

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BİR DOĞRUSAL KALICI MIKNATISLI SENKRON MOTORUN
YARDIMCI DİŞ VE KAYKI TEKNİKLERİ İLE VURUNTU
KUVVETİNİN ENİYİLEŞTİRİLMESİ

AYŞE BODUROĞLU

KOCAELİ 2019

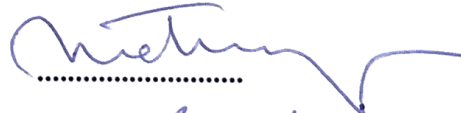


KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BİR DOĞRUSAL KALICI MIKNATISLI SENKRON
MOTORUN YARDIMCI DİŞ VE KAYKI TEKNİKLERİ İLE
VURUNTU KUVVETİNİN ENİYİLEŞTİRİLMESİ

AYŞE BODUROĞLU

Doç. Dr. Metin AYDIN
Danışman, Kocaeli Üniversitesi
Prof. Dr. Zafer BİNGÜL
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi
Prof. Dr. Ahmet M. HAVA
Jüri Üyesi, ODTÜ


.....

.....

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 09.07.2019

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Doğrusal motorların tasarım prensipleri uzun yıllardır bilinmesine rağmen gelişimi ve üretimi son yıllarda artış göstermiştir. Güç elektroniği alanında yaşanan gelişmeler sürücü sistemlerini de geliştirmiş ve bu motorların dinamik özelliklerinin iyileştirilmesiyle kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır. Ayrıca doğrusal motorların aktarma organlarına ihtiyaç duymadan doğrusal hareket üretmesi, bu sayede maliyetten ve hacimden tasarruf sağlaması bu motorlara olan ilgiyi günden güne daha da artırmaktadır.

Gelişen teknolojiyle birlikte doğrusal motorların daha fazla kullanılmaya başlanması bu motorların tasarımına ve üretimine olan ilgiyi arttırmış, bu alandaki uluslararası pazar gitgide büyümeye başlamıştır. Ulusal pazarın yetersiz olması, ülkemizde bu alanda yeterli çalışma yapılmaması ve kaynakların azlığı danışman hocam Doç. Dr. Metin Aydın tarafından büyük bir öngörüyle fark edilmiş ve kendisi beni bu alanda araştırma yapmaya sevk etmiştir. Bu sebeple bu çalışmada özgün tasarım ve tamamen yerli imkanlarla üretilen bir 1-iten 1-izleyenli doğrusal senkron motor tasarımı, üretimi ve doğrulaması gerçekleştirilmiştir.

Bu bağlamda çalışmalarımdaya tecrübesiyle beni her zaman yönlendiren, tez çalışmamın başından sonuna kadar beni titizlikle takip eden değerli hocam Doç. Dr. Metin Aydın'a, bilgi birikimi ve desteğini esirgemeyen hocam Dr. Mehmet Güleç'e, yardımlarından dolayı Sn. Yücel Demir'e teşekkür ederim. Tez kapsamında ortaya çıkan motor prototipi Kocaeli Üniversitesi BAP biriminin destekleriyle üretilmiştir (Proje no: 2019/045). Katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Beni bugünlere getiren sevgisini, desteğini ve inancını benden esirgemeyen güç kaynaklarım annem Aysel Barış ve babam Rifat Barış'a, paylaşmak nedir bana öğreten, bu dünyanın onlar için her zaman daha iyi bir yer olmasını dilediğim kardeşlerim İrem Barış ve Ece Barış'a, son olarak bana her zaman güvenen ve her konuda yanımda olan hayatımın aşkı, eşim Osman Boduroğlu'na teşekkür ederim.

Haziran -2019

Ayşe BODUROĞLU

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ÖZET.....	x
ABSTRACT.....	xi
GİRİŞ	1
1. DOĞRUSAL MOTOR SİSTEMLERİ.....	4
1.1. Kalıcı Mıknatıslı Doğrusal Senkron Motorlar	7
1.1.1. Klasik KM doğrusal senkron motor tipleri	9
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	12
2.1. Yayın Araştırması	12
2.2. Patent Araştırması	19
3. KM DOĞRUSAL SENKRON MOTOR ÖN TASARIMI	23
3.1. Tasarım Kriterleri	23
3.2. KM Senkron Doğrusal Senkron Motor Temel Denklemleri.....	24
3.3. KM Doğrusal Senkron Motor Manyetik Eşdeğer Devre Modeli	27
3.3.1. Doğrusal manyetik eşdeğer devre analizi	27
3.3.2. 9-Oluk 8-kutuplu KM doğrusal senkron motorların doğrusal olmayan manyetik eşdeğer devre analizi.....	29
3.4. Ön Tasarım Motor SEA Performans Sonuçları.....	33
3.4.1. Yüksüz durum analizleri	33
3.4.2. Yüklü durum analizleri	35
3.5. Ön Tasarım Motor MED ve SEA Performans Sonuçlarının Karşılaştırılması	35
4. KM DOĞRUSAL SENKRON MOTOR SONLU ELEMAN ANALİZLERİ.....	38
4.1. KM Doğrusal Senkron Motor Ön Tasarım SEA Sonuçları.....	39
4.1.1. Yüksüz durum sonuçları	40
4.1.2. Yüklü durum sonuçları.....	41
4.2. KM Doğrusal Senkron Motorun Oluk Açıklığı Optimizasyonu	41
4.3. KM Doğrusal Senkron Motorun Yardımcı Diş Optimizasyonları	42
4.3.1. Yardımcı diş parametrelerinin her birinin motor performansına etkisi	43
4.3.2. Optimum yardımcı diş boyutlarının elde edilmesi.....	45
4.3.3. Yardımcı diş radius verilmesinin motor performansına etkisi	46
4.4. KM Doğrusal Senkron Motorun Mıknatıs Kaykısı Optimizasyonu	48
4.4.1. Klasik kaykısı analizleri.....	48
4.4.2. V şekilli kaykısı analizleri	48
4.5. Nihai Tasarım KM Doğrusal Senkron Motor Performans Sonuçları.....	52
4.5.1. Nihai tasarım motor yüksüz durum performans sonuçları.....	52
4.5.2. Nihai tasarım motor yüklü durum performans sonuçları	53
4.5.3. Nihai tasarım motor 2B ve 3B SE analizlerinin karşılaştırılması	53

4.6. Ön Tasarım ve Nihai Tasarım KM Doğrusal Senkron Motor Performans Karşılaştırması	55
5. ÖZGÜN KM DOĞRUSAL SENKRON MOTOR PROTOTİP ÜRETİMİ, TEST SİSTEMİ VE PERFORMANS TESTLERİ	56
5.1. Özgün KM Doğrusal Senkron Motor Prototip Üretimi.....	56
5.1.1. Motor bileşenlerinde kullanılan malzemeler ve üretim yöntemleri.....	56
5.1.2. KM doğrusal senkron motor test sistemi	59
5.2. Motor Performans Testleri	61
5.2.1. Yüksüz durum performans testleri.....	61
5.2.2. Yüklü durum performans testleri	63
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	64
KAYNAKLAR	65
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	70
ÖZGEÇMİŞ	71



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Doğrusal motorların sınıflandırılması.....	4
Şekil 1.2.	Karşılıklı mıknatıslar ile oluşturulan doğrusal hareket.....	5
Şekil 1.3.	1-iten 1-izleyenli doğrusal senkron motor yapısı	6
Şekil 1.4.	Bir hassas pozisyonlama sisteminde döner motor (a) ve doğrusal motor (b) kullanımı	7
Şekil 1.5.	KM doğrusal senkron motor çeşitleri, a) yassı tek taraflı ve çift taraflı doğrusal senkron motorlar, b) Silindirik doğrusal senkron motor, c) çapraz akılı doğrusal senkron motor, (d) yassı oluksuz ve oluklu doğrusal senkron motorlar	8
Şekil 1.6.	Silindirik doğrusal senkron motor yapısı.....	9
Şekil 1.7.	Nüvesiz doğrusal senkron motor yapısı.....	10
Şekil 1.8.	Nüveli doğrusal senkron motor yapısı	10
Şekil 1.9.	Oluksuz doğrusal senkron motor yapısı.....	11
Şekil 2.1.	Önerilen manyetik eşdeğer devre modeli	13
Şekil 2.2.	Referans alınan 9-oluk 8-kutup motor	14
Şekil 2.3.	Standart ve N parçaya bölünmüş adım kaykısı modelleri	16
Şekil 2.4.	Üçgen yardımcı diş eklenmiş 9-oluk 8-kutup motor	17
Şekil 2.5.	Kaykılı, yardımcı diş eklenmiş motor modeli	18
Şekil 2.6.	Parçalı iten yapısı.....	20
Şekil 2.7.	İtenine üçgen yardımcı diş eklenmiş DSM.....	20
Şekil 2.8.	Son etkisini azaltmak için önerilen DSM	20
Şekil 2.9.	Önerilen yardımcı diş yapısı	21
Şekil 2.10.	İten kaykısı.....	21
Şekil 2.11.	Gömülü mıknatıs yapısı	22
Şekil 2.12.	Mıknatısları mekanik etkilere karşı koruyan aparat.....	22
Şekil 3.1.	Senkron motor fazör diyagramı	25
Şekil 3.2.	Nüvenin manyetik eşdeğer devre modeli.....	28
Şekil 3.3.	Doğrusal motorun manyetik eşdeğer devre modeli	30
Şekil 3.4.	1-oluk 1-mıknatıs yapısının (a) basitleştirilmiş modeli, (b) akı yolları, (c) belirlenen düğüm noktaları, (d) MED modeli	30
Şekil 3.5.	Doğrusal olmayan modellemede iş akış planı	31
Şekil 3.6.	MED modeli ile elde edilen hava aralığı akı yoğunluğu değişimi.....	32
Şekil 3.7.	MED modeli ile elde edilen zıt EMK gerilimi değişimi.....	32
Şekil 3.8.	MED modeli ile elde edilen çıkış kuvveti değişimi.....	33
Şekil 3.9.	9-oluk 8-kutuplu motor modeli ve ağ yapısı.....	33
Şekil 3.10.	9-oluk 8-kutuplu doğrusal senkron motorun (a) akı yoğunlukları dağılımı, (b) akı çizgileri	34
Şekil 3.11.	SEA yöntemiyle elde edilen hava aralığı akı yoğunluğu değişimi.....	34
Şekil 3.12.	SEA yöntemiyle elde edilen zıt EMK gerilimleri değişimi.....	34
Şekil 3.13.	SEA yöntemiyle elde edilen THB değişimi.....	35
Şekil 3.14.	SEA yöntemiyle elde edilen çıkış kuvveti.....	35
Şekil 3.15.	MED ve SEA ile elde edilen hava aralığı akı yoğunluğu değişimleri	36

Şekil 3.16. MED ve SEA ile elde edilen zıt EMK faz gerilimi değişimleri	36
Şekil 3.17. MED ve SEA ile elde edilen çıkış kuvveti değişimleri	36
Şekil 4.1. KM doğrusal senkron motorun 2-boyutlu, (a) Flux® SEA modeli, (b) mesh yapısı.....	39
Şekil 4.2. KM doğrusal senkron motorun (a) yüksüz durum akı yoğunluğu seviyeleri, (b) akı çizgileri	40
Şekil 4.3. KM doğrusal senkron motorun vuru kuvveti değişimi.....	40
Şekil 4.4. KM doğrusal senkron motorun faz ve hat Zıt-EMK değişimi.....	41
Şekil 4.5. KM doğrusal senkron motorun çıkış kuvveti değişimi.....	41
Şekil 4.6. Oluk açıklığı değişimine göre vuru kuvvetinin değişimi.....	42
Şekil 4.7. Oluk açıklığı değişimine göre çıkış kuvveti değişimi.....	42
Şekil 4.8. Oluk açıklığı değişimine göre çıkış kuvvet dalgalanması değişimi	42
Şekil 4.9. Yardımcı diş parametreleri	43
Şekil 4.10. Yardımcı diş yüksekliği değişimine göre (a) vuru kuvveti değişimi, (b) kuvvet dalgalanması değişimi	44
Şekil 4.11. Yardımcı diş genişliği değişimine göre (a) vuru kuvveti değişimi, (b) kuvvet dalgalanması değişimi	44
Şekil 4.12. Yardımcı diş uzaklığı değişimine göre (a) vuru kuvveti değişimi, (b) kuvvet dalgalanması değişimi	45
Şekil 4.13. Kuvvet dalgalanması değerinin diş yüksekliği ve diş genişliğine bağlı olarak değişimi.....	46
Şekil 4.14. Yardımcı dişe uygulanan radius modelleri (a) tek taraftan radius, (b) tek taraftan ters radius, (c) her iki taraftan radius	46
Şekil 4.15. Tek taraftan radius verilmesi durumunda (a) kuvvet çıkış ve (b) kuvvet dalgalanmasının değişimi	47
Şekil 4.16. Tek taraftan ters radius verilmesi durumunda (a) kuvvet çıkış ve (b) kuvvet dalgalanmasının değişimi.....	47
Şekil 4.17. Her iki taraftan radius verilmesi durumunda (a) kuvvet çıkış ve (b) kuvvet dalgalanmasının değişimi.....	47
Şekil 4.18. 9-oluk 10-kutuplu KM doğrusal senkron motorun mıknatıslarının, (a) kaykısız 10 eşit parçaya bölünmüş hali, (b) klasik kaykısı yapısı	49
Şekil 4.19. Klasik kaykısı yapısında açı değişimine bağlı olarak çıkış kuvveti değişimi.....	49
Şekil 4.20. Klasik kaykısı yapısında açı değişimine bağlı olarak kuvvet dalgalanması değişimi	49
Şekil 4.21. Önerilen simetrik ve asimetric V şekilli kaykısı modelleri, (a) Model-1, (b) Model-2, (c) Model-3, (d) Model-4, (e) Model-5, (f) Model-6.....	50
Şekil 4.22. Kaykısı açısının 5,75 derece olduğu durumda klasik kaykısı ve V şekilli kaykısı yapıları için çıkış kuvveti karşılaştırması.....	51
Şekil 4.23. Kaykısı açısının 5,75 derece olduğu durumda klasik kaykısı ve V şekilli kaykısı yapıları için kuvvet dalgalanması karşılaştırması	51
Şekil 4.24. Gerçekleştirilen tasarımların referans kuvvete göre kuvvet farkları.....	51
Şekil 4.25. Nihai tasarımda motora ait vuru kuvveti değişimi.....	52
Şekil 4.26. Nihai tasarım motora ait hat ve faz gerilimleri değişimi (@2m/s)	53
Şekil 4.27. Nihai tasarım motora ait çıkış kuvveti değişimi (@15Amax)	53
Şekil 4.28. 3B SEA modeli	54

Şekil 4.29. 2B ve 3B analizleriyle elde edilen zıt EMK gerilimlerinin karşılaştırılması (@2m/s).....	54
Şekil 4.30. 2B ve 3B analizleriyle elde edilen çıkış kuvvetlerinin karşılaştırılması (@15Amax).....	54
Şekil 5.1. (a) Kesilmiş iten sacı ve (b) paketlenmiş iten yapısı	57
Şekil 5.2. İten sargı yapısı	57
Şekil 5.3. İten sargıları ve iten nüvesine yerleştirilmiş hali	58
Şekil 5.4. İten ve alüminyum parça arasındaki dış yapısı	58
Şekil 5.5. İzleyen tablası	59
Şekil 5.6. Mıknatısları yapıştırılmış (a) kaykısız izleyen, (b) kaykılı izleyen yapıları	59
Şekil 5.7. Tasarlanan KM doğrusal senkron motor test sistemi.....	60
Şekil 5.8. Tasarlanan doğrusal senkron motor test sistemi yandan görünüşü.....	60
Şekil 5.9. Üretilen doğrusal motor test sistemi, motor sürücüsü ve kartlar	61
Şekil 5.10. Zıt EMK hat gerilimlerinin karşılaştırılması (@0,083m/s)	62
Şekil 5.11. Özgün kaykısız doğrusal motorun çıkış kuvveti karşılaştırması (@15Amax)	63

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Yassı tip doğrusal senkron motorların karşılaştırılması	11
Tablo 3.1. KM doğrusal senkron motor tasarım kriterleri	23
Tablo 3.2. MED modeli ile elde edilen kritik bölge akı yoğunlukları	32
Tablo 3.3. MED ve SEA ile elde edilen performans sonuçlarının karşılaştırılması.....	37
Tablo 4.1. Ön tasarım, yardımcı diş eklenmiş tasarım ve nihai tasarım motorun performans karşılaştırması	55
Tablo 5.1. Özgün DSM hat direnci ve endüktansı ölçümleri.....	62
Tablo 5.2. Fazlara ait zıt EMK gerilim değerleri	63

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

m_1	: Faz sayısı
p	: Kutup çifti sayısı
N_1	: Faz başına düşen sarım sayısı
k_{w1v}	: Sargı faktörü
k_{d1v}	: Dağıtım faktörü
k_{p1v}	: Adım faktörü
k_{s1v}	: Kaykı faktörü
ω	: Açısal frekans, (rad/s)
I_a	: Besleme akımı, (A)
τ	: Kutup adımı, (m)
v_s	: Doğrusal senkron hız, (m/s)
ϕ_f	: Mıknatıs uyartım akısı, (Weber)
E_f	: EMK Gerilimi, (V)
f	: Frekans, (Hz)
δ	: Yük açısı, (derece)
V_1	: Terminal gerilimi, (V)
x_{sq}	: q eksen senkron reaktansı, (ohm)
x_{sd}	: d eksen senkron reaktansı, (ohm)
I_{aq}	: q eksen akımı, (A)
I_{ad}	: d-eksen akımı, (A)
P_{in}	: Motor giriş gücü, (W)
P_{elm}	: Elektromanyetik güç, (W)
P_{1w}	: Bakır kayıpları, (W)
R_1	: Sargı direnci, (ohm)
F_{dx}	: Elektromanyetik itme kuvveti, (N)
f_r	: Kuvvet dalgalanması, (%)
H	: Manyetik alan şiddeti, (Amper sarım/m)
B	: Manyetik akı yoğunluğu, (Wb/m ²)
l	: Manyetik akı yolu uzunluğu, (m)
l_c	: Nüvenin ortalama uzunluğu, (m)
ϕ	: Manyetik alana dik geçen akı miktarı, (Weber)
μ	: Manyetik geçirgenlik, (H/m)
μ_r	: Bağlı geçirgenlik, (H/m)
μ_0	: Boşluğun geçirgenliği, (H/m)
μ_d	: Değişken manyetik geçirgenlik, (H/m)
μ_s	: Sabit manyetik geçirgenlik, (H/m)
A	: Kesit alanı, (m ²)
\mathcal{F}	: Manyetomotor kuvveti, (N)
i	: Manyetik devreden geçen akım, (A)
R	: Relüktans, (Amper sarım/Wb)
R_d	: Değişken relüktans, (Amper sarım/Wb)
R_s	: Sabit relüktans, (Amper sarım/Wb)

Kısaltmalar

AC	: Alternating Current (Alternatif Akım)
DC	: Direct Current (Doğru Akım)
EMK	: Elektro Motor Kuvveti
NdFeB	: Neodymium Iron Boron
SE	: Sonlu Eleman
SEA	: Sonlu Elemanlar Analizi
KM	: Kalıcı Mıknatıs
DSM	: Doğrusal Senkron Motor
KMDSM	: Kalıcı Mıknatıslı Doğrusal Senkron Motor
Zıt-EMK	: Zıt Elektro Motor Kuvveti
THB	: Toplam Harmonik Bozunum
MRI	: Magnetic Resonance Imaging (Manyetik Rezonans Görüntüleme)
MAGLEV	: Magnetic Levitation (Manyetik Levitasyon)
3B	: 3 boyutlu
2B	: 2 boyutlu
RMS	: Root Mean Square (Karekök Ortalama)
MMF	: Magnetomotor Force (Manyetomotor Kuvveti)
MED	: Manyetik Eşdeğer Devre

BİR DOĞRUSAL KALICI MIKNATISLI SENKRON MOTORUN YARDIMCI DİŞ VE KAYKI TEKNİKLERİ İLE VURUNTU KUVVETİNİN ENİYİLEŞTİRİLMESİ

ÖZET

Kalıcı mıknatıslı doğrusal senkron motorlar, dişli kutusu, kayış kasnak mekanizması gibi aktarma organlarını ortadan kaldırdığı için son yıllarda endüstriyel otomasyon sistemlerinde sıklıkla tercih edilmektedir. Güç elektroniği alanında yaşanan gelişmeler ve mıknatıs maliyetlerinin önceki yıllara göre nispeten düşmesi bu motorlar alanında yapılan çalışmalara ivme kazandırmıştır. Doğrusal senkron motorların kullanıldıkları sistemde ekstra bir mekanik bağlantı elemanının olmaması bu motorların hızlı cevap yeteneğine sahip olmalarına, yüksek hızlara ulaşabilmelerine ve hassas pozisyonlama yapabilmelerine olanak sağlamaktadır. Ayrıca bu motorların kayıplarının düşük, kuvvet yoğunluklarının yüksek olması da bu motorların tercih edilirliliğini arttırmaktadır. Gerçekleştirilen bu çalışmada endüstriyel bir otomasyon sisteminde kullanılmak üzere vuruuntu kuvveti azaltılmış, kuvvet yoğunluğu yüksek bir doğrusal senkron motor tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan yapının 1-iten 1-izleyenli olması sebebiyle motorda yapısal özelliklerinden kaynaklanan vuruuntu kuvveti ve son etkisi kaynaklı kuvvet dalgalanması mevcuttur. Bu çalışmada kuvvet çıkış kalitesini etkileyen bu parametrelerin minimize edilmesi için çeşitli analizler ve optimizasyonlar gerçekleştirilmiş, çalışma sonunda hedef başarıyla gerçekleştirilmiştir. Yapılan performans testleri sonucunda motor analiz verileri ile test sonuçlarının uyumluluğu gözlenmiş, sonuçlar ayrıntılı bir şekilde sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: AC Senkron Motor Tasarımı, Doğrusal Motor, Doğrusal Senkron Motor, Kalıcı Mıknatıslı Doğrusal Senkron Motor, Kayıklı Doğrusal Senkron Motor.

DETENT FORCE MINIMIZATION OF A PERMANENT MAGNET LINEAR SYNCHRONOUS MOTOR WITH AUXILIARY TEETH AND SKEWING METHODS

ABSTRACT

Permanent magnet linear synchronous motors are often used in industrial automation systems since they resolve the demand for the transmission components such as gearboxes and belt systems. Developments in the field of power electronics and relatively lower magnet costs compared to previous years have accelerated this area. Linear synchronous motors are used in the systems without extra mechanical components; thus, these motors can respond quickly, have high speed and provide accurate positioning. In addition, low losses and high force densities increase the preference of these motors. In this study, a linear synchronous motor that detent force is minimized and force density is increased design has been realized for use in an industrial automation system. Designed 1-track 1-forcer linear motor has end force and detent force due to its structural properties. In this study, various analyses and optimizations were performed to minimize these parameters that affect force output quality. The target was successfully carried out at the end of the study. As a result of the performance tests, the results of the motor analyses and the test results were observed and compared. All studies were presented in detail.

Keywords: AC Synchronous Motor Design, Linear Motor, Linear Synchronous Motor, Permanent Magnet Linear Synchronous Motor, Skewed Linear Synchronous Motor.

GİRİŞ

Doğrusal motorlar özel elektrik motorlarıdır ve döner motorların bir düzlem üzerine açılmış hali olarak düşünülebilir. Bu motorlarda bobin ve mıknatısların elektromanyetik olarak etkileşmesiyle elektrik enerjisi yüksek verimli doğrusal mekanik enerjiye dönüştürülür. Bu da döner motorlarda doğrusal hareket elde etmek amacıyla kullanılan kayış kassak, dişli mekanizması gibi yapıları ortadan kaldırarak motorların daha verimli bir şekilde çalışmasını sağlar.

Doğrusal senkron motorlar DC motorda olduğu gibi fırça yapılarına sahip olmaması ve asenkron motorlara göre daha yüksek kuvvet üretebilmesi gibi sebeplerle son yıllarda endüstride daha çok tercih edilmektedir. Güç elektroniği alanında yaşanan gelişmeler, mıknatıs malzemelerinin önceki yıllara göre daha kolay temin edilmesi ve maliyetlerinin nispeten düşmesi de bu motorların kullanımını yaygınlaştırmaktadır.

Doğrusal senkron motorlar basit ve kompakt yapılı olmaları, az bakım gerektirmeleri, yüksek verimle çalışmaları, yüksek hızlarda çalışabilmeleri ve hassas pozisyonlama yapabilmeleri sebebiyle konveyör sistemleri, paketleme ve depolama hatları, asansörler, su jetleri, sıvı metal pompalama tesisleri, kayan kapı mekanizmaları, lazer kesim makineleri, MRI ve X-ray başta olmak üzere sağlıktan otomasyona birçok alanda sıklıkla kullanılmaktadır. Ayrıca son zamanlarda bu motorlar savunma ve silah sistemlerinde de sıkça kullanılmaya başlanmış, piyasada yaygın bir hale gelmeye başlamıştır.

Bu çalışmanın amacı, vuruş kuvveti minimize edilmiş kalıcı mıknatıslı 1-iten 1-izleyenli doğrusal senkron motorun tasarımını, üretimini ve deneysel doğrulaması gerçekleştirmektir. Tez kapsamında oluk kutup optimizasyonu gerçekleştirilen kesir oluklu motorun iten ve izleyen yapılarında çeşitli iyileştirme çalışmaları yapılmış ve geometrik boyutları belirlenmiştir. İncelenen tasarımlarda motorun vuruş kuvvetini ve kuvvet dalgalanmasını minimize edecek tasarımı elde etmek hedeflenmiştir.

Tez kapsamında, tasarım kriterlerine bağılı kalarak bir KM doğrusal senkron motorun tasarımı, performans iyileştirilmesi için çeşitli optimizasyonlar ve prototip üretimi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca motorun yüklü ve yüksüz durum testlerini gerçekleştirmek amacıyla bir test sistemi tasarımı yapılmıştır. Test sisteminden alınan test verileri ile sonlu eleman analizi sonuçları karşılaştırılmış ve motor doğrulanmıştır.

Bölüm 1’de doğrusal motorların temelleri, çalışma prensibi ve sınıflandırılmasıyla alakalı temel bilgiler verilmiş, çalışma prensibi ve bileşenlerine değinilmiştir. Ayrıca bu bölümde doğrusal motorların döner motorlar ile karşılaştırması gerçekleştirilmiş ve doğrusal motorların performans kriterleri hakkında bilgi verilmiştir.

Bölüm 2’de detaylı bir literatür araştırmasına yer verilmiş, KM doğrusal senkron motorlar özelinde gerçekleştirilen makale araştırmasından bir özet sunulmuştur. Araştırma kapsamında KM doğrusal senkron motorların manyetik eşdeğer devre modellemesi, manyetik tasarımı, vuruñu kuvveti azaltma yöntemleri ve kontrolüne odaklanılmıştır. Ayrıca bu bölümde doğrusal motorlarla alakalı yapılan patent çalışmalarına da yer verilmiş, farklı alanlarda alınan patentlerde özetlenmiştir.

Bölüm 3’de KM doğrusal senkron motorun tasarım kriterleri, temel denklemleri ve manyetik eşdeğer devre modellemesine yer verilmiştir. Ayrıca bu bölümde ön tasarım motorun manyetik eşdeğer devre modellemesi gerçekleştirilmiş, 1-diş 1-mıknatıs yapısının ayrıntılı çözümlenmesine yer verilmiş ve SE analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu bölümün sonunda bu iki yöntemden elde edilen veriler karşılaştırılmıştır.

Bölümde 4’de ön tasarım KM doğrusal senkron motorun ön tasarımının SE analizleri verilmiş, kuvvet bileşenlerinden ve vuruñu kuvveti azaltma yöntemlerinden bahsedilmiştir. Bölümde ayrıca motor çıkış kuvvetinde meydana gelen kuvvet dalgalanmasını azaltmak ve tasarım kriterlerinde verilen kuvvet seviyesini sağlayabilmek için optimizasyonlar gerçekleştirilmiştir. Son olarak nihai tasarım motor performans verileri verilerek, bu veriler ile ön tasarım motor verilerinin karşılaştırması yapılmıştır.

Bölüm 5’de KM doğrusal senkron motorun prototip üretiminin temelleri, motor bileşenlerinin üretim resimleri, tasarlanan motor test sistemi ve motorun deneysel doğrulama testlerine yer verilmiştir. Test sonuçları tablolar ve grafikler ile ayrıntılı bir

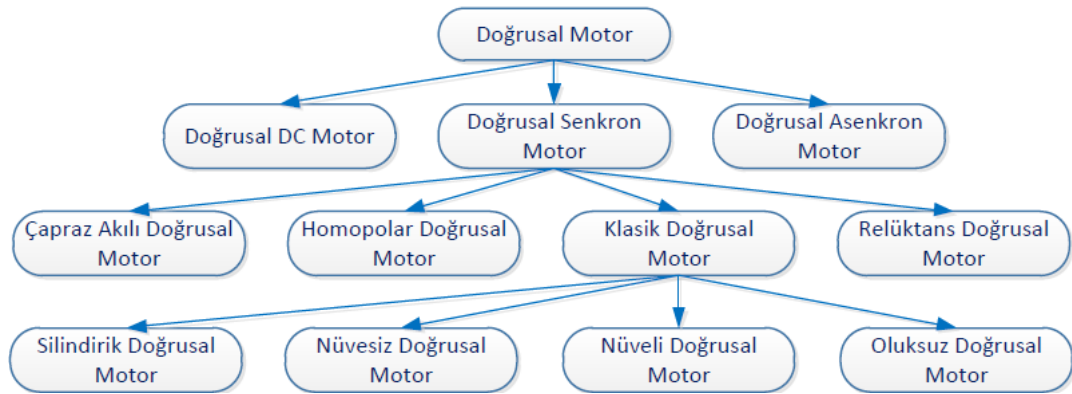
şekilde sunulmuş, son olarak bölüm sonunda test verileri ve elektromanyetik analiz sonuçlarının karşılaştırılarak motorun performans doğrulaması yapılmıştır.

Son olarak Bölüm 7'de ise yapılan çalışmalar hakkında genel bilgiler ve değerlendirmeler yapılmış, motor tasarım ve üretim aşaması kısaca özetlenmiş, son bilgilendirmeler ile tez sonlandırılmıştır.



1. DOĞRUSAL MOTOR SİSTEMLERİ

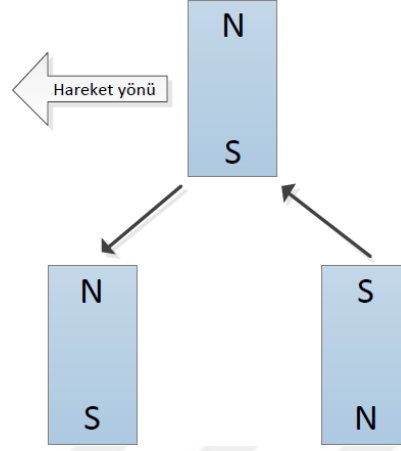
Doğrusal motorlar doğrusal senkron, doğrusal asenkron ve doğrusal DC motorlar olmak üzere üç ana grupta sınıflandırılmaktadır. Bu üç motor arasındaki temel fark uyarılma şekilleridir. Asenkron doğrusal motorlarda iten sargıları beslendiğinde motorun hava aralığında bir manyetik alan oluşur. Senkron hızda hareket eden manyetik alan sebebiyle izleyen iletkenlerinde gerilim indüklenir. İzleyen uçlarının kısa devre edilmesiyle izleyenden bir akım akar. Bu durumda izleyen iletkenlerinden akan akım manyetik alan içerisinde olduğundan Biot-Savart yasası gereğince izleyene bir kuvvet etkir ve hareket etmeye başlar. Doğrusal senkron ve doğrusal DC motorlarda ise uyarılma mıknatıslar ve DC bobinler ile sağlanır. Doğrusal DC motor ile doğrusal senkron motorların farkı ise besleme şekilleridir. Doğrusal DC motor kare dalga şekline sahip akım ile beslenirken, doğrusal senkron motor sinüzoidal akım ile beslenmektedir. Şekil 1.1’de doğrusal motorların sınıflandırılması gösterilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere doğrusal motorlar içerisinde en kapsamlı olanı doğrusal senkron motorlardır. Bu çalışmada klasik doğrusal senkron motorlar incelenmiştir.



Şekil 1.1. Doğrusal motorların sınıflandırılması

Doğrusal motorların çalışması manyetizma prensibine benzetilebilir. Manyetizma prensibinin temelinde iki mıknatıs karşılıklı yerleştirildiğinde bu iki mıknatıs birbirlerine itme veya çekme kuvveti uygular. Karşılıklı yerleştirilen bu mıknatıslar hareket ettirilmek istendiğinde ise Şekil 1.2’de olduğu gibi karşı karşıya gelen

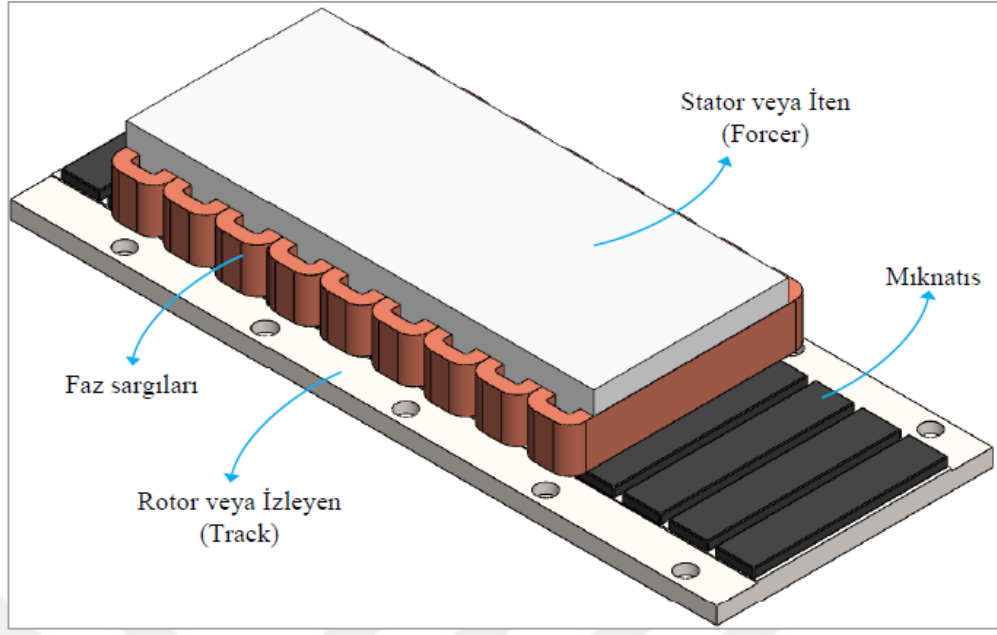
kutupların doğru bir şekilde ayarlanması gerekir. Bu ayarlama doğru yapıldığında mıknatıslar düz bir çizgi üzerinde doğrusal olarak hareket ettirilebilir.



Şekil 1.2. Karşılıklı mıknatıslar ile oluşturulan doğrusal hareket

Doğrusal motorlar da benzer şekilde itme ve çekme kuvvetleri tarafından tahrik edilir. Manyetizmadan farkı, mıknatıs kutuplarının değişimi mıknatıslar yerine bakır tellerden oluşan bobinler ile sağlanmasıdır. Bu bobinlerden akım geçirildiğinde bobinlerin etrafına sarıldığı nüve dişleri mıknatıs gibi davranır. Bu ilişkide oluşan kuvvet, bobinlerden geçirilen akıma, sarım sayısına ve sargının etrafına sarıldığı nüve malzemenin cinsine bağlı olur. Bu tip motorlarda bakır sargıların sarıldığı nüve malzemesi genellikle çelik gibi manyetik direnci düşük, manyetik alanı iyi iletilecek malzemelerden seçilir.

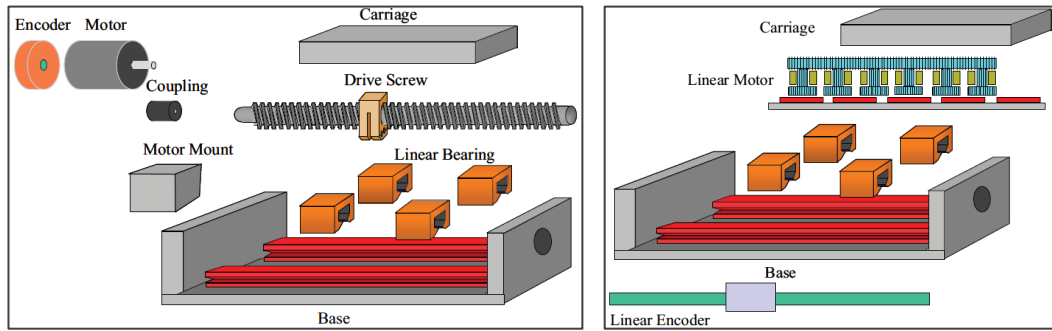
Doğrusal motorlar döner motorlarda olduğu gibi izleyen ve iten yapılarından oluşmaktadır. Bu motorlarda iten faz sargılarından oluşan, izleyene oranla daha kısa ve hareketli olan kısımdır. İzleyen ise doğrusal asenkron motorlarda sargılı, doğrusal senkron motorlarda mıknatıslı yapıya sahip, genellikle motorun sabit ve uzun olan kısmıdır. Şekil 1.3'de izleyeni uzun iteni kısa 1-iten 1-izleyenli bir doğrusal senkron motor yapısı gösterilmiştir. Bu motorların yapısı her uygulamada aynı olmak zorunda olmamakla birlikte uygulamanın ihtiyacına göre değişkenlik gösterebilir.



Şekil 1.3. 1-iten 1-izleyenli doğrusal senkron motor yapısı

Doğrusal harekete ihtiyaç duyulan uygulamalarda doğrusal motorlar döner motorlara göre büyük avantaj sağlamaktadır. Doğrusal motor kullanılan uygulamalarda motor ile yük arasında dişli, kayış kasnak mekanizması gibi aktarma elemanlarına ihtiyaç duyulmaz. Sistemlerde bu elemanların kullanılmaması sürtünmeyi azaltarak motorun güvenli bir şekilde yüksek hızlara ve ivmelere ulaşmasına izin verir. Yük doğrudan motor ile bağlantılı olduğundan aralarında herhangi bir boşluk yoktur, bu da hareketin kontrolünü ve doğruluğunu artırır. Ayrıca doğrusal motor kullanılan uygulamalarda sistemin ataleti düşüktür ve sistemde gürültü oluşmaz. Bu sebeple hassas pozisyonlama yapılacak uygulamalarda doğrusal motor kullanmak sisteme olan güvenilirliği artırır. Şekil 1.4'de hassas pozisyonlama yapılacak bir sistemde döner motor (a) ve doğrusal motor (b) kullanımlarının karşılaştırması gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi doğrusal motor kullanılan sistem daha basit yapılıdır. Bu sistemde pozisyon bilgisini elde etmek için doğrusal enkoder kullanmak yeterlidir. Doğrusal enkoder her ne kadar yüksek maliyetli bir bileşen olarak görülse de sistemin tamamının toplam maliyeti düşünüldüğünde bir dezavantaj sağlamamaktadır. Doğrusal motor sistemlerinde yalnızca mıknatıs plakasının uzunluğunun hareketi sınırlaması bir dezavantaj olarak görülebilir. Bu da plakaların arka arkaya eklenmesiyle çözülebilecek bir problemdir.

Doğrusal motorların performansları değerlendirilirken çıkış kuvveti, kuvvet dalgalanması, frenleme mekanizması gibi birçok parametre göz önünde bulundurulur. Doğrusal motor sistemlerinde çıkış kuvvetinin taşınacak yükün büyüklüğüyle orantılı olması beklenir. Bunun yanında doğrusal motorlarda taşınan yükün pozisyonlaması, sistemde oluşabilecek titreşim ve sistemin kontrol edilebilirliği açısından vuruntu kuvveti olabildiğince düşük olması gerekir. Ayrıca bu motorlarda, motoru herhangi bir konumda mekanik olarak durdurabilen bir fren sisteminin olması da önemlidir. Fren sistemi güvenlik açısından farklı bir kaynaktan beslenmeli ve kontrolden bağımsız olmalıdır. Doğrusal motor tasarımlarında aranan özelliklerden biri de motorun izleyen plakasının uzatılabilir olmasıdır. Böylece motor hareket doğrultusunun daha uzun olduğu uygulamalarda da tercih edilebilir. İzleyen plakasının uzun kullanılacağı uygulamalarda izleyenin modüler parçalar halinde arka arkaya birleştirilebilir yapıda olması da çok önemlidir. Bu özellik sayesinde elektriksel veya mekanik olarak zarar gören kısım için tüm izleyenin sökülmesine ihtiyaç duyulmaz. Uygulamada birden fazla iten bloğu kullanılması durumunda ise herhangi bir arıza olması durumuna karşılık bu iten bloklarının beslemesinin ayrı ayrı kaynaklardan yapılması tavsiye edilir. [1]



(a) (b)
Şekil 1.4. Bir hassas pozisyonlama sisteminde döner motor (a) ve doğrusal motor (b) kullanımı [2]

1.1. Kalıcı Mıknatıslı Doğrusal Senkron Motorlar

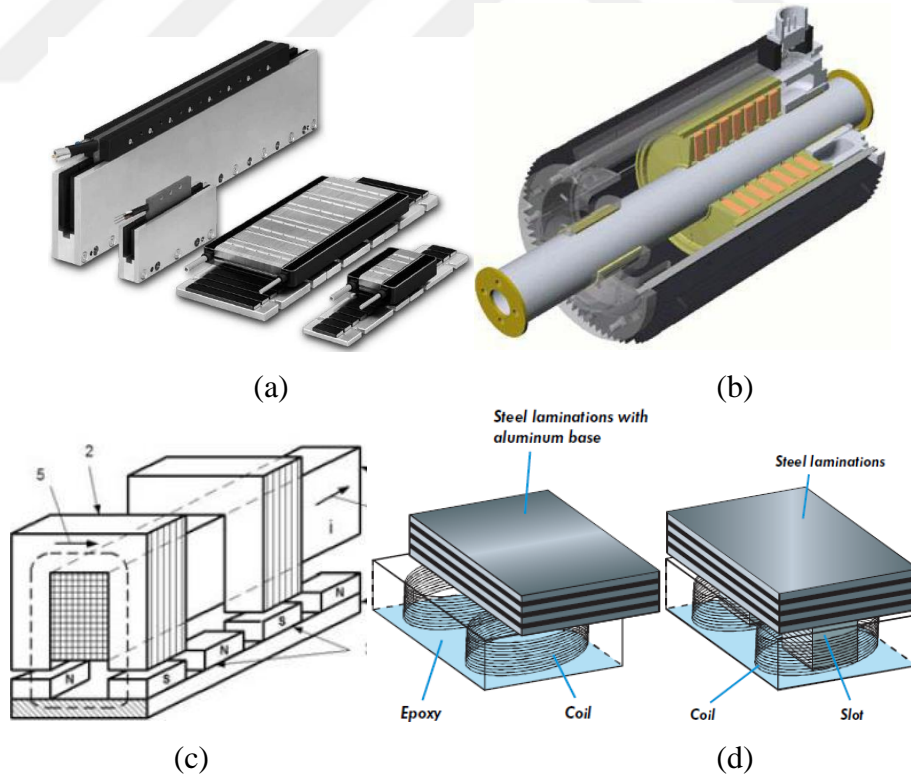
Doğrusal senkron motorlar genellikle yüksek kuvvet yoğunluğu gerektiren uygulamalarda sıklıkla tercih edilmektedir. Bu motorlar yüksek ivmelenme ve hassas pozisyonlama yapabilme özellikleri sayesinde endüstriyel uygulamalardan robotik uygulamalara, medikal sistemlerden MAGLEV sistemlerine kadar birçok alanda sıklıkla tercih edilmektedir.

Doğrusal senkron motorlar fiziksel özellikleri ve çalışma şekilleri bakımından iki ana gruba ayrılabilirler. Bu motorlar fiziksel özellikleri bakımından aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir [4];

- Yassı – silindirik şekilli motorlar
- Tek taraflı (single-sided) – çift taraflı (double-sided) motorlar
- Oluklu – oluksuz motorlar
- Nüveli – nüvesiz motorlar
- Çapraz akılı (transverse-flux) – doğrusal akılı (longitudinal-flux) motorlar

Tüm bu fiziksel yapıya sahip doğrusal senkron motorlar hemen hemen aşağıdaki üç şekilde de çalışabilirler;

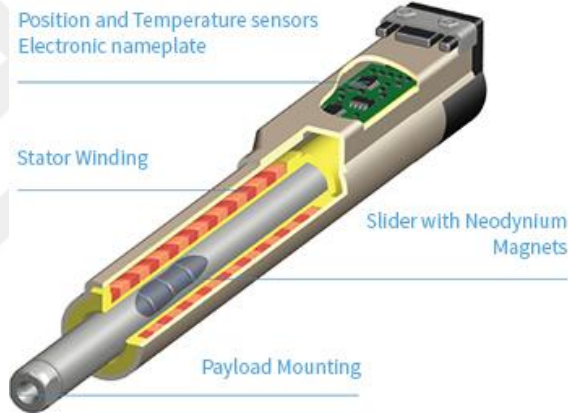
- Miknatısların hareketli parçada yer aldığı motorlar
- Miknatısların hareketsiz yapıda yer aldığı motorlar
- Sargılara uyarım verilerek çalışan motorlar



Şekil 1.5. KM doğrusal senkron motor çeşitleri, a) yassı tek taraflı ve çift taraflı doğrusal senkron motorlar [3], b) Silindirik doğrusal senkron motor [4], c) çapraz akılı doğrusal senkron motor [4], (d) yassı oluksuz ve oluklu doğrusal senkron motorlar [5]

1.1.1. Klasik KM doğrusal senkron motor tipleri

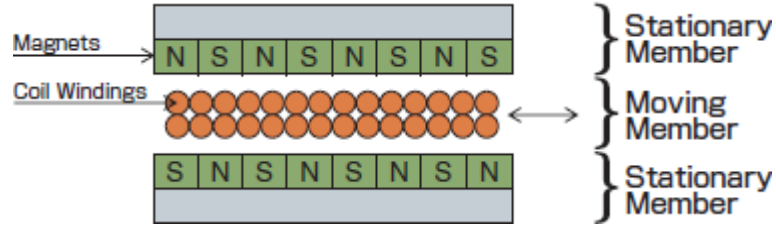
Klasik doğrusal senkron motorlar kullanıldıkları uygulamanın ihtiyacına göre nüveli-nüvesiz, oluklu-oluksuz ve yassı-silindirik olarak tasarlanabilirler. Silindirik doğrusal motorlarda mıknatıslar silindirik bir kılıf içerisine radyal olarak yerleştirilmiştir. İten sargıları genellikle 3-fazlıdır ve fırçasız komutasyon alan etkili sensörler ile sağlanmaktadır. Yapısal olarak doğrusal aktuatörlere benzemektedir. Doğrusal aktuatörlerden farklı olarak strok boyu uzatılmak istendiğinde iten boyunun da uzatılması gerekmektedir. Ayrıca bu tip motorlarda strok boyu uzadıkça stroğun bir noktadan desteklenmesi gerekmektedir. Bu sebeplerden dolayı silindirik doğrusal motorlar ticari olarak kullanılan ilk doğrusal motorlardan olsa da zaman içerisinde diğer doğrusal motorlar karşısında yerini koruyamamıştır.



Şekil 1.6. Silindirik doğrusal senkron motor yapısı [6]

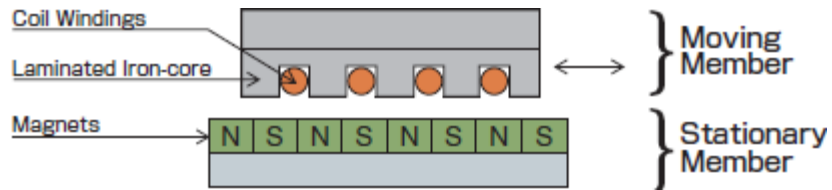
Nüvesiz doğrusal motorlar birbirlerine paralel ve karşılıklı kalıcı mıknatıslı izleyen plakaları ile bu iki plaka arasına yerleştirilmiş hareketli itenden oluşur. İten sargıları epoksi ile bir bütün haline getirilerek alüminyum bir blok ile birleştirilir. Bu alüminyum blok, doğrusal rulman sistemleriyle izleyen plakaları tarafından desteklenmektedir. Bu tip motorlarda itenin nüvesiz olması sebebiyle iten ve izleyen plakaları arasında bozucu kuvvetler oluşmaz. Ayrıca iten nüvesiz olarak oluşturulduğundan ağırlığı düşük, dolayısıyla motorun ivmelenmesi yüksektir. İzleyen plakalarının karşılıklı olması ve motorun kapalı bir yapıya sahip olması sebebiyle de motor kaçak akları oldukça azdır ve iteni konumlaması kolaydır. Ancak bu motorlarda sargıların epoksiyle kaplanması sebebiyle sargılarda oluşan ısı hava aralığına doğrudan iletilir. Bu sebeple bu tip motorlarda ısı yönetimine dikkat edilmelidir.

Ayrıca bu motorlarda yükü doğrudan iten yapısı taşıdığı ve iten yalnızca sargılardan oluştuğundan nüveli yapılara göre dayanıklılığı düşüktür. Motorun iki plakasında mıknatıslar bulunması sebebiyle de maliyeti yüksektir.



Şekil 1.7. Nüvesiz doğrusal senkron motor yapısı [7]

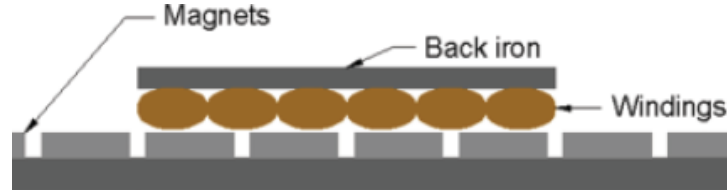
Nüveli doğrusal motorlarda, izleyen kalıcı mıknatısların monte edildiği manyetik özelliği olan bir malzemeden oluşur. İten ise laminasyonlu bir yapıdan oluşmuştur ve sargılar laminasyonlu yapıda bulunan dişlerin etrafına sarılır. Motorda iten sargılarına alan etkili sensörler yerleştirildiğinden motorun sıcaklık bilgisi anlık olarak elde edilebilir. Ayrıca bu motor yapısı nüvesiz motorlardaki gibi kapalı bir yapıya sahip olmadığından ve itene soğutma uygulanabildiğinden motorun ısı atımı iyidir. Bu motorlardan nüvesiz motorlara göre daha yüksek kuvvetler elde etmek mümkündür. Motorda yalnızca bir plakada mıknatıs kullanıldığından maliyeti nüvesiz motorlara göre daha düşüktür. Ancak bu motorlarda vuru kuvveti oldukça yüksektir ve motor yapısından kaynaklı normal bozucu kuvveti oluşur. Bu sebeple nüveli doğrusal motorların tasarımında genellikle kayk, yardımcı diş gibi vuru ve normal kuvveti düşürmek için çalışmalar gerçekleştirilir.



Şekil 1.8. Nüveli doğrusal senkron motor yapısı [7]

Oluksuz doğrusal motorlarda, izleyen yapısı nüveli doğrusal senkron motorlar ile aynıdır. İten yapısında ise sargılar manyetik özelliğe sahip bir parça üzerine yapıştırılmıştır. Bu manyetik parça ve sargılardan oluşan yapı epoksi ile kaplanarak alüminyum bir gövde içerisine yerleştirilir. Bu yapı sayesinde oldukça dayanıklı bir iten yapısı oluşur. Ayrıca motorda iten dişleri ve mıknatıslar arasında bir etkileşim olmadığından vuru kuvveti düşüktür. Motor vuru kuvveti bakımından nüveli

motorlara karşı bir avantaj sağlarken, üretim maliyeti bakımından da nüvesiz motorlara karşı avantaj sağlar. Çünkü bu yapıda yalnızca bir plakada mıknatıs kullanılmıştır. İten nüveli motorlara göre daha hafif olduğundan daha yüksek bir ivmelenmeye sahiptir.



Şekil 1.9. Oluksuz doğrusal senkron motor yapısı [8]

Yassı doğrusal senkron motorlardan nüveli, nüvesiz ve oluksuz motorların performans, maliyet, termal karakteristik ve dayanıklılık bakımından karşılaştırması Tablo 1.1’de verilmiştir. Bu tablo doğrusal senkron motor seçiminde oldukça yardımcı olacak özet bir tablo niteliği taşımaktadır.

Tablo 1.1. Yassı tip doğrusal senkron motorların karşılaştırılması

Özellik	Nüveli DSM	Nüvesiz DSM	Oluksuz DSM
Maliyet	Düşük	Yüksek	En Düşük
Y-Eksen kuvveti	En Yüksek	Yok	Orta
Vuruntu kuvveti	En Yüksek	Yok	Orta
Kuvvet-boyut oranı	En İyi	Orta	İyi
Termal karakteristik	En İyi	En Kötü	İyi
İten ağırlığı	En Ağır	En Hafif	Orta
İten mekanik dayanıklılığı	En İyi	En Kötü	İyi

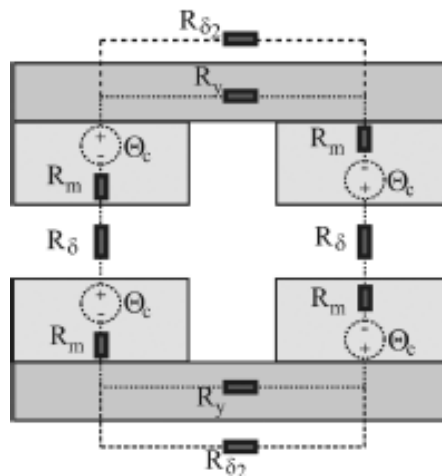
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde doğrusal motorlarla alakalı literatürde gerçekleştirilen çalışmalar incelenmiştir. İncelenen çalışmalarda doğrusal motorların manyetik eşdeğer devre modelini içeren çalışmalar [9-16] arasında özetlenmiştir. Bunlara ek olarak doğrusal motorların SEA analizleriyle performans kontrolünün yapıldığı çalışmalar [17-22], doğrusal motorların performans iyileştirmesinin yapıldığı çalışmalar ise [18-37] arasında özetlenmiştir.

2.1. Yayın Araştırması

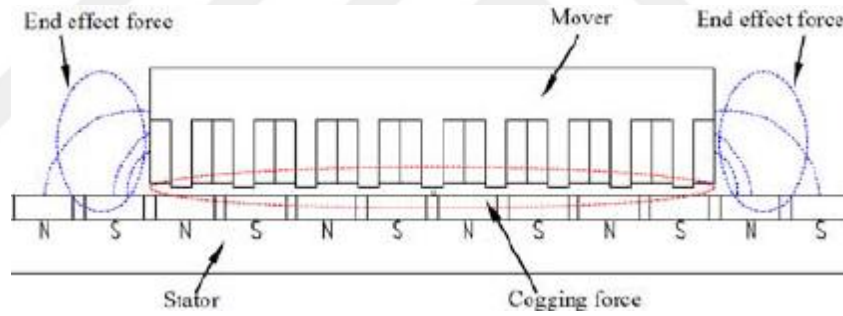
Literatürde doğrusal motorlarda incelenen en temel konulardan biri motorun manyetik eşdeğer devresinin oluşturulması ve performans verilerinin hesaplanmasıdır. Qu ve Lipo (2004) [9] tarafından gerçekleştirilen çalışmada yüzeyden mıknatıslı doğrusal senkron motorun performans verileri manyetik eşdeğer devre modeli ile iki ayrı yöntem kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen performans verilerini doğrulamak amacıyla sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Yapılan çalışmalarda sonlu elemanlar analizleri ile manyetik eşdeğer devre modeli arasında dişlerin doyumluğa uğramadığı durumda %7 den az, doyumluğa uğradığı durumda %17 den az fark olduğu görülmüştür. Tüm bu çalışmalar sonunda özgün bir doğrusal senkron motor modeli ortaya çıkarılmıştır. Vaez-Zadeh ve Isfahani (2007) [10] tarafından gerçekleştirilen çalışmada hava aralığı akı yoğunluğu dağılımı hesabı için kesin ve basit bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntem gelişmiş manyetik eşdeğer devre modeli ve hava aralığı akı yoğunluğu dağılımı fonksiyonunu içeren farklı bir yöntemdir. Yöntem, sondaki dişleri ve demir nüvedeki manyetik doyumları da hesaba kattığından kesinliği yüksek bir yöntem olarak sunulmuştur. Çalışmada bu yöntem kullanılarak hesaplamaları gerçekleştirilen motorun sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilerek analitik ve nümerik yöntem sonuçları karşılaştırılmıştır. Leidhold ve Mutschler (2007) [11] tarafından gerçekleştirilen çalışmada 39 oluk 13 kutuplu uzun itenli doğrusal senkron motorun manyetik eşdeğer devre modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan modelde eddy akımları hesaba katılmadan manyetik sistem parçalara bölünerek tek

yönde akı akıtan akı tüpleri oluşturulmuştur. Motorun sargıları manyeto motor kuvveti olarak mıknatıslar ise akı kaynağı olarak modellenmiştir. Bu yöntem sensörsüz sistemlerin üzerinde nasıl analiz gerçekleştirileceğine açıklık getirmektedir. Li ve diğ. (2011) [12] tarafından gerçekleştirilen çalışmada bir fırlatıcı sistemi için 1-iten 2-izleyenli çıkış gücü yüksek bir doğrusal motor tasarımı gerçekleştirilmiştir. Çalışmada temel elektromanyetik kuvvet denklemleri kullanılarak kuvvet yoğunluğu analitik yöntemlerle elde edilmek istenmiştir. Bu sebeple öncelikle motorun manyetik eşdeğer devre modeli oluşturulmuş ve ilgili denklem takımları yazılmıştır. Daha sonra belirlenen ön tasarım parametreleri bir SEA modeli oluşturulmuş ve gerekli analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonuç kısmında analitik ve SEA verileri karşılaştırılarak, fırlatıcı sistemi için optimum doğrusal motor tasarımı anlatılmıştır. Kazan ve Onat (2011) [13] tarafından yapılan çalışmada hava aralığı oldukça geniş olan bir nüvesiz bir doğrusal senkron motorun tasarım optimizasyonlarını SEA yöntemine göre daha hızlı bir şekilde gerçekleştirebilmek amacıyla hem SEA yöntemini hem de manyetik eşdeğer devre modeli yöntemini kullanan hibrit bir çözüm yöntemi kullanılmıştır. Yöntemde başlangıçta manyetik eşdeğer devre modeli için gerekli olan parametrelerin bir kısmı karmaşık olmayan SEA analizleriyle elde edilmiştir. Elde edilen parametreler kullanılarak manyetik eşdeğer devre modeli ile hava aralığı akı yoğunluğu ve çıkış kuvveti analitik olarak elde edilmiştir. Bu sayede SEA yöntemine göre daha hızlı sonuç elde edilmiştir. [14-16] referanslı çalışmalarda da ilk 3 referanstaki gibi doğrusal motorların manyetik eşdeğer devrelerinin oluşturulması için farklı yöntemler kullanılarak çalışmalar yapılmıştır.



Şekil 2.1. Önerilen manyetik eşdeğer devre modeli [13]

Gerçekleştirilen literatür araştırmaları göstermiştir ki doğrusal motorlarda performans verilerinin elde edilmesinde ve gerekli performans iyileştirmelerinin yapılmasında kullanılan en etkili yöntem sonlu elemanlar analizleri (SEA) gerçekleştirmektir. Zhang ve diğ. (2014) [17] tarafından yapılan çalışmada 1-iten 1-izleyenli farklı oluk-kutup kombinasyonlarına sahip kesir oluklu 16 farklı doğrusal senkron motorun vuruğu kuvvetleri, ortalama çıkış kuvvetleri ve kuvvet dalgalanmaları sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilerek bu motorların performans karşılaştırması yapılmıştır. Tüm motorlarda oluk ve diş genişlikleri eşit tutulmuştur ve sargı olarak daha kısa sargı sonuna sahip olması sebebiyle çift katmanlı konsantre sargı kullanılmıştır. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda aynı oluk sayısına sahip iki motordan kutup sayısı oluk sayısından küçük olan motorda, kutup sayısı oluk sayısından büyük olan motora göre çıkış kuvveti daha büyüktür. Ancak bu motorlarda kuvvet dalgalanması ve vuruğu kuvveti de yüksek olduğundan motor tercihinin uygulama ihtiyacına göre yapılması tavsiye edilmiştir.



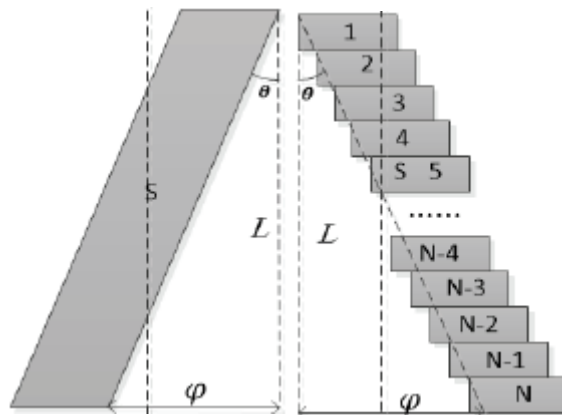
Şekil 2.2. Referans alınan 9-oluk 8-kutup motor [17]

Lu ve diğ. (2012) [18] tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise bu çalışmaya benzer şekilde farklı oluk-kutup kombinasyonlarına sahip motorların performans karşılaştırması yapılmıştır. Ancak bu çalışmada ek olarak motorların 1-iten 1-izleyen ve 2-iten 1-izleyenli olması durumlarının karşılaştırması da yapılmıştır. Chunyan ve Baoquan (2012) [19] tarafından yapılan çalışmada, 18-oluk 21-kutuplu yıldız bağlı konsantre sargılı ve açık oluklu doğrusal motorun çıkış kuvveti kalitesini arttırmak için fiziksel parametrelere bağlı olarak elektromanyetik optimizasyonlar gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, motorun iten arka nüve kalınlığı, izleyen kalınlığı, hava aralığı uzunluğu, oluk genişliği, mıknatıs kalınlığı, mıknatıs genişliği, sarım sayısı ve yardımcı diş genişliği gibi parametreler belli aralıklarda değiştirilerek bu parametrelerin çıkış kuvvetine ve normal kuvvetine olan etkisi incelenmiştir. Yapılan

incelemede, küçük hava aralığının çıkış kuvvetini arttırdığı, kalın iten ve izleyen nüvelerinin sarım sayısının fazla olduğu durumlarda doyuma neden olmadan çıkış kuvvetini arttırdığı görülmüştür. Oluk genişliği değişiminin ve yardımcı diş genişliğinin çıkış kuvvetinde çok büyük değişimlere neden olmadığı ancak yardımcı diş kalınlığının değişimi ile kuvvet dalgalanmasının büyük oranda azaltıldığı tespit edilmiştir. Jeans ve diğ. (1999) [20] tarafından yapılan çalışmada da buna benzer şekilde motor fiziksel parametrelerinin değişiminin motor performansına etkisi incelenmiş ve bu doğrultuda bir doğrusal motor tasarımı gerçekleştirilmiştir. Shi ve diğ. (2014) [21] tarafından yapılan çalışmada 1-iten 1-izleyenli bir doğrusal senkron motorun iteninin modüler parçalara bölünmesinin motor elektromanyetik performansına etkisi SEA analizleri ile incelenmiştir. Çalışmada farklı oluk-kutup kombinasyonuna sahip motorların modüler parçalara bölünmesi durumunda motorun zıt EMK değişimi, çıkış kuvveti ve kuvvet dalgalanması gibi performans verileri karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçları değerlendirildiğinde itenin modüler parçalara bölünmesiyle oluşturulan akı boşluklarının oluk sayısı kutup sayısından büyük olan motorlar için motor performansını artırmadığı görülmüştür. Oluk sayısı kutup sayısından küçük olan motorda akı boşluğu arttıkça motor performansının iyileştiği görülmüştür. Chunyan ve diğ. (2012) [22] tarafından gerçekleştirilen çalışmada elektromanyetik fırlatma sistemi için bir doğrusal senkron motor tasarımı gerçekleştirilmiştir. Motorun izleyeni uzun iteni kısa olarak tasarlanmıştır. Çalışmanın başında motorun manyetik devre hesaplamaları gerçekleştirilmiş, ardından ön tasarımı tamamlanan motorun elektromanyetik analizleri gerçekleştirilmiştir. Motorun performans verilerinin iyileştirilmesi için gerekli optimizasyonlar yapılmış ve elde edilen veriler sonuçlar kısmında sunulmuştur.

Doğrusal motorlarla alakalı yapılan SEA tabanlı çalışmalar incelendiğinde, motor performans verilerinin sunulduğu, performans karşılaştırmalarının yapıldığı analizlerin yanında vuru kuvvetini azaltmak amacıyla da birçok çalışma gerçekleştirildiği görülmüştür. Cruise ve Landy (1999) [23] tarafından gerçekleştirilen çalışmada doğrusal senkron motorlarda vuru kuvvetini azaltmak için kullanılan yöntemler üzerinde durulmuştur. Bu doğrultuda motorda vuru kuvvetini azaltmak amacıyla yüzeyden mıknatıslı ve gömülü mıknatıslı modeller için mıknatıs genişliği, oluk genişliği, hava aralığı genişliği ve mıknatıs kaykısı optimizasyonları SEA

analizleri yardımıyla yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda yüzeysel miknatıslı ve gömülü miknatıslı seçenekler için vuruş kuvvetini düşüren en etkili yöntemin kaykısı olduğuna karar verilmiştir. Bunun yanında yapılan optimizasyon sonuçları da çalışmanın sonuçlar bölümünde sunulmuştur. Palomino ve Conde (2008) [24] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, 8 kutuplu konsantre sargılı bir doğrusal motorun çıkış kuvvetini oluşturan bileşenlerden bahsedilmiş ve çıkış kuvvetindeki dalgalanmaları azaltmak amacıyla miknatıslara kaykısı verme yöntemi önerilmiştir. Çalışma, motorun toplam paket boyunun 10'da biri kullanılarak, miknatıslara belli oranda kaykısı uzunlukları denenmesiyle gerçekleştirilmiştir. Denenen kaykısı uzunluklarının sonuçları karşılaştırıldığında, kaykısı uzunluğunun fazla olduğu analizlerde kuvvet dalgalanmasının yanında çıkış kuvvetinin de ciddi oranda düştüğü görülmüştür. Bu sebeple çalışma sonunda kuvvet düşümünün daha kabul edilebilir oranda olduğu optimum kaykısı uzunluğu tercih edilmiştir. Yao ve diğ. (2015) [25] tarafından gerçekleştirilen çalışmada doğrusal motorlarda çıkış kuvvetindeki dalgalanmaların ikinci, dördüncü ve altıncı harmoniklerden kaynaklandığı üzerinde durulmuş ve bu harmonikleri ortadan kaldırmak için miknatıslara kaykısı uygulanması gerektiği belirtilmiştir. 3D sonlu elemanlar analizleri uzun hesaplamalar ve zaman gerektirdiğinden motorda adım kaykısı yöntemi kullanılmıştır. Çalışmada 12-oluk 14-kutuplu bir doğrusal motorun yüklü ve yüksüz durumlarda kaykısı açısı, segment sayısı optimizasyonları yapılmıştır. Bu optimizasyonların yanında motorun farklı oluk-kutup kombinasyonlarına sahip olması durumunda kaykısının etkisi incelenmiştir.



Şekil 2.3. Standart ve N parçaya bölünmüş adım kaykısı modelleri [25]

Cai ve diğ. (2012) [26] tarafından yapılan çalışmada da buna benzer şekilde adım kaykılı motor tasarımı üzerinde durulmuştur. Jung ve diğ. (2001) [27] tarafından

gerçekleştirilen çalışmada kaykılı doğrusal senkron bir motorun vuru kuvveti, çıkış kuvveti ve kuvvet dalgalanması gibi performans verilerinin değişken fiziksel parametrelere göre değişimi incelenmiştir. Bu motor için hava aralığı genişliği, mıknatıs kalınlığı, mıknatıs overhang uzunluğu, mıknatıs genişliği ve kaykılı uzunluğu parametrelerinin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Analizlerde 3-boyutlu eşdeğer manyetik devre ağı yöntemi kullanılmıştır. Gerçekleştirilen optimizasyonlar sonucunda değiştirilen fiziksel parametrelerin motor performansına etkisi gözlenmiş ve optimum sonuçlar elde edilmiştir. In-Cheol ve diğ. (2007) [28] tarafından gerçekleştirilen çalışmada 8-kutuplu bir doğrusal senkron motorda mıknatıs kaykısının ve overhang miktarının motor performansına etkisi incelenmiştir. Motorun izleyeni kaykılı bir yapıya sahip olduğundan sonlu elemanlar analizleri 3-boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca çalışmada motorun test verilerine de yer verilmiş, çalışmanın sonunda SEA analizlerinden elde edilen sonuçlar ile test sonuçları karşılaştırılmıştır. Buna göre kaykısız duruma göre, motora 10mm'lik bir kaykılı uzunluğu verildiğinde motor testlerindeki verilerde bozulma oranı %6 seviyelerinden %2 seviyelerine çekilmiştir.

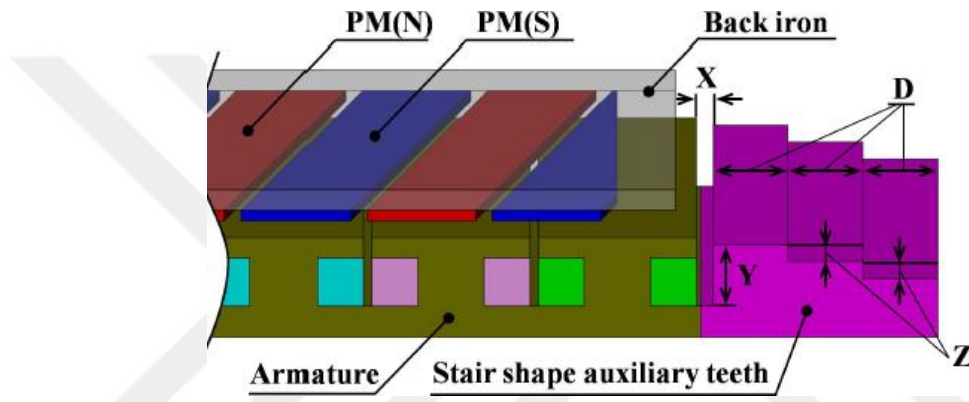
Hwang ve diğ. (2012) [29] tarafından gerçekleştirilen çalışmada 9-oluk 8-kutuplu bir doğrusal motorun vuru kuvvetini azaltmak amacıyla iki optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Bu optimizasyonlardan ilki olan Taguchi yöntemiyle bu motorun iten dişlerinin boyutlandırılmış ve vuru kuvveti bir miktar azaltılmıştır. Bu yöntemin ardından ikinci optimizasyon olarak itenin başına ve sonuna alüminyum parçalar eklenerek en uca üçgen manyetik parçalar eklenmiş ve vuru kuvveti bir miktar daha azaltılmıştır. Yapılan bu optimizasyonlarla vuru kuvveti %30 oranında azaltılmıştır.



Şekil 2.4. Üçgen yardımcı diş eklenmiş 9-oluk 8-kutup motor [29]

Park ve diğ. (2013) [30] tarafından gerçekleştirilen çalışmada genel bir ulaşım sistemi için süresiz armatür yapısına sahip 9-oluk 8-kutuplu bir doğrusal motorda izleyen

köşelerinden kaynaklı oluşan vuruğu kuvvetini azaltmak amacıyla izleyen yapıyı üzerinde optimizasyonlar gerçekleştirilmiştir. İlk olarak izleyendeki mıknatıslara 30 derece kaykık açısı verilmiştir. Bu işlem ile vuruğu kuvveti bir miktar azaltılmış olsa da uygulama ihtiyacına göre yeterli olmamıştır. Bu sebeple ikinci bir işlem olarak itenin her iki tarafına merdiven şeklinde yardımcı dişler eklenmiş ve bu yapının boyutsal optimizasyonu yapılmıştır. Analizler 3B sonlu elemanlar analizleri ile gerçekleştirilmiş ve sonuçta elde edilen nihai tasarım motorda vuruğu kuvveti ön tasarım motora göre %60, yalnızca izleyenine kaykık uygulanmış motora göre %12,46 oranında azaltılmıştır.



Şekil 2.5. Kayıklı, yardımcı diş eklenmiş motor modeli [30]

Park ve diğ. (2014) [31] yaptığı bir diğerk çalışmada aynı süreksiz armatür yapısına sahip 9-oluk 8-kutup motor yapısının köşe vuruğu kuvvetini azaltmak amacıyla iten yapısının başına ve sonuna dikdörtgen şekilli ve çeyrek dilim daire şeklinde yardımcı dişler eklenmiş ve bu yapıların boyutsal optimizasyonları yapılmıştır. Analizler sonlu elemanlar yöntemi tabanlı JMAG programı ile 2B olarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda vuruğu kuvveti çeyrek dilim daire şeklinde yardımcı diş eklenen motorda ön tasarım motora göre %53,29, dikdörtgen şekilli yardımcı diş eklenen motora göre %21,13 oranında azaltılmıştır. Jang ve diğ. (2010) [32] tarafından yapılan çalışmada doğrusal senkron bir motorda manyetik devreden bağımsız bir yardımcı nüvenin motor performans verilerine etkisi incelenmiştir. Motorda manyetik devreden bağımsız olarak eklenen parçanın motordaki vibrasyonu büyük ölçüde azalttığı görülmüştür. J. Jastrzembski ve Ponick (2010) [33] tarafından gerçekleştirilen çalışmada doğrusal motorlarda vuruğu kuvvetini azaltmak için farklı yöntemler sunulmuştur. Çalışmada vuruğu kuvvetinin, iten olukları ile mıknatısların etkileşmesinden kaynaklanan vuruğu kuvveti ve son etkisinden kaynaklanan vuruğu

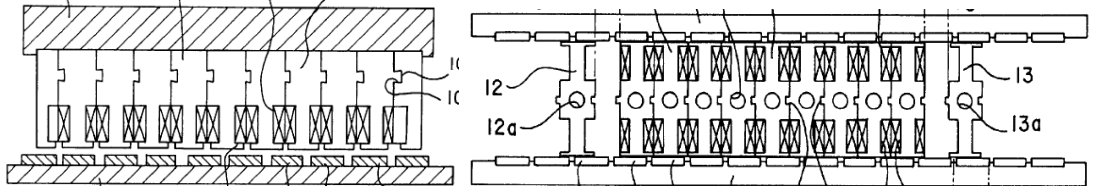
kuvveti bileşenlerinden oluştuğu vurgulanmıştır. Bu sebeple bu iki bileşeni ortadan kaldırmak için itene yardımcı diş ekleme, eklenen yardımcı dişe radius verme, mıknatıslara kaykı verme ve parçalı iten yapısı yöntemleri kullanılmıştır. Sonlu elemanlar analizleri kullanılarak gerçekleştirilen çalışmada motor modeli ve gerçekleştirilen optimizasyonlara ait grafik çıktılarına yer verilmiştir. Jiang ve diğ. (2016) [34] tarafından gerçekleştirilen çalışmada endüstriyel uygulamalar için vuruğu kuvveti ve kuvvet dalgalanması düşük bir doğrusal senkron motor tasarımı elde etmek için fiziksel optimizasyonlar gerçekleştirilmiştir. Çalışmada mıknatıs şekli, oluk açıklığı ve yardımcı diş parametrelerinin 12-oluk 10-kutuplu doğrusal motorun performansına etkisi sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilerek incelenmiştir. Her bir parametrenin etkisi göz önünde bulundurularak motor boyutlandırması yapılmış ve nihai tasarım elde edilmiştir. [35-37] referanslı çalışmalarda da motor fiziksel parametrelerine bağılı olarak optimizasyonlar gerçekleştirilmiş ve bu parametrelerin motor performansına etkisi incelenmiştir

2.2. Patent Araştırması

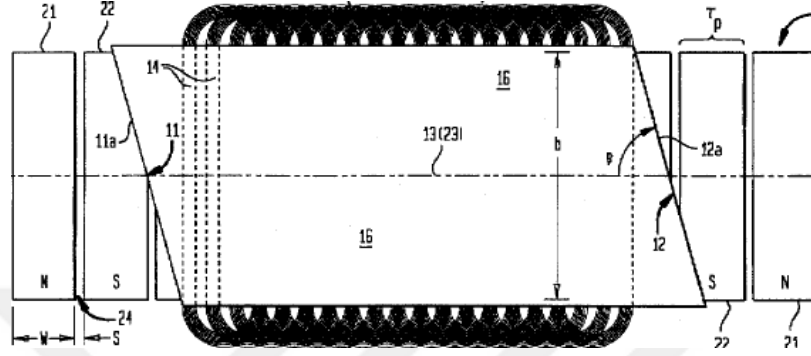
Doğrusal senkron motorlar için patent taraması gerçekleştirildiğinde Yaskawa, Etel, Aerotech, Fischer, Sanyo Denki gibi büyük doğrusal motor üretici firmalar başta olmak üzere birçok firmanın doğrusal motorların tasarımı ve sürücü sistemleri üzerine çalıştığı ve bu alanda patentler aldığı görülmüştür. Bu bölümde alınan patentlerden farklı yöntemler ve teknikler üzerinde duranlar kısa özetlenmiştir.

US640747B1 numaralı patent Yaskawa firması tarafından alınmış, patentte KMDSM motorun iten yapısı üzerine çalışılmıştır. Tasarlanan yapıda, iten parça parça ve birbiri içine geçebilen laminasyonlardan oluşturulmuş, iten sargıları bu laminasyon parçaları üzerine açılan oluklara yerleştirilmiştir. Tasarım hem 1-itene 1-izleyen hem de 1-itene 2-izleyen yapısına sahip motorlar için hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğunu ve itme kuvvetinin tepe değerini arttırmak için gerçekleştirilmiştir.

US005744879 numaralı patentte bir doğrusal senkron motor vuruğu kuvvetini azaltmak ve hareket hassasiyetini arttırmak amacıyla hareketli iten yapısının sonlarına üçgen şekilli parçalar eklenmiştir. Ayrıca patentte bu parçaların boyut ve açı hesaplamalarına yer verilerek, parçaların kaykılı ve kaykısız modellerdeki etkisinden bahsedilmiştir.

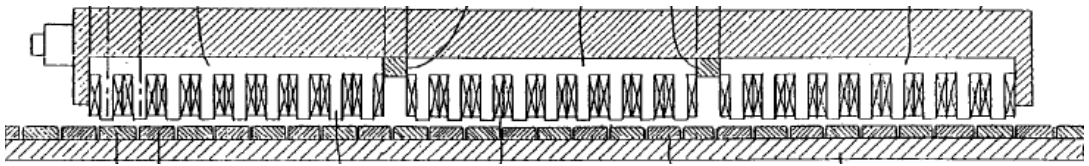


Şekil 2.6. Parçalı iten yapısı [38]



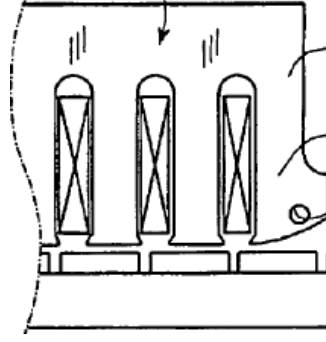
Şekil 2.7. İtenine üçgen yardımcı diş eklenmiş DSM [39]

US6476524 numaralı patent 1-iten 1-izleyenli bir doğrusal senkron motorun vurutu kuvvetini azaltmak amacıyla yeni bir iten yapısı önermektedir. Bu iten yapısında eşit boyutlarda ve dışarıdan ayrı ayrı beslenen 9'ar oluklu iten yapıları alüminyum bir parça ile birleştirilmiş ve her biri arasında eşit mesafe bırakılmıştır. Bu sayede son etkisinden kaynaklanan vurutu kuvvetinin önüne geçilmiştir. Ayrıca motorda ortada yer alan iten yapısına sıcaklık sensörleri eklenerek bu yapının motor sıcaklıklarını nasıl etkilediği gözlenmiştir.



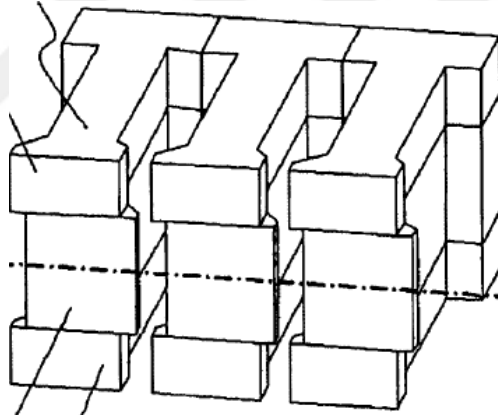
Şekil 2.8. Son etkisini azaltmak için önerilen DSM [40]

US7825549B2 ve US6949846 numaralı patentlerde 1-iten 1-izleyenli doğrusal senkron motorda son etkisinden kaynaklanan vurutu kuvvetini azaltmak amacıyla yardımcı diş tasarımları önerilmiştir. Ayrıca bu patentlerde yardımcı dişin motor performansına etkisinden de bahsedilmiş, gerçekleştirilen diş tasarımının hesaplamalarına yer verilmiştir.



Şekil 2.9. Önerilen yardımcı diş yapısı [42]

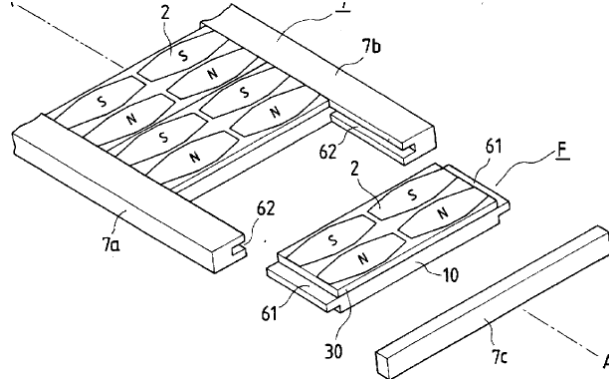
US20100201210A1 numaralı patente tasarlanan doğrusal senkron motorun oluk ve mıknatıslarının etkileşmesinden kaynaklanan vuruş kuvvetini elimine etmek amacıyla iten kaykısı önerilmiştir. Çalışmada paket boyu doğrultusunda motor 2,3,4 ve 5 parçalara bölünerek farklı kaykısı açıları ve yöntemleri denenmiş, bu yöntemlerin motor performansına etkisi tablo ve grafiklerle sunulmuştur.



Şekil 2.10. İten kaykısı [43]

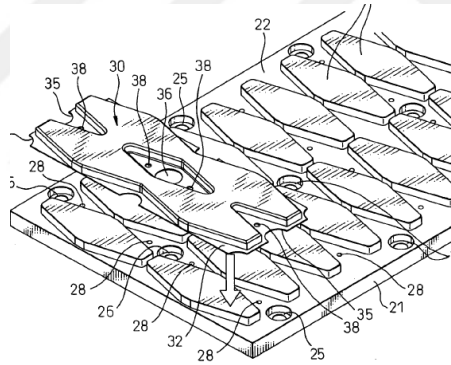
Fanuc firması tarafından alınan US6873066B2 numaralı patente bir doğrusal motorda vuruş kuvvetini minimize etmek amacıyla mıknatıslara radius verilmiştir. Çalışmada mıknatıslara verilen radius şeklinin parabolik ve hiperbolik denklemler ile hesaplanması anlatılmış, oluşan mıknatis şeklinin motor performansına etkisi gösterilmiştir.

Yine Fanuc firması tarafından alınan US005757091A numaralı patente, standart dışı mıknatıslar motorun izleyenine çift sıra olarak yerleştirilmiştir. Çalışmada mıknatısların yerleştirilmesi için parçalı bir aparat tasarlanmış ve mıknatıslar bu aparat içerisine yerleştirilmiştir.



Şekil 2.11. Gömülü mıknatıs yapısı [45]

US20060125327A1 numaralı patente baklava dilimi şeklinde olan mıknatısların üzerine mekanik bağlantıdan zarar görmemesi için bir aparat geliştirilmiştir. Bu aparat manyetik olmayan malzemeden üretilmiş ve bir parçası 4 adet mıknatısın üzerini örtmektedir. Aparatın ortasında bulunan boşluk civataların bağlantısını kolaylaştırmaktadır.



Şekil 2.12. Mıknatısları mekanik etkilere karşı koruyan aparat [46]

5782877 numaral patente nüvesiz U-kanallı bir doğrusal motor iten sargılarının çevresine konumlanan U-şekilli borulardan oluşmuş soğutma yapısı verilmiştir. Patent kapsamında boruların tasarımı, giriş çıkış noktaları ve malzeme özelliklerinden bahsedilmiştir. US2014/0054979 numaralı patente ise 1-iten 1-izleyenli bir doğrusal motorda iteni soğutma amaçlı yerleştirilen boru tasarımlarından bahsedilmiştir. Borular iten sac malzemesi içine konumlandırılmış, boruların paralel ve seri bağlanması için seçenekler sunulmuştur.

3. KM DOĞRUSAL SENKRON MOTOR ÖN TASARIMI

Bu bölümde belirlenen tasarım kriterleri doğrultusunda 1-iten 1-izleyenli özgün doğrusal senkron motorun ön tasarımı ve boyutlandırılması gerçekleştirilmiştir. Motor ön tasarımı ve boyutlandırılması gerçekleştirilirken KM doğrusal senkron motor temel denklemleri ve manyetik eşdeğer devre modeli kullanılmıştır. Bu bölümde son olarak ön tasarım motorun SE analizleri gerçekleştirilmiş ve manyetik eşdeğer devre modeli yöntemiyle elde edilen veriler doğrulanmıştır.

3.1. Tasarım Kriterleri

Tasarımı gerçekleştirilecek olan KM doğrusal senkron motorun tasarım kriterleri Akım Metal firmasından bir endüstriyel otomasyon sistemi için alınmıştır. Bu tasarım kriterleri Tablo 3.1 de verilmiştir. Motor 1-iten 1-izleyenli olarak tasarlanacak, motorun hareketli kısmı iteni olacaktır.

Tablo 3.1. KM doğrusal senkron motor tasarım kriterleri

Tasarım Kriterleri	Değer
DC bara gerilimi	310V
Sürekli kuvvet	550N
Sürekli akım	15A
Maksimum kuvvet	1100N
Maksimum motor uzunluğu	500mm
Hız	2m/s

Gerçekleştirilen ön tasarım sonucunda kuvvet yoğunluğu yüksek, vuru kuvveti ve kuvvet dalgalanması düşük, sinüsoidal bir zıt EMK gerilimine sahip ve tasarım kriterlerini karşılayan bir KM doğrusal senkron motoru tasarımı elde edilmesi hedeflenmektedir.

3.2. KM Senkron Doğrusal Senkron Motor Temel Denklemleri

Bu bölümde KM doğrusal senkron bir motorun temel tasarım denklemleri verilmiştir [4]. Dengeli bir akım sistemi ile beslenen simetrik çok fazlı sarımın uzay-zaman MMF dağılımı,

$$\begin{aligned}
 F(x,t) = & \frac{N_1 \sqrt{2} I_a}{\pi p} \sin \omega t \sum_{v=1}^{\infty} \frac{1}{v} k_{\omega 1 v} \cos \left(v \frac{\pi}{\tau} x \right) \\
 & + \frac{N_1 \sqrt{2} I_a}{\pi p} \sin \left(\omega t - \frac{1}{m_1} 2\pi \right) \sum_{v=1}^{\infty} \frac{1}{v} k_{\omega 1 v} \cos v \left(\frac{\pi}{\tau} x - \frac{1}{m_1} 2\pi \right) + \dots \\
 & + \frac{N_1 \sqrt{2} I_a}{\pi p} \sin \left(\omega t - \frac{m_1 - 1}{m_1} 2\pi \right) \sum_{v=1}^{\infty} \frac{1}{v} k_{\omega 1 v} \cos v \left(\frac{\pi}{\tau} x - \frac{m_1 - 1}{m_1} 2\pi \right)
 \end{aligned} \quad (3.1)$$

şeklinde ifade edilir. Burada m_1 faz sayısı, p kutup çifti sayısı, N_1 faz başına düşen sarım sayısı, $k_{\omega 1 v}$ sargı faktörü, $\omega = 2\pi f$ açısal frekans, I_a besleme akımı ve τ kutup adımındır. Denklem (3.1), Denklem (3.2) deki gibi sadeleştirilebilir.

$$\begin{aligned}
 F(x,t) = & \frac{1}{2} \sin \left\{ \left[\left(\omega t - v \frac{\pi}{\tau} x \right) + (v-1) \frac{2\pi}{m_1} \right] \right. \\
 & \left. + \sin \left[\left(\omega t + v \frac{\pi}{\tau} x \right) - (v-1) \frac{2\pi}{m_1} \right] \right\}
 \end{aligned} \quad (3.2)$$

Sargı faktörü $k_{\omega 1 v}$, dağıtım faktörü k_{d1v} , adım faktörü k_{p1v} ve kaykı faktörünün bir ürünüdür. Bu faktörler cinsinden sargı faktörü Denklem (3.3) deki gibi ifade edilir.

$$k_{\omega 1 v} = k_{d1v} k_{p1v} k_{s1v} \quad (3.3)$$

Burada verilen dağıtım ve adım faktörü Denklem (3.4) ve Denklem (3.5) deki şekilde açılabilir.

$$k_{d1v} = \frac{\sin [v\pi / (2m_1)]}{q_1 \sin [v\pi / (2m_1 q_1)]} \quad (3.4)$$

$$k_{p1v} = \sin \left(v \frac{\pi \omega_c}{\tau} \right) \quad (3.5)$$

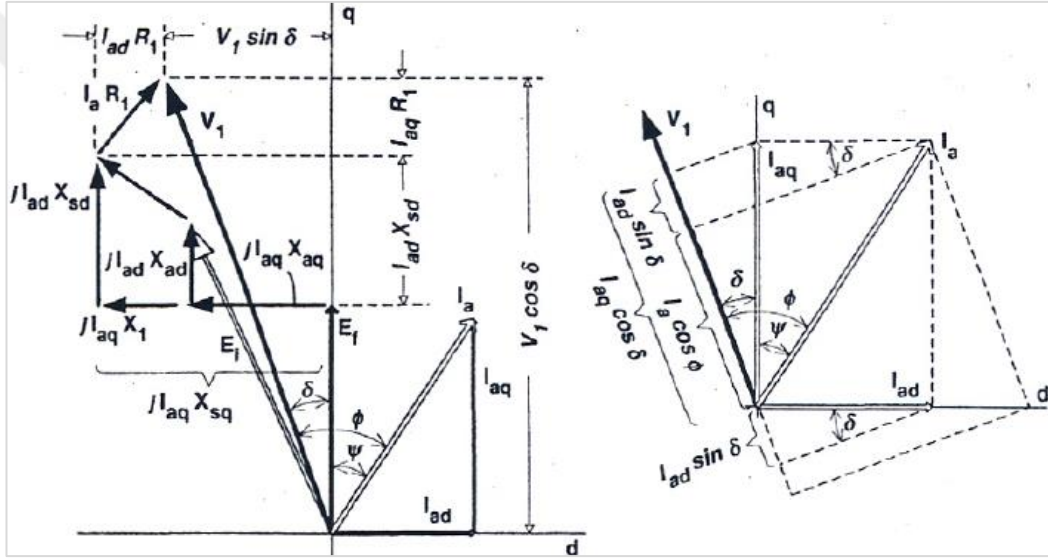
Kaykı faktörü kaykısız motorlarda 1'dir. Doğrusal senkron motorlarda iten sargılarının bir fazında indüklenen yüksüz RMS gerilimi (EMF),

$$E_f = \pi \sqrt{2} f N_1 k_{\omega 1} \Phi_f \quad (3.6)$$

şeklinde ifade edilir. Denklem (3.6) da Φ_f mıknatıs uyartım akısıdır. E_f EMK gerilimi, d ve q-eksen EMK gerilimlerinin bileşiminden oluşur. d-eksen mıknatıs kutbunun merkezinden geçen eksen iken q-eksen, d-eksene dik olarak konumlanan eksenidir. d ve q-eksen EMF gerilimleri, d ve q-eksen mıknatıs akıları cinsinden Denklem (3.7) ve Denklem (3.8) deki gibi ifade edilebilir.

$$E_{ad} = \pi \sqrt{2} f N_1 k_{\omega 1} \Phi_{ad} \quad (3.7)$$

$$E_{aq} = \pi \sqrt{2} f N_1 k_{\omega 1} \Phi_{aq} \quad (3.8)$$



Şekil 3.1. Senkron motor fazör diyagramı [4]

Şekil 3.1’da verilen fazör diyagramı kullanılarak,

$$V_1 \sin \delta = -I_{ad} R_1 + I_{aq} X_{sq} \quad (3.9)$$

$$V_1 \cos \delta = I_{aq} R_1 + I_{ad} X_{sd} + E_f \quad (3.10)$$

denklemlerinin çıkarımını yapmak mümkündür. Denklem (3.9) ve Denklem (3.10) da yer alan δ ifadesi terminal gerilimi ve q-eksen EMK gerilimi arasında kalan yük açısıdır. X_{sq} ve X_{sd} ise q ve d-eksenlerdeki senkron reaktansları ifade eder. Bu durumda akımlar,

$$I_{ad} = \frac{V_1 (X_{sq} \cos\delta - R_1 \sin\delta) - E_f X_{sq}}{X_{sd} X_{sq} + R_1^2} \quad (3.11)$$

$$I_{aq} = \frac{V_1 (R_1 \cos\delta - X_{sd} \sin\delta) - E_f R_1}{X_{sd} X_{sq} + R_1^2} \quad (3.12)$$

şeklinde ifade edilir. Armatür akımının RMS değeri Denklem (3.11) ve Denklem (3.12) de verilen I_{ad} ve I_{aq} akımlarının bileşke fonksiyonudur ve Denklem (3.13) deki gibi ifade edilir.

$$I_a = \sqrt{I_{ad}^2 + I_{aq}^2} \quad (3.13)$$

Motorun giriş gücü ise Denklem (3.14) deki şekilde ifade edilir.

$$P_{in} = m_1 V_1 I_a \cos\Phi = m_1 V_1 (I_{aq} \cos\delta - I_{ad} \sin\delta) \quad (3.14)$$

Doğrusal motorlarda elektromanyetik güç, demir kayıplarının ihmal edildiği durumda;

$$P_{elm} = P_{in} - \Delta P_{1w} \quad (3.15)$$

şeklinde giriş gücü ile bakır kayıplarının farkı olarak ifade edilir. Denklem (3.15) deki bakır kaybı,

$$\Delta P_{1w} = m_1 I_a^2 R_1 \quad (3.16)$$

şeklinde yazılır. Denklem (3.16) daki R_1 sargı direncidir. Elektromanyetik güç ifadesinin doğrusal senkron hız oranı,

$$F_{dx} = \frac{P_{elm}}{V_s} \quad (3.17)$$

şeklinde yazılır ve elektromanyetik itme kuvvetini ifade eder.

Elektromanyetik itme kuvvetinde oluşan kuvvet dalgalanması üç bileşenden oluşur; birincisi iten dişleri ve mıknatıslar arasında oluşan etkileşimden kaynaklanan dalgalanma, ikincisi hava aralığı akı yoğunluğunun dalga şeklindeki bozukluktan kaynaklanan dalgalanma, üçüncüsü ise motoru besleyen akım kaynağında meydana gelen dalgalanmalardır. Kuvvet dalgalanmasını Denklem (3.18) deki gibi ifade etmek mümkündür;

$$f_r = \frac{1}{F_{dx}} \sqrt{\sum_v F_{dxv}^2} \quad (3.18)$$

Motor ön tasarım verileri ve temel denklemleri kullanılarak yapılan hesaplamalar ile KM doğrusal senkron motorun 9-oluk 8-kutuplu bir yapıda olmasına karar verilmiştir. Motor ön tasarım boyutlarını belirlemek ve ön tasarım performans sonuçlarını hızlıca elde etmek amacıyla manyetik eşdeğer devre (MED) modeli oluşturulacak ve gerekli hesaplamalar yapılacaktır.

3.3. KM Doğrusal Senkron Motor Manyetik Eşdeğer Devre Modeli

3.3.1. Doğrusal manyetik eşdeğer devre analizi

İçinden akım geçen bir iletkenin etrafında bir manyetik alan meydana gelir. İletken Şekil 3.2'deki gibi bir manyetik nüve üzerine sarılır ise, manyetik akı nüve üzerinden devresinin tamamlar. Bir nüve etrafına sarılı sargıdan geçen akım tarafından manyetik alanın üretilmesini açıklayan temel kanun Amper Kanunu'dur ve temel ifadesi Denklem (3.19)'daki gibidir [49-51];

$$\oint H dl = I_{net} \quad (3.19)$$

Amper kanunun temel ifadesinde yer alan I ifadesi akım (A), H ise manyetik alan şiddetidir (Amper Sarım/m). l manyetik akı yolunun uzunluğudur ve birimi metre (m)'dir.

Şekil 3.2'de bir kolu üzerinde N sarımlı bir sargı bulunan dikdörtgen nüve gösterilmiştir. Amper Kanunu'ndaki integralin yolu, dikdörtgen nüvedeki ortalama yol uzunluğuna eşittir. Akım taşıyan sargı telleri ise akımın yolunu N defa keserler. Bu durumda Amper Kanunu'ndaki integral ifadesi,

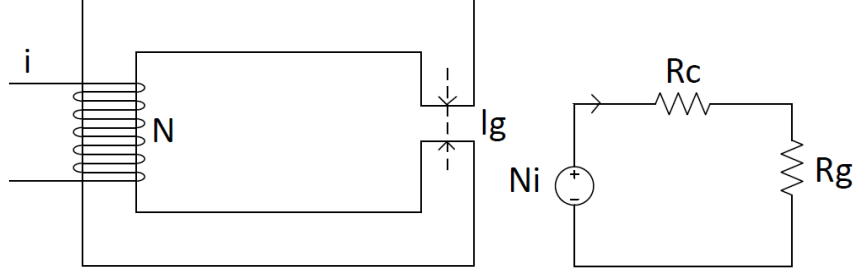
$$Hl_c = Ni \quad (3.20)$$

şeklinde düzenlenebilir. Denklem (3.20) de, l_c nüvenin ortalama yol uzunluğudur.

Elektrik makinalarında kullanılan en önemli büyüklüklerden biri akı yoğunluğudur. Manyetik akı yoğunluğu, manyetik alana dik bir birim alandan geçen akı miktarıdır ve

$$B = \frac{\Phi}{A} \quad (3.21)$$

şeklinde ifade edilir.



Şekil 3.2. Nüvenin manyetik eşdeğer devre modeli

Birimi W_b/m^2 veya Tesla T'dır. Manyetik alan şiddeti ve bir malzemede üretilen manyetik akı yoğunluğu arasındaki ilişki,

$$B = \mu H \quad (3.22)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Denklem (3.22) de μ manyetik geçirgenliktir ve malzeme içerisinde manyetik alanın geçişini tanımlar. Her malzeme bir manyetik geçirgenliğe sahiptir. Manyetik geçirgenliği yüksek olan malzemelerde daha kolay manyetik alan oluşur.

Denklem (3.23) de verilen, herhangi bir malzemenin geçirgenliği ile havanın geçirgenliğinin oranlanmasına bağlı geçirgenlik adı verilir ve bağlı geçirgenlik μ_r ile gösterilir. Bağlı geçirgenliğin yüksek olması malzemenin manyetik özelliğinin yüksek olduğu anlamına gelir.

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (3.23)$$

Bir nüvedeki akı yoğunluğunun genliği Denklem (3.24) de verilmiştir.

$$B = \mu H = \frac{\mu Ni}{l_c} \quad (3.24)$$

Toplam manyetik akının değeri Denklem (3.25) deki gibi ifade edilir;

$$f=BA=\frac{\mu NiA}{l_c} \quad (3.25)$$

Bir elektromanyetik devrede manyetik akı nüveye sarılı sargıdan geçen akım tarafından üretilir. Manyetik akı, demir nüve üzerinden kendi için en düşük dirençli yolu bularak çevrimini tamamlamak isteyecektir.

Bir sargıdan geçen akım manyetomotor kuvvetinin değerini belirler. Manyetomotor kuvveti devrede bir akı üretilmesini ve Denklem (3.26)'daki gibi ifade edilir;

$$F=Ni \quad (3.26)$$

Devreden geçen toplam akı ise;

$$f=\frac{F}{R} \quad (3.27)$$

şeklinde ifade edilir. Denklem (3.27) de R, relüktansı temsil eder ve birimi $A_{sarıım}/Wb$ 'dir. Relüktans bir elektrik devresindeki dirence karşılık gelir ve Denklem (3.28)'deki gibi ifade edilir;

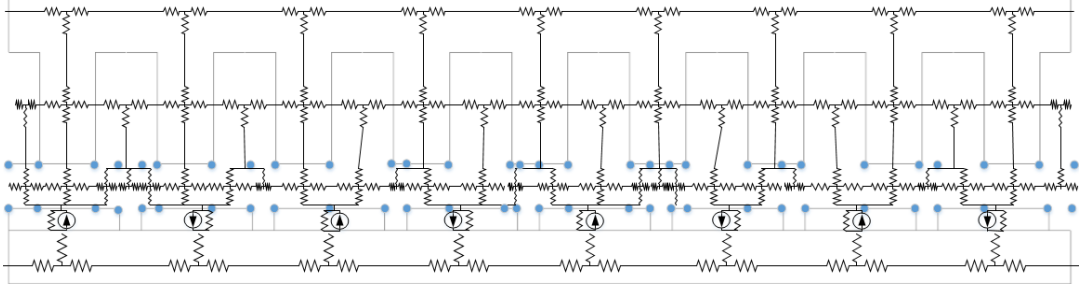
$$R = \frac{l_c}{\mu A} \quad (3.28)$$

3.3.2. 9-Oluk 8-kutuplu KM doğrusal senkron motorların doğrusal olmayan manyetik eşdeğer devre analizi

Manyetik eşdeğer devre (MED) modeli KM motorun tasarım aşamasında sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Basitleştirilmiş MED modeli, motorun basit olarak akı yoğunluklarının tespitinde SEA yöntemlerine göre ciddi anlamda zamandan tasarruf sağlamaktadır [9-16].

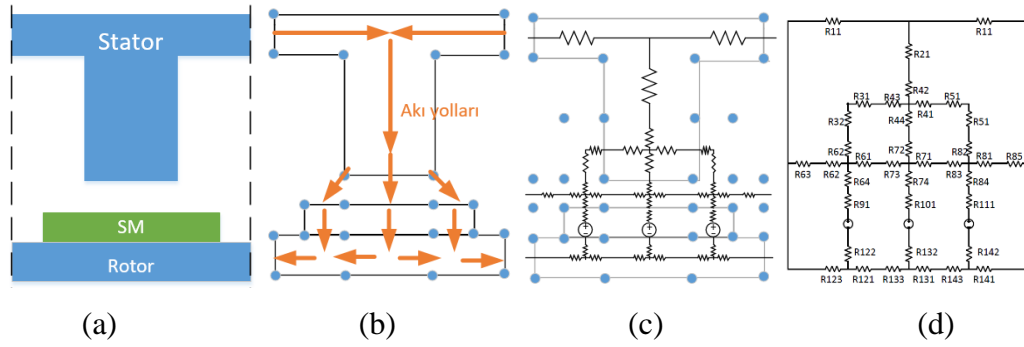
Bu bölümde KM doğrusal senkron motorun 2-boyutlu gelişmiş MED modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan manyetik eşdeğer devre modelinde, motorun kritik bölgelerine düğüm noktaları atanarak, her bir düğüm noktası arasına 2-boyutta relüktanslar tanımlanmıştır. Bu yöntemle oluşturulan 9-oluk 8-kutuplu doğrusal senkron motorun MED modeli Şekil 3.3'de gösterilmiştir. Modelde yaklaşık olarak 350 adet relüktans oluşmakta, buna bağlı olarak da 50 adet matrisin çözülmesi gerekmektedir. Bu sebeple motorun MED modeli oldukça karmaşık bir yapı haline

gelmektedir. Yapının relüktans sayısının fazla olması ve manyetik eşdeğer devre modelinin karmaşıklığı işlem yükünü arttıracığından motorun sadece 1-oluk 1-mıknatıs yapısı dikkate alınarak MED modeli oluşturulmuştur.



Şekil 3.3. Doğrusal motorun manyetik eşdeğer devre modeli

1-oluk 1-mıknatıslı yapının modeli, akı yolları, akı yollarına bakılarak belirlenen düğüm noktaları ve 2-boyutta oluşturulan MED modeli Şekil 3.4'de gösterilmiştir. Model motorun yüksüz durumu için oluşturulmuş, bu sebeple devreye iten sargılarından kaynaklanan EMK bileşeni eklenmemiştir. Manyetik eşdeğer devre modelinde, izleyen ve itendeki relüktansların manyetik geçirgenlikleri değişken, mıknatıs ve hava aralığındaki relüktanslar sabit olarak tanımlanmıştır.



Şekil 3.4. 1-oluk 1-mıknatıs yapısının (a) basitleştirilmiş modeli, (b) akı yolları, (c) belirlenen düğüm noktaları, (d) MED modeli

Değişken ve sabit olan relüktansların formülü Denklem (3.29) ve Denklem (3.30)'da verilmiştir;

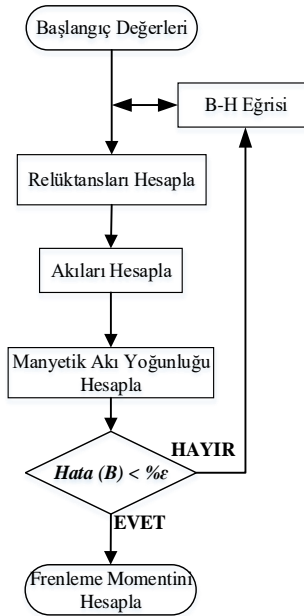
$$R_d = \frac{1}{\mu_0 \mu_d A} \quad (3.29)$$

$$R_s = \frac{1}{\mu_0 \mu_s A} \quad (3.30)$$

burada R_d doğrusal olmayan, R_s ise sabit relüktansları temsil etmektedir. Ayrıca bu denklemlerdeki μ_0 boşluğun manyetik geçirgenliğini, μ_d BH eğrisinden elde edilen değişken manyetik geçirgenliği, μ_s sabit manyetik geçirgenliği, l akı yolu uzunluğunu ve A ise kesit alanını temsil etmektedir.

Doğrusal olmayan modellemede kullanılan Gauss-Siedel yöntemi iteratif bir yöntemdir ve amacı tanımlı hata yüzde değerini sağlayacak şekilde sonuçlar elde etmektir. Gauss-Siedel yöntemiyle her bir iterasyon sonunda BH eğrisinden yeni bir değer alınarak sonuca yakınsamaktadır.

Doğrusal olmayan modellemede iş akış planı Şekil 3.5’de verilmiştir. Hesaplamaya başlanırken ilk başta değişkenlere başlangıç değeri atanmaktadır. Daha sonra sırası ile relüktanslar, akılar ve manyetik akı yoğunlukları hesaplanmaktadır. Hesaplamalar bittikten sonra karar verme aşamasında hesaplanan manyetik akı yoğunlukları ile bir önceki iterasyonda hesaplanan manyetik akı yoğunluğu değeri karşılaştırılmaktadır. Bu durumda eğer hata yüzdesi istenilen değerden altında ise akış tamamlanmaktadır. Hata yüzdesi istenilen değerden yüksek ise döngü, BH eğrisi üzerinden yeni verilerin güncellenmesi ile tekrar başa dönmektedir.



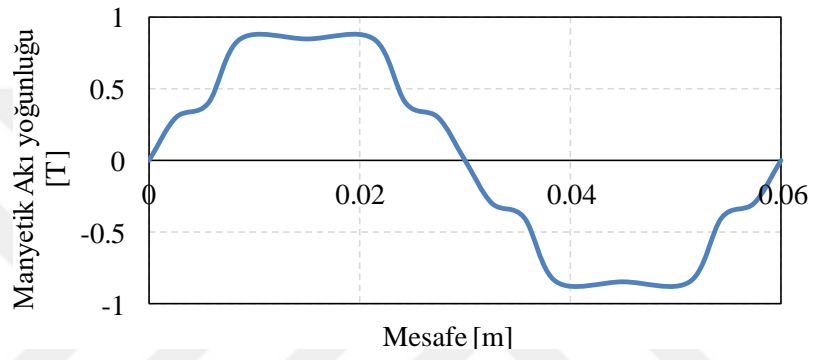
Şekil 3.5. Doğrusal olmayan modellemede iş akış planı

Gerçekleştirilen hesaplamalar sonucunda iten dış ortası, iten dış başı ve hava aralıklarında manyetik akı yoğunlukları değerleri Tablo 3.2’de verilmiştir. Ayrıca hava

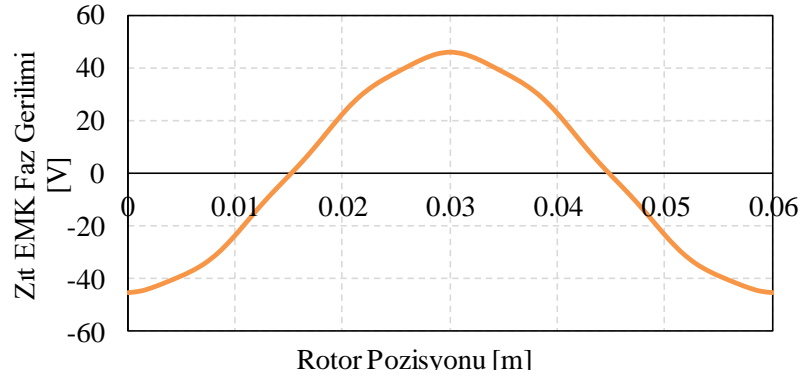
aralığı akı yoğunluğu, zıt EMK gerilimi ve çıkış kuvveti değişimleri Şekil 3.6 ve Şekil 3.8 arasında gösterilmiştir.

Tablo 3.2. MED modeli ile elde edilen kritik bölge akı yoğunlukları

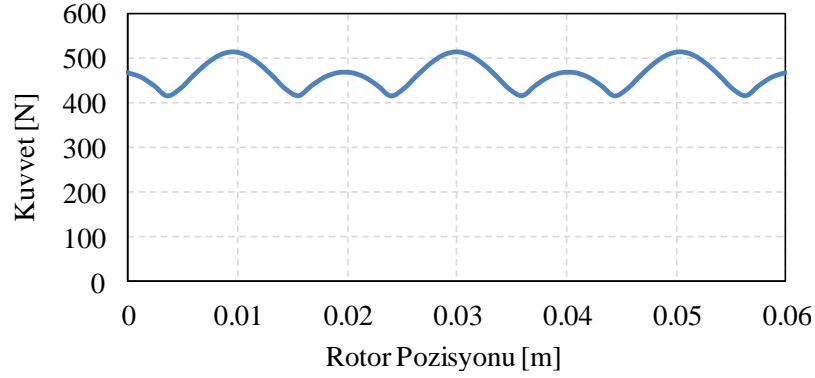
Bölge	Akı yoğunluğu
İten dış başı	0,91T
İten dış ortası	1,12T
Hava aralığı	0,85T



Şekil 3.6. MED modeli ile elde edilen hava aralığı akı yoğunluğu değişimi



Şekil 3.7. MED modeli ile elde edilen zıt EMK gerilimi değişimi

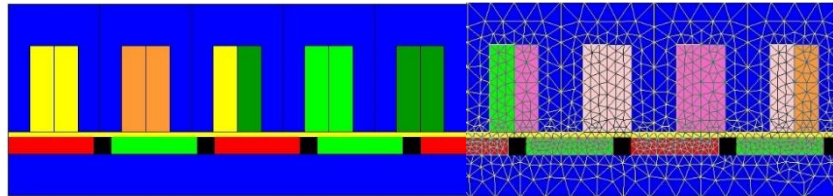


Şekil 3.8. MED modeli ile elde edilen çıkış kuvveti değişimi

3.4. Ön Tasarım Motor SEA Performans Sonuçları

Bu bölümde temel tasarım denklemleri ile ön boyutlandırması yapılan 9-oluk 8-kutuplu KM doğrusal senkron motorun 2-boyutlu SEA yöntemiyle performans verileri elde edilmiştir. Flux 2B yazılımı kullanılarak analizleri gerçekleştirilen açık oluklu motorun model ve ağ yapısı Şekil 3.9’da gösterilmiştir.

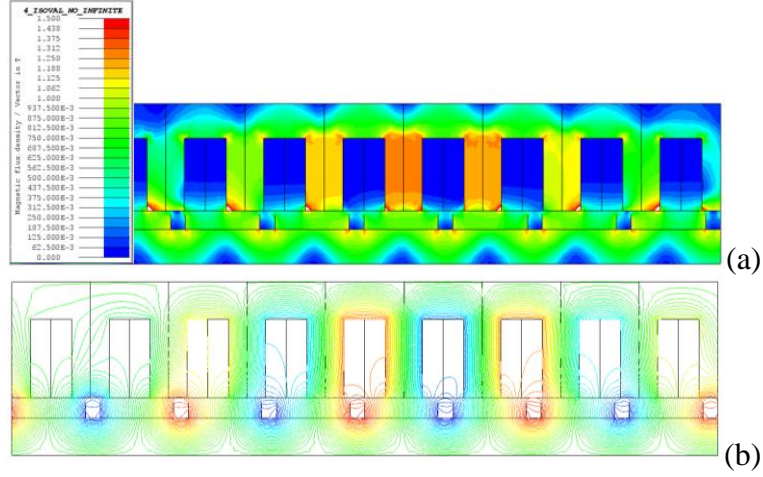
Motorda izleyen ve iten sac malzemesi olarak M19 silisli çelik, mıknatıs malzemesi olarak ise B_r değeri 1,15T seviyelerinde olan NdFeB türü bir mıknatıs kullanılmıştır. Yüklü ve yüksüz durum SE analizleri gerçekleştirilmiş, motorun performans verileri bölüm sonunda MED analiziyle elde edilen veriler ile karşılaştırılmıştır.



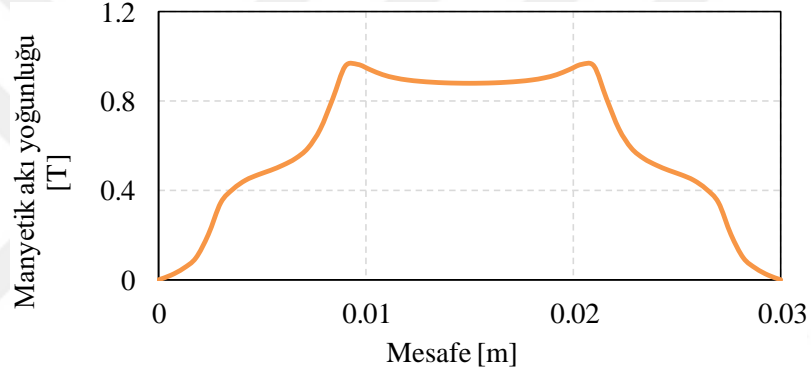
Şekil 3.9. 9-oluk 8-kutuplu motor modeli ve ağ yapısı

3.4.1. Yüksüz durum analizleri

9-oluk 8-kutuplu motorun yüksüz durum analizi sonucu elde edilen akı yoğunlukları dağılımı ve akı çizgileri Şekil 3.10’de gösterilmiştir. Buna göre ortalama hava aralığı akı yoğunluğu 0,64T, ortalama iten diş ortası akı yoğunluğu 1,28T ve iten diş başı akı yoğunluğu 1,15T olarak elde edilmiştir. Motorun hava aralığı akı yoğunluğu değişimi ise Şekil 3.11’de verilmiştir.

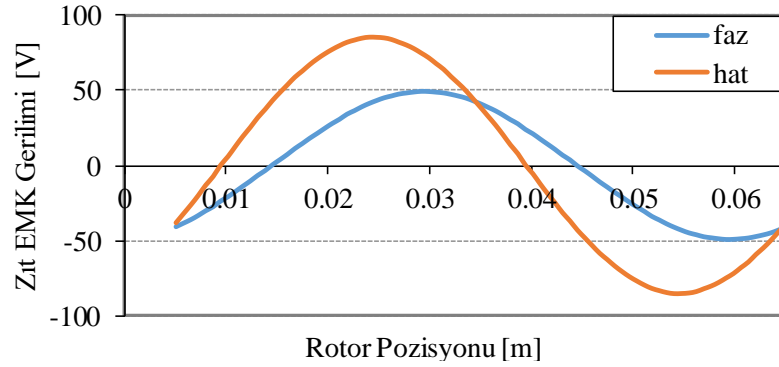


Şekil 3.10. 9-oluk 8-kutuplu doğrusal senkron motorun (a) akı yoğunlukları dağılımı, (b) akı çizgileri

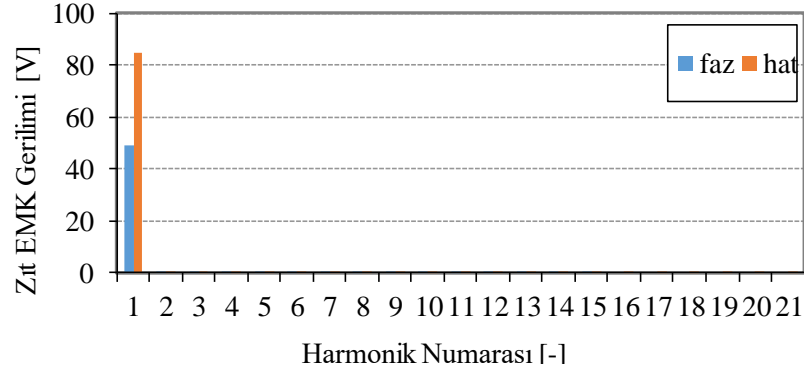


Şekil 3.11. SEA yöntemiyle elde edilen hava aralığı akı yoğunluğu değişimi

Motorun 2m/s hız değerindeki faz e hat gerilimleri ve harmonik değerleri sırasıyla Şekil 3.12 ve Şekil 3.13’de gösterilmiştir. Hat geriliminin tepe değeri 85V, hat gerilimi toplam harmonik bozunumu (THB) değeri ise %0,37 seviyelerinde elde edilmiştir.



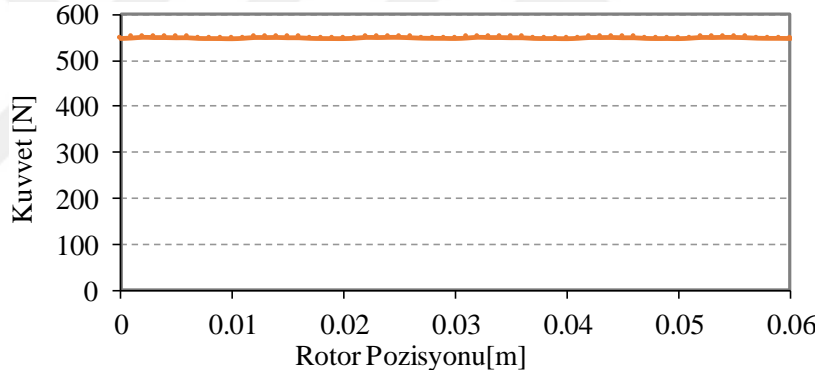
Şekil 3.12. SEA yöntemiyle elde edilen zıt EMK gerilimleri değişimi



Şekil 3.13. SEA yöntemiyle elde edilen THB değişimi

3.4.2. Yüklü durum analizleri

Motorun 15Amax faz akımında gerçekleştirilen yüklü durum analizleri sonucunda elde edilen çıkış kuvveti değişimi Şekil 3.14’de gösterilmiştir. Burada ortalama kuvvet 549N, ortalama kuvvete göre kuvvet dalgalanması %1 seviyelerindedir.



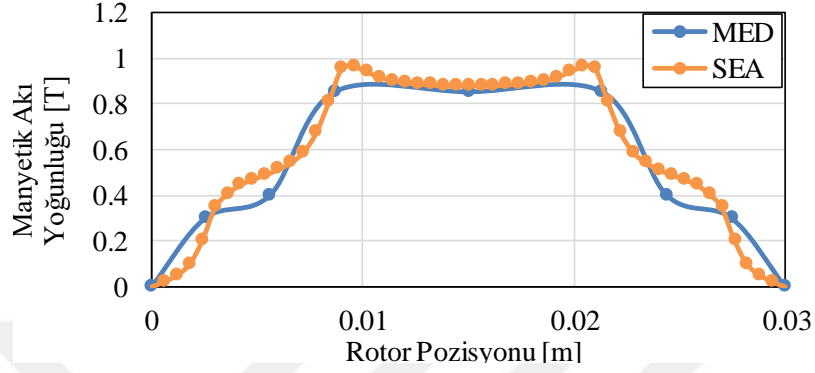
Şekil 3.14. SEA yöntemiyle elde edilen çıkış kuvveti

3.5. Ön Tasarım Motor MED ve SEA Performans Sonuçlarının Karşılaştırılması

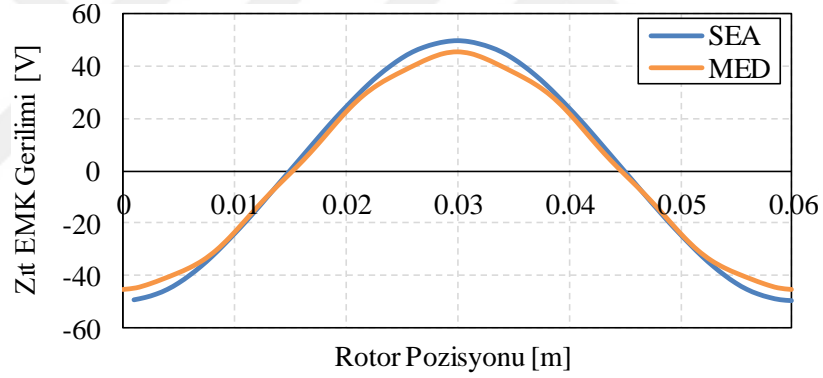
Bu bölümde MED ve SEA yöntemleriyle elde edilen hava aralığı akı yoğunluğu, zıt EMK gerilimi ve çıkış kuvvetinin değişimleri karşılaştırılmıştır. Bu verilerin birbirlerine göre değişimleri sırasıyla Şekil 3.15 ve Şekil 3.17 arasında verilmiştir.

Tablo 3.3’de SEA ve MED ile elde edilen performans değerlerinin karşılaştırması ve bu iki yöntem arasındaki farklar yüzdeler olarak verilmiştir. Tablodan da görüldüğü gibi hava aralığı akı yoğunlukları arasında %5,5, iten diş ortası akı yoğunlukları arasında %12,5, zıt EMK gerilimi temel harmonik tepe değerleri arasında ise %7 lik bir fark bulunmaktadır. Yapılan modellemede 1-diş ve 1-oluk alınlığı, FEA de

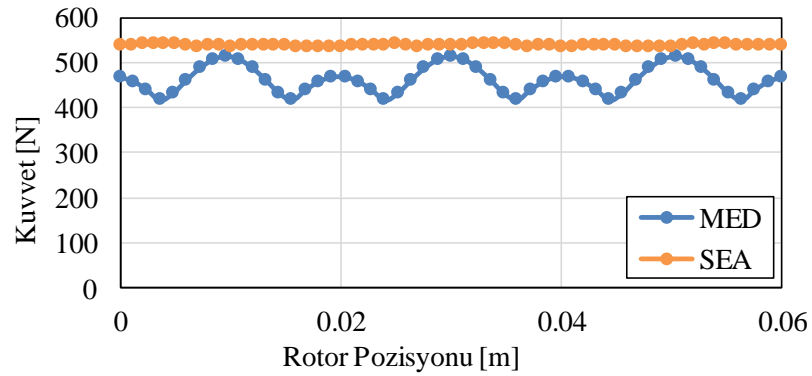
modellenen motorun 2 boyutlu olması, problemin 3 boyutlu olması gibi gerçekler farklılıkları açıklamaktadır. Bu yöntem arasındaki farklar kullanılan 1-oluk 1-mıknatıstan oluşan MED modeli ve varsayımlar göz önüne alındığında bu farklar oldukça makul seviyededir.



Şekil 3.15. MED ve SEA ile elde edilen hava aralığı akı yoğunluğu değişimleri



Şekil 3.16. MED ve SEA ile elde edilen zıt EMK faz gerilimi değişimleri



Şekil 3.17. MED ve SEA ile elde edilen çıkış kuvveti değişimleri

Tablo 3.3. MED ve SEA ile elde edilen performans sonuçlarının karşılaştırılması

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

4. KM DOĞRUSAL SENKRON MOTOR SONLU ELEMAN ANALİZLERİ

Bu bölümde çalışma koşulları göz önüne alınarak izleyeni uzun 9-oluk 10-kutuplu doğrusal senkron motorun elektromanyetik tasarımı, analizleri ve performans iyileştirmesi için gerekli optimizasyonlar gerçekleştirilmiştir. Ön tasarımda 9-oluk 8-kutuplu olarak karar verilen özgün KM doğrusal senkron motor yapısı, izleyeni uzun tasarımda 9-oluk 10-kutuplu olarak güncellenmiştir. Temel KM doğrusal senkron motor tasarım denklemleri kullanılarak gerçekleştirilen performans karşılaştırmasında 9-oluk 10-kutuplu yapının 9-oluk 8-kutuplu yapıya göre kuvvet yoğunluğunun daha yüksek olacağı öngörülmektedir.

Manyetik analizler ilk olarak 9-oluk 10-kutuplu yapının ön tasarımı için gerçekleştirilmiş, yüklü ve yüksüz durum analizleri ile motorun tasarım kriterlerine uygunluğu kontrol edilmiştir. Kuvvet seviyesinin tasarım kriterlerine uygunluğunun tespit edilmesinin ardından kuvvet kalitesini arttırmak ve vuruğu bileşenini azaltmak amacıyla çeşitli optimizasyonlar yapılmış ve bu optimizasyonlara ait sonuçlar ilgili bölümlerde sunulmuştur. Gerçekleştirilen optimizasyon çalışmalarının ardından motor nihai tasarımı elde edilmiş, performans sonuçları bölüm sonunda ayrıntılı olarak verilmiştir.

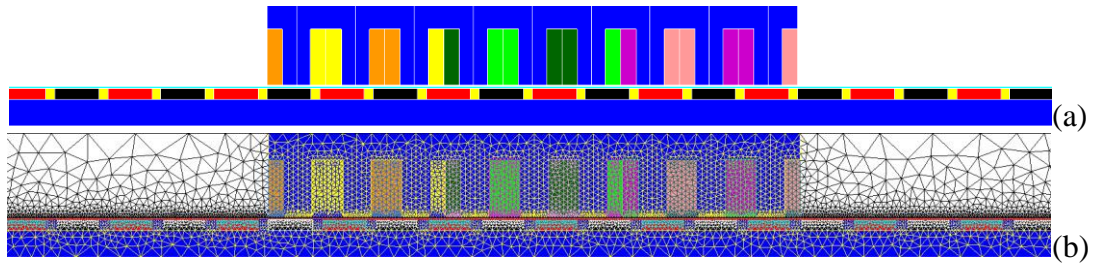
KM doğrusal senkron motorlarda çıkış kuvveti 3 temel bileşenden oluşur; elektromotor kuvveti, relüktans kuvveti ve vuruğu kuvveti [52]. Vuruğu kuvveti, nüveli doğrusal senkron motorlarda kuvvet dalgalanmasının en temel bileşenidir ve 2 temel bileşenden oluşur. Bu bileşenlerden ilki mıknatıs ve olukların etkileşmesinden kaynaklanan vuruğu kuvvetidir, ikincisi ise itenin son dişi ile mıknatısların etkileşmesinden kaynaklanan son etkisidir [53]. Bu bileşenlerin toplamı olan vuruğu kuvveti, KM doğrusal senkron motorlarda titreşime ve mekanik problemlere yol açtığından azaltılması gerekir. Bu iki bileşeni azaltmak için literatürde birçok yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin başında; mıknatıslara veya iten oluklarına kaykık vermek, iten sonlarına yardımcı diş eklemek, parçalı iten yapısı kullanmak, mıknatıs

boyutu optimizasyonları yapmak, oluk açıklığı optimizasyonları yapmak ve uygun oluk-kutup kombinasyonu belirlemek gelmektedir [19, 20, 54-58].

Bu bölümde öncelikle 9-oluk 10-kutuplu KM doğrusal senkron motorun performans verileri verilmiş ardından vuruuntu kuvvetini düşürmek amacıyla çeşitli optimizasyonlar gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen ilk optimizasyon mıknatıslar ve olukların etkileşmesinden kaynaklanan vuruuntu kuvvetini azaltmak amacıyla oluk açıklığı optimizasyonudur. Oluk yapısına karar verildikten sonra, tüm izleyenin itenden uzun olduğu yapılarda ortak problem olan son etkisini azaltmak amacıyla yardımcı diş optimizasyonları gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen kapsamlı optimizasyonlardan sonra son olarak mıknatıs kaykısı optimizasyonları gerçekleştirilmiş ve motor tasarımı nihailendirilmiştir.

4.1. KM Doğrusal Senkron Motor Ön Tasarım SEA Sonuçları

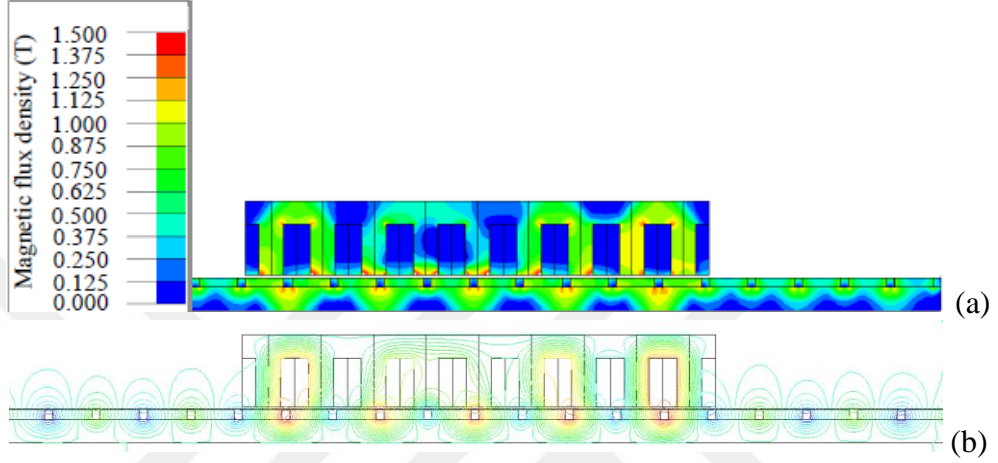
Ön tasarım sonucu oluk-kutup kombinasyonu ve geometrik boyutları belirlenen KM doğrusal senkron motorun modeli Flux® SEA paket programı ile oluşturulmuş modeli ve bu modele ait mesh yapısı Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Motorda bütün enerji dönüşümünün gerçekleştiği hava aralığında ağ yapısı yoğunluğu olması gerektiği gibi yüksektir. Modelde doğrusal bir hareket olduğu için hareket eden kısımda sıkıştırılabilir bir ağ yapısı oluşturulmuştur. Bu sayede her bir hareket adımında mesh kendini yenileyerek, daha doğru sonuçlar alınmasını sağlamıştır.



Şekil 4.1. KM doğrusal senkron motorun 2-boyutlu, (a) Flux® SEA modeli, (b) mesh yapısı

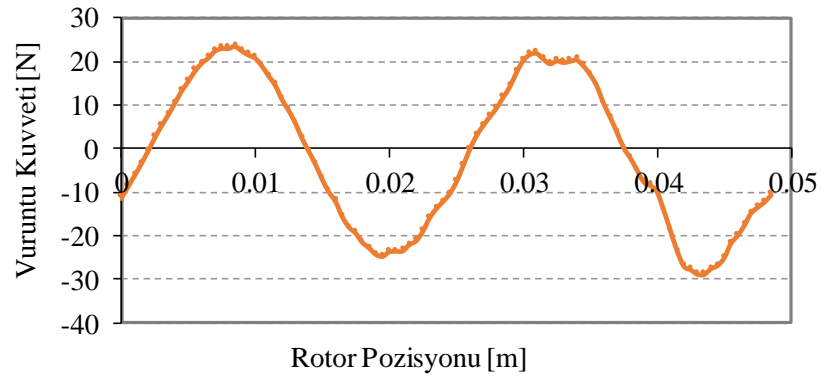
4.1.1. Yüksüz durum sonuçları

Bu bölümde KM doğrusal senkron motorun iten sargılarına herhangi bir akım verilmeden yüksüz durum analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizler sonucunda elde edilen akı yoğunlukları ve akı çizgileri Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Maksimum akı yoğunluğu dişlerde 1,5T seviyelerinde gözlenmiştir.

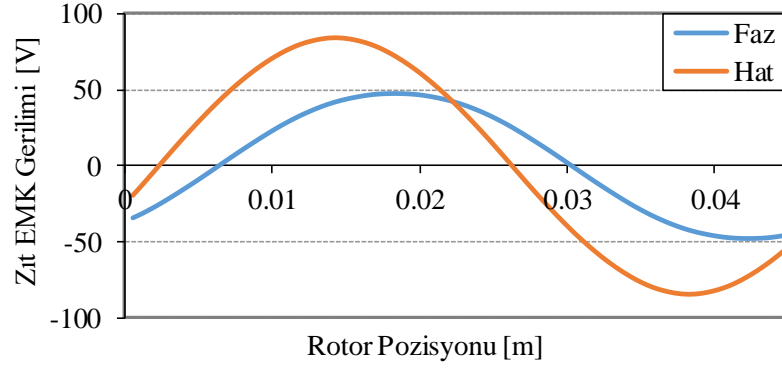


Şekil 4.2. KM doğrusal senkron motorun (a) yüksüz durum akı yoğunluğu seviyeleri, (b) akı çizgileri

Ön tasarım KM doğrusal senkron motorun vuru kuvveti değişimi Şekil 4.3’de gösterilmiştir. Vuru kuvvetinin tepeden tepeye değeri 52,4N seviyelerindedir. Bu değer ortalama çıkış kuvvetinin yaklaşık %9,5’ine denk gelmektedir. Zıt-EMK gerilimi değişimleri de Şekil 4.4’de verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere hat gerilimi zıt-EMK değişimi saf sinüse yakındır.



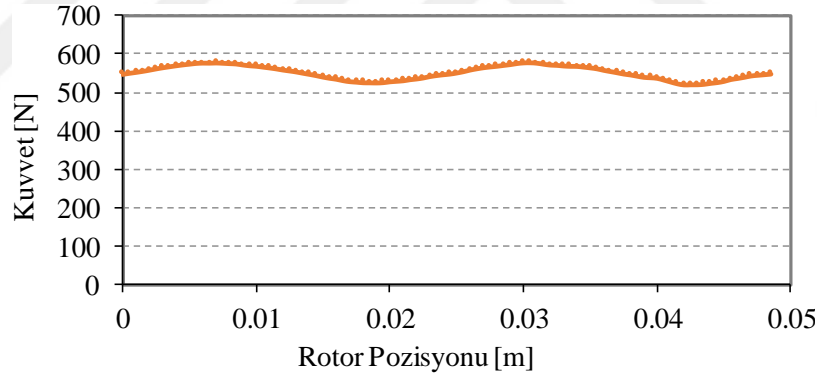
Şekil 4.3. KM doğrusal senkron motorun vuru kuvveti değişimi



Şekil 4.4. KM doğrusal senkron motorun faz ve hat Zıt-EMK değişimi

4.1.2. Yüklü durum sonuçları

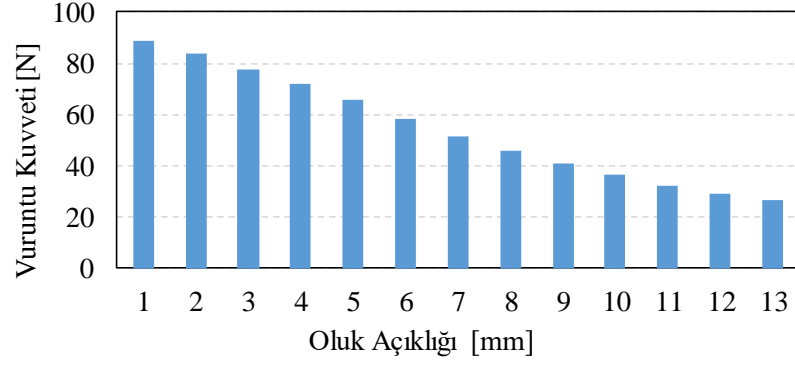
15Amax akım uygulanarak yüklü durum analizleri gerçekleştirilen KM doğrusal senkron motorun çıkış kuvveti değişimi Şekil 4.5'de verilmiştir. Gerçekleştirilen analizlerde ortalama kuvvet değeri 550,46Nm ve ortalama çıkış kuvveti dalgalanması % 10,12 seviyelerinde elde edilmiştir.



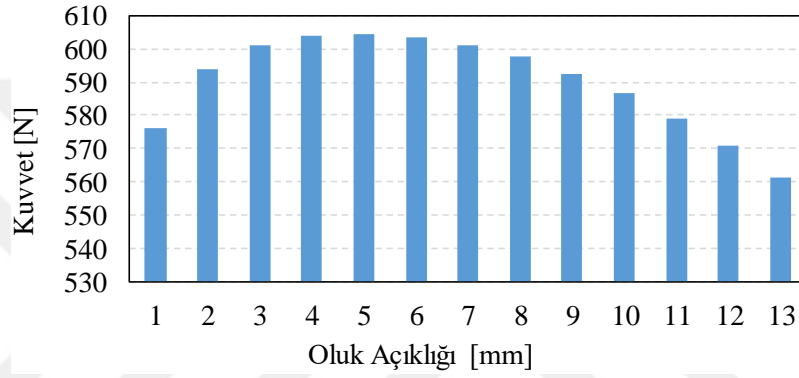
Şekil 4.5. KM doğrusal senkron motorun çıkış kuvveti değişimi

4.2. KM Doğrusal Senkron Motorun Oluk Açıklığı Optimizasyonu

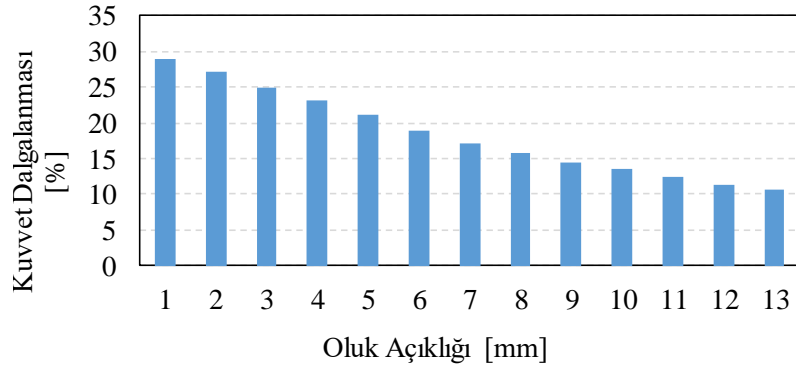
Bu bölümde ön tasarım sonucu ortaya çıkan 9-oluk 10-kutuplu KM doğrusal senkron motorun SEA yöntemiyle oluk açıklığı optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Analizlerde tüm oluk açıklığı değerleri için oluk yüksekliği ve oluk açısı sabit tutulmuştur. Gerçekleştirilen analizler sonucunda motorun vuru kuvveti ve çıkış kuvveti değişimi Şekil 4.6 ve Şekil 4.8 arasında gösterilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde motorun açık oluklu bir yapıya sahip olması durumunda vuru kuvveti ve kuvvet dalgalanmasının daha düşük olduğu seviyelerde olduğu görülmüştür. Bu sebeple motorda açık oluklu bir yapıya karar verilmiştir.



Şekil 4.6. Oluk açıklığı değişine göre vuruntu kuvvetinin değişimi



Şekil 4.7. Oluk açıklığı değişimine göre çıkış kuvveti değişimi

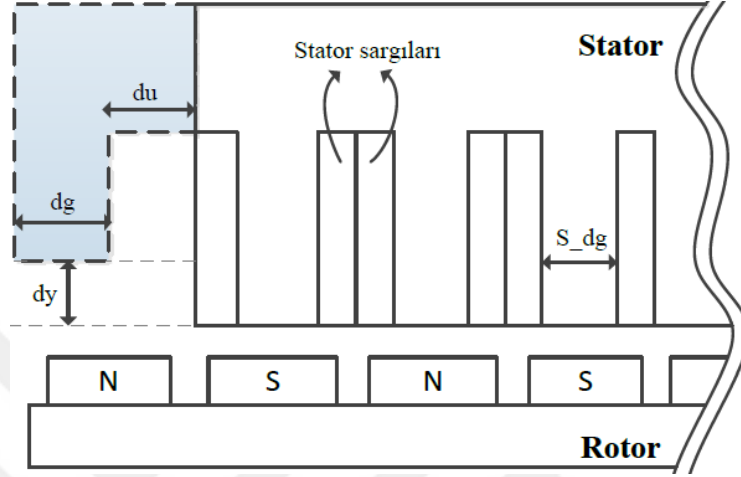


Şekil 4.8. Oluk açıklığı değişimine göre çıkış kuvvet dalgalanması değişimi

4.3. KM Doğrusal Senkron Motorun Yardımcı Diş Optimizasyonları

Bu bölümde 9-oluk 10-kutuplu doğrusal senkron motorda son etkisinden kaynaklanan vuruntu kuvvetini azaltmak amacıyla itenin her iki tarafına yardımcı diş eklenmiştir. Eklenen yardımcı dişin boyutları, yüksekliği ve geometrik yapısı vuruntu kuvvetini etkilediğinden çeşitli optimizasyonlar gerçekleştirilerek optimum diş yapısı ve boyutları belirlenmiştir. Bu sebeple ilk aşamada Şekil 4.10'da gösterilen yardımcı diş

parametrelerinin ayrı ayrı motor performansına etkisi incelenmiş, dişe radyus verilmesi durumunun diş performansını etkileyip etkilemediği gözlemlenmiştir. Son olarak ise parametrelerden diş uzaklığı (d_u), diş genişliği (d_g) ve diş yüksekliği (d_y) eş zamanlı olarak değiştirilerek nihai yardımcı diş boyutları elde edilmiştir.

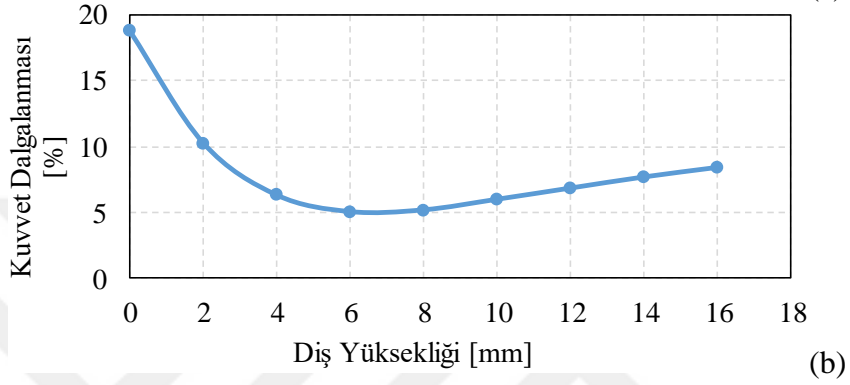
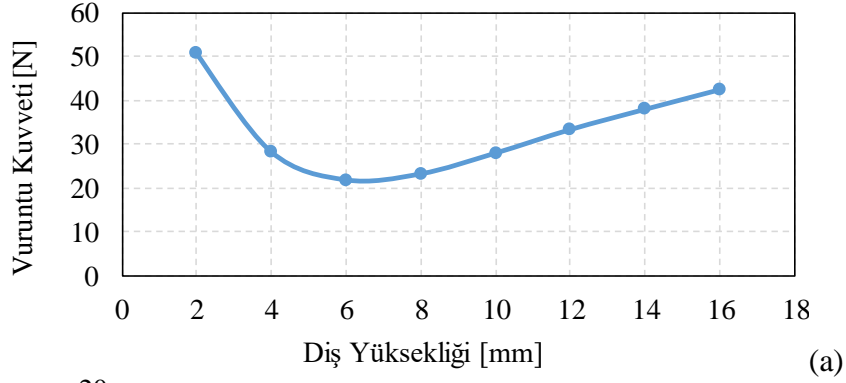


Şekil 4.9. Yardımcı diş parametreleri

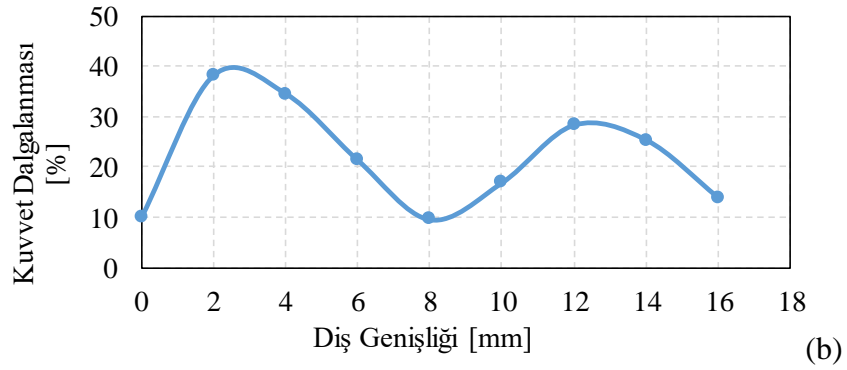
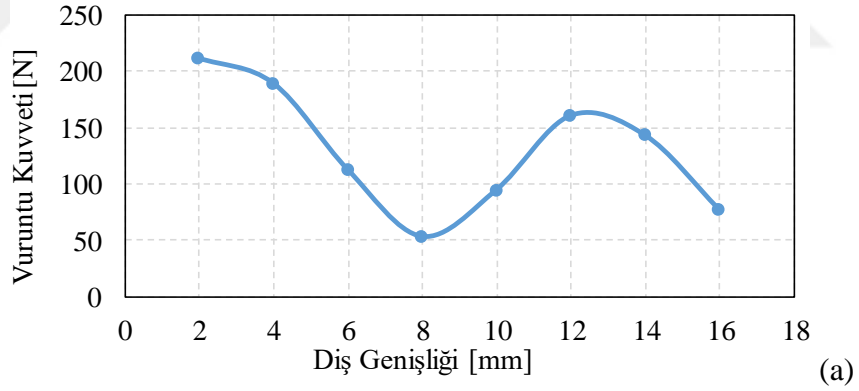
4.3.1. Yardımcı diş parametrelerinin her birinin motor performansına etkisi

Bu bölümde öncelikle yardımcı diş yüksekliği, belirli bir aralıkta değiştirilerek motor tepeden tepeye vuru kuvveti ve kuvvet dalgalanmasına etkisi gözlemlenmiş ve sonuçlar Şekil 4.10'da verilmiştir. Bu analizlerde yardımcı diş genişliği, iten diş genişliğinin (S_{dg}) yarısı olarak sabitlenmiş, yardımcı diş uzaklığı ise 0mm olarak kabul edilmiştir. Bu durumda motor diş yüksekliğinin 6mm seviyelerinde olması durumunda minimum vuru kuvveti ve kuvvet dalgalanması elde edildiği görülmüştür.

Gerçekleştirilen analizler kapsamında değiştirilen ikinci parametre yardımcı diş genişliğidir. Bu analizler yapılırken diş yüksekliği ve diş uzaklığı 0mm olarak kabul edilmiştir. Yardımcı diş genişliğine bağlı olarak tepeden tepeye vuru kuvveti ve kuvvet dalgalanmasının değişimi Şekil 4.11'de verilmiştir. Bir önceki analizde de görüleceği üzere bu analizde de vuru kuvveti ve kuvvet dalgalanması değişimleri benzer trendler izlemiştir. Sonuç olarak diş yüksekliğinin 8mm olduğu noktada vuru kuvveti ve kuvvet dalgalanması minimum olmaktadır.

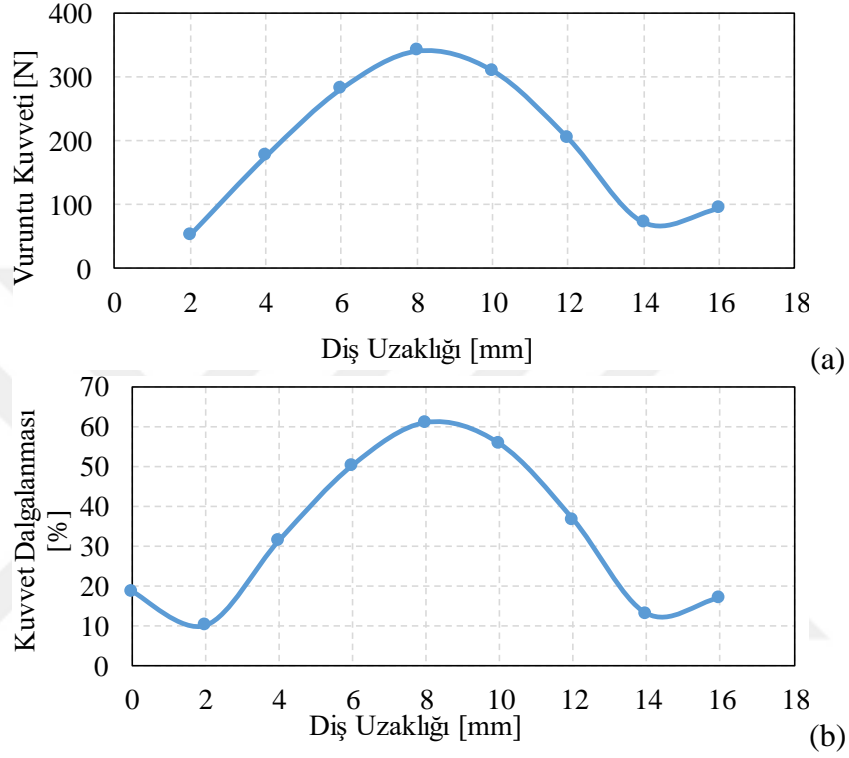


Şekil 4.10. Yardımcı diş yüksekliği değişimine göre (a) vuruntu kuvveti değişimi, (b) kuvvet dalgalanması değişimi



Şekil 4.11. Yardımcı diş genişliği değişimine göre (a) vuruntu kuvveti değişimi, (b) kuvvet dalgalanması değişimi

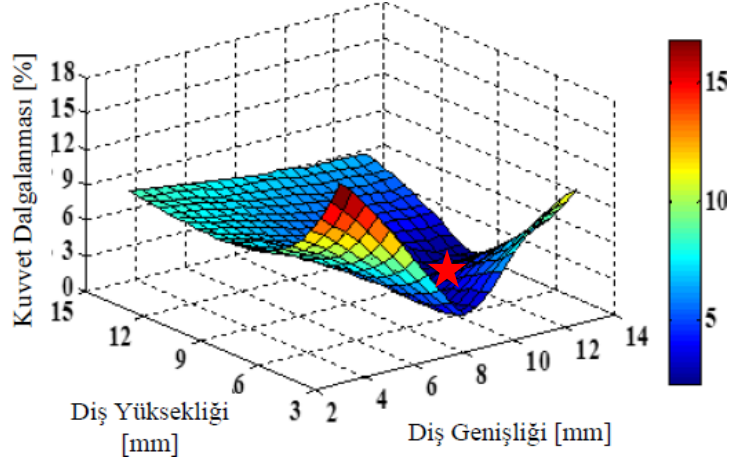
Bu bölümde gerçekleştirilen analizler kapsamında değiştirilen son parametre yardımcı dişin iten sargılarına olan uzaklığıdır. Diş uzaklığının değişiminin tepeden tepeye vuru mu kuvveti ve kuvvet dalgalanmasına etkisi Şekil 4.12’de gösterilmiştir. Analiz sonuçlarından da görüleceği üzere yardımcı dişin itene yakın olduğu durumlarda vuru mu kuvveti ve kuvvet dalgalanması minimum seviyede olmaktadır.



Şekil 4.12. Yardımcı diş uzaklığı değişimine göre (a) vuru mu kuvveti değişimi, (b) kuvvet dalgalanması değişimi

4.3.2. Optimum yardımcı diş boyutlarının elde edilmesi

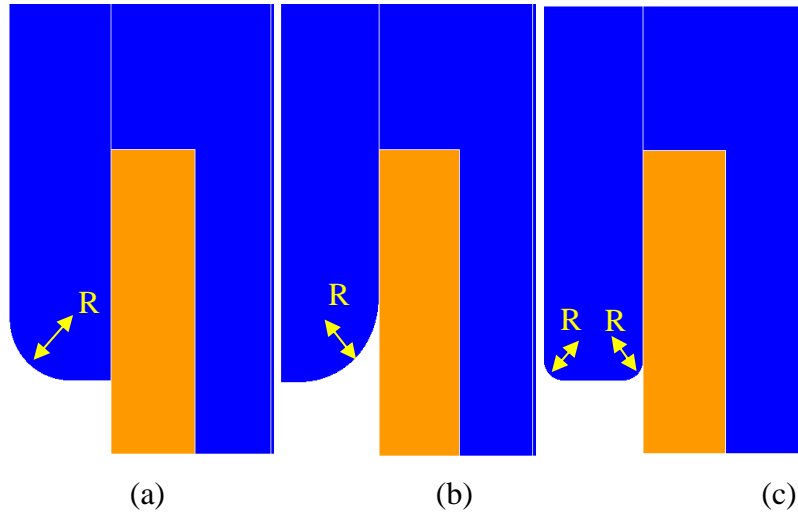
Bu bölümde, bir önceki bölümde elde edilen veriler ve değişimler göz önüne alınarak yardımcı diş yüksekliği ve genişliği analizlerde eş zamanlı olarak değiştirilerek optimum diş boyutları elde edilmiştir. Gerçekleştirilen analizlerde yardımcı diş uzaklığı 0mm olarak kabul edilmiştir. Bunun sebebi Şekil 4.12’de de görüldüğü üzere vuru mu kuvvetinin minimum olduğu noktaların dişin itene en yakın olduğu kısımlarda olmasıdır. Bu doğrultuda elde edilen sonuçlar Şekil 4.13’deki eğri ile ifade edilmiştir. Optimizasyon sonucunda diş kalınlığının 8,5mm ve diş yüksekliğinin 6mm olduğu durumda minimum nokta elde edilmiş, bu noktada ortalama kuvvet 562,95N kuvvet dalgalanması %2,34’dir.



Şekil 4.13. Kuvvet dalgalanması değerinin diş yüksekliği ve diş genişliğine bağlı olarak değişimi

4.3.3. Yardımcı diş radius verilmesinin motor performansına etkisi

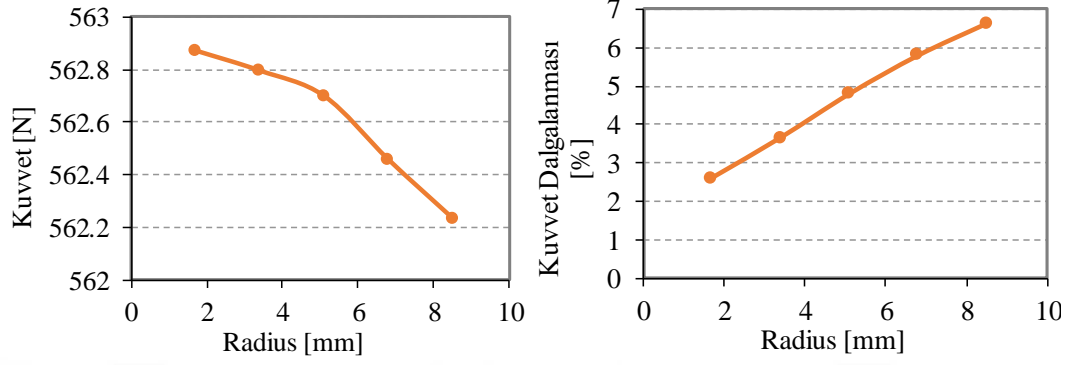
Bu bölümde nihai boyutlarına karar verilen yardımcı dişe çeşitli şekillerde radius eklenmesinin motor performansına etkisi kontrol edilmiştir. Bölüm 4.3.1’de gerçekleştirilen analizlerde de görüldüğü gibi vuru kuvveti, kuvvet dalgalanması ile benzer trendler izlediği için bu bölümde yalnızca motorun kuvvet dalgalanması incelenmiştir. Analizlerde yardımcı diş boyutları olarak Bölüm 4.3.2’de karar verilen boyutlar kullanılmıştır.



Şekil 4.14. Yardımcı dişe uygulanan radius modelleri (a) tek taraftan radius, (b) tek taraftan ters radius, (c) her iki taraftan radius

Bu kapsamda gerçekleştirilen analizlerde kullanılan diş modelleri Şekil 4.14’de gösterilmiştir. Gerçekleştirilen üç analizde de yardımcı diş radius verilmesi

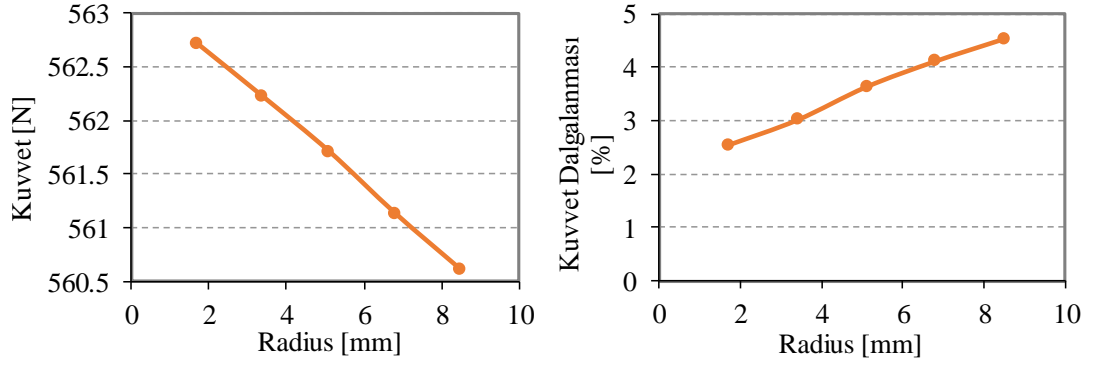
durumunun motor performansında iyileştirici bir etkiye sahip olmadığı görülmüş, sonuçlar Şekil 4.15 ve Şekil 4.17 arasında verilmiştir. Bu sebeple nihai yardımcı diş boyutlandırması yapılırken radius yapısı kullanılmamıştır.



(a)

(b)

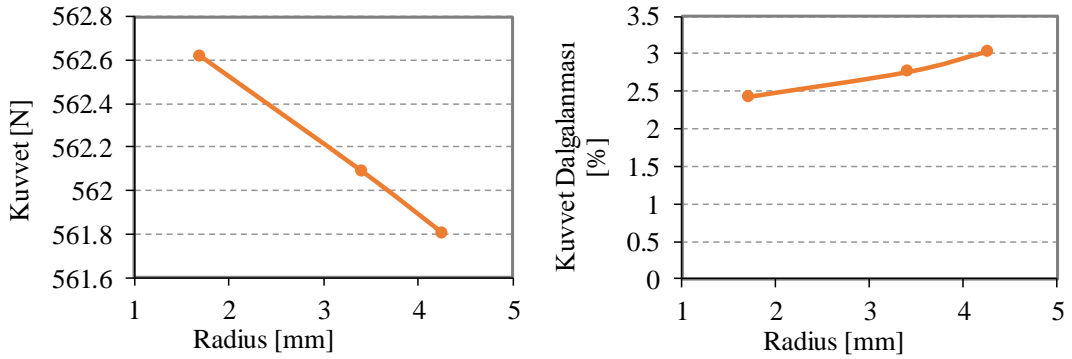
Şekil 4.15. Tek taraftan radius verilmesi durumunda (a) kuvvet çıkış ve (b) kuvvet dalgalanmasının değişimi



(a)

(b)

Şekil 4.16. Tek taraftan ters radius verilmesi durumunda (a) kuvvet çıkış ve (b) kuvvet dalgalanmasının değişimi



(a)

(b)

Şekil 4.17. Her iki taraftan radius verilmesi durumunda (a) kuvvet çıkış ve (b) kuvvet dalgalanmasının değişimi

4.4. KM Doğrusal Senkron Motorun Mıknatıs Kaykısı Optimizasyonu

Bu bölümde yardımcı diş optimizasyonu ile son etkisinden kaynaklanan vuruş kuvveti azaltılmış olan 9-oluk 10-kutuplu doğrusal senkron motorun, oluk-kutup etkileşmesinden kaynaklanan vuruş kuvvetini azaltmak amacıyla mıknatıslara kaykısı verme yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem endüstride hız kontrolü ve titreşimi azaltmak amacıyla sıklıkla kullanılmaktadır. Mıknatısların kaykısı analizlerini 3B SE analizleri ile gerçekleştirmek daha doğrudur. Ancak modelin karmaşık olması ve çözüm sürelerinin uzun olması sebebiyle analizler 2B SEA ile gerçekleştirilmiştir.

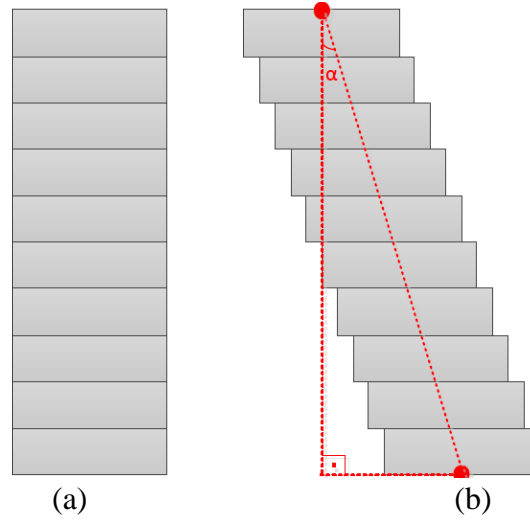
Analizler gerçekleştirilirken model Şekil 4.18(a)'da gösterildiği gibi, paket boyu doğrultusunda 10 eşit parçaya bölünmüştür. Şekil 4.18(b)'de gösterilen klasik kaykısı yapısının analizleri gerçekleştirilirken oluşturulan 10 farklı 2B modelin analiz sonuçları ayrı ayrı hesaplanmış, bu sonuçları 3B analiz sonuçlarına dönüştürmek için süper pozisyon yöntemi kullanılmıştır.

4.4.1. Klasik kaykısı analizleri

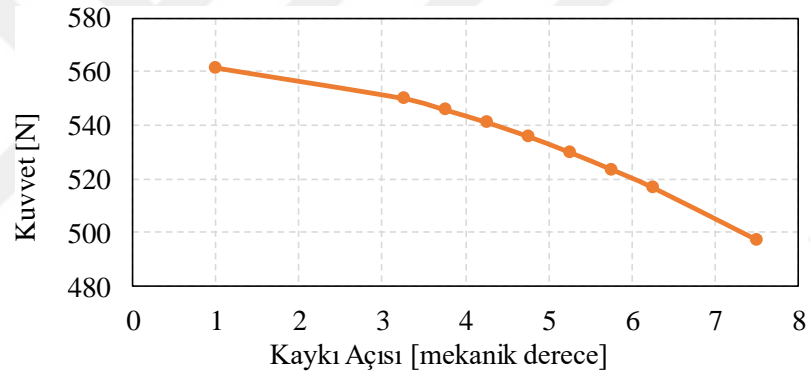
Bu bölümde Şekil 4.18(b)'de gösterilen klasik kaykısı yapısının farklı α açısı değerleri için çıkış kuvveti analizleri gerçekleştirilmiş ve kuvvet dalgalanmasının minimum olduğu seviye tespit edilmek istenmiştir. Şekil 4.19 ve Şekil 4.20'deki değişimler incelendiğinde kaykısı açısının 5,75 mekanik derece olması durumunda kuvvet dalgalanmasının minimum seviyededir ve çıkış kuvveti tasarım kriterlerinin üzerindedir.

4.4.2. V şekilli kaykısı analizleri

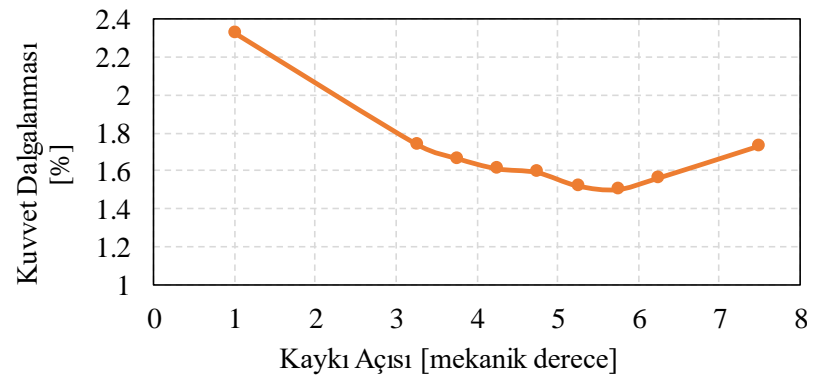
Bu bölümde 5,75 mekanik kaykısı açısı için farklı V şekilli kaykısı modelleri önerilmiş ve bu modeller Şekil 4.21'de gösterilmiştir. Önerilen modellerden Model-1 ve Model-4 simetrik V şekilli kaykısı yapılarıdır. Bu yapılarda mıknatıslar 5 parça yukarıda 5 parça aşağıda olacak şekilde bölünmüştür. İkisi arasındaki tek fark Model-4'de altta kalan 5 parçanın kaykısı açısının $\alpha/2$ yani 2,88 mekanik derece olmasıdır.



Şekil 4.18. 9-oluk 10-kutuplu KM doğrusal senkron motorun mıknatıslarının, (a) kaykısız 10 eşit parçaya bölünmüş hali, (b) klasik kaykılı yapısı



Şekil 4.19. Klasik kaykılı yapısında açı değişimine bağlı olarak çıkış kuvveti değişimi

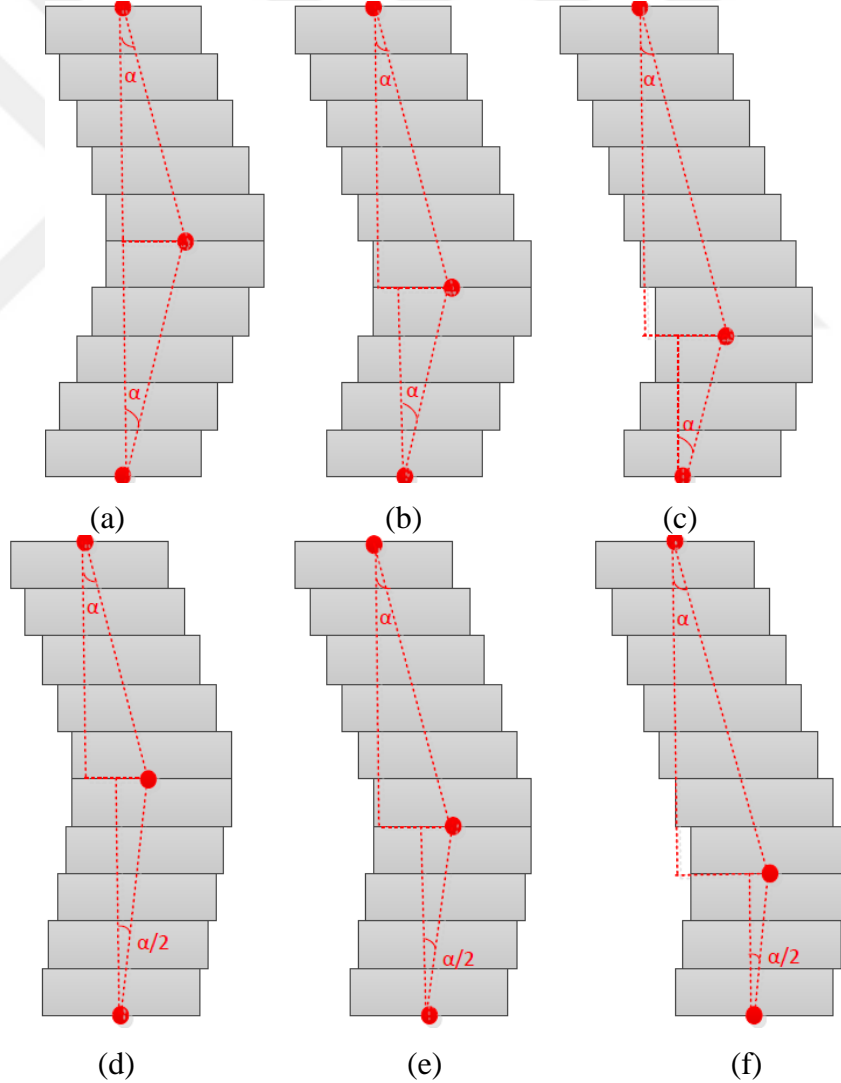


Şekil 4.20. Klasik kaykılı yapısında açı değişimine bağlı olarak kuvvet dalgalanması değişimi

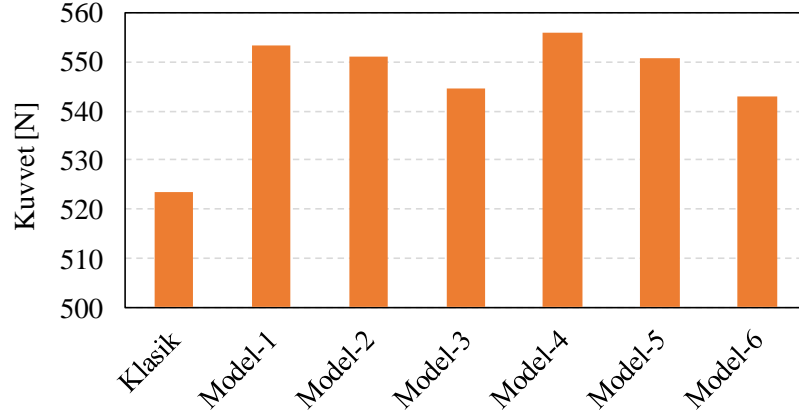
Model-2 ve Model-5'te mıknatıslar 6 parça üstte 4 parça altta kalacak şekilde asimetrik olarak yerleştirilmiştir. Model-3 ve Model-6'da ise 7 parça üstte 3 parça altta olacak

şekilde bir mıknatıs yerleşimi yapılmıştır. Model-5 ve Model-6'da Model-4'te olduğu gibi alttaki parçaların kaykı açısı 2,88 mekanik derece olarak ayarlanmıştır.

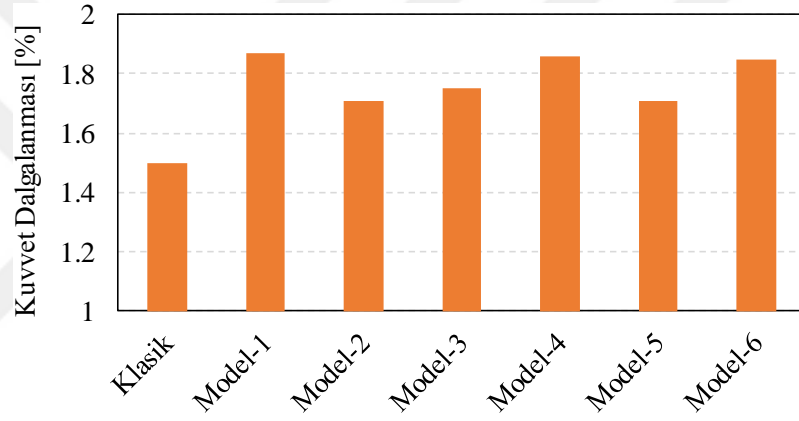
Şekil 4.22 ve Şekil 4.23'te önerilen V şekilli kaykı yapıları ile klasik kaykı yapısının kuvvet çıkışı ve kuvvet dalgalanmaları verilmiştir. Şekil 4.24'de ise gerçekleştirilen tasarımların çıkış kuvvetlerinin, tasarım kriterlerinde verilen referans kuvvete göre ne kadar yukarıda ya da aşağıda olduğu karşılaştırılmıştır. Klasik kaykı yapısının kuvvet dalgalanması minimum seviyede olmasına karşılık ortalama çıkış kuvvetinin referans kuvvetten yaklaşık 27N aşağıda olması sebebiyle gerçekleştirilen analizler sonucunda hem kuvvet çıkışı bakımından hem de kuvvet dalgalanması bakımından optimum sonucu veren Model-2 yapısına nihai tasarım olarak karar verilmiştir.



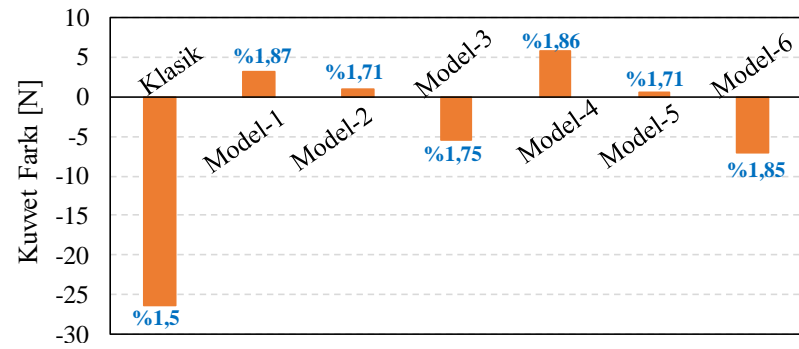
Şekil 4.21. Önerilen simetrik ve asimetrik V şekilli kaykı modelleri, (a) Model-1, (b) Model-2, (c) Model-3, (d) Model-4, (e) Model-5, (f) Model-6



Şekil 4.22. Kaykılı açısının 5,75 derece olduğu durumda klasik kaykılı ve V şekilli kaykılı yapıları için çıkış kuvveti karşılaştırması



Şekil 4.23. Kaykılı açısının 5,75 derece olduğu durumda klasik kaykılı ve V şekilli kaykılı yapıları için kuvvet dalgalanması karşılaştırması



Şekil 4.24. Gerçekleştirilen tasarımların referans kuvvete göre kuvvet farkları

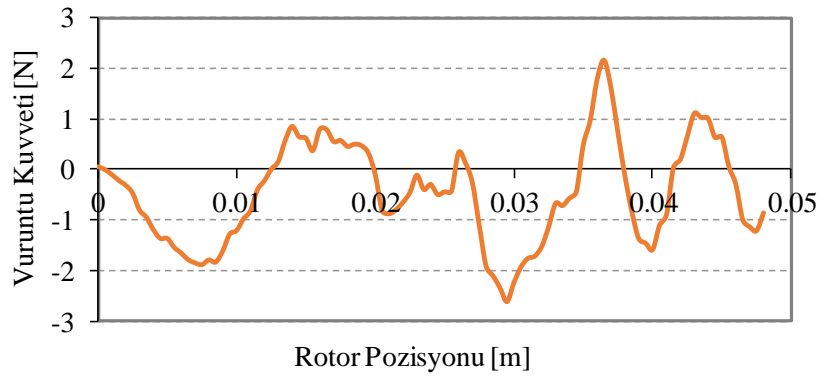
4.5. Nihai Tasarım KM Doğrusal Senkron Motor Performans Sonuçları

Çeşitli optimizasyonlar ile ortaya çıkarılan nihai tasarım KM doğrusal senkron motorun iteninde 6mmx8,5mm boyutlarında yardımcı dişler kullanılmış, izleyende dikdörtgen şekilli mıknatıslar kullanılarak asimetrik V şekilli mıknatıs kutupları oluşturulmuştur. Motora ait tüm analizler 2B olarak süper pozisyon yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiş ve sonuçlar bu bölümde özetlenmiştir. Nihai tasarım doğrusal motor analizlerinde izleyen ve itende M19, mıknatıslarda Br seviyesi 1,17T seviyelerinde olan NdFeB malzeme kullanılmıştır.

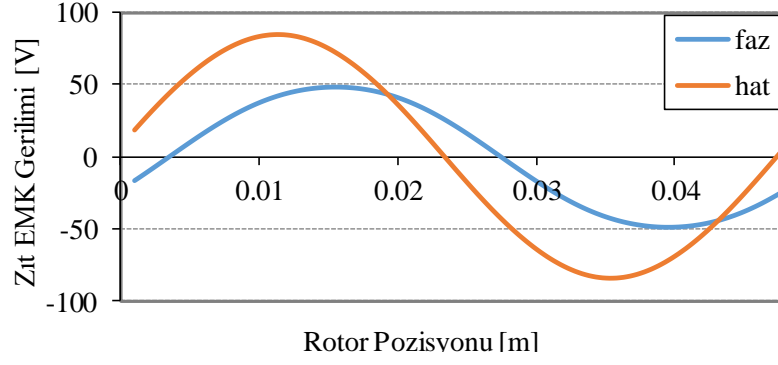
4.5.1. Nihai tasarım motor yüksüz durum performans sonuçları

Nihai tasarım motora ait vuruş kuvvetinin değişimi Şekil 4.25’de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi motorun vuruş kuvveti oldukça düşük seviyelerdedir ve tepeden tepeye değeri 4,75N seviyelerindedir. Bu değer ortalama çıkış kuvvetinin %0,86’sına eşittir.

Motora ait hat ve faz geriliminin 2m/s hızda değişimleri Şekil 4.26’da verilmiştir. Burada hat gerilimi maksimum değeri 84,53V, faz gerilimi maksimum değeri ise 48,35V olarak elde edilmiştir.



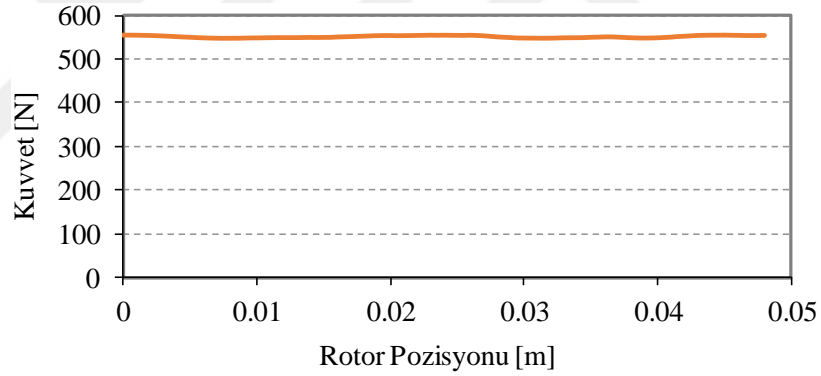
Şekil 4.25. Nihai tasarımda motora ait vuruş kuvveti değişimi



Şekil 4.26. Nihai tasarım motora ait hat ve faz gerilimleri değişimi (@2m/s)

4.5.2. Nihai tasarım motor yüklü durum performans sonuçları

Nihai tasarım motora ait 15Amax akımda elde edilen çıkış kuvvetinin değişimi Şekil 4.27'de verilmiştir. Analizler sonucunda ortalama kuvvet değeri 550,89N ve ortalama kuvvet dalgalanması %1,71 seviyelerinde elde edilmiştir.

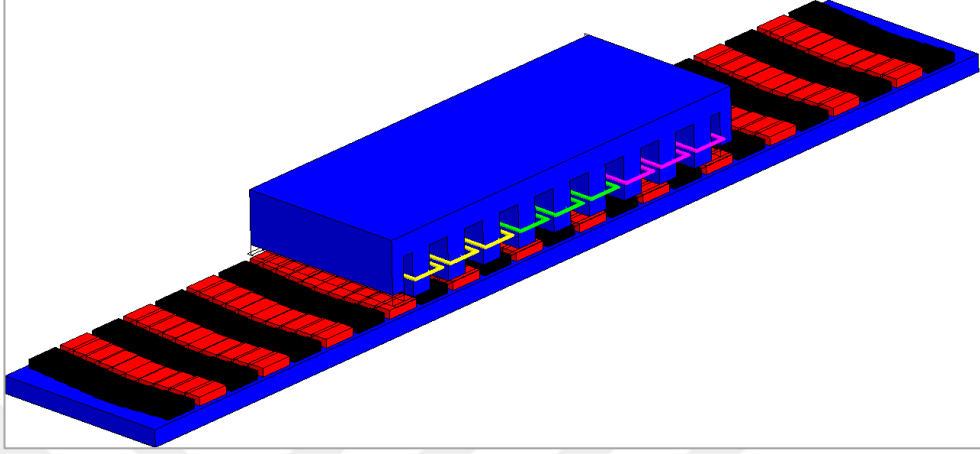


Şekil 4.27. Nihai tasarım motora ait çıkış kuvveti değişimi (@15Amax)

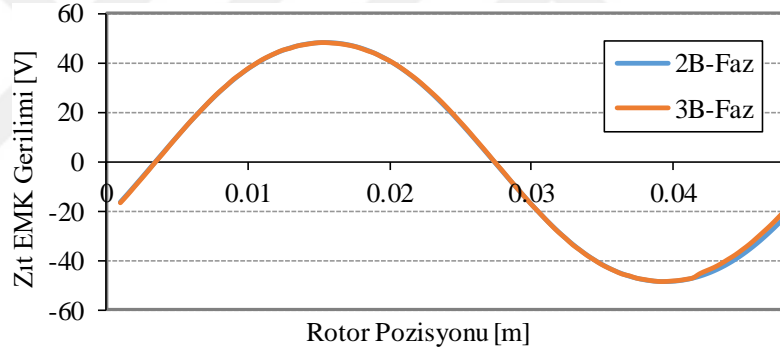
4.5.3. Nihai tasarım motor 2B ve 3B SE analizlerinin karşılaştırılması

2B süperpozisyon yöntemi kullanılarak SE analizleri gerçekleştirilen nihai tasarım doğrusal motorda, kullanılan yöntemin doğruluğunun kontrolünü sağlamak amacıyla 3B SE analizleri gerçekleştirilmiş, zıt EMK gerilimi ve çıkış kuvveti verileri 2B analizleri ile karşılaştırmalı olarak bu bölümde verilmiştir. Gerçekleştirilen analizlerde 2 m/s doğrusal hızda zıt EMK hat gerilimi tepe değeri 2B analizlerde 48,35V olarak elde edilirken 3B analizlerde 48,5V olarak elde edilmiştir. Çıkış kuvveti ise 2B analizlerde 550,89N olarak elde edilirken 3B analizlerde 552,37N olarak elde edilmiştir. Sonuçlardan da görüldüğü gibi 2B ve 3B analiz sonuçları oldukça

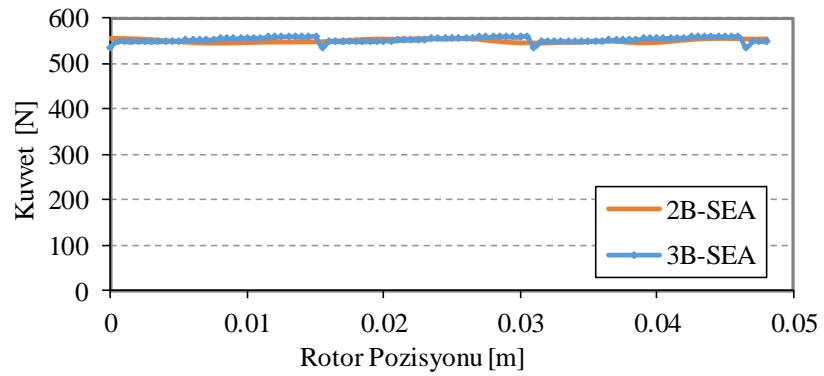
uyumludur. Şekil 4.28’de nihai tasarım doğrusal motorun 3B SEA modeli gösterilmiştir. Gerçekleştirilen analizlerin 2B analiz sonuçlarıyla karşılaştırmalı olarak değişimi Şekil 4.29 ve Şekil 4.30’da verilmiştir.



Şekil 4.28. 3B SEA modeli



Şekil 4.29. 2B ve 3B analizleriyle elde edilen zıt EMK gerilimlerinin karşılaştırılması (@2m/s)



Şekil 4.30. 2B ve 3B analizleriyle elde edilen çıkış kuvvetlerinin karşılaştırılması (@15Amax)

4.6. Ön Tasarım ve Nihai Tasarım KM Doğrusal Senkron Motor Performans Karşılaştırması

Bu bölümde KM doğrusal senkron motor için gerçekleştirilen optimizasyonların motor performansına etkisini gözlemlemek amacıyla ön tasarım, yardımcı diş eklenmiş ara tasarım ve nihai tasarım motorların performans karşılaştırması yapılmıştır. Gerçekleştirilen optimizasyonlarda motorda son etkisinden kaynaklanan vuruğu kuvvetini azaltmak için yardımcı diş, oluk-kutup etkileşmesinden kaynaklanan vuruğu kuvvetini azaltmak amacıyla ise mıknatıslara kaykık verme yöntemi kullanılmıştır. Tablo 4.1’de de görüleceği üzere özgün tasarım 9-oluk 10-kutuplu motorda vuruğu kuvvetinde en yüksek paya sahip olan bileşen son etkisinden kaynaklanan vuruğu kuvvetidir. Buna kanıt olarak motora yardımcı diş eklenmesiyle ortaya çıkan ara tasarımda vuruğu kuvvetinin ön tasarıma göre %81 oranında azalması gösterilebilir. Özgün tasarım motor bir endüstriyel otomasyon sisteminde kullanılacağından motor performansını daha da arttırmak amacıyla gerçekleştirilen kaykık optimizasyonlarıyla ise motorun vuruğu kuvveti ön tasarım motora göre %90 oranında azaltılmıştır. Ayrıca bu optimizasyonlar sayesinde motor kuvvet dalgalanması %10 seviyelerinden %1,7 seviyelerine gerilemiştir. Gerçekleştirilen optimizasyonlarda iten sargı yapısı ve diş boyutlarıyla alakalı herhangi bir değişiklik yapılmadığından 3 tasarımda motorun zıt EMK gerilim seviyeleri oldukça yakındır.

Tablo 4.1. Ön tasarım, yardımcı diş eklenmiş tasarım ve nihai tasarım motorun performans karşılaştırması

	Ön Tasarım Motor	Yardımcı Diş Eklenmiş Ara Tasarım Motor	Nihai Tasarım Motor
Oluk/kutup		9/10	
Anma akımı		15Amax	
Anma hızı		2m/s	
Vuruğu kuvveti	52,39N	9,74N	4,75N
Zıt-EMK tepe değeri (Hat@2m/s)	84,45V	87,95V	84,53V
Çıkış kuvveti	550,46N	562,78N	550,89N
Kuvvet dalgalanması	%10,12	%2,46	%1,71

5. ÖZGÜN KM DOĞRUSAL SENKRON MOTOR PROTOTİP ÜRETİMİ, TEST SİSTEMİ VE PERFORMANS TESTLERİ

Bu bölümde gerçekleştirilen analizler ile ortaya çıkartılan özgün tasarım doğrusal senkron motorun prototip üretimi hakkında bilgi verilmiş, motor yüklü/yüksüz durum performans testlerini gerçekleştirmek amacıyla tasarlanan test sistemi tanıtılmış ve gerçekleştirilen motor performans testleri verilmiştir. Ayrıca bu bölümde motora ait üretim resimlerine de yer verilmiştir. Son olarak motorun performans testleri ile elektromanyetik analizleri karşılaştırılmış ve motor performans doğrulaması gerçekleştirilmiştir.

5.1. Özgün KM Doğrusal Senkron Motor Prototip Üretimi

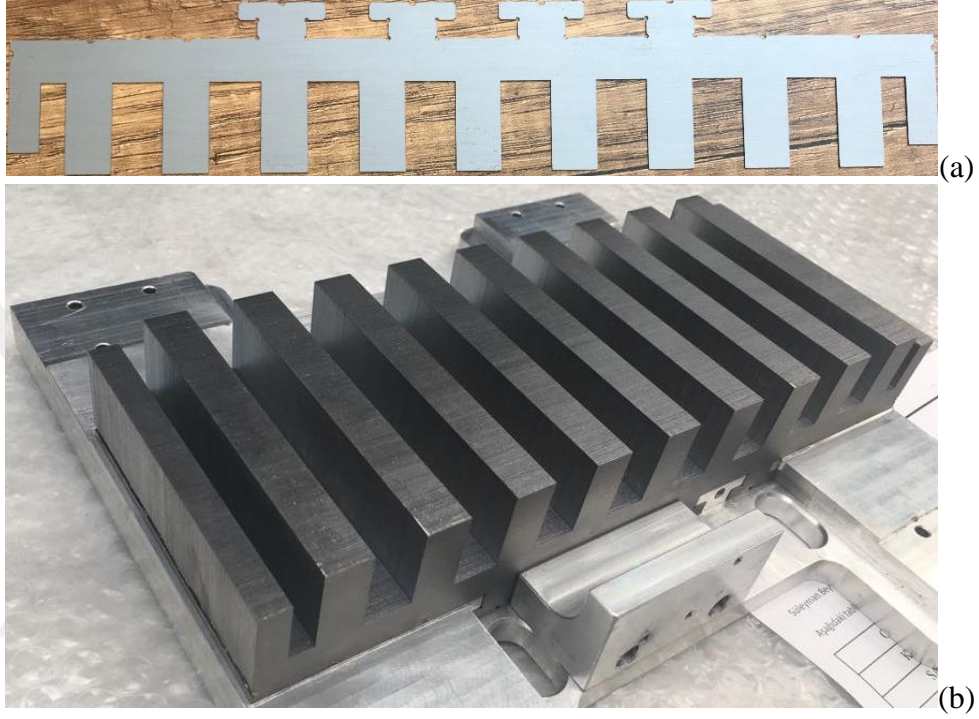
Özgün KM doğrusal senkron motor için prototip üretimi gerçekleştirilirken motorun izleyeni için kayıklı ve kayksız iki izleyen yapısı da üretilmiştir. Test sisteminde izleyen tablasının yerleştirildiği kısım vidalı olarak tasarlandığından farklı izleyen yapıları bu kısma kolaylıkla yerleştirilebilmektedir. Bu bölümde ilk olarak motor bileşenlerinde kullanılan malzemeler ve üretim yöntemleri resimlerle verilmiş, ardından motor test sistemi ve sistem bileşenleri tanıtılmıştır.

5.1.1. Motor bileşenlerinde kullanılan malzemeler ve üretim yöntemleri

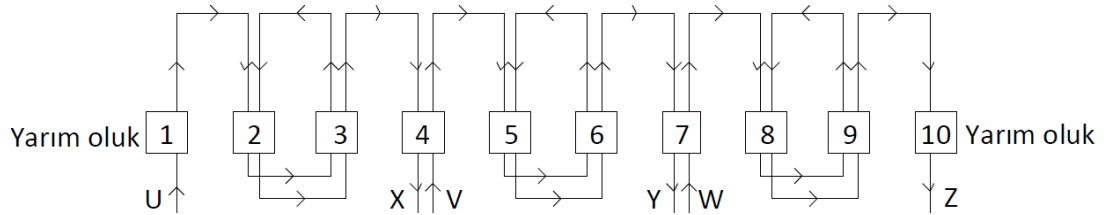
Üretilen özgün KM doğrusal senkron motorun izleyeninde kayıklı ve kayksız olmak üzere her iki yapıda da mıknatıs malzemesi olarak N33UH sınıfı NdFeB kullanılmıştır. Mıknatıslar izleyene Loctite 334 türü bir yapıştırıcıyla yapıştırılmıştır. İtende manyetik sac malzeme olan M270-35A kullanılırken, izleyende katı manyetik malzeme tercih edilmiştir.

Şekil 5.1’de gösterilen iten yapısı oluşturulurken manyetik sac malzeme, nihai motorun iten boyutlarında lazer aracılığıyla kesilmiş, ardından kesilen sac parçalar paket boyu sağlanıncaya kadar üst üste konulup kaynaklanmıştır. Ardından iten bobinleri Şekil 5.2’de verilen sargı yapısına göre oluşturularak iten oluklarına yerleştirilmiştir. Bobinlerin iten oluklarına yerleştirilmesinden sonra oluk ağızlarına

çıtalar yerleştirilmiş, sargı sonları preslenerek sıkıştırılmış ve bağlanmıştır. Son olarak itende 3-faz besleme kabloları da çıkarılmış ve iten yapısı tamamlanmıştır. Nihai motora ait iten yapısı Şekil 5.3’de gösterilmiştir. İtenin test sistemine monte edilmesi için itene Şekil 5.4’de gösterilen diş yapıları açılmış ve iten sac malzemesi bu dişler yardımıyla alüminyum bir parçaya geçirilmiştir.



Şekil 5.1. (a) Kesilmiş iten sacı ve (b) paketlenmiş iten yapısı

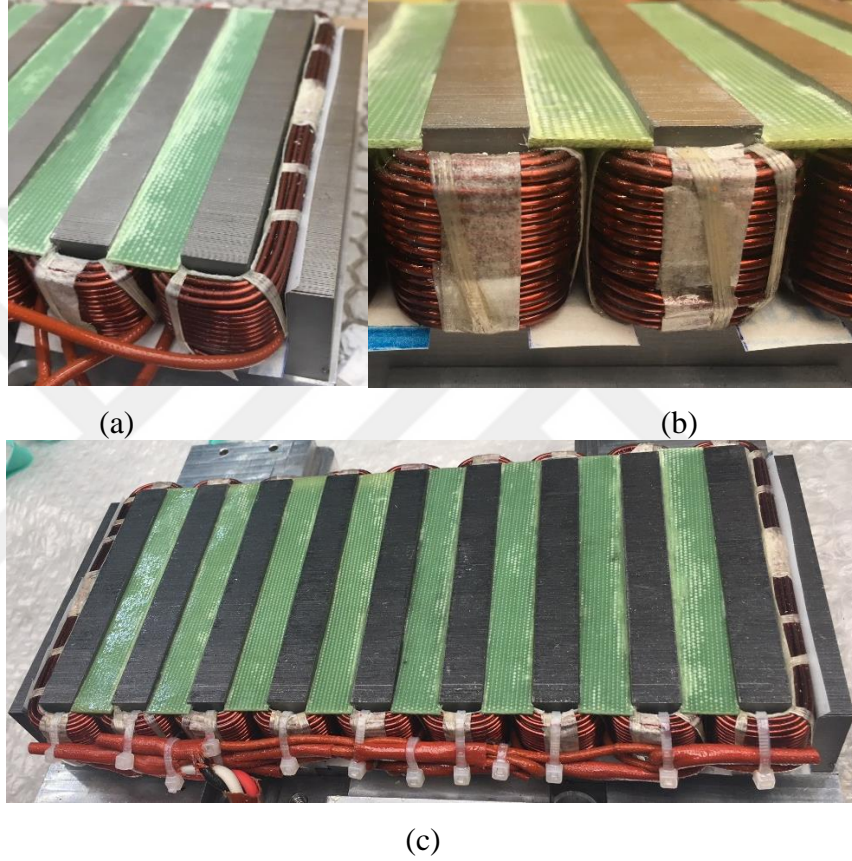


Şekil 5.2. İten sargı yapısı

Şekil 5.5’de KM doğrusal senkron motorun izleyenine mıknatıslar yapıştırılmadan önceki hali gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi izleyen tablasına vida delikleri açılmış ve izleyen test sistemine bu vidalar ile monte edilmiştir. Bu sayede test sistemine farklı izleyen yapılarının monte edilmesine imkan sağlanmıştır.

Bir önceki bölümde bahsedildiği gibi özgün tasarım motor için kayıklı ve kaykısız olmak üzere iki farklı izleyen yapısı üretilmiştir. Kaykısız yapıda 26 adet tek parça

mıknatis kullanılmıştır. Kaykılı yapıda ise mıknatis maliyetini dışürmek amacıyla analizlerde izlenilen yöntem de göz önüne alınarak her mıknatis kutbu için 10 adet dikdörtgen parça kullanılmıştır. İzleyen boyutları kaykısız yapı ile aynı tutulduğunda kaykılı yapıya 24 adet mıknatis kutbu sığdırılmış ve toplamda 240 adet mıknatis kullanılmıştır. Mıknatısları yapıştırılmış kaykısız ve kaykılı izleyen yapıları Şekil 5.6'da gösterilmiştir.



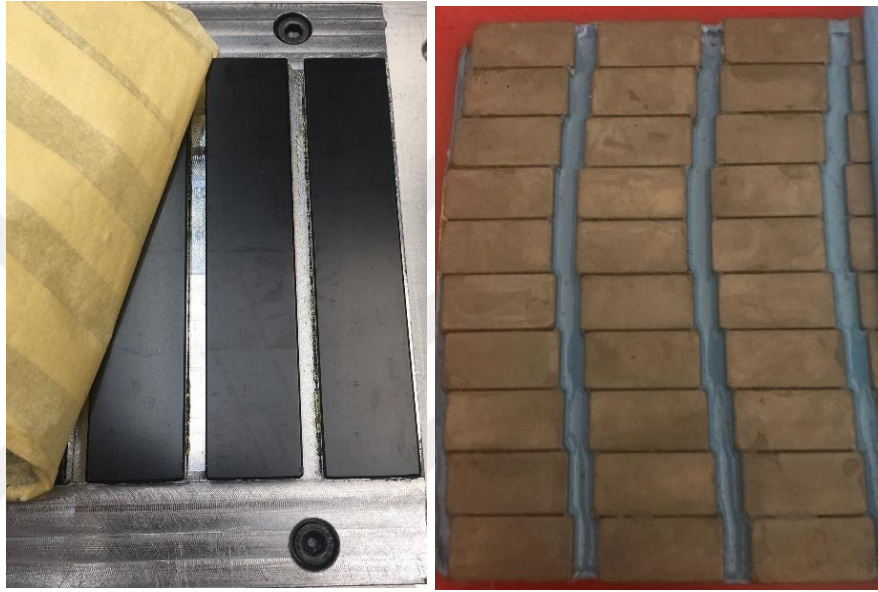
Şekil 5.3. İten sargıları ve iten nüvesine yerleştirilmiş hali



Şekil 5.4. İten ve alüminyum parça arasındaki diş yapısı



Şekil 5.5. İzleyen tablası



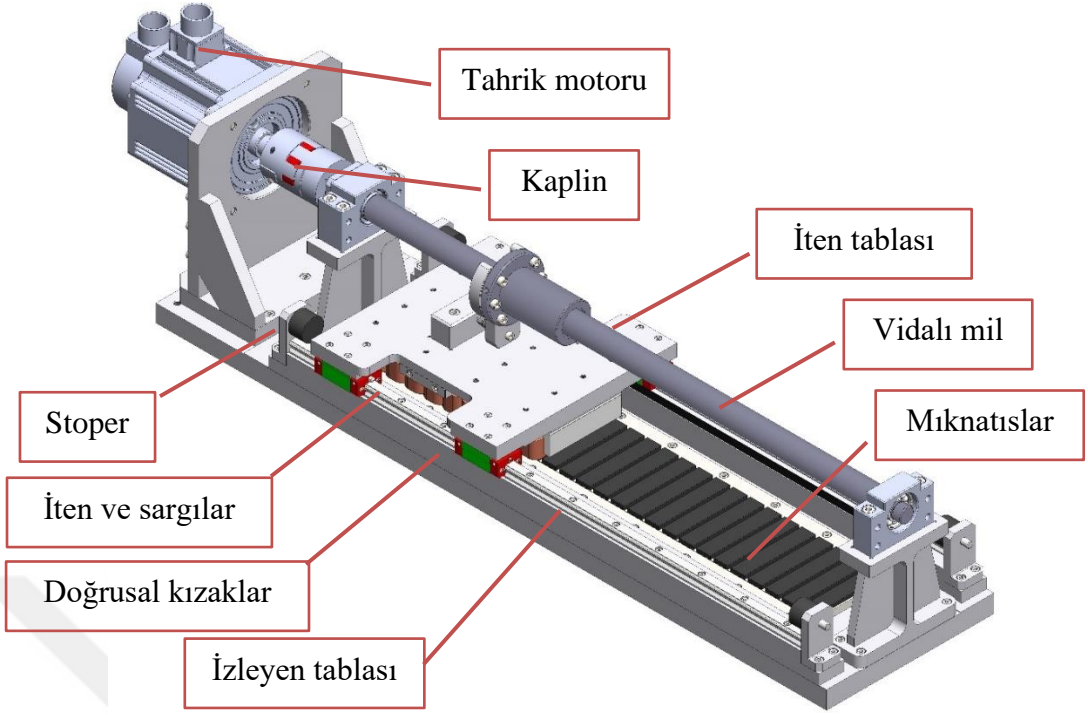
(a)

(b)

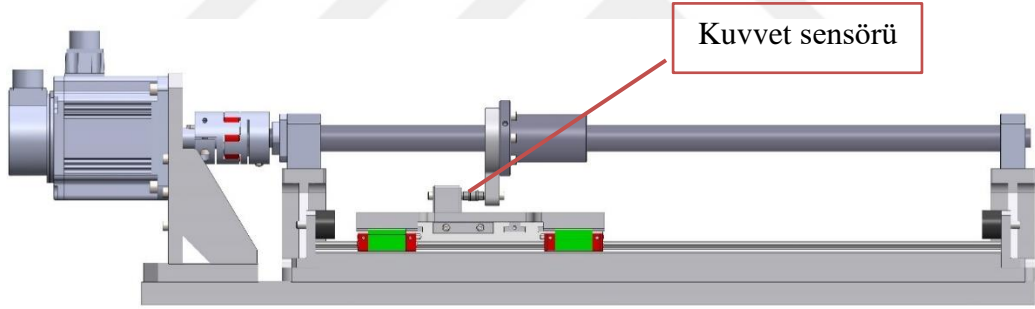
Şekil 5.6. Mıknatısları yapıştırılmış (a) kaykısız izleyen, (b) kaykılı izleyen yapıları

5.1.2. KM doğrusal senkron motor test sistemi

Tasarlanan ve üretilen özgün KM doğrusal senkron motorun yüklü ve yüksüz durum performans testlerini gerçekleştirebilmek amacıyla tasarlanan doğrusal motor test sistemi Şekil 5.7’de gösterilmiştir. Sistemde iten doğrusal kızaklar yardımıyla hareket yönüne dik olacak şekilde sabitlenmiştir. İzleyen ise bir tabla üzerine vidalanmıştır. Şekilden de görüleceği gibi sistemde yüksüz durum testlerini gerçekleştirmek amacıyla bir tahrik motoru bulunmaktadır. Tahrik motoru ve doğrusal motor bir vidalı mil vasıtasıyla birbirine bağlanmıştır.

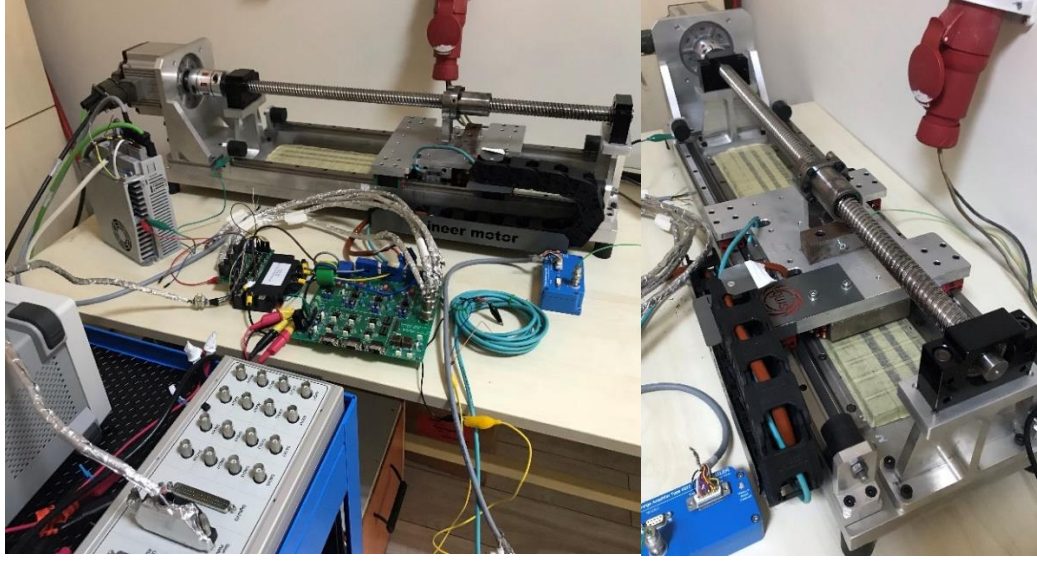


Şekil 5.7. Tasarlanan KM doğrusal senkron motor test sistemi



Şekil 5.8. Tasarlanan doğrusal senkron motor test sistemi yandan görünüşü

Motorun yüklü durum testleri gerçekleştirilirken motor sürücü üzerinden yüklenmekte ve kuvvet verisi Şekil 5.8'de gösterilen kuvvet sensörü üzerinden alınmaktadır. Doğrusal motorun konum bilgisi gövdeye yerleştirilen doğrusal enkoder ile elde edilmektedir. Doğrusal enkoderden alınan konum bilgi sürücü içerisinde işlenerek motor çalışmasında geri bildirim olarak kullanılmaktadır. Gerçekleştirilen 3B tasarıma bağlı kalınarak üretilen doğrusal motor test sistemi Şekil 5.9'da gösterilmiştir. Motor yüklü durum testlerinde OEMax Servo Drive CSD5 sürücü kullanılmıştır.



Şekil 5.9. Üretilen doğrusal motor test sistemi, motor sürücüsü ve kartlar

5.2. Motor Performans Testleri

Bu bölümde analizleri tamamlanan, prototip ve test düzeneği üretimi gerçekleştirilen analiz sonuçları verilirken ara tasarım olarak adlandırılan özgün kaykısız KM doğrusal senkron motorun performans testlerine ilişkin sonuçlar verilmiştir. Motor testleri yüksüz ve yüklü durum testleri olmak üzere iki başlıkta incelenmiştir. Yüksüz durum testleri kapsamında motorun direnç, endüktans ölçümleri yapılmış, zıt EMK gerilimi değişimi elde edilmiş ve farklı hız değerleri için zıt EMK verileri kontrol edilmiştir. Yüklü durum testleri kapsamında ise motorun farklı akım değerlerinde çıkış kuvveti değerleri elde edilmiş, anma akımında ve anma hızındaki kuvvet değişimi verilmiştir. Son olarak elde edilen tüm test verileri SEA sonuçları ile karşılaştırılmış, yüzde hata verileri hesaplanmış ve motor performans doğrulaması yapılmıştır.

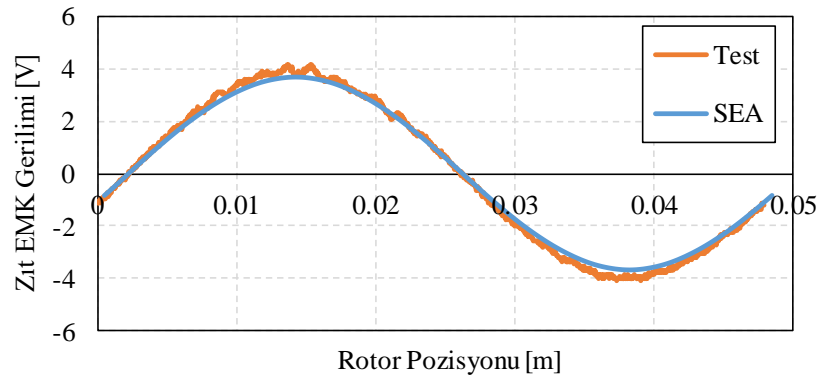
5.2.1. Yüksüz durum performans testleri

Özgün kaykısız KM doğrusal senkron motor yıldız bağlantı şekline sahiptir ve motor sargı direncini ve endüktansını ölçmek için LCR metre kullanılmıştır. Motora ait hat direnci ve hat endüktansı ölçümleri Tablo 5.1’de verilmiştir.

Tablo 5.1. Özgün DSM hat direnci ve endüktansı ölçümleri

Ölçüm No	Fazlar	Direnç (ohm)
1	U-V	0,866
2	V-W	0,869
3	U-W	0,869
Ölçüm No	Fazlar	Endüktans (mH)
1	U-V	11
2	V-W	11,4
3	U-W	10,64

Yüksüz durum testlerinin bir sonraki adımında motorun zıt EMK gerilim değerleri ve değişimleri ölçülmüştür. Bunun için doğrusal motorun sargıları enerjilendirilmeden tahrik motoru farklı hızlarda döndürülmüştür. Şekil 5.10'da motorun 0,083m/s hızda çalışması durumunda osiloskop yardımıyla elde edilmiş, hat gerilimleri SEA verileriyle karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Tablo 5.2'de tahrik motorunun farklı hızlarda döndürülmesi durumunda elde edilen hat gerilimi değerleri, SEA ile elde edilen gerilimler ve yüzde hata bilgileri verilmiştir.



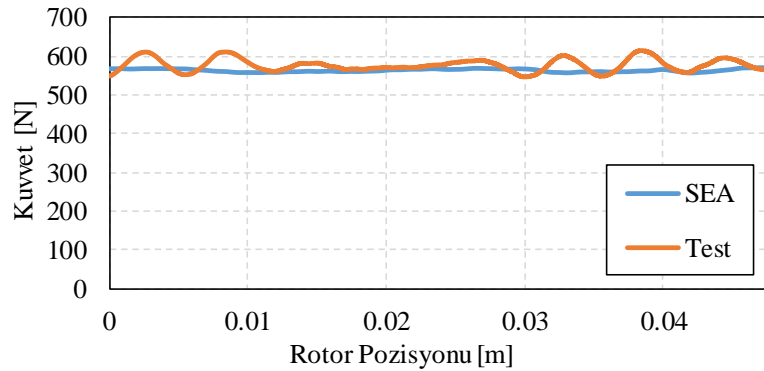
Şekil 5.10. Zıt EMK hat gerilimlerinin karşılaştırılması (@0,083m/s)

Tablo 5.2. Fazlara ait zıt EMK gerilim değerleri

Tahrik Motoru Hızı [rpm]	Doğrusal Hız [m/s]		SEA Ölçümleri [Vrms]	Test Ölçümleri [Vrms]	%Hata
50	0,021	U-V	0,618	0,68	8,31
100	0,042	U-V	1,24	1,36	8,32
200	0,083	U-V	2,57	2,82	8,79
250	0,104	U-V	3,16	3,46	8,53
300	0,125	U-V	3,62	3,96	7,71
400	0,167	U-V	4,95	5,43	8,55
500	0,208	U-V	6,38	6,99	8,48
600	0,25	U-V	7,67	8,41	8,36

5.2.2. Yüklü durum performans testleri

KM doğrusal senkron motorun yüklü durum testlerini gerçekleştirmek için motor sargıları enerjilendirilmiş, motorda oluşan kuvvet kuvvet sensörü vasıtasıyla ölçülmüştür. Doğrusal motorun konum bilgisi, gövdeye yerleştirilen enkoderden alınmış, enkoderden alınan bu bilgi motor sürücüsünde işlenmiştir. Motorun tüm sargılar enerjilendirilerek, 15Amax akımında 0,083m/s doğrusal motor hızı için çıkış kuvveti değerleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlardan yola çıkılarak oluşturulan karşılaştırma grafiği Şekil 5.11'de gösterilmiştir. Gerçekleştirilen hesaplamalarda SEA sonuçları ile test sonuçları arasında yaklaşık %12 fark bulunmaktadır.



Şekil 5.11. Özgün kaykısız doğrusal motorun çıkış kuvveti karşılaştırması (@15Amax)

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, doğrusal motorların temelleri konusunda genel bilgiler verilmiş, KM doğrusal senkron motorların temel özellikleri, çeşitleri ve temel denklemlerine yer verilmiş, KM doğrusal senkron motorların manyetik eşdeğer devre modellemesi tamamlanmıştır. Ayrıca çalışmada, özgün 9-oluk 10-kutuplu doğrusal senkron bir motorun tasarımı ve prototip üretimi gerçekleştirilmiştir ve tamamlanan manyetik modelleme ile 2B ve 3B sonlu elemanlar modellemesinin uyum içerisinde olduğu gösterilmiştir. Son olarak motora ait performans testleri gerçekleştirilmiş ve gerçekleştirilen elektromanyetik analizlerin doğrulaması tamamlanmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] Kazan E., Design and Implementation of Linear Motor for Multi-Car Elevators, Master Thesis, Sabanci University, İstanbul, 2009.
- [2] Trilogy Linear Motor & Linear Motor Positioners, Parker Hannifin Corporation, http://www.motionusa.com.s3website.amazonaws.com/parkertrilogy/Full_Catalog.pdf, (Ziyaret tarihi: 20.12.2018).
- [3] Linear Synchronous Motors, Etel Motion Technology, <https://www.etal.ch/fileadmin/PDF/Catalogs/LinearMotors/LinearMotorsEN.pdf>, (Ziyaret tarihi: 20.12.2018).
- [4] Gieras J. F., Piech Z. J., Tomczuk B. Z., *Linear Synchronous Motors-Transportation and Automation Systems*, Second Edition, CRC Press, USA, 2000.
- [5] Linear Motors Application Guide, Aerotech Corporation, <https://www.aerotech.com/media/136335/linear-motors-application-en.pdf>, (Ziyaret tarihi: 20.12.2018).
- [6] Linear Motors, <https://linmot.com/products/linear-motors/>, (Ziyaret tarihi: 20.12.2018).
- [7] Linear Servo Drive, Linear Σ Series, Yaskawa, http://software.yaskawa.eu.com/nc/ru/drives-motion/ac-servo-drives/linear-servomotors/downloads.html?tx_damfrontend_pi1%5Bsort_title%5D=DESC, (Ziyaret tarihi: 22.12.2018).
- [8] Linear Motors, I-Force Ironless and RIPPED Ironcore Series, Parker Hannifin Corporation, https://www.parker.com/literature/Electromechanical%20North%20America/CATALOGS-BROCHURES/Linear_Motor_Brochure.pdf, (Ziyaret tarihi: 22.12.2018).
- [9] Qu R., 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*, 2004, **40**(1), 121-127.
- [10] Vaez-Zadeh S., Isfahani A. H., Enhanced Modeling of Linear Permanent-Magnet Synchronous Motors, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2007, **43**(1), 33-39.
- [11] Leidhold R., Mutschler P., Evaluation of Sensorless Method for Synchronous-Linear Motors by Using a Magnetic Equivalent Circuit Based Model, *IEEE International Electric Machines & Drives Conference*, 2007, 386-391.

- [12] Li L., Ma M., Kou B., Chen Q., Analysis and Design of Moving-Magnet-Type Linear Synchronous Motor for Electromagnetic Launch System, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2011, **39**(1), 121-126.
- [13] Kazan E., Onat A., Modeling of Air Core Permanent-Magnet Linear Motors with a Simplified Nonlinear Magnetic Analysis, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2011, **47**(6), 753-1762.
- [14] Song J. Y., Lee J. H., Kim D. W., Jung S.Y., Analysis and Modeling of Concentrated Winding Variable Flux Memory Motor Using Magnetic Equivalent Circuit Method, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2017, **53**(6), 1-4.
- [15] Yeo H. K., Lim D. K., Woo D. K., Ro J. S., Jung H. K., Magnetic Equivalent Circuit Model Considering Overhang Structure of a Surface-Mounted Permanent-Magnet Motor, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2015, **51**(3), 1-4.
- [16] Sheikh-Ghalavand B., Vaez-Zadeh S., Isfahani A. H., An Improved Magnetic Equivalent Circuit Model for Iron-Core Linear Permanent-Magnet Synchronous Motors, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2010, **46**(1), 112-120.
- [17] Zhang X., Wang X., Xu X., Feng H., Slot-Pole Combinations Research of Permanent-Magnet Linear Synchronous Motor with Concentrated Windings, *17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2014, 1322-1325.
- [18] Lu Q., Cheng C., Zhang X., Huang L. Yang Z., Ma D., Ye Y., Fang Y., Comparative Investigation of Single-sided and Double-sided Permanent Magnet Linear Motor, *15th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2012, 1-5.
- [19] Chunyan L., Baoquan K., Research on Electromagnetic Force of a Large Thrust Force Permanent Magnet Synchronous Linear Motor, *16th International Symposium on Electromagnetic Launch Technology*, 2012, 1-4.
- [20] Jeans C. G., Cruise R. J., Landy C. F., Methods of Detent Force Reduction in Linear Synchronous Motors, *International Electric Machines and Drives Conference IEMD'99*, 1999, 437-439.
- [21] Shi J., Kong H., Huang L., Lu Q., Ye Y., Influence of Flux Gaps on the Performance of Modular PM Linear Synchronous Motors, *17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2014, 1566-1571.
- [22] Chunyan L., Baoquan K., Shukang C., Research on a Large Thrust Force Permanent Magnet Synchronous Linear Motor Used in Space Electromagnetic Launcher, *16th International Symposium on Electromagnetic Launch Technology*, 2012, 1-4.
- [23] Cruise R. J., Landy C.F., Reduction of Cogging Forces in Linear Motors, *IEEE Africon, 5th Africon Conference in Africa*, 1999, 623-626.

- [24] Palomino G. G., Conde J. R., Ripple Reduction in a PMDSM with Concentrated Winding Using 2-D Finite Element Simulation, *4th IET Conference on Power Electronics, Machines and Drives*, 2008, 451-454.
- [25] Yao Y., Chen Y., Lu Q., Huang X., Ye Y., Analysis of Thrust Ripple of Permanent Magnet Linear Synchronous Motor with Skewed PMs, *18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2015, 1141-1146.
- [26] Cai J. J., Lu Q., Huang X., Yes Y., Thrust Ripple of a Permanent Magnet DSM with Step Skewed Magnets, *IEEE Transaction on Magnetics*, 2012, **48**(11), 4666-4669.
- [27] Jung I., Hur J., Hyun D., Performance Analysis of Skewed PM Linear Synchronous Motor According to Various Design Parameters, *IEEE Transaction of Magnetics*, **37**(5), 2001, 3653-3657.
- [28] In-Cheol H., Ki-Bong J., Gyu-Tak K., A Study on the Characteristic Analysis According to Overhang and Skew of Permanent Magnet in PMDSM, *Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2007, 1255-1258.
- [29] Hwang C. C., Li P. L., Liu C. T., Optimal Design of a Permanent Magnet Linear Synchronous Motor with Low Cogging Force, *IEEE Transaction on Magnetics*, 2012, 1039-1042.
- [30] Park E. J., Lim Y., Jung S. Y., Edge Effect Minimization of Stationary Discontinuous Armature PMDSM Using Skewed Magnets and Stair Shape Auxiliary Teeth, *International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2013, 1958-1961.
- [31] Park E. J., Kim Y. J., Jung S. Y., Optimal Design of Semi-Arch Auxiliary-Teeth of Stationary Discontinuous Armature PMDSM with Concentrated Winding Using Design of Experiment, *9th IET International Conference on Computation in Electromagnetics (CEM 2014)*, 2014, 1-2.
- [32] Jang K., Kim J., An H., Kim G., Optimal Design of Auxiliary Core to Reduce Detent Force According to End Effect in PMDSM, *Digest of the 2010 14th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation*, 2010, 1-1.
- [33] Jastrzemski J. P., 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*, 2010, 823-828.
- [34] Jiang S., Ye P., Jin G., Qi Y., 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 Electronics Society*, 2016, 1716-1720.
- [35] Zhu Y. W., Cho Y. H., Detent Force Reduction in Permanent-Magnet Linear Synchronous Motor Utilizing Poles, *2009 8th International Symposium on*

Advanced Electromechanical Motion Systems & Electric Drives Joint Symposium, 2009, 1-6.

- [36] Zhu Y. W., Lee S. G., Chung K. S., Cho Y. H., Investigation of Auxiliary Poles Design Criteria on Reduction of End Effect of Detent Force for PMDSM, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2009, **45**(6), 2863-2866.
- [37] Kim Y. J., Jung S. Y., Minimization of Outlet Edge Force Using Stair Shape Auxiliary Teeth in a Stationary Discontinuous Armature Linear Permanent Magnet Motor, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2011, **47**(10), 3228-3231.
- [38] Miyamoto Y., Hisatsune M., Maekawa K., Doi T., Tanabe M., Linear Motor, 2002, U.S. Patent No. 6,407,471 B1, *United States Patent*.
- [39] Stoiber D., Synchronous Linear Motor, 1998, U.S. Patent No. 5,744,879, *United States Patent*.
- [40] Miyamoto Y., Maekawa K., Doi T., Hisatsune M., Linear Motor, 2002, U.S. Patent No. 6,476,524, *United States Patent*.
- [41] Wang X., Linear Motor with Reduced Cogging, 2010, U.S. Patent No. 7,825,549 B2, *United States Patent*.
- [42] Sugita S., Misawa Y., Linear Motor with Reduced Cogging Force, 2005, U.S. Patent No. 6,949,846 B2, *United States Patent*.
- [43] Nakayama M., Yamaguchi S., Naka K., Ito K., Tanaka T., Linear Motor, 2010, U. S. Patent No. 2010/0201210 A1, *United States Patent Application Publication*.
- [44] Yamamoto T., Maeda T., Linear Motor, 2005, U.S. Patent No. 6,873,066 B2, *United States Patent*.
- [45] Sogabe M., Higashi S., Permanent Magnet Field Pole for Linear Motor, 1998, U. S. Patent No. 5,757,091, *United States Patent*.
- [46] Sagobe M., Shimura Y., Linear Motor, 2006, U.S. Patent No. 2006/0125327 A1, *United States Patent Application Publication*.
- [47] Chitayart A., Linear Motor with Improved Cooling, 1998, U.S. Patent No. 5,783,877, *United States Patent*.
- [48] Sugita S., Misawa Y., Miyairi S., Linear Motor, 2014, U.S. Patent No. 2014/0054979 A1, *United States Patent Application Publication*.
- [49] Chapman S. J., *Electric Machinery Fundamentals*, Fifth Edition, McGraw-Hill Publishing, USA, 2012.
- [50] Hanselman D., *Brushless Permanent Magnet Motor Design*, Second Edition, Magna Physics Publishing, USA, 2006.

- [51] Taylor&Francis Group., *Handbook of Electric Motors*, Second Edition, CRC Press, USA, 2004.
- [52] Rovers J. M. M., Jansen J. W., Lomonova E. A., Novel Force Ripple Reduction Method for a Moving-Magnet Linear Synchronous Motor with a Segmented Stator, *International Conference on Electrical Machines and Systems*, 2008, 2942-2947.
- [53] Chung S., Kim J., Double-Sided Iron-Core PMDSM Mover Teeth Arrangement Design for Reduction of Detent Force and Speed Ripple, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, **63**(5), 3000-3008.
- [54] Lim K., Woo J., Kang G., Hong J., Kim G., Detent Force Minimization Techniques in Permanent Magnet Linear Synchronous Motors, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2002, **38**(2), 1157-1160.
- [55] Li A. L., Ma B. M., Chen C. Q., Detent Force Analysis in Permanent Magnet Linear Synchronous Motor Considering Longitudinal End Effects, *15th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2012, 1-5.
- [56] Hirano H., Tahara S., Ogawa K., Magnetic Field Structure of Permanent Magnet Linear Synchronous Motor for Reduction of Thrust Ripple," *19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2016, 1-4.
- [57] Wang M., Li L., Yang R., Overview of Thrust Ripple Suppression Technique for Linear Motors," *Chinese Journal of Electrical Engineering*, 2016, **2**(1), 77-84.
- [58] Tan Q., Li L., Huang X., Wang Yang M., R., Analysis of the Detent Force for the Long-Stator Permanent Magnet Linear Synchronous Motor with Modular Mover, *21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2018, 1853-1856.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] **Barış A.**, Gulec M., Demir Y., Aydın M., Doğrusal Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Doğrusal Olmayan Manyetik Eşdeğer Devre ve Sonlu Elemanlar Tabanlı Tasarımı, *1. Ulusal Elektrik Enerjisi Dönüşümü Kongresi (EL-EN)*, 2017.
- [2] **Boduroglu A.**, Demir Y., Lyra R., Aydın M., Influence of Auxiliary Teeth on Performance of a Permanent Magnet Linear Motor, *XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2017, **53**(11), 779-784.
- [3] **Boduroglu A.**, Gulec M., Demir Y., Yolacan E., Aydın M., A New Asymmetric Planar V-Shaped Magnet Arrangement for A Linear PM Synchronous Motor, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2019, **55**(7), 1-5.

ÖZGEÇMİŞ

1992 yılında İskenderun'da doğdu. İlkokulu Afyon Hüseyin Sümer İlköğretim Okulunda, ortaokulu Rize Çay İlköğretim Okulunda, liseyi ise Kilis Hacı Mehmet Koçarlan Anadolu Lisesi'nde okudu. 2010 yılında Kocaeli Üniversitesi Mekatronik Mühendisliğini kazandı ve 2015 yılında üniversiteden mezun oldu. 2016-2019 yılları arasında, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimini tamamladı. 2015 yılının ağustos ayından beri MDS Motor Ltd. şirketinde Ar-Ge Mühendisi olarak görev yapmaktadır.



T.C.

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ'NE

155113017 öğrenci numarasıyla kayıtlı olduğum Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans programından mezun olmuş bulunmaktayım. 09.07.2019 tarihinde tez sunumunu gerçekleştirmiş olduğum yüksek lisans tezimin YÖK Tez sistemine yüklenen versiyonunda tez süresince destek aldığım Kocaeli Üniversitesi BAP birimini "Teşekkür" bölümüne eklemeyi unuttuğum için sadece teşekkür bölümünde revizyon yapmak istiyorum. YÖK Tez sistemine 10279581 numarasıyla kaydedilmiş tezimde yapılmasını istediğim değişiklikler dilekçeyle beraber sunmuş olduğum CD'de mevcuttur.

Gereğinin yapılmasını saygılarımla arz ederim.

10./10./2019

Ayşe BODUROĞLU

İmza

Uygundur
Doç. Dr. Metin Aydın
Metin

11/10/2019