

T.C
MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

34074

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KISA DEVRE ÇUBUKLU ve ÇELİK SEKONDERLİ
LINEER ASENKRON MOTORLAR

TEZ YÖNETİCİSİ

Yrd.Dç. Dr.FEVZİ KENTLİ

HAZIRLAYAN

ÖMER FARUK ORĞUN

ŞUBAT / 1994

İ Ç İ N D E K İ L E R

SAYFA

ÖZET.....	I
TEŞEKKÜR.....	II
KULLANILAN SEMBOLLER.....	III
BÖLÜM 1. GİRİŞ.....	1
1.1 Çalışmanın Konusu.....	1
BÖLÜM 2.	
2.1 Lineer Makinaların Sınıflandırılması.....	3
2.1.1 Lineer Tahrik Makinalarının Sınıflandırılması..	3
2.1.2 Lineer Kaldırma Makinalarının Sınıflandırılması	3
2.2 Lineer Tahrik Makinaları.....	4
2.2.1 Lineer Tahrik Makinalarının Ortak Özellikleri..	4
2.3 Lineer Asenkron Motorlar ve Yapıları.....	7
2.3.1 Lineer Asenkron Motor Çeşitleri.....	9
2.3.2 Lineer Asenkron Motor Primer Sargıları.....	10
2.3.3 Yüksek Hızlı Lineer Asenkron Makinalar ve Çok Hızlı Yer Taşımacılığında Kullanılması.....	12
2.3.4 Lineer Asenkron Motorun Uygulama Alanları.....	13
2.4 Hızlı Yer Taşımacılığında Besleme Üniteleri.....	14
2.4.1 Bara Sistemi.....	14
2.4.2 Aktif Ray Sistemi.....	14
2.4.3 Araçta Güç Üretimi.....	14
BÖLÜM 3. LINEER ASENKRON MOTORLARIN ANALİZİ.....	15
3.1 Sekonder Empedansı ve Sekonder Karakteristik Empedansı.....	15

3.2	Lineer Asenkron Motorlarda Moment.....	18
3.3	Goodness Katsayısı.....	20
3.4	Uç Etkileri.....	21
3.4.1	Enine Uç Etkisi.....	21
3.4.2	Boyuna Uç Etkisi.....	22
BÖLÜM 4.	DENEY ARACI OLARAK KULLANILAN LINEER ASENKRON MOTORLARI ve ÖZELLİKLERİ.....	23
4.1	GİRİŞ.....	23
4.2	Primer Sac Paketleri.....	23
4.3	Sekonderler.....	24
4.4	Primer Sarım Şemaları.....	25
4.4.1	Uç Bobinlerinin Kullanıldığı Durum.....	26
4.4.2	Uç Bobinlerinin Kullanılmadığı Durum.....	26
4.5	Sargılarda Kullanılan İletkenler.....	26
4.6	Deneyde Kullanılan Güç Kaynağı.....	26
BÖLÜM 5.	SEKONDERİ KISA DEVRE ÇUBUKLU LINEER ASENKRON MOTOR ÜZERİNDE YAPILAN DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	32
5.1	GİRİŞ.....	32
5.2	Sekonder Malzemenin Özgül Direncinin Bulunması...	32
5.3	Primer Sargı Empedansının Bulunması.....	33
5.3.1	Ölçülen ve Hesaplanan Değerler.....	33
5.4	Değişik Gerilimlerde Makinanın Çalışma Karakteristiklerinin Bulunması.....	35
5.5	Boyuna Hava Aralığı,Primer Çekirdek ve Hava Aralığı Kutup Akısının Ölçülmesi.....	42
5.5.1	Ölçülen ve Hesaplanan Değerler.....	42
5.6	Enine Akı Dağılımının Ölçülmesi.....	43
5.6.1	Ölçülen ve Hesaplanan Değerler.....	43

BÖLÜM 6.DENEY ARACI LINEER ASENKRON MOTOR ÜZERİNDE YAPILAN TEORİK ÇALIŞMALAR.....	51
6.1 Lineer Makinada Kutup Sayısının Bulunması.....	51
6.2 Lineer Makinada kw Sargı Katsayısı.....	57
6.2.1 kf Form Faktörü.....	57
6.2.2 ks Kirişlenme Faktörü.....	57
6.2.3 kd Yayılma Faktörü.....	58
6.3 Parametrelerin ifadelendirilmesi.....	59
BÖLÜM 7.DEĞERLENDİRME ve GRAFİK ÇİZİMLERİ.....	61
YARARLANILAN KAYNAKLAR.....	88

Ö Z E T

Bu kısımda, tezin kapsamı nedir sorusuna başlıklar altında değinilmektedir. Tez hem tek parça çelik sekonderli, hem de sekonderi kısa devre çubuklu (sac paketten) lineer asenkron motorların performans ve parametrelerinin tespiti, eşdeğer devrelerindeki büyüklüklerin bulunması ve elde edilen neticelerin karşılaştırılması ile ilgilidir.

Tez, lineer makinelerin kullanıldığı alanların incelenmesi ile başlamakta, bunu lineer makinelerin çeşitli durumlarına göre sınıflandırılması ve bu sınıflandırma içerisinde çalışılan makinenin konumu da çizilmektedir.

Daha sonra deneyi yapılan lineer asenkron motorun primer ve sekonder kısımlarının boyutları, sargı durumları gibi birimsel değerler verilmektedir. Bununla beraber yapılan deneylerin yapılış biçimleri ve amaçları anlatılmıştır. $s=1$ durumunda okunan ve kaydedilen değerler tablolar halinde verilmiş olup, sonuç kısmında da eğriler çizilerek değerlendirme yapılmıştır.

T E Ş E K K Ü R

Bu çalışmamı gerçekleştirirken,yardımlarından dolayı baş ta danışman ve tez yöneticim Hocam Yr.D.Dr.Fevzi KENTLİ'ye şükranlarımı ve saygılarımı sunarım.Atelye çalışmalarında gs termiş olduğu katkılardan dolayı sayın Sedai KARAHAN'a,yardı m sever ayrıca vatansever olan Tefvik ve Fatma TÜRKAY'a,yaptığı kalıplarla motor iskeletini oluşturan değerli usta Mehmet Ali LIMON'a teşekkür ederim.

Avcılar/İSTANBUL

Ömer Faruk ORĐUN

KULLANILAN SEMBOLLER VE ANLAMLARI

SEMBOL A N L A M I

G	Goodness katsayısı
f	Şebeke frekansı (50Hz)
f ₁	Primere uygulanan gerilimin frekansı (Hz)
w ₁	Primer açısal hızı (Raadyan/sn)
w ₂	Sekonder açısal hız (Radyan/sn)
σ	İletkenlik
μ_0	Havanın geçirgenliği
μ_{rel2}	Sekonderin relatif geçirgenliği
ρ	Sekonder özgül direnci
2p	Kutup sayısı
τ_p	Kutup adımı
S ₁	Primerdeki oluk sayısı (veya statordaki)
m ₁	Primer (motor B için stator) faz sayısı
c	Bobin sayısı
c'	Faz başına bobin sayısı
q	Kutup başına oluk sayısı
q'	Faz ve kutup başına oluk sayısı
Nph	Faz başına sarım sayısı
Z	Bir oluktaki iletken sayısı
Z ₂₀	Karakteristik sekonder impedansı.
Z ₂	Sekonder impedansı
R ₂	Sekonder impedansının reel bileşeni
X ₂	Sekonder impedansının imajiner bileşeni
Z ₁	Faz başına primer impedansı
R ₁	Z ₁ 'in reel bileşeni
X ₁	Z ₁ 'in imajiner bileşeni
Z _g	Makinanın toplam empedansı
A	Sekonder impedansı katsayısı
L	Sekonder (malzemenin)nüvenin enine uzunluğu
Neff	Faz başına efektif sarım sayısı
Bs	Sekonder malzemenin doyma akı yoğunluğu
B	Magnetik akı yoğunluğu
H	Magnetik alan
ke	Enine uç etkisi kat sayısı
$\emptyset$	Kutup başına hava aralığı akısı
$\emptyset_0$	E=U iken kutup başına hava aralığı akısı
φ_r	Sekonder impedansı faz açısı (26,6°)
s	Kayma
vs	Lineer senkron hız
λ	f ₁ /f ₀ oranı
Uh	Faz arası giriş gerilimi
U	Faz-nötr giriş gerilimi
lg	Hava aralığı mesafesi
γ_{el}	Bobin yanları arasındaki elektriksel açı

q_b	Bobin yanları arasındaki oluk sayısı
d'	İki oluk arasındaki elektriksel açısı
k_s	Kirişlenme faktörü
k_d	Yayılma faktörü
k_f	Form faktörü
k_w	Sargı faktörü ($k_w = k_s \cdot k_d \cdot k_f$)
P_1	Bir faz giriş gücü
I_1	Primer giriş akımı
F_k'	Makinanın vagonuna konan ağırlık
F_{kn}	Öteleme kuvveti (moment)
R_{fe}	Demir ve ek kayıplar direnci
X_m	Mıknatıslama reaktansı
I_m	Mıknatıslama akımı
I_2	Sekonder akımı
I_{fe}	Demir ve ek kayıpları akımı



B Ö L Ü M 1

GİRİŞ

Bir ülkenin ekonomisindeki gelişmeler, o ülkeyi yüklü bir ulaşım problemiyle tanıştırır. bu problem karşısında alınacak önlem; EMİN, EKONOMİK ve HIZLI olmalıdır. Bunu sağlayabilecek ulaşım sistemi tren taşımacılığıdır.

Yüzyılımızın ikinci yarısından sonra elektrikli ulaşım sistemlerinde büyük hızlara çıkılmıştır. Neticede lineer elektrik motorları önem kazanmıştır. Elektrik enerjisinin mekanik enerjiye transferi dönme hareketi yapan motorlar yardımıyla gerçekleştirilir. Doğrusal harekete ihtiyaç olan sistemlerde ise, motor milinden alınan mekanik güç, motor ve iş makinası arasına yerleştirilen ek elemanlar yardımıyla doğrusala çevrilir. Lineer elektrik motoru, ek düzeneğe ihtiyaç göstermeden direkt olarak doğrusal hareket vermektedir. Böylece lineer motor, döner tiplere nazaran avantajlar içerir. Bunlar;

- a) Kuruluşu, montajı rahat ve kolaydır.
- b) Sekonderi ile mekanik bağlantısı yoktur.
- c) İyi hızlanma ve yavaşlama sağlayabilir.
- d) Aşırı derecede gürültülü çalışmaz.
- e) Ekonomiktir.

Lineer Elektrik Motorunun Kullanıldığı Alanlar:

- a) Yüksek hızlı yer taşımacılığında,
- b) Otomobil sanayiinde araba tekerleklerinin deneylerinde,
- c) Otomobil sanayiinde model arabalarının kaza deneyleri için hızlandırılmalarında,
- d) Konveyör sistemlerinde,
- e) Sıvı, metal pompalarda,
- f) Tekstil sanayiinde mekik hareketinde,
- g) Alüminyum şerit çekilmesinde,
- h) Sürme tipi kapı hareketlerinde,
- ı) Nümerik kontrollü makina düzenlerinde.

Yüksek kalkınma momenti isteyen alanlarda olmak üzere lineer motorun geniş uygulama alanları bulunmaktadır.

1.1. Çalışmanın konusu

Deneyimizde kullanılan motor primeri kısa, sekonderi tamamen doğrusal olup uzundur. Sekonder tarafında oluklar içeriside kısa devre edilmiş bakır çubuklar eğimli olarak yerleştirilmiştir. Primer kısmında kullanılan sargı şekli daha sonraki bölümde açıklanacaktır. Lineer asenkron motor üzerinde daha önceden yapılmış olan bilimsel çalışmalar mevcuttur. Biz bu çalışmada temel olarak, sekonderi değişik iki lineer asenkron motor üzerinde yapılan deneyler sonucu ortaya çıkacak değer-

leri karşılaştırmak istedik. Kullanılan motorların primer kısımları aynı özellikleri taşımaktadır. Sekonderleri ise farklıdır. Birinci sekonder, tek parça malzemeden (ST-35 ÇELİĞİ) oluşmuş, manyetik ve elektriksel olarak tek yanlıdır. Bu tip sekonderli lineer asenkron motor üzerinde yapılan deney değerleri daha önce yapılmış olan bilimsel çalışmadan alınmıştır. İkinci sekonder ise 0.50 mm. kalınlığındaki silisyumlu sac paketten yapılmış olup üzerine oluklar açılmıştır. Oluklar içerisine bakır çubuklar eğimli geçirilerek yanlardan bakır lamalarla kısa devre edilmiştir.

İşte biz bu tip sekonderli, primeri sargılı ve hareketli lineer asenkron motorun konstrüksiyonunu yaptık. Deneylerimizi de bu tip motor üzerinde gerçekleştirdik.

Deneylerde ayarlanan hava aralığında, her iki sargı durumu için (uç bobinleri devrede iken ve devre dışı iken) deney sonuçları alındıktan sonra, değişik bir hava aralığında deney tekrarlanmıştır. Deneylerimiz çok kademeli olarak gerçekleştirilmiştir. Şimdi bu kademeleri başlıklar halinde açıklarsak.

BİRİNCİ KADEMEDE, primer ve sekonderin fiziksel boyutları elektriksel özellikleri, oluk adımı, oluk genişliği, diş genişliği, kutup adımı, senkron hızı sargıların oluklara ne şekilde yerleştirildiği, sarım sayıları, iletkenlerin kesiti, akım yoğunluğu ve sürekli rejim yük akımı gibi özellikleri incelenmiştir.

İKİNCİ KADEMEDE, uç bobinleri devrede iken ve uç bobinleri devre dışı iken R_1 , X_1 , Z_1 değerleri ölçülerek ve hesaplanarak bulundu.

ÜÇÜNCÜ KADEMEDE, farklı hava aralığında ve farklı bağlantı konumlarında makinanın performansı incelenmiştir. Yaptığımız deneylerde değişik gerilim kademelerinde makinanın ürettiği moment şebekeden çektiği akım ve güç kaydedilmiştir.

DÖRDÜNCÜ KADEMEDE, primer sac paketi üzerine sarılmış ve sekonder üzerine yapıştırılmak suretiyle özel hazırlanmış ölçü bobinleri yardımıyla değişik gerilim kademelerinde oluklar boyunca hava aralığı akısı, çekirdek akısı, kutup akısı ve enine akı dağılımı ölçülmüştür.

BEŞİNCİ KADEMEDE, ölçülen ve bulunan değerler rapor edilmiştir.

B Ö L Ü M 2

2.1. Lineer makinelerin sınıflandırılması (1,2,3,4)

Özel yapıya sahip ve aynı zamanda çalışma özelliğine sahip, çok değişik türleri mevcut olan, lineer elektrik makinelerinin sınıflandırılması önem arzeder. Lineer elektrik makineleri öteleme ve normal kuvvetin kullanılmasına göre iki ana gruba ayrılır.

1) Lineer Tahrik Makinaları

2) Lineer Kaldırma Makinaları

2.1.1. Lineer tahrik makinelerinin sınıflandırılması

Lineer tahrik makineleri, öteleme kuvveti yardımıyla motor çalışmada sistemlerin doğrusal hareketini sağlarlar. Bu tür makinelerin sınıflandırılmasında, klasik elektrik makinelerindeki yaklaşım benimsenir. Daha sonra ise her ana başlık altında lineer motorlara özgü değişik türlerin sınıflandırılmasına geçilir:

a) LINEER ASENKRON MAKİNALAR (LİM)

b) LINEER SENKRON MAKİNALAR (LSM)

c) DEĞİŞİK TÜR LİNER MAKİNALAR

a-) LINEER ASENKRON MAKİNALAR, primer veya sekonder tarafın uzunluğuna, hareketli oluşuna, malzeme türlerine, çekirdek akısının doğrultusuna göre sınıflandırılır.

b-) LINEER SENKRON MAKİNALAR, çalışma ilkesi dönen tip makinelere benzer. Özellikle çok hızlı tekerleksiz yer taşımacılığında düşünülmektedir. Ray üzerinde primer sargıların bulunup bulunmaması ve diğer çalışma özelliklerine göre sınıflandırılırlar.

c-) DEĞİŞİK TÜR LINEER MAKİNALAR, dört ana grupta incelenir.

1) Lineer Doğru Akım Makinaları

2) Lineer Titreşim Makinaları

3) Lineer Adım Makinaları

4) Lineer Histeresiz Makinaları

2.1.2. Lineer kaldırma makinelerinin sınıflandırılması

Lineer elektirik makineleri biri hareket yönünde (öteleme kuvveti) ve diğeri hareket yönüne dik (normal kuvvet) itme veya çekme kuvveti özelliğinden faydalınarak geliştirilen türlere LINEER KALDIRMA MAKİNALARI denir. Öteleme kuvvetinden faydalanarak geliştirilen türlerde LINEER MOTOR denir. Çok hızlı yer taşımacılığında trenin havada asılı kalması

için lineer kaldırma makinalarından faydalanılır. Lineer kaldırma makinalarında normal kuvvetin çekme veya itme şeklinde olmasına göre sınıflandırılır.

- 1) Elektromanyetik Çekme (FERROMANYETİK)
- 2) Elektrodinamik itme (İNDÜKTİF)

Yukarıda yapılarına göre sınıflandırdığımız lineer makinaların herbirini şimdi kendi özelliklerine göre sınıflandıralım. Daha sonra deney motorumuzun içerisinde bulunduğu sınıf olan lineer asenkron motorlar hakkında açıklamada bulunalım. Lineer asenkron motorların dışındaki türler için sadece kendilerine özgü özelliklerine göre sınıflandırılmaları yapılacak, ancak açıklama yapılmayacaktır. Lineer asenkron motorlar için geniş açıklama ilerideki konularda yapılacaktır.

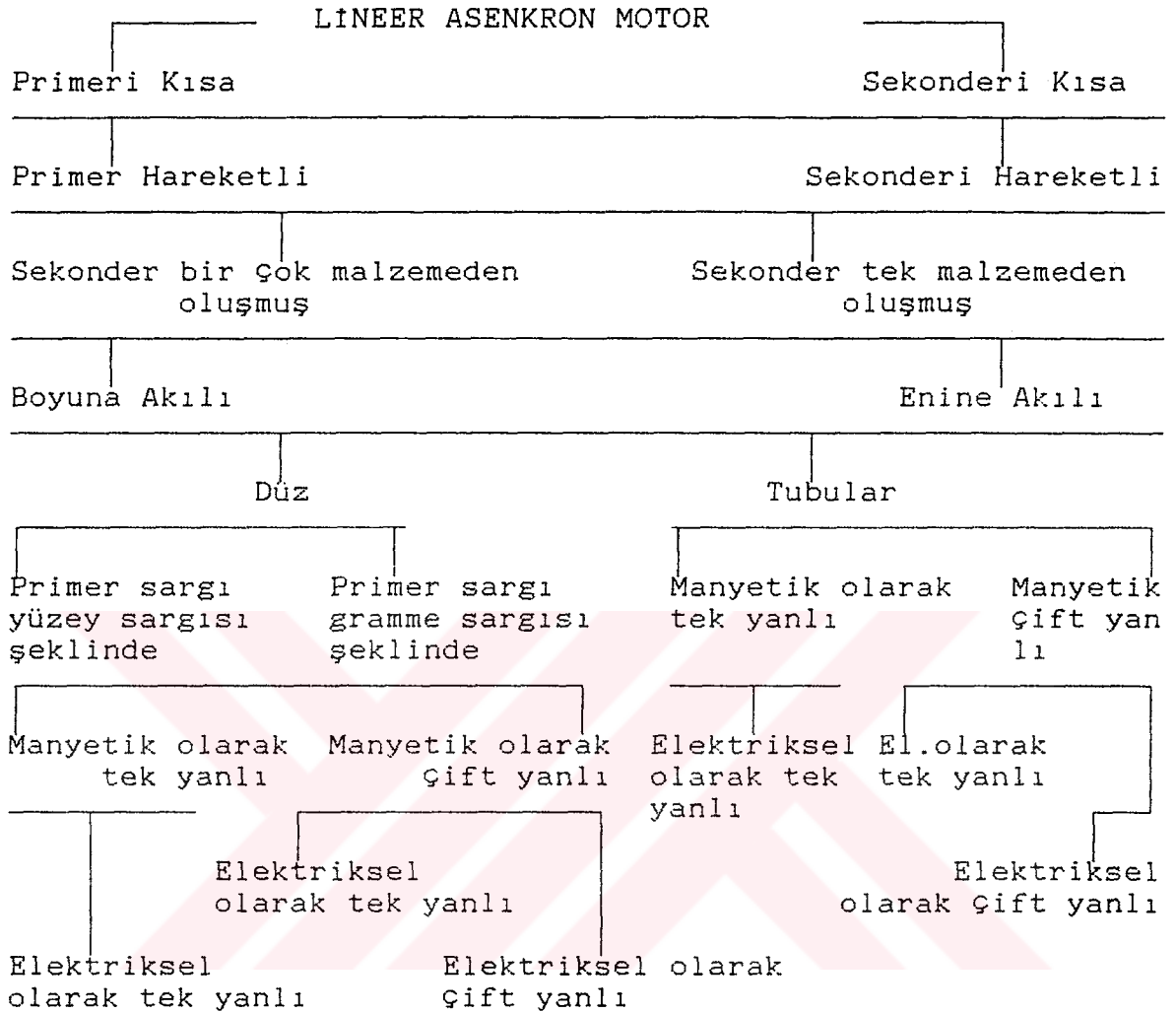
Buna göre, lineer asenkron motorların topolojik (elektriksel, mekaniksel, manyetik ve geometrik açıdan) olarak sınıflandırılması (Şek.2.1), ayrıca hızlarına göre sınıflandırılması (Şek.2.2) yer almıştır. Bilgi için lineer senkron makinaların sınıflandırılması (Şek.2.3), değişik tür lineer makinaların sınıflandırılması verilmiştir (Şek.2.4).

2.2. Lineer tahrik makinaları

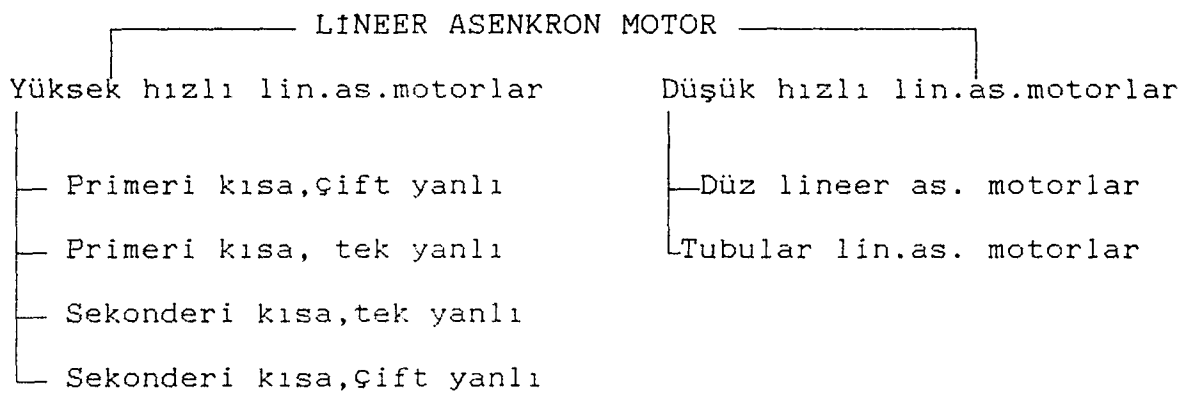
Normal elektrik makinaları dönerek elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürürken lineer elektrik motorlarında bu görevi doğrusal hareket ederek yaparlar. Dönen tip elektrik makinalarda simetriden dolayı ortaya çıkmayan bir çok durum bu makinalarda problem olarak ortaya çıkar. Çok hızlı yer taşımacılığındaki gelişmeler lineer elektrik makinalarının geliştirilmesiyle olmuştur. Lineer tahrik makinalarını tanıtmadan önce bu makinaların ortak özelliklerinden bahsetmekte yarar vardır. Bundan dolayı ilk önce bu makinaların ortak özellikleri açıklanacak ve daha sonra bu makinaların tanıtılması ve çok hızlı yer taşımacılığında uygulaması hakkında bilgi verilecektir.

2.2.1. Lineer tahrik makinalarının ortak özellikleri

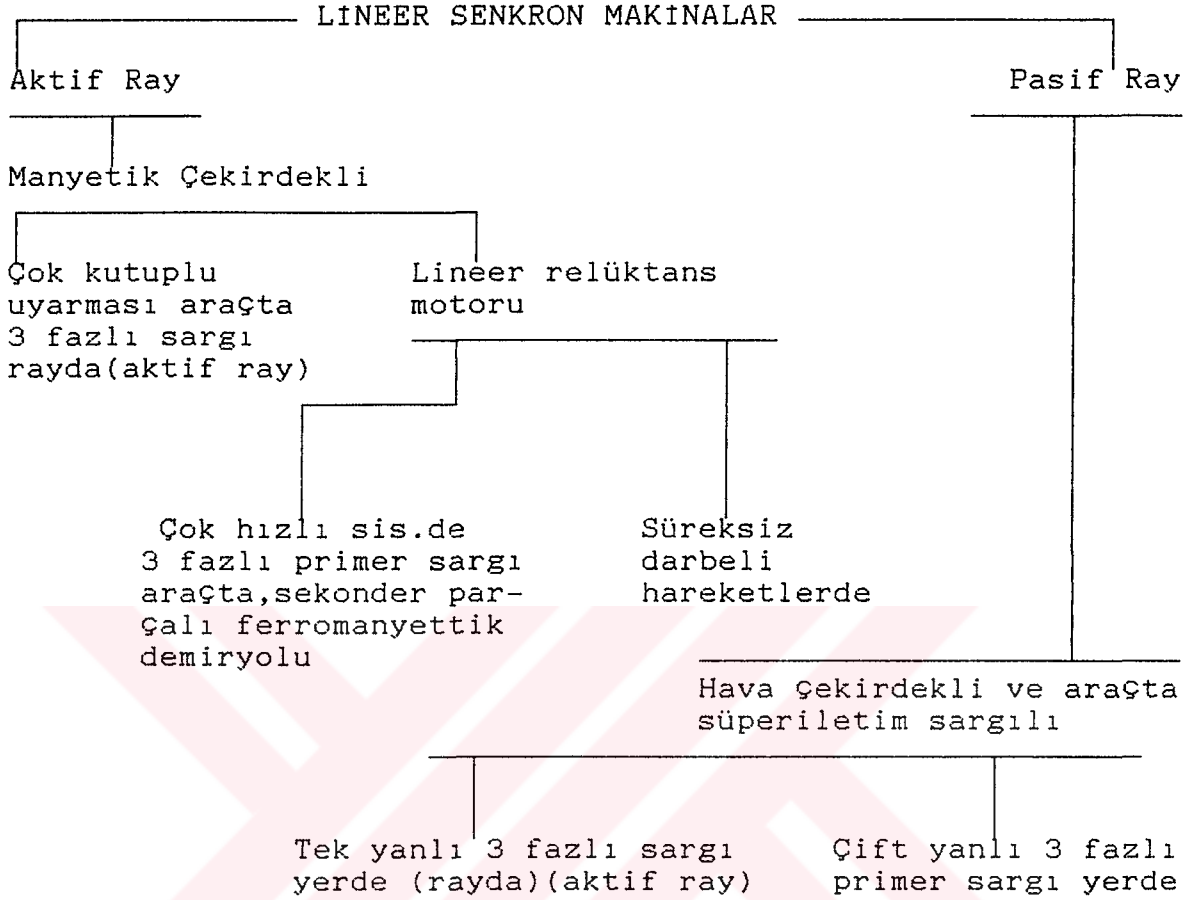
- 1) Lineer tahrik makinaları öteleme hareketi yaparlar.
- 2) Primer ve sekonder yanlarının uzunlukları eşit değildir.
- 3) Bir kenarının sonlu uzunlukta oluşu döner makinalar için kullanılan sargı türlerini yetersiz hale getirmiştir.
- 4) Hava aralıklarının büyük olması dolayısıyla Cos küçüktür.
- 5) Döner makinalarda radyal kuvvet olarak bilinen ve simetriden dolayı sıfır olan normal doğrultudaki kuvvetler lineer makinalarda primer ve sekonder yanlar arasında itme yada çekme kuvveti şeklinde ortaya çıkar.



Şek.2.1. Lineer asenkron motorların topolojik olarak sınıflandırılması.



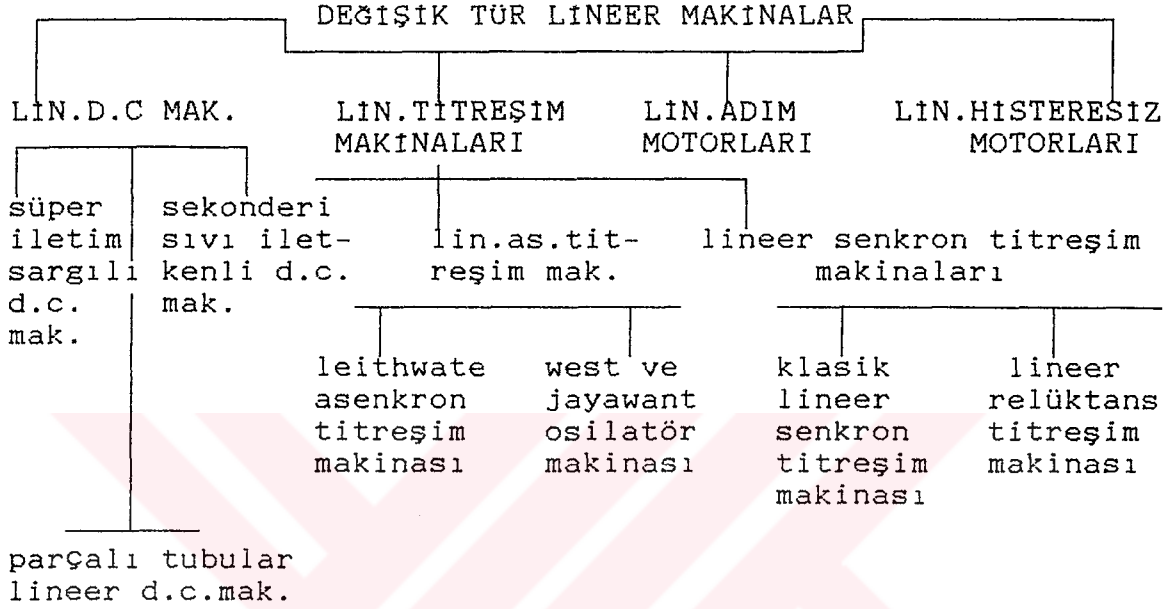
Şek.2.2. Lineer asenkron motorların hızlarına göre sınıflandırılması.



Şek.2.3.Lineer senkron makinaların sınıflandırılması

- 6) Klasik elektrik makinalarında çekirdek akısı kutup akısının yarısına eşittir.Bu kural lin.elektrik makinalarında uç bölgelerin varlığı nedeniyle geçerli değildir.Kutup sayısına bağlı olarak,çekirdek akısı kutup akısının yarısından daha büyük değerlere ulaşır.
- 7) Sekonder malzeme olarak çekirdek akısını taşımak üzere çok kez tek parça dökme çelik kullanılır.Bu durumda manyetik akı çeliğin üst kısmında toplanarak doyma ya neden olur.Bu doyma ise makinanın tüm çalışma karakteristiklerini etkiler.
- 8) Sekonder malzeme olarak tabaka halinde alüminyum, bakır veya çeliğin kullanılması sekonder yandaki akımların eliptik bir yol izlemesine neden olur.Lineer asenkron makinalarında izlenen bu durum sekonder yandaki empedansını arttırır ve hava aralığı akısının enine doğrultuda üniformluğunu bozar.Bu etki "enine uç etkisi" olarak tanımlanır.
- 9) Lineer elektrik makinasının hareket doğrultusunda primer veya sekonder yanın sonlu uzunlukta oluşu senkron hızda dahi sekonder yanda girdap akımları meydana getirerek hava aralığı akısının hareket doğrultusunda üniformluğunu bozar."Boyuna uç etkisi" olarak tanımla-

nan bu etki tasarım ve çalışma büyüklüklerine bağlı olarak senkron hızda pozitif ya da negatif kuvvetler üretir. Asenkron makinalarda senkron altı hızlarda bu etki sürer.



Sek.2.4. Değişik tür lineer makinaların sınıflandırılması

2.3. Lineer asenkron motorlar ve yapıları

Lineer asenkron motorlar, lineer tahrik motorlarının içerisinde en çok geliştirilmiş, en çok yer tutan ve lineer makina tipleri içerisinde en çok bilinenidir. Böyle olmasının sebepleri vardır.

Örneğin aynen dönen tip asenkron makinalarda olduğu gibi kendi yapılarından gelen basitlik, sağlamlık en arıza yapmaları, kuvvetli ve güvenli olmaları, ayrıca ucuz olmalarından kaynaklanan ekonomik oluşları, sekonderlerinin (rotorlarının) dışarıdan beslenmemesi ve bu nedenle dış bağlantı gerektirmemeleri gibi sebepler lineer asenkron motorları en çok kullanılır ve en çok bilinir hale getirmiş ve diğer tiplerden daha fazla gelişme, ilerleme imkanına kavuşmuştur.

Lineer asenkron makinaların lineer senkron makinalardan en büyük ayrıntılardan biride öteleme hızının sabit olmayışı ve bu hızın senkron hızdan küçük oluşundan dolayı "ASENKRON" adını almalarıdır. Çalışma prensibi bakımından bu makinalara "İNDÜKSİYON MAKİNALARI" da denir. Lineer asenkron makinalarda küçük kaymada en büyük öteleme kuvvetleri meydana gelir. Büyük kaymalarda ise kaldırma kuvveti öteleme kuvvetinden büyüktür.

Rotoru sincap kafesli olan ve dönen normal bir asenkron motorun kesidi gösterilmiştir (Şek.2.5). Motoru, dönme ekseninden geçen A-A' düzlemi ile kesip açalım ve rotor ile statorun yanıl yüzeylerini düzlem haline getirelim (Şek.2.6).

yönünde hareket ettiğinde ve primer sabit kaldığında Δt zamanı sonunda Δx kadar ötelenecektir (Şek.2.6). Primer ve sekonderin ortak kısımlarında değişeceğinden alan dağılışının değişmesine yol açacaktır. Böylece uç etkileri oluşacaktır. Buda doğru sal hareket yapan lineer asenkron motor özelliklerinin döner tip motorunkinden farklılık göstermesine yolaçar.

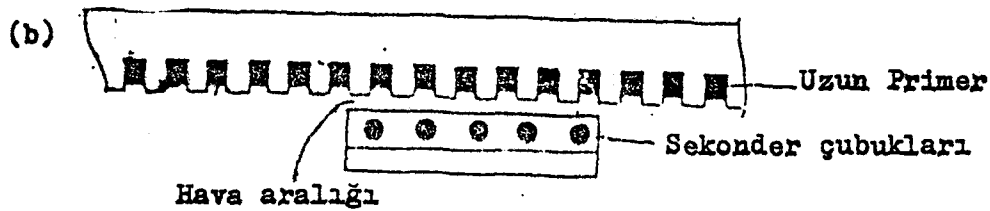
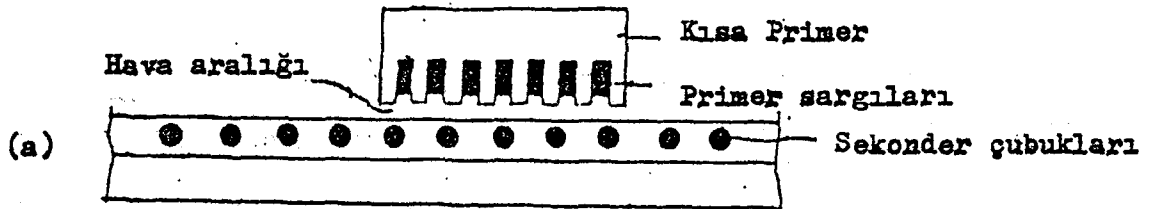
Lineer asenkron motorun primeri ile sekonderi arasında çekme kuvveti vardır. Bu çekme kuvvetini azaltmak için biradet primer yerine iki adet primer kullanılır (Şek.2.8). Böylece sekonder iki primer tarafından örtüldüğünden ek yönlü çekme kuvveti oluşamaz. Her iki yöndeki çekme kuvveti, teorik olarak bir birini dengede tutarak, sekondere bir çekme kuvveti gelmez.

2.3.1. Lineer asenkron motor çeşitleri

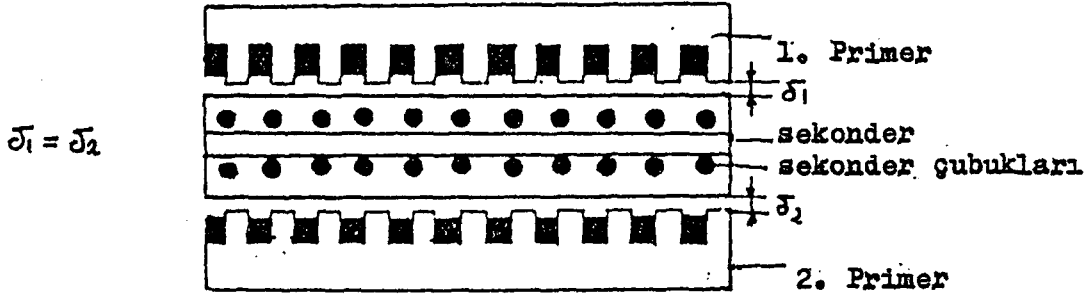
Uç etkilerinin etkisini azaltmak ve doğrusal yönde etkiyen kuvvetin azalmasını önlemek amacı ile ya sekonder ya da primer uzun yapılır. Yalnız sekonder ve primer uzunlukları bakımından lineer asenkron motorları iki çeşide ayırma olanağı vardır.

- 1) Uzun sekonder ve kısa primerli olan motorlar.
- 2) Uzun primer ve kısa sekonderli olan motorlar.

Uzun sekonderli (Şek.2.7a) ve uzun primerli lineer asenkron motorların yapısı gösterilmiştir (Şek.2.7b) Bu tür motorların her ikisinde de, bir primer bulunduğunda primer ile sekonder arasında büyük çekme kuvveti vardır.



Şek.2.7.a) Uzun sekonderli, kısa primerli lineer asenk. motor
b) Uzun primerli kısa sekonderli lineer asenk. motor



Şek.2.8. İki primerli lineer asenkron motorun yapısı.

Çift primerli lineer asenkron motorda primer ile sekonder arasında her iki tarafta kalan hava aralığı pratikte ne kadar eşit yapılırsa, sekonderin primer tarafından çekme kuvveti o kadar dengelenir ve bu kuvvet sıfır olur.

Pratikte en çok kullanılan lineer asenkron motorlar iki kısa primerli ve uzun sekonderlidir. Bu tür motorlar ulaşım araçlarında kullanılır.

Lineer asenkron motorların sekonderleri iletken bir şerit veya bir kaç değişik şeridin üstüste getirilmesi ile de yapılabilir. Örneğin demir bir şerit onun üstüne alüminyum ya da bakır şerit yerleştirilir. İki primerli motorlarda her iki primer karşısınada bu şeritler yerleştirilir. Bundan başka, sinçap kafesli asenkron motora benzer biçimde sekonder, oluklu silisyumlu saclardan yapılır. Oluklara kısa devre edilmiş alüminyum veya bakır çubuklar eğimli olarak konur.

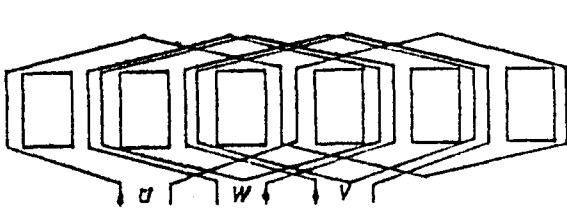
2.3.2. Lineer asenkron motor primer sargıları

Lineer asenkron motorlarda üç fazlı alternatif akım sargıları genellikle primer sac paketinin üzerine yerleştirilir. Lineer asenkron motorlarda değişik biçimde bobinlerden oluşan üç fazlı primer sargıları mevcuttur (Şek.2.9).

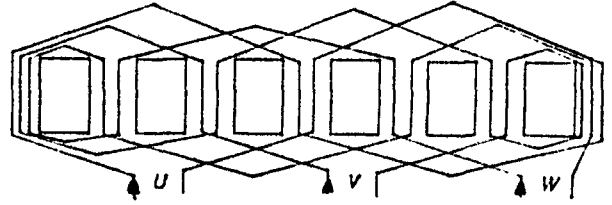
Bu sargıların durumu özetlenirse, başlıca üç çeşit sargı kullanılmaktadır.

- 1) Döner tip asenkron motorların iki katlı sargı tipi.
- 2) Gramme sargısı, kutup bölümü büyük motorlarda tercih edilir. Kaçak akı ve reaktansı büyüktür.
- 3) Üç katlı sargı tipi.

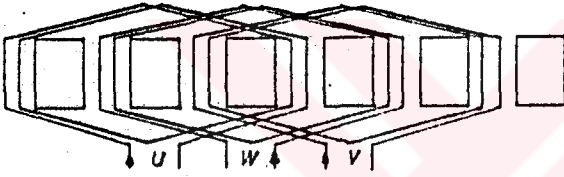
Lineer asenkron motorlarda primer sargıları genellikle iki tabakalı alternatif akım sargısı tipinde yapılır. Döner tip motorlarda bulunan, üç fazlı sargılar nasıl döner alan, döner akım dalgası oluşturursa, burada da yani lineer asenkron motorda da, primerde bulunan üç fazlı akımlar ise yürüyen alan yürüyen akım dalgası oluşturur.



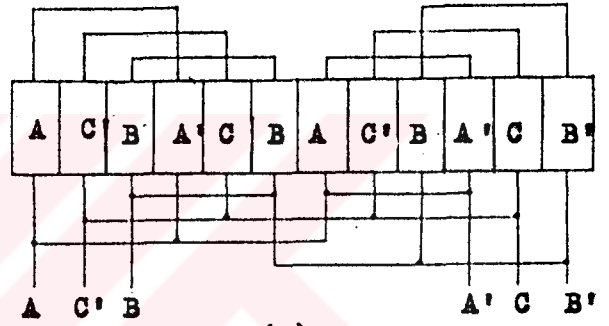
(a)



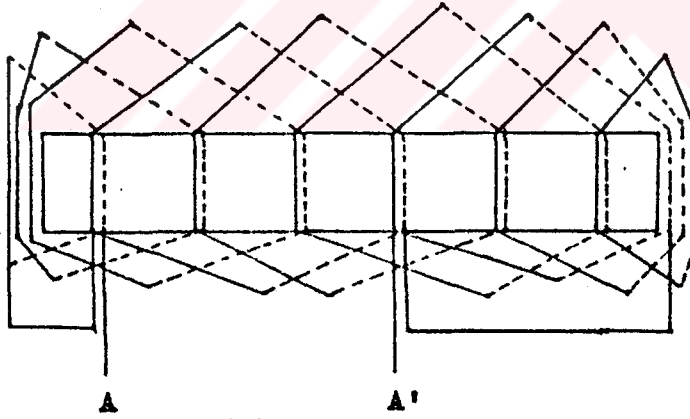
(b)



(c)



(d)



(e)

Şek.2.9. Lineer asen.motorda değişik biçimde bobinlerden oluşan üç fazlı primer sargıları.

a),b) Eşit olmayan bobinli.

c) Eşit bobinli.

d) Klasik üç fazlı sargı.

e) Kısa kutup adimli, üç bobinli çift tabakalı sargı.

Bu oluşan elektromanyetik dalgı primer sargıya uygulanan gerilimin frekansı ile doğru orantılı olan bir hızla yürür.

2.3.3.Yüksek hızlı lineer asenkron makinalar ve çok hızlı yer taşımacılığında kullanılması

Büyük lineer asenkron makinaların kullanılmasıyla yüksek hızlı yer taşımacılığı araçlarının tahriği ümit vadetmektedir. Burada yüksek hızdan 70 m/sn.nin üzerindeki hızlar anlaşılmaktadır.

Lineer asenkron motorlarda uç tesirleri gibi bilinen ve kaçınılmaz olaylar önem arz etmekte ve özel çareler bulunmasını gerektirmektedir. Bu itibarla yüksek hızlarda lineer asenkron motorların işletilmesinin orta ve düşük hızlarda işletilmesinden ayrı ve farklı bir şey olduğunu hatırlatmakta büyük yarar vardır.

Kısa primerli lineer asenkron motorlar işletme masraflarının azlığı bakımından kısa sekonderli lineer asenkron motorlara nazaran daha üstündürler. Kısa sekonderli lineer asenkron motorlarda besleme problemleri yönünden daha avantajlıdır. Fakat kısa primerli lineer asenkron motorların yüksek hızlı yer taşımacılığında bir çok uygulamaları olduğundan yüksek hızlı yer taşımacılığında en iyi bir yaklaşım olduğu kanaatine varılabilir. Bundan dolayı biz kısa primerli lineer asenkron motorlarla ilgileniyoruz.

Kısa primerli lineer asenkron motorlarda primer sargıların ve primer nüvenin boylarının sonlu oluşu uç tesirlerine sebep olur. Bunları da statik ve dinamik uç etkileri diye ikiye ayırmak mümkündür.

Bunlardan dinamik uç etkisi sonlu primer ile sonsuz sekonderin birbirlerine göre rölatif hareketlerinden doğmaktadır. Bu durumu şu şekilde açıklayabiliriz. Bilindiği gibi bir iletken değişen bir manyetik alan içinde bulunursa, bu iletken de bir gerilim endüklemesi olur. Aynı şekilde araç hareket ederken aracın önünde bulunan sekonder kısımları aracın altına girerken bir akı değişimine maruz kalır ve bu sekonder kısımlarında bir gerilim endüklemesi olur. Aynı durum aracın arka kısmından çıkan sekonder kısımlarında da olur. Bu gerilimler sekonderden bir akım akıtır. Bu durum aracın hızı senkron hızda olsa dahi olur. Bu akımlar uç tesiri akımları olarak adlandırılırlar. Hız arttıkça, artan kuvvetler ortaya çıkarılırlar. Yüksek hızlı lineer asenkron makinelerde ortaya çıkan bu kuvvetler düşük kayma bölgesindeki fren kuvvetleridir. Bu da lineer asenkron motorun ötelemesini, güç faktörünü ve verimi düşürücü sonuçlar doğurur.

Statik uç etkisi ise sargıların empedansının dengesizliğinden meydana gelir. Sargı empedanslarındaki bu dengesizlik sargıdan dengesiz akımların akmasına sebep olur. Bu dengesiz akımlar, sargılar dengeli bir gerilim kaynağına bağlansa bile olur. Statik uç etkisi lineer asenkron motorlarda ötelemede azalma ve ek kayıpların meydana gelmesine sebep olur. Statik uç etkisi araç dururken bile vardır. Fakat dinamik uç etkisi

araç durduğu zaman olmaz.Aynı zamanda dinamik uç etkisinin ol maması statik uç etkisini arttırır.Bu da hava aralığında akı yoğunluğunun dağılımını bozar.

Lineer asenkron makinaların fiziki yapısının sonucu enine uç etkisi de meydana gelir.İlk önce sekonderde endüklenen akımları,göz önüne alalım.Bu akımların akım yoğunluklarının boyuna bileşenleri J_x ve enine bileşeni de J_z olsun.Burada akım yoğunluğu J_x ,enine uç etkisinin esas sebebidir.Buna göre primeri ve sekonderi eşit genişlikte olan bir lineer asenkron motorun uç etkisinden daha fazla olacaktır.Enine uç etkisinin ana etkisi eşdeğer sekonder direncini arttırmaktadır. Bu da enine uç etkisinin yapay bir taklidi anlamını taşımaktadır.O zaman enine uç etkisi bakımından zayıf ama sekonder direnci olması gerekenden fazla olan bir lineer asenkron motor tavsiye edilir.

Enine uç etkisinin esas sonuçları şunlardır:

- a) Sekonder direncini arttırmak.
- b) Yan kararsızlığa sebep olmak.
- c) Hava aralığı aakısını bozmak.
- d) Lineer asenkron motorun performansını bozar.

Yüksek hızlı çift yanlı lineer asenkron motorlarda mekanik zorlamalar iki primer arasında geniş aralıklar bulundurma ya zorlar.Bunun sonucunda primer ile sekonder arasında kabul edilebilir bir mesafe olmalıdır.Örneğin yüksek hızlı çift yanlı lineer asenkron motorun sekonder kalınlığı $d = 8-10$ mm. kadar ve iki primer arasındaki uzaklık " g " olmak üzere $g/d = 3$ ile 6 arasında olabilir.Bu tür makinalarda giriş frekansı 100 Hz.'den daha büyük olabilir.Buna bağlı olarak da % 10'luk bir kaymada deri olayı ihmal edilmez.Yüksek hızlı lineer asenkron motorlarda hava aralığı geniş olduğundan hava aralığının kutup adımına oranı (g/d) önemlidir.Lineer asenkron motorların açık bir analizi yapılırken yukarıdakiler hesaplara katılır.

2.3.4.Lineer asenkron motorun uygulama alanları

Lineer asenkron motora ait ilk patent 1895'lerde kumaş tezgahlarında mekik fırlatma uygulanması için alınmıştı.Daha sonra 1930 yılında iki primerli ve manyetik olmayan metal sekonderli motorun patenti alınmıştır.1905 yıllarında trenlerin tahrikinde kullanılması düşünüldü.İkinci dünya savaşından önce lineer asenkron motor büyük uygulama alanı bulamamıştır. Bunun nedeni olarak,o zamanlarda elektrik malzeme,eleman ve yarı iletken elektronik elemanlarının pahalı oluşu ve ya henüz bilinmeyişi gösterilebilir.1945 yıllarında lineer asenkron motor,ABD.de uçakları hızlandırmak amacı ile uç fazlı olarak büyük güçler için imal edilmiştir.Bugün trenlerin tahrikinde kullanılan lineer asenkron motorlar ile 500 km/saatlik hızlara ulaşılmıştır.Küçük hızlarda bantlı ileticilerde (konveyör) kömür ocaklarında bant sisteminde v.b. alanlarda...

2.4. Hızlı yer taşımacılığında besleme Uniteleri

Çok hızlı yer taşımacılığında kullanılan tahrik ve kaldırma makinalarına enerji iletiminde problemler ortaya çıkmakta bugün için araca enerji iletimi üç şekilde yapılmaktadır.

- 1) Bara sistemi,
- 2) Aktif ray sistemi,
- 3) Araçta güç üretimi.

Bu üç sistemi incelenmesi aşağıda verilmiştir.

2.4.1. Bara sistemi

Bara sisteminde araca elektrik enerjisini ray boyunca yerleştirilen pantograflar yardımıyla verilmektedir. Yüksek hızlarda rüzgarın tesiriyle aracın yana doğru kayması barayla temas halinde olan pantografin çıkmasına neden olabilir. Ayrıca aracın yerle teması kesildiğinde dönüş iletkenine ihtiyaç göstermesi yerinden çıkan pantografin tekrar barayla temas haline getirilmesi ve 500 km/h hızlar mertebesinde hareket halinde olan aracın her an böyle nedenlerden dolayı enerjisiz kalması sistem emniyeti açısından sakıncalıdır. Bu sistem yüksek hızlar için yetersizdir.

2.4.2. Aktif ray sistemi

Bu sistem tahrik amacıyla lineer senkron motor kullanılması durumunda geçerlidir. Motorun raya yerleştirilen üç fazlı sargıları aracın hareketi izlenerek sıra ile beslenir. Ray bobinleri eşit uzunlukta kısımlara ayrılmış olup araç hangi bobinin etki alanına girmekte ise o kısma enerji verilir ve aracın terkettiği kısmın enerjisi kesilir. Bu işlem aracın yerini belirleyen bir sistemin verdiği sinyallerle kumanda edilen sıra değiştirici anahtarlar vasıtasıyla yapılmaktadır. Böylece bütün ray aynı zamanda beslenmediğinden sistemin işletme masrafları azalacaktır.

2.4.3. Araçta güç üretimi

Araçta küçük bir gaz veya diesel türbin kurulması gerekli güç üretiminde yeterli olabilir. Ancak gürültü ve çevre kirlenmesi sorunlarının yanı sıra aracın ağırlığının da önemli ölçüde arttıracığından diğer alternatifler üzerinde durulmaktadır.

B Ö L Ü M 3

LİNEER ASENKRON MOTORLARIN ANALİZİ

3.1. Sekonder empedansı ve sekonder karakteristik empedansı (1.5.6)

Çizelge 3.1. Sekonder empedans sayıları

YÖNTEM		A	φ_r
A		$8/\pi = 2,55$	45°
B	B1	$64 \cdot \sqrt{5/3} \cdot \pi^2 = 4,83$	$26,6^\circ$
	B2	$1280/9 \cdot \pi = 4,59$	$26,6^\circ$
	B3	$16/[\pi \cdot \sqrt{1 + (4/3 \cdot \pi)^2}] = 4,69$	23°
C		$64/(\pi^2 \sqrt{2}) = 4,59$	$35,3^\circ$

Sekonder empedans ifadesi:

Döner tip motor için,

$$Z_2 = \frac{m \cdot A \cdot L^2 \cdot N_{ef}^2 \cdot B_s \cdot f}{k_e \cdot \emptyset \cdot s \cdot D} \quad (3.1)$$

Lineer motor için,

Lineer tip için, Z_2 deklemini; Çap(D) ile kutup adımı(τ) arasındaki bağıntı neticesinde, aşağıdaki şekle girer.

$$D = \frac{2p \cdot \tau}{\pi} \quad (3.2)$$

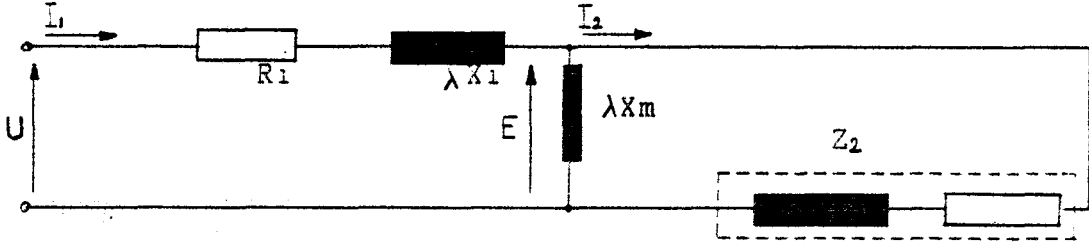
$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{2p} \quad (3.3)$$

$$\frac{1}{D} = \frac{\pi}{\tau \cdot 2p} \quad (3.4)$$

$$Z_2 = \frac{\pi \cdot m \cdot A \cdot L^2 \cdot N_{ef}^2 \cdot B_s \cdot f}{\tau \cdot 2p \cdot k_e \cdot \emptyset \cdot s} \quad \text{olur.} \quad (3.5)$$

Yukarıdaki denklem ifadelerinde değişken olan parametreler kutup akısı ($\emptyset$) ve kaymadır (s).

Z_2 (sekonder empedansı) eşdeğer devredeki (Şek.3.1) seri primer empedansına bağlı,yük akımı ile orantılı değişme gösteren hava aralığı gerilimine bağlı olup küçük makinalarda primer empedansının E 'ye ve dolayısıyla $\emptyset$ 'ye etkisi özellikle belirgindir.



Şek.3.1 Lineer asenkron motorun eşdeğer devresi.

Lineer elektrik makinası ister büyük güçlü isterse küçük güçlü olsun,dogru 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 ($\emptyset$ 'nin),uç gerilimine karşı düşen değerini aldığı($\emptyset=\emptyset_0$),kaymanın ($s=1$) olduğu durumda(Z_2) sekonder empedansı karakteristik empedans olacaktır.

Yani;

$$Z_{20} = \frac{Z_2 \cdot s \cdot \emptyset}{\emptyset_0} \quad (3.6)$$

$$\frac{\emptyset}{\emptyset_0} = \frac{E}{U} \quad (3.7) \quad \text{olup} \quad Z_{20} \text{ 'ın genliği}$$

$$Z_{20} = \frac{m \cdot A \cdot f \cdot L^2 \cdot N_{ef}^2 \cdot B_s}{k_e \cdot D \cdot \emptyset_0} \quad \text{Döner tip için.} \quad (3.7)$$

$$Z_{20} = \frac{\pi \cdot m \cdot A \cdot L^2 \cdot N_{ef}^2 \cdot B_s \cdot f}{\tau \cdot 2p \cdot k_e \cdot \emptyset_0} \quad \text{Lineer tip için.} \quad (3.8)$$

Karakteristik empedans (Z_{20}) ifadelerinden 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 empedansı ve karakteristik empedansı denklemlerinden anlaşıldığı üzere sekonder malzemenin

cinsi, boyutları, kutup akısının ve diğer ifadelerin etkileri kolayca görülebilir.

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

Sekonder empedans ve karakteristik empedans değerlerini azaltma yöntemleri şunlardır.

1) Denklemlerden 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 yüzeyi koymakla (döner tip için boyuna, lineer tip için enine) (k_e) enine uç etkisi katsayısı aynı L uzunluğuna göre arttırılmış sayılır.

Gerçi (k_e) enine uç etkisi katsayısı:

$$k_e = \frac{\pi \cdot L}{2\tau} \quad (3.9) \quad \text{ve ya} \quad k_e = \frac{p \cdot L}{D} \quad (3.10)$$

3) Düşük bir Z_2, Z_{20} ve dolayısıyla daha iyi bir performans elde etmek için değiştirilebilecek diğer bir parametre ise kutup akısıdır. Yani kutup akısının arttırılmasıdır. Ancak primer çekirdeğin doyuma gitmesinden ve belli bir elektrik yükünün üzerine çıkılamamasından dolayı, bu $\emptyset$ akısı istenildiği kadar arttırılamaz.

4) Z_2 ve Z_{20} empedanslarının azaltılmasının başka bir yolu olarakda makinaya uygulanan gerilimin frekansını azaltmak olduğu aşağıdaki denklemlerden anlaşılır.

$\emptyset$ ve $\emptyset_0$ akılarını formülüne edersek

$$E = 4,44 \cdot f \cdot N_{ef} \cdot \emptyset \quad \text{den} \quad (3.11)$$

$$\emptyset = \frac{E}{4,44 \cdot f \cdot N_{ef}} \quad (3.14) \quad \text{ve} \quad \emptyset_0 = \frac{U}{4,44 \cdot f \cdot N_{ef}} \quad (3.15)$$

Bu ifadeleri denklem (3.5) ve (3.8)'de yerine koyarsak sekonder empedansı ve sekonder karakteristik empedansı aşağıdaki ifadeleri oluşturur.

$$Z_2 = \frac{4,44 \cdot \pi \cdot m \cdot A \cdot L^2 \cdot N_{ef} \cdot B_s}{2p \cdot k_e \cdot \tau} \cdot \frac{f}{s \cdot E} \quad (3.16)$$

$$Z_{20} = \frac{4,44 \cdot \pi \cdot m \cdot A \cdot L^2 \cdot N_{ef} \cdot B_s}{2p \cdot k_e \cdot \tau} \cdot \frac{f}{U} \quad (3.17)$$

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

Fakat frekansın değişmesi ile makinanın sekonder hızı, X_1 , X_m değerleride değişmektedir. Bu durum uygulama imkanını kısıtlayan faktörlerdir. Frekans değiştirilmekle kutup akısı değiştirilmektedir. Böylece $\emptyset$ 'ye ne derece etki edileceği, yukarıda üçüncü madde de belirtilmiştir.

$\pi = 3,14159$
 $A = 4,59$ katsayı
 m = Faz sayısı
 ρ = Özgül direnç ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)
 L = Sekonderin enine uzunluğu (m)
 N_{ef} = Faz başına efektif sarım sayısı
 B_s = Doyma akım yoğunluğu (1.8 Tesla)
 D = Sekonderin eni (rotor çapı) (m)
 τ = Kutup adımı (m)
 $2p$ = Kutup sayısı
 $\emptyset$ = Kutup akısı
 s = Kayma
 k_e = Enine uç etkisi katsayısı
 f = Frekans
 φ_r = Sekonder empedansı faz açısı (26.6°)

3.2. Lineer asenkron motorlarda moment

Yukarıdaki ifade de (3.16);

$$\frac{4,44 \cdot \pi \cdot m \cdot A \cdot L^2 \cdot N_{ef} \cdot B_s \cdot \rho}{2p \cdot k_e \cdot \tau} = K \quad \text{olarak kabul edilince, (3.18)}$$

$$Z_2 = K \cdot \frac{f}{s \cdot E} \quad \text{şeklinde ifadelendir.} \quad (3.19)$$

Böylece R_2 (sekonder direnci), X_2 (sekonder reaktansı) aşağıdaki gibi olur.

$$R_2 = Z_2 \cdot \cos \varphi_r = \frac{K \cdot f}{s \cdot E} \cdot \cos \varphi_r \quad (3.20)$$

$$X_2 = Z_2 \cdot \sin \varphi_r = \frac{K \cdot f}{s \cdot E} \cdot \sin \varphi_r \quad (3.21)$$

Sekonder akımı ;

$$I_2 = \frac{E}{Z_2} \quad (3.22) \quad \text{burada formül 3.19 dikkate alınır}$$

$$I_2 = \frac{E^2 \cdot s}{K \cdot f} \quad (3.23)$$

$$s = f_2 / f \quad \text{olduğuna göre} \quad (3.24)$$

f_2 = Kayma frekansı

$$I_2 = \frac{E^2}{f^2} \cdot \frac{f_2}{K} \quad \text{sekonder akımı.} \quad (3.25)$$

$$P_i = m \cdot I_2^2 \cdot R_2 \quad \text{Hava aralığı gücü} \quad (3.26)$$

$$V_s = 2 \cdot f \cdot \tau \quad (\text{m/sn.}) \quad \text{Lineer senkron hız} \quad (3.27)$$

Lineer moment ;

$$M = \frac{P_i}{V_s} \quad (3.28)$$

Yukarıdaki (3.20), (3.25) ve (3.27) ifadeleri

(3.28) 'de irdelenirse;

$$M = \left(\frac{E}{f} \right)^3 \cdot \frac{m \cdot f_2 \cdot \cos \varphi_r}{K \cdot 2 \cdot \tau} \quad \text{sonucu bulunur.} \quad (3.29)$$

3.3. Goodness katsayısı (7,8,9,10)

Lineer motorların dizaynında güç/ağırlık oranı, sistemin maliyeti, güvenilirliği, değişkenliği, gürültüsü, sistemin verimi gibi kavramların dikkate alınması gerekliliği vardır.

Verilen bir e.m.k için elektrik devresi maximum akımı, verilen bir m.m.k içinde manyetik devresi maximum akıyı geçirir. Bu devreler arasındaki bağıntı akımla, akı arasındaki bağıntıyı ortaya koymaktadır. Bu iki birim birlikte kuvveti meydana getirirler. Bu iki devrenin bir denklemde birleştirilebilmesiyle, makinanın özelliğini veren bir kriter ortaya çıkar. Bu kritere GOODNESS KATSAYISI denir.

Goodness katsayısı uygulanan bir e.m.k 'in akımını üretecek elektrik devresinin kabiliyeti ve devreden geçen akımın Ø akısını oluşturacak, manyetik devrenin kabiliyeti ile orantılıdır. Böylece ;

$$G = \frac{\mu \cdot w \cdot \phi \cdot Ae \cdot Am}{le \cdot lm} \quad \text{olur.} \quad (3.30)$$

Ae = Elektrik devresi alanı
 Am = Manyetik devresi alanı
 le = Elektrik devresi uzunluğu
 lm = Manyetik devresi uzunluğu
 µ = Geçirgenlik
 w = Açısal hız
 Ø = İletkenlik

Lineer makinelerin hava aralıkları dönen tiplere nazaran daha büyüktür. Bir lineer makina dizaynı oluşturulurken goodness katsayısı belli bir değerin altına indirilemez. Yukarıdaki ifa deden de anlaşılacağı üzere büyük kesit, büyük iletkenlik, büyük geçirgenlik, büyük frekans daha iyi bir makina demektir, şeklinde genelleştirilebilir ve bütün elektromanyetik makineler için geçerlidir.

Goodness katsayısı üzerindeki çalışma geliştirildiğinde aşağıdaki denklem elde edilmiştir.

$$G = \frac{2 \cdot \tau^2 \cdot \mu_0 \cdot f}{\pi \cdot lg \cdot \rho_r} \quad (3.31)$$

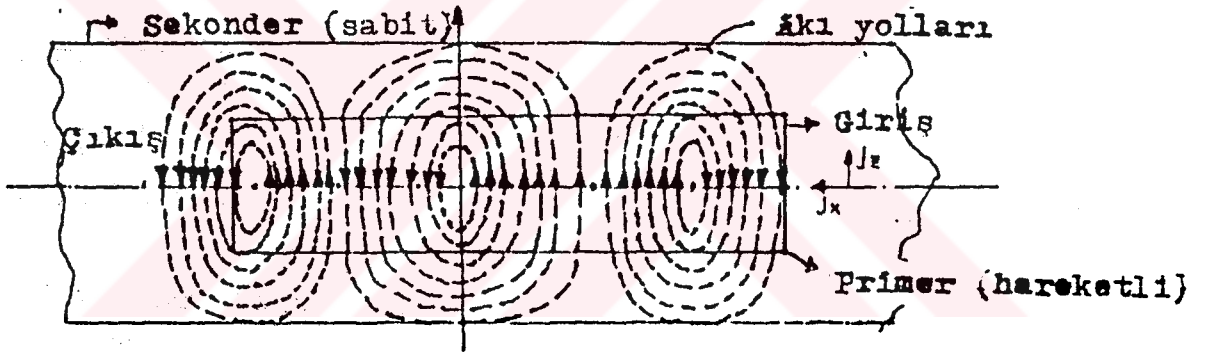
τ = Kutup adımı
 f = Kaynak frekansı
 lg = Hava aralığı
 µ₀ = Havanın manyetik geçirgenliği
 ρ_r = Yüzeysel özgül direnç

3.4. Uç etkileri (7,8,9,10)

Döner tip motorun rotor boyu için incelenen uç etkisi ve katsayısı (k_e) 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 kullanılır. Lineer tipte ise sekonder boyuna doğrultusundaki uç etkisi için "boyuna uç etkisi ve katsayısı (k_b)" enine doğrultudaki uç etkisi için ise "enine uç etkisi ve katsayısı (k_e)" ifadeleri kullanılır.

3.4.1. Enine uç etkisi

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



Şek.3.2 Sekonder akım yolları

Yukarıdaki şekilde de görüldüğü gibi, sekonderde oluşan girdap akımları, sekonderin uç bölgelerinde devrelerini tamamlamak (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.

Uç bölgelerinde akan akımlar için endüklenen e.m.k.'in bir kısmının J_x akımı tarafından kullanılması gerekmektedir. Bu durum ise, eksen doğrultusunda akan ve moment meydana getiren girdap akımlarının kaynağı olan e.m.k.'ni azaltır. J_x akımının oluşturduğu bu azalma kendini toplam sekonder akımında ve dolayısıyla ilme kuvveti olan momentte gösterir. Ayrıca enine uç etkisi bileşeni olan J_x akımı, makinanın hava aralığı alanında bozulmasına sebebiyet verir.

Sekonder kayıplarında ve momentte azalmaya yol açan bu etki ENİNE UÇ ETKİSİ olarak tanımlanır. Hesaplamalarda (k_e) katsayısı ile dikkate alınır.

. Z_2 sekonder empedansı hesaplanırken, sekonder eni sonsuz olan ideal bir motor için bulunan empedansın (k_2) katsayısına bölünmesi ile uç etkisi kapsama alınmış olur.

Primeri, sekonderine eşit genişlikte olan lineer asenkron motor ;

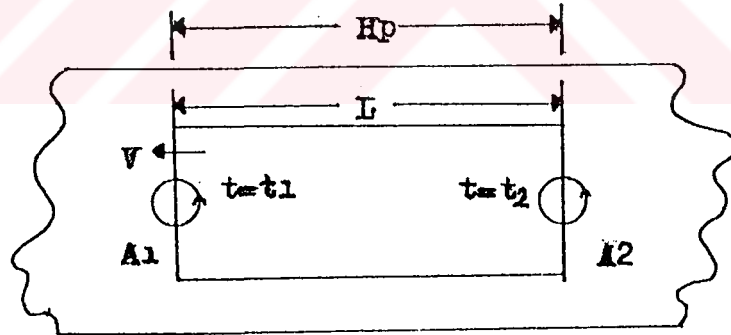
Sekonderi primerden daha geniş olan bir motordan daha büyük enine uç etkisi gösterir.

Enine uç etkisi büyüdükçe moment ve k_2 katsayısı azalır.

3.4.2. Boyuna uç etkisi

Sadece lineer elektrik makinaları için boyuna uç etkisi mevzu bahistir. Lineer elektrik makinalarda meydana gelmesinin sebebi ise, primer çekirdeğin 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 ETKİSİ " 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.



Şek.3.3. Lineer asenkron motorda senkron hızda uç etkisi

Şekildeki A1 ve A2 noktalarında primer hareket halindeyken manyetik akının frekanslı oluşundan dolayı, gerilim endüklendir. Bunun neticesinde şekilde de görüldüğü gibi primerin giriş ucu kısmında (A1'de) yüksek, primerin çıkış ucu olan (A2'de) küçük değerlerde akımlar oluşur. Bu akımlara boyuna uç etkisi akımları denir ve senkron hızda kayıplara sebep olur. Kayıplar hıza göre farklılık gösterir. Ayrıca boyuna uç etkisi primer ile sekonder arasındaki hava aralığına da bağlı bir fonksiyondur. Yani, hava aralığı arttırıldığı zaman boyuna uç etkisi azalmaktadır (Şek.3.3).

B Ö L Ü M 4

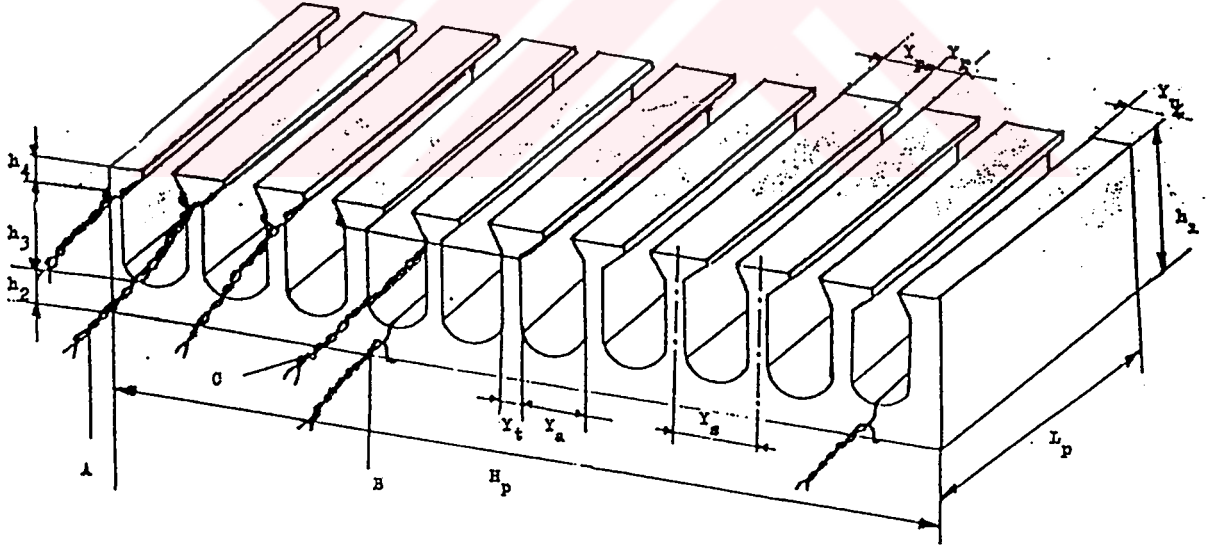
DENEY ARACI OLARAK KULLANILAN LİNEER ASENKRON MOTORLARI VE ÖZELLİKLERİ

4.1. GİRİŞ

Bu bölümde deney motorlarının özellikleri ayrıntılı olarak verilecektir. Daha önceki bölümde Lineer Asenkron Motorlar için yaptığımız sınıflandırma içinde deney motorlarının yeri ortaya konulacaktır.

Motorların primerleri hareketli olup kısadır ve aynı özellikleri taşımaktadırlar. Sekonderleri ise tamamen farklıdır. Birinci motorun sekonderi tek parça malzemeden (ST-35 çeliği) yapılmıştır. İkinci motorun sekonderi ise kafes sargılıdır. Çalışmamızın amacı farklı sekondere sahip, aynı primerli bu iki lineer asenkron motorun performanslarının karşılaştırılmasıdır.

4.2. Primer sac paketleri (10, 11)



Sek.4.1. Primer sac paketi ve ölçü bobinlerinin perspektif görünüşü.

$H_p = 36,9$ cm.
 $L_p = 8,42$ cm.
 $W_p = 27$ kg.
 $Y_a = 17,5$ mm.
 $Y_p = 23$ mm.

$Y_r = 7 \text{ mm.}$

$Y_s = 30,75 \text{ mm.}$

$Y_t = 13,5 \text{ mm.}$

$Y_u = 18 \text{ mm.}$

$h_1 = 88 \text{ mm.}$

$h_2 = 40 \text{ mm.}$

$h_3 = 40 \text{ mm.}$

$h_4 = 8 \text{ mm.}$

$A = d\emptyset = 0,5 \text{ mm. } N=5 \quad \text{ve;}$

$d\emptyset = 0,6 \text{ mm. } N=10$

$B = d\emptyset = 0,5 \text{ mm. } N=1$

$d\emptyset = 0,6 \text{ mm. } N=10$

$C = d\emptyset = 0,5 \text{ mm. } N=2$

$d\emptyset = 0,6 \text{ mm. } N=10$

SEMBOLLERİN ANLAMİ ;

H_p = Sac paketin boyu

L_p = Sac paketin eni

W_p = Sac paketin ağırlığı

Y_a = Oluk genişliği

Y_p = Dış ağzı genişliği

Y_r = Oluk ağzı genişliği

Y_s = Oluk adımı

Y_t = Dış dibi genişliği

Y_u = Uç noktaları dış ağzı genişliği

h_1 = Sac paketin yüksekliği

h_2 = Sac paketin gövde yüksekliği

h_3 = Oluk yüksekliği

h_4 = Dış ağzı yüksekliği

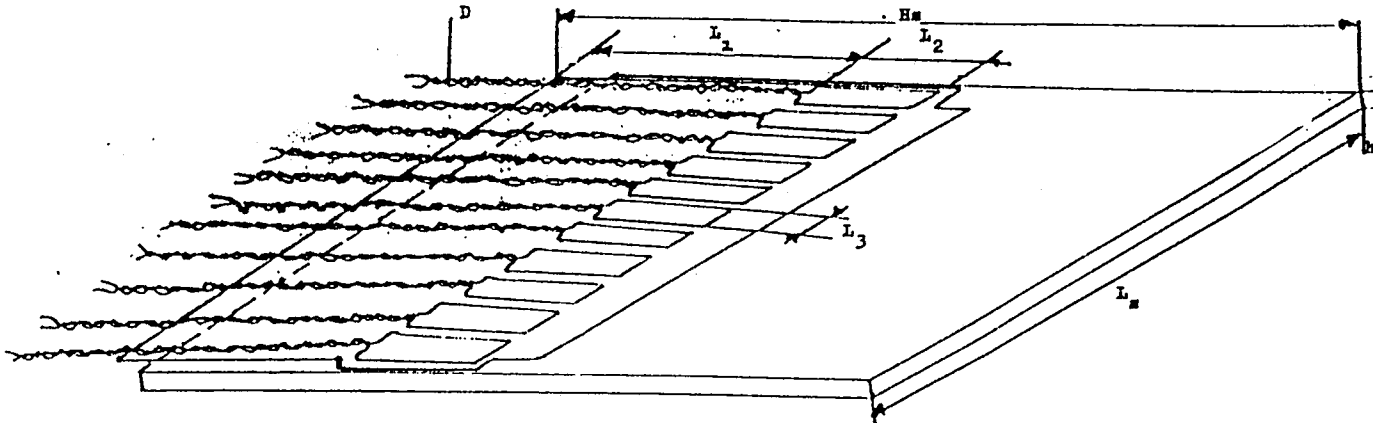
A = Boyuna hava aralığı akısı ölçü bobini

B = Çekirdek akısı ölçü bobini

C = Hava aralığı kutup akısı ölçü bobini

Q = Oluk adedi. (Primer üzerinde 14 oluk)
(Dahili oluk 12, harici 2 adet)

4.3. Sekonderler



Sek.4.2. Sekonder Çeligi ve ölçü bobininin perspektif görünüşü. (birinci sekonder)

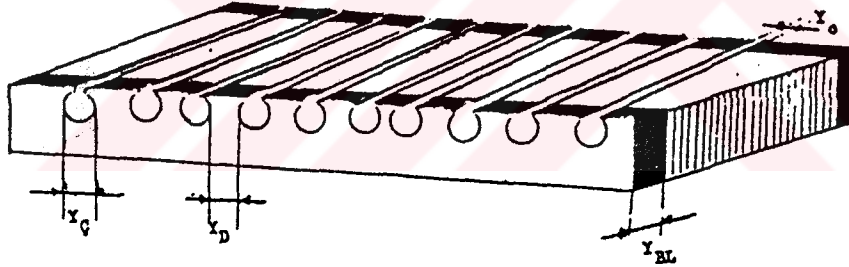
1. SEKONDER

$H_s = 86$ cm.
 $L_s = 11,7$ cm.
 $h_1 = 21$ mm.
 $L_1 = 21,5$ cm
 $L_2 = 9$ cm.
 $L_3 = 1$ cm.
 $D = d\phi = 0,6$ mm. $N=1$

2. SEKONDER

96 cm.
 $9,9$ cm.
 20 mm.
 $Y_{\phi} = 8$ mm.
 $Y_D = 15$ mm.
 $Y_{BL} = 5$ mm.
 $Y_o = 2$ mm.

H_s = Sekonderin uzunluğu,
 L_s = Sekonderin eni,
 h_1 = Sekonderin kalınlığı.
 L_2 = Bobin halkalarının boyu,
 L_3 = Bobin halkalarının eni,
 D = Enine hava aralığı akısı ölçü bobini apı,
 Y_{ϕ} = Bakır ubugun apı.
 Y_D = Bakır ubuklar arası mesafe,
 Y_{BL} = Kısa devre lamasının kalınlığı,
 Y_o = Sekonder oluğunun dış ağız genişliği,



Şek.4.3. Kısa devre ubuklu sekonderin perspektif görünüşü. (ikinci sekonder)

4.4. Primer sarım şemaları

Primer sargıları klemens tablosundaki bağlantıların değıştirilmesiyle kolayca iki türe (uç bobinleri devrede - uç bobinleri devre dışı) imkan verebilecek şekilde sarılmıştır. Sarım şemasında fazlar her iki tür içinde A, B ve C harfleri ile ifade edilmiştir. Oluk ağız dikkate alınarak oluğun tabanına yerleştirilen sargı elemanı kenarı için Üslü harfler (A1'-B3' gibi) üstüne yerleştirilen sargı elemanı kenarı için ise Üssüz (sade) harfler (A1-B3 gibi) kullanılmıştır. Her iki bağlantıda da çift katlı sargılar kullanılmıştır.

4.4.1.Uç bobinlerinin kullanıldığı durum

Bu duruma ilişkin sarım şeması görülmektedir (Şek.4.4). Bobinlerin fazlara göre dağılımı şöyledir.

A ve B fazı için,sekiz tam-iki uç bobini,
C fazı için,üç tam iki ara bobin şeklindedir.

Motorumuzda toplam onbeş bobin kullanılmış olup altmış sarım içermektedir .Tam bobinler ile uç ve ara bobinlerin uzunlukları eşit değildir.Örneğin; tam bobinlerin arasında üç diş kalırken,ara bobinlerin arasında iki,uç bobinlerin arasın da bir diş kalmaktadır.

4.4.2.Uç bobinlerinin kullanılmadığı durum

Bu duruma ilişkin sarım şeması görülmektedir (Şek.4.5) . Şekilden de anlaşıldığı gibi bobinlerin fazlara göre dağılımı

A ve B fazı sekiz tam bobin,C fazı üç tam bobin-bir ara bobin şeklindedir.

4.5. Sargılarda kullanılan iletkenler

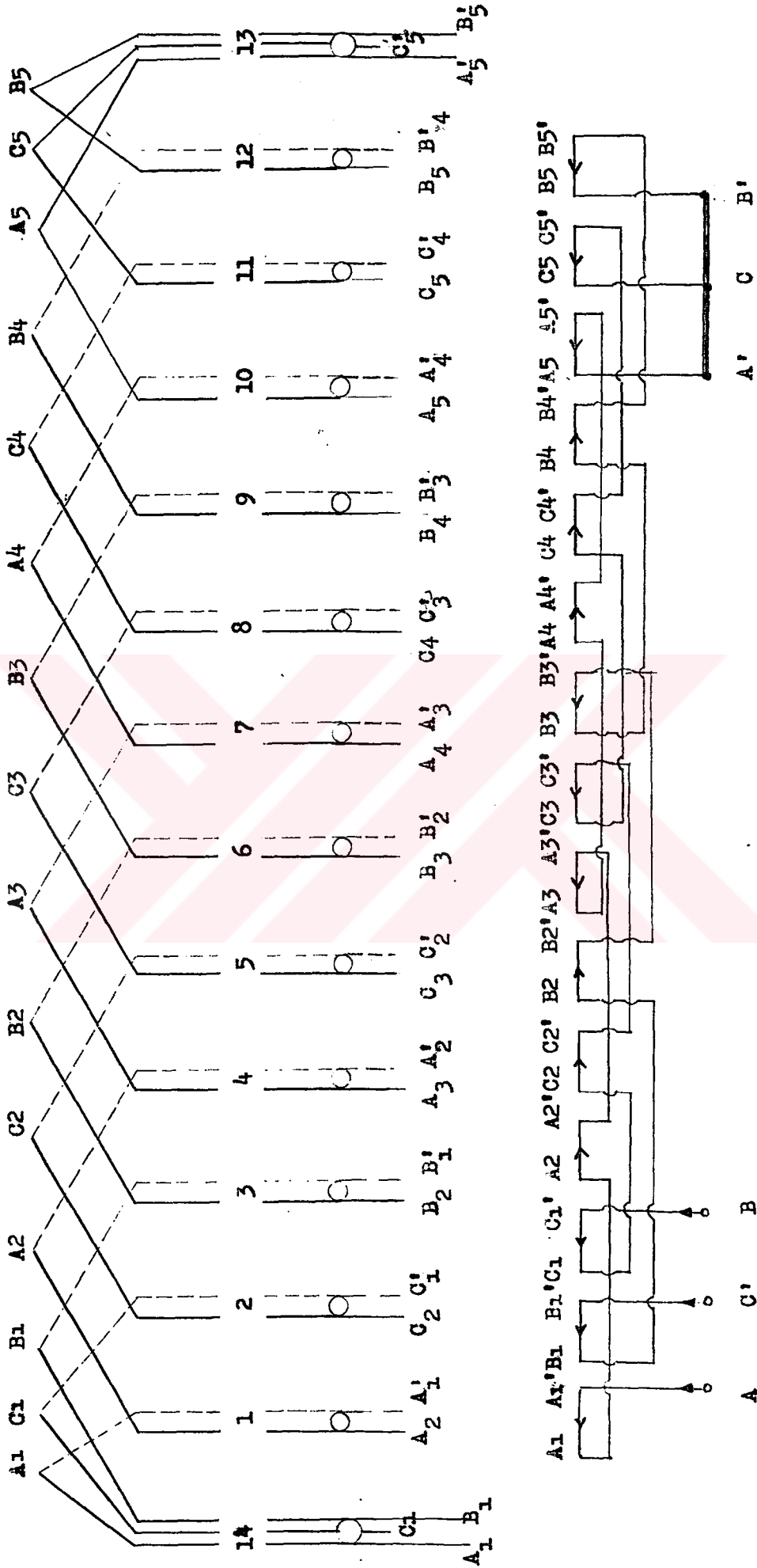
Sargılarda kullanılan iletkenlerin özellikleri şöyledir.

Diç = 1,8 mm.
Ddiş = 1,9 mm.
Siç = 2,5447 mm².
J = 4 A/mm².
İyük = 10,1788 A.

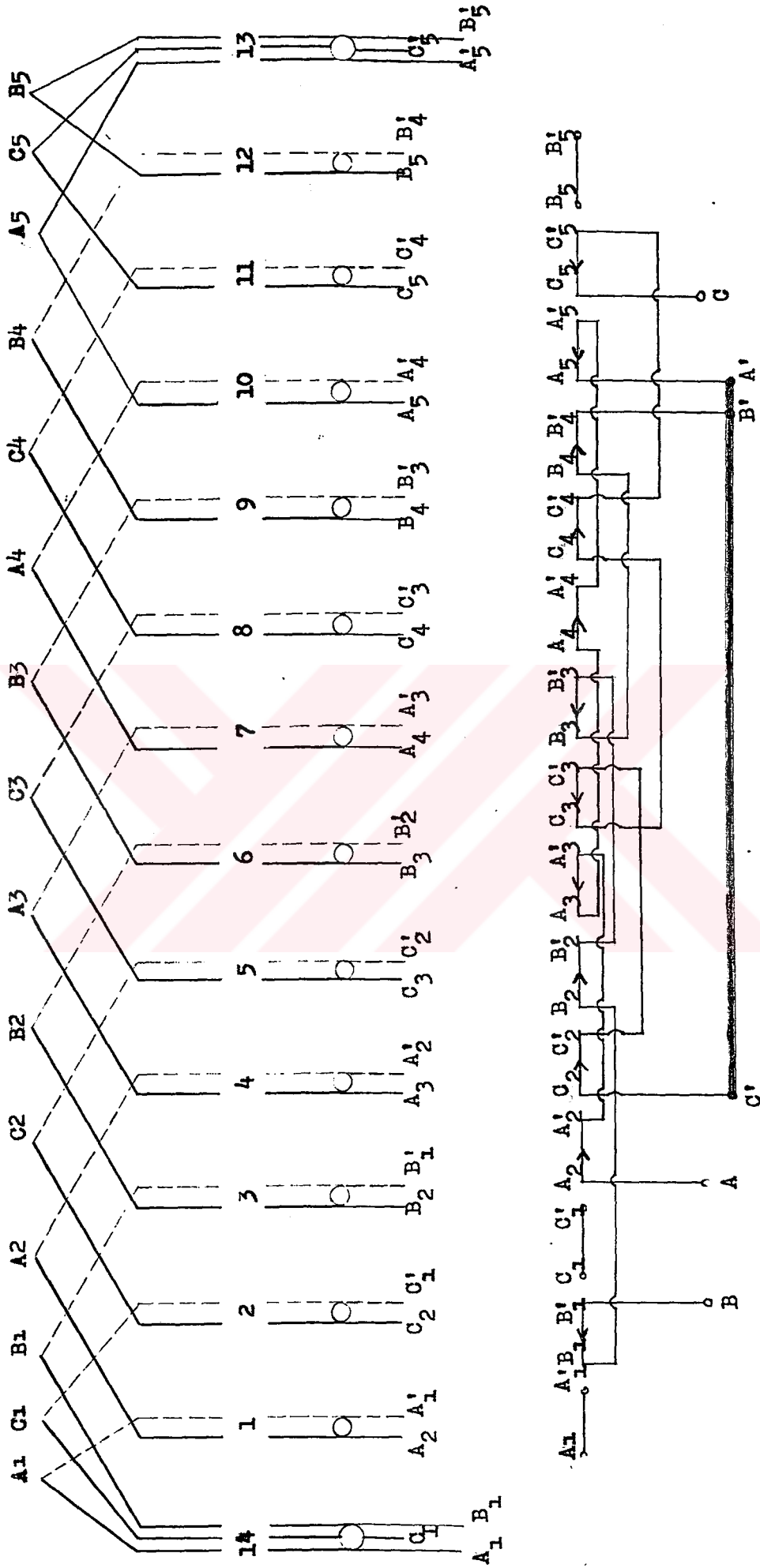
Ancak piyasada 1,8 mm.çapında (2,5447 mm².kesitinde) iletken bulunamadığı için her biri 1.05 mm. çaplı üç telli sarım kullanılmıştır.

4.6. Deneyde kullanılan güç kaynağı

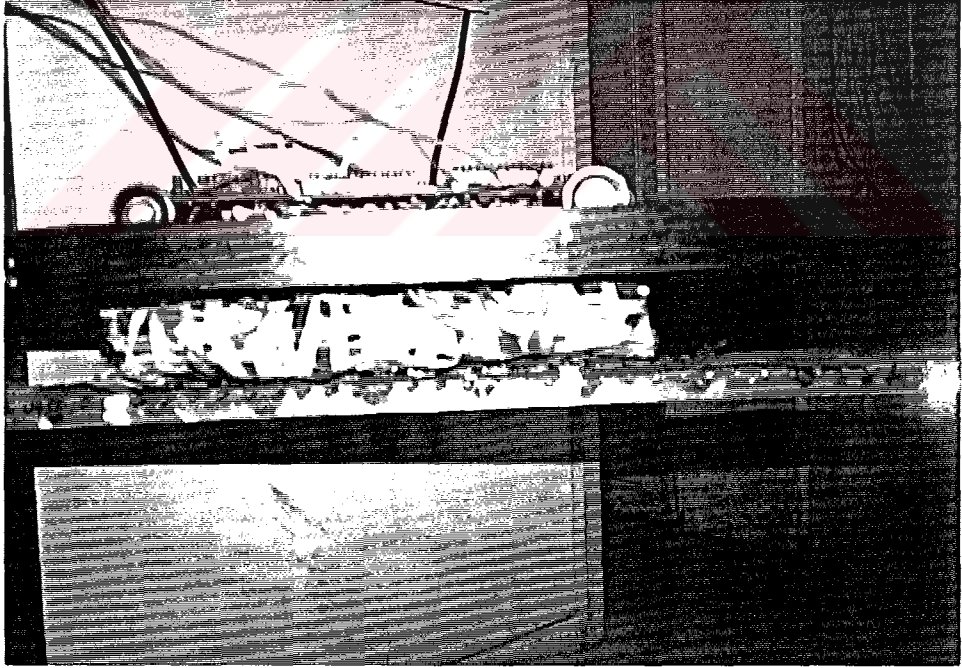
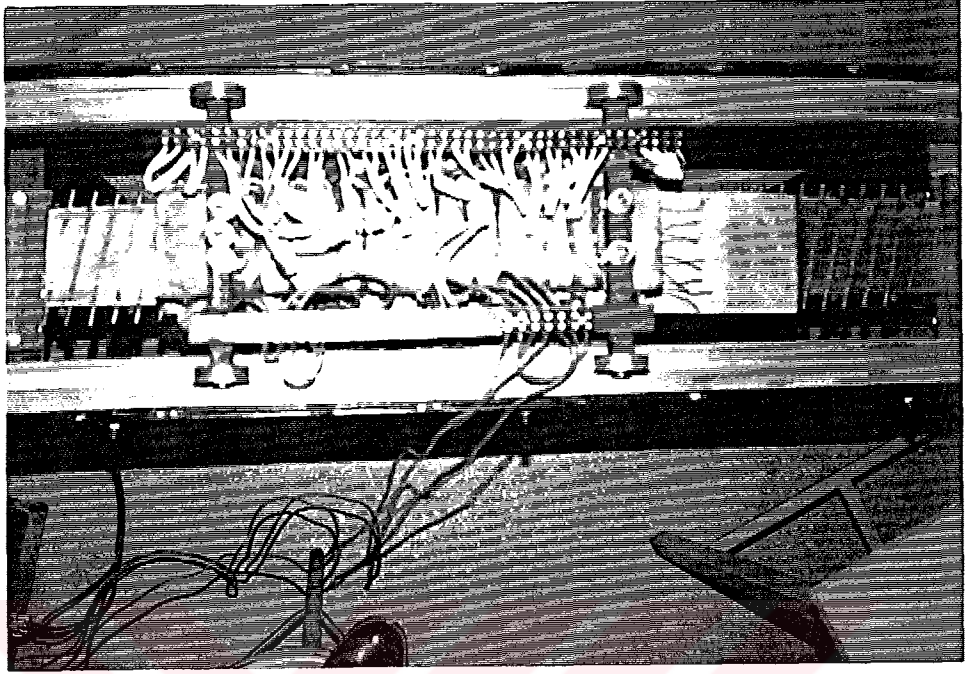
Lineer asenkron motora sabit frekans altında değişik gerilimler uygulama,varyak yardımı ile sağlanmıştır.Varyak üç fazlı 380 / 0-380 V. etiket değerlidir.



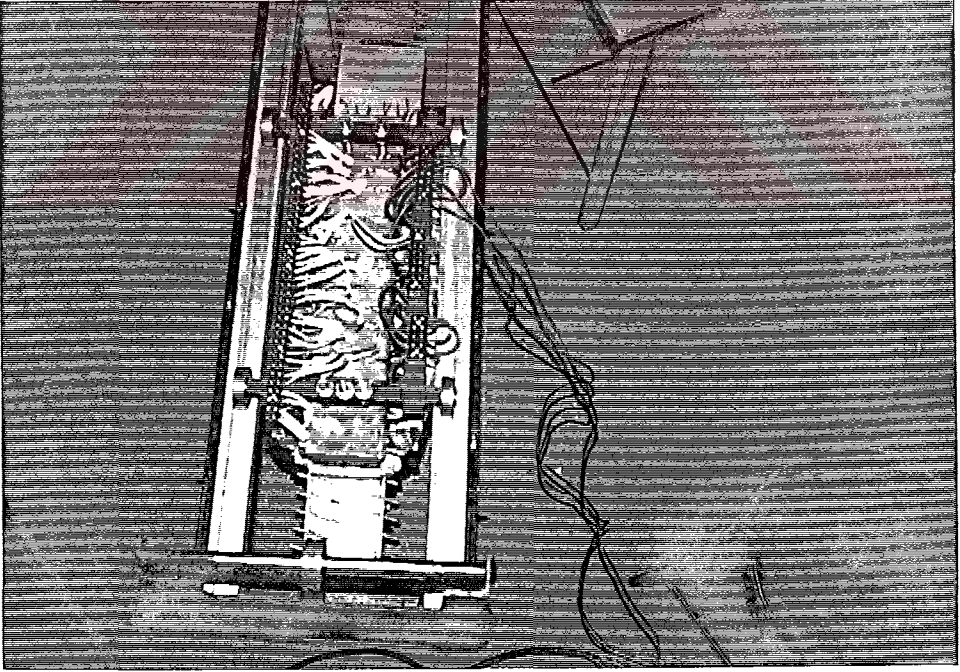
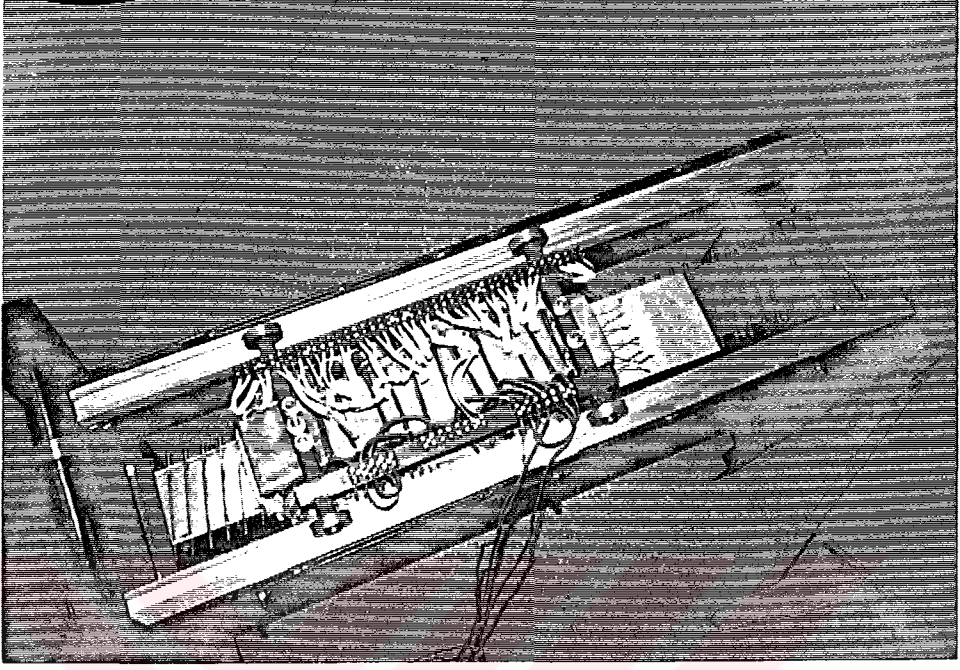
Şek.4.4. Lineer asenkron motorda ug bobinlerinin kullanıldığı andaki sarım şeması



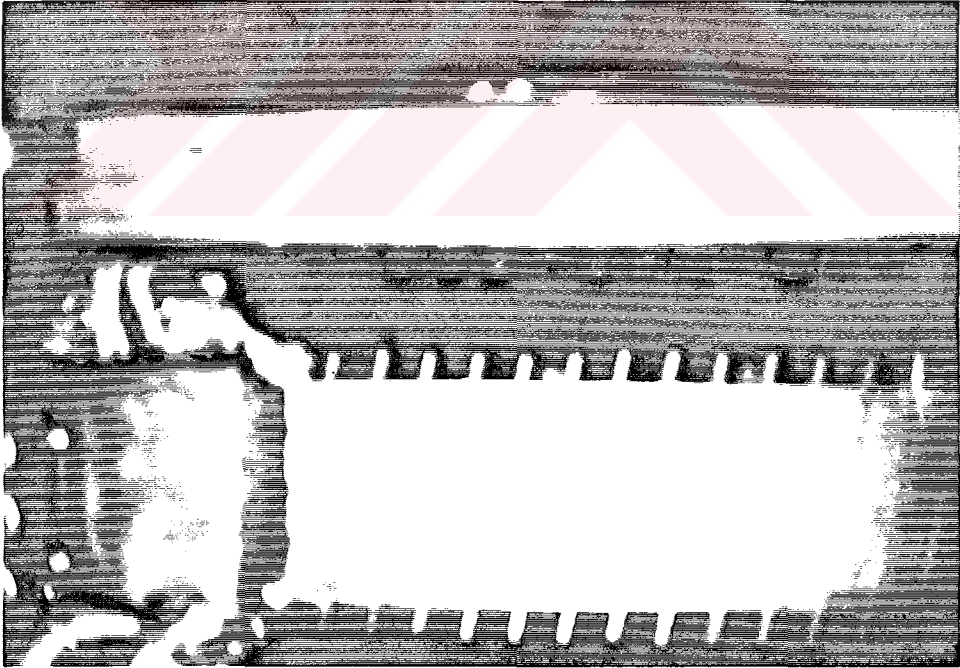
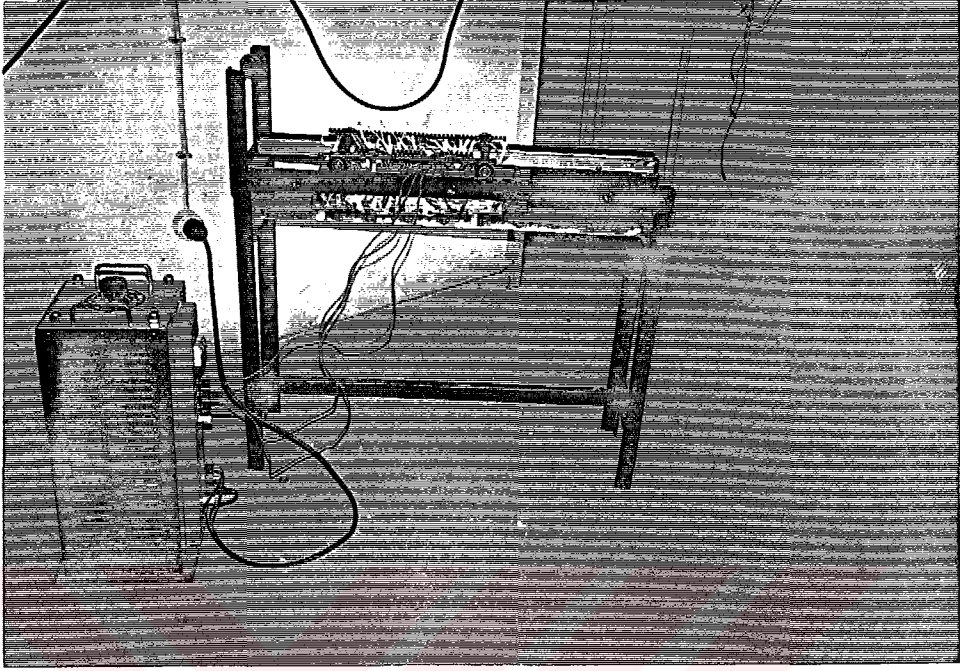
Şek.4.5. Lineer asenkron motorda uç bobinlerinin kullanılmadığı andaki sarım şeması



Şek.4.6.Deney motorunun çeşitli fotoğraflık görüntüleri



Şek.4.7.Deney motorunun çeşitli fotoğrafik görüntüleri



Şek.4.8.Deney motorunun çeşitli fotoğrafik görüntüleri

B Ö L Ü M 5

SEKONDERİ KISA DEVRE ÇUBUKLU LİNEER ASENKRON MOTOR ÜZERİNDE YAPILAN DENEYSEL ÇALIŞMALAR

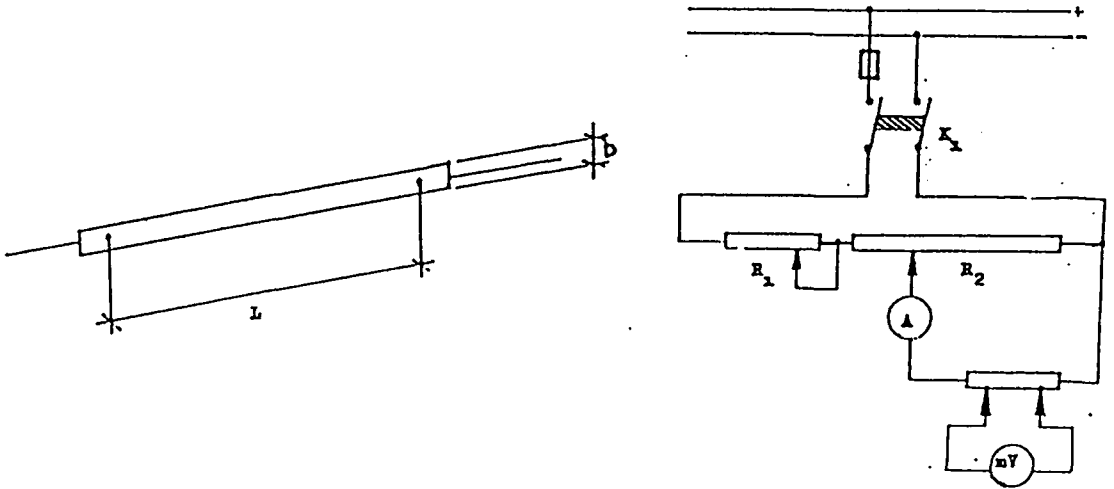
5.1. Giriş

Bu bölümün konusu, sabit frekansta, dolayısıyla sabit bir senkron hızda değişik hava aralıklarında ve makinada yer alan uç bobinlerinin devrede veya devre dışı oluşlarına göre makinenin çalışma karakteristiklerini incelemek, akım, gerilim, güç, ürettiği kuvvet, (Φ_v) boyuna hava aralığı akısı, (Φ_e) çekirdek akısı, (Φ_r) hava aralığı kutup akısı ve (Φ_u) enine hava aralığı akısı gibi büyüklükleri ölçmektir.

Primerin dört köşesi de eşit mesafede ayarlanarak $lg = 2,26$ mm. ve $lg = 2,75$ mm.lik hava aralıklarında ölçümler yapılmıştır.

5.2. Sekonder malzemenin özgül direncinin bulunması

- 1) Sekonder olarak kullanılan 0,50 mm. kalınlıktaki silisyumlu sacdan belli uzunlukta ve biçimde (lamba) örnek alınır. Malzemenin homojen olmasına dikkat edilmelidir.
- 2) Şek.5.1. deki devre kurulur.
- 3) Direnci ölçülecek olan malzemeye değişik gerilimler uygulanarak bu kademelerdeki gerilim ve akım değerleri kaydedilir. Çok kademede ölçüm direnç değerinin doğruluğunu arttıracaktır.



Şek.5.1. Sekonder malzemenin özgül direncinin bulunması ile ilgili deney bağlantı şeması.

Çizelge 5.1. Sekonder malzemenin özgül direncinin bulunmasında elde edilen değerler.

ÖLÇÜM NO	MALZEME ÇAPI (mm)	GERİLİM (mV)	AKIM (A)	DİRENÇ (Ω)	ORTALAMA DİRENÇ (Ω)
1	0,50	0,3	0,02	0,015	0,01616
2	0,50	0,8	0,05	0,016	
3	0,50	1,1	0,07	0,015	
4	0,50	1,8	0,1	0,018	
5	0,50	2,4	0,13	0,018	
6	0,50	270	17,78	0,015	

Sekonder için örnek alınan silisli sacın uzunluğu L= 8cm dir. Böylece özgül direnç;

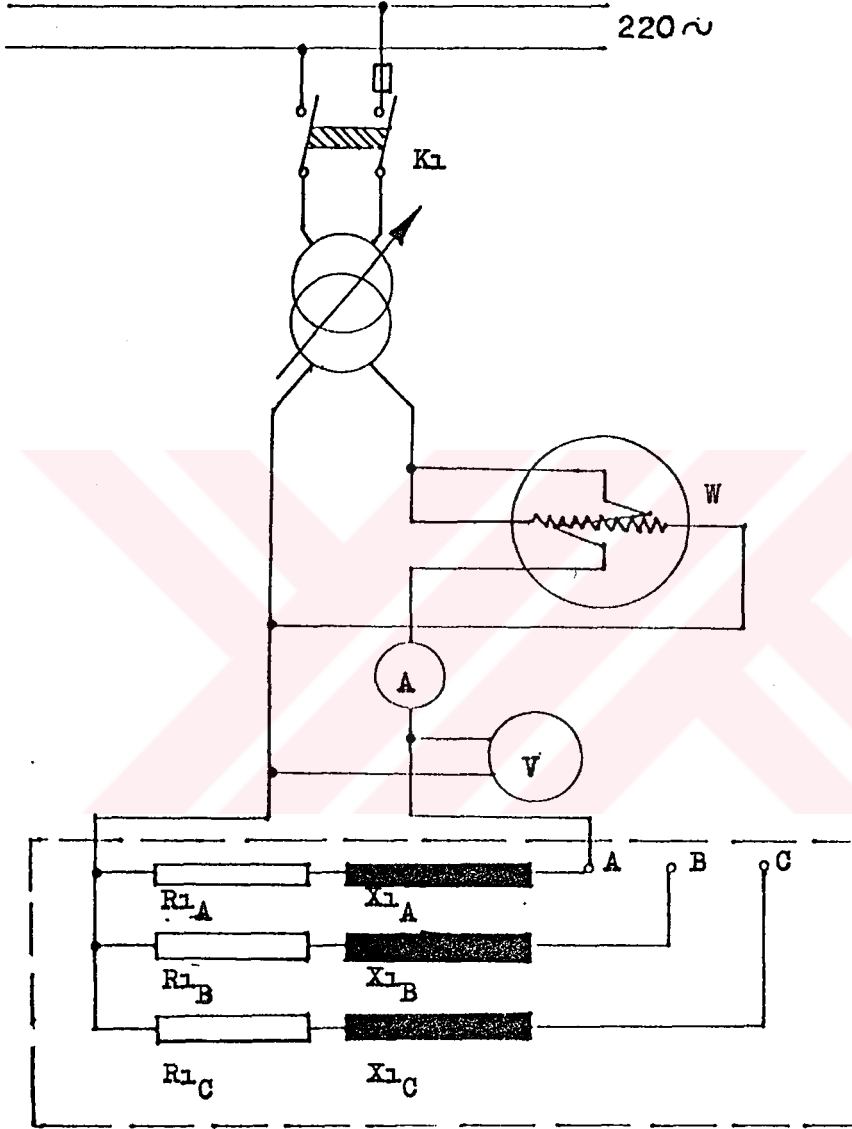
$$\rho = \frac{\pi \cdot R_{or} \cdot D^2}{4 \cdot L} = 0,03964 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m} \text{ dir.}$$

5.3. Primer sargı empedansının bulunması

- 1) Burada önce uç bobinleri devrede iken primer sargı empedansının ölçülmesine karar verildi.
- 2) $Z_2=0$ ve $Z_m \approx 0$ yapmak amacıyla primer sekonderden ayrılır ve magnetik olmayan bir zemine konur. Eğer magnetik bir zemine konursa ölçmeler yanlış olur.
- 3) Şek.5.2.deki devre kurulur. Her ne kadar sargıların sarılmasında üç faz sargısının da dengeli olmasına dikkat edilirse her faz ayrı ayrı ölçülüp ortalamasını almak daha doğrudur.
- 4) Primer sargıya uygulanan gerilim kademe kademe artırılarak bir kaç kademede akım, gerilim ve güç değerleri kaydedilir. (Sekonder yok ken primere anma gerilimi 220 v.) uygulanmamalıdır.
- 5) Her faz için yukarıdaki işlemler tekrar edilir.
- 6) Primer sargıda uç bobinleri devre dışı iken yukarıdaki işlemler tekrar edilir.

5.3.1. Ölçülen ve hesaplanan değerler

Yukarıda açıklanan deney sonucu ölçülen ve hesaplanan değerler Çizelge.5.2. ve 5.3.te sunulmuştur. Yapılan hesaplamalarda:



Şek.5.2. Primer sargı empedansını ölçmek için gerekli deney bağlantı şeması.

$$\cos \varphi_1 = P_1 / U_1 \cdot I_1 \quad Z_1 = U_1 / I_1 = R_1^2 + X_1^2$$

$$R_1 = Z_1 \cdot \cos \varphi_1 \quad X_1 = Z_1 \cdot \sin \varphi_1$$

ifadeleri kullanılmıştır.

5.4. Değişik gerilimlerde makinanın çalışma karakteristiklerinin bulunması

1) Ölçmenin hangi sarım şekli için ve hangi hava aralığında yapılacağına karar verilir.

2) Deneyimizde makina önce uç bobinlerinin devrede bulunduğu durumda ortalama hava aralığı $lg=2,26$ mm.ye ayarlanmıştır. Burada birbirinden farklı herhangi iki ayrı hava aralığının da değerler alıp, deneysel sonuçlara hesaplamalardan elde edilecek teorik sonuçların karşılaştırılması amaçlanmıştır.

3) Şek.5.3.teki devre kurulur.

4) Makinanın ürettiği kuvveti ölçmek amacıyla ağırlıkları koymaya yarayan ve dingiller üzerine portatif olarak oturtulmuş vagon konulmuştur.

5) Varyanın çıkış gerilimi sıfırdan başlanarak vagondaki ağırlığı taşımaya başladığı ana kadar artırılır. Bu durumda ($s=1$) ölçü aletlerinin gösterdikleri değerler ve vagondaki ağırlık kaydedilir.

6) Vagonun ağırlığı artırılarak 5.maddedeki işlemler tekrarlanır.

7) Motorun sarım şekli değiştirilerek yukarıdaki işlemler tekrar edilir.

8) Primer çekirdeği üzerine konulmuş olan civataların sıkılması veya gevşetilmesiyle ve ayar şablonu (sentil) kullanılarak değişik bir hava aralığı değerine ayarlanır. ($2,75$ mm).

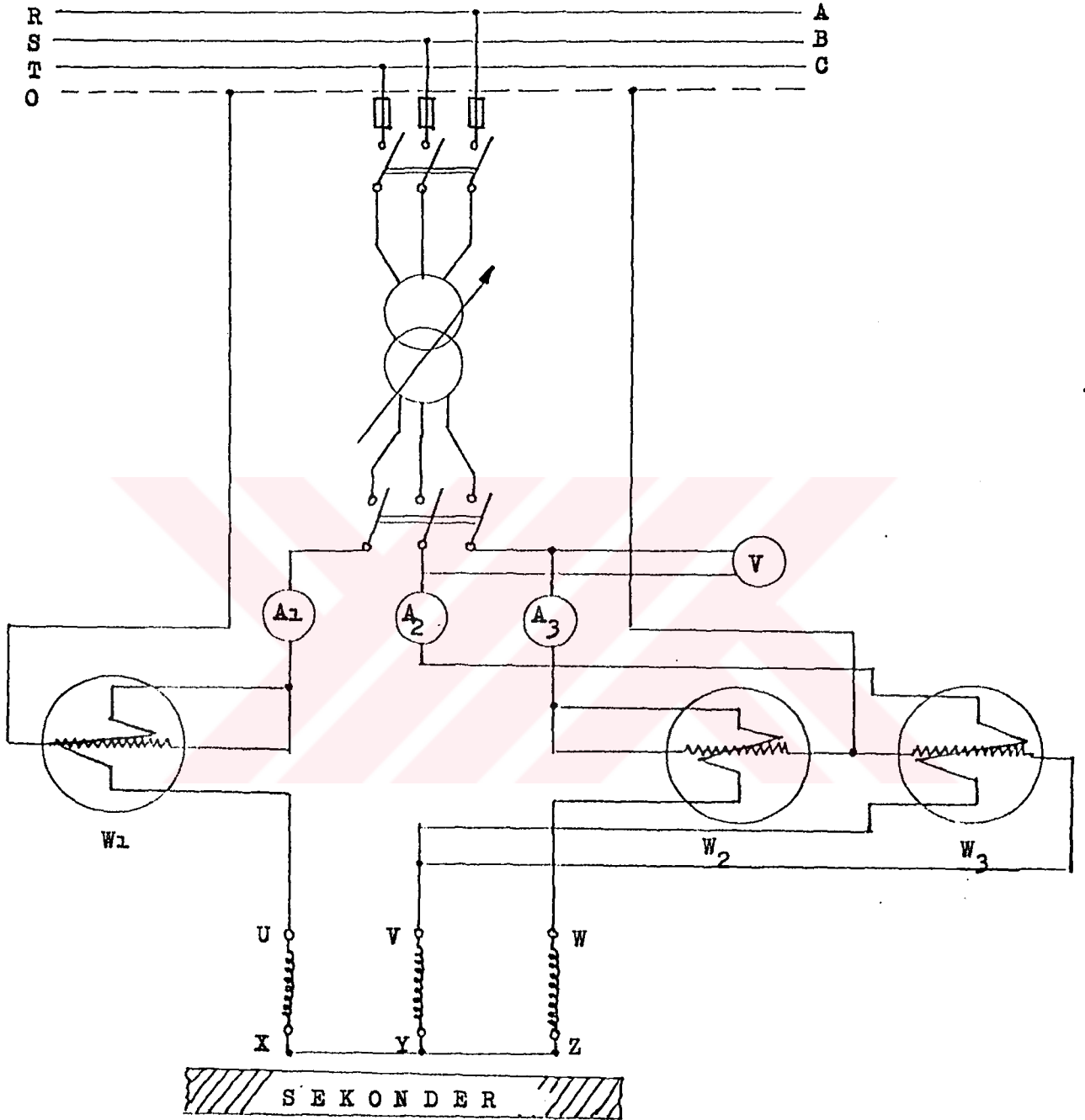
9) Yeni hava aralığı için aynı işlemler tekrar edilir. Bu işlemler sırasında sekonderin ısınmamasına dikkat edilir. Gerekirse soğutucu düzenekler kullanılır.

$lg=2,26$ mm.de ve uç bobinleri devrede iken alınan değerler Çizelge.5.4. te,

$lg=2,26$ mm. de uç bobinleri devre dışı iken alınan değerler Çizelge.5.5. te,

$lg=2,75$ mm.de ve uç bobinleri devrede iken alınan değerler Çizelge.5.6. da,

$lg=2,75$ mm.de uç bobinleri devre dışı iken alınan değerler Çizelge.5.7. de sunulmuştur.



Şek. 5.3. Lincer As. Motorun Çalışma Karakteristiklerinin bulunması deneyine ilişkin bağlantı şeması.

Çizelge 5.2.Uç bobinleri devrede iken R_1, X_1, Z_1 in deneysel olarak bulunan değerleri.

FAZ	U (V)	I (A)	P(W)	Z(Ω)	Cos ϕ	R(Ω)	X(Ω)	ϕ
A	35	4,74	20	7,38	0,120	0,88	7,32	92,34°
	50	6,58	40	7,60	0,121	0,92	7,54	92,27°
	60	7,61	55	7,84	0,120	0,94	7,78	92,34°
B	35	4,66	21	7,51	0,128	0,96	7,44	91,82°
	50	6,37	40	7,84	0,125	0,98	7,77	92,02°
	60	7,57	55	7,92	0,121	0,95	7,86	92,27°
C	35	4,95	22	7,07	0,126	0,89	7,01	91,95°
	50	6,75	42	7,40	0,124	0,91	7,34	92,08°
	60	8,00	55	7,50	0,114	0,86	7,45	92,72°

Faz	Rort. (Ω)	Xort. (Ω)	R ₁ (Ω)	X ₁ (Ω)	Z ₁ (Ω)
A	0,913	7,546	0,920	7,50	7,55
B	0,963	7,690			
C	0,886	7,266			

Çizelge 5.3.Uç bobinleri devre dışı iken R_1, X_1, Z_1 in deneysel olarak bulunan değerleri.

FAZ	U (V)	I (A)	P(W)	Z(Ω)	Cos ϕ	R(Ω)	X(Ω)	ϕ
A	35	7,05	44	4,96	0,178	0,88	4,88	88,6°
	50	10	87,5	5	0,175	0,87	4,92	88,8°
	60	11,9	125	5,04	0,175	0,88	4,96	88,8°
B	35	6,95	40	5,03	0,164	0,82	4,96	89,51°
	50	9,70	80	5,15	0,164	0,84	5,08	89,51°
	60	11,6	120	5,17	0,172	0,88	5,09	88,99°
C	35	7,33	43,8	4,77	0,170	0,81	4,70	89,12°
	50	10,5	91	4,76	0,173	0,82	4,68	88,93°
	60	12,46	125	4,81	0,167	0,80	4,74	89,31°

Faz	Rort. (Ω)	Xort. (Ω)	R ₁ (Ω)	X ₁ (Ω)	Z ₁ (Ω)
A	0,876	4,92	0,844	4,889	4,961
B	0,846	5,043			
C	0,810	4,706			

Çizelge 5.5. Lineer asenkron motorların karakteristik değerleri. ($l_g=2,2625\text{mm}$ hava aralığında, $s=1$, uç bobinleri devre dışı iken).

A-sekonderi kısa devre çubuklu.

B-sekonderi tek parça malzemedendir.

	Fk' kg)	Fkn (N)	Un (V)	I ₁ (A)	Pgiriş (W)	Cos ϕ
A	2	19,62	42	3,41	68	0,274
	4	39,24	50	4,03	96	0,275
	6	58,86	55	4,47	126	0,296
	8	78,48	60	5,09	172	0,325
	10	98,10	67	5,53	196	0,305
	12	117,72	67	5,17	178	0,297
	15	147,15	70	5,15	184	0,295
	20	196,20	80	5,45	228	0,302
	24	235,44	90	6,00	286	0,306
	28	274,68	90	5,86	290	0,317
	38	372,78	95	6,25	326	0,317
	60	588,60	110	7,20	435	0,317
Ortalama Cos ϕ = 0,328						
B	2	19,62	120	4,22	312,5	0,356
	4	39,24	150	5,44	522,5	0,369
	6	58,86	178	6,60	768,75	0,377
	8	78,48	197	7,66	1030	0,394
	10	98,10	220	8,74	1317,5	0,395
	12	117,72	233	9,37	1508,7	0,398
	14	137,34	251	10,2	1802,2	0,406
	16	156,96	268	10,74	2005,6	0,402
	18	176,58	279	11,45	2216	0,400
	20	196,20	292	12,15	2465	0,401
	22	215,82	301	13,24	2840	0,411
	24	235,44	317	13,62	3085	0,412
	26	255,06	327	14,42	3380	0,413
	28	274,68	340	15,00	3690	0,417
	30	294,30	355	15,68	3850	0,399
	32	313,92	366	16,51	4175	0,398
34	333,54	375	17,86	4800	0,413	
36	353,16	382	18,63	5075	0,411	
Ortalama Cos ϕ = 0,398						

Çizelge 5.6. Linear asenkron motorların karakteristik değerleri. (lg=2,75 mm hava aralığında, s=1, uç bobinleridevrede iken).
A-sekonderi kısa devre çubuklu.
B-sekonderi tek parça malzemedendir.

	Fk' (kg)	Fkn (N)	Un (V)	I ₁ (A)	Pgiriş (W)	Cos ϕ
A	2	19,62	53	7,71	335	0,473
	4	39,24	56	8,20	405	0,509
	6	58,86	59	8,56	425	0,486
	8	78,48	63	8,87	465	0,480
	10	98,10	63	8,80	455	0,474
	16	156,96	68	9,45	560	0,503
	20	196,20	72	9,90	550	0,446
	22	215,82	80	10,57	720	0,492
	25	245,25	80	10,57	665	0,454
	28	274,68	80	10,41	710	0,492
33	323,73	87	11,20	895	0,530	
Ortalama Cos ϕ = 0,485						
B	2	19,62	136	4,12	297,5	0,310
	4	39,24	172	5,54	527,5	0,320
	6	58,86	196	6,29	732,5	0,340
	8	78,48	220	7,59	1016,3	0,340
	10	98,10	239	8,43	1220	0,350
	12	117,72	267	9,46	1541,3	0,350
	14	137,34	285	10,15	1775	0,350
	16	156,96	297	11,08	2041,3	0,360
	18	176,58	322	12,00	2430	0,360
	20	196,20	327	12,22	2550	0,370
	22	215,82	342	13,44	2892,5	0,360
	24	235,44	359	13,85	3190	0,370
	26	255,06	369	14,43	3390	0,370
	28	274,68	378	15,07	3705	0,380
	30	294,30	394	16,07	4165	0,380
	32	313,92	403	16,60	4345	0,370
Ortalama Cos ϕ = 0,355						

5.5. Boyuna hava aralığı akısı, çekirdek akısı ve hava aralığı kutup akısının ölçülmesi

1) Primer uzunluğuna veya oluk sayısına göre değişen manyetik akı ($\emptyset$) değerini ölçmek amacıyla primer sac paketi üzerine bir kaç sarımdan oluşan ölçü bobinleri sarılır. Şek.4.1.de $\emptyset_v, \emptyset_e$ ve $\emptyset_r$ akılarını ölçmek amacıyla primer çekirdek üzerine sarılmış ölçü bobinlerinin amaçlarına göre sarılış şekilleri görülmektedir. Ölçü bobinlerinin bağlantı uçlarının bükülme nedeni ölçme anında mikrovolt düzeyinde dahi olsa ölçme hatasını önlemek içindir. Özellikle manyetik bölgeye yakın olan kısımlarda bükme esnasında göz bırakmamaya çalışılmıştır.

2) Bundan önceki deneylerde olduğu gibi ölçmenin makinanın hangi sarım şekli için ve hangi hava aralığında yapılacağına karar verilir. Deneyimizde makina önce uç bobinlerinin devrede bulunduğu durumda $lg=2,26$ mm. ye ayarlanmıştır.

3) Şek.5.3.te görülen devre kurulur. Şek.5.3. te şeklin karışmaması için ölçü bobinleri gösterilmemiştir. Primer sac paketinde gerçekte sadece primer sargısı bulunmayıp ayrıca A, B ve C ölçü bobinleri sekonder malzemede ise D ölçü bobinide bulunmaktadır. Bu durum şek.4.1. ve şek.4.2. de görülmektedir.

4) Gerilim uygulandığında primerin hareketsiz kalması için primer sac paketi, ağıaç çerçeve arasında her iki taraftan sıkıştırılmıştır.

5) Makinaya uygulanan gerilim sıfırdan başlanarak kademe kademe anma gerilimine kadar artırılır ve ölçü bobinlerinin uçlarındaki e.m.k ölçülür.

6) Motorun sarım şekli değiştirilerek, örneğin uç bobinlerinin devre dışı olduğu durum için yukarıdaki işlemler tekrar edilir.

7) Hava aralığı değiştirilerek ($lg=2,75$) yukarıdaki işlemler yine tekrar edilir.

5.5.1. Ölçülen ve hesaplanan değerler

Bilindiği gibi , $U = 4,44.f.N.\emptyset$ (V)

$$\emptyset = \frac{U}{4,44.f.N} \quad (Wb) \text{ dir.}$$

N_v = Boyuna hava aralığı akısı ölçü bobini (10 sarım)

N_e = Çekirdek akısı ölçü bobini (10 sarım)

N_r = Boyuna hava aralığı kutup akısı ölçü bobini (10 sarım)

$$\emptyset_v = \frac{U_v}{4,44.f.N_v} = \frac{U_v}{4,44.50.10} = U_v/2220$$

$$\emptyset_e = \frac{U_e}{4,44.f.N_e} = U_e/2220$$

$$\emptyset_\tau = \frac{U_\tau}{4,44.f.N_\tau} = U_\tau/2220$$

Böylece ölçülen e.m.k. değerleri yukarıdaki formüllerde yerlerine konduğunda $\emptyset$ akıları hesaplanır.

Uç bobinleri devrede iken $l_g=2.26\text{mm.}$ ve $l_g=2.75\text{mm.}$ 'deki değerler Çizelge 5.8. de, uç bobinleri devre dışı iken aynı hava aralığındaki değerler Çizelge 5.9. da verilmiştir.

5.6. Enine akı dağılımının ölçülmesi

1) Primer çekirdeğin eni veya sekonderin eni boyunca hava aralığında değişen manyetik akı ($\emptyset$) dağılımını ölçmek amacıyla sekonder malzemesi üzerine ve sekonder enini tamamen kaplayacak şekilde Bölüm 4.3.te açıklandığı ve Şek.4.2.de görüldüğü gibi (D) ölçü bobinleri yerleştirilmiştir.Şek.4.2de sekonder malzeme üzerine yerleştirilmiş ölçü bobinlerinin sarılış ve yerleştiriliş şekilleri görülmektedir.Enine akı dağılımını ölçmek için Bölüm 5.5.deki işlemler tekrar edilir.

5.6.1.Ölçülen ve hesaplanan değerler

N_u =Hava aralığı enine akı dağılımı ölçü bobini 1 sarım olup,

$$\emptyset_u = \frac{U_u}{4,44.f.N_u} = \frac{U_u}{4,44.50.1} = U_u/222 \quad \text{formülüne göre,}$$

ölçülen e.m.k. değerlerinden $\emptyset$ akıları hesaplanır.

$l_g=2,26\text{mm}$ ve $l_g=2,75\text{mm}$ deki,uç bobinleri devrede iken ve devre dışı iken alınan değerler Çizelge 10.da verilmiştir.

Çizelge 5.8. Sekonderi kısa devre çubuklu lineer asenkron motorun uç bobinleri devrede iken boyuna hava aralığı akısı ($\emptyset v$), hava aralığı kutup akısı ($\emptyset \tau$), çekirdek akısı ($\emptyset e$) değerleri. (a-90V da; b-180V da).

No	Uv, U τ (V)		$\emptyset v$ (mWb)		Uv, U τ (V)		$\emptyset v$ (mWb)	
	a	b	a	b	a	b	a	b
v1	0,6	1,2	0,269	0,539	0,63	1,36	0,283	0,611
v2	1,6	3,3	0,719	1,480	2,08	4,45	0,934	2,000
v3	1,7	3,7	0,764	1,660	2,16	4,29	0,970	1,928
v4	1,0	2,4	0,449	1,070	1,49	2,79	0,669	1,253
v5	2,4	4,5	1,070	2,020	2,92	5,32	1,312	2,391
v6	2,5	4,7	1,123	2,110	2,51	4,61	1,128	2,071
v7	1,3	2,6	0,584	1,160	1,46	2,70	0,656	1,213
v8	2,4	4,6	1,070	2,060	2,90	5,32	1,303	2,391
v9	2,2	4,2	0,988	1,880	2,46	4,54	1,105	2,040
v10	1,3	2,5	0,584	1,123	1,44	2,62	0,647	1,177
v11	2,5	4,9	1,123	2,202	2,96	5,45	1,330	2,449
v12	1,8	3,9	0,808	1,752	2,05	3,95	0,921	1,775
v13	0,2	0,65	0,089	0,292	0,55	1,26	0,247	0,566
v τ	3,3	5,9	1,361	2,651	2,64	5,27	1,186	2,368
lg=2,2625 mm					lg=2,75 mm			
No	Ue (V)		$\emptyset e$ (mWb)		Ue (V)		$\emptyset e$ (mWb)	
	a	b	a	b	a	b	a	b
e1	0,83	1,71	0,373	0,768	0,87	1,88	0,391	0,844
e2	0,88	1,73	0,395	0,777	1,26	2,57	0,566	1,155
e3	1,53	3,05	0,687	1,370	1,61	3,24	0,723	1,456
e4	1,49	2,86	0,669	1,285	2,20	4,32	0,988	1,941
e5	1,79	3,36	0,804	1,510	1,90	3,47	0,853	1,559
e6	1,38	2,68	0,620	1,204	1,01	1,93	0,453	0,867
e7	1,37	2,71	0,615	1,217	1,33	2,57	0,597	1,155
e8	1,32	2,39	0,593	1,074	1,62	2,97	0,728	1,334
e9	1,76	3,46	0,791	1,555	1,78	3,57	0,800	1,604
e10	1,37	2,58	0,615	1,159	2,03	4,11	0,914	1,851
e11	2,03	4,02	0,912	1,806	2,02	3,92	0,909	1,765
e12	0,88	1,79	0,395	0,804	0,25	0,49	0,112	0,220

Çizelge 5.8.Sekonderi tek malzemeden olan lineer asenkron motorun uç bobinleri devrede iken,boyuna hava aralığı akısı($\emptyset v$) hava aralığı kutup akısı($\emptyset \tau$),çekirdek akısı($\emptyset e$) değerleri. (a-U=190 V da;b-U=380 V da).

No	Uv,U τ (V)		$\emptyset v$ (mWb)		Uv,U τ (V)		$\emptyset v$ (mWb)	
	a	b	a	b	a	b	a	b
v1	0,64	1,30	0,581	1,175	0,64	1,25	0,576	1,126
v2	0,71	1,40	0,644	1,261	0,72	1,38	0,648	1,243
v3	0,84	1,52	0,756	1,369	0,81	1,45	0,729	1,309
v4	0,81	1,47	0,731	1,324	0,80	1,43	0,720	1,288
v5	0,86	1,57	0,779	1,418	0,87	1,56	0,783	1,409
v6	0,88	1,56	0,797	1,405	0,87	1,55	0,783	1,396
v7	0,79	1,42	0,716	1,283	0,77	1,41	0,693	1,270
v8	0,86	1,56	0,779	1,405	0,84	1,55	0,761	1,396
v9	0,93	1,59	0,842	1,432	0,89	1,57	0,804	1,414
v10	0,86	1,49	0,774	1,347	0,82	1,49	0,738	1,342
v11	0,90	1,62	0,810	1,459	0,84	1,59	0,759	1,432
v12	0,76	1,49	0,689	1,346	0,69	1,40	0,626	1,263
v13	0,86	1,60	0,779	1,441	0,75	1,50	0,675	1,351
v τ	0,73	1,42	1,657	3,209	0,71	1,40	1,610	3,153
lg= 2,2625 mm					lg= 2,75 mm			
No	Ue (V)		$\emptyset e$ (mWb)		Ue (V)		$\emptyset e$ (mWb)	
	a	b	a	b	a	b	a	b
e1	0,17	0,36	0,765	1,657	0,17	0,34	0,765	1,536
e2	0,24	0,51	1,081	2,319	0,25	0,52	1,148	2,360
e3	0,29	0,62	1,319	2,792	0,30	0,61	1,351	2,747
e4	0,29	0,56	1,310	2,522	0,29	0,55	1,306	2,477
e5	0,22	0,43	1,018	1,945	0,21	0,40	0,945	1,828
e6	0,17	0,37	0,770	1,666	0,17	0,35	0,765	1,576
e7	0,17	0,34	0,779	1,531	0,17	0,34	0,779	1,531
e8	0,19	0,40	0,855	1,833	0,19	0,40	0,887	1,801
e9	0,27	0,56	1,252	2,558	0,27	0,55	1,256	2,477
e10	0,31	0,61	1,432	2,770	0,30	0,60	1,373	2,711
e11	0,30	0,61	1,360	2,756	0,28	0,55	1,261	2,490
e12	0,22	0,42	0,990	1,905	0,20	0,39	0,900	1,774

Çizelge 5.9.Sekonderi kısa devre çubuklu lineer asenkron motorun uç bobinleri devre dışı iken boyuna hava aralığı a-kısı ($\emptyset v$),hava aralığı kutup akısı ($\emptyset \tau$),çekirdek akısı ($\emptyset e$) değerleri.(a-U=90V da;b-U=180V da).

No	Uv,U τ (V)		$\emptyset v$ (mWb)		Uv,U τ (V)		$\emptyset v$ (mWb)	
	a	b	a	b	a	b	a	b
v1	1,28	2,77	0,576	1,247	1,29	2,84	0,581	1,279
v2	0,33	0,89	0,148	0,400	0,39	0,95	0,175	0,427
v3	2,36	4,58	1,063	2,063	2,39	4,45	1,076	2,004
v4	2,38	4,50	1,072	2,072	2,35	4,49	1,058	2,022
v5	0,38	1,05	0,171	0,472	0,40	1,23	0,180	0,554
v6	2,53	4,79	1,139	2,157	2,49	4,75	1,121	2,139
v7	2,35	4,45	1,058	2,004	2,28	4,60	1,027	2,072
v8	0,37	1,07	0,166	0,481	0,40	1,10	0,180	0,495
v9	2,49	4,71	1,121	2,121	2,44	4,25	1,099	1,914
v10	2,35	4,46	1,058	2,009	2,28	4,45	1,027	2,004
v11	0,26	0,58	0,117	0,261	0,31	0,67	0,139	0,301
v12	1,53	3,33	0,689	1,500	1,55	3,51	0,698	1,581
v13	1,11	2,30	0,500	1,036	1,08	2,26	0,486	1,018
v τ	5,21	10,2	2,346	4,594	5,22	10,34	2,351	4,657
lg= 2,2625 mm					lg= 2,75 mm			
No	Ue (V)		$\emptyset e$ (mWb)		Ue (V)		$\emptyset e$ (mWb)	
	a	b	a	b	a	b	a	b
e1	0,18	0,36	0,081	0,162	0,16	0,35	0,072	0,157
e2	0,58	1,46	0,261	0,657	0,63	1,49	0,283	0,671
e3	2,72	5,38	1,225	2,423	2,76	5,87	1,243	2,644
e4	0,74	1,77	0,333	0,797	0,77	1,92	0,346	0,864
e5	0,24	0,46	0,108	0,207	0,27	0,57	0,121	0,256
e6	2,39	4,58	1,076	2,063	2,34	4,83	1,054	2,175
e7	0,05	0,20	0,022	0,090	0,04	0,24	0,018	0,108
e8	0,46	1,24	0,207	0,558	0,53	1,43	0,238	0,644
e9	3,02	6,02	1,360	2,711	3,02	6,02	1,360	2,711
e10	0,63	1,63	0,283	0,734	0,76	1,34	0,342	0,603
e11	0,36	1,01	0,162	0,454	0,40	1,01	0,180	0,454
e12	1,32	2,74	0,594	1,234	1,32	2,83	0,594	1,274

Çizelge 5.9.Sekonderi tek malzemeden olan lineer asenkron motorun uç bobinleri devre dışı iken,boyuna hava aralığı akısı, hava aralığı kutup akısı,çekirdek akısı değerleri.
(a-U=190 v da;b-U=380 v da).

No	U _v ,U _τ (V)		Ø _v (Wb)		U _v ,U _τ (V)		Ø _v (Wb)	
	a	b	a	b	a	b	a	b
v1	0,28	0,71	0,256	0,639	0,27	0,59	0,250	0,540
v2	0,65	1,30	0,585	1,175	0,60	1,22	0,550	1,110
v3	0,74	1,48	0,666	1,337	0,73	1,37	0,660	1,250
v4	0,93	1,68	0,837	1,518	0,93	1,62	0,850	1,470
v5	1,05	1,76	0,945	1,585	1,00	1,76	0,910	1,600
v6	0,92	1,66	0,835	1,500	0,94	1,64	0,850	1,490
v7	0,96	1,72	0,864	1,549	0,98	1,71	0,890	1,550
v8	1,06	1,85	0,959	1,666	1,04	1,80	0,950	1,640
v9	0,97	1,68	0,873	1,518	0,98	0,89	0,890	1,520
v10	1,02	1,78	0,923	1,603	1,03	1,77	0,940	1,610
v11	1,07	1,89	0,968	1,702	0,94	1,81	0,850	1,650
v12	0,81	1,54	0,729	1,387	0,77	1,49	0,700	1,350
v13	0,80	1,60	0,725	1,443	0,69	1,46	0,630	1,330
vτ	0,78	1,55	1,768	3,390	0,76	1,42	1,710	3,200
lg= 2,2625 mm					lg= 2,75 mm			
No	U _e (V)		Ø _e (mWb)		U _e (V)		Ø _e (mWb)	
	a	b	a	b	a	b	a	b
e1	0,08	0,21	0,369	0,945	0,08	0,17	0,369	0,784
e2	0,21	0,48	0,972	2,184	0,20	0,45	0,923	2,050
e3	0,35	0,70	1,594	3,153	0,34	0,68	1,540	3,060
e4	0,36	0,69	1,626	3,148	0,36	0,69	1,660	3,140
e5	0,32	0,68	1,445	3,085	0,31	0,64	1,410	2,880
e6	0,22	0,45	1,027	2,063	0,22	0,44	0,990	1,980
e7	0,14	0,29	0,630	1,315	0,11	0,27	0,540	1,230
e8	0,25	0,48	1,126	2,162	0,24	0,45	1,080	2,050
e9	0,36	0,68	1,644	3,094	0,34	0,67	1,530	3,020
e10	0,38	0,75	1,720	3,400	0,37	0,74	1,710	3,333
e11	0,37	0,79	1,689	3,590	0,36	0,73	1,630	3,290
e12	0,22	0,43	0,990	1,977	0,19	0,39	0,870	1,770

Çizelge 5.10.Sekonderi kısa devre çubuklu lineer asenkron motorun uç bobinleri devrede ve uç bobinleri devre dışı iken e-nine hava aralığı akısı ($\emptyset u$) değerleri.
(a-U=90 V da;b-U=180 V da).

UÇ BOBİNLERİ DEVREDE İKEN.								
No	Uu (mV)		Øu (mWb)		Uu (mV)		Øu (mWb)	
	a	b	a	b	a	b	a	b
u1	42	83	0,018	0,037	36	76	0,016	0,034
u2	119	246	0,053	0,110	98	197	0,044	0,088
u3	95	197	0,042	0,088	87	175	0,039	0,078
u4	78	162	0,035	0,072	75	151	0,033	0,068
u5	63	132	0,028	0,059	65	139	0,029	0,062
u6	56	121	0,025	0,054	54	117	0,024	0,052
u7	62	137	0,027	0,061	55	121	0,024	0,054
u8	100	351	0,045	0,158	70	148	0,031	0,066
u9	124	241	0,055	0,108	78	161	0,035	0,072
u10	27	44	0,012	0,019	27	54	0,012	0,024
lg= 2,2625 mm					lg= 2,75 mm			
UÇ BOBİNLERİ DEVRE DIŞI İKEN.								
No	Uu (mV)		Øu (mWb)		Uu (mV)		Øu (mWb)	
	a	b	a	b	a	b	a	b
u1	65	118	0,029	0,053	57	114	0,025	0,051
u2	155	321	0,069	0,144	131	271	0,059	0,122
u3	144	303	0,064	0,136	130	271	0,058	0,122
u4	141	298	0,063	0,134	128	264	0,057	0,118
u5	102	212	0,045	0,095	97	199	0,043	0,089
u6	94	187	0,042	0,084	86	175	0,038	0,078
u7	92	183	0,041	0,082	82	165	0,036	0,074
u8	105	199	0,047	0,089	85	165	0,038	0,074
u9	101	187	0,045	0,084	75	135	0,033	0,060
u10	23	43	0,010	0,019	26	5	0,011	0,022

Çizelge 5.10.Sekonderi tek malzemeden olan lineer asenkron motorun enine hava aralığı akısı ($\emptyset u$) değerleri.
(a-U=190 V da;b-U=380 V da).

UÇ BOBİNLERİ DEVRE DIŞI İKEN.						
No	Uu (mV)		Øu (mWb)		Uu (mV)	Øu (mWb)
	a	b	a	b	a	a
u1	78	116	0,035	0,052	106	0,047
u2	310	565	0,139	0,254	291	0,131
u3	341	597	0,153	0,268	296,5	0,133
u4	345	602	0,155	0,271	301,5	0,135
u5	319,5	595	0,143	0,268	314,5	0,141
u6	315,5	551	0,142	0,248	286	0,128
u7	370	63	0,166	0,283	364,5	0,164
u8	380	642	0,171	0,289	380	0,171
u9	381	655	0,171	0,295	361	0,162
u10	273	462	0,123	0,208	247,5	0,111
u11	72	144	0,032	0,064	54	0,024
lg= 2,2625 mm					lg= 2,75 mm	
UÇ BOBİNLERİ DEVREDE İKEN						
No	Uu (mV)		Øu (mWb)		Uu (mV)	Øu (mWb)
	a	b	a	b	a	a
u1	67	130	0,030	0,058	81	0,036
u2	281	539	0,126	0,242	286	0,128
u3	308,5	602,5	0,138	0,271	294	0,132
u4	303	605	0,136	0,272	294,5	0,132
u5	289	580	0,130	0,261	290	0,130
u6	282	546	0,127	0,245	282	0,127
u7	334	627	0,150	0,282	335	0,150
u8	352	649	0,158	0,292	349,5	0,157
u9	355	660	0,159	0,297	365	0,164
u10	254,5	490	0,114	0,220	253	0,113
u11	60,8	120	0,027	0,054	69,2	0,031

NOT: Sekonderi tek parça malzemedan (ST-35 eliği) yapılan motordan alınan değerler deney sırasına göre aynı numaralı çizelgelerle birlikte verilmiştir. Daha önce açıklandığı gibi bu tip sekonderli motor dizaynı 1972 yılında El.Mak.Kürsüsü asistanı Dr.Yük.Müh.R.Nejat TUNÇAY tarafından tasarlanmış ve yapımı gerçekleştirilmiştir.Dr.Y.Müh.Fevzi KENTLİ'de 1981 yılında bu motor üzerinde bilimsel çalışma yapmıştır.Bu motordan elde edilen değerler yukarıda ek çizelgeler ile verilmiş olup,bu değerler kısa devre ubuklu motorumuzdan alınan deney değerleriyle ve hesaplanan değerlerle karşılaştırılmıştır.



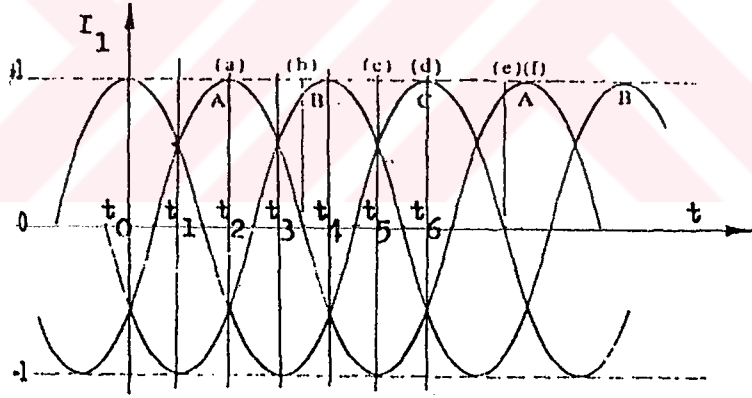
B Ö L Ü M 6

DENEY ARACI LINEER ASENKRON MOTOR ÜZERİNDE YAPILAN TEORİK ÇALIŞMALAR

6.1 Lineer Makinada 2p Kutup Sayısının Bulunması (8)

Lineer makinalarda kutup sayısı tek sayılı, çift sayılı veya kesirli olabilir. Bilindiği gibi makinanın bazı büyük-lüklerini hesaplayabilmek için kutup sayısının tam olarak bi-linmesi gerekir.

Kutup sayısının belirlenmesinde M.M.K. egrisinin zarfın - dan faydalanılır. Egrinin çiziminde üç fazlı akımlar birimsel vektör olarak alınır ve bir peryot içindeki değişimleri kendi aralarında yaptıkları açığa göre incelenir. Üç fazlı akımların zamana göre değişim eğrileri görülmektedir (Şek.6.1). Üç bobinleri devredeyken (Şek.6.2 a,b,c,d,e,f), üç bobinleri devre dı-şı iken (Şek.6.3 a,b,c,d,e,f) ωt nin değişik anlarında primer uzunluğu boyunca amper-iletkenin değişimi görülmektedir.



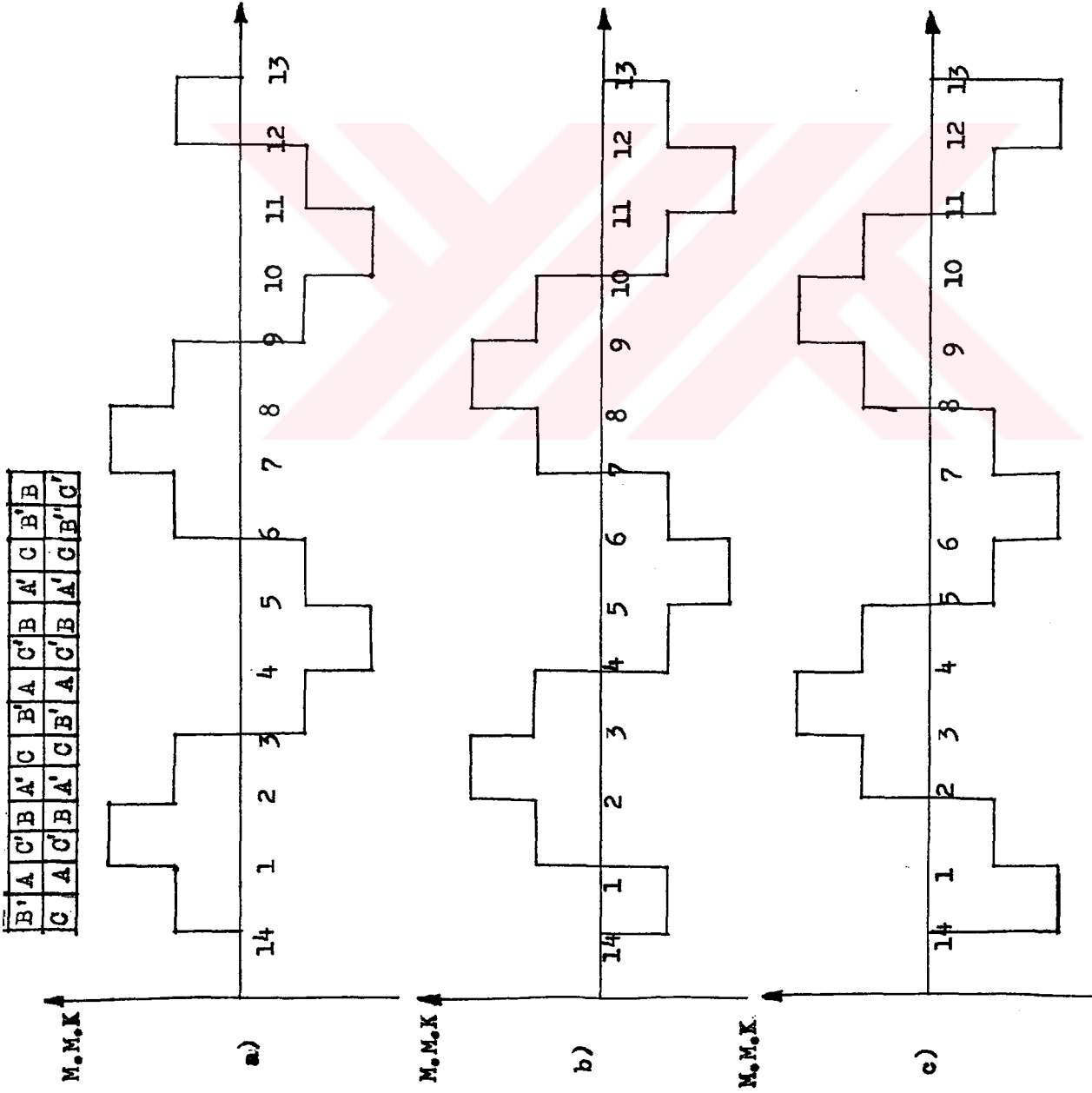
Şek.6.1. Üç fazlı akımların zamana göre değişim eğrileri

Şek.6.2 ve 6.3. de amper iletkenleri çizirken şu ka-buller yapılmıştır. Göz önüne alınan $t=t_1$ anında Şek.6.1 den $i_a=1/2, i_b=-1, i_c=1/2$ alınmıştır. Bundan sonra (+) değerli faz akımlarının A,B,C, bobin yanlarında oluşturdukları amper-ilet-ken (+) ve (-) akımlar ise (-) amper-iletken meydana getirdi-ği ve buna karşılık (+) akımların A',B',C' bobin yanlarında (-) amper-iletken, (-) akımların ise (+) amper-iletken meyda - na getirdiği kabul edilmiştir. Ayrıca pozitif yön yukarı, nega-tif yön aşağıya doğru kabul edilmiştir.

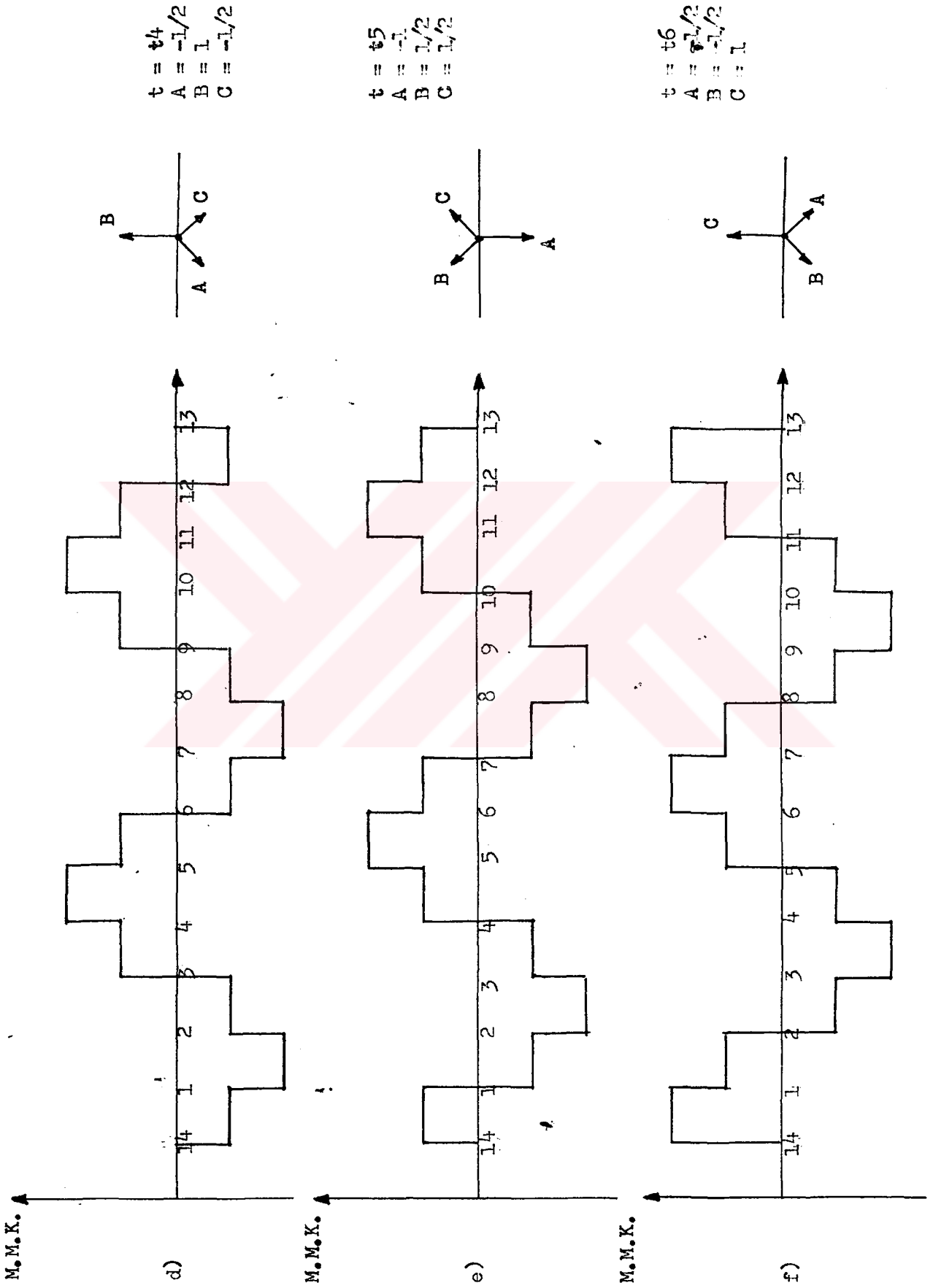
$I_{max} = 1$ birim
 $t = t_1$
 $A = 1/2 I_{max}$
 $B = -I_{max}$
 $C = 1/2 I_{max}$

$t = t_2$
 $A = 1$
 $B = -1/2$
 $C = -1/2$

$t = t_3$
 $A = 1/2$
 $B = 1/2$
 $C = -1$



Şek.6.2. Linear makina uç bobinleri devrede iken çeşitli t anlarında $M.M.K$ 'in primer çevresine dağılımı



Şek.6.2. Lirner makinada uç bobinleri devrede iken çeşitli t anlarında MMK'in primer çevresine dağılımı

Şek.6.2.de, Uç bobinleri devrede iken ;

a'da	Toplam M.M.K. alanı	17 kare
	Tam bir kutbun kapsadığı alan	4 kare
	t=t ₁ anındaki kutup sayısı	17/4=4,25
b'de	Toplam M.M.K. alanı	17 kare
	Tam bir kutbun kapsadığı alan	4 kare
	t=t ₂ anındaki kutup sayısı	17/4=4,25
c'de	Toplam M.M.K. alanı	18 kare
	Tam bir kutbun kapsadığı alan	4 kare
	t=t ₃ anındaki kutup sayısı	18/4=4,5
d'de	Toplam M.M.K alanı	17 kare
	Tam bir kutbun kapsadığı alan	4 kare
	t=t ₄ anındaki kutup sayısı	17/4=4,25
e'de	Toplam M.M.K. alanı	17 kare
	Tam bir kutbun kapsadığı alan	4
	t=t ₅ anındaki kutup sayısı	17/4=4,25
f'de	Toplam M.M.K. alanı	18 kare
	Tam bir kutbun kapsadığı alan	4 kare
	t=t ₆ anındaki kutup sayısı	18/4=4,5

Şek.6.3 de, Uç bobinleri devre dışı iken ;

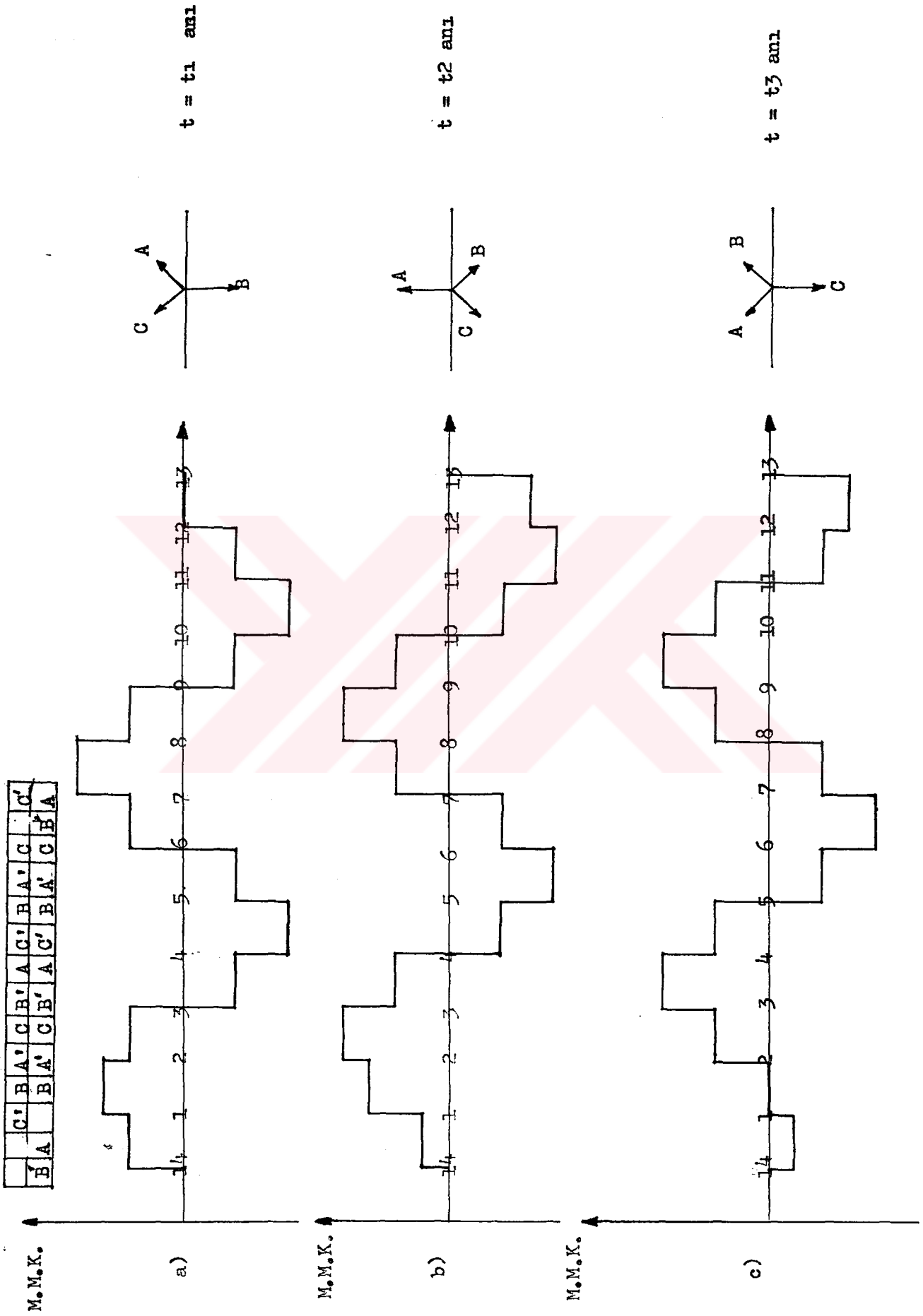
a'da	Toplam M.M.K. alanı	15,5 kare
	Tam bir kutbun kapsadığı alan	4 kare
	t=t ₁ anındaki kutup sayısı	15,5/4=3,875
b'de	Toplam M.M.K. alanı	17,5 kare
	Tam bir kutbun kapsadığı alan	4 kare
	t=t ₂ anındaki kutup sayısı	17,5/4=4,375
c'de	Toplam M.M.K. alanı	15 kare
	Tam bir kutbun kapsadığı alan	4 kare
	t=t ₃ anındaki kutup sayısı	15/4=3,75
d'de	Toplam M.M.K. alanı	15,5 kare
	Tam bir kutbun kapsadığı alan	4 kare
	t=t ₄ anındaki kutup sayısı	15,5/4=3,875
e'de	Toplam M.M.K. alanı	17,5 kare
	Tam bir kutbun kapsadığı alan	4 kare
	t=t ₅ anındaki kutup sayısı	17,5/4=4,375
f'de	Toplam M.M.K. alanı	15 kare
	Tam bir kutbun kapsadığı alan	4 kare
	t=t ₆ anındaki kutup sayısı	15/4=3,75

Uç bobinleri devrede iken;

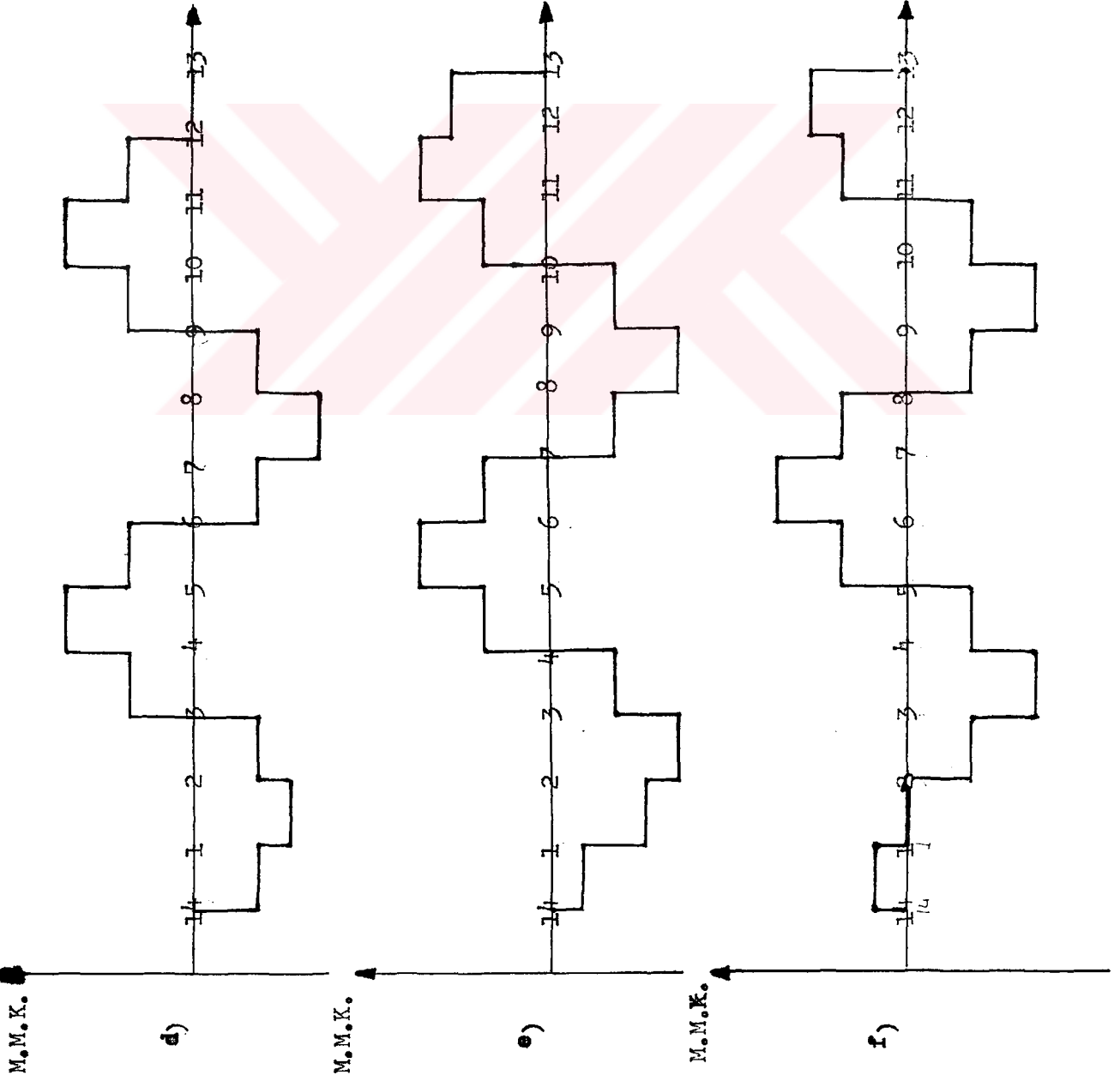
$$2p = \frac{2.4,5 + 4.4,25}{6} = 4,3333 \text{ KUTUP}$$

Uç bobinleri devre dışı iken;

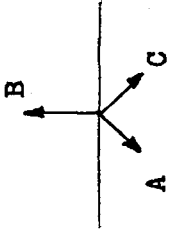
$$2p = \frac{2.3,875 + 2.4,375 + 2.3,75}{6} = 4 \text{ KUTUP}$$



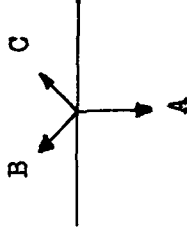
Şek.6.3. Linear makinada uç böbinleri devre dışı iken çeşitli t anlarında MMK'in primer çevresine dağılımı



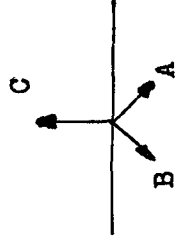
$t = t_4$ anı



$t = t_5$ anı



$t = t_6$ anı



Şek.6.3. Linear makina uç bobinleri devre dışı iken çeşitli t anlarında MMK'in primer çevresine dağılımı

6.2. Lineer makinada kw sargı katsayısı (4)

Lineer makinalarda primer de doğan zıt e.m.k.nın etkin değeri;

$$E_1 = 4,44.f.N_1.\phi_s \quad (6.1)$$

N_1 : Primer faz sargısı sarım sayısı.

f : Yürüme hızına ilişkin frekans.

ϕ_s : Kutup başına hava aralığındaki yürüyen alan.

E_1 : Primer zıt e.m.k.nın etkin değeri.

Faz sargısı faz bobinlerinin seri bağlanmasıyla elde edilmektedir. Bobinler primer ya da sekonder çevresine yayıldıklarından, bobin gerilimleri arasında da faz farkı vardır. Bununla birlikte faz sargısının gerilimi bobin gerilimlerinin cebirsel toplamından küçüktür. Hava aralığında tam sinüsoidal olarak yayılmamasından dolayı hava aralığı akısında harmonikler yer almaktadır. Dolayısıyla E_1 de de harmonikler yer almaktadır. Bu nedenle (6.1) ifadesinde değişiklik yapmak gerekmektedir. Böylece k_f hava aralığındaki alanın tam sinüsoidal olmamasından kaynaklanan " form katsayısı " bobinlerin kırılganlığından ileri gelen k_s "kırılganlık katsayısı" ve bobinlerin oluklara yayılmasından ileri gelen k_d "yayılma katsayısı" olmak üzere (6.1) ifadesi ;

$$E_1 = k_w.4,44.f.N_1.\phi_s \quad (6.2) \quad \text{olur.}$$

$$k_w = k_f.k_s.k_d \quad (6.3)$$

k_w : Toplam sargı katsayısı

6.2.a. k_f form katsayısı

Bu katsayı ϕ alanının hava aralığında tam sinüsoidal olmamasından kaynaklanır. ϕ tam sinüs biçimde ise $k_f=1$ dir.

6.2.b. k_s kırılganlık katsayısı (4)

Lineer makinalarda da kırılganlık katsayısını hesaplama yöntemi aynen döner tip makinalarda olduğu gibidir. Ancak formüllerdeki ifadeler lineer makinaya dönüştürülmüş şekildedir.

Uç bobinleri devrede iken;

Primer sarım şemalarında görüldüğü gibi (Şekil 4.4). $A_2, A_3, A_4, A_5, B_1, B_2, B_3, B_4, C_2, C_3$ ve C_4 tam bobinlerinde;

$q_b=3$ ve $q=3$ olup

q_b =Bobin yanları arasındaki oluk sayısı= Y_b =Bobin adımı

q =Kutup başına düşen oluk sayısı= $Y_s=S/2p$ oluk adımı

$$\gamma_{el.} = \frac{180^\circ \cdot q_b}{q} = 180^\circ$$

$$k_s = \sin\left(\frac{\gamma_{el.}}{2}\right) = \sin\left(\frac{180}{2}\right) = \sin 90^\circ = 1$$

C1 ve C5 ara bobinlerinde;
 $q_b=2$ ve $q=3$ olup

$$\gamma_{el.} = \frac{180^\circ \cdot 2}{3} = 120^\circ \text{ olup } k_s = \sin 60^\circ = 0,866$$

A1 ve B5 uç bobinlerinde;
 $q_b=1$ ve $q=3$ olup

$$\gamma_{el.} = \frac{180^\circ \cdot 1}{3} = 60^\circ \text{ olup } k_s = \sin 30^\circ = 0,5$$

Tüm sargılar için;

$$k_s = \frac{11.1 + 2.0,866 + 2.0,5}{15} = 0,91547$$

Uç bobinleri devre dışı iken;

Tam bobinlerde $k_s=1$
 C5 ara bobininde $k_s=\sin 30^\circ=0,866$

$$\text{Tüm sargılar için; } k_s = \frac{11.1 + 1.0,866}{12} = 0,9888$$

6.2.c. k_d yayılma katsayısı (4)

Faz sargı bobinlerinin gerek primer, gerekse sekonder çevresindeki oluklara yayılması, bir yandan (ısınma ve mekanik dayanıklılık bakımından) makinaların daha iyi koşullar altında çalışmasını sağlarken diğer yandan hava aralığında bu sargıların meydana getirdiği alanın daha sinüsoidal olmasını sağlamaktadır. Buna karşılık bobinlerin primer çevresine yayılması, bu bobinlerin gerilimleri arasında faz farkı oluşturur. Bobin gerilimleri geometrik olarak toplandığından toplam sargı gerilimi küçülür. Bu durumda etkin sarım sayısını hesaplamada k_d yayılma katsayısı dikkate alınır.

Uç bobinleri devrede iken;

A2, A3, A4, A5, B1, B2, B3, B4, C2, C3 ve C4 tam bobinlerinde;

q' = Primerde faz ve kutup başına oluk sayısı

$$q' = \frac{S}{2p \cdot m} = 12/4 \cdot 3 = 1 \quad \alpha = \frac{180^\circ \cdot p}{S} = \frac{180^\circ \cdot 2}{12} = 30^\circ$$

$$k_d = \frac{\sin(q' \cdot \alpha / 2)}{q' \cdot \sin(\alpha / 2)} = \frac{\sin(30^\circ / 2)}{\sin(30^\circ / 2)} = 1$$

C1 ve C5 ara bobinlerinde;

$$q' = 14 / 4,33.3 = 1,0769 \quad \alpha = \frac{180^\circ \cdot 2,1665}{14} = 27^\circ,855$$

$$k_d = 0,998$$

A1 ve B5 uç bobinlerinde;

$$q' = 1,0769 \quad \alpha = 27^\circ,855$$

$$k_d = 0,998$$

Toplam yayılma faktörü

$$k_d = \frac{11.1 + 2.0,998 + 2.0,998}{15} = 0,99948$$

Uç bobinleri devre dışı iken;

$$\text{Tam bobinlerde} \quad k_d = 1$$

C5 ara bobininde;

$$q' = 13 / 4.3 = 1,0833 \quad \alpha = \frac{180^\circ \cdot 2}{13} = 27^\circ,692$$

$$k_d = \frac{\sin(1,0833 \cdot 27^\circ,692 / 2)}{1,0833 \cdot \sin(27^\circ,692 / 2)} = 0,9984$$

Toplam yayılma faktörü

$$k_d = \frac{11.1 + 1.0,9984}{12} = 0,99987$$

$$\text{uç bobinleri devrede iken} \quad k_w = k_f \cdot k_s \cdot k_d = 0,9149$$

$$\text{uç bobinleri devre dışı} \quad k_w = 0,9886$$

6.3. $s=0$ dan $s=1$ e kadar bütün kayma değerlerinde parametreleri

Primer akımı ve kompleks ifadesi,

$$I_1 = U_1 / Z_1 = I_{1r} + jI_{1i} \quad \text{ve genliği} \quad I_1^2 = I_{1r}^2 + I_{1i}^2 \quad (6.4)$$

Sekonder akımı ve kompleks ifadesi,

$$I_2 = E_2 / Z_2 = I_{2r} + jI_{2i} \quad \text{ve genliği} \quad I_2^2 = I_{2r}^2 + I_{2i}^2 \quad (6.5)$$

Primer bakır kaybı gücü, (Pcu)

$$P_{cu} = m \cdot I_1^2 \cdot R_1 \quad (6.6)$$

Giriş gücü (P₁) ve Güç Katsayısı

$$P_1 = m \cdot U_1 \cdot I_1 \quad (6.7)$$

$$P_1 = m \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 \quad (6.8)$$

Ifade 6.8 den güç katsayısı

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{m \cdot U_1 \cdot I_1} \quad (6.9)$$

P_i (Hava aralığı gücü),

$$P_i = m \cdot I_2^2 \cdot R_2/s \quad (6.10)$$

Demir Kaybı gücü (P_{fe})

$$P_{fe1} = P_1 - P_{cu} - P_i \quad (6.11)$$

Makinanın Senkron Hızı (v₁),

$$v_1 = 2 \cdot f_1 \cdot \tau_p \quad \text{burada} \quad \begin{array}{l} f_1: \text{Makinaya uygulanan} \\ \text{gerilimin frekansı (Hz)} \\ \tau_p: \text{Kutup adımı (m)} \end{array} \quad (6.12)$$

Makinanın Öteleme Kuvveti (Momenti) F_{kn},

$$F_{kn} = \frac{P_i}{v_1} \quad (6.13)$$

Makinanın Çıkış Gücü (P)

$$P = F_{kn} \cdot v_1 \cdot (1-s) \quad (6.14)$$

Makinanın Verimi (η),

$$\eta = \frac{P}{P_1} \quad \text{veya} \quad \% \eta = \frac{P \cdot 100}{P_1} \quad (6.15)$$

B Ö L Ü M 7

7.1. Değerlendirme ve grafik çizimleri

Daha önceki bölümlerde de değinildiği gibi deney motorlarının birbirlerinden farklı yanları sekonderleridir. Birinin sekonderi kısa devre çubuklu (kafes sargılı) , diğerinin ki tek parça malzemeden yapılmış olup dökme çeliktir. (st-35) Birinci motorun sekonderi ve primeri paketlenmiş silisyumlu saclardan oluştuğu için foucoult kayıpları azdır.

Aşağıda değişik sargı yapıları ve hava aralığı için makinelerin deney sonuçları tatışılmaktadır. Deneyler makinelerin dört ayrı konumunda gerçekleştirilmiştir. Bunlar;

- 1) $lg = 2,2625$ mm, uç bobinleri devrede iken.
- 2) $lg = 2,2625$ mm, uç bobinleri devre dışı iken.
- 3) $lg = 2,75$ mm, uç bobinleri devrede iken.
- 4) $lg = 2,75$ mm, uç bobinleri devre dışı iken.

Sekonderi kısa devre çubuklu motor uç bobinleri devrede iken, aynı hava aralığında uç bobinleri devre dışı olduğu duruma göre daha fazla güç harcamaktadır. Örneğin $lg=2,2625$ mm. hava aralığında uç bobinleri devrede iken 2 kg. yük için, şebekeden 184 W. çekerken uç bobinleri devre dışı 68 W. çekmektedir. (Çizelge 5.4 ve 5.5) sekonderi tek parçalı motorda ise aynı yük ve hava aralığında uç bobinleri devrede iken giriş gücü 275 W. uç bobinleri devre dışı iken 312,5 W.'dır.

Güç katsayısı bakımından karşılaştırıldığında, uç bobinleri devrede iken kafes sargılı motorun güç katsayısının daha iyi olduğu görülmektedir. Kafes sargılı lineer motorun ortalama güç katsayısı 0,424 iken, sekonderi tek parçalı lineer motorun ortalama güç katsayısı 0,384 tür (Çizelge 5.4). Kafes sargılı lineer motorun hava aralığı artırıldığında güç katsayısı düzeltilmektedir.

Sekonderi tek parçalı motorda ise bu durumun tam tersi bir durum görülmektedir. Ayrıca uç bobinlerinin devreye girmesinin güç katsayısını kötüleştirdiği gözlenmektedir. (Şek.7.19 ve 7.20).

Karşılaştırma akı dağılımı bakımından yapıldığında;

Uç bobinlerinin kullanılmadığı durumdaki boyuna ve enine hava aralığı akısı, çekirdek akısı değerlerinin uç bobinlerinin kullanıldığı durumdaki akı değerlerinden daha fazla

olduğu görülmektedir. Bu durum her iki tip motorda da gözlenmektedir (Şek.7.1.2.....11.12). Ancak akı dağılımı bakımından sekonderi tek parçalı motordaki akı dağılımı daha düzgün yani oluklar arası akı dalgalanması daha azdır.

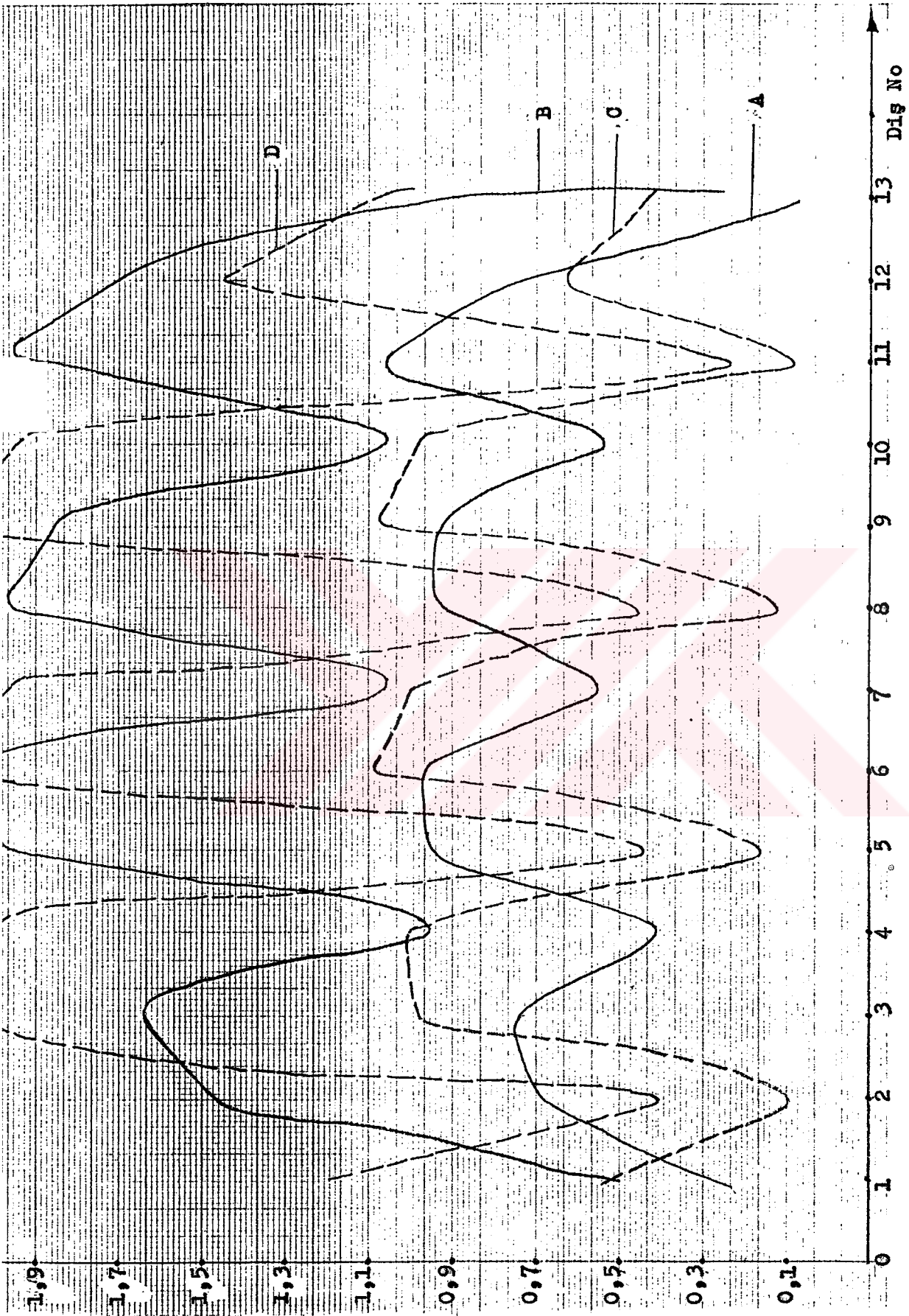
Primer çekirdekindeki akı dağılımı her iki motorda ve her iki hava aralığında da uç bobinleri devre dışı iken okuma hataları da gözönünde tutularak, hemen hemen aynıdır(Şek.7.3, Şek.7.4 ve Şek.7.9,10).Bu ise ke enine uç etkisi katsayısının değerinin daha büyük olduğunu göstermektedir.

Diğer yandan sekonderi tek parçalı lineer asenkron motorun enine akı dağılımının kafes sargılı motorunkinden daha da düzgün olduğu gözlenmektedir. Buradan da ke enine uç etkisi katsayısının kafes sargılı motorunkinden daha da küçük olduğu anlaşılmaktadır (Şek.7.11 ve Şek.7.12).

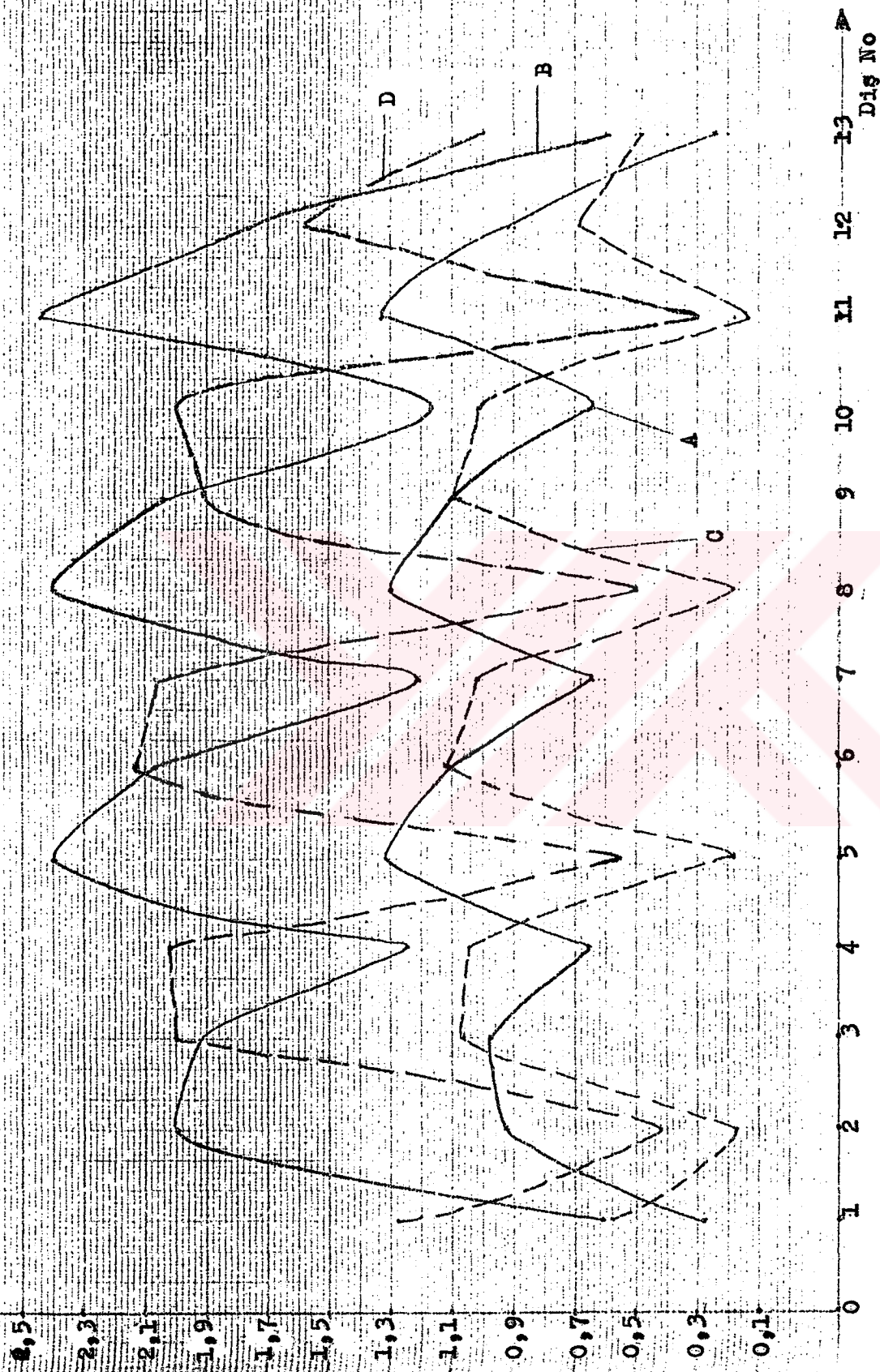
ke enine uç etkisi katsayısının daha büyük olması Z ise sekonder empedansının küçülmesini, I sekonder akımının ve aynı zamanda hava aralığı gücünün artmasını, böylece öteleme kuvvetinin (F) artmasını sağlar. Deneysel çalışmalar sekonderi kısa devre çubuklu lineer asenkron motorun büyük bir kalkış momentine sahip olduğunu göstermiştir.

Her iki tip motorda da hava aralığı artırıldığı zaman belli bir yükü ötelemek için motora uygulanan gerilimin artırılması gerekmektedir.Bu ise motorun şebekeden çektiği akımı ve gücü artırmaktadır.Ancak iki motor aynı hava aralığı için birbiriyle karşılaştırıldığında,kafesli motor sekonderi tek parçalı motora göre daha az akım ve güç çekmektedir.

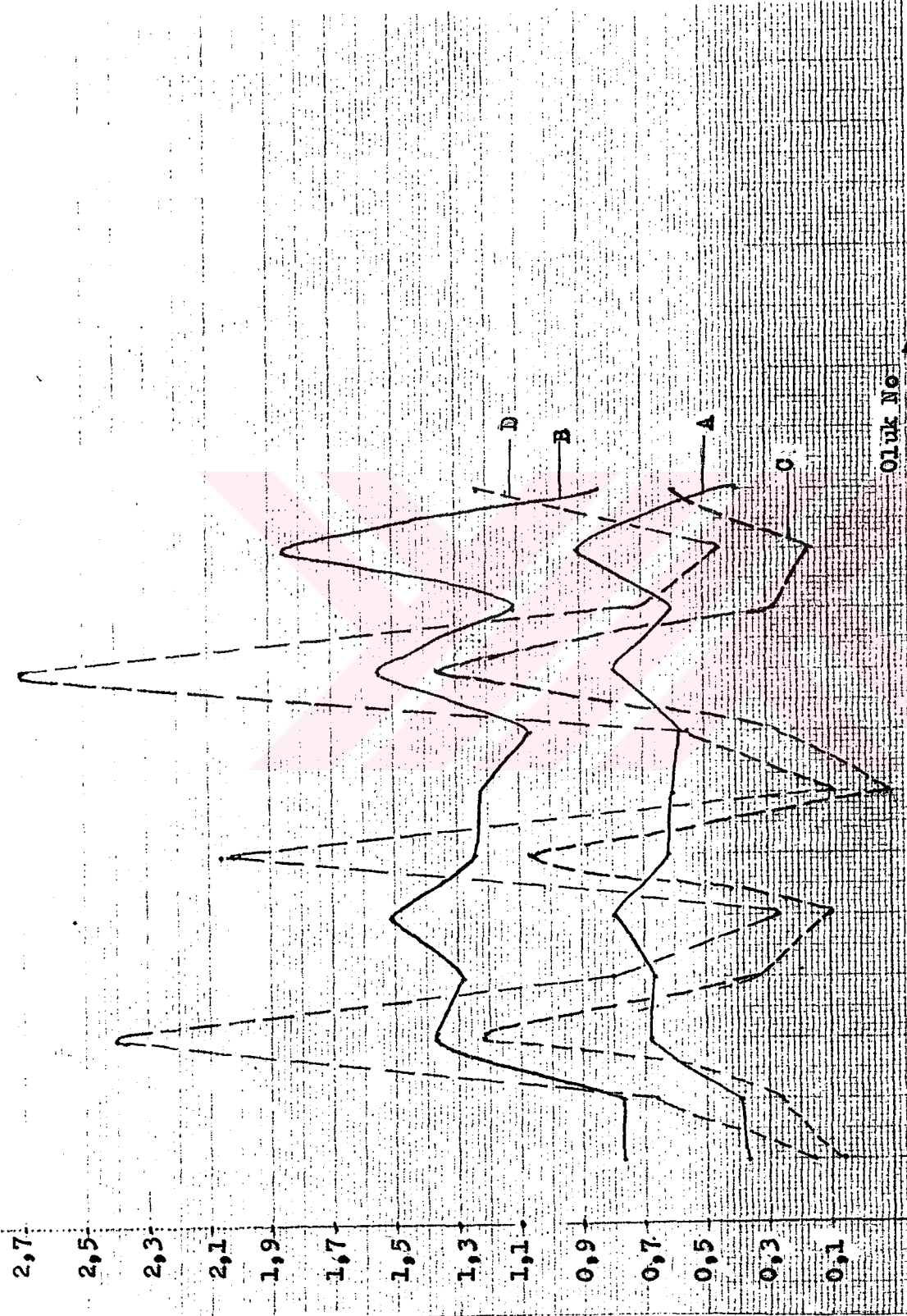
Çizelgelerdeki bazı F_k değerlerinde deneysel çalışmanın getirdiği bazı zorluklardan dolayı ölçme ve okuma hataları bulunabilir.Bu hatalar makinanın üzerindeki ağırlığı tamamen taşımaya başladığını zannedip değer okuma veya taşımaya başlamadı diyerek gerilimi biraz daha artırır değer okuma sonucudur.Halbuki gerilimin ya bir kaç volt daha artırılması veya bir kaç volt düşürülmesi gerekmektedir.



Şek . 7. 1. Sekonderi kısa devre gubuklu Lineer motorun boyuna hava aralığı akl dağılımı.
(lg=2,2625mm)
A: (90V) uç bobinleri devrede iken. D: (180V) uç bobinleri devre dışı iken.
B: (180V) " " " " " "
C: (90 V) uç bobinleri devre dışı iken.



Sek. . 7.2.Sekonderi kılsa devre çubuklu lineer motorun boyuna hava aralığı akı dağılımı.
 (1g=2,75mm) A:(90V) uç bobinleri devre iken. D:(180V) uç bobinleri devre dışı iken.
 B:(180V) " " "
 C:(90V) uç bobinleri devre dışı iken.

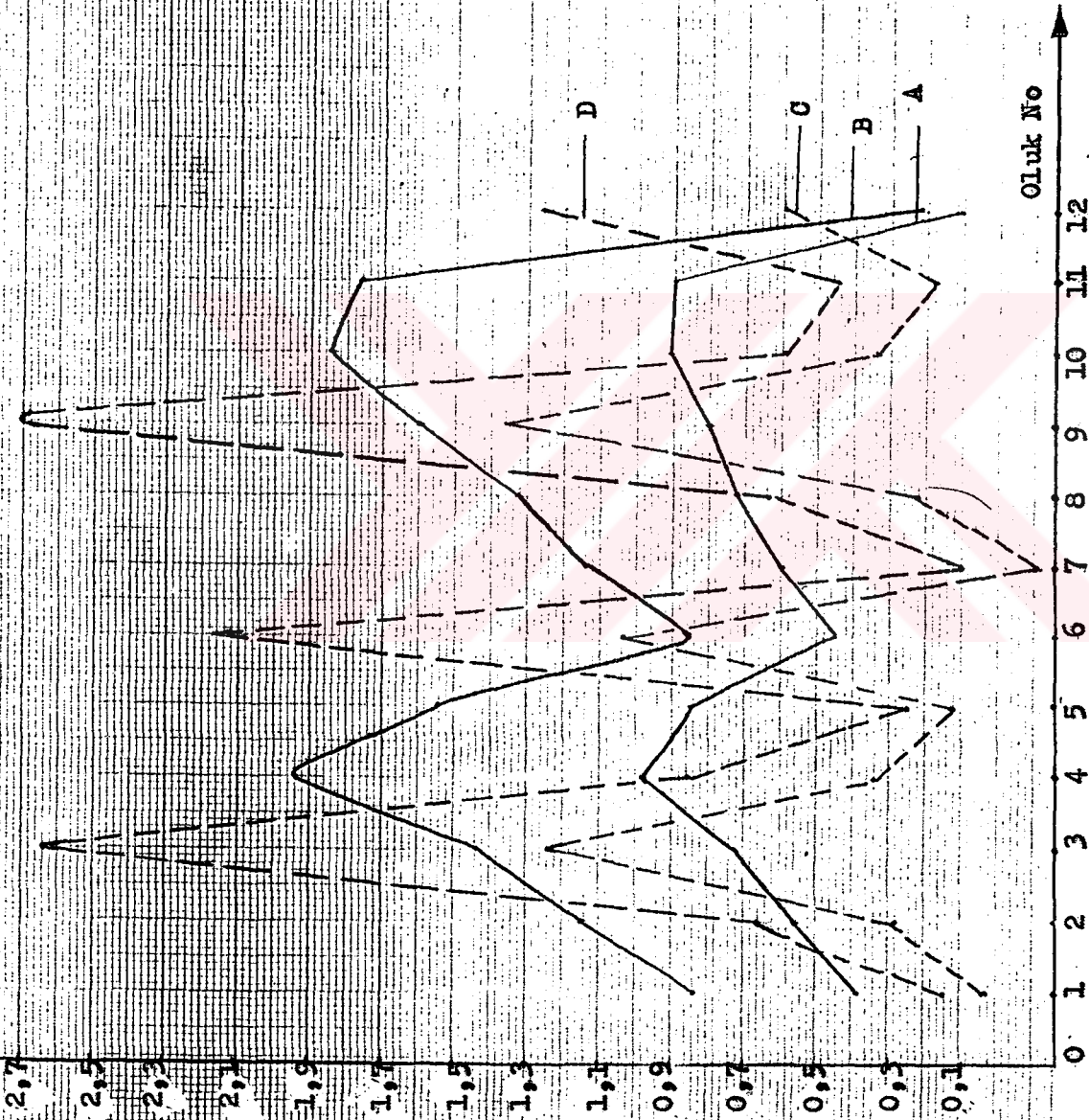


Sek. 7.3. Sekonderi kısa devre çubuklu lineer motorun primer çekirdeğindeki akı dağılımı.

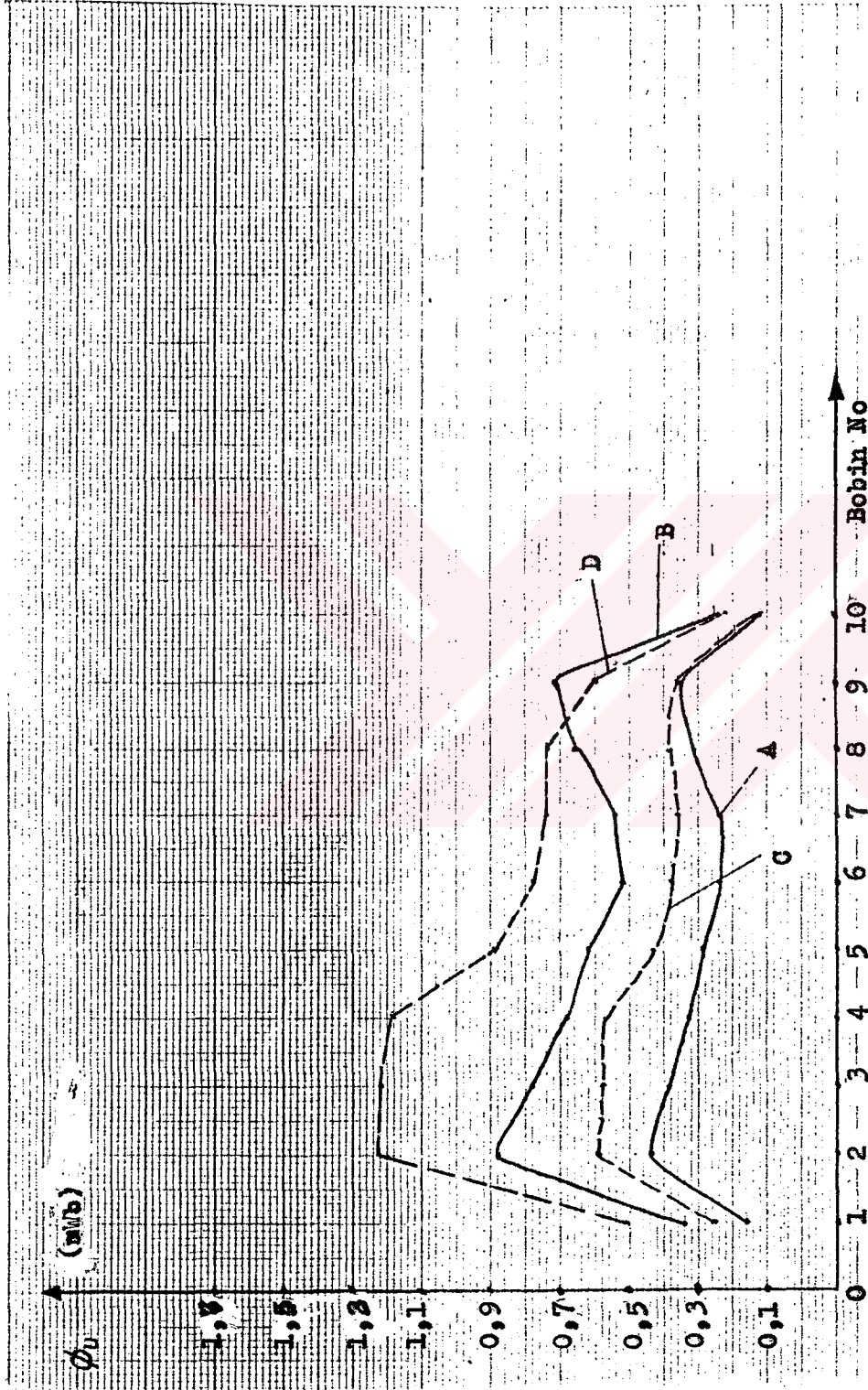
(lg=2,2625mm) uç bobinleri devrede iken. D:(180V) uç bobinleri devre dışı iken.

B:(180V) uç bobinleri devrede iken.

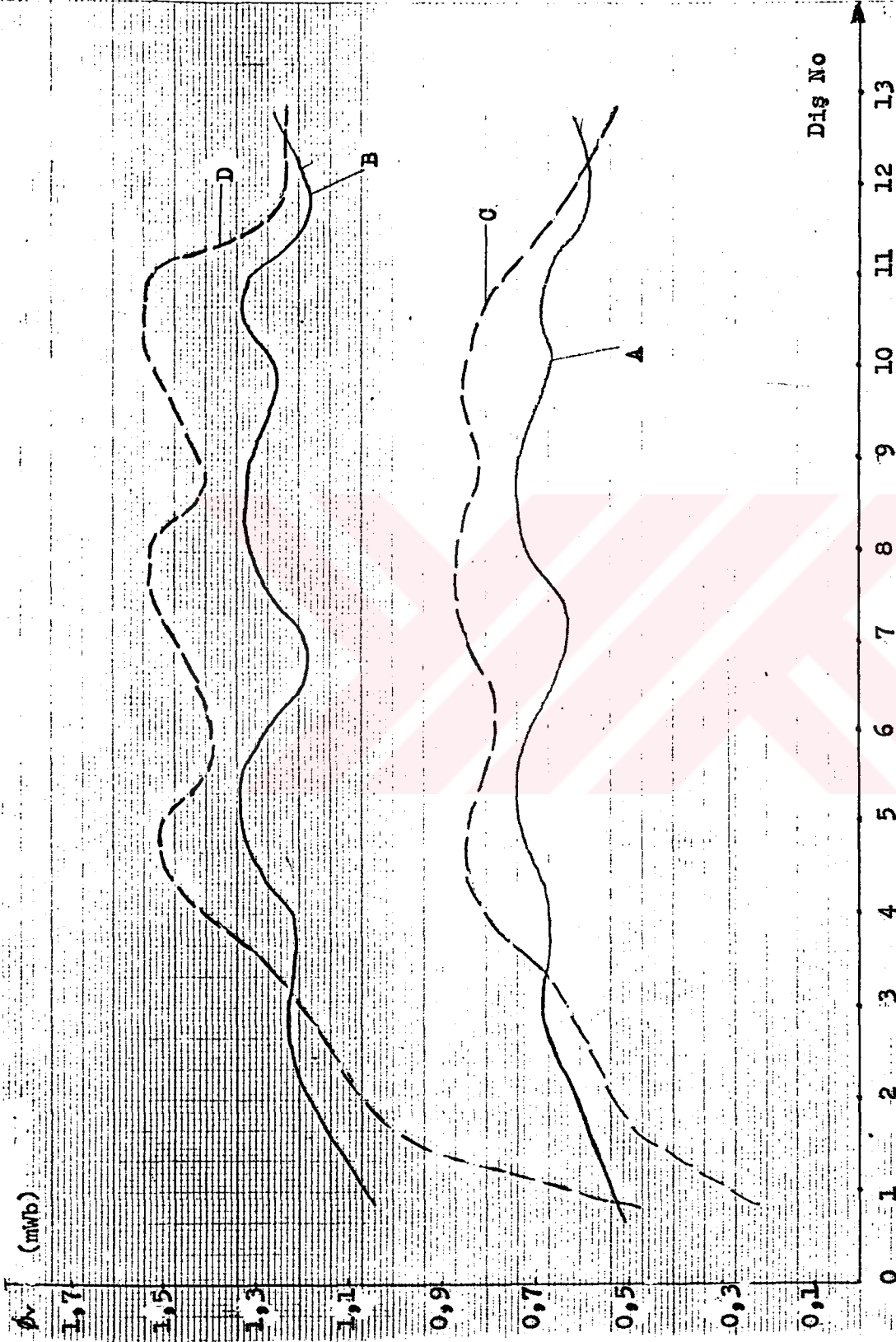
C:(90V) uç bobinleri devre dışı iken.



Şek .7.4. Sekonderi kısa devre gubuklu motorun primer çekirdeğindeki akı dağılımı.
 (lg=2,75mm) A: (90V) uç bobinleri devrede iken. D: (180V) uç bobinleri devre dışı iken.
 B: (180V) " " " " " "
 C: (90V) uç bobinleri devre dışı iken.



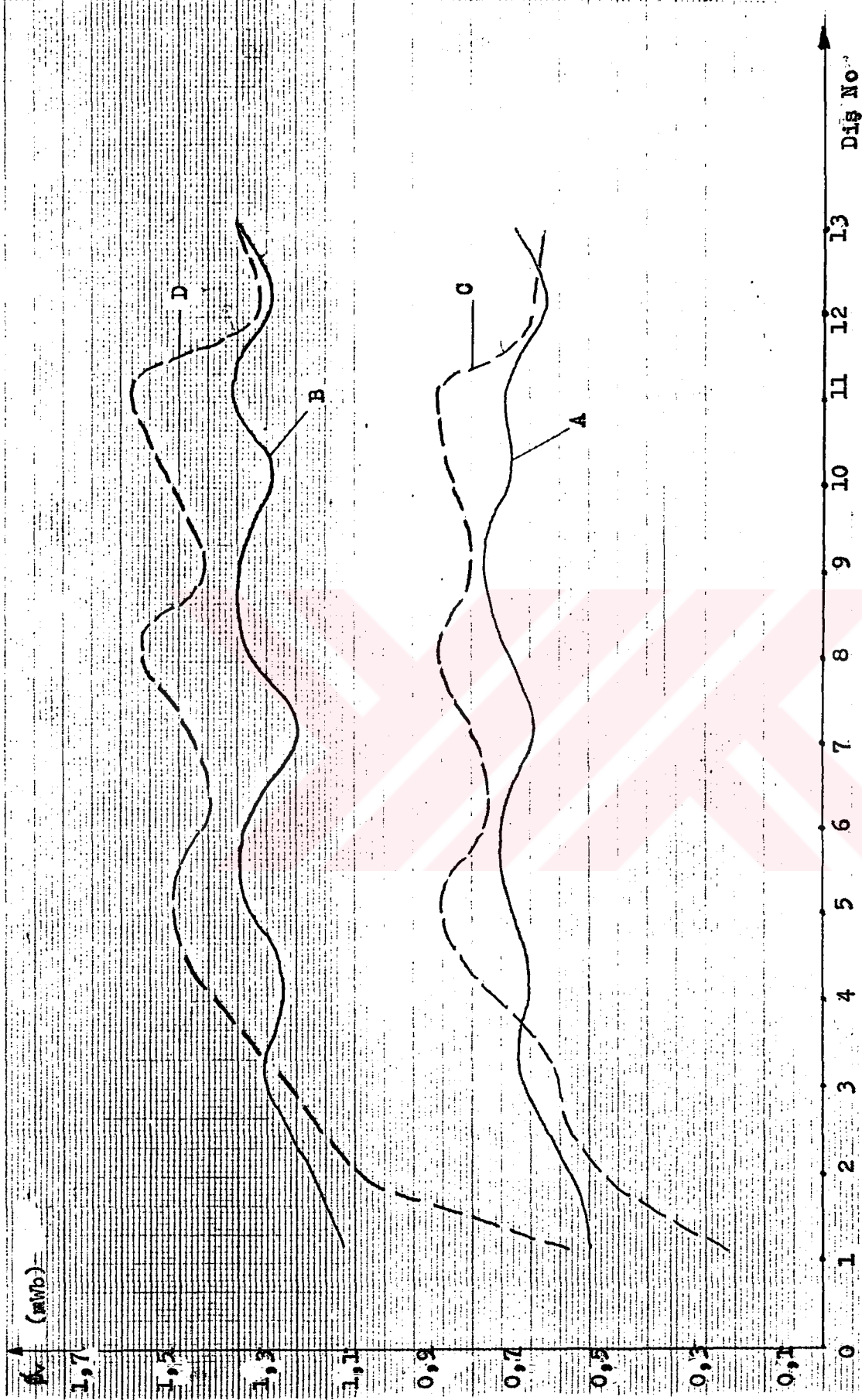
Şekil 7.6. Sekonderi kısa devre gubuklu motorun enine hava aralığı akı dağılımı.
 (I_g=2,75am) A:(90V) uç bobinleri devrede iken. D:(180V) uç bobinleri devre dışı iken.
 B:(180V) " " " " " " " "
 C:(90V) uç bobinleri devre dışı iken.



Şek .7.7. Sekonderi tek parça malzemeden olan motorun boyuna hava aralığı akı dağılımı.

İlg= 2,2625 mm)

A: (190V)	uç bobinleri devrede iken.
B: (380V)	" " " "
C: (190V)	uç bobinleri devre dışı iken.
D: (380V)	" " " "



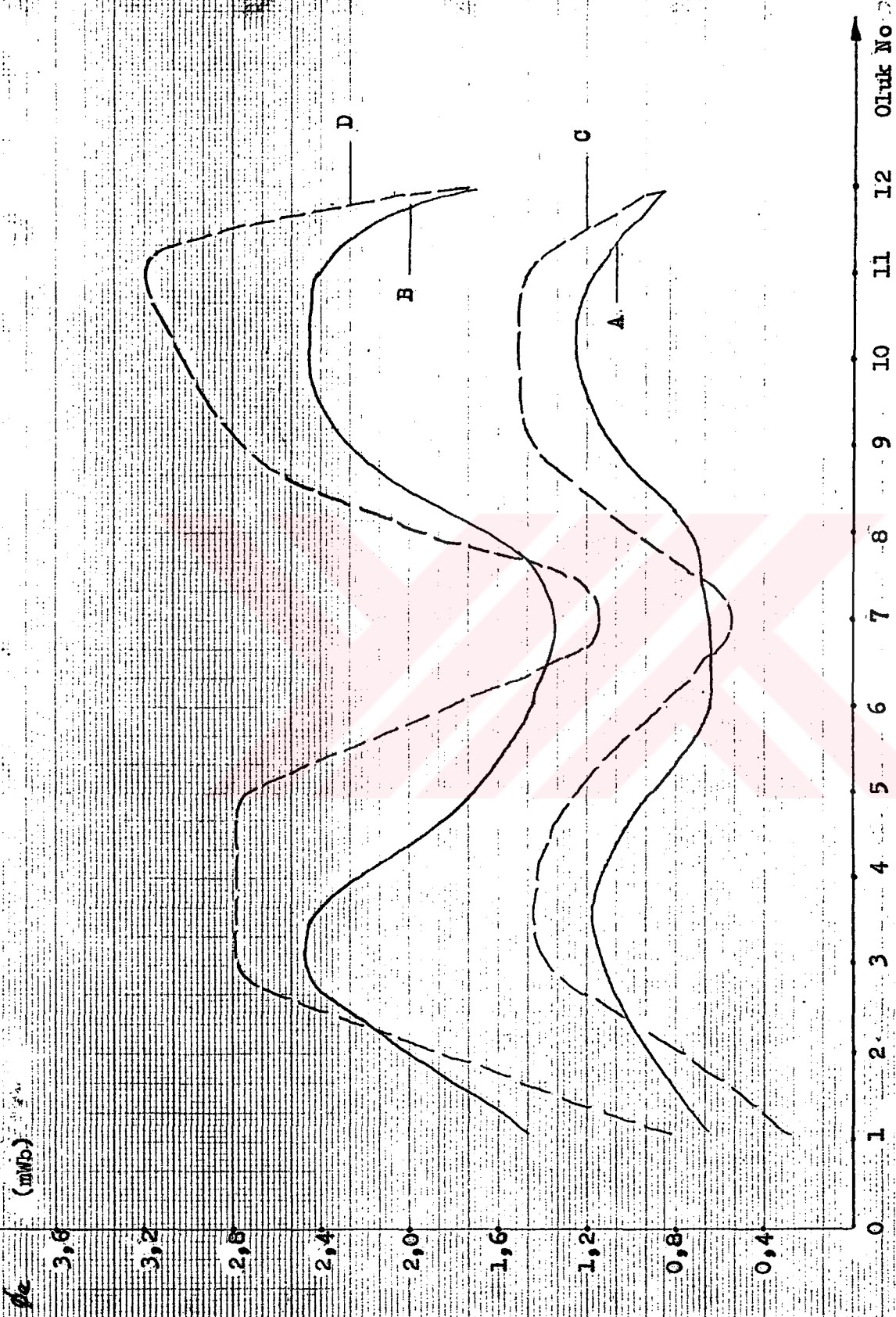
Şekil 7.8. Sekonderi tek parça malzemeden olan Lineer motorun boyuna hava aralığı akı dağılımı.

(lg= 2,75mm) A:(190V) uç bebinleri devrede iken.

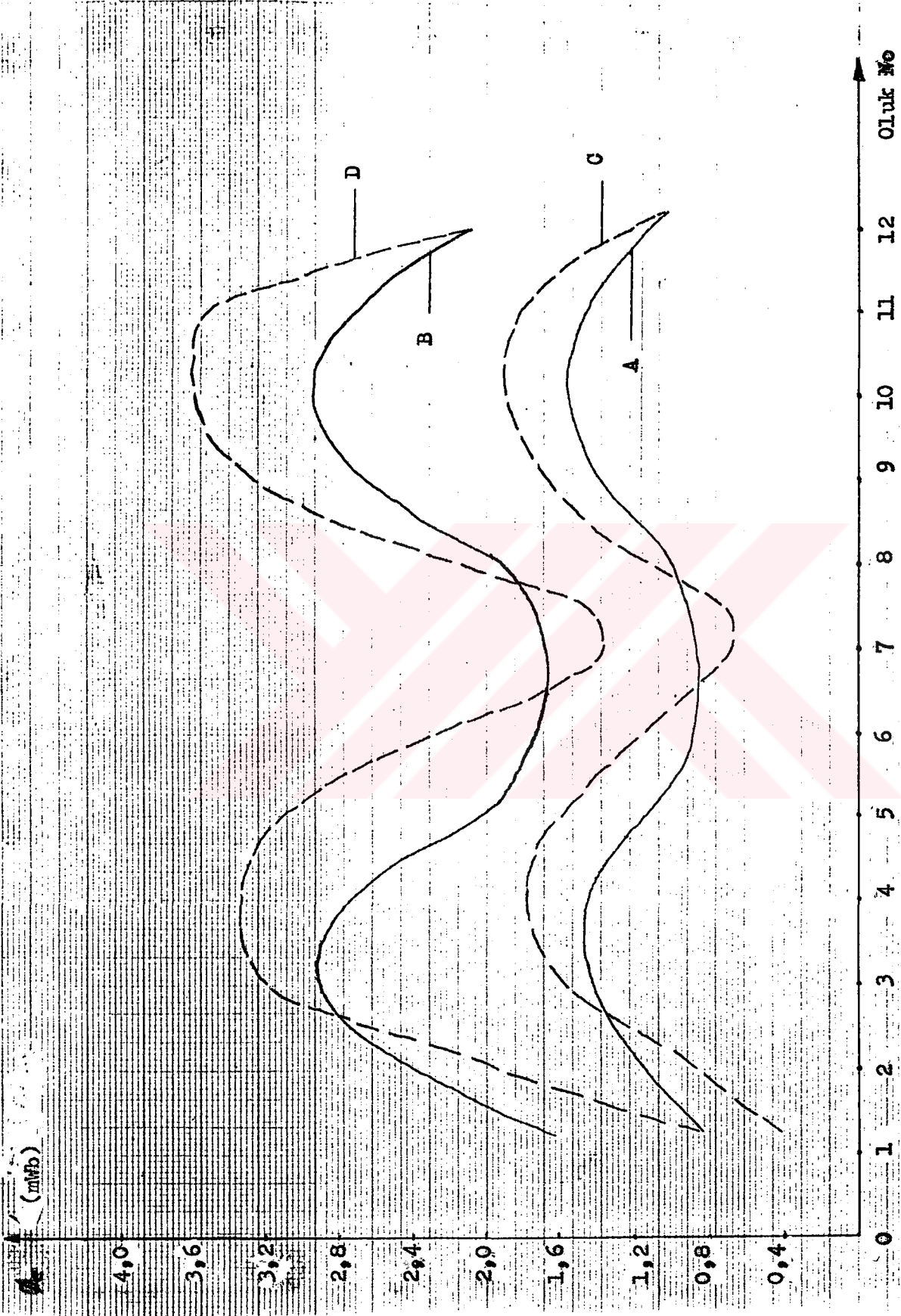
B:(380V) " " " "

C:(190V) uç bebinleri devre dışı iken.

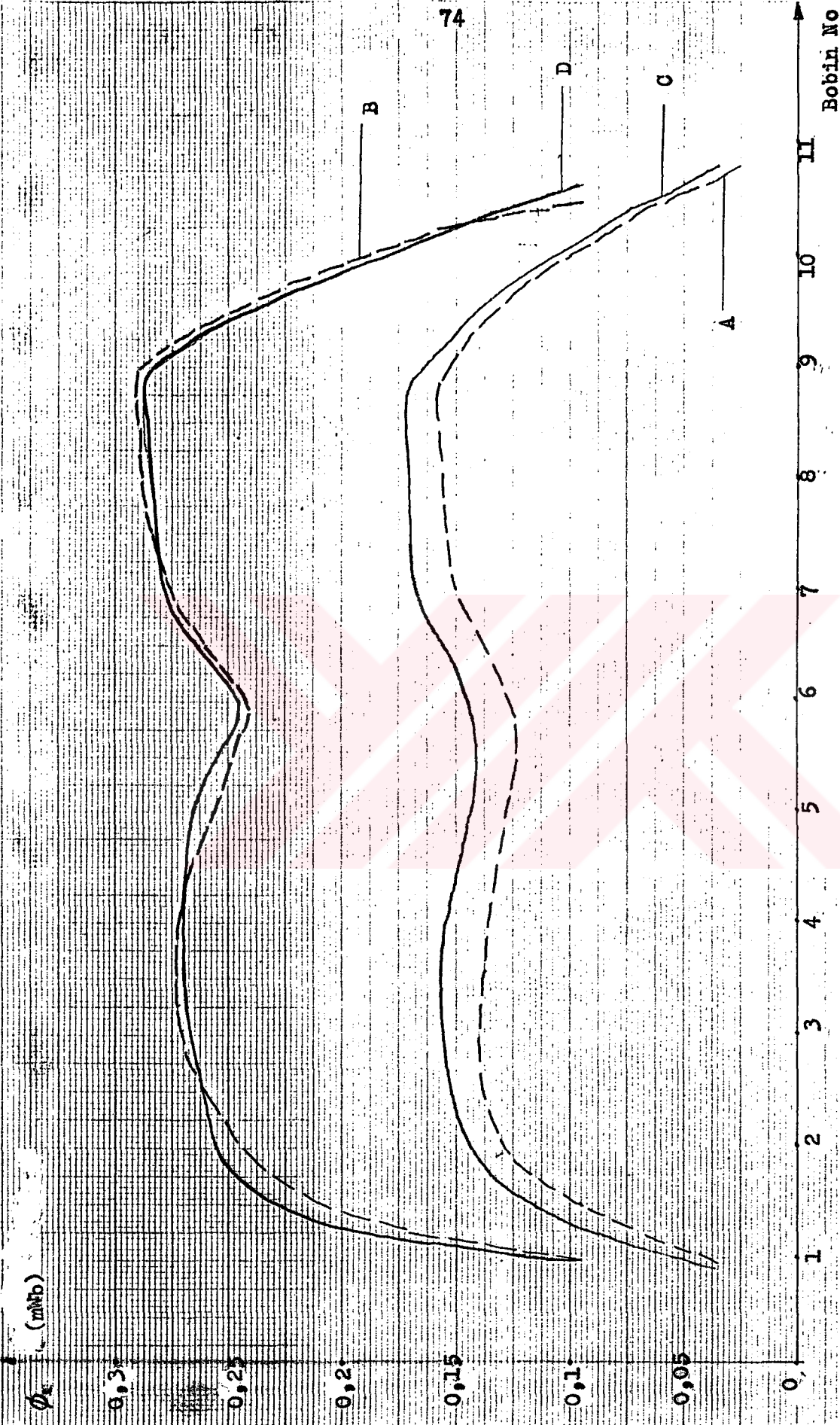
D:(380V) " " " "



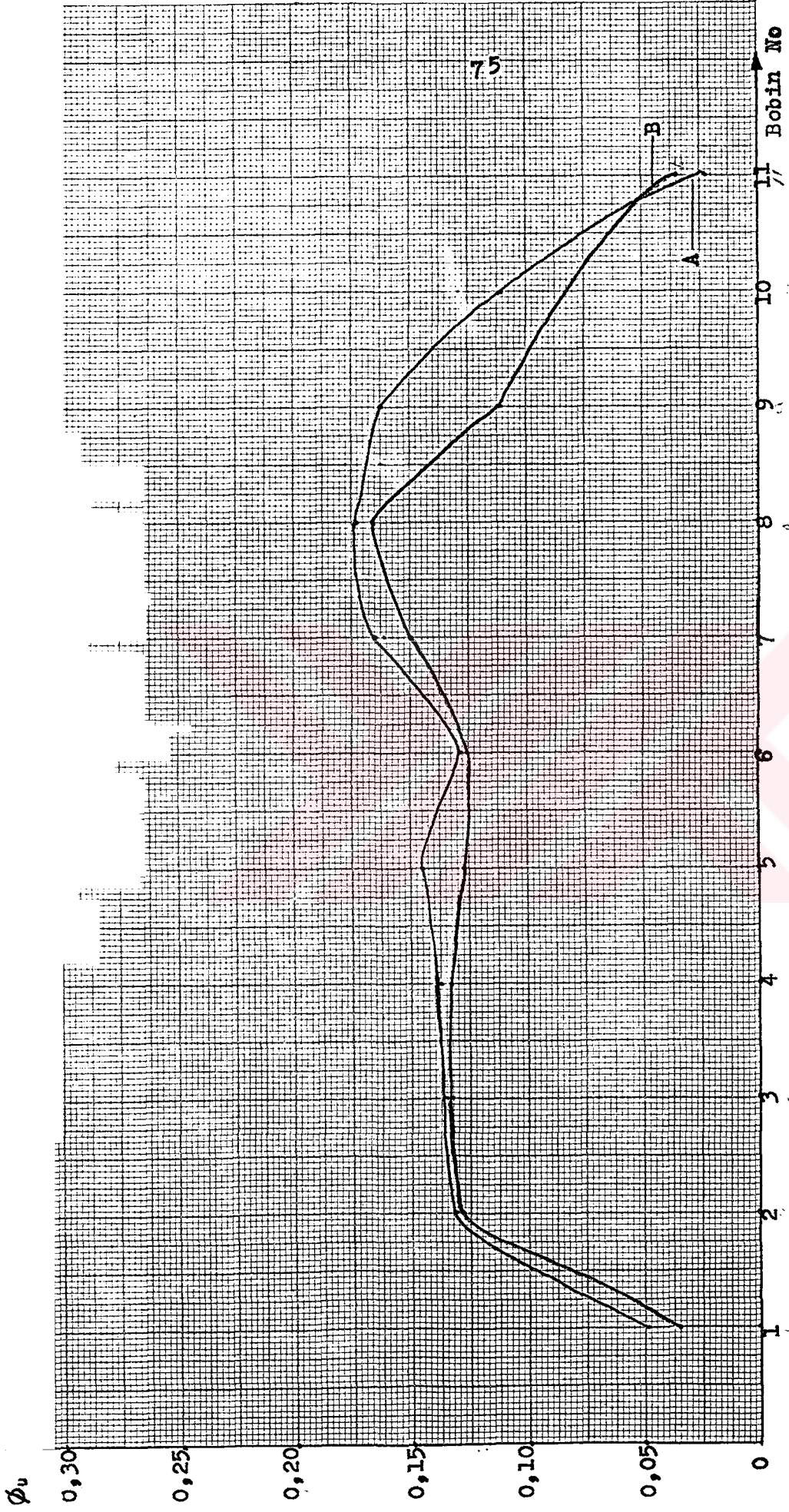
Sek 7.9. Sekonderi tek parça malzemeden olan Lineer motorun primer gektirdeğindeki akı dağılımı.
 (lg= 2,2625mm) A: (190V) uç bobinleri devredâ iken. D: (380V) uç bobinleri devre dışı iken.
 B: (380V) " " " " " "
 C: (190V) uç bobinleri devre dışı iken.



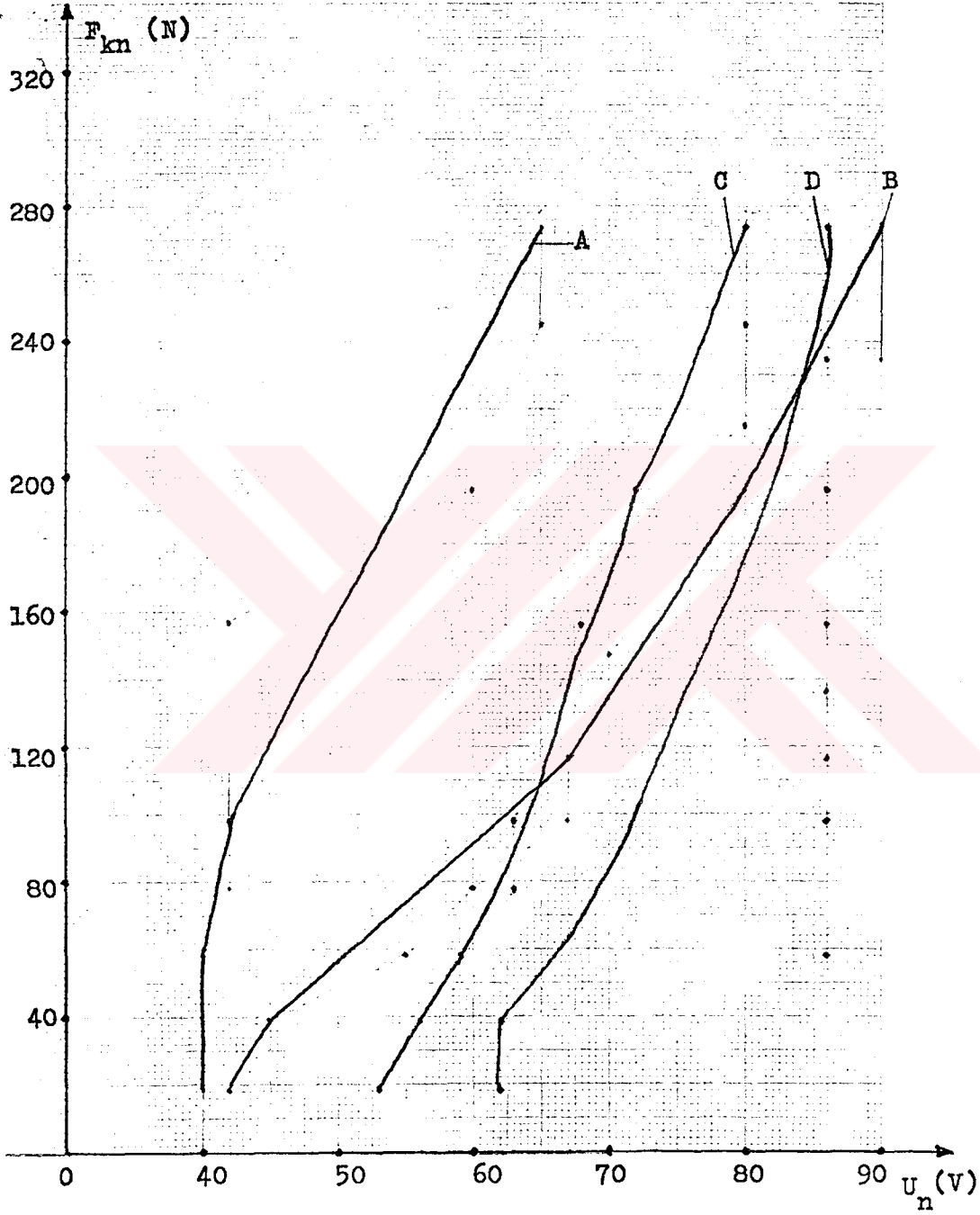
Sek. 7.10. Sekonderi tek parça malzemeden olan Lineer motorun primer çekirdeğindeki akı dağılımı.
 A: (190V) uç bobinleri devrede iken. D: (380V) uç bobinleri devre dışı iken.
 B: (380V) " " " " " "
 C: (190V) uç bobinleri devre dışı iken.



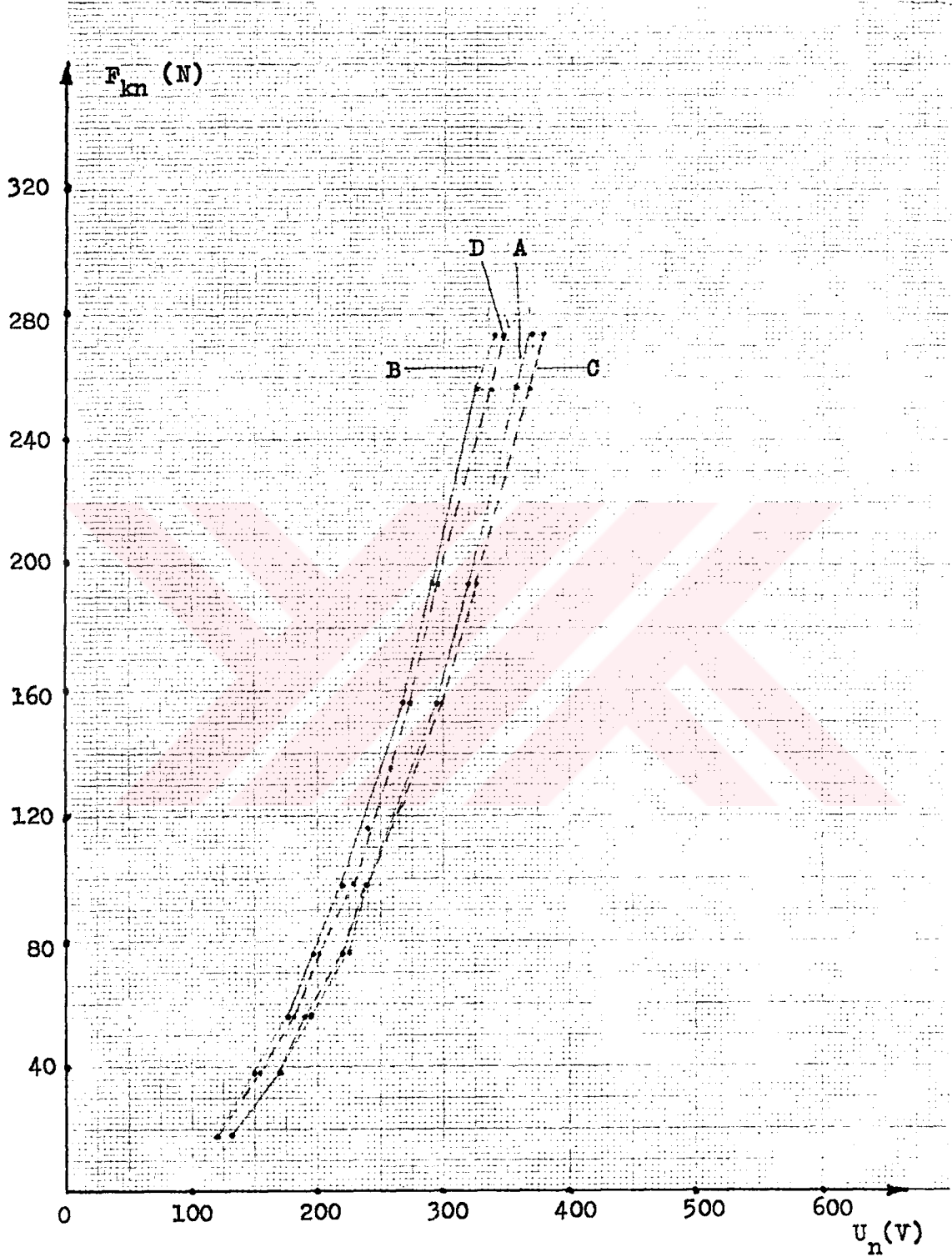
Şek. 7.11. Sekonderi tek parça malzemedan olan Lineer motorun enine hava aralığı akı dağılımı.
 (lg=2,2625mm) A:(190V) uç bobinleri devrede iken. D:(380V) uç bobinleri devre dışı iken.
 B:(380V) " " " " " "
 C:(190V) uç bobinleri devre dışı iken.



Şek.7.12. Sekonderi tek parça malzemeden olan lineer motorun enine hava aralığı akı dağılımı.
(lg=2,75mm) A: (190V) uç bobinleri devrede iken.
B: (190V) uç bobinleri devre dışı iken.



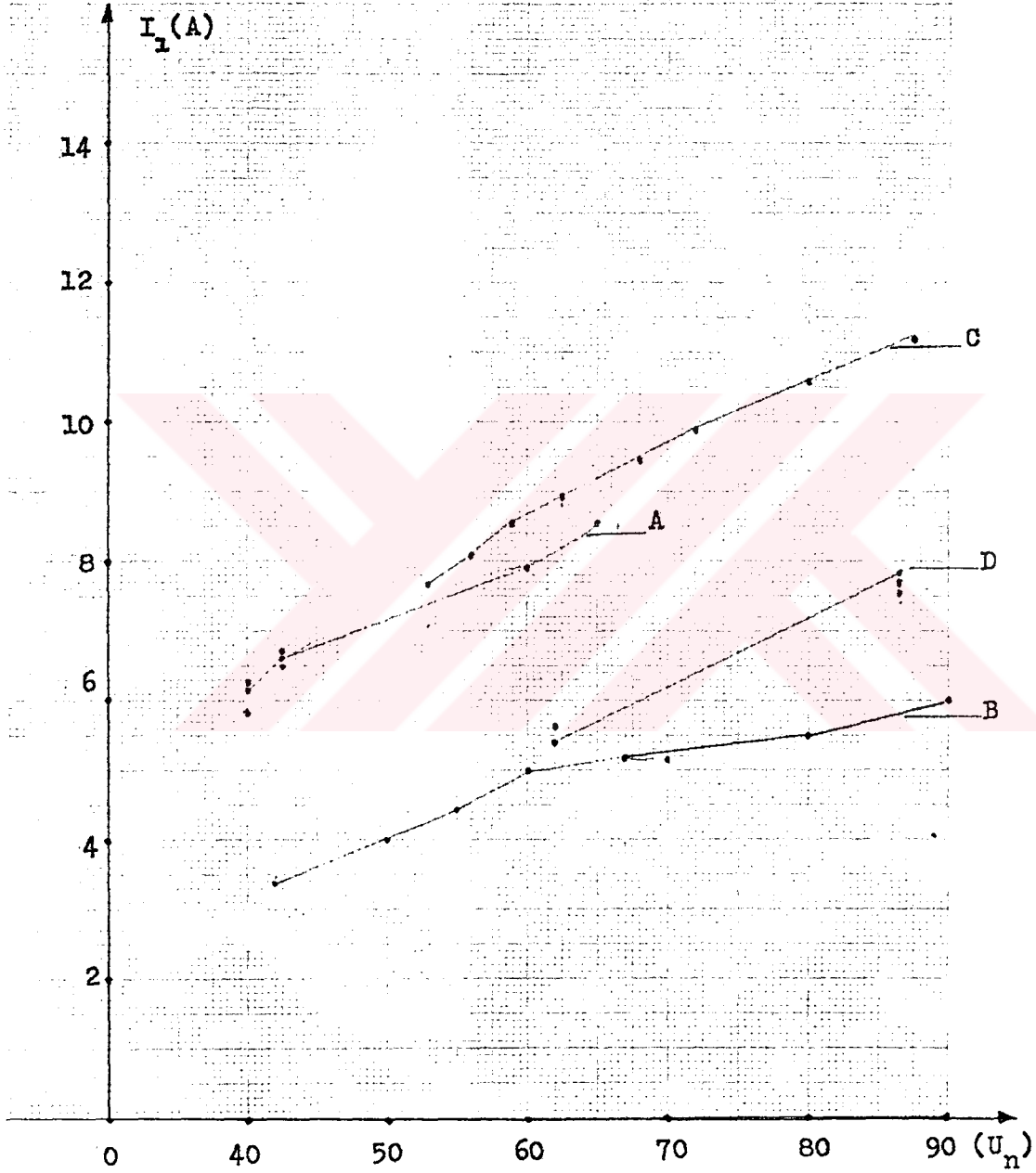
Şek.7.13. Sekonderi sincap kafesli motorun $F_{kn} = f(U_n)$ eğrileri
 A: uç bobinleri devrede ($lg=2,2625mm$)
 B: uç bobinleri devre dışı ($lg=2,2625mm.$)
 C: uç bobinleri devrede ($lg=2,75 mm.$)
 D: uç bobinleri devre dışı ($lg=2,75 mm.$)



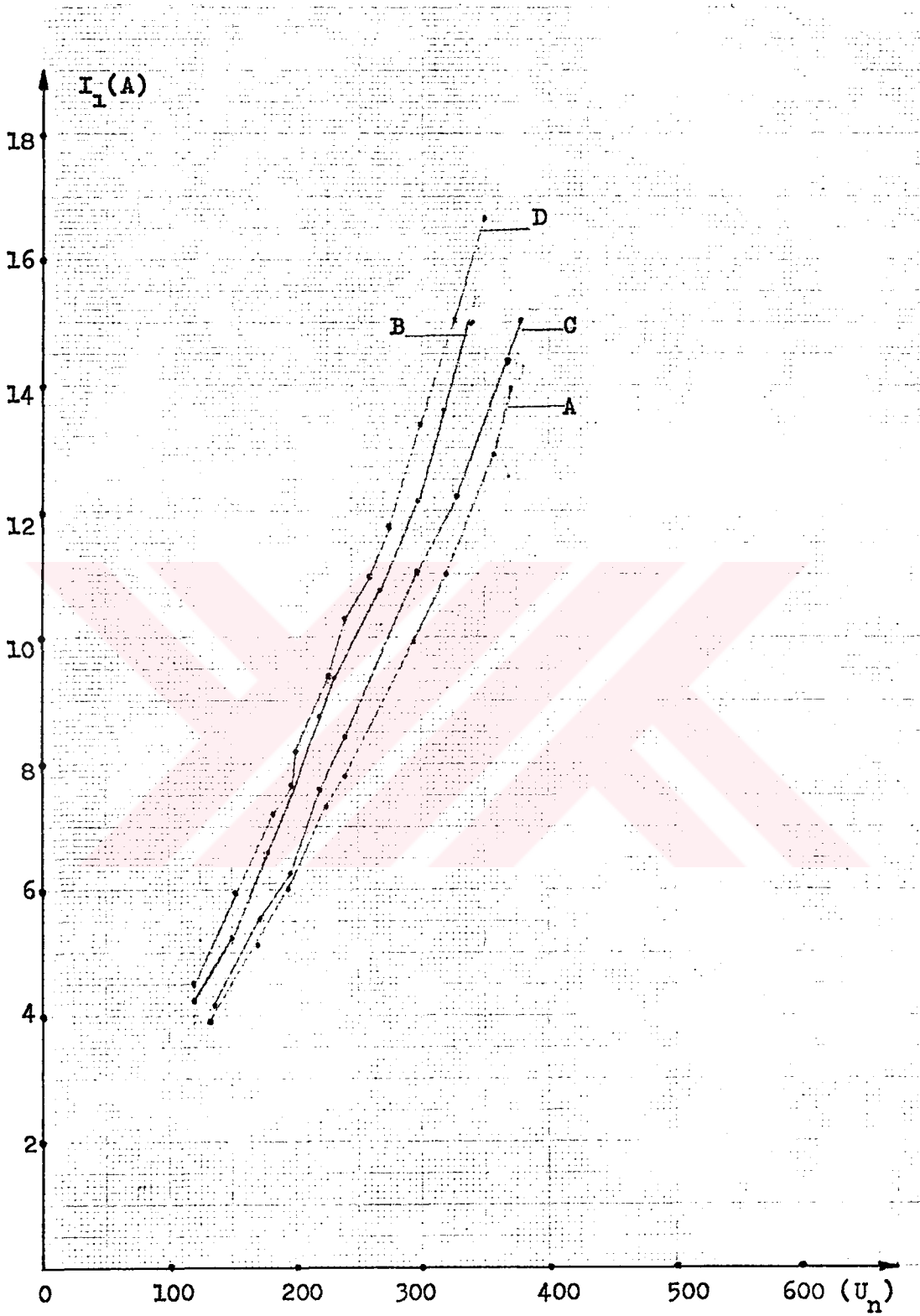
Şek.7.14. Sekonderi tek parça malzemeden olan motor için

$F_{kn} = f(U_n)$ eğrileri.

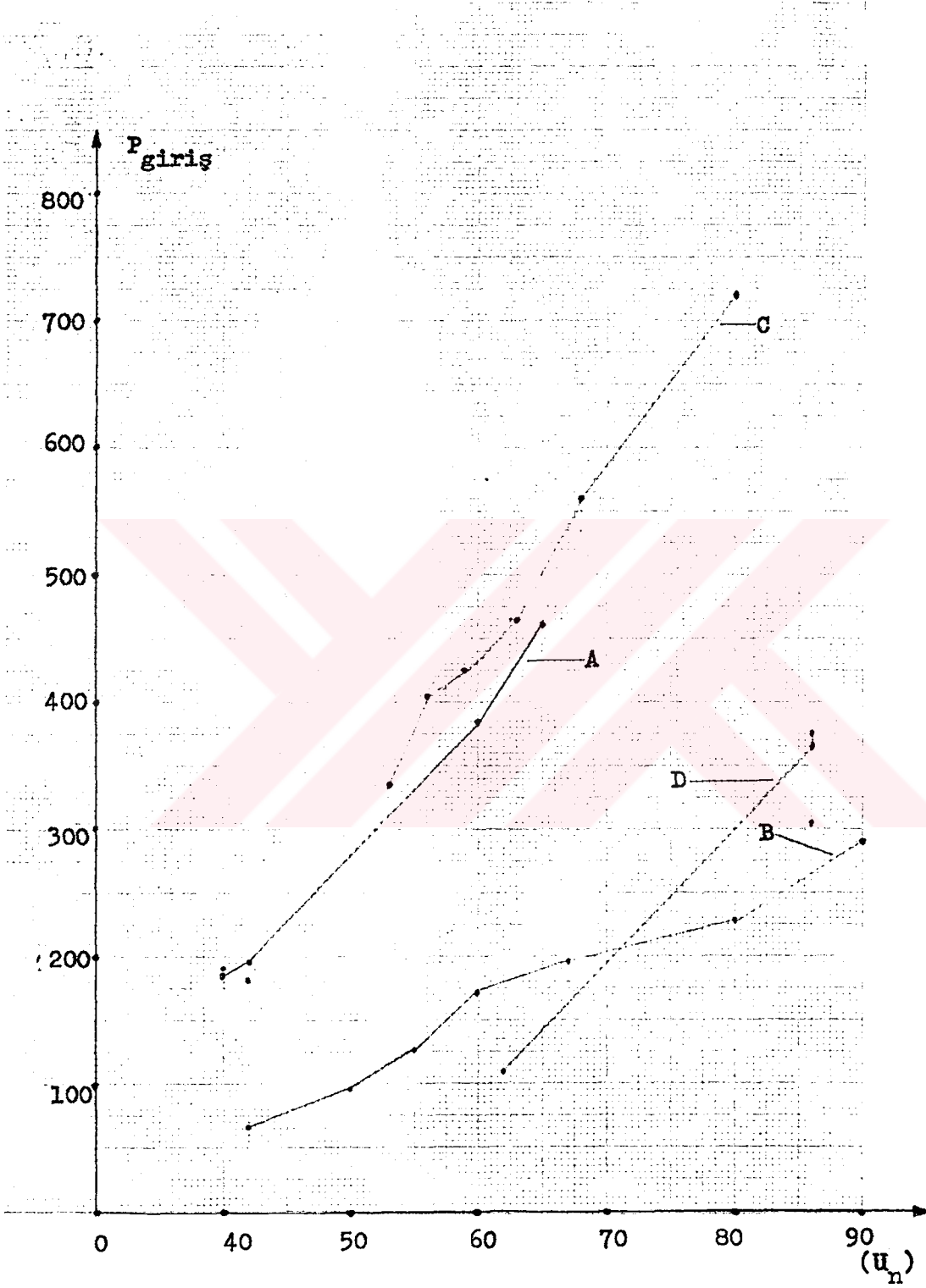
- A: uç bobinleri devrede ($lg=2,2625mm$)
- B: uç bobinleri devre dışı ($lg=2,2625mm$)
- C: uç bobinleri devrede ($lg=2,75mm$)
- D: uç bobinleri devre dışı ($lg=2,75mm$)



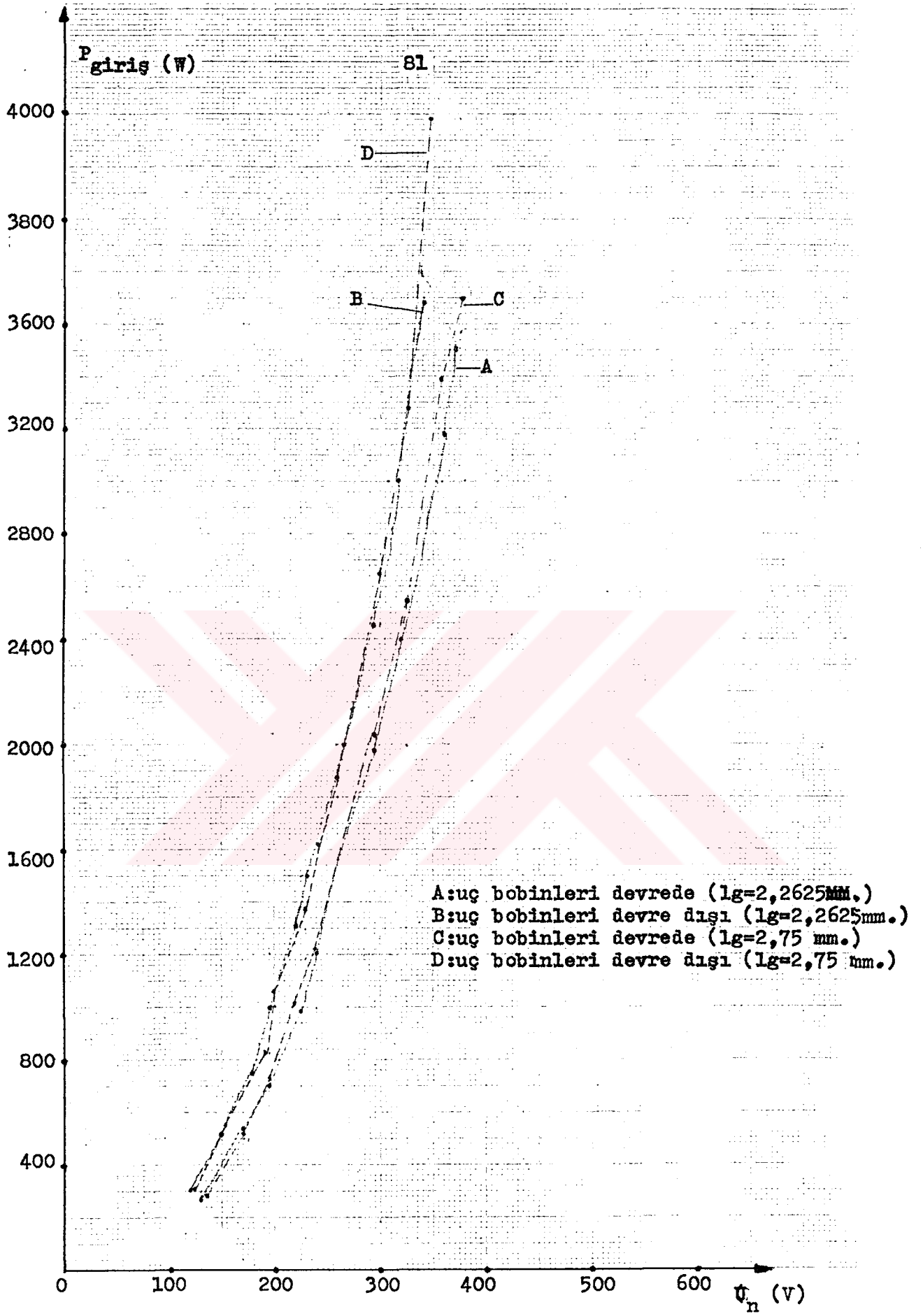
Şek.7.15. Sekonderi kafes sargılı motor için, $I = f(U_n)$ eğrileri
 A: uç bobinleri devrede ($lg=2,2625$ mm.)
 B: uç bobinleri devre dışı ($lg=2,2625$ mm.)
 C: uç bobinleri devrede ($lg=2,75$ mm.)
 D: uç bobinleri devre dışı ($lg=2,75$ mm.)



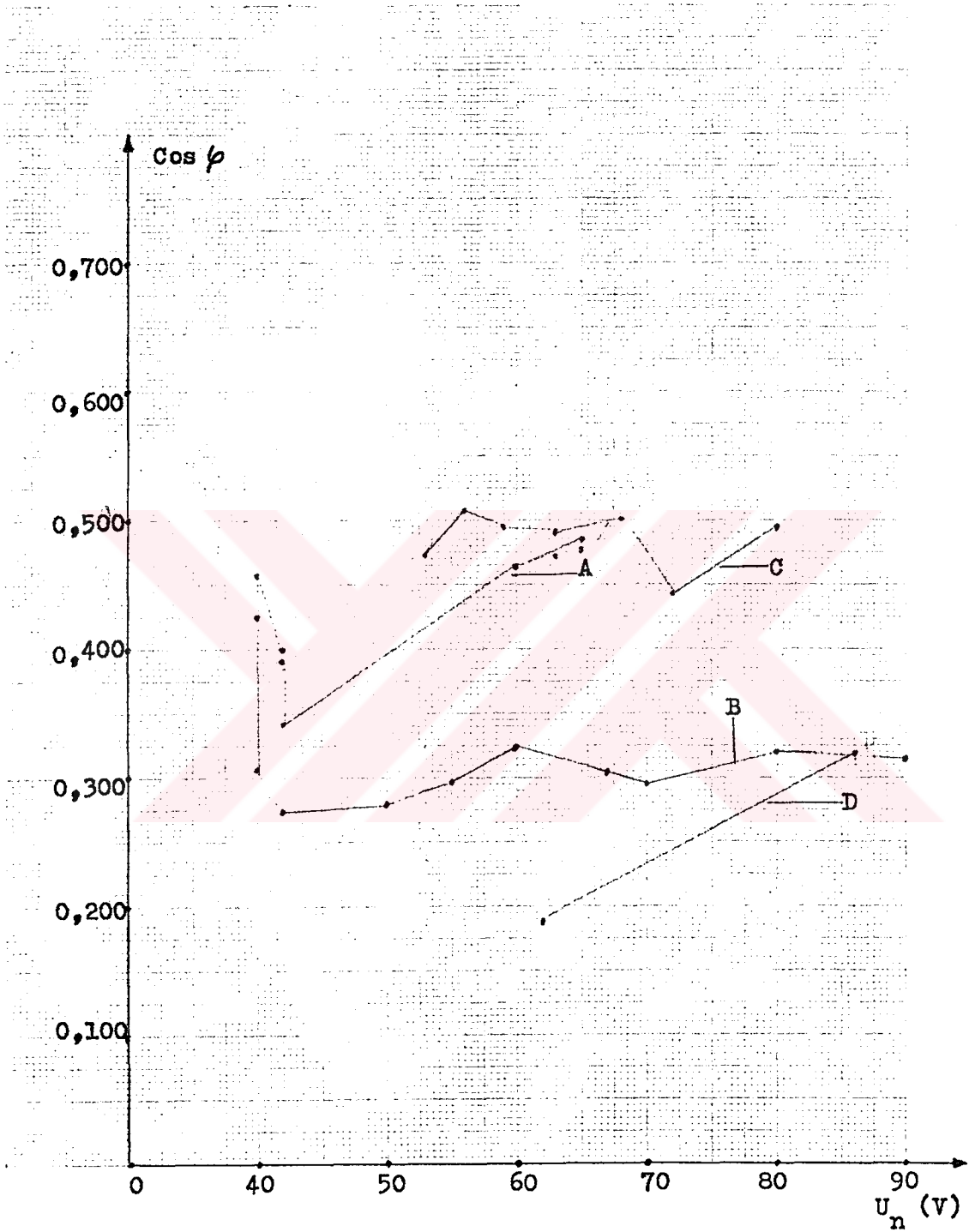
Şek.7.16. Sekonderi tek parça malzemeden olan motorun $I_1 = f(U_n)$ eğrileri
 A: uç bobinleri devrede ($lg=2,2625$ mm.)
 B: uç bobinleri devre dışı ($lg=2,2625$ mm.)
 C: uç bobinleri devrede ($lg=2,75$ mm.)
 D: uç bobinleri devre dışı ($lg=2,75$ mm.)



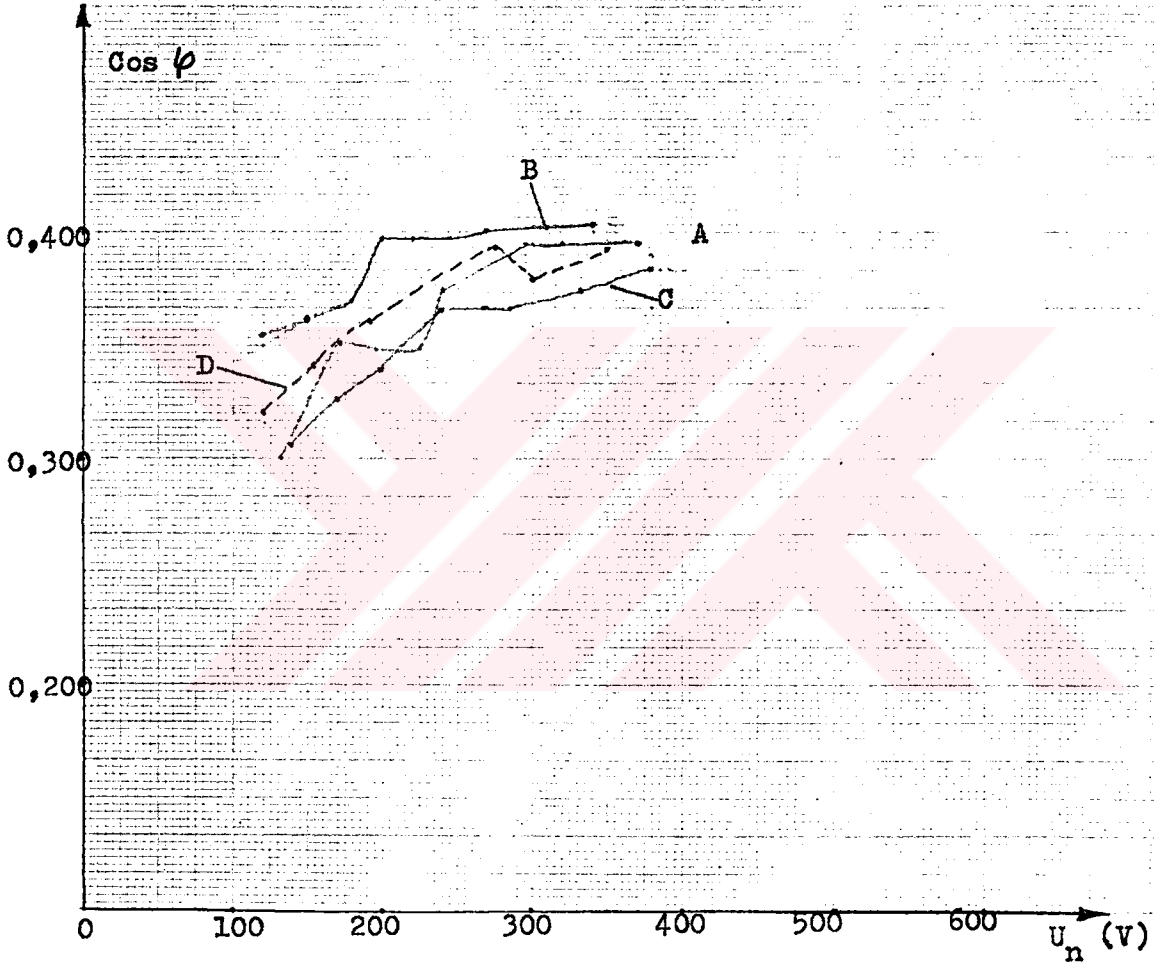
Şek.7.17. Sekonderi kafes sargılı motorun $P_{giriş} = f(U_n)$ eğrileri
 A: uç bobinleri devrede ($lg=2,2625$ mm.)
 B: uç bobinleri devre dışı ($lg=2,2625$ mm.)
 C: uç bobinleri devrede ($lg=2,75$ mm.)
 D: uç bobinleri devre dışı ($lg=2,75$ mm.)



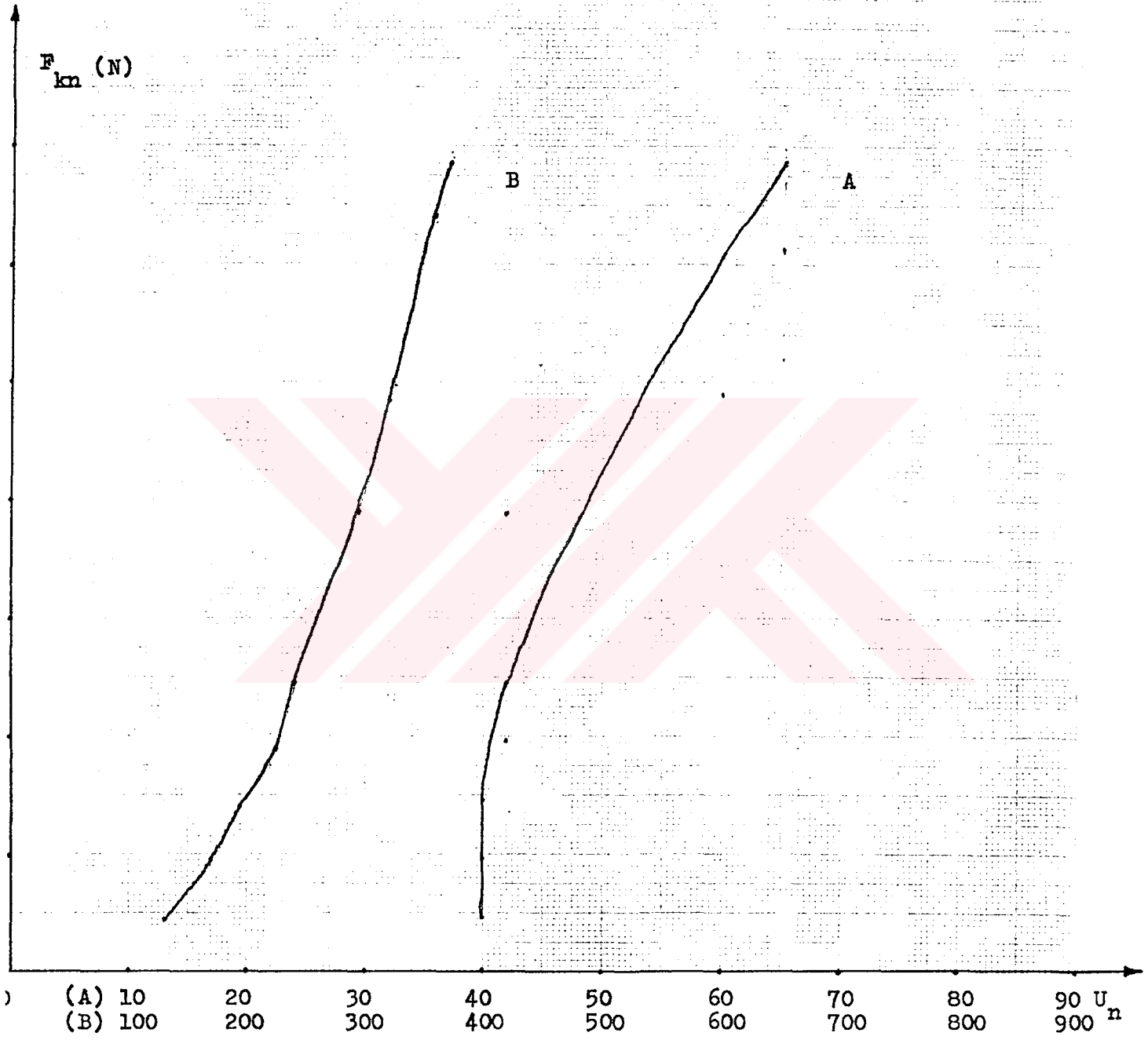
Şek.7.18.Sekonderi tek parça malzemedan olan motorun $P_{giriş} = f(U_n)$ eğrileri



Sek.7.19. Sekonderi sincap kafesli motorun $\cos \varphi = f(U_n)$ eğrileri
 A: uç bobinleri devrede ($l_g=2,2625$ mm.)
 B: uç bobinleri devre dışı ($l_g=2,2625$ mm.)
 C: uç bobinleri devrede ($l_g=2,75$ mm.)
 D: uç bobinleri devre dışı ($l_g=2,75$ mm.)



Şek.7.20. Sekonderi tek parça malzemeden olan motorun $\text{Cos } \varphi = f(U_n)$ eğrileri
 A: uç bobinleri devrede ($l_g=2,2625$ mm.)
 B: uç bobinleri devre dışı ($l_g=2,2625$ mm.)
 C: uç bobinleri devrede ($l_g=2,75$ mm.)
 D: uç bobinleri devre dışı ($l_g=2,75$ mm.)

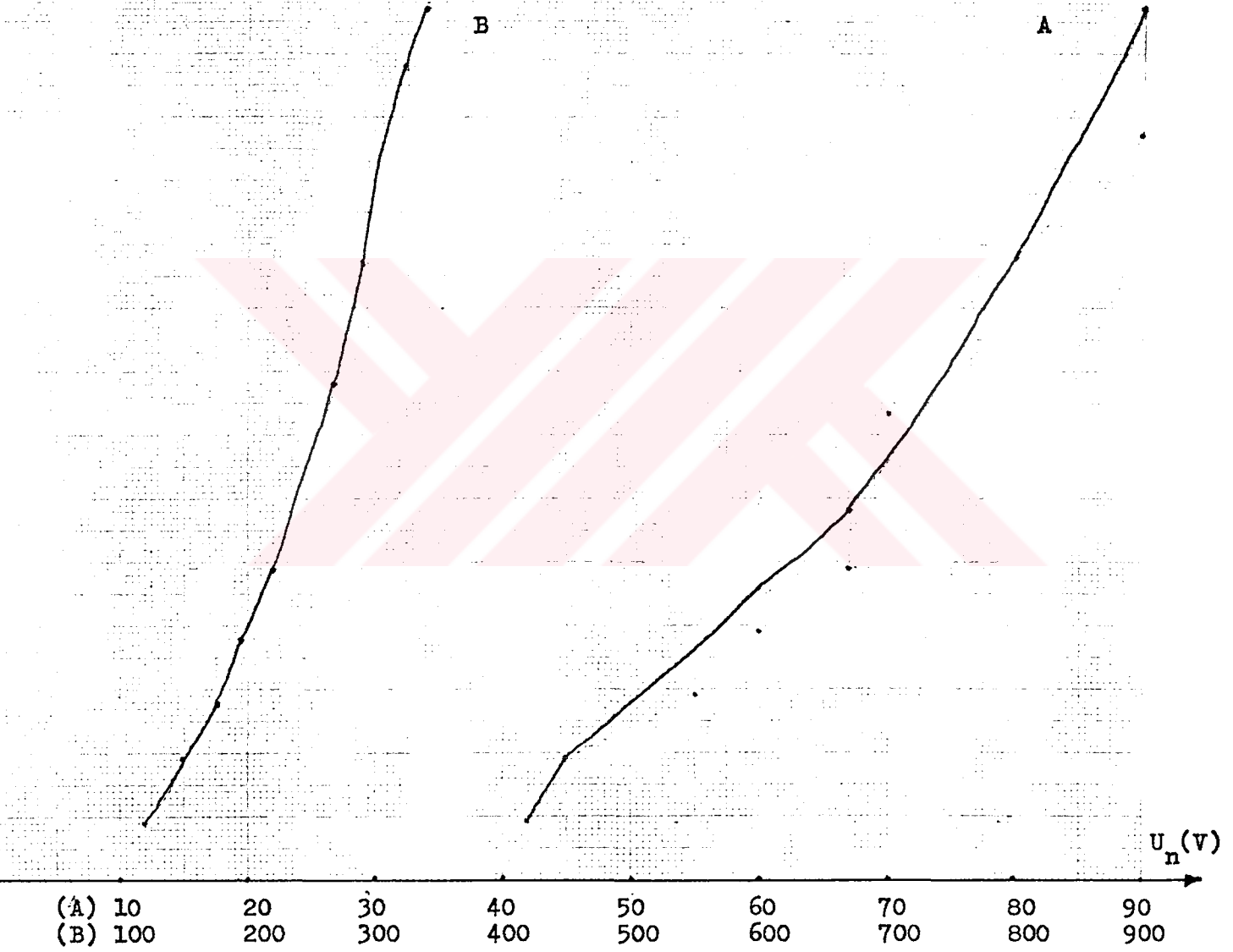


Şek.7.21. Her iki lineer motorun $F_{kn} = f(U_n)$ eğrileri (lg=2,2625 mm.)

A:Sekonderi sincap kafes sargılı.

B:Sekonderi tek parça malzemeli.

Uç bobinleri devrede iken.

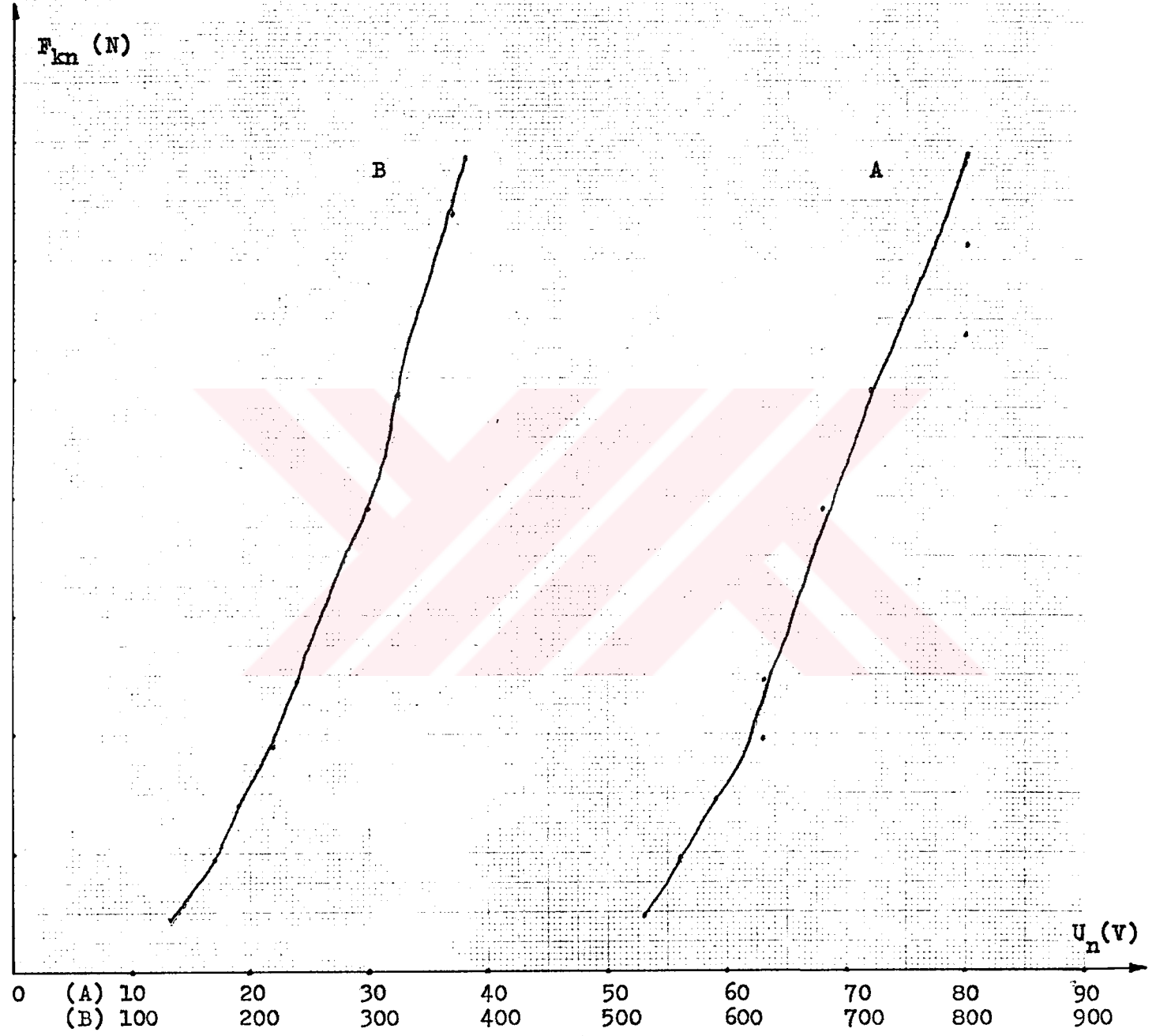
$F_{kn} (N)$ 

Şek.7.22. Her iki lineer motorun $F_{kn} = f(U_n)$ eğrileri ($lg=2,2625$ mm.)

A: Sekonderi sincap kafes sargılı.

B: Sekonderi tek parça malzemeli.

Uç bobinleri devre dışı iken.



Şek.7.23. Her iki lineer motorun $F_{kn} = f(U_n)$ eğrileri (lg=2,75 mm.)

A: Sekonderi sincap kafes sargılı.

B: Sekonderi tek parça malzemeli.

Uç bobinleri devrede iken.

$F_{kn} (N)$

B

A

 $U_n (V)$

(A)	10	20	30	40	50	60	70	80	90
(B)	100	200	300	400	500	600	700	800	900

Şek.7.24. Her iki lineer motorun $F_{kn} = f(U_n)$ eğrileri (lg=2,75 mm.)

A: Sekonderi kafes sargılı.
 B: Sekonderi tek parça malzemeli.
 Uç bobinleri devre dışı iken.

YARARLANILAN KAYNAKLAR

1. TUNÇAY, R.N.;
Linear Induction Motors with Unlaminated Steel
Secondaries, Ph.Dr. Thesis, UMIST, 1977
2. ÇETİN, İ.;
Lineer Asenkron Motorlar ve Yüksek Hızlı Trenlerde
Uygulanması, 2. Konferans
3. KENTLİ, F.;
Lineer Elektrik Makinaları Ders Notu, 1980
4. SARIOĞLU, K.;
Elektrik Makinalarının Temelleri Cilt III, 1983
5. CHALMERS, B.J. and WOOLEY, I.;
General Theory of Solid Rotor Induction Machines
Proc. I.E.E., Vol. 119, No 9, September 1972
6. SAMBATH, H.P.;
Induction Machines with Unlaminated Rotors,
Ph.Dr. Thesis, UMIST, 1976
7. WOOLEY, I. and CHALMERS, R.N.;
End Effects in Unlaminated Rotor Induction Machines,
Proc. I.E.E. Vol. 120, No 6 June 1973
8. NASAR, S.A. and BOLDEA, I.;
Linear-Motion Electric Machines. 1976
9. CHALMERS, B.J. ve TUNÇAY, R.N.;
İ.T.Ü. Elektrik Fakültesi Konferansları, No 14, Sayfa 14-27
1979
10. KENTLİ, F.;
Çelik Sekonderli Lineer Asenkron Makinalar
M.M.L.S. Diploma Tezi 1981

NOT: Deney aracı olarak kullanılan makinanın primer yanı 1972 yılında Prof. Dr. Y. Müh. R.N. TUNÇAY tarafından, sekonder yanı Yr. Dç. Dr. F. KENTLİ tarafından tasarlanmış olup, yapımı Teknik Öğretmen Ömer Faruk ORĞUN tarafından gerçekleştirilmiştir.