

LİNEER ELEKTROMANYETİK FIRLATICI SİSTEM TASARIMI VE EŞDEĞER DEVRE MODELİ KULLANARAK GELİŞTİRİLMİŞ FIRLATMA PERFORMANSI İÇİN BOYUT OPTİMİZASYONU

İsmail TOPALOĞLU, Osman GÜRDAL*

Meslek Yüksekokulu, Çankırı Karatekin Üniversitesi, Taşmescit Mevki, Çankırı, 18100

*Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Bursa Orhangazi Üniversitesi, Yıldırım,
Bursa, 16350

itopaloglu@karatekin.edu.tr, ogurdal@gazi.edu.tr

(Geliş/Received: 22.02.2012; Kabul/Accepted: 06.12.2012)

ÖZET

Bu çalışmada, insansız hava araçları için mekanik fırlatma sistemlerine alternatif olarak elektromanyetik bir fırlatıcı sistemde kullanılmak üzere tek taraflı lineer indüksiyon motor tasarlanmıştır. Çalışmada tasarlanan motor özellikleri 3 fazlı, 8 kutuplu, 380 V, 6 m/s, yükü 5,84 kg ve itme kuvveti 409,55 N'dur. Yapılan tasarımın klasik fırlatıcılara karşı yeni bir alternatif sunması beklenmektedir. Bu çalışmanın amacı fırlatma maliyetlerini azaltmak ve mobil bir fırlatma sistemi oluşturmaktır. Bu amaç için tasarlanan örnek motor tasarım parametreleri ve geometrik boyutlandırma eşitlikleri çalışmada sunulmuştur. Motorun geometrik boyutlarını hesaplayabilmek için analitik hesaplama yapabilen bir program geliştirilmiştir. Program, geliştirilen algoritma ile iteratif olarak en iyi geometrik boyut değerlerini elde etmeye çalışmaktadır. Çalışmada eşdeğer devre modeli kullanılarak fırlatma performansını geliştirmek için boyut optimizasyonu yapılmıştır. Amaç fonksiyonu, tasarım parametrelerinden verim, güç faktörü ve sistem ağırlığında denenmiş ve fırlatma performansına etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar iki boyutlu sonlu elemanlar analizinde değerlendirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Lineer indüksiyon motor, elektromanyetik tasarım, boyut eşitlikleri, elektromanyetik fırlatıcı optimizasyon, boyut optimizasyonu.

DESIGN OF LINEAR ELECTROMAGNETIC LAUNCHER SYSTEM AND DIMENSION OPTIMIZATION USING EQUIVALENT CIRCUIT MODEL OF LINEAR ELECTROMAGNETIC LAUNCHERS TO IMPROVE LAUNCHING PERFORMANCE

ABSTRACT

In this study, single side linear induction motor has been designed to use in an electromagnetic launcher system that would be alternative of mechanical launcher system for unmanned aerial vehicle. Design specifications are 8 poles, 3 phases, 380 V, 6 m/s rotor velocity, 5.84 kg payload and 409.55N thrust. It is expected that proposed design presents an alternative to conventional launchers. The purpose of the design is to reduce the cost of launching operation and constitute a mobile launcher system. For this aim, the designed prototype motor parameters and geometric dimension equations are presented in study. The software has been developed which can calculate the motor geometric dimensions analytically. The software uses developed algorithm to get optimum geometric dimensions iteratively. The dimension optimization using equivalent circuit model of linear electromagnetic launchers to improve launching performance. Goal function tested at the launcher design parameters on the efficiency, power factor, and weight, which investigated influence on launching performance. Two-dimensional finite-element analysis evaluates the results from the dimension optimization.

Keywords: Linear induction motor, electromagnetic design, sizing equations, electromagnetic launcher, optimization, dimension optimization.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Elektromanyetik fırlatıcıların çalışmasının temel ilkesi, elektromanyetik teoriye dayanır. Gerçekleştirilmek istenen durum, değişen ya da hareket eden güçlü bir elektromanyetik alan yaratılarak, hareket ettirilecek ya da fırlatılacak nesnenin bu elektromanyetik alanı takip etmesini sağlamaktır. Kuramsal olarak elektromanyetik alanın hareket etme hızında bir sınır olmadığı için itici kuvvetin hıza ulaşması beklenen durumda, hızlandırılan nesne için de bir hız limiti yoktur [1]. Elektromanyetik fırlatıcı sistemde kullanılan çeşitli motor tipleri; tek taraflı lineer indüksiyon motor, çift taraflı lineer indüksiyon motor, sabit mıknatıslı lineer senkron motor ve sabit mıknatıslı fırçasız doğru akım motorudur. İlk lineer motor Charles Wheatstone tarafından 1845 yılında üretilmiştir. Lineer motorların birçok kullanım alanı vardır. Lineer indüksiyon motorlar genel olarak şu alanlarda tek başına uygulamaları bulunmaktadır. Bunlar; konveyör sistemleri, insan taşıma, sıvı metal taşıma, hızlandırıcı, fırlatıcı, yavaş ve orta hızlı trenler olarak söylenebilir [2]. 1940'ların sonuna doğru Westinghouse Electric şirketi Birleşik Devletler Deniz kuvvetleri için iki tane uçak fırlatıcı sistemi başarıyla tamamlamıştır. Sistemin uzunluğu 425 m, genişliği 30 cm ve çalışması için 12000 kW güce ihtiyaç duymaktadır. Fırlatma işlemi 300 m boyunca sürüyor bu mesafeyi 4 ile 15 dakika arası zamanda alabiliyordu, uçak fırlatma hızı 100 m/s ulaşıyor ve 125 m de durmak için mesafe kalıyordu [3,4]. Yamamura LİM'in teorik temelleri üzerine detaylı çalışmalar yapmışlardır. Her ikisi de çalışmalarında tek ve çift taraflı LİM'in boyuna uç etkisini teorik olarak analiz etmişlerdir [5]. Nasar ve Boldea lineer elektrik motorları üzerine çok geniş araştırmalar yapmışlardır. Kitaplarında tek taraflı lineer indüksiyon motorlarını detaylı olarak incelemişlerdir [6,7]. Gieras LİM'in yapısal imalatı, uygulamaları ve tasarımı üzerine detaylı çalışmalar yapmıştır. Anthony R.Eastham ile beraber yaptığı çalışmada tek taraflı lineer indüksiyon motorda faz dengesizliklerini iki farklı metot ile incelemişlerdir. Kullandıkları birinci metot analitik ve eşdeğer devre modeli temeli üzerinedir. İkinci metot ise sayısal ve sonlu elemanlar metodunu içermektedir [8]. R. M. Pai ve Boldea yapmış oldukları çalışmalarda LİM'in tam eşdeğer devresini elde etmişlerdir. LİM'in kararlı durum performans karakteristiklerini boyuna uç etkisi, enine yan etkisi ve deri etkisi değerlerini içine alan tek boyutlu, iki boyutlu ve üç boyutlu analizler ile elde etmişlerdir [9]. E.R.Laithwaite yaptığı çalışmada lineer indüksiyon motoru büyük ağırlıkları hızlandırmak için kullanmıştır. Çalışmasında 200 kg'lık bir yükü 1200m/s hızla 1500 m mesafe götüren LİM tasarımı sunulmuştur [10]. Jawad Faiz yaptığı çalışmada tek taraflı lineer indüksiyon motoru uç etkisi ve arka demir plaka üzerindeki alüminyum kalınlığı etkisini içeren bir boyutlu ve iki boyutlu eşdeğer devre modelini geliştirmiştir [11]. Bu

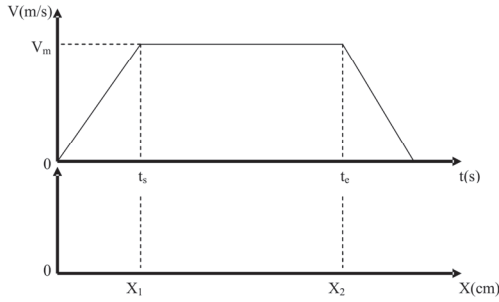
çalışmada insansız hava araçlarını fırlatmak amacı ile tek taraflı lineer indüksiyon motorun geometrik değerleri hesaplanmıştır. Motorun geometrik değerlerini hesaplayabilmek için bir bilgisayar programı hazırlanmıştır. Program için geliştirilen algoritma ile iteratif olarak en iyi geometrik boyut değerlerini elde etmeye çalışmaktadır. Hali hazırda en iyi boyut değerini elde etmek için endüstride ve akademide kullanılan birçok yöntem vardır [12,13]. Uçak fırlatma sistemlerinde buharla çalışan katapult yerine elektromanyetik fırlatıcı kullanmak birçok araştırmacının ilgisini çekmiştir [14–17]. Geçtiğimiz yıllarda, optimizasyon teknikleri mühendislik uygulamaları ve birçok alanda tekniğin izin verdiği ölçüde çözüm süreci otomatikleştirilerek tasarım zamanını çok fazla efor harcamadan düşürmüştür. Bugünlerde endüstride lineer hareket gereken kullanım alanlarında özellikle raylı taşımacılık sistemleri ve fırlatma sistemlerinde lineer indüksiyon motorlar tercih edilmektedir [18,19]. Bu motorların bu sistemlerde tercih edilmesinin arkasında yatan sebep herhangi bir ek aparat veya sistem gerektirmeden lineer itme hareketi üretebilmeleridir. Şimdiye kadar birçok araştırmacı lineer indüksiyon motorların ideal tasarımı için araştırmalar yapmıştır ve birçok amaç fonksiyonu bu tasarımlarda tasarımı idealleştirmek için kullanılmıştır [20]. Statik manyetik problemlerinde boyut optimizasyonu problemi için çözüm geliştiren ve sunan öncü araştırmacılardan Kim, D-H. boyut optimizasyonu problemini statik manyetik analiz koşulları altında çözmüştür [21]. Im, D. sonlu elemanlar metodu ve yapay zekâ algoritmaları kullanarak sabit uyarım gerilimi kullanarak kuvvet/motor ağırlığı oranını geliştirmeye çalışmıştır [22,23]. Başka bir araştırmada, fırlatma kuvveti sabit lineer hız altında lineer programlama kullanılarak geliştirilmeye çalışmıştır [24]. Lineer indüksiyon motor optimizasyonu birçok araştırmada incelenmiştir. Bunlardan tasarım optimizasyonu için olan çalışmada verim ve güç faktörünü geliştirmek için çalışmıştır [25,26]. Yukarıda anılan optimizasyon süreçlerinin hepsinde temel alınan çözüm domaini klasik indüksiyon motor eşdeğer devre parametreleri kullanılarak oluşturulmuştur fakat bir kısmında uç etki faktörü dikkate alınmışken bir diğer kısmında dikkate alınmamıştır. [27–29]. Bu çalışmada da klasik tasarım çözüm çalışması sürecinde eşdeğer devre modeli temel alınmıştır; buna ek olarak klasik tasarım sürecinden sonra yapılan iteratif optimizasyon sürecinde uç etkisi de dikkate alınmıştır. Boyut optimizasyonu sonrasında elde edilen fırlatıcıya ait geometrik değerler iki boyutlu sonlu elemanlar metodu kullanılarak reaksiyon plakası üzerindeki kuvvet değişimleri incelenmiştir. Bu çalışmada amaç günümüzde hızla, ülkemizde de gelişen insansız hava araçları için elektromanyetik bir fırlatma sistemi geliştirmektir. Bu amaç için tek taraflı lineer indüksiyon motor tasarlanmıştır. Tasarlanan LİM'e ait fiziksel, çalışma ve eşdeğer devre parametreleri göstermiştir ki tek taraflı lineer indüksiyon motor elektromanyetik fırlatıcı sistem için uygundur.

2. TASARIM PROBLEMİ VE BOYUT EŞİTLİKLERİ (Design Problem and Sizing Equations)

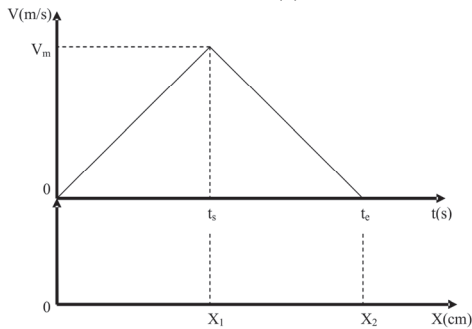
Lineer indüksiyon motorun çalışma ilkesi aynı dönel indüksiyon motor gibidir. Bir lineer indüksiyon motor temel olarak açılmış bir indüksiyon motorun yatay olarak üretilmesiyle oluşmaktadır. Bu çalışma şeklinde motor dönme kuvveti yerine lineer itme kuvveti oluşturmaktadır. Çalışmada kullanılan tasarım parametreleri: uçak ağırlığı (Tüm donanımlarıyla beraber)=5,84 kg, uçuş hızı (maksimum)= 6,0 m/s, maksimum hızlanma yolu=1,2 m, hızlanma zamanı=0,135s, hızlanma=44,444 m/s² ve kuvvet=259,55 Newton'dur. Kuvvet değerine kayıplar için 150 N eklenince kuvvet değeri 409,55 N'dur. Tüm sürtünmeleri yok varsayarsak, fırlatma sisteminin hareketi aşağıdaki şekilde tanımlanabilir.

$$m \frac{d^2 s}{dt^2} = F \quad \text{veya} \quad F = m \cdot a, \quad x = \frac{1}{2} a t^2 \quad (1)$$

Denklem 1'de m sistemdeki hareketli parçaların ağırlıkları, s rotor pozisyonu, F kuvvet ve a fırlatma için gereken hızlanmadır [30–31].



(a)



(b)

Şekil 1. Elektromanyetik lineer fırlatıcı hız-zaman grafik görünüşleri, (a) Yamuk tip hız-zaman grafiği görünüşü, (b) Üçgen tip hız-zaman grafiği görünüşü. (Electromagnetic linear launcher speed-time graph, (a) Trapezoid type speed-time graph, (b) Triangle type speed-time graph.)

Şekil 1'de yamuk tip hız-zaman grafiği olarak verilen eğri düşük ve orta hızlı fırlatma sistemlerinde tercih edilmekte iken üçgen tip hız-zaman grafiği verilen eğri yüksek ağırlıkta ve yüksek hıza ihtiyaç duyan fırlatma sistemlerinde tercih edilmektedir. Lineer indüksiyon motoru boyut eşitliklerini

tanımlayabilmemiz için öncelikle motora ait temel hız, kayma, giriş gücü, çalışma frekansı, çalışma gerilimi, çalışma akımı gibi değerleri tanımlamak gerekmektedir. V_s motor senkron hızı, V_r rotor hızı olmak üzere kayma denklem 2 ile tanımlanabilir.

$$S = \frac{V_s - V_r}{V_s} \quad (2)$$

V_s motor senkron hızı;

$$V_s = \frac{2\omega R}{p} = 2f\tau \quad (3)$$

denklem 3 ile tanımlanır. Burada R indüksiyon motor stator yarıçapı, f frekans, p tek kutup sayısı, ω açısal hız, τ kutup adımıdır. Kutup adımı denklem 4 ile tanımlanmaktadır. Burada L_s lineer motor stator uzunluğudur.

$$\tau = \frac{2\pi R}{p} = \frac{L_s}{p} \quad (4)$$

Nasar ve Boldea LİM'de ki akım yoğunluğu J 'yi denklem 5'deki gibi tanımlamışlardır [7].

$$J = \frac{2\sqrt{2}m k_w N_c I}{L_s} \quad (5)$$

Burada J akım yoğunluğu (A/m), m faz sayısı, k_w sargı faktörü, N_c oyuktaki bobin sayısı, I giriş akımı RMS değeridir. Akım yoğunluğu değeri tasarlanan motorun çalışma şartlarına bağlı olarak giriş tasarımında değişik değerlerde seçilebilir. Özel soğutma sistemine sahip olan tasarımlarda büyük seçilebilirken hava soğutmalı tasarımlarda düşük seçilmektedir. Motorun sargı faktörü değeri k_w adım katsayısı k_p ve dağıtım katsayısı k_d değerinin çarpımından elde edilir ve denklem 6 ile ifade edilir.

$$k_w = k_p \cdot k_d \quad (6)$$

$$k_p = \sin\left(\frac{\theta_p}{2}\right) \quad (7)$$

Burada, θ_p bobin açıklığı elektrik derecesidir.

$$k_d = \frac{\sin\left(\frac{q_1 \alpha}{2}\right)}{q_1 \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (8)$$

Burada, q_1 faz başına kutup başına oyuk sayısı değeridir, α oyuk açısıdır ve denklem 9 ile ifade edilir.

$$\alpha = \frac{\pi}{mq_1} \quad (9)$$

Denklem 7 ve 8 kullanılarak denklem 6'da yerine konulursa denklem 10 elde edilir.

$$k_w = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2m}\right)}{q_1 \sin\left(\frac{\pi}{2mq_1}\right)} \quad (10)$$

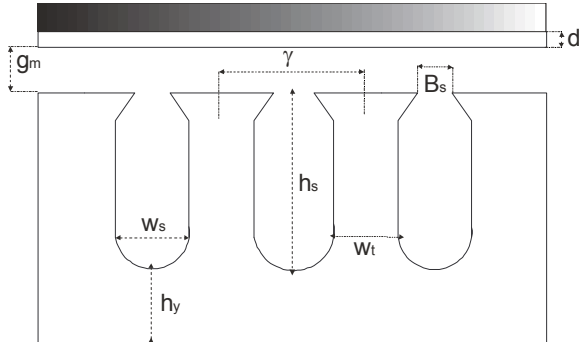
Motor giriş gücü tanımlanacak olursa;

$$P_i = mVI \cos \phi \quad (11)$$

elde edilir. Denklem 11'de m faz sayısı V faz gerilimi I faz akımı ve ϕ 'de güç faktörüdür. Giriş gücü stator sargılarındaki bakır kaybının ve nüvedeki demir kayıplarının bir parçasıdır. Eğer motorun çıkış gücü ifadesini rotor kayıpları, sürtünme ve rüzgâr kayıplarını ihmal ederek yazacak olursak;

$$P_o = F_s \cdot V_r \quad (12)$$

denklem 12 elde edilir. Burada F_s itme kuvveti ve V_r rotor hızıdır. Motorda hava aralığı değeri çok önemlidir. Motorda etkili hava aralığı değeri ile gerçek mekanik hava aralığı değeri oluklu yapı yüzünden farklıdır. Motordaki boyut parametreleri şekil 2'de tanımlanmıştır.



Şekil 2. Lineer indüksiyon motor boyut parametreleri (Linear induction motor geometric dimension parameters)

Şekil 2'de gösterilen g_m mekanik hava aralığı, h_y stator boyunduruk yüksekliği, h_s oluk yüksekliği, w_s oluk genişliği, B_s oluk ağzı genişliği, w_t dış genişliği, d iletim katmanı kalınlığı ve γ oluk adımıdır.

Gieras yaptığı çalışmalarda etkili hava aralığını denklem 13'deki gibi tanımlamıştır.

$$g_e = k_c \cdot g_o \quad (13)$$

Burada, g_o manyetik hava aralığı ve k_c de carter katsayısı olarak bilinmektedir [32].

$$g_o = g_m + d \quad (14)$$

Denklem 14 kullanılarak carter katsayısı denklem olarak gösterilecek olursa;

$$k_c = \frac{\gamma}{\gamma - \lambda g_o} \quad (15)$$

γ oluk adımı iki oluk dış merkezi arasındaki mesafedir ve denklem 16 ile tanımlanır.

$$\gamma = \frac{\tau}{mq_1} \quad (16)$$

Denklem 15 ve denklem 16'da kullanılan λ değeri denklem 17'de ifade edilmektedir [33].

$$\lambda = \frac{4}{\pi} \left[\frac{w_s}{2g_o} \arctan\left(\frac{w_s}{2g_o}\right) - \ln \sqrt{1 + \left(\frac{w_s}{2g_o}\right)^2} \right] \quad (17)$$

Oluk adımı ayrıca oluk genişliği ve dış genişliğinin toplamıdır.

$$w_s = \gamma - w_t \quad (18)$$

Denklem 18'de geçen dış genişliği değeri w_t stator dişlerinde meydana gelecek manyetik doyumun önüne geçebilmek için mümkün olduğunca küçük tasarlanmaktadır. Bu da ancak tasarımda dış akı yoğunluğu değerini uygun bir değerde seçmek ile mümkündür. Bu aralık 1,1T-1,6T arasındadır [34]. Stator oluk derinliği değeri h_s denklem 19'da hesaplanmıştır.

$$h_s = \frac{A_s}{w_s} \quad (19)$$

A_s oluk kesit alanı olarak ifade edilmektedir. Genel olarak tasarımlarda stator oluklarının %70'inin sargı geriye kalan %30'luk kısmınınsa yalıtım malzemesi olduğu kabul edilir [35]. Stator nüvesi boyunduruk yüksekliği h_y denklem 20'de tanımlanmıştır [36].

$$h_y = \frac{\Phi_p}{2B_y W_s} \quad (20)$$

Denklem 20'de W_s stator nüve genişliği, B_y boyunduruk akı yoğunluğu değeri ve Φ_p kutup başına akı büyüklüğü değeridir.

3. AMAÇ FONKSİYONU VE KISITLAR (OBJECTIVE FUNCTION AND LIMITS)

Literatürde kullanılan birçok çalışmada kullanılmış amaç fonksiyonları vardır [37–42]. Bu çalışmalarda kullanılan ortak parametreler sırasıyla hava aralığı, uzunluğu, uç etkisi faktörü, verim, ağırlık, maliyet, hacim, hava aralığı manyetik akı yoğunluğu ve alüminyum kalınlığıdır. Bu değişkenler çok farklı konfigürasyonlarda amaç fonksiyonları içinde tanımlanmıştır. Bu çalışmada kullanıldığı şekliyle denklem 21, 22 ve 23'de tanımlanmıştır.

$$\text{Amaç Fonksiyonu} = \frac{(\text{verim} \cdot \text{güç faktörü})^{M_1}}{(\text{hacim})^{M_2}} \quad (21)$$

$$\text{Amaç Fonksiyonu} = \frac{(\text{verim} \cdot \text{güç faktörü})^{M_1}}{(Kg)^{M_2}} \quad (22)$$

$$\text{Amaç Fonksiyonu} = \frac{(\text{verim} \cdot \text{güç faktörü})^{M_1}}{(\text{maliyet})^{M_2}} \quad (23)$$

Denklem 21, 22 ve 23'de tanımlanan optimizasyon amaç fonksiyonlarında uç etki faktörüne değinilmemiştir. Eğer uç etki faktörü değeri denklem 21, 22 ve 23'e eklenirse sırasıyla denklem 24, 25 ve 26;

$$\text{Amaç Fonksiyonu} = \frac{(\text{verim} \cdot \text{güç faktörü})^{M_1}}{(\text{hacim})^{M_2} \cdot (M_{ue})^{M_3}} \quad (24)$$

$$\text{Amaç Fonksiyonu} = \frac{(\text{verim} \cdot \text{güç faktörü})^{M_1}}{(Kg)^{M_2} \cdot (M_{ue})^{M_3}} \quad (25)$$

$$\text{Amaç Fonksiyonu} = \frac{(\text{verim} \cdot \text{güç faktörü})^{M_1}}{(\text{maliyet})^{M_2} \cdot (M_{ue})^{M_3}} \quad (26)$$

elde edilir. Burada M_{ue} uç etki faktörüdür. Tasarlanan lineer motor için verim·güç faktörü değeri motor performansının belirlenmesinde birinci faktördür. Tanımlanan bu üç değişik optimizasyon amaç fonksiyonunda hacim başına performans, ağırlık başına performans ve maliyet başına performans değerleri elde edilmeye çalışılmıştır. M_{ue} uç etki faktörü hava aralığı gücünden hava aralığında meydana gelen relüktans, saçaklanma ve diğer ek kayıplar çıkarıldıktan sonra elde edilmektedir.

$$M_{ue} = \frac{P_{ha} - P_{hak}}{P_{ha}} \quad (27)$$

uç etkisi faktörü motor hızıyla beraber değişim göstermektedir. Denklem 27'de P_{ha} hava aralığı gücü ve P_{hak} hava aralığı gücü kayıplarını ifade etmektedir. Tanımlanan amaç fonksiyonları farklı tasarımlarda kullanılmış ve performans etkileri incelenmiştir.

Tanımlanan üç farklı optimizasyon amaç fonksiyonu dört farklı durumda incelenmiştir. Bunlar;

$$M_1=1, M_2=M_3=0$$

$$M_1=0, M_2=M_3=1$$

$$M_1=M_2=0, M_3=1$$

$$M_1=M_2=M_3=1$$

durumlarıdır. Optimizasyon amaç fonksiyonu için yukarıdaki durumlar aşağıdaki şekilde açıklanabilir.

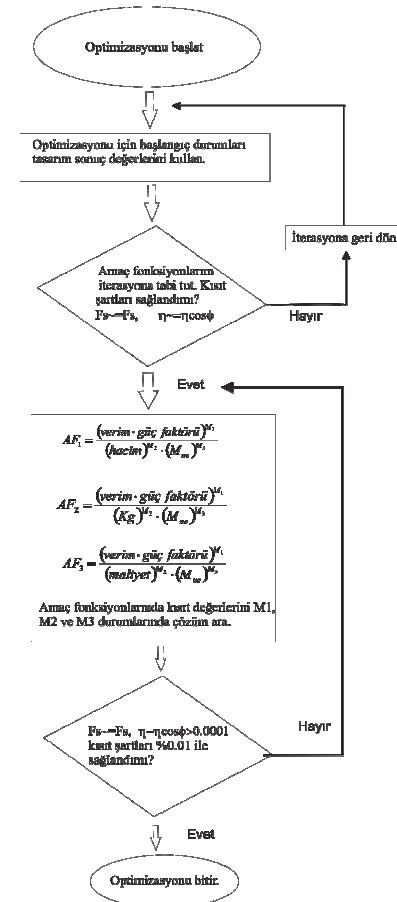
Birinci durumda amaç fonksiyonlarında ayrı ayrı performansı arttırmaya yani verim·güç faktörü değerine odaklanılıyor.

İkinci durumda amaç fonksiyonlarında hacim, ağırlık ve maliyet minimuma indirilmeye odaklanılıyor.

Üçüncü durumda performansı arttırmak için uç etkisi değeri azaltılmaya odaklanılıyor.

Dördüncü durumda genel performans artırımına odaklanılıyor.

Lineer elektromanyetik fırlatıcılar için geliştirilen yazılımda, hazırlanan ek bir bölüm ile denklem 24, 25 ve 26'da tanımlanan amaç fonksiyonlarından yararlanılarak boyut optimizasyonunu analitik temelli iteratif bir algoritmayla gerçekleştirmektedir. Geliştirilen iteratif boyut optimizasyonuna yönelik çözüm algoritması şekil 3'de gösterilmiştir.



Şekil 3. İteratif optimizasyon çözüm algoritması (Iterative optimization solution algorithm)

Tablo 1. Kısıt parametrelerine göre amaç fonksiyonları (Object functions with limit parameters)

Kısıt parametresi	M ₁ , M ₂ ve M ₃ durumu	Amaç fonksiyonu	İndirgenen amaç fonksiyonu
=	M ₁ =1 M ₂ =0 M ₃ =0	$AF_1 = \frac{(\text{verim} \cdot \text{güç faktörü})^{M_1}}{(\text{hacim})^{M_2} \cdot (M_{ue})^{M_3}}$	$AF_1 = \text{verim} \cdot \text{güç faktörü}$
		$AF_2 = \frac{(\text{verim} \cdot \text{güç faktörü})^{M_1}}{(Kg)^{M_2} \cdot (M_{ue})^{M_3}}$	$AF_2 = \text{verim} \cdot \text{güç faktörü}$
		$AF_3 = \frac{(\text{verim} \cdot \text{güç faktörü})^{M_1}}{(\text{maliyet})^{M_2} \cdot (M_{ue})^{M_3}}$	$AF_3 = \text{verim} \cdot \text{güç faktörü}$
=	M ₁ =0 M ₂ =1 M ₃ =1	$AF_1 = \frac{(\text{verim} \cdot \text{güç faktörü})^{M_1}}{(\text{hacim})^{M_2} \cdot (M_{ue})^{M_3}}$	$AF_1 = \frac{1}{\text{hacim} \cdot M_{ue}}$
		$AF_2 = \frac{(\text{verim} \cdot \text{güç faktörü})^{M_1}}{(Kg)^{M_2} \cdot (M_{ue})^{M_3}}$	$AF_2 = \frac{1}{Kg \cdot M_{ue}}$
		$AF_3 = \frac{(\text{verim} \cdot \text{güç faktörü})^{M_1}}{(\text{maliyet})^{M_2} \cdot (M_{ue})^{M_3}}$	$AF_3 = \frac{1}{\text{maliyet} \cdot M_{ue}}$
=	M ₁ =0 M ₂ =0 M ₃ =1	$AF_1 = \frac{(\text{verim} \cdot \text{güç faktörü})^{M_1}}{(\text{hacim})^{M_2} \cdot (M_{ue})^{M_3}}$	$AF_1 = \frac{1}{M_{ue}}$
		$AF_2 = \frac{(\text{verim} \cdot \text{güç faktörü})^{M_1}}{(Kg)^{M_2} \cdot (M_{ue})^{M_3}}$	$AF_2 = \frac{1}{M_{ue}}$
		$AF_3 = \frac{(\text{verim} \cdot \text{güç faktörü})^{M_1}}{(\text{maliyet})^{M_2} \cdot (M_{ue})^{M_3}}$	$AF_3 = \frac{1}{M_{ue}}$
=	M ₁ =1 M ₂ =1 M ₃ =1	$AF_1 = \frac{(\text{verim} \cdot \text{güç faktörü})^{M_1}}{(\text{hacim})^{M_2} \cdot (M_{ue})^{M_3}}$	$AF_1 = \frac{(\text{verim} \cdot \text{güç faktörü})}{(\text{hacim}) \cdot (M_{ue})}$
		$AF_2 = \frac{(\text{verim} \cdot \text{güç faktörü})^{M_1}}{(Kg)^{M_2} \cdot (M_{ue})^{M_3}}$	$AF_2 = \frac{(\text{verim} \cdot \text{güç faktörü})}{(Kg) \cdot (M_{ue})}$
		$AF_3 = \frac{(\text{verim} \cdot \text{güç faktörü})^{M_1}}{(\text{maliyet})^{M_2} \cdot (M_{ue})^{M_3}}$	$AF_3 = \frac{(\text{verim} \cdot \text{güç faktörü})}{(\text{maliyet}) \cdot (M_{ue})}$

Şekil 3'de geliştirilen iteratif boyut optimizasyon yazılımı algoritma gösterilmektedir. Bu algoritma klasik boyut hesaplamalarından elde edilen verileri kullanarak üç amaç fonksiyonu için ayrı olmak üzere, kısıt şartları (=, >=, <=, > ve <) seçilmek kaydıyla hesaplama yapmaktadır. Geliştirilen program ilk tasarım parametreleriyle optimizasyon sonucunda elde edilen yada bir başka deyişle geliştirilen değerlerin değişim oranlarını da hesaplamaktadır. Optimizasyon sonucu elde edilen değerler ayrıca bir sonuç ekranından görülebilmektedir. Seçilen kısıt parametrelerine göre amaç fonksiyonlarının indirgenmiş durumlar Tablo 1'de verilmiştir.

Ayrıca elde edilen optimizasyon sonuçları grafik olarak aynı sayfada görülebilmektedir. Bu grafikleri rotor hızına bağlı olarak verim, ağırlık, giriş gücü, çıkış gücü, itme kuvveti, güç faktörü, hava aralığı, uç etki faktörü ve yaklaşık maliyet olarak sıralanmaktadır. Yaklaşık maliyet için gereken eşitlikler denklem 28, 29 ve 30'da verilmiştir.

$$V_{nive} = w_b \cdot ((L_s \cdot h_y) + (m \cdot p \cdot q) \cdot (h_s \cdot w_l)) \quad (28)$$

$$V_{iletken} = ((\pi \cdot d_{kes}^2) / 4) \cdot L_b \quad (29)$$

$$C_{Maliyet} = (V_{nive} \cdot \rho_{çelik} \cdot M_{C-kg-fiyat}) + (V_{iletken} \cdot \rho_{Cu} \cdot M_{B-kg-fiyat}) \quad (30)$$

Tablo 1'de görüleceği üzere geliştirilen programda seçilen kısıt parametresine göre program amaç fonksiyonlarını bir alt forma indirgemektedir. Bu formlar optimizasyon da iteratif döngülerin kısıt fonksiyonları olarak kullanılmıştır. Ayrıca tablo 1'de amaç fonksiyonlarının durumlarına göre kullanılacak kısıt parametreleri de verilmiştir. Amaç fonksiyonlarında birinci durumda tasarımcı tercihiyle ilgili olarak kullanılan malzeme miktarı çok fazla dikkate alınmadan sadece motor performansını arttırmak için çözümler aranmaktadır. İkinci durumda motor performansını düşürmeden hacim ve kullanılacak olan malzeme ağırlığı azaltılmaya ve buna bağlı olarak maliyet aşağıya düşürülmeye çalışılmaktadır. Üçüncü durumda farklı bir fonksiyonla tekrardan birinci duruma benzer olarak ancak bu kez uç etkisi değeri kullanılarak motor performansı artırılmaya çalışılmaktadır. Dördüncü ve son durum genel motor performansı ve maliyeti azaltma doğrultusunda uç etkisi değeri kullanılarak yapılmaya çalışılmaktadır. Tablo 1'de verilen kısıt parametreleriyle M_1 , M_2 ve M_3 'ün 0 ya da 1 olma durumu açıklanmıştır.

4. OPTİMİZASYON SONUÇLARI VE SONLU ELEMANLAR ANALİZİ (OPTIMIZATION RESULTS AND FINITE ELEMENT ANALYSIS)

Geliştirilen tasarım ve iteratif optimizasyon yazılımıyla giriş tasarım parametrelerine bağlı tasarım optimizasyon sonuçları tablo 3'de sunulmuştur. Optimizasyon öncesi ilk tasarım sonuçlarını elde etmek için kullanılan giriş tasarım parametreleri de tablo 2'de sunulmuştur. Bu değerler kullanılarak lineer indüksiyon motorun geometrik modeli iki boyutlu olarak sonlu elemanlar analizi için oluşturulmuştur.

Tablo 2'de ki giriş tasarım parametrelerine karşılık hesaplanan motor geometrik boyut değerleri iteratif

optimizasyon sürecinden sonra dört farklı durumda incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar tablo 3'de sunulmuştur. Birinci durumda verimde % 43 iyileşme sağlanırken ağırlık % 2 azalmıştır, ikinci durumda verimde % 38 iyileşme sağlanırken ağırlık % 8 azalmıştır, üçüncü durumda verimde % 28 iyileşme sağlanırken ağırlık % 3 azalmıştır ve dördüncü durumda verimde % 51 iyileşme sağlanırken ağırlık % 13 azalmıştır.

Tablo 2. Giriş tasarım parametreleri (Input design parameters)

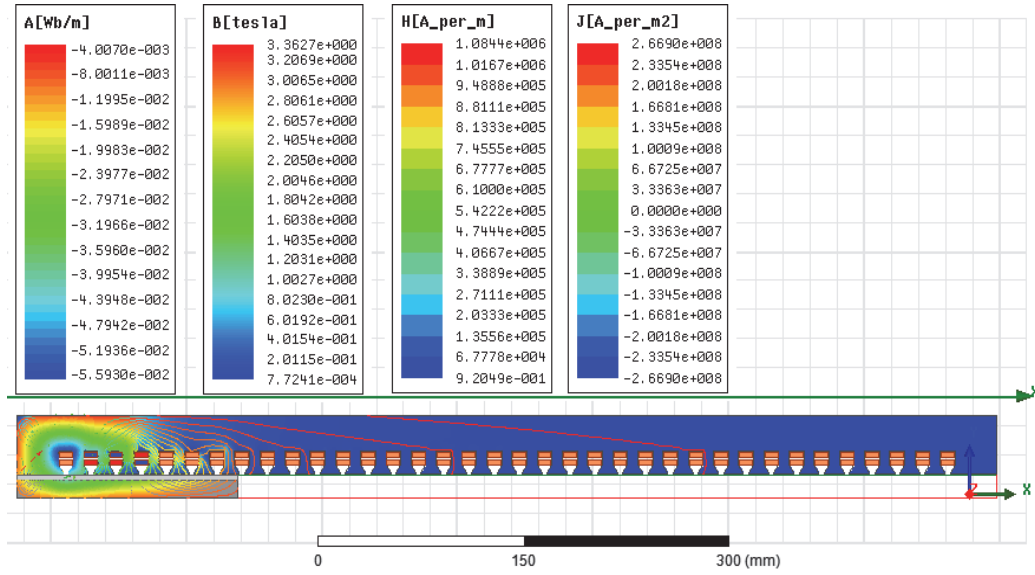
Giriş Tasarım Parametresi ve Birimi	Değer
Alüminyum Kalınlığı (metre)	0,003
Faz sayısı	3
Hat Gerilimi (Volt)	380
Oluk başına/Kutup başına/Faz sayısı	1
Çalışma frekansı (Hz)	50
Kutup sayısı	4
Kayma değeri	0.11
Rotor hızı (metre/saniye)	6 m/s
Stator genişliği (metre)	0,111
İtme kuvveti (Newton)	410 N
Oluk doluluk oranı	%55
Çalışma sıcaklığı C°	60 C°
Yığın faktörü	0,93
Stator Boyunduruk akı yoğunluğu (Tesla)	1,1 T
Stator dış akı yoğunluğu (Tesla)	1,5 T

Tablo 3'de ki dördüncü durumda motor boyutu geometrik değerleri kullanılarak yapılan iki boyutlu sonlu elemanlar analizinde nüve ve reaksiyon plakası üzerindeki manyetik akı yoğunluğu, manyetik alan şiddeti ve enerjili sargılardaki hacim akım yoğunlukları analiz edilmiştir.

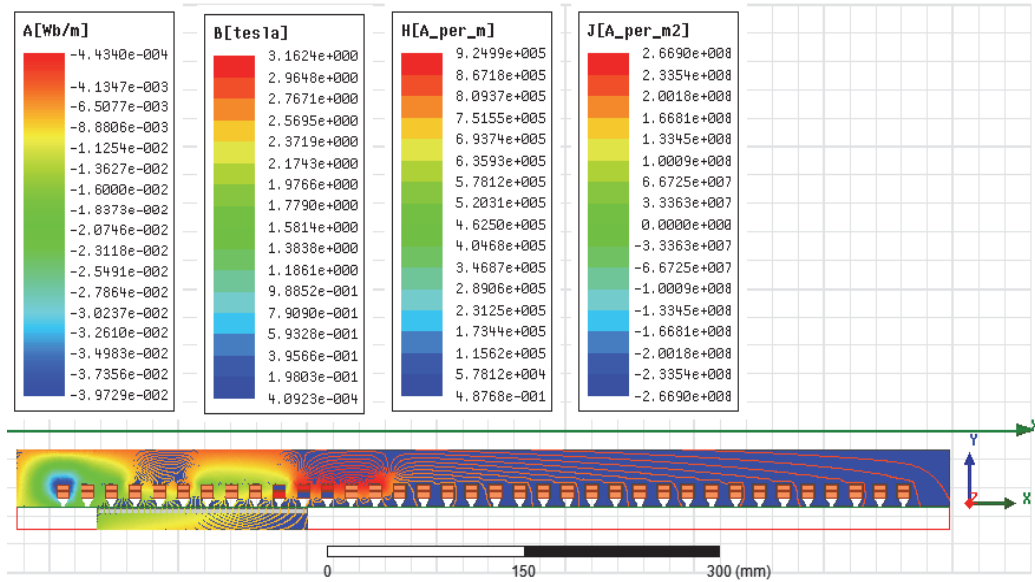
Şekil 4 ve 5'da tasarlanan fırlatma sisteminin iki boyutlu sonlu elemanlar analizine ait reaksiyon plakaları farklı pozisyondayken durumları gösterilmektedir. Bu analizler sayesinde motor üretilmeden reaksiyon plakasının farklı pozisyonlardaki manyetik parametrelerin değişimi gözlenebilmektedir. Bu sayede analitik çözümlerde

Tablo 3. Optimizasyon sonuçları (Optimization results)

Çıkış Parametreleri	$M_1=1, M_2=M_3=0$		$M_1=0, M_2=M_3=1$		$M_1=M_2=0, M_3=1$		$M_1=M_2=M_3=1$	
	1.Durum		2.Durum		3.Durum		4.Durum	
	İlk değer	Son değer	İlk değer	Son değer	İlk değer	Son değer	İlk değer	Son değer
Kutup adımı (m)	0,0606 m	0,0606 m	0,0606 m	0,0585 m	0,0606 m	0,0585 m	0,0606 m	0,0601 m
Oluk adımı (m)	0,0215 m	0,0215 m	0,0215 m	0,0215 m	0,0215 m	0,0215 m	0,0215 m	0,0215 m
Stator uzunluğu (m)	0,4646 m	0,4646 m	0,4646 m	0,4444 m	0,4646 m	0,4444 m	0,4646 m	0,4545 m
Oluk genişliği (m)	0,0080 m	0,0080 m	0,0080 m	0,0079 m	0,0080 m	0,0079 m	0,0080 m	0,0073 m
Diş genişliği (m)	0,0122 m	0,0120 m	0,0122 m	0,0120 m	0,0122 m	0,0120 m	0,0122 m	0,0111 m
Oluk derinliği (m)	0,0094 m	0,0091 m	0,0094 m	0,0061 m	0,0094 m	0,0061 m	0,0094 m	0,0068 m
İtme kuvveti (N)	477,52 N	664,32 N	477,52 N	532,13 N	477,52 N	732,13 N	477,52 N	444,34 N
Nüve boyunduruk yüksekliği (m)	0,0108 m	0,0088 m	0,0108 m	0,0088 m	0,0108 m	0,0098 m	0,0108 m	0,0096 m
Çıkış gücü (Watt)	1165,2 W	2175,4 W	1165,2 W	1989,4 W	1165,2 W	1089,4 W	1165,2 W	2011,3 W
Giriş gücü (Watt)	4370,3 W	4370,3 W	4370,3 W	4370,3 W	4370,3 W	3370,3 W	4370,3 W	3970,3 W
Verim %*CosΦ	0,2665	0,4977	0,2665	0,4551	0,2665	0,3231	0,2665	0,5065
Sargı bakır ağırlığı (kg)	40,77 kg	40,13 kg	40,77 kg	33,13 kg	40,77 kg	38,13 kg	40,77 kg	32,13 kg
Nüve ağırlığı (kg)	43,1 kg	42,1 kg	43,1 kg	42,1 kg	43,1 kg	42,1 kg	43,1 kg	42,22 kg
Toplam ağırlık (kg)	83,87 kg	82,23 kg	83,87 kg	75,23 kg	83,87 kg	80,23 kg	83,87 kg	74,35 kg



Şekil 4. Reaksiyon plakası ilk pozisyondayken lineer indüksiyon motor iki boyutlu sonlu elemanlar analizi manyetik akı yoğunluğu, manyetik akı çizgileri, manyetik alan şiddeti ve hacim akım yoğunluğu gösterimi. (Linear induction motor two dimensional finite element analysis magnetic flux density, magnetic flux lines, magnetic field intensity and volume current density view at reaction plate first position)



Şekil 5. Reaksiyon plakası ikinci pozisyondayken lineer indüksiyon motor iki boyutlu sonlu elemanlar analizi manyetik akı yoğunluğu, manyetik akı çizgileri, manyetik alan şiddeti ve hacim akım yoğunluğu gösterimi. (Linear induction motor two dimensional finite element analysis magnetic flux density, magnetic flux lines, magnetic field intensity and volume current density view at reaction plate second position)

görsel olarak göremediğimiz uç etkisi gibi faktörler görülebilmektedir. Bu durumlara bağlı olarak üretimde kullanılacak vida, kaynak gibi lazım olacak işlemlere motorun geometrik yapısı üzerinde akı dağılımını en az etkileyen noktalar seçilebilmektedir. Analiz sonuçları ile matlab tabanlı geliştirilen yazılımın optimizasyon sonucunda elde edilen değerler birbirlerini doğrulamıştır. İki boyutlu statik manyetik analiz sonucu reaksiyon plakası itme kuvveti 438,58 N ve Tablo 3'de dördüncü durumda optimizasyon sonucu elde edilen itme kuvveti değeri 444,34 N'dur % 0,0129'luk bir hata payıyla birbirlerini doğrulamaktadır. Hem sonlu elemanlar analizinde

hem de geliştirilen yazılımda hata payı % 0.01 alındığı için sonuçlarda ki hata payının az olduğu söylenebilir.

5. SONUÇLAR (RESULTS)

Tasarlanan motora ait giriş tasarım parametreleri Tablo 4'de ve bu giriş parametrelerine bağlı tasarım sonuç değerleri sırasıyla Tablo 5'de sunulmuştur. Geliştirilen tasarım yazılımında kullanılan tasarım boyut eşitlikleri çalışmada sunulmuştur. Ayrıca geliştirilen yazılımda kullanılan algoritma ile motor geometrik boyutları iteratif olarak hesaplanmaktadır.

Tablo 4. Giriş tasarım parametreleri (Input design parameters)

No	Giriş Tasarım Parametresi ve Birimi	Tasarım-1	Tasarım-2	Tasarım-3
1	Alüminyum Kalınlığı (metre)	0,0035	0,003	0,0025
2	Faz sayısı	3	3	3
3	Hat Gerilimi (Volt)	380	380	380
4	Oluk başına/Kutup başına/Faz sayısı	1	1	1
5	Çalışma frekansı (Hz)	50	50	50
6	Kutup sayısı	4	6	8
7	Kayma değeri	0.1	0.01	0.01
8	Rotor hızı (metre/saniye)	6 m/s	6 m/s	6 m/s
9	Stator genişliği (metre)	0,167	0,167	0,167
10	İtme kuvveti (Newton)	410 N	410 N	410 N
11	Oluk doluluk oranı	%55	%55	%55
12	Çalışma sıcaklığı C°	60 C°	60 C°	60 C°
13	Yığın faktörü	0,93	0,93	0,93
14	Stator Boyunduruk akı yoğunluğu (Tesla)	1,1 T	1,1 T	1,1 T
15	Stator dış akı yoğunluğu (Tesla)	1,5 T	1,5 T	1,5 T

6. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, insansız hava araçları için mekanik fırlatma sistemlerine alternatif olarak elektromanyetik bir fırlatıcı sistemde kullanılmak üzere tek taraflı lineer indüksiyon motor tasarlanmış ve tasarım yazılımı geliştirilmiştir. Lineer elektromanyetik fırlatıcılarda kullanılan lineer indüksiyon motorları için matlab tabanlı iteratif tasarım ve optimizasyon yazılımı geliştirilmiştir. Bu yazılımda kullanılmak üzere üç farklı amaç fonksiyonu tanımlanmış ve bu amaç fonksiyonları her biri ayrı dört durumda incelenmiştir; elde edilen sonuçlar çalışmada sunulmuştur. Geliştirilen iteratif tasarım yazılımından elde edilen değerler optimizasyon ara yüzüyle ihtiyaca göre kullanılacak amaç fonksiyonlarına istenilen kısıtlar konularak tekrar hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, sonlu elemanlar analizi ortamında motorun iki boyutlu analiz modelini oluşturmak için kullanılmıştır. Yapılan analiz sonuçlarıyla geliştirilen programın hesaplama sonuçları çok az hata payları ile uyum içindedir. Hali hazırda endüstride ve doğrusal kuvvetin ihtiyaç duyulduğu alanlarda sıklıkla kullanılan lineer indüksiyon motorları için matlab tabanlı iteratif tasarım ve optimizasyon yazılımı geliştirilmiştir. Çalışmada tanımlanan amaç fonksiyonları diğer elektromanyetik aygıtların boyut optimizasyon problemlerinin çözümünde de kendi çözüm domeni içinde kullanılabilir.

Tablo 5. Tasarlanan motora ait tasarım sonuç değerleri (Design result values of designed motor)

No	Tasarım Sonuç Parametresi ve Birimi	Tasarım-1		Tasarım-2		Tasarım-3	
		Maks.	Min.	Maks.	Min.	Maks.	Min.
1							
2	Kutup adımı (metre)	0,0667	0,0667	0,0606	0,0606	0,0716	0,0716
3	Oluk adımı (metre)	0,0215	0,0215	0,0215	0,0215	0,0232	0,0232
4	Stator uzunluğu (metre)	0,3667	0,3667	0,4646	0,4646	0,5858	0,5858
5	Oluk genişliği (metre)	0,0080	0,0048	0,0080	0,0048	0,0080	0,0048
6	Diş genişliği (metre)	0,0046	0,0026	0,0122	0,0154	0,0132	0,0164
7	Oluk derinliği (metre)	0,0049	0,0045	0,0094	0,0031	0,0098	0,0033
8	Hesaplanan itme kuvveti (Newton)	702,85	596,89	477,52	423,21	318,13	286,91 N
9	Nüve boyunduruk yüksekliği (metre)	0,0142	0,0047	0,0108	0,0102	0,0107	0,079 m
10	Çıkış gücü (Watt)	4217,1	2457,55	2865,2	2539,3	1908,8	1721,5 W
11	Giriş gücü (Watt)	4723,7	4016,5	3570,3	3195,1	2440,9	2216,1 W
12	Verim %	0,892	0,611	0,802	0,794	0,781	0,776
13	Sargı bakır ağırlığı (kg)	58,11	29,88	48,77	12,92	37,8	22,09 kg
14	Nüve ağırlığı (kg)	156,71	145	55,1	55,1	73,47	61,41 kg
15	Toplam ağırlık (kg)	203,11	186,59	103,87	68,02	111,27	83,50 kg

Ayrıca yazılımda kullanılan maliyet fonksiyonu sayesinde sistemin yaklaşık maliyeti hesaplanabilmektedir. Çalışmada önerilen tasarım yazılımının uygulaması çok sayıda ön lineer indüksiyon motor tasarımında gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar göstermiştir ki Tasarım-2 diğer tasarımlara göre ağırlık ve verim olarak daha iyi değerlere sahiptir. Elde edilen tasarım değerleri sisteme ait geometrik boyut değerleri sunmaktadır. Ancak unutulmamalıdır ki bu değerler üretimde direk kullanılmamalıdır. Bu değerler en iyileştirme işleminden sonra üretim için kullanılabilir hale gelecektir. Bunun temel sebebi sonuçların tek bir değer değil bir aralık içinde tasarım sonuçları kümesi şeklinde elde edilmesinden kaynaklanmaktadır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Gürdal, O, "Electromagnetic Field Theory", **Nobel Press**, Ankara, 2000.
- Gürdal, O, "Design of Electrical Machines", **Nobel&Atlas Press**, Ankara, 2001.
- Westinghouse Engineer, "A wound rotor, 1400 feet long", 160-161, 1946.
- Jones, M.F, "Three phase linear motor catapult system," **U.S.Patent 2404984**, July 30, 1946.
- Yamamura, S, "Theories Of The Linear, Induction Motor", **Wiley Press**, New York, 1979.
- Boldea, I, ve Syed A. N, "Linear Electric Actuators and Generators", **Cambridge University Press**.

7. Boldea, I, ve Syed A. N, "The Induction Machines Design Handbook Second Edition", **Taylor and Francis Group**, 2010.
8. Adamiak, K. Ananthasivam, K. Dawson, G.E. Eastham, A.R, Gieras, J.F, "The causes and consequences of phase unbalance in single-sided linear induction motors", **IEEE Transactions on Magnetics** , Vol 24 , No 6 , 3223 – 3233, 1988 .
9. Pai, R.M, Boldea, I, Nasar, S.A, "A complete equivalent circuit of a linear induction motor with sheet secondary", **IEEE Transactions on Magnetics**, Vol 24, No 1, 639 – 654, 1988.
10. Laithwaite, E.R, "Adapting a linear induction motor for the acceleration of large masses to high velocities", **IEE Proceedings-Electric Power Applications**, Vol 142, No 4, 262 – 268, 1995.
11. Faiz, J, Jafari, H, "Accurate modelling of single-sided linear induction motor", **IEEE International Magnetics Conference**, Vol 18, No 21, 1999.
12. Topaloğlu, İ, Gürdal, O, "Optimization Of Salient Pole Synchronous Hydro Generators Using Sequential Mixed Integer Nonlinear Programming Method at Transient and Dynamic Analysis Conditions", **J. Fac. Eng. Archit. Gazi Univ.**, Vol 25, No 2, 355-361, 2010.
13. Topaloğlu, İ, Gürdal, O, "A Second Order Sensitivity Analysis Based Numerical Approach Developed For Dimension Optimization, In Electric Machine Design by Electromagnetic Design Software" **J. Fac. Eng. Archit. Gazi Univ.**, Vol 25, No 2, 363-369, 2010.
14. Fair, H.D, "Electromagnetic Launch Science and Technology in the United States Enters a New Area", **IEEE Transaction on Magnetics**, Vol 41, No 1, 158–164, 2005.
15. Bushway, R. R, "Electromagnetic aircraft launch system development considerations" **IEEE Transactions on Magnetics**, Vol 37, No 1, 52-54, 2001.
16. Fair, H.D, "The science and technology of electric launch" **IEEE Transactions on Magnetics**, Vol 37, No 1, 25-32, 2001.
17. Doyle, M.R, Samuel, D.J., Conway, T. ve Kilmowski, R.R., "Electromagnetic aircraft launch system-emals" **IEEE Transactions on Magnetics**, Vol 31, No 1, 528-533, 1995.
18. Sung, J. H. ve Nam, K. "A new approach to vector control for a linear induction motor considering end effects," **IEEE IAS Annu. Meeting**, 2284–2289, 1999.
19. Duncan, J., "Linear induction motor-Equivalent circuit model," **Proc. Inst. Elec. Eng.**, Vol 130, No 1, Part B, 1983.
20. Bazghaleh, A. Z., Naghashan, M. R., ve Meshkatoddini, M. R., "Optimum Design of Single-Sided Linear Induction Motors for Improved Motor Performance", **IEEE Transactions on Magnetics**, Vol. 46, NO 11, 3939-3947, 2010.
21. Kim, D.H, Ship, K. S, ve Sykulski, J. K, "Applying Continuum Design Sensitivity Analysis Combined With Standard EM Software to Shape Optimization in Magnetostatic Problems" **IEEE Transactions on Magnetics**, Vol 40, No. 2, 1156-1159, 2004.
22. Im, D., Park, S. ve Park, D., "Optimum design of single-sided linear induction motor using the neural networks and finite element method," in **Int. Joint Conf. Neural Networks**, Vol 3, 2811–2814,, 1993.
23. Im, D. Park, S. ve Im, J., "Design of single-sided linear induction motor sing finite element metod and SUMT," **IEEE Trans. Magn.**, Vol 29, No. 2, 1762–1766, 1993.
24. Creppe, R. C., Ulson, J. A. C., ve Rodrigues, J. F., "Influence of design parameters on linear induction motor end effect," **IEEE Energy Convers.**, Vol 23, no. 2, 3270–3272, 2008.
25. Ryu, J. S, Yao, Y, Koh, C.S, "Optimal Shape Design of 3-D Nonlinear Electromagnetic Devices Using Parameterized Design Sensitivity Analysis", **IEEE Transactions on Magnetics**, Vol 41, No 5, 1792-1795, 2005.
26. Yokoi, T. ve Ebihara, D. "An optimal design technique for high speed mathematical programming method," **IEEE Trans. Magn.**, Vol 25, No 5, 3596–3598, 1989.
27. Isfahani, A. H., Ebrahimi, B. M. ve Lesani, H., "Design optimization of low-speed single-sided linear induction motor for efficiency and power factor," **IEEE Trans. Magn.**, Vol 44, No. 2, 266–272, 2008.
28. Jian, W. X., Yongchang, G. Z., Yaohua Z., Wang, L. Y., ve Guo, Y., "An Improved Equivalent Circuit Model of a Single-Sided Linear Induction Motor". **IEEE Transactions on Mag.** Vol 59, No 5, 2277-2282, 2010 .
29. Jian, W. X., Youguang, Z, Wang, G. Y, Longcheng, Y, Z, "Equivalent circuits for single-sided linear induction motors" **Energy Conversion Congress and Exposition, 2009**, 1288-1293, 2009.
30. Stumberger, G, Aydemir M.T, Zarko, D, Lipo, T.A, "Design and Comparison of Linear Synchronous Motor and Linear Induction Motor for Electromagnetic Aircraft Launch Systems", **IEEE International Electric Machines and Drives Conference**, Vol 1, 494-500, 2003.
31. Stumberger, G, Zarko, D, Aydemir M.T, Lipo, T.A, "Sizing Design of a Superconductor Bulk Permanent Magnet Linear Synchronous Motor for Electromagnetic Aircraft Launch Systems", **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, Vol 14, No 1, 54-62, 2004.
32. Gieras, J.F, "Linear Induction Drives", **Oxford University Press**, New York, 1994.
33. Plodpradistha, W, "Study of Tubular Linear Induction Motor for Pneumatic Capsule Pipeline system", **Ph.D. Dissertation, Department of**

- Electrical Engineering, University of Missouri, Columbia, 2002.**
34. Mirsalim, M, Doroudi, A, Moghani, J.S, "Obtaining the Operating Characteristics of Linear Induction Motors: A New Approach", **IEEE Transactions on Magnetic**, Vol 38, 1365-1370, 2002.
 35. Isfahani, A.H, Ebrahimi, B.M, Lesani, H, "Design Optimization of a Low-Speed Single-Sided Linear Induction Motor for Improved Efficiency and Power Factor", **IEEE Transactions on Magnetic**, Vol 44, 266-272, 2008.
 36. Still, A, ve Sisikind, C.S, "Elements of Electrical Machine Design", **McGraw-Hill Book Company**, New York, 1954.
 37. Kim, D.H, Ship, K. S, ve Sykulski, J. K, "Applying Continuum Design Sensitivity Analysis Combined With Standard EM Software to Shape Optimization in Magnetostatic Problems" **IEEE Transactions on Magnetics**, Vol 40, No. 2, 1156—1159, 2004.
 38. Ryu, J. S, Yao, Y, Koh, C.S, "Optimal Shape Design of 3-D Nonlinear Electromagnetic Devices Using Parameterized Design Sensitivity Analysis", **IEEE Transactions on Magnetics**, Vol 41, No 5, 1792-1795, 2005.
 39. Fujii, N. "Second Order Sensitivity Analysis for a Class of Shape Optimization Problems", **IEEE Transactions on Magnetics**, 1176-1178, 1994.
 40. Pai, R.M, Boldea, I, Nasar, S.A, "A complete equivalent circuit of a linear induction motor with sheet secondary", **IEEE Transactions on Magnetics**, Vol 24, No 1, 639 – 654, 1988.
 41. Gerçek, A. S, "Analytical design software for single-sided linear induction motor" **PhD Thesis, Electrical and Electronic Engineering, University of Gaziantep**, 2009.
 42. Göynük, Y. "Development of an electrical machines analysis And optimum design software package" **PhD Thesis, Electrical and Electronic Engineering, Middle East Technical University**, 2008.

