

# PIC Tabanlı Fırçasız DC Motor Sürücüsü Tasarımı

Ömer Aydoğdu, Mert Bayer

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

Selçuk Üniversitesi

oaydogdu@selcuk.edu.tr, bayermert@hotmail.com

## Özet

*Bu çalışmada, Fırçasız DC motorlar için PIC 16F876 tabanlı bir motor sürücü sistemi tasarlanmış ve pratik olarak gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen sürücü sisteminde, güç devresi ile kontrol devresi PC817 optik izolatörler kullanılarak yalıtılmışlardır. Böylece sistemde güç devresinin kontrol devresi üzerinde oluşturabileceği olumsuz etkiler giderilmiştir. Gerçekleştirilen sistemin diğer önemli özelliği, sürücü sistemi için kullanılan devre elemanlarının oldukça yaygın olarak kullanılması ve uygun fiyata kolaylıkla temin edilebilmesidir. Böylece sürücü sistemi, düşük maliyeti ve basit yapısı nedeniyle kolayca pratik olarak uygulanabilmektedir. Gerçekleştirilen sürücü sistemi, düşük maliyetine rağmen oldukça iyi performans göstermektedir. Yapılan çalışmada, gerçekleştirilen sürücü sisteminden elde edilen faz-nötr ve fazlar arası gerilimler sonuç olarak verilmiştir.*

**Anahtar Kelimeler:** Fırçasız DC Motor, PIC 16F876, Motor Sürücü.

## Abstract

*In this study, PIC 16F876 based motor driver for brushless DC motor is designed and practically implemented. In designed system, PIC based control circuits is isolated from power circuits by using PC817 opto-isolators. In this way, undefined effects on control card are eliminated from power card. In addition, electronics components on the driver card is used very widespread and is easily acquired. Driver system is practically implemented easily because of basic structure and low prices. Performance of the driver system is very good. As a result of study, phase voltages and phase to phase voltages are given.*

**Keywords:** Brushless DC Motor, PIC 16F876, Motor Driver.

## 1. Giriş

Fırçasız Doğru Akım (DC) motorları artık günümüzde, endüstriyel uygulamaların çoğunda, özellikle otomotiv sektörü, uzay teknolojileri, bilgisayar teknolojileri, tıp elektroniği, askeri alanlar, robotik uygulamaları ve ev ürünlerinde sıkça kullanılmaktadır. Bu motorlar, yüksek moment/akım ve yüksek moment/eylemsizlik oranına sahiptir. Ayrıca Fırçasız DC motorların, sağlam yapı, yüksek verim ve yüksek güvenilirlik gibi üstünlükleri vardır [1].

Bu özelliklerinin yanında, Fırçasız DC motorların avantaj ve dezavantajlarını aşağıdaki gibi sıralayabiliriz [2,3].

Fırçasız DC motorların avantajları:

- Hız kontrol olanağına sahiptir,
- Verimleri çok yüksektir,
- Fırçasız yapıları sebebi ile ark oluşturmamakta ve fırçadan çıkan karbon tozlarını içermemektedir,
- Küçük boyutta yüksek moment üretebilirler,
- Uyarma akımına ihtiyaç duymazlar,
- Güvenilir çalışma ortamı sağlarlar,
- Soğutulması kolaydır,
- Yüksek hızlarda çalışma imkanı verirler,
- Sessiz çalışma sağlarlar.

Fırçasız DC motorların dezavantajları:

- Kontrol devresi karmaşıktır,
- Pozisyon sensörlerine ihtiyaç duyarlar,
- Maliyetleri yüksektir.

Mikrodenetleyici (PIC) devre elemanları son yıllarda, uygun yapısı nedeniyle tek döngülü sayısal kontrol sistemlerinde sıkça kullanılmaktadır. Ayrıca yaygın kullanımı ve uygun fiyatı nedeniyle popülerliği giderek artmaktadır. PIC'ler, bir bilgisayarın temel özelliklerini içeren tek bir silikon kılıf içerisinde toplanmış tüm devre elemanlarıdır. Genel olarak bir PIC devre elemanı; bir mikroişlemci, program/veri belleği, giriş/çıkış birimleri, saat darbesi üreteçleri, zamanlayıcı/sayıcı birimleri, kesme kontrol birimi, analog/dijital ve dijital/analog çeviriciler, darbe genişlik üretici, seri haberleşme birimi ve daha özel uygulamalar için kullanılan diğer çevresel birimlerden meydana gelmektedir. Çalışmada kullanılan PIC 16F876 devre elemanı, yüksek performans RISC CPU teknolojisi, 20 MHz çalışma frekansı, 3 adet giriş/çıkış, 3 adet zamanlayıcı, 2 adet PWM modül, 5 kanallı 10 bitlik ADC, 8Kx14 kelime flash hafıza, 368x8 bayt RAM ve 256x8 bayt EEPROM içermektedir [4].

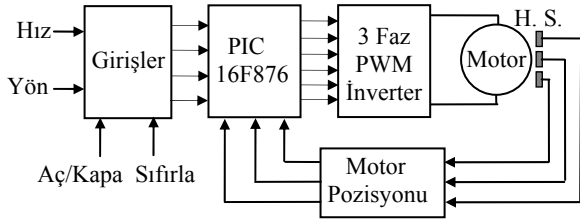
Bu çalışmada Fırçasız DC motorlar için PIC tabanlı bir sürücü gerçekleştirilmiştir. Motorun, hall effect sensörlerinden alınan konum bilgileri PIC tarafından yorumlanarak yazılan program sayesinde uygun komutasyon çıkışları üretilmiş ve bu çıkışlar izolasyon amacıyla optik izolatörlere uygulanmıştır. Gerçekleştirilen sistemde motor akımını karşılamak için uygun MOSFET elemanları kullanılmıştır. MOSFET elemanlarını sürmek için TC4427 sürücü entegreleri tercih edilmiştir. Yazılım olarak Microchip firmasının MPLAB programında derlenen ASM dili kullanılmıştır [5].

## 2. Fırçasız DC Motor Sürücüsü

Fırçasız DC motorların çalıştırılması ve kontrolü oldukça zordur. Bu motorlar, yapıları gereği elektronik olarak kontrol edilir ve doğru akım komütasyonu için kontrol işleminde rotor pozisyon bilgisi gerektirirler.

Fırçasız DC motorların kontrolünde, iki ayrı kapalı çevrim kullanılır. Birincisi, iç kontrol çevrimidir ve burada motor akımı veya momenti kontrol edilir. Bu amaçla, motor faz sargılarının akımları sürekli takip edilerek, referans akımı izlemesi sağlanır. İkincisi ise, dış kontrol çevrimidir. Bu çevrimde, motor hızı kontrol edilir. Geri besleme olarak, pozisyon sensörlerinden alınan gerçek motor hız bilgisi, hız denetleyicisine uygulanmalıdır.

Yapılan bu çalışmada, Fırçasız DC motorun akım geri beslemesi yapılmadan, nominal şartlarda çalışmasını sağlayan açık çevrim kontrolü yapılmıştır. Yani sistemde, akım geri beslemesi yapılmadan, motorun hall sensörlerinden alınan rotor pozisyon bilgisine göre, motoru döndürmek için gerekli elektronik komutasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil 1’de gerçekleştirilen sürücü sisteminin blok şeması verilmiştir.



Şekil 1: Gerçekleştirilen fırçasız DC motor sürücü sistemi

### 3. PIC Tabanlı Fırçasız DC Motor Sürücüsü Tasarımı

Gerçekleştirilen sistemde, fırçasız DC motor sürücü kartında mikrodenetleyici olarak PIC16F876, devrenin yalıtımı için de PC817 optik izolatörü kullanılmıştır. Sürücü kartında bulunan inverter devresi P ve N kanallı MOSFET çiftlerinden meydana gelmiş olup bu MOSFET’ler MOSFET sürme entegreleri yardımıyla sürülmüştür. Kullanılan PIC mikrodenetleyicisi ASM dilinde programlanmıştır.

Sürücü sisteminin gerçekleşmesi iki aşamada yapılmıştır. Birinci aşama, donanımın tasarlanması, ikinci aşama ise kontrol yazılımının yapılmasıdır. Bu bölümde her iki aşama da ayrıntılarıyla açıklanmıştır.

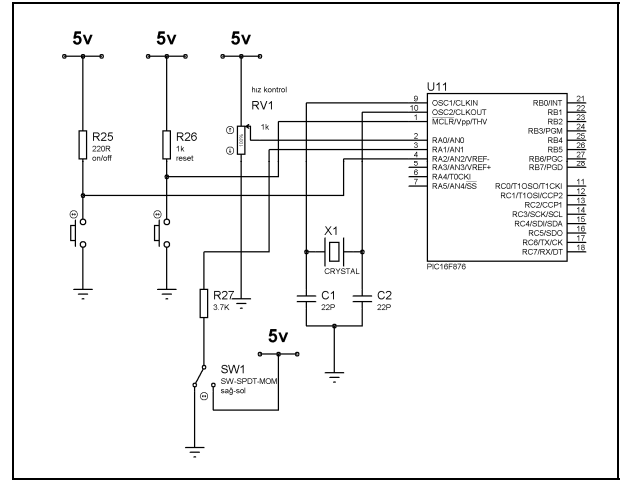
#### 3.1. Sistem Tasarımı

Fırçasız DC motor sürücü sistemi, giriş ve çıkış bölümlerinin tasarlanması olarak iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Devrenin giriş bölümü; on/off butonu, yön anahtarı, sensör girişleri ve hız kontrol potansiyometresinden meydana gelmiştir. Çıkış bölümü ise izolasyon katı ve üç fazlı PWM inverterden meydana gelmiştir. Aşağıda giriş ve çıkış bölümlerinin tasarımıyla ilgili özet bilgiler verilmiştir.

#### 3.1.1. Giriş bölümünün tasarlanması

Daha öncede belirtildiği gibi devrede mikrodenetleyici olarak Microchip firmasının PIC16F876 entegresi kullanılmıştır. Mikrodenetleyicinin A ve B portları, giriş portları olarak ayarlanmıştır.

Şekil 2’den anlaşılacağı gibi mikrodenetleyicinin RA0 girişine potansiyometre bağlanmıştır. Potansiyometre, bir gerilim bölücü olarak çalışmak suretiyle RA0 girişine uygulanan gerilimi 0-5 V arasında değiştirmektedir. Program aşamasında, RA0 girişine gelen sinyal, ADC yardımıyla 8 bit çözünürlüklü bir dijital değere dönüştürülmüştür. Bu değer, PWM (darbe genişlik modülasyonu) sinyalinin doluluk oranının belirlenmesinde kullanılmıştır.



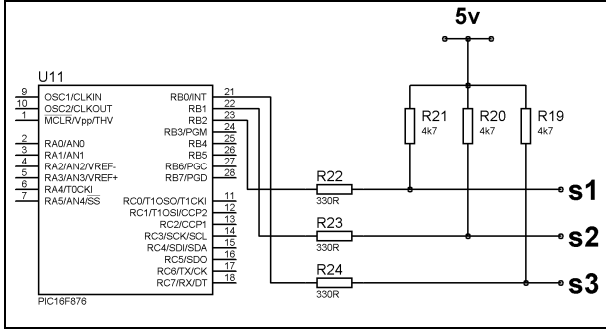
Şekil 2: Devrenin giriş bölümü

RA1 girişine iki yönlü bir anahtar bağlanmıştır. Bu şekilde RA1 girişine Lojik 1 (5 volt) veya Lojik 0 (0 volt) sinyali uygulanabilmektedir. Lojik 1 durumunda motor saat yönünde dönerken, Lojik 0 durumunda ise saat yönünün tersine dönmektedir.

RA2 girişine bir bas-çek buton bağlayarak bu girişe anlık olarak Lojik 0 sinyalinin uygulanabilmesi sağlanmıştır, bu buton devrede on/off butonu olarak kullanılmıştır. Bu butona bir defa basılınca, sistem “on” komutu alıp motor çalışmaktadır. Tekrar basılınca motor durmaktadır.

Fırçasız DC motor sürücü sisteminde komütasyon sinyallerinin üretilebilmesi için rotor pozisyonunun bilinmesi gereklidir. Fırçasız DC motorlarda rotor pozisyonu, motor içerisinde yerleştirilen hall sensörleri (S1, S2, S3) ile belirlenir. Ayrıca birçok uygulamada, hall sensörleri açık kolektör çıkışlı olarak tasarlanırlar. Şekil 3’de, açık kolektör çıkışlı hall sensörlerinin PIC devresine bağlantısı görülmektedir.

Şekil 3’de verilen sistemde, hall sensörlerinin beslemeleri ve toprakları, mikrodenetleyicinin beslemesi ve toprağıyla ortak olarak bağlanmıştır. Şekil 3’e göre, hall sensör çıkışının Lojik 0 olması durumunda PIC’e 0 volt, hall sensör çıkışının Lojik 1 olması durumunda ise PIC’e 5 voltluk gerilim uygulanmaktadır.



Şekil 3: Sensörlerin devreye girişi

### 3.1.2. Çıkış bölümünün tasarlanması

Kontrol kartında çıkış bölümü giriş bölümüne göre daha karmaşıktır. Çıkış bölümünde daha çok güç elemanları bulunmaktadır. Bu bölümün tasarımı çıkışın izole edilmesi ve üç fazlı inverter devresinin tasarımı olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır.

#### Çıkışın izole edilmesi

Mikrodenetleyici 5V'luk gerilim ile çalışırken, Fırçasız DC motor ise 12V'luk gerilim ile çalışmaktadır. Devrenin sağlıklı çalışması için farklı gerilimlerle çalışan devre elemanlarının birbirinden yalıtılması gerekmektedir.

Piyasada izolasyonu sağlayan birçok optik izolatör çeşidi bulunmaktadır. Burada önemli olan izole edilecek sinyalin frekansdır. Hız kontrolü için 10 kHz'lik bir PWM sinyali üretildiğinden dolayı kullanılacak optik izolatörün de bu sinyali iletebilmesi gerekmektedir. Bundan dolayı sistemde PC817 adlı optik izolatörün kullanılması uygun görülmüştür. Şekil 4'de izolasyon işleminin nasıl yapıldığı görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi, 3 fazlı fırçasız DC motoru çalıştırmak için kullanılan 6 çıkış sinyalinin 3 tanesi, terslenerek PC817 izolatöre uygulanmıştır. Ayrıca Şekil 4'de görüldüğü gibi, izolatörler ile 12V'luk ve 5V'luk kaynaklar birbirinden tamamen ayrılmıştır.

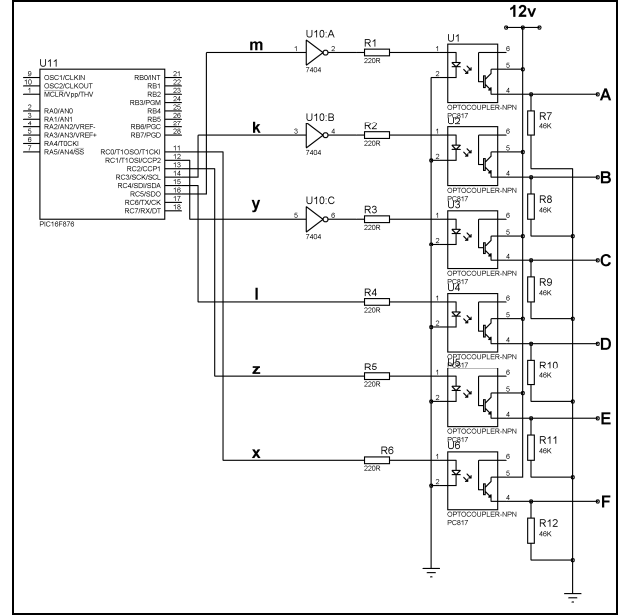
#### Üç fazlı PWM inverter devresi

Uygulamada, kullanılan fırçasız DC motor 3 fazlı ve yıldız bağlı olduğundan dolayı, motorun çalıştırılabilmesi için 3 fazlı PWM inverter kullanılmıştır. Sistemde PWM frekansı 10 kHz seçilmiştir.

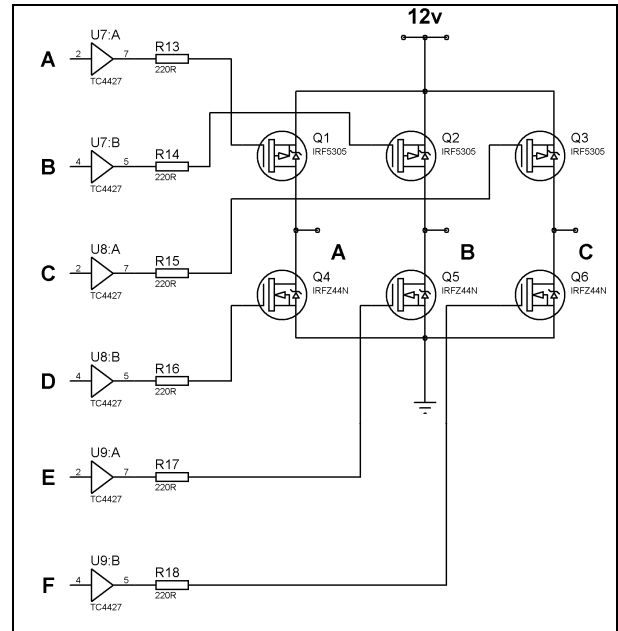
Şekil 5'de görüldüğü gibi, 3 fazlı PWM inverter için 3 adet P-kanallı MOSFET (Q1, Q2, Q3) ve 3 adet N-kanallı MOSFET (Q4, Q5, Q6) kullanılmıştır. Şekilde, üstte yer alan MOSFET'ler P-kanallı, altta yer alan MOSFET'ler ise N-kanallıdır. P-kanallı MOSFET'leri ilettime geçirmek için 0 volt, kesime götürmek için ise 12 volt'luk gerilim uygulanmıştır. N-kanallı MOSFET'leri ilettime geçirmek için 12 volt ve kesime götürmek içinse 0 volt'luk gerilim uygulanmıştır. Inverter çıkışları A, B, C motor faz sargılarına doğrudan bağlanmaktadır.

Günümüzde MOSFET sürücü entegreleri sayesinde MOSFET'lerin sürülmesi çok kolaylaşmıştır. Bu tasarımda

TC4427 sürücü entegresi kullanılmıştır. Sürücü entegresinin kullanım amacı, MOSFET'lerin en uygun biçimde iletim ve kesime götürülmesi ve 3 fazlı köprüde, anlık kısa devre gibi olumsuzlukların giderilmesi için anahtarlama ölü zamanları sağlamaktır. Ayrıca, anahtarlama elemanlarının iletim veya kesim anlarında yüksek akım çekmeleri nedeniyle optik izolatör çıkış akımlarının yetersiz kalması sonucu, uygun anahtarlama akımını sağlamaktır.



Şekil 4: Çıkış devresinin yalıtımı



Şekil 5: MOSFET sürücülerin bağlantı şekilleri

### 3.2. Kontrol Yazılımı

Bu bölümde, sürücü sisteminde kullanılan PIC 16F876 mikrodenetleyicinin kontrol yazılımı verilmektedir. PIC yazılımı, birkaç farklı programlama dilinde yapılabilir. Bunlardan en sık kullanılanlar; ASM dili, basic dili ve C dilleridir. ASM dili, mikrodenetleyici ailesinin temel programlama dili olup diğer bütün diller bu dil üzerine bina edilmiştir. PIC program kodları hangi dilde yazılmış olursa olsun, yazılan programların mikrodenetleyiciye aktarılabilmesi için Hexadesimal (Hex) formata çevrilmesi gerekmektedir, bundan dolayı her kullanılan dilin birde Hex kodu derleyicisi bulunmaktadır. Bu çalışmada mikrodenetleyici yazılımı, ASM diliyle gerçekleştirilmiştir.

#### 3.2.1. Fırçasız DC Motor

PIC yazılımının yapılabilmesi için, kullanılan fırçasız DC motorun özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu projede, MOOG firmasının BN23HP-18DA-04CH kod numaralı fırçasız DC motoru kullanılmıştır. Motora ait temel teknik özellikler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1: Motor özellikleri

Fırçasız DC motor tipi	MOOG BN23HP-18DA
Terminal gerilimi	12 volt
Çıkış gücü (P)	86 watt
Faz sayısı (Bağlantı)	3 (Yıldız)
Yüksüz Hız ( $\omega$ )	3400 d/dak.
Nominal akım ( $I_n$ )	8.8 A
Kutup sayısı (p)	8

Motor 8 kutuplu olduğu için, elektriksel olarak 60 derecelik her dönüş, mekanik olarak 15 derecelik dönüşe tekabül etmektedir. Buna göre, fırçasız DC motorun hall sensörleri yardımıyla kontrolü gerçekleştirilecekse, sensörlerden alınan sinyallere karşılık gelen sargı gerilimlerinin bilinmesi gerekmektedir. Sistemde PIC programı sayesinde, rotor pozisyon bilgilerine göre istenilen değer ve yönde motor sargılarına gerilim uygulanmaktadır. Rotor pozisyonlarına karşılık 3 faz sargılarına uygulanması gereken gerilimler, her iki yön için Tablo 2'de verilmiştir.

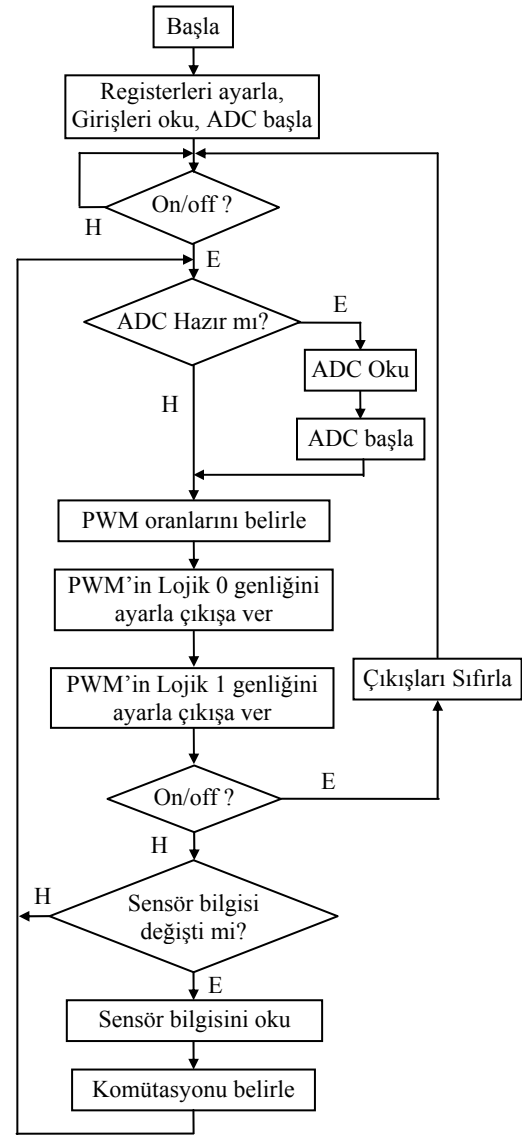
Tablo 2: Sensör çıkışlarına karşılık gelen sargı gerilimleri

Evre	1	2	3	4	5	6
Sensör 1						
Sensör 2						
Sensör 3						
Kod	100	101	001	011	010	110
<b>Motor yönü</b>	Saat yönünde					
Sargı A	-	O	+	+	O	-
Sargı B	+	+	O	-	-	O
Sargı C	O	-	-	O	+	+
<b>Motor yönü</b>	Saat yönüne ters					
Sargı A	+	O	-	-	O	+
Sargı B	-	-	O	+	+	O
Sargı C	O	+	+	O	-	-

Fırçasız DC motor sürücü sisteminde, motor dönüş yönü ve PWM doluluk oranları yukarıda belirtildiği gibi sırasıyla iki yönlü anahtar ve bir gerilim bölücü potansiyometre ile belirlenmektedir. PIC, bu giriş değerlerine göre, motoru saat yönünde veya saat yönünün tersi yönde döndürmektedir. Ayrıca PWM doluluk oranı ayarlanarak motor hızı ayarlanabilmektedir. PWM sinyali PIC devresinde yazılımsal veya donanımsal olarak iki şekilde üretilebilmektedir. Bu projede PWM modül kullanılmamış ve sinyal yazılımsal olarak üretilmiştir.

#### 3.2.2. Sürücü sistemi akış diyagramı

Fırçasız DC motor sürücü sisteminin program akış şeması aşağıda verilmiştir. Akış şemasına göre, sisteme enerji verildiğinde registerler ayarlanmakta, Port A ve Port B olarak ayarlanan girişler okunmakta, motor pozisyonu belirlenmekte, ADC'ye başla komutu verilmektedir. Bu ayarlamalardan sonra sistem hazır vaziyette çalış (on) komutunu beklemektedir.

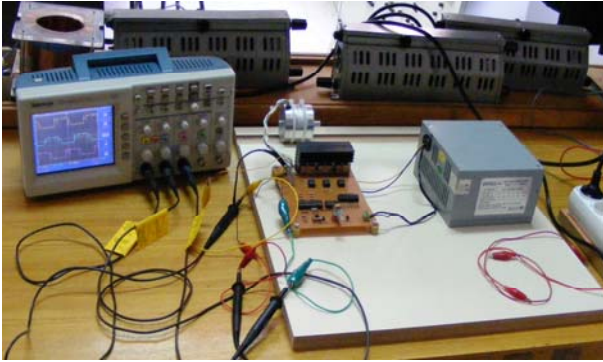


Şekil 6: Akış diyagramı

Çalış (on) komutu alınca, eğer ADC çıkışları hazır ise değeri okunmakta, bir sonraki çıkışı hazırlaması için komut verilmekte, ADC'den okunan değere göre PWM doluluk oranları belirlenmekte, zamanlayıcı yardımı ile PWM sinyali üretilmektedir. Üretilen PWM sinyalinin inverterde hangi anahtarlama elemanına uygulanacağı, hall sensörlerinin durumuna göre Tablo 2 kullanılarak belirlenmekte veya uygun komütasyon seçilmektedir.

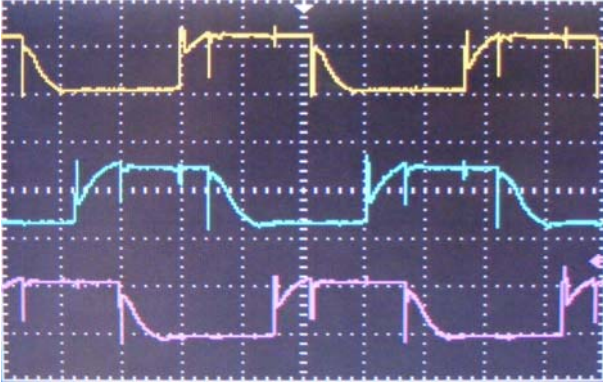
#### 4. Uygulama Sonuçları

Şekil 7'de tasarlanan devre ve deney düzeneği görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi, sürücü sistemi başarıyla çalıştırılmış ve osiloskop yardımıyla sürücü çıkışı gözlemlenmiştir.



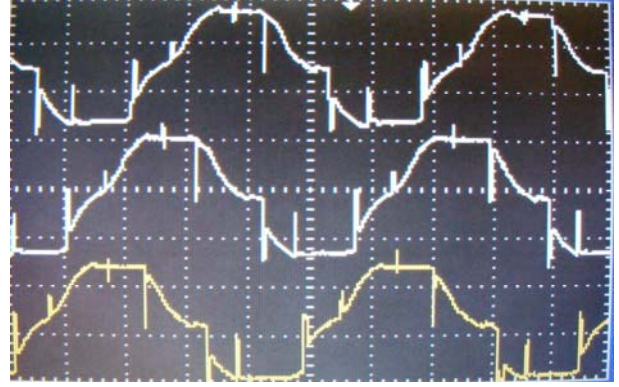
Şekil 7: Deney seti

Şekil 8'de, motor yüksüz ve 3400 d/dak. ile dönerken 3 faz sargı uçlarındaki  $V_{A0}$ ,  $V_{B0}$  ve  $V_{C0}$  faz-toprak gerilimlerinin dalga şekilleri görülmektedir. Dalgalar arasında 120°şer derecelik faz farkı bulunmaktadır.



Şekil 8: Yukarıdan aşağıya  $V_{A0}$ ,  $V_{B0}$ ,  $V_{C0}$  gerilim dalga şekilleri. Time/div: 1ms, Volt/div:10.0V

Şekil 9'da, motor yüksüz ve 3400 d/dak. ile dönerken 3 faz sargı uçlarındaki  $V_{AB}$ ,  $V_{BC}$  ve  $V_{CA}$  faz-faz gerilimlerinin dalga şekilleri görülmektedir. Dalgalar arasında yine 120°şer derecelik faz farkı bulunmaktadır.



Şekil 9: Yukarıdan aşağıya  $V_{AB}$ ,  $V_{BC}$ ,  $V_{CA}$  gerilim dalga şekilleri. Time/div: 1ms, Volt/div:10.0V

#### 5. Sonuçlar

Bu çalışmada, fırçasız DC motorlar için PIC 16F876 tabanlı bir sürücü sistemi tasarlanmış ve başarıyla pratik olarak gerçekleştirilmiştir. Basit yapısı ve düşük maliyetine göre sistemin kararlı bir şekilde çalıştığı görülmüştür. Tasarlanan devre, fırçasız DC motorun moment kontrolü yapmadan sadece pozisyon sensörlerinden geri besleme olarak kontrolünü sağlamaktadır. Sabit yüklü ve sabit hızlı fırçasız DC motor uygulamalarında kolaylıkla kullanılabilir yapıdadır. Sistem, ilave edilecek bir akım sensörü yardımıyla, motor akım kontrolü dolayısıyla moment kontrolü de yapılabilecek niteliktedir. Son olarak, yapılan deneyler sonucunda tasarlanan sürücünün, hem kullanılan malzemelerin ucuzluğu ve tedarik kolaylığı hem de sistemin kararlılığı nedeniyle pratik uygulamalarda güvenli bir şekilde kullanılabilirliği görülmüştür.

#### 6. Kaynaklar

- [1] Yedamale, P., *Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals*, Microchip Technology Inc. App. Note, USA. 2003.
- [2] Toliyat H.A., Gopalarathnam T., *AC Machines Controlled as DC Machines (Brushless DC Machines/Electronics)*. The Power Electronic Handbook. CRC Press LLC, New York, 2002.
- [3] Lee B., Ehsani M., "Advanced Simulation Model for Brushless DC Motor Drives", *Electric Power Component and Systems*, 31: 841-868, 2003.
- [4] Data Sheet, PIC 16F87X 28/40-Pin 8-Bit CMOS FLASH Microcontrollers, Microchip Technology Inc. 2001.
- [5] Bayer, M., *Mikrodenetleyici Tabanlı Fırçasız DC Motor Sürücüsü Tasarımı*, Selçuk Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Lisans Bitirme Projesi, 2008.