



Design of a permanent magnet synchronous motor used in elevators

Lale Tükenmez Ergene*¹, Abdullah Polat¹, Hosein Bakhtiarzadeh²

¹İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, 34469, İstanbul, Türkiye

²Metroplast Asansör, Iran

Highlights:

- Analysis of permanent magnet synchronous motors in different structures used in elevator applications
- Analytical calculation, analysis with finite element method and production process, consistency with the test results
- Making a new design with increased efficiency, decreased the size, volume and weight of the motor

Graphical/Tabular Abstract

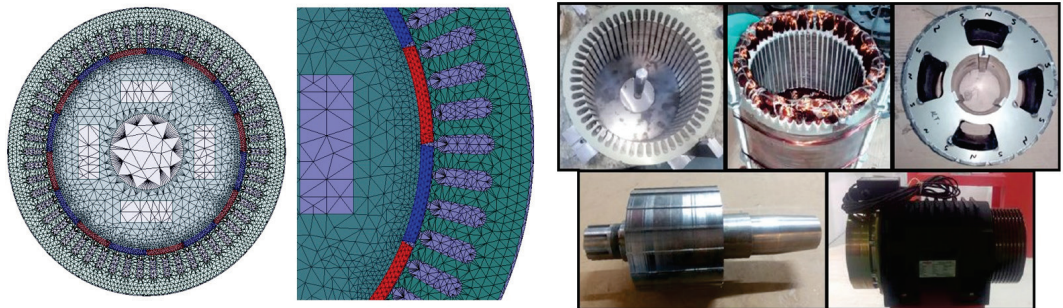


Figure 1. The mesh structure and production process of the new motor with 54 slots

Table 1. General information for three different types PMSM

	48-slots PMSM	60-slots AKAR PMSM	54-slots New PMSM
Length of the motor [mm]	150	150	120
Total volume [m ³]	0,008576	0,006899	0,006469
Total weight [kg]	79	108,29	80,56
Efficiency [%]	58	74	77,27

Keywords:

- Elevator applications
- Permanent magnet synchronous motor
- Permanent magnets
- Finite element method
- Analytical design

Purpose: The objective was to design a new PMSM having increased efficiency, decreased length and weight compare to those of the reference motor.

Article Info:

Received: 18.10.2017

Accepted: 19.12.2017

Theory and Methods:

The motors are simulated by using a commercial software (ANSYS Maxwell) that is based on the coherency between the test and simulation results are evaluated in terms of their current, torque and efficiency. Finally, the new improved motor is designed by considering the drawbacks of the previous designs.

DOI:

10.17341/gazimmfd.416529

Results:

The motor having the integral winding has 58% efficiency and a high oscillating torque because of its high frequency harmonics. The proposed design shows better performance in terms of the followings:

Acknowledgement:

- Total weight of the motor is reduced by 25 %
- Total volume is reduced by 5%
- Efficiency is increased by 4%
- Manufacturing process is also improved because of using the less number of the stator slots
- Stack length of the motor is reduced by 20%

Correspondence:

Author: Lale T. Ergene
e-mail: ergene@itu.edu.tr
phone: +90 532 337 9767

The cost analysis is also given in the paper and the total cost is not increased. The stack length is critical for the elevator applications. So the motor having 54 slots and shortened stack length is proposed with the same cost.



Conclusion:

In this study, three different types of PMSMs are modeled and analyzed for an elevator with a cabin speed of 1 m / s and a capacity of eight people with a 2: 1 suspension system. The industrial type AKAR model PMSM is simulated and tested. The coherency between the simulation and test results is satisfied. The next PMSM having 48 stator slots with the integral winding is designed analytically and simulated by using FEM.

The overall results are evaluated in terms of application needs and motor performance to design a better motor. The proposed PMSM design having 54 stator slot with short-pitched winding is simulated and prototyped. The simulation and test results show that the new motor is more suitable for the application with the increased efficiency and reduced volume/weight.



Asansör uygulamalarında kullanılan daimi mıknatıslı senkron motor tasarımı

Lale Tükenmez Ergene*¹ , Abdullah Polat¹ , Hosein Bakhtiarzadeh² 

¹İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, 34469, İstanbul, Türkiye

²Metroplast Asansör, Iran

Ö N E Ç I K A N L A R

- Asansör uygulamalarında kullanılan farklı yapılarda daimi mıknatıslı senkron motorların analizi
- Analitik hesaplama, sonlu elemanlar yöntemi ile analiz, üretim süreci ve test sonuçları ile tutarlılık
- Verimliliğin arttığı, motor boyunun, hacminin ve ağırlığının azaldığı yeni bir tasarımın yapılması

Makale Bilgileri

Geliş: 18.10.2017

Kabul: 19.12.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.416529

Anahtar Kelimeler:

Asansör uygulamaları,
daimi mıknatıslı senkron
motorlar,
daimi mıknatıslar,
sonlu elemanlar yöntemi,
analitik tasarım

ÖZET

Bu çalışmada asansör uygulamalarında kullanılan düşük hızlı ve yüksek momentli daimi mıknatıslı senkron motorlar (DMSM) incelenmiştir. Analitik hesaplamalar, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak aynı uygulama için daha iyi motor tasarım önerileri sunulmuştur. Saniyede bir metre hızla çalışan sekiz kişilik bir asansör için öncelikle piyasada kullanılan 60 oluklu 16 kutuplu bir motor benzetim ve test sonuçları incelenmiştir. Ardından sırasıyla 48 oluklu ve 54 oluklu motorların benzetimleri gerçekleştirilmiştir. Akım, gerilim, harmonik bileşenler, moment ve verim karakteristikleri açısından farklı yapılardaki motorlar incelenmiştir. Bu sonuçlar doğrultusunda, asansör uygulamaları için ilgili standartlar göz önünde bulundurularak ve maliyet düşünülerek en uygun görülen motor üretilmiştir. Önerilen 54 oluklu yapının, gerek benzetim gerekse test sonuçları göz önüne alındığında; daha iyi mıknatıslı kullanılması durumunda dahi, motor boyutları ve toplam ağırlık azaldığı için toplam maliyeti arttırmadan, verimi arttırdığı gözlenmiştir. Ayrıca yeni tasarım, asansör uygulamalarında önemli olan motor boyunu %20 oranında azaltarak daha iyi performans gösteren bir motor tasarlanmış ve üretilmiştir.

Design of a permanent magnet synchronous motor used in elevators

H I G H L I G H T S

- Analysis of permanent magnet synchronous motors in different structures used in elevator applications
- Analytical calculation, analysis with finite element method and production process, consistency with the test results
- Making a new design with increased efficiency, decreased the size, volume and weight of the motor

Article Info

Received: 18.10.2017

Accepted: 19.12.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.416529

Keywords:

Elevator applications,
permanent magnet
synchronous motor,
permanent magnets,
finite element method,
analytical design

ABSTRACT

In this study, low speed and high torque permanent magnet synchronous motors (PMSM) used in elevator applications are investigated. Better motor design solutions are proposed by using the analytical calculations, the finite element method based simulations. Firstly, a permanent magnet synchronous motor having 60 slots 16 poles (already in the market) for an eight- person elevator which is operating at a speed of one meter per second is analyzed by using the simulation and experimental results. The simulations of the motors having 48 and 54 slots are performed as the next step. Different types of motors have been analyzed in terms of current, voltage, harmonic components, moment and efficiency characteristics. In the view of these results, the most suitable motor is prototyped considering the cost and the relevant standards for the elevator applications. The proposed new motor with 54 slots shows a better performance due to its simulation and test results by increased efficiency and decreased the size, volume and weight. This is valid even though better permanent magnets are preferred. In addition, the stack length of the new motor is reduced by 20% and this output is very important especially for elevator applications.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Asansörler; yükleri veya insanları, alçak veya yüksek yerlere dikey yönde aşağı indirme veya yukarıya çıkarma amacıyla kullanılan, bir platform ve kabinden meydana gelen makine düzenleridir. Asansör uygulamalarında genellikle, mekanik şanzımanlı yani dişli kutusu barındıran asenkron motorlar kullanılmaktadır. Açısal hızı istenilen hıza indirmek amaçlı kullanılan dişli kutusu sistemleri; çok düşük verim, yüksek gürültü, makine odası ihtiyacı ve sık sık şanzıman yağlanması gereksinimi gibi birçok dezavantaja sahiptir. Motor tercihi olarak bir diğer seçenek ise, güç elektroniği sistemleri ile kontrol edilen düşük hızlı uygulamalarda dişli kutusu olmaksızın kullanılabilen daimi mıknatıslı senkron motorlardır (DMSM). Fakat bu sistemin maliyetli olması ticari olarak kullanımının yaygınlaşmasının önünde bir engel teşkil etmektedir. Son yıllarda, neodyum mıknatısların fiyatlarının düşmesi ve güç elektroniği sistemlerinin geliştirilmesi ile beraber DMSM, yukarıda bahsi geçen dezavantajlara çözüm üreterek, asenkron motor için ciddi bir rakip olmuştur.

21. yüzyılda hızla artmaya devam eden yüksek yapılaşma düşünülecek olursa, asansörlerin kullanımı ve tükettikleri enerji miktarındaki artışın araştırmacıların dikkatini çekmesi kaçınılmazdır. Bu doğrultuda, asansör uygulamalarında kullanılan DMSM hakkında 2000’li yıllarda birçok çalışma yapılmıştır. Öncelikle, düşük hızlı, dişli kutusu kullanmaksızın sürülen DMSM ile asansör uygulamalarında, titreşimi azaltarak, gürültü seviyesinin azaltıldığı gösterilmiştir [1]. Daha sonra eksenel akılı DMSM’ nun doğrudan sürülen asansör uygulamaları için uygunluğunu gösteren çalışmalar yapılmıştır. Böylece motor uzunluğu azaltılarak, kullanım ergonomik hale getirilebilmekte ve makine odası ihtiyacı ortadan kalkmaktadır [2]. Ardından, farklı oluk sayıları ve sargı diyagramları içeren farklı yapılara ait performansları karşılaştıran çalışmalar yapılmıştır [3]. Bir başka çalışmada; kesirli adımlı sargı diyagramı kullanılarak tek katmanlı ve çift katmanlı sargı teknikleri için çıkış momenti incelenmiştir [4]. Son yıllarda ise, daha yüksek binalarda klasik üç fazlı makinaların ihtiyacı karşılayamaması durumu göz önünde bulundurularak çok yüksek hızlı motor sürücü sistemleri hakkında çalışmalar yapılmıştır [5]. Farklı çalışmalarda, sargı diyagramları tasarımına, farklı faz sayısına sahip motor tiplerine ve sürücü sistemlerine dair çalışmaların yanı sıra, daha kaliteli malzeme kullanımı da gerek mıknatıs gerekse çelik tercihi göz önünde bulundurulmuştur [6]. Böylece, verim ve performans açısından daha detaylı çalışmalar ortaya konmuştur. Ayrıca DMSM’ ların asansör uygulamalarında kullanılmaları açısından bir diğer önemli husus olan güç elektroniği ve kontrol konuları da, doğrudan sürüş için farklı yöntemlerin araştırılması ile her geçen gün geliştirilmektedir [7, 8]. Bu doğrultuda, klasik yöntemlere ek olarak sezgisel (ing: heuristic) yöntemlerin kullanıldığı çalışmalar da bulunmaktadır [9]. Bu çalışma kapsamında; düşük hızlı ve yüksek momentli bir DMSM’un asansör uygulamalarında kullanımı; analitik hesaplamalar,

benzetimler ve test sonuçları doğrultusunda incelenmiştir. DMSM’ lar, rotor yapısına göre farklı tiplerde üretilmektedir. Bu makalede, rotoru yüzey mıknatıslı DMSM kullanılmış olup, saniyede bir metre hızla çalışan sekiz kişilik bir asansöre ait motorun analizleri yapılmıştır.

Modern bir asansör sistemi; elektrik motoru, kodlayıcı ve evirici temel bileşenlerinden oluşmaktadır. Kodlayıcı, motor ve kabin konumunu belirlemekte ve bu veriler doğrultusunda motor kontrolü için gerekli işaretler evirici tarafından üretilmektedir. Bu çalışmada ilk olarak asansör sistemine ilişkin analitik hesaplamalar yapılmış olup, asansörün mekanik ve fiziksel özellikleri ile ilgili tasarımlara başlanmıştır. Kabin hızı, asansör kapasitesi, kabin net ağırlığı bilgileri doğrultusunda tercih edilecek motorun çıkış gücü hesaplanmakta ve bu güç değeri motor tasarımının başlangıç noktasını oluşturmaktadır. Elektriksel ve mekanik parametrelerin belirli kabuller doğrultusunda analitik olarak hesaplanması ile beraber motor boyutları belirlenmiştir. Stator ve rotor ana boyutları belirlendikten sonra, belirlenen kutup sayısında, farklı oluk sayıları için ortaya çıkan farklı sargı diyagramları ile farklı tasarımlar oluşturulmuştur. Tercih edilen oluk sayısı ile motorda çap veya kesirli sargı kullanılabilir. Çap sargı (tam adımlı) sargı diyagramında, mıknatıs kutup adımı ve sargı kutup adımı eşittir ancak kesirli sargı (kesirli adım) diyagramında mıknatıs kutup adımı sargı kutup adımından daha büyüktür. Mıknatıs kutup adımı ile sargı kutup adımının arasındaki oran ve indüklenen gerilim, harmonikler açısından çok önemli bir etkidir ve bu harmonikler motorda titreşime sebep olmaktadır.

Çalışmada ilk model olarak; 48 oluklu, 16 kutuplu ve tam adımlı sargıya sahip DMSM tasarlanmıştır. Ardından endüstride kullanılan 4 kW güce sahip AKAR DMSM (tip: SMT 140 AC-15) test edilmiş ve benzetim sonuçlarının tutarlı olduğunu gösterebilmek adına bu motor da modellenmiştir. Modelin oluşturulabilmesi amacıyla; boyutları, sargı diyagramı ve malzeme özellikleri gibi teknik verilere erişmek için test motoru sökülülmüştür. Bu doğrultuda, 60 oluklu, 16 kutuplu ve kesirli adımlı sargı diyagramına sahip olan test motoru, incelenen ikinci motor olmuştur. Modeller, Sonlu Elemanlar Yöntemine (SEY) dayalı olarak çalışan ANSYS Maxwell ticari paket program aracılığıyla çözülmüştür. Elde edilen benzetim sonuçları ve test sonuçları karşılaştırılarak; verim, moment ve akım karakteristiklerinin tutarlılığı gözlenmiştir. Buradaki tutarlılık yeni tasarlanacak ve SEY ile analiz edilecek motor sonuçlarının da güvenilirliği için bir kriter oluşturacaktır. Tam adımlı sargı diyagramına sahip ilk motor, harmonik analizi ve mekanik titreşimler açısından incelenmiştir. Daha sonra test motoru da benzer karakteristikler açısından incelenip, yeni tasarlanacak motorda iyileştirilecek özelliklere karar verilmiştir. Sarım üzerine iyileştirmeler, DMSM’ yi daha tıknaz (ing: compact) hale getirme ve motorun uzunluğunu azaltma amaçları doğrultusunda motor yeniden tasarlanmıştır. Bu üç motora ait sonuçlar karşılaştırılarak önerilen motor; manyetik, elektriksel ve mekanik özellikleri açısından incelenmiştir.

2. ASANSÖR SİSTEMLERİ (ELEVATOR SYSTEMS)

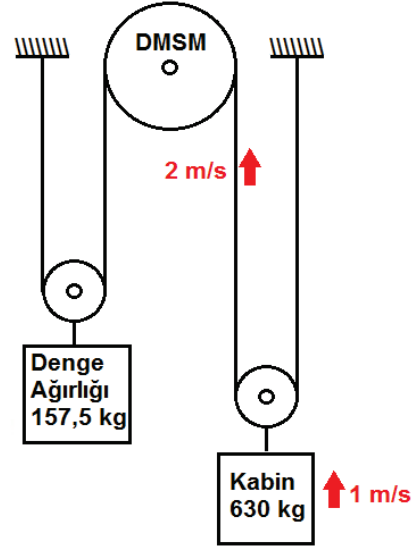
Çok eski zamanlardan bu yana insanlar, ağır yükleri kaldırmak amacıyla makinelerden yararlanmışlardır. 19. yüzyılın ortalarına kadar büyük iş kolaylığı sağlamasına rağmen can ve mal güvenliği konusunda çok büyük sorunlara yol açan sistemler sanayinin birçok alanında yük transferi amacıyla kullanılmıştır. 1853 yılında, Elisha Grave Otis buharla çalışan ve insan taşıma amaçlı ilk yük taşıma sistemini geliştirmeyi başarmıştır [10]. Asansör endüstrisi, elektronik ve mekanik teknolojisindeki ilerlemelerden faydalanarak gelişimini sürdürmektedir. Kullanım açısından, tüm asansörler; dikey yönde hareket etme, istenilen katlarda durabilme ve kabin bulundurma özelliklerine sahip olmalarının yanı sıra kabine uygulanan itici güç düşünülecek olursa; çekiş (ing: traction) asansörleri, hidrolik, pnömatik ve manyetik asansörler gibi türleri bulunmaktadır. Hidrolik ve pnömatik asansörler ucuzluğu sebebiyle genellikle beş kata kadar olan yapılarda tercih edilirken, manyetik asansörler gelişmekte olan teknolojileri sebebiyle halen oldukça maliyetlidir. Asansör alanında neredeyse tüm dünyada en önemli referans kaynağı olan ve asansörlerin yapım ve montajı ile ilgili güvenlik kurallarını tanımlayan ilgili EN 81-1:1998+A3 (elektrikli asansörler) standardının yerini "EN 81-20 İnsan ve Yük taşımak için – Yapım ve montaj ile ilgili güvenlik kuralları" adlı standart almaya başlamıştır [11].

Bu çalışmada, yaygın olarak tercih edilen çekiş asansörleri kullanılmıştır. Bu asansörler; itiş gücünü elektrik motorlarından elde eder ve bir yanda kabine bir diğer yanda da denge ağırlığına bir kasnak üzerinden çelik kablo ile bağlı bir düzenekten oluşurlar. Denge ağırlığı, motor mili üzerindeki yükü azaltmak amacıyla kullanılır. Kabin kapasitesi, her bir kişinin ağırlığı EN 81-20 standartları doğrultusunda 75-80 kg olacak şekilde sekiz (8) kişilik olarak öngörüldükten sonra, yaygın olarak kullanılan 2:1 süspansiyon tercihi sonrası gerekli hesaplamalar yapılmıştır [12]. Bu doğrultuda, 1 m/s hızla hareket edecek 630 kg ağırlığındaki kabin ve bunu sağlayacak denge ağırlığına ilişkin şema Şekil 1'de verilmiştir. Asansör sistemini oluşturan temel bileşenler; sürücü gelen üç fazlı gerilim, sürücü, sürücüden sonra DMSM ve kodlayıcıya ait bağlantı kabloları, kodlayıcı, denge ağırlığı ve DMSM olarak Şekil 2'de gösterilmiştir.

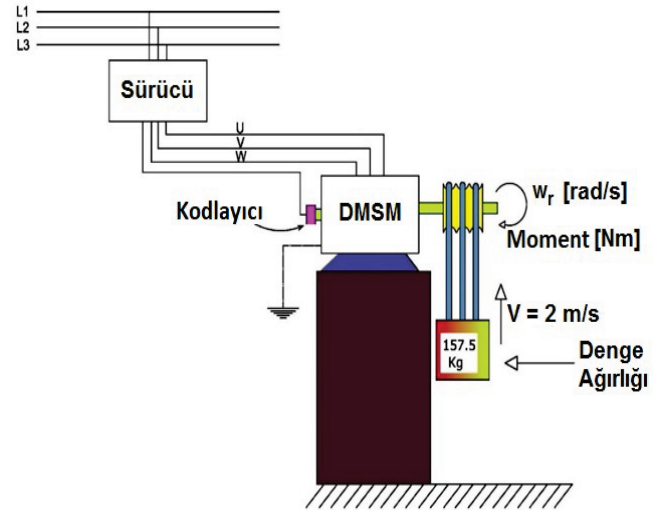
3. DAİMİ MIKNATISLI SENKRON MOTORLAR (DMSM) (PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS (PMSM))

Yük asansörlerde temel ihtiyaç, düşük hız ve yüksek moment karakteristiğine sahip elektrik motorlarıdır. Asenkron motorlar; mekanik olarak hızları düşürüldüğünde bu tip asansörlerin ihtiyaç duyduğu performansa sahip olsalar da, klasik olarak tercih edilen bu yöntemin, dişli kutusu ve makine odası gerekliliği, sert kalkışı gibi birçok dezavantajı bulunmaktadır. Frekans mertebesini kolaylıkla kontrol edebilme kabiliyeti bulunan, güç elektroniği devrelerinin kullanımı sayesinde dişli kullanmaksızın düşük hız ihtiyacını

karşılayabilen DMSM' lar son yıllarda yaygınlaşmıştır. DMSM' ların; yüksek verim, tızk yapı dolayısıyla daha küçük boyutlar ve daha hafif oluşu, uzun ömür, başarılı kontrol performansı, yumuşak hareket kabiliyeti, gürültüsüz çalışma, makine odasına ihtiyaç duymaması ve müşteri açısından istenilen hız aralığında çalışması gibi birçok avantajı bulunmaktadır [13].

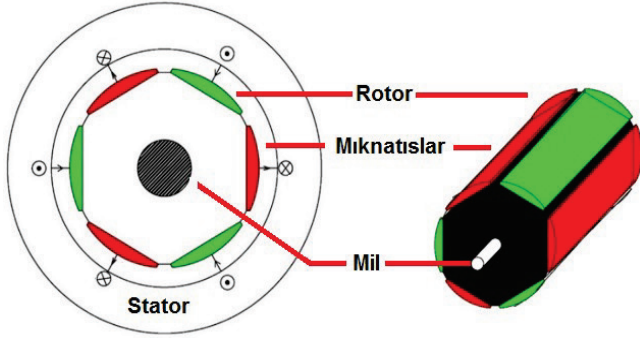


Şekil 1. 2:1 süspansiyona sahip sekiz kişilik asansörün basit görünümü (Simple sketch of 8-person elevator having 2:1 suspension)



Şekil 2. DMSM ve asansör sistemini oluşturan temel bileşenler (PMSM and the main components of an elevator system)

19. yüzyıl itibariyle tasarımı yapılmasına rağmen uygun ve ucuz mıknatıs temininin olmaması sebebiyle DMSM' nun üretimi ve kullanımının yaygınlaşması, nadir toprak mıknatısların fiyatlarının düşmesi ile 20. yüzyılın sonlarında başlamıştır. DMSM' lar; senkron motor ailesine dahil, sinüzoidal akım ile sürülen, rotor yapısına ve mıknatısların yerleştirilmelerine göre farklı tipleri olan motorlardır. Bu çalışmada, Şekil 3'de görüldüğü üzere yüzey mıknatıslı DMSM kullanılmıştır.



Şekil 3. Yüzey mıknatıslı DMSM kesit görünümü ve rotoru
(Cross section of the surface mounted PMSM and its rotor)

4. TASARIM SÜRECİ (DESIGN PROCEDURE)

4.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) (Finite Element Method (FEM))

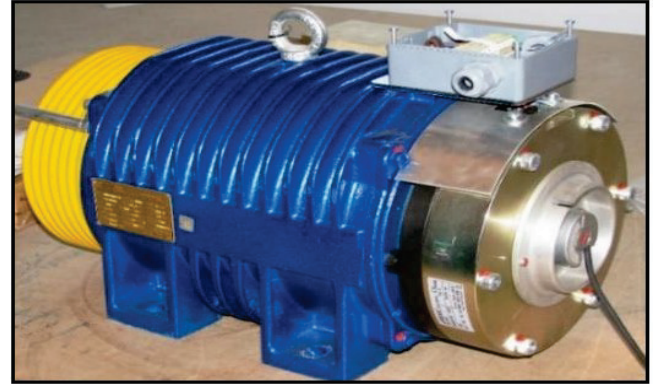
Benzetim aşamasında, SEY tabanlı analiz programı ANSYS Maxwell ticari paket programından faydalanılmıştır. Makinelerin karmaşık yapıları ve malzemelerin doğrusal olmayan karakteristikleri sebebiyle analitik çözüm yapabilmenin zorluğu göz önünde bulundurularak, sayısal çözüm yolu sıklıkla tercih edilmektedir. SEY, bu amaç için en çok kullanılan ve en uygun yöntemdir. SEY’ de bir sistemin sonlu sayıdaki bilinmeyen büyüklüğünün sistemin bilinen büyüklükleri cinsinden bulunması yolu izlenir [14]. SEY ile çözüm yoluna gidilen problemlerde esasen; manyetik akı yoğunluğu, akı şiddeti, elektriksel akı yoğunluğu ve akım şiddeti ifadelerini içeren Maxwell denklemlerinin çözümü temel alınmaktadır. Bu amaçla; çözüm bölgesinin sonlu elemanlara ayrılması, her bir eleman için temel denklemlerin yazılması, çözüm bölgesindeki tüm elemanların birleştirilmesi ve elde edilen denklem sisteminin çözülmesi adımları izlenerek analiz yapılabilmektedir [15].

4.2. Test Motoru (Test Motor)

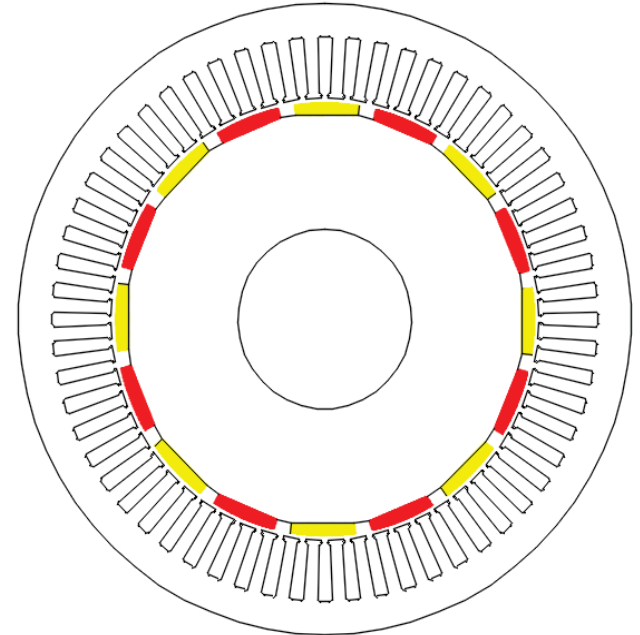
Benzetim aşamasına geçmeden önce, tutarlılığın test sonuçlarıyla doğrulanması amacıyla, test edilecek motorun da benzetim yapılabilmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda; Şekil 4’de gösterilen endüstride kullanılan 4 kW güce sahip AKAR DMSM (tip: SMT 140 AC-15) teknik bilgilerinin elde edilmesi amacıyla sökülüştür. 16 kutuplu, 60 oluklu test motoruna ait genel bilgiler Tablo 1’de verilmiştir. Kesit görünümü ise Şekil 5’de görülmektedir. Test motoruna ait plaka değerleri Tablo 2’de gösterilmiştir.

Tablo 1. 60 oluklu AKAR motora ait genel bilgiler (General information of the AKAR motor with 60 slots)

Motor Parametre	Değer
Rotor uzunluğu [mm]	150
Hava aralığı genişliği [mm]	1
Rotor çapı [mm]	168
Stator çapı [mm]	242
Oluk genişliği [mm]	6.2
Oluk derinliği [mm]	26
Her oluktaki sarım sayısı	40



Şekil 4. AKAR dişlisiz asansör motoru
(The AKAR Gearless elevator motor)



Şekil 5. 16 kutuplu AKAR motor kesiti
(Cross section of the AKAR Motor with 16 poles)

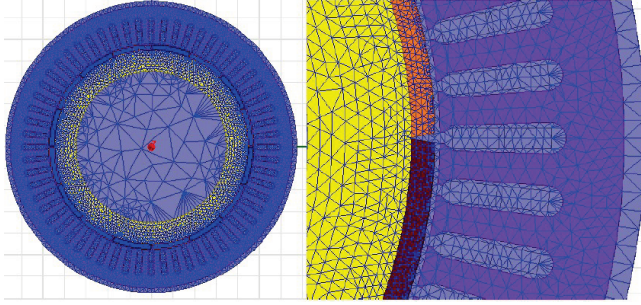
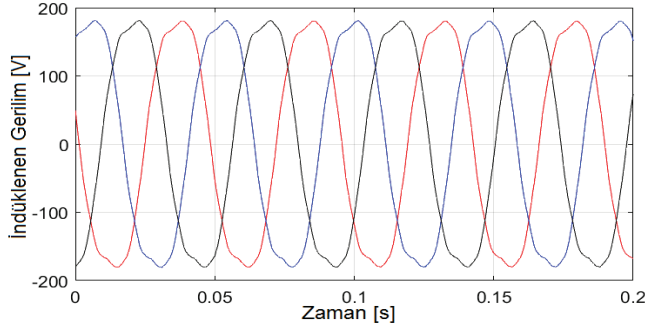
Tasarım sürecinde önce plaka değerleri bilinen AKAR motorun benzetimi yapılacak ve daha sonra deneysel sonuçlarla modellemenin tutarlılığı karşılaştırılacaktır. Benzetim sonuçlarının ve test sonuçlarının tutarlılığı, önerilecek motorun gerçekleşmesinden önce benzetiminin yapılarak, istenilen sonuçların alınabileceğini göstermesi açısından çok önemlidir.

4.2.1. Test motoru SEY benzetim sonuçları (The FEM Simulation Results of the Test Motor)

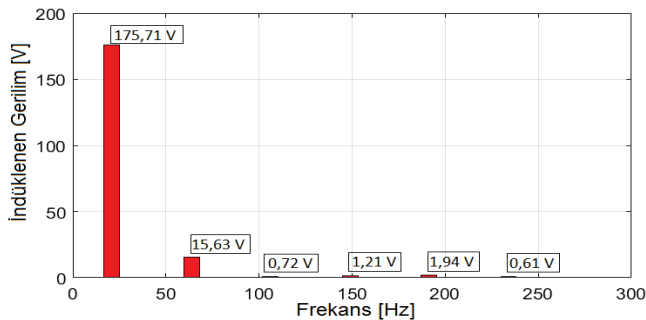
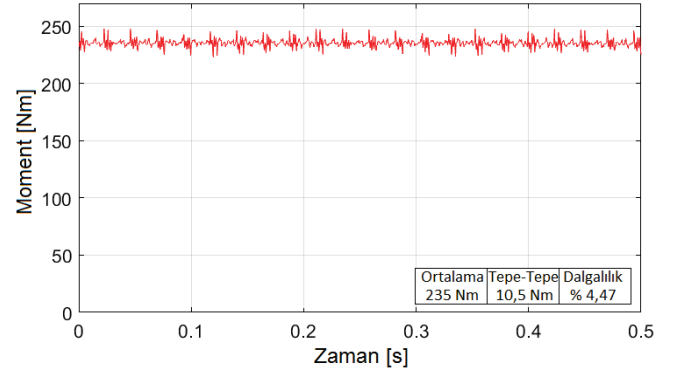
Endüstride kullanılan AKAR motora ait Şekil 5’de elde edilen geometri kullanılarak SEY ile benzetiminin yapılabilmesi amacıyla uygun ağ yapısı oluşturulmuştur. Ağ yapısı genel görünümü ve mıknatıslara, rotor ve statora ait detay görünümü Şekil 6’da görülmektedir. Zamana bağlı olarak yapılan çözümlenelerde, farklı yük akımları için moment, güç ve verim değerleri elde edilmiştir. İlk olarak indüklenen gerilim Şekil 7’de görüldüğü gibi elde edilmiştir.

Tablo 2. AKAR DMSM plaka değerleri (The nameplate of the AKAR PMSM)

AKAR - Dişlisiz Asansör Tahrik Motoru			
Tip	SMT140AC-15	Frekans	21,2 Hz
Seri No	15-0729	Ağırlık	145 Kg
Yük	630 Kg	Kutup Sayısı	16
Hız	1 m/s	Gerilim	360 V
Süspansiyon	2:1	Güç	4 KW
cos φ	1	Akım	13 A
İzolasyon sınıfı	IP 54	Devir sayısı	159,2 min ⁻¹
Üretim Yılı	2015	Moment	240 Nm
Kodlayıcı tipi	ECN1313	Bağlantı şekli	Yıldız

**Şekil 6.** 60 oluklu AKAR test motoruna ait ağ yapısı ve yakın plan görünümü (Mesh structure of the AKAR Motor with 60 slots and its detailed view)**Şekil 7.** Test motoru indüklenen gerilim karakteristiği (Induced voltage characteristics of the Test Motor)

Kesirli adım sargı diyagramı kullanılması sayesinde harmonik içerik oldukça azalmış olup 5,7,11,13 gibi yüksek frekanslı harmonik bileşenler Şekil 8'de görüldüğü üzere indüklenen gerilimden temizlenmiştir.

**Şekil 8.** Test motoruna ait indüklenen gerilim harmonik açılımı (Induced voltage harmonic components of the Test motor)**Şekil 9.** Test motoru moment karakteristiği (Torque characteristics of the Test Motor)

Bu durum Şekil 9'da verilen moment karakteristiğinde ve dalgalık değerinde de açıkça görülebilmektedir. Farklı yük akımları ile yüklenen motor için yapılan benzetimler sonucunda moment, giriş ve çıkış güçleri ve verim değerleri Tablo 3'de gösterildiği gibi elde edilmiştir.

4.2.2. Test motoruna ait deneysel sonuçlar (The experimental results of the Test Motor)

Bu çalışmada, konumlandırma, hız ve mesafe geri bildiriminde gayet başarılı olan artırılmış kodlayıcı (ing: incremental encoder) tercih edilmiştir. Basit ve ucuz olmaları, ayrıca değişken çıkış tipleri ve değişken darbe sayısına sahip olmaları sebebiyle piyasada sıklıkla tercih edilen kodlayıcı tipleridir. Kodlayıcı seçiminin yanı sıra, sürücü seçimi de asansör sistemlerinde kullanılan DMSM için çok önemlidir. Bu çalışmada, Tablo 4'de bilgileri verilen ADrive Arkel tip sürücü sistemi kullanılmıştır. Yukarıda belirtilen elemanlarla kurulan Şekil 10'da gösterilen test düzeneğinde, sürtünme freni ve 1 metre uzunluğunda kol ve farklı ağırlıklar kullanılarak moment ölçümü farklı yük akımları için yapılmıştır. Benzetim adımlarına paralel yük akımlarını sağlayacak farklı yük kademelerinde motor çalıştırılmış olup, akım, moment, giriş ve çıkış güçleri ve hız değerleri kaydedilmiştir. Daha sonra her durum için verim değerleri hesaplanmıştır. Bu değerler Tablo 5'de gösterilmiştir. Motor hızı 11.32 A yük akımına kadar 159-160 min⁻¹ arasında sabit kalmakta iken, 13 A yük akımı mertebesinde 150 min⁻¹ değerine düşmüştür. Anma moment değerine 10.5 A yük akımı değerinde ulaşıırken, ortalama verim değeri %74 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 3. Test motoruna ait farklı yük akımları için elde edilen benzetim sonuçları
(Simulation results of the Test motor for different load currents)

Akım [A]	Moment [Nm]	P _{çıkış} [W]	P _{giriş} [W]	Verim [%]
0,65	30	500,1	768,8	65
2,13	50	850,2	1167,5	72,8
2,8	62	1033,6	1385	74,62
3,7	85	1417	1801,6	78,65
4,5	105	1750,5	2192,2	79,85
6,266	145	2417,3	3061,7	78,95
8	179	2984,1	3894	76,63
9,347	211	3517,6	4647	75,7
10,5	230	3834	5118	75
11,32	256	4267,8	5715	74,7
13	294	4901,3	6680	73,37
Ortalama				75

Tablo 4. ADrive Arken Sürücü sistemi genel bilgileri (General information about ADrive Arken drive system)

Motor gücü	11 kW
Anma çıkış akımı	26 A
Maksimum çıkış akımı (< 6 s)	52 A
Giriş gerilimi	AC 3 Faz, 340-420V, 50/60 Hz, ± %5
Çıkış gerilimi	AC 3 Faz, 0-400V, 0-100Hz
Kontrol tipi	Kapalı çevrim vektör kontrolü Açık çevrim V/f (Asenkron sürüşler için)
Dijital çıkış frekans çözünürlüğü	0,004 Hz
DGM yöntemi	Uzay vektör modülasyonu
Çıkış dalga şekli	Sinüs
Taşıyıcı frekansı	10 kHz
Kodlayıcı tipi	HTL or TTL, 500 – 4096 darbeleri artırımı kodlayıcı

Tablo 5. Test motoruna ait farklı yük akımları için elde edilen deneysel sonuçlar
(Experimental results of the Test motor for different load currents)

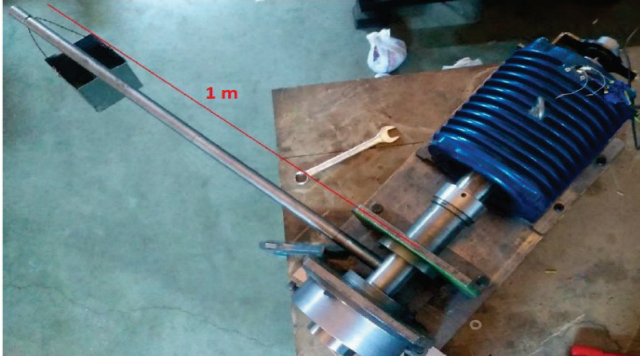
Akım [A]	Moment [Nm]	P _{çıkış} [W]	P _{giriş} [W]	Verim [%]
0,65	16	266,736	334,5	77,42
2,13	50	833,55	1128,9	73,84
2,8	65	1083,615	1484	73,02
3,7	90	1500,39	1961	76,5
4,5	114	1900,494	2385	79,68
6,266	150	2500,65	3320,98	75,3
8	185	3084,135	4240	72,7
9,347	215	3584,265	4953,91	72,35
10,5	242	4034,382	5565	72,5
11,32	260	4334,46	5999,6	72,24
13	295	4631,5	6604	70,131
Ortalama				74.158

4.2.3. Test motoruna ait benzetim ve deney sonuçlarının karşılaştırılması

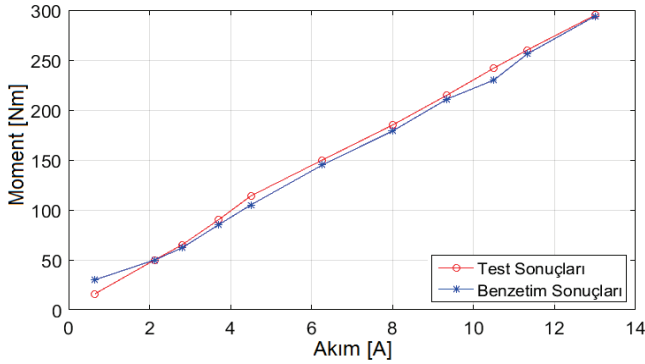
(The comparison of the simulation and Experimental Results)

Benzetim yönteminin, yeni motorun tasarımı aşamasında kullanılabilirliğini gösterebilmek adına AKAR motorun

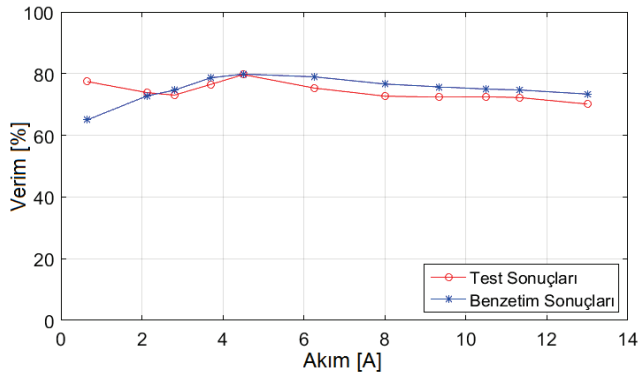
daha önce elde edilen benzetim ve deneysel sonuçlarının tutarlılığı Şekil 11 ve Şekil 12’de sırasıyla gösterilmektedir. Görüldüğü üzere farklı yük akımlarında test edilen motora ait deneysel sonuçlar ve aynı akım değerlerinde elde edilen benzetim sonuçları moment ve verim değerleri doğrultusunda tutarlılık göstermiştir.



Şekil 10. Deney düzeneği (Experimental setup)



Şekil 11. Test motoru için Akım-Moment karakteristiklerinin karşılaştırması (The comparison of the current-torque characteristics of the Test motor)



Şekil 12. Test motoru için Akım-Verim karakteristiklerinin karşılaştırması (The comparison of current-efficiency characteristics of the Test motor)

4.3. 48 Oluklu Motora Ait Analitik Tasarım (The analytical design of the motor with 48 slots)

Öncelikle, tek tabakalı ve çap sargıya sahip motora ait parametreleri; aşağıda ön hesapları yapılan kabuller doğrultusunda analitik olarak hesaplanmıştır. İlk olarak, rotor giriş ve çıkış güçleri standartlara uygun verim değerleri göz önünde bulundurularak hesaplanmıştır. Kabin ve denge ağırlığı birbirini dengeleyecek şekilde tasarlandıktan sonra, Şekil 1'de gösterildiği gibi 630 kg yolcu kapasitesi için motor milinde maksimum 157,5 kg yük olacaktır. Bu doğrultuda, yerçekimi ivmesi ve makaradaki halatın doğrusal hızı kullanılarak ihtiyaç duyulan mekanik güç

yaklaşık 3,1 kW olarak hesaplanmış ve makara sisteminin veriminin %80 olarak kabul edilmesi sonucunda, motor çıkış gücü yaklaşık olarak 4 kW olarak hesaplanmıştır. Makaranın çapı, asansör kapasitesi doğrultusunda seçilen çelik halatın çapına bağlı olarak 240 mm olarak belirlenmiştir. Ayrıca, DMSM 16 kutuplu olarak tasarlanmıştır. Böylece hız, frekans ve moment değerleri Eş. 1, Eş. 2, Eş. 3, Eş. 4 ve Eş. 5 ile gösterildiği gibi sırasıyla elde edilmiştir.

$$C=2.\pi.r \quad C=2.\pi.120 \quad C=0,754 \text{ m} \quad (1)$$

$$n=60. (v/C) \quad n=60. (2/0,754) \quad n=159,2 \text{ min}^{-1} \quad (2)$$

$$\omega=(2.\pi.n)/60 \quad \omega=(2.\pi.159,2)/60 \quad \omega=16,67 \text{ rad/s} \quad (3)$$

$$f=(n.p)/60 \quad f=(159,2.8)/60 \quad f=21,2 \text{ Hz} \quad (4)$$

$$T=P_{\text{çıkış}} / \omega \quad T=4000/16,67 \quad T=240 \text{ Nm} \quad (5)$$

Hesaplanan çıkış gücü ve motor veriminin %75 olduğu kabulüyle giriş gücü 5,34 kW olarak hesaplanır. Gerilim değeri faz faz arası 360 V olarak alındığında ve motorun yıldız bağlı olduğu kabulüyle faz akımı yaklaşık olarak 11 A olarak elde edilir. Akım yoğunluğunun standartlar doğrultusunda temini sonucunda bakır telin çapı 1,44 mm olarak hesaplanmıştır. Lakin bu kesite sahip telin sert ve esnek olmayışı göz önünde bulundurularak 0,85 mm çapa sahip üç paralel iletkenin kullanılmasına karar verilmiştir.

Boyutların analitik olarak hesaplanması aşamasında DMSM tasarımı için kullanılan deneye dayalı (ing: empirical) formüller ve kabullerden yararlanılmıştır [16]. Kullanılan mıknatis doğrultusunda hava aralığı akı yoğunluğu 0,85 [T] olarak alınmıştır. Elektrik yükü (A) ise Eş. 6 ile verilen denklemde gösterilen teğetsel kuvvet ($\sigma_{F \tan}$) (ing: tangential stress) değeri 39000 kabul edilerek (Hava aralığı akı yoğunluğunun 0,85 T değeri için) 46000 A/m olarak hesaplanmıştır [17].

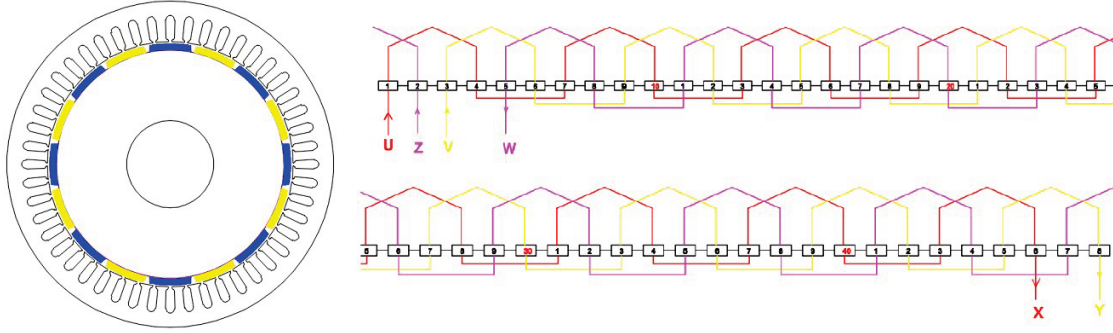
$$\sigma_{F \tan} = B_n \cdot A \quad (6)$$

'D' rotor çapını, 'L' motor uzunluğunu, 'S' motor görünür gücünü, 'K_w' sargı faktörünü, 'B_n' hava aralığı manyetik akı yoğunluğunu, 'A' elektrik yükünü ve 'n_{rps}' saniyedeki devir sayısını ifade ettiği Eş. 7 ile verilen denklem sayesinde rotor çapı hesaplanmıştır.

$$D^2 \cdot L = S / 11 \cdot K_w \cdot B_n \cdot A \cdot n_{rps} \quad (7)$$

Makinenin; rotor çapı ve motor uzunluğu belirlendikten sonra oluk boyutları, sarım sayısı gibi parametreleri belirlenerek tasarım tamamlanmış ve genel bilgileri Tablo 6'da verildiği gibi elde edilmiştir.

Tam adımlı sargı tercihi doğrultusunda; 'Z' oluk sayısını, 'p' kutup çifti sayısını ve 'm' faz sayısını ifade ettiği, $q=Z/(2p.m)$ eşitliğinin tam sayı olması gerekmektedir. Bu doğrultuda 16 kutuplu ve 3 fazlı tasarım gereği 48 oluklu bir DMSM tasarlanmıştır, kesit görünümü ve sargı diyagramı Şekil 13'de verildiği gibi elde edilmiştir.



Şekil 13. 48 oluklu DMSM kesiti ve sargı diyagramı (Cross section of the PMSM with 48 slots and its winding layout)

Tablo 6. 48 oluklu motora ait genel bilgiler (General information of the motor with 48 slots)

Motor Parametre	Değer
Rotor uzunluğu [mm]	150
Hava aralığı genişliği [mm]	1
Rotor çapı [mm]	190
Stator çapı [mm]	266
Oluk genişliği [mm]	6.3
Oluk derinliği [mm]	25.2
Her oluktaki sarım sayısı	42

4.3.1. 48 oluklu motora ait SEY benzetim sonuçları (The FEM Simulation Results of the motor with 48 slots)

Test motorunun benzetim sonuçları elde edildikten sonra, analitik olarak tasarımı yapılan 48 oluklu çap sargı diyagramına sahip motorun benzetimi yapılmıştır. Şekil 13'de elde edilen geometri kullanılarak SEY ile çözülebilmesi için uygun ağ yapısı oluşturulmuştur. Ağ yapısı genel görünümü ve mıknatlara, rotor ve statora ait detay görünümü Şekil 14'de görülmektedir. Benzetim sonucunda, moment ve indüklenen gerilim karakteristikleri elde edilmiş olup bu karakteristiklerin yardımıyla moment dalgalılığı ve indüklenen gerilimin harmonik açılımı da incelenmiştir. İndüklenen gerilim Şekil 15'de görüldüğü gibi elde edilmiştir. İndüklenen gerilim yüksek frekanslı harmonik bileşenleri içermektedir. İndüklenen gerilim içerisinde, çalışma frekansı olan 21 Hz' de görülen temel bileşenin yanı sıra, 3, 5, 7, 9, 11 ve 13. harmonikler bulunmaktadır. Harmonik bileşenleri Şekil 16'da verilmiştir. Şekil 17'de verilen moment-zaman karakteristiğinde, ortalama değeri, tepeden tepeye değer ve dalgalılık değerleri hesaplanmıştır. Tam adımlı sargıya sahip bu motorun yüksek moment dalgalılığı dolayısıyla titreşim açısından asansör uygulaması için uygun olmadığı benzetim sonuçlarında görülmektedir.

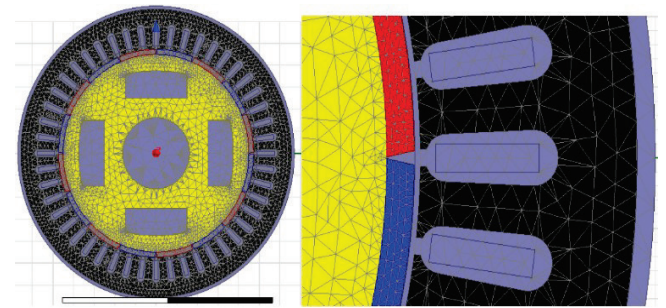
4.4. 54 Oluklu, 16 Kutuplu Önerilen Motor (The proposed motor having 54 slots, 16 poles)

Üretim süreci açısından önem arz eden; motor uzunluğunun kısalması, sarım üzerine iyileştirme, toplam hacmin azalması

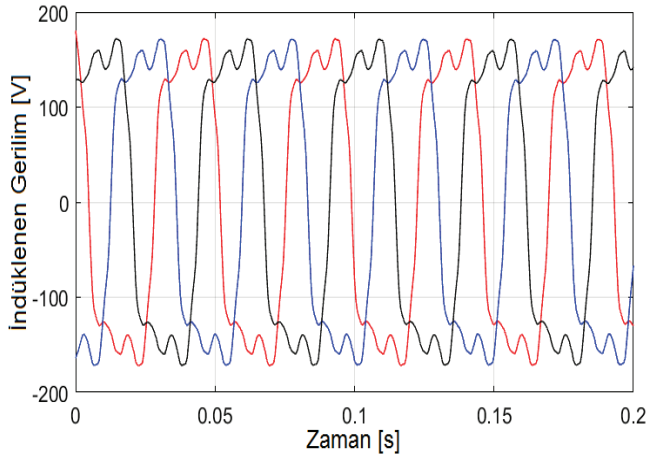
ve maliyet konuları dikkate alınarak, 60 oluklu AKAR motor ve 48 oluklu motor, yapısında, sargısında ve malzeme teknolojisinde iyileştirmeler yapılarak yeniden tasarlanacaktır. Bu doğrultuda, kutup sayısı aynı tutularak yeni motorda oluk sayısı 54 seçilecektir. Ayrıca, daha kuvvetli mıknatıslar kullanılıp ve hava aralığı da 1 mm' den 0.5 mm'ye azaltılacaktır. Bu sayede hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu artırılacak ve dolayısıyla aynı moment değerlerine ulaşmak için motor boyutlarının küçülmesi sağlanacaktır. Sonuç olarak, motor boyutlarının küçülmesiyle asansör sistemi içerisinde motorun konumlandırılması daha kolaylaşacaktır. Mıknatıs malzemesi olarak, N38SH yerine N45SH tercih edilmiş, böylece boyut hesaplamalarına doğrudan etki eden hava aralığı akı yoğunluğu 0,85 T yerine 0,9 T olarak güncellenmiştir. Oluk sayısının da 54 olarak belirlenmesi sonucu, önerilen motora ait sargı şeması Şekil 18 de, hesaplamalar sonucunda elde edilen genel bilgiler Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. 54 oluklu motora ait genel bilgiler (General information of the motor with 54 slots)

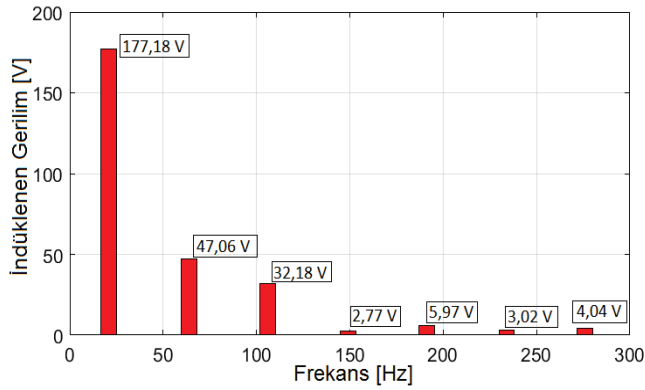
Motor Parametre	Değer
Rotor uzunluğu [mm]	120
Hava aralığı genişliği [mm]	0,5
Rotor çapı [mm]	184
Stator çapı [mm]	262
Her oluktaki sarım sayısı	42



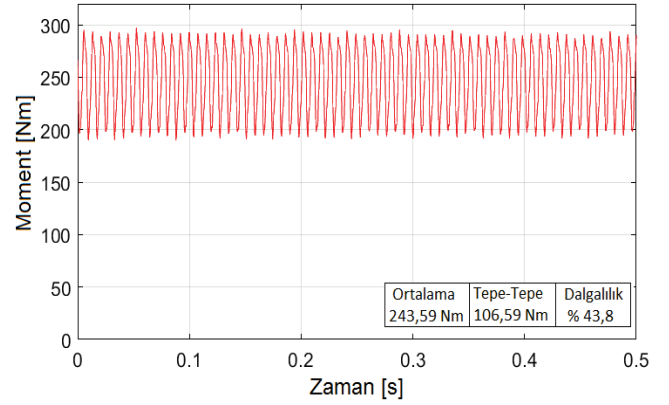
Şekil 14. 48 oluklu motora ait ağ yapısının genel ve detay görünümü
(Mesh structure of the motor with 48 slots and its detailed view)



Şekil 15. 48 oluklu motora ait indüklenen gerilim karakteristiği (Induced voltage characteristics of the motor with 48 slots)



Şekil 16. 48 oluklu motora ait indüklenen gerilim harmonik bileşenleri (Induced voltage harmonic components of the motor with 48 slots)



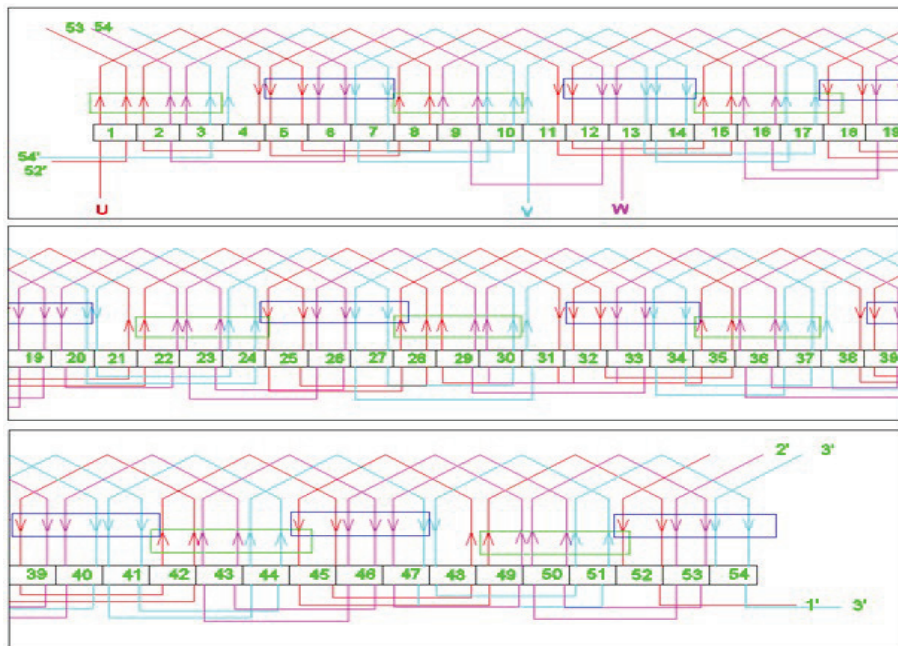
Şekil 17. 48 oluklu motora ait moment karakteristiği (Torque characteristics of the motor with 48 slots)

Yeni motorun kesit görünümü ise Şekil 19'da görülmektedir.

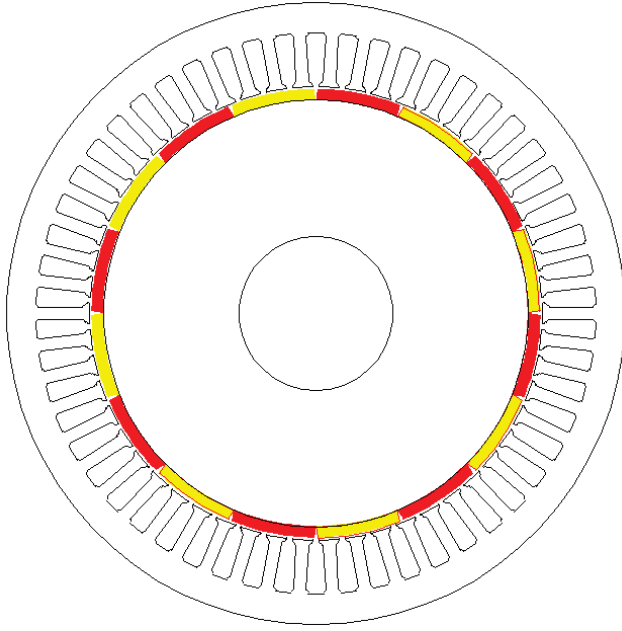
Görüldüğü üzere, motor uzunluğu hem 48 oluklu motor modeline hem de AKAR motora göre %20 oranında azaltılmıştır. Bu sayede asansör sistemi için, aynı güç ve moment değerlerini sağlayacak daha tıkkız bir motor tasarlanmıştır. Hesaplama sürecinden sonra, bu motor bilgileri kullanılarak benzetim yapılmış, ardından üretim gerçekleştirilmiş ve üretilen motora ait test sonuçları doğrultusunda ihtiyaçları karşılayabilecek bir motorun elde edildiği kanıtlanmış olacaktır.

4.4.1. 54 oluklu yeni motorun SEY benzetim sonuçları (The FEM Simulation results of the new motor with 54 slots)

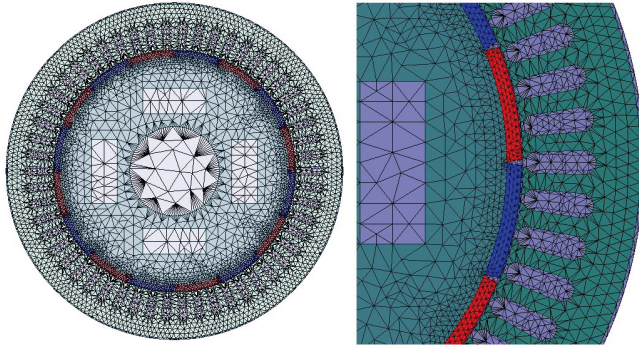
Yukarıda belirlenen parametreler ile Şekil 19'da gösterilen geometri kullanılarak SEY ile çözülebilmesi için elde edilen ağ yapısı genel görünümü ve detay görünümü Şekil 20'de görülmektedir.



Şekil 18. 54 stator oluklu motora ait sargı şeması (Winding layout for the motor with 54 stator slots)

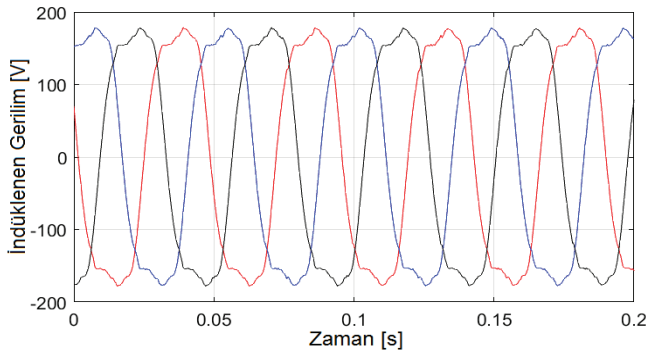


Şekil 19. 54 oluklu yeni motora ait kesit görünümü
(Cross section view of the motor with 54 slots)



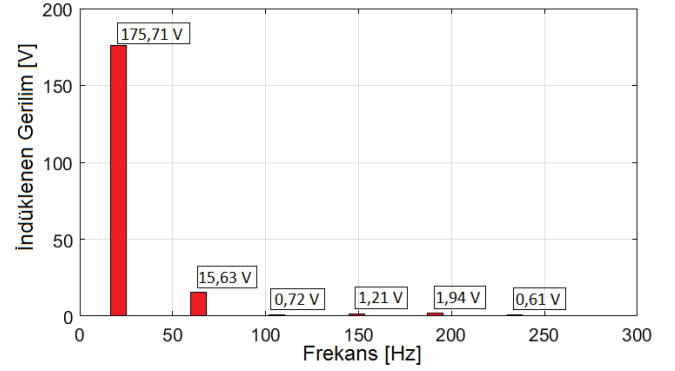
Şekil 20. 54 oluklu yeni motora ait ağ yapısının genel ve detay görünümü (Mesh structure of the new motor with 54 slots and its detailed view)

Önerilen motorun da üretim sürecinden önce benzetimi yapılmış ve gerilim, moment karakteristikleri incelenmiştir. İndüklenen gerilim Şekil 21'de görüldüğü gibi elde edilmiştir.



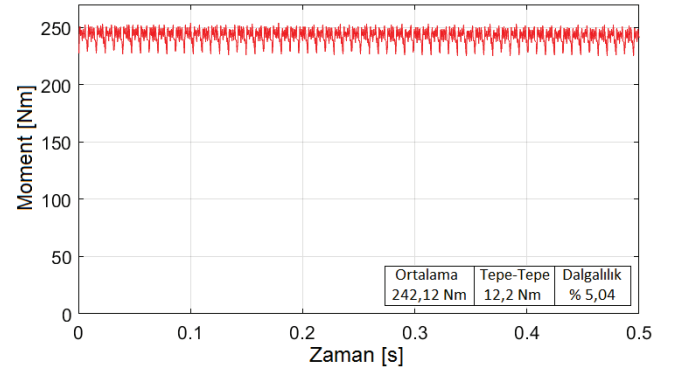
Şekil 21. 54 oluklu yeni motora ait indüklenen gerilim karakteristiği
(Induced voltage characteristics of the new motor with 54 slots)

Yine kesirli adım sargı diyagramı kullanıldığı için yüksek frekanslı harmonik bileşenler Şekil 22'de görüldüğü üzere gerilim işaretinde bulunmamaktadır.



Şekil 22. 54 oluklu yeni motora ait indüklenen gerilim harmonik bileşenleri (Induced voltage harmonic components of the new motor with 54 slots)

Moment karakteristiği, ortalama değeri, tepe-tepe arasındaki fark ve dalgalılık değerleri ise Şekil 23'de görüldüğü gibi elde edilmiştir.



Şekil 23. 54 oluklu yeni motora ait moment karakteristiği
(Torque characteristics of the new motor with 54 slots)

4.4.2. 54 oluklu yeni motorun üretimi (The prototyping of the new motor with 54 slots)

Yapılan hesaplamalar doğrultusunda benzetim sonuçlarının da beklenildiği gibi elde edilmesinin ardından yeniden tasarlanan DMSM Metroplast Asansör Firması tarafından üretilmiştir. Sargıların yerleştirilmesi, kutuplar, stator, rotor ve üretilen motora ait görseller Şekil 24'te görülmektedir.

4.4.3. 54 oluklu yeni motorun deneysel sonuçları (The experimental results of the new motor with 54 slots)

AKAR motor için uygulanan test adımları yeniden tasarlanan motor için tekrarlanmış olup, elde edilen sonuçlar Tablo 8'de verilmiştir.

Ayrıca, 54 oluklu yeni motor için elde edilen benzetim ve test sonuçlarının tutarlılığı Şekil 25 ve Şekil 26'da moment ve verim eğrileri ile gösterilmiştir. Görüldüğü üzere üretimi gerçekleştirilen 54 oluklu yeni motora ait test sonuçları ve

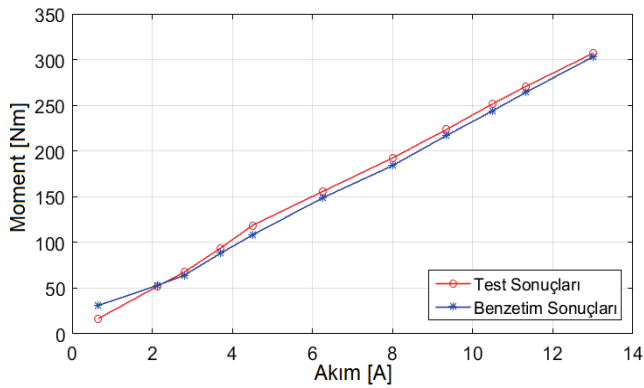
tasarım aşamasında elde edilen benzetim sonuçları beklenildiği üzere örtüşmektedir.



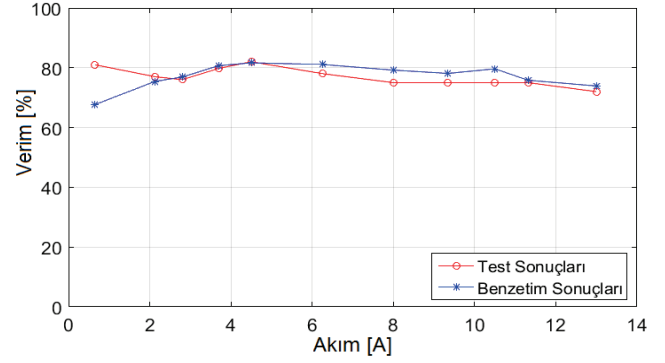
Şekil 24. 54 oluklu yeni motorun üretim süreci
(Production process of the new motor with 54 slots)

Tablo 8. 54 oluklu yeni motora ait farklı yük akımları için elde edilen deneysel sonuçlar
(Experimental results of the new motor with 54 slots for different load currents)

Akım [A]	Moment [Nm]	Pçıkış [W]	Pgiriş [W]	Verim [%]
0,65	16,64	277,4	344,5	81
2,13	52	866,9	1128,9	77
2,8	67,6	11267	1484	76
3,7	93,6	1560	1961	79,79
4,5	118,56	1976,5	2385	82
6,266	156	2600,7	3320,98	78
8	192,4	3207,5	4240	75
9,347	223,6	3727,6	4953,91	75
10,5	251,68	4195,7	5565	75
11,32	270,4	4507,8	5999,6	75
13	306,8	4816,7	6604	72
		Ortalama		77



Şekil 25. 54 oluklu yeni motor için Akım-Moment karakteristiklerinin karşılaştırması (Comparison of the current-torque characteristics of the new motor with 54 slots)



Şekil 26. 54 oluklu motor için Akım-Verim karakteristiklerinin karşılaştırması
(Comparison of the current-efficiency characteristics of the new motor with 54 slots)

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışma kapsamında kabin hızı 1 m/s olan ve 2:1 süspansiyon sistemine sahip sekiz kişi kapasiteli bir asansör için kullanılacak üç farklı tip DMSM için analizler yapılmıştır. Öncelikle piyasada kullanılan AKAR motora ait hem benzetim hem de test sonuçları elde edilmiş ve sonuçların tutarlılığı görülmüştür. Daha sonra çap sargı diyagramına sahip 48 oluklu motor için analitik tasarım yapılmış ve SEY ile benzetim sonuçları elde edilmiştir. Bu sonuçlar doğrultusunda, daha iyi bir performans amacıyla yapısal olarak daha uygun bir motor tasarlanmış, benzetim sonuçları doğrultusunda üretilmiş ve deneysel sonuçlar ışığında mevcut asansör sistemi için en uygun motor olduğu gözlenmiştir. Üç motora ait genel bilgiler karşılaştırmalı olarak Tablo 9'da verilmiştir. Benzetim sonucunda elde edilen elektriksel ve mekanik bilgiler de Tablo 10'da karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Tablo 9 ve Tablo 10'da verilen sonuçlar doğrultusunda; ilk motorun (çap sargılı) üretime ve kullanıma uygun olmadığı, yüksek frekanslı harmonik bileşenler sebebiyle titreşimli momente yol açtığı ve verim değerinin %58 seviyelerinde kaldığı gözlenmiştir. Kesirli adımlı sargı diyagramına sahip diğer iki motor karşılaştırıldığında ise önerilen motorun daha uygun olduğu aşağıda belirtilen sonuçlar ışığında gösterilmiştir.

- Toplam ağırlık %25 oranında azaltılmıştır.
- Toplam hacim %5 oranında azaltılmıştır.
- Verimlilik %4 oranında artırılmıştır.
- Oluk sayısının azaltılmasıyla, sarım süreci, dolayısıyla üretim sürecinden %10 oranında tasarruf edilmiştir.
- Motor uzunluğu %20 oranında azaltılmıştır.

Ayrıca kullanılan malzemeler ve birim fiyatlar doğrultusunda maliyet analizi de Tablo 11'de gösterilmiştir. Seri üretim olmadığı sadece numune üretimi olduğu için hurda hesabı ve işçilik maliyetleri eşit kabul edilerek yeni motor üretiminde ortaya çıkan fark gösterilmiştir. Rulman, kodlayıcı, gövde ve kasnak için kullanılan döküm demir her iki motorda da aynı olduğu için maliyet detayları verilmemiştir. Tablo 11 detaylı olarak incelenecek olursa daha iyi mıknatıs kullanıldığı için mıknatıs maliyeti artsa da,

Tablo 9. Üç farklı tip DMSM için genel bilgiler (General information for three different types PMSM)

	48 oluklu Çap sargılı DMSM	60 oluklu Akar DMSM	54 oluklu Yeni DMSM
Oluk sayısı	48	60	54
Her oluktaki sarım sayısı	42	40	42
Hava aralığı akı yoğunluğu [T]	0,85	0,85	0,9
Hava aralığı genişliği [mm]	1	1	0,5
Stator dış çapı [mm]	266	242	262
Rotor çapı [mm]	190	168	184
Motor uzunluğu [mm]	150	150	120
Rotor hacmi [m ³]	0,004133	0,003325	0,00319
Toplam hacim [m ³]	0,008576	0,006899	0,006469
Bakır ağırlığı [kg]	11	9,89	9,73
Mıknatıs ağırlığı [kg]	2	2,4	2,2
Stator çelik ağırlığı [kg]	43	66	43,3
Rotor çelik ağırlığı [kg]	23	30	25,3
Toplam ağırlık [kg]	79	108,29	80,56

Tablo 10. Üç farklı tip DMSM için elde edilen benzetim sonuçları
(Simulation results of three different types PMSM)

	48 oluklu Çap sargılı DMSM	60 oluklu Akar DMSM	54 oluklu Yeni DMSM
Giriş gücü [W]	6897	5405	5350
Çıkış gücü [W]	4000	4000	4000
Verim [%]	58	74	77,27
Moment [Nm]	244	235	242
Vuruntu momenti [Nm]	9,28	2	2,13

Tablo 11. 60 oluklu Akar motor ve 54 oluklu yeni motora ait maliyet analizi
(Cost analysis of the Akar motor with 60 slots and the new motor with 54 slots)

Kullanılan Malzeme Türü	Yer ve Birim Fiyat	60 oluklu Akar DMSM		54 oluklu Yeni DMSM	
		Miktar	Fiyat	Miktar	Fiyat
Stator (Silisli Sac)	3200 TL/ton	66 kg	211,2 TL	43,3 kg	138,56 TL
Rotor (Silisli Sac)	3200 TL/ton	30 kg	96 TL	25,3 kg	80,96 TL
Mil (Döküm Demir)	2400 TL/ton	11 kg	26,4 TL	9 kg	21,6 TL
Sargı (0,85 mm bakır)	129 TL/kg	9,89 kg	1275,81 TL	9,73 kg	1255,17 TL
Mıknatıs (N38SH)	30 TL/adet	2,4 kg (16 adet)	480 TL		
Mıknatıs (N45SH)	17,75 TL/adet			2,2kg (32adet)	568 TL
	TOPLAM		2089,41 TL		2064,29

kullanılan malzeme miktarı azaldığı için toplam fiyat artmamıştır. Asansör sistemine uygunluğu açısından öncelik arz eden tahrik motorunun uzunluğu kısaltılmış ve maliyeti arttırmadan önerilen 54 oluklu yeni motor üretilmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Wang J. H., Tan F. W., Jin R. L., Research on low-speed gearless permanent magnet synchronous motor for elevator drive, International Conference on Electrical Machines and Systems, Nanjing-Çin, 454-459, 27-29 Eylül, 2005.
- Ficheux R. L., Caricchi F., Crescimbin F., Honorati O., Axial-flux permanent-magnet motor for direct-drive elevator systems without machine room, IEEE Trans. Ind. Appl., 37 (6), 1693-1701, 2001.
- Salminen P., Niemela M., Pyhonen J., Mantere J., Performance analysis of fractional slot wound PM-motors for low speed applications, IEEE Industry Applications Conference, Seattle-A.B.D., 1032-1037, 3-7 Ekim, 2004.
- Bianchi N., Bolognani S., Pre M. D., Grezzani G., Design considerations for fractional-slot winding configurations of synchronous machines, IEEE Trans. Ind. Appl., 42 (4), 997-1006, 2006.
- Jung E., Yoo H., Sul S. K., Choi H. S., Choi Y. Y., A Nine-Phase Permanent-Magnet Motor Drive System for an Ultrahigh-Speed Elevator, IEEE Trans. Ind. Appl., 48 (3), 987-995, 2012.
- Cicalé S., Albini L., Parasiliti F., Villani M., Design of a Permanent Magnet Synchronous Motor with Grain Oriented electrical steel for Direct-drive elevators,

- International Conference on Electrical Machines, Marsilya- Fransa, 1256-1263, 2-5 Eylül, 2012.
7. Mu-han N., Hong-yan M., Comparative study on permanent magnet synchronous motor control systems in elevator, Chinese Control and Decision Conference, Changsha-Çin, 1568-1573, 31 Mayıs-2 Haziran, 2014.
 8. Wang G., Qi J., Xu J., Zhang X., Xu D., Antirollback Control for Gearless Elevator Traction Machines Adopting Offset-Free Model Predictive Control Strategy, IEEE Trans. Ind. Electron., 62 (10), 6194-6203, 2015.
 9. Tong-xu W., Hong-yan M., The research of PMSM RBF neural network PID parameters self-tuning in elevator, Chinese Control and Decision Conference, Qingdao-Çin, 3350-3354, 23-25 Mayıs, 2015.
 10. ThoughtCo. History of the elevator. <https://www.thoughtco.com/history-of-the-elevator-1991600>. Yayın tarihi Nisan 19, 2017. Erişim tarihi Eylül 11, 2017.
 11. Güzel B., EN 81-20 ve EN81-50 Standartlarının imalatçı firmalara ve montaj firmalarına getirdiği yeni gereksinimler, Asansör Sempozyumu, İzmir-Türkiye, 19-26, 13-15 Ekim, 2016.
 12. Türk Standartlar Enstitüsü. TS EN 81-20. Asansörler - yapım ve montaj için güvenlik kuralları – insan ve yük taşıma amaçlı asansörler –Bölüm 20: insan ve yük asansörleri, 2014.
 13. Wang G., Xu J., Li T., Zhang G., Zhan H., Ding L., Xu D., Weight-Transducerless Starting Torque Compensation of Gearless Permanent-Magnet Traction Machine for Direct-Drive Elevators, IEEE Trans. Ind. Electron., 61 (9), 4594 – 4604, 2014.
 14. Ersöz M., Öner Y., Bingöl O., Flux barrier TLA-type synchronous reluctance motor design and optimization, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 31 (4), 941-950, 2016.
 15. Bianchi N., Electrical Machine Analysis Using Finite Elements, CRC Press, Taylor & Francis Group, NewYork-A.B.D., 2005.
 16. Pyrhonen J., Jokinen T., Hrabovcova V., Design of Rotating Electrical Machines, John Wiley&Sons, Birleşik Krallık, 2008.
 17. Pyrhonen J., Jokinen T., Hrabovcova V., 6- Main Dimensions of a Rotating Machine, Design of Rotating Electrical Machines, John Wiley&Sons, Birleşik Krallık, 283-285, 2008.