



Design and optimization of in-wheel asynchronous motor for electric vehicle

Uğur Demir*^{ID}, Mustafa Caner Aküner^{ID}

Marmara University, Mechatronics Engineering Department, Goztepe, Kadıkoy, Istanbul, 34722, Turkey

Highlights:

- Calculation of the desired motor requirement for an electric vehicle
- Prevention of the long analysis duration by using desing of experiment
- Optimization by defining the critical motor design parameters

Keywords:

- Electrical vehicle
- Vehicle dynamic
- Asynchronous motor
- Taguchi method

Article Info:

Received: 11.04.2017

Accepted: 06.03.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.416448

Acknowledgement:

This work was supported by Marmara University Scientific Research Projects Commission (Project No: FEN-C-DRP-090217-0057) and Coşkunöz Holding A.Ş.

Correspondence:

Author: Uğur Demir
e-mail: ugur-demir@outlook.com
phone: +90 534 478 7370

Graphical/Tabular Abstract

In this study, electrical vehicle (EV) technologies, vehicle dynamic, the parameters of asynchronous motor were investigated. The performance requirements for a passenger car were calculated from the equations of vehicle dynamic. The performance characteristics of asynchronous motor were evaluated. To achieve the desired motor performance requirements, trivial parameters for asynchronous motor were eliminated by Taguchi's method. After the defining of critical parameters for asynchronous motor, the parameters of asynchronous motor were optimized. As a result, using proposed method which is given in Figure A (Taguchi method and related standard deviation value) has provided to avoid waste of time from long analysis time.

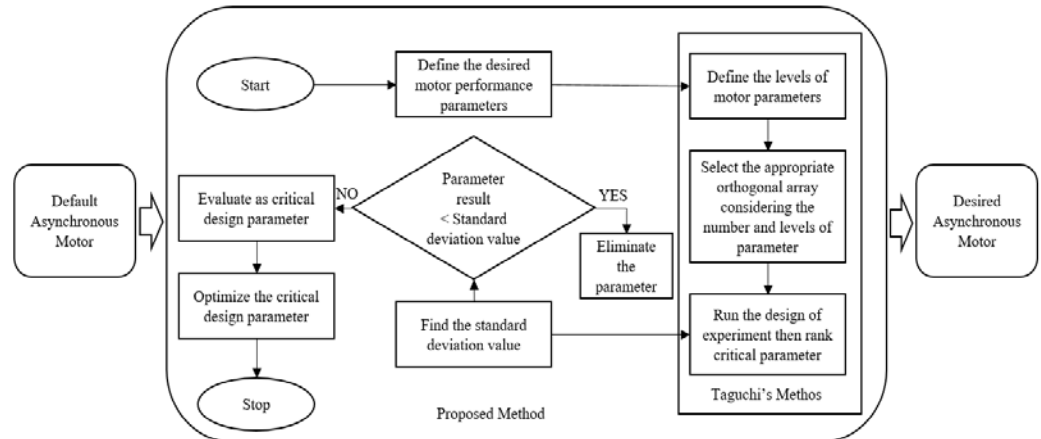


Figure A. The diagram of proposed method

Purpose: The purpose of this study is to modify the required design parameters to ensure that a default asynchronous motor can meet the desired engine performance requirements.

Theory and Methods:

By using the Taguchi method and the related standard deviation value, the parameters of the critical motor design are determined. Then, considering the critical design parameters, the default asynchronous motor is optimized to develop the desired electric motor.

Results:

The determination of 6 critical design parameters and the optimization of the desired engine were carried out by the proposed method.

Conclusion:

The long analysis duration and time wasting for all the parameters of the asynchronous motor were prevented by using proposed method.



Elektrikli bir araç için tekerlek içi asenkron motorun tasarım ve optimizasyonu

Uğur Demir*^{ID}, Mustafa Caner Aküner^{ID}

Marmara Üniversitesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Göztepe Kampüsü, Kadıköy, İstanbul, 34722, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Elektrikli bir araç için ihtiyaç duyulan motor gereksinimlerinin hesaplanması
- Deneysel tasarım yöntemi ile uzun analiz zamanlarının önüne geçilmesi
- Kritik motor tasarım parametrelerinin belirlenerek optimizasyon sağlanması

Makale Bilgileri

Geliş: 11.04.2017

Kabul: 06.03.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.416448

Anahtar Kelimeler:

Elektrikli araçlar,
araç dinamiği,
asenكرون motor,
Taguchi metodu

ÖZET

Bu çalışmada elektrikli araç (EA) teknolojileri, araç dinamiği ve asenkron motor parametreleri incelenmiştir. Araç dinamiği üzerine yapılan incelemelerden, binek bir araç için motor performans gereksinimleri hesaplanmıştır. Asenkron motor performans karakteristiği ve tasarım parametreleri ele alınarak değerlendirilmiştir. Arzu edilen motor performans gereksinimlerini elde etmek için, Taguchi metodu ile asenkron motor için önem derecesi düşük parametreler elenmiştir. Asenkron motor için kritik parametrelerin belirlenmesinin ardından motor parametreleri optimize edilerek tasarım tamamlanmıştır. Sonuç olarak Taguchi metodu ve belirlenen bir standart sapma değerini kullanarak asenkron motor tasarımında önem derecesi düşük parametrelerin elenmesiyle uzun analiz sürelerinden kaynaklanan zaman israfının önüne geçilmeye çalışılmıştır.

Design and optimization of in-wheel asynchronous motor for electric vehicle

H I G H L I G H T S

- Calculation of the desired motor requirement for an electric vehicle
- Prevention of the long analysis duration by using desing of experiment
- Optimization by defining the critical motor design parameters

Article Info

Received: 11.04.2017

Accepted: 06.03.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.416448

Keywords:

Electrical vehicle,
vehicle dynamic,
asynchronous motor,
Taguchi method

ABSTRACT

In this study, electrical vehicle (EV) technologies, vehicle dynamic, the parameters of asynchronous motor were investigated. The performance requirements for a passenger car were calculated from the equations of vehicle dynamic. The performance characteristics of asynchronous motor were evaluated. To achieve the desired motor performance requirements, trivial parameters for asynchronous motor were eliminated by Taguchi's method. After the defining of critical parameters for asynchronous motor, the parameters of asynchronous motor were optimized. As a result, using Taguchi method and related standard deviation value have provided to avoid waste of time from long analysis time.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: ugur-demir@outlook.com / Tel: +90 534 478 7370

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son zamanlarda tüm dünyada tartışılan ana problemlerin arkasında küresel ısınma olduğu ortaya konulmaktadır. Araştırmalar, küresel ısınmaya fosil yakıt tüketiminin de neden olduğunu göstermiştir. Buna bağlı olarak fosil yakıt fiyatları da yıldan yıla arttığı görülmektedir [1]. Küresel ısınma ve enerji krizleri, elektrikli araç teknolojilerini geliştirme ihtiyacını doğurmuştur. 2016'da, kurumsal ortalama yakıt tasarrufu standartlarının aktivasyonu ile elektrikli araçlar için düşünülen küresel talebin çok kuvvetli bir şekilde büyüyeceği öngörülmektedir [2]. CO² (karbondioksit) yayılımının azaltılarak, küresel ısınmayı önleme gayretlerinin bir parçası olarak, elektrik motorlarının kullanımı bir çözüm olarak kabul edilmiştir [3]. Günümüz dünyasında enerji ve çevre kavramlarına bir çözüm sunması için, elektrikli araçlar oldukça ilgi çekmektedir. Elektrik motorlu çekiş sistemleri, geniş moment-hız özelliği, yüksek güç yoğunluğu ve yüksek enerji verimliliği sunmaktadır [4]. Elektrikli araçlar, hem teknik hem de ekonomik problemlerin tamamının çözümüne katkı sağlayacak bir çalışmadır. Kuşkusuz ki, elektrikli araçlar, geleceğin taşıma sektörünün bir parçası olacaktır. Fakat elektrikli araçların çoğu, sektördeki araçların yerini alması için hala büyük bir çaba sarf etmektedirler [5].

Yakıt verimi ve çevre dostu ürün talepleri, temiz enerji ve enerji tasarrufuna olan ilgiyi arttırmaktadır. Bu kapsamda, hibrit elektrikli araçlar gereksinimleri karşılamak için uygulanabilir bir çözüm olarak ortaya çıkmaktadırlar. Hibrit araçlar için birçok güç aktarım konfigürasyonu vardır. Hibrit araçların performansı, güç kaynağının entegrasyonu ve güç aktarma sisteminin tasarımına bağlıdır [6]. Yakıt ekonomisini iyileştirmek ve CO² yayılımını düşürme gereksinimleri ile birlikte, elektrikli ve hibrit elektrikli araçlar büyük rağbet görmüştür [7]. Hibrit ve elektrikli araçların artan popülaritelerinden dolayı, otomotiv endüstrisinde, elektrik motorlu çekiş sistemleri yaygınlaşmaya başlamıştır [8]. Yeni trendler, mobil iş makineleri, ağır taşımacılık ve binek araçlar için elektrik motorlu çekiş sistemlerine yönelmektedir [9]. Enerji koruma ve yönetimi, daima sınırlı güç kaynağına sahip elektrikli araçlar için kritik bir konudur. Enerji kaybı, uygun motor tasarımı, üretimi, en uygun sürüş teknikleri işlem verimi ile minimize edilebilir. Fakat başlangıç için sıfır hızda maksimum tork ihtiyacı genellikle gereklidir. Dolayısıyla,

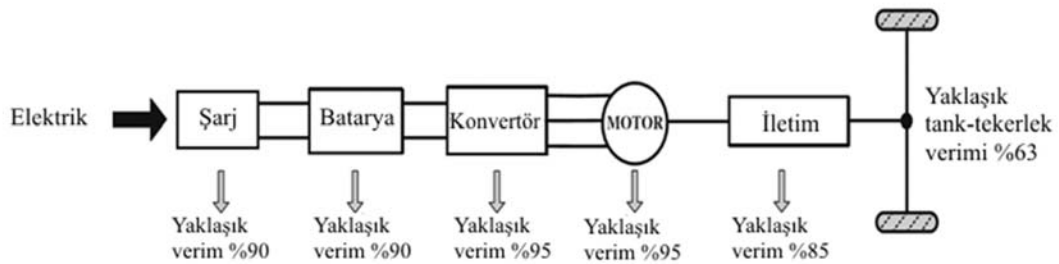
amper başına düşen maksimum tork, akım sürüş tekniğinin önemli bir tasarım parametresidir. Yüksek hızlı motorlar için, dolaylı tahrikli mekanizmaları, iletim dişlileri ya da mekanik diferansiyel kullanılır. Bu motorlar genellikle, akım harmonikleri ya da tork relüktansı ve vuruş momentinden kaynaklanan, tork dalgalanmaları minimize edilmiş ve verimliliği maksimize edilmiş olarak tasarlanırlar. Doğrudan tahrikli tekerlek içi motorlar ise mekanik hız düşürme problemlerine sahip değildir, dişli gerektirmez. Düşük hızlarda yeterli tork üretebilir. Bu motorlar çekiş ya da tork motoru olarak sınıflandırılabilirler. Bu elektrik motorları aynı zamanda, maksimum tork ve minimum ohmik kayıp olacak şekilde tasarlanırlar [10]. Enerji ve çevre kavramları, alternatif enerji kaynaklarına yeteri kadar ilgi duyulması için hükümetleri bu konuda ilgiye itiyor. Bu kapsamda temiz ve yenilenebilir enerji konusunda büyük bir ilgi oluşmuştur. Otomotiv endüstrisi, hibrit, benzinli ve elektrikli araç teknolojilerine, söz konusu sorunları azaltmak için yatırım yapıyor. General Motor (GM) bu alternatif araçları geliştirmek için birçok program yürütmektedir. Menzili artırılmış araç konseptini de ilk defa GM tanıtmıştır. Bu araç yaklaşık olarak 60 km menzile sahiptir. GM Chevrolet Volt ilk endüstrileştirilmiş menzili uzatılmış araç unvanına sahiptir [11].

1.1. Elektrikli Araç Teknolojileri (Electric Vehicle Technology)

CO² yayılımının azaltılması, hava kalitesinin iyileştirilmesi, benzin tüketim oranının düşürülmesi için geleceğin en uygulanabilir araç seçeneği olarak elektrikli araçlar görülmektedir. Temel olarak, elektrikli bir aracı kullanma hissi geleneksel içten yanmalı motorlu bir araç ile aynıdır. Elektrikli araç teknolojileri temel anlamda 3 ana grupta toplanabilir. Bunlar; EA (elektrikli araçlar), HEA (hibrit elektrikli araçlar) ve HHEA (harici olarak şarj edilebilir elektrikli araçlar) [12].

1.1.1. EA teknolojisi (EV technology)

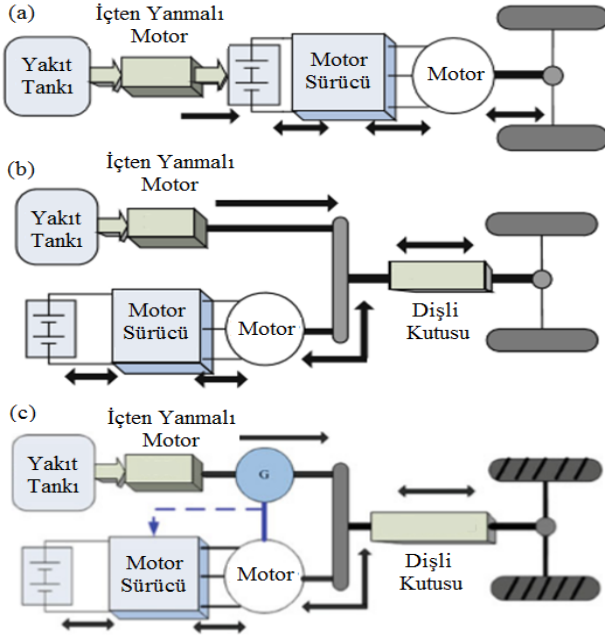
Bu teknoloji, şase üzerinde taşınan bataryanın elektrik enerji depolama kabiliyetinden yararlanarak, bu enerjinin kullanımı ile tarif edilebilir. Batarya yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanabilir. Sürüş anında enerji depolayıp elektrik motorun sürebilir. Elektrikli araçlar %90 a kadar verim sağlayabilir. EA teknolojisinin şematik ve teorik akış zinciri Şekil 1'de gösterilmiştir [12].



Şekil 1. EA teknolojisi bağlantı yapısı (The schematic structure of EV technology) [12]

1.1.2. HEA teknolojisi (HEV technology)

Geleneksel araçlar ile kıyaslandığı zaman, içten yanmalı motor ile entegrasyonu sağlanmış bir elektrik motoru kombinasyonuna sahip olan HEA teknolojisi daha fazla yakıt verimi sağlar. Bu kombinasyona sahip olan HEA rejeneratif fren enerjisi ile yeniden şarj edilip yakıt tüketimini azaltma ve optimize etme özelliklerine sahiptir. Temel anlamda güç aktarma kombinasyonları, HEA için 3 kategoride toplanabilir bunlar Seri-HEA, Paralel-HEA, Paralel-Seri-HEA. Şekil 2 de bu 3 tip çekiş sistemlerine ait gösterimler verilmiştir [12, 13].



Şekil 2. a) Seri-HEA b) Paralel-HEA c) Paralel-Seri-HEA çekiş sistemleri (The traction systems a) Serial-HEV b)Parallel-HEV c) Parallel-Serial-HEV) [12]

1.1.3. HHEA teknolojisi (PHEV technology)

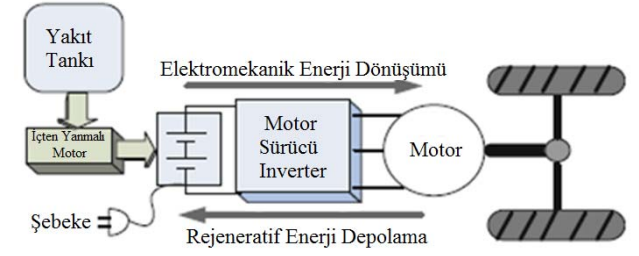
Son zamanlarda otomotiv endüstrisinde HHEA teknolojisi üzerine odaklanılmıştır. HHEA, hibrit bir elektrikli araçtır ve şebekeden şarj olabilir. Basit fonksiyonel bir değişiklik ile HHEA çoklu elektrik enerjisi değişimi ile petrol kullanarak çalışabilmektedir. Temel anlamda petrol elektrik enerjine dönüşmekte ve bu sayede güç aktarımı ile sürüş sağlanmaktadır. Şekil-3'de HHEA bağlantı yapısı gösterilmektedir [12].

1.1.4. Elektrikli araç teknolojilerinde kullanılan motor tipleri

(The electric motor types used for electrical vehicle technology)

Elektrikli araçlarda kullanılan elektrik motorlarından bazıları; DC motorlar, sabit mıknatıslı senkron motorlar, anahtarlamalı relüktans motorlar, sincap kafesli indüksiyon motorlarıdır. Bu motorların performansları, elektrik bataryaları, ekonomik performanslarına göre belirlenebilir.

Tablo 1'de elektrikli araçlarda kullanılan motorların avantaj ve dezavantajlarını gösterilmiştir [5, 14].



Şekil 3. HHEA Çekiş Sistemi (The traction system of PHEV)[12]

Elektrikli ve Hibrit elektrikli araçlarda kullanılan elektrik motorları uygulama alanına ve ihtiyaç duyulan gereksinime göre farklılık göstermektedir. Tablo 2' de endüstrileşmiş bazı marka ve modellere ait elektrik motoru ve yakıt bilgileri yer almaktadır [15]. Tablo 2'de gösterildiği gibi hibrit olmayan %100 elektrikli araçlar için ön görülen güç gereksinim, 70kW ile 125 kW arasındadır. Bununla beraber maksimum hız limitleri 120km/h ile 0-50km/h hızlanma karakteristikleri 9 saniye civarındadır. %100 elektrikli araçlar ortalama kilometre başına 90-160Wh civarında enerji tüketimi göstermektedir [16, 17]. Tablo 2'de görüldüğü üzere EA teknolojisinde yer alan TESLA asenkron bir motor kullanılmaktadır. Menzili ise 365 km ile rakiplerine kıyasla öne geçmektedir. Tablo 1'de ise radyal akıllı asenkron (indüksiyon) motorunun ekonomik tarafı ağır basmaktadır. Asenkron motorlar düşük maliyetli üretim ve uzun bakım periyotları ile elektrikli araçlar için kullanımı kolaylaştıran bir yapıya sahiptirler

1.1.5. Türkiye pazarındaki binek otomobillerin incelenmesi (Investigation of the passenger cars in Turkey market)

Bu çalışmanın konusu tekerlek içi asenkron motor, OEM (Original Equipment Manufacturing) / Ana sanayi müşterilerine hizmet edeceği gibi aynı zamanda da sektörde var olan araçlar için de bir dönüşüm çözümü olması amaçlanmaktadır. Bu doğrultuda Türkiye pazarında en çok satılan binek araçlar incelenmeye alınmıştır. Bu araçlar üreticilerinin vermiş olduğu katalog değerleri üzerinden değerlendirilmiştir. Özellikle motor gücü, tork ve motor devri açısından ele alınmıştır. Bu parametreleri gösterimi Tablo 3'deki gibidir. Tablo 3'de gösterilen araç karakteristiklerinin binek bir araç için 80-95 kW arasında bir güç gereksinimi ile 3600-6000 RPM arasında bir devir ile tam yükte 150-320 N.m arasında tork ihtiyacı olduğu görülmektedir.

1.2. Araç Dinamiği ve Asenkron Motor Parametreleri (Vehicle Dynamic and Asynchronous Motor Parameters)

1.2.1. Araç dinamiği (Vehicle dynamic)

Yer araçları öncelikle tek bir yöne gitmek için tasarlandıkları için sadece tek boyuttaki yanal dinamikleri ele alınır. Yanal kuvvet, 5 kuvvet bileşenden oluşmaktadır. Bunlar

Tablo 1. Elektrikli araçlarda kullanılan elektrik motorlarının avantaj ve dezavantajları
(The advantages and disadvantages of electric motors used in electric vehicles) [5]

Teknik Özellikler	DC Motor	Asenkron Motor	Rotor Sargılı Senkron Motor	Sabit Miknatıslı Senkron Motor	Sabit Miknatıslı Senkron Motor	Anahtarlamalı Relüktans Motor
Alan Oryantasyonu	Radyal	Radyal	Radyal	Radyal	Eksenel	Radyal
Tork	+	-	-	++	++	+
Verim	-	-	(+/-)	++	++	+
Maksimum Hız	-	(+/-)	-	(+/-)	(+/-)	+
Soğuma	-	-	(+/-)	+	-	+
Alan Zayıflaması	+	+	+	(+/-)	(+/-)	(+/-)
Güvenilirlik	-	+	-	+	+	+
Ekonomik Potansiyel	+	++	-	-	(+/-)	+

Tablo 2. Endüstrileşmiş EA, HHEA ve HEA araç teknoloji özellikleri
(The vehicle technology features of Industrialized EV, PHEV and HEV) [15]

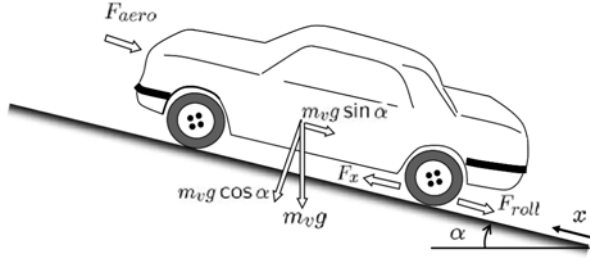
Araç	Kullanılan Motor Tipi, Gücü, Devri	ECE	Batarya
Honda insight Hibrit 2010	BPMDC, 9,7KW - 1500 RPM	1,3L	100,8 V, 5,75Ah
Ford Fusion Hibrit	PMSM, 79KW - 6500 RPM	2,5 L	275 V, NiMH
Toyota Prius Hibrit 2011	PMSM, 1,3KW - 1800 RPM	1,8 L	201,6 V, NiMH
Toyota Prius Hibrit 2012	PMSM, 2,5KW - 1200 RPM	1,8 L	Inverter DC link 600V
GM Volt Hibrit 2011	PMSM, 2,5KW - 1200 RPM	1,4 L	16KWh,45Ah,Li-Ion
Hyundai Sonata Hibrit 2011	PMSM, 30KW	2,4 L	Li-Polymer
Tesla Roadstar 2009 EV	Asenkron Motor, 215 KW	-	Li-Ion 375 V, 53 KW Menzil : 365 km
Mitsubishi İmiev	PMSM, 47KW	-	16KWh,Li-Ion, Menzil :160 km
Renault Fluence EV	PMSM, 70KW	-	22KWh,Li-Ion, Menzil :185 km
BMW Active EV	PMSM, 125KW	-	32KWh,Li-Ion, Menzil :151 km
Ford Focus BEV	PMSM, 107KW	-	23KWh,Li-Ion, Menzil :122 km

Tablo 3. Türkiye pazarındaki binek araçların teknik bilgiler
(The technical informations of the passenger cars in Turkey market)

Teknik Bilgiler	Fiat Egea Sedan		Renault Fluence		Ford Focus	
	1,6 16V MultiJet II (Dizel)	1,6 16V E-Torq AT6 (Benzin)	1,5 dCi (Dizel)	1,6 16V CVT (Benzin)	1,6 tdCi (Dizel)	1,6L Ti-VCT 125 PS (Benzin)
Güç (kW)	88	81	81	85	85	94
Beygir Gücü (HP)	120	110	110	115	115	125
Devir (RPM)	3750	5500	4000	6000	3600	6300
Tork (Nm)	320	152	240	156	270	159
	1750rpm	4500rpm	1750rpm	4000rpm	1750rpm	4000rpm
Maksimum Hız (km/h)	199	192	190	185	195	192
Tekerlek Aralığı (mm)	2637	2637	2702	2702	2648	2648
Uzunluk (mm)	4532	4532	4622	4622	4560	4560
Genişlik (mm)	1792	1792	1809	1809	2010	2010
Yükseklik (mm)	1497	1497	1479	1479	1492	1492
Boş Ağırlık (kg)	1270	1205	1389	1280	1336	1289

eylemsizlik kuvveti, araç çekiş kuvveti, hava sürtünmesi, tekerlek sürtünme direnci ve yerçekimi kuvvetidir. Şekil 4'de hareket eden bir araç için eğimli bir yolda yanıl kuvvet

bileşenleri gösterilmektedir. F_{aero} hava sürtünmesi, F_{roll} yuvalanma direnci ve F_x çekiş kuvvetini temsil etmektedir [17].



Şekil 4. Araç üzerindeki yanal kuvvetler
(The lateral forces on vehicle body) [16]

Buradaki m araç yolcuları dahil toplam araç kütlesi V_x araç hızı, α yolun eğim açısı, g yer çekimi ivmesidir. Buradan hareketle Eş. (1) denklemi ile bir aracın çekiş kuvveti ve kuvvet dinamikleri hesaplanabilir [17].

$$F_x = m_v \cdot \frac{d}{dt} \cdot V_x + F_{aero} + F_{roll} + m_v \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (1)$$

Buradaki α yolun eğimi, eğime ait yatay ve dikey uzunlukların yüzdesel derecesi ile tanımlanmaktadır. Bu tanımlama Eş. (2) ve Eş. (3) denklemleri ile gösterilmiştir. Burada yer alan d ve Δh dikey ve yata uzunlukları temsil etmektedir [17].

$$\%grade = \frac{\Delta h}{d} \cdot 100 \quad (2)$$

$$\alpha = \arctan \frac{\%grade}{100} \quad (3)$$

Aerodinamik kuvvet ise Eş. (4)' de yer alan eşitlik üzerinden hesaplanmaktadır. Burada yer alan ρ havanın kütle yoğunluğu, C_d aerodinamik sürtünme katsayısı, A_F aracın ön yüzey alanı ve V_{wind} rüzgâr hızıdır. Standart durumlarda çoğunlukla hava kütle yoğunluğu $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ 'e eşittir. C_d aerodinamik sürtünme katsayısı tipik olarak $0,2 < C_d < 0,4$ arasında bir değer almaktadır. Bununla beraber yolcu araçları için yaklaşık olarak $C_d \approx 0,3$ ve spor amaçlı araçlar için ise $C_d \approx 0,4$ alınmaktadır [17].

$$F_{aero} = \frac{\rho \cdot C_d \cdot A_F}{2} (V_x + V_{wind})^2 \quad (4)$$

Yuvarlanma direnci ise tekerleğin dönüş dinamiği ve yol ile yüzey alanı ilişkisine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Toplam yuvarlanma direnci ise Eş. (5) ile hesaplanmaktadır. Buradaki f_r yuvarlanma direnci

katsayısıdır. Radyal bir tekerleğin tipik olarak yuvarlanma katsayısı $0,009 \sim 0,015$ arasında bir değer alır [17].

$$F_{roll} = f_r \cdot m_v \cdot g \cdot \cos \alpha \quad (5)$$

1.2.2. Asenkron motor ve parametreleri (Asynchronous motor and its parameters)

İndüksiyon motorları iki kategoride sınıflandırılırlar. Bunlar; sincap kafes ve sargı rotordur. Sincap kafes de, sargıları yapılmış stator doğrudan kaynağa bağlanır, rotor sargısı ise uzunlamasına barlar ile rotorun dışına yerleştirilir ve barlar kısa devre çubuğu ile kısa devre edilir. Sargı Rotor ise rotor barları dışında sincap kafese benzer. Sargı Rotor da rotor sarımları izole edilerek yapılır. Şekil 5'de bir indüksiyon motoru gösterilmiştir [18].

İndüksiyon / Asenkron motorların faz girişlerine uygulanan gerilim, stator sarımlarından bir akım akmasına ve dolayısıyla bir manyetik alan oluşmasını sağlar. Bu manyetik alanın dönme hızı ise senkron hız olarak adlandırılır. Buradaki senkron hız uygulana faz gerilimin frekansı ile motor üzerindeki kutup sayısına bağlıdır. Dönen manyetik alan, rotor çubukları üzerinde bir gerilim indüklemektedir. Bu gerilim manyetik alanın hızına, manyetik akı yoğunluğuna, manyetik alandaki iletkenin (rotor çubuklarının) uzunluğuna bağlıdır. Burada rotor üzerinden akım rotor manyetik alanını doğurur. Dolayısıyla makine üzerinde indüklenen tork, stator ve rotorun oluşturduğu manyetik alanlara bağlıdır. Asenkron bir motorun eşdeğer devre modeli, bir transformatör gibi modellenerek çıkartılabilmektedir. Bir asenkron motora ait moment-hız eğrisi Şekil 6'de verilmiştir [19,20].

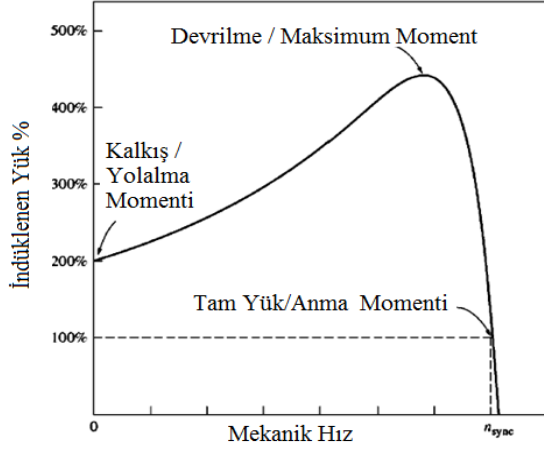
Asenkron bir motora ait kesit görüntüsü Şekil 7a ve oluk geometrisi Şekil 7b'de verilmiştir. Burada asenkron motor için stator iç ve dış çapları ile rotor çapı, hava aralığı mesafesi, rotor ve stator olukları ile shaft çapına ilişkin gösterimlere yer verilmiştir. Asenkron bir motor; makine, performans, stator ve rotor parametreleri ile tasarlanırlar. Makine parametrelerini, kutup sayısı, sürtünme-rüzgâr kayıpları ve kayıp faktörleri oluşturmaktadır. Performans parametreleri ise çıkış gücü, giriş gerilimi, çıkış devri ve uygulanan şebekenin frekansı belirler.

Stator parametreleri ise statorun iç-dış çapları, motor uzunluğu ile oluk sayısı belirlemektedir. Bunlarla beraber stator oluk geometrisi ve stator sargı parametreleri statoru oluşturan diğer öğelerdir. Rotor parametreleri de, stator



Şekil 5. Asenkron (indüksiyon) motor yapısı (The asynchronous (induction) motor structure) [18]

parametreleri ile benzerdir, rotor iç-dış çapları, motor uzunluğu, oluk sayısı, oluk geometrisi ve rotor sargı parametrelerinden oluşmaktadır.



Şekil 6. Asenkron motorun moment-hız karakteristiği
(The torque-speed characteristic of the asynchronous motor) [19]

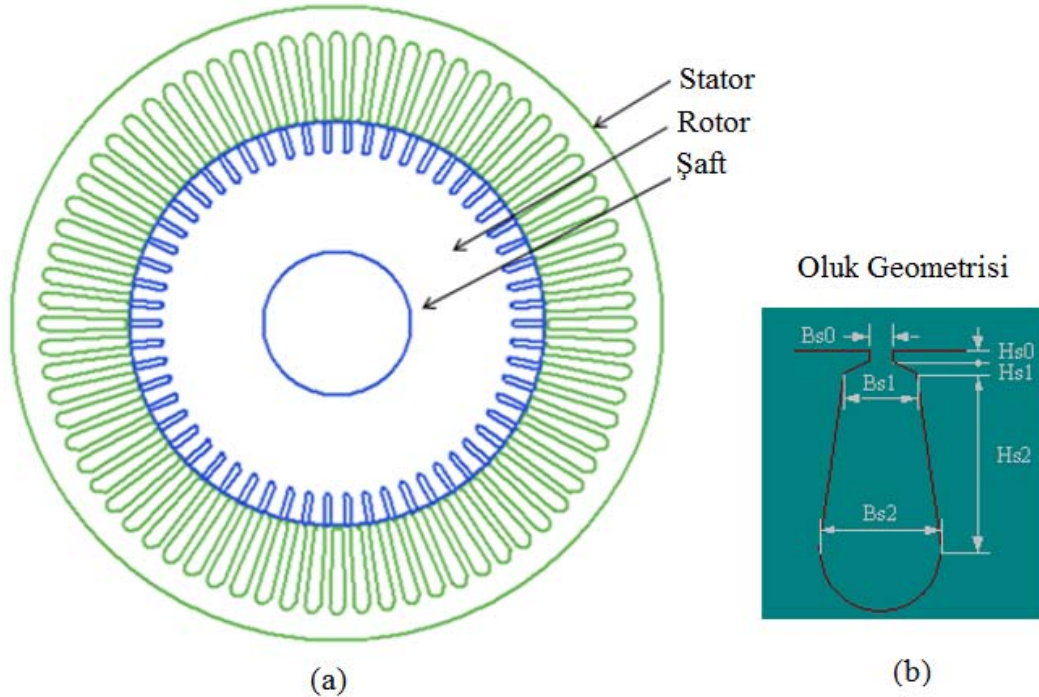
Bu çalışmada asenkron motor tasarımı için kritik tasarım parametrelerinin belirlenmesi için Tablo 4’de gösterilen temel motor tasarım parametreleri kullanılmıştır. Tablo 4’de gösterilmeyen diğer motor tasarım parametreleri sabit kabul edilerek bunlara ilişkin değerler Tablo 5’de gösterilmiştir. Tablo 5’de sürtünme-rüzgar kayıpları, kayıp faktörü ve rotor ile stator oluk geometrilerine dair değerler verilmiştir.

Tablo 4. Deney tasarımı için kullanılacak asenkron motor parametreleri
(The asynchronous motor parameters for design of experiment)

Teknik Özellikler	Parametre İsimleri
Makine Özellikleri	Kutup Sayısı
Performans Özellikleri	Giriş Gerilimi (V)
	Frekans (Hz)
Stator	Stator Dış Çapı (mm)
	Stator İç Çapı (mm)
	Motor Uzunluğu (mm)
	Stator Oluk Sayısı
Stator Sargısı	İletken Sayısı
	Teldeki Damar Sayısı
Rotor	Tel Çapı (mm)
	Şaft Çapı (mm)
Rotor Sargısı	Rotor Oluk Sayısı
	Halka Yüksekliği (mm)
	Halka Genişliği (mm)

2. DENEYSEL METOT (EXPERIMENTAL METHOD)

Bu çalışmada önerilen metot, elektrikli bir araç için ihtiyaç duyulan motor gereksinimlerini sağlayacak bir motorun tasarımı ve analizi ile ilgilidir. Metot performans değerleri belirlenen bir elektrik motorunun kritik parametrelerinin belirlenmesi ve ardından kritik parametreler üzerinden optimizasyonu ile arzu edilen performans değerlerine ulaşmayı amaçlamaktadır. Metodun merkezinde Taguchi'nin deney tasarımı yöntemi ile tasarım parametrelerinin derecelendirilmesi ve standart sapma değeri



Şekil 7. a) Asenkron motorun kesit görünümü ve b) Oluk geometrisi
(a)The cross sectional vies of the asynchronous motor and b) Slot geometry)

ile önemsiz parametrelerin elenmesi yer almaktadır. Taguchi ve standart sapma değeri ile belirlenen kritik tasarım parametreleri optimizasyon işlemi ile son bularak arzu edilen hedef değerlere ulaşmayı sağlamaktadır. Deneysel metoda ait akış diyagramı Şekil 8’de gösterilmiştir.

Tablo 5. Sabit kabul edilen motor tasarım parametreleri
(The motor design parameters as fixed)

Teknik Özellikler	Parametre İsimleri	Değer
Motor Özellikleri	Rastsal Kayıp Faktörü	0,02
	Sürtünme Kaybı	150 Watt
	Rüzgar Kaybı	0 Watt
Stator Özellikleri	Yığılma Faktörü	0,92
	Hs0	0,8 mm
	Hs1	0,52 mm
Stator Oluk Parametreleri	Hs2	39,48 mm
	Bs0	3 mm
	Bs1	4,8 mm
	Bs2	8,2 mm
	Stator Sargı Parametreleri	Paralel Kol Sayısı
Tel Çapı İçin İzolasyon		0,09 mm
Rotor Özellikleri	Yığılma Faktörü	0,92
	Hs0	0,5 mm
	Hs01	0 mm
	Hs1	0,66 mm
	Hs2	14,34 mm
Rotor Oluk Parametreleri	Bs0	1 mm
	Bs1	3,3 mm
	Bs2	3,3 mm

2.1. Motor Performans Gereksinimlerinin Belirlenmesi (Defining of the Motor Performance Requirements)

Yapılan araştırmalar doğrultusunda Türkiye pazarında olan 3 tip binek araç ve bunlardan 2 tanesinin Avrupa pazarına

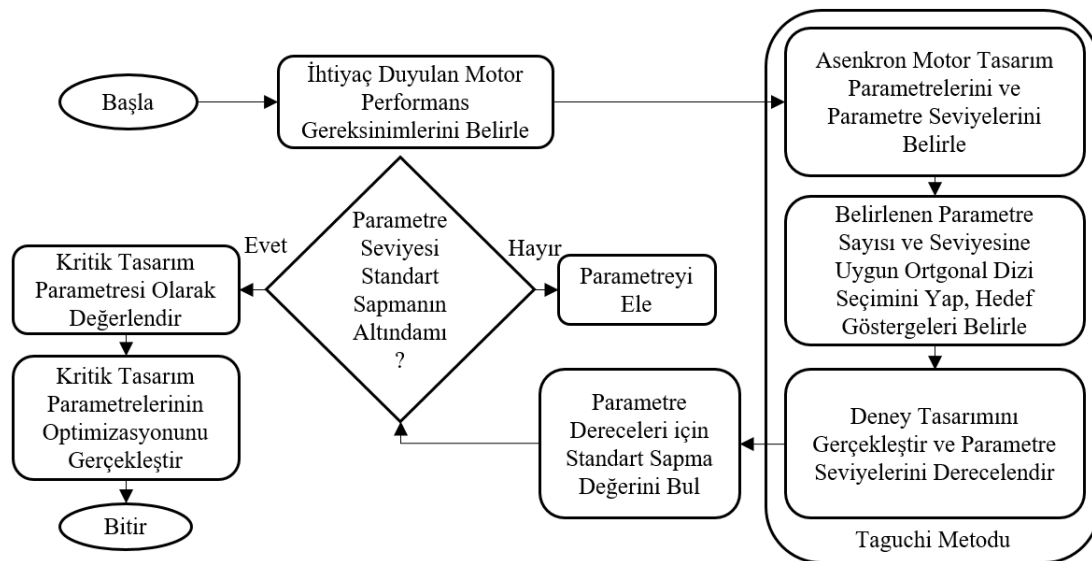
sunulan elektrikli araç modelleri incelenerek, araç dinamiğine ait hesaplamaların yapılması için ortalama araç parametre değerleri belirlenmiştir. Belirlenen araç parametreleri Tablo 6’da verilmiştir.

Tablo 6. Araç dinamiği analiz parametreleri
(The analysis parameters of vehicle dynamic)

Parametre	Değer	Birim
Aerodinamik Sürtünme Katsayısı	0,3	-
Hava Kütle Yoğunluğu	1,2	kg/m ³
Yuvarlanma Direnci	0,01	-
Araç Boş Ağırlığı	1300	kg
İvmelenme (0-100km/h)	12	sn
Tekerlek Genişliği	0,226	m
Tekerlek Çapı	0,73	m
Jant Çapı	0,4	m
Araç Genişliği	1800	mm
Araç Yüksekliği	1460	mm

Tablo 6’da parametreleri verilen aracın 0 derecelik bir eğimde 0-130 km/h analizi yapılmıştır. Motor performans parametreleri için tayin edilecek tork, güç ve devir değerlerine ilişkin alınan sonuçlar Şekil 9’da verilmiştir.

Yapılan analizde 100 km/h hızdaki bir araç için gerekli olan performans değerlerinin Şekil 5’deki grafikte gösterildiği gibi 75 kW gücünde 156 Nm torka sahip bir aracın bu değerleri 4500 devir civarında sağladığını göstermektedir. Bu analiz 0 derecelik eğim için gerçekleştirilmiştir. Dolayısıyla Türkiye şartlarında 10 derece eğime sahip bir yolda minimum kalkış momentinin de hesaplanması gerekmektedir. Bu doğrultuda Tablo 6’daki araç için bu parametreler yeniden hesaplandığında, 800 Nm lik bir kalkış torkunun sağlanması gerektiği tespit edilmiştir. Hesaplanan motor gereksinimlerine ait sonuçlar Tablo 7’de birleştirilmiştir.



Şekil 8. Kritik tasarım parametrelerinin belirlenmesi ve optimizasyonu için akış diyagramı
(The flow diagram for optimization and defining of the critical design parameters)

Tablo 7. Motor performans gereksinimleri
(The vehicle performance requirements)

Yol Alma Momenti (10 Derece Eğimde)	Anma Momenti (4500 RPM'de)	Anma Gücü (4500 RPM'de)
800 Nm	156 Nm	75 kW

Tablo 7'de gösterilen motor performans değerleri önden ya da arkadan çekişli (4x2) araç sistemleri için merkezi motor bloğunun performans değerleridir. Bu çalışmada tasarımı ön görülen asenkron motor paketi araç tekerleği ile sınırlıdır. Aynı zamanda bu asenkron motor hem önden hem arkadan çekişli bir araç (4x4) için gerçekleştirilmiştir. Dolayısıyla Tablo 7'de verilen motor performans değerleri yeniden ele alınarak çeyrek araç modeli üzerinden Tablo 8'deki gibi güncellenir.

Tablo 8. 4x4 araç motor performans gereksinimleri
(The motor performance requirements for 4x4 vehicle)

Yol Alma Momenti (10 Derece Eğimde)	Anma Momenti (4500 RPM'de)	Anma Gücü (4500 RPM'de)
200 Nm	39 Nm	18,75 kW

2.2. Asenkron Motor için Kritik Tasarım Parametrelerinin Belirlenmesi

(Defining of Critical Design Parameters for Asynchronous Motor)

Bu çalışmada ele alınan asenkron motor için yapılan tasarım ve optimizasyon çalışmalarında Taguchinin deney tasarım metodu kullanılmıştır. Bu method, temel anlamda bir sistemin fonksiyonelliğini etkileyen 2 faktör olduğunu belirtmektedir. Bu faktörlerden ilki kontrol faktörü ikincisi ise gürültü faktörüdür. Buradaki kontrol faktörü değişken ve kontrol edilebilirken, gürültü faktörleri değişken olmakla beraber kontrol edilmeler bazen imkansız olabilmektedir.

Taguchi yöntemi gürültü varyasyonlarından daha az etkilenen kontrol faktörlerinin bulunmasını sağlar. Böylece optimizasyonu sağlayabilecek kararlı kontrol değişkenleri elde edilmiş olur [21, 22].

2.2.1. Deney tasarımının belirlenmesi

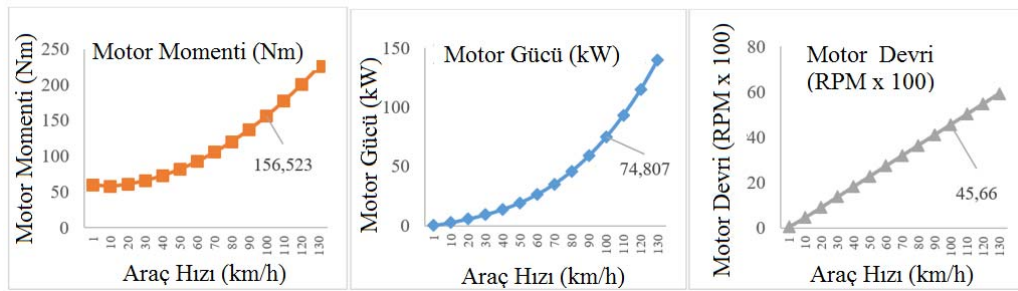
(Defining of experimental design)

Bu bölümde Tablo 4'de gösterilen asenkron motora ait 14 parametre için alt ve üst limitler belirlenmiştir. Alt ve üst limitler için belirlenen 2 seviyeye ait değerler Tablo 9'da verilmiştir.

Tablo 9. Asenkron motor parametreleri için deney tasarım seviyeleri
(The design of experiment levels for the asynchronous motor parameters)

Parametreler	Seviye 1	Seviye 2
Kutup Sayısı	2	6
Giriş Gerilimi (V)	380	690
Frekans (Hz)	50	300
Stator Dış Çapı (mm)	330	360
Stator İç Çapı (mm)	190	230
Motor Uzunluğu (mm)	255	305
Stator Oluk Sayısı	54	72
İletken Sayısı	1	6
Teldeki Damar Sayısı	1	5
Tel Çapı (mm)	0,81	1,15
Şaft Çapı (mm)	60	80
Rotor Oluk Sayısı	48	68
Halka Yüksekliği (mm)	35	45
Halka Genişliği (mm)	12	20

Asenkron motor için belirlenen 14 parametre ve 2 seviye için Tablo 10'da gösterilen Taguchinin ortogonal dizi seçim matrisi kullanılarak deney tasarım tablosu belirlenmiştir. Burada 14 parametre ve 2 seviye için Tablo 10, L16 deney

**Şekil 9.** 0-130km/h araç performans gereksinimleri (The vehicle performance requirements for 0-130km/h)**Tablo 10.** Taguchinin ortogonal dizi seçim matrisi (Taguchi's orthogonal array matrix)

	Parametre Sayısı												
		4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Seviye	2	L8	L8	L8	L8	L12	L12	L12	L12	L16	L16	L16	L16
Sayı	3	L9	L18	L18	L18	L18	L27	L27	L27	L27	L27	L36	L36
Sayı	4	L'16	L'16	L'32	L'32	L'32	L'32	L'32	L'32				

dizisinin uygun olduğunu göstermektedir. L16 ortogonal dizisi Tablo 4 ve Tablo 9 için uygulandığında Tablo 11’de gösterilen 16 deneyden oluşan deney dizisi ortaya çıkmaktadır.

2.2.2. Deney tasarımının gerçekleştirilmesi (Implementation of experimental design)

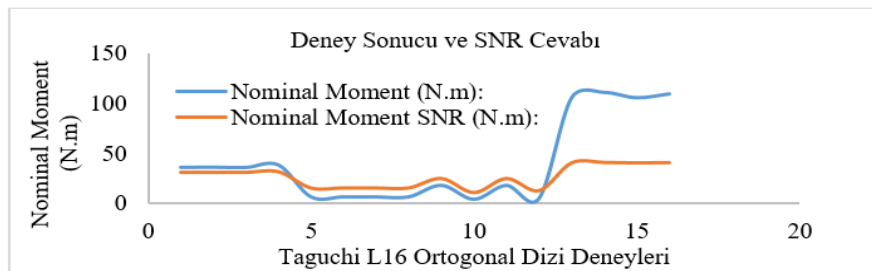
Tablo 11’de verilen deneyler Ansys RMXprt programında analiz edilmiştir. Yapılan 16 deney nominal/anma momenti, devrilme/maksimum moment, kalkış/yol alma momenti, güç faktörü, nominal/anma devri ve verim bakımında ele alınmıştır. Elde edilen sonuçlar ve bu sonuçlara ait veriler Şekil 10’dan Şekil 15’e kadar ilgili parametre ve o parametreye ait işaret gürültü oranı (SNR) değerleri açısından grafikler üzerinde gösterilmiştir.

2.2.3. Deney sonuçlarının analiz edilmesi (Analysis of experimental results)

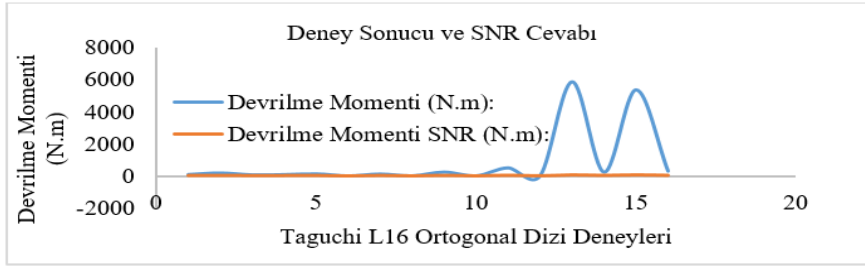
Nominal/anma momenti, devrilme/maksimum moment, kalkış/yol alma momenti, güç faktörü, nominal/anma devri ve verim için elde edilen SNR değerleri Tablo 4’de verilen parametrelerin hangi oranda etkili olduğunu göstermektedir. Alınan SNR değerleri Taguchi metodu ile parametrelerin seviye 1 ve seviye 2 değerleri bakımından nasıl bir etki oluşturduğu gözlemlenmiştir. İlgili parametre için seviye 1 ve seviye 2 arasındaki mutlak fark bir delta ifadesi ile temsil edilmektedir. Buradaki delta o parametrenin ele alınan analiz için ne derecede önemli olduğunu ifade etmektedir. Bu çalışmada yapılan analiz sonucu elde edilen delta değerleri sıralandığında Tablo 12’de verilen gösterim elde edilmektedir.

Tablo 11. Taguchinin ortogonal deney tasarım tablosu (14 parametre 2 seviye için L16)
(Taguchi’s orthogonal design of experiment table (L16 for 14 parameters 2 level))

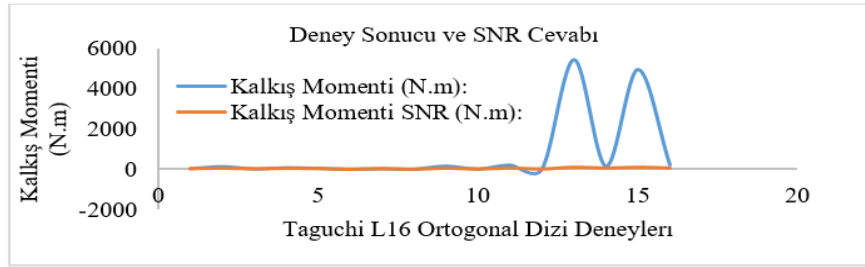
Deneyler	Kutup Sayısı	Giriş Gerilimi	Frekans	Stator Dış Çapı	Stator İç Çapı	Motor Uzunluğu	Stator Oluk Sayısı	İletken Sayısı	Teldeki Damar Sayısı	Tel Çapı	Şaft Çapı	Rotor Oluk Sayısı	Halka Yüksekliği	Halka Genişliği
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2
4	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1
5	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2
6	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1
7	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1
8	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2
9	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1
10	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2
11	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2
12	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1
13	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2
14	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1
15	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1
16	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2



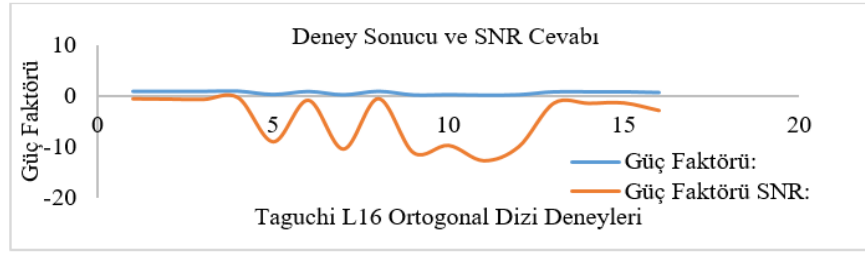
Şekil 10. Nominal/Anma momenti için deney sonucu ve SNR cevabı (The experiment result and SNR response for the rated moment)



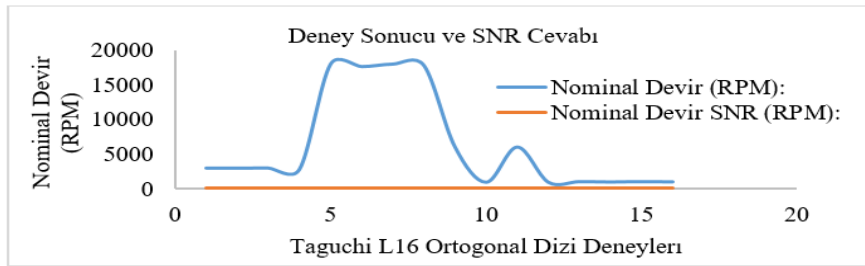
Şekil 11. Devrilme/Maksimum moment için deney sonucu ve SNR cevabı
(The experiment result and SNR response for the breakdown moment)



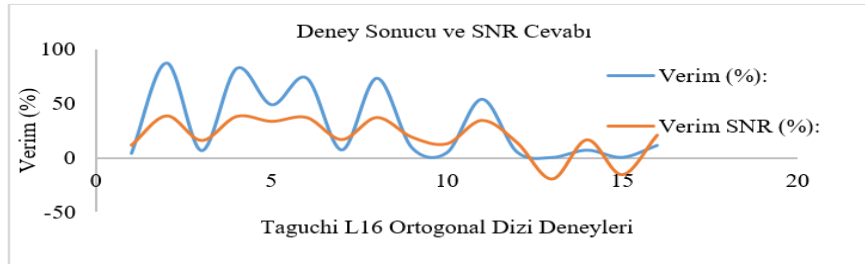
Şekil 12. Kalkış/Yol alma moment için deney sonucu ve SNR cevabı
(The experiment result and SNR response for the starting moment)



Şekil 13. Güç faktörü için deney sonucu ve SNR cevabı (The experiment result and SNR response for the power factor)



Şekil 14. Nominal/Anma devri için deney sonucu ve SNR cevabı (The experiment result and SNR response for the rated speed)



Şekil 15. Verim için deney sonucu ve SNR cevabı (The experiment result and SNR response for the efficiency)

Tablo 12. Kritik motor tasarım parametrelerinin derecelendirilmesi (The ranking of the critical motor design parameters)

Parametreler	Nominal	Devrilme	Kalkış	Nominal	Verim	Güç
	Moment	Momenti	Momenti	Devir	(%)	Faktörü:
	(N.m):	(N.m):	(N.m):	(RPM):		
	Sıralama	Sıralama	Sıralama	Sıralama	Sıralama	Sıralama
Kutup Sayısı	2	3	2	1	1	2
Giriş Gerilimi (V)	4	5	6	4	6	4
Frekans (Hz)	1	2	1	2	3	1
Stator Dış Çapı (mm)	11	13	14	14	13	8
Stator İç Çapı (mm)	14	10	8	10	7	10
Motor Uzunluğu (mm)	9	11	12	9	9	14
Stator Oluk Sayısı	12	8	11	12	12	12
İletken Sayısı	6	1	3	3	2	3
Teldeki Damar Sayısı	5	4	4	5	10	5
Tel Çapı (mm)	3	6	5	6	4	6
Şaft Çapı (mm)	7	7	7	7	5	7
Rotor Oluk Sayısı	10	12	10	13	14	11
Halka Yüksekliği (mm)	13	14	13	11	11	9
Halka Genişliği (mm)	8	9	9	8	8	13

Tablo 13. Varsayılan Asenkron Motora Ait Parametreler ve Performans Göstergeleri

(The parameters and performance results of the default asynchronous motor)

Parametre	Değer	Parametre	Değer	Sonuçlar	Değer
Kutup Sayısı	6	İletken Sayısı	6	Kalkış Momenti (Nm)	284
Giriş Gerilimi (V)	380	Teldeki Damar Sayısı	5	Devrilme Momenti (Nm)	443
Frekans (Hz)	50	Tel Çapı (mm)	1,06	Nominal Momenti (Nm)	187
Stator Dış Çapı (mm)	327	Şaft Çapı (mm)	75	Nominal Devir (RPM)	957
Stator İç Çapı (mm)	210	Rotor Oluk Sayısı	58	Güç Faktörü	0,868
Motor Uzunluğu (mm)	280	Halka Yüksekliği (mm)	40	Verim (%)	81,9
Stator Oluk Sayısı	72	Halka Genişliği (mm)	16		

Bu çalışma dahilinde kritik parametrelerin daha iyi sınıflandırılabilmesi ve ayırt ediciliğinin ortaya çıkartılması için, elde edilen delta değerlerine standart sapma formülüzasyonu uygulanarak standart sapma değerinin üstünde kalan değerler yeşil tema ile renklendirilmişlerdir. Bu bölümde özetle Tablo 12 değerlendirildiğinde, örneğin nominal moment faktörü için standart sapma üzerinde kalan parametreler ilk olarak frekans parametresi olmak üzere ikinci ise kutup sayısı parametresidir.

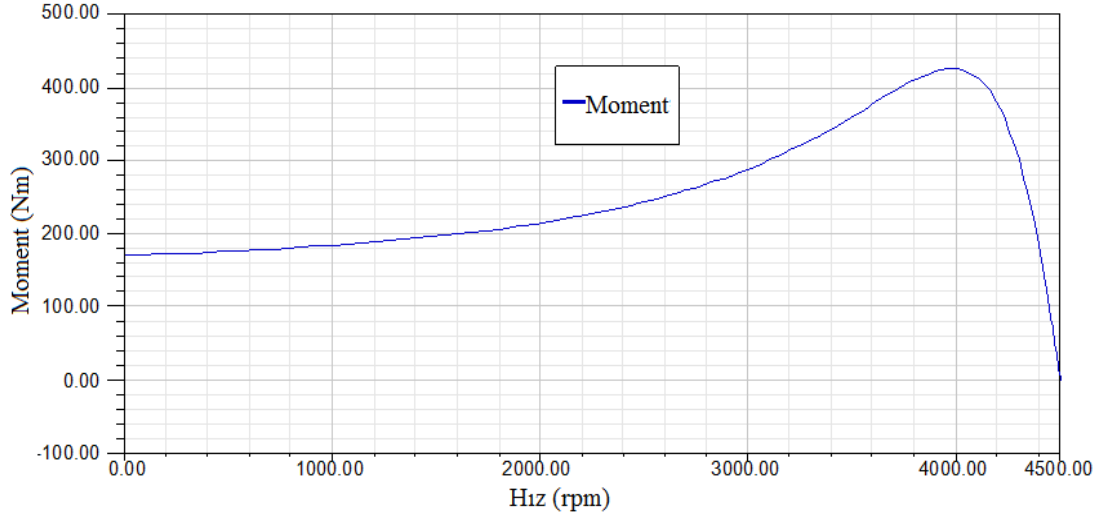
Diğer taraftan Tablo 12 bir bütün olarak ele alındığında, nominal/anma momenti, devrilme/maksimum moment, kalkış/yol alma momenti, güç faktörü, nominal/anma devri ve verim faktörleri için kritik parametrelerin; Kutup Sayısı, Giriş Gerilimi, Frekans, İletken Sayısı, Teldeki Damar Sayısı ve Tel Çapı olduğu görülmektedir.

3. ASENKRON MOTOR ANALİZİ (ANALYSIS OF ASYNCHRONOUS MOTOR)

Kritik parametrelerin belirlenmesinin ardından, asenkron motordan istenilen performans değerleri için tekrar analiz ve optimize edilmesi gerekir. Bu çalışmada yapılan analizler Ansys RMXprt programı ile gerçekleştirilmektedir. Varsayılan asenkron motora ait parametreler ve sonuçları Tablo 13'de verilmiştir, gösterilen performans değerlerinin Tablo 6'da gösterilen performans değerlerine ulaşabilmesi için bir analiz dizisi daha gerçekleştirilerek istenilen değerler optimize edilmeye çalışılmıştır. Tablo 6'da gösterilen asenkron motor performans değerlerine ulaşılabilmek için Taguchi metodu ve standart sapma değeri ile belirlenen 6 kritik asenkron motor parametreler üzerinden optimize edilmeye çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlar ve optimize edilen giriş parametreleri Tablo 14'de verilmiştir.

Tablo 14. Optimize edilen asenkron motora ait parametreler ve performans göstergeleri
(The parameters and performance results of the optimized asynchronous motor)

Parametre	Değer	Parametre	Değer	Sonuçlar	Değer
Kutup Sayısı	4	İletken Sayısı	4	Kalkış Momenti (Nm)	170
Giriş Gerilimi (V)	690	Teldeki Damar Sayısı	7	Devrilme Momenti (Nm)	423
Frekans (Hz)	150	Tel Çapı (mm)	1,7	Nominal Momenti (Nm)	40
Stator Dış Çapı (mm)	327	Şaft Çapı (mm)	75	Nominal Devir (RPM)	4477
Stator İç Çapı (mm)	210	Rotor Oluk Sayısı	58	Güç Faktörü	0,7487
Motor Uzunluğu (mm)	280	Halka Yüksekliği (mm)	40	Verim (%)	87,29
Stator Oluk Sayısı	72	Halka Genişliği (mm)	16		

**Şekil 16.** Optimize edilen asenkron motor moment-hız eğrisi (The torque-speed curve of the optimized asynchronous motor)

4. SİMGELER (SYMBOLS)

α	: Yolun eğimi
A_F	: Aracın ön yüzey alanı (m ²)
C_d	: Aerodinamik sürtünme katsayısı
d	: Yolun dikey uzunluğu (m)
F_{aero}	: Aerodinamik sürtünme kuvveti (N)
F_{roll}	: Yuvarlanma direnç kuvveti (N)
f_r	: Yuvarlanma direnç katsayısı
F_x	: Araç çekiş kuvveti (N)
g	: Yerçekimi ivmesi (kg/N)
Δh	: Yolun yatay uzunluğu (m)
m_v	: Toplam araç kütlesi (kg)
ρ	: Hava kütle yoğunluğu (kg/m ³)
V_x	: Araç hızı (m/sn)
V_{wind}	: Rüzgar hızı (m/sn)

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada farklı varyasyonlardaki araç dinamikleri ve performansları değerlendirilerek, ortalama binek bir araç için ihtiyaç duyulan motor performans karakteristiği çıkartılmıştır. Ardından arzu edilen bu performans değerlerine ulaşmak için asenkron motor karakteristiği ve parametreleri incelenmiştir. Asenkron motor için kritik parametrelerin belirlenmesi adına Taguchi'nin yöntemi

kullanılmıştır. Arzu edilen performans değerlerine ulaşmak için etki oranı düşük parametreler elenip kritik parametre varyasyonlarının kullanılması ile asenkron motorun optimize edilmesi sağlanmıştır. Tablo 14'de gösterilen 6 kritik asenkron motor parametresi ile arzu edilen asenkron motor moment-hız eğrisine ulaşılmıştır. Optimize edilmiş motora ait moment-hız eğrisi Şekil 16'da verilmiştir.

Çalışmada izlenen metot sayesinde asenkron motorun tüm parametrelerine ait kombinasyonlarının oluşturacağı uzun analiz zamanını Taguchi yöntemi ile kısaltarak zaman israfının önüne geçilmesini sağlanmıştır. Bununla beraber Taguchi yöntemi, hangi faktörün hangi parametre ile ne derecede ilişkisi olduğunu da göstermektedir. Dahası elde edilen sonuçlar için daha hassas iyileştirme yapılmak istenildiğinde Taguchi yöntemi ile elenen parametrelerin elenme derecelerine göre tekrar ele alınıp arzu edilen asenkron motor performans değerlerine erişim yüzdesinin (%) artmasına da olanak tanımaktadır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENTS)

Bu çalışma Marmara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu tarafından desteklenen FEN-C-DRP-090217-0057 no'lu proje kapsamında gerçekleştirilerek, Coşkunöz Holding A.Ş. tarafından da desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Ahmad M.Z., Sulaiman E. and Kosaka T., Optimization of Outer-Rotor Hybrid Excitation FSM for In-Wheel Direct Drive Electric Vehicle, IEEE International Conference on Mechatronics (ICM), 691 – 696, 2015.
2. Sant A.V., Khadkikar V., Xiao W., Zeineldin H.H., Four-Axis Vector-Controlled Dual-Rotor PMSM for Plug-in Electric Vehicles, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 62 (5), 3202-3212, 2015.
3. Chiba A., Kiyota K., Hoshi N., Takemoto M., Ogasawara S., Development of a rare-earth-free SR motor with high torque density for hybrid vehicles, IEEE Transactions on Energy Conversion, 30 (1), 175-182, 2015.
4. Chen L., Hopkinson D., Wang J., Cockburn A., Sparkes M., O'Neill W., Reduced Dysprosium Permanent Magnets and Their Applications in Electric Vehicle Traction Motors, IEEE Transactions on Magnetics, 51 (11), Article Sequence Number : 8109004, 2015.
5. Baltatanu A., Florea M.-L., Modeling and testing of electric vehicle propulsion systems, UPB Scientific Bulletin, Series C: Electrical Engineering, 77 (3), 201-212. , 2015.
6. Al-Aawar N., Arkadan A.-R.A., Optimal control strategy for hybrid electric vehicle powertrain, IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 3 (2), 362-370, 2015.
7. Hua W., Zhang G., Cheng M., Investigation and design of a high-power flux-switching permanent magnet machine for hybrid electric vehicles, IEEE Transactions on Magnetics, 51 (3), Article Sequence Number: 8201805, 2015.
8. Chun Y.-D., Park B.-G., Kim D.-J., Choi J.-H., Han P.-W., Development and performance investigation on 60kW induction motor for EV propulsion, Journal of Electrical Engineering and Technology, 11 (3), 639-643, 2016.
9. Ruuskanen V., Nerg J., Pyrhonen J., Ruotsalainen S., Kennel R., Drive cycle analysis of a permanent-magnet traction motor based on magnetostatic finite-element analysis, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 64 (3), 1249-1254, 2015.
10. Yang Y.-P., Wang J.-P., Wu S.-W., Luh Y.-P., Design and control of axial-flux brushless dc wheel motors for electric vehicles - Part II: Optimal current waveforms and performance test, IEEE Transactions on Magnetics, 40 (4 I), 1883-1891, 2004.
11. Rahman K.M., Jurkovic S., Stancu C., Morgante J., Savagian P.J., Design and Performance of Electrical Propulsion System of Extended Range Electric Vehicle (EREV) Chevrolet Volt, IEEE Transactions on Industry Applications, 51 (3), 2479-2488, 2015.
12. Shafiei A., Carli G., Williamson S.S., Electric and Plug-In Hybrid Electric Vehicles, Power Electronics for Renewable Energy Systems, Transportation and Industrial Applications, Wiley, 2014.
13. Hewu W., Jiuyu D., Minggao O., Vehicle powertrain technology, Sustainable Automotive Energy System in China, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013.
14. Shinnaka S., Takeuchi S., A new sensorless drive control system for transmissionless EVs using a permanent-magnet synchronous motor, World Electric Vehicle Journal, 1 (1), 1-9, 2007.
15. Rahman F., Dutta R., AC Motor Control Applications in Vehicle Traction, AC Electric Motors Control: Advanced Design Techniques and Applications, Wiley, 2013.
16. Profumo F., Zhang Z., Tenconi A., Axial flux machines drives: A new viable solution for electric cars, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 44, 39-45, 1997.
17. Nam K.H., AC Motor Control and Electrical Vehicle Applications, CRC Press, 2010.
18. Bodson M., Giri F., Introduction to AC Motor Control, AC Electric Motors Control: Advanced Design Techniques and Applications, Wiley, 2013.
19. Chapman S.J., Electric Machinery Fundamentals, McGraw-Hill Education, 5th edition, 2003.
20. Bayrak M, Küçükler A., A Power Based Algorithm Design for Detection of Broken Rotor Bars Faults in Three Phase Induction Motors, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 31 (2), 303-311, 2016.
21. Brisset S., Gillon F., Vivier S., and Brochet P., Optimization with experimental design: An approach using Taguchi's methodology and finite element simulations, IEEE Transaction on Magnetics, 37 (5), 3530–3533, 2001.
22. Taguchi G., Chowdhury S., and Wu Y., Taguchi's Quality Engineering Handbook, Wiley, 1th edition, 2004.