



**T.C.**  
**BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ**  
**BİLİMSEL ARAŞTIRMA PROJESİ**  
**SONUC RAPORU**

**Motor Sürücü Denetim Sisteminin Hızlı Modellenmesi ve  
DSP Gömülü Kodlarının Otomatik Üretilmesi**

**PROJE YÜRÜTÜCÜSÜ: Yrd. Doç. Dr. Metin Kesler**

**ARAŞTIRMACILAR: Yrd. Doç. Dr. Cihan Karakuzu  
Yrd. Doç. Dr. Uğur Yüzgeç**

**BAŞLAMA TARİHİ: 01.01.2011**

**BİTİŞ TARİHİ: 12.10.2012**

**BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ**  
**BİLECİK, 20112**

## 1. GİRİŞ

Günümüz endüstrisinde asenkron motorlar oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunun en önemli sebebi, daha az bakım gerektirmesi, daha ucuz olması ve her çalımsa hızında moment üretebilmesidir. Bilinen alternatif akım makineleri içinde kullanım oranı en fazla olan bu makinelerin, bir zamanlar, hız denetiminin geniş bir aralıkta yapılamaması asenkron motorlar için istenilmeyen bir durum olmasına rağmen yarı iletken anahtarlı çeviricilerin ve buna yönelik hızlı işlemcilerin gelişimi, bu durumu tersine çevirmiştir. Bu gelişme, daha iyi denetim modellerinin çalışılması ve başarımıyla desteklenmiştir.

Sayısal işaret işlemciler (DSP) video, müzik, haberleşme ve ölçme tekniğinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Elektrik makinelerinin hız, moment ya da konum denetiminde yüksek hızlı ve doğruluklu işlem başarımının elde edilmesinde ve daha karmaşık denetim yöntemlerinin uygulanmasında sayısal işaret işleyiciler önemli yer tutmaktadır. Güç elektroniği sürücü düzeneklerinde kullanılan yarı iletken anahtarların daha hızlı ve daha karmaşık denetimleri, sürekli gelişen mikroişlemci teknolojisiyle daha kolay yapılabilmektedir.

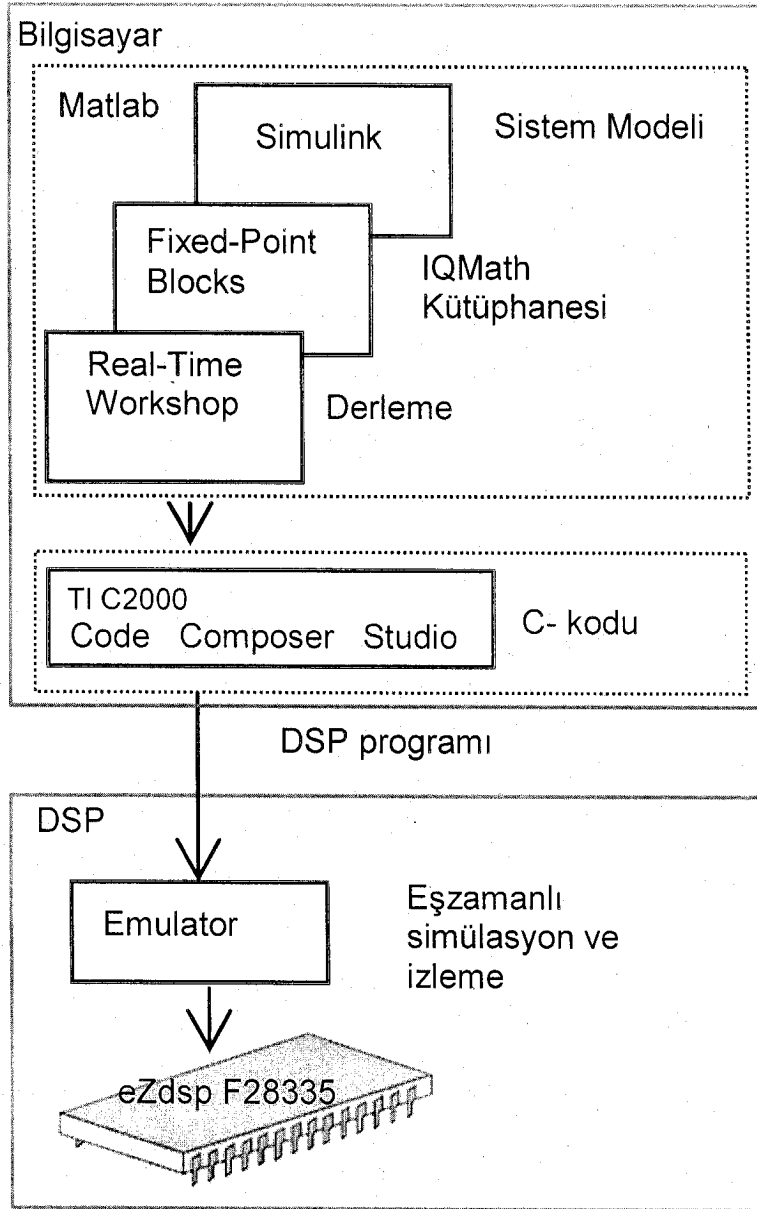
Bu çalışmada, endüstrisinde asenkron motorlar için motor sürücü denetim sisteminin hızlı modellenmesi ve DSP gömülü kodlarının otomatik üretilmesi için Matlab/Simulink ortamında Embedded Target for TIC2000 DSP [6] ve Real Time Workshop (RTW) alt yazılımları kullanarak DSP kodlarının üretimi gerçekleştirilmektedir. Üretilen gömülü kodlar CCS (Code Composer Studio) ortamında derlenerek F28335 DSP kartına yüklenmektedir.

## 2. I. ARA RAPOR DÖNEMİNDE YAPILAN ÇALIŞMALAR

### 2.1. DSP Gömülü Kod Üretme Aşamaları

Proje ile ilgili olarak literatür taraması incelenmiştir ve gömülü kod üretme çalışmaları yapılmıştır. Öngörülen 6 aylık zaman diliminde, Matlab/Simulink Embedded Target ve Real Time Workshop yazılımı ile model tabanlı otomatik gömülü kod üretimi ve DSP ile motor denetim çalışmanın çalışmalarının verimliliği ve getirdiği kolaylıklar incelenmektedir. Matlab/Simulink, denetim algoritmalarının blok diyagramlarla gösterilebilen benzetimi için model tabanlı bir geliştirme

ortamıdır. Blok diyagramlarla verilen DSP algoritmaları, Real Time Workshop (RTW), Link for Code Composer Studio Development Tools ve Embedded Target for TIC2000 DSP alt yazılımları ile Şekil 1'de görüldüğü gibi hedef DSP işlemcileri için makine diline (assembly) çevirmekte ve gerçek zamanda (real time) uygulanması ve tasarım doğrulaması çok hızlı bir şekilde yapılabilmektedir.



Şekil 1. Matlab/Simulink üzerinden otomatik gömülü kod üretimi akış diyagramı.

Motor hız denetim sisteminin laboratuvar ortamında Sayısal İşaret İşlemci (DSP) geliştirme kartı üzerinden denetimi için Matlab Simulink Embedded Target yazılımı ile kod üretimi otomatik olarak gerçekleştirilmektedir. Matlab Simulink yazılımı ile benzetimi yapılan Motor hız denetim sisteminin, DSP üzerinden denetimi için gerekli C dilindeki kodları Embedded Target TIC2000 DSP alt yazılımı ile üretilecektir. Üretilen kodlar TMS320R28335 DSP kartına gönderilerek Motor hız denetim sisteminin kontrolü sağlanmaktadır. Matlab/Simulink ortamında otomatik gömülü kod üretmek amacıyla, Embedded Target for TI C2000 DSP araç kutusundaki C28x DMC kütüphanesinden Clarke dönüşü bloğu, C28x IQ math kütüphanesinden aritmetik işlem ve matematiksel fonksiyon blokları, Simulink, Simulink Fixed Point ve Signal Processing Blockset kütüphanesi kullanılarak motor hız denetim algoritması oluşturulacaktır. Bu Simulink modele, C2800 DSP Core Support kütüphanesinden C28x ADC ve C28x PWM blokları eklenerek F28335 DSP analog girişleri ile PWM çıkışları seçilecek ve C2000 Target Preferences kütüphanesinden F28335 bloğu eklenerek DSP konfigürasyon ayarları yapılmaktadır.

RTW (Real Time Workshop), Simulink ortamında oluşturulan motor hız denetim blok diyagramından C kodlarını otomatik olarak üretmektedir. Bu kodlar TI CCS2000 (Code Composer Studio 2000) DSP yazılım geliştirme ortamına aktarılarak diğer destek dosyalarıyla birlikte derlenmekte ve emülatör aracılığı ile DSP'ye yüklenmektedir. Böylece, Matlab/Simulink ortamında oluşturulan motor hız denetimin model tabanlı denetim blok diyagram gerçek zamanlı sinyal işlemine tabi tutulmak üzere DSP ortamında gerçek zamanlı olarak aktarılması ve uygulanması mümkün olmaktadır.

## **2.2. TMS320F28335 DSP Yapısı**

TMS320F28335 DSP, sabit noktalı işlem yapan 32-bit 150Mhz bir işlemci olup, 16-kanal 6.67ns çözünürlüklü ölü zaman ayarlı programlanabilir PWM çıkışı, 16 kanal 12-bit 80ns dönüşüm zamanlı A/D çevirici, 4 adet sayısal yakalama girişi ve 4 adet kare dalga kodlayıcı girişi, 16-bit 7 port programlanabilir sayısal giriş-çıkış, 18K word RAM ve 128K word Flash EEROM ve C/C++ programlama desteğine sahiptir. İşlemci sabit noktalı aritmetik işlem yapmasına rağmen IQmath kütüphane desteği ile kayan noktalı aritmetik işlem kolaylığında ve ona yakın doğrulukta işlem yapabilmektedir.

### 2.3. CCS Programlama Arayüzü

Texas Instruments firmasının ürettiği bu sayısal işaret işlemcisi, Code Composer Studio (CCS) ile birlikte gelmektedir. İşlemcinin programlanması C++ ve ASM ile yapılabildiği gibi MATLAB Simulink, VISSIM, PSIM gibi özel paket programlar da kullanılabilir. Ancak oluşturulan program kodları yine CCS aracılığıyla işlemciye yüklenmektedir. Bu işlem için CCS kullanılan program tarafından çağrılmaktadır. Paket içeriği olarak gelen CD ile sistem kurulumu standart PC donanım kurulumu gibidir. CCS 'in yeni sürümlerinde kart bağlantısı çalışma anında kesilebilmekte ve tekrar bağlanabilmektedir. Ancak önceki sürümlerinde DSP program yüklemesi ve koşturulması bitene kadar kart ile bağlantının kesilmesine izin vermemektedir.

CCS ara yüzünde standart C/C++ proje oluşturma işlemleriyle, CSS örnek dosyalarından her hangi birinde ana program çatısı oluşturulabilir. CCS'de açılan her yeni proje için kullanılan işlemciye ilişkin "f2833.gel" dosyası eklenmelidir. F2833 işlemcisinin bütün birimlerinin adresleri ve adları C++ desteği ile neyse yönelimli olarak tanımlanmıştır. Bu nedenle standart olarak işlemci birimlerine ilişkin başlık dosyaları, kütüphane dosyaları ve kullanıcı tarafından değiştirilebilen kaynak dosyaları açılan projeye eklenmelidir. Bu dosyalar, kullanıcı tarafından oluşturulacak yeni denetim yazılımları gibi kaynak dosyaları ile bağlanarak çıkış dosyası üretilir ve işlemciye yüklenir. İşlemcinin kullanılan birimlerine göre giriş/çıkış kapıları, ADC girişleri, PWM çıkışları, sayısal veri çıkışları, işlemci ve kullanılan birimlerin uygun çalışma hızları mevcut kaynak dosyalarında değiştirilir. Özellikle kesme (interrupt) vektörleri program zamanlaması açısından doğru ayarlanmalıdır. Örneğin 2.5kHz'lik bir PWM işareti üretimi için 400µs'lik bir zaman kesme vektör yazılımı yapılmalıdır. Denetimi yürütecek program ya da program grubu bu süre içinde bir çevrimini tamamlamalıdır. Her giriş/çıkış kapısı; giriş, çıkış, işaret yakalama ya da PWM için bağımsız olarak ayarlanabilir. Ancak işlemci bilgi sayfalarında verilen bacak bağlantı yapılarına dikkat edilmelidir. İşlemcinin temel birim kayıtları tam korumalı olduğundan gerekli ayarlar yapılırken koruma kaldırılır ve ayarlama sonunda koruma kodları yeniden etkin yapılır. Bundan sonraki bölümlerde DSP'nin programlanmasında takip edilecek işlem sırası aynı kod sırasıyla verilmiştir. Kodlar verildiği sırada yazılmalıdır. Motor sürücü denetim sisteminin hızlı modellenmesi ve DSP gömülü kodlarının otomatik üretilmesi, motor kontrolü ve DSP

parametrelerinin değiştirilmesi için için Matlab'ın Guide bölümü kullanılarak bir ara yüz tasarlandı.

### 3. PMSM'nin Matematiksel Modeli ve FOC Yöntemi

Burada  $d$  ve  $q$  senkron olarak dönen eksen takımını,  $L_d, L_q$  endüktansı,  $R$  rotor sargı direncini,  $i_d, i_q$  akımı,  $V_d, V_q$  gerilimi,  $\psi_d, \psi_q$  akıyı,  $\psi_m$  sabit mıknatıs akısını,  $T_e$  elektriksel momenti,  $T_y$  yük momentini,  $B$  manyetik akı yoğunluğunu,  $w_r$  rotor hızını,  $w_e$  elektriksel hızı,  $\theta_r$  rotor açısını temsil etmektedir [2,9].

PMSM'nin d-q modeli;

$$V_d = Ri_d + L_d \frac{di_d}{dt} - w_r L_q i_q \quad (1)$$

$$V_q = Ri_q + L_q \frac{di_q}{dt} - w_r L_d i_d + w_r \psi_m \quad (2)$$

$$\psi_d = L_d i_d + \psi_m \quad (3)$$

$$\psi_q = L_q i_q \quad (4)$$

$$T_e = 1.5P(\psi_m i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) \quad (5)$$

$$\frac{dw_r}{dt} = \frac{T_e - T_y - B w_r}{J} \quad (6)$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r \quad (7)$$

$$\omega_e = \omega_r * P \quad (8)$$

Daimi mıknatıslı senkron motorun FOC yöntemiyle denetlemekte amaç AC motoru DC motora benzeterek kontrolünü sağlamaktır. Bu benzetim ise stator akımlarının dönen d-q eksen akımına dönüştürülmesiyle yapılır. Bu akımlardan q bileşeni moment ile doğru orantılıdır. Dolayısı ile bu bileşenin kontrolü ile moment de kontrol edilmiş olur [7]. PMSM'da ( $L_d=L_q$ ) iki eksen endüktansları birbirine eşittir. Buna göre eşitlik 5'teki moment ifadesi eşitlik 9'daki gibi hesaplanır.

$$T_e = 1.5P(\psi_m I_q) \quad (9)$$

Böylelikle akının zaten sabit mıknatıstan dolayı sabit olması durumu da göz önünde bulundurularak DC motordaki gibi tek akım ile ( $I_q$ ) kontrol edilerek moment kontrolü sağlanmış olur [2]. d-eksen akımının sıfırda tutulduğu bu yöntem Field Oriented Control (Alan Yönlendirmeli Kontrol, Vektör Kontrol) olarak isimlendirilir.

### 3.1 Hızlı Modelleme ve Model Tabanlı Gömülü Kod Üretimi

Hızlı modelleme, denetim algoritmalarının blok diyagramlarla gösterilebilen benzetimi için model tabanlı bir geliştirme ortamı olan Matlab / Simulink vasıtası ile sistemin modeli oluşturulma işlemidir. Hızlı modellemenin kilit noktası, otomatik kod üretimidir. Otomatik kod üretimi, algoritma kodlamasını otomatik olarak üretmeyi, hedef DSP kartına kodlamayı, derlemeyi, bağlamayı ve yüklemeyi kapsamaktadır. Bu otomasyon, tasarım değişikliklerinin blok diyagram yoluyla doğrudan yapılabilmesine izin vermekte ve saniyeler içerisinde yeni testler için hazır olmasını sağlamaktadır. Oluşturulan simulink modelinde normal matematiksel fonksiyon blokları yerine TI firması tarafında geliştirilen ve optimize edilmiş IQmath fonksiyonları kullanılmıştır. IQmath, sabit noktalı (fixed point) işlemciler için geliştirilmiş ve kayan noktalı (floating point) işlemciler kadar hassas matematiksel işlem performansı sağlayan, maksimum kod optimizasyonu yapılmış algoritmalarıdır[8].

Gömülü kodların otomatik üretimi için gerçekleştirilen bu adımların ekran görüntüsü Şekil 1'te görülmektedir. Herhangi bir programlama dili içine girmeden DSP bloğu ve tasarım parametreleri gerçek zamanda değiştirilebilmektedir. Grafikselsel blok diyagramların kullanımı, DSP üzerinden denetlenen sistem tasarımını, modellenmesini ve modifikasyonunu oldukça kolaylaştırmaktadır .

#### 4. II. RAPOR DÖNEMİNDE YAPILAN ÇALIŞMALAR

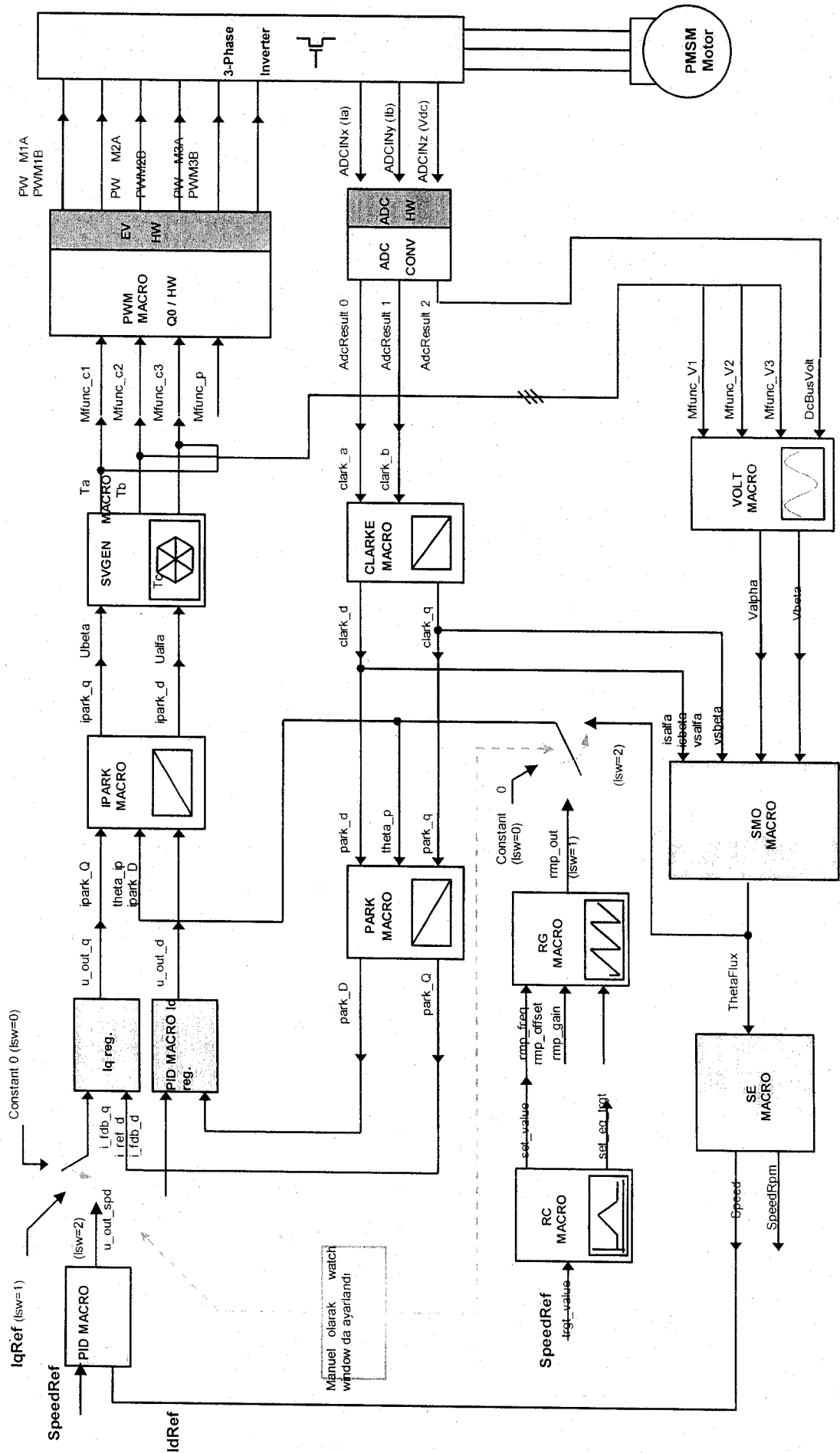
Bu dönemde projede kapsamında kullanılacak olan PMSM motorun hız kontrol modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan hız kontrol modeli Matlab/Simülink yazılımı ortamına aktarılarak DSP üzerinde yürütülecek olan kodlar otomatik olarak üretilmesi sağlanmaktadır.

şekil3 'de verilen FOC tabanlı kontrol modeli,

- PID MACRO,
- Iq reg.,
- PID MACRO Id reg.,
- IPARK MACRO,
- SVGEN MACRO,
- PWM MACRO,
- PARK MACRO,
- CLARKE MACRO,
- ADC CONV,
- RC MACRO,
- SE MACRO,
- SMO MACRO,
- VOLT MACRO

Bloklardan oluşmaktadır.

Şekil13. PMSM motorun FOC tabanlı hız denetim modeli



#### 4. PMSM SENNKRON MOTORUN FOC TABANLI HIZ KONTROL MODELİNİN MATLAB/SİMULİNK ORTAMINDA MODELLENMESİ VE DSP UYGULAMA KODLARININ OTOMATİK ÜRETİLMESİ

Matlab/Simulink ortamında otomatik gömülü kod üretmek amacıyla, Embedded Target for TI C2000 DSP araç kutusundaki C28x DMC kütüphanesinden Clarke dönüşüm bloğu, C28xxx Motor Control bloğu, C28x IQmath kütüphanesinden aritmetik işlem ve matematiksel fonksiyon blokları, Simulink, Simulink Fixed Point ve Signal Processing Blockset kütüphanesi kullanılarak paralel AGF denetim algoritması oluşturulmaktadır. Bu Simulink modele, C2800 DSP Core Support kütüphanesinden C28x ADC ve C28x PWM blokları eklenerek F28335 DSP analog girişleri ile PWM çıkışları seçilmekte ve C2000 Target Preferences kütüphanesinden F28335 eZdsp bloğu eklenerek DSP konfigürasyon ayarları yapılmaktadır.

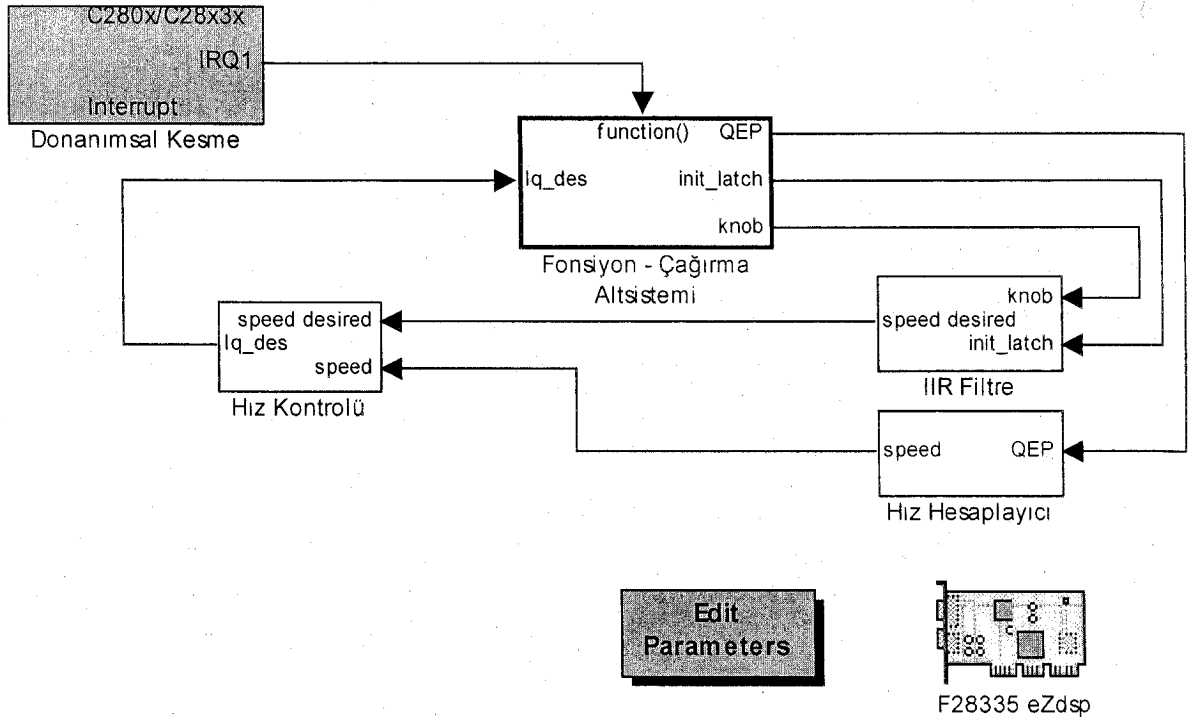
Oluşturulan simulink modelde normal matematiksel fonksiyon blokları yerine IQmath fonksiyonları kullanılmıştır. IQmath, sabit noktalı (fixed point) işlemciler için geliştirilmiş ve kayan noktalı (floating point) işlemciler kadar hassas matematiksel işlem performansı sağlayan, maksimum kod optimizasyonu yapılmış algoritmalarıdır. Şekil 4'de paralel Motor hız denetim'inin model tabanlı gömülü kod üretimi blok diyagramı görülmektedir. Şekil 5-16'de Şekil 4de verilen modelin ait alt blok şemaları görülmektedir

RTW (Real Time Workshop), Simulink ortamında oluşturulan motor hız denetim sisteminin grafiksel blok diyagramından C kodlarını otomatik olarak üretmektedir. Bu kodlar TI CCS2000 (Code Composer Studio 2000) DSP yazılım geliştirme ortamına aktarılarak diğer destek dosyalarıyla birlikte derlenmekte ve bilgisayarın paralel portuna bağlı F28335 DSP'nin üzerindeki emülatör aracılığı ile yüklenmektedir. Böylece, Matlab/Simulink ortamında oluşturulan motor hız denetim sisteminin model tabanlı denetim blok diyagram gerçek zamanlı sinyal işlemine tabi tutulmak üzere DSP ortamında gerçek zamanlı olarak aktarılması ve uygulanması mümkün olmaktadır.

Tüm tasarım işlemi tam otomatik, esnek ve oldukça kolay bir şekilde yapılabilmektedir. Ayrıca, herhangi bir programlama dili içine girmeden DSP bloğu ve tasarım parametreleri gerçek zamanda değiştirilebilmektedir. Grafiksel blok diyagramların kullanımı, DSP üzerinden

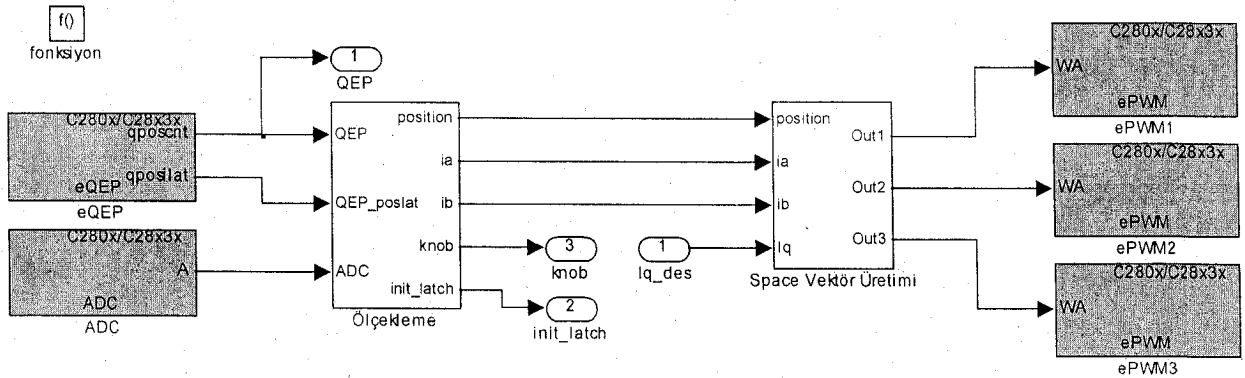
denetlenen sistem tasarımını, prototiplendirilmesini ve modifikasyonunu oldukça kolaylaştırmaktadır.

#### 4.1. Motor Hız Denetim Sistemin Genel Şeması

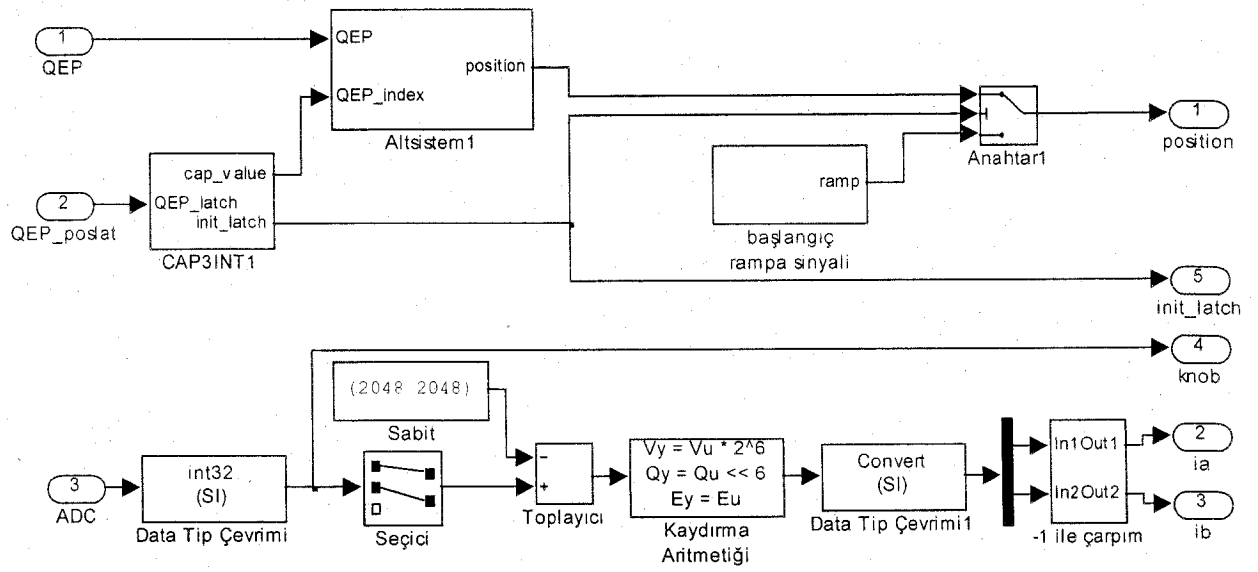


Şekil 1 - PMSM motorun FOC tabanlı Modelinin Matlab/Simulink Genel Görünümü

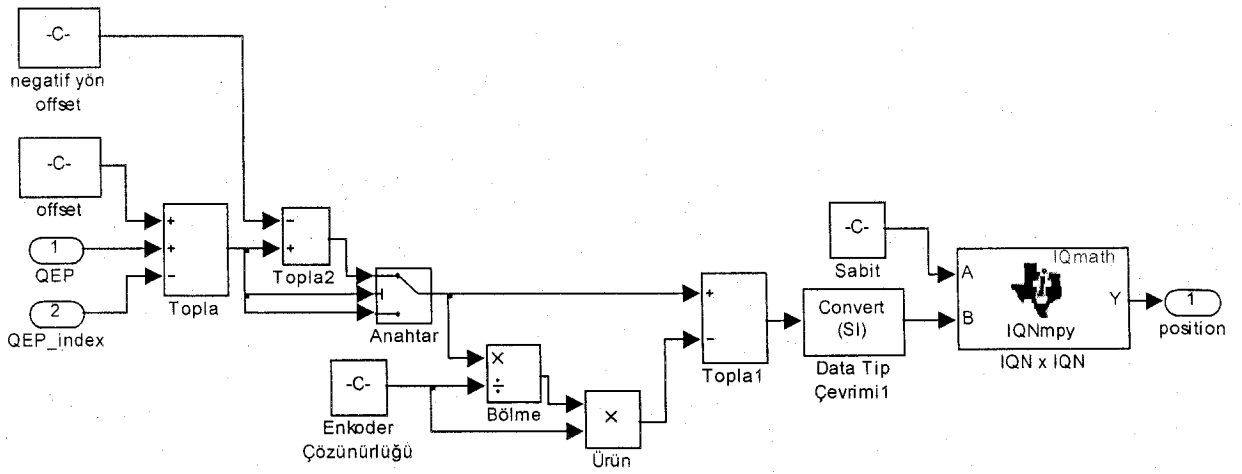
#### 4.2. Fonksiyon – Çağırma Alt sistemi Bloğu



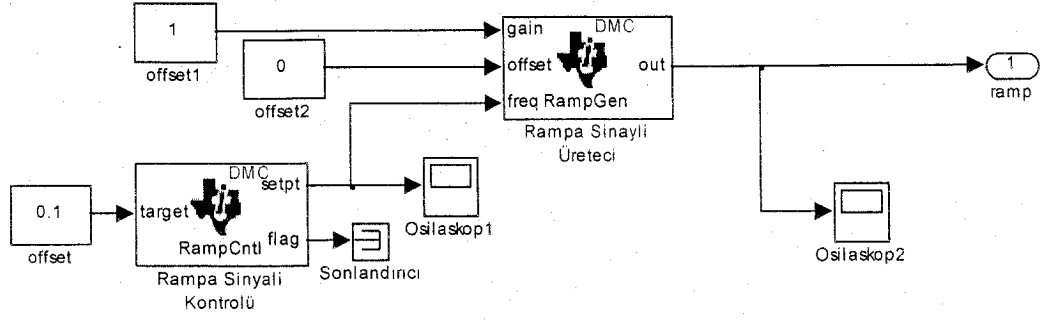
Şekil 5 - Ölçme bloğu



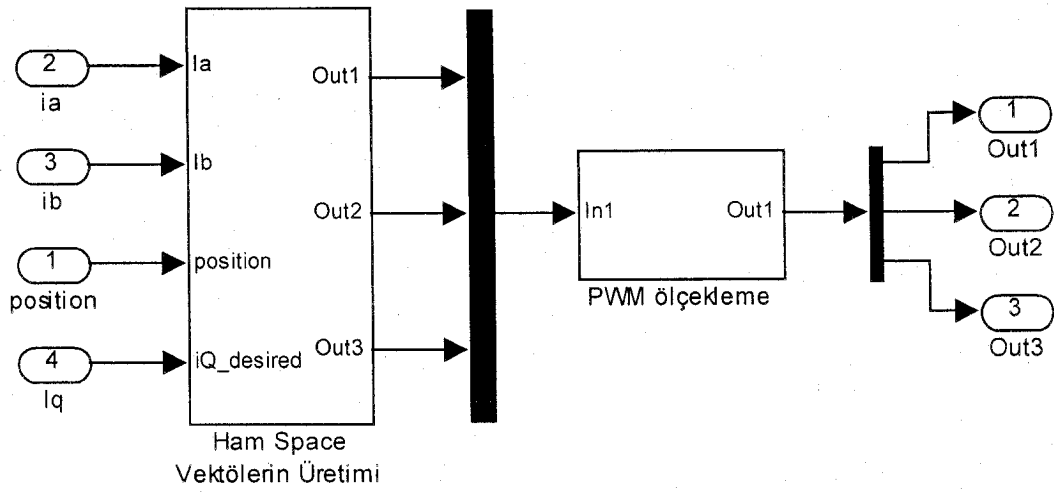
Şekil 6 - Ölçekleme bloğu



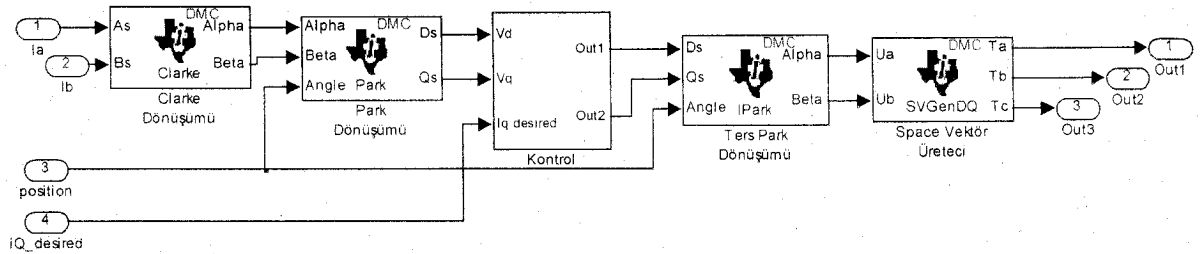
Şekil 7 - Altsistem bloğu



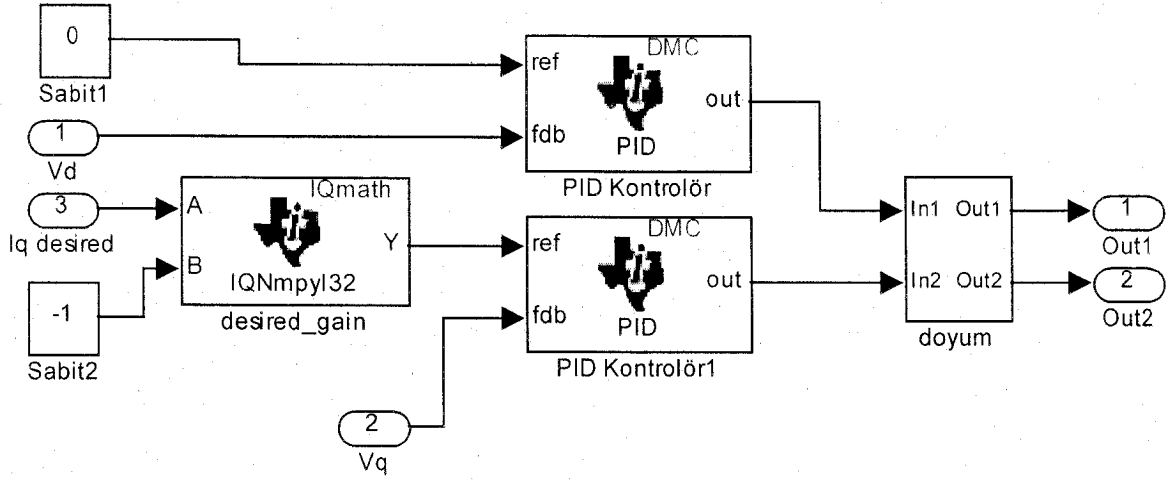
Şekil 8 - Başlangıç rap sinyali bloğu



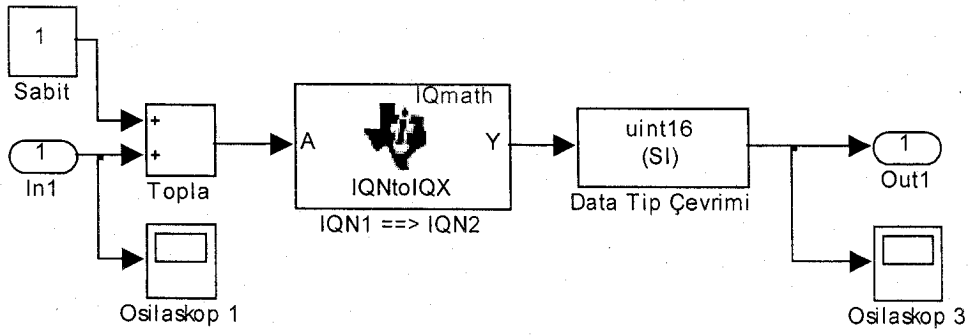
Şekil 9 - Space vektör üretimi bloğu



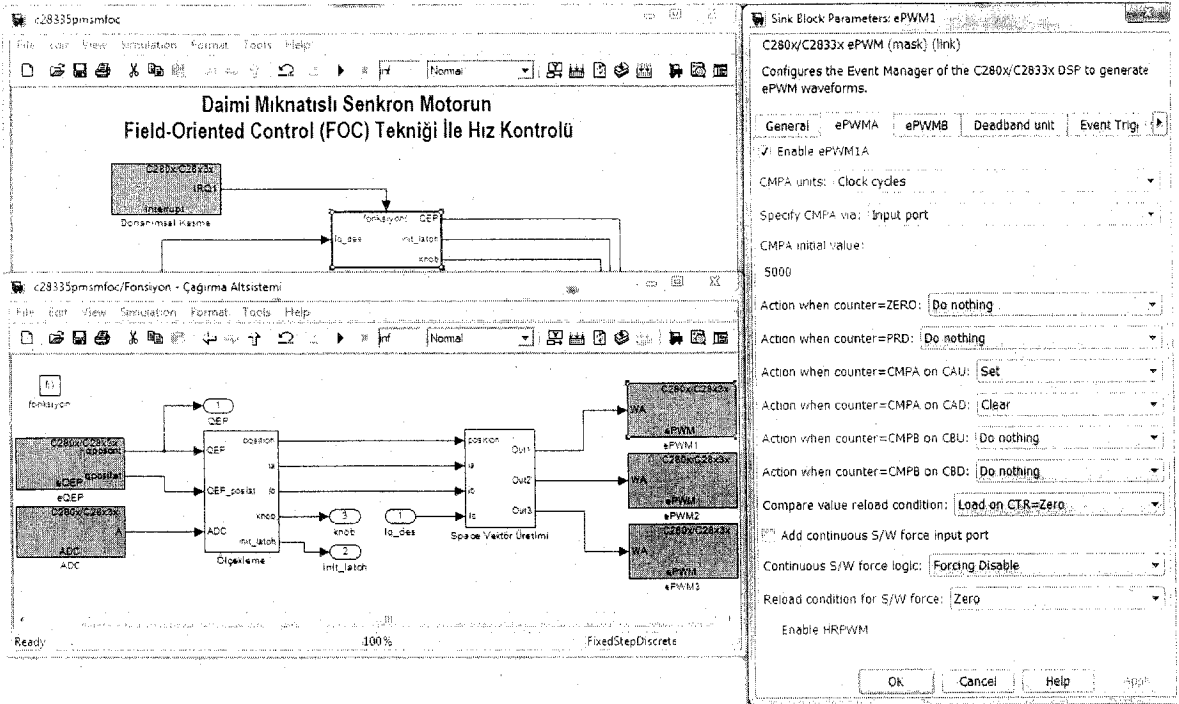
Şekil 10 - Ham Space vektör üretimi bloğu



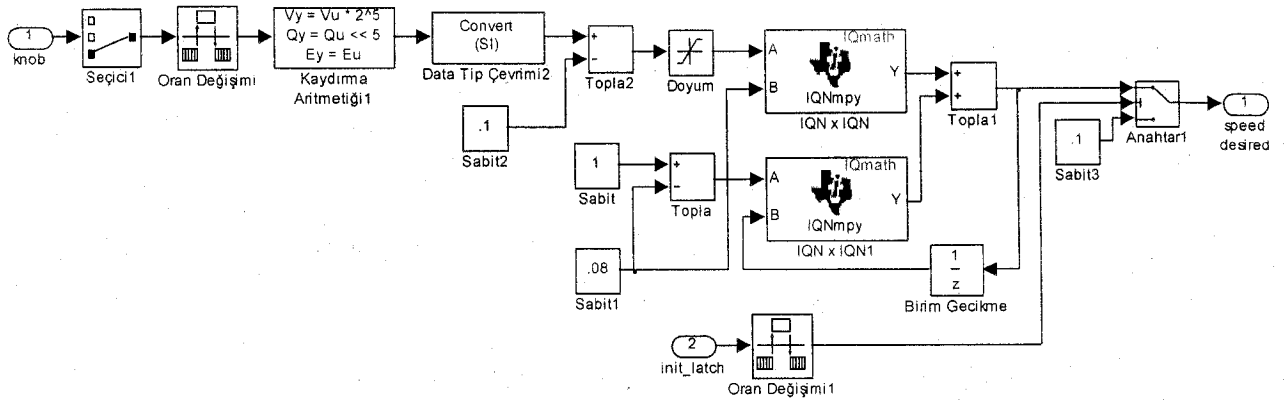
Şekil 11 - PID kontrol bloğu



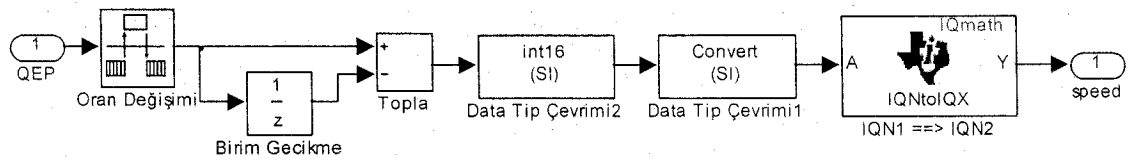
Şekil 12 - PWM ölçekleme bloğu



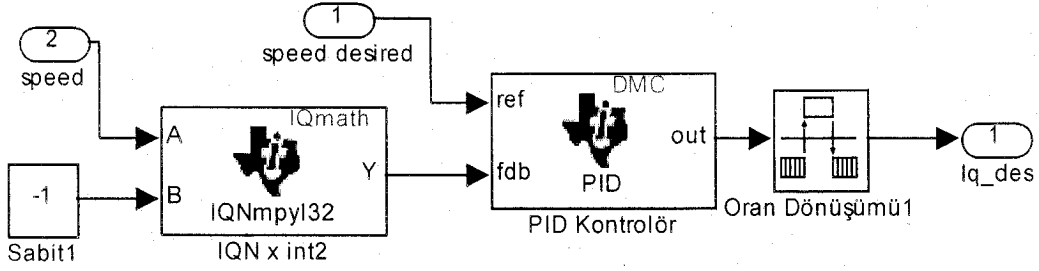
Şekil 13 - ePWM1, ePWM 2 ve ePWM 3 blokları parametre ayarı



Şekil 14 - IIR filtre bloğu



Şekil 15 - Hız hesaplayıcı bloğu



Şekil 16 - Hız kontrolü bloğu

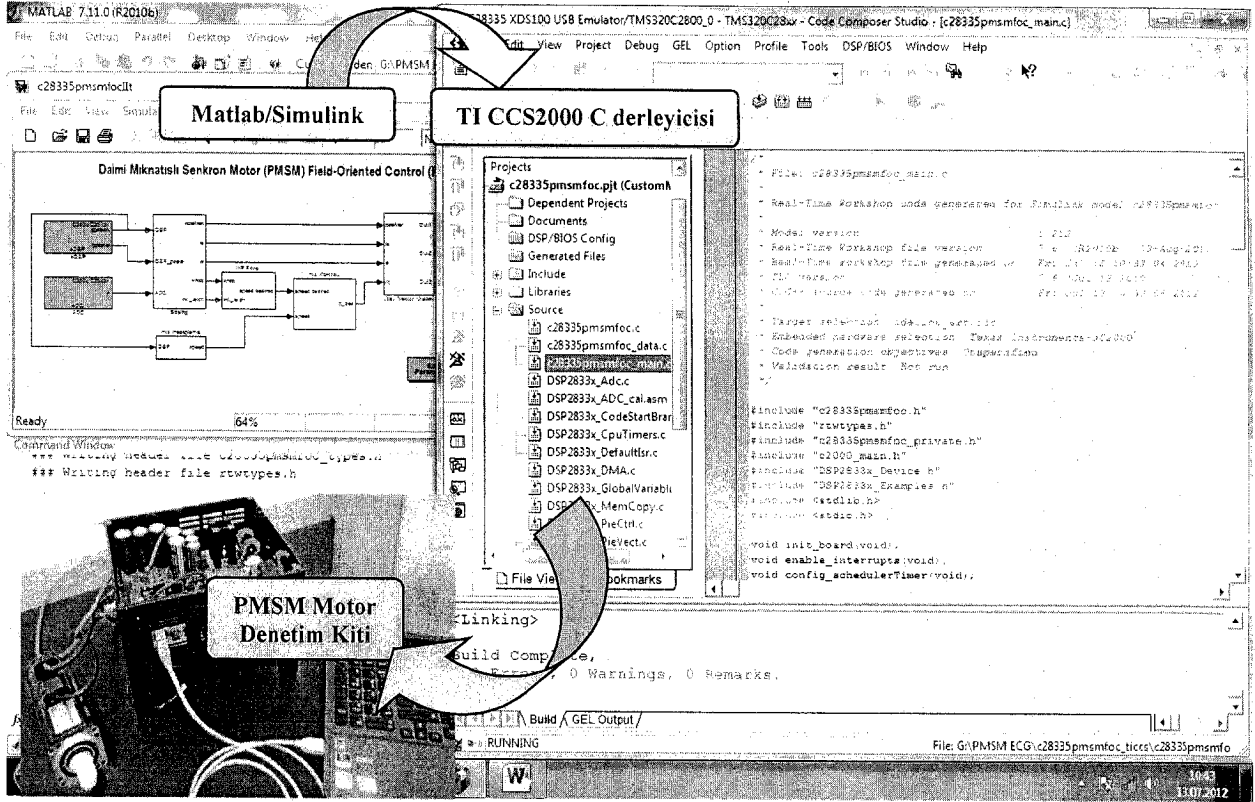
Şekil 4’de FOC yöntemi ile PMSM denetim sistemini için Matlab / Simulink’te oluşturulmuş model tabanlı denetim blok diyagramı görülmektedir. Bu modelde görüldüğü üzere motorun mekanik hızını ölçmek için DSP’nin eQEP modülünden alınan veri Hız Hesaplama bloğu vasıtası ile motorun hız bilgisine dönüştürülmektedir. Hız Kontrolü bloğunda motorun anlık hızı ile istenilen hızı karşılaştırılarak PID kontrolör vasıtası ile istenilen Iq akımının değeri belirlenmektedir. Akabinde istenen Iq akımı, ADC den gelen Ia ve Ib akımları ve Enkoderden gelen pozisyon bilgisi Uzay Vektör Üretimi bloğundaki clark park dönüşümleri ve PWM ölçekleme blokları vasıtası ile PMSM’nin kontrolü için gerekli PWM sinyallerine dönüştürülmektedir.

Gömülü kodların otomatik üretimi ve uygulama adımların ekran görüntüsü Şekil 4’te görülmektedir. Burada gerçekleştirilen adımlar sırası ile şöyledir:

- PMSM denetim sistemini için Matlab / Simulink’te oluşturulmuş model tabanlı denetim blok diyagramı penceresinde model build edilmiştir.
- Build işleminden sonra Matlab otomatik olarak Code Composer Studio programını çağırmış ve bu program üzerinde projeyi oluşturmuştur.
- Akabinde header dosyaları, c dosyaları gibi proje için gerekli tüm kaynak dosyaları üretilmiştir.
- Proje tamamlandığında bu dosyalar tekrar derlenerek DSP için gerekli kodlar oluşturulmuş ve DSP ye yüklenmiştir.

- Böylelikle DSP için gerekli kodlar otomatik olarak üretilmiş DSP'ye yüklenmiş ve DSP, PMSM Motor Denetim Kiti üzerinden motor denetimi için kullanıma hazır hale gelmiştir.

Bütün bu aşamalar hiçbir kodlama işlemi içerisine girilmeden otomatik olarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 17: Çalışmada kullanılan yüksek voltaj dijital PMSM motor denetim kiti(sol alt) ve gömülü kodların otomatik üretimi için gerçekleştirilen adımların ekran görüntüsü.

## 5. Bilimsel Etkinlikler

Bu proje kapsamında yapılan çalışmalar ELECO2012 konferansına " PMSM Denetim Sisteminin Hızlı Modellenmesi ve DSP Gömülü Kodlarının Otomatik Üretilmesi" isminde bildiri olarak yayınlanmıştır.

## 6. Sonuç

Bu çalışmada PMSM motorun Alan Yönlendirmeli Kontrol (Field Oriented Control, FOC) yöntemi ile denetim sisteminin hızlı modellenmesi ve bu model üzerinden hiçbir kodlama

işlemine girilmeden gömülü kodların otomatik olarak üretimi gerçekleştirilmiştir. Otomatik üretilen DSP kodları yine otomatik olarak Yüksek Voltaj Dijital Motor Kontrol Kiti'ne bağlı olan DSP'ye yüklenmektedir. Akabinde yine bu kite bağlanmış durumda olan PMSM'nin kontrolü otomatik üretilen kodlar vasıtasıyla sağlanmıştır.

Motor kontrol algoritmasının Simulink blok diyagramından otomatik C kod üretimi işlemi, derleme, bağlama ve gerçek zamanlı DSP kodunu yükleme tümüyle otomatiktir. Deneysel sonuçlara göre otomatik üretilen kodlar oldukça verimlidir. Bu da uygulama geliştirme çevrim süresini oldukça kısaltmakta ve uygulama geliştirme maliyetinin azalmasını sağlamaktadır. Proje sürecinde literatür taraması, denetim algoritmasının Matlab ortamında oluşturulması, deneysel düzeneğin hazırlanması ve otomatik DSP gömülü kodların üretilmesi ve sistemin çalıştırılması Matlab ortamında oluşturulmuştur.

### **Kaynaklar**

- [1] K. Karnofsky, Speeding DSP algorithm Design, IEEE SPECTRUM, July 1996.
- [2] K.H. Hong et al. An integrated environment for rapid prototyping of DSP Algorithms using matlab and Texas instruments' TMS320C30 / Microprocessors and Microsystems 24, pp. 349-363, 2000.
- [3] Bose, B.K. 2001. "Modern power electronics and AC drives". Prentice Hall, 0-12-016743-6, 339-340, 271-305.
- [4] Shepherd, W. and Zhang, L. 2004. "Power Converter Circuits". Marcel Dekker, 0-8247-5054-3, 355-370.
- [5] Holmes, G.D. and Lipo, T.A. 2003. "Pulse Width Modulation for Power Converters – Principle and Practise". IEEE Press Series on Power Engineering, 105-139.
- [6] Mohan, N., Undeland, T.M. and Robbins, W.P. 2003. "Power Electronics Converter Application and Design, 975- 8431-99-4, 214- 267, 427-443.
- [7] Sani, A.M. 2007. "Advanced Modulation Techniques for Power Converters". Master of Science, Department of Electrical and Computer Engineering University of Manitoba, Winnipeg, Manitoba, 31–38.
- [8] Sarioğlu, M.K., Gökaşan, M. and Boğosyan, S. 2003. "Asenkron Makineler ve Kontrolü". Birsen Yayınevi, 975–511-343-6, 254-260.

# PMSM Denetim Sisteminin Hızlı Modellenmesi ve DSP Gömülü Kodlarının Otomatik Üretilmesi

## Rapid Prototyping of PMSM Control System and Automatic Generating of DSP Embedded Codes

Cem MORKOÇ<sup>1</sup>, Metin Kesler<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Bilgisayar Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü  
Bilecik Üniversitesi  
cem.morkoc@bilecik.edu.tr

<sup>2</sup>Bilgisayar Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi  
Bilecik Üniversitesi  
metin.kesler@bilecik.edu.tr

### Özet

Daimi mıknatıslı senkron motorun (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) yüksek güç, yüksek hız ve moment üretebilme kapasitesi, yüksek verim gibi avantajları kompakt bir yapı içerisinde barındırması, bu motor tipinin son yıllarda geliştirilen yüksek performanslı kontrol sistemlerinde kullanım yaygınlığını giderek arttırmaktadır. Günümüzde motor kontrol uygulamaları halihazırda dijital sinyal işlemciler (Digital Signal Processors, DSP) gibi özel işlemciler ile gerçekleştirilmektedir. Ancak gerçekleştirilen bu uygulamalarda kod üretme yöntemleri genellikle klasik yöntemlerle sınırlı kalmakta ve her bir uygulama için farklı ve uzun kodlar yazma gereksinimi duyulmaktadır. Bu çalışmada ise PMSM motorun Alan Yönlendirmeli Kontrol (Field Oriented Control, FOC) yöntemi ile denetim sisteminin hızlı modellenmesi ve bu model üzerinden hiçbir kodlama işlemine girilmeden gömülü kodun otomatik olarak üretimi ele alınacaktır.

### Abstract

Containing advantages such as high power, high speed and moment considering current rate, high efficiency, low rotor inertia and low motor size of Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) in a compact package, increases usage rate of this type of motor in high performance control systems which developed last years. Nowadays, motor control applications already performed by special processors such as Digital Signal Processors (DSP). But in that applications generally code generating methods limited with classical methods and need for writing long and different codes for each application. In this paper addressed that rapid modelling of control system of PMSM with Field Oriented Control (FOC) method and generating of embedded code automatically without writing any code over this model.

### 1. Giriş

Daimi mıknatıslı senkron motorun (PMSM) yüksek güç / ağırlık oranı, yüksek ivmelenme, moment geçişlerinin düzgünlüğü, akım oranına göre yüksek hız ve moment üretebilme kapasitesi, yüksek verim ve düşük atalet gibi avantajları kompakt bir yapı içerisinde barındırması, bu motor tipinin son yıllarda geliştirilen yüksek performanslı kontrol sistemlerinde kullanım yaygınlığını giderek arttırmaktadır. Ayrıca rotor kütlelerinin düşük olması nedeniyle uygulanan gerilime çok hızlı tepki göstermesi ve rotor akısının sabit mıknatıslar tarafından sağlanması nedeniyle enerji darboğazına giren dünyamızda ileriki yıllarda bu motor tipine olan ilginin dolayısı ile de kullanım yaygınlığının daha da artacağı öngörülmektedir [1].

AC motorlarda en yaygın kullanılan kontrol yöntemleri skaler kontrol (V/f), Doğrudan moment kontrol (DTC) ve vektör kontrol (FOC - Field Oriented Control) yöntemleridir [2]. Günümüzde motor kontrol uygulamaları halihazırda DSP gibi özel işlemciler ile gerçekleştirilmektedir. Ancak gerçekleştirilen bu uygulamalarda kod üretme yöntemleri genellikle klasik yöntemlerle sınırlı kalmakta ve her bir uygulama için farklı ve uzun kodlar yazılma gereksinimi duyulmaktadır [3].

Bu çalışmada PMSM motorun FOC yöntemi ile kontrol sisteminin hızlı modellenmesi için Matlab/Simulink [4] ortamında Embedded Target for TIC2000 DSP [5] ve Real Time Workshop (RTW) [6] alt yazılımları kullanılarak DSP kodlarının üretimi otomatik olarak gerçekleştirilmektedir. Otomatik üretilen kodlar TI CCS2000 (Code Composer Studio 2000) yazılım geliştirme ortamında derlenerek F2812 eZdsp kartına yüklenmektedir.

## 2. PMSM'nin Matematiksel Modeli ve FOC Yöntemi

Burada  $d$  ve  $q$  senkron olarak dönen eksen takımını,  $L_d, L_q$  endüktansı,  $R$  rotor sargı direncini,  $i_d, i_q$  akımı,  $V_d, V_q$  gerilimi,  $\psi_d, \psi_q$  akıyı,  $\psi_m$  sabit mıknatıs akısını,  $T_e$  elektriksel momenti,  $T_y$  yük momentini,  $B$  manyetik akı yoğunluğunu,  $w_r$  rotor hızını,  $w_e$  elektriksel hızı,  $\theta_r$  rotor açısını temsil etmektedir [2.9].

PMSM'nin d-q modeli;

$$V_d = Ri_d + L_d \frac{di_d}{dt} - w_r L_q i_q \quad (1)$$

$$V_q = Ri_q + L_q \frac{di_q}{dt} - w_r L_d i_d + w_r \psi_m \quad (2)$$

$$\psi_d = L_d i_d + \psi_m \quad (3)$$

$$\psi_q = L_q i_q \quad (4)$$

$$T_e = 1.5P(\psi_m i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) \quad (5)$$

$$\frac{dw_r}{dt} = \frac{T_e - T_y - B w_r}{J} \quad (6)$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = w_r \quad (7)$$

$$w_e = w_r * P \quad (8)$$

Daimi mıknatıslı senkron motorun FOC yöntemiyle denetlemekte amaç AC motoru DC motora benzeterek kontrolünü sağlamaktır. Bu benzetim ise stator akımlarının dönen d-q eksen akımına dönüştürülmesiyle yapılır. Bu akımlardan q bileşeni moment ile doğru orantılıdır. Dolayısı ile bu bileşenin kontrolü ile moment de kontrol edilmiş olur [7]. PMSM'da ( $L_d=L_q$ ) iki eksen endüktansları birbirine eşittir. Buna göre eşitlik 5'teki moment ifadesi eşitlik 9'daki gibi hesaplanır.

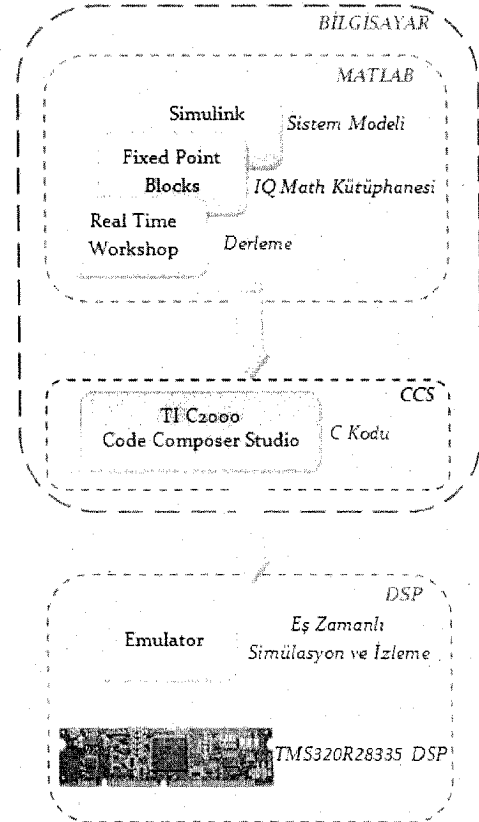
$$T_e = 1.5P(\psi_m i_q) \quad (9)$$

Böylelikle akımın zaten sabit mıknatıstan dolayı sabit olması durumu da göz önünde bulundurularak DC motordaki gibi tek akım ile ( $i_q$ ) kontrol edilerek moment kontrolü sağlanmış olur [2]. d-eksen akımının sıfırda tutulduğu bu yöntem Field Oriented Control (Alan Yönlendirmeli Kontrol, Vektör Kontrol) olarak isimlendirilir.

## 3. Hızlı Modelleme ve Model Tabanlı Gömülü Kod Üretimi

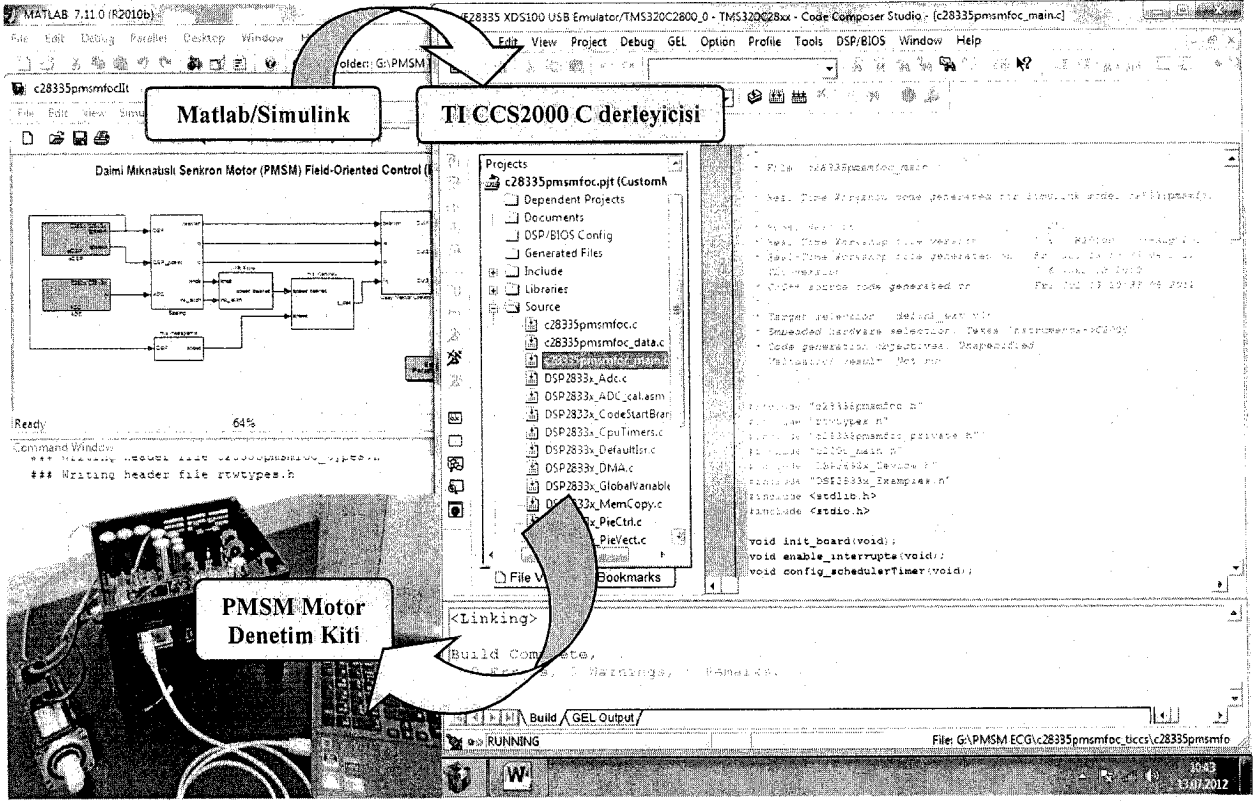
Hızlı modelleme, denetim algoritmalarının blok diyagramlarla gösterilebilen benzetimi için model tabanlı bir geliştirme ortamı olan Matlab / Simulink vasıtası ile sistemin modeli oluşturulma işlemidir. Hızlı modellemenin kilit noktası, otomatik kod üretimidir. Otomatik kod üretimi, algoritma kodlamasını otomatik olarak üretmeyi, hedef DSP kartına kodlamayı, derlemeyi, bağlamayı ve yüklemeyi kapsamaktadır. Bu otomasyon, tasarım değişikliklerinin blok diyagram yoluyla doğrudan yapılabilmesine izin vermekte ve saniyeler içerisinde yeni testler için hazır olmasını sağlamaktadır. Oluşturulan simulink modelinde normal matematiksel fonksiyon blokları yerine TI firması tarafından geliştirilen ve optimize edilmiş IQmath fonksiyonları kullanılmıştır. IQmath, sabit noktalı (fixed point) işlemciler için geliştirilmiş ve kayan noktalı (floating point) işlemciler kadar hassas matematiksel işlem performansı sağlayan, maksimum kod optimizasyonu yapılmış algoritmalarıdır[8].

Gömülü kodların otomatik üretimi için gerçekleştirilen bu adımların ekran görüntüsü Şekil 2'te görülmektedir. Herhangi bir programlama dili içine girmeden DSP bloğu ve tasarım parametreleri gerçek zamanda değiştirilebilmektedir. Grafikselsel blok diyagramların kullanımı, DSP üzerinden denetlenen sistem tasarımını, modellenmesini ve modifiikasyonunu oldukça kolaylaştırmaktadır.



Şekil 1: Gömülü kod üretiminin aşamaları.





Şekil 4: Çalışmada kullanılan yüksek voltaj dijital PMSM motor denetim kiti(sol alt) ve gömülü kodların otomatik üretimi için gerçekleştirilen adımların ekran görüntüsü.

## 5. Sonuçlar

Bu çalışmada PMSM motorun Alan Yönlendirmeli Kontrol (Field Oriented Control, FOC) yöntemi ile denetim sisteminin hızlı modellenmesi ve bu model üzerinden hiçbir kodlama işlemine girilmeden gömülü kodların otomatik olarak üretimi gerçekleştirilmiştir. Otomatik üretilen DSP kodları yine otomatik olarak Şekil 4'te görülen Yüksek Voltaj Dijital Motor Kontrol Kiti'ne bağlı olan DSP'ye yüklenmektedir. Akabinde yine bu kite bağlanmış durumda olan PMSM'nin kontrolü otomatik üretilen kodlar vasıtasıyla sağlanmaktadır. Motor kontrol algoritmasının Simulink blok diyagramından otomatik C kod üretimi işlemi, derleme, bağlama ve gerçek zamanlı DSP kodunu yükleme tümüyle otomatiktir. Deneysel sonuçlara göre otomatik üretilen kodlar oldukça verimlidir. Bu da uygulama geliştirme çevrim süresini oldukça kısaltmakta ve uygulama geliştirme maliyetinin azalmasını sağlamaktadır.

## 6. Teşekkür

Bu çalışma, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi BAP (Bilimsel Araştırma Projeleri) 2010-02-BİL.01-003 nolu proje kapsamında desteklemiştir

## 7. Kaynaklar

[1] Akyazı, Ö., Küçükali, M. ve Akpınar A. S., "Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Hız Denetiminin Farklı Bulanık Üyelik Fonksiyonları Kullanılarak

Gerçekleştirilmesi", *Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu*, 2011, 1.

- [2] Asker, M. E., Özdemir, M. ve Bayındır İ. B., "Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorun Hız Kontrol Sisteminde UVDGM ile Yapılan V/f ve Vektör Kontrol Yöntemlerinin İncelenmesi". *5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu*, 2009, 1-4.
- [3] Güven, S., Okumuş, H. İ. ve Yaşar İ., "SMDA Motorlu Otonom Araçların Gömülü Kod Üretimi ile TMS320F2808 DSP Tabanlı Hız Denetimi", *Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu*, 2011, 1.
- [4] Simulink, Simulation And Model – Based Design: User's Guide, Version 6.
- [5] Embedded Target for the TI TMS320C2000 DSP Platform for Use with Real – Time Workshop User's Guide, Version 6.
- [6] Real – Time Workshop, for use with Simulink: User's Guide, version 6.
- [7] Kazan, F. A. ve Bilgin, O., "Sabit Mıknatıslı Senkron Motorun Alan Yönlendirmeli Kontrolü ve Simülasyonu", *ELECO Elektrik, Elektronik, Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*, 2008, 1.
- [8] Kesler, M., Uçar, M. ve Özdemir, E., "Paralel Aktif Güç Filtresi İçin DSP Tabanlı Denetim Algoritmasının Otomatik Gömülü Kod Üretimi ile Hızlı Prototiplendirilmesi", *ELECO Elektrik, Elektronik, Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*, 2006, 1-3.
- [9] Akin, B. ve Bhardwaj M., Sensorless Field Oriented Control of 3-Phase Permanent Magnet Synchronous Motors, Texas Instruments.