

# Doğrudan Yolvermeli Sabit Mıknatıslı Senkron Motorda Rotor Çubuk Arızasının İncelenmesi

\*<sup>1</sup>Goşenay HATİK, <sup>2</sup>Elif İNGENÇ, <sup>3</sup>Mehmet AKAR

<sup>1,2,3</sup> Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, 60250, Tokat, Türkiye

## Özet

Doğrudan Yolvermeli Sabit Mıknatıslı Senkron Motorlar (DY-SMSM) rotorlarında bulunan mıknatısların yanı sıra sincap kafes içermesi sebebiyle şebekeye direkt bağlanarak yol alabilirler. Bu motorların durağan çalışmada rotor bakır kayıpları ve mıknatıslanma akım kayıpları olmaması sebebiyle verimleri ve güç faktörleri yüksektir. Ayrıca daha düşük termal yüklenmeye maruz kalması sebebiyle pompa ve fanlar gibi sabit hızlı uygulamalarda asenkron motorlara göre tercih edilir hale gelmişlerdir. Sunulan bu çalışmada DY-SMSM' nin yol alma esnasında asenkron tork üretimini sağlayan rotor çubuklarında meydana gelen kırıkların motor yol alma performansı üzerine olan etkisi incelenmiştir. DY-SMSM Sonlu Elemanlar Yöntemiyle modellenmiş sağlam ve rotor çubuk kırığı arızası durumları için hız, tork ve akım sinyalleri izlenerek elde edilen sonuçlar grafiksel olarak sunulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Doğrudan Yolvermeli Sabit Mıknatıslı Senkron Motor, rotor çubuk arızası

## Abstract

Having squirrel cage as well as magnets in their rotors, Line Start Synchronous Motors proceed connecting to the line directly. Due to the lack of rotor copper losses and of magnetizing current losses in stationary operation, these motors are high efficiency and power factors. In addition, due to the exposure to lower thermal load, they have become preferable to induction motors in fixed speed applications like pumps and fans. In the study presented here, during the starting of Line Start Synchronous Motors, the effects of fractures that occur in rotor bars which provide asynchronous torque production are investigated on the performance of the motor. Line Start Synchronous Motors that modeled by the Finite Elements Method has been operated at full load and no-load for healthy and rotor broken bar fault and speed, torque and current signals analysis was carried out with graphical result.

**Key words:** Line Start Synchronous Motor, rotor broken bar fault

## 1. Giriş

Fosil yakıtların maliyetlerinin ve sera gazı salınımının azaltılmasına yönelik çalışmaların artması motor üreticilerini daha verimli ve daha yenilikçi teknolojiye sahip motorlar üretmeye mecbur bırakmaktadır. Türkiye'de toplam elektrik tüketiminin yaklaşık %40, sanayideki elektrik tüketiminin ise yaklaşık %70' i elektrik motorları tarafından tüketilmektedir[1]. Bu sebeple elektrik motorlarında enerji verimliliğinin artırılması oldukça önemlidir.

Doğrudan Yolvermeli Sabit Mıknatıslı Senkron Motorlar (DY-SMSM) rotor geometrisinde sabit mıknatısları ve kısa devre çubukları birlikte bulundurmaktadır. Bu hibrit tasarım ile DY-SMSM şebekeye direk bağlanarak asenkron motor gibi yol almakta, durağan çalışmada ise uyartım ve

\*Sorumlu yazar: Adres: Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, 60250, Tokat, TÜRKİYE. E-mail adres: gosenayhatik@hotmail.com

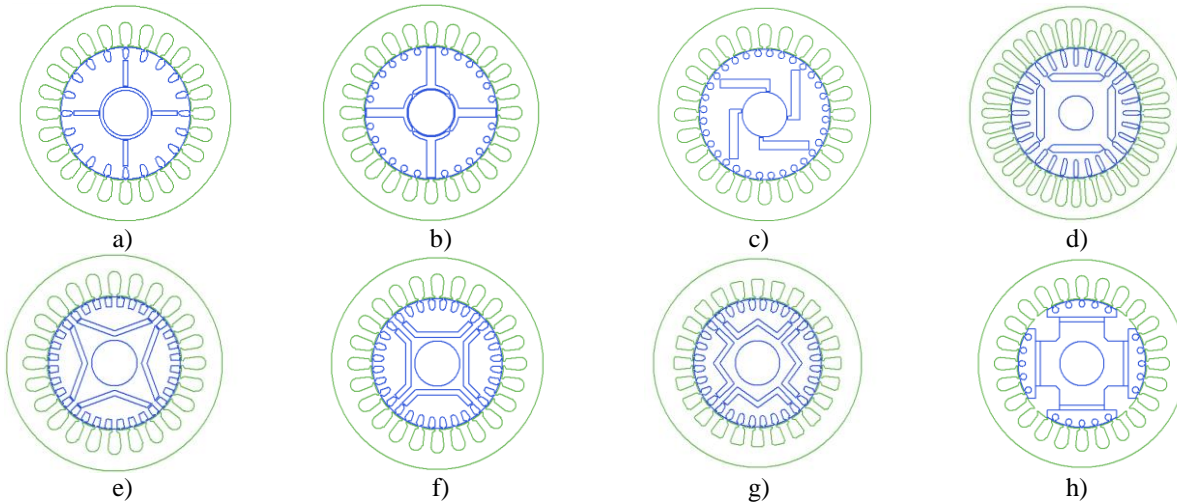
rotor bakır kayıplarının olmaması sebebiyle asenkron motorlara göre daha yüksek verime ve güç faktörüne sahip olmaktadır. Ayrıca geleneksel sabit mıknatıslı motorlar yol alma ve yüksek performans için yüksek kabiliyetli eviriciye gereksinim duyarken DY-SMSM' nin basitliği ve düşük maliyeti sabit hızlı uygulamalarda geleneksel SMSM' lere göre en önemli avantajıdır.

Direkt yol alabilen senkron motorlar için ilk çalışma 1978 yılında Binns [2] tarafından yapılmış olup daha sonra motorun dinamik ve senkron hızda performansının tespiti, motor denklemlerinin geliştirilmesi ve kalıcı durum performansının SEY ile analizine yönelik çalışmalarla devam etmiştir [3-8]. DY-SMSM' lerde stator ile rotor arasındaki hava aralığı simetrik olarak dağılmıştır. Bu motorlarda meydana gelecek herhangi bir arıza bu simetrinin bozulmasına sebep olur. Rotor çubuk arızası rotor faz dirençlerinin değişmesine ve rotor fazları arasında dengesizliğe bu ise stator ile rotor arasındaki döner elektromanyetik alandaki simetrinin bozulmasına sebep olur. Sonuç olarak bu asimetrik durum motor akımlarında ilave frekans bileşenleri, hız ve torkta salınımlar üretir.

Sunulan bu çalışmada DY-SMSM' ye şebekeye direkt bağlanabilme ve yol alabilme kabiliyeti kazandıran rotor kısa devre çubuklarında meydana gelen arızaların motor performansı üzerine olan etkisi incelenmiştir. Bu amaç doğrultusunda 2.2kW mil gücüne sahip DY-SMSM Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) ile modellenmiş yüksüz ve tam yük altında hız, tork ve akım sinyalleri sağlam ve arızalı durumlar için karşılaştırılmıştır.

## 2. Materyal ve Yöntem

DY-SMSM' ler mıknatısın rotor içerisindeki konumuna göre radyal mıknatıslanan rotor (Şekil 1a-1b), asimetrik dağıtılmış rotor (Şekil 1c) ve gömülü mıknatıslı rotor (Şekil 1d-1h) olarak isimlendirilmektedir [9].



Şekil 1. DY-SMSM için farklı rotor geometrileri

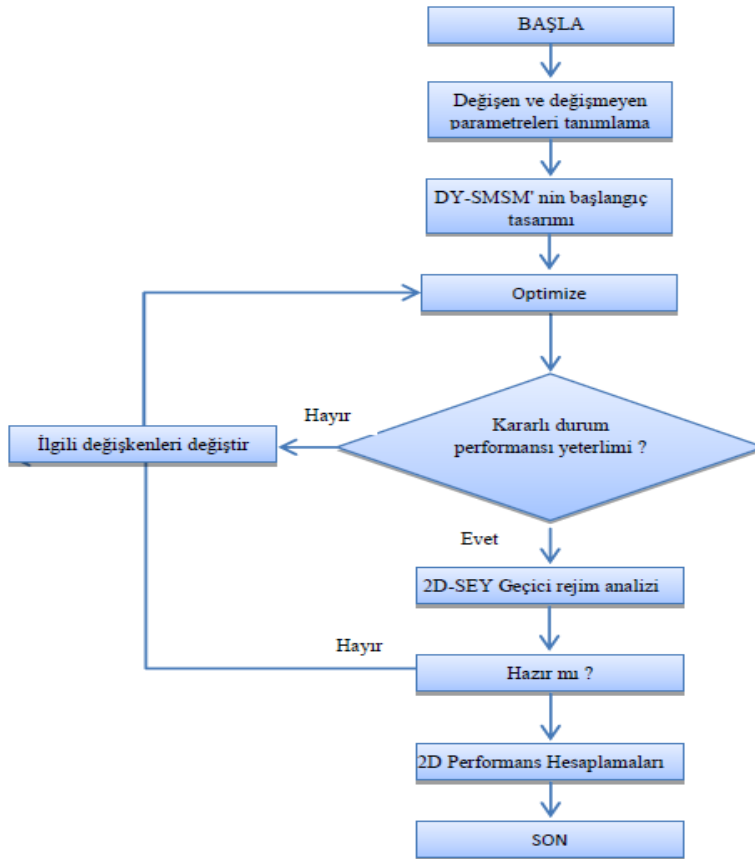
DY-SMSM' nin SEY ile analize hazır hale gelebilmesi için temel büyüklüklerin ayarlanarak gerçek sisteme en yakın şekilde modellenmesi gerekir [10]. Bu amaç doğrultusunda DY\_SMSM'

nin bazı fiziki ve elektriksel büyüklüklerinin hesaplanması veya deneysel olarak ölçülmesi gerekir. Sunulan çalışmada Şekil 1d rotor geometrisi referans alınarak modelleme ve analiz çalışması yapılmıştır. Kullanılan motora ait parametreler Tablo 1' de verilmiştir.

**Tablo 1.** DY-SMSM' nin tasarım ölçüleri

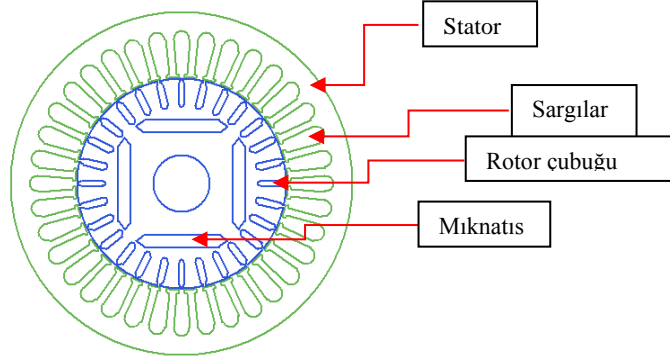
Parametreler	Stator	Rotor
Dış çap (mm)	160	97.9
İç çap (mm)	99.9	26.8
Eksenel uzunluk (mm)	121	121
İletken çapı (mm)	0.6438	-
Sargı tipi	Tam kalıp	Kafes
Bağlantı şekli	Üçgen	-
Oluk sayısı	36	28
Oluktaki iletken sayısı	82	-
Mıknatıs genişliği	-	32.97
Mıknatıs kalınlığı	-	5.7
Hava aralığı genişliği (mm)	1	

SEY ile makina performansı yüksek hassasiyetle kısa zamanda farklı durumlar için hesaplanabilir. Modelleme yapılırken Şekil 2' de verilen akış diyagramındaki işlem basamakları takip edilmiştir.



**Şekil 2:** Modelleme akış diyagramı

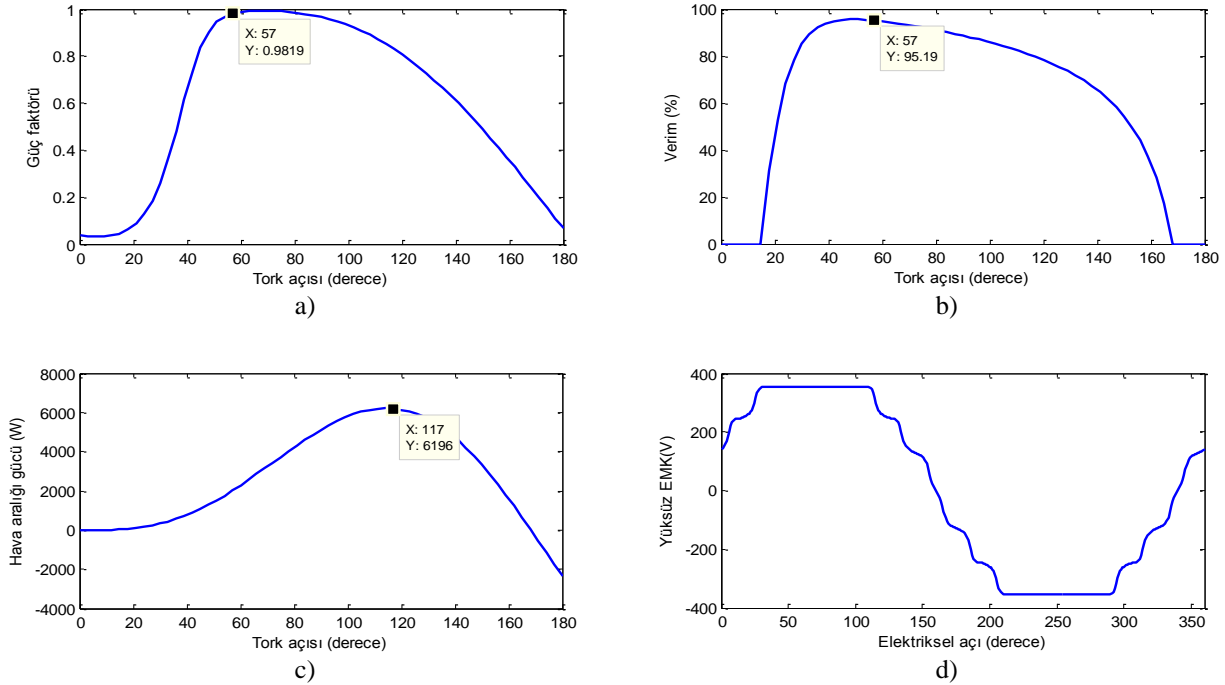
Modelleme ile elde edilen motor geometrisi ve sonuçlar kullanılarak DY-SMSM' nin SEY ile analizi gerçekleştirilebilir. Geçici durum analizinde belirlenen zaman aralıklarıyla motorun bir periyot boyunca manyetik alan, enerji, güç, kayıp hız ve akı değerlerine ulaşılabilmektedir [10]. Geçici durum analizi için kullanılan model Şekil 3' de görülmektedir.



Şekil 3: DY\_SMSM SEY modeli

### 3. Benzetim Çalışması

Modelleme sonucunda elde edilen DY-SMSM' nin kalıcı durum analizi yapıldığında çıkış gücünün 2199.01W, şebeke giriş gücünün 2310.12W, güç faktörünün 0.98, verimin %95.19, maksimum çıkış gücünün 6196W, endüklenen faz EMK' nin efektif değeri 280.26V ve indüklenen torkun 13.99Nm olduğu görülmüştür.



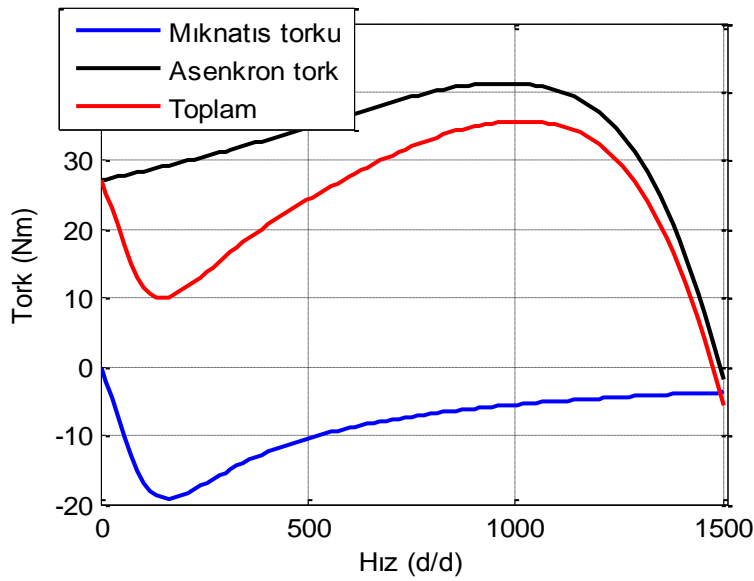
Şekil 4: DY-SMSM durağan çalışma eğrileri(a-Güç faktörü, b-Verim, c-Hava aralığı gücü, d-Yüksüz EMK)

Aynı gövdeye sahip IE2 sınıfı yüksek verimli asenkron motorlarda bu değerler sırasıyla yaklaşık 2200W, 2603W, 0.75, %84.5 ve 14.6Nm' dir. Görüldüğü gibi DY-SMSM yüksek verimli asenkron motorla ürettikleri tork değerleri hemen hemen aynı olmasına karşın verimi yaklaşık %10 daha fazladır.

DY-SMSM' de ilk kalkış anında mıknatıslar tarafından üretilen tork motor eşdeğer devre parametrelerine bağlı olarak değişir ve frenleme etkisi yaparak rotor çubukları tarafından üretilen asenkron torku zayıflatır.

$$T_{mıknatıs} = \frac{3pR_s(1-s)^2 E_0^2}{2w_s(1-s)} \frac{R_s^2 + X_{qs}^2(1-s)^2}{(R_s^2 + X_{qs}X_{ds}(1-s)^2)^2} \quad (1)$$

Eşitlikte verilen  $p$  kutup sayısını,  $R_s$  stator sargı iç direncini,  $s$  kaymayı,  $E_0$  senkron hızda endüklenen gerilimi,  $X_{qs}$  stator q eksenli reaktansını,  $X_{ds}$  stator d eksenli reaktansını,  $w_s$  elektriksel senkron hızı temsil etmektedir.



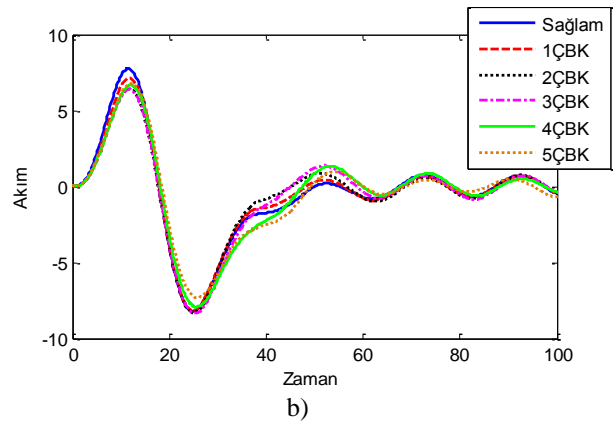
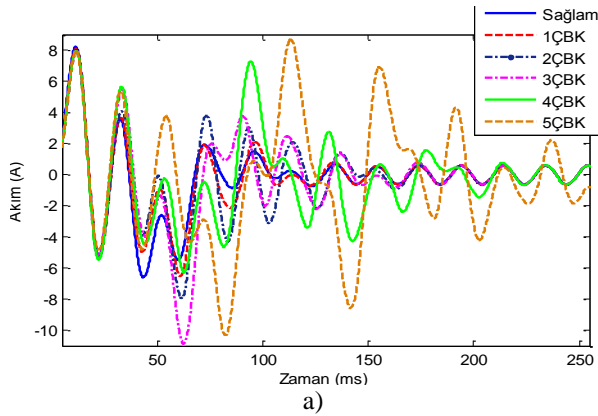
Şekil 5: DY-SMSM hız tork eğrileri

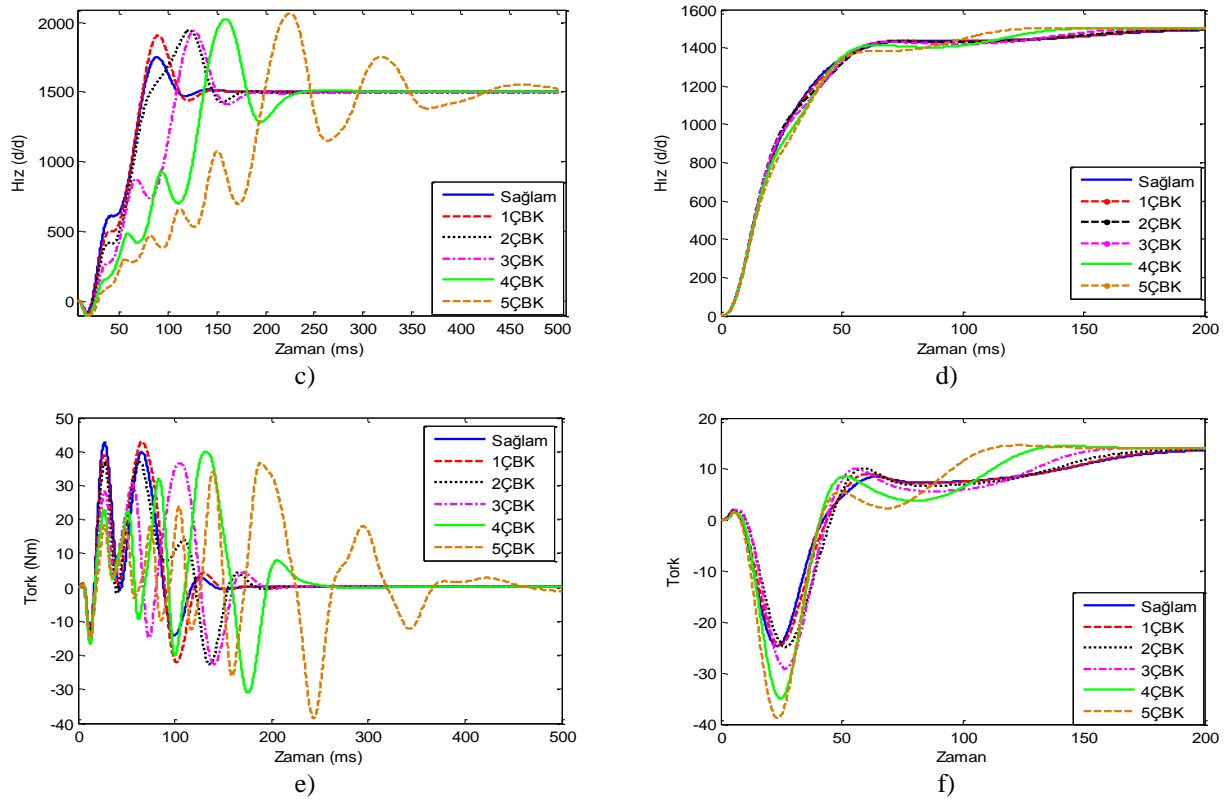
Eşitlikte görüldüğü gibi mıknatıslar tarafından üretilen frenleme torku endüklenen gerilimin karesi ile doğru orantılıdır. DY-SMSM' de mıknatıs hacmin seçimi oldukça önemlidir. Çünkü büyük seçilmesi endüklenen emk' yı artırır, çekilen hat akımını düşürür, rotorun termal yükünü azaltır, güç faktörünü yükseltirken şebekeden çekilen giriş gücünü düşürür ve motorun maksimum çıkış gücünü artırır. Ancak mıknatıs hacminin büyümesi ürettiği fren torkunu artırarak toplam torku ve tork açısını azaltır. Ayrıca kalkış anında toplam torkta oluşan çökme momenti iyi ayarlanamazsa motorun yük altında yol almasında olumsuz etki oluşturabilir. Modellenen DY\_SMSM' nin rotor çubukları ve mıknatıslar tarafından üretilen tork ile toplam torkun hıza göre değişimi Şekil 5' de verilmiştir.

DY-SMSM' de meydana gelecek rotor çubuk kırığı arızası ile rotor eşdeğer devresindeki direnç azalacak, çekilen hat akımı ve dolayısıyla rotor termal yükü artacak, rotor bakır kayıpları yükselecek, güç faktörü azalırken motor giriş gücü artacaktır. Ayrıca rotor çubuk arızası motorun üreteceği maksimum gücü azaltırken tork açısını yükseltecektir. Akım artışı motor sıcaklığını artıracığından mıknatıslarda demagnetizasyon arızasını da tetikleyecektir. Bu sebeple bu arızanın başlangıç safhalarında tespiti hem motor hem de birlikte çalıştığı diğer ekipmanlar için oldukça önemlidir. Sağlam DY-SMSM' de toplam 28 adet rotor çubuğu bulunmaktadır. Rotor çubuk arızası, 1çubuk kırık (1ÇBK), 2 çubuk kırık (2ÇBK), 3 çubuk kırık (3ÇBK), 4 çubuk kırık (4ÇBK) ve 5 çubuk kırık (5ÇBK) olacak şekilde SEY ile oluşturulan modelde rotor çubuklarının modelden silinmesi ile oluşturulmuştur. Analizler sağlam ve her bir arıza durumları için yüksüz ve tam yük altında durağan ve dinamik çalışma şartlarında tekrarlanmıştır. Geçici durum analizi 0.0002 sn adım aralıklarıyla 0.5 sn boyunca gerçekleştirilmiştir.

Durağan çalışmada beklenildiği gibi hem yüksüz hem de tam yük altında sağlam ve arızalı durumlar için akım, hız ve tork eğrilerinde arızadan kaynaklanan bir sapma görülmemiştir. Çünkü DY-SMSM senkronlandıktan sonra rotor çubukları stator manyetik akısı tarafından kesilmediğinden rotorda herhangi bir gerilim indüklenmemekte ve sonuç olarak rotor akımı ve manyetik akısı da sıfır olmaktadır. Rotor çubuklarından akan akım veya akı sıfır ise rotor çubuklarında üretilen asenkron tork ta sıfırdır.

Dinamik çalışma için yüksüz ve tam yük altında elde edilen grafikler Şekil 6' da sunulmuştur. Eğriler incelendiğinde yüksüz çalışmada akım, hız ve torktaki salınımların arızanın artışı ile doğru orantılı olarak arttığı, motorun senkron hıza sağlam çalışmada yaklaşık 150ms' de ulaştığı halde 5ÇBK durumu için senkron hıza 500ms' de ulaştığı görülmektedir. Yüksüz çalışmada hızda meydana gelen salınımlar tork eğrisini de etkilemekte elektromanyetik momentte pozitif ve negatif yönde aşmalar oluşturmaktadır.





Şekil 6: DY-SMSM dinamik çalışma eğrileri(a-Yüksüz akım, b-Tam yükte akım, c-Yüksüz hız, d-Tam yükte hız, e-Yüksüz tork, f-Tam yükte tork)

DY-SMSM' nin tam yükte çalışması durumunda ise; akım ve hız sinyallerinde arıza ile birlikte küçük salınımlar olsa da etkisinin çok fazla olmadığı görülmektedir. Ancak tork eğrisinde de açıkça görüleceği üzere rotor çubuk kırık arızasının artışı ile kalkış anında negatif yönde oluşan torkun tepe değerinin -25Nm' den -40 Nm' ye değiştiği ve motor senkronlanana kadar salınım torkunun devam ettiği görülmektedir.

## Sonuçlar

Sunulan bu çalışmada DY-SMSM' de rotor çubuk arızasının motor performansına olan etkisi incelenmiştir. Durağan çalışmada arızanın motor performansı üzerine olumsuz bir etkisi olmazken dinamik çalışmada motor akım, hız ve tork eğrilerinde arıza ile birlikte salınımların ortaya çıktığı özellikle yüksüz çalışmada daha net görülmektedir. Rotor çubuklarındaki arıza sebebiyle hava aralığındaki simetrisinin bozulması üretilen asenkron torkta salınımlar oluşturmaktadır. Bu durum motorun ürettiği toplam torku etkilemekte motorun senkronlanmasını geciktirmektedir.

**Kaynaklar**

- [1] [http://www.eie.gov.tr/verimlilik/document/Elektrik\\_Motorlari.pdf](http://www.eie.gov.tr/verimlilik/document/Elektrik_Motorlari.pdf)
- [2] Binns KJ, Barnard WR and Jabbar MA. Hybrid Permanent-magnet Synchronous Motors. Proc Inst Elect Eng 1978;125:203-208.
- [3] Honsinger VB. Permanent Magnet Machines: Asynchronous Operation. IEEE Trans Power App Syst 1980; 99:1503-1509.
- [4] Honsinger VB. Performance of Polyphase Permanent Magnet Machines. IEEE Trans Power App Syst 1980; 99:510-1518.
- [5] Binns KJ and Jabbar MA. High field Self-starting Permanent Magnet Synchronous Motor. Proc Inst Elect Eng 1981; 128:157-160.
- [6] Shimmin DW, Wang J, Bennett N and Binns KJ. Modeling and Stability Analysis of a Permanent-magnet Synchronous Machine Taking into Account the Effect of Cage Bars . Proc IEEE Elect Power Applications 1995; 142: 37-144.
- [7] Kurihara K, Wakui G and Kubota T. Steady-state Performance Analysis of Permanent Magnet Synchronous Motors Including Space Harmonics. IEEE Trans Magnetics 1994;30: 1306-1315.
- [8] Williamson S and Knight AM. Performance of Skewed Single Phase Line-start Permanent Magnet Motors. IEEE Trans Industry Applications 1999; 35; 577-582.
- [9] Tarımer İ. Investigation of the Effects of Rotor Pole Geometry and Permanent Magnet to Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor's Efficiency. Electronics and Electrical Engineering 2009; 2:67-72.
- [10] Akar M, Fenerciođlu A ve Soyaslan M. Asenkron Motorlarda Rotor Çubuğu Kırık Arızasının Elektromanyetik Tork ile Tespiti. İATS'11, Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu. 2011;142-146.