama elemanı kullanılmıştır. Yani her faz sargısının üzerinden geçen akımın yönünü değiştirmek amacıyla H köprüsü oluşturulmuştur [Airpax Mechatronics, S 42M100, Data Sheet, 1999,].

1B-2B faz sargısını besleyen devrede Q5, Q6, Q7, Q8 transistörleri, motor akımını taşıyan Q1, Q2, Q3, Q4 transistörlerinin baz akımlarını kuvvetlendirmek amacıyla kullanılmıştır. Q5, Q6, Q7 ve Q8 transistörleri NPN yapılı BC237 kodlu transistörlerdir. Bu transistörlerin maksimum kolektör – emiter gerilimi 45V, emiter – baz gerilimi 6V, sürekli durumda maksimum kolektör akımı 100 mA 'dır. Q1 ve Q2 transistörleri PNP yapılı BD140 kodlu güç transistörlerdir. Bu transistörlerin maksimum kolektör – emiter gerilimi 80V, emiter – baz gerilimi 5V, sürekli durumda maksimum kolektör akımı 1.5A, pik kolektör akımı 3A ve baz akımı 0.5A'dır. Q3 ve Q4 transistörleri NPN yapılı BD139 güç transistörleridir. Bu transistörlerin maksimum kolektör – emiter gerilimi 80V, emiter – baz gerilimi 5V, sürekli durumda maksimum kolektör akımı 1.5A, pik kolektör akımı 3A ve baz akımı 0.5A 'dır [BD 140 Data Sheet, 2000; BC 237 Data Sheet, 2001; BD 139 Data Sheet, 2001].

Bu devrede bipolar adım motorunun ve PIC 16F877 'nin çalışma gerilimleri aynıdır. Herhangi bir nedenden dolayı bipolar adım motorunun sürme devresinde veya adım motorunun kendisinde meydana gelebilecek bir arızadan PIC besleme devresinin etkilenmesini önlemek amacıyla bipolar adım motorunun beslemesi başka gerilim regülatör devresinden yapılmıştır. Bu devre şekil 4.16 'da görülmektedir.

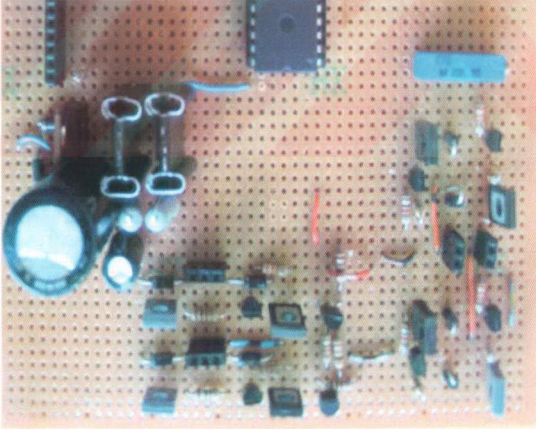


Şekil 4.15: Bipolar adım motorunun sürme devresi.



Şekil 4.16: Bipolar adım motorunun besleme gerilimini sağlayan devre.

Şekil 4.17 'de bipolar adım motorunun sürme devresi ve besleme regülatör devresi görülmektedir [BDX 53 Data Sheet, 2000].

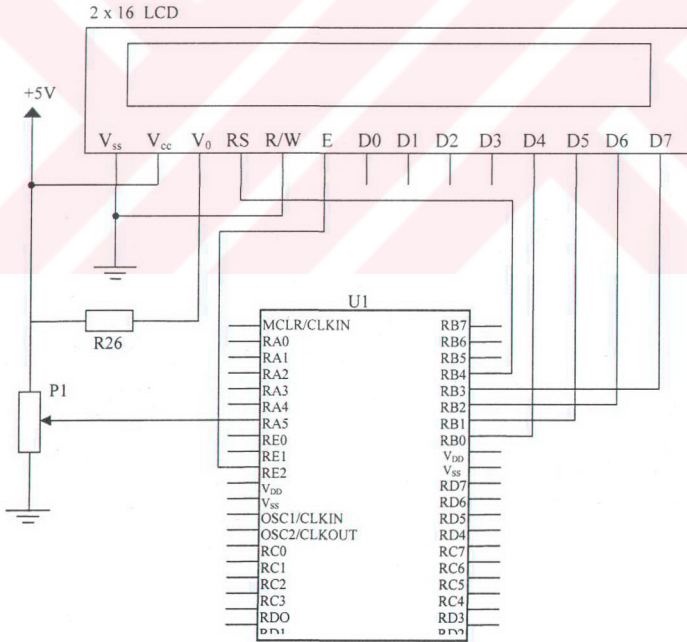


Şekil 4.17: Bipolar adım motorunun besleme ve sürme devresi.

Bipolar adım motorunun besleme regülatörü devresinde, gerilim regülatörü olarak 7805 regülatörü kullanılmıştır. Bu regülatörün çıkış akımı 1 A 'dır. Bu akım bipolar adım motorunun

bir faz sargısını sürmek için yeterlidir. Eğer her iki faz sargısının aynı anda enerjileneceği bir sürme yöntemi tercih edilecek olunursa yeterli olmayacaktır. Bu nedenden dolayı regülatörün çıkış akımını kuvvetlendirmek için iki adet transistör kullanılmıştır. Bu transistörler Q17 ve Q18 numaralı BDX53 kodlu NPN yapılı güç transistörleridir. Bu transistörlerin maksimum kolektör – emiter gerilimi 45V, emiter – baz gerilimi 5V, sürekli durumda maksimum kolektör akımı 8 A, pik kolektör akımı 12 A ve maksimum baz akımı 0.2 A'dır. 7805 regülatörü çıkışında sabit 5V gerilim elde ediliyor fakat bipolar adım motorunun sürme devresinde kullanılan transistörler iletim durumunda olduklarında her transistörün kolektör - emiter arasında bir gerilim düşümü olacaktır. Bu gerilim düşümlerinden dolayı motorun faz sargısının üzerine 5V 'dan daha düşük bir gerilim düşecektir. 7805 regülatörünün toprak bacağına iki adet diyot bağlanmıştır. Bu diyotlar yaklaşık 1.2V 'luk bir referans gerilimi oluşturacaktır. Bu gerilim çıkışa yansiyarak çıkış gerilimi yaklaşık olarak 6.2V olacaktır. Sürme devresinde oluşan kayıplar çıkarıldığında bipolar adım motorunun sargılarının uçları arasına yaklaşık 5V gerilim düşümü olacaktır.

#### 4.6 LCD ve Analog Giriş



Şekil 4.18: LCD ve Analog girişin devreye bağlanması.



PIC 16F877 10 bit analog sayısal dönüştürücüye sahiptir. Ölçülen analog gerilimi 0 ile 1023 arasında 1024 adet farklı sayısal bilgiye dönüştürür. Devreye bağlantısı şekil 4.18 'da görülmektedir. Adım motorlarının hız ayarları bu analog giriş tarafından yapılmaktadır.

LCD ise motorların gitmesi gereken noktaların görüntülenmesini sağlar. LCD 'nin kontrolü RS bağlantı ucu ile sağlanır. RS ucu düşük olduğu zaman (0) LCD 'nin kontrol saklayıcısı seçilir. Eğer RS ucu yüksek (1) olursa LCD' nin veri saklayıcısı seçilmiş olur. Enable bağlantı ucu bu verinin okunmasını sağlar. Veriler D4 ile D7 arasındaki bağlantı uçlarından gönderilir.

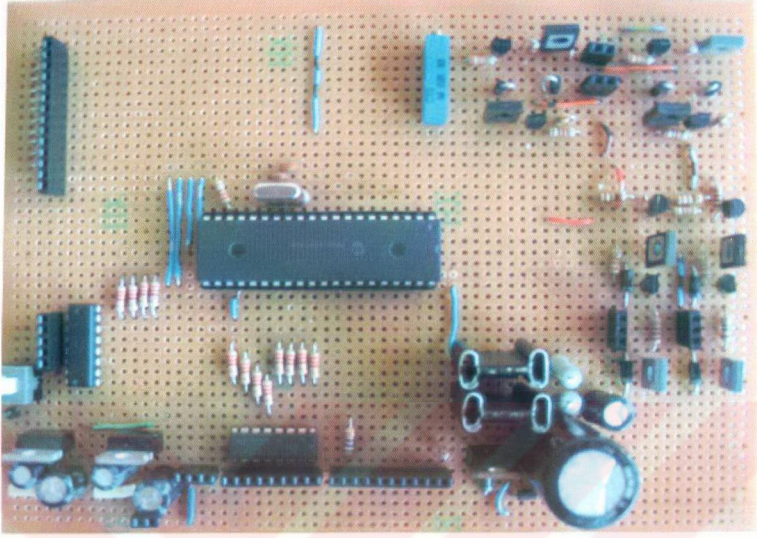
Şimdiye kadar yazılım için belirlenen beş an başlık ve bu yazılım için gerekli olan donanımsal özellikler belirlendi ve uygulama devresi tasarlandı. Öncelikle tuş takımının uygulama devresine aktarımı yapıldı. Tuş takımının yazılımında start, stop ve z yönünde koordinatların girilmesi gibi bazı ek görevler ile birlikte tuş takımının yazılımı da geliştirildi.

Daha sonra x yönünde hareket eden adım motorları için başlama, durma ve yön bilgilerinin bulunduğu, eş zamanlı olarak konum bilgisini belirleyen sayıcı ile birlikte çalışan ve adım motorlarının hareketini sağlayan sıralı darbeleri üreten kısmın da bulunduğu yazılım yapıldı. X yönündeki adım motorlarının çalışması için sürücü entegreler seçilip sürme devreleri yapıldı. Yazılım olarak aynı işlemler y ve z yönünde çalışan adım motorları içinde yapıldı. Donanımsal olarak x ve z yönlerinde çalışan adım motorları unipolar adım motorlarıdır. Y yönünde çalışan adım motoru bipolar adım motordur.

Bipolar adım motoru için H köprüsü denilen devre oluşturuldu. Bu devre oluşturulurken adım motorunun akımını taşıyabilecek transistörler seçildi. Bu transistörlerin ilettime girebilmesi için bazından geçmesi gereken akımlar, PIC 16F877 entegresinin bir bacağından çekilebilecek maksimum akım olan 25 mA değerinden çok yüksek olduğu için H köprüsünde olan her bir güç transistörünün baz akımı, daha küçük güçlü transistörlerin kolektör akımları kullanılarak elde edilmiştir. Bu aynı zamanda güç devresi mikrodenetleyiciyi birbirlerinden ayırarak bir güvenlik önlemi olmuştur. H köprü devresinin gerilimi ile PIC mikrodenetleyicisinin besleme gerilimini ayırmak için ve transistörlerde meydana gelen gerilim kayıplarını karşılamak için bipolar adım motorunu besleyen çıkış gerilimi 6.2V olan bir regülatör devresi tasarlandı.

Adım motorlarının hızlarının belirlenmesi için PIC mikrodenetleyicisinin analog girişine bağlanan bir potansiyometre kullanıldı. Adım motorlarının gitmesi gereken koordinatların, başlama ve durma bilgilerinin aktarıldığı bir LCD devresi tasarlandı.

Şekil 4.19 'da besleme devreleri, sürme devreleri, LCD ve analog giriş devreleri ile PIC 16F877 beraber devrenin tamamı görülmektedir.



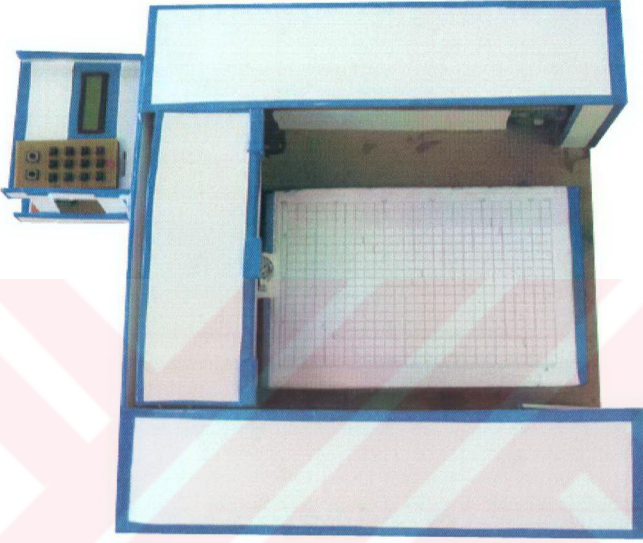
**Şekil 4.19:** Besleme devreleri, sürme devreleri, LCD ve analog giriş devrelerinin tamamı.

Bu noktadan sonra x, y, ve z kartezyen düzlemde hareket yeteneği olan bir delici matkap ile sistem tamamlanmış olur. Sistemin çalışması ise şu şekilde olur; x yönündeki koordinat girilir ve kabul ettirme tuşuna basılır, y yönündeki koordinat girilir ve kabul ettirme tuşuna basılır, z yönündeki koordinatın girilmesi gerekiyorsa silme tuşuna bir süre basılır ve LCD üzerinde yanıp sönen bir yıldız görüldüğünde z yönündeki koordinat girilir, tekrar silme tuşuna bir süre basılır ve yanıp sönen yıldız kaybolur artık tekrar değişinceye kadar z yönündeki koordinat sabit kalacaktır. Start için sıfır tuşuna bir süre basılır, x ve y yönündeki adım motorları aynı yönde çalışmaya başlarlar her iki motorda gitmesi gereken noktaya gittiğinde durduğunda z yönündeki adım motoru belirlenen mesafe kadar matkabı aşağıya doğru indirir ve orada bir süre bekler daha sonra başlangıç noktasına geri döner. Sistem artık yeni bir koordinat girmeye hazır haldedir. Yeni koordinat girildiğinde adım motorları bulundukları konuma göre, yani en son bulundukları yeri referans alarak yön bilgilerini belirleyecektir.

Şekil 4.20 'de oluşturulan sistemin bütün işlemlerinin tamamlandığı son hali görülmektedir.

Şekil 4.21 'de sistemin delme yüzeyi ve delinmesi gereken noktalar görülmektedir. Dikkat edilirse delinmesi istenilen noktalar tam olarak delinmemiştir. Bu hatanın kaynağın sistemin mekaniksel problemleridir. Z yönündeki hareketi yapan motorun miline bir vida

bağlanarak hareket doğrusallaştırılmıştır. Fakat vidanın motor miline olan bağlantısında oluşan hatadan dolayı matkabın iniş ve çıkışları tam olarak istenilen düzgünlükte olmamaktadır. Buda noktaların delinmesinde hataya yol açmaktadır.

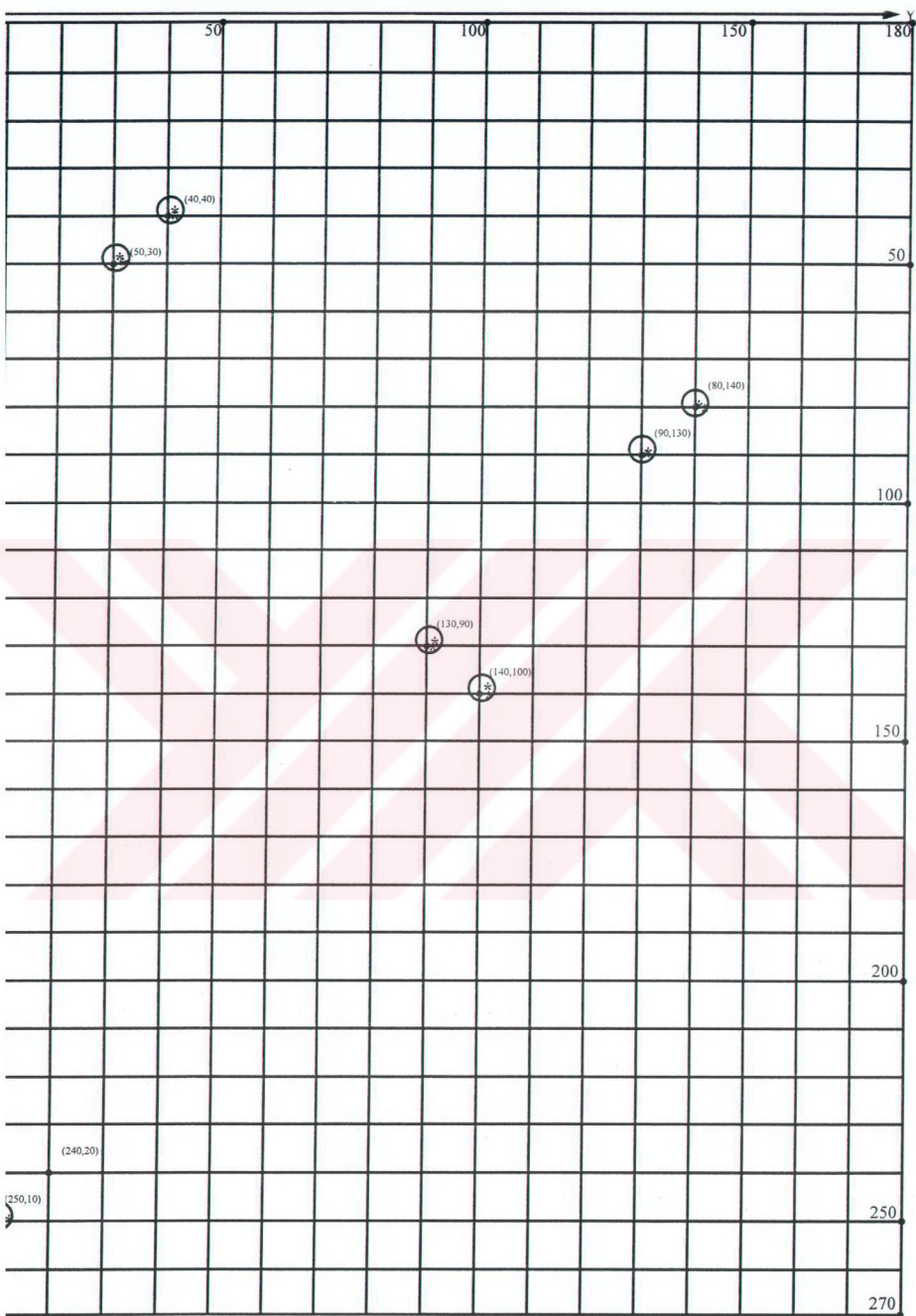


Şekil 4.20: x,y ve z kartezyen düzlemde hareket eden ve belirlenen noktayı delen matkap.

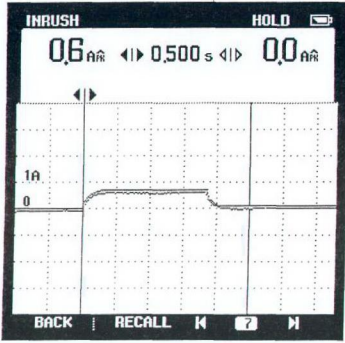
Sistem ve dolayısıyla adım motorları beş değişik hızda hareket ettirilebilirler. Bu hızlardan en yüksek olanı 125 adım/sn ve en düşük olanı 32 adım/sn 'dir. Diğer üç değişik hız değeri ise 42 adım/sn, 56 adım/sn ve 84 adım/sn 'dir. Düşük ve yüksek hız değerlerinde yapılan denemelerde matkap yaklaşık olarak aynı noktaları delmiştir. Sistem 125 adım/sn olan en yüksek hız değerinin üzerinde verilen hız değerlerinde konum hataları yapmıştır. X yönündeki hareketi sağlayan adım motoru bir darbe aldığı anda sistem x yönünde 0,33 mm hareket etmektedir. Y yönündeki adım motoru bir darbe aldığı anda sistem y yönünde 0,34 mm hareket etmektedir.

Ayrıca sistem içerisinde el konumu da bulunmaktadır. Sistem el konumuna alındıktan sonra x yönündeki hareket 2,8, y yönündeki hareket 4,6 ve z yönündeki hareket 1,3 tuşları ile yapılmaktadır. El ile hareket ettirilerek bir noktaya getirilen sistem otomatik konumuna alınırsa sistemin yeni başlangıç değeri bu getirilen nokta olur. Bu özellik pratikte sadece belirli bir bölge üzerinde çalışılmak istenildiğinde kolaylık sağlar.

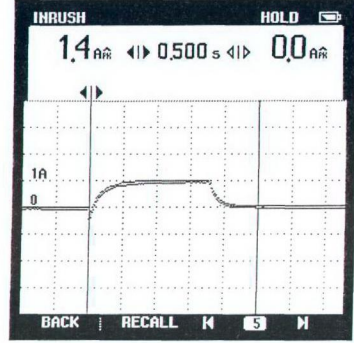




Şekil 4.21: Matkabin delme yüzeyi ve delinen noktalar.



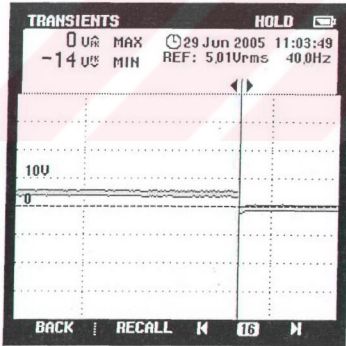
(a) Unipolar adım motorunun bir faz akımının dalga şekli.



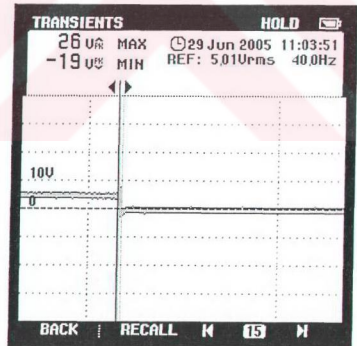
(b) Bipolar adım motorunun bir faz akımının dalga şekli.

Şekil 4.22: Unipolar ve bipolar adım motorlarının akımlarının iletim ve kesim anındaki dalga şekilleri.

Daha önceki bölümlerde adım motorunun sargısının enerjilenmesi ile beraber sargılarından geçen akımın zamanla değişiminin doğrusal olmadığı anlatılmıştı. Şekil 4.22 'de unipolar ve bipolar adım motorlarının bir sargısından geçen akımın iletim ve kesim anındaki değişimleri gösterilmiştir.



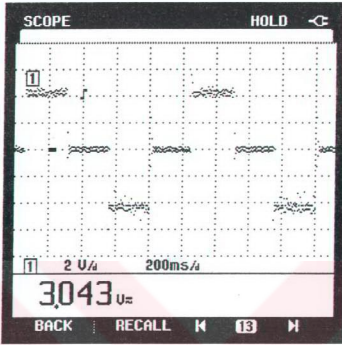
(a) Bipolar adım motorunun sargının enerjisi kesildiğinde ters yönde oluşan gerilim.



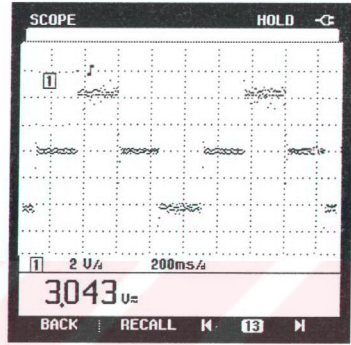
(b) Unipolar adım motorunun sargının enerjisi kesildiğinde ters yönde oluşan gerilim.

Şekil 4.23: Unipolar ve bipolar adım motorlarının bir sargısının enerjisi kesildiğinde sargı üzerinde oluşan ters yöndeki akımın dalga şekli.

Şekil 4.23 'de unipolar ve bipolar adım motorlarının bir sargısının enerjisinin kesilmesi ile sargı üzerinde oluşan ters yöndeki gerilimler görülmektedir. Bu ters yönde oluşan gerilimlerden kaynaklanan ters yönlü akımların dolaşabileceği serbest bir yol oluşturmak amacıyla, sürme devrelerinde serbest dolaşım diyotları kullanılmaktadır.



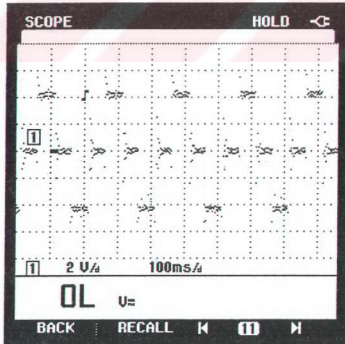
(a) Bipolar adım motorunun birinci faz sargısının üzerinde oluşan gerilim dizisi.



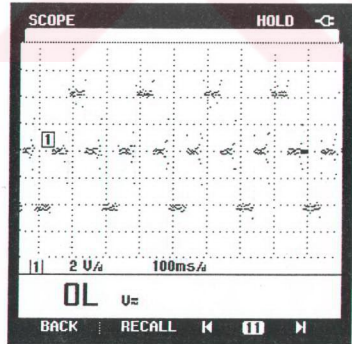
(b) Bipolar adım motorunun ikinci faz sargısının üzerinde oluşan gerilim dizisi.

Şekil 4.24: Bipolar adım motorunun sargıları üzerindeki gerilim dizisi.

Şekil 4.24 'de görüldüğü gibi bipolar adım motorunun bir sargısı üzerindeki geriliminin yönü her an için yön değiştirmektedir.

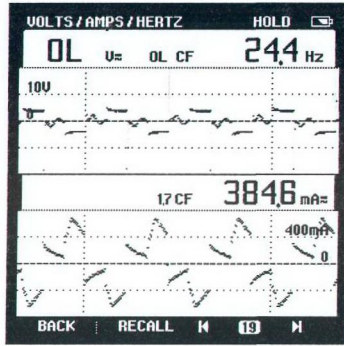


(a) Bipolar adım motorunun birinci faz sargısının üzerinde oluşan gerilim dizisi.

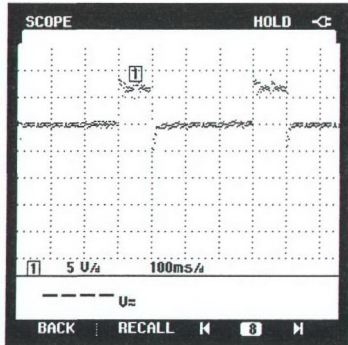
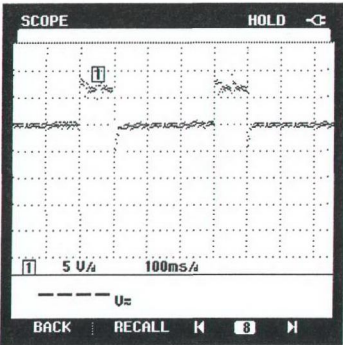
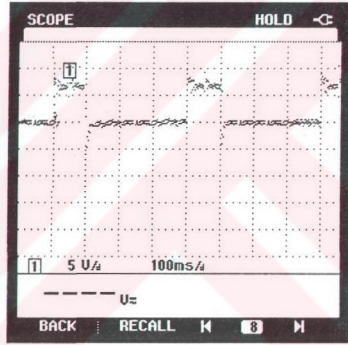
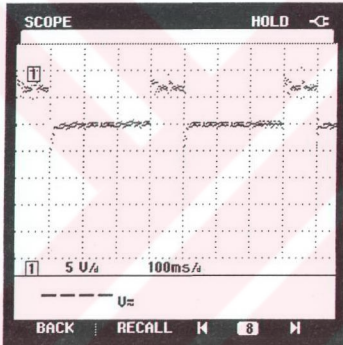


(b) Bipolar adım motorunun ikinci faz sargısının üzerinde oluşan gerilim dizisi.

Şekil 4.25: Daha yüksek bir hız değerinde bipolar adım motorunun sargıları üzerindeki gerilim dizisi.

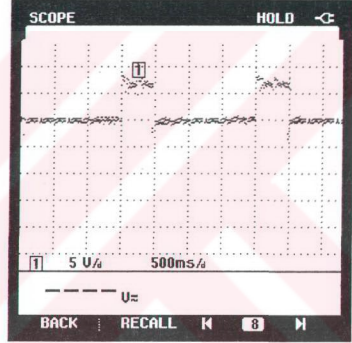
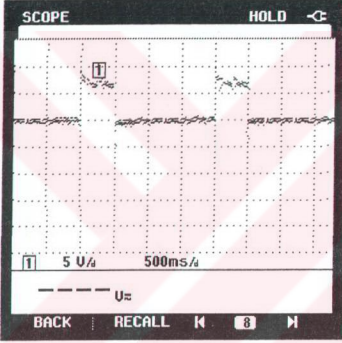
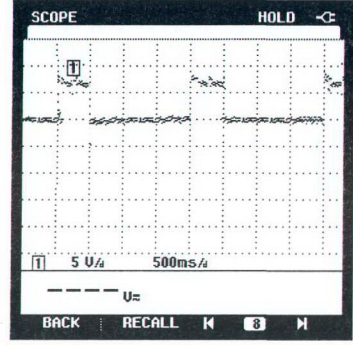
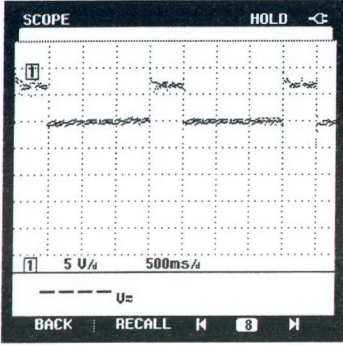


Şekil 4.26: Bipolar adım motorunun bir sargısı üzerindeki gerilimin ve akımın anlık değişimi.

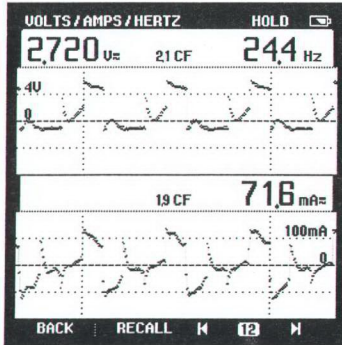


Şekil 4.27: Unipolar adım motorunun sargıları üzerindeki gerilim dizisi.





Şekil 4.28: Daha düşük bir hız değeri için unipolar adım motorunun sargıları üzerindeki gerilim dizisi.



Şekil 4.29: Unipolar adım motorunun bir sargısı üzerindeki gerilimin ve akımın anlık değişimi.

## SONUÇ:

Adım motorları, son yıllarda hassasiyetlerinin oldukça artması sonucunda kendisine hassas konum hassasiyeti gerektiren, bir robot kolun kontrolü gibi, çeşitli kullanım alanlarını açmıştır. Adım motorları çalışma mantığı olarak sayısal girişli elektrik motorlarıdır yani kontrolü bir mikroişlemci, bilgisayar veya mikrodenetleyici ile kolayca yapılabilir demektir.

Bilgisayar ile yapılan kontrol sistemleri, prototip geliştirmek için uygun görünse de geliştirilen sistemin endüstriye aktarılmasında maliyet problemini doğurur. Adım motorları geri beslemesiz çalıştıkları için karmaşık kontrol sistemlerine ihtiyaç duymazlar. Bu tasarım maliyetlerini aşağıya çekecektir. Diğer yandan ucuz ve etkili bir mikrodenetleyici tasarım maliyetini tek başına aşağıya çekmektedir. Maliyetleri düşürmek ve yapılabilecek en basit şekilde tasarımları yapmak amacıyla sistemlerin kontrolü için mikrodenetleyicilerin kullanılması avantajlı olmaktadır.

Bu çalışmada önemi yukarıda anlatılan nedenlerden dolayı mikrodenetleyici yardımı ile adım motorlarının kontrolü sağlanarak bir deney düzeneği oluşturulmuş, bu deney düzeneği ile hem mikrodenetleyicinin tasarım kolaylığı ve maliyet açısından sistemi nasıl etkilediği hem de adım motorları ile oluşturulan bir düzeneğin diğer elektrik motorlarına göre daha basit ve düşük maliyetli olduğu gösterilmiştir.

Bu düzeneği kontrol için PIC 16F877 mikrodenetleyicisi seçilmiştir. Mikrodenetleyiciler belli bir program doğrultusunda çalışırlar ve kontrol sistemlerinde bulunan birçok özelliği yazılım doğrultusunda aktif hale gelecek şekilde bünyesinde bulundurlar. Bundan dolayı kontrol sistemindeki tasarım maliyetlerini aşağıya çekmektedirler.

Aynı zamanda bir mikrodenetleyici sadece bir motorun kontrolünü değil birden fazla işlemi gerçekleştirebildiği gibi bu işlemler arasında bağıntı kurup bir blok halinde sistemi kontrol edebilir. Bu özelliği kullanılarak mikrodenetleyiciler aktif şekilde endüstriyel uygulamalara katılabilmektedirler. Bütün iş sadece yazılım ve yapılacak yazılım doğrultusunda tasarlanmış donanım birimlerine kalmıştır. Fiyatlarının oldukça ucuz olması teknik özelliklerinin çok gelişmiş ve çok hızlı bir şekilde gelişmekte olmasından dolayı Microchip firması tarafından üretilen PIC mikrodenetleyicileri endüstride kendisine kullanım alanı bulmuştur.

Belirtildiği gibi deney düzeneğinin kontrolü sağlandığında mikrodenetleyici ile adım motorlarının bir arada kullanılması sonucu oluşturulmuş bir düzenek olacaktır. Bu aynı zamanda şunu göstermektedir ki bir mikrodenetleyici olan PIC 16F877, bir sistemi kontrol edebilmek için gerekli olan yeterlilik ve teknik özelliklere sahiptir.

x, y ve z gibi üç eksen üzerinde hareket kabiliyeti olan bu düzenek, adım motorlarının yön, hız ve konum kontrolü ile gerçekleştirilebilecek olan birçok uygulamaya örnek teşkil etmiştir. Örneğin konum hassasiyeti gerektiren bir robot kol, belirtilen noktaları delen matkap, x-y plotter ve bir iş makinesinin tablasının iki veya üç ekseninde hareketi gibi yerlerde mikrodeneleyiciler ve adım motorları birlikte kullanılırlar.

Bir mikrodeneleyici yardımı ile sadece kontrol değil giriş ve çıkış birimleri de oluşturulabilir. Bunu deney düzeneğinde giriş birimi olarak bir tuş takımı ve çıkış birimi olarak da 2x16 karakter büyüklüğünde bir LCD kullanılmıştır.

Bu tez çalışmasında mikrodeneleyici ile birlikte adım motorunun hız, konum ve dönüş yönü kontrolü yapılarak x, y ve z kartezyen düzleminde hareket kabiliyeti olan bir matkap ile belirtilen noktayı delen bir düzenek yapılmıştır. Bu yapılan düzenek ile mikrodeneleyicinin özelliklerinden faydalanılarak endüstride neler yapılabileceği ile ilgili fikir sahibi olundu. Bununla beraber yeni yapılacak olan değişik araştırmalara zemin oluşturuldu.



## KAYNAKLAR

Allegro Microsystems, Inc., 1999, ULN 2003 High - Voltage, High – Current, Darlington Arrays Data Sheet, Data Sheet.

Al-Sayed, H., Khachan, S., M., Al-Sayed, M., 2004, Rf Wireless Speed Limiter, Department of Mecanical Engineering American University of Beirut, Lebanon.

Billingsley, J., Phythian, M., 1999, Secondary School Robotics Competition, University of Southern Queensland.

Birch, C., M., Quinn, R., D., Hahm, G., ve diğ., 2000, Design of Cricket Microrobot, Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA,00), San Francisco.

Boylestad, R., Nashelsky, L., Çev: Özyılmaz, H., Küçük, Ü., 1994, Elektronik Elemanlar ve Devre Teorisi, Evren Ofset Basım Sanayi, Ankara.

Caldwell, W., D., Rennels, D., A., 1997, A Minimalist Hardware Architecture for Using Commercial Microcontroller in Space, 16<sup>th</sup> Digital Avionics System Conference.

Chiasson, J., N., Novotnak, R., T., 1993, Nonlinear Speed Observer for the Permanent Magnet Stepper Motor, IEEE, Transactions on Automatic Control. Vol. 38, No. 10; 1584 – 1588.

Chirikjian, G., S., Stein, D., 1999, Kinematik Design and Commutation of A Spherical Stepper Motor, IEEE, Transactions on Mechatronics, Vol. 4, No. 4, 342-352

Crespi, A., ve diğ., 2004, Swimming and Crawling with Amphibios Snake Robot, School of Computer and Communication Sciences, Switzerland.

Doğançay, İ., Çolak, İ., 2001, Eprom Kontrollü İki Adım Motorunun Bir Torna Tezgahında Kullanılması, Teknik Eğitim Fakültesi, Gazi Üniversitesi.

Duitsman, S., Gorr, S., Myrah, M., Olstad, J., 2002, Remotely Controlled Bronco Project, Project Advisor: Dr. Barnicki, Milwaukee School of Engineering.

Eisenberg. M., Wensch, T., Blauvelt, G., 1999, Geometry Specific Languages and Their Interface, Department of Computer Science, University of Colorado.

Etienne, R., Gruev, V., Ghani, M., A., 1998, VLSI Implementation of Motion Centroid Localization for Autonomous Navigation, Advances in Neural Information Processing System, Vol. 10.

Fairchild Semiconductor, Inc., 2000, PNP Silicon Transistors, BD 140 Data Sheet, NPN Silicon Transistor, BDX 53 Data Sheet, Data Sheet.

Fitzgerald, A., E., Kingsley, C., Umans, S., D., 1990, Electic Machinery, McGraw – Hill Pres, New York.

Fitzpatrick, J., M., Starckschall, G., ve diğ., 2005, A Novel Platform Simulating Irregular Motion Enhance Assessment of Respiration – Correlated Radiation Therapy Procedures, Journal of Applied Clinical Medical Physics, Vol: 6, Num: 1.

Gardner, N., Çev: Yalçın, C., 1998, PIC Proglamlama El Kitabı, Bileşim Yayıncılık, İstanbul.

Grove, D., E., 2001, The Vertical Integration of Mechatronics at Virginia Tech, Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University.

Gürbüz, R., 1996, Selection of Motor and Motor Drivers for Converting a General Purpose Lathe to CNC Lathe, The Journal of Polytechnic, Gazi University Technical Education Faculty, Ankara, Turkey.

Hill, G., j., Nicklas, H., ve diğ., 1998, The Hobby Eberly Telescope Low Resolution Spectrograph, Mechanical Design.

Humphries, J., T., Motors and Controls, 1998, Southern Illinois University, Merrill Publishing Company, Ohio.

Jones, D., W., 2001, Control of Stepping Motors, The University of Iowa Department Computer Science, McGraw – Hill, New York.

Landmark, N., Aström, B., 2003, Target Tracking, Technology Department, Örebro University, Sweden.

McNeill, D., K., Adaptive Visual Representations for Autonomous Mobile Robots Using Competitive Learning Algorithms, Department of Electrical & Computer Engineering, University of Manitoba.

Microchip Technology, Inc., 2001, 28/40 Pin Enhanced FLASH Microcontroller, PIC 16F87XA Data Sheet, Data Sheet..

Microchip Technology, Inc., 2004, Jones, D., W., Stepping Motor Fundamental.

Minebea – Matsushita Motor Corporation, Inc., 2004, Permanent Magnet Stepper Motors, PM 35L Data Sheet, Data Sheet.

Obuchowski, P., ve diğ., 2002, Autonomous Underwater Vehicle, University of Rhode, Island.

ON Semiconductor, 2001, NPN Silicon Transistor, BC 237 Data Sheet.

Pinaud, J., P., Solari, S., Skelton R., E., 2004, Deployment of A Class 2 Tensegrity Boom, University of California, San Diego.

Radmamesh, M., ve diğ., 2004, Rescue Robot League Competition Lisbon, Portugal, Azad University, Tehran, Iran.

Royston, W., W., C., 2003, Integrated Floor Plan Producer, School of Information Technology and Electrical Engineering, Vol. 3, The University of Queensland.

Saliah, H., H., Nurse, E., Abecassis, A., 1999, Design of Generic, Interactive, Virtual and Remove, Electrical Engineering Laboratory, 29<sup>th</sup> IEEE Frontiers in Education Conferense, Session 12c6.

Shah, C., 2000, Sensorless Control of Stepper Motor Using Kalman Filter, Bachelor of Engineering in Instrument & Control Engineering, Dharamsinh Desai Institute of Technology, India.

Smith, C., Resnick, M., Lippman, A., B., 2002, Material Design For A Robotic Arts Studio, Massachusetts Institute of Technology.

ST Microelectronics, Inc., 2001, NPN Silicon Transistors, BD 139 Data Sheet, Data Sheet.

Sutphen, A., Matson, D., M., Rogers, C., Cao, C., 2004, Amultidisciplinary Team Approach to The Design and Development of An Autonomous Mobile Robot Team Project, Tufuts University Medford, Massachusetts.

Thomson Airpax Mechatronics, Inc., 1999, Permanent Magnet Stepper Motors, S 42M100 Data Sheet, Data Sheet.

Toro, V. D., Basic Electric Machines, 1990, Proffesor Emeritus Department of Electrical Engineering, City University of Newyork, Prentice – Hall, Englewood Cliffs Pres, New Jersey.

Türay, E., 1989, Tübitak Yarı İletken Teknoloji Araştırma Labarotuvarı, Elektrik Mühendisliği Dergisi, Sayı 366-67.

Weintraub, M., Noonan, J., P., Chang, H., C., 2004, Control Logic and Small Signal Interface of A Kinetic Sculpture, Scool of Engineering Tufts University Medford, Massachusetts.

Wildi, T., 2002, Electrical Machines Drives and Power Systems, Laval University, Prentice – Hall, Englewood Cliffs Pres, New Jersey.

Williams, A., 1997, The Perth Automated Supernova Search, University of Western, Australia.

Youngblood, G., M., Cook, D., J., Holder, B., L., 2004, Managing and Adaptive Versalite Home Architecture, The University of Texas, Depertment of Computer Science Engineering.

Zhibi, M., Chiasson, J., N., 1991, Position Control of Permanent Magnet Stepper Motor by Exact Linearization, IEEE, Transactions on Automatic Control. Vol. 36, No. 5, 620-625.

## ÖZGEÇMİŞ

1980 Yılında Elazığ 'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Elazığ 'da tamamladıktan sonra 1998 – 2002 yıllarında Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi Bölümü 'nden mezun olarak lisans diploması aldı. 2002-2004 yılları arasında SEZAL Elektrik Enerji A.Ş bünyesinde çalıştı.

