

Doğrusal Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Doğrusal Olmayan Manyetik Eşdeğer Devre ve Sonlu Elemanlar Tabanlı Tasarımı

Non-Linear Magnetic Equivalent Circuit and Finite Element Analysis Based Design of a Linear Permanent Magnet Synchronous Motor

Ayşe Barış¹, Mehmet Güleç², Yücel Demir¹ ve Metin Aydın²

¹Ar-Ge Departmanı
MDS Motor Tasarım Ltd.
ayse@mdsmotor.com, yucel@mdsmotor.com

²Mekatronik Müh. Böl.
Kocaeli Üniversitesi
mehmet.gulec@kocaeli.edu.tr, metin.aydin@kocaeli.edu.tr

Özet

Doğrusal elektrik motorları, dişli kutusu gibi ekstra aktarma elemanlarına olan ihtiyacı ortadan kaldırdığı için özellikle otomasyon uygulamalarında sıklıkla tercih edilmektedir. Bu çalışmada sürekli mıknatıslı bir doğrusal senkron motorun (SMDSM) basit bir otomasyon uygulaması için 2-boyutlu (2B) Gauss-Siedel tabanlı doğrusal olmayan manyetik eşdeğer devre (MED) modeli oluşturulmuş ve hava aralığı, stator dişleri gibi kritik bölgelerdeki akı yoğunlukları hesaplanmıştır. Analitik olarak yapılan hesaplamalar ile zıt elektromotor kuvveti (EMK) gerilimi ve çıkış kuvveti elde edilmiştir. Ayrıca motorun detaylı sonlu elemanlar analizi (SEA) gerçekleştirilerek MED modeli ve SEA sonuçlarının karşılaştırması yapılmıştır.

Anahtar kelimeler: doğrusal motor, doğrusal SM senkron motor, sürekli mıknatıslı senkron motor, senkron motor

Abstract

Linear motors are often used in the automation applications since they resolve the demand for the extra transmission components such as gearboxes. In this study, a two-dimensional (2D) Gauss-Siedel based non-linear magnetic equivalent circuit (MEC) model of a permanent magnet linear synchronous motor (PMLSM) is investigated for a simple automation application and flux densities at the critical regions such as air gap and stator teeth are calculated. The back electromotive force (EMF) voltage and the output force are obtained by analytical calculations. Finally, detailed finite element analysis (FEA) of the PMLSM is performed to compare the results obtained from MEC and FEA.

Keywords: linear motor, linear PM synchronous motor, permanent magnet synchronous motor, synchronous motor

1. Giriş

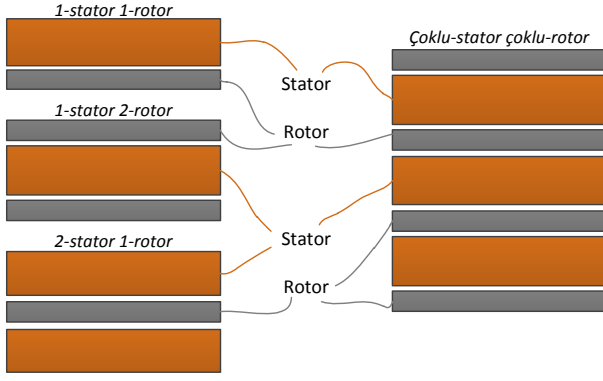
Doğrusal motorların tasarım prensipleri uzun yıllardır bilinmesine rağmen gelişimi son yıllarda, özellikle de kullanılan yazılımların ve analiz bilgisayarlarının gelişmesi ile artış göstermiştir. Güç elektroniği alanında yaşanan gelişmeler

sürücü sistemlerini de geliştirmiş ve bu motorların dinamik özelliklerinin iyileştirilmesiyle ve hızında artış ile kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır.

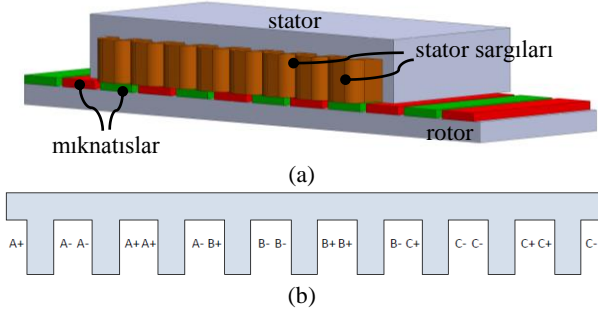
Doğrusal motorlar asenkron ya da fırçalı DC olabileceği gibi senkron motor olarak da tasarlanmakta ve kullanılmaktadır. Günümüzde doğrusal sürekli mıknatıslı senkron motorlar diğer topolojilere kıyasla daha sık uygulamalarda görülmektedir. Bu motorlar döner motorların bir düzlem üzerine açılmış hali olarak düşünülebilir. Bu motorlarda, bobin ve mıknatısların elektromanyetik olarak etkileşmesiyle manyetik enerji yüksek verimli doğrusal mekanik enerjiye dönüştürülür. Bu da döner motorlarda doğrusal hareket elde etmek amacıyla kullanılan kayış kasnak, dişli mekanizması gibi yapıları ortadan kaldırarak motorların daha yüksek hızlara ulaşabilmelerini, hassas konumlama yapabilmelerini, hızlı cevap yeteneğine sahip olmalarını ve geniş aralıkta kontrol edilebilmelerini sağlar. Bunun yanında doğrusal motorların kayıplarının düşük olması ve kuvvet yoğunluğunun yüksek olması gibi etmenler de günümüzde bu tip motorların endüstride kullanımını da arttırmaktadır [1]-[3].

Sürekli mıknatıslı (SM) doğrusal motorlarda bahsedilen avantajların yanında vuru kuvveti, kuvvet dalgalanması gibi motor performansını etkileyen dezavantajlar da mevcuttur. Bu dezavantajlar doğrusal motor tasarımında yapılan optimizasyonlar ve belirlenen oluk-kutup kombinasyonları sayesinde ortadan kaldırılabilir [5]-[11]. SM doğrusal motor yapısı farklı stator ve rotor sayılarına sahip olabilir: 1-Stator 1-rotor, 2-stator 1-rotor, 1-stator 2-rotor ya da çoklu-rotor çoklu-stator alternatifleri (Şekil 1) uygulamalarda sıklıkla görülmektedir. Bu çalışmada kullanılan 1-rotor 1-statorlu doğrusal motor 3B yapısı, sargılar dahil stator ve rotor bileşenleri ise Şekil 2'de gösterilmiştir.

SM doğrusal motorlarda akı yoğunlukları motor performansını etkileyen önemli parametrelerden birisidir. Bu sebeple doğrusal motorların kritik bölgelerindeki akı yoğunlukları temelde sayısal yöntemler [4], manyetik alan hesabı [5] ve



Şekil 1: Doğrusal motor yapısı alternatifleri



Şekil 2: Bu çalışmada kullanılan 1-stator 1-rotorlu SM doğrusal motor (a) 3B modeli ve (b) sargı şeması

MED modeli kullanılarak elde edilmektedir [12]. MED modeli, SM motorlarda motorun tasarımı aşamasında sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Basitleştirilmiş MED modeli, motorun basit olarak akı yoğunluklarının tespitinde sayısal yöntemlere göre ciddi oranda zamandan tasarruf sağlaması bakımından oldukça büyük avantaj sağlamaktadır. Doğrusal olmayan MED modelinde çok sayıda düğüm noktası ve relüktanslar kullanılarak detaylı bir eşdeğer devre modeli oluşturulur. Bu tip modeller 2B ve 3B olarak gerçekleştirilerek daha detaylı hale getirilebilir [13]-[19].

Bu çalışmada bir SMDSM 2B doğrusal olmayan MED modeli oluşturulmuş ve ön tasarımı yapılarak kritik bölgelerdeki akı yoğunlukları tespit edilmiştir. Temel ve en çok kullanılan yöntemlerden biri olan Gauss-Siedel ile doğrusal olmayan model elde edilmiş ve modeldeki bütün değişken relüktansların BH eğrisi hesaba katılmıştır. Ardından gerçekleştirilen hesaplamalar ile motor zıt-EMK gerilimi ve çıkış kuvveti elde edilmiştir. Sonrasında motorun sonlu elemanlar analizi (SEA) gerçekleştirilerek MED modeli ve SEA sonuçlarının karşılaştırması yapılmıştır. Motor tasarımı sonlandırılarak MED ve SEA farklılıkları vurgulanmış ve modellemelerin avantaj ve dezavantajları tasarımcılara ve araştırmacılara sunulmuştur.

2. SM doğrusal senkron motor ön tasarımı

Doğrusal motor ön tasarımı SM motor temel denklemleri kullanılarak gerçekleştirilmiş ve motor fiziksel parametreleri belirlenmiştir. Motor stator sargılarında yüksüz durumda mıknatıs uyarım akısı Φ_m tarafından endüklenen gerilim

ifadesi aşağıda verilmiştir:

Tablo 1: Doğrusal motorun tasarım ölçütleri

Sürekli Kuvvet	540 N
Sürekli Akım	15 A
Max. Motor Uzunluğu	240 mm
Max. Kuvvet	1100 N
DC Bara Gerilimi	310 V
Hız	2 m/s

$$E_j = \pi \sqrt{2} f S k_s \Phi_m \quad (1)$$

burada S sarım sayısını, k_s sargı faktörünü ve f ise frekansı ifade etmektedir. Mıknatıs uyarım akısı ifadesi Φ_m ise:

$$\Phi_m = \frac{2}{\pi} \tau L_r B_a \quad (2)$$

burada τ kutup adımını, L_r rotor uzunluğunu ve B_a hava aralığı manyetik akı yoğunluğunun temel harmoniğidir. Sargı faktörü ifadesi ise dağılım faktörü k_d , adım faktörü k_a ve kayk faktörü k_k ile ifade edilebilir:

$$k_s = k_d k_a k_k \quad (3)$$

Yüzeyden mıknatıslı motorun d-eksen akımı sıfır iken rotora etkileyen kuvvet ifadesi aşağıda verilmiştir:

$$F_r = \frac{m I_q E_j}{v_s} \quad (4)$$

burada I_q q-eksen akımını, m faz sayısını ve v_s ise doğrusal senkron hızı ifade etmektedir.

Tablo 1'de verilen tasarım ölçütleri dikkate alınarak yukarıdaki denklemler ile doğrusal motorun ön tasarımı gerçekleştirilmiş ve geometrik boyutları elde edilmiştir. Böylece, kesir oluklu bir tasarım gerçekleştirilmiş ve 9-oluk 8-kutuplu bir model ön görülmüştür.

3. SM Doğrusal senkron motor MED modeli

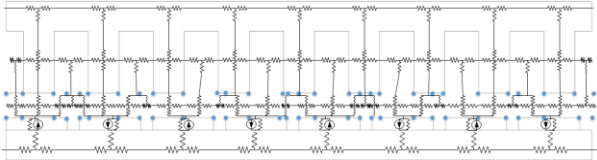
Sürekli mıknatıslı doğrusal bir senkron motorun 2B gelişmiş manyetik eşdeğer devre modeli nu bölümde oluşturulmuş ve sunulmuştur. Oluşturulan manyetik eşdeğer devre modelinde, motorun kritik bölgelerine düğüm noktaları belirlenmiş ve her bir düğüm noktası arasında 2 boyutta relüktanslar tanımlanmıştır. Bu yöntemle oluşturulan doğrusal senkron motorun manyetik eşdeğer devre modeli Şekil 3'de gösterilmiştir. Modelde yaklaşık olarak 350 adet relüktans tanımlanması ve 50 adet matris oluşturulması gerekmektedir. Bu durum doğrusal motorun manyetik eşdeğer devre modelini oldukça karmaşık bir yapıya dönüştürmektedir. Yapının relüktans sayısının fazla olması ve manyetik eşdeğer devre modelinin karmaşıklığı işlem yükünü arttıracığından motorun sadece 1-oluk ve 1-mıknatıs dikkate alınarak MED modellemesi gerçekleştirilmiştir. 1-oluk 1-mıknatıs modeli, bu modelin akı yolları, akı yollarına bakılarak belirlenen düğüm noktaları ve 2B oluşturulan manyetik eşdeğer devre modeli Şekil 4'de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi model yüksüz durum için incelenmiştir. Dolayısıyla, manyetik eşdeğer devre modeline stator sargılarının oluşturacağı EMK bileşeni eklenmemiştir. Manyetik eşdeğer devre modelinde, stator ve rotordaki relüktansların manyetik geçirgenlikleri değişken, mıknatıs ve hava aralığındaki relüktanslar ise sabit olarak tanımlanmıştır. Değişken ve sabit olan relüktansların formülü aşağıdaki sırası ile verilmiştir.

$$\mathfrak{R}_d = \frac{1}{\mu_0 \mu_d} \frac{l}{A} \quad (5)$$

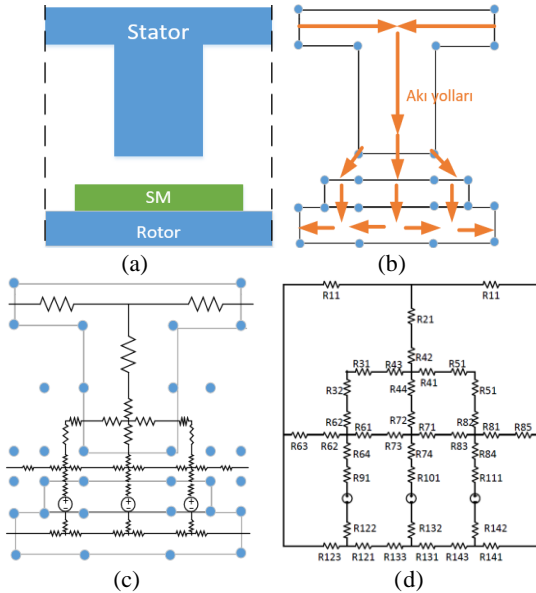
$$\mathfrak{R}_s = \frac{1}{\mu_0 \mu_s} \frac{l}{A} \quad (6)$$

burada \mathfrak{R}_d doğrusal olmayan, \mathfrak{R}_s ise sabit relüktansları temsil etmektedir. (5) ve (6) formüllerin, μ_0 boşluğun manyetik geçirgenliğini, μ_d BH eğrisinden elde edilen değişken manyetik geçirgenliği, μ_s sabit manyetik geçirgenliği (mıknatıs için 1.05 ve hava için 1), l akı yolu uzunluğunu ve A ise kesit alanını temsil etmektedir.

Doğrusal olmayan modellemede kullanılan Gauss-Siedel yöntemi iteratif bir yöntem olup, amacı tanımlı hata yüzde değerini sağlayacak şekilde sonuçlar elde etmektir. Gauss-Siedel yönteminde her bir iterasyon sonunda BH eğrisinden yeni bir değer alınarak sonuca yakınsamaktadır. Doğrusal olmayan modelleme iş akış planı Şekil 5'de gösterilmiştir. Hesaplamaya ilk başta değişkenlere başlangıç değerlerinin atanmasıyla başlanmaktadır. Daha sonra sırası ile relüktanslar, akılar ve manyetik akı yoğunlukları hesaplanmaktadır. Hesaplamalar bittikten sonra karar verme aşamasında hesaplanan manyetik akı yoğunluğu ile bir önceki iterasyonda hesaplanan manyetik akı yoğunluğu değeri karşılaştırılmakta ve eğer hata yüzdesi istenilen değer altında ise süreç sona ermektedir. Eğer hata yüzdesi yüksek ise döngü, BH eğrisi



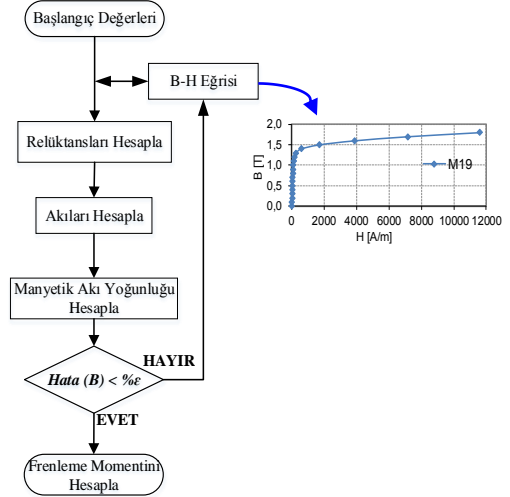
Şekil 3: 9-oluk 8-kutuplu motorun karmaşık manyetik eşdeğer devre modeli



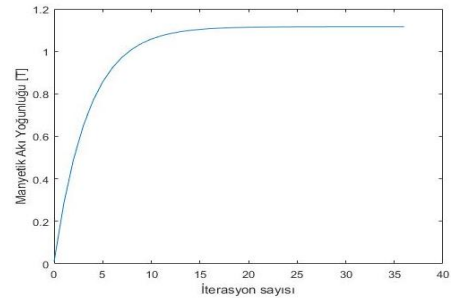
Şekil 4: SM Doğrusal motorun (a) basitleştirilmiş 1-oluk 1-mıknatıs modeli, (b) akı yolları, (c) belirlenen düğüm noktaları ve (d) manyetik eşdeğer devre modeli

üzerinden yeni verilerin güncellenmesi ile tekrar başa dönmektedir.

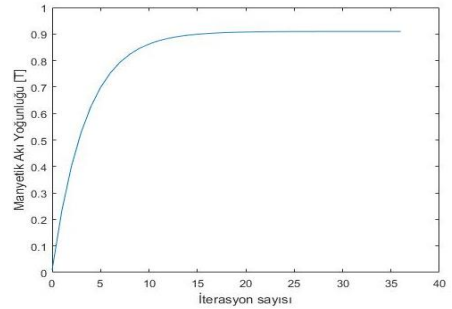
Gerçekleştirilen hesaplamalar sonucunda stator dış ortası, stator dış başı ve hava aralıklarındaki manyetik akı yoğunluklarının değişimi sırasıyla Şekil 6 ve Şekil 8 arasında verilmiştir. Buna göre stator dış ortası manyetik akı yoğunluğu 1,12 T, stator dış başı manyetik akı yoğunluğu 0,91 T ve hava aralığı manyetik akı yoğunluğu 0,85 T seviyelerinde elde edilmiştir. Yaklaşık bir model kullanılarak elde edilen sonuçlar, bir sonraki bölümde gerçekleştirilecek detaylı SEA sonuçları ile karşılaştırılacaktır ve MED modelinin doğruluğu sınanacaktır.



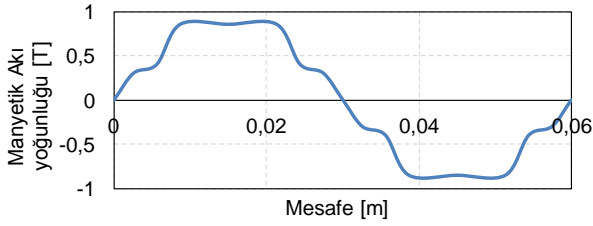
Şekil 5: Doğrusal olmayan modelleme iş akış planı



Şekil 6: Doğrusal olmayan MED modeli ile elde edilen stator dış ortası manyetik akı yoğunluğu



Şekil 7: Doğrusal olmayan MED modeli ile elde edilen stator dış başı manyetik akı yoğunluğu

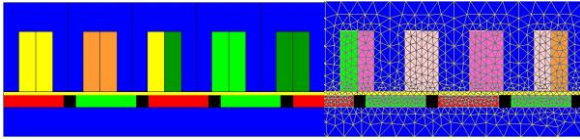


Şekil 8: Hava aralığı ortasında yüksüz durum manyetik akı yoğunluğu değişimi

4. 2D-SEA ile SMDSM performans kontrolü

Bu kısımda 9-oluk 8-kutuplu doğrusal motorun 2B SEA analizleri gerçekleştirilmiştir. Flux® 2B yazılımı kullanılarak analizleri gerçekleştirilen açık oluklu doğrusal motor modeli ve motor ağ yapısı Şekil 9'da gösterilmiştir. Motorda enerji dönüşümünün gerçekleştiği hava aralığında ağ yapısı oldukça yoğun olarak oluşturulmuştur. Bu durum motorun analizinde sonuçların doğruluğunun artmasını sağlamaktadır.

Motorda rotor ve stator sac malzemesi olarak M19 silisli çelik, mıknatıs malzemesi olarak ise B_r değeri 1,15 T seviyelerinde olan NdFeB türü bir mıknatıs kullanılmıştır. Yüklü ve yüksüz durum SEA analizleri gerçekleştirilen motorun stator ve rotor nüvesi, stator dişi ve hava aralığı gibi kritik bölgelerindeki akı yoğunlukları ile motor akı çizgileri elde edilmiştir. Ayrıca, motora ait vuru kuvveti, zıt-EMK gerilimi, çıkış kuvveti ve kuvvet dalgalanması gibi performans verileri de SEA analizleriyle elde edilmiştir.

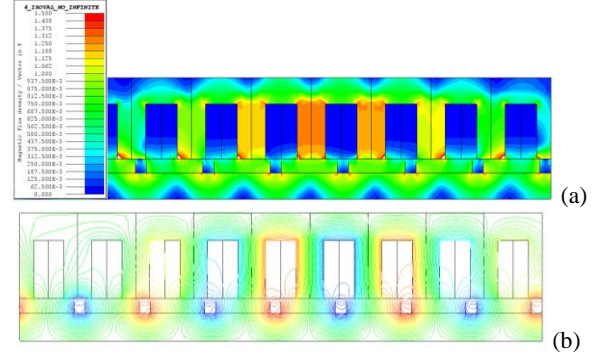


Şekil 9: 9-oluk 8-kutuplu doğrusal senkron motor SEA modeli ve ağ yapısı

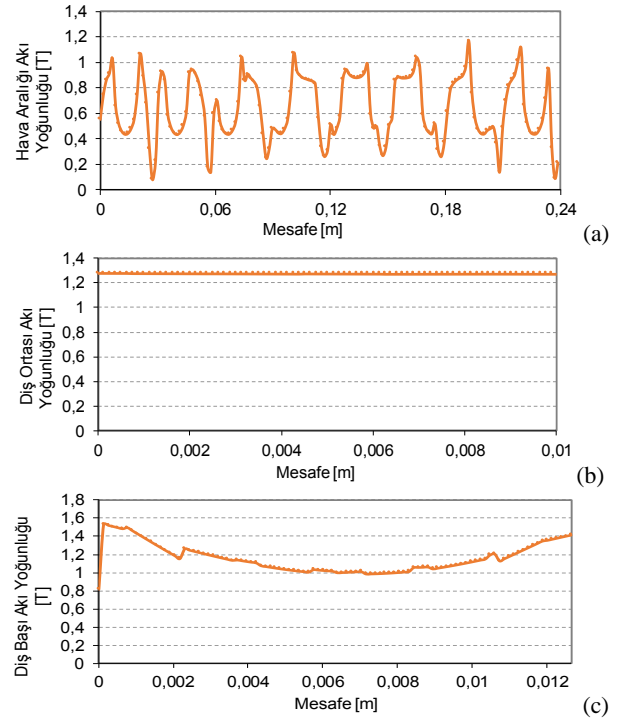
4.1. Yüksüz durum analizleri

9-oluk 8-kutuplu motorun yüksüz durum analizi sonucu elde edilen akı yoğunlukları ve akı çizgileri Şekil 10'da verilmiştir. Buna göre ortalama hava aralığı akı yoğunluğu 0,64 T, ortalama stator diş ortası için 1,28 T ve ortalama stator diş başı için 1,15 T olarak elde edilmiştir. Bu manyetik akı yoğunluklarının değişimi Şekil 11'de gösterilmiştir.

Tepe değeri 1,1 N seviyelerinde olan vuru kuvvetinin değişimi ise Şekil 12'de verilmiştir. Bu değer ortalama çıkış kuvvetinin %0,2'sine karşılık gelmektedir. Sürekli mıknatıslı doğrusal motorlarda vuru kuvveti mekanik titreşim, akustik gürültü, hız ve kuvvet dalgalanması gibi problemlere sebep olduğundan vuru kuvvetinin ortalama çıkış kuvvetine göre yüzdesinin düşük olması doğrusal motorlar için istenilen özelliklerdendir [20]. Burada elde edilen %0,2'lik oran oldukça düşük bir değer olduğunu unutulmamalıdır.

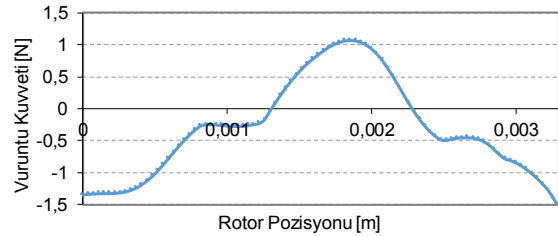


Şekil 10: 9-oluk 8-kutuplu doğrusal senkron motor akı yoğunluğu dağılımı (a) ve akı çizgileri (b).

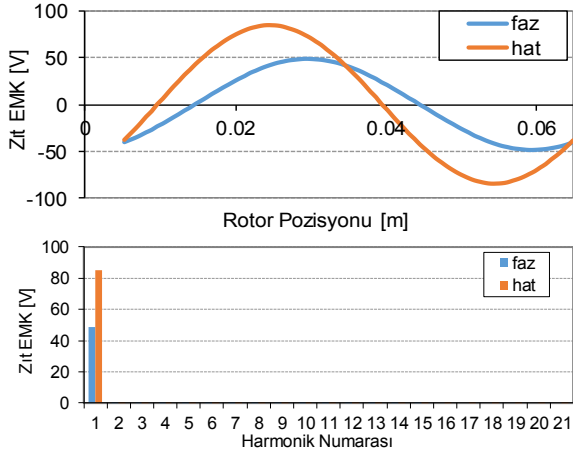


Şekil 11: 9-oluk 8-kutuplu doğrusal senkron motorun (a) hava aralığı, (b) stator diş ortası, (c) stator diş başı akı yoğunlukları

Motorun 2 m/s hız değeri için zıt-EMK faz ve hat gerilimleri ve harmonik içerikleri Şekil 13'de gösterilmiştir. Hat geriliminin tepe değeri 85 V, hat gerilimi toplam harmonik bozunumu (THB) değeri ise %0,37 seviyelerindedir.



Şekil 12: 9-oluk 8-kutuplu doğrusal senkron motor vuru kuvveti değişimi (SEA)



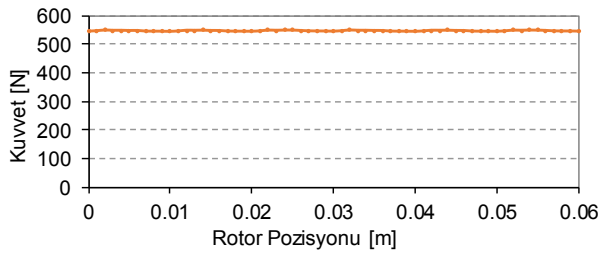
Şekil 13: 9-oluk 8-kutuplu dsüreklî mıknaıslı doğrusal senkron motor faz ve hat gerilimi ve harmonikleri (2m/s hızda) (SEA)

4.2. Yüklü durum analizleri

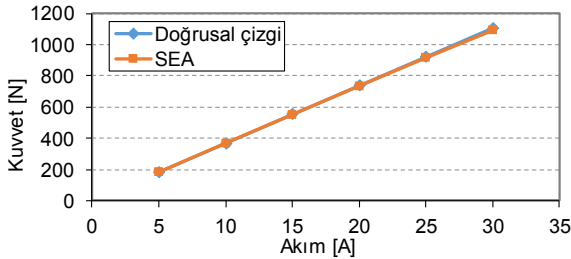
Motorun 15 A faz akımında gerçekleştirilen yüklü durum analizleri sonucu elde edilen çıkış kuvveti değişimi Şekil 14'de gösterilmiştir. Burada ortalama kuvvet 549 N, ortalama kuvvete göre kuvvet dalgalanması %1 seviyelerindedir. Ayrıca Şekil 15'de verilen kuvvet-akım grafiğinde motorun çıkış kuvvetinin herhangi bir doyum problemi olmadan akıma bağlı olarak doğrusal bir şekilde arttığını göstermektedir. Tasarlanan SM doğrusal motor 30 A akım altında anlık olarak 1110 N kuvvet kabiliyetine sahiptir.

5. MED ile SEA sonuçlarının karşılaştırılması

Bu bölümde, MED ve SEA analizleri sonucunda elde edilen hava aralığı, stator dış başı ve stator dış ortası akı yoğunlukları ile zıt-EMK gerilimi ve çıkış kuvveti verileri yoğunlukları arasında yaklaşık olarak %5 fark olduğu görülmüştür. Bunun



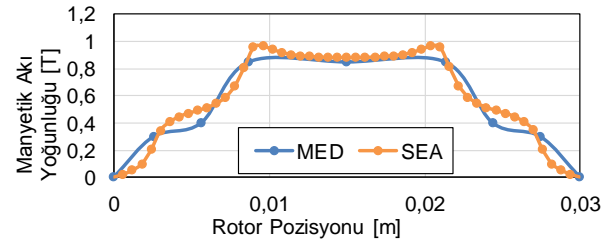
Şekil 14: 9-oluk 8-kutuplu doğrusal senkron motor çıkış kuvveti değişimi (15 A akımda) (SEA)



Şekil 15: 9-oluk 8-kutuplu doğrusal motor kuvvet-akım değişimi (SEA)

yanında stator dış ortası ve zıt-EMK karşılaştırılmıştır. Şekil 16'da verilen hava aralığı akı gerilimi temel harmonik tepe değeri karşılaştırmaları da gerçekleştirilmiş, SEA ve MED sonucu elde edilen veriler ve aralarındaki farklar da Tablo 2'de verilmiştir.

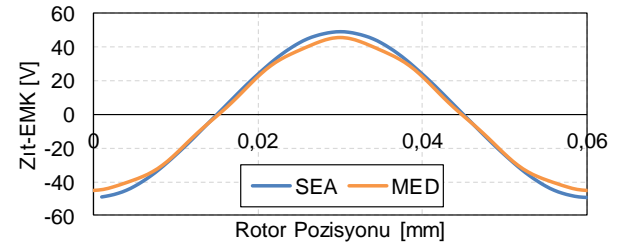
Şekil 17'de MED ve SEA sonucu elde edilen zıt-EMK gerilimleri karşılaştırılmıştır. Zıt-EMK gerilimlerinin tepe değerleri arasında %7'lik bir fark söz konusudur. Şekil 18'de verilen çıkış kuvvetleri arasında ise %14'lük bir fark olduğu tespit edilmiştir. Akı yoğunlukları, zıt-EMK gerilimleri ve çıkış arasındaki farklar kullanılan 1-oluk ve 1-mıknaıslıstan oluşan MED modeli ve varsayımlar göz önüne alındığında bu farkların makul seviyelerde olduğu söylenebilir.



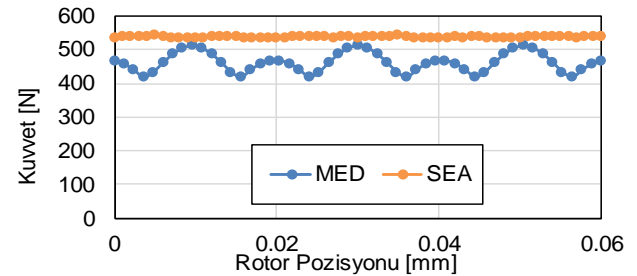
Şekil 16: Hava aralığı akı yoğunlukları karşılaştırması: MED ve 2D-SEA sonuçları

Tablo 2: SEA ve MED ile elde edilen sonuçların karşılaştırması

	MED	SEA	% Fark
Stator dış ortası akı yoğ. (T)	1,12 T	1,28 T	12,5
Hava aralığı akı yoğ. (T)	0,85 T	0,9 T	5,5
Temel harmonik tepe değeri (V)	45,6 V	49,4 V	7



Şekil 17: Zıt-EMK gerilimlerinin karşılaştırması



Şekil 18: Çıkış kuvvetlerinin karşılaştırması

6. Sonuçlar

Bu çalışmada, basit bir otomasyon uygulaması için bir doğrusal sürekli mıknatıslı senkron motor tasarımı gerçekleştirilmiş, doğrusal motorun 2B doğrusal olmayan MED modeli oluşturulmuş ve motorun kritik bölgelerdeki akı yoğunluğu değişimleri elde edilmiştir. SMDSM'nin zıt-EMK gerilimi, hava aralığı akı yoğunluğu değişimi ve çıkış kuvveti gibi performans parametreleri analitik olarak elde edilerek çalışmada sunulmuştur. Ayrıca, detaylı sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilerek MED modeli ile SEA sonuçları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalı sonuçlardan, özellikle, enerji dönüşümünün gerçekleştiği hava aralığındaki akı yoğunlukları arasındaki farkın makul seviyelerde kaldığı sonucu çıkarılabilir. Buna ek olarak, MED modelinin 1-ölç 1-kutup şeklinde oluşturulmasına rağmen analitik sonuçların SEA sonuçları ile uyum içerisinde olduğu çalışma sonucunda görülmektedir.

7. Kaynaklar

- [1] Jiefan, C., Chengyuan, W. and Guihong, F., "Force analysis of short pitch permanent magnet linear servo motors", *The Fifth International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, pp. 1596-1598 Vol.2, 2003.
- [2] Jastrzembki, J. P. and Ponick, B., "Different methods for reducing detent force in a permanent magnet linear synchronous motor", *IECON 2010- 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, Glendale, AZ*, pp. 823-828, 2010.
- [3] Jiang, S., Ye, P., Jin, G., Qi, Y. and Lin, H., "Optimization design to reduce detent force and standardize back-EMF for permanent magnet synchronous linear motor", *IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Florence*, 2016, pp. 1716-1720.
- [4] Zheng, L., Jin, J., Guo, Y. and Zhu, J., "Electromagnetic analysis of a permanent magnet linear synchronous motor", *2008 International Conference on Electrical Machines and Systems, Wuhan*, 2008, pp. 3453-3458.
- [5] Wang, X., Wang, P. and Xu, X., "Magnetic field analytical calculation of the permanent magnet synchronous linear motor with fractional slot concentrated windings", *2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Hangzhou*, 2014, pp. 1762-1767.
- [6] Youn, S. W., Lee, J. J., Yoon H. S. and Koh, C. S., "A New Cogging-Free Permanent-Magnet Linear Motor", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 44, no. 7, pp 1785-1790, July 2008.
- [7] Shi, J., Kong, H., Huang, L., Lu, Q. and Ye, Y., "Influence of flux gaps on the performance of modular PM linear synchronous motors", *2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Hangzhou*, 2014, pp. 1566-1571.
- [8] Bai, Y., Yang, T. and Kou, B., "Reducing detent force and three-phase magnetic paths unbalance of PM linear synchronous motor using modular primary iron-core structure", *2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Hangzhou*, 2014, pp. 1743-1748.
- [9] Ahn, H. J., Lee, S. H., Lee, D. Y., Jang, K. B. and Kim, G. T., "A Study on the Characteristics of PMLSM According to Permanent Magnet Arrangement", *2008 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Edmonton, Alta.*, 2008, pp. 1-6.
- [10] Yao, Y., Chen, Y., Lu, Q., Huang, X. and Ye, Y., "Analysis of thrust ripple of permanent magnet linear synchronous motor with skewed PMs", *2015 18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Pattaya*, 2015, pp. 1141-1146.
- [11] Li, C., Kou, B. and Cheng, S., "Research on a large thrust force permanent magnet synchronous linear motor used in space electromagnetic launcher", *2012 16th International Symposium on Electromagnetic Launch Technology, Beijing*, 2012, pp. 1-4.
- [12] Vaez-Zadeh, S. and Isfahani, A. H., "Enhanced Modeling of Linear Permanent-Magnet Synchronous Motors", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 43, no. 1, pp. 33.
- [13] Qu, R. and Lipo, T. A., "Analysis and modeling of air-gap and zigzag leakage fluxes in a surface-mounted permanent-magnet Machine", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 40, no. 1, pp. 121-127, Jan.-Feb. 2004.
- [14] Tavana, N. R. and Dinavahi, V., "Design of slotted permanent magnet linear synchronous motor for improved thrust density", *2013 International Electric Machines & Drives Conference, Chicago, IL*, 2013, pp. 1225-1228.
- [15] Sheikh-Ghalavand, B., Vaez-Zadeh S. and Isfahani, A. H., "An Improved Magnetic Equivalent Circuit Model for Iron-Core Linear Permanent-Magnet Synchronous Motors", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 46, no. 1, pp. 112-120, Jan. 2010.
- [16] Yeo, H. K., Lim, D. K., Woo, D. K., Ro, J. S. and Jung, H. K., "Magnetic Equivalent Circuit Model Considering Overhang Structure of a Surface-Mounted Permanent-Magnet Motor", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 51, no. 3, pp. 1-4, March 2015.
- [17] Kazan, E. and Onat, A., "Modeling of Air Core Permanent-Magnet Linear Motors With a Simplified Nonlinear Magnetic Analysis", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 47, no. 6, pp. 1753-1762, June 2011.
- [18] Song, J. Y., Lee, J. H., Kim, D. W., Kim, Y. J. and Jung, S. Y., "Analysis and Modeling of Concentrated Winding Variable Flux Memory Motor Using Magnetic Equivalent Circuit Method", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 53, no. 6, pp. 1-4, June 2017.
- [19] Ferkova, Z., Franko, M., Kuchta, J. and Rafajdus, P., "Electromagnetic design of Ironless Permanent Magnet Synchronous Linear Motor", *2008 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, Ischia*, 2008, pp. 721-726.
- [20] Zhu, Y. W., Koo, D. H., Cho, Y. H., "Detent Force Minimization of Permanent Magnet Linear Synchronous Motor by Means of Two Different Methods", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 44, no. 11, pp. 4345-4348, Nov. 2008.