



**NWSA-ENGINEERING SCIENCES**

Received: September 2012  
Accepted: January 2013  
NWSA ID : 2013.8.1.1A0342  
ISSN : 1308-7231

**Hakan Çelik**  
**Hasan Kürüm**

Firat University, Elazig-Turkey  
hakancelik@firat.edu.tr  
hkurum@firat.edu.tr

**SABİT MIKNATISLI SENKRON MOTORUN ALAN YÖNLENDİRMELİ KONTROLÜ**

**ÖZET**

Son zamanlarda mikroişlemci teknolojisindeki gelişmeler ve güçlü mıknatısların üretilmesi ile birlikte Sabit Mıknatıslı Senkron Motorlara (SMSM) olan ilgi giderek artmaktadır. Daha önce asenkron motorların kullanıldığı sürücü düzeneklerde artık SMSM'ler kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle doğrudan tahrik sistemlerinde SMSM'lerin kullanılmasıyla birlikte geniş bir hız aralığında çalışma imkânı sağlanmıştır. SMSM'ler günümüzde, asansörler, elektrikli araçlar, uçaklar, robot teknolojisi vb. birçok alanda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. SMSM'lerin vektör kontrol yöntemlerinden olan Alan Yönlendirmeli Kontrol (AYK) ile sürücü sistemlerde değişken hız uygulamalarında dinamik bir cevap elde edilebilir. Bu çalışmada SMSM'nin AYK'sına ilişkin Matlab/Simulink'te benzetimler yapılmıştır. Ayrıca laboratuvarında DS1103 Ace Kit kullanılarak SMSM'nin deneysel sürücü sistemi gerçekleştirilmiştir. Deneysel ve benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlar kullanılarak, SMSM'nin kullanıldığı sürücü düzeneklerde AYK ile geniş bir hız aralığında yüksek dinamik cevaba sahip olduğu gösterilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Sabit Mıknatıslı Senkron Motor, Alan Yönlendirmeli Kontrol, Gerilim Kaynaklı İnverter, Deneysel Sürücü Sistem, Benzetim.

**FIELD ORIENTED CONTROL OF PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR**

**ABSTRACT**

With the recent developments in microprocessors technology and production of strong magnets the interest on Permanent Magnet Synchronous Motors (PMSM) increases continuously. PMSM are begun to be used in driver set ups in which asynchronous motors were used before. Especially, with the use of PMSM in direct excitation systems it is now possible to work in a wide speed range. SMSMs are used in different areas like elevators, electrical vehicles, air planes and robotic technology. It is possible to achieve dynamic responses in variable speed applications in driver systems with Field Oriented Control (FOC), one of the vector control methods of PMSM. In this study, simulations are generated with Matlab/Simulink about FOC used in PMSM. Furthermore experimental driver system of SMSM is generated using DS1103 Ace Kit in the laboratory. Using the results of simulations and experimental driver set ups, it is shown that with FOC it is possible to achieve dynamic response in a wide speed range in the driver set up in which PMSM are used.

**Keywords:** Permanent Magnet Synchronous Motors, Field Oriented Control, Voltage Source Inverter, Experimental Drive System, Simulation.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son zamanlarda mikroişlemci teknolojisindeki gelişmeler ve güçlü mıknatısların üretilmesi ile birlikte SMSM'lere olan ilgi giderek artmaktadır. SMSM'ler yüksek verim değerleri, basit yapıları ve birim hacim başına elde edilen yüksek güç yoğunluğu nedeniyle diğer motorlardan daha fazla tercih edilmektedirler. Sürücü sistemlerde yaygın bir şekilde kullanılmakta olan asenkron motorlar özellikle düşük hızlarda verimli bir şekilde kullanılamazlar. Özellikle servo uygulamalarda geniş bir hız aralığında çalışıldığından asenkron motorun kullanımı güçleşmektedir. Bu nedenle düşük hızlarda verimli bir şekilde çalışabilen SMSM'lere olan ilgi giderek artmaktadır. Asansör sistemlerinde SMSM'lerin kullanımı ile doğrudan tahrik mümkün olmaktadır. Asansör gibi birçok uygulamada asenkron motorların yerine artık SMSM'ler kullanılmaktadır [1].

SMSM'ler mıknatısların yerleşim biçimine göre; yüzey mıknatıslı ve içten mıknatıslı olmak üzere iki şekilde üretilirler. Yüzey mıknatıslı motorların rotor çapları küçük olduğundan, eylemsizlik katsayısı düşük ve dinamik davranışları iyidir. İçten mıknatıslı motorlarda ise yüzey mıknatıslı motora göre daha yüksek akı yoğunluğu elde edilir ve hava aralığı daha küçük yapılabilir. İçten mıknatıslı motorların yüksek hızlarda merkezkaç kuvvetiyle dağılmaması da önemli bir üstünlüğüdür. Bu motorlar üretilen zıt emk şekline göre Sabit Mıknatıslı Senkron Motor ve Fırçasız doğru akım motoru olarak ikiye ayrılırlar. Sabit Mıknatıslı Senkron motorların ürettiği zıt emk sinüzoidaldir. Fırçasız Doğru akım motorlarında ise üretilen zıt emk trapezoidaldir [2 ve 3].

Motorlardaki yapısal iyileştirmelerin yanında, kontrol yöntemlerinde de gelişmeler sağlanmıştır. Daha önceden kullanılan Skaler kontrol yöntemlerinin kullanıldığı sürücü sistemler istenilen performansı sağlayamamışlar ve günümüzde bu kontrol yöntemlerinin yerini vektör kontrol yöntemleri almıştır. SMSM'nin vektör kontrol yöntemlerinde biri olan AYK, mikroişlemci ve güç elektroniği alanındaki gelişmeler ile birlikte yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Bu kontrol yönteminde 3 fazlı olan motor denklemleri d-q eksen dönüşümü yapılarak iki boyutlu vektör düzlemine aktarılır ve alan yönlendirmesi için motorun d-ekseni akımı  $i_d$  sıfır yapılır. Motorun kontrolü q-eksen akımı olan  $i_q$  ile gerçekleştirilir [4, 5, 6, 7, 8 ve 9]. AYK yönteminde motor akımının kontrolü için Darbe Genişlik modülasyonu (DGM) ile statora uygulanan gerilimin genliği ve frekansı değiştirilir.

Diğer bir vektör kontrol yönteminde ise stator akısı, rotor akısı ve moment, inverter için uygun bir anahtarlama stratejisine göre doğrudan kontrol edilebilir. Bu yöntem Doğrudan Moment Kontrolü (DMK) olarak ifade edilir. DMK'da kontrol büyüklükleri doğru akım motorundaki gibi motor akısı ve momenttir [10].

SMSM'nin rotor ve stator alanının senkronizasyonu için kullanılan algılayıcılar, sistemin maliyetini arttırır ve güvenilirliğini azaltır [4]. Bu sakıncaları ortadan kaldırmak için, literatürde SMSM'nin AYK ile konum algılayıcısız kontrolüne ilişkin birçok çalışma yapılmıştır [10, 11 ve 12]. Yine literatürde SMSM'nin AYK'sında yapay zekâ tekniklerinin kullanımına ilişkin çalışmalar da yapılmıştır [13 ve 14]. Ayrıca SMSM'nin AYK'sının deneysel uygulamasında ortaya çıkan sorunların çözümüne yönelik çalışmalar da yapılmıştır [15].

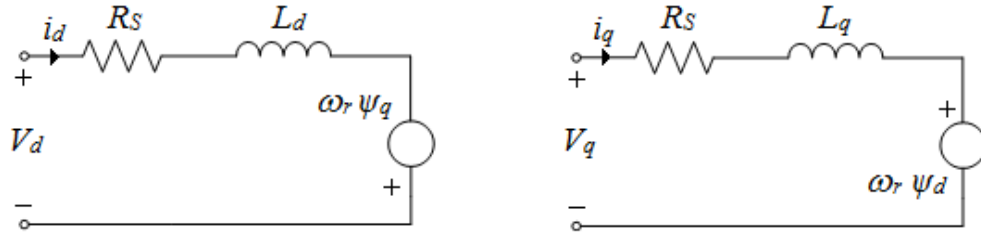
## 2. ÇALIŞMANIN ÖNEMİ (SIGNIFICANCE OF RESEARCH)

Bu çalışmada ilk olarak SMSM'nin AYK ile kontrolünün Matlab/Simulink benzetimi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra laboratuvar ortamında DS1103 Ace Kit kullanılarak oluşturulan deneysel sürücü düzenek ile deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Sürücü

sistemlerde genellikle geniş bir hız aralığında, değişken yükler için kararlı bir çalışma istenmektedir. Hem benzetim hem de deneysel sürücü düzenek SMSM'nin değişik yük ve hızlardaki dinamik davranışını ve performansını test etme imkânı sağlamaktadır. Böylece yapılan benzetim ve deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar kullanılarak SMSM'nin AYK ile kontrolünün sürücü sistemlerdeki performansı incelenmiştir. Literatürde SMSM'nin DSP ile AYK uygulamalarında uzay vektör DGM işaretleri donanımsal olarak üretilir. Bu çalışmada farklı olarak üç faz stator akımlarını ölçümü ile donanımsal DGM işaretlerinin üretimi arasında bir senkronizasyon sağlanmıştır. Bu sayede akımlarda oluşan ve karasız çalışmaya neden olan ani bozucu darbelerin önüne geçilmiştir.

### 3. SMSM'NİN MATEMATİKSEL MODELİ (MATHEMATICAL MODEL OF PMSM)

Bu kısımda SMSM'nin d-q eksenindeki matematiksel modeli ele alınacaktır. d-q eksenindeki modelin kullanılması ile SMSM'nin matematiksel modeli daha basit hale gelir. Bu model ile SMSM'nin hem geçici hem de sürekli durumdaki davranışı incelenebilmektedir. Şekil 1'de SMSM'nin d-q eşdeğer devreleri gösterilmiştir.



Şekil 1. SMSM'nin d-q eşdeğer devreleri  
 (Figure 1. d-q equivalent circuits of PMSM)

Bu eşdeğer devrelerden,

$$V_d = R_s i_d + \frac{d}{dt} \psi_d - \omega_r \psi_q \quad (1)$$

$$V_q = R_s i_q + \frac{d}{dt} \psi_q + \omega_r \psi_d \quad (2)$$

olur. Burada;  $V_d$  ve  $V_q$  d-q eksen gerilimlerini,  $i_d$  ve  $i_q$  d-q eksen akımlarını,  $\psi_d$  ve  $\psi_q$  d-q eksen akılarını ve  $\omega_r$  rotor hızını göstermektedir.

$\psi_d$  ve  $\psi_q$  d-q eksen akıları,

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

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

olarak yazılabilir. Burada,  $\psi_M$  mıknatısını temsil eder.  $L_d$  ve  $L_q$  ise d-q eksen inductanslarıdır. Denklem 3 ve 4, Denklem 1 ve 2'de yerine yazılırsa d-q eksen gerilimleri,

$$V_d = R_s i_d + L_d \frac{d}{dt} i_d - \omega_r L_q i_q \quad (5)$$

$$V_q = R_s i_q + L_q \frac{d}{dt} i_q + \omega_r L_d i_d + \omega_r \psi_M \quad (6)$$

olur. Moment denklemi q-d eksen büyüklüklerine göre ifade edilirse,

$$T_e = \frac{3p}{2} [\psi_d i_q - \psi_q i_d] \quad (7)$$

olur. Bu denklemde  $p$ , motorun çift kutup sayısıdır. Denklem 3 ve 4'te verilen  $\Psi_d$  ve  $\Psi_q$  akıları, Denklem 7'de yerine yazılırsa moment denklemi,

$$T_e = \frac{3p}{2} [\psi_M i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (8)$$

olarak elde edilir. Bu denklemde, birinci terim mıknatıs tarafından üretilen momentini ikinci terim ise relüktans momentini temsil eder. Yüzey mıknatıslı SMSM'lerde  $L_d$  ve  $L_q$  indüktansları birbirine eşit olduğundan, relüktans momenti sıfırdır. Bu durumda moment denklemi,

$$T_e = \frac{3p}{2} [\psi_M i_q] \quad (9)$$

olur. Hareket denklemi ise,

$$T_e - T_y = J \left( \frac{1}{p} \right) \frac{d\omega_e}{dt} + B \left( \frac{1}{p} \right) \omega_e \quad (10)$$

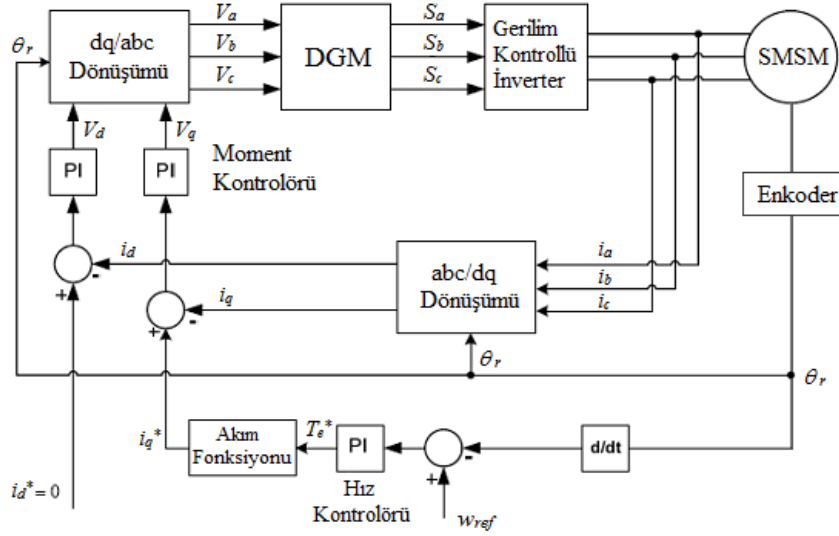
olarak yazılabilir. Burada  $J$  atalet momentini,  $B$  sürtünme katsayısını,  $\omega_e$  ise elektriksel hızı temsil etmektedir.

#### 4. SMSM'İN ALAN YÖNLENDİRMELİ KONTROLÜ (FIELD ORIENTED CONTROL OF PMSM)

Elektrik makinalarında kullanılan AYK, Alternatif Akım (AA) motorlarının Doğru Akım (DA) motorlarındaki gibi, uyarma devresi ve endüvi devresi arasında bir ilişki olmadan birbirinden bağımsız olarak kontrol edilmesini sağlar. Bu yöntem sayesinde DA motorlarından elde edilen yüksek dinamik performans AA motorlarından da elde edilebilir. Bu yöntem ilk olarak 1968'de Hasse [16] ve 1971'de Blaschke [17] tarafından önerilmiştir.

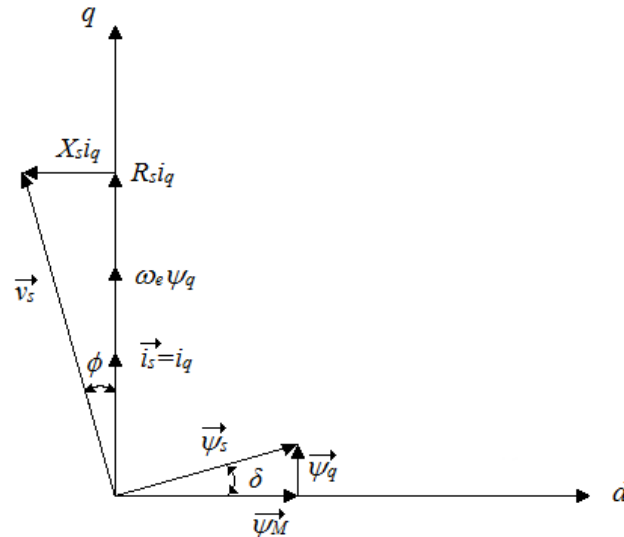
AYK'nın temel prensibi, makina akımının biri moment üreten ve diğeri ise akı üreten bileşen olmak üzere d-q olarak ifade edilen iki bileşene ayrılmasına ve bu bileşenlerin birbirinden bağımsız olarak kontrol edilmesine dayanır. Diğer elektrik makinalarına göre SMSM'lerde AYK daha kolaydır. Bunun sebebi rotora yerleştirilen sabit mıknatısların rotorda sabit bir manyetik akı üretmesidir [18].

SMSM'nin moment denkleminin verildiği Denklem 19'dan yüzey mıknatıslı SMSM'de moment  $\Psi_M$  akısına ve q eksenine akımı olan  $i_q$ 'ya bağlıdır.  $\Psi_M$  akısı rotora yerleştirilen sabit mıknatısların oluşturduğu akı olduğundan değeri sabittir. Bu durumda moment sadece q eksenine akımı olan  $i_q$ 'ya bağlı olur. d eksenine akımı olan  $i_d$ 'nin momente bir etkisi olmadığından değeri sıfır alınır. Böylece bakır kayıpları da azaltılmış olur [19].



Şekil 2. SMSM'nin AYK blok diyagramı  
 (Figure 2. FOC block diagram of PMSM)

Şekil 2'de SMSM'nin AYK blok diyagramı verilmiştir. Bu blok diyagramından görüldüğü gibi hız kontrolörünün çıkışından referans moment daha sonra ise Denklem 9 kullanılarak  $i_q$  referans akımı elde edilmektedir. Referans ve motordan ölçülen  $i_q$  akımları karşılaştırılarak elde edilen hata değeri Oransal İntegral (PI) kontrolörün girişine uygulanmaktadır. Kontrolörün çıkışından  $V_q$  değeri elde edilmektedir. Benzer şekilde referans ve motordan ölçülen  $i_d$  akımları karşılaştırılarak elde edilen hata değeri PI kontrolörün girişine uygulanır. Kontrolörün çıkışından  $V_d$  değeri elde edilmektedir. Daha sonra ters Clarke ve ters Park dönüşümleri kullanılarak  $V_d$  ve  $V_q$  gerilimlerinden üç fazlı  $V_a$ ,  $V_b$  ve  $V_c$  referans gerilimleri elde edilir. DGM bloğunda referans gerilimleri elde etmek için gerilim kaynaklı inverterin anahtarlarına uygulanacak sürme işaretleri oluşturulmaktadır.

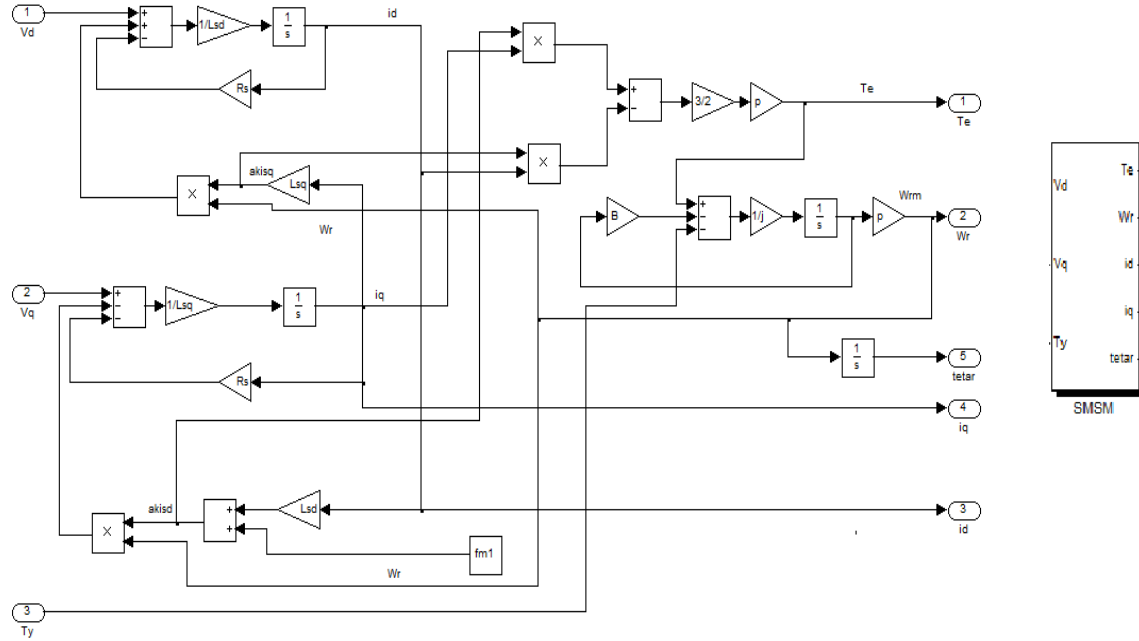


Şekil 3. SMSM'nin AYK sürekli durum vektör diyagramı  
 (Figure 3. Continuous FOC vector diagram of PMSM)

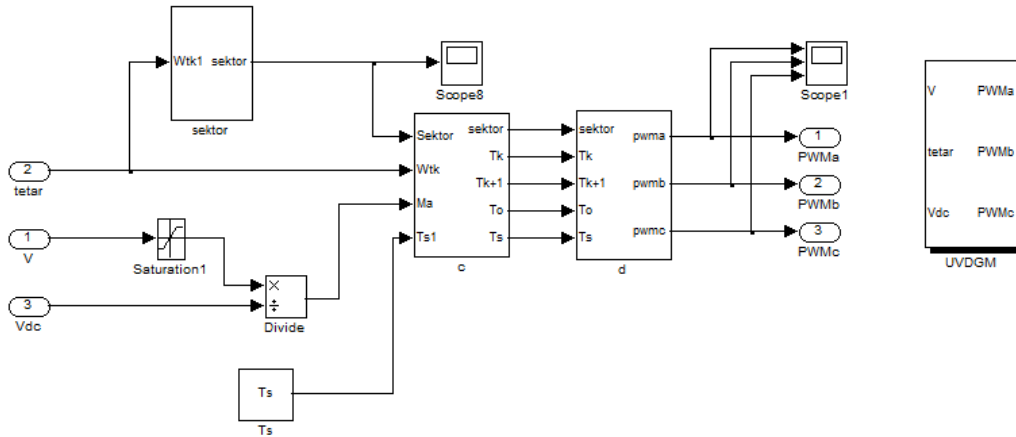
Şekil 3'de SMSM'nin AYK sürekli durumuna ilişkin vektör diyagramı gösterilmiştir. Bu diyagramda  $\vec{V}_s$  stator gerilim vektörünü,  $\vec{i}_s$  stator akım vektörünü,  $\vec{\Psi}_s$  stator akı vektörünü,  $\vec{\Psi}_M$  mıknatıs akı vektörünü,  $\delta$  yük açısını,  $\varphi$  güç açısını,  $\omega_e$  elektriksel açısal hızı ve  $X_s$  senkron reaktansı temsil etmektedir.

### 5. SMSM'İN ALAN YÖNLENDİRMELİ KONTROLÜNÜN BENZETİMİ (SIMULATION OF FIELD ORIENTED CONTROL OF PMSM)

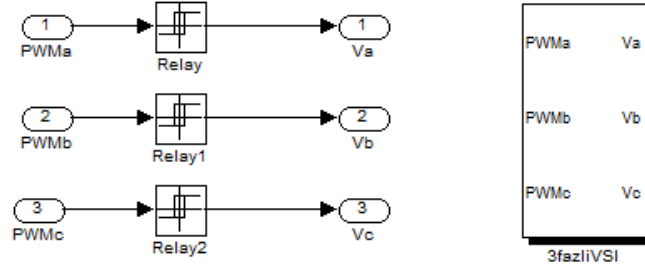
SMSM'nin AYK'sına ilişkin benzetim çalışmaları Matlab/Simulink'te yapılmıştır. Bu benzetimde ilk olarak daha önce verilen SMSM'nin matematiksel modeline ilişkin denklemler kullanılarak benzetimi yapılmıştır. SMSM'nin Matlab/Simulink benzetim bloğunun içeriği Şekil 4'te verilmiştir. Gerilim kaynaklı inverterin kontrolünde kullanılan uzay vektör DGM tekniğinin benzetim bloğunun içeriği Şekil 5'te verilmiştir. Şekil 6'da ise SMSM'nin kontrolünde kullanılan gerilim kaynaklı inverterin Matlab/Simulink benzetim bloğunun içeriği verilmiştir.



Şekil 4. SMSM Matlab/Simulink benzetim bloğunun içeriği  
(Figure 4. The content of PMSM Matlab/Simulink simulation block)

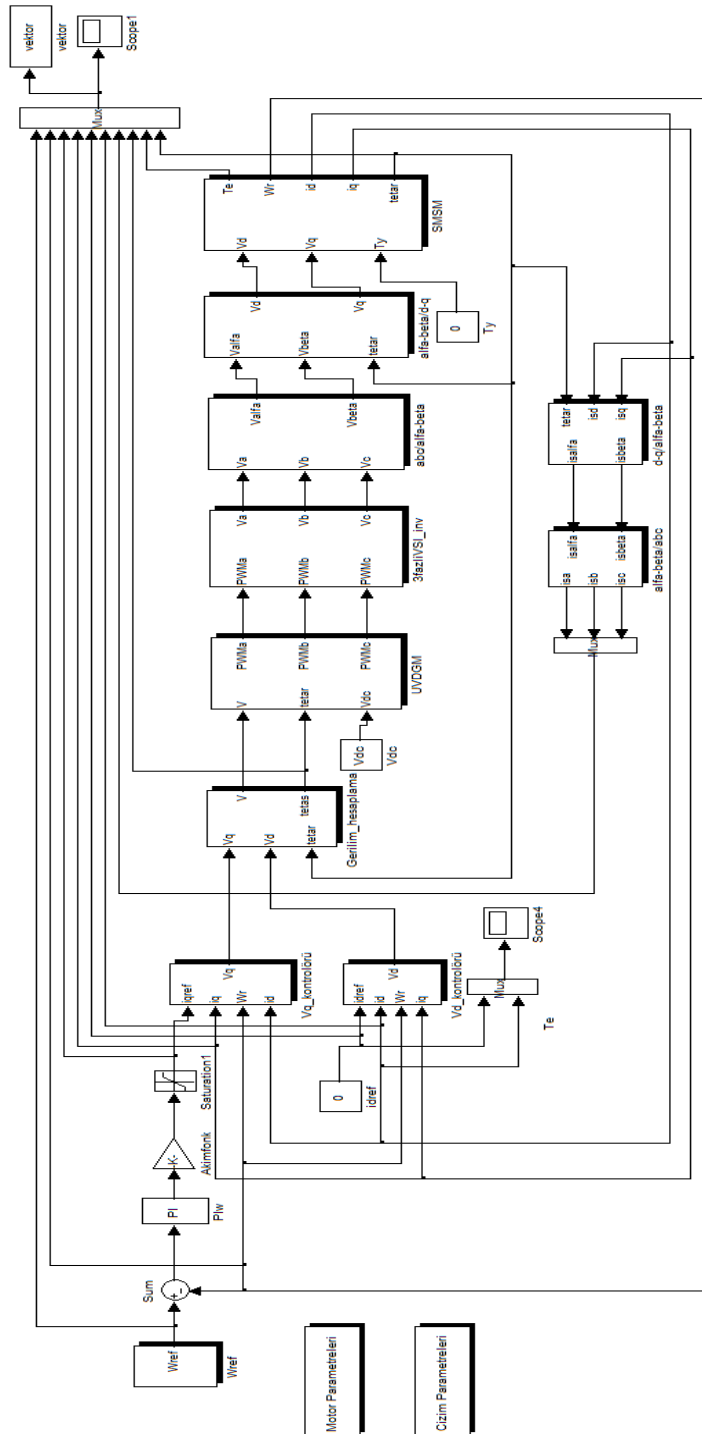


Şekil 5. Uzak vektör DGM Matlab/Simulink benzetim bloğunun içeriği  
(Figure 5. The content of space vector PWM Matlab/Simulink simulation block)



Şekil 6. 3 fazlı gerilim kaynaklı inverter Matlab/Simulink benzetim bloğunun içeriği  
(Figure 6. The content of 3 phase voltage supplied inverter Matlab/Simulink simulation block)

Bu blokların birleştirilmesi sonucunda oluşan SMSM'nin AYK'sına ilişkin Matlab/Simulink benzetimi Şekil 7'de verilmiştir. Bu benzetimde ilk olarak motor modelinden elde edilen akım değerleri ile referans akım değerleri karşılaştırılarak elde edilen hata değerleri PI kontrolörlerine uygulanmaktadır. PI kontrolörlerinin bulunduğu bloklarda AYK'da tam olarak d ve q eksenini arasındaki ayrışımın sağlanması için gereken düzeltme faktörleri de eklenerek  $V_d$  ve  $V_q$  gerilim değerleri elde edilmektedir. Bunlara göre belirlenen referans gerilim ise uzay vektör DGM işaretlerinin üretildiği benzetim bloğuna girilmektedir. Bu blokta üretilen sürme işaretleri gerilim kaynaklı inverter bloğu vasıtasıyla motora uygulanmaktadır. Böylece SMSM'nin AYK'sı gerçekleştirilmektedir.

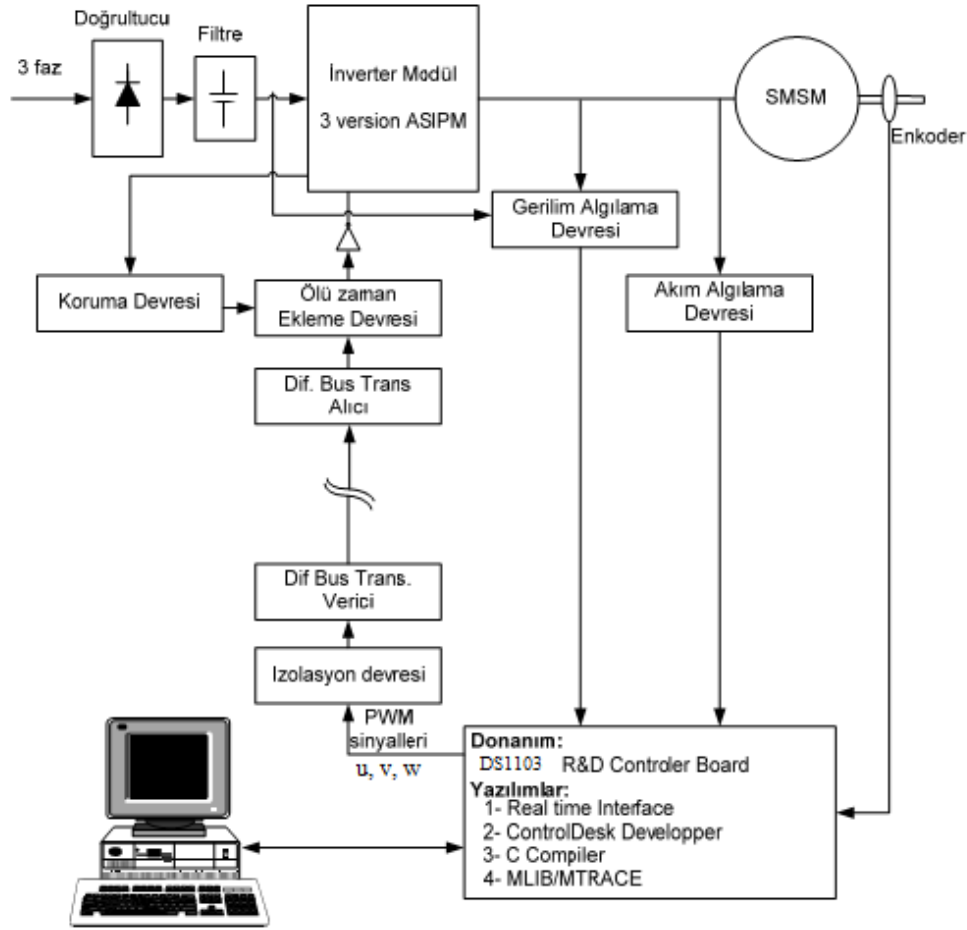


Şekil 7. SMSM'nin AYK Matlab/Simulink benzetimi  
 (Figure 7. Matlab/Simulink simulation FOC of PMSM)

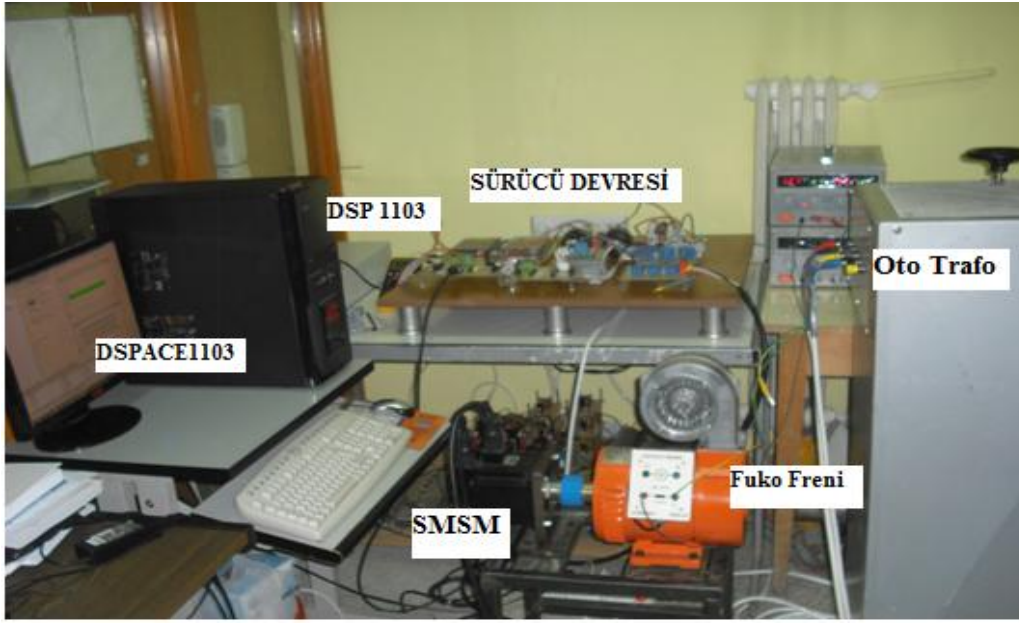


## 6. SMSM'İN ALAN YÖNLENDİRMELİ KONTROLÜNÜN DENEYSEL UYGULAMASI (EXPERIMENTAL APPLICATION OF FIELD ORIENTED CONTROL OF PMSM)

SMSM'nin AYK'sına ilişkin deneysel uygulamaların gerçekleştirildiği deneysel sürücü sisteme ait blok diyagramı Şekil 8'de, fotoğraf ise Şekil 9'da verilmiştir. Sürücü devresinde motorun sürülmesinde Mitsubishi firmasının üretmiş olduğu PS22056 Application Specific Intelligent Power Module (ASIPM) inverter modülü kullanılmıştır. Sistemde denetleyici kart olarak ise DSPACE firması tarafından üretilen DS1103 Ace kit kullanılmıştır.

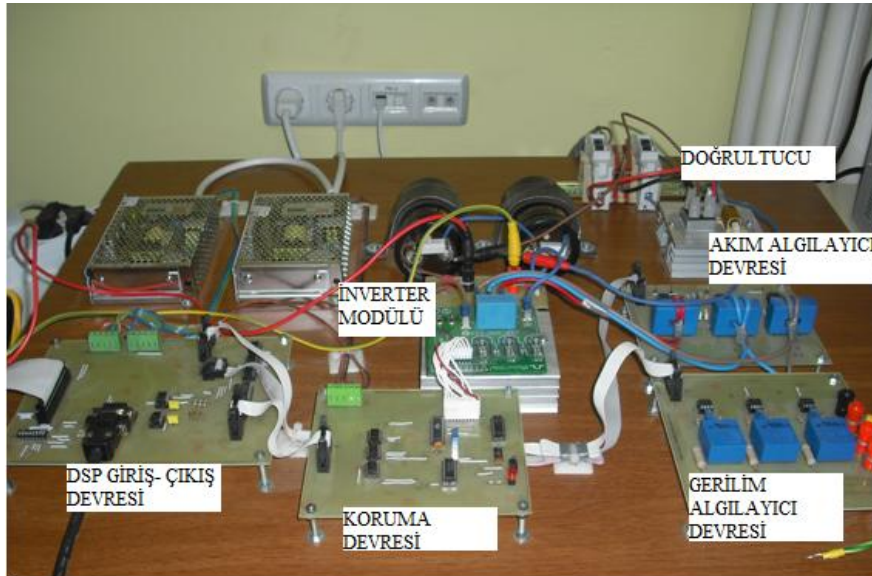


Şekil 8. Deneysel sürücü sistemin blok diyagramı  
(Figure 8. Block diagram of experimental driver system)



Şekil 9. Deneysel sürücü sistem  
(Figure 9. The experimental driver system)

Şekil 9'da görüldüğü gibi deneysel sürücü sistem, gerilim kaynaklı inverterin DA giriş gerilimini elde etmek için kullanılan oto trafo, Şekil 10'da fotoğrafı verilen sürme ve kontrol işaretlerinin ölçümü ve motora uygulanması için kullanılan sürücü devre, sistemin Matlab/Simulink'te oluşturulan modelinin DSP'ye yüklenmesi ve sistemin gerçek zamanlı kontrolü için kullanılan dsPACE 1103 arayüzü, TMS320F240 DSP işlemcisinin bulunduğu denetleyici kart, SMSM ve SMSM'yi yüklemek için kullanılan fuko freninden oluşmaktadır. Bu deneysel sürücü sistem ile SMSM'nin farklı kontrol yöntemleri ile değişken hız ve yük durumları için hem geçici hem de sürekli duruma ilişkin dinamik davranışının izlenmesi ve kaydedilmesi mümkün olmaktadır.



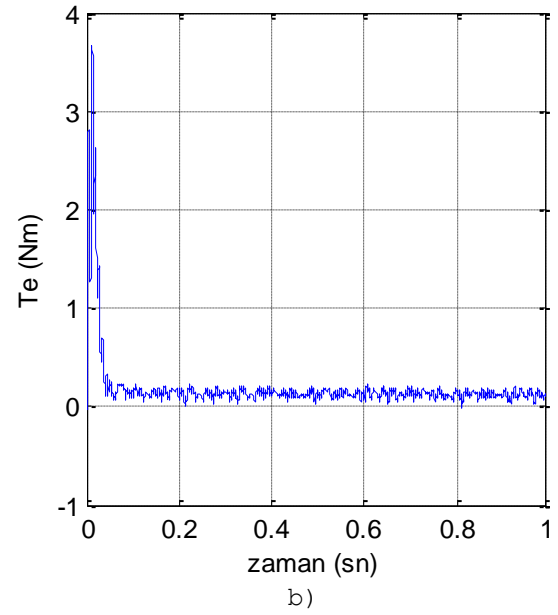
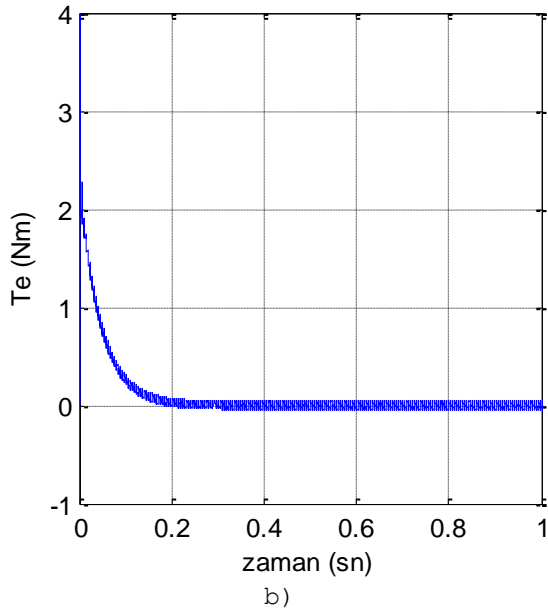
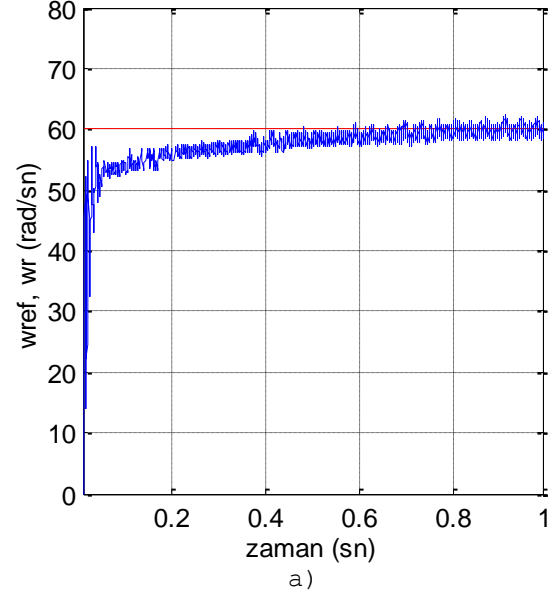
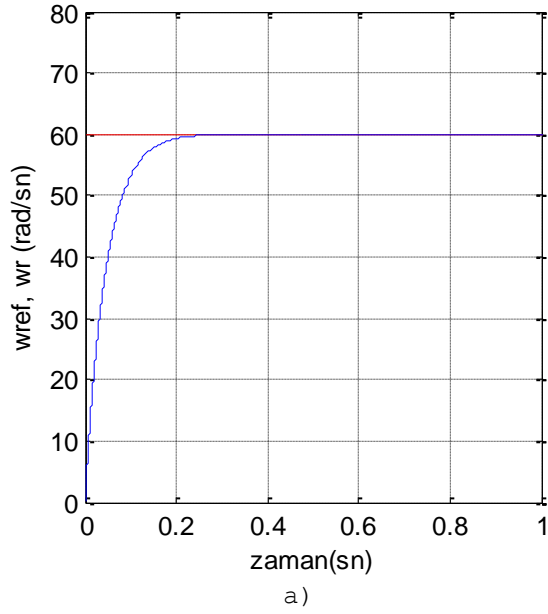
Şekil 10. Sürücü devresi  
(Figure 10. The driver circuit)

Deneysel çalışmalarda SMSM'nin hız ölçümü için motor miline akuple edilmiş olan ve 1 turda 2500 darbe üreten artımsal enkoder kullanılmaktadır.

#### **7. BENZETİM VE DENEYSEL ÇALIŞMALARDAN ELDE EDİLEN SONUÇLAR (THE RESULTS OBTAINED FROM SIMULATION AND EXPERIMENTAL STUDIES)**

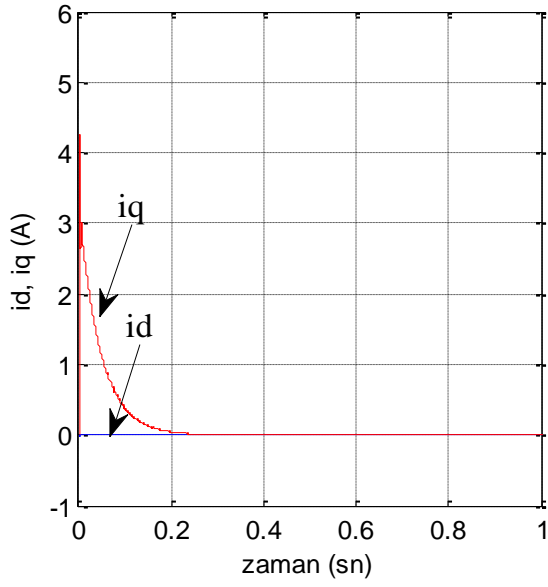
Benzetim ve deneysel çalışmalarda EK'de parametreleri verilen, Delta firmasının üretmiş olduğu ECMA serisi 1.5 kW gücündeki SMSM kullanılmıştır. Çalışmalarda gerilim kaynaklı inverterin DA giriş gerilimi olan  $V_{dc}$  75 V, anahtarlama frekansı  $f_s$  5 kHz olarak seçilmiştir. Kullanılan PI kontrolörlerinin katsayıları sistem modelinden hareketle Kök Yer Eğrisinden belirlenmiştir. Hızı süzmek için kesim frekansı 200 Hz olan alçak geçiren süzgeç, moment kontrolünde kullanılan akımları süzmek için ise kesim frekansı 1500 Hz olan alçak geçiren süzgeç kullanılmıştır. Ayrıca Matlab/Simulink'te yapılan benzetim çalışmalarında çalışma adımı  $10^{-5}$  alınmıştır. Benzetim ve deneysel çalışmalar değişken hız ve moment değerleri için yapılmıştır. Böylece geniş bir hız aralığında hem geçici durumda hem de sürekli durumda AYK'nın SMSM'nin performansına olan etkisi incelenmiştir. Çalışmalarda SMSM'ye elektriksel hız değeri referans hız olarak girilmektedir.

Şekil 11-16'da 60 rad/s referans hız ve yüksüz durum için SMSM'nin AYK'sına ait benzetim ve deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde AYK'nın teorisinde belirtildiği gibi  $i_d$  akımının sürekli sıfır olduğu  $i_q$  akımının momentle doğrusal değiştiği ve SMSM'nin hızının kısa sürede referans hızı yakaladığı görülmektedir. Deneysel sistemde sistemi yüklemek için kullanılan fuko freninin rotoru, yüksüz durumda küçük bir yük momenti oluşturduğundan, deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlarda yüksüz durumda olmasına rağmen SMSM'nin küçük bir akım çektiği görülmektedir. Bunun dışında benzetim ve deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçların büyük ölçüde benzer olduğu görülmektedir.

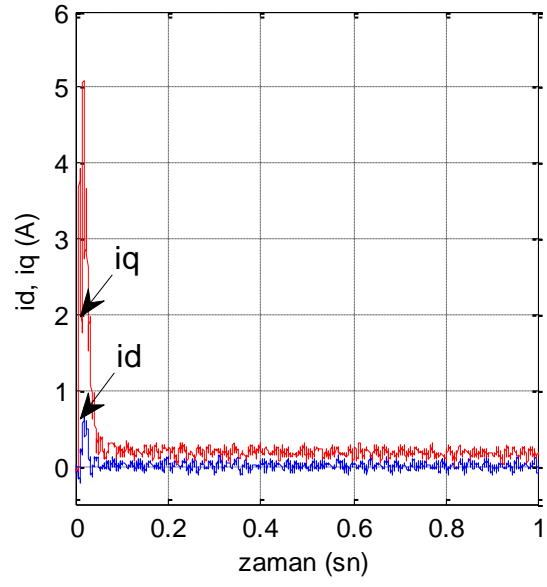


Şekil 11. 60 rad/s'lik referans hız ve yüksüz durum için benzetim sonuçları a) hız, b) moment (Figure 11. Simulation results for a reference speed of 60 rad/s and no-load a) speed b) torque)

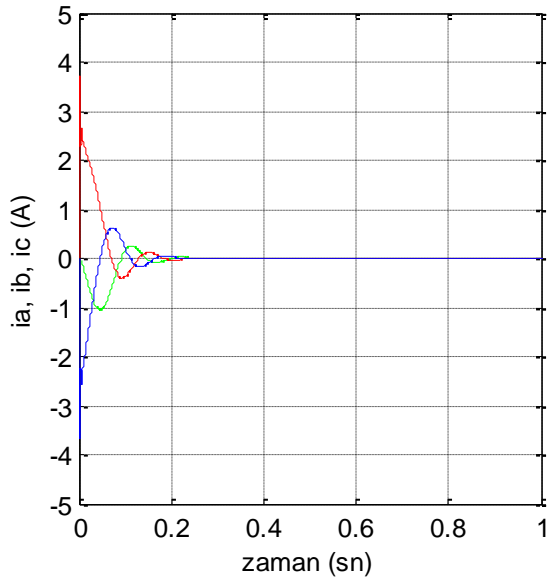
Şekil 12. 60 rad/s'lik referans hız ve yüksüz durum için deneysel sonuçlar a) hız, b) moment (Figure 12. Experimental results for a reference speed of 60 rad/s and no-load a) speed b) torque)



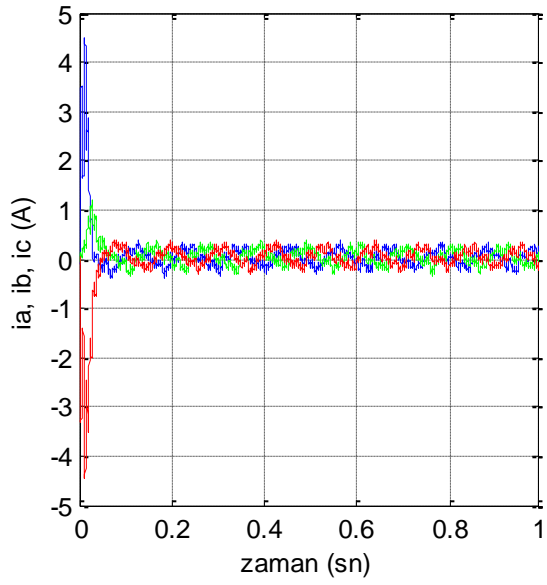
a)



a)



b)



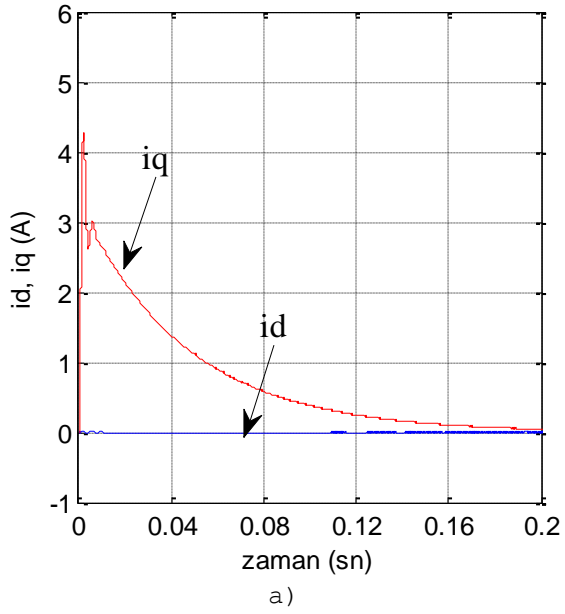
b)

Şekil 13. 60 rad/s'lik referans hız ve yüksüz durum için benzetim sonuçları a) d-q eksen akımları, b) üç faz stator akımları

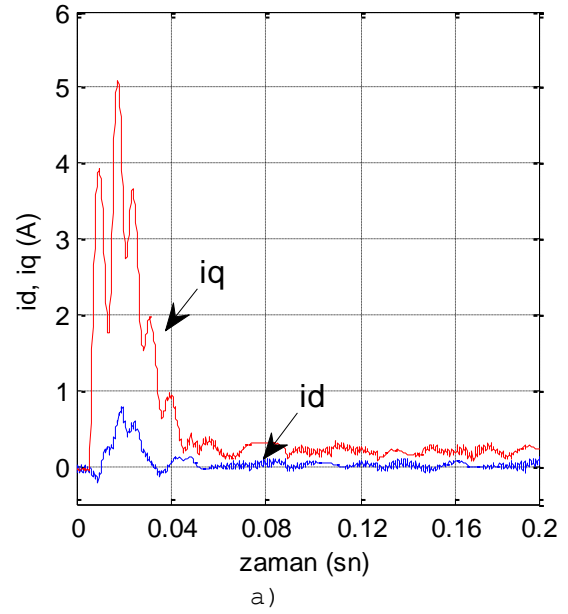
(Figure 13. Simulation results for a reference speed of 60 rad/s and no-load a) d-q axes currents b) three phase stator currents)

Şekil 14. 60 rad/s'lik referans hız ve yüksüz durum için deneysel sonuçlar a) d-q eksen akımları, b) üç faz stator akımları

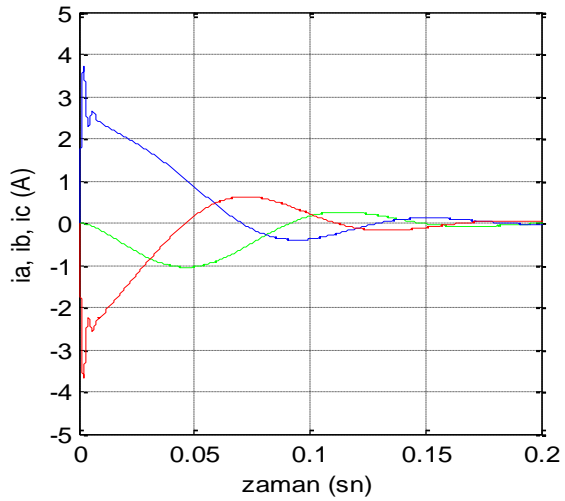
(Figure 14. Experimental results for a reference speed of 60 rad/s and no-load a) d-q axes currents b) three phase stator currents)



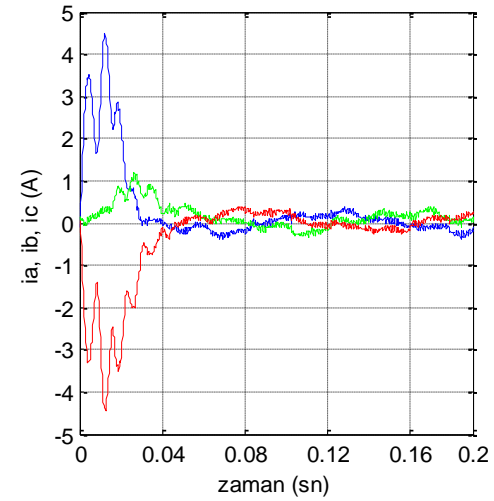
a)



a)



b)



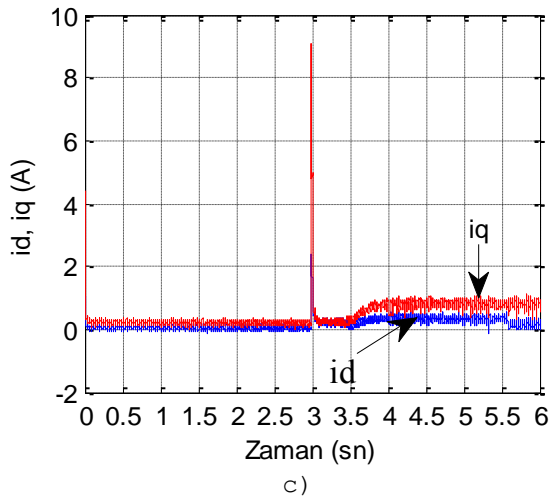
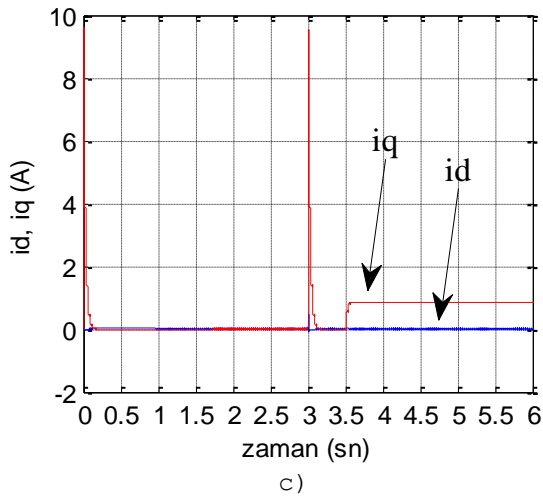
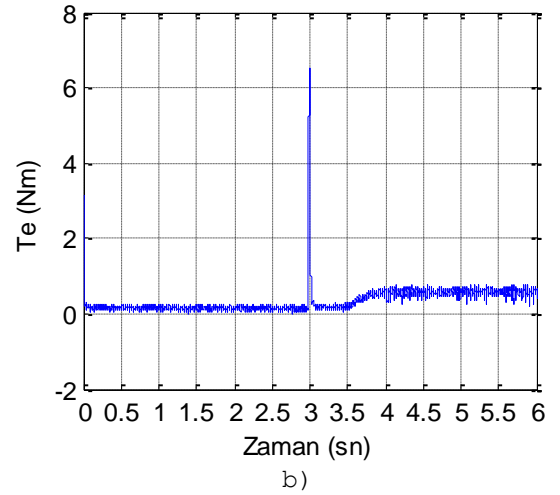
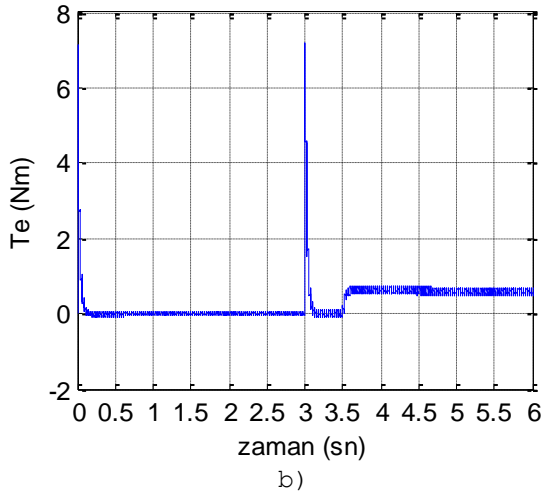
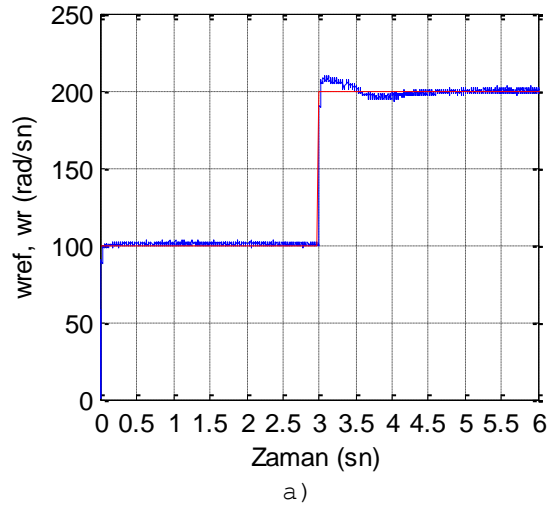
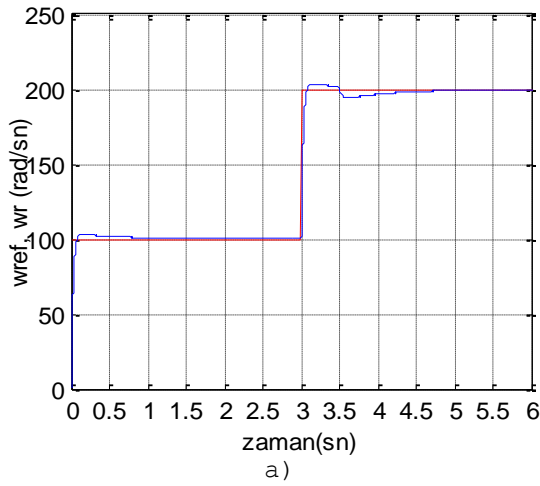
b)

Şekil 15. 60 rad/s'lik referans hız ve yüksüz durumda başlangıç anı için benzetim sonuçları a) d-q eksen akımları, b) üç faz stator akımları

(Figure 15. Simulation results at the start point for a reference speed of 60 rad/s and no-load a) d-q axes currents b) three phase stator currents)

Şekil 16. 60 rad/s'lik referans hız ve yüksüz durumda başlangıç anı için deneysel sonuçlar a) d-q eksen akımları, b) üç faz stator akımları

(Figure 16. Experimental results at the start point for a reference speed of 60 rad/s and no-load a) d-q axes currents b) three phase stator currents)

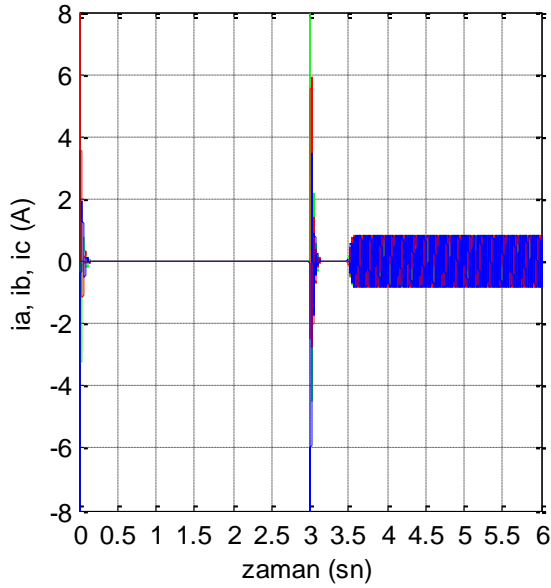


Şekil 17. Referans hızın, 100 rad/s'den 200 rad/s'ye gitmesi durumunda,  $T_y=0.6$  Nm yük için benzetim sonuçları a) hız, b) moment, c) d-q eksen akımları  
(Figure 17. Simulation results for the case that reference speed increases from 100 rad/s to 200 rad/s

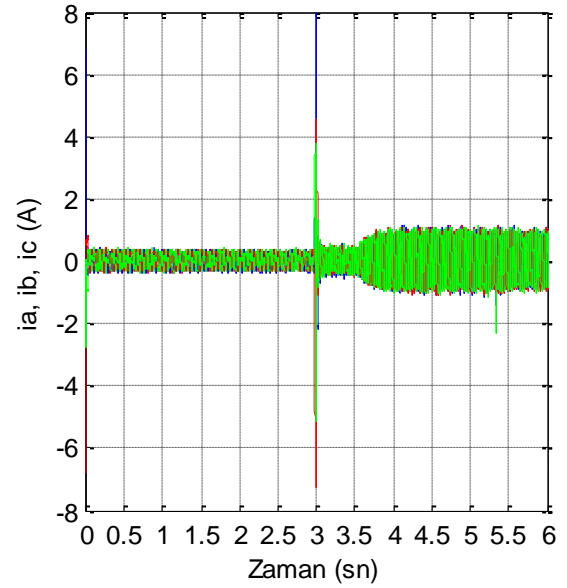
Şekil 18. Referans hızın, 100 rad/s'den 200 rad/s'ye gitmesi durumunda,  $T_y=0.6$  Nm yük için deneysel sonuçlar a) hız, b) moment, c) d-q eksen akımları  
(Figure 18. Experimental results for the case that reference speed increases from 100 rad/s to 200 rad/s

and  $T_y=0.6$  Nm load a) speed b) torque  
c)d-q axes currents)

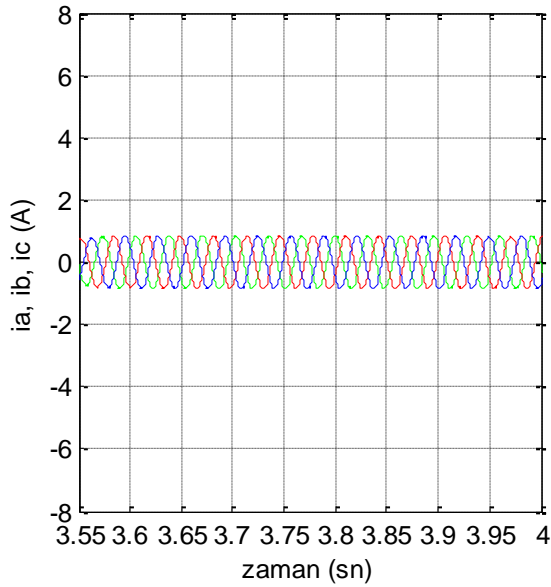
and  $T_y=0.6$  Nm load a) speed b) torque  
c)d-q axes currents)



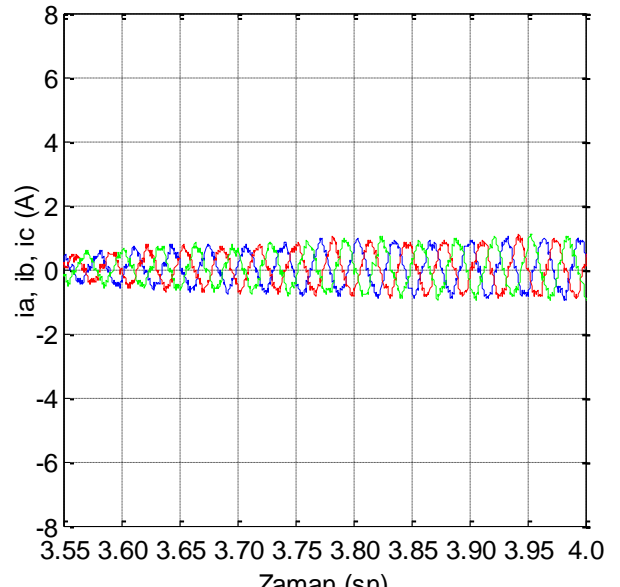
a)



a)



b)



b)

Şekil 19. Referans hızın, 100 rad/s'den 200 rad/s'ye gitmesi durumunda,  $T_y=0.6$  Nm yük için benzetim sonuçları a) üç fazlı stator akımları, b) yüklenme anı için üç fazlı stator akımları

(Figure 19. Simulation results for the case that reference speed increases from 100 rad/s to 200 rad/s and  $T_y=0.6$  Nm load a)three phase stator currents b)three phase currents at the loading point)

Şekil 20. Referans hızın, 100 rad/s'den 200 rad/s'ye gitmesi durumunda,  $T_y=0.6$  Nm yük için deneysel sonuçlar a) üç fazlı stator akımları, b) yüklenme anı için üç fazlı stator akımları

(Figure 20. Experimental results for the case that reference speed increases from 100 rad/s to 200 rad/s and  $T_y=0.6$  Nm load a)three phase stator currents b)three phase currents at the loading point)



Şekil 17-20'de değişken bir referans hız için SMSM'nin AYK'sına ait benzetim ve deneysel sonuçlar verilmiştir. SMSM başlangıçta yüksüz olarak çalıştırmakta ve 1.8 s sonra 0.6 Nm'lik bir yükü yüklenmektedir. Referans hız olarak ilk önce 100 rad/sn'lik bir hız verilmekte daha sonra ise 200 rad/s'ye çıkarılmaktadır. Benzetim ve deneysel sonuçlardan, SMSM'nin referans hızı iyi bir şekilde takip ettiği görülmektedir. Ayrıca 1.8 s'de 0.6 Nm ile yüklenme anında  $i_d$  akımının yaklaşık olarak sıfır olduğu ve  $i_q$  akımının ise momentle doğrusal olarak değiştiği görülmektedir. Yüklenme anında SMSM'nin hızında kısa süreli çok küçük bir düşüş olmakta ve daha sonra yine referans hız yakalanarak kararlı bir şekilde çalışılmaktadır. Yüklenme anına ait üç faz stator akımları incelendiğinde ise yükü orantılı olarak üç faz stator akımlarının da arttığı görülmektedir.

#### 8. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Son zamanlarda sürücü sistemlerde yaygın bir şekilde kullanılan SMSM'nin kontrolü için vektör kontrol yöntemlerinden bir olan AYK kullanılmaktadır. Bu çalışmada SMSM'nin AYK'sına ait Matlab/simulink ortamında benzetim çalışmaları ve laboratuvarında DS1103 ACE kit kullanılarak deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Sonuçlar incelendiğinde benzetim ve deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçların büyük oranda aynı olduğu görülmektedir. Yine benzetim ve deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre SMSM'lerin kontrolü için AYK'nın kullanılması ile sürücü sistemlerden elde edilen dinamik cevap ve performans artmaktadır. Deneysel çalışmalarda gerilim kaynaklı inverterin kontrolü için DS1103 Ace Kit'in donanımsal DGM işaretleri kullanılmıştır. Bu donanımsal DGM işaretlerinin üretilmesi ile üç fazlı stator akımların ölçülmesi arasında bir senkronizasyon sağlanmış ve böylece akımlarda oluşan ani darbeler ortadan kaldırılmıştır. Dolayısıyla SMSM'nin AYK'sına ait deneysel çalışmalarda ortaya çıkan karasız çalışma durumlarının önüne geçilmiş ve akımlardaki dalgalanmalar azaltılmıştır.

#### NOT (NOTICE) :

Bu çalışma Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (FÜBAP) tarafından 1869 nolu proje olarak desteklenen "Sabit Mıknatıslı Senkron Motorun DSP Tabanlı Doğrudan Moment Kontrolü" isimli doktora tezinden türetilmiştir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Duru, H.T. ve Demiröz, R., (2008). Doğrudan Tahrikli Asansör Sistemlerinde Kullanılan Mıknatıslı Uyartımlı Senkron Motorların Çalışma ve Boyutlandırma İlkeleri, Asansör Sempozyumu, İzmir.
2. Demirbaş, Ş., (2001). Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Konum Algılayıcısız Denetimi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
3. Nandam, P.K. and Sen, P.C., (1990). Electric Motor Drives and Control-Past, Present, and Future, IEEE Trans. Ind. Electronics, vol. 37, pp: 562-575.
4. Öksüztepe, E., (2008). Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorların Algılayıcısız Kontrolü, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
5. Bal, G., Özgenel, M.C. ve Demirbaş, Ş., (2007). Vektör Denetimli Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorun Uzay Vektör Darbe Genişliği Modülasyonu ile Performans Analizi, Politeknik Dergisi, Sayı: 1, ss:7-13.

6. Teker, A., (2008). Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Bulanık Mantık ile Hız Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
7. Er, B.H., (2007). Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorların Mekanik Algılayıcısız Konum Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
8. Kaewjinda, W. and Konghirun, M., (2007). Vector Control Drive of Permanent Magnet Motor Using Resolver Sensor, ECTI Transactions on Electrical Eng., Electronics and Communications, Vol.:5, No.1, pp: 134-138.
9. Platnic, M., (1998). Implementantation of Vector Control for PMSM Using the TMS320F240 DSP., SPRA494 Application Reports, Texas Instruments.
10. Comnac, V., Cernat, M., Moldoveanu, F., and Draghici, I., (2002). Sensorless Speed and Direct Torque Control of Surface Permanent Magnet Synchronous Machines Using an Extended Kalman Filter, IEEE 22nd Convention Electrical and Electronical Engineers, Israel.
11. Ko, J.S., Lee, J.H., Chung, S.K., and Youn, M.J., (1993). A Robust Position Control of Brushless DC Motor with Dead Beat Load Torque Observer, IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol.: 40, No: 5, pp. 512-520.
12. Sun, D., Zhu, J.G., and He, Y.K., (2003). Continuous Direct Torque Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on SVM, IEEE Sixth International Conference on electrical Machines and systems (ICEMS 2003), China.
13. Singh, B., Singh, B.P., and Dwivedi, S., (2006). DSP based implementation of fuzzy precompensated PI speed controller for vector controlled PMSM drive, in IEEE Conf. Proc. of Industrial Electronics and Applications, pp:1-6 (May).
14. Zare, J., (2008). Vector control of permanent magnet synchronous motor with surface magnet using artificial neural networks, 43rd International Universities Power Engineering Conference (UPEC 2008), 1-4 Sept., p.1-4, Italy.
15. Kaewjinda, W. and Konghirun, M., (2006). A DSP-Based vector control of PMSM servo drive using resolver sensor, Proc. IEEE TENCON, p.1-4.
16. Hasse, K., (1968). Zum Dynamischen Verhalten der Asynchronmaschine bei Betrieb mit Variable Ständerfrequenz und Ständerspannung, ETZ-A, H.4, pp:77.
17. Blaschke, F., (1971). Das Prinzip der Feldorientierung, Die Grundlage für die TRANSVEKTOR-Relung von Asynchronmaschinen, Siemens Zeitschrift, 45, pp:757.
18. Adam, A.A., (2007). Sabit Mıknatıslı Senkron Motorda Moment Dalgalanması ve Gürültünün Azaltılması, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
19. Kazan, F.A. ve Bilgin, O., (2008). Sabit Mıknatıslı Senkron Motorun Alan Yönlendirmeli Kontrolü ve Simülasyonu, Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu (ELECO 2008), Bursa.

**EK.**

**ÇALIŞMALARDA KULLANILAN SMSM'İN PARAMETRELERİ  
(PMSM PARAMETERS USED IN THE STUDIES)**

Hem benzetim hem de deneysel çalışmalarda kullanılan SMSM'ye ait parametreler aşağıda verilmiştir;

Nominal Gücü,	$P_N$	:1.5 kW
Stator Direnci,	$R_s$	:0.26 $\Omega$
Stator İndüktansı,	$L_s$	:4.01 mH
Atalet Momenti,	$J$	:0.00119 kgm <sup>2</sup>
Sürtünme Katsayısı,	$B$	:0.0000014161 Nm.s
Mıknatıs Akısı,	$\Psi_M$	:0.0946 Weber
Kutup Sayısı,	$2p$	:10