

T.C.  
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**LİNEER ASENKRON MOTORLARIN TEORİSİ VE TASARIM ANALİZİ**

Cuma KIRAÇ

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ELEKTRİK – ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI

MALATYA

2010

**Tezin Başlığı:** Lineer Asenkron Motorların Teorisi ve Tasarım Analizi

**Tezi Hazırlayan:** Cuma KIRAÇ

**Sınav Tarihi:** 28 Haziran 2010

Yukarda adı geçen tez jürimizce değerlendirilerek Elektrik – Elektronik Mühendisliği

Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

**Sınav Jürisi Üyeleri** ( ilk isim jüri başkanı, ikinci isim tez danışmanı)

Prof. Dr. Teymuraz ABBASOV

İnönü Üniversitesi

Prof. Dr. Arif MEMMEDOV

İnönü Üniversitesi

Doç. Dr. Müslüm ARKAN

İnönü Üniversitesi

İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

Prof. Dr. Asım KÜNKÜL

Enstitü Müdürü

## **ONUR SÖZÜ**

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “ Lineer Asenkron Motorların Teorisi ve Tasarım Analizi ” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığını ve yararlandığım bütün kaynakların, hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Cuma KIRAÇ

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

LİNEER ASENKRON MOTORLARIN TEORİSİ VE TASARIM ANALİZİ

Cuma KIRAÇ

İnönü Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Müh. Anabilim Dalı

132 + xiv Sayfa

2010

Danışman: Prof. Dr. Arif MEMMEDOV

Bu çalışmanın amacı ileri ve ileri-geri hareket eden Lineer Asenkron Motorları (LAM) tanımlamaktır. Manyetik devrelerinin ve bobinlerinin açık olması bu motorları diğer motorlardan farklı kılmaktadır. Son zamanlarda hızlı tren sistemlerinde, yürüyen merdivenlerde ve birçok uygulamada bu tip motorların kullanılması kurulum masraflarının azalmasına neden olduğundan, bu motorların tasarımı ve performanslarının incelenmeleri özel önem taşımaktadır.

Lineer asenkron motorun tasarımında gereken parametrelerin bulunması için elektromanyetik dalga teorisi kullanılarak çok katlı sistemin eşdeğer devresi oluşturulmuştur. 1000 mm uzunluğunda, 80 mm genişliğinde, 48 bobinden oluşan üç fazlı bir lineer asenkron motor tasarımı yapılmıştır. Yapılan motor üzerinde; döner motorlardaki "Açık devre" ve "Kısa devre" deneylerine benzer "Kayıplı" ve "Kayıpsız" durumlar için deneyler yapılmıştır. Deneylerin sonucunda motorun dairesel diyagramı kurulmuş, diyagramdan alınan sonuçlara göre motorun çalışma karakteristikleri çıkarılmıştır. Yapılan motorda primerdeki çift kutupların sayısı değiştirilerek farklı rotor çeşitleri denenmiş, elde edilen sonuçlar tablolar halinde verilmiştir. Tabloların karşılaştırılması sonucunda çok katlı rotor uygulamasında en iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler; Asenkron , Rotor , Stator , Lineer motor

## **ABSTRACT**

M. Sc. Thesis

LINEAR INDUCTION MOTOR THEORY AND DESIGN ANALAYSIS

Cuma KIRAÇ

İnönü Üiversity

Graduate School of Natural And Applied Sciences

Department of Electrical And Electronics Engineering

132 + xiv Pages

2010

Supervisor: Prof. Dr. Arif MEMMEDOV

The purpose of this study is to define Linear Asynchronous Motors (LAM) having motion in forward and forward-backward direction. The different between these type of motors and the others is that the magnetic circuits and coils are open in LAM's. Recently, the investigations of the desigin and performance of these motors have a great importance, since the application of these type of motors in high-speed railway systems, escalators and many other applications lowers the installation costs.

The equivalent circuit of multi-layered system was created by using electromagnetic wave theory in order to obtain the needed parameters for the desigin of linear asynchronous motor. A three phase linear asynchronous motor having length of 1000 mm, width of 80 mm and composed of 48 coils was designed. Experiments similar to "Open circuit" and "Short circuit" experiments of asynchronous motor were caried out for "lossless" and "lossy" case. The circular diagram of motor was established according to the experiment results and the operation characteristics of the motor were obtained from the diagram. Different rotor types were tested on the manufactured motor by changing double-poles and obtmined results were presented by using tables. After the comparison of tables, it was concluded that the best results were obtained fore multi layered rotor application.

**Keywords:** Asynchronous, Rotor , Stator , Linear Induction Motor.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın her aşamasında yardım, öneri ve desteğini esirgemeden beni yönlendiren danışman hocam Prof. Dr. Arif **MEMMEDOV**' a;

2009/49 nolu “ Lineer Asenkron Motorların Teorisi ve Tasarım Analizi ” başlıklı projemize destek veren İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi ve çalıőanlarına;

İNönü Üniversitesi Elektrik – Elektronik Mühendisliğindeki hocalarıma;

Tüm maddi, manevi yardımları için ailem'e ve tüm dostlarıma teőekkürlerimi arz ediyorum.

## İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	iii
ABSTRACT .....	iv
TEŞEKKÜR .....	v
İÇİNDEKİLER .....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	ix
TABLolar DİZİNİ .....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR .....	xiii
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
<b>2. KURAMSAL TEMELLER .....</b>	<b>4</b>
2. 1. Giriş .....	4
2. 2. Lineer Asenkron Motorların Yapısı .....	4
2. 3. Lineer Asenkron Motorların Uygulama Alanları .....	6
2. 4. Linner Asenkron Motorların Sınıflandırılması .....	7
2. 5. Lineer Asenkron Motorların Modellenmesi .....	12
2. 6. Lineer Asenkron Motorun Hız Kontrolü .....	13
2. 7. Lineer Asenkron Motorda Elektromanyetik Alanlar ve Kuvvetler .....	15
2. 8. LAM' ların Elektromanyetik etkileri .....	15
2. 9. Elektro Manyetik Alan Eşitlikleri .....	18
2. 10. Lineer Asenkron Motorun Performansının Analizi .....	23
2. 11. İyilik Faktörü .....	24
2. 12. Düşük Hızlı ve Yüksek Hızlı Motorlar .....	25
2. 13. Lineer Asenkron Motorun Ön ve Arkasındaki Akı Yoğunluğu .....	28
2. 14. Lineer Asenkron Motorun İtme Karakteristikleri .....	29
2. 15. Lineer Asenkron Motorda Normal Kuvvet .....	31
2. 16. Lineer Asenkron Motorda Kenar Etkisi .....	32
2. 17. Lineer Asenkron Motorda Uç Etkileri .....	33
2. 17.1.Enine uç etkisi .....	33
2. 17.2.Boyuna uç etkisi .....	34

2. 18.	Lineer Asenkron Motorların Döner Motorlara Benzetilerek Kurulan Esas Denklemleri .....	35
2. 19.	Lineer motorlarda eşdeğer devre ile moment, sekonder empedansı ve sekonder karakteristik empedansı .....	35
2. 20.	Sonuç .....	39
3.	<b>MATERYAL VE YÖNTEM</b> .....	41
3. 1.	Giriş .....	41
3. 2.	Doğrudan Manyetik Alan Analizi Metotları .....	41
3. 3.	Katman ve Fourier Metotları .....	45
3. 4.	Sonlu Elamanlar Metodu .....	50
3. 5.	İki Boyutlu Çözüm .....	51
3. 6.	Üç Boyutlu Çözüm .....	55
3. 7.	Sınır Elamanları Metodu .....	55
3. 8.	Lineer Asenkron Motorun Teorik Analizi .....	56
3. 9.	Lineer Asenkron Motorun Çok Katlı Eşdeğer devresi .....	56
3. 10.	Lineer Asenkron Motorun Tasarımı ve Hazırlanması .....	64
3. 11.	Lineer Asenkron Motora Ait Teknik Veriler .....	64
3. 12.	Oluşturulan Lineer Asenkron Motorun Görünümü .....	66
3. 13.	Lineer Motor Uygulamasına Ait Kumanda Devresi ve Güç Devresi .....	75
3. 14.	Sonuç .....	76
4.	<b>ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA</b> .....	77
4. 1.	Giriş .....	77
4. 2.	Yürüyen Manyetik Alanın Grafiksel Çözümü .....	77
4. 3.	Yürüyen Manyetik Alanın Analitik Çözümü .....	81
4. 4.	Lineer Asenkron Motorun Deneysel Analizi .....	82
4. 5.	Faz Dirençlerinin Ölçümü .....	84
4. 6.	Manyetik devrenin kayıplı durumu için yapılan deney .....	86
4. 7.	Manyetik Devrenin Kayıpsız Durumu Deneyleri .....	88
4. 8.	Lineer Asenkron Motorun Dairesel Diyagramı .....	90
4. 9.	Lineer Asenkron Motorun Sekonderi Üzerine Yük Konarak Yapılan Hız Testi .....	95
4. 10.	Lineer Asenkron Motorda Çok Katmanlı Sekonder .....	96
4. 11.	Lineer Asenkron Motorun Y Bağlı Durumu .....	96



4. 12.	Lineer Asenkron Motorun $\Delta$ Bağlı Durumu .....	100
4. 13.	Lineer Asenkron Motorun İki Parçalı Y Bağlı Durum .....	102
4. 14.	Lineer Asenkron Motorun Bobinleri İkişerli Seri ve Y Bağlı Durum .....	104
4. 15.	Faz Dirençlerinin Ölçümü İçin Yapılan Testler .....	107
4. 16.	Farklı Çeşit Rotor ( Sekonder ) Denemeleri .....	110
4. 17.	Şebeke Geriliminde Lineer Motordaki Harmoniklerin İncelenmesi .....	112
4. 18.	Hız Kontrol Cihazı İle Lineer Motordaki Harmoniklerin İncelenmesi .....	113
4. 19.	Güç Kalitesi Analizörü ( CA 8332 B ) İle Ölçülen Değerler .....	117
4. 20.	Lineer Asenkron Motor Deneme Görünümleri .....	119
4. 21.	Lineer asenkron motorun primer manyetik akı ölçüm değerleri .....	121
4. 22.	Sonuç .....	121
5.	<b>SONUÇ VE ÖNERİLER</b> .....	122
6.	<b>KAYNAKLAR</b> .....	125
7.	<b>EK</b> .....	126
7. 1.	Kaynak Elektrik Dergisinde Yayımlanan Makale .....	126
8.	<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	132

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2. 1.	Normal bir motordan lineer asenkron motor elde etmek için kesilip açma işlemi .....	5
Şekil 2. 2.	Kısa primerli LAM .....	8
Şekil 2. 3.	Kısa sekonderli LAM .....	8
Şekil 2. 4.	Tüp tipi lineer asenkron motor .....	10
Şekil 2. 5.	Çift yanlı C - çekirdekli ve sargıları dağıtılmış bir TFLAM .....	10
Şekil 2. 6.	LAM' ların sınıflandırılması .....	11
Şekil 2. 7.	Tek kenarlı lineer asenkron motorun geometrisi .....	24
Şekil 2. 8.	$\alpha_1$ ' in hızla değişimi .....	27
Şekil 2. 9.	$\alpha_2$ ' in hızla değişimi .....	27
Şekil 2. 10.	$v'$ ve $\tau'$ ' in hızla değişimi .....	27
Şekil 2. 11.	Lineer asenkron motorda normal akı yoğunluğunun dağılımı .....	29
Şekil 2. 12.	Lineer asenkron motorun itme karakteristikleri .....	30
Şekil 2. 13.	Lineer asenkron motorun kutup başına itmesi .....	30
Şekil 2. 14.	Lineer asenkron motordaki normal kuvvet .....	31
Şekil 2. 15.	Lineer asenkron motorda kenar etkisi .....	32
Şekil 2. 16.	Sekonder akım yolları .....	33
Şekil 2. 17.	Lineer asenkron motorda senkron hızda uç etkisi .....	34
Şekil 2. 18.	Lineer asenkron motorun eşdeğer devresi .....	36
Şekil 3. 1.	LAM' un analizi için eksenler .....	43
Şekil 3. 2.	Uç etkileri dahil edilerek geliştirilen eşdeğer devre .....	44
Şekil 3. 3.	Tek yanlı bir lineer asenkron motorun genel görünümü .....	46
Şekil 3. 4.	Bir motor dizisi .....	47
Şekil 3. 5.	Katman analizi için sekonder modeli .....	48
Şekil 3. 6.	Matematiksel modelin enine görünümü .....	50
Şekil 3. 7. a	LAM' da boyuna bir kesit .....	54
Şekil 3. 7. b	LAM' da boyuna kesit alanında yapılan elaman dağılımı .....	54
Şekil 3. 8. a	LAM ' un Konstruksiyonu .....	56
Şekil 3. 8. b	LAM ın Çok Katlı Analiz Şekli .....	56
Şekil 3. 9.	Lineer asenkron motorun çok katlı modeli .....	58

<b>Şekil 3. 10. a</b>	LAM ' in k. Katı .....	60
<b>Şekil 3. 10. b</b>	LAM ' in iki kapılı analog II eşdeğer devresi .....	60
<b>Şekil 3. 11.</b>	Aktif kat .....	61
<b>Şekil 3. 12. a</b>	Aktif katın T şeklinde ki analog modeli .....	61
<b>Şekil 3. 12. b</b>	Aktif katın II şeklinde ki analog modeli .....	61
<b>Şekil 3. 13.</b>	Çok katlı modele denk düşen analog devre .....	62
<b>Şekil 3. 14.</b>	Lineer motora ait 300 spirden oluşan bobin ölçüleri .....	65
<b>Şekil 3. 15.</b>	İndüktörü oluşturan E I42/VM530 A tip trafo sac ölçüleri .....	65
<b>Şekil 3. 16.</b>	Bobinler klemens ve E tipi trafo sacı .....	67
<b>Şekil 3. 17.</b>	Primer ve rotor .....	67
<b>Şekil 3. 18.</b>	E tipi sac ve primer bobinleri .....	68
<b>Şekil 3. 19.</b>	Ray ve bobinler .....	68
<b>Şekil 3. 20.</b>	Ray ve bobinler .....	69
<b>Şekil 3. 21.</b>	Ray ve bobinler .....	69
<b>Şekil 3. 22.</b>	Rotor parçaları ( alüminyum ve demir) .....	70
<b>Şekil 3. 23.</b>	Rotor parçaları ve E tipi trafo sac dizisi .....	70
<b>Şekil 3. 24.</b>	E tipi trafo sac dizisi .....	71
<b>Şekil 3. 25.</b>	Bobinler trafo sacı ve klemens bağlantıları .....	71
<b>Şekil 3. 26.</b>	Bobin Sarım Çıkışı .....	72
<b>Şekil 3. 27.</b>	E Tipi Trafo Sac Parçaları .....	72
<b>Şekil 3. 28.</b>	Sekonderin Yüklü Hali .....	73
<b>Şekil 3. 29.</b>	Denenen Farklı Çeşit Sekonder Örnekleri .....	73
<b>Şekil 3. 30.</b>	Bobin Teli Sarılarak Oluşturulan Sekonder .....	73
<b>Şekil 3. 31.</b>	Alüminyum Çubuklu Rotor .....	74
<b>Şekil 3. 32.</b>	Bobin Teli ile Oluşturulmuş Rotor .....	74
<b>Şekil 3. 33.</b>	Sekonderin Alttan Görünümü ( Taşıyıcı Araba ) .....	74
<b>Şekil 3. 34.</b>	Sekonder Üstten Görünüm .....	75
<b>Şekil 3. 35.</b>	Lineer asenkron motorun ileri - geri hareket kumanda devre şeması ...	75
<b>Şekil 3. 36.</b>	Lineer asenkron motorun ileri - geri hareket güç devre şeması .....	76
<b>Şekil 4. 1. a</b>	A Fazı için primer manyetik akı çizgileri ve bobin bağlantı şekli .....	77
<b>Şekil 4. 1. b</b>	B Fazı için primer manyetik akı çizgileri ve bobin bağlantı şekli .....	78
<b>Şekil 4. 1. c</b>	C Fazı için primer manyetik akı çizgileri ve bobin bağlantı şekli .....	78
<b>Şekil 4. 1. d</b>	A, B, C Fazı toplu primer manyetik akı çizgileri .....	79
<b>Şekil 4. 1. e</b>	Lineer asenkron motorun vektörel gösterimle toplam manyetik alanı....	79

<b>Şekil 4. 1. f</b>	Lineer asenkron motorlar için primer ve sokonderdeki manyetik akı dağılımı .....	80
<b>Şekil 4. 1. g</b>	Lineer asenkron motorunda A,B,C fazlarının manyetik akılarının toplamalarının oluşturduğu toplam manyetik alanın hareket yönü .....	80
<b>Şekil 4. 2.</b>	Lineer motorun ölçü aletleri ile bağlantısı .....	82
<b>Şekil 4. 3.</b>	Manyetik devrenin açık olması hali ( Demirsiz ) .....	88
<b>Şekil 4. 4.</b>	Manyetik devrenin kalınlığı 10 mm çelik tabaka ile kapalı olması hali... ..	90
<b>Şekil 4. 5.</b>	Lineer asenkron motorun dairesel diyağramı .....	93
<b>Şekil 4. 6.</b>	Dairesel diyağram kullanılarak çizilen Lineer asenkron motorun çalışma karakteristikleri .....	94
<b>Şekil 4. 7.</b>	Farklı rotor ( sekonder) deneme örnekleri .....	111
<b>Şekil 4. 8.</b>	Motora uygulanan şebeke gerilimi ( R,S,T Fazları) .....	112
<b>Şekil 4. 9.</b>	Üç faza ait toplu harmonik görüntüsü .....	112
<b>Şekil 4. 10.</b>	Tek faza ait harmonik görüntüsü .....	113
<b>Şekil 4. 11.</b>	40 Hz de frekansta üç fazın görüntüsü .....	113
<b>Şekil 4. 12.</b>	50 Hz ferkansta üç fazın görüntüsü .....	114
<b>Şekil 4. 13.</b>	60 Hz de frekansta üç fazın görüntüsü .....	114
<b>Şekil 4. 14.</b>	40 Hz de motorda oluşan harmoniklerin tek faz görüntüsü .....	115
<b>Şekil 4. 15.</b>	50 Hz de üç fazın harmoniklerinin toplu ( her renk bir faz) görüntüsü .....	115
<b>Şekil 4. 16.</b>	50 Hz de tek fazın harmoniklerinin görüntüsü .....	116
<b>Şekil 4. 17.</b>	60 Hz de bir faza ait harmoniklerinin görüntüsü .....	116
<b>Şekil 4. 18.</b>	Aynı faza ait gerlimin görüntüsü .....	117
<b>Şekil 4. 19.</b>	Gerilimi ayarlanabilir oto transformatör ve ayar kolu .....	119
<b>Şekil 4. 20.</b>	Frekans değiştirilebilen sürücü ( invertör) .....	120
<b>Şekil 4. 21.</b>	Lineer asenkron motor .....	120
<b>Şekil 4. 22.</b>	Watmetreler .....	121

## TABLolar DİZİNİ

<b>Tablo 3. 1.</b>	Kanada Queen Üniversitesi' ndeki deneysel LAM un tasarım verileri	53
<b>Tablo 3. 2.</b>	Lineer asenkron motorun teknik verileri	66
<b>Tablo 4. 1.</b>	Kayıplı durum faz dirençleri	84
<b>Tablo 4. 2.</b>	Kayıpsız durum için faz dirençleri	85
<b>Tablo 4. 3.</b>	Kayıplı durumda akım, gerilim, güç ve $\cos\phi$	86
<b>Tablo 4. 4.</b>	Kayıpsız durumda akım, gerilim, güç ve $\cos\phi$	89
<b>Tablo 4. 5.</b>	Kütle (yük) bağı olarak hız itme kuvveti ve kayma değerleri	95
<b>Tablo 4. 6.</b>	Kütle (yük) bağı olarak hız, itme kuvveti ve kayma değerleri	96
<b>Tablo 4. 7.</b>	Stator boşta iken manyetik dağılımlı durum (demirsiz), motor Y bağı	97
<b>Tablo 4. 8.</b>	Stator 1 mm lik saç ile kaplıyken dağılım azaltılmış durum, motor Y bağı	98
<b>Tablo 4. 9.</b>	Stator 10 mm lik çelik ile kaplıyken (dağılım yok), motor Y bağı	99
<b>Tablo 4. 10.</b>	Stator boşta iken manyetik dağılımlı durum (demirsiz), motor $\Delta$ bağı	100
<b>Tablo 4. 11.</b>	Stator 10 mm lik çelik ile kaplıyken (dağılım yok), motor $\Delta$ bağı	101
<b>Tablo 4. 12.</b>	Stator boşta iken manyetik dağılımlı durum (demirsiz)	102
<b>Tablo 4. 13.</b>	Stator 10 mm lik çelik ile kaplıyken (dağılım yok)	103
<b>Tablo 4. 14.</b>	Kütle bağı olarak hız, itme kuvveti ve kayma değerleri	104
<b>Tablo 4. 15.</b>	Stator boşta iken manyetik dağılımlı durum (demirsiz)	105
<b>Tablo 4. 16.</b>	Stator 10 mm lik çelik ile kaplıyken (dağılım yok)	106
<b>Tablo 4. 17.</b>	Kütle (yük) bağı olarak hız, itme kuvveti ve kayma değerleri	107
<b>Tablo 4. 18.</b>	Manyetik dağılımlı durumda faz dirençleri	108
<b>Tablo 4. 19.</b>	Manyetik dağılım olmadığı durumda (kayıpsız) faz dirençleri	108
<b>Tablo 4. 20.</b>	Manyetik dağılımlı (kayıplı) durumda faz dirençleri	109
<b>Tablo 4. 21.</b>	Manyetik dağılım olmadığı durumda (kayıpsız) faz dirençleri	110
<b>Tablo 4. 22.</b>	Güç analizörü ile ölçülen değerler	118

## SİMGELER VE KISALTMALAR

A	: Manyetik vektör potansiyeli (Wb/m veya T.m)
B	: Manyetik indüksiyon (T)
d	: Kalınlık (m)
$e_r$	: Elektro motor kuvveti (V)
F	: Öteleme kuvveti (N)
f	: Frekans (Hz)
Ge	: İylik faktörü
g	: Hava aralığı (mm)
H	: Manyetik alan şiddeti (A/m)
I	: Akım (A)
J	: Akı yoğunluğu (A/m)
k	: Dalga numarası
$k_e, k_h$	: Histerezis ve eddy kayıplarının tespiti için katsayılar
$k_{\omega 1}$	: Primer sarım faktörü
$k_{\omega 2}$	: Sekonder sarım faktörü
$k_{sat}$	: Manyetik doyum faktörü
L	: İndüktans (H)
$\ell$	: Uzunluk (m)
m	: Faz sayısı
n	: Döner hız (devir/dak.)
p	: Kutup sayısı
P	: güç (W)
$P_m$	: Mekanik güç (W)
$P_{out}$	: Çıkış gücü (W)
$P_{in}$	: Giriş gücü (W)
Q	: Reaktif güç (VAR)
R	: Direnç ( $\Omega$ )
s	: Kayma
$s_{cr}$	: Kritik Kayma
$\Delta P$	: Mekanik kayıp gücü (W)

$\Delta P_2$	: Sekonder kayıp güç (W)
T	: Moment (N.m)
t	: Zaman (Sn)
U	: Gerilim (V)
$v_s$	: Senkron doğrusal hız (m/s)
$v$	: Hız (m/s)
X	: Doğrusal yol (m)
Z	: Empedans ( $\Omega$ )
$\alpha$	: Sönümlenme katsayısı
$\delta$	: Hava aralığı (mm)
$\Phi$	: Manyetik akı (Wb)
$\gamma$	: Yayılma katsayısı
$\eta$	: Verim
$\lambda$	: Halkalama akısı (Wb)
$\mu$	: Manyetik iletkenlik (H/m)
$\mu_r$	: Relatif manyetik iletkenlik (H/m)
$\mu_0$	: Boşluğun manyetik iletkenliği (H/m)
$\theta$	: Açısal yol (Rad)
$\sigma$	: İndüksiyon kaçak katsayısı veya elektriksel iletkenlik (S/m)
$\tau$	: Kutup adımı (m)
$\omega$	: Açısal frekans (rad/s)
$\rho$	: Özgül direnç ( $\Omega.mm^2 / m$ )
L	: Sekonderin enine uzunluğu ( m )
Nef	: Faz başına efektif sarım sayısı
ke	: Enine uç etkisi katsayısı
$\Theta$	: MMF
MMF	: Manyeto motor kuvveti
LAM	: Lineer asenkron motor
EMK	: Elektro motor kuvveti

## 1. GİRİŞ

Günümüzde bilimsel ve teknik gelişmelerin hızlanması nedeniyle, bilim adamlarından teknikte ve elektromekanikte, geliştirilmiş teknik uygulamaların ve teknolojilerin tasarlanması ve kullanılması istenmektedir.

Sanayide kullanılan teknolojinin esas elamanlarından biri elektrik makina sürücüleridir. Teknolojinin gelişmesiyle güç elektroniği ve mikroşlemci teknolojisindeki gelişmeler elektrik makina sürücülerinin daha verimli çalıştırılması ve daha esnek kontrol sistemlerinin oluşturulmasına imkan vermektedir. Böylelikle elektrik makina sürücülerini günümüzde robotik teknolojinin ve esnek kontrol sistemlerinin esas komponentlerinden biri olmaktadır.

Sanayide kullanılan elektrik motorlarının yaklaşık % 50 si ileri - geri lineer hareket eden mekanizmalar ve makinalarda kullanılmaktadır. Bu nedenle motor milinin dönme hareketini lineer harekete dönüştürülmesi için ek mekanizmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Buda kayıpların artmasına ve makinanın çalışma esnekliğinin azalmasına neden olmaktadır.

Lineer elektrik motorları ise ileri ve geri hareket imkaanına sahip olduğu için iletici, dönüştürücü gibi aktarma elamanlarının kaldırılmasına olanak vermektedir. Bu durum lineer elektrik motorları ile çalışan mekanizmaların aynı gövdeye bağlanmasına imkaan vermektedir. Böylece lineer motorlar ek kayıpların yok olmasına ve sistemin esnek çalışmasına katkıda bulunmaktadır.

Bazı çalışma mekanizmalarında lineer elektrik motor sürücü sistemleri ile çalışma mekanizmalarının otomatik kontrol sistemleri arasındaki sınırları belirlemek mümkün değildir; başka bir deyişle lineer motorlar çalışma mekanizmaları ile ayrılmaz bir bütün oluşturmaktadırlar. Lineer motorlar birçok üstünlükleri olduğundan günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Lineer motorların üstünlüklerinden bazılarını aşağıdaki gibi sıralayabiliriz.

1- Taşıma araçlarında tekerlekleri etkileyen merkez kaç kuvvetlerinin, ray ve yol ile olan sürtünme kuvvetlerinin azaltılması, hareket hızının artırılması, yol verme ve frenleme zamanının ve boyunun azaltılması, ortam kirliliğine sebep olan etkilerin ortadan kaldırılmasıdır. Özellikle yer taşımacılığında kullanıldıklarında bu avantajlarından dolayı hızlanma ve frenlenme için araç ve tekerlek donanımına fazla gerek duyulmaz.



2- Sanayide kullanılan mekanizmalar, cihazlar ve otomatik sistemlerde lineer motorların primer ve sekonder parçaları arasındaki mekaniksel bağlantıların olmaması; mekanik kayıpların azalması, kinematik devrelerin basitleşmesi, kontrolde kalite ve devamlılığın artması gibi faydaları vardır.

3- Aggressive ortamlarda, patlamadan korkulan kapalı ortamlarda, steril ve derin vakumlu ortamlarda, büyük basınçlı kaplarda, radyoaktif ortamlarda ve çalışmanın zor olduğu durumlarda güvenle kullanılmaktadır. Mekaniksel ve elektriksel olarak iyi korunabildikleri için çevreye karşı zararsızdırlar. Kurulumları, tamiratları ve bakımları kolaydır.

4- Yukarıda göz önüne alınan üstünlüklerine rağmen lineer asenkron motorlarda manyetik devrelerinin açık olması sebebiyle bir dizi yetersizlikleri de mevcuttur. Bu yetersizlikler lineer asenkron motorun kullanımını olumsuz yönde etkilemektedir. Tasarımda aktif malzemelerin kullanımının artması ve çeşitli istenmeyen elektriksel etkilerin oluşması, elektriksel verilerin kötüleşmesine ve çalışma karakteristiklerinin her zaman olumlu olmaması gibi dezavantajları bulunmaktadır.

Günümüzde Lineer asenkron motorların incelenmesi alanında basılmış yüzlerce bilimsel çalışmanın büyük çoğunluğunda kenar ve uc etkileri ile teorik araştırmalar göz önüne alınmıştır. LAM'ların konstrüksiyonlarının, fiziksel proseslerinin analizi, tasarımı, karakteristiklerinin mühendislik yöntemleriyle analizine ait oldukça az kaynak bulunmaktadır. Bu makinaların imal edildikten sonra denenmesi ve karakteristiklerinin tasarım verileri ile karşılaştırılıp değerlendirilmesi alanında çalışma bulunmamaktadır. Hazırlanmış olduğumuz tez çalışması ile bu yetersizliklerin giderilmesi açısından yapılan çalışmaların sonuçları göz önüne alınmıştır.

Döner rotorlu asenkron motorlarda makinanın esas karakteristiklerinin bulunması amacıyla açık devre ve kısa devre deneyleri yapılmaktadır. Lineer asenkron motorlarda böyle deneylerin yapılması mümkün olmadığından, lineer asenkron motorların önemli karakteristikleri teorik işlemler sonucunda bulunmaktadır. Bu tez çalışmasında gerçek lineer asenkron motor üzerinde yapılan deneysel çalışmalarda motorun karakteristikleri oluşturulmaya çalışılmıştır.

Lineer hareket elde etmek için döner makinalardan kayış - kasnak mekanizmaları, kremayer mekanizmaları, bilyalı ve klavuz vida mekanizmaları kullanmak yerine lineer makinaları kullanmak güç kaybını azaltmaktadır. Birçok uygulama için örneğin büyük yüklerde ve hareket eksenini düşey olduğunda bu metotlar halen en iyileridir. Lineer makinaların en belirgin özelliği, dönme hareketini doğrusal harekete çeviren dişli gibi

dönüştürücülere gerek duyulmaksızın lineer hareketi meydana getirmeleridir. Bunun yanında lineer motorlar mekanik sistemlere göre çok yüksek ve çok düşük hızlarda çalışabilme, yüksek ivmelenme kabiliyeti, geri düşme olmaksızın yüksek doğruluk verme ve nerdeyse sıfır bakım maliyeti gibi birçok belirgin avantajlar sunmaktadır. Ayrıca basit, güçlü, güvenilir ve emniyetli olmaları, değişik koşullara uyabilme yetenekleri ve dairesel hareketi doğrusal harekete çevirmek için mekanik dönüştürücülere ihtiyaç duymamaları lineer makinaları tercih edilir hale getirmektedir.

Lineer motorlar mekaniksel bir temas olmaksızın sekonder de bir öteleme kuvveti meydana getirmektedirler.

Primer ile sekonder arasında meydana gelen dikey (normal) kuvvetten dolayı hızlı yer taşımacılığında levitasyon makinaları olarak da kullanılmaktadır.

Bu ve buna benzer birçok avantaja sahip lineer asenkron motorları, değişken hızlı kontrol sistemleri olarak çeşitli endüstri alanlarında yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır [1].

## **2. KURAMSAL TEMELLER**

### **2. 1. Giriş**

Bu tezin amacı, ileri veya ileri-geri hareket edebilen elektrik makineleri Lineer asenkron motorları (LAM) tanımlamaktır. Manyetik devrelerinin ve bobinlerinin açık olması bu motorları diğer motorlardan farklı kılmaktadır. Bu motorlarda manyetik devrelerin açık olması ve sekonder veya primerin sonlu genişliğe sahip olması sınır etkilerinin oluşmasına neden olur. Bu açıdan bu motorlarda sınır veya yatay, kalınlık veya dikey yüzey kabuk etkilerinin incelenmesi büyük önem taşımaktadır. Günümüzde hızlı tren sistemlerinde, yürüyen merdivenler, yürüyen sekiler gibi birçok uygulamada bu tür motorların kullanılması, bu uygulamalar için kurulum masraflarının azaltılmasına katkısı olacağından, bu motorların tasarımı ve teorik incelenmeleri özel önem taşımaktadır. Konunun detayına girmeden önce lineer motorların yapısı ve özellikleri iyi bilinmelidir.

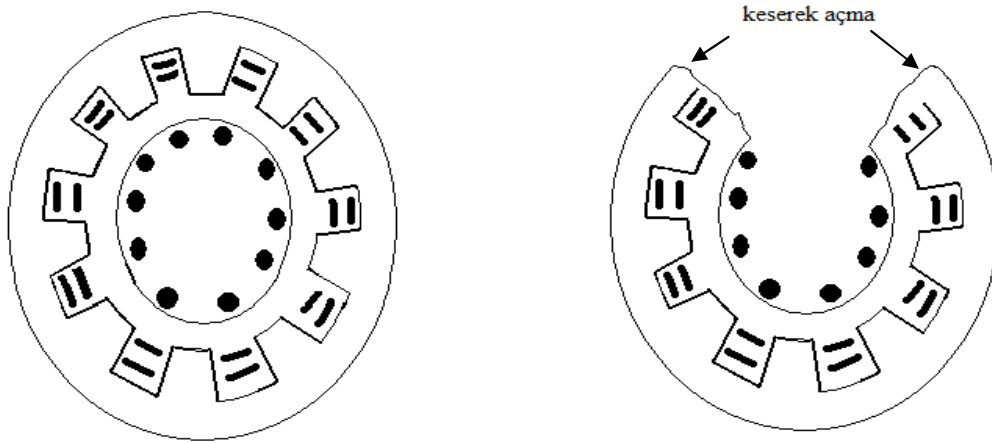
### **2. 2. Lineer Asenkron Motorların Yapısı**

Çalışma ilkeleri döner elektrik motorlarının özel halleri olarak açıklanabilen bu makineler döner elektrik motorları ile aynı türde yapılabilirler. Her elektrik motorunun lineer tipi gerçekleştirilebilir. Fakat yapımında bazı güçlüklerle olabilir. Lineer elektrik makinelerinin topolojisi yaklaşık 40 yıldır bilinmekte ve kavramsal olarak motorların bütün tiplerinin ( DC, indüksiyon, senkron ve relüktans ) lineer konfigürasyonları mümkündür. Bununla beraber lineer DC motor ve lineer senkron motor donanım uygulamasını karmaşık hale getiren çift uyarım ( alan ve armatür ) gerektirir. Relüktans motor indüklenmiş ve harici olarak ikincil uyarıma sahip olmadığından dolayı zayıf itici karakteristiğe sahiptir. Bundan dolayı dikkatin çoğu lineer asenkron motorları üzerinde yoğunlaşmıştır [2].

Lineer makineler genellikle motor modunda uygulama alanı bulmaktadır ancak nadiren de olsa generatör olarakta kullanılmaktadır. Döner hareket yapan bir elektrik makinesine karşılık gelen lineer hareket yapan bir elektrik makinesi geliştirildiğinde; elde edilen yeni makinenin topolojik özelliklerinin değişmesi yanı sıra çalışma karakteristikleri ve tasarım kriterleri de önemli ölçüde değişir. Makinenin manyetik devresindeki topolojik değişimler sonucu döner hareketli makinelerle açıklanamayan yeni elektromanyetik olaylar rol oynamaya başlar [1].

Şekil 2. 1 de döner asenkron makinelerin lineer eşdeğeri olan ve lineer asenkron makine (LAM) olarak bilinen makine görülmektedir. Şekil 2. 1 de görüldüğü gibi Lineer makine döner makineden kesilip açılarak elde edilmektedir. Genellikle lineer makinelerin stator tarafı primer ve rotor tarafı ise sekonder diye adlandırılmaktadır.

Lineer asenkron makinaların lineer senkron makinalardan farklarından biri öteleme hızının sabit olmayışı ve bu hızın senkron hızdan düşük olmasından dolayı asenkron adını almaktadırlar. Çalışma prensibi olarak bu makinalara **indüksiyon** makinaları da denir. Lineer asenkron makinalarda küçük kayma ve en büyük öteleme kuvvetleri meydana gelir. Büyük kaymalarda ise kaldırma kuvveti öteleme kuvvetinden büyüktür.



Şekil 2. 1. Normal bir motordan lineer asenkron motor elde etmek için kesilip açma işlemi

Lineer motorların çalışma prensipleri ve karakteristikleri temelde döner motorlarına benzemektedir. Döner motorlarda primer sargılar kendi üzerlerine konulduğundan hava aralığındaki elektromanyetik alanlar yarım periyotları kutup adımına eşit olarak uzaya göre periyodiktir. Bununla beraber lineer motorun kısa elamanı sonlu uzunluğa sahip ve açık uçludur, öncü ve kuyruk kenarları açıkça tanımlanabilir. Bundan dolayı lineer motorun hava aralığındaki elektro manyetik alanlar uzaya göre sürekli periyodik olmayıp motorun uzunluğu boyunca değişir ve her iki uçta motorun uzunluğundan daha ileri giderler. Bu kavram lineer motorlarda genelde uç etkileri olarak adlandırılır. Uç etkisi ( kuyruk kenarının daha ilerisine uzanarak) simetrik değildir. Lineer motor ve döner motorun her ikisi enine yönde sonlu genişliğe sahiptir fakat kenar etkisi olarak adlandırılan sonuç etki büyük hava aralığından dolayı lineer motorlarda daha etkilidir.

Bir lineer motorun verimi ve güç faktörü de genelde büyük hava aralığından dolayı döner motorlarla karşılaştırıldığında daha zayıftır.

### **2. 3. Lineer Asenkron Motorların Uygulama Alanları**

Lineer motorlar muhtelif endüstriyel uygulamalar için araştırılmıştır. Bu uygulamalardan bazıları nükleer endüstride sodyum ve sodyum – potasyum alaşımı için sıvı metal pompaları ve çelik endüstrisinde erimiş metallerin karıştırılmasını içerir. Diğer uygulamalar uzay mekiğinin fırlatılması ve tekstil endüstrisi için paket sarıcılarında iplik kılavuzları, endüstriyel konveyörler ve aktüatörleri içerir. Bununla beraber lineer asenkron motorların en yaygın uygulaması yer taşımacılığı alanında olmuştur. Bu uygulamalar yüksek hızlı yolcu taşıma ve tasnifgarları için yürütücü ve yavaşlatıcılarıdır.

Lineer elektrik makinelerinin performansı, güç faktörü ve verim açısından, nadiren eşdeğerleri döner elektrik makinelerinin performansına ulaşmaktadır. Ancak birçok uygulamada, performanstaki bu düşüş doğrusal hareket elde etmek için döner makinalarda kullanılan donanımlardan dolayı (dişli, şanzıman gibi) meydana gelen düşüşten daha azdır. Ayrıca lineer makinelerde, döner eşdeğerlerinde olmayan birçok karakteristik bulunmaktadır. Bu nedenle lineer motorlar aşağıda sıralanan yerlerde yaygın olarak kullanılmaktadır [1].

- Yüksek hızlı yer taşımacılığında
- Konveyör yürüyen bant sistemlerinde
- Mekanik kolları çalıştırmakta
- Sıvı metal pompalarında
- Kompresörlerde
- Tekstil sanayinde
- Sürgülü kapılarda
- Büyük disklerin hareketinde
- Disket / disk sürücülerinde
- Otomobil sanayinde
- Yüksek gerilim devre kesicilerinde
- Tıp alanında
- Kaplamaçılıkta
- Çelik sanayinde

Günümüzde hemen hemen bütün döner elektrik makinelerinin lineer eşdeğerleri uygulama alanı bulmaktadır. Lineer motorun ilk bulunuşu 1845' te Charles Wheatstone tarafından icat edilen relüktans tipi lineer motora dayanmaktadır. Lineer motorlarda en çok uygulama alanı bulan lineer asenkron motorlardır.

Lineer asenkron motorlara ait ilk patent 1895 ' lerde kumaş tezgahların da mekik fırlatma uygulaması için alınmıştır. Daha sonra 1930 yılında iki primerli ve manyetik olmayan metal sekonderli motorun patenti alınmıştır. 1905 yıllarında trenlerin tahriklerinde kullanılması düşünülmüş, ikinci dünya savaşından önce lineer motorlar büyük uygulama alanı bulamamıştır. Bunun nedeni olarak o zamanlar elektrik malzeme, elaman ve yarı iletken elektronik elamanların pahalı oluşu ve henüz bilinmeyişi gösterilebilir. 1945 yılında lineer motor ABD de uçakların hızlandırılması amacıyla üç fazlı olarak büyük güç ler için imal edilmişlerdir. Bu gün ise trenlerin tahrikinde kullanılan lineer motorlar ile 500 km/ h lik hızlara ulaşılmıştır [1].

#### **2. 4. Linner Asenkron Motorların Sınıflandırılması**

Lineer motorlar komütasyonun sağlanmasına göre fırçalı fırçasız, şekline göre; U kanal, yassı veya tüp şeklinde, çekirdeğin tipine göre demir çekirdekli, hava çekirdekli ve slotsuz olarak sınıflandırılabilir.

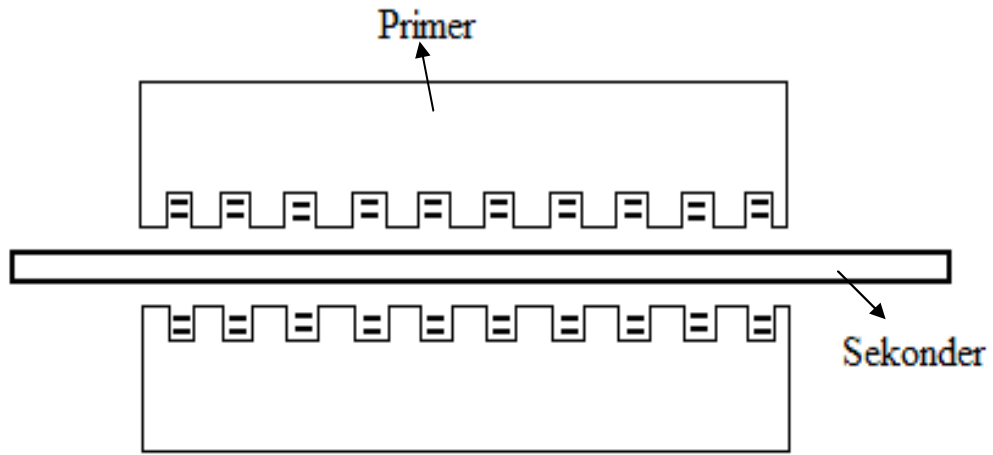
Lineer asenkron motorlar primer ve sekonderin hangisinin kısa olduğuna bakılarak ya kısa primerli lineer asenkron motor veya kısa sekonderli lineer asenkron motor olarak adlandırılır.

Bazı lineer asenkron motorlarda biri hareket doğrultusunda ve diğeri hareket doğrultusuna dik olmak üzere iki kuvvet meydana gelmektedir. Dik kuvvet primer ve sekonder arasında ya itme ya da çekme kuvveti şeklindedir. Meydana gelen dik kuvvet primerin üzerinde sekonderi havaya kaldırılmasını sağlıyorsa, bu tür makinalar lavitasyon makinası olarak adlandırılır. Diğer taraftan sadece öteleme kuvveti üreten makinalara lineer motor denilmektedir.

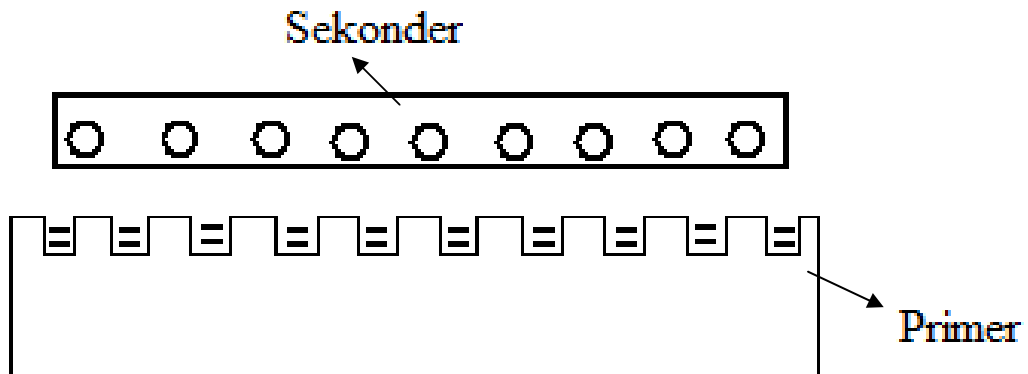
Lineer motorların en yaygın olanı çok fazlı olanlarıdır. Çok fazlı LAM ' lar da ki hava aralığı manyetik alanı hareketli bir manyetik alandır. Bir lineer asenkron motorun hava aralığı alanı, döner hareketli ve çok fazlı asenkron motorlarınkinden farklı olarak genellikle ileri yönde bir bileşen, geri yönde bir bileşen ve manyetik devrenin süreksizliğinden dolayı titreşimli bir bileşen olmak üzere üç bileşene sahiptir. Ancak, ileri yön bileşeni en etkin bileşen olarak sekonderde indüklenen akımlarla etkileşmesi

sonucu faydalı kuvvet oluşmasına neden olmaktadır. Ayrıca döner hareketli motorlardan farklı olarak LAM lar sekonderi sabit primeri hareketli ya da primeri sabit sekonderi hareketli olabilir.

Primer ve sokonder arasındaki uzunluk farkına bağlı olarak şekil 2. 2 de görüldüğü gibi bir LAM kısa primerli veya şekil 2. 3 de görüldüğü gibi kısa sekonderli olabilir. Ayrıca şekil 2. 4 de ki çift yanlı bir LAM oluşturmak için karşı karşıya duran iki primer gerekmektedir. Şekil 2. 3 deki gibi eğer LAM ' ın tek bir primeri varsa buna tek yanlı LAM denir.



Şekil 2. 2. Kısa primerli LAM



Şekil 2. 3. Kısa sekonderli LAM

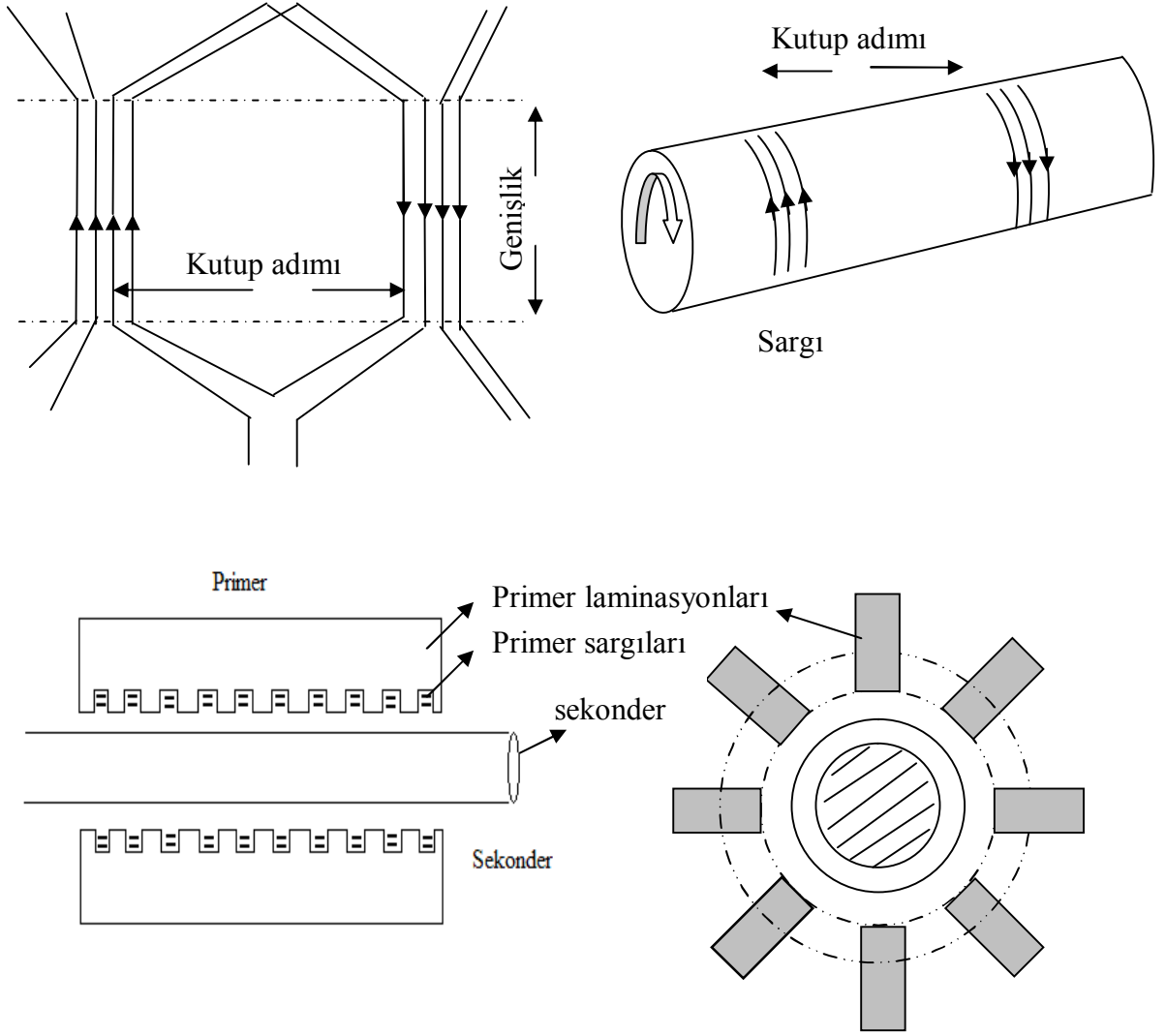
Bir LAM 'ın sekonderi bazen ferromanyetik bir malzeme olan demirle (arka demiri) alüminyum veya bakır gibi bir tabakanın yan yana getirilmesi ile oluşturulur. Ayrıca sekonder bilinen kafes türlerinden de olmaktadır. Ancak sargılı tip hemen hemen hiç kullanılmamaktadır.

Döner motorlarda olduğu gibi bir lineer asenkron motoru üç fazlı, iki fazlı veya tek fazlı yapılabilir. Tek fazlı bir LAM 'ın kalkış mekanizması, döner hareketli tek fazlı asenkron motorda olduğu gibidir. Bu bakımdan, tek fazlı bir LAM gölge kutuplu veya kondansatör de içeren yardımcı bir sargıya sahip olabilmektedir.

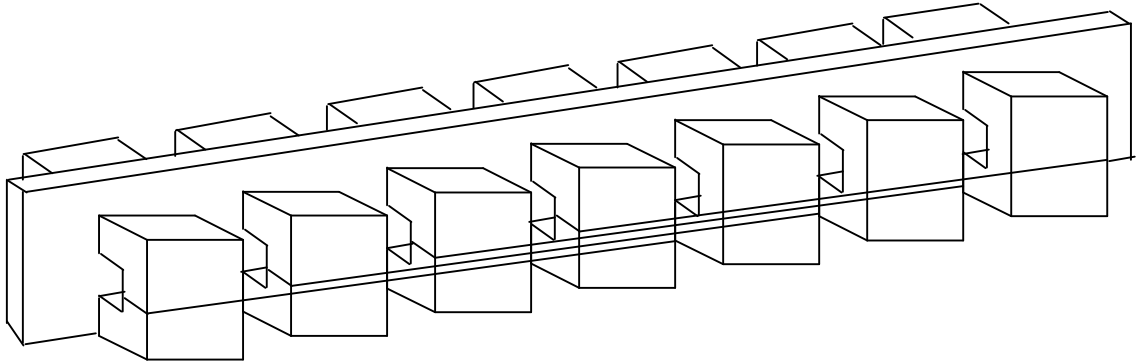
LAM'lar döner asenkron motorların kesilmesi açılması ve daha sonra düzlemsel hale getirilmesi sonucu elde edildikleri için düzlemsel LAM adını almaktadır. Şekil 2. 4 de tipik bir primer sargı görülmektedir. Kutup adımı lineer motorun genişliği ile karşılaştırıldığında büyük ise primer sargının omik direnci ve kaçak reaktansı uzun sargı uçlarından dolayı artar; etkin sargı uç direncide artar. Bundan dolayı motor doğal olarak verimsiz olacaktır. Bazı uygulamalar için lineer motorun enine yönde tekrar yuvarlanması ile ilginç bir topoloji geliştirilebilir. Genişlik şekil 2. 4 de görüldüğü gibi çember şeklini alacak şekilde yuvarlanmıştır. Böyle bir motor tüp tipi lineer asenkron motor olarak adlandırılır. Şimdi primer sargılarının sürekliliğinin sürdürülmesi için uç sargılarının gerekli olmadığı hemen anlaşılacaktır. İletkenlerin kendileri kesintili sargıların oluşturulması için yuvarlanabilir. Motor hala doğrusaldır çünkü serbestlik derecesi çevrimsel hareketlidir.

Düzlemsel LAM' lar ve silindirik LAM' lar çekirdekdeki manyetik akının hareket yönünde bulunduğu motor sınıfına girmektedir. Bu tür motorlara ayrıca boyuna akılı motorda denilmektedir. Elektromanyetik devreler üzerinde değişiklik yapılarak çekirdekdeki manyetik akı hareket yönüne dik bir düzlemde bulunan motorlara enine akılı motorları ( TFLAM ) denilmektedir. Şekil 2. 5 de enine akılı motorun şeması ve şekil 2. 6 da topolojik olarak lineer motorların sınıflandırma şeması verilmektedir [1,3].

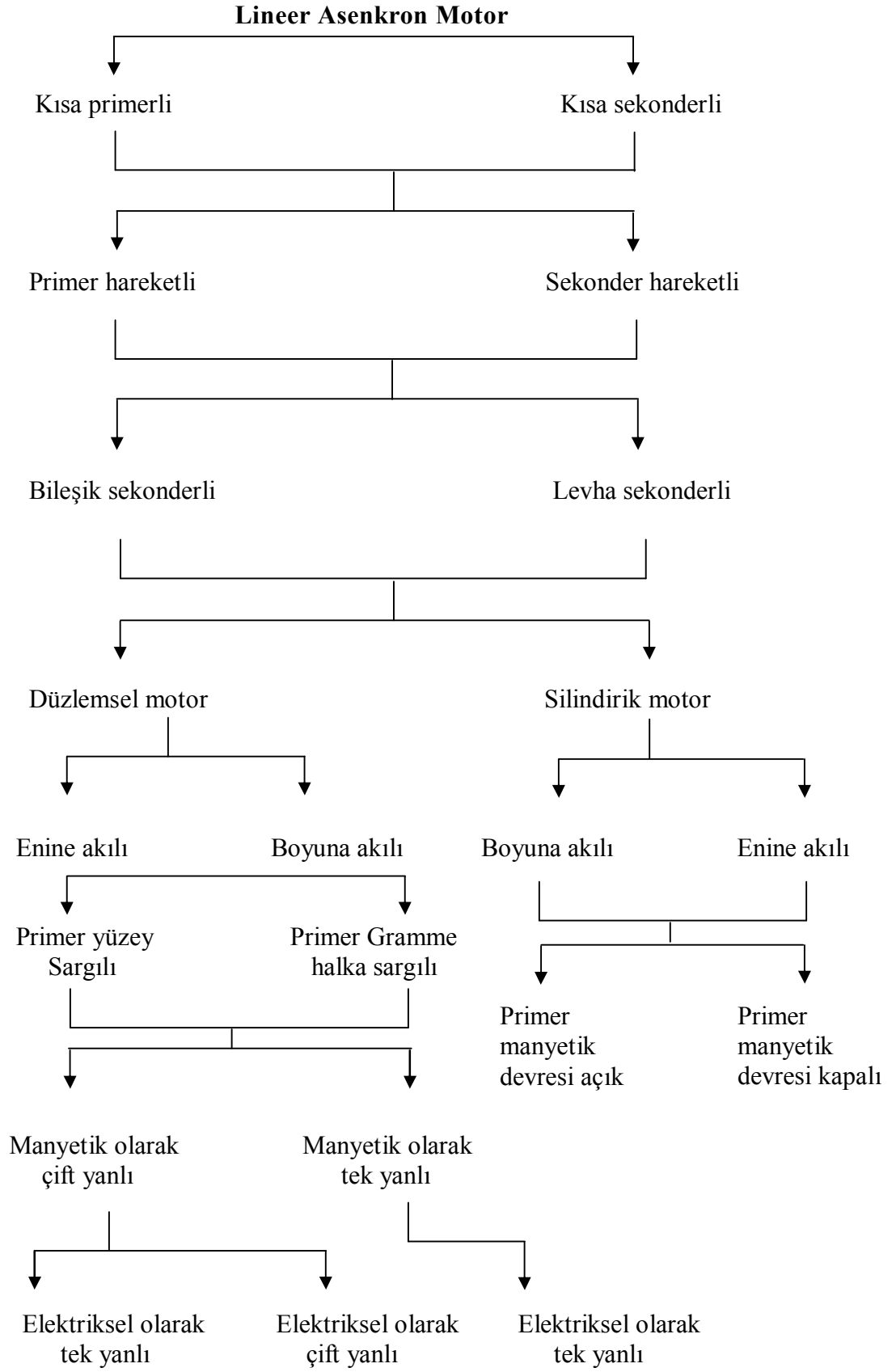




**Şekil 2. 4.** Tüp tipi lineer asenkron motor



**Şekil 2. 5.** Çift yanlı C - çekirdekli ve sargıları dağıtılmış bir TFLAM.



**Şekil 2. 6.** LAM' lerin sınıflandırılması

## 2. 5. Lineer Asenkron Motorların Modellenmesi

Lineer asenkron motorları döner hareket yapan eşdeğerlerinden farklı kılan manyetik devrelerindeki topolojik değişimler sonucu meydana gelen elektromanyetik olaylardır. Bu elektromanyetik olaylar; motor performansını olumsuz yönde etkileyen uç etkilerini doğurur. Bu bakımdan makinayı modellerken, bu olumsuz yöndeki etkileri de göz önünde bulundurmak için daha önce kullanılan analiz metotlarının değiştirilmesi veya yeni metotların geliştirilmesi gerekir [1].

Şimdiye kadar yapılan çalışmalarda lineer asenkron motorları modellemek için kullanılan doğrudan manyetik alan metotları, Fourier metotları, sonlu elemanlar metodu ve sınır elemanları metodudur. Bu konuda yapılan bütün araştırmalar, motorun primeri ile sekonderi arasında hava aralığı manyetik alan denklemlerinin kurulması ve çözümüne dayanmaktadır. Bu manyetik alan denklemleri, A manyetik vektör potansiyeli terimleri cinsinden, sabit bir referansa göre, belli bir bağıl hızla hareket eden bir motorun genel bir bölgesi için kurulan 3 boyutlu Maxwell denklemlerinden türetilmektedir [1,4].

$$\nabla_x \frac{1}{\mu} \nabla \cdot \bar{A} = -\sigma \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} - (\bar{v} \cdot \nabla) \bar{A} \sigma + \bar{J}_s \quad (2.1)$$

Çözümün daha basit olması açısından motorun elektromanyetik devre özellikleri göz önünde bulundurularak yapılan varsayımlarla çeşitli ihmaller yapılarak yukarıdaki üç boyutlu denklemler türetilmektedir. Daha sonra, elde edilen denklemler ya doğrudan ya da bilinen nümerik metotlardan sonlu elemanlar metodu veya sınır elemanları metodu kullanılmaktadır [1,4].

Bu metotlara ilişkin çeşitli akım frekans ve hız değerlerinde performans hesaplarının yapılabilmesi için genellikle, döner elektrik makinalarında olduğu gibi elektriksel eşdeğer devre modelleri kullanılmaktadır. Bu eşdeğer devre modelleri elde edilirken genelde yukarıda verilen manyetik alan denkleminin çözüm sonuçlarından yararlanılmaktadır. Ancak bu eşdeğer devre modelleri, döner asenkron motorlara benzer boşta çalışma ve tutulmuş rotor deneysel sonuçlarından da elde edilmektedir [1].

Lineer asenkron motorun sonlu yapısından dolayı motor performansına olumsuz yönde etki eden ve döner motor eşdeğerlerinden farklı kılan uç etkileri göz önünde bulundurulmalıdır. Ayrıca bu etkiler nedeniyle motor için kullanılan eşdeğer devre modelindeki parametrelerin hıza ve frekansa göre değişimi dikkate alınmalıdır.

## 2. 6. Lineer Asenkron Motorun Hız Kontrolü

Günümüzde hızlı elektronik güç anahtarları ve mikro işlemci / mikro denetleyicilerin ( Transputer, vektör işlemcileri, DSP vs) elektrik motorlarının sürülmesi ve kontrolünde kullanılan inverter gibi sürücü sistemlerinin gelişmesinde ve endüstride çok kullanılmasında büyük rol oynamaktadır. Elektrik motorlarında sürücü sistem olarak kullanılan inverterler, kontrol algoritmasına bağlı olarak motora giriş geriliminin genliğinde ve frekansında değişiklik yaparak arzu edilen şekilde enerji transferi yapan güç üniteleridir. Bu sürücü sistemleri sayesinde elektrik motorunun nominal çalışma aralığında arzu edilen hızda belli bir yükü beslemesi durumundaki performansı artmaktadır [1,5].

Endüstride asenkron motorlar için en yaygın olarak kullanılan metotlar skalar kontrol ( V / f kontrol ) ve vektör kontrolüdür (alan yönlendirmeli). Skalar kontrolde motor hızının yüke ve gerilim düşmelerine bağlı olarak değişmesi; motor besleme frekansının büyük oranda değişmesi sırasında sistemin kararsız çalışma konumuna geçebilmesi, küçük hızlarda moment titreşimlerinin ve moment kayıplarının ortaya çıkması gibi bazı dezavantajlar, skalar kontrol performansının vektör kontrolüne göre daha düşük olmasına neden olmaktadır. Ancak skalar kontrolde güç elektroniği ve kontrol devreleri basit ve maliyeti düşük olmaktadır. Vektör kontrolde ise küçük hızlarda kararlı çalışabilmesi moment kaybının olmaması, momentin titreşimsiz olması ani yük değişimlerinden ve gerilim düşümlerinden çıkış hızının etkilenmemesi gibi bazı avantajlar vektör kontrolünün tercih edilmesine sebep olmaktadır. Oysa vektör kontrol algoritması skalar kontrol algoritmasına göre daha karmaşıktır.

Genel olarak üç fazlı asenkron motorlarda stator ve rotor manyetik alan uzay vektörlerinin yönleri arasındaki açı çalışma koşullarına göre değiştiğinden bu iki vektör arasındaki etkileşim nedeniyle moment kontrolü DC makinalardaki gibi doğrudan yapılmamaktadır. Ancak asenkron motorun rotor sargısının manyetik alanı DC motordaki alan sargısının manyetik alanına benzetilebilir. Bunun için motora ilişkin denklemler senkron hızda dönen d q eksen takımında kurularak d eksenini rotor manyetik alan vektörü ile çakıştırılacak olursa, seçilen referans çatıdaki rotor manyetik alan vektörünün q bileşeni sıfır olacaktır. Bu durumda motorda üretilen moment DC motordakine benzer rotor manyetik alanının d bileşeni ile stator akımının q bileşeninin çarpımı ile doğru orantılı olacaktır. Bunun sonucu olarak DC

motordaki gibi üretilen moment bağımsız bir şekilde, rotor manyetik alanının d bileşeni sabit tutularak ve stator akımının q bileşeni ayarlanarak kontrol edilmektedir. Asenkron motorların kontrolü için kullanılan kontrol metotlarından biriside yukarda anlatıldığı gibi Alan Yönlendirmeli Kontrol metodudur. Bu metoda ayrıca Vektör Kontrol Metodu da denilmektedir [1,4,5].

Vektör kontrolü, dolaylı ve doğrudan kontrol diye iki alt sınıfa ayrılmaktır. Bunlardan dolaylı vektör kontrol metodunda, hava aralığı manyetik alan vektörü dolaylı bir şekilde motor hızından hesaplanan kayma frekansı ve motor parametreleri yardımıyla bulunmaktadır. Motor parametrelerinin sıcaklık, manyetik doyma ve lineer motor söz konusu ise uç etkilerinden dolayı hız ve frekansa bağlı değişmesi bu kontrol metodunu zorlaştırmaktadır. Oysa lineer asenkron motora ilişkin bu etkiler göz önünde bulundurularak motora ilişkin uygun bir model ortaya konulacak olursa dolaylı vektör kontrol metodunu uygulamak mümkün olacaktır. Yapılan bazı araştırmalar lineer asenkron motorun uç etkiler nedeniyle mıknatıslanma indüktansının hıza göre değişimi bir dengeleme faktörü ile göz önünde bulundurularak dolaylı vektör kontrolü yapılmıştır. Doğrudan vektör kontrol metodunda ise hava aralığındaki manyetik alanı algılayıcılar yardımıyla doğrudan ölçülmektedir [1].

Lineer hareketi mekaniksel temas olmaksızın üretmeleri, lineer asenkron motorların son zamanlarda birçok alanda değişken hız sistemi olarak kullanılmalarını cazip hale getirmiştir. Bu metotların kontrolü için yapılan araştırmalarda daha çok vektör kontrol metotları kullanılmıştır. Bu motorlarda vektör kontrolünü uygulayabilmek için, döner asenkron motorun eşdeğer devre modeline benzer ve hava aralığındaki elektro manyetik alan denkleminin çözümünden yararlanarak uyarlanan bazı devre modelleri kullanılmıştır. Bazı araştırmacılar düşük hızlı lineer asenkron motorlarda uç etkileri ihmal edilerek, bu motorların kontrolü için döner makinaların modellerini kullanmışlardır [1]. Ancak yüksek hızlı motorlarda uç etkileri, düşük kayma bölgesinde motorun hava aralığı manyetik alanı üzerinde olumsuz yönde büyük ölçüde etki yaptıkları ve bunun sonucu olarak motorun güç faktörünü ve verimini önemli derecede düşürdüğü için göz önünde bulundurulmaları gerekir.

## 2. 7. Linear Asenkron Motorda Elektromanyetik Alanlar ve Kuvvetler

Linear asenkron motorların primeri ve sekonderi arasındaki hava aralığının geniş olması ve manyetik devrelerinin açık olması sebebi ile döner asenkron motorlardan farklı özelliklere sahiptir. Fakat manyetik denklemlerinin oluşumu döner motorlarınkine benzeyen yapıya sahiptir.

## 2. 8. LAM' ların Elektromanyetik etkileri

Linear asenkron motorun primer sargılarının oluşturduğu MMF' lerinin etkisiyle senkron lineer hareketin ifadesi

$$v_s = 2 \frac{\tau}{T} = 2 f \tau = \omega \frac{\tau}{\pi} \quad (2. 2)$$

Burada  $\tau$  = kutup adımı  $f = 1/ T$  giriş frekansı  $\omega = 2\pi f$  kaynak açısal frekansıdır. Senkron hız LAM larda primer akımının frekansına ve kutup adımının değerine bağlı olarak değişir [6].

LAM ların sekonder parçası x eksenine yönündeki lineer hızı senkron hızdan ( $v < v_s$ ) düşük olup kayma ifadesi:

$$s = \frac{v_s - v}{v_s} \quad (2. 3)$$

ile hesaplanır.

Primer hattı akım yoğunluğunun ifadesi

$$J = \frac{m_1 \cdot N_1 \cdot I_1 \cdot \sqrt{2}}{\tau \cdot P} \quad (2. 4)$$

ile hesaplanır.

Burada  $m_1$  primer faz sayısı  $I_1$ : giriş akımı  $N_1$ : her fazın primer sarım sayısı  $p$ : kutup sayısını ifade eder.

Primerde üretilip hava aralığından sekondere geçen elektromanyetik güç ifadesi:

$$P_{elm} = P_m + \Delta P_2 = F \cdot v_s \quad (2. 5)$$

Burada  $P_m$  mekanik gücü  $\Delta P_2$  sekonder sargı kaybı  $F$  elektro manyetik kuvveti temsil eder.

Linear asenkron motorlarda mekanik güç ifadesi

$$P_m = P_{out} + \Delta P_m = F \cdot v \quad (2.6)$$

Burada  $P_{out}$ : çıkış gücü ,  $\Delta P_m$ : mekanik sürtünme kayıplarıdır.

Lineer asenkron motorlardaki Lineer itme kuvveti  $F_x$  ile elektro manyetik kuvvet  $F$  arasında

$$F = F_x + \Delta F_m = P_{out} / v + \Delta P_m / v \quad (2.7)$$

Bağıntısı yazılır. Burada  $\Delta F_m$  mekanik kayıp güç tür.

Elektro manyetik kuvvetin kaymaya bağımlı durağan olmayan ifadesi:

$$F = \frac{2F_{max}}{Scr/S + S/Scr} \quad (2.8)$$

Burada  $Scr$  döner indüksiyon motorlarda kalkış torkundan maximum  $F_{max}$  kuvvetine geçişinin kritik kayma değeridir. [6]

Lineer hızın temel denklemleri

$$v = 2f\tau \left\{ 1 - Scr \left[ \frac{F_{max}}{F} - \sqrt{\left(\frac{F_{max}}{F}\right)^2 - 1} \right] \right\} \quad (2.9)$$

LAM ' da geniş kutup adımları sabit kuvvet ve sabit giriş frekanslarında yüksek  $F_{max}$  ve yüksek hızların oluşmasına sebep olurlar. Giriş primer sarım EMF indüklenen gerilimi döner indüksiyon motorlarındaki ile aynı bağıntıdan hesaplanır [6].

$$E_1 = 4\delta_f \cdot f \cdot N_1 \cdot K\omega_1 \cdot \Phi \quad (2.10)$$

Burada ana akı  $\Phi = \alpha_i \cdot \tau \cdot Li \cdot Bmz$  dir.  $\delta_f = E_1 / E_{1av}$

Primer EMF form faktörü  $\alpha_i = Bav / Bmz$  hava aralığının normal komponent ortalama akı yoğunluğu oranıdır.

Sekonderde indüklenen EMK nin herhangi bir kayma değeri için

$$SE_2' = \frac{N_1 K\omega_1}{N_2 \cdot K\omega_2} \cdot SE_2 = 2 \cdot N_1 K\omega_1 \cdot SE_2 = SE_1 \quad (2.11)$$

ile ifade edilir. [6]

Primer sargılarla indüklenen sekonder akımı

$$I_2' = \frac{SE_2}{Ktr \cdot |Z_{2(S)}|} = \frac{E_2'}{|Z_{2(S)}| / S} = \frac{E_1}{\sqrt{[R_{2(S)}' / S]^2 + [X_{2(S)}' / S]^2}} \quad (2. 12)$$

Burada  $E_2' = E_1$  ve primer sistemden sekonder sisteme geçen güç kaybı ve sekonder empedans değeri:

$$Z_{2(S)}' = R_{2(S)}' + jX_{2(S)}' = Ktr \cdot Z_{2(S)} \quad (2. 13)$$

Sekonderin aktif kayıp gücü:

$$\Delta P_2 = m_2 \cdot I_2'^2 \cdot R_{2(S)}' = m_1 \cdot (I_2')^2 \cdot R_{2(S)}' \quad (2. 14)$$

(2. 5) bağıntısından yararlanılarak hava aralığından geçen elektro manyetik güç ifadesi

$$P_{elm} = m_1 \cdot (I_2')^2 \cdot \frac{R_{2(S)}'}{S} = \frac{\Delta P_2}{S} \quad (2. 15)$$

Mekanik gücün kayma ve sekonder kayıp güç cinsinden ifadesi:

$$P_m = \frac{1-s}{s} \cdot \Delta P_2 \quad (2. 16)$$

olarak yazılır.

İtme kuvveti  $F_x$  eşitlik (2. 7) kullanılarak bulunabilir. LAM ' lar da ferro-manyetik çekirdeğin sekonderde oluşturduğu normal kuvvet

$$F_z = F_{za} - F_{zr} \quad (2. 17)$$

Burada

$$F_{za} = B^2 \frac{A}{4\mu_0} \quad , \quad F_{zr} = \frac{Bmx}{Bmz} \cdot (F_x + \Delta F_m) \text{ ve } A \text{ primer çekirdeğin aktif}$$

yüzey genişliğidir.  $F_{za}$  terimi primer ve sekonder ferro manyetik çekirdek arasındaki çekme kuvvetini oluşturur.  $F_{zr}$  terimi primer manyetik alanın sekonderde indüklediği eddy akımlarının oluşturduğu elektro dinamik kuvveti ifade eder [6].

LAM ' larada sekonderi ferromanyetik olmayan motorlar için:

$$F_z = -F_{zr} = -\frac{Bmx}{Bmz} \cdot (F_x + \Delta F_m) \quad (2. 18)$$

ile hesaplanır.

Giriş aktif güç ifadesi:

$$P_{in} = m_1 V_1 I_1 \cos \Phi \quad \text{dir.} \quad (2. 19)$$



Burada  $V_1$  ve  $I_1$  giriş faz gerilimi ve faz akımı  $\Phi$  ise  $V_1$  ve  $I_1$  arasındaki faz açısıdır.

Verim ise

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{Fx.v}{m_1.V_1..I_1.Cos\Phi} \quad (2.20)$$

ile hesaplanır.

$$\text{Burada } \eta.Cos\Phi = \frac{Fx.v}{m_1.V_1..I_1} \text{ ile LAM' lar için verim x faz açısı değeri bulunur.}$$

Bu değer LAM' larda maksimum 0,5 i geçemez, oysa bu değer döner asenkron motorlarda 0,8 civarındadır. LAM' lar için dezavantaj gibi görülen bu değer LAM' ların büyük hava aralıkları ile çalışmasının bir sonucudur [6].

## 2. 9. Elektro Manyetik Alan Eşitlikleri

LAM' larda primer ve sekonderin yeterince uzun kabul edilmesi durumunda elektromanyetik alan dağılımı döner motorların özellikleri ile benzerdir. LAM 'larda x yönünde  $v$  hızı ile hareket eden; sekonderin  $i = k$  gibi katmanlara ayrılarak incelenmesi büyük kolaylıklar sağlar. Öyle ki bütün katmanların lineer ve izotropik olması neticesinde elektro manyetik alanın iletken olmayan hava aralığındaki çözümü LAM' lar için Laplace 's eşitliği ile

$$\frac{\partial^2_{mvi}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2_{mvi}}{\partial z^2} = 0 \quad (2. 21)$$

Ve iletken tabakalar için Helmholtz's eşitliği

$$\frac{\partial^2_{mvi}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2_{mvi}}{\partial z^2} = \alpha_{vi}^2 .F_{mvi} \quad (2. 22)$$

ile çözülür.

Burada kaymanın bir fonksiyonu olan  $\alpha_{vi}$  konstant değeri hareketin + x yönünde olduğu ileri yönlü hareketli manyetik alanlar için:

$$\alpha_{vi} = \alpha_{vi}^+ = \sqrt{(j\omega_{vi}^+ .\mu_i .\delta_i)} = (aR_i + jax_i).\sqrt{1-v(1-s)}.k_i \quad (2. 23)$$

$\alpha_{vi}$  konstant değeri hareketin - x yönünde olduğu ileri yönlü hareketli manyetik alanlar için:

$$\alpha_{vi} = \alpha_{vi}^- = \sqrt{(j\omega_{vi}^- \cdot \mu_i \cdot \delta_i)} = (aR_i + jax_i) \cdot \sqrt{1 + v(1-s)} \cdot k_i \quad (2.24)$$

Kayma değeri s=1 olması halindeki katmanın i. harmonik değeri için  $k_i$  değeri:

$$k_i = \sqrt{0,5\omega\mu_0\mu_{ri}\sigma_i} \quad (2.25)$$

Ve sekonder akımının açısal frekansı

$$\omega_{vi} = 2\pi f [1 \pm v(1-s)] = \omega [1 \pm v(1-s)] \quad (2.26)$$

Ferromanyetik olmayan tabakaların manyetik geçirgenlik değeri

$$\mu_i = \mu_0 \mu_{ri} \quad (2.27)$$

ile hesaplanır

Burada "i".ci tabakanın bağıl geçirgenliği  $\mu_{ri}$  olup ( $\mu_{ri} \approx 1$ ) ve  $aR_i = aX_i = 1$  dir.

Ferromanyetik olmayan tabakaların manyetik geçirgenliğinin karmaşık sayılarla ifadesi

$$\mu_i = \mu_0 \cdot \mu_{rsi} \cdot (\mu' - \mu'') \quad (2.28)$$

Burada  $\mu_{rsi}$  ferromanyetik tabakaların bağıl yüzey manyetik geçirgenliğidir.  $\mu' \cdot \mu''$  histerezis kayıplarının ve ferromanyetik tabakaların orta kısımlarının lineer olmayan karmaşık manyetik geçirgenliğinin ifadesidir.

Akım normalde z yönünde akmaz bu sebeple  $E_{mzvi} = 0$  ve  $H_{myvi} = 0$  dir. Bunun anlamı alan dağılımının iki boyutlu  $H_{mxvi}$ ,  $H_{mzvi}$  ve  $E_{myvi}$  eksenel değerlere sahip olmasıdır.

İleri yönde hareket eden alanlar için:

$$F_{mvi}^+(x, z, t) = \sum_{v=1}^{\infty} C_{1vi} \exp[j(\omega_{vi}^+ t - \beta_v x)] [C_{3v} \exp(-k^+_{vi} z) + C_{4vi} \cdot \exp(k^+_{vi} z)] \quad (2.29)$$

Geri yönde hareket eden alan için:

$$F_{mvi}^-(x, z, t) = \sum_{v=1}^{\infty} C_{1vi} \exp[j(\omega_{vi}^- t - \beta_v x)] [C_{3v} \exp(-k^-_{vi} z) + C_{4vi} \cdot \exp(k^-_{vi} z)] \quad (2.30)$$

$\alpha_{vi}$ ,  $k_{vi}$  katsayıları ve

$$\beta_v = v \cdot \frac{\pi}{\tau} \quad (2.31)$$

İfadesi ile bağlantılıdır.

$$k_{vi} = \sqrt{(\alpha_{vi}^2 + \beta_{vi}^2)} = (aR_{vi} + jax_{vi}) k_{vi} \quad (2.32)$$

Öyleki:

$$aR_{vi} = \Re[k_{vi}] / k_{vi} \quad ; \quad ax_{vi} = \Im[k_{vi}] / k_{vi} \quad ; \quad (2.33)$$

ve

$$k_{vi} = \sqrt{1 \pm v(1-s)} k_i \quad (2.34)$$

Manyetik ve elektrik akı yoğunluğu için 2. 21 ve 2. 22 eşitlikleri bölgesel çözümdür; bu sebeple bütün tabakaların primer çekirdekten geçen aktif yüzey hat akımı dağılımının çözümü için

$$a(x,t) = \sum_{v=1}^{\infty} \left\{ A_{mv}^+ \exp[j(\omega s_v^+ t - \beta_v x)] + A_{mv}^- \exp[j(\omega s_v^- t + \beta_{vx})] \right\} \quad (2.35)$$

Normal yüzeylerin hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğunun dağılım ifadesi:

$$b(x,t) = \sum_{v=1}^{\infty} \left\{ B_{mzv}^+ \exp[j(\omega s_v^+ t - \beta_v x)] + B_{mzv}^- \exp[j(\omega s_v^- t + \beta_{vx})] \right\} \quad (2.36)$$

Burada ileri yönde hareket eden alan için

$$S_v^+ = 1 - v(1-s) \quad (2.37)$$

Geri yönde hareket eden alan için

$$S_v^- = 1 + v(1-s) \quad (2.38)$$

Eşitlik (2. 35) ve (2. 36) daki  $A_{mv}^+$  ve  $B_{mzv}^+$  sembolleri ileri yönde hareket eden manyetik akı yoğunluğunun hat akımı tepe değerleri ne ait büyüklüklerdir. Aynı sembollerin ( - ) değerleri geri yönde hareket eden alanlar içinde geçerlidir.

Aşağıda hat akımı hat akımı yoğunluğu, manyetik akı yoğunluğu ve MMF için kompleks büyüklüklerin ifadesi belirtilmiştir.

$$A_{mv}^+ = \frac{v\pi}{2\tau} \Theta_{mv} \exp \left\{ j \left[ (v-1) \frac{m_1 - 1}{m_1} \pi - \frac{\pi}{2} \right] \right\} \quad (2.39)$$

$$A_{mv}^- = \frac{v\pi}{2\tau} \Theta_{mv} \exp \left\{ -j \left[ (v+1) \frac{m_1 - 1}{m_1} \pi - \frac{\pi}{2} \right] \right\} \quad (2.40)$$

$$B_{mzv}^+ = 0,5 B_{mzv} \exp \left[ j(v-1) \frac{m_1 - 1}{m_1} \pi \right] \quad (2.41)$$

$$B_{mzv}^- = 0,5 B_{mzv} \exp \left[ -j(v+1) \frac{m_1 - 1}{m_1} \pi \right] \quad (2.42)$$

$$\Theta_{mv}^+ = 0,5\Theta_{mv} \exp\left[j(v-1)\frac{m_1-1}{m_1}\pi\right] \quad (2.43)$$

$$\Theta_{mv}^- = 0,5\Theta_{mv} \exp\left[-j(v+1)\frac{m_1-1}{m_1}\pi\right] \quad (2.44)$$

MMF' nin  $v$ -th harmoniğinin tepe değeri:

$$\Theta_{mv} = \frac{2\sqrt{2}m_1}{\pi} \frac{1}{p} \frac{1}{v} N_1 k_{\omega 1v} I_1 = m_1 [\Theta_{mv}]_{m1=1} \quad (2.45)$$

Manyetik akı yoğunluğu için  $v$ -th harmoniğinin tepe değeri:

$$B_{mzv} = \Theta_{mv} \frac{\mu_0}{2g_t k_c k_{sat}} \quad (2.46)$$

Burada  $k_{\omega 1v} = v$ . harmonik için sarım faktörü,  $g_t$  = ferro manyetik çekirdek arasındaki toplam hava aralığı,  $k_c$  = karter faktörü,  $k_{sat}$  = manyetik devrenin doyum faktörüdür.  $v$ . harmonik için bu eşitlikler kesin ve doğru sonuçlar verir; örnek olarak üç fazlı sistemler için uygundur [6].

$v = 2km_1 + 1$ , için burada  $k=1,2,3,\dots$

$$\Theta_{mv}^+ = \frac{3}{2} [\Theta_{mv}]_{m1=1} \quad (2.47)$$

$v = 2km_1 - 1$ , için burada  $k=1,2,3,\dots$

$$\Theta_{mv}^- = \frac{3}{2} [\Theta_{mv}]_{m1=1} \quad (2.48)$$

Eğer (2. 35) ve (2. 36) bağıntılarında hat akımı ve manyetik akı yoğunluğu biliniyorsa tanjansiyel ve normal tabakaların eşitlikleri yazılabilir elektro manyetik alan dağılımının eşitlikleri trigonometrik seriler yardımıyla çözülür. İlk tabaka için ( $i = 1$  için)

$$C_{1v1} \cdot C_{4v1} = C_{2v1} C_{4v1} = 0 \quad (2.49)$$

$$\delta_i = \frac{1}{k_i} \quad (2.50)$$

Maxwellin Stres Tensor denklemlerinin kullanılmasıyla aktif sekonder yüzeyinin her bölgesinin kuvveti kolayca bulunabilir LAM ' lar için kuvvetin  $N/m^2$  olması durumunda eşitliklerin son hali

x yönü için:

$$f_x = -0,5 \cdot \mu_0 \sum_{v=1}^{\infty} \Re e [H_{mzvi} \cdot H_{mxvi}^*] \quad (2. 51)$$

y yönü için:

$$f_y = 0,5 \cdot \mu_0 \sum_{v=1}^{\infty} \Re e [H_{mzvi} \cdot H_{myvi}^*] \quad (2. 52)$$

z yönü için:

$$f_z = 0,5 \cdot \mu_0 \sum_{v=1}^{\infty} \Re e [0,5H_{mzvi} \cdot H_{mzvi}^* - 0,5H_{mxvi} \cdot H_{mxvi}^* - 0,5H_{myvi} \cdot H_{myvi}^*] \quad (2. 53)$$

Burada  $H_{mxvi}$ ,  $H_{myvi}$ ,  $H_{mzvi}$  sekonder aktif yüzey için alan dağılımının manyetik bileşenleridir ve  $H_{mxvi}^*$ ,  $H_{myvi}^*$ ,  $H_{mzvi}^*$  değerleri de bunlara ait bağlı değerlerdir.

Silindirik (tabular) LAM' ların çözüm ve analizi dairesel koordinatlar sistemine göre (  $r, \theta, x$  ) yapılır [6].

Eksen el simetri eşitliği:

Eşitlik (2. 21) e geçiş yapılırsa

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial F_{mvi}}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 F_{mvi}}{\partial x^2} = 0 \quad (2. 54)$$

Eksen el simetri eşitliği: Eşitlik (2. 22) e geçiş yapılırsa

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial F_{mvi}}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 F_{mvi}}{\partial x^2} = \alpha^2_{vi} \cdot F_{mvi} \quad (2. 55)$$

Şeklinde yazılır.

Silindirik koordinatların iki alan ölçüsü  $H_{mrvi}$ ,  $H_{mzvi}$  ve  $H_{m\theta vi}$  bileşenleridir.

Bu motorlar için diğer eksenler hariç; İdeal eksen el simetri ile sadece x yönündeki itme kuvvetinin ifadesi: eşitlik (2. 51) ile bağdaştırılır ise;

$$f_x = -0,5 \cdot \mu_0 \sum_{v=1}^{\infty} \Re e [H_{mrvi} \cdot H_{mxvi}^*] \quad (2. 56)$$

Olarak yazılır.

## 2. 10. Lineer Asenkron Motorun Performansının Analizi

Lineer asenkron motorun performansının analizinde çok sayıda teknik makaleler ve kitaplar yayınlanmıştır fakat şimdi bile lineer asenkron motorun performansının tamamen anlaşıldığı veya açıklanabildiği söylenemez. Lineer asenkron motorun topolojisi oldukça karmaşıktır ve sonuç olarak teorik analizi çok zordur. Yaygın olarak kullanılan kısa primerli, tek kenarlı lineer asenkron motoru şekli 2. 7 de görülmektedir. Primer, sekonder iletken levha ve arka demirinin genişlikleri farklı olarak gösterilmiştir. Daha da ötesi primer sekonderin orta çizgisine göre dengededir. Üç fazlı akım ve gerilimlerle primer sargıları uyarıldığında iletken levhada akımlar indüklenir ve lineer motorda üç eksenli kuvvetler üretilir. Her yöndeki simetrikliğin eksikliğinden dolayı hava aralığındaki elektro manyetik alanlar sadece kompleks üç boyutlu vektör potansiyel problemi ile tanımlanabilir. Bundan dolayı problem 1, 2 ve 3 boyutlu alan çözümlerinin elde edilme teşebbüsü ile muhtelif araştırmacılar tarafından sadeleştirilmiştir [1,5].

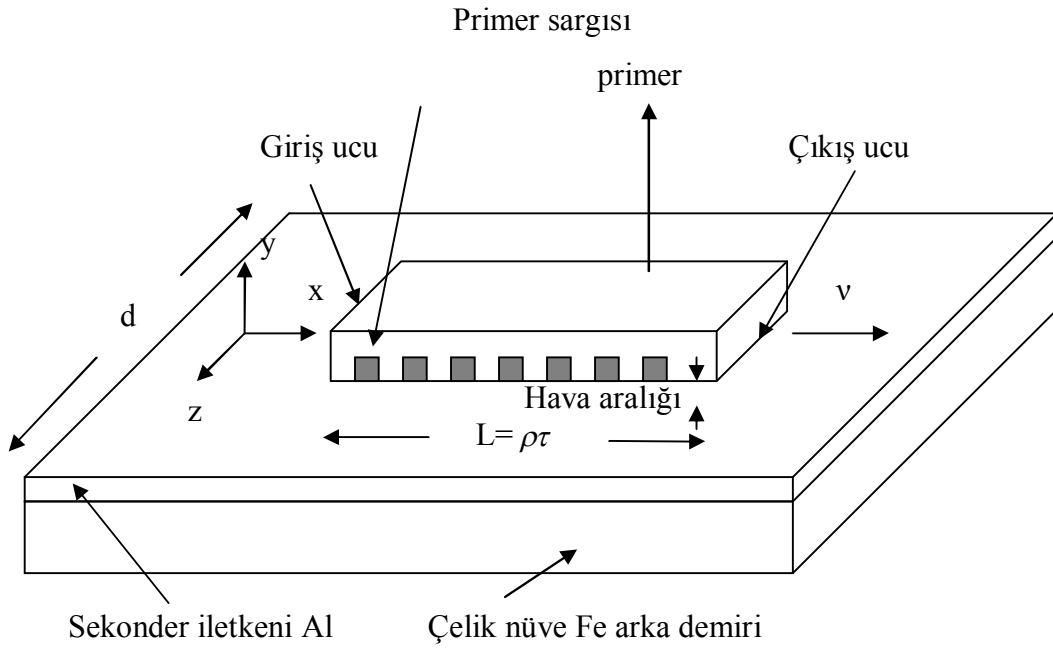
Adından da anlaşıldığı gibi bir boyutlu analizde bütün miktarların sadece bir uzaysal değişkenin fonksiyonları olduğu varsayılmıştır. Örneğin lineer asenkron motorun böyle bir analizinde primer akımın ( $i_1$ ) aşağıdaki gibi  $x'$  in bir fonksiyonu ve sadece  $z$  bileşenine sahip olduğu dikkate alınır.

$$i_{1z} = f(x), 0 \leq x \leq L$$

sekonder akımı  $i_{2z}$  ve akı yoğunluğu  $B_y$  gibi diğer miktarlarda sadece uzaysal değişken  $x'$  in fonksiyonlarıdır. İki boyutlu analizde bütün miktarların iki uzaysal değişkenin fonksiyonları olduğu düşünülür. Örneğin hava aralığı akı yoğunluğu  $B_y$  ve sekonder levhasındaki akımın  $z$  bileşeni  $x$  ve  $y$  uzaysal değişkenlerinin bir fonksiyonudur. Üç boyutlu analizde bütün miktarlar  $x$ ,  $y$  ve  $z'$  nin fonksiyonlarıdır.

Bir boyutlu analiz oldukça basittir fakat lineer asenkron motorun karakteristiklerinin bütün yönleri yeteri kadar modellenmemesine rağmen temel lineer asenkron motor parametrelerinin açık ve belirgin fonksiyonları şeklinde kapalı biçimde çözümler sağlar. Bundan dolayı bu çözümler uç etkilerinin temel yönlerinin anlaşılmasının sağlanmasına çok yardımcı olur. İki ve üç boyutlu analizde lineer asenkron motorun performansının tahmin edilmesinde daha doğru sonuçlar elde edilir. Üç boyutlu çözümler hem uç etkisi hem de kenar etkisinin modellenmesinde gerekir.

Bazı araştırmacılar lineer asenkron motorun analizi için klasik devre yaklaşımını kullanmışlar, bazılarıda lineer asenkron motorun performansının tahmin edilmesi için elektromanyetik alan analizi metotlarını kullanmışlardır. Sabit akımla beslenen lineer asenkron motorun performans karakteristikleri bu araştırmacıların çalışmalarının tabanında tartişılarak açıklamaya çalışılmıştır [1].



şekil 2. 7. Tek kenarlı lineer asenkron motorun geometrisi

## 2. 11. İyilik Faktörü

Bir asenkron motor primer kaynağından g eker ve bunu indüksiyon yoluyla hava aralığından sekonder devresine iletir. Hava aralığından iletilen g ve rotor kayıpları arasındaki fark yükün sürülmesi ve hareket ettirilmesi için mekanik enerji olarak hazır bulunur. Enerji dönüşümü bakış açısından primer direnci ve primer sekonder devrelerinin kaçak reaktansları başlıca gerekli şeyler değildir. Daha da ötesi enerji

dönüşümünün verimi motorun ortak reaktansı  $X_m$  artarken ve sekonder devresinin direnci azalırken iyileşir. Bundan dolayı temel bir motor için bir iyilik faktörü ( $G = X_m / R_2$ ) tanımlanabilir; motorun performansı G nin değerinin artması ile iyileşir.

Basitleştirilmiş lineer asenkron motorun topolojisi dikkate alınarak, Laithwaite lineer motor için aşağıdaki gibi bir iyilik faktörü tanımlamıştır [2].

$$G = \frac{2\mu_0 f \tau^2}{\pi \rho_s g} = \frac{\mu_0}{\pi \rho_s} v_s \frac{\tau}{g} \quad (2.57)$$

Burada  $f$  kaynak frekansı,  $\tau$  primer sargısı kutup adımı,  $\rho_s$  sekonder iletken levhanın yüzey öz direnci,  $g$  hava aralığı,  $\mu_0$  boş uzayın geçirgenliği ve  $v_s$  lineer senkron hızdır.

Lineer motorun yüksek senkron hızlarda ve  $\tau/g$  oranı büyük olduğunda daha iyi enerji dönüşüm aygıtı olduğu görülür. Bu gözlem daha temel etmenlerle de açıklanabilir. Örneğin diğer elektromanyetik aygıtlar gibi bir lineer motor elektrik ve manyetik yüklenmelerinin tasarım sınırlamaları ile üzerine enpoze edilen doğal kuvvet yoğunluğu sınırlamasına sahiptir. Sonuç itme sınırlaması ile motorun verilen boyutu için yüksek güç (hız başına itme) sadece yüksek hızlarda mümkündür. Eğer  $\tau/g$  oranı küçükse primer kaçak akısı büyük ve sonuç olarak primer ve sekonder devreleri arasındaki etkin manyetik kuplaj azalır ve bundan dolayı lineer asenkron motor zayıf performans gösterir. Hava aralığı çoğu kez manyetik sınırlamalar ile belirlenir ve bundan dolayı verilen bir lineer senkron hız için kutup adımı ve dolaylı olarak  $\tau/g$  oranı frekans artarken azalır. Bundan dolayı yüksek frekanslı motorlar düşük frekanslı motorlarla karşılaştırıldığında zayıf performans gösterir [2].

## 2. 12. Düşük Hızlı ve Yüksek Hızlı Motorlar

Eğer üç fazlı lineer motorun primer sağrıları dengeli sinüsoidal akımlar ile uyarılırsa benzer bir MMF kuvvet dağılımı meydana getirecek şekilde eşdeğer yüzey akım levhası veya yaprağı tanımlanabilir. Lineer motorun ön ucundan bir  $x$  uzunluğundaki doğrusal akım yoğunluğu  $j_1$  aşağıdaki gibi yazılır [2].

$$j_1 = J_1 \exp\left[j\left(\omega t - \frac{\pi x}{\tau}\right)\right] = J_1 \exp\left[\frac{j\pi}{\tau}(v_s t - x)\right] \quad (2.58)$$



Burada  $\omega = 2\pi.f$  açısıl kaynak frekansı,  $\tau$  primer sargısının kutup adımı,  $v_s = 2.f.\tau$  lineer senkron hız ve  $J_1$  aşağıdaki gibidir:

$$J_1 = \frac{3\sqrt{2}N_{faz}K_{wl}I_1}{p\tau} \quad (2.59)$$

Burada  $K_{wl}$  primer sargısının sarım faktörü,  $N_{faz}$  primer sargısının faz başına sarım sayısı ve  $p$  primer sargısının kutup çifti sayısıdır.

Primerin ön ucundan  $x$  uzunluğundaki hava aralığı akı yoğunluğunun normal bileşeni  $x'$  in bir fonksiyonudur. Lineer asenkron motorun bir boyutlu basit modeli kullanılarak  $x'$  in bir fonksiyonu olarak hava aralığı akı yoğunluğunun normal bileşeni aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$B_n(x) = B_0 \exp\left[j\frac{\pi}{\tau}(v_s t - x)\right] + B_1 \exp\left(-\frac{x}{\alpha_1}\right) \exp\left[j\frac{\pi}{\tau'}(v' t - x)\right] + B_2 \exp\left[-\left(\frac{2\pi\tau - x}{\alpha_2}\right)\right] \exp\left[j\frac{\pi}{\tau'}(v' t + x)\right] \quad 0 \leq x \leq L \text{ için} \quad (2.60)$$

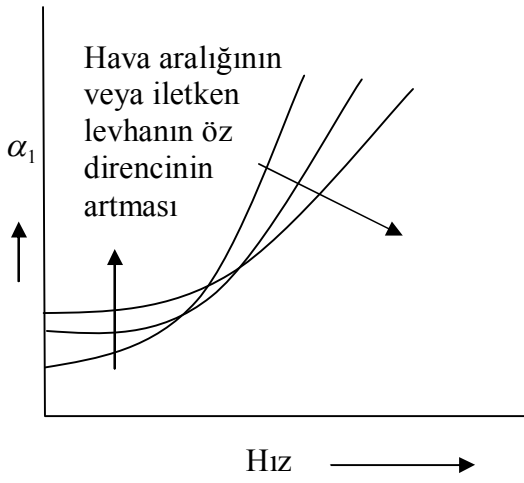
Burada  $v_s = 2f\tau$ ,  $v' = 2f\tau'$  ve  $L$  lineer asenkron motorun primerinin uzunluğudur.

Birinci terim normal hareket eden dalgayı temsil etmekte olup lineer asenkron motor sonsuz derecede uzun bile olsa mevcuttur. Hareket eden bu dalga  $x$  yönünde senkron hızda hareket eder; gerçekte bu ön ucun  $x = 0$  olmasını açıklığa kavuşturur. İkinci terim giriş ucunda üretilmiş zayıflatıcı hareket eden dalgayı temsil eder ve  $x$  in pozitif yönünde hareket eder. Buna giriş ucundaki süreksizlik neden olur ve giriş uç dalgası olarak adlandırılır. Üçüncü terim çıkış ucunda üretilmiş zayıflatıcı hareket eden dalgayı temsil eder ve  $x'$  in negatif yönünde giriş ucuna doğru hareket eder. Buna çıkış ucundaki süreksizlik neden olur ve çıkış uç dalgası denir. Her ikisi uç etkisi dalgaları olarak adlandırılır [2].

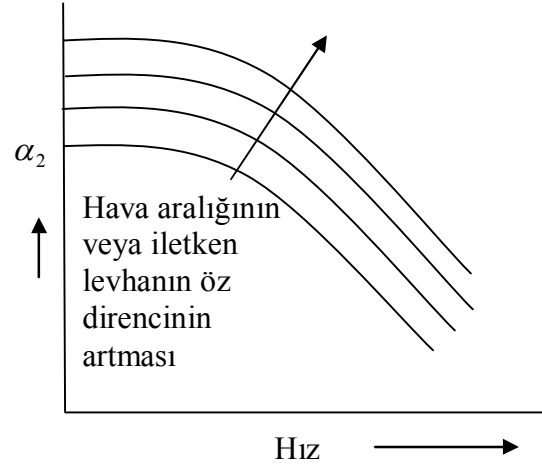
$\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $v'$  ve  $\tau'$  parametreleri motorun özelliklerine hava aralığına ve iletken levhanın öz direncine bağlıdır. Bu değerler ile bunların değişimi Yamamura tarafından belirlenmiştir. Bunların etkisinin anlaşılması motorun performansının belirlenmesine yardımcı olur [2].

Eşitlik (2.60) daki  $\alpha_1, \alpha_2$  parametreleri lineer asenkron motorun uçlarından belirli bir mesafedeki uç etkilerinin bağlı şiddetlerini belirler. Lineer asenkron motorun hızı ile bu parametrelerin değişimleri düşük hız bölgesinde ve yüksek hız bölgesinde

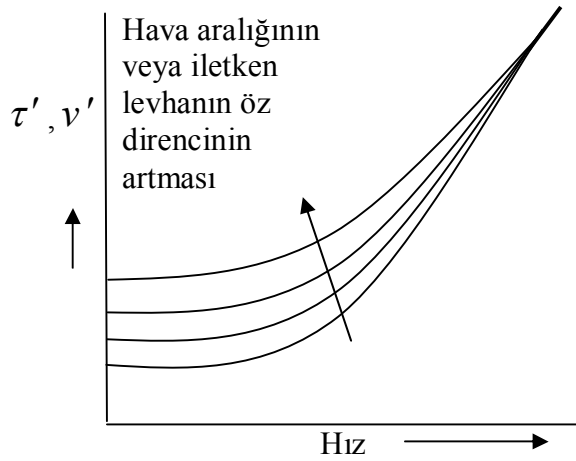
oldukça farklıdır. Bağlı hızın ( $v$ ) bir fonksiyonu olarak bu ilişkiler aşağıdaki şekillerde görülmektedir.



Şekil 2. 8.  $\alpha_1$ ' in hızla değişimi



Şekil 2. 9.  $\alpha_2$ ' in hızla değişimi



Şekil 2. 10.  $v'$  ve  $\tau'$  ' in hızla değişimi

Düşük hız bölgesinde  $\alpha_1$  ve  $\alpha_2$  hemen hemen lineer asenkron motorun hızından bağımsızdır. Oysaki yüksek hız bölgesinde bunlar lineer asenkron motorun hızına güçlü olarak bağımlıdır. Daha da ötesi düşük hız bölgesinde  $\alpha_1$  ve  $\alpha_2$  ikisi birden iletken levhanın öz direnci ile beraber hava aralığı ile artar. Bununla beraber yüksek hız bölgesinde hava aralığı ve iletken levhanın öz direncinin artışı ile  $\alpha_1$  azalır ve  $\alpha_2$  artar. Yüksek hız ve düşük hız bölgeleri arasında açıkça kesilmiş bir bölge yoktur. Bununla beraber Yamamura yüksek hız bölgesinin  $G \gg 4$  ile karakterize edildiğini göstermiştir.

0,25 G sabiti bazen manyetik Reynold sayısı ( MRN ) olarak söylenir. Bundan dolayı yüksek hız bölgesi  $MRN \gg 1$  bölgesi olarak ta tanımlanır [2].

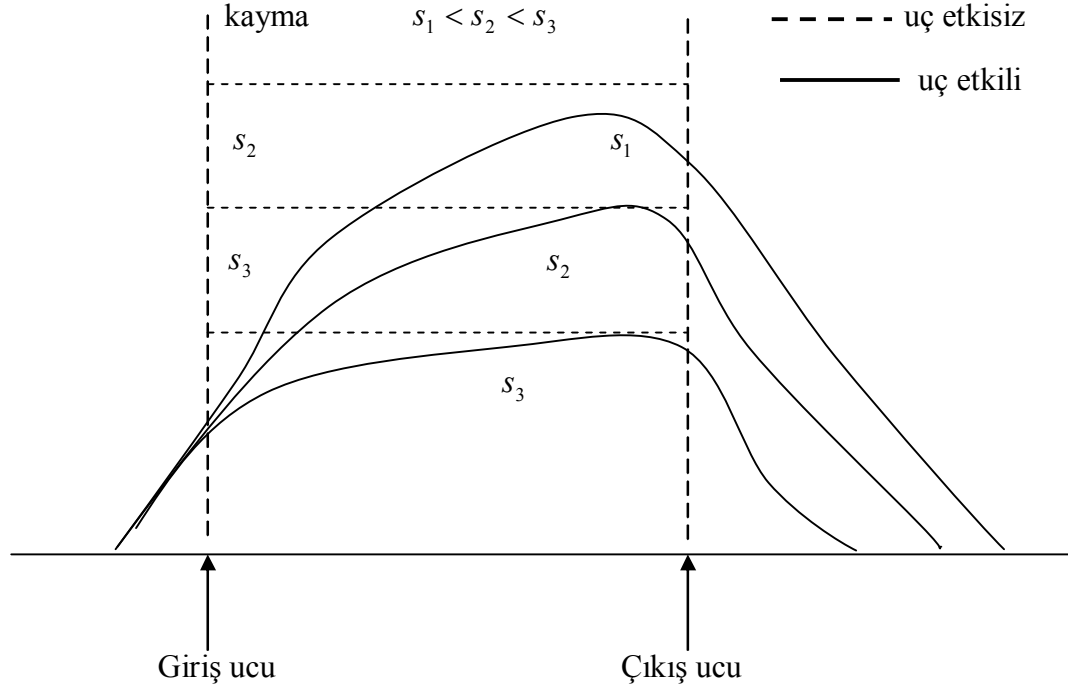
Düşük hız bölgesi ve yüksek hız bölgesi arasında bariz bir farklılık daha vardır. Uç etkisi dalgalarının yarım dalga boyu  $\tau'$  ve hızı  $v'$  şekil (2. 10) da  $v'$  nün fonksiyonları olarak görülmektedir. Yüksek hız bölgesinde hem  $\tau'$  hem de  $v'$  hava aralığı ve sekonder levhanın iletkenliğinden bağımsız ve  $v'$  yaklaşık olarak  $v$  ye eşittir. Düşük hız bölgesinde bununla beraber  $\tau'$  ve  $v'$  bu parametrelerinin fonksiyonlarıdır ve  $v' > v$  ; yani uç etkisi dalgaları sekonder levhadan daha hızlı hareket eder. Gerçekte bu bölgede  $v' > v_s$  olması mümkündür ve sonuç olarak uç etkilerinden dolayı lineer asenkron motor senkron ve daha yüksek hızlarda pozitif itme üretebilir [2].

Pratik yüksek hızlı lineer asenkron motorlarda  $\alpha_1$   $\alpha_2'$  den çok daha büyüktür.  $\alpha_1$  in sayısal değeri lineer asenkron motorun bütün uzunluğu üzerinde mevcut giriş uç dalgası ile lineer asenkron motorun uzunluğu ile karşılaştırılabilir. Hız ile itme, kaldırma, güç faktörü, verim v b. ' nin değişimleri gibi lineer asenkron motor karakteristikleri bu durumda bu giriş uç dalgası ile doğrudan etkilenir. Bununla beraber  $\alpha_2 / L$  oranı pratik motorlar için çok büyüktür. Sonuç olarak çıkış uç etkisi dalgası Lineer asenkron motorun sadece çıkış ucunda mevcuttur ve lineer asenkron motorun dış karakteristikleri üzerinde çok az etkiye sahiptir [1,2].

### 2. 13. Lineer Asenkron Motorun Ön ve Arkasındaki Akı Yoğunluğu

Lineer motorlardaki uç etkisi açıkça motorun uzunluğu boyunca düzgün olmayan akı yoğunluğu dağılımı biçiminde sergilenir. Sabit akımla beslenen lineer asenkron motorun uzunluğu boyunca kayma ve pozisyonla normal akı yoğunluğunun tipik değişimi şekil 2. 11 de görülmektedir. Sabit primer akımı ile primer akımının mıknatıslanma bileşeni azalır ve sonuç olarak hava aralığı akısı artan kayma ile yük bileşeninin artması ile azalır. Bu uç etkisi olan ve olmayan tüm motorlar için doğrudur. Verilen bir kayma için lineer asenkron motorun uzunluğu boyunca akı yoğunluğu giriş ucunda küçük bir akı ile başlayarak artar. Giriş uç etkisi dalgasının nüfuzunun derinliğine bağlı olarak akı yoğunluğu uç etkisi olmayan bir motorda bulunabilecek normal seviyesine bile ulaşamaz.  $\alpha_1$  hız ile arttığından bu durumun düşük kayma değerlerinde olması olasıdır. Daha da ötesi akı yoğunluğunun bariz bir seviyesi lineer asenkron motorun çıkış ucunun daha ilerisinde bulunur. Bu manyetik

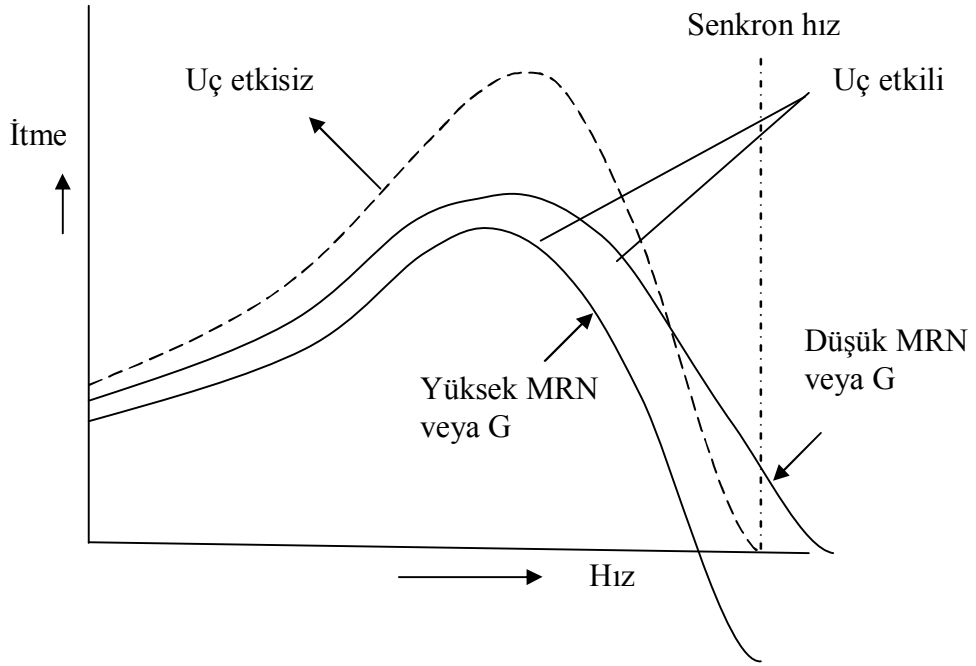
canlanma veya uyanma olarak(wake) bilinir. Bu manyetik canlanma lineer asenkron motorun itmesinde az etkiye sahip olmasına rağmen tek kenarlı lineer asenkron motorda primer ve sekonder arasındaki normal kuvvete önemli miktarda katkıda bulunur [2].



Şekil 2. 11. Lineer asenkron motorda normal akı yoğunluğunun dağılımı

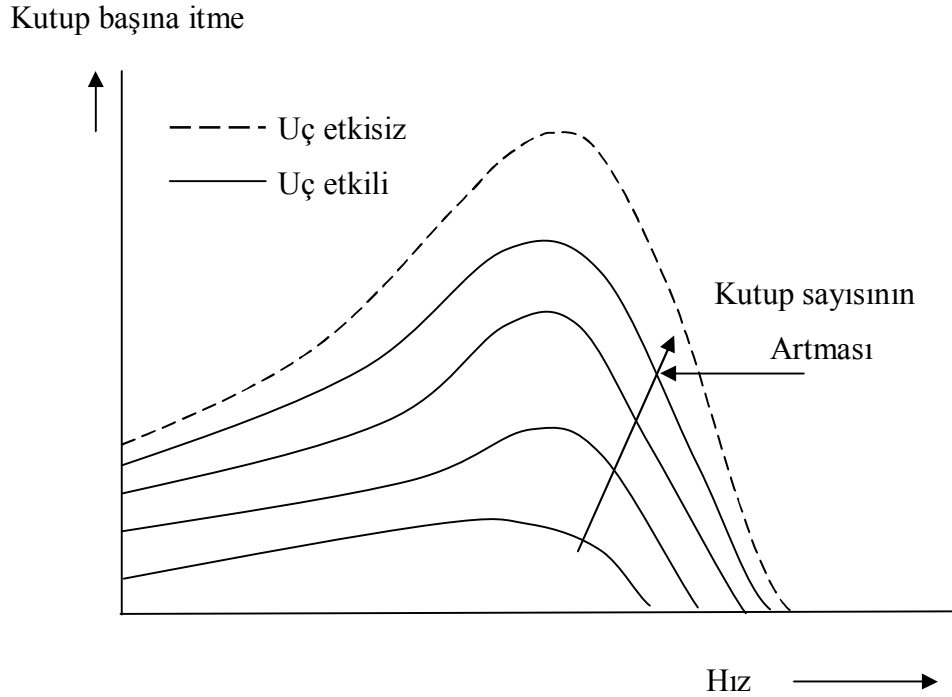
## 2. 14. Lineer Asenkron Motorun İtme Karakteristikleri

Lineer asenkron motorun itme - hız karakteristikleri Şekil 2. 12 de görülmektedir. Uç etkisi olmaksızın karakteristikler doğal olarak geleneksel döner indüksiyon motorlarına benzemektedir. İtme sıfır hızda sonlu bir başlangıç değerinden hızın artması ile maksimum bir değere çıkar ve senkron hızda çabucak sıfıra düşer. Senkron hızın ötesindeki hızlarda itme işaretini değiştirir ve frenleme itmesi meydana gelir. Bununla beraber uç etkisinden dolayı gerçek karakteristik idealden farklıdır. Yüksek hız karakteristikleri sergileyen lineer asenkron motorlarında ( yani  $MRN \gg 1$  ) itme bütün hızlarda idealden daha düşüktür. Böyle bir lineer asenkron motor senkron hızda frenleme itmesi üretir. Düşük hız karakteristikleri sergileyen lineer asenkron motorlarında ( yani  $MRN < 1$  ) uç etkisi dalgaları senkron hızda bile sekonder levhadan daha hızlı hareket edebilir ve bu durumda lineer asenkron motor senkron hızda pozitif itme üretecektir [2].



Şekil 2. 12. Lineer asenkron motorun itme karakteristikleri

İtme karakteristiklerindeki uç etkisi kutup sayısı artırıldığında daha az etkilidir. Örneğin hız ile kutup başına itmenin değişimi Şekil 2. 13 de çeşitli kutup sayıları için gösterilmiştir. Kutup sayısı artarken karakteristik ideal karakteristiğe yaklaştırmaya eğilimlidir [2].

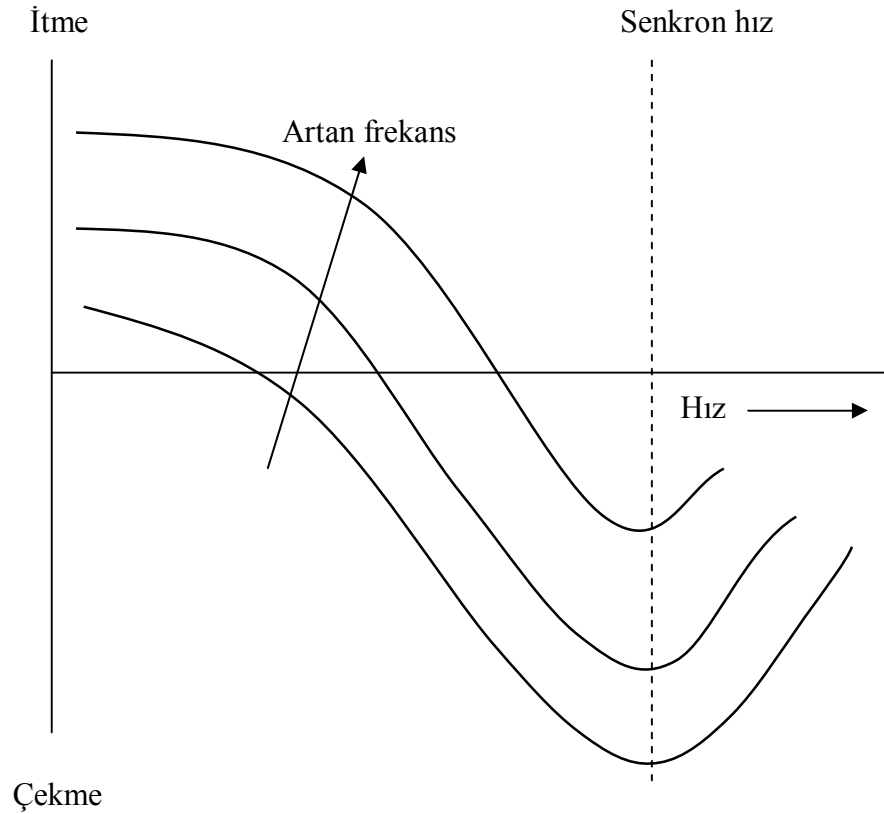


Şekil 2. 13. Lineer asenkron motorun kutup başına itmesi

## 2. 15. Lineer Asenkron Motorda Normal Kuvvet

Çift kenarlı lineer asenkron motor konfigürasyonunda sekonder levha iki yarım primer arasında tam ortaya yerleştirilmiştir; Yarım primer ve sekonder levha arasındaki normal kuvvet diğer yarım primerdekine eşit ve zıt yönlüdür. Bundan dolayı bileşke normal kuvvet sıfırdır. Sadece sekonder levha iki yarım primer arasına asimetrik olarak yerleştirildiğinde net bir normal kuvvet olacaktır; bu kuvvet sekonderi ortaya getirmeye eğilimlidir ve sekonderin merkezden küçük yer değiştirmelerinde yer değiştirme ile doğrudan orantılıdır.

Bununla beraber tek kenarlı lineer asenkron motorunda topolojinin temel asimetriğinden dolayı primer ve sekonder arasında büyük bir net kuvvet vardır. Normal kuvvetin hız ve primer akımının frekansı ile değişimi şekil 2. 14 de görülmektedir. Kuvvet senkron hızda çekme kuvvetidir ve genliği hız azalırken azalır hatta kuvvet işaretini değiştirebilir ve bazı hızlarda özellikle yüksek frekanslı çalışmalarda itme kuvveti olabilir. Nene ve Del Cid tek kenarlı lineer asenkron motorun normal kuvvetinin davranışının açıklanması için bir devre yaklaşımı kullanmışlardır [2].

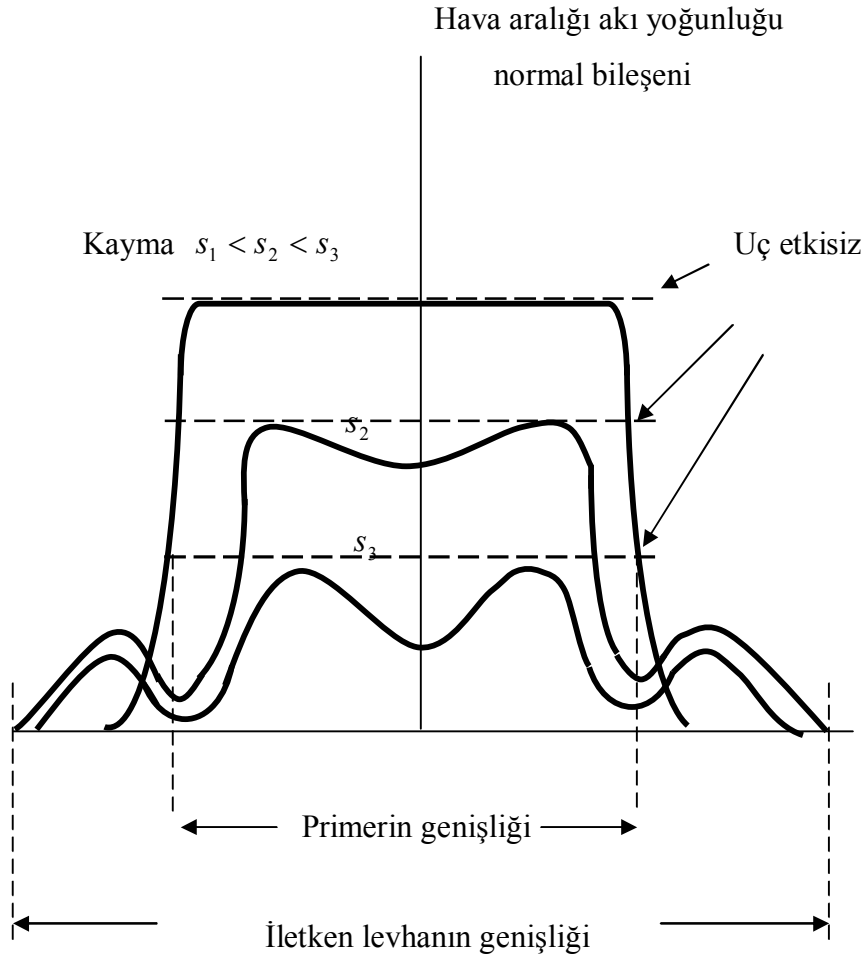


Şekil 2. 14. Lineer asenkron motordaki normal kuvvet

## 2. 16. Lineer Asenkron Motorda Kenar Etkisi

Lineer asenkron motorun sonlu genişliğe sahip olmasının etkisi genelde kenar etkisi olarak adlandırılır. Bu etki genişlik ( hava aralığının ) daha düşük değerlerinde daha etkilidir. Enine yönde normal akı yoğunluğunun değişimi şekli 2. 15 de görülmektedir. Akı yoğunluğunun dağılımı kenar etkisinden dolayı merkezde bir iniş göstermekte ve bu iniş daha yüksek hızlarda daha etkilidir.

Lineer asenkron motorun performansı sekonder iletken levhanın genişliğinde ( $d$ ) bağlıdır. Bununla beraber Yamamura itmeyi içeren lineer asenkron motorun dış karakteristiklerinin ( $d - W_1$ ) /  $\tau > 0,4$  ise hemen hemen  $d$  den bağımsız olduğunu göstermiştir [2,5].



Şekil 2. 15. Lineer asenkron motorda kenar etkisi

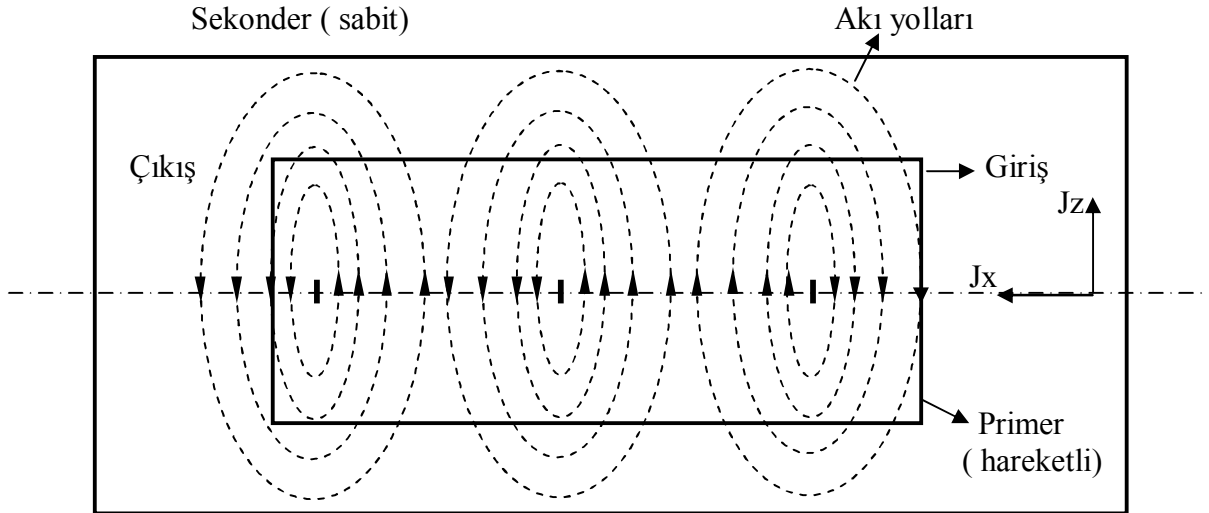
## 2. 17. Lineer Asenkron Motorda Uç Etkileri

Döner tip motorun rotor boyu için incelenen uç etkisi ve katsayısı ( $ke$ ) lineer tipte sekonderin eni için incelenen enine uç etkisi ve katsayısıdır. Döner tipte sadece tek bir uç etkisi olduğu için analizlerde sadece uç etkisi terimi olarak kullanılır. Lineer tipte ise sekonderin boyuna doğrultusundaki uç etkisi için 'boyuna uç etkisi' ve katsayısı ( $kb$ ), enine uç etkisi için 'enine uç etkisi' ve katsayısı ( $ke$ ) ifadeleri kullanılır.

### 2. 17. 1. Enine uç etkisi

Gerek döner tip gerekse lineer tip makinaların stator ( primer ) ve rotor ( sekonder ) boyu sınırlıdır. Bu durum makinanın momentine ( öteleme kuvvetine ) olumsuz yönde etki yapmaktadır. Eğer boylar sonsuz olsaydı teorik olarak uç etkisi mevzu bahis olmayacaktı.

Aşağıdaki şekilde de görüldüğü gibi, sekonder de oluşan girdap akımları sekonderin uç bölgesinde devrelerini kapamak ( kapalı devre ) zorundadırlar. Uç bölgesinde kapalı devre oluşturan bu akımların iki bileşeni vardır.  $J_x$  boyuna bileşen  $J_z$  enine bileşen.  $J_x$  enine uç etkisinin bileşenidir.



Şekil 2. 16. Sekonder akım yolları

Uç bölgelerinde akan akımlar için indüklenen EMK nin bir kısmının  $J_x$  akımı tarafından kullanılması gerekmektedir. Bu durum ise eksen doğrultusunda akan ve moment meydana getiren girdap akımlarının kaynağı olan EMK' ni azaltır.  $J_x$  akımının



oluşturduğu bu azalma kendini toplam sekonder akımında ve dolayısıyla itme kuvveti olan moment te gösterir. Ayrıca enine uç etkisi olan  $J_x$  akımı, makinanın hava aralığı alanının da bozulmasına sebebiyet verir.

Sekonder kayıplarında ve momentte azalmaya yol açan bu etki enine uç etkisi olarak tanımlanır. Hesaplamalarda  $ke$  katsayısı ile dikkate alınır.

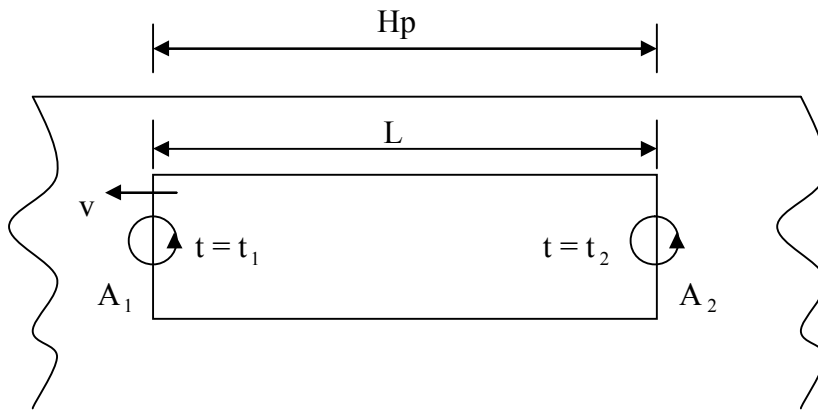
$Z_2$  sekonder empedansı hesaplanırken, sekonder eni sonsuz olan ideal bir motor için bulunan empedansın  $ke$  katsayısına bölünmesi ile uç etkisi kapsama alınmış olur.

Primeri sekonderine eşit genişlikte olan lineer asenkron motor; sekonderi primerinden daha geniş olan bir motordan daha büyük enine uç etkisi gösterir. Enine uç etkisi büyüdükçe moment ve  $ke$  katsayısı azalır [2,8].

## 2. 17. 2. Boyuna Uç Etkisi

Sadece lineer elektrik makinaları için boyuna uç etkisi mevzu bahistir. Lineer elektrik makinaların da meydana gelmesinin sebebi ise primer çekirdeğinin ve sargılarının boyları sonlu uzunlukta, dolayısıyla buna bağlı olarak hava aralığının hareket doğrultusunda sonlu oluşundan kaynaklanır ve makinanın tüm çalışma karakteristiklerini etkiler. Bu etki "boyuna uç etkisi" olarak adlandırılır. Boyuna uç etkisi iki kısma ayrılmaktadır. Bunlar dinamik ve statik olmak üzere:

Dinamik uç etkisi sonlu uzunlukta olan primer ile sonsuz uzunluktaki sekonder arasındaki hareketten kaynaklanır [8].



Şekil 2. 17. Lineer asenkron motorda senkron hızda uç etkisi

Şekildeki  $A_1$  ve  $A_2$  noktalarında primer hareket halindeyken manyetik akının frekanslı oluşundan dolayı, gerilim endüklenir. Bunun neticesinde şekilde de görüldüğü gibi primerin uç kısmında ( $A_1$ ' de) yüksek, Primerin çıkış ucu olan ( $A_2$ ' de) küçük değerde akımlar oluşur. Bu akımlara boyuna uç etkisi akımları denir ve senkron hızda kayıplara sebep olur. Kayıplar hıza göre farklılıklar gösterir. Ayrıca boyuna uç etkisi primer ile sekonder arasındaki hava aralığına da bağlı bir fonksiyondur. Yani Şekil 2. 17' de hava aralığı artırıldığı zaman boyuna uç etkisi azalmaktadır [1,2,8].

## **2. 18. Lineer Asenkron Motorların Döner Motorlara Benzetilerek Kurulan Esas Denklemleri**

Bu kısımda döner asenkron motorlarda kullanılan denklemler ile lineer asenkron motorlarda oluşturulan denklemler birlikte belirtilecek ve lineer asenkron motorlarda eşdeğer devre ile moment, sekonder empedansı ve sekonder karakteristi empedansı çıkarılacaktır.

## **2. 19. Lineer motorlarda eşdeğer devre ile moment, sekonder empedansı ve sekonder karakteristik empedansı**

Sekonder empedans ifadesi:

Döner tip motor için,

$$Z_2 = \frac{m.A.L^2.Nef^2.B_s.\rho}{Ke.\Phi.S.D} \quad (2. 61)$$

Lineer motor için,

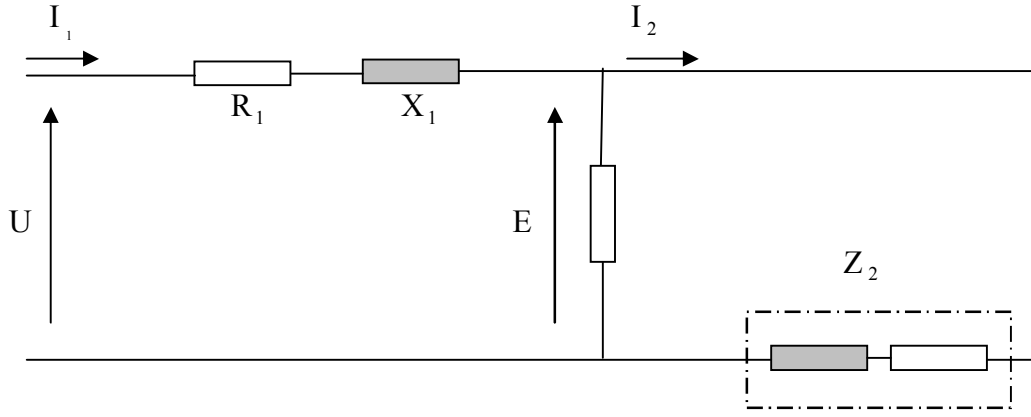
Lineer tip için  $Z_2$  denklemi; çap D ile kutup adımı  $\tau$  arasındaki bağıntı neticesinde, aşağıdaki şekle dönüşür.

$$D = \frac{2P.\tau}{\pi} , \quad \tau = \frac{\pi.D}{2P} , \quad \frac{1}{D} = \frac{\pi}{\tau.2P} \quad (2. 62)$$

$$Z_2 = \frac{\pi.m.A.L^2.Nef^2.B_s.\rho}{\tau.2P.Ke.\Phi.S} \text{ olur.} \quad (2. 63)$$

Yukarda ki denklem ifadelerinde değişken olan ifadeler kutup akısı  $\Phi$  ve kayma  $s$  dir.

$Z_2$  sekonder empedansı eşdeğer devredeki şekil 2. 18 seri primer empedansına bağlı, yük akımı ile orantılı değişme gösteren hava aralđı gerilimine bağlı olup küçük makinaların primer empedansının  $E'$  ye ve dolayısıyla  $\Phi$  ye etkisi özellikle belirgindir.



**Şekil 2. 18.** Lineer asenkron motorun eşdeğer devresi

Lineer elektrik makinası ister büyük güçlü isterse küçük güçlü olsun, doğru analiz için eşdeğer devrede  $Z_1$  empedansının direnci dikkate alınması gerekir. Yani ihmal edilmemelidir. Fakat bazı araştırmacı ve yazarlar büyük makinalarda bu primer empedans direncinin ihmal edilebileceğini belirtmektedirler.

Kutup akısının ( $\Phi$ 'nin), uç gerilimine karşı düşen değerini aldığı ( $\Phi = \Phi_0$ ), kaymanın ( $S=1$ ) olduğu durumda  $Z_2$  sekonder empedansı karakteristik empedans olacaktır.

Yani:

$$Z_{20} = \frac{Z_2.S.\Phi}{\Phi_0} \quad (2. 64)$$

$$\frac{\Phi}{\Phi_0} = \frac{E}{U} \quad (2. 65)$$

Şeklinde olup,  $Z_{20}$  'ın genliği

Döner tip için:

$$Z_{20} = \frac{m.A.\rho.L^2.Nef^2.B_s}{Ke.D.\Phi_0} \quad (2.66)$$

Lineer tip için:

$$Z_{20} = \frac{\pi.m.A.L^2.Nef^2.B_s.\rho}{\tau.2P.Ke.\Phi_0} \quad (2.67)$$

Karakteristik empedans  $Z_{20}$  değerlerinden de görüldüğü gibi, makinanın çalışması anında kayma ( s ) değerine bağlı değildir. Sadece motor uçlarına uygulanan gerilime bağlıdır. Bu özelliğinden dolayı makinanın dizaynında  $Z_{20}$  karakteristik empedansı kullanılır. Sekonder empedans ve karakteristik empedans denklemlerinden anlaşıldığı üzere sekonder malzemenin cinsi, boyutları, kutup akısı ve diğer ifadelerin etkileri kolayca görülebilir.

Araştırmacılar gerek döner tip gerekse lineer tip asenkron motor dizaynında genellikle araştırmalarını daha küçük sekonder empedans ve karakteristik empedans, daha büyük moment elde etmeye yönelmişlerdir.

Sekonder empedans ve karakteristik empedans değerlerini azaltma yöntemleri şunlardır.

- 1- Denklemden de görüleceği gibi, döner tip makinaların rotorunun boyundaki, lineer tip makinaların ise sekonderinin enine uzunluğunun (L' nin) azaltılması sonucu  $Z_2$  ve  $Z_{20}$  değerlerinde de küçülme olur.
- 2- Sekonder malzemenin kenarlarına uç yüzeyleri koymaktır. Sekonder malzemeye uç yüzeyleri koymakla ( döner tip için boyuna, lineer tip için ise enine )  $ke$  enine uç etkisi katsayısı aynı L uzunluğuna göre artırılmış olur.

Gerçi  $ke$  enine uç etkisi katsayısı:

$$Ke = \frac{\pi.L}{2\tau} \quad \text{veya} \quad Ke = \frac{P.L}{D} \quad \text{dir.} \quad (2.68)$$

- 3- Düşük bir  $Z_2$ ,  $Z_{20}$  ve dolayısıyla daha iyi performans elde etmek için değiştirilebilecek diğer parametre ise kutup akısıdır. Yani kutup akısının artırılmasıdır. Ancak primer çekirdeğin doyuma gitmesinden ve belli bir elektrik yükü üzerine çıkarılamamasından dolayı, bu  $\Phi$  akısı istenildiği kadar artırılmaz.
- 4-  $Z_2$  ve  $Z_{20}$  empedanslarının azaltılmasının başka bir yolu olarakta makinaya uygulanan gerilimin frekansını azaltmak olduğu aşağıdaki denklemlerden anlaşılır.

$\Phi$  ve  $\Phi_0$  akılarını formülize edersek

$$E = 4.44. f .Nef .\Phi \text{ den} \quad (2. 69)$$

$$\Phi = \frac{E}{4.44. f .Nef} \text{ ve } \Phi_0 = \frac{U}{4.44. f .Nef} \quad (2. 70)$$

Bu ifadeleri denklem (2. 63) ve (2. 67) de yerine koyarsak sekonder empedansı ve sekonder karakteristik empedansı aşağıdaki ifadelerden oluşur.

$$Z_2 = \frac{4.44.\pi.m.AL^2.Nef.B_s}{2P.Ke.\tau} \cdot \frac{f}{S.E} \quad (2. 71)$$

$$Z_{20} = \frac{4.44.\pi.m.AL^2.Nef.B_s}{2P.Ke.\tau} \cdot \frac{f}{U} \quad (2. 72)$$

$Z_2$  ve  $Z_{20}$  empedanslarının değeri frekansın birer fonksiyonudur. Frekansla doğru orantılı olarak değişirler. Makinanın çalışma frekansı düşürülerekte empedans ve karakteristik empedans azaltılabilir.

Fakat frekansın değişmesi ile makinanın sekonder hızı  $x_1$  ve  $x_m$  değerleride değişmektedir. Bu durum uygulama imkanaanı kısıtlayan faktörlerdir. Frekans değiştirilmekle kutup akısı değiştirilmektedir. Böylece ( $\Phi$ ) ye ne derece etki edileceği, yukardaki 3. maddede belirtilmiştir. Burada A= 4,59 katsayıdır

Moment için; yukarda ki ifadede (2. 71) :

$$\frac{4.44.\pi.m.AL^2.Nef.B_s.\rho}{2P.Ke.\tau} = K \text{ kabul edilirse} \quad (2. 73)$$

$$Z_2 = K. \frac{f}{S.E} \quad (2. 74)$$

Şeklin de ifade edilir.

Böylece  $R_2$  sekonder direnci ve  $X_2$  sekonder reaktansı aşağıdaki gibi olur.

$$R_2 = Z_2.Cos\varphi_r = \frac{K.f}{S.E}.Cos\varphi_r \quad (2. 75)$$

$$X_2 = Z_2.Sin\varphi_r = \frac{K.f}{S.E}.Sin\varphi_r \quad (2. 76)$$

Sekonder akımı:

$$I_2 = \frac{E}{Z_2} \quad (2. 77)$$

Burada formül (2. 74) dikkate alınır

$$I_2 = \frac{E^2 \cdot S}{K \cdot f} \quad (2. 78)$$

$$S = \frac{f_2}{f} \quad (2. 79)$$

Olduğuna göre (  $f_2$  kayma frekansı )

$$I_2 = \frac{E^2}{f^2} \cdot \frac{f_2}{K} \quad (2. 80)$$

olarak sekonder akımı ifadesi çıkarılır.

Hava aralığı gücü

$$P_i = m \cdot I_2^2 \cdot R_2 \quad (2. 81)$$

Lineer senkron hız

$$v_s = 2 \cdot f \cdot \tau \quad (\text{m/sn}) \quad (2. 82)$$

Lineer moment

$$M = \frac{P_i}{v_s} \quad (2. 83)$$

Yukarda ki (2. 75) , (2. 80) , ve (2. 82) ifadeleri (2. 83) denkleminde düzenlenirse

$$M = \left[ \frac{E}{f} \right]^3 \cdot \frac{m \cdot f_2 \cdot \text{Cos} \varphi_r}{K \cdot 2 \cdot \tau} \quad (2. 84)$$

Sonucu bulunur.

## 2. 20. Sonuç

Bu bölümde lineer asenkron motorların genel özelliklerinden bahsedilmiştir. Bütün döner motorların lineer eşdeğerinin yapılabileceği; fakat bunlar içinde en verimli motorun lineer asenkron motor olduğu vurgulanmıştır. Sanayide, yürüyen bantlarda, tekstilde, hızlı tren sistemlerinde ve buna benzer birçok yerde kullanılan lineer asenkron motorların birçok çeşidinin olabileceği belirtilmiştir. Döner motorlardan farklı olan elektro manyetik etkilerine değinilmiş ve hız kontrolü için döner motorlarda kullanılan sistemlerden yani vektör kontrolü ve skalar kontrol sistemlerinin kullanılabileceği belirtilmiştir. Bu sistemlerden vektör kontrolünün lineer asenkron motorlar için daha avantajlı olduğu vurgulanmıştır.

Lineer asenkron motorlarda elektromanyetik alanlar ve kuvvetlerden bahsedilmiş, Uç ve kenar etkileri üzerinde durulmuş ve lineer asenkron motorların hız, kuvvet, kutup adımı, itme, akı yoğunluğu ve yapısal özelliklerinin grafiksel olarak ne şekilde değiştiği açıklanmıştır.

Lineer asenkron motorlara ait denklemlerin döner motorlardaki elektrik ve manyetik özelliklere benzetilerek nasıl oluşturulduğu gösterilmiştir. Çıkarılan denklemlerden de görüldüğü gibi lineer asenkron motorlar ile döner asenkron motorlar arasında birçok benzerlikler bulunmaktadır.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3. 1. Giriş

Temel olarak, lineer motor performansının, aynı tip döner motor performansından farklı olmasının nedeni motorun primer/sekonder giriş ve çıkış uçlarında meydana gelen geçici etkilerdir. Bu etkiler motorun tipine bağlı olarak değişmektedir. Kısa statorlu lineer asenkron motorlarda, iletken sekonderin stator altına girmesi ve stator altından çıkması, motorun performansını döner asenkron motor performansından önemli derecede farklı kılan geçici giriş uç ve çıkış uç etkileri doğurmaktadır. Lamineli yapıdaki senkron motorlarda ise bu etkiler yoktur ancak, sekonder çekirdeğindeki çıkık yapı nedeniyle periyodik kuvvet değişimleri meydana gelmektedir. Lineer asenkron motorlar ile ilgili problemler, analiz etmek için en zor olanlarıdır ve bunlar için geliştirilen metotlar diğer motorlar içinde uygulanabilir. Lineer motorlar için şimdiye kadar geliştirilen analiz metotları üç gruba ayrılır:

- 1,2 ve 3 boyutlu doğrudan manyetik alan analiz metodu
- Katman ve Fourier teknikleri kullanılarak geliştirilen manyetik alan analizi metotları
- Sonlu elamanlar ve sınır elamanları teknikleri kullanılarak geliştirilen manyetik alan analizi metotları.

#### 3. 2. Doğrudan Manyetik Alan Analizi Metotları

İlk olarak uç etkilerini analiz etmek için çalışmalar yapanlar ark motor tasarımcıları Shturman, Aranov ve değişken hızlı asenkron motor konusunda çalışan araştırmacılarıdır [1].

Bu ilk çalışmalar tek boyutlu hava aralığı manyetik alan denklemlerinin çözümüne dayanmaktadır. Bu denklemler,  $\bar{A}$  manyetik vektör potansiyel terimleri cinsinden, sabit bir referansa göre,  $V$  bağlı hızı ile hareket eden bir makinanın genel bir bölgesi için 3 boyutlu Maxwell denklemlerinden türetilmektedir [1,5,9].

$$\nabla_x \frac{1}{\mu} \nabla \cdot \bar{A} = -\sigma \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} - (\bar{v} \cdot \nabla) \bar{A} \sigma + \bar{J}_s \quad (3. 1)$$

Burada  $\mu$  malzemenin manyetik iletkenliği,  $\sigma$  malzemenin elektriksel iletkenliği ve



$B = \nabla x \bar{A}$  ve  $J_s$  kaynak akım yoğunluğudur.

Şekil 3. 1 de gösterilen lineer asenkron motor topolojisinde 3 boyutlu manyetik alan denklemi aşağıdaki varsayımlar yapılarak önemli derecede basit hale getirilebilmektedir.

- Hava aralığında ve sekonderde sadece manyetik alan şiddeti  $H_y$  mevcuttur.
- Demir için manyetik iletkenlik  $\mu = \infty$  dur.
- Primer altında ve sekonderde z yönlü akımlar mevcuttur.
- Döner asenkron makinalarda sincap kafes sargılı rotorunun uç bileziklerindeki akıma eşdeğer bir akım, x yönlü olarak primer altı dışında, sekonderde akar.
- Sürekli rejimde ve tek frekanslı kaynaktan beslenen motor için s kayma olmak üzere

$$\frac{\partial}{\partial t} = j\omega s \quad \text{tir.}$$

- Ve primerden geçen akımlar aşağıdaki gibi akım tabakasıyla temsil edilirler.

$$j_1 = \text{Re} \left[ J_1 e^{j\left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x\right)} \right]$$

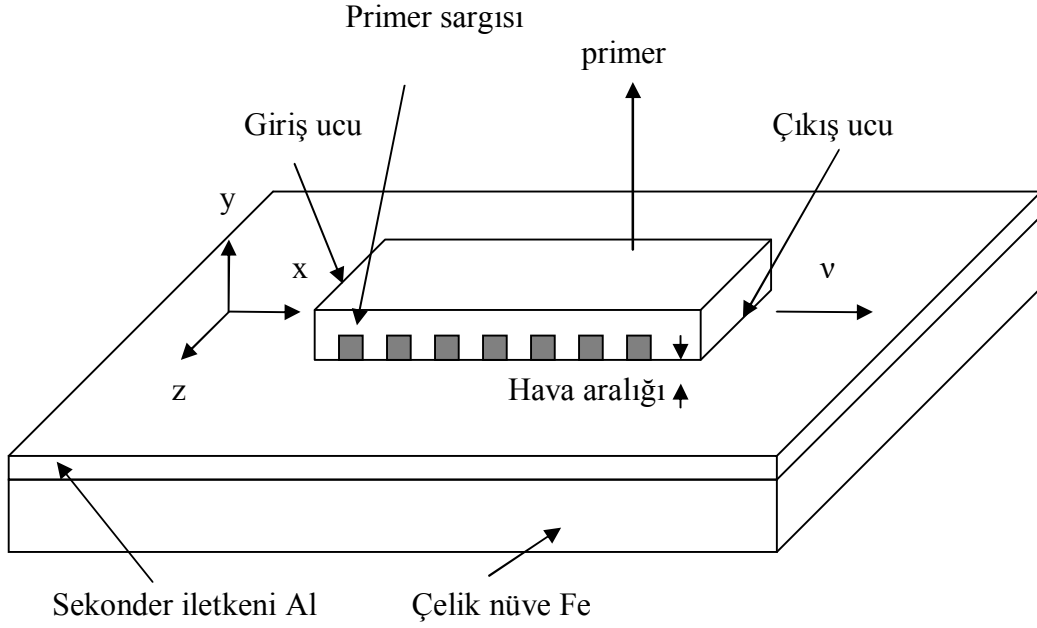
Burada Re köşeli parantez içerisindeki terimin reel kısmını göstermektedir. Denklem (3. 1) bu durumda aşağıdaki hale gelir.

$$\frac{\partial^2 B_y}{\partial x^2} - \frac{\mu_0 \sigma j \omega s B_y}{g} = \frac{\mu_0}{g} \frac{\partial J_1}{\partial x} \quad (3. 2)$$

Denklem (3. 2) nin sürekli durumda çözümü aşağıdaki gibidir.

$$b_y = \text{Re} \left[ \bar{B}_s e^{j\left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x\right)} + \bar{B}_1 e^{-\frac{x}{\alpha_1}} e^{j\left(\omega t - \frac{\pi}{\tau_e} x\right)} + \bar{B}_2 e^{\frac{x}{\alpha_2}} e^{j\left(\omega t + \frac{\pi}{\tau_e} x\right)} \right] \quad (3. 3)$$

Burada  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  ve  $\tau_e$  sekonderin hızına, sekonderin direncine ve hava aralığına bağlı fonksiyonlardır. Denklem (3. 3) birçok varsayıma bağlı olarak basitleştirilmiş olmasına rağmen lineer asenkron motorun çalışmasıyla ilgili çok iyi bilgiler vermektedir.



**Şekil 3. 1.** LAM'ın Analizi için eksenler

Denklem (3. 3) ün ilk terimi döner motorun hava aralığında manyetik indüksiyona karşılık gelen ve pozitif yönde ilerleyen bir manyetik indüksiyon dalgasıdır. İkinci terim x eksenini boyunca sönmüş, pozitif yönde ilerleyen ve giriş ucu nedeniyle meydana gelen bir manyetik indüksiyon dalgasıdır. Üçüncü terim ise, x eksenini boyunca eksponansiyel olarak artan manyetik indüksiyon dalgasıdır [1].

Performans açısından lineer asenkron motorlar döner eşlenikleri ile karşılaştırıldığı zaman, bu son iki terim lineer motorun performansının azalmasına neden olan temel unsur olmaktadır.  $B_s$ ,  $B_1$  ve  $B_2$  kompleks sabitleri basit sınır koşullarından bulunabilmektedir:

a - Stator uçlarında manyetik akıda herhangi bir bozulma (fringing) yoktur. Bu nedenle stator altında net manyetik akı sıfırdır

$$\int_0^L b_y \cdot dx = 0$$

b-Stator uçlarında manyetik akıda herhangi bir bozulma (fringing) olmadığından

dolaylı,  $x=0$  da:  $b_y = \frac{\rho_s J_1}{v}$  olur.

Genel olarak  $\alpha_1, \alpha_2$  den çok daha büyüktür. Ve bu nedenle giriş ucu dalgası çıkış ucu dalgasına göre performans üzerinde etkisi çok daha büyüktür.

Bu basit tek boyutlu denklemlerden çıkarılan diğer bir sonuçta; yüksek sekonder hızlarında  $\alpha_1$  daha da büyüyerek sınır koşulu (b)'den  $x=0$  konumunda  $b_y$  nin çok küçüldüğü görülmektedir. Bunun nedeni yüksek hızlarda denklem (3.3) de  $B_s \approx -B_1$  haline gelerek her iki dalga eşit genlikte primer uzunluğu boyunca birbirlerini yok etmektedirler. Bu bakımdan yüksek hız tasarımları için LAM performansı düşük hız tasarımlarına nazaran uç etkilerinden daha fazla etkilenmektedirler.

Ayrıca,  $\tau_e = \tau \cdot (1-s) = \tau$  düşük kayma değerlerinde uç etkileri yine artarak  $B_s$  ve  $B_1$  manyetik indüksiyon dalgaları primer uzunluğunun çoğu boyunca birbirini yok etmektedir.

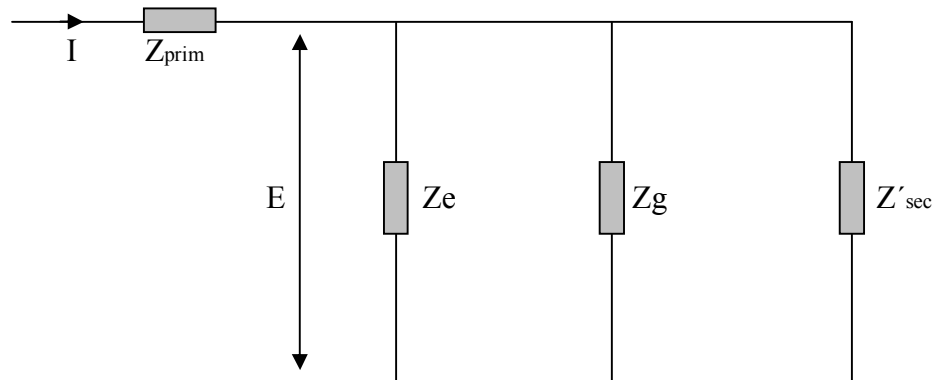
Giriş ucu etkisi göz önünde bulundurularak geliştirilen basit bir eşdeğer devre şekil 3.2' de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi geliştirilen eşdeğer devre, mıknatıslanma ve demir kayıplarını modelleyen  $Z_g$  ortak empedansına paralel bağlanan  $Z_e$  empedansı haricinde döner motorun eşdeğer devresine benzerdir [1].

$$Z_e = \frac{1-k_e}{k_e} Z_{tot} \quad \text{ve} \quad Z_{tot} = \frac{Z_g Z'_{sec}}{Z_g + Z'_{sec}} \quad (3.4)$$

Bu tekniği doğrulamak için yazarlar

a)- uç etkilerini göz önünde bulundurarak

b)- uç etkilerini ihmal ederek bulunan sonuçlar, birisi Kanada raylı yer taşımacılığı Enstitüsünde (CIGGT) diğeri General Elektrik şirketi (GEC) tarafından test edilmiş olan iki tek yanlı LAM' un test sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır. Her iki motor içinde kuvvet hız eğrileri test sonuçları ile iyi uyum göstermişlerdir [1].



Şekil 3.2. Uç etkileri dahil edilerek geliştirilen eşdeğer devre

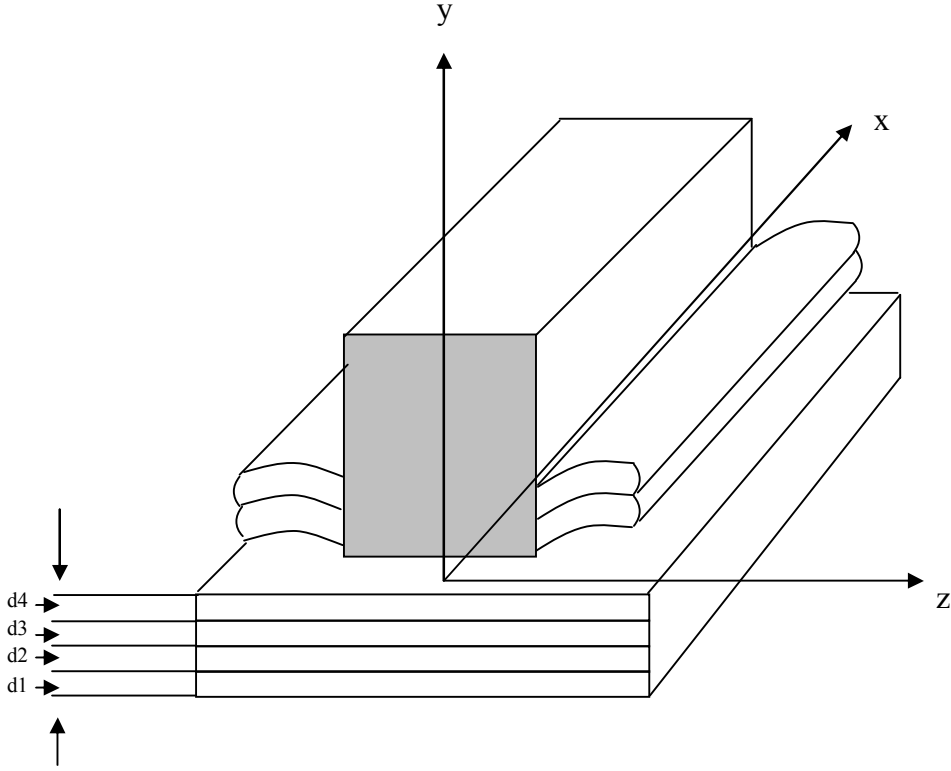
Burada  $Z_{\text{prim}}$  primer empedansı,  $Z'_{\text{sec}}$  primere indirgenmiş sekonder empedansı,  $Z_g$  ortak empedans,  $Z_e$  uç etkisi empedansı,  $I$  primer akımı ve  $E$  hava aralığı emk' sıdır.

Lineer asenkron motorun giriş ucundan dolayı hava aralığında meydana gelen manyetik indüksiyon geçici etkidir. Bu geçici etki nedeniyle meydana gelen kuvvet kayıpları ve çıkış ucundan itibaren primer dışındaki akıda meydana gelen düşme bakımından asenkron motorun döner makinaya nazaran kuvvet / kutup oranında bir azalma meydana gelir. Kaymaya göre bu kayıpların değişimi oluşturulabilir.

Bu alanda araştırmalar yapan araştırmacılar tek boyutlu manyetik alan analizi yaklaşımıyla değişik çalışmalar yapmışlardır. Tek boyutlu yaklaşımla, manyetik indüksiyonun ikinci, üçüncü ve dördüncü dereceden olmak üzere üç değişik denklemini elde edilebilir. Üçüncü dereceden olan denklemde yaklaşık bir yoldan, sekonderdeki  $x$  yönlü akımların (uç bileziği akımları) etkisi bulunmaktadır. Dördüncü dereceden olan denklemlerde ise sonlu yapıdaki çekirdeğin permabilitesi göz önünde tutulmaktadır.

### 3. 3. Katman ve Fourier Metotları

Lineer motorlar genellikle döner eşleniklerine göre daha büyük hava aralığına sahip oldukları için, hava aralığında  $H$  manyetik alan şiddetini uniform kabul etmek gerçekçi olmaz. Ayrıca tek yanlı lineer asenkron motorda sekonder, çelik üzeri alüminyum kaplı kalın tabakalardan oluşmaktadır. Bu nedenle, doğru sonuçlar elde etmek için sekonderdeki akım dağılımı göz önünde bulundurulması gerekir. Şekil 3. 3 'de görüldüğü gibi lineer motoru katmanlara bölerek ve daha sonra iki boyutlu alan analizini yapmaktan ibaret olan bir analiz metodu bir dizi yazar tarafından geliştirilmiştir. İki boyutlu çözümde, yönlü alınan değişken olmadığı şekil 3. 1 ve rotor akımları sadece  $z$  yönlü olduğu kabul edilmektedir [1].



**Şekil 3. 3.** Tek yanlı bir lineer asenkron motorun genel görünümü

Ancak alüminyum kaplı sekonderde akımın x yönünde bir bileşeni olmaktadır, bu akım bileşeninin etkisi genellikle Russel – Norsworthy faktörü olarak sekonder direncinin artmasıyla göz önünde tutulmaktadır. Bu metoda oyuk etkisini, ya Carter katsayısıyla hava aralığını artırarak ya da isotropic olmayan katman permabilitelerini kullanarak dahil etmek mümkündür. Sargı akımları statorda hava aralığı yüzeyinde bir akım tabakasıyla temsil edilir. Lineer motorun analizi yapılırken katman metodunun bir dezavantajı, primer demir çekirdeğinin sonlu uzunlukta ve sonlu genişlikte olması nedeniyle ortaya çıkan bazı zorluklardır. Katman metodunu kullanarak yapılan çoğu analizde demir çekirdeğin sürekli olduğu kabul edilmektedir. Ancak, son zamanlarda bu problemin üstesinden gelmek için bazı girişimler yapılmıştır. Şeki 3. 4 de görüldüğü gibi sonlu uzunlukta ki stator etkisi, x eksenı boyunca genellikle demir çekirdekleri sürekli ancak akım yoğunlukları süresiz olan sonsuz sayıda motorun dizili olduğu kabul edilerek göz önünde tutulabilir. Bu durumda akım yoğunluğu sinüzoidal olarak ilerleyen dalgaların Fourier serileri ile temsil edilebilir. Şekil 3. 5 de genel bir makinada bir harmonik dalga bileşeni için katman düzeni verilmektedir. Gösterilen  $B_y$  ve  $H_x$  değerleri komşu iki katmanın birbirine değdiği yüzeydeki değerleridir. Bütün bu alanlar  $\omega_n$  açısıl

kayma frekansıyla değiştiği kabul edilerek ve deplasman akımı ihmal edilerek n. katman için Maxwell denklemleri aşağıdaki denkleme indirgenebilir [1,5,4,9].

$$\frac{\partial^2 \bar{B}_y}{\partial z^2} = \bar{B}_y \gamma_n^2 \quad \text{ve} \quad \gamma_n = \left[ k^2 \frac{\mu_{x,n}}{\mu_{y,n}} + j \sigma_n \mu_0 \mu_{x,n} \omega_n \right] \quad (3.5)$$

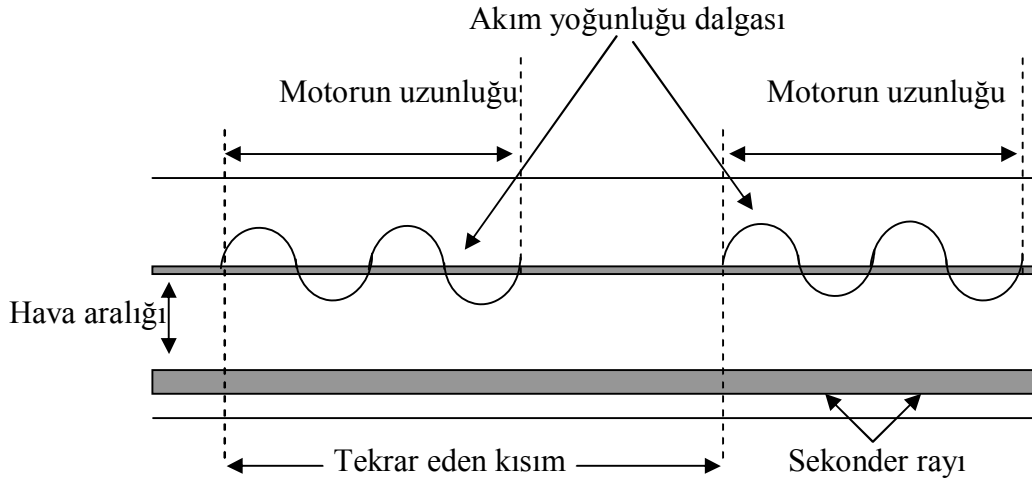
Burada  $k = 2\pi /$  dalga boyu,  $\mu_{x,n}$  ve  $\mu_{y,n}$  sırasıyla x ve y yönlerindeki permabiliteler,

$\omega_n = s_n \cdot \omega$  ve  $s_n$  n. Katmanın kayma değeridir.

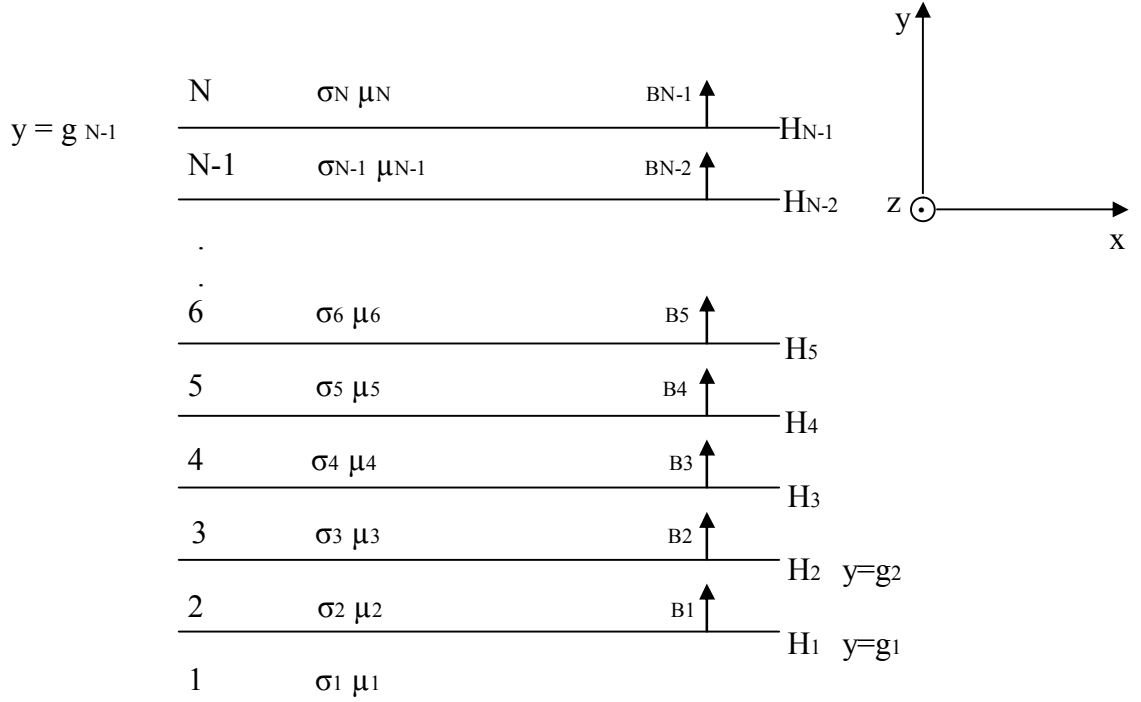
Denklem 3.5 ' de  $\bar{B}_y$ ,  $b_y = \text{Re} | \bar{B}_y \cdot \exp ( \omega t - kx ) |$  akım yoğunluğunun kompleks fazör genliğidir.

$$\bar{B}_y = A \cosh(\gamma_n \cdot y) + C \sinh(\gamma_n \cdot y) \quad (3.6)$$

Burada A ve C sınır koşullarından bulunur. Bölge de  $\nabla \cdot B = 0$  olduğundan  $B_x$  ve  $H_x$  hesaplanabilmektedir.



şekil 3. 4. Bir motor dizisi.



**Şekil 3. 5.** Katman analizi için sekonder modeli

Katman geometrisini denklem ( 3. 6 ) da yerine koyarak n. katmanın alt ve üst yüzeylerindeki  $B_y$  ve  $H_x$  değerleri arasındaki ilişki yazılabilir. Bunun sonucu  $H_x$  için aşağıdaki denklem ortaya çıkar.

$$\begin{vmatrix} B_n \\ H_n \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cosh(\gamma_n S_n) & \frac{1}{\beta_n} \sinh(\gamma_n S_n) \\ \beta_n \sinh(\gamma_n S_n) & \cosh(\gamma_n S_n) \end{vmatrix} \begin{vmatrix} B_{N-1} \\ H_{N-1} \end{vmatrix} \quad (3.7)$$

veya

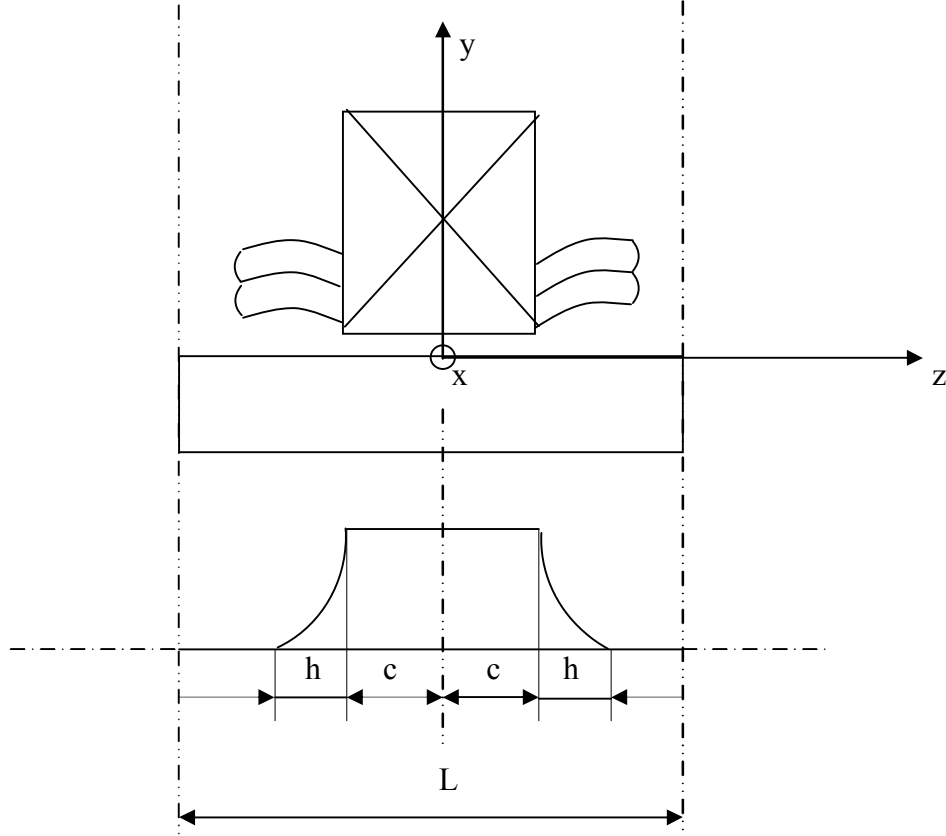
$$\begin{vmatrix} B_n \\ H_n \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} T_n \end{vmatrix} \begin{vmatrix} B_{N-1} \\ H_{N-1} \end{vmatrix} \quad (3.8)$$

$|T_n|$  n. bölge için transfer matrisi olarak adlandırılır. Eğer makinanın her katmanı için transfer matrisi biliniyorsa, o zaman herhangi iki katman arasındaki transfer matrisini, bu iki katman arasındaki bütün transfer matrislerini çarparak bulmak mümkündür. Katmanlar arası sınırlarda  $B_y$  süreklidir ve akım yoğunluğu tabakası mevcut olduğu

sürece, yani sınırın hemen altında ve üstünde  $H_x$  ' deki fark akım yoğunluğuna eşit olduğu zaman  $H_x$  ' de sürekli olur. Eger bir katman sınırında akım yoğunluğu tabakası ve akım yoğunluğu biliniyorsa yukarıdaki denklemlerle makinada herhangi bir katmandaki alan bileşenleri hesaplanabilmektedir. Bunun sonucunda Maxwell denklemleri veya katmanlar arasındaki net güç akışını kullanarak her katman üzerindeki kuvvetler hesaplanabilmektedir.

Bu metotlarda lineer motor, sadece boyuna eksen üzerinde dizili sonsuz sayıda motorla şekil 3. 4 değil, ayrıca buna ek olarak enine eksen üzerinde dizili sonsuz sayıda motorla modellenmektedir şekil 3. 6. Bu durumda primer sargıları tarafından oluşturulan manyeto motor kuvveti çift fourier serileri ile temsil edilmektedir. Burada hesap iterasyonu, demirin doyması göz önünde tutularak her katman permabilite sinin bir değere ayarlanmasını mümkün kılmaktadır. Boldea ve Bobescu [1] bu metodu kullanarak buldukları sonuçları 924 mm uzunluğunda, 75 mm genişliğinde ve 5. 5 mm hava aralığına sahip 7 kutuplu bir lineer asenkron motorun test sonuçlarıyla karşılaştırarak, hesap yoluyla bulunan sonuçların test yoluyla bulunan sonuçlarla uyum içinde olduğunu göstermişlerdir. Primer ve sekonderin demir çıkıklığı, LAM 'in uç noktalarındaki bir katman için çekirdeğin permabilite ve sekonderin iletkenlik değerleri değiştirilerek modellenmektedir. Bu süreksiz noktalarda ve katmanlar arasındaki sınır koşulları transfer matrisleri kullanılarak çözülmektedir ve alan teorisinden bir eşdeğer devre geliştirilmektedir. Alınan sonuçlar 0 – 515 km / h hız aralığında General Electric Şirketi tarafından yayınlanan test sonuçlarıyla karşılaştırılmaktadır. Öteleme kuvveti, primer akımı, güç faktörü verim ve dikey kuvvet bakımından sonuçların çok uyumlu olduğu tespit edilmektedir. [1,8]





Şekil 3. 6. Matematiksel modelin enine görünümü

### 3. 4. Sonlu Elamanlar Metodu

Bilgisayar hızının artması ve fiyatının düşmesiyle birlikte lineer motor problemlerinin analizi, nümerik metotlar kullanılarak yapılmaya başlanmıştır. Ancak ideal çözüm olan tam üç boyutlu analizde çözüm denklemlerini basitleştirmek için hala bazı yaklaşımlar yapılmaktadır.

Sonlu elamanlar metodu son 20 yıl içerisinde bazı kısmi diferansiyel denklem takımlarını çözmek için geliştirilmiştir. İlk olarak mukavemet problemlerini çözmek için inşaat mühendisleri tarafından kullanılmaya başlandı ancak, elektrik mühendisliği ile ilgili elektro manyetik alan denklemlerini çözmek için de çok uygun bir metot olduğu görülmüştür [1].

Bu metotta problem önce, deplasman akımı ihmal edilerek  $\bar{A}$  manyetik vektör potansiyeli için vektör denklemi elde etmek amacıyla Maxwell denklemlerinin terimleri cinsinden en temel haliyle tanıtılır.

$$\nabla_x \frac{1}{\mu} \nabla \bar{A} = -\sigma \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} - (\bar{v} \cdot \nabla) \bar{A} \sigma + \bar{J}_s \quad (3.9)$$

Burada  $\bar{B} = \nabla \times \bar{A}$ ,  $\bar{B} = \mu \bar{H}$ ,  $\nabla \cdot \bar{A} = 0$ ,  $\sigma$  elektriksel iletkenlik,  $\bar{v}$  hız Js kaynak akımı yoğunluğudur.

Denklem (3. 9) da  $\bar{A}$  ve  $\bar{B}$ , tanımlanan bir referans konumun terimleri cinsinden ifade edilmektedir. Hız terimi  $v$ , makinanın herhangi bir parçasının referans eksene göre bağıl hareketini göz önünde bulundurmak içindir. Lineer motor için bu referans eksen, ister sabit primerde ister hareketli sekonderde seçilebilmektedir.  $\mu$  manyetik iletkenlik değeri  $\bar{A}$  ve  $\bar{B}$  ye bağlı olduğundan dolayı manyetik doyma göz önünde tutulabilmektedir. Problemi analiz edilen manyetik sistem lineer kabul edilirse, bu durumda (3. 9) un sol tarafı ifadesiyle değiştirilebilir. Denklem (3. 9), tanımlanan sınır koşullarında lineer motoru içeren hacim bölgesinin çözümü için diferansiyel denklem takımındadır. Bu sınır koşulları, sargılardaki akım ve genlikle düşünülen bölgeden itibaren belli bir yere kadar değeri sıfıra doğru düşen akı yoğunluğu ve indüklenen akımlardır. Sonlu elamanlar metodu alan ve hacim bölgesini, 2 boyutlu problemler için genellikle üçgen veya dörtkenar ve üç boyutlu problemler için genellikle heksahedral elamanlara bölünmeyi içermektedir. Daha sonra elemanların bir düğüm veya köşelerindeki  $\bar{A}$  manyetik alan vektör potansiyeli, bu düğümler arasındaki potansiyelin daha önceden tanımlanan bir şekilde ( lineer veya quadratic ) değişikliği varsayılarak hesaplanmaktadır. Sonuçların alınmasında en çok kullanılan Galerkin ağırlıklı artık metodu veya enerji fonksiyonelleri gibi değişken formülasyonlardır. Hangi metot kullanılırsa kullanılsın alınan sonuçlar, sadece doğru sonuçlara yakın sonuçlar olur. Burada sonuçların doğruluk veya tam doğru sonuçlara yakınlık derecesi, problem in alan veya hacim bölgesinde kullanılan elaman sayısına bağlıdır. Daha sonra otomatik sonlu elaman üretimi için geliştirilen bazı teknikler, elaman sayısını minimumda tutmak bakımından verimli olmuştur [1].

### 3. 5. İki Boyutlu Çözüm

Şekil 3. 1 kısa statorlu bir LAM' da hareket yönünün x doğrultusunda olduğunu göstermektedir. Eğer statorun z doğrultusunda genişliği yeteri derecede büyük ise, x - y düzleminde iki boyutlu bir kesit alanı modellenerek doğru sonuçlar almak mümkündür. Sekonderdeki "x" yönlü akımlardan dolayı meydana gelen enine bozucu etkiler Russel - Norsworthy faktörüyle sekonder direnci artırılarak göz önünde tutulabilir [1, 9]. Daha sonra akımların sadece z yönünde aktığı ve bütün manyetik alanlar z yönünde değişken olduğu kabul edilerek denklem (3. 9) aşağıdaki hale gelir.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right] = \sigma \left[ \frac{\partial A_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial A_z}{\partial x} \right] + J_s \quad (3. 10)$$

Bu durumda, denklem ( 3. 10 ) da A' nın sadece bir bileşeni (  $A_z$  ) bulunduğundan dolayı problem önemli derecede basit hale gelir. Literatürlerde birçok değişik metot ve yaklaşımlarla denklem (3. 10) ' a çözüm örnekleri bulunmaktadır.

Bütün manyetik alanların besleme frekanslarınının zamana göre sinüzoidal olarak değiştiği kabul edilirse. Denklem (3. 10) aşağıdaki gibi daha basit hale gelmektedir.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{1}{\mu} \frac{\partial \bar{A}_z}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{1}{\mu} \frac{\partial \bar{A}_z}{\partial y} \right] = \sigma \left[ j\omega \bar{A}_z + v_x \frac{\partial \bar{A}_z}{\partial x} \right] + J_s \quad (3. 11)$$

Burada  $\omega$  açısasal kaynak frekansı,  $A_z = \text{Re} \{ \bar{A}_z . e^{j\omega t} \}$  ve  $J_s = \text{Re} \{ \bar{J}_s . e^{j\omega t} \}$  dir. Bu durumda denklem (3. 10) daki değişkenler kompleks uzay fazörleriyle değiştiği için sonuçlar  $\bar{A}_z \exp\{j\omega t\}$  ve  $\bar{J}_s \exp\{j\omega t\}$  ifadelerinin reel kısımlarının alınmasıyla elde edilir. Eğer demirin nonlineerliği göz önünde tutulacak olursa, o zaman sonuca ulaşmak için B / H eğrisinde  $\mu$  B ve H değerleri birbirini sağlayana kadar sonlu elamanlar için  $\mu$  iterasyon yoluyla ayarlanması gerekir.

Denklem (3. 11) in kullanımının bir avantajı, alan değerlerini bulmak için çözüm iterasyonları sadece bir kere yapılır. Eğer bu yaklaşım sonuç açısından tatmin edici bulunmazsa, örneğin geçici rejimde çözüm veya demirin aşırı derecede doyması göz önünde tutulmak istenirse, o zaman  $\partial A / \partial t$  zamana göre türev terimini bulunduran denklem (3. 10) un çözülmesi gerekir. Bu denklemin çözümü içerisinde bulunan zaman türev terimi,  $t - \Delta t$  ve  $t$  anlarındaki potansiyeller ve bu potansiyellerin türevlerini bulunduran bir ifadeyle değiştirildiği, normalde 'zaman adımlaması' (time stepping) diye bilinen bir teknik gerektirir. Tek frekanslı metotta denklem (3. 11) in çözüm metodu karşılaştırıldığı zaman bu metot, bilgisayarda sonuca ulaşmak için önemli derecede zaman almaktadır. Kanada Queen Üniversitesinde bulunan bir deneysel lineer asenkron motor için bu iki çözüm metodu karşılaştırılmaktadır. Tasarım bilgileri tablo 3. 1 de verilen bu motorun boyuna kesiti şekil 3. 7a 'da ve yapılan üçgen elaman dağılımı şekil 3. 7b de gösterilmektedir. Değişik kaynak frekansları için deneysel olarak alınmış olan sonuçlarla tek frekanslı metotla bulunan sonuçlar karşılaştırmış, teorik sonuçların yüksek kayma değerlerinde test sonuçlarıyla çok uyumlu olduğunu ancak düşük kayma değerlerinde teorik ve deneysel sonuçların birbirinden uzaklaştığını görmülmüştür. Düşük kayma değerlerinde test ve teorik sonuçlar arasındaki bu uzaklaşmanın demirin doyması nedeniyle meydana geldiği düşünülmektedir. Tek

frekanslı teknikte verilen bir elaman için bir tam peryot boyunca tek bir  $\mu$  değeri kullanılırken zaman adımlama metodunda her adımda değeri değişebilen bir  $\mu$  değeri kullanılmaktadır. Düşük kayma değerlerinde sonuçların uyumlu olmasına neden olan diğer bir faktörde muhtemelen enine uç etkilerinin olduğu söylenmektedir. Kanada Queen üniversitesin'deki deneysel LAM teorik olarak 11 Hz kaynak frekansında ve 7 Hz kayma frekansında çalışırken geçici bir anahtarla enerji kesilip açılarak, zamana göre normal ve öteleme kuvvetlerinin değişimleri verilmektedir. Bu sonuçların alınmasında bir peryot boyunca 48 adım kullanılmakta. Kullanılan bilgisayarlara göre sonuçların alınması için tek frekanslı metot ta 2-3 CPU dakika ve zaman adımlama metodunda 2-4 CPU saat zaman gerekmektedir. Bu süreler belki günümüz bilgisayarlar için daha az olacaktır ancak, iki metot uygulamasının bilgisayarlarda aldığı süreler arasındaki fark çarpıcıdır.

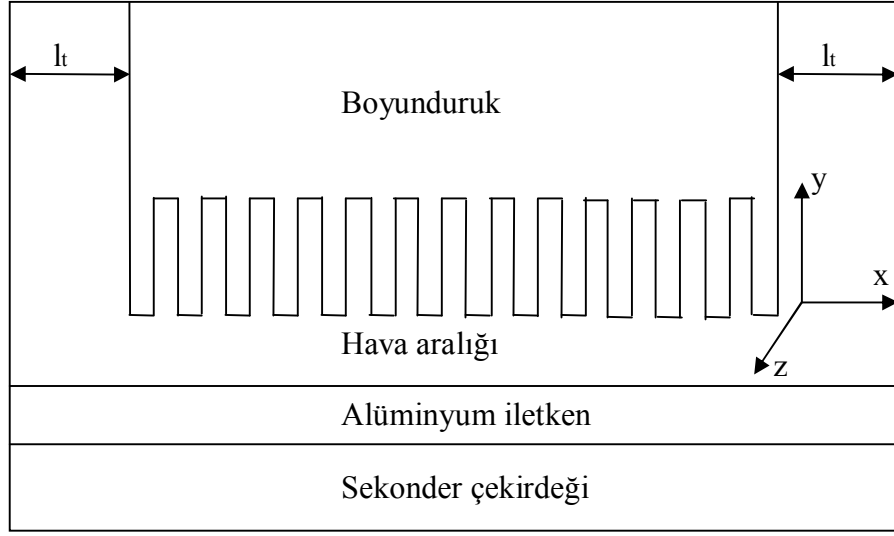
a- manyetik devre kısımlarının derin bir doyma sınırına geldiği ve

b- besleme akımının önemli derecede yüksek harmoniklere sahip olmadığı müddetçe tek frekanslı metodun kullanılması tavsiye edilmektedir.

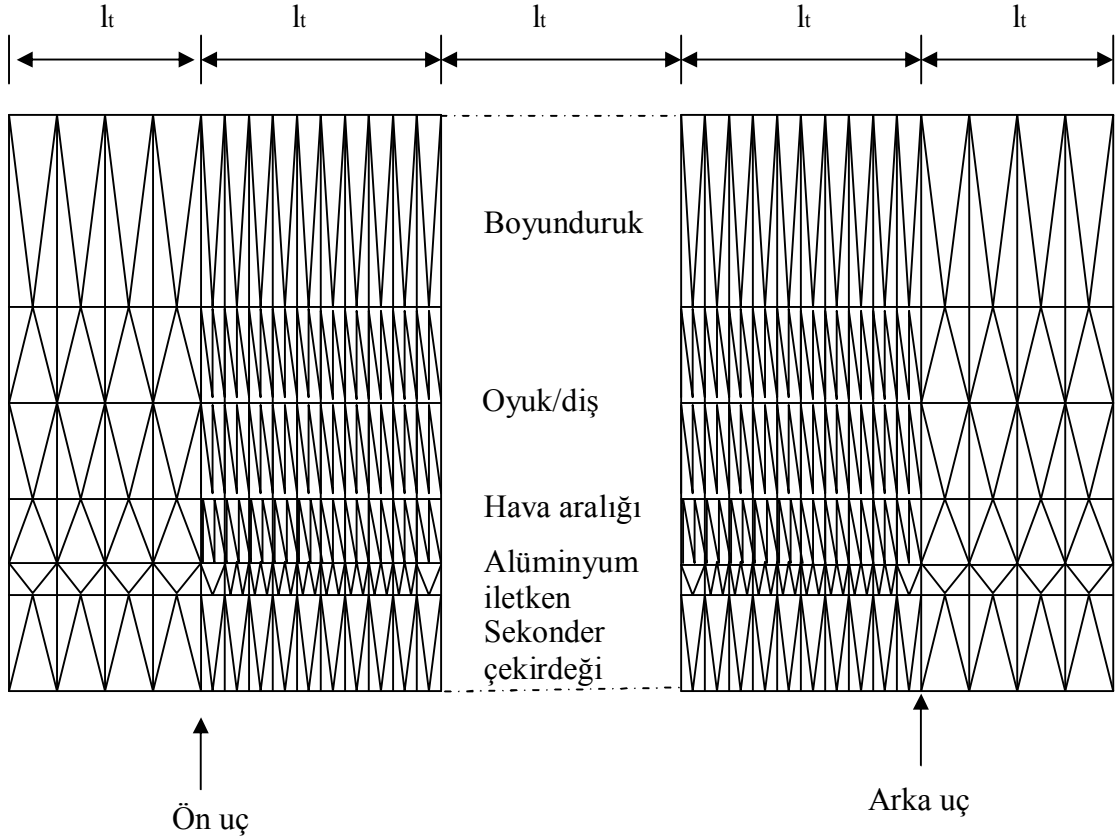
Enine ve boyuna uç etkileri için düzeltme faktörü kullanarak iki boyutlu elektromanyetik katman analizi metodunda daha büyük doğrulukta sonuçlar alındığını iddia edilmektedir [1].

**Tablo 3. 1.** Kanada Queen Üniversitesi' ndeki deneysel LAM un tasarım verileri [1]

Açıklama	Değer	Birim
Faz sayısı	3	-
Çift kutup sayısı	3	-
Kutup adımı	0.25	m
Kutup sayısına düşen faz başı oluk sayısı	3	-
Oyuk ebadı	15x35	mm
Bobin adımı	7/9	-
Primer çekirdeğinin genişliği	101	mm
Alüminyum sekonder kalınlığı	2.5	mm
Sekonder enine taşıma uzunluğu	9.5	mm
Sekonder demir kalınlığı	111	mm



Şekil 3. 7 (a). LAM' da boyuna bir kesit



Şekil 3. 7 (b). LAM da boyuna kesit alanında yapılan elaman dağılımı

### 3. 6. Üç Boyutlu Çözüm

Manyetik vektör potansiyelinin üç boyutlu denklemi, her eksen boyunca A' nin üç bileşeni için çözüm gerektirir. Çoğu üç boyutlu problem için doğru sonuçlar elde etmek amacıyla gerekli sonlu elaman sayısı genellikle bilgisayar hafızasında büyük yer tutar ve hesaplama zamanı uzun olur. Bu problemi daha basite indirgemenin metodu, hem skalar hem de vektörel manyetik potansiyellerin kombinasyonunu kullanmaktır. Modellenecek lineer motorun hacmi değişik özelliklere sahip bölgelere bölünebilir. Eddy ve kaynak akımlarının bulunmadığı bölgelerde Ht manyetik alan şiddeti  $\Psi$  ' toplam skalar potansiyeli' nin gradyanı gibi temsil edilebilir [1,8].

$$H_t = -\nabla\Psi \quad (3. 12)$$

Kaynak akımlarının bulunduğu ancak, Eddy akımlarının bulunmadığı sargılardaki gibi bölgelerde Ht iki bileşenle temsil edilebilir. Bu bileşenler sadece kaynak akımları nedeniyle Hs ve  $\phi$  ' indirgenmiş skalar potansiyel' inin gradyanına eşit bir bileşendir.

$$H_t = H_s - \nabla\phi \quad (3. 13)$$

Ticari amaçla piyasada hesaplamayı basitleştirmek için hem indirgenmiş hemde toplam skalar potansiyellerini kullanan TOSCA adında bir manyetik üç boyutlu bilgisayar paket programı bulunmaktadır [1].

Sekonder gibi Eddy akımlarının bulunduğu başka bölgelerde manyetik vektör potansiyeli A ve denklem (3. 9) için çözüm yapılmalıdır. Bu değişik özelliklere sahip bölgeler arasındaki sınırlarda, alınan değişik sonuçları bir arada bağdaştırmak için, değişik manyetik alan değerlerini bağdaştıran link denklemleri kullanılmaktadır [1].

### 3. 7. Sınır Elamanları Metodu

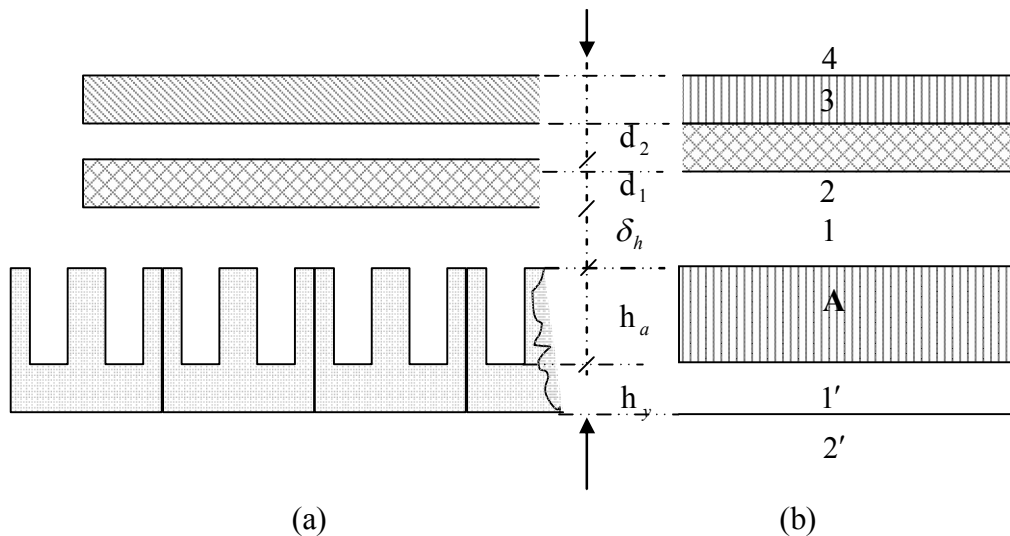
Bu konuda yapılan yayınlarda henüz sınır elamanları metodunun lineer motor analizine uygulanması açıklanmaktadır. Bu metodun yukarıda açıklanan (kısım 3. 5) metottan farkı, sonlu elamanlar metodunda modelin bütün bölgelerinde yayılmış düğümlerindeki değişkenlerin bilinmeyen değerleri için çözüm aranırken, sınır elemanları metodunda modelin değişik bölgeleri arasındaki sınırlı değişkenlerin bilinmeyen değerleri için çözüm aranmaktadır. Daha sonra bu sınır bölgelerinde bulunan değişken değerlerinden gerekirse manyetik alan değerlerini bulmak mümkündür.

Sınır elamanları metodu daha çok makine mühendisliği konuları analizinde popüler olmuştur ancak, elektromanyetik alan problemlerinin çözümü için hala gelişme aşamasındadır. Bu metodun bir dezavantajı, manyetik doymanın kolay bir şekilde göz önünde tutulmasıdır. Manyetik doymayı göz önünde tutmak için kullanılan teknikler, sonlu elamanlar metodunda olduğu gibi bilgisayar açısından büyük hafıza ve hesaplama zamanı gerektirmektedir. Bu metodun diğer bir dezavantajı çözüm aşamasında oluşturulan matrisler bünyelerinde bulundurduğu elamanlar bakımından, genellikle sonlu elamanlar çözümüyle ilgili seyrek matrislere kıyasla daha yoğun elamanlıdır. Sonlu elamanlar ve sınır elamanlar metodunu bir arada kullanılması muhtemelen avantaj sağlayacağı düşünülmektedir.

### 3. 8. Lineer Asenkron Motorun Teorik Analizi

Döner motorlarda primer sargılar kendi üzerlerine konulduğundan hava aralığındaki elektromanyetik alanlar yarım periyotları kutup adımına eşit olarak uzaya göre periyodiktir. Bununla beraber lineer motorun kısa elamanı sonlu uzunluğa sahip ve açık uçludur, öncü ve kuyruk kenarları açıkça tanımlanabilir. Bundan dolayı lineer motorun hava aralığındaki elektromanyetik alanlar uzaya göre sürekli periyodik olmayıp motorun uzunluğu boyunca değişir. Döner motorlar ile lineer motorlar arasındaki bu farktan dolayı döner motorlarda döner manyetik alan oluşurken lineer motorlarda yürüyen manyetik alan oluşmaktadır.

### 3. 9. Lineer Asenkron Motorun Çok Katlı Eşdeğer devresi



Şekil 3. 8. : (a) LAM ' un konstruksiyonu

(b) LAM ın çok katlı analiz şekli

- $d_1$  : ferromanyetik olmayan malzeme kalınlığı
- $d_2$  : ferromanyetik malzeme kalınlığı
- $\delta_h$  : hava aralığı
- $h_a$  : aktif çekirdek kalınlığı
- $h_y$  : yaka (boyunduruk) kalınlığı

Şekil 3. 8 (a) da tasarımı yapılmış ve oluşturulmuş olan primeri sabit, rotoru ise hareketli olan LAM' un konstrüksiyonu görülmektedir.

1945 yılında asenkron makinaların Maxwell denklemlerini kullanarak; dairesel fazör diyagramını kurulması nedeniyle optimum modelleme yöntemi kullanılmıştır [9,10]. Bu nedenle araştırmacılar motoru katmanlara ayırmıştır, elektrik devreleri ile analizi için gerçek ortamın özelliklerinin ortalama değerleri alınmıştır. Gerçekte an izotrop olan bu ortamlar homojen modelde koordinat eksenleri yönünde izotrop ( homojen ) olurlar. Bu yöntemi kullanılarak tasarlanmış makinanın izotrop rotor tabakaları ile modeli şekil 3. 8 (b) de görülmektedir. Burada rotor tabakaları x eksenini boyunca yönlendirilmişlerdir [9,11]. Lineer motorun modelinde aşağıdaki işaretler kullanılmıştır:

Şekil 3. 8 (b) de A vektörü z eksenini boyunca yönlendirilmiş ortamın akı yoğunluğu, 1- hava aralığı, 2- para manyetik malzeme (alüminyum), 3- Ferromanyetik olmayan ( dielektrik malzeme) tabaka ve 4- Sonsuz hava katmanıdır.

Düzlemsel elektromanyetik dalgaların yayılması teorisinden bir ortamdan diğer ortama geçen elektromanyetik alanların teğet bileşenleri eşit olduğundan ortamların sonundaki dalgaların karakteristik veya dalga dirençlerinin kompleks değerleri:

$$\bar{Z}_d = \bar{E}_1 / \bar{H}_z \quad (3. 14)$$

İfadesinden belirlenmektedir ve ohmlarla ölçülmektedir [12]. Öte yandan EMA' ların klasik teorisinden bilinmektedir ki çoklu katlardan geçen EMA' ların analizi nedeniyle iki kapılı devrelerde zincir bağlı devrelerin teorisini kullanmak çözüm olur. Bu teoriye göre her bir  $\delta$  kalınlığındaki katman bir iki kapılı gibi alınabilir. Bu durumda sınır katında teğet bileşenleri eşit olan elektrik ve manyetik alan şiddetleri:

$$\begin{aligned} \bar{E}_1, \bar{H}_1 \text{ ve } \bar{E}_2, \bar{H}_2 \text{ ile işaretlenirse} \\ \left. \begin{aligned} \bar{E}_1 &= \bar{E}_2 Ch \bar{J} \delta + \bar{H}_2 \bar{Z}_d \cdot Sh \bar{J} \delta \\ \bar{H}_1 &= \frac{\bar{E}_2}{\bar{Z}_d} \cdot Sh \bar{J} \delta + \bar{H}_2 \cdot Ch \bar{J} \delta \end{aligned} \right\} \quad (3. 15) \end{aligned}$$



olarak yazılabilir ki burada

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (3.16)$$

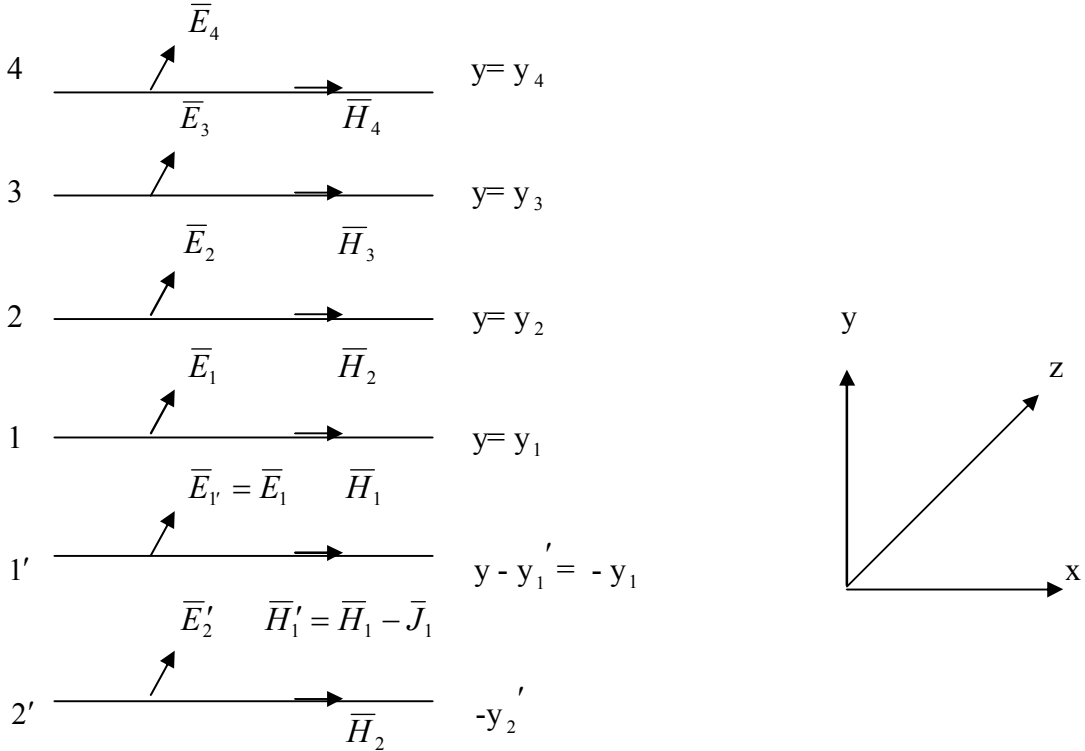
Yayıma katsayısı olarak adlandırılır. Burada  $\alpha$  sönme katsayısı,  $\beta$  fazör katsayısıdır. Makinayı besleyen akım sinüs formunda değişiyorsa ve kenar kaynaktan beslendiğinden akı yoğunluğu

$$j_k = J_{km} \cdot \text{Sin}(\omega t - ax + \varphi)$$

Şeklin de veya

$$j_k = J_m [J_{km} e^{j\psi} e^{-jax} e^{j\omega t}] = J_m [J_{km} e^{-jax} e^{j\omega t}] = J_m [J_{km}(x) e^{j\omega t}]$$

Şeklinde yazılabilir ve alanlarda sinüs formunda değiştiği için yukarıda ki şekilde yazılabilir. Burada  $a = \pi / \tau$  dalga katsayısıdır. Bu durumda alanı x-y koordinatlarında karakterize eden her bir büyüklük ancak y ekseninin bir fonksiyonu olur.



Şekil 3. 9. : Lineer asenkron motorun çok katlı modeli

Şekil 3. 9 da görülen çok katlı modelde her bir kat kendi karakteristiklerine (manyetik geçirgenliği  $\mu_x$  ve  $\mu_y$ , elektrik geçirgenliği  $\sigma_z$ ) sahiptirler. Analizi

kolaylaştırmak nedeniyle kalınlığı  $h_a$  olan 1 ve 1' katmanlarıyla sınırlanan aktif katı, sonsuz ince ve akı yoğunluğu  $J$  olan bir kat şeklinde olduğunu varsayalım. İki eksenli sistemlerde alan; x ve y boyunca alan bileşenleri ile karakterize edilirler. Bu durumda Maxwell denklemleri, dışarıdan akım olmayan ve  $v$  hızı ile sabit koordinat sisteminde hareket eden ihtiyari kat için Helmholtz denklemleri ne dönüşür.

$$\bar{J}_m = \text{rot} \bar{H}_m = \bar{e}_2 \left( \frac{\partial \bar{H}_{my}}{\partial x} - \frac{\partial \bar{H}_{mx}}{\partial y} \right) = \sigma (\bar{E}_m + V_x \bar{B}_m) \quad (3.17)$$

$$\bar{B}_m = \text{rot} \bar{A}_m = \bar{e}_x \frac{\partial \bar{A}_m}{\partial y} - \bar{e}_y \frac{\partial \bar{A}_m}{\partial x} = \bar{e}_x \bar{B}_{mx} + \bar{e}_y \bar{B}_{my} \quad (3.18)$$

Burada A elektromanyetik alanın vektör potansiyeli,  $\bar{J}_m$  akım yoğunluğu vektörü,  $V$  uzayda hızın yönünü belirleyen vektör ( $V \times B_m = e_z v B_m$ ) (7.4)' de  $\bar{B}_m = \mu \bar{H}_m$  göz önüne alınırsa

$$\bar{H}_{xm} = \frac{1}{\mu_x} \bar{B}_{mx} = \frac{1}{\mu_x} \frac{\partial \bar{A}_m}{\partial y} \quad (3.19)$$

$$\bar{H}_{ym} = \frac{1}{\mu_y} \bar{B}_{my} = -\frac{1}{\mu_y} \frac{\partial \bar{A}_m}{\partial x} \quad (3.20)$$

ve bir dizi işlemler yapılarak Helmholtz denklemleri aşağıdaki gibi alınır [11,13].

$$\frac{\partial^2 \bar{A}_m}{\partial y^2} - \left( \frac{\mu_x}{\mu_y} a^2 + j\omega S \mu_x \sigma \right) \bar{A}_m = 0 \quad (3.21)$$

Veya

$$\frac{\partial^2 \bar{A}_m}{\partial y^2} - \gamma^2 \bar{A}_m = 0 \quad (3.22)$$

Burada

$$\gamma^2 = \frac{\mu_x}{\mu_y} a^2 + \bar{J} \mu_x \sigma \omega S \quad (3.23)$$

ve

$\gamma = \alpha + j\beta$  olduğundan elektro manyetik alanın y eksenini boyunca yayılma hızı

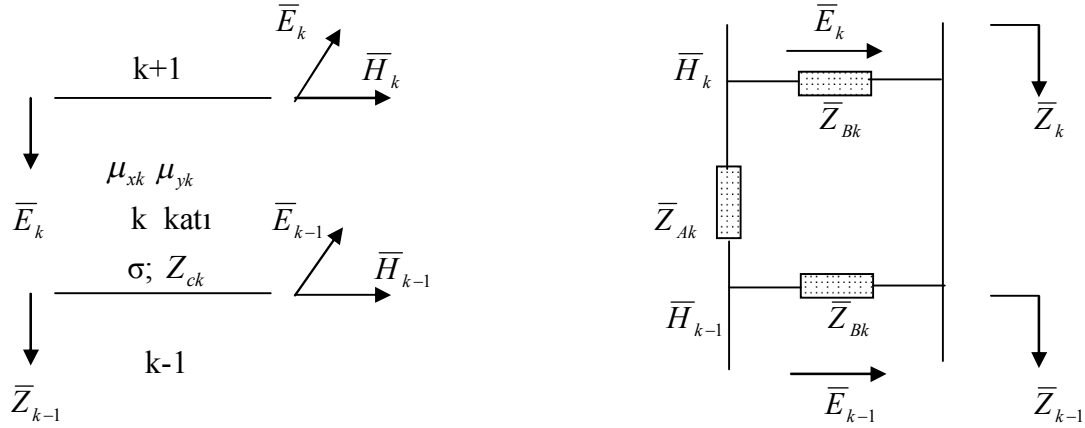
$$v_y = \frac{\omega}{\beta} \quad (3.24)$$

Dağlanın ( 2. katmanın ) x eksenini boyunca hareket hızı ise

$$v_x = v_s(1 - S) = 2\pi f(1 - S) = \frac{\omega}{a}(1 - S) \quad (3.25)$$

ifadesi ile belirlenir.

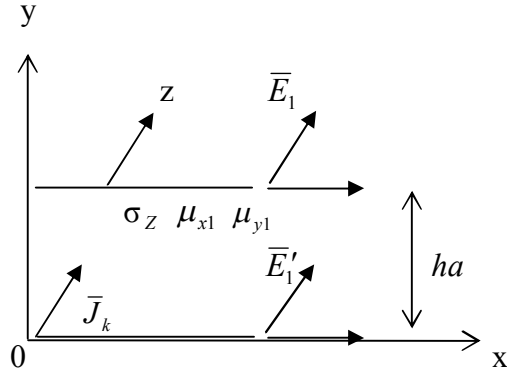
İki kapılıların zincir bağlanması teorisini kullanarak Şekil 3. 9 da verilmiş olan asenkron motorun çok katlı modelinin k. katının analog modelini aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi gösterilebilir. Her bir kat yüzeylere göre simetrik olduğu için her iki kat " T " ve " Π " eşdeğer devre şeklinde gösterilebilir [9,12,13].



**Şekil 3. 10.** ( a): LAM ' ın k. katı ( b): LAM ' ın iki kapılı analog " Π " eşdeğer devresi

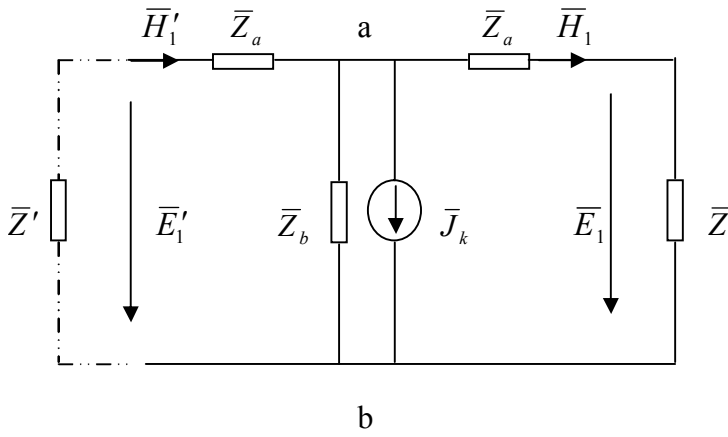
Şekil 3. 10: (a) da LAM ' ın k. katı, Şekil 3.10 (b) de ise LAM ' ın " Π " şekilli simetrik iki kapılı analog eşdeğer devresi görülmektedir. Bu devredeki dirençler alanın ve ortamın karakteristik dirençleri şeklinde gösterilmiştir. Şekil 3. 9 daki çok katlı modelin analog devresi A aktif katma paralel bağlanmış şekil deki iki paralel devre gibi gösterilebilirler.

A katındaki iki uçlu elektrik devresinde akım kaynağı gibi gösterilebilir.

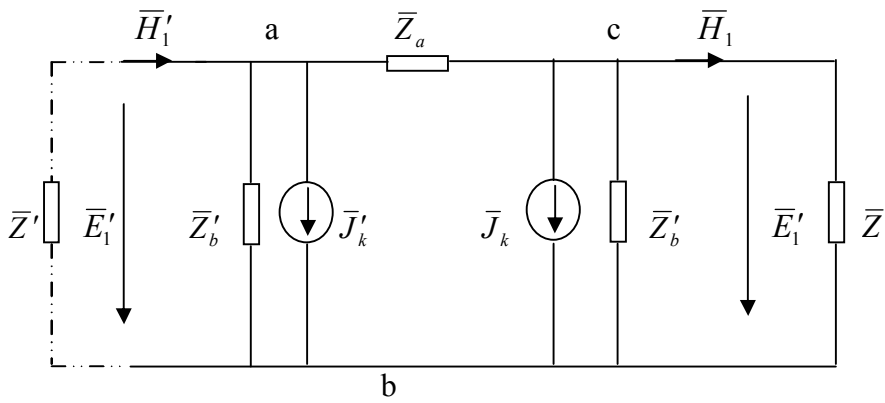


**Şekil 3. 11. :** Aktif kat

Aktif olan kat  $ha$  yüksekliğine sahip olup parametreleri koordinat eksenleri boyunca eşit yayılmış homojen ortama sahiptirler.

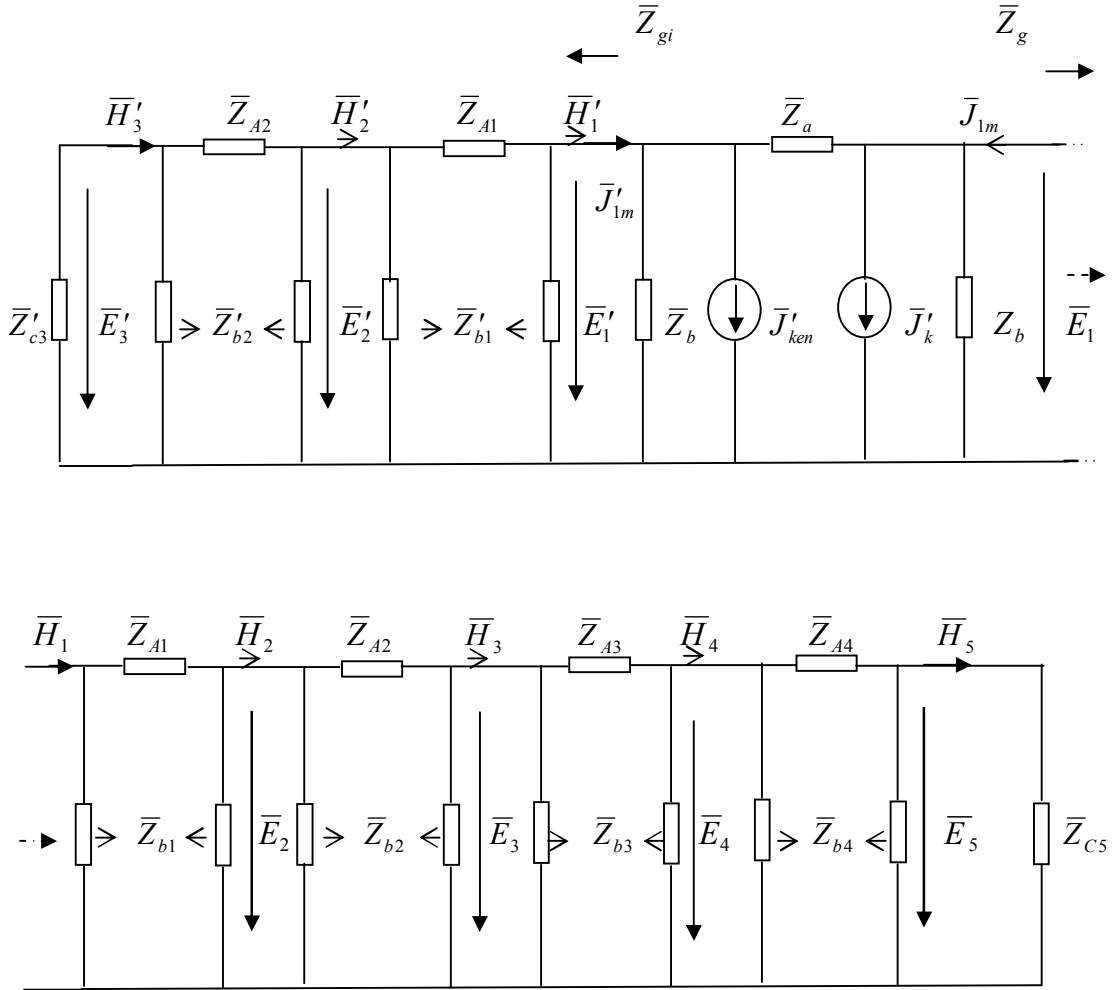


**Şekil 3. 12 (a)** Aktif katın "T" şeklinde ki analog modeli



**Şekil 3. 12. (b)** Aktif katın "Π" şeklinde ki analog modeli

Giriş aktif katma kenardan verilen akım; z eksenı boyunca yönelen  $\bar{J}_k$  vektörü ile karakterize edilir. Şekil 3. 8 deki ha kalınlığındaki aktif kat şekil 3. 12 (a) da ki ‘T’ şekil 3. 12 (b) de ki ‘’ II ’’ şekilli analog devre şeklinde gösterilebilir.



Şekil 3. 13. : Çok katlı modele denk düşen analog devre

Şekil 3. 10 (b) ve şekil 3. 12 (b) deki devreler göz önüne alınırsa şekil 3. 8 deki LAM' in eşdeğer devresi şekil 3. 13 de ki gibi alınabilir.

Şekil 3. 13 de ki eşdeğer devreye denk gelen kompleks giriş direnci ifadesi

$$\bar{Z}_g = \frac{\bar{Z} \cdot \bar{Z}'}{\bar{Z} + \bar{Z}'} \quad (3. 26)$$

Şekil 3.10 e göre k. katın giriş direnci [12];

$$\bar{Z}_K = \frac{\bar{E}_K}{\bar{H}_K} = \bar{Z}_{CK} = \frac{\bar{Z}_{K+1} Ch \bar{\alpha}_k \delta_k + \bar{Z}_{CK} Sh \bar{\alpha}_k \delta_k}{\bar{Z}_{K+1} Sh \bar{\alpha}_k \delta_k + \bar{Z}_{CK} Ch \bar{\alpha}_k \delta_k} = \bar{Z}_{CK} \frac{\bar{Z}_{K+1} + \bar{Z}_{CK} th \bar{\alpha}_k \delta_k}{\bar{Z}_{K+1} th \bar{\alpha}_k \delta_k + \bar{Z}_{CK}} \quad (3. 27)$$

Burada  $\bar{Z}_{ck}$  k. kattaki iki kapılının dalga veya karakteristik direncidir ve

$$\bar{Z}_{CK} = j\omega\mu_{sk} / \bar{\alpha}_k \quad (3. 28)$$

$$\bar{Z}_{K+1} = \bar{E}_{K+1} / \bar{H}_{K+1} \quad (3. 29)$$

(3. 27), (3. 28), (3. 29) Şeklindeki denklemler tüm katlar için yazılabilir ve bu denklemlere göre (3. 26) ifadesinden kompleks giriş direnci  $\bar{Z}_g$  hesaplanır. Bu durumda

$$\bar{E}'_{1m} = \bar{E}_{1m} = -\bar{Z}_g \bar{J}_{1m} \quad (3. 30)$$

olur ve iki kapılının denklemleri kullanılarak istenen keyfi katın y koordinatına bağımlı olan alan karakteristikleri bulunur. İki kapılılar teorisine göre "Π" şekilli iki kapılının parametreleri iki kapılının  $\|\pi_k\|$  matris katsayıları ile belirlenir.

$$\|\pi_k\| = \begin{vmatrix} \bar{A}_{11} & \bar{A}_{12} \\ \bar{A}_{21} & \bar{A}_{22} \end{vmatrix}$$

Böylece istenilen kat için (  $y>0$  ve  $y<0$  ) yazılabilir.

$$\bar{Z}_{Ak} = \bar{A}_{12} = \bar{Z}_{Ck} Sh\bar{\alpha}_k \delta_k \quad (3. 31)$$

$$\bar{Z}_{Bk} = \frac{\bar{A}_{12}}{\bar{A}_{11} - 1} = \bar{Z}_{ck} \frac{Sh\bar{\alpha}_k \delta_k}{Ch\bar{\alpha}_k \delta_k - 1} \quad (3. 32)$$

Burada

$$\frac{\bar{Z}_{Ak}}{\bar{Z}_{Bk}} = Ch\bar{\alpha}_k \delta_k - 1 \quad (3. 33)$$

(3. 33) ifadesinde  $Cos\bar{\alpha}_k \delta_k = 1$  olduğunda  $\frac{\bar{Z}_{Ak}}{\bar{Z}_{Bk}} = 0$  olur. Pratikte birçok

durumda  $|\bar{Z}_{Ak}| \ll |\bar{Z}_{Bk}|$  olur.

Poyuting teorisine göre k katına y yönünde ulaşan enerji

$$\hat{S}_K = \pm 0,5 \left[ \bar{E}_{km} H_{km}^* - \bar{E}_{k+1,m} H_{k+1,m}^* \right] \quad (3. 34)$$

Şeklinde yazılır ki burada " - " işareti  $y < 0$  da , " + " işareti  $y > 0$  da olur.

K katında faydalı işe harcanan enerji,  $W/m^2$  ;

$$P_k = \text{Re}[\hat{S}_k] \quad (3. 35)$$

Elektrik kayıplarına harcanan enerji,  $W/m^2$  ;

$$P_{e.k} = P_k . S_k \quad (3. 36)$$

K katının  $s_k$  kayması ile x eksenini boyunca hareket ettirilmesi için gereken mekaniksel enerji,  $W/m^2$  ;

$$P_{mek,k} = P_k(1 - s_k) \quad (3.37)$$

K katının x eksenini boyunca birim alanını etkileyen elektromanyetik kuvvet,  $N/m^2$  ;

$$F_k = \frac{P_k(1 - s)}{\delta_k} = \frac{P_k}{\delta_{senkron}} = \frac{P_k}{2f_1\tau} = \frac{a}{\omega} \cdot P_k \quad (3.38)$$

Burada  $a = \frac{\pi}{\tau}$  dur.

(3.22) denklemi şekil 3.12 deki aktif kat için

$$\frac{\partial^2 \bar{A}_m}{\partial y^2} - \alpha^2 \bar{A}_m = -\mu_x \bar{J}_{ken} \quad (3.39)$$

Şeklinde yazılır. (3.39) denkleminin çözümünden  $\mu_y = \infty$  ve  $\sigma_z = 0$  durumunda aktif katın parametreleri belirlenir.

$$\left. \begin{aligned} \bar{Z}_a &= j\omega\mu_x \frac{ha}{2} \\ \bar{Z}_b &= -j\omega\mu_x \frac{ha}{6} \\ \bar{J}_m &= \bar{J}_{km} \cdot ha = I_m \end{aligned} \right\} \quad (3.40)$$

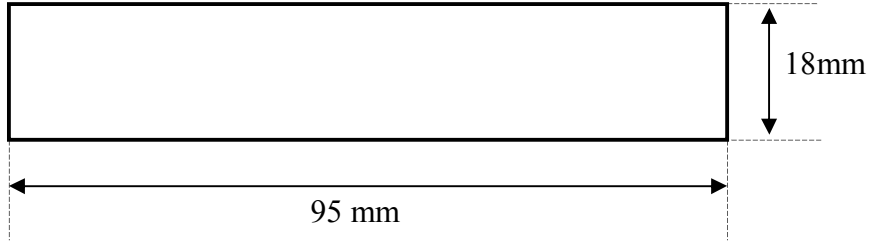
Hesaplamalarda  $|\bar{J}_{1m}| = |\bar{J}'_{1m}|$  ve  $\bar{J}_k = \bar{J}'_{1k} + \bar{J}_{1k}$  alınmalıdır.

### 3.10. Lineer Asenkron Motorun Tasarımı ve Hazırlanması

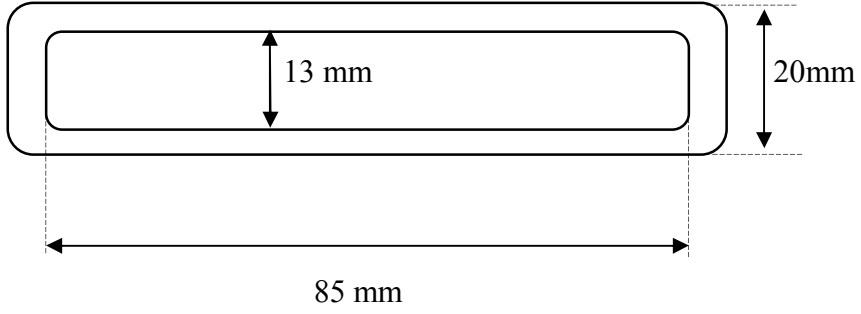
Lineer asenkron motorların tasarımı için geliştirilmiş yöntemler olmadığından ve her bir lineer motor özel amaçlar için kullanıldığından elimizde var olan malzemeler göz önünde bulundurularak lineer asenkron motorun tasarımı gerçekleştirilmiştir.

### 3.11. Lineer Asenkron Motora Ait Teknik Veriler

Oluşturulan lineer asenkron motorun 300 sipir olarak sarılan bobin yapısı ve E tipi trafo saç ölçüleri aşağıdaki gibidir.

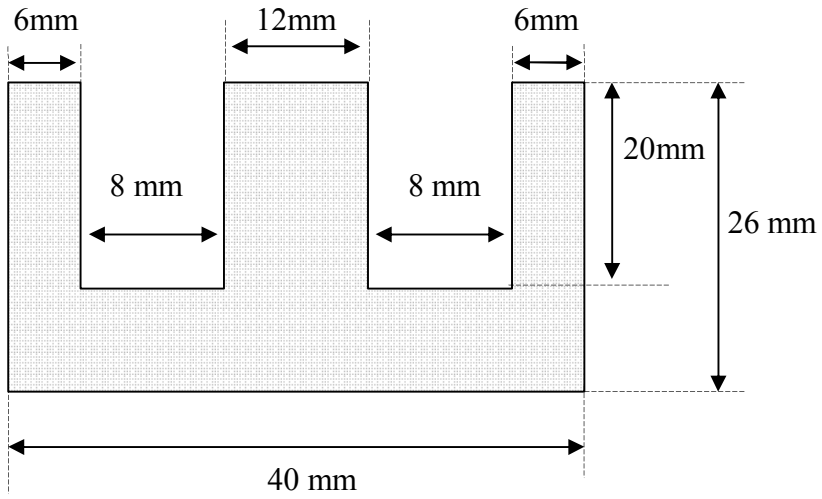


Yandan Görünüm



Üstten Görünüm

Şekil 3. 14. Lineer asenkron motora ait 300 spirden oluşan bobin ölçüleri



Şekil 3. 15. Primeri oluşturan E I42/VM530 A tip trafo saç ölçüleri

Oluşturulan lineer asenkron motora ait teknik ölçüler tablo halinde aşağıda belirtilmiştir.

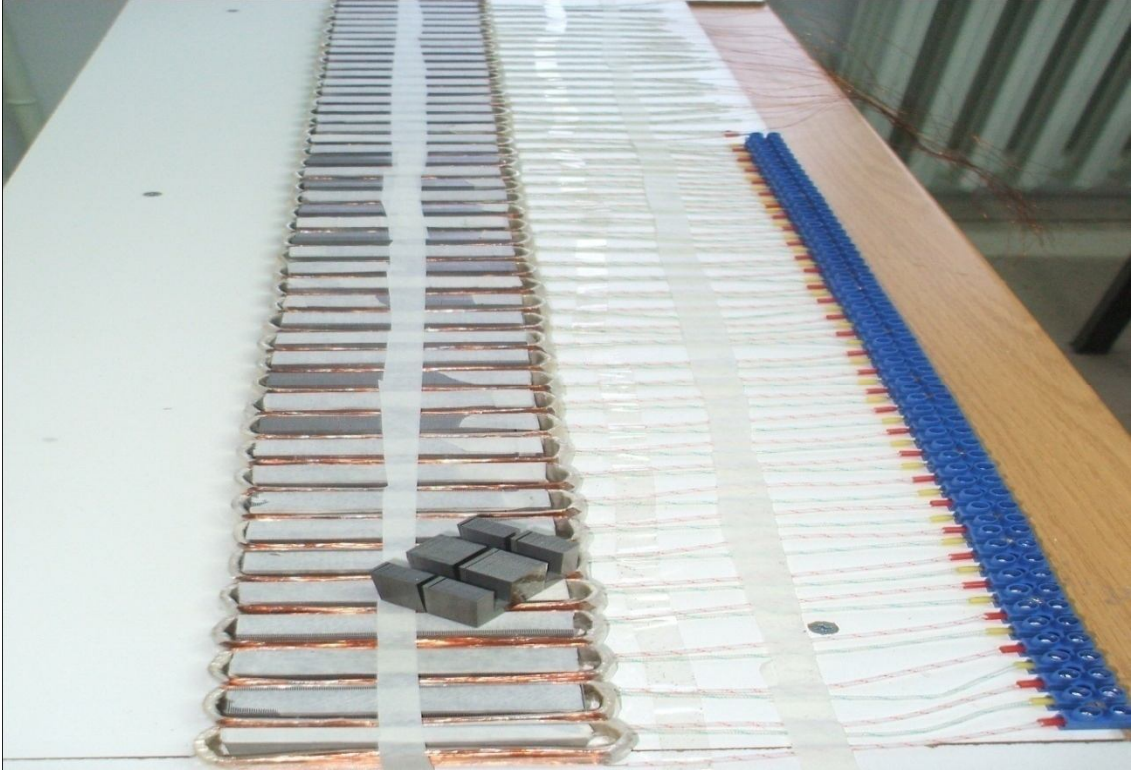


**Tablo 3. 2.** Lineer asenkron motorun teknik verileri

Açıklama	Değer	Birim
Kutup adımı	62	mm
Çift kutupların sayısı	16	-
Primer uzunluğu	1000	mm
Primer genişliği	80	mm
Sekonder alüminyum levhanın ölçüleri	1,2x120x120	mm
Sekonder çelik levhanın ölçüleri	1,2x120x120	mm
Primer ve sekonder arası hava aralığı	0,3	mm
Tek bir bobin sarım (spir) sayısı	300	Tur
E tipi silisli trafo sacı ( EI42/VM530 A ) kalınlığı	0,5	mm
Şebeke frekansı	50	Hz
İnvertör frekans aralığı	0-60	Hz
Faz gerilimi	220	V
Kullanılan EMAYE Bobin teli kesiti	0,30	mm

### 3. 12. Oluşturulan Lineer Asenkron Motorun Görünümü

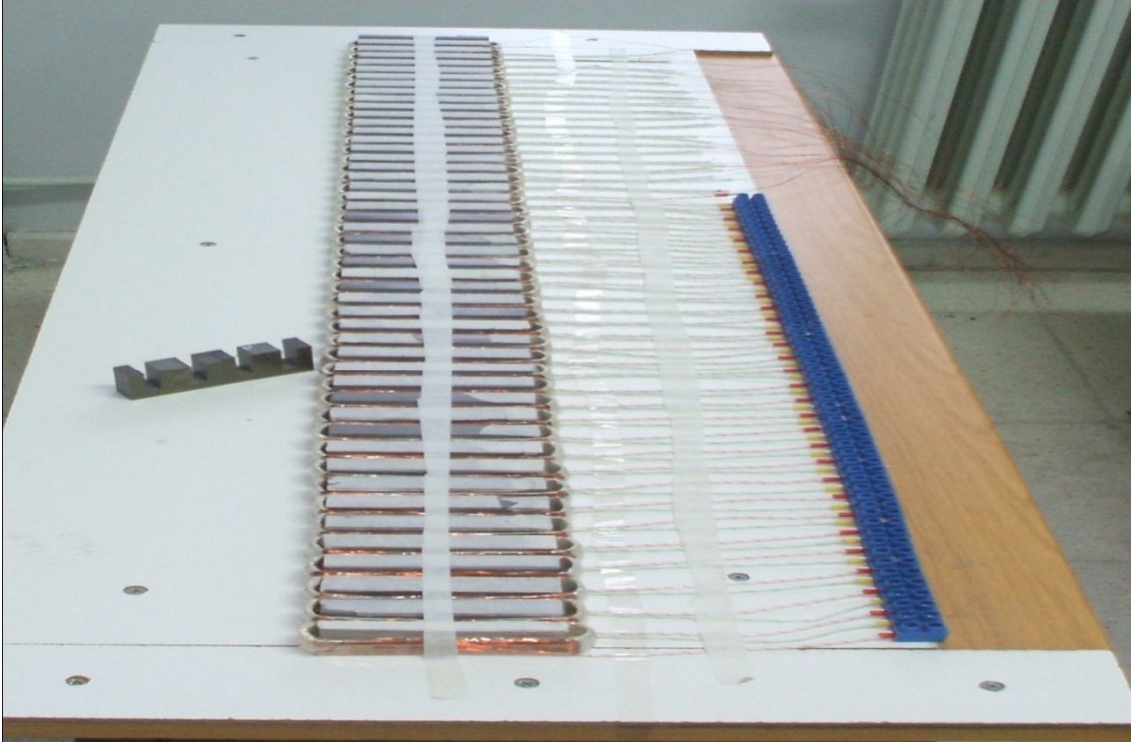
Tasarım aşamasında lineer asenkron motora ait primer, sekonder, bobinler ve bobin sarım çıkışı ile lineer motorun yapımında kullanılan malzemeler aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir. Yine farklı tip sekonder örnekleri tasarlanmış olup bunlara ait şekillerde aşağıda gösterilmiştir.



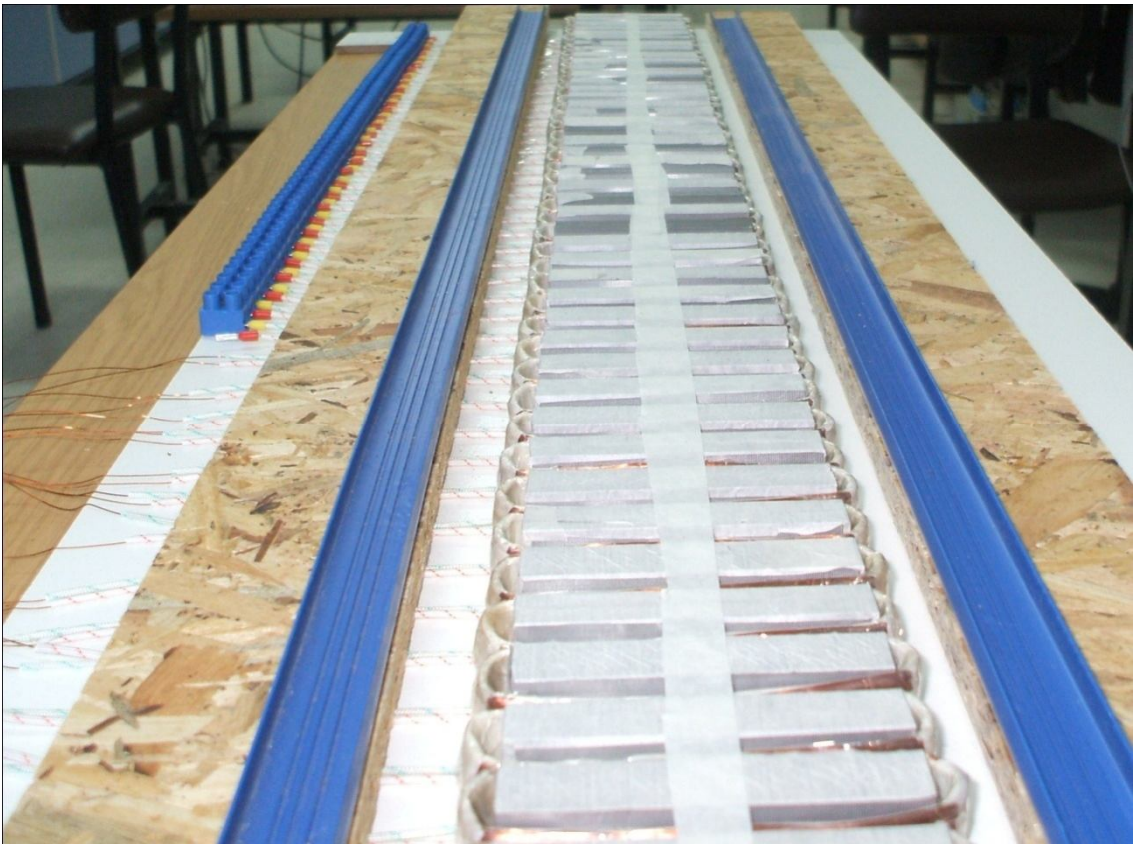
Şekil 3. 16. Bobinler klemens ve E tipi trafo sacı



Şekil 3. 17. Primer ve rotor

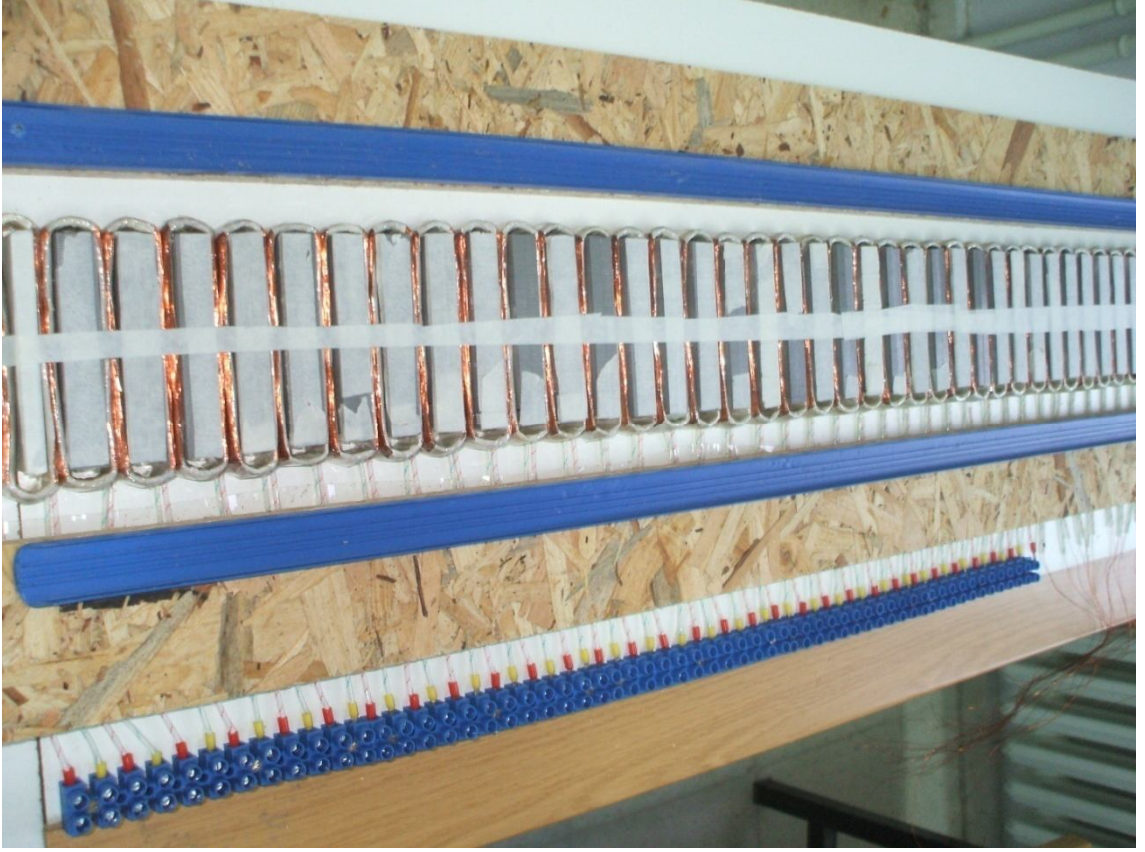


Şekil 3. 18. E tipi sac ve primer bobinleri



Şekil 3. 19. Ray ve bobinler





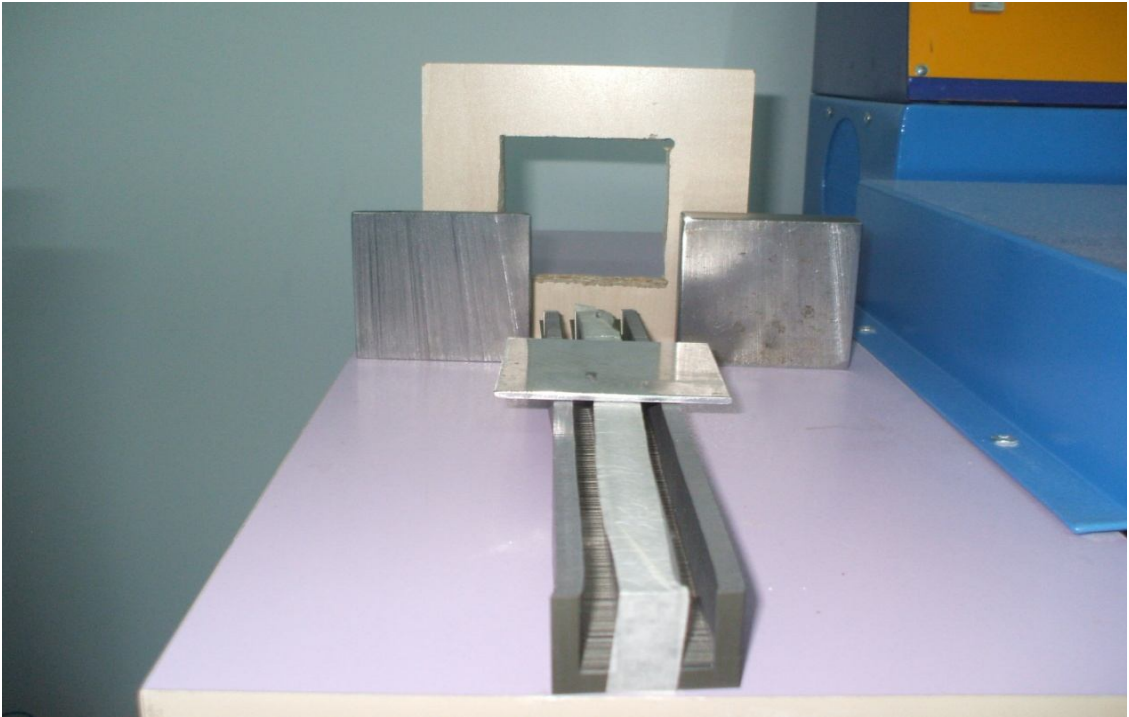
**Şekil 3. 20.** Ray ve bobinler



**Şekil 3. 21.** Ray ve bobinler

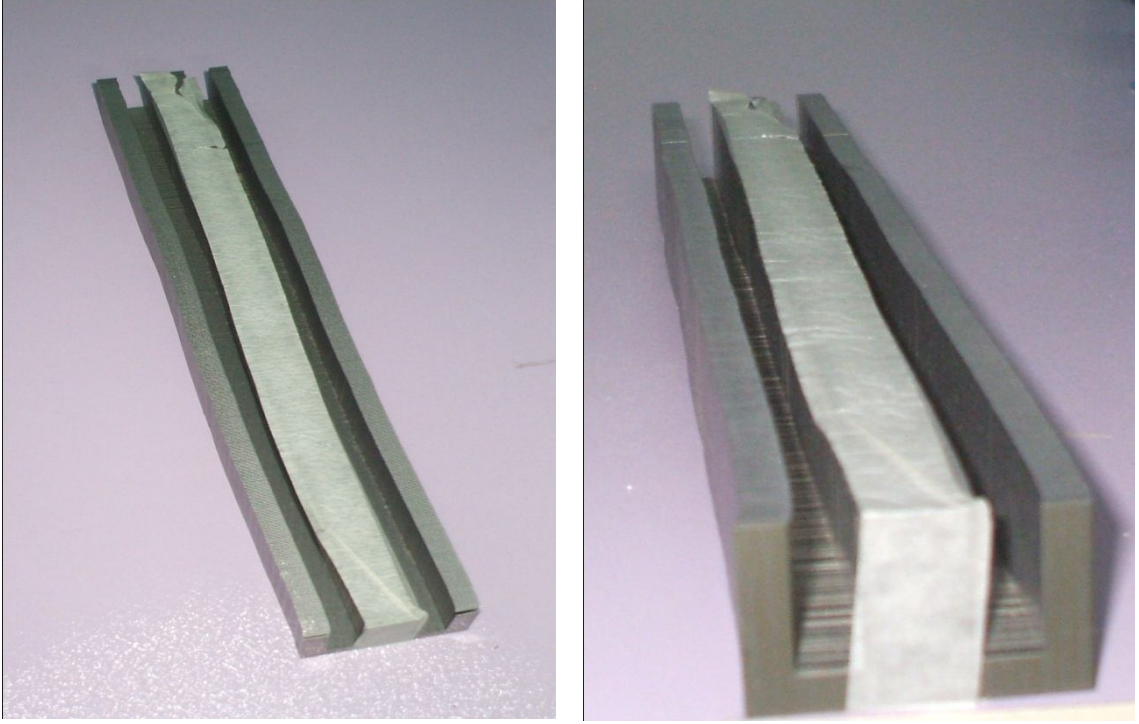


Şekil 3. 22. Rotor parçaları ( alüminyum ve demir)

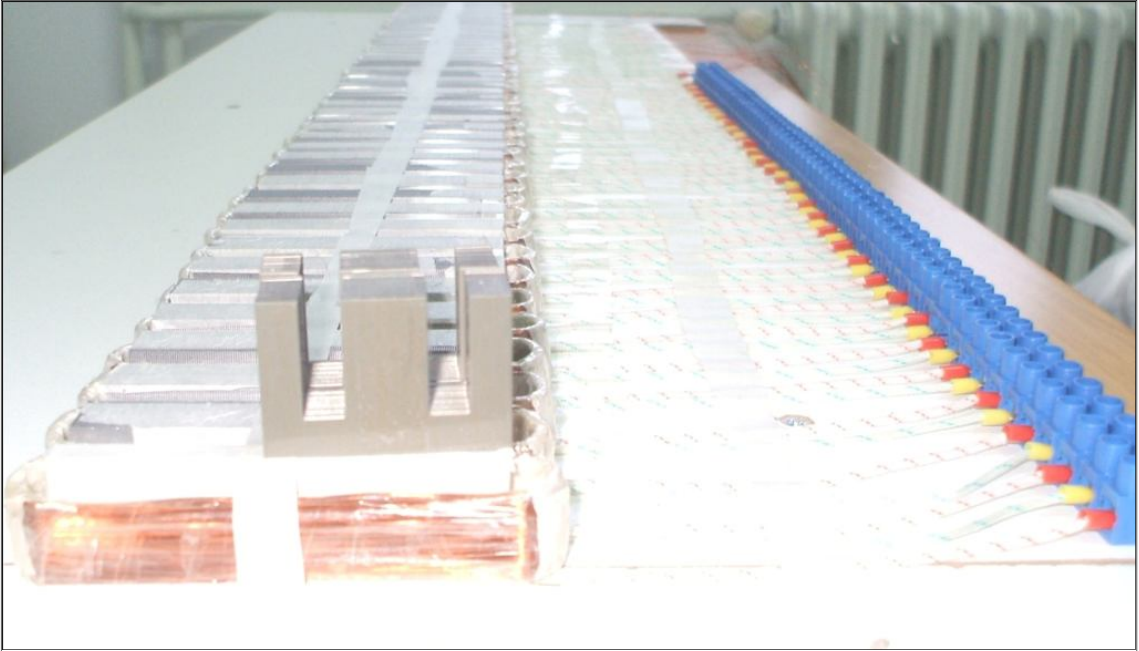


Şekil 3. 23. Rotor parçaları ve E tipi trafo sac dizisi

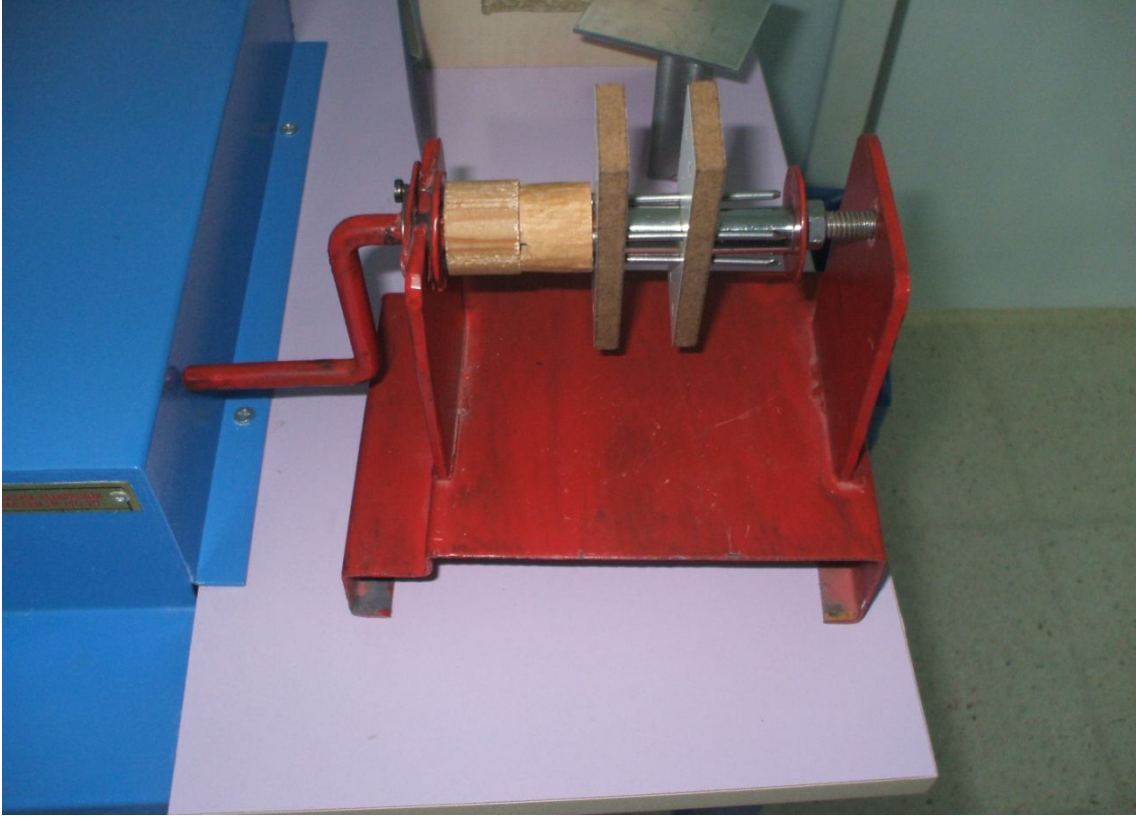




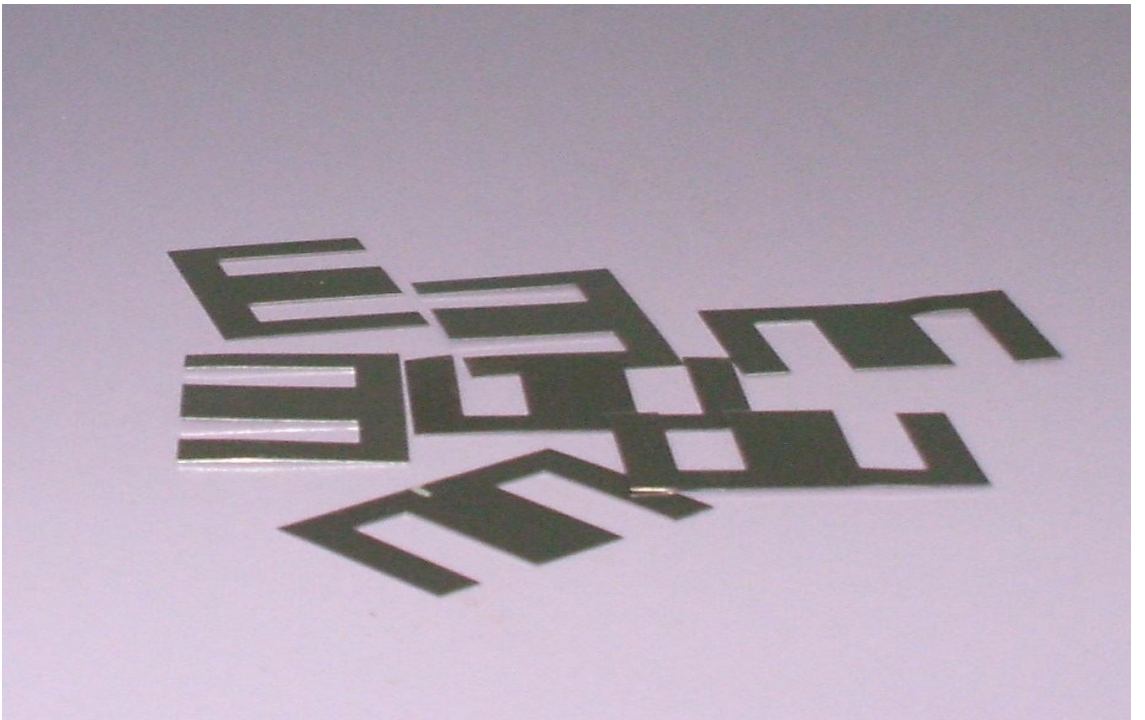
**Şekil 3. 24.** E tipi trafo sac dizisi



**Şekil 3. 25.** Bobinler trafo sacı ve klemens bağlantıları

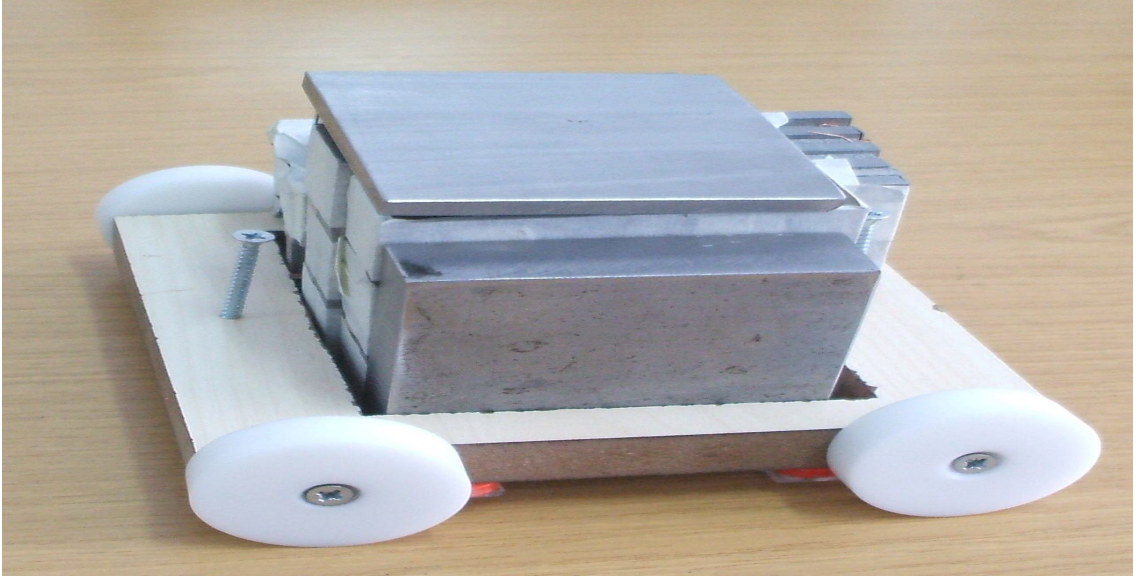


Şekil 3. 26. Bobin Sarım Çıkrığı

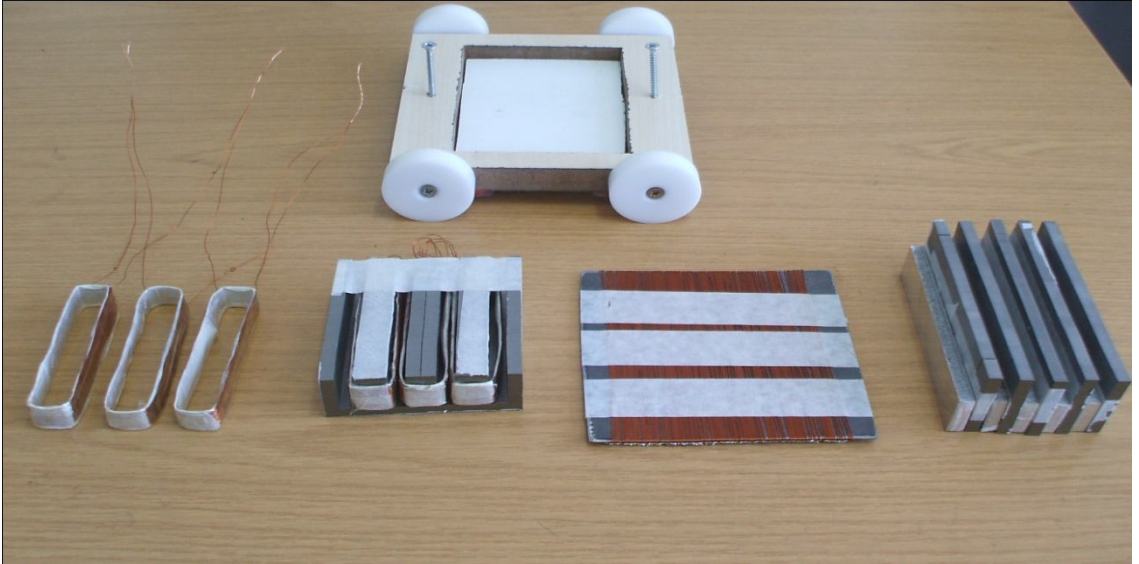


Şekil 3. 27. E Tipi Trafo Sac Parçaları

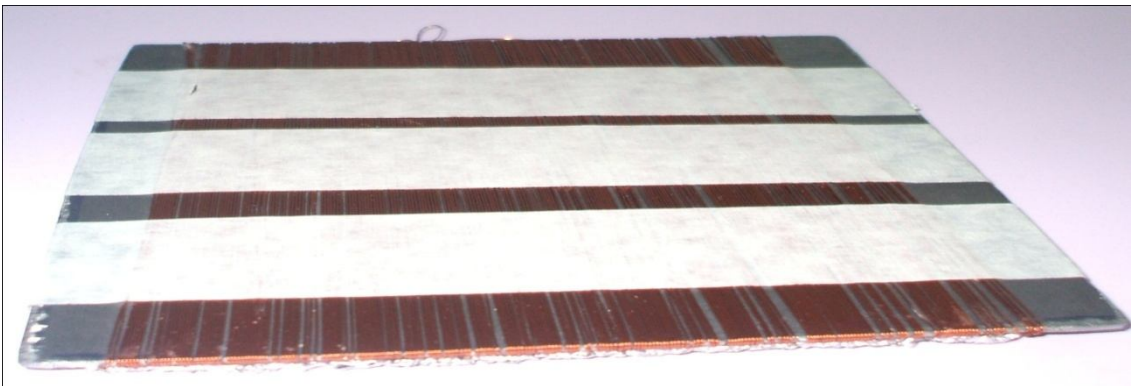




**Şekil 3. 28.** Sekonderin Yüklü Hali

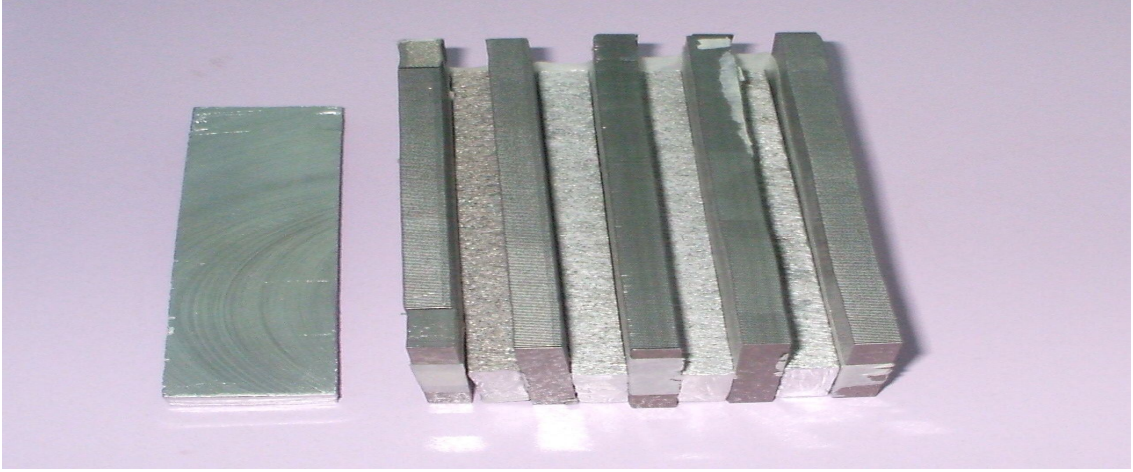


**Şekil 3. 29.** Denenen Farklı Çeşit Sekonder Örnekleri

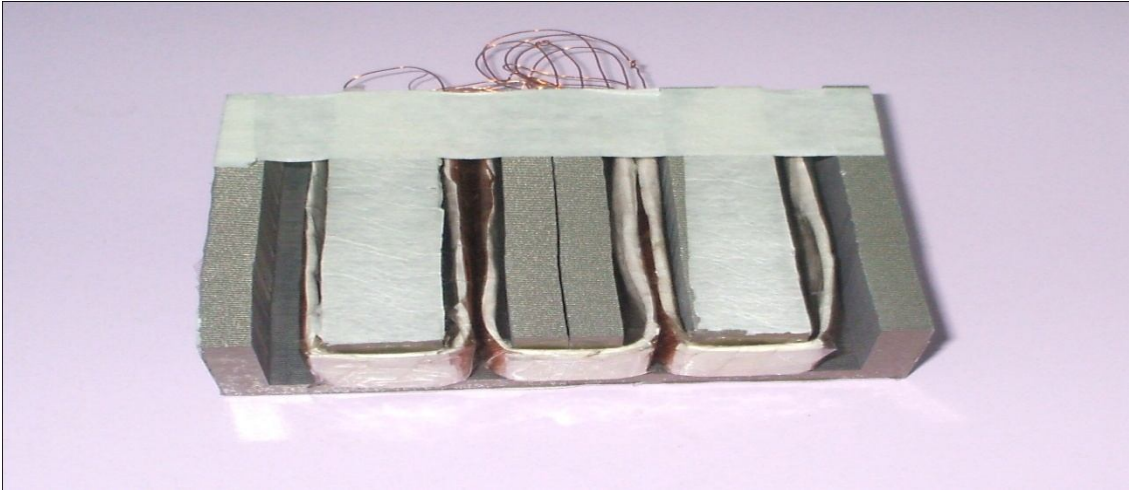


**Şekil 3. 30.** Bobin Teli Sarılarak Oluşturulan Sekonder

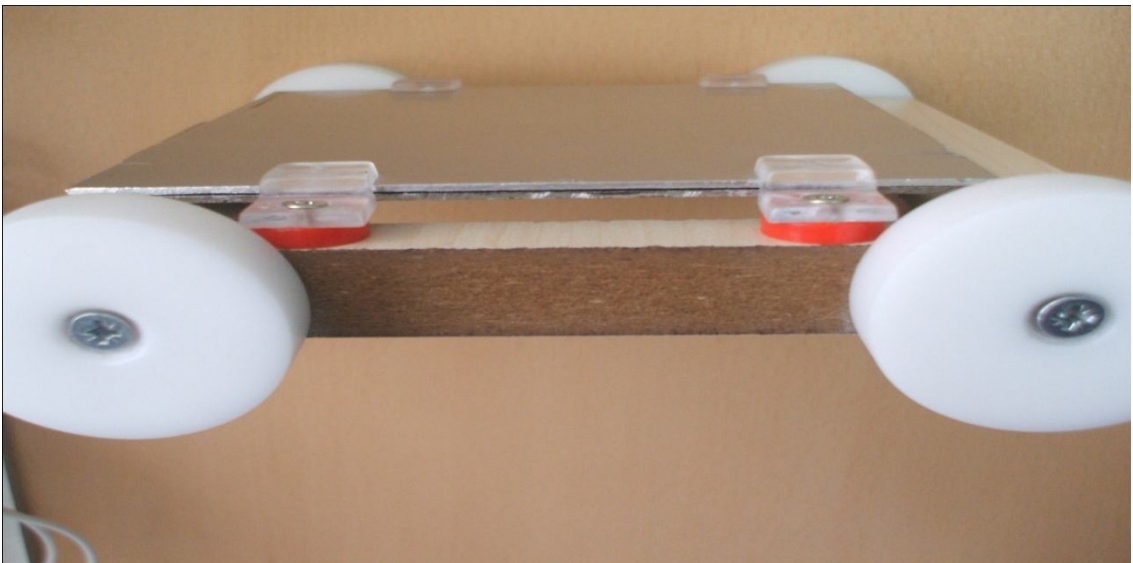




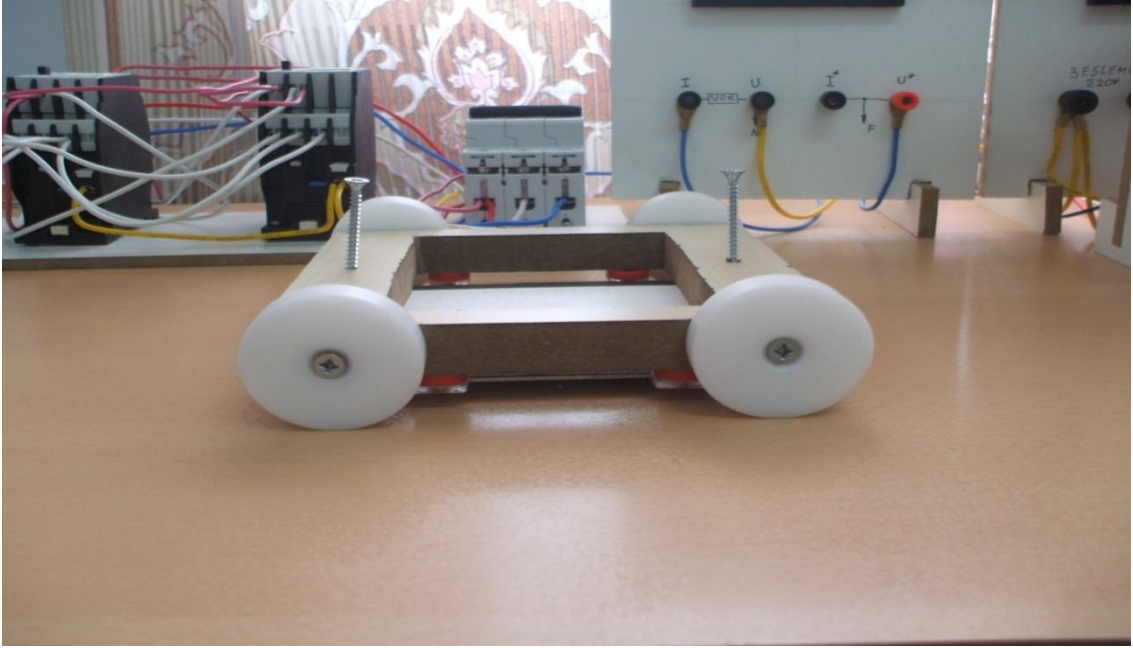
**Şekil 3. 31.** Alüminyum Çubuklu Rotor



**Şekil 3. 32.** Bobin Teli ile Oluşturulmuş Rotor

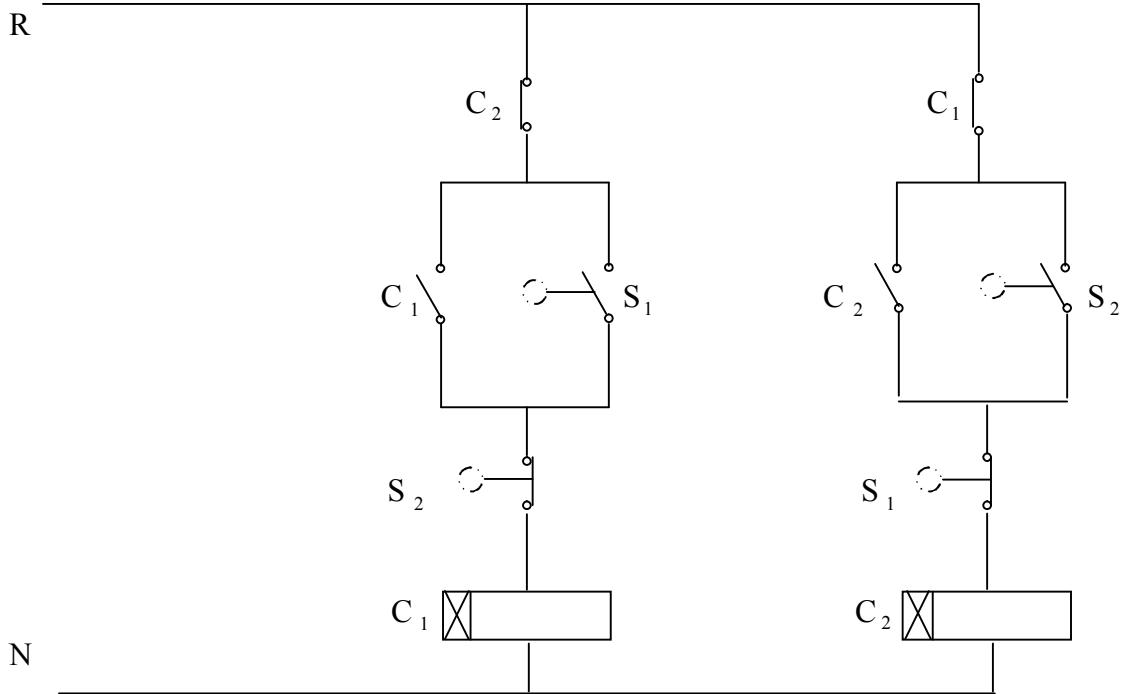


**Şekil 3. 33.** Sekonderin Alttan Görünümü ( Taşıyıcı Araba )



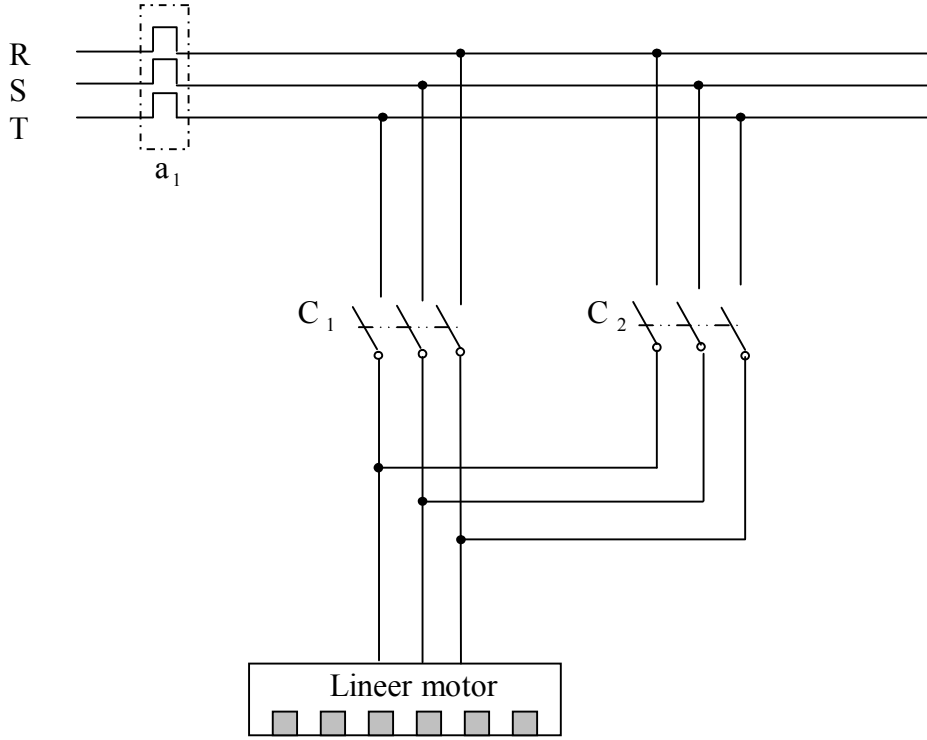
Şekil 3. 34. Sekonder Üstten Görünüm

### 3. 13. Linear Motor Uygulamasına Ait Kumanda Devresi ve Güç Devresi



( Not:  $C_1$  ve  $C_2$  : ileri - geri hareket kontaktörleri,  $S_1$  ve  $S_2$  ileri - geri sınır anahtarları )

Şekil 3. 35. Lineer asenkron motorun ileri - geri hareket kumanda devre şeması



Şekil 3. 36. Lineer asenkron motorun ileri - geri hareket güç devre şeması

### 3. 14. Sonuç

Bu bölümde lineer asenkron motorlarda kullanılan analiz tekniklerinden bahsedilmiştir. Şimdiye kadar geliştirilen analiz tekniklerini 3 gruba ayırmış ve bunların

- Bir, iki ve üç boyutlu doğrudan manyetik alan analizi metodu
- Katman ve Fourier teknikleri kullanılarak geliştirilen manyetik alan analizi
- Sonlu elamanlar ve sınır elamanları teknikleri kullanılarak geliştirilen manyetik alan analizi metotları olarak açıklanmıştır. Kullanılan bu metotların uç etkilerinin hesaplanmasında yeterlilikleri ve oluşturulan çok sayıdaki denklemlerin paket programlar ile bilgisayarlarla çözümünün her geçen gün daha da kolaylaşacağı vurgulanmıştır.

48 bobin bir araya getirilerek ve E tipi saçlar yardımıyla 1000 mm uzunluğunda 80 mm genişliğinde primer oluşturulmuştur. Rotor kısmı ise 1,2 x 120 x 120 mm boyutlarında demir ve alüminyum saç tabakalardan yapılmıştır.

Oluşturulan bu lineer asenkron motor ileri ve geri çalışan kumanda ve güç devresiyle çalıştırılmıştır. Lineer asenkron motorun denemelerinde gerilimi değiştirilebilen oto transformatör ve frekansı değiştirilebilen mono faz girişli, trifaz çıkışlı invertör kullanılmıştır.

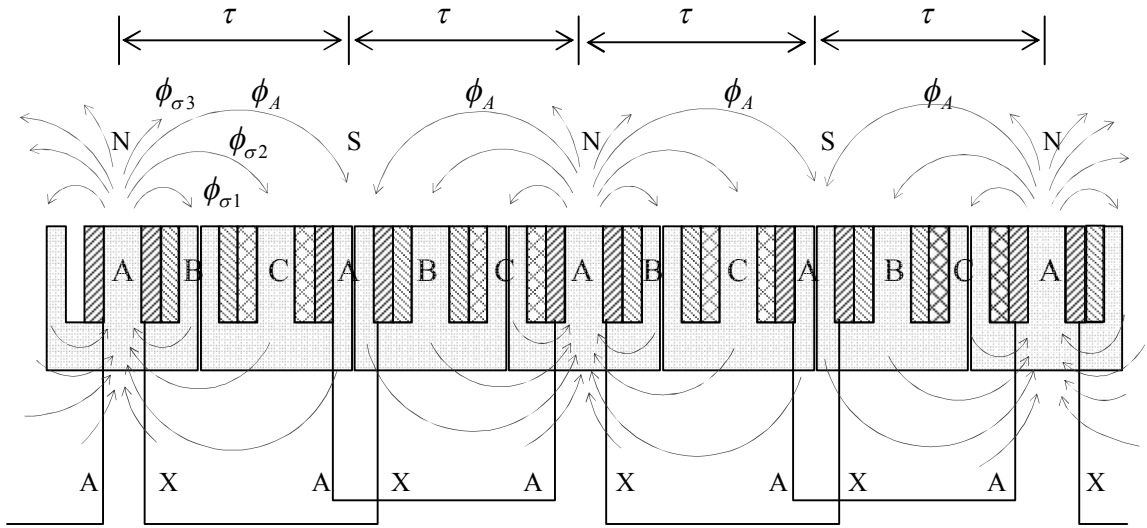
## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

### 4. 1. Giriş

Döner motorların primerinde döner alan oluşurken lineer asenkron motorda yürüyen manyetik alan oluşmaktadır. Lineer asenkron motorda oluşan yürüyen manyetik alanın çözümü grafiksel ve analitik olarak incelenmiştir. Lineer asenkron motorun bobinlerinin bağlantısı her faz için ayrı ayrı belirtilmiştir. Daha sonra deneysel analizi yapılmıştır.

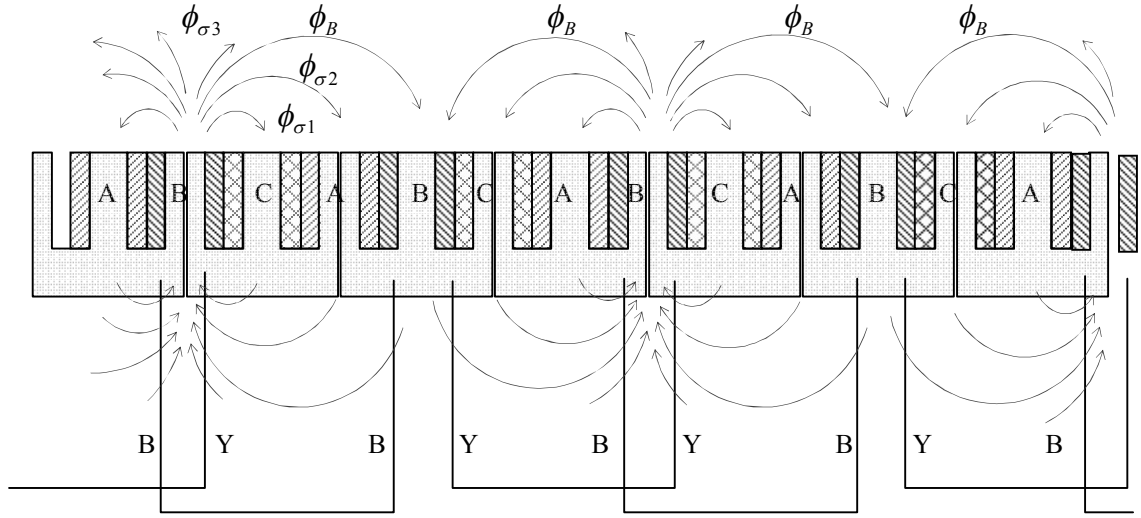
### 4. 2. Yürüyen Manyetik Alanın Grafiksel Çözümü

Şekil 4. 1. (a) da lineer asenkron motorun primerinde A fazının oluşturduğu manyetik akı çizgileri görülmektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi manyetik akının esas kısmı ikinci A bobininin çekirdeğinden kapanır. Aynı zamanda bu oluşan alanın  $\phi_{\sigma 1}$  ve  $\phi_{\sigma 2}$  dağılımlı kısımları B ve C çekirdeklerinden kapanır.  $\phi_{\sigma 3}$  dağılımlı kısmı ise devresini sonsuzda kapatır.



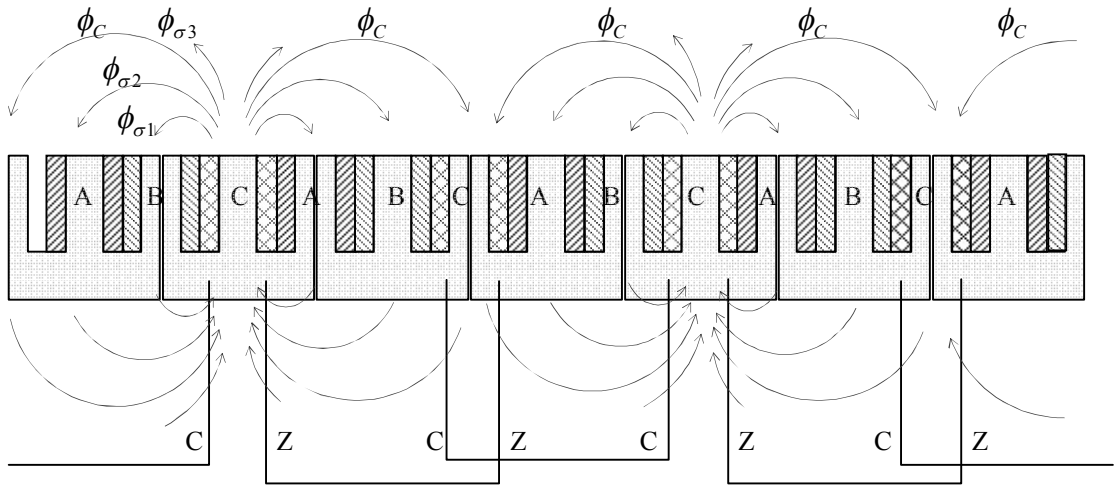
Şekil 4. 1. (a) A Fazı için primer manyetik akı çizgileri ve bobin bağlantı şekli

Şekil 4. 1. (b) de lineer asenkron motorun primerinde B fazının oluşturduğu manyetik akı çizgileri görülmektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi manyetik akının esas kısmı ikinci B bobininin çekirdeğinden kapanır. Aynı zamanda bu oluşan alanın  $\phi_{\sigma 1}$  ve  $\phi_{\sigma 2}$  dağılımlı kısımları A ve C çekirdeklerinden kapanır.  $\phi_{\sigma 3}$  dağılımlı kısmı ise devresini sonsuzda kapatır.



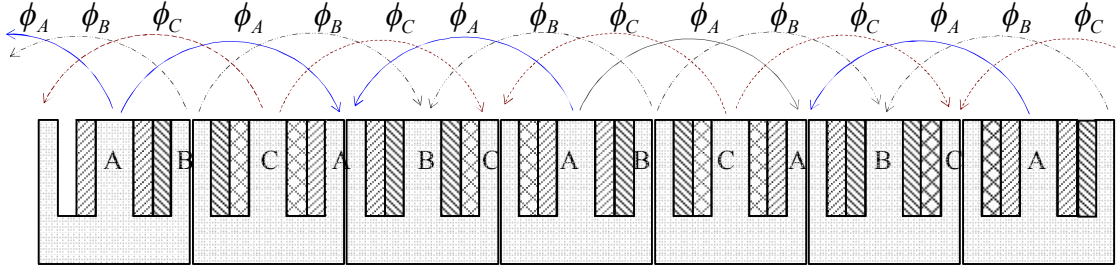
Şekil 4. 1. (b) B Fazı için primer manyetik akı çizgileri ve bobin bağlantı şekli

Şekil 4. 1. (c) de lineer asenkron motorun primerinde C fazının oluşturduğu manyetik akı çizgileri görülmektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi manyetik akının esas kısmı ikinci C bobininin çekirdeğinden kapanır. Aynı zamanda bu oluşan alanın  $\phi_{\sigma 1}$  ve  $\phi_{\sigma 2}$  dağılımlı kısımları A ve B çekirdeklerinden kapanır.  $\phi_{\sigma 3}$  dağılımlı kısmı ise devresini sonsuzda kapatır.



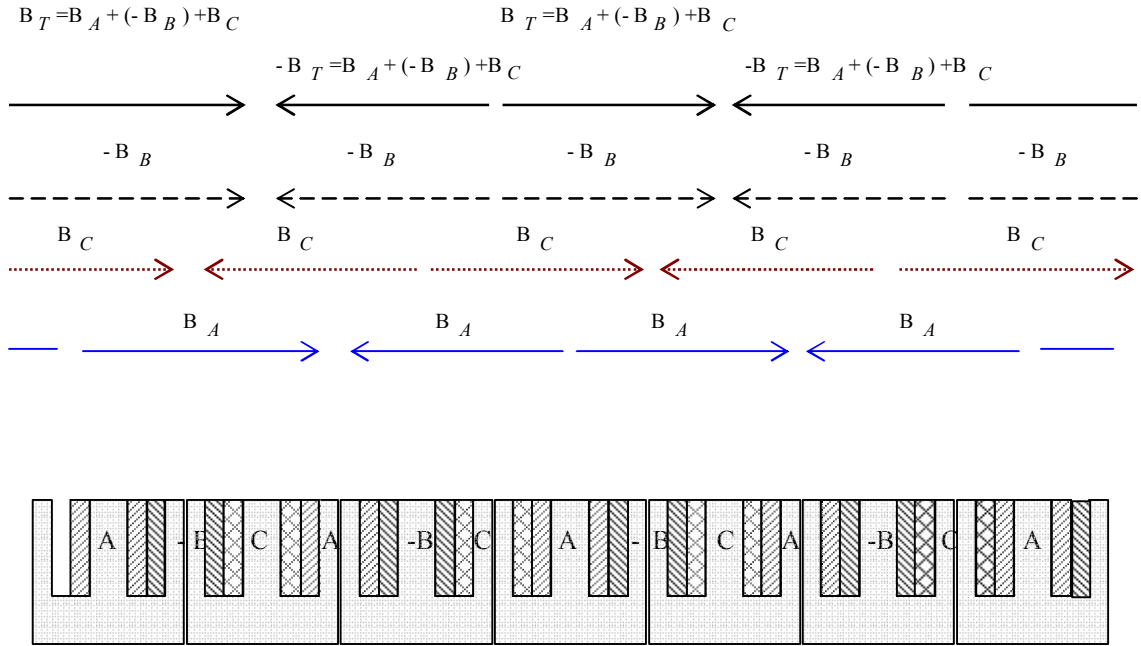
Şekil 4. 1. (c) C Fazı için primer manyetik akı çizgileri ve bobin bağlantı şekli

Şekil 4. 1. (d) de  $\phi_A, \phi_B$  ve  $\phi_C$  manyetik akılarının toplam dağılımı görülmektedir.



Şekil 4. 1. (d) A, B, C Fazı toplu primer manyetik akı çizgileri

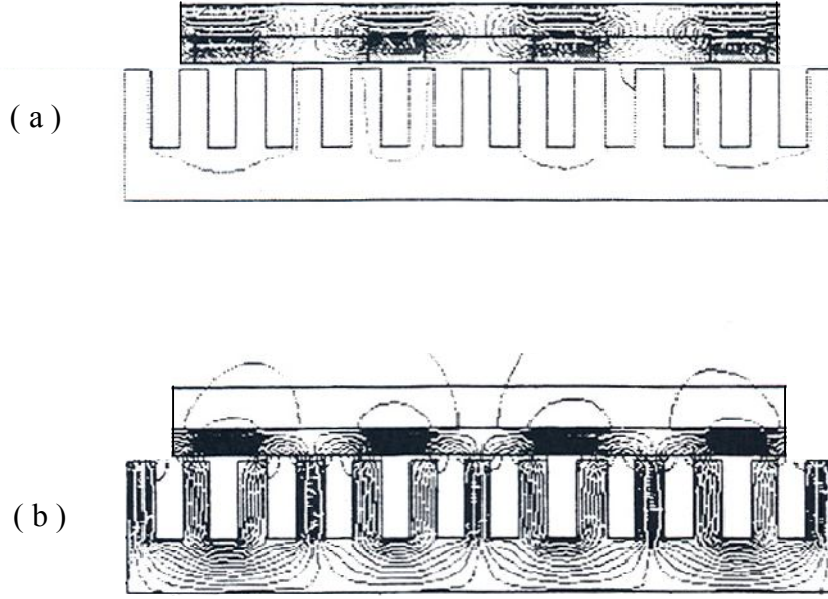
Şekil 4. 1. (e) de manyetik akılara denk düşen manyetik indüksiyonların vektörler şeklinde gösterimi ve vektörel toplamları gösterilmiştir.



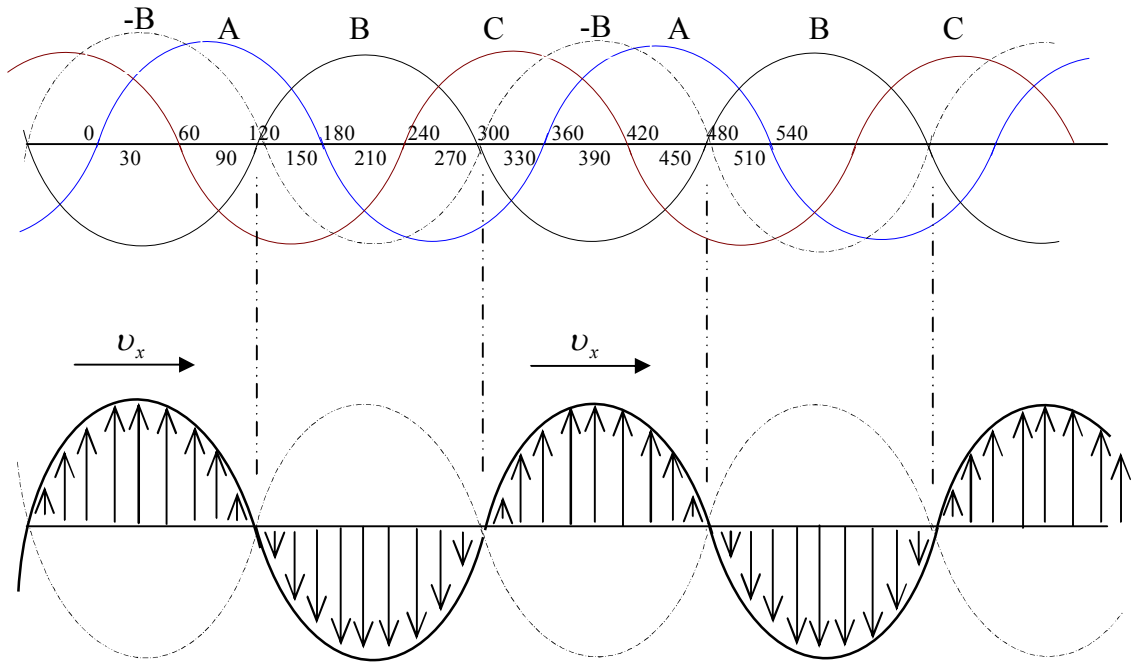
Şekil 4. 1. (e) Lineer asenkron motorun vektörel gösterimle toplam manyetik alanı

Şekil 4. 1 (f) de a) ferromanyetik olmayan malzeme için ve b) Sekonderi arka demirli ferromanyetik malzeme için oluşan akı çizgileri gösterilmiştir.





**Şekil 4. 1. (f):** lineer asenkron motorlar için primer ve sokonderdeki manyetik akı dağılımı:



**Şekil 4. 1. (g)** Lineer asenkron motorunda A,B,C fazlarının manyetik akılarının toplamlarının oluşturduğu toplam manyetik alanın hareket yönü

Yürüyen alanın hız ifadesi

$$v_x = 2\tau.f.(1-s) = \frac{\omega}{a}(1-s) \quad (a = \frac{\pi}{\tau} ise)$$

Yukarda E tipi trafo saçlarının bir araya getirilerek oluşturulan lineer asenkron motor un grafiksel çözümü yapılmıştır.

### 4. 3. Yürüyen Manyetik Alanın Analitik Çözümü

Yukarda grafiksel çözümü gösterilen lineer asenkron motorun analitik çözümü  $\omega t$  nin bazı değerleri için aşağıda hesaplanmıştır.

$$B_A = B \omega .\text{Sin} \omega t$$

$$B_B = - B \omega .\text{Sin}(\omega t - 120^\circ)$$

$$B_C = B \omega .\text{Sin}(\omega t + 120^\circ)$$

$$\omega t = 0^\circ : B_{Top} = B_A + (-B_B) + B_C = (0 + 0,866 + 0,866) B \omega = 1,732 B \omega$$

$$\omega t = 30^\circ : B_{Top} = (0,5 + 1 + 0,5) . B \omega = 2 B \omega$$

$$\omega t = 60^\circ : B_{Top} = (0,866 + 0,866 + 0) . B \omega = 1,732 B \omega$$

$$\omega t = 90^\circ : B_{Top} = (1 + 0,5 - 0,5) . B \omega = 1 B \omega$$

$$\omega t = 120^\circ : B_{Top} = (0,866 + 0 - 0,866) . B \omega = 0$$

$$\omega t = 150^\circ : B_{Top} = (0,5 - 0,5 - 1) . B \omega = -B \omega$$

$$\omega t = 180^\circ : B_{Top} = (0 - 0,866 - 0,866) . B \omega = -1,732 B \omega$$

$$\omega t = 210^\circ : B_{Top} = (-0,5 - 1 - 0,5) . B \omega = -2 B \omega$$

$$\omega t = 240^\circ : B_{Top} = (-0,866 - 0,866 + 0) . B \omega = -1,732 B \omega$$

$$\omega t = 270^\circ : B_{Top} = (-1 - 0,5 + 0,5) . B \omega = -B \omega$$

$$\omega t = 300^\circ : B_{Top} = (-0,866 + 0 + 0,866) . B \omega = 0$$

$$\omega t = 330^\circ : B_{Top} = (0,5 + 0,5 + 1) . B \omega = B \omega$$

$$\omega t = 360^\circ : B_{Top} = (0 + 0,866 + 0,866) . B \omega = 1,732 B \omega$$

$$\omega t = 390^\circ : B_{Top} = (0,5 + 1 + 0,5) . B \omega = 2 B \omega$$

$$\omega t = 420^\circ : B_{Top} = (0,866 + 0,866 + 0) . B \omega = 1,732 B \omega$$

$$\omega t = 450^\circ : B_{Top} = (1 + 0,5 - 0,5) . B \omega = B \omega$$



$$\omega t = 480^\circ : B_{Top} = (0,866 - 0 - 0,866) \cdot B \omega = 0$$

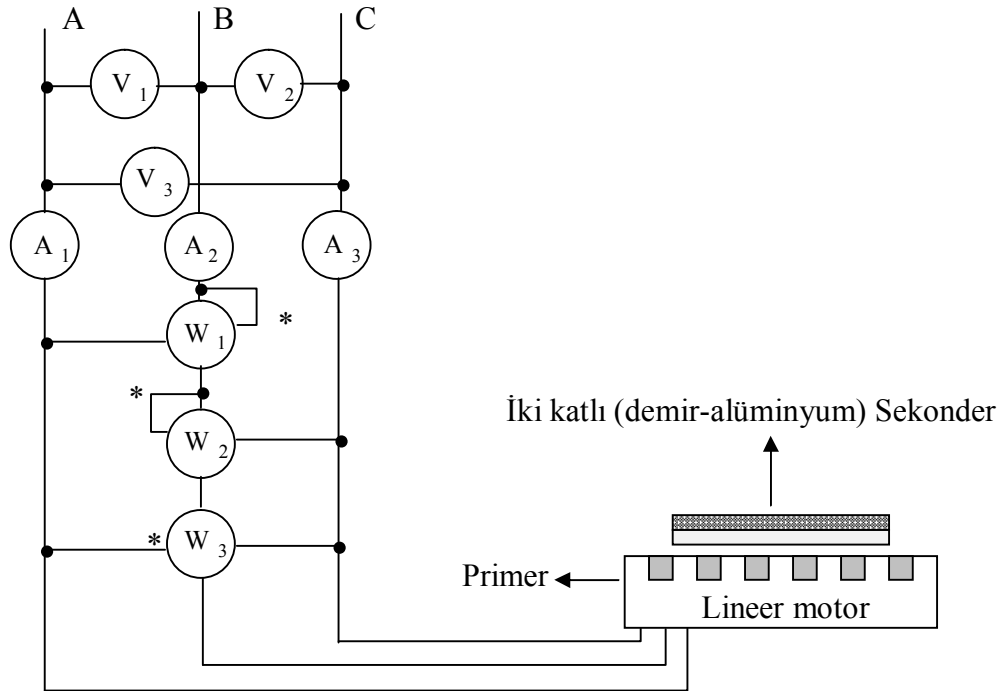
$$\omega t = 510^\circ : B_{Top} = (0,5 - 0,5 - 1) \cdot B \omega = -B \omega$$

$$\omega t = -30^\circ : B_{Top} = (-0,5 + 0,5 + 1) \cdot B \omega = B \omega$$

$$\omega t = -60^\circ : B_{Top} = (-0,866 + 0 + 0,866) \cdot B \omega = 0$$

#### 4. 4. Lineer Asenkron Motorun Deneysel Analizi

Döner rotorlu asenkron motorlarda makinanın esas karakteristiklerinin bulunması amacıyla açık devre ve kısa devre deneyleri yapılmaktadır. Lineer asenkron motorlarda böyle deneylerin yapılması mümkün olmadığından, lineer asenkron motorların önemli karakteristikleri teorik işlemler sonucunda bulunmaktadır. Gerçek lineer motor üzerinde yapılan deneysel çalışmalarda motorun karakteristikleri oluşturulmaya çalışılmıştır. Bu nedenle döner rotorlu asenkron motorlarda kullanılan açık devre deneyi gibi burada stator çekirdeklerinin yüzeyi manyetik malzeme olan, çelik bir tabaka ile kaplanmış ve manyetik alanın tümüyle manyetik direnci düşük olan çelik üzerinden kapanması sağlanmıştır. Döner rotorlu asenkron motorlarda ki kısa devre rejimine denk gelen durum gibi, stator manyetik devresinin açık olduğu ( yani rotor bulunmayan durum ) ve manyetik direncin maksimum değere sahip olduğu durumların deneyi yapılmıştır. Kayıplı durum deney devresi için şekil 4. 2 deki devre kuruldu.



Şekil 4. 2. Lineer motorun ölçü aletleri ile bağlantısı

$V_1 - U_{AB}$  Hat gerilimini ölçen voltmetre

$V_2 - U_{BC}$  Hat gerilimini ölçen voltmetre

$V_3 - U_{AC}$  Hat gerilimini ölçen voltmetre

$A_1 - I_A$  Hat akımını ölçen ampermetre

$A_2 - I_B$  Hat akımını ölçen ampermetre

$A_3 - I_C$  Hat akımını ölçen ampermetredir.

Yukarıda ki devre bağlantısında

$$W_1 = U_{AB} \cdot I_B \cdot \cos(\overline{U_{AB}} \overline{I_B}) \text{ gücünü}$$

$$W_2 = U_{BC} \cdot I_B \cdot \cos(\overline{U_{BC}} \overline{I_B}) \text{ gücünü}$$

$$W_3 = U_{AC} \cdot I_B \cdot \cos(\overline{U_{AC}} \overline{I_B}) \text{ gücünü ölçüyor.}$$

Ayrton yöntemine göre üç faza ait aktif toplam güç ifadesi

$$P_{3faz} = W_1 + W_2 = \sqrt{3} U_h \cdot I_h \cdot \cos\varphi \text{ ile bulunur.}$$

$W_3 = U_h I_h \sin\varphi$  ifadesine karşılık gelen gücü ölçmektedir. Bu nedenle motorun

harcadığı reaktif gücün karşılığı;

$$Q = \sqrt{3} \cdot W_3$$

eşitliği ile bulunur.

Lineer asenkron motorun analizi aşamaları aşağıdaki gibidir:

1- Şekil 4. 2 de gösterilen devre kurulur.

2- Kayıplı ve kayıpsız durumlar için ampermetre - voltmetre yöntemi ile faz dirençleri ölçülür.

3- Kayıplı devre deneyi yapılır, deney sonuçlarına göre

$$I_{KL} = f(U_{KL}); \cos\varphi_{KL} = f(U_{KL}); P_{KL} = f(U_{KL}) \text{ karakteristikleri kurulur.}$$

4- Kayıpsız devre deneyi yapılır ve deney sonuçlarına göre

$I_{ks} = f(U_{ks}); \cos\varphi_{ks} = f(U_{ks}); P_{ks} = f(U_{ks})$  karakteristikleri kurulur.

5- Kayıplı ve kayıpsız devre sonuçlarına göre: Lineer asenkron motorun basitleştirilmiş dairesel diyagramı kurulur.

6- Dairesel diyagram kullanılarak Lineer asenkron motorun  $P, F, I, \eta = f(s)$  ve  $\cos\varphi$  özel karakteristikleri kurulur.

#### 4. 5. Faz Dirençlerinin Ölçümü

a) Kayıplı durumda faz dirençlerinin ölçümünde şekil 4. 2 deki devre kullanılır. Bu nedenle seri olarak A-B, B-C, C-A uçları şebekeye bağlanarak gerilim ve akım değerleri tabloya yazılmıştır. ( Not: Yüksek hassasiyet isteniyorsa her durum için 4-5 ölçüm yapılarak ortalama değer alınır.) Her fazın aktif direnci tablodan yararlanarak aşağıdaki gibi hesaplanır. Faz dirençlerinin ölçümünde tek fazlı köprü doğrultucu kullanılmıştır. Filtre olarak 1000  $\mu\text{F}$ , 750 V kutuplu kondansatör kullanılmıştır ve oluşabilecek dalgalanmaların etkisi ihmal edilmiştir.

**Tablo 4. 1.** Kayıplı durum faz dirençleri

Hatlar	Parametreler		
	I (A)	U (V)	r ( $\Omega$ )
A-B	0,633	380,2	600,6
B-C	0,642	380,7	593,0
C-A	0,630	379,6	602,5

$$r_{AKL} = \frac{r_{CA} + r_{AB} - r_{BC}}{2} = 305,05 \Omega$$

$$r_{BKL} = \frac{r_{AB} + r_{BC} - r_{CA}}{2} = 295,5 \Omega$$

$$r_{CKL} = \frac{r_{BC} + r_{CA} - r_{AB}}{2} = 297,45 \Omega$$

Dairesel diyagram motor ısınması göz önüne alınarak kurulduğundan dirençlerin değerleri 75<sup>0</sup> C sıcaklığı için hesaplanmalıdır. Bu nedenle faz dirençleri 75<sup>0</sup> C deki değerlere dönüştürülür.

$$r_{AKL(75^0C)} = r_{AKL} \cdot |1 + \alpha(75^0 - \theta_0)|$$

$$\alpha_{Bakr} = 4,2 \cdot 10^{-3} K^{-1} = \frac{4,2 \cdot 10^{-3}}{273} C^{-1} = 1,583 \cdot 10^{-5} C^0$$

Burada  $r_{AKL(75^0C)}$  = 75 C<sup>0</sup> deki direncin değeri

$\alpha$  = Direncin sıcaklık katsayısı

$\theta_0$  = Ölçüm zamanında ki bobinin sıcaklığı

Böylelikle  $\alpha_{Bakr} = 4,2 \cdot 10^{-3} K^{-1}$ ,  $\theta_0 = 37 C^0$  olduğu durum için

$$r_{AKL(75^0C)} = 305,69 \Omega ; r_{BKL(75^0C)} = 295,68 \Omega ; r_{CKL(75^0C)} = 297,63 \Omega \text{ olur.}$$

b) Stator çekirdek kalınlığı 10 mm olan çelik tabaka ile kapatılarak tüm manyetik alanın bu çelik tabakadan geçirilmesi sağlanıyor ve a) daki işlemler tekrarlanarak sonuçlar kayıpsız durum için tablo 4. 2. ye göre tekrar hesaplanıyor.

**Tablo 4. 2.** Kayıpsız durum için faz dirençleri

Hatlar	Parametreler		
	I (A)	U (V)	r (Ω)
A-B	0,173	380,0	2197
B-C	0,170	381,0	2240
C-A	0,175	380,5	2174

Fazların aktif dirençleri:

$$r_{AKS} = \frac{r_{CA} + r_{AB} - r_{BC}}{2} = 1066,16 \Omega$$

$$r_{BKS} = \frac{r_{AB} + r_{BC} - r_{CA}}{2} = 1131,5 \Omega$$

$$r_{CKS} = \frac{r_{BC} + r_{CA} - r_{AB}}{2} = 1108,5 \Omega$$

Bu değerler bulunduktan sonra

$$r_{AKS(75^{\circ}C)} = 1066,16 \Omega ; \quad r_{BKS(75^{\circ}C)} = 1132,2 \Omega ; \quad r_{CKS(75^{\circ}C)} = 1109,22 \Omega$$

değerleri hesaplanır.

#### 4. 6. Manyetik devrenin kaybılı durumu için yapılan deney

Deneyin yapılması için şekil 4. 2. deki devrenin girişine gerilimi değiştirilebilen oto-transformatörün çıkışından enerji verilmiştir. Oto transformatör ile lineer asenkron motorun uçlarındaki gerilim değiştirilerek farklı gerilimler için ölçü aletlerinden ölçülen değerler aşağıdaki tabloya yazılmıştır.

**Tablo 4. 3.** Kaybılı durumda akım, gerilim, güç ve  $\cos\phi$

No	Q V A R	U <sub>AB</sub> V	U <sub>BC</sub> V	U <sub>CA</sub> V	U <sub>KL</sub> V	I <sub>A</sub> A	I <sub>B</sub> A	I <sub>C</sub> A	I <sub>KL</sub> A	P <sub>1</sub> W	P <sub>2</sub> W	P <sub>KL</sub> W	Cosφ -
1	61,00	189,2	189,0	188,6	188,93	0,362	0,370	0,365	0,366	75,00	37,50	112,5	0,940
4	104,8	260,5	261,4	260,9	260,9	0,493	0,500	0,495	0,496	132,5	71,00	203,5	0,910
8	162,8	340,0	341,0	341,1	340,7	0,613	0,622	0,618	0,618	210,0	117,0	327	0,898
10	185,3	380,6	381,2	380,8	380,9	0,665	0,672	0,670	0,669	262,5	145,5	400	0,907
12	215,6	420,0	421,0	419,6	420,2	0,720	0,727	0,723	0,723	305,0	177,5	482,5	0,918
13	252,0	436,5	437,3	436,7	436,8	0,785	0,743	0,790	0,773	330,0	190,0	520,0	0,890

Tabloda matematiksel işlemlerde kullanılacak değerler verilmiş olup tüm değerlerin listeleri sonraki tablolarda görülebilir.

$U_{13} = 1,2.U_n = 1,2. 380 = 456$  olması gerekmektedir. Oto transformatörün maksimum çıkış gerilimi 437 V olduğundan  $U_{13} = 437$  V alınmıştır.

Tablo 4. 3. de

$$U_{KL} = \frac{U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}}{3}, \quad I_{KL} = \frac{I_A + I_B + I_C}{3}, \quad P_{KL} = P_1 + P_2 \quad \text{ve}$$

$$\cos \varphi = \frac{P_{KL}}{\sqrt{3}.U_{KL}.I_{KL}} \quad \text{olarak alınmıştır.}$$

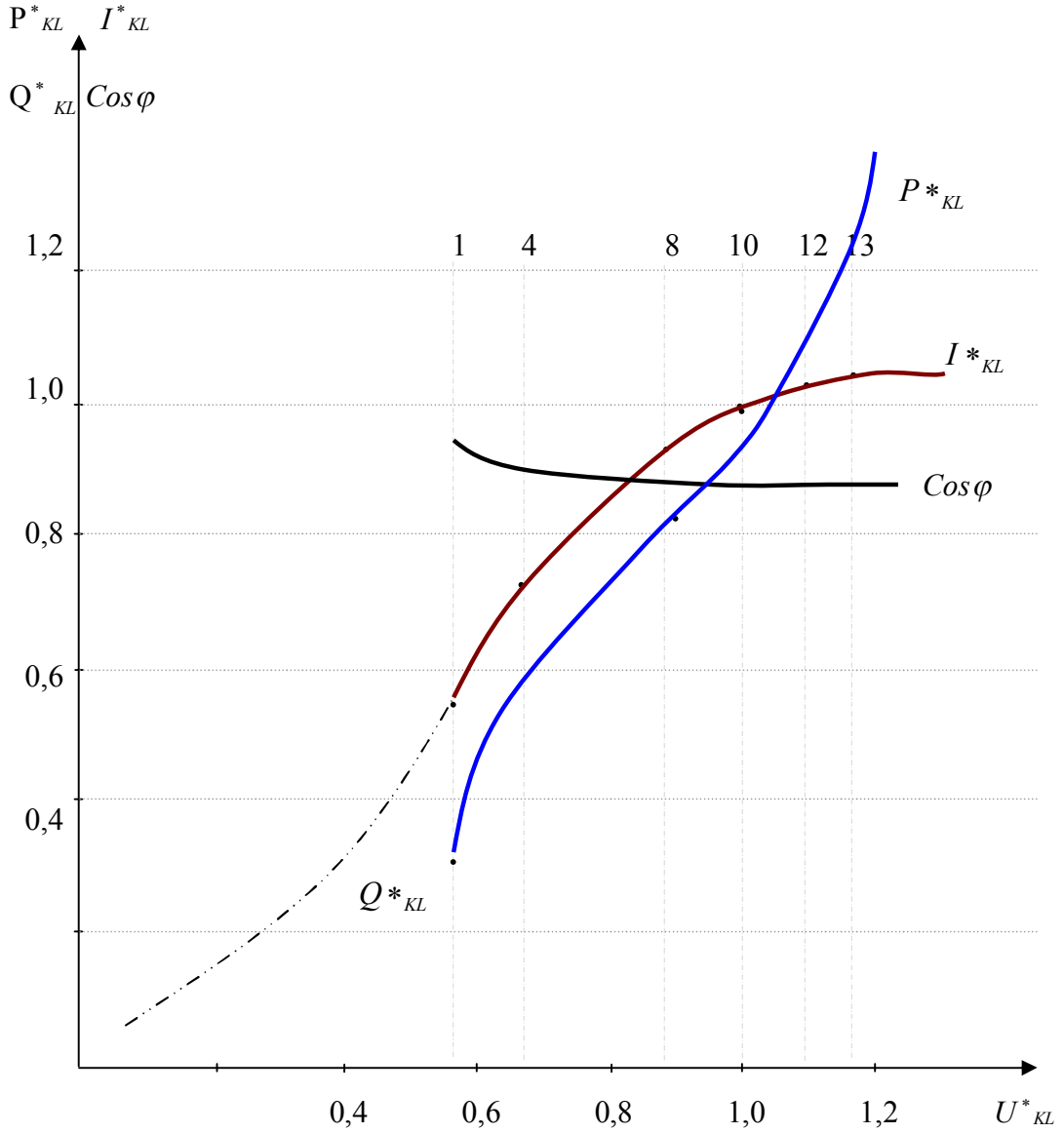
Tablo 4. 3. den alınmış verileri kullanarak

$$I^*_{KL} = f(U^*_{KL}); P^*_{KL} = f(U_{KL}); \cos \varphi = f(U^*_{KL}) \quad \text{eğrileri oluşturulur.}$$

Şekil 4. 3 deki eğrilerin oluşturulmasında parametreler nominal gerilimdeki değerlere bölünerek birimsiz hale getirilmiştir.

$$\frac{U_{KL}}{U_{KLn}} = U_{KL} * ; \quad \frac{I_{KL}}{I_{KLn}} = I_{KL} * ; \quad \frac{P_{KL}}{P_{KLn}} = P_{KLn} *$$

Aşağıda gösterilen eğrilerden de görüldüğü gibi manyetik direncin maksimum değerinde; gerilim 0 dan -  $U_n$  değerine kadar değiştirildiğinde akım, aktif ve reaktif güçler hızla nominal değerlere kadar büyür. Güç katsayısı ise azaldığından reaktif gücün artma hızı büyür.  $U_{KL} > U_n$  değerinde primerin bobinleri (sargıları) ısındığı ve aktif dirençleri büyüdüğünden akımın büyüme hızı düşmüş Q nun büyümesi P ye göre hızlanmış ve güç katsayısı azalmaya başlamıştır.



Şekil 4. 3. Manyetik devrenin açık olması hali ( Demirsiz )

#### 4. 7. Manyetik Devrenin Kayıpsız Durumu Deneyleri

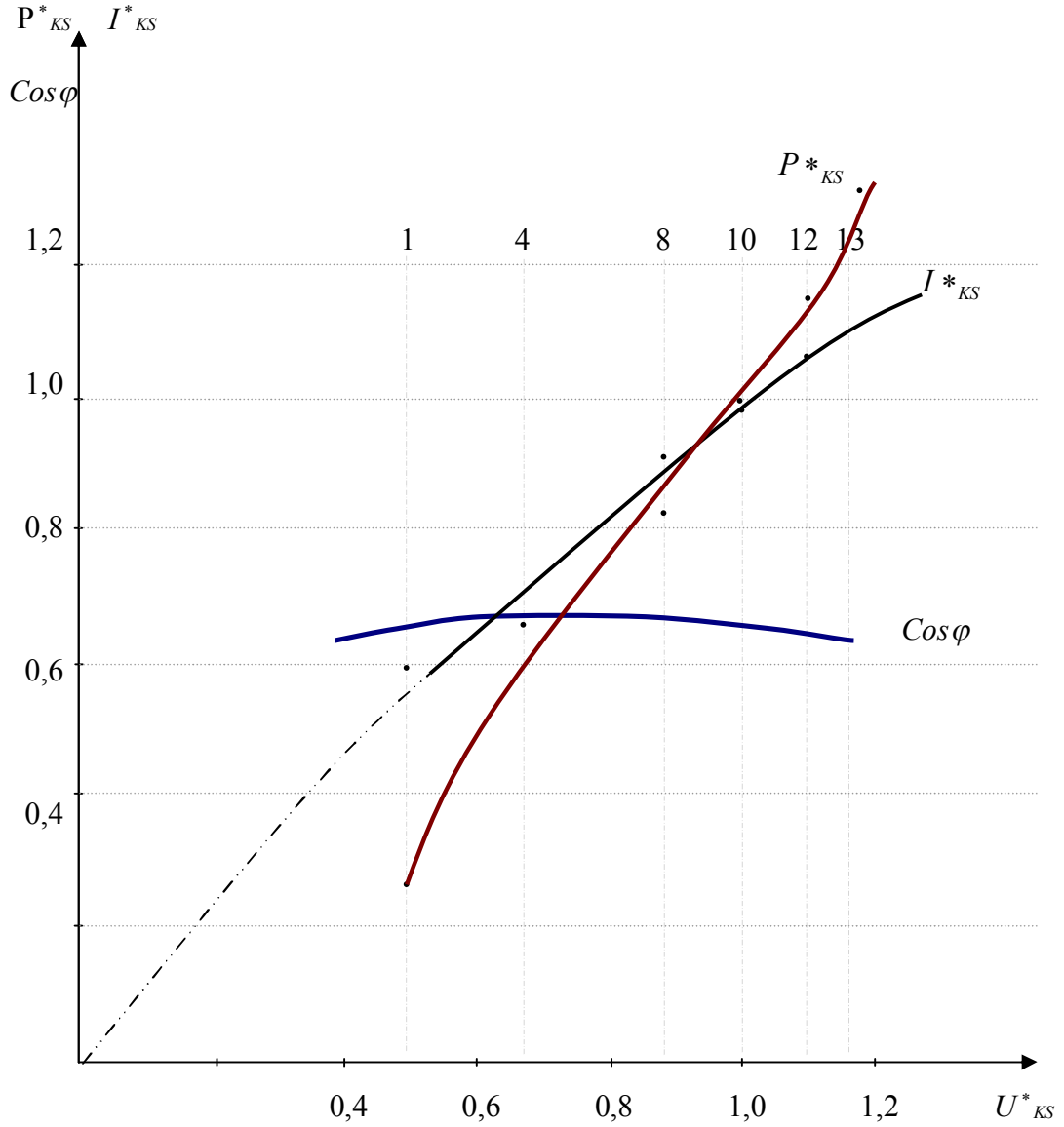
Bu durumda manyetik dağılım manyetik alanların minimuma indirmek ( yok etmek ) amacıyla; Primer kalınlığı 10 mm olan bir çelik tabaka ile kaplanmış ve şekil 4. 2. deki bağlantı göz önünde bulundurularak deneyler yapılmıştır. Alınan sonuçlardan bazı değerler aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

**Tablo 4. 4.** Kayıpsız durumda akım, gerilim, güç ve  $\text{Cos}\varphi$ 

No	$Qx\sqrt{3}$ V A R	$U_{AB}$ V	$U_{BC}$ V	$U_{CA}$ V	$U_{KS}$ V	$I_A$ A	$I_B$ A	$I_C$ A	$I_{KS}$ A	$P_1$ W	$P_2$ W	$P_{KS}$ W	$\text{Cos}\varphi$ -
1	20,05	190,3	191,1	190,0	190,53	0,12	0,12	0,115	0,118	22,5	2,50	25,00	0,643
4	35,00	260,9	261,2	261,3	261,13	0,15	0,15	0,15	0,151	38,00	6,00	44,00	0,645
8	50,00	340,5	342,0	341,6	341,4	0,18	0,175	0,177	0,177	59,5	10,00	69,50	0,665
10	60,50	380,7	381,1	380,5	380,8	0,20	0,193	0,195	0,196	72,00	12,50	84,50	0,654
12	71,50	420,2	421,3	420,1	420,5	0,22	0,21	0,215	0,215	85,00	15,5	100,5	0,642
13	76,00	438,5	439,3	438,1	438,6	0,23	0,22	0,218	0,222	92,00	16,50	108,5	0,644

Tablo 4. 4.'ün sonuçlarına göre kurulmuş olan eğriler Şekil 4. 4. de gösterilmiştir. Eğrilerden de görüldüğü gibi akımla gerilimin bağıntısı ve güç katsayısının değişim eğrisi lineere çok yakındır. Bu devrenin lineer rejimde çalıştığını göstermektedir. Çelik tabakada Fuko ve histerezis kayıplarının artması nedeniyle aktif ve reaktif güçler nominal gerilimden sonra hızla büyümektedirler.





Şekil 4. 4. Manyetik devrenin kalınlığı 10 mm çelik tabaka ile kapalı olması hali

#### 4. 8. Lineer Asenkron Motorun Dairesel Diyagramı

Dairesel diyagramın kurulması için aşağıdaki büyüklükler gerekmektedir:

a): Nominal gerilimde tablo 4. 3. de bulunmuş olan

$$I_{KL} = 0,669A \quad \text{ve} \quad P_{KL} = 400W \text{ değerleri;}$$

b): Manyetik devrenin kayıpsız durumu için bulunmuş olan

$$I_{KS} = 0,196A \quad \text{ve} \quad P_{KS} = 84,5W \text{ değerleri;}$$

c): 75 °C sıcaklığı için bulunmuş olan faz dirençleri

$$r_{KL(75^{\circ}C)} = 295,68 \Omega \text{ ve } r_{KS(75^{\circ}C)} = 1132,2 \Omega ;$$

d): Dairesel diyagramın kurulmasından önce akım için  $m_i = 0,05$  A/cm ölçeği seçilmiş ve bu durumda gücün ölçeği:

$$m_p = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot m_i = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,05 = 38,87 \text{ W/cm olur.}$$

Tablo 4 den gerilimin nominal değerinde  $I_{KS} = 0,196A$  nin aktif bileşeni:

$$I_{KS(aktif)} = I_{KS} \cdot \cos \varphi_{ks} = 0,196 \cdot 0,654 = 0,128A \text{ veya}$$

$$I_{KS(aktif)} = \frac{0,128}{m_i} = \frac{0,128}{0,05} = 2,56 \text{ cm} = 0_1 \text{ L uzunluğu}$$

Reaktif bileşeni ise:

$$I_{KS(reaktif)} = I_{KS} \cdot \sin \varphi_{ks} = 0,196 \cdot 0,756 = 0,148A \text{ veya}$$

$$I_{KS(reaktif)} = \frac{0,148}{m_i} = \frac{0,148}{0,05} = 2,96$$

Bulunmuş bileşenlere göre  $I_{KS}$  vektörü kurulur. Şekil 4. 5. de a noktasından “ $0_1$  x” eksenine paralel olarak ab doğrusu geçirilir. Tablo 4. 3 den nominal gerilime denk düşen  $I_{KL} = 0,669A$  akımının aktif bileşeni

$$I_{KL(aktif)} = I_{KL} \cdot \cos \varphi_{KL} = 0,669 \cdot 0,907 = 0,607A \text{ veya}$$

$$I_{KL(aktif)} = \frac{0,607}{m_i} = 12,136 \text{ cm} = 0_1 \text{ f uzunluğu}$$

Reaktif bileşen ise

$$I_{KL(reaktif)} = I_{KL} \cdot \sin \varphi_{KL} = 0,669 \cdot 0,421 = 0,282A \text{ veya}$$

$$I_{KL(aktif)} = \frac{0,282}{m_i} = 5,63 \text{ cm} = \text{f k uzunluğu}$$

“f K” ve “ $0_1$  K” Doğrularına göre şekil (4. 5.) deki  $I_{KL} = 0_1 k$  kurulur. Böylelikle daire üzerindeki a ve k noktaları bulunur. Bu noktalar birleştirilerek dairenin “a k”

kesenini alınır. a k nın ortasından çıkarılan dik doğru a b doğrusunu 0 noktasında keser ki bu kurulacak olan çemberin merkezi olur. “K g” doğrusu  $r_{1KS} / r_{1KL}$  oranında bölünerek d noktası bulunur yani;

$$\frac{g, d}{g, K} = \frac{r_{KL}}{r_{KS}} = \frac{295,68}{1132,2} = 0,261 \text{ veya}$$

$$g.d = 0,261 g.K = 0,261 \cdot 2,6 = 0,679 \text{ cm}$$

“ d ” noktası çember üzerinde “ e ” yani kaymanın  $s = \pm \infty$  noktasını belirler. K noktası ise  $s=1$  noktası olur.

Böylelikle “k” noktasından geçen “ a k ” doğrusu faydalı gücü, “d” noktasından geçen “ a e ” doğrusu itici kuvveti oluşturan  $P_{it}$  gücü, “a g” doğrusu ise şebekeden çekilen ( $P_1=0$ ) gücünü karakterize eder. Böylece gücün kayıplı durumdan kayıpsız duruma kadar değişim zamanı statordan akan akım vektörünün ucu çember boyunca kayacaktır.

Varsayalım ki yükün herhangi bir durumu için statordan akan  $I_1$ , akımının modülü  $m_i$  ölçeği ile “O<sub>1</sub> j” doğru parçasına eşittir. Başka bir deyişle:

$$I_1 = m_i \cdot \text{”O}_1 \text{ j” (A)}$$

Eğer “j h”  $\perp$  ”O<sub>1</sub> f” doğrusu çizilirse;  $P_y = \text{”j z”} \cdot m_p$  ;  $P_{it} = \text{”j u”} \cdot m_p$  ve  $P_1 = \text{”j h”} \cdot m_p$  güçleri alınır.

Kaymanın bulunması nedeniyle a noktasından y eksenine paralel “a c” doğrusu geçirilir. “a k” keseni ise mümkün olduğu kadar uzatılır. Keyfi c noktasından C T// a e keseni geçirilir ve c T nin “a j” ile kesişme noktası Q bulunur. Buradan kayma

$$s = \frac{cQ}{cT}$$

Güç katsayısı ise 0<sub>1</sub> noktasından geçen ve çapı 100 mm olan “O<sub>1</sub> M” yarı çemberi ile “O<sub>1</sub> j” doğrusunun kesişme noktasına göre

$$\cos \varphi_1 = \frac{Xm}{O_1m}$$

olur.

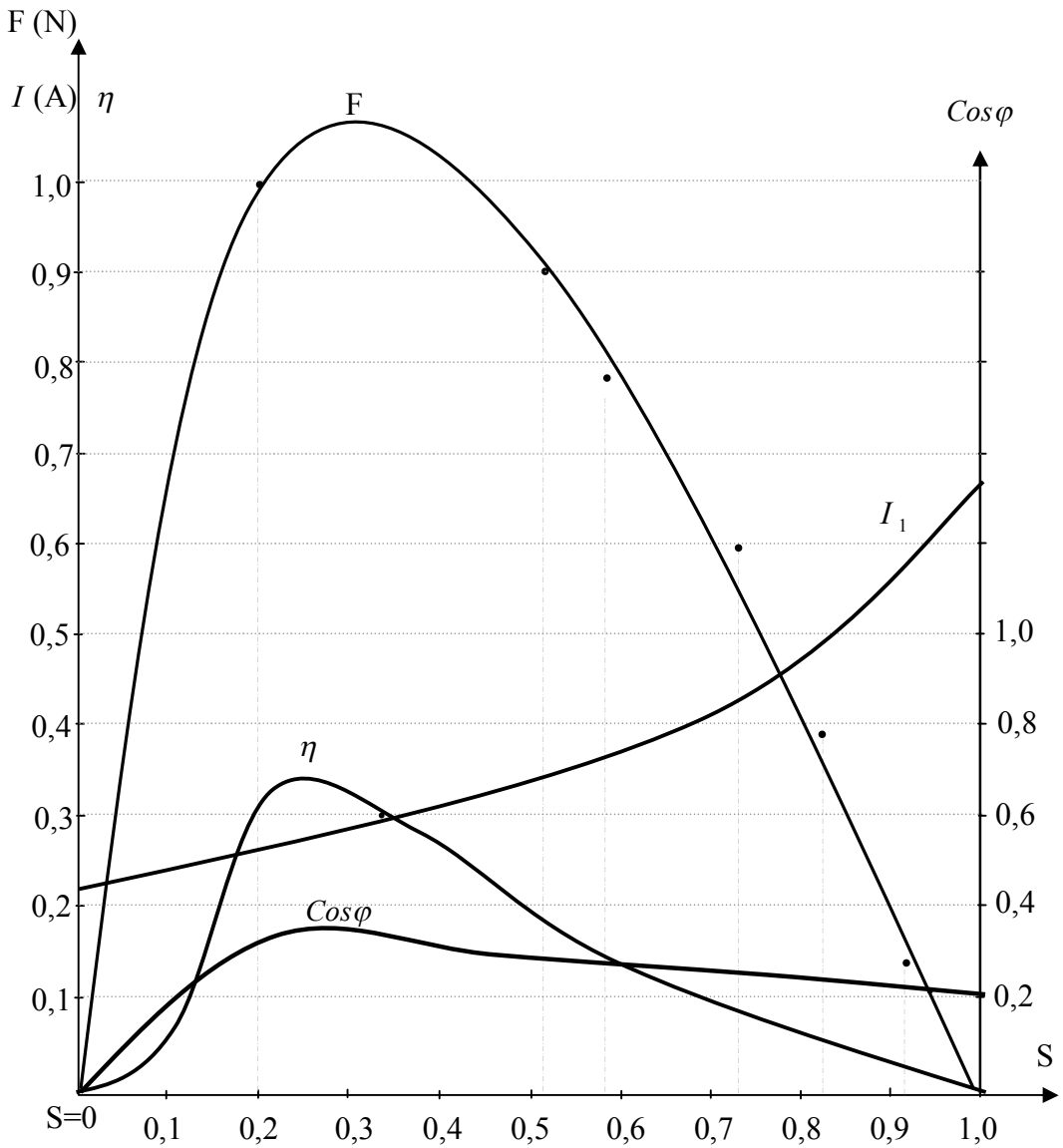


dönüştürülmüş değerleri;  $P_{ek}$  – ek kayıplar, nominal gücün 0,005.  $P_{1n}$  lik kısmı gibi alınır. Diğer güçler için ise

$$P_{ek} = 0,005.P_{1n}.\left(\frac{I}{I_{1n}}\right)^2 \text{ ifadesi ile bulunur. Verim ise: } \eta = \frac{P_1 - \Sigma P}{P_1} = 1 - \frac{\Sigma P}{P_1} \text{ ifadesine}$$

göre hesaplanır [9-16]. Lineer motoru yükleyerek farklı akımlar için nominal gerilimde F, I,  $\eta$  ve  $\text{Cos } \varphi$  parametrelerinin  $s = \frac{\vartheta_s - \vartheta}{\vartheta_s}$  kaymasına bağımlı eğrileri

şekil 4. 6 da verilmiştir.



Şekil 4. 6. Dairesel diyagram kullanılarak çizilen Lineer asenkron motorun çalışma Karakteristikleri

#### 4. 9. Lineer Asenkron Motorun Sekonderi Üzerine Yük Konarak Yapılan Hız Testi

Lineer asenkron motorun sekonderi üzerine farklı ağırlıklar konulmuş ve 380 v, 50 Hz şebeke geriliminde aşağıdaki tablodaki sonuçlar elde edilmiştir. İtme kuvveti için aşağıdaki ifadeler kullanılmıştır.

$$F = \frac{m.L}{t^2} \text{ itme kuvveti (N)}$$

$$P = m.g \text{ burada; } g = 9,81 \text{ yerçekimi ivmesi, } m = \text{kütle (Kg)}$$

$$g = \frac{L}{t}; \text{ ( not: senkron hız } g_s = 6.2 \text{ m/s dir. Primerin uzunluğu 1 m olup}$$

sekonderin hareket aralığı 0,88 m dir. )

**Tablo 4. 5.** Kütleye (yük) bağlı olarak hız itme kuvveti ve kayma değerleri

NO	m ( Kg)	$g$ ( m/s)	$F_{itme} (N)$	$S = \frac{g_s - g}{g_s}$
1	0,355	1,6	1,03	0,740
2	0,825	0,97	0,88	0,840
3	1,000	0,85	0,82	0,860
4	1,820	0,54	0,61	0,910
5	3,125	0,33	0,38	0,947
6	4,200	0,17	0,14	0,972
7	5,000	0,15	0,13	0,976

#### 4. 10. Linear Asenkron Motorda Çok Katmanlı Sekonder

Aşağıdaki tabloda “ alüminyum – demir – alüminyum – demir ” şeklinde sıralanmış iki kat saç ve iki kat alüminyum olmak üzere 4 katlı tabakadan oluşan sekonder (araba) için yük, hız, itme kuvveti ve kayma değerleri tablo olarak verilmiştir.

**Tablo 4. 6.** Kütleye (yük) bağlı olarak hız, itme kuvveti ve kayma değerleri

NO	m ( Kg)	$g$ ( m/s)	$F_{itme} (N)$	$S = \frac{g_s - g}{g_s}$
1	0,355	1,17	0,56	0,811
2	0,825	0,82	0,62	0,868
3	1,000	0,93	0,97	0,850
4	1,820	0,75	1,17	0,879
5	3,125	0,49	0,85	0,921
6	4,200	0,34	0,54	0,945
7	5,000	0,32	0,56	0,948

#### 4. 11. Linear Asenkron Motorun Y Bağlı Durumu

Aşağıda lineer asenkron motor uygulaması üzerinde yapılan deneylere ait olan deney sonuç tabloları verilmiştir.

Motor Y bağlı durumda ve motor a 380 V / 50 Hz şebeke gerilimi uygulanmıştır. Daha sonra sırayla stator boşta, 1 mm lik saç ve 10 mm lik çelik ile kapatılıp aşağıdaki tablolar oluşturuldu.

**Tablo 4. 7.** Stator boşta iken manyetik dağılımlı durum (demirsiz) , motor Y bağlı

No	Q VAR	U <sub>AB</sub> V	U <sub>BC</sub> V	U <sub>CA</sub> V	U <sub>KL</sub> V	I <sub>A</sub> A	I <sub>B</sub> A	I <sub>C</sub> A	I <sub>KL</sub> A	P <sub>1</sub> W	P <sub>2</sub> W	P <sub>KL</sub> W	Cosφ -
1	61,00	189,2	189,0	188,6	188,9	0,362	0,370	0,365	0,366	75,00	37,50	112,5	0,940
2	77,9	219,7	219,9	219,5	219,7	0,420	0,457	0,422	0,423	97,5	51,0	148,5	0,920
3	90,1	239,3	240,6	240,1	240,0	0,455	0,463	0,460	0,459	115,0	60,00	175,0	0,918
4	104,8	260,5	261,4	260,9	260,9	0,493	0,500	0,495	0,496	132,5	71,00	203,5	0,910
5	119,5	280,1	281,2	280,5	280,6	0,527	0,533	0,530	0,530	152,5	80,00	232,5	0,900
6	131,6	300,2	301,1	300,5	300,6	0,558	0,565	0,563	0,562	172,5	91,00	263,5	0,900
7	148,9	320,1	320,8	320,7	320,5	0,595	0,602	0,600	0,599	195	105	300	0,903
8	162,8	340,0	341,0	341,1	340,7	0,613	0,622	0,618	0,618	210,0	117,0	327	0,898
9	173,2	360,2	361,1	360,8	360,7	0,643	0,650	0,648	0,647	228	132,5	360,5	0,893
10	185,3	380,6	381,2	380,8	380,9	0,665	0,672	0,670	0,669	262,5	145,5	400	0,907
11	200,1	400,5	401,7	400,6	400,9	0,695	0,703	0,698	0,699	282,5	163	445,5	0,919
12	215,6	420,0	421,0	419,6	420,2	0,720	0,727	0,723	0,723	305,0	177,5	482,5	0,918
13	252,0	436,5	437,3	436,7	436,8	0,785	0,743	0,790	0,773	330,0	190,0	520,0	0,890



**Tablo 4. 8.** Stator 1 mm lik saç ile kaplıyken dağılım azaltılmış durum, motor Y bağlı

No	Q VAR	$U_{AB}$ V	$U_{BC}$ V	$U_{CA}$ V	$U_{KL}$ V	$I_A$ A	$I_B$ A	$I_C$ A	$I_{KL}$ A	$P_1$ W	$P_2$ W	$P_{KL}$ W	$Cos\phi$ -
1	50,2	190,1	190,5	190,0	190,2	0,168	0,170	0,160	0,166	29,5	4,5	34	0,622
2	68,4	220,5	221,9	221,2	221,2	0,202	0,205	0,196	0,201	37,5	5	42,5	0,552
3	82,3	240,3	241,7	241,1	241,0	0,228	0,230	0,218	0,225	45	5,5	50,5	0,532
4	97,0	260,3	261,5	260,7	260,8	0,253	0,255	0,243	0,250	55	6	61	0,540
5	114,3	280,2	281,5	281	280,9	0,278	0,280	0,268	0,275	65	7,5	72,5	0,542
6	131,6	301,5	301,6	302	301,7	0,305	0,307	0,299	0,303	76	9,5	85,5	0,540
7	155,0	320,8	322	321,2	321,3	0,335	0,340	0,323	0,332	90	10	100	0,541
8	175,8	340	341,7	342	341,2	0,367	0,370	0,353	0,363	102,5	12,5	115	0,536
9	200	360	361,1	360,7	360,6	0,397	0,397	0,383	0,392	119,5	14,5	134	0,547
10	228,6	380,2	381,9	381,2	381,1	0,432	0,435	0,415	0,427	135	16	151	0,536
11	254,6	400	401	400,8	400,6	0,462	0,462	0,445	0,456	155	19,5	174,5	0,551
12	284,9	420,5	421,1	420,6	420,7	0,497	0,497	0,475	0,489	175	22,5	197,5	0,554
13	307,4	436,4	437,7	436,5	436,9	0,522	0,520	0,500	0,514	192,5	25	217,5	0,559

**Tablo 4. 9.** Stator 10 mm lik çelik ile kaplıyken (dağılım yok) , motor Y bağı

No	Q VAR	U <sub>AB</sub> V	U <sub>BC</sub> V	U <sub>CA</sub> V	U <sub>KS</sub> V	I <sub>A</sub> A	I <sub>B</sub> A	I <sub>C</sub> A	I <sub>KS</sub> A	P <sub>1</sub> W	P <sub>2</sub> W	P <sub>KS</sub> W	Cosφ -
1	34,72	190,3	191,1	190,0	190,5	0,12	0,12	0,115	0,118	22,5	2,5	25	0,643
2	47,6	220,6	221,5	221	221	0,135	0,133	0,133	0,133	29,5	5	34,5	0,678
3	53,7	240,3	241,6	240,5	240,8	0,145	0,143	0,143	0,143	34	5,5	39,5	0,663
4	60,62	260,9	261,2	261,3	261,1	0,15	0,15	0,15	0,151	38	6	44	0,645
5	68,41	280,9	281,8	281,5	281,4	0,160	0,155	0,153	0,156	42,5	6,05	48,55	0,639
6	77,08	300,9	301,8	301,3	301,3	0,170	0,163	0,160	0,164	49,5	7,5	57	0,666
7	82,27	320,3	321,3	321,4	321	0,175	0,173	0,170	0,173	52,5	9,5	62	0,645
8	86,60	340,5	342,0	341,6	341,4	0,18	0,175	0,177	0,177	59,5	10	69,5	0,665
9	96,12	360,5	361,8	361	361,1	0,188	0,183	0,183	0,184	69	10,1	79,1	0,687
10	104,7	380,7	381,1	380,5	380,8	0,20	0,193	0,195	0,196	72	12,5	84,5	0,654
11	113,5	400,2	401,3	400	400,5	0,215	0,202	0,200	0,206	77,5	14,5	92	0,644
12	123,8	420,2	421,3	420,1	420,5	0,22	0,21	0,215	0,215	85	15,5	100,5	0,642
13	131,6	438,5	439,3	438,1	438,6	0,23	0,22	0,218	0,222	92	16,5	108,5	0,644

#### 4. 12. Linear Asenkron Motorun $\Delta$ Bağı Durumu

**Tablo 4. 10.** Stator boşta iken manyetik dağılımlı durum (demirsiz), motor  $\Delta$  bağı

No	Q VAR	$U_{AB}$ V	$U_{BC}$ V	$U_{CA}$ V	$U_{KL}$ V	$I_A$ A	$I_B$ A	$I_C$ A	$I_{KL}$ A	$P_1$ W	$P_2$ W	$P_{KL}$ W	$Cos\phi$ -
1	168,9	190,4	191,9	190,7	191	1,09	1,08	1,1	1,09	205	107,5	312,5	0,867
2	212,2	220,5	221,9	220,7	221	1,24	1,23	1,26	1,24	271	146	417	0,879
3	242,5	240,3	241,4	240,9	240,7	1,35	1,33	1,36	1,35	310	172,5	428,5	0,857
4	284	260	261,4	261,2	260,9	1,44	1,43	1,46	1,44	367,5	200	567,5	0,872
5	316,1	280	281	281	280,7	1,55	1,54	1,56	1,55	420	232,5	625,5	0,866
6	351,6	300	301,2	300,6	300,6	1,58	1,59	1,60	1,59	465	263	728	0,879
7	379,3	320	321,2	320,9	320,7	1,73	1,71	1,72	1,72	530	300	830	0,869
8	417,4	340	341,2	340,9	340,7	1,77	1,76	1,80	1,78	580	340	920	0,876
9	454,7	361	362,5	361,5	361,6	1,87	1,86	1,89	1,87	690	390	1080	0,922
10	493,6	380,4	380,8	380,5	380,6	1,98	1,96	1,99	1,98	740	430	1170	0,896
11	530	400,5	401	400,6	400,7	2,08	2,07	2,10	2,08	840	470	1310	0,908
12	562,9	419,5	420	419,8	419,8	2,16	2,14	2,18	2,16	900	520	1420	0,904
13	588,9	437	437,5	437	437,2	2,30	2,27	2,31	2,29	960	560	1520	0,877

**Tablo 4. 11.** Stator 10 mm lik çelik ile kaplıyken (dağılım yok) , motor  $\Delta$  bağlı

No	Q VAR	U <sub>AB</sub> V	U <sub>BC</sub> V	U <sub>CA</sub> V	U <sub>KS</sub> V	I <sub>A</sub> A	I <sub>B</sub> A	I <sub>C</sub> A	I <sub>KS</sub> A	P <sub>1</sub> W	P <sub>2</sub> W	P <sub>KS</sub> W	Cos $\phi$ -
1	86,6	190,3	190,8	190,2	190,4	0,285	0,282	0,280	0,282	54,5	6,5	61	0,656
2	112,6	220,1	220,8	220,3	220,4	0,332	0,328	0,328	0,329	67,5	10	77,5	0,617
3	129,9	240	240,7	240,5	240,4	0,357	0,350	0,353	0,353	79,5	11	90,5	0,616
4	149,8	260	261,1	261,5	260,9	0,387	0,385	0,387	0,386	92,5	14	106,5	0,611
5	168,9	280,1	281,4	281	280,8	0,422	0,413	0,417	0,417	109	16	125	0,616
6	188,8	300,3	301	301	300,7	0,450	0,448	0,450	0,449	124,5	19,5	144	0,616
7	219,9	320,2	321	321,2	320,8	0,487	0,475	0,482	0,481	142,5	22,5	165	0,617
8	238,2	340	340,8	341,1	340,6	0,517	0,513	0,515	0,515	161	25,5	186,5	0,614
9	268,5	360	361,4	361,6	361	0,555	0,543	0,550	0,549	183,5	30	213,5	0,622
10	298,8	380,2	382,5	382	381,6	0,587	0,580	0,587	0,585	205,5	34,5	240	0,621
11	324,8	400	402	400,5	400,8	0,625	0,605	0,620	0,616	226	39,5	265,5	0,621
12	362	420,1	421,6	420,8	420,8	0,657	0,645	0,657	0,653	252,5	45	297,5	0,625
13	389,7	436,5	437	436,6	436,7	0,682	0,670	0,685	0,679	274,5	49,5	324	0,631

#### 4. 13. Lineer Asenkron Motorun İki Parçalı Y Bağlı Durum

Motor Y bağlı olup 48 olan bobin sayısı iki ye bölünerek; 24 bobinli iki parçaya ayrılmıştır. Böylece motorun şebekeden çektiği akım artırılmıştır.

**Tablo 4. 12.** Stator boşta iken manyetik dağılımlı durum (demirsiz)

No	Q VAR	U <sub>AB</sub> V	U <sub>BC</sub> V	U <sub>CA</sub> V	U <sub>KL</sub> V	I <sub>A</sub> A	I <sub>B</sub> A	I <sub>C</sub> A	I <sub>KL</sub> A	P <sub>1</sub> W	P <sub>2</sub> W	P <sub>KL</sub> W	Cosφ .
1	176,7	190,2	191,5	190,5	190,7	1,502	1,460	1,502	1,488	275	145	420	0,855
2	242,5	220,5	221,4	220,7	220,9	1,740	1,690	1,740	1,723	365	195	560	0,856
3	277,1	240	241	240,3	240,4	1,800	1,770	1,820	1,797	425	225	650	0,869
4	320,4	260,3	261,2	260,8	260,8	2,0	1,945	2,0	1,982	495	265	760	0,849
5	372,4	280,1	281	280,7	280,6	2,113	2,063	2,110	2,095	570	310	880	0,864
6	433	300,8	301,6	301,8	301,4	2,213	2,158	2,210	2,194	640	360	1000	0,873
7	485	320,1	321,4	321,4	321	2,343	2,288	2,340	2,324	720	400	1120	0,867
8	554,3	340,2	341	341,4	340,9	2,360	2,310	2,362	2,344	770	460	1230	0,889
9	606,6	360	361	360,5	360,5	2,512	2,45	2,512	2,491	880	500	1380	0,887
10	658,2	380,5	381	380,7	380,7	2,610	2,543	2,605	2,586	940	560	1500	0,880
11	727,5	400,5	401,8	401,3	401,2	2,657	2,610	2,675	2,653	1090	620	1710	0,928
12	779,5	420	420,8	420,1	420,3	2,775	2,688	2,777	2,747	1100	670	1770	0,885
13	883,4	433	435	433,3	433,8	2,820	2,746	2,812	2,793	1190	700	1890	0,901

**Tablo 4. 13.** Stator 10 mm lik çelik ile kaplıyken (dağılım yok)

No	Q VAR	U <sub>AB</sub> V	U <sub>BC</sub> V	U <sub>CA</sub> V	U <sub>KS</sub> V	I <sub>A</sub> A	I <sub>B</sub> A	I <sub>C</sub> A	I <sub>KS</sub> A	P <sub>1</sub> W	P <sub>2</sub> W	P <sub>KS</sub> W	Cosφ .
1	103,9	190	190,5	190	190,2	0,385	0,360	0,353	0,366	65	14,5	79,5	0,655
2	133,4	220	221,3	220,8	220,7	0,442	0,420	0,410	0,424	88,5	17,5	106	0,654
3	154,2	240,8	241,1	240,9	240,9	0,475	0,450	0,440	0,455	102,5	21	123,5	0,651
4	181	260,5	260,7	260,8	260,7	0,515	0,493	0,483	0,497	122,5	25	147,5	0,657
5	208,7	280	281	280,6	280,5	0,565	0,530	0,525	0,540	142,5	29,5	172	0,656
6	240,8	300,4	300,2	300,9	300,5	0,608	0,578	0,565	0,584	165	34	199	0,655
7	272,8	320	321	321,3	320,8	0,657	0,618	0,605	0,627	189,5	40	229,5	0,659
8	308,3	340,4	340,2	341	340,5	0,697	0,663	0,648	0,669	214,5	45	259,5	0,658
9	344,7	360,3	361	360,9	360,7	0,750	0,703	0,690	0,714	241	52,5	293,5	0,658
10	385,4	380	380,5	380,6	380,4	0,787	0,745	0,730	0,754	270	59,5	329,5	0,663
11	428,7	400,5	401,5	401	401	0,840	0,785	0,775	0,800	300	66	366	0,659
12	476,3	420	421,2	420,3	420,5	0,882	0,835	0,820	0,846	332,5	75	407,5	0,661
13	502,3	436,6	438	436,9	437,2	0,925	0,863	0,850	0,879	360	85	445	0,669

NOT: Motor Y bağı olup 48 olan bobin sayısı iki ye bölünerek; 24 bobinli iki parçaya ayrılmış ve her faza ayrı ayrı 8 bobin bağlanmıştır. Böylece motorun şebekeden çektiği akım artırılmıştır.

**Tablo 4. 14.** Kütleyle bağı olarak hız, itme kuvveti ve kayma değerleri

NO	m ( Kg)	$g$ ( m/s)	$F_{itme} (N)$	$S = \frac{g_s - g}{g_s}$
1	0,355	1,950	1,543	0,685
2	0,825	1,790	3,023	0,711
3	1,000	1,600	2,909	0,742
4	1,820	1,080	2,441	0,826
5	3,125	0,956	3,249	0,846
6	4,200	0,830	3,289	0,866
7	5,000	0,752	3,215	0,879

Motor 24 er bobinli iki parçaya bölünmüş ve her faza 8 bobin bağlanmıştır. Senkron hız  $g_s = 6,2$  m/s dir. Primerin uzunluğu 1 m olup sekonderin hareket aralığı 0,88 m dir. Şebeke gerilimi 380 V, 50 Hz, motor yıldız bağlıdır.

#### 4. 14. Lineer Asenkron Motorun Bobinleri İkişerli Seri ve Y Bağı Durum

Bobinler ikişer ikişer seri bağlanarak kutup adımı iki katına çıkarılmıştır. Daha sonra motor bağlantıları yapıp bobinlerin sonları Y bağlanmıştır. Statorun kayıplı, kayıpsız durumları ve sekonder hız testleri tablo olarak aşağıda belirtilmiştir.

**Tablo 4. 15.** Stator boşta iken manyetik dağımlı durum (demirsiz)

No	Q VAR	$U_{AB}$ V	$U_{BC}$ V	$U_{CA}$ V	$U_{KL}$ V	$I_A$ A	$I_B$ A	$I_C$ A	$I_{KL}$ A	$P_1$ W	$P_2$ W	$P_{KL}$ W	$Cos\phi$ -
1	39	190,4	191,3	190,5	190,7	0,360	0,355	0,345	0,353	67,5	49,5	117	1
2	50,2	220,3	221	220,4	220,6	0,418	0,410	0,405	0,411	90	64,5	154,5	0,98
3	56,3	240,4	241	240,5	240,6	0,453	0,445	0,435	0,444	106	75,5	181,5	0,98
4	67,6	260	260,8	260,4	260,4	0,495	0,488	0,483	0,489	124,5	89	213	0,97
5	77,1	280,2	281	280,6	280,6	0,533	0,523	0,515	0,524	144,5	102,5	247	0,97
6	86,6	300,5	301,3	301,2	301	0,565	0,555	0,545	0,555	165	117,5	282,5	0,976
7	96,1	320,4	320,7	321	320,7	0,603	0,593	0,583	0,593	186	132,5	318,5	0,967
8	108,3	340	340,5	340,5	340,3	0,643	0,630	0,625	0,633	209,5	150	359,5	0,964
9	119,5	360	360,8	360,5	360,4	0,683	0,673	0,660	0,672	234	170	404	0,963
10	140,3	380,2	381	380,6	380,6	0,736	0,725	0,720	0,727	267,5	187,5	455	0,950
11	147,2	400,4	402	400,9	401,1	0,750	0,738	0,726	0,738	290	207,5	497,5	0,970
12	168,9	420,3	421,5	420,8	420,9	0,813	0,795	0,793	0,800	324,5	229,5	554	0,950
13	181,9	425	426,2	425	425,4	0,850	0,840	0,830	0,840	355	247,5	602,5	0,973



**Tablo 4. 16.** Stator 10 mm lik çelik ile kaplıyken (dağılım yok)

No	Q VAR	U <sub>AB</sub> V	U <sub>BC</sub> V	U <sub>CA</sub> V	U <sub>KL</sub> V	I <sub>A</sub> A	I <sub>B</sub> A	I <sub>C</sub> A	I <sub>KL</sub> A	P <sub>1</sub> W	P <sub>2</sub> W	P <sub>KL</sub> W	Cosφ -
1	45,9	190,1	190,6	190	190,2	0,183	0,190	0,176	0,183	37,5	12,5	50	0,829
2	62,4	220,4	221,5	220,5	220,8	0,210	0,220	0,203	0,211	50	15,5	65,5	0,812
3	71	240	241	240,2	240,4	0,228	0,235	0,223	0,229	57,51	19	76,5	0,802
4	81,4	260	261,2	260,2	260,5	0,250	0,255	0,238	0,248	67,5	22,5	90	0,804
5	97	280	281,7	280,3	280,7	0,263	0,278	0,255	0,265	77,5	25	102,5	0,796
6	108,3	300,4	301,5	300,8	300,9	0,288	0,295	0,273	0,285	87,5	29	116,5	0,785
7	121,3	320,2	321,3	320,6	320,7	0,303	0,310	0,293	0,302	97,5	32	129,5	0,772
8	134,2	340,4	341,8	341,5	341,2	0,320	0,328	0,305	0,318	112	36	148	0,787
9	142,3	360	361,5	360,5	360,7	0,325	0,333	0,313	0,324	120	40	160	0,790
10	155,9	380,8	382	381,9	381,6	0,343	0,350	0,323	0,339	132,5	44,5	177	0,790
11	168,9	400	401,2	400	400,4	0,355	0,363	0,340	0,353	145	49,5	194,5	0,794
12	185,3	420,7	421,8	420,6	421	0,378	0,383	0,353	0,371	160	55	215	0,795
13	189,7	425	426,5	425,5	425,5	0,380	0,385	0,355	0,373	164	55,5	219,5	0,798

Aşağıdaki tabloda 380 V, 50 Hz lik şebeke geriliminde Lineer asenkron motorun bobinleri ikişer ikişer seri bağlanıp bobin sonları yıldız bağlanmış olup kutup adım genişliği iki katına çıkarılmış durum için hız, itme kuvveti ve kayma değerleri ölçüldü.

**Tablo 4. 17.** Kütleye (yük) bağlı olarak hız, itme kuvveti ve kayma değerleri

NO	m ( Kg)	$g$ ( m/s)	$F_{itme} (N)$	$S = \frac{g_s - g}{g_s}$
1	0,100	0,587	0,039	0,905
2	0,200	0,518	0,060	0,916
3	0,295	0,456	0,069	0,926
4	0,355	0,425	0,072	0,931
5	0,825	0,251	0,059	0,959
6	1,000	0,159	0,029	0,974
7	1,820	Yükü taşımadı	.....	.....
8	3,125	Yükü taşımadı	.....	.....
9	4,200	Yükü taşımadı	.....	.....
10	5,000	Yükü taşımadı	.....	.....

#### 4. 15. Faz Dirençlerinin Ölçümü İçin Yapılan Testler

-48 Bobini olan motorun ikiye bölünerek 24 bobinli ve her faza 8 bobin bağlanarak bobin sonlarının yıldız bağlandığı durum için hesaplanan faz dirençleri.

a) Boşta

Bu nedenle A-B, B-C, C-A uçları şebekeye bağlanarak gerilim ve akım değerleri tabloya yazılmıştır. Her fazın aktif direnci tablodan yararlanarak aşağıdaki gibi hesaplanır.

**Tablo 4. 18.** Manyetik dağılımlı durumda faz dirençleri

Hatlar	Parametreler		
	I (A)	U (V)	r (Ω)
A-B	2,525	379,7	150,4
B-C	2,563	379,6	148,1
C-A	2,558	380,8	148,9

$$r_{AKL} = \frac{r_{CA} + r_{AB} - r_{BC}}{2} = 75,6 \Omega$$

$$r_{BKL} = \frac{r_{AB} + r_{BC} - r_{CA}}{2} = 74,8 \Omega$$

$$r_{CKL} = \frac{r_{BC} + r_{CA} - r_{AB}}{2} = 73,3 \Omega$$

b) Stator çekirdek kalınlığı 10 mm olan çelik tabaka ile kapatılarak tüm manyetik alanın bu çelik tabakadan geçirilmesi sağlanıyor yukardaki işlemler tekrarlanarak sonuçlar aşağıdaki tabloya göre tekrar hesaplanıyor.

**Tablo 4. 19.** Manyetik dağılım olmadığı durumda (kayıpsız) faz dirençleri

Hatlar	Parametreler		
	I (A)	U (V)	r(Ω)
A-B	0,650	379,8	584,3
B-C	0,640	380,5	594,5
C-A	0,625	379	606,4

Fazların aktif dirençleri:

$$r_{AKS} = \frac{r_{CA} + r_{AB} - r_{BC}}{2} = 298,1 \Omega$$

$$r_{BKS} = \frac{r_{AB} + r_{BC} - r_{CA}}{2} = 286,2 \Omega$$

$$r_{CKS} = \frac{r_{BC} + r_{CA} - r_{AB}}{2} = 308,3 \Omega$$

- Bobinler çift çift seri bağlanmış olup kutup adımının büyütüldüğü ve bobin sonlarının yıldız bağlandığı durum için hesaplanan faz dirençleri:

a) Boşta

Her fazın aktif direnci tablodan yararlanarak aşağıdaki gibi hesaplanır.

**Tablo 4. 20.** Manyetik dağılımlı (kayıplı) durumda faz dirençleri

Hatlar	Parametreler		
	I (A)	U (V)	r (Ω)
A-B	0,670	381,2	569
B-C	0,665	383,0	576
C-A	0,665	380,5	572

$$r_{AKL} = \frac{r_{CA} + r_{AB} - r_{BC}}{2} = 282,5 \Omega$$

$$r_{BKL} = \frac{r_{AB} + r_{BC} - r_{CA}}{2} = 286,5 \Omega$$

$$r_{CKL} = \frac{r_{BC} + r_{CA} - r_{AB}}{2} = 289,5 \Omega$$

b) Stator çekirdek kalınlığı 10 mm olan çelik tabaka ile kapatılarak tüm manyetik alanın bu çelik tabakadan geçirilmesi sağlanmış ve yukardaki işlemler tekrarlanarak sonuçlar aşağıdaki tabloya göre tekrar hesaplanmıştır.

**Tablo 4. 21.** Manyetik dağılım olmadığı durumda (kayıpsız) faz dirençleri

Hatlar	Parametreler		
	I (A)	U (V)	r (Ω)
A-B	0,313	380,9	1217
B-C	0,310	382,9	1235
C-A	0,315	380,9	1209

Fazların aktif dirençleri:

$$r_{AKS} = \frac{r_{CA} + r_{AB} - r_{BC}}{2} = 595,5 \Omega$$

$$r_{BKS} = \frac{r_{AB} + r_{BC} - r_{CA}}{2} = 621,5 \Omega$$

$$r_{CKS} = \frac{r_{BC} + r_{CA} - r_{AB}}{2} = 613,5 \Omega$$

#### 4. 16. Farklı Çeşit Rotor ( Sekonder ) Denemeleri

A) : Kalınlığı 0,5 mm ve ebatları 12 x 12 cm olan rotor sacı üzerine 0,30 mm kesitinde 200 sipir bobin teli sarılmış ve sargının son uçları seri bağlanmıştır.

Yıldız bağlı lineer motora 380V, 50 Hz lik şebeke gerlimi uygulanmış ve oluşturulan bu sekonder levha primer ile sekonder levha arasındaki çekim kuvvetinden dolayı kesik kesik çalıştırılabilmiştir. Sekonder ( araba ) taşıyıcıyı yüklediğimizde hareketin dahada zorlaştığı görülmüştür.

B) : Kalınlığı 0,5 mm ve ebatları 12 x 12 cm olan rotor sacı üzerine 0,30 mm kesitinde 200 sipir bobin teli sarılmış ve sarılan bu sağırların her bir spiri buydan boya paralel olacak şekilde kısa devre edilmiştir.

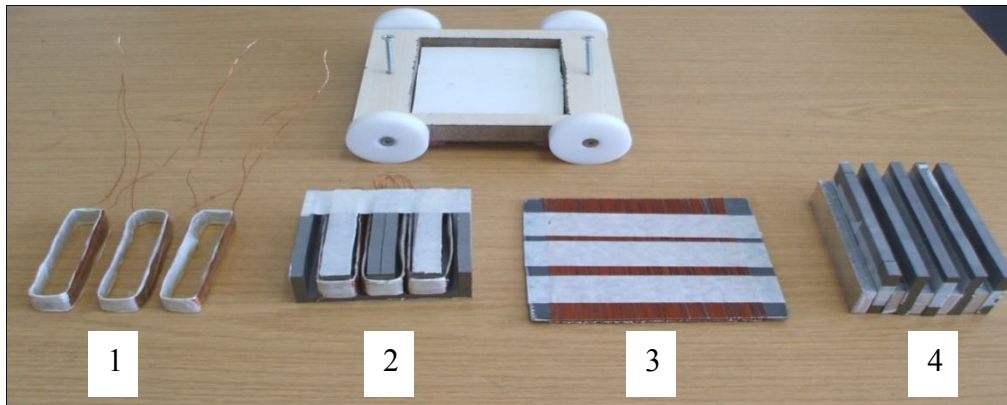
Yıldız bağlı lineer motora 380 V, 50 Hz lik şebeke gerlimi uygulanmış ve oluşturulan bu sekonder levha primer ile sekonder levha arasındaki çekim kuvvetinden dolayı kesik kesik çalıştırılabilmiştir. Sekonder ( araba ) taşıyıcıyı yüklediğimizde hareketin dahada zorlaştığı fakat bobinleri seri bağlı rotora göre daha iyi olduğu gözlenmiştir.

C) : Şekil 4. 7. 4 den de görüldüğü gibi I tipi trafo saçları ile alüminyum çubuklardan oluşan sekonder in alüminyum çubuklarının uçları kısa devre edilmiştir.

Yıldız bağlı lineer motora 380V, 50 Hz lik şebeke gerlimi uygulanmış ve oluşturulan bu sekonder blok primer ile sekonderin I tipi trafo saçları arasındaki çekim kuvvetinden dolayı hareket ettirilememiştir.

D) : Yine Şekil 4. 7. 2 den de görüldüğü gibi E tipi trafo saçları ile oluşturulan düzenin içine 3 adet 50 sipirlik ve 3 adet 100 sipirlik bobin ayrı ayrı sarılıp yerleştirilerek denenmiştir. Sargı uçları ayrı ayrı seri ve paralel olarak bağlanmıştır.

Yıldız bağlı lineer motora 380V, 50 Hz lik şebeke gerlimi uygulanmış ve oluşturulan bu sekonder blok primer ile sekonderin E tipi trafo saçları arasındaki çekim kuvvetinden dolayı hareket ettirilememiştir.



**Şekil 4. 7.** Farklı rotor ( sekonder) deneme örnekleri

#### 4. 17. Şebeke Geriliminde Lineer Motordaki Harmoniklerin İncelenmesi

Aşağıdaki resimlerde; lineer asenkron motora 380 V, 50 Hz lik şebeke gerilimi uygulanmıştır. Daha sonra harmonik güç analizörü ile oluşan harmonikler gösterilmiştir. Resimlerden de görüldüğü gibi 1. 5. 7 ve 11. harmoniklerin yüksek olduğu izlenmiştir.

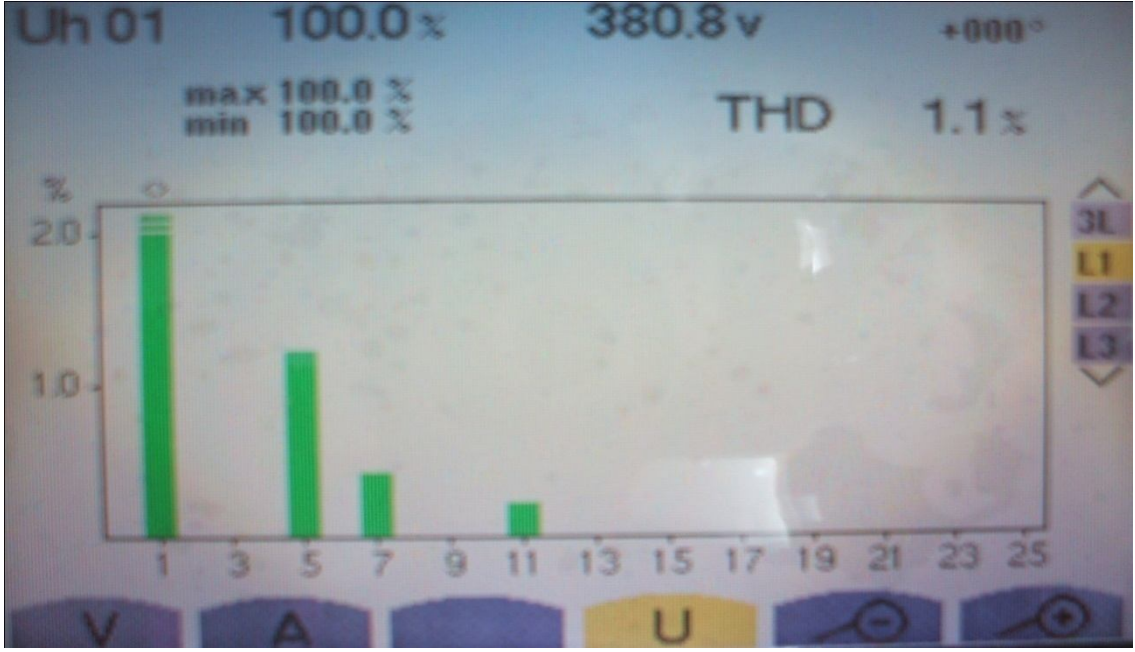


Şekil 4. 8. Motora uygulanan şebeke gerilimi ( R,S,T Fazları)



Şekil 4. 9. Üç faza ait toplu harmonik görüntüsü

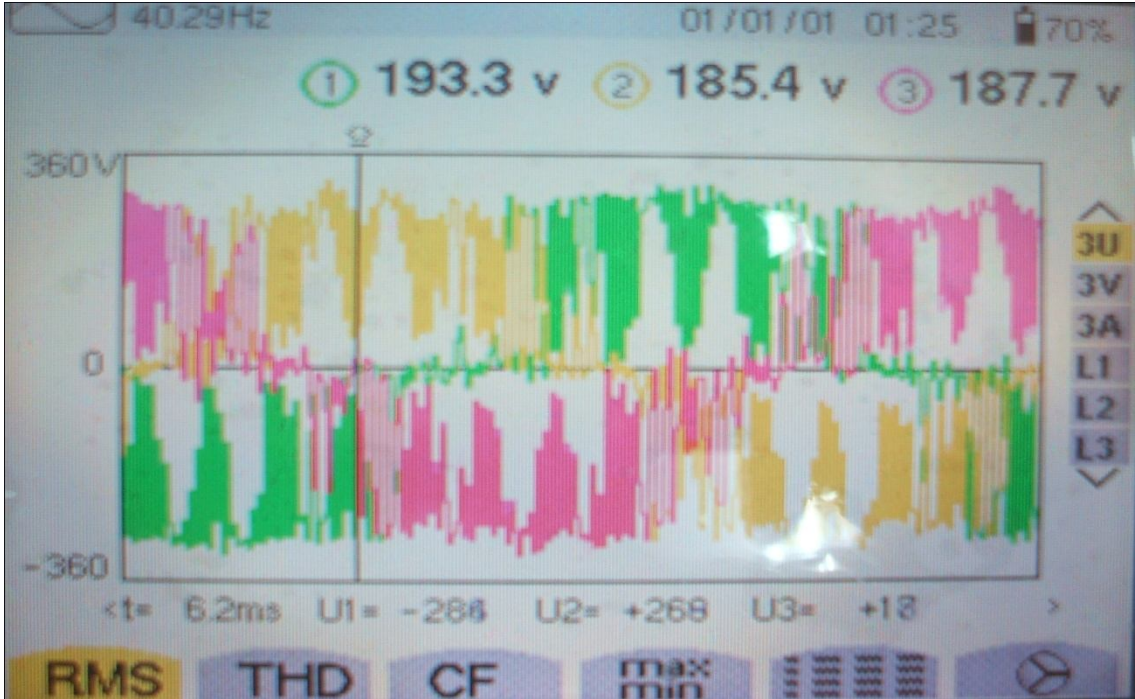




Şekil 4. 10. Tek faza ait harmonik görüntüsü

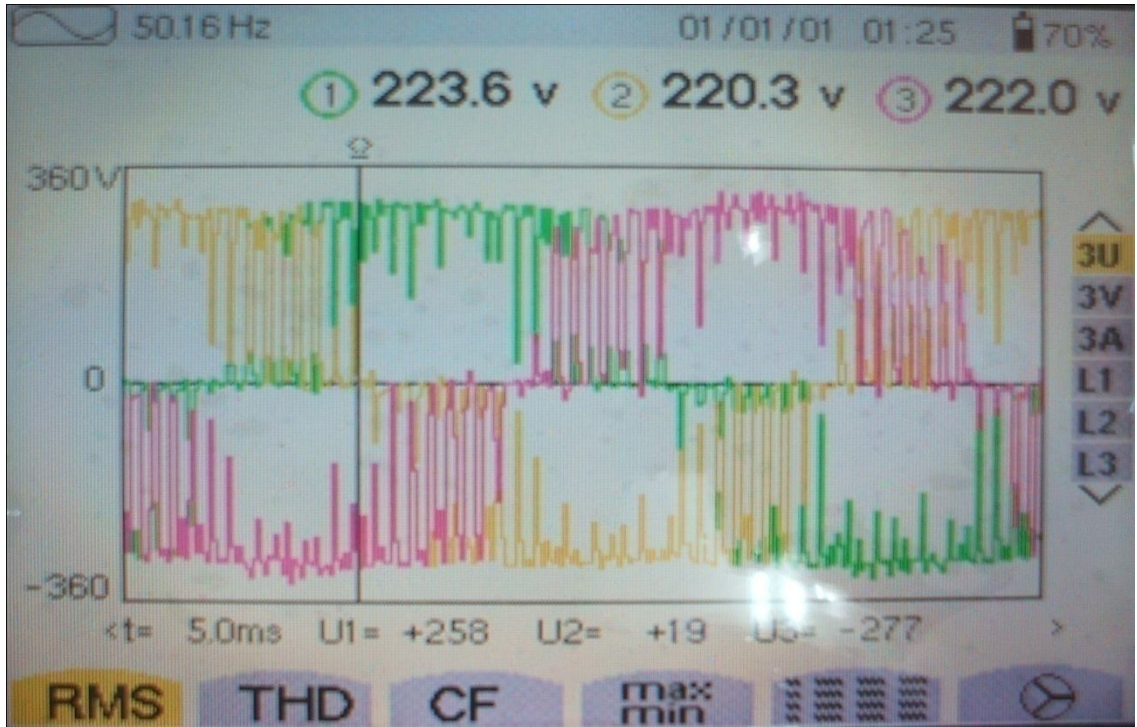
#### 4. 18. Hız Kontrol Cihazı İle Lineer Motordaki Harmoniklerin İncelenmesi

Aşağıdaki resimlerde; lineer asenkron motora hız kontrol cihazı ile farklı frekanslar da gerilimler verilmiştir. Daha sonra harmonik güç analizörü ile oluşan harmonikler izlenmiştir.

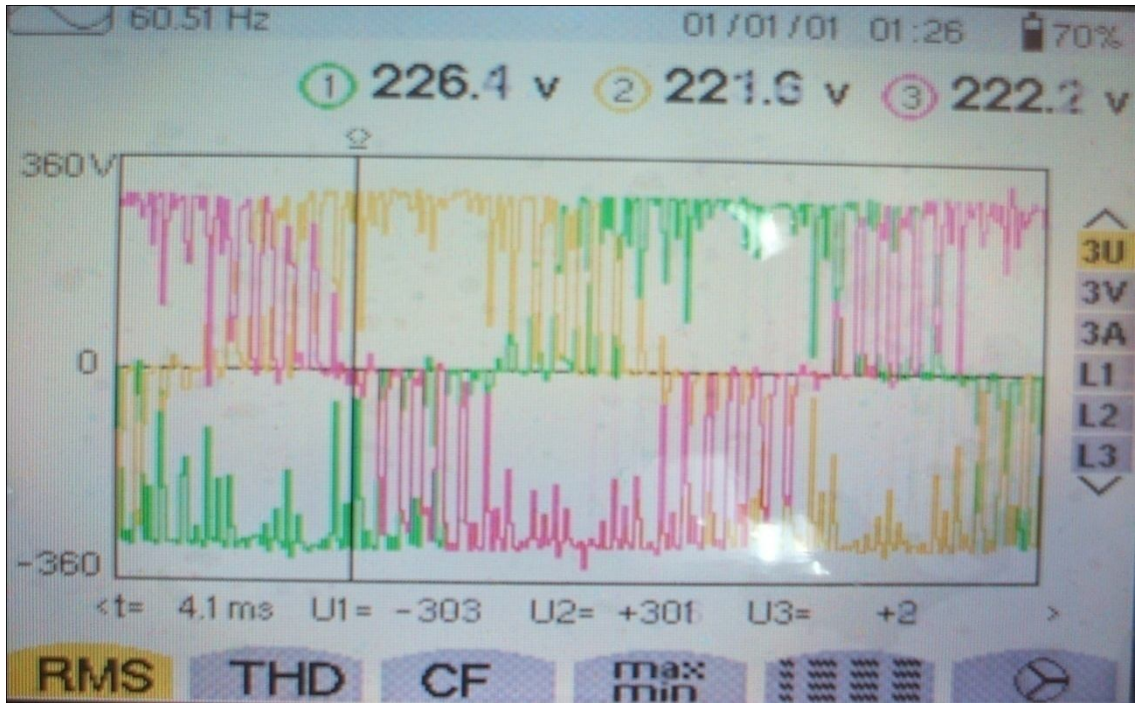


Şekil 4. 11. 40 Hz de frekansta üç fazın görüntüsü





Şekil 4. 12. 50 Hz frekansta üç fazın görüntüsü



Şekil 4. 13. 60 Hz de frekansta üç fazın görüntüsü

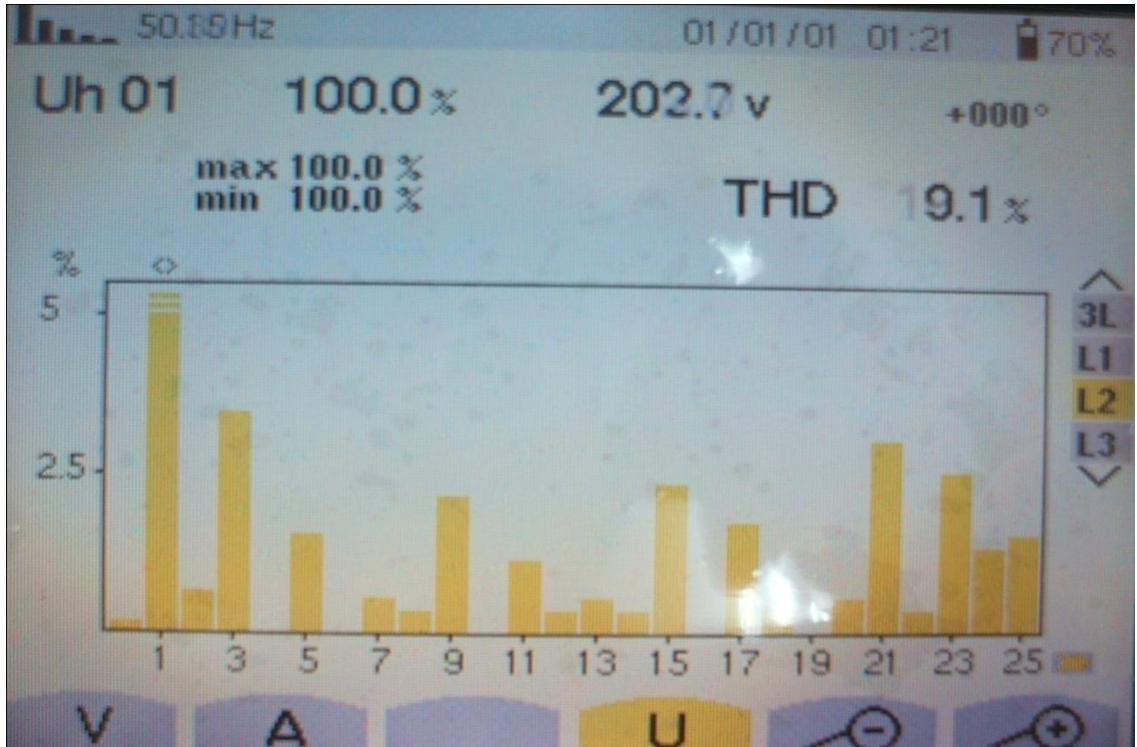


Şekil 4. 14. 40 Hz de motorda oluşan harmoniklerin tek faz görüntüsü

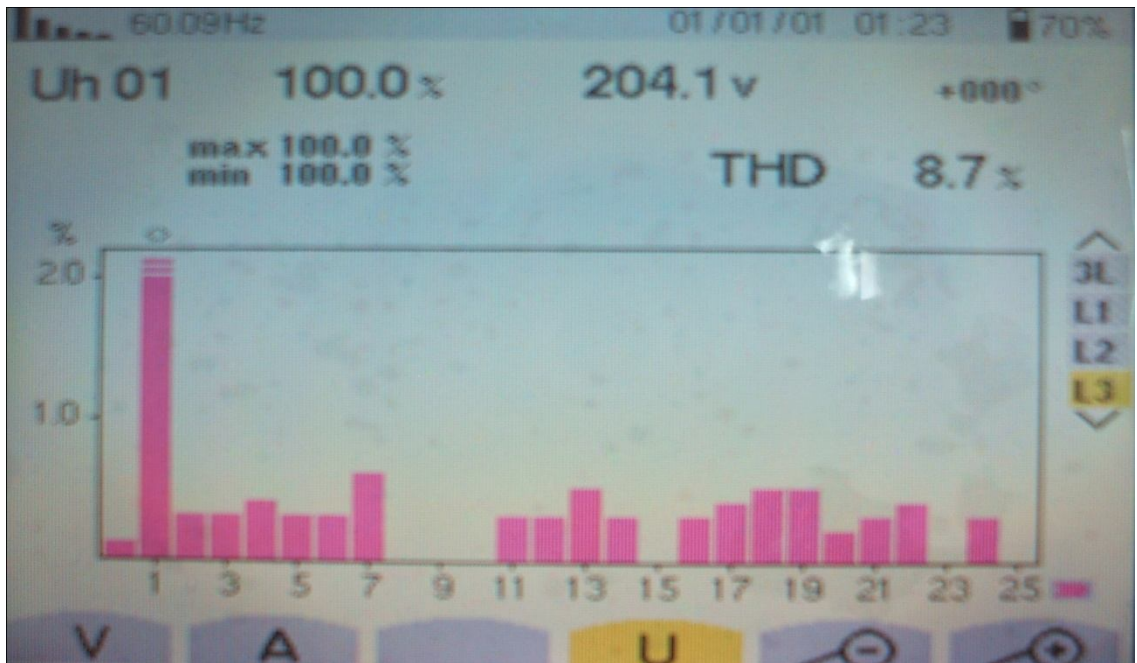


Şekil 4. 15. 50 Hz de üç fazın harmoniklerinin toplu ( her renk bir faz) görüntüsü





Şekil 4. 16. 50 Hz de tek fazın harmoniklerinin görüntüsü



Şekil 4. 17. 60 Hz de bir faza ait harmoniklerinin görüntüsü



**Şekil 4. 18.** Aynı faza ait gerilimin görüntüsü

Harmonik güç analizörüne ait resimlerden de görüldüğü gibi hız kontrol cihazı ile beslenen motordaki harmonikler daha fazladır.

#### **4. 19. Güç Kalitesi Analizörü ( CA 8332 B ) İle Ölçülen Değerler**

Aşağıdaki tabloda CA 83 32 A güç kalitesi analizöründe MN 93 A akım probu kullanılarak lineer asenkron motora oto transformatör ile farklı gerilimler verilmiş ve güç kalitesi analizöründen ölçülen değerler tabloda gösterilmiştir.

48 bobinden oluşan Lineer motorun sonu yıldız bağlıdır ve statoru boşa yani kayıplı durum için testler yapılmıştır.

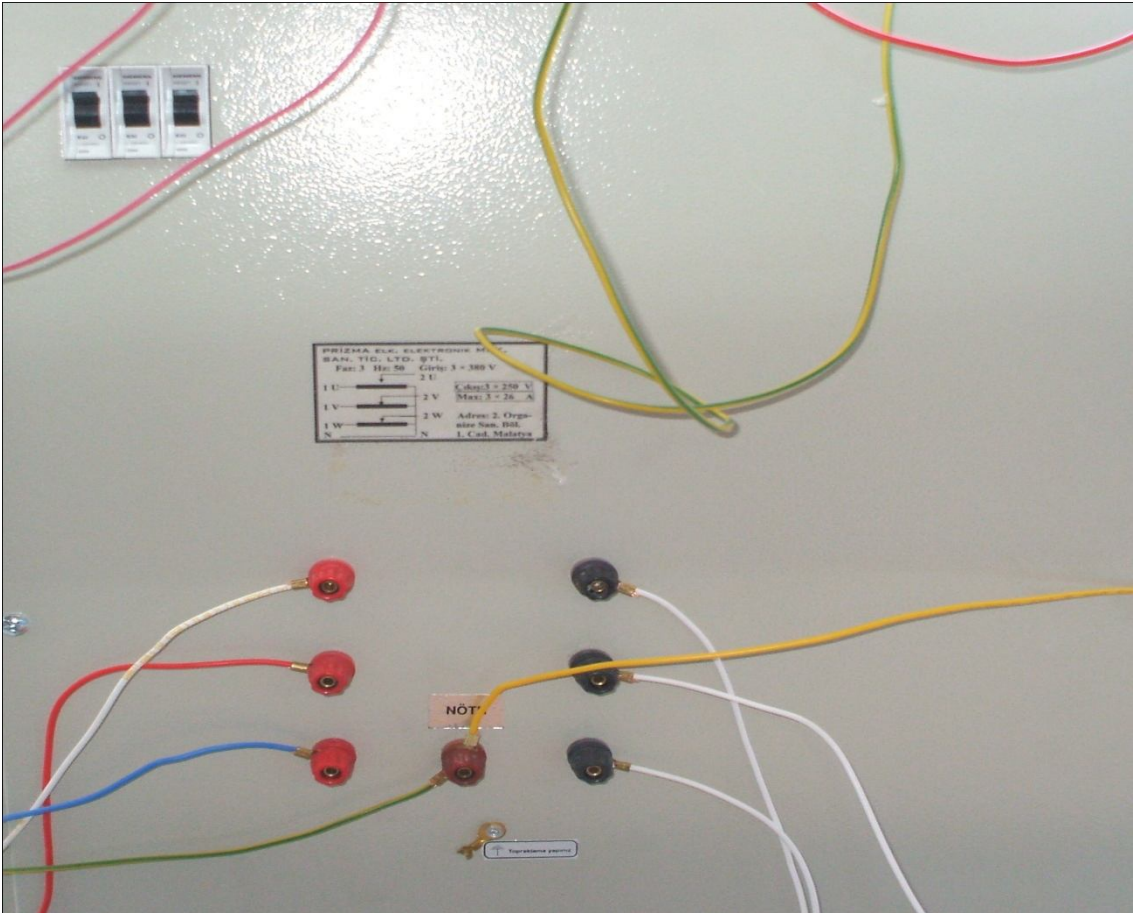
Stator 10 mm lik çelik tabakayla kapatılıp enerji verildiğinde güç kalitesi analizörünün akım proplarından akım bilgisi alınamadığından kayıpsız durum testi yapılmamıştır.

**Tablo 4. 22.** Güç analizörü ile ölçülen değerler

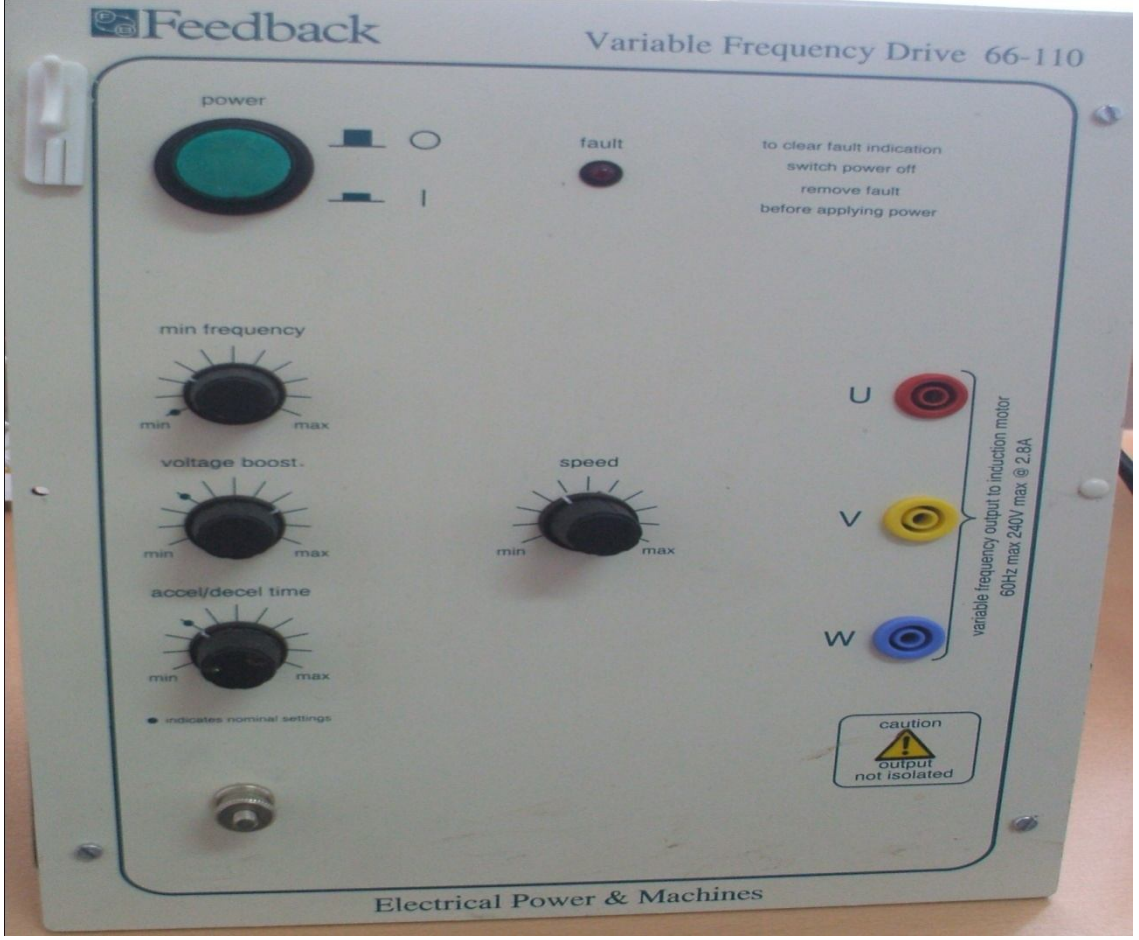
No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$U_1$	190,9	220,3	239,5	260,5	279,7	300	320	340	360	380	400	420	437
$U_2$	191,6	220,9	240,5	262	280,8	301,6	321,4	341,9	362	381,8	400,3	421,1	439
$U_3$	191,6	221	240,2	261,3	279,9	301,5	320,4	340,8	360,5	380,6	400	420,2	438,1
$I_1$	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7
$I_2$	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7
$I_3$	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7
$P_1$	36,3	47,5	55,2	64,8	73,7	83,9	93,9	104,8	115,1	126,3	137,2	149,5	159,5
$P_2$	35,5	46,6	54,4	64,1	72,9	82,7	92,8	103,8	114,4	125,6	136,7	148,1	158,8
$P_3$	35,6	46,7	54,5	64,0	72,6	82,9	92,5	103,4	114	125,1	136,2	147,6	158,4
$Q_1$	19	24,4	27,9	32,4	36,2	40,4	44,3	48,5	52	56,2	59,8	63,7	66,3
$Q_2$	19,6	25,3	28,9	33,7	37,7	41,9	46	50,5	54,2	58,6	62,2	66,5	69,3
$Q_3$	19	24,4	27,8	32,1	35,9	40	43,8	48,1	51,5	55,4	58,9	63,1	65,7
$S_1$	40,9	53,3	61,7	72,2	82	92,9	103,6	115,1	126	137,8	149,3	162,6	172,7
$S_2$	40,6	52,9	61,4	72,2	82	92,7	103,5	115,2	126,4	138,1	149,7	162,7	173,2
$S_3$	40,3	52,6	61,1	71,5	80,9	91,9	102,5	114,1	125	136,6	147,7	160,8	171,3
$V_1$	110,4	127,2	138,2	150,5	161,4	173,6	184,7	196,3	207,6	219,3	230,8	242,7	252,3
$V_2$	110,3	127,3	138,3	151	161,9	173,7	185,2	169,9	208,7	219,9	231,3	243,4	253,1
$V_3$	110,8	127,7	138,8	151,1	162,1	174	185,4	197,2	208,8	220,1	231,4	243,4	253,1
$P_T$	107,3	140,4	163,5	192,0	219,1	248,5	278,7	310,7	342	375,8	408,7	444,8	476
$Q_T$	57,3	74	84,3	97,5	109,2	121,9	133,5	146,1	157	169,3	179,5	191,8	200,2
$S_T$	121,9	158	183,8	215	224	277	308,7	324,6	377	412,9	445,9	484	515,1
$Cos\varphi$	0,882	0,885	0,889	0,891	0,894	0,898	0,901	0,905	0,909	0,911	0,915	0,918	0,921



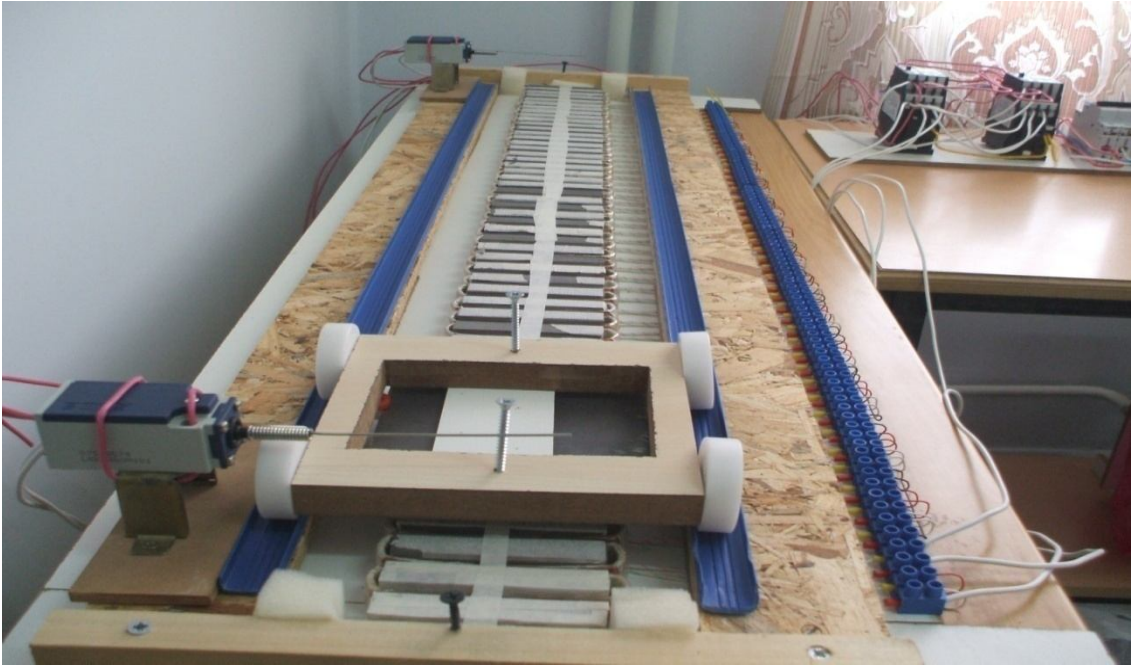
#### 4. 20. Linear Asenkron Motor Deneme Görünümleri



Şekil 4. 19. Gerilimi ayarlanabilir oto transformatör ve ayar kolu

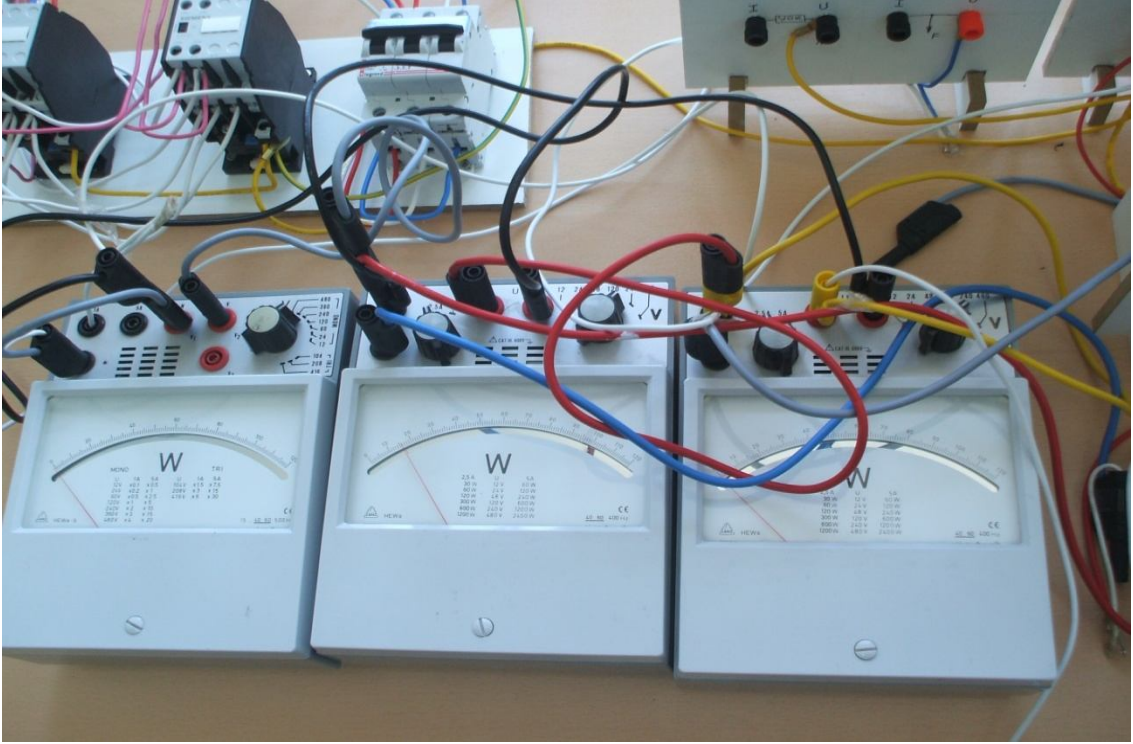


Şekil 4. 20. Frekansı değiştirilebilen sürücü ( invertör)



Şekil 4. 21. Lineer asenkron motor





Şekil 4. 22. Watmetreler

#### 4. 21. Lineer asenkron motorun primer manyetik akı ölçüm değerleri

Lineer asenkron motor 380 V, 50 Hz lik şebeke gerilimi ile beslenmiş ve primer in çekirdekleri üzerindeki manyetik akı yoğunluğu değişik durumlar için ölçülerek aşağıda belirtilmiştir.

- 1- Primer çekirdekleri 1 cm' lik çelikle kaplı :  $\Phi = 0,15 - 0,18$  mT (mili tesla)
- 2- Primer çekirdekleri 0,5 mm' lik saçla kaplı :  $\Phi = 10 - 10,6$  mT (mili tesla)
- 3- Primer çekirdekleri 2 cm' lik çelikle kaplı :  $\Phi = 0,102 - 0,124$  mT (mili tesla)
- 4- Primer çekirdekleri boş ken :  $\Phi = 12,75 - 12,85$  mT (mili tesla)

değerleri ölçülmüştür.

#### 4. 22. Sonuç

Bu bölümde oluşturulan lineer asenkron motorun bağlantıları, yürüyen manyetik alan oluşumu, oluşan alanın grafiksel ve analitik çözümü üzerinde durulmuştur.

Oluşturulan lineer asenkron motor deneysel olarak incelenmiş, test sonuçlarına göre lineer asenkron motorun dairesel diyagramı ve karakteristikleri çıkarılmıştır. Lineer asenkron motorun bağlantısı değiştirilerek farklı bağlantılar için elde edilen test sonuçları tablolar halinde oluşturulmuştur. Şebeke geriliminde ve hız kontrol cihazı ile lineer asenkron motorda oluşan harmonikler incelenmiştir.



## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasının ikinci bölümünde literatür analizi yapılmış olup lineer asenkron motorların tarihçesi ve genel özellikleri hakkında bilgiler, elektro manyetik alanlar ve kuvvetler, lineer asenkron motorların döner asenkron motorlara benzetilerek oluşturulan günümüzde kullanılan çözüm yöntemleri verilmiştir.

Tezin üçüncü bölümünde lineer asenkron motor için kullanılan analiz yöntemleri, tasarlanan lineer asenkron motorun teknik verileri, motorun hazırlanması, motorun primer çekirdeklerinin oluşturulması, güç ve kumanda devresi hakkında bilgiler verilmiştir ve lineer asenkron motorun çok katlı eşdeğer devresi kurulmuş, iki kapılılar teorisine göre lineer motorun katmanlarındaki alan şiddetlerinin denklemleri yazılmıştır.

Lineer asenkron motorun çok katlı modeli Şekil 3. 9' da görüldüğü gibi elde edilmiştir. Sınır koşulları kullanılarak Maxwell'in elektro manyetik dalga denklemleri Helmholtz denklemlerine dönüştürülmüş ve bu denklemler çözülmüştür. Çözüm sonucunda iki kapılıların "II" şekilli eşdeğer devresi Şekil 3. 10' da elde edilmiş, aktif katın "T" ve "II" şekilli eşdeğer devreleri Şekil 3. 12' de görülmektedir. İki kapılıların seri-zincir bağlama yöntemini kullanarak çok katlı sistemin eşdeğer analog devresi Şekil 3. 13' de oluşturulmuştur. Elektroteknik yöntemler kullanılarak eş değer devrenin parametreleri elde edilir ve lineer asenkron motorun tasarımında kullanılır.

Dördüncü bölümde lineer asenkron motorda yürüyen dalganın oluşması vektörel ve trigonometrik şekilde incelenerek Şekil 4. 1' de verilmiştir. Literatürlerde bu dalga boncuk şeklinde yayıldığı verilmiştir, incelemeler sonucunda yürüyen dalganın boncuk şeklinde olmadığı Şekil 4. 1 (f) ve Şekil 4. 1 (g)' de görülmektedir.

Yine dördüncü bölümde yapılmış olan Lineer Asenkron Motorun deneysel analizi verilmiştir. Bu bölümde farklı rotor türlerinin deneme sonuçları, primer sargılarının çift kutuplarını değiştirerek yapılan test sonuçları tablolar şeklinde verilmiştir. Test sonuçlarına göre hangi durumda lineer asenkron motorun daha verimli olduğu belirtilmiştir. Bu bölümün en önemli kısımlarından biri deneme yoluyla dairesel diyagramın kurulması ve kurulan bu diyagramı kullanarak makinanın çalışma karakteristiklerinin bulunabilmesidir. Literatürde böyle bir çalışma hakkında bilgi olmadığından tezin bu kısmı makale şeklinde yayınlamış ve makalenin fotokopisi ekte verilmiştir.

Yapılan çalışmalar sonucunda lineer asenkron motorların imal edildikten sonra esas karakteristiklerinin kurulmasının imkanı doğmuştur. Lineer asenkron motor için oluşturulan bu karakteristikler Şekil 4. 6 da gösterilmiştir. Kurulmuş dairesel diyagramla makinanın çalışması sırasında parametrelerden herhangi birini (örneğin şebekeden çekilen gücü) ölçerek diğer parametreleri bulma imkaanımız doğmaktadır. Lineer asenkron motor için oluşturulan dairesel diyagram Şekil 4. 5 gösterilmiştir.

Denemeler sabit statorlu LAM' lar için yapılmıştır. Statoru hareketli lineer motorlarda bu yöntemin kullanılması istenirse, stator ve rotor ayrılarak aynı yöntemlerle karakteristiklerin alınması ve tasarım değerleri ile karşılaştırmak mümkündür.

Lineer asenkron motorun sekonderi çok katlı katmanlardan oluşturulduğunda ve sekonder üzerine ağırlık konulduğunda tek katlı sekondere göre daha hızlı hareket ettiği dolayısıyla itme kuvvetinin büyüdüğü gözlenmiştir.

Lineer asenkron motoru yıldız bağlı durumdan üçgen bağlı duruma çevirdiğimizde akım ve güç değerlerinde üç kat bir artış olduğu gözlenmiştir.

Yıldız bağlı motoru iki kısma ayırıp yine yıldız bağladığımızda nominal gerilimde 400 W olarak ölçülen toplam güç 1500 W değerine yükselmiştir. Yine akım değerleride aynı oranda artmıştır. Akım ve güçteki bu artış itme kuvvetinde de gözlenmiştir.

Lineer motorun bobinleri ikişerli seri bağlanıp bobin sonları yıldız bağlandığında sekonderin hareketinin zorlaştığı ve yük arttığında hareketin tamamen durduğu gözlenmiştir. Yıldız bağlı duruma göre akım ve toplam güç ifadelerinde düşme olmadığı halde itme kuvvetindeki bu düşüş manyetik akının itme kuvveti oluşturmakta verimsiz olduğunu göstermektedir.

Lineer motorun şebeke geriliminde 1. 5. 7. ve 11. harmoniklerinin yüksek olduğu invertör ile çalıştırıldığında harmoniklerin daha fazla olduğu ölçülerek gözlenmiştir.

Lineer asenkron motorun sekonder performansı için yapılan denemelerde

- 1- I tipi sac ve alüminyum çubuklu sekonder
- 2- E tipi sac ve sargılı sekonder
- 3- Demir sac üzeri sargılı sekonder
- 4- Tek katlı alüminyum ve demirden oluşan sekonder
- 5- Çok katlı alüminyum ve demirden oluşan sekonder

Olmak üzere sekonderi seri ve paralel bağlantılı çeşitli sekonder örnekleri denenmiştir. Oluşturulan bu sekonderler içinde en iyi performans sekonderi alüminyum ve demir levhalardan oluşturulan çok katlı sekonder örneğinde elde edilmiştir.

Döner asenkron motorlara göre birçok avantajları olan lineer asenkron motorların gelişen yarı iletken, bilgisayar, kumanda ve kontrol teknolojileri ile daha verimli hale getirileceği ve sanayide birçok uygulama alanı bulacağı tartışılmaz bir gerçektir.

## 6. KAYNAKLAR

- [1] H. Altun, “Lineer asenkron motorun vektör kontrolü” PhD Thesis, Fırat University Turkey, 2001.
- [2] O. Gürdal “*Elektrik makinelerinin tasarımı*”, Atlas yayın, 2001
- [3] Laithwaith, E.R. “*Induction Machines for Special Purposes*”, Chemical Publishnig Campany, New York, 1966
- [4] Al-Magayouf, M.A., Alwash S.R.and Bonniya , M.I., Finite Element “*Analaysis of Lineer Induction Motors*”, 1986
- [5] Yamamura, S., “*Theory of Linear Induction Motors*”, Wiley, New York, 1979
- [6] Jacke F. Gieras “*Linear Induction Drivers*”, Clarendon pres, Oxford, 1994
- [7] Bocarov V.I. and Nagarsky “*High-Speed Ground Transport with Linear Propulsion and Magnetic Suspansiyon Sistems*” (in Russian), Moscow, 1985
- [8] Zbigniew J. Piech, Jacek F. Gieras Connecticut, “*Linear Synchronous Motors Transportation Aoutomation Systems*”, July 1999
- [9] Mishkin E. “*Theory of the squirrel – cage indüktion machine drived directly from maxwell’s filed equations*”, The quarterly jourhal of machines and applied matematics, 1954,vol v VII. Part 4 p.472-487.
- [10] Turovskiy Y. Tekniksel Elektrodinamik, Moskova, Energiya 1974, 488 sah. ( Rusca)
- [11] Posthinkov I. M. Bezusiy L.G “*Çok katlı ortamlarda oluşan elektro manyetik alanların hesaplanması*”, SSRI Bilimler akademisinin bildirileri, Energetik ve Taşıma, 1970 N6, P42-49
- [12] Polivanov K.M. “*Elektro Teknigin Teorik Temelleri III*”, Moskova Energiya, 1975, ( Rusca)
- [13] Greig J. Freeman E. M. “*Travelling – wave problem in electrical machines, Proceedings of the Institutution of electrical Engineers*”, ( proc. IEE), 1967. Voll 114. No 11. P. 1681-1683
- [14] Adam T., Toth F. and Papp L., “*Position ControlLed Lineer Motor Drive for Conveyor Systems*” 1998
- [15] Richard, H. Engelman,William, H. Middeendorf, “*Handbook of Electrical Motors*”, p. 149 Marcel Dekker Inc., p.55, NewYork, 1995
- [16] B.K. Bose,“*Power electronics and AC drivers Bose*”, Prentice Hall NJ. 1986

## ELEKTRİK MOTORLARI

**Döner rotorlu asenkron motorlarda makinanın esas karakteristiklerinin bulunması amacıyla açık devre ve kısa devre deneyleri yapılmaktadır. Lineer asenkron motorlarda böyle deneylerin yapılması mümkün olmadığından, önemli karakteristikleri teorik işlemler sonucunda bulunmaktadır. Bu çalışmada gerçek lineer motor üzerinde yapılan deneylerle motorun karakteristikleri oluşturulmaya çalışılmıştır.**

## Lineer Asenkron Motorların Deneysel Analizi

Arif Memmedov (memmedov@inonu.edu.tr)  
Cuma Kıraç (kiraccuma@hotmail.com)

Günümüzde bilimsel ve teknik gelişmelerin hızlanması nedeniyle, bilim adamlarından teknik ve elektro mekanikte, geliştirilmiş teknik işlemlerin ve teknolojilerin tasarlanması ve kullanılması istenmektedir.

Sanayide kullanılan teknolojinin esas elamanlarından biri elektrik- makina sürücüleridir. Teknolojinin gelişmesiyle güç elektroniği ve mikroişlemci teknolojisindeki gelişmeler elektrik- makina sürücülerinin daha verimli çalıştırılması ve daha esnek kontrol sistemlerinin oluşturulmasına imkan vermektedir. Böylelikle elektrik- makina sürücülerinin günümüzde robotik teknolojinin ve esnek kontrol sistemlerinin esas komponentlerinden biri olmaktadır.

Sanayide kullanılan elektrik motorlarının yaklaşık yüzde 50'si (8) ileri-geri lineer hareket eden mekanizmalar ve makinalarda kullanılmaktadır. Bu nedenle motor milinin dönme hareketinin lineer harekete dönüştürülmesi için ek mekanizmalara ihtiyaç duyulmaktadır ki, bu da kayıpların artmasına ve makinanın çalışma esnekliğinin azalmasına neden olmaktadır.

Lineer elektrik motorları ise ileri ve geri hareket imkanına sahip olduğu için iletili -dönüştürücü gibi aktarma organlarının kaldırılmasına olanak vermektedir. Bu durum lineer elektrik motorları ile çalışan mekanizmaların aynı gövdeye bağlanmasına imkan sağlamaktadır. Böylece lineer motorlar ek kayıpların yok olmasına ve sistemin esnek çalışmasına katkıda bulunurlar.

Bazı çalışma mekanizmalarında lineer elektrik motor sürücü sistemleri ve çalışma mekanizmalarının otomatik kontrol sistemleri arasındaki sınırları belirlemek mümkün değildir; başka bir deyişle lineer motorlar çalışma mekanizmaları ile ayrılmaz bir bütün oluşturmaktadır. Lineer motorlar birçok üstünlükleri olduğundan günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır (1, 3, 4, 5). Lineer motorların üstünlüklerinden bazılarını aşağıdaki gibi sıralayabiliriz.

1- Taşıma araçlarında tekerlekleri etkileyen merkezkaç kuvvetlerinin, ray ve yol ile olan sürtünme kuvvetlerinin azaltılması, hareket hızının artırılması, yol verme ve frenleme zamanının ve boyunun azaltılması, ortam kirliliğine sebep olan etkilerin ortadan kalkması.

2- Sanayide kullanılan mekanizmalar, cihazlar ve otomatik sistemlerde lineer motorların primer ve sekonder parçaları arasındaki mekaniksel bağlantıların olmaması; mekaniksel kayıpların azalması, kinematik devrelerin basitleştirilmesi, kontrolde kalite ve devamlılığın artırılması v.b

3- Aggressive ortamlarda, patlamadan korkulan kapalı ortamlarda, steril ve derin vakumlu ortamlarda, büyük basınçlı kaplarda, radyoaktif ortamlarda ve çalışmanın zor olduğu durumlarda kullanılmaktadır.

4- Yukarıda belirtilen üstünlüklerine rağmen lineer asenkron motorların manyetik devrelerinin açık olması sebebiyle, bir dizi yetersizlikleri de mevcuttur. Bu yetersizlikler lineer asenkron motorun kullanımını olumsuz yönde etkilemektedir. Tasarımda aktif malzemelerin kullanımının artması ve çeşitli istenmeyen elektriksel etkilerin oluşması, elektriksel verilerin kötüleşmesine ve çalışma karakteristiklerinin her zaman olumlu olmamasına neden olmaktadır.

Günümüzde lineer asenkron motorların incelenmesi alanında basılmış yüzlerce bilimsel çalışmanın büyük çoğunluğunda kenar ve uç etkileri ile teorik araştırmalar göz önüne alınmıştır. LAM'ların konstrüksiyonlarının, fiziksel proseslerinin analizi, tasarımı, karakteristiklerinin mühendislik yöntemleriyle analizine ait oldukça az kaynak bulunmaktadır. Bu makinaların imal edildikten sonra denenmesi ve karakteristiklerinin tasarım verileri ile karşılaştırılıp değerlendirilmesi alanında çalışma bulunmamaktadır. Makalemizde bu yetersizliğin giderilmesi açısından yapılan çalışmaların sonuçları göz önüne alınmıştır.

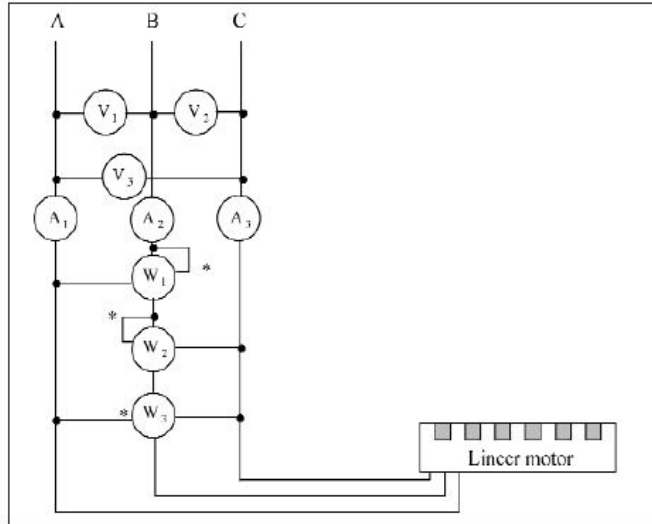




### 1- Lineer Asenkron Motorun Deneysel Devresi

Döner rotorlu asenkron motorlarda makinanın esas karakteristiklerinin bulunması amacıyla açık devre ve kısa devre deneyleri yapılmaktadır. Lineer asenkron motorlarda böyle deneylerin yapılması mümkün olmadığından, önemli karakteristikleri teorik işlemler sonucunda bulunmaktadır. Bu çalışmada gerçek lineer motor üzerinde yapılan deneylerle motorun karakteristikleri oluşturulmaya çalışılmıştır. Bu nedenle döner rotorlu asenkron motorlarda kullanılan açık devre deneyi gibi burada stator çekirdeklerinin yüzeyi manyetik malzeme olan, çelik bir tabaka ile kaplanmış ve manyetik alanın tümüyle manyetik direnci düşük olan çelik üzerinden kapanması sağlanmıştır. Döner rotorlu asenkron motorlardaki kısa devre rejimine denk gelen durum gibi, stator manyetik devresinin açık olduğu (yani rotor olmayan durum) ve manyetik direncin maksimum değere sahip olduğu durumların deneyi yapılmıştır. Kayıplı deney devresi için şekil (1) göz önünde bulundurulmuştur.

$V_1$ :  $U_{AB}$  Hat gerilimini ölçen voltmetre  
 $V_2$ :  $U_{BC}$  Hat gerilimini ölçen voltmetre  
 $V_3$ :  $U_{AC}$  Hat gerilimini ölçen voltmetre



Şekil 1 - Lineer motorun ölçü aletleri ile bağlantısı

$A_1$ :  $I_A$  Hat akımını ölçen ampermetre  
 $A_2$ :  $I_B$  Hat akımını ölçen ampermetre  
 $A_3$ :  $I_C$  Hat akımını ölçen ampermetredir.  
 Yukardaki devre bağlantısında  
 $W_1 = U_{AB} \cdot I_B \cdot \cos(\alpha_{AB, I_B})$  gücünü  
 $W_2 = U_{BC} \cdot I_B \cdot \cos(\alpha_{BC, I_B})$  gücünü  
 $W_3 = U_{AC} \cdot I_B \cdot \cos(\alpha_{AC, I_B})$  gücünü ölçüyor.

Ayrton yöntemine göre üç faza ait aktif toplam güç ifadesi

$$P_{3faz} = W_1 + W_2 = \sqrt{3} U_h I_h \cos\varphi$$

ile bulunur.

$W_3 = U_h I_h \sin\varphi$  ifadesine karşılık gelen gücü ölçmektedir. Bu nedenle motorun harcadığı reaktif gücün karşılığı;

$$Q = \sqrt{3} W_3$$

eşitliği ile bulunur.

Lineer asenkron motorun analizi aşamaları aşağıdaki gibidir:

1- Şekil 1'de gösterilen devre kurulumu.

2- Kayıplı ve kayıpsız durumlar için ampermetre-voltmetre yöntemi ile faz dirençleri ölçülür.

3- Kayıplı devre deneyi yapılır, deney sonuçlarına göre

$$I_{KL} = f(U_{KL}); \cos\varphi_{KL} = f(U_{KL}); P_{KL} = f(U_{KL})$$

karakteristikleri kurulur.

4- Kayıpsız devre deneyi yapılır ve deney sonuçlarına göre

$$I_{ks} = f(U_{ks});$$

$$\cos\varphi_{ks} = f(U_{ks});$$

$$P_{ks} = f(U_{ks})$$

karakteristikleri kurulur.

5- Kayıplı ve kayıpsız devre sonuçlarına göre; lineer asenkron motorun basitleştirilmiş dairesel diyagramı kurulur.

6- Dairesel diyagram kullanılarak lineer asenkron motorun  $P$ ,  $F$ ,  $I$ ,  $\eta = f(s)$  ve  $\cos\varphi$  özel karakteristikleri kurulur.

### 2- Faz Dirençlerinin Ölçümü

a) Kayıplı durumda faz dirençlerinin ölçümünde şekil (1)'deki devre kullanılır. Bu nedenle seri olarak A-B, B-C, C-A uçları şebekeye bağlanarak gerilim ve akım değerleri ölçülüp tablo 1'e yazılmıştır. (Not: Yüksek hassasiyet isteniyorsa her durum için 4-5 ölçüm yapılarak ortalama değer alınır.) Her fazın aktif direnci tablodan yararlanılarak aşağıdaki gibi hesaplanır.

Hatlar	Parametreler		
	I (A)	U (V)	r ( $\Omega$ )
A-B	0,633	380,2	600,6
B-C	0,642	380,7	593,0
C-A	0,630	379,6	602,5

Tablo 1

Her faza ait aktif dirençler aşağıdaki ifadelerden bulunur.

$$r_{AKL} = \frac{r_{CA} + r_{AB} - r_{BC}}{2} = 305,05 \Omega$$

$$r_{BKL} = \frac{r_{AB} + r_{BC} - r_{CA}}{2} = 295,5 \Omega$$

$$r_{CKL} = \frac{r_{BC} + r_{CA} - r_{AB}}{2} = 297,45 \Omega$$

Dairesel diyagram motor ısınması göz önüne alınarak kurulduğundan dirençlerin değerleri 75°C sıcaklığı için hesaplanmalıdır. Bu nedenle faz dirençleri 75°C'deki değerlere dönüştürülür.

$$r_{AKL(75^\circ C)} = r_{AKL} \{1 + \alpha(75^\circ - \theta_0)\}$$



$$\alpha_{\text{bakr}} = 4,2 \cdot 10^{-3} K^{-1}$$

$$K^{-1} = \frac{4,2 \cdot 10^{-3}}{273} C^{-1} = 1,583 \cdot 10^{-5}$$

Burada  $r_{AKL(75^\circ C)}$ ;  $75^\circ C$ 'deki direncin değeri

$\alpha$ ; Direncin sıcaklık katsayısı

$\theta_0$ ; Ölçüm zamanındaki

bobinin sıcaklığıdır.

Böylelikle

$\alpha_{\text{bakr}} = 4,2 \times 10^{-3} K^{-1}$ ,  $\theta_0 = 37^\circ C$

olduğu durum için

$r_{AKL(75^\circ C)} = 305,69 \Omega$ ;

$r_{BKL(75^\circ C)} = 295,68 \Omega$ ;

$r_{CKL(75^\circ C)} = 297,63 \Omega$ ; olur.

b) Stator çekirdek kalınlığı 10 mm olan çelik tabaka ile kapatılarak tüm manyetik alanın bu çelik tabakadan geçirilmesi sağlanıyor ve a'daki işlemlerle sonuçlar tablo 2'ye göre tekrar hesaplanıyor.

Hatlar	Parametreler		
	I (A)	U (V)	r ( $\Omega$ )
A-B	0,173	380,0	2197
B-C	0,170	381,0	2240
C-A	0,175	380,5	2174

Tablo 2

Fazların aktif dirençleri:

$$r_{AKS} = \frac{r_{CA} + r_{AB} - r_{BC}}{2} = 1066,16 \Omega$$

$$r_{BKS} = \frac{r_{AB} + r_{BC} - r_{CA}}{2} = 1131,5 \Omega$$

$$r_{CKS} = \frac{r_{BC} + r_{CA} - r_{AB}}{2} = 1108,5 \Omega$$

Bu değerler bulunduktan sonra

$r_{AKS(75^\circ C)} = 1066,16 \Omega$ ;

$r_{BKS(75^\circ C)} = 1132,2 \Omega$ ;

$r_{CKS(75^\circ C)} = 1109,22 \Omega$

değerleri hesaplanır.

### 3: Manyetik Devrenin Kayıplı Durum Deneyi

Deneyin yapılması için şekil (1)'deki devrenin girişine gerilimi değiştirilebilen oto-transformatörün çıkışından enerji verilmiştir. Oto transformatör ile lineer asenkron motorun uçlarındaki gerilim değiştirilerek farklı gerilimler için ölçü aletlerinden ölçülen değerler tablo 3'e yazılmıştır.

Uygulanacak maksimum gerilim

$$U_6 = 1,2 \times U_n = 1,2 \times 380 = 456 V$$

olması gerekmektedir. Oto transformatörün maksimum çıkış gerilimi 437 V olduğundan

$$U_6 = 437 V \text{ alınmıştır.}$$

Tablo 3'te

$$U_{KL} = \frac{U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}}{3}$$

$$I_{KL} = \frac{I_A + I_B + I_C}{3}$$

$$P_{KL} = P_1 + P_2 \text{ ve}$$

$$\cos \varphi = \frac{P_{KL}}{\sqrt{3} U_{KL} I_{KL}}$$

olarak alınmıştır.

Tablo 3'ten alınmış verileri kullanarak

$$I_{KL}^* = f(U_{KL}^*);$$

$$P_{KL}^* = f(U_{KL}^*);$$

$$\cos \varphi = f(U_{KL}^*)$$

eğrileri oluşturulur. Şekil 2'deki eğrilerin oluşturulmasında parametreler nominal gerilimdeki değerlere bölünerek birimsiz hale getirilmiştir.

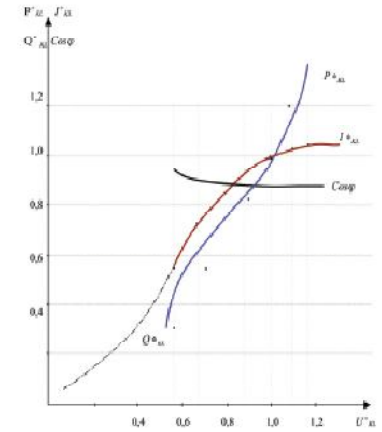
$$\frac{U_{KL}}{U_{KLn}} = U_{KL}^* ; \frac{I_{KL}}{I_{KLn}} = I_{KL}^* ;$$

$$\frac{P_{KL}}{P_{KLn}} = P_{KL}^* ;$$

Şekil 2'deki eğrilerden de gö-

rüldüğü gibi manyetik direncin maksimum değerinde; gerilim 0'dan  $U_n$  değerine kadar değiştirildiğinde akım, aktif ve reaktif güçler hızla nominal değerlere kadar büyür. Güç katsayısı ise azaldığından reaktif gücün artma hızı büyür.

$U_{KL} > U_n$  değerinde indüktörün bobinleri (sargıları) ısındığı ve aktif dirençleri büyüdüğünden akımın büyüme hızı düşmüş  $Q$ 'nun büyümesi  $P$ 'ye göre hızlanmış ve güç katsayısı azalmaya başlamıştır.



Şekil 2 - Manyetik devrenin açık olması hali

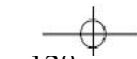
### 4: Manyetik Devrenin Kayıpsız Durum Deneyi

Bu durumda manyetik dağılım manyetik alanlarını minimuma indirmek (yok etmek) amacıyla, indüktör kalınlığı 10 mm olan çelik bir tabaka ile kaplanmış ve şekil 1'deki bağlantı göz önünde bulundurularak deneyler yapılmıştır. Alınan sonuçlardan bazı değerler tablo 4'te gösterilmiştir.

Tablo (4)'ün sonuçlarına göre kurulmuş olan eğriler Şekil 3'te gösterilmiştir. Eğrilerden de görüldüğü gibi akımla gerilimin ba-

No	Q (VAR)	U <sub>AB</sub> (V)	U <sub>BC</sub> (V)	U <sub>CA</sub> (V)	U <sub>KL</sub> (V)	I <sub>A</sub> (A)	I <sub>B</sub> (A)	I <sub>C</sub> (A)	I <sub>KL</sub> (A)	P <sub>1</sub> (W)	P <sub>2</sub> (W)	P <sub>KL</sub> (W)	cos φ
1	61,00	189,2	189,0	188,6	188,93	0,362	0,370	0,365	0,366	75,00	37,50	112,5	0,940
2	104,8	260,5	261,4	260,9	260,93	0,493	0,500	0,495	0,496	132,5	71,00	203,5	0,910
3	162,8	340,0	341,0	341,1	340,7	0,613	0,622	0,618	0,618	210,0	117,0	327	0,898
4	185,3	380,6	381,2	380,8	380,9	0,665	0,672	0,670	0,669	262,5	145,5	400	0,907
5	215,6	420,0	421,0	419,6	420,2	0,720	0,727	0,723	0,723	305,0	177,5	482,5	0,918
6	252,0	436,5	437,3	436,7	436,8	0,785	0,743	0,790	0,773	330,0	190,0	520,0	0,890

Tablo 3

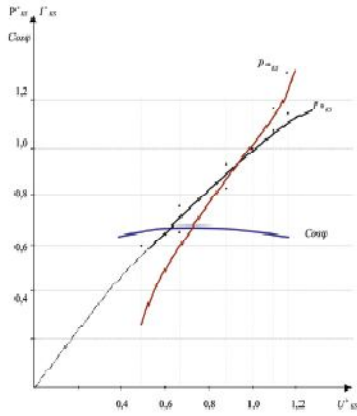






No	Q X √3 (VAR)	U <sub>AB</sub> (V)	U <sub>BC</sub> (V)	U <sub>CA</sub> (V)	U <sub>KL</sub> (V)	I <sub>A</sub> (A)	I <sub>B</sub> (A)	I <sub>C</sub> (A)	I <sub>KL</sub> (A)	P <sub>1</sub> (W)	P <sub>2</sub> (W)	P <sub>KL</sub> (W)	cosφ
1	20,05	190,3	191,1	190,0	190,53	0,12	0,12	0,115	0,118	22,5	2,5	25	0,643
2	35,00	260,9	261,2	261,3	261,13	0,15	0,15	0,15	0,151	38	6	44	0,645
3	50,00	340,5	342,0	341,6	341,4	0,18	0,175	0,177	0,177	59,5	10	69,5	0,665
4	60,50	380,7	381,1	380,5	380,8	0,20	0,193	0,195	0,196	72	12,5	84,5	0,654
5	71,50	420,2	421,3	420,1	420,5	0,22	0,21	0,215	0,215	85	15,5	100,5	0,642
6	76,00	438,5	439,3	438,1	438,6	0,23	0,22	0,218	0,222	92	16,5	108,5	0,644

Tablo 4



Şekil 3 - Manyetik devrenin, kalınlığı 10 mm. çelik tabaka ile kapalı olması hali

ğintısı ve güç katsayısının değişim eğrisi lineere çok yakındır. Bu, devrenin lineer rejimde çalıştığını göstermektedir. Çelik tabakada Fuko ve histerezis kayıplarının artması nedeniyle aktif ve reaktif güçler nominal gerilimden sonra hızla büyümektedir.

### 5: Lineer Asenkron Motorun Dairesel Diyagramı

Dairesel diyagramın kurulması için aşağıdaki büyüklükler gerekmektedir:

a) Nominal gerilimde tablo 3'te bulunmuş olan;

$$I_{KL} = 0,669A \text{ ve } P_{KL} = 400 W \text{ değerleri;}$$

b) Manyetik devrenin kayıpsız durumu için bulunmuş olan;

$$I_{KS} = 0,196 A \text{ ve } P_{KS} = 84,5 W \text{ değerleri;}$$

c) 75°C sıcaklığı için bulunmuş olan faz dirençleri;

$$r_{KL(75^\circ C)} = 295,68 \Omega \text{ ve}$$

$$r_{KS(75^\circ C)} = 1132,2 \Omega$$

d) Dairesel diyagramın kurulmasından önce akım için  $m_i = 0,05 A/cm$  ölçeği seçilmiş ve bu durumda gücün ölçeği:

$$m_p = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot m_i = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,05$$

$$= 38,87 W/cm$$

olur.  
Tablo 4'ten gerilimin nominal değerinde

$$I_{KS} = 0,196 A \text{ 'in aktif bileşeni:}$$

$$I_{KS(aktif)} = I_{KS} \cos \varphi_{KS}$$

$$\cos \varphi_{KS} = 0,196 \cdot 0,654 = 0,128 A$$

veya

$$I_{KS(aktif)} = \frac{0,128}{m_i} = \frac{0,128}{0,05}$$

$$= 2,56 cm = \overline{O_1 L}$$

uzunluğu

Reaktif bileşeni ise:

$$I_{KS(reaktif)} = I_{KS} \sin \varphi_{KS}$$

$$= 0,196 \cdot 0,756 = 0,148 A$$

veya

$$I_{KS(reaktif)} = \frac{0,148}{m_i} = \frac{0,148}{0,05} = 2,96$$

Bulunmuş bileşenlere göre vektörü kurulur. Şekil 4'te a noktasından  $\overline{O_1 x}$  eksenine paralel olarak  $\overline{ab}$  doğrusu geçirilir. Tablo 3'ten nominal gerilime denk düşen  $I_{KL} = 0,669 A$  akımının aktif bileşeni

$$I_{KL(aktif)} = I_{KL} \cdot \cos \varphi_{KL}$$

$$= 0,669 \cdot 0,907 = 0,607 A$$

veya

$$I_{KL(aktif)} = \frac{0,607}{m_i} = 12,136 cm = \overline{O_1 f}$$

Reaktif bileşeni ise

$$I_{KL(reaktif)} = I_{KL} \cdot \sin \varphi_{KL}$$

$$= 0,669 \cdot 0,421 = 0,282 A$$

veya

$$I_{KL(aktif)} = \frac{0,282}{m_i} = 5,63 cm = \overline{f' k}$$

uzunluğu;

$\overline{f'k}$  ve  $\overline{O_1 k}$  doğrularına göre şekil 4'teki  $I_{KL} = 0,1 k$  kurulur. Böylelikle daire üzerindeki a ve k noktaları bulunur. Bu noktalar birleştirilerek dairenin ak keseni alıyoruz.  $\overline{ak}$ 'nin ortasından çıkarılan dik doğru  $\overline{ab}$  doğrusunu  $O$  noktasında keser ki bu kurulacak olan çemberin merkezi oluyor.  $kg$  doğrusu  $r_{1KS}/r_{1KL}$  oranında bölünerek d noktası bulunur. Yani;

$$\frac{gd}{gk} = \frac{r_{KL}}{r_{KS}} = \frac{295,68}{1132,2} = 0,261$$

veya

$$g.d = 0,261 \cdot g.k = 0,261 \times 2,6$$

$$= 0,679 cm$$

"d" noktası çember üzerinde "e" yani kaymanın  $s = \pm \infty$  noktasını belirler. k noktası ise  $s=1$  noktası olur.

Böylelikle "k" noktasından geçen ak doğrusu faydalı gücü, "d" noktasından geçen  $\overline{ae}$  doğrusu itici kuvveti oluşturan  $P_{it}$  gücü,  $\overline{ag}$  doğrusu ise şebekeden çekilen ( $P_1=0$ ) gücünü karakterize eder. Böylece gücün kayıplı durumdan kayıpsız duruma kadar değişim zamanı statordan akan akım vektörünün ucu çember boyunca kayacaktır.

Varsayalım ki yükün herhangi







No	m (kg)	Q (m/s)	$F_{line}(N)$	$s - \frac{\partial_s - \theta}{\theta_s}$
1	0,355	1,6	1,03	0,2
2	0,825	0,97	0,88	0,52
3	1,000	0,85	0,82	0,57
4	1,820	0,54	0,61	0,73
5	3,125	0,33	0,38	0,83
6	4,200	0,17	0,14	0,91
7	5,000	0,15	0,13	0,93

Tablo 5

indeki manyetik akı yoğunluğu değişik durumlar için ölçülerek aşağıda belirtilmiştir.

1- Primer çekirdekleri 1 cm'lik çelikle kaplanmış:

$\varnothing = 0,15 - 0,18$  mT (mili tesla)

2- Primer çekirdekleri 0,5 mm'lik saca kaplanmış:

$\varnothing = 10 - 10,6$  mT (mili tesla)

3- Primer çekirdekleri 2 cm'lik çelikle kaplanmış:

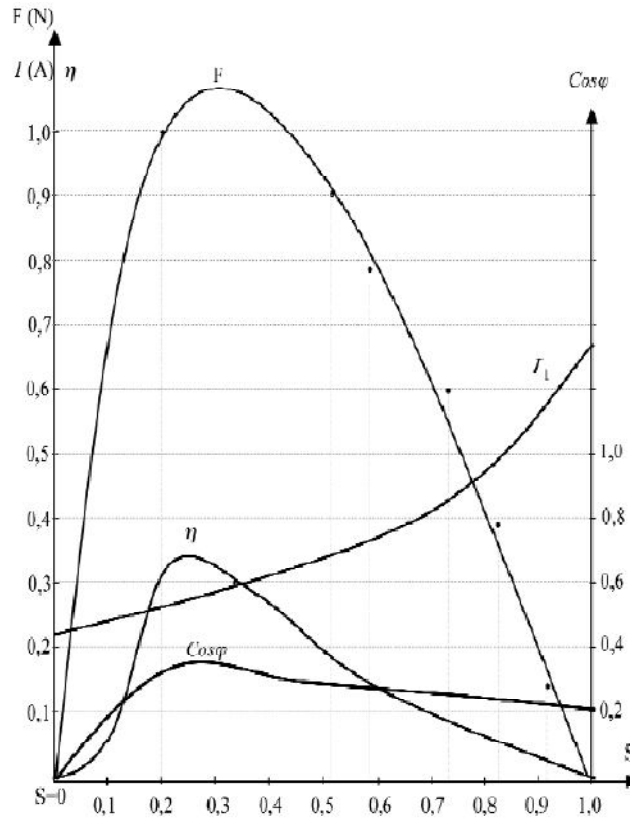
$\varnothing = 0,102 - 0,124$  mT (mili tesla)

4- Primer çekirdekleri boşken:

$\varnothing = 12,75 - 12,85$  mT (mili tesla) değerleri ölçülmüştür.

#### Sonuçlar

Yapılan çalışmalar sonucunda



Şekil 5 - Lineer asenkron motorun dairesel diyagram kullanılarak çizilen çalışma karakteristikleri

lineer asenkron motorların imal edildikten sonra esas karakteristiklerinin kurulmasına (şekil 5) imkan doğmuştur. Kurulmuş dairesel diyagramla (şekil 4) makinanın çalışması sırasında parametrelerden herhangi birini (örneğin şebekeden çekilen gücü) ölçerek diğer parametreleri bulma imkanımız doğmaktadır.

Denemeler sabit statorlu LAM'lar için yapılmıştır. Statoru hareketli lineer motorlarda bu yöntemin kullanılması istenirse, stator ve rotor ayrılarak aynı yöntemlerle karakteristiklerin alınması ve tasarım değerleri ile karşılaştırmak mümkündür.

#### KAYNAKLAR

1. Jacke F. Gieras, 1994, **Linear Induction Drivers Clarendon**, pres Oxford.

2. Doç. Dr. Osman Gurdal **Elektrik Makinelerinin Tasarımı**.

3. Adam T., Toth, F. and Papp, L., **1998 Position Controlled Linear Motor Drive for Conveyor Systems**.

4. Al-Magayouf, M.A., Alwash S.R. and Bonniya, M.I., 1986 **Finite Element Analysis of Linear Induction Motors**

5. Zbigniew J. Piech, Jacek F. Gieras Connecticut, July 1999, **Linear Synchronous Motors Transportation Automation Systems**

6. **Power Electronics and AC Drivers** Bose, B.K 1986

7. **High-Spool Ground Transport with Linear Propulsion and Magnetic Suspension Systems in Russian** Bocarov, V.I. and Nagarsky 1985 Moscow

8. Mishkin E. **Theory of the Squirrel - Cage Induction Machine Driven Directly From Maxwell's Filled Equations. The Quarterly Journal of Machines and Applied Mathematics**, 1954, vol v VII. Part 4 p.472-487.

9. Polivanov K.M. **Elektro Teknikin Teorik Temelleri**. III, Moskova Energiya, 1975, (Rusça)

10. Turovskiy Y. **Tekniksel Elektrodinamik**, Moskova, Energiya 1974, 488 sah. (Rusça)

11. Posthinkov I. M. Bezusiy L.C Çok katli ortamlarda oluşan elektro manyetik alanların hesaplanması SSRI Bilimler akademisinin bildirileri, Enerjetik ve Taşıma, 1970 N6, P42-49

12. Greig J. Freeman E. M. **Traveling - wave problem in electrical machines, Proceedings of the Institution of electrical Engineers** (proc. IEE), 1967. Voll 114. No 11. P. 1681-1683



## 8. ÖZGEÇMİŞ

20. 02. 1973 yılında Kahramanmaraş' ın Göksun ilçesinde doğdum. İlk, orta ve lise öğrenimimi Malatya' da bitirdim. 1990 yılında Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik – Elektronik Mühendisliği bölümünde öğrenime başlayıp 1995 yılında bitirdim.

1996 Yılında İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mühendislik Fakültesi Elektrik – Elektronik Mühendisliği bölümünde yüksek lisans eğitimine başladım. Yine 1996 yılında Malatya İPAŞ iplik Fabrikası'nda Elektrik-Elektronik Mühendisi olarak iş hayatına başladım. 1998 - 1999 Yılları arasında yedek subay olarak Hakkari' nin Şemdinli ilçesinde askerlik hizmetini tamamladım. 1999 Yılından 2009 Yılına kadar ANATEKS Anadolu Tekstil Fabrikaları A.Ş ' de Elektrik ve Makine Bakım Şefi olarak görev yaptım.

2010 Yılında Elektrik Mühendisleri Odasına kayıt yaptırdım ve şu an serbest mühendislik hizmetleri yapmaktayım.