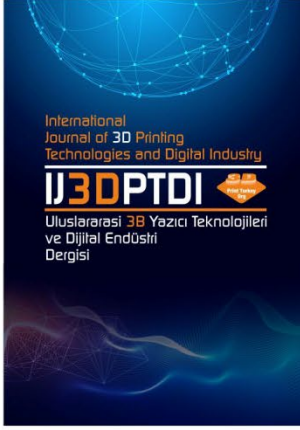




ULUSLARARASI 3B YAZICI TEKNOLOJİLERİ
VE DİJİTAL ENDÜSTRİ DERGİSİ

INTERNATIONAL JOURNAL OF 3D PRINTING
TECHNOLOGIES AND DIGITAL INDUSTRY

ISSN:2602-3350 (Online)

URL: <https://dergipark.org.tr/ij3dptdi>

HAFİF ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN ARAÇ MODELİ VE SÜRÜŞ DÖNGÜSÜNE GÖRE ELEKTRİK MOTORU TASARIMI

ELECTRIC MOTOR DESIGN BASED ON VEHICLE
MODEL AND DRIVING CYCLE FOR LIGHT ELECTRIC
VEHICLES

Yazarlar (Authors): Doğukan Ayhan , Ali Bakbak *

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Ayhan D., Bakbak A., “Hafif Elektrikli Araçlar İçin Araç Modeli ve Sürüş Döngüsüne Göre Elektrik Motoru Tasarımı” *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 9(2): 236-246, (2025).

DOI: 10.46519/ij3dptdi.1630021

Araştırma Makale/ Research Article

Erişim Linki: (To link to this article): <https://dergipark.org.tr/en/pub/ij3dptdi/archive>

HAFİF ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN ARAÇ MODELİ VE SÜRÜŞ DÖNGÜSÜNE GÖRE ELEKTRİK MOTORU TASARIMI

Doğukan Ayhan^a , Ali Bakbak^a 

^aManisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Türkiye

*Sorumlu yazar: ali.bakbak@cbu.edu.tr

(Geliş/Received: 30.01.25; Düzeltme/Revised: 23.04.25; Kabul/Accepted: 09.06.25)

ÖZ

Günümüzde elektrikli araçların yaygınlaşması, bu alanda yapılan araştırmaları hızlandırmıştır. Hafif elektrikli araçlar, sürüş döngüleri sırasında belirli bir hız-tork karakteristiğine sahip olmaları ve düşük hızlarda yüksek tork gereksinimleri nedeniyle, bu tür araçlara uygun elektrik motorlarının belirlenmesi, tasarımı ve analizi kritik bir öneme sahiptir. Bu çalışma, hafif elektrikli araçlar için dış rotorlu, yüzey montajlı, sabit mıknatıslı senkron motor (SMSM) tasarımı ve analizini kapsamaktadır. Motor tasarımına geçmeden önce, araç geometrisi ve fiziksel parametreleri ile sürüş döngüsü analiz edilmiştir. Araç modeline, pist koşullarına ve belirlenen sürüş döngüsüne göre motor tasarım gereksinimleri belirlenmiş ve bu doğrultuda optimizasyon yapılmıştır. Enerji verimliliği ve araç performansının ön planda olduğu hafif elektrikli araç yarışlarında kullanılmak üzere tasarlanan dış rotorlu SMSM, bu gereksinimlere göre optimize edilmiştir. Bu tasarım ve analiz süreci, motorun yüksek enerji verimliliği ve performansını sağlamayı hedeflemektedir.

Anahtar Kelimeler: Hafif Elektrikli Araçlar, Sürüş Döngüsü, Araç Modeli, Hafif Elektrikli Araç Yarışları, Dış Rotorlu PMSM, Motor Tasarımı.

ELECTRIC MOTOR DESIGN BASED ON VEHICLE MODEL AND DRIVING CYCLE FOR LIGHT ELECTRIC VEHICLES

ABSTRACT

The widespread adoption of electric vehicles has accelerated research in this field. Light electric vehicles, due to their specific speed-torque characteristics during driving cycles and their requirement for high torque at low speeds, necessitate the selection, design, and analysis of suitable electric motors. This study focuses on the design and analysis of an outer rotor, surface-mounted, permanent magnet synchronous motor (PMSM) for light electric vehicles. Before initiating the motor design process, vehicle geometry, physical parameters, and the driving cycle were analyzed. Motor design requirements were then determined based on the vehicle model, track conditions, and the specified driving cycle, and an optimization process was carried out accordingly. The outer rotor PMSM, developed for use in light electric vehicle competitions where energy efficiency and performance are critical, was optimized to meet these demands. This design and analysis process aims to ensure high energy efficiency and performance of the motor.

Keywords: Light Electric Vehicles, Driving Cycle, Vehicle Model, Outer Rotor PMSM, Motor Design.

1. GİRİŞ

Otomotiv sektöründe, konvansiyonel araçlar egzoz emisyonları ve iklim değişikliği gibi ekolojik dengeyi, yaşam koşullarını ve insan sağlığını etkileyen geniş kapsamlı çevresel sorunlara neden olmaktadır. Artan enerji verimliliği talepleriyle birlikte küresel çevresel düzenlemelere uyum sağlamak amacıyla elektrikli araçlar alanında geçtiğimiz son on yıl içerisinde dikkate değer teknolojik ilerlemeler kaydedilmiştir. Birçok ülke ve otomotiv şirketleri çevresel sürdürülebilirliğe olan taahhütlerini daha da ileriye götürmek amacıyla toplumsal farkındalık kazanmıştır ve konvansiyonel araç satışlarını kademeli olarak sonlandırmak için zaman çizelgeleri belirlemiştirler [1]. Avrupa Birliği'nin çevresel hedeflerinden biri, 2050 yılına kadar iklim nötrlüğünü sağlamaktır. Avrupa Parlamentosu verilerine göre, karayolu taşımacılığının en büyük paya (yaklaşık %72) sahip olduğu 2016 yılında küresel karbondioksit emisyonlarının yaklaşık %25'ini ulaşım emisyonları oluşturmaktadır [2]. Elektrikli araçlara olan ilgi arttıkça, sürüş döngüsü ve araç modeli tabanlı motor tasarımı çalışmaları da artış göstermiştir. Bu alandaki çalışmalar, elektrikli araçların daha da yaygınlaşması için önemli bir adım olarak görülmektedir [3].

Hafif elektrikli araçlar genel olarak enerji verimliliğinin temel amaç olduğu uygulamalarda tercih edilirler. Literatürde, çeşitli motor topolojileri için sürüş döngüsü bazlı verimlilik analizlerine sıkça rastlanmaktadır [4]. [5] çalışmasında elektrikli araç performansının izlenmesi ve optimize edilmesinde dijital ikiz teknolojisi kullanılarak farklı motor tiplerinin enerji tüketimi ve hızlanma performanslarını gerçek zamanlı yol verilerine dayanarak karşılaştırmış ve SMSM motorun üstün performans sergilediğini ortaya koymuştur. Sürüş döngüsü aracın gerçek dünya performansını modellemek için kullanılır ve aracın hızı, ivmesi, yokuş çıkma ve frenleme gibi faktörler ile araç motorunun tork ve hız gereksinimlerinin belirlenmesine olanak tanır. Diğer bir yandan, araç modeli aracın fiziksel özelliklerini ve performansını matematiksel olarak tanımlayan bir modeldir. Araç modeli, aracın hızı, ağırlığı, direnci, sürtünmesi, aerodinamik özellikleri vb. gibi faktörleri hesaba katarak aracın performansını ölçer. Bu sayede, daha verimli ve performanslı elektrik motorları tasarlanarak, hafif elektrikli araçların

performansı maksimize edilir [6-11]. Bu çalışmada araç modelinden elde edilen veriler ve pist geometrik verileri ile birlikte araç için pist simülasyonu “Sürüş Döngüsü Çıkarılması ve Analizi” bölümünde gerçekleştirilmiştir.

Hafif elektrikli araç kategorisindeki araçların hareketini sağlayacak olan motor türünün belirlenmesi önem arz etmektedir. Çalışma [12]'de doğru akım, sabit mıknatıslı senkron, senkron relüktans ve asenkron motor gibi farklı topolojilerdeki makineler performans, güvenilirlik ve verim gibi parametreler açısından değerlendirilmiştir. Ancak motor seçimi, sürüş döngüsüne özgü gereksinimler dikkate alınarak yapılmalıdır. Özellikle bazı hafif elektrikli araç uygulamaları düşük hız çalışma bölgesinde yüksek tork talep etmektedirler. Çekiş uygulamalarında (traction applications) genellikle senkron motor kategorisi altındaki iç kalıcı mıknatıslı senkron motor (Interior permanent magnet synchronous-IPMSM) veya yüzey montajlı kalıcı mıknatıslı senkron motorlar (Surface mounted synchronous motor-SMPMSM) tercih edilmektedir. Çünkü senkron motorlar, nominal hız aralığında asenkron motorlara kıyasla daha yüksek güç yoğunluğu ve verimlilik sunar [3,13-15]. Bu uygulamada hafif elektrikli aracın hareketini sağlamak için dış rotorlu SMPMSM tercih edilmiştir. Dış rotorlu motorlar (hub motorlar), doğrudan tekerleklere entegre edilebilir olmaları sayesinde mekanik aktarma organlarına olan ihtiyacı ortadan kaldırırlar. Bu yapı, sistemin toplam kütlesini azaltır ve enerji kayıplarını minimize eder. Bu yapı, özellikle yarış araçlarında görülen düşük hız-yüksek tork gereksinimleri için verimli bir çözümdür [5]. Ayrıca araç güç aktarımında Şanzıman ve diferansiyel gibi mekanik aktarma organlarının ortadan kalkması, daha hafif ve sade bir yapı sağlar [2,16].

Pist simülasyonu sonucu elde edilen değerler ile motor tasarımı için isterler oluşturulmuştur. Motor isterlerine göre dış rotorlu SMSM elektromanyetik analizi sonlu elemanlar analizi (SEA) programlarıyla gerçekleştirilmiştir.

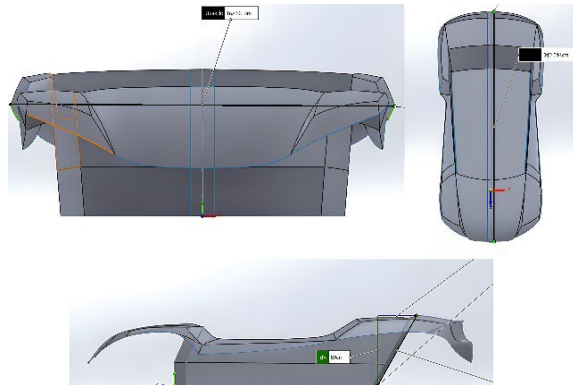
2. SÜRÜŞ DÖNGÜSÜ ÇIKARILMASI VE ANALİZİ

Motor isterlerinin belirlenmesi için pist simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Pist simülasyonunun amacı; pistin bölümlere ayrılması, her bir bölüm için hız ve karakteristik araç parametrelerinin belirlenmesi ve bunlara karşılık gelen tork değerlerinin hesaplanmasıdır. Toplam araç ister kuvvet değerinin belirlenmesi ile birlikte, bu değer kullanılarak araç ister toplam tork değeri hesaplanmıştır. Gerçekleştirilen çalışmada pist viraj, frenleme ve hızlanma bölgeleri olarak üç farklı bölgeye ayrılmıştır. Virajlar ve düz yollar arasındaki hız değişimi, tork gereksinimlerinin de farklılaşmasına neden olmaktadır. Hesaplamalarda fren mesafeleri ve süreleri de hesaba katılmıştır. Bu kuvvet hesaplarını yaparken araç ivme değeri $0,5 \text{ m/s}^2$ ve ortalama pist eğimi $\%1,4$ değeri kullanılmış olup, frenleme noktalarında ise araç ivme değeri $-0,5 \text{ m/s}^2$ olarak hesaba katılmıştır. Virajların keskinliğine göre araç hız değerleri değişmektedir. Bununla birlikte düz yollarda araç hızı 36 km/h olarak alınmış olup, pist içerisindeki yük ve elektriksel torkunun hesaplanması için Denklem (1) kullanılmıştır [17].

$$T_E - T_L = J \frac{d\omega}{dt} \quad (1)$$

Buradaki T_E elektriksel torku, T_L yük torkunu, J eylemsizlik momenti ve ω açısal hızı temsil etmektedir.

Pist bilgileri ve pist için yapılan hesaplamalar Çizelge 1’de, sürüş döngüsü boyunca araç ister tork hesabının yapılabilmesi için gerekli olan araç geometrik ve aerodinamik parametreleri ve diğer parametreler Çizelge 2’de verilmiştir. Araç teknik resimleri Şekil 1’de mevcuttur.



Şekil 1. Araç teknik resimleri

Çizelge 1. Pist bilgileri

Özellik	Birim	Değer
Pist Tur Uzunluğu	m	1370
Pist Tur Sayısı	-	5
Pisti Bitirmek İçin Toplam Süre	s	900
Toplam Viraj Sayısı	-	8
Sağa Doğru Viraj Sayısı	-	5
Sağa Doğru Viraj Toplam Uzunluk	m	90
Sola Doğru Viraj Sayısı	-	3
Sola Doğru Viraj Toplam Uzunluk	m	115
Pist Ortalama Eğim	%	1,4
Görev Sayısı	-	3
Görev İçin Verilecek Ek Süre	-	90
Pisti Bitirmek İçin Ortalama Hız	km/h	28

Çizelge 1’de bulunan veriler TEKNOFEST “Uluslararası Efficiency Challenge Elektrikli Araç Yarışları” şartnamesinden alınmıştır [18].

Çizelge 2. Araç parametreleri

Özellik	Birim	Değer
Araç Kütlesi Sürücü İle Birlikte(m)	kg	500
Araç Hızlanma İvmesi(a)	m/s^2	0,5
Araç Yavaşlama İvmesi(a)	m/s^2	-0,5
Yerçekimi Sabiti(g)	Nm^2/kg^2	9,81
Hava Yoğunluğu(pa)	kg/m^3	1,23
Sürüklenme Sabiti(Cd)	-	0,46
Yuvarlanma Direnci(Cr)	-	0,02
Araç Ön Alanı(A)	m^2	1,48
Araç Teker Yarıçapı	m	0,3
Araç Jant Dış Çapı	inç	17
Araç Jant İç Çapı	inç	10,79
Dişli Oranı	-	1
Tekerlek Ataleti	kg.m^2	22,5

Sürüş döngüsü boyunca araca çeşitli direnç kuvvetleri etki eder. Bu kuvvetler sırasıyla; Aerodinamik Direnç Kuvveti (Aerodynamic Resistance Force-Fa), Lastik Yuvarlanma Direnç Kuvveti (Tire Rolling Resistance Force-Fr), Gradyan Direnç Kuvveti (Gradient Resistance Force-Fg), Eylemsizlik Direnç Kuvveti(Inertia Resistance-F_A)’dir. Araç ister tork değerinin hesaplanması için Denklem (2), Denklem (3), Denklem (4), Denklem (5) ve Denklem (6) kullanılır [1,2,8,17,19].

$$F_a = m \cdot a \quad (2)$$

$$F_g = m \cdot g \cdot \sin(\alpha) + \frac{1}{2} \quad (3)$$

$$F_A = \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot C_d \cdot A_v \cdot (V_w + V_v)^2 \quad (4)$$

$$F_r = m \cdot g \cdot C_r \cdot \cos(\alpha) \quad (5)$$

$$F_T = F_a + F_g + F_A + F_r \quad (6)$$

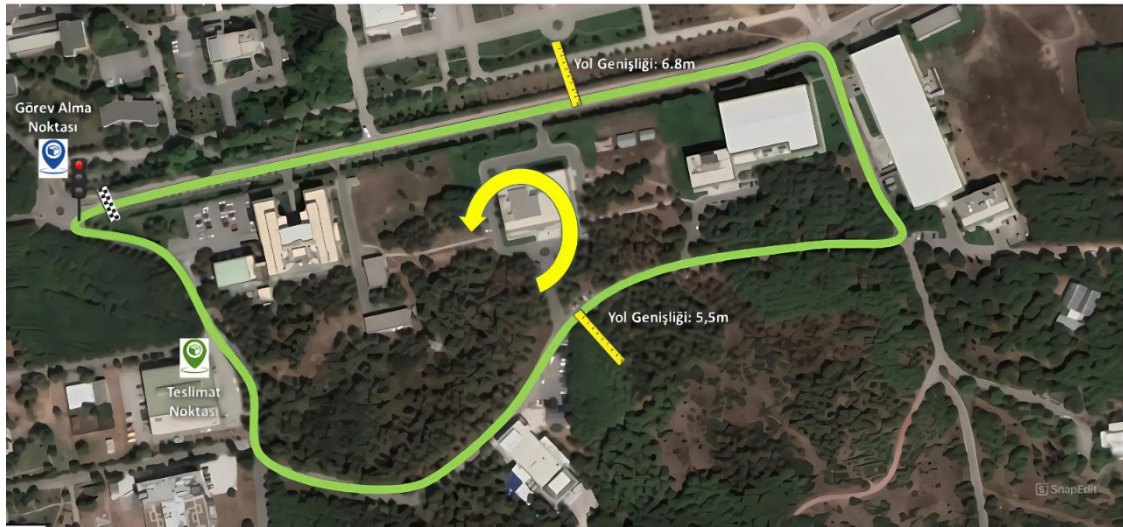
Buradaki denklemlerde sırasıyla; m araç kütlesini, a araç ivmesini, g yerçekimi ivmesini, α yol eğimi, ρ_a hava yoğunluğunu, C_d araç sürüklenme sabitini, A_v araç ön alanını, V_v araç

hızını, V_w rüzgar hızını, C_r araç yuvarlanma direncini temsil etmektedir [3,8,11]. Araç ister tork değeri hesaplanırken pist ortalama eğim değeri %1,4, rüzgar hızı 0 km/h olarak hesaba katılmıştır. Tekerlek ataleti ise Denklem (7) yardımıyla hesaplanmıştır.

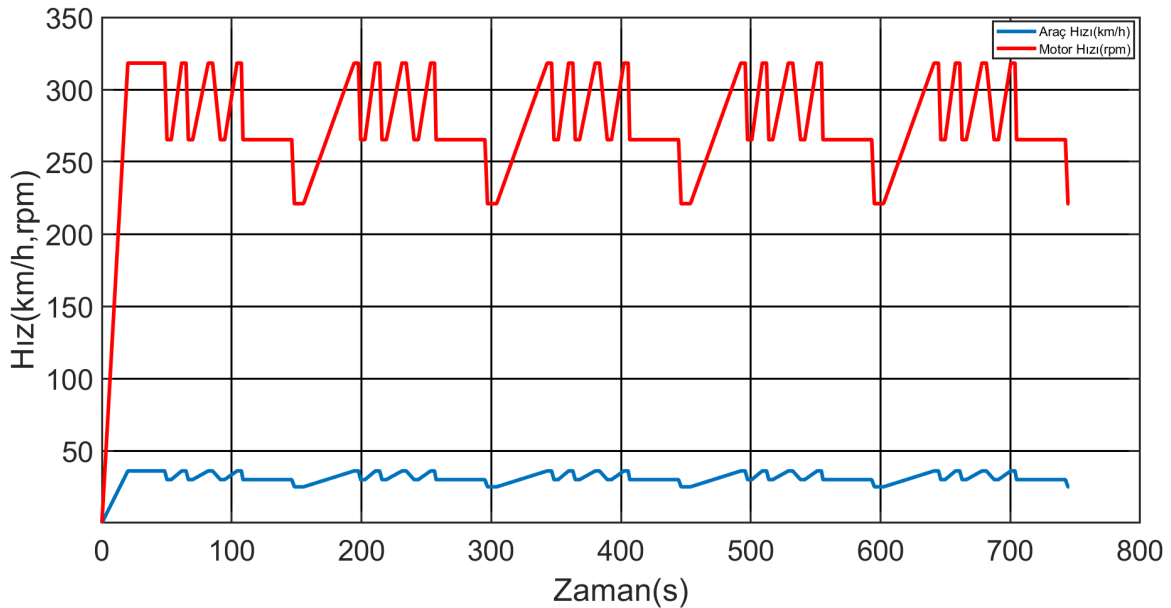
$$I = m \cdot r^2 \quad (7)$$

Burada m tekerlek kütlesi ve r tekerlek yarıçapını temsil etmektedir.

Yarış pistinin Google Earth üzerinden elde edilen iki boyutlu görüntüsü Şekil 2’de sunulmuştur.



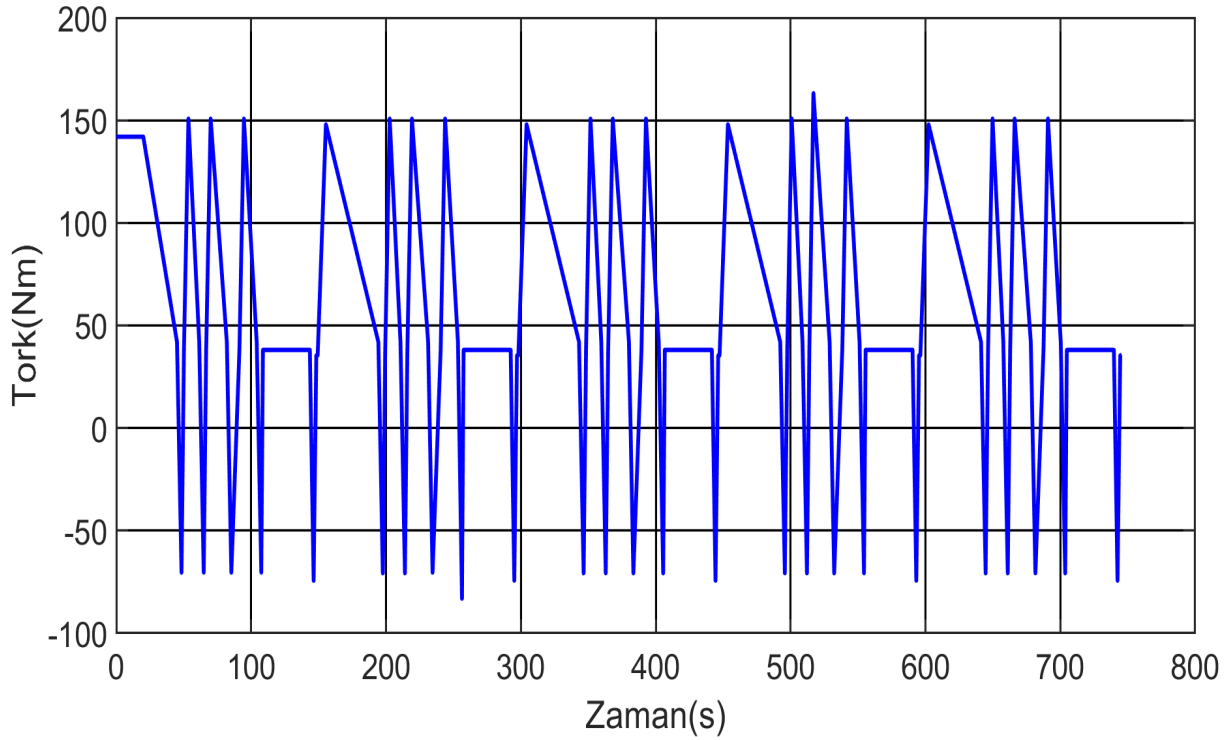
Şekil 2. TEKNOFEST “Uluslararası Efficiency Challenge Elektrikli Araç Yarışları” yarış pisti [18]



Şekil 3. Araç hızı ve motor hızının bir döngüdeki değerleri

Sürüş döngüsü sonuçlarının elde edilebilmesi için araç geometrik ve aerodinamik parametrelerinin değerleri ile birlikte aracın pisti bitirmesi için süre, virajların ve düzlüklerin mesafeleri, virajlardaki araç hız değerleri ve düzlüklerde araç hız değerleri kullanılmıştır. Virajlarda araç hızının belirlenmesinden önce ortalama araç hızı pisti bitirme süresi ve toplam pist uzunluğu değerlerinden 28 km/h olarak

hesaplanmıştır. Hesaplamalar ve analizlerin sonucunda araç belirtilen hız değerleri ile yarışı 745,4 s'de tamamlamaktadır. Bu doğrultuda, araç hızı ve araç hızından elde edilmiş motor hızının zamana göre değişimi Şekil 3'de verilmiştir. Araç ister torku, sabit ivmeli hareket boyunca sürekli değişmekte; frenleme noktalarında ise negatif değerlere ulaşmaktadır (Şekil 4).



Şekil 4. Araç ister torkunun zamanla değişimi

3. MOTOR TASARIMI

Sürüş döngüsünde elde edilen maksimum tork ve hız değerlerine göre, aracın ihtiyaç duyduğu maksimum mekanik güç Denklem (8) ile 5026,16 W olarak hesaplanmıştır. Motor tasarımı için maksimum ve ortalama mekanik güç değeri referans alınmaktadır [20]. Sistemde iki motor kullanılacağından, her bir motor için 75,4 Nm tork ve 316,6 rpm hız değerleri esas alınarak yaklaşık 2500 W mekanik güç gereksinimi hesaplanmıştır.

3.1. Motor Boyutlandırması

Sürüş döngüsü içerisinde araç ister ortalama mekanik gücü ise Denklem (9) yardımıyla 1811,55 W olarak hesaplanmıştır. Sürüş döngüsü araç ister ortalama mekanik güç hesabı yapılırken, ortalama araç ister tork değeri ve ortalama motor hız değeri sırasıyla, 62.876 Nm ve 275.128 rpm olarak hesaba katılmıştır. [17,21-22].

$$P_m = \omega_{\max} \cdot T_{\max} \quad (8)$$

$$P_{\text{ort}} = \omega_{\text{ort}} \cdot T_{\text{ort}} \quad (9)$$

Motor doğru akım bara gerilimi (V_{DCBUS}) 72V'dur. Uygulamada kullanılacak olan HUB motor jantı 274 mm değerine sahiptir. Motor temel boyut hesapları yapılırken birim hacim başına tork (Torque Ratio Per Volume - TRV) değeri belirleyici bir kriterdir. İstenen motor torku, rotor çapı ve TRV değerleri bilindiği için Denklem (10) yardımıyla motor uzunluğu hesaplanmıştır [21-22].

$$TRV = \frac{T}{V_{\text{rotor}}} = \frac{4 \cdot T}{\pi \cdot L_{\text{stk}} \cdot D^2} \quad (10)$$

Burada T motor torkunu, V_{rotor} rotor hacmini, L_{stk} motor eksenel uzunluk, D rotor çapını temsil etmektedir. Yüksek enerjili sinterlenmiş NdFeB mıknatıs kullanılacağı için TRV değeri 40 kNm/m³ olarak hesaba katılmıştır [22]. Bu

değer, NdFeB mıknatısların sağladığı yüksek manyetik akı yoğunluğu ve daha önce benzer motor topolojilerinde elde edilen değerlerle uyumlu olduğu için tercih edilmiştir. Ayrıca, literatürde küçük hacimli dış rotorlu motorlarda TRV değeri genellikle 35–45 kNm/m³ aralığında tanımlanmaktadır. Böylelikle Denklem (10) yardımıyla motor uzunluğu (L_{stk}) değeri 38,5 mm olarak hesaplanmıştır.

Uygulamada kullanılacak olan HUB motor jantı, mıknatısların sabitleneceği yüzey için 6 mm rotor saç kalınlığı sabittir. Mıknatıs(kutup) boyutlandırması için Denklem (11), Denklem (12) ve Denklem (13) kullanılmıştır.

$$\lambda = \frac{L_{stk}}{\tau_p} \quad (11)$$

$$e = \frac{\tau_{arc}}{\tau_p} \quad (12)$$

$$\tau_p = \frac{\pi \cdot D_{rotor}}{p} \quad (13)$$

Bu denklemler içerisindeki sembollerin anlamları sırasıyla; L_{stk} motor eksenel uzunluğunu, τ_p kutup adımını, τ_{arc} kutup yerleştirme açısını, D_{rotor} rotor çapını ve p ise kutup sayısını temsil etmektedir [22]. Motor rotor saç kalınlığı (rotor back iron thickness) 11 mm değerine, mıknatıs kalınlığı 5 mm değerine ve motor dış çapı 274 mm değerine sahip olduklarından dolayı rotor iç çapı 252 mm olarak hesaplanır. Mıknatıs kalınlığı 5 mm; üretim kısıtları nedeniyle hava aralığı ise 1 mm olarak belirlenmiş ve bu değerlere göre analiz süreci başlatılmıştır. Bu durumda stator çapı 250 mm değerine sahiptir.

3.2. Oluk/Kutup Seçimi

Motor hızı ile kutup sayısı arasındaki ilişki Denklem (14)'de verilmiştir [21].

$$n = \frac{60 \cdot f_e}{p} \quad (14)$$

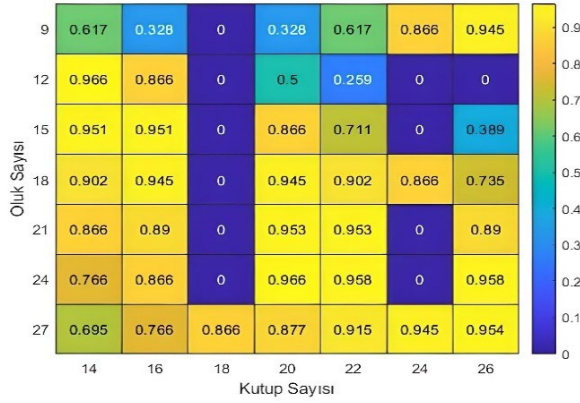
Bu eşitlikte n devir sayısını, f_e elektriksel frekansı, p kutup çifti sayısını temsil etmektedir. Motorun hesaplanan maksimum devir sayısında (316,6 rpm) çalışabilmesi için farklı kutup sayılarında gerekli olan elektriksel frekans değerleri Çizelge 3'de verilmiştir.

Çizelge 3. Kutup sayısı ve frekans ilişkisi

Kutup Çifti Sayısı	Elektriksel Frekans
1	5,28
2	10,55
3	15,83
4	21,11
5	26,38
6	31,66
7	36,94
8	42,21
9	47,49
10	52,77
11	58,04

Elektriksel frekansın fazla olmasının nüve kayıplarını artırma gibi dezavantajları vardır. Ancak çok düşük seçilmesi durumunda da modülasyon zorlukları oluşacaktır. Bu sebeple kutup çifti sayısı(p) 10 ve 11 şebeke frekansına yakın değeriyle uygun olarak görülmektedir. Öte yandan motor kutup sayısının belirlenmesi için dikkat edilmesi gereken noktalardan bir diğeri de dengesiz manyetik kuvvetlerdir (Unbalanced Magnetic Forces-UMF). Kutup sayısı($2p$) = $3 \cdot k - 1$ olan makinelerde radyal ve çevresel gezici gerilimlere (radial and circumference traveling stresses) bağlı iki bileşenli bir UMF ortaya çıkar. Buna karşın, $2p = 3k + 1$ olan kutup sayılarında bu bileşenlerin etkisi kısmen azalır. Bu etkileşimler nedeniyle, aynı oluk sayısı için, kutup sayısı oluk sayısına göre daha küçük bir değere sahip olan makine, kutup/oluk sayıları bir farklı olduğunda daha büyük bir dengesiz manyetik kuvvet üretir. Diğer bir deyişle, aynı kutup sayısı için, kutup/oluk sayıları iki farklı olan makineler, kutup/oluk sayıları bir farklı olan makinelerden daha az dengesiz manyetik kuvvet üretir [23]. 22 kutuplu (11 çift) yapı, stator oluk sayısı ile birlikte belirli kutup/oluk oranlarında daha dengeli manyetik kuvvet dağılımı sağlar. 24 oluk ile birlikte 22 kutuplu yapı kullanıldığında sargı faktörü yüksek kalmakta ve UMF oluşumu minimuma inmektedir. Bu, özellikle düşük hızda çalışan ve yüksek tork gerektiren dış rotorlu motorlar için önemli bir avantajdır. Bu durumda 22 kutup sayısı($2p$) ve 24 ve 21 oluk sayısı(S) için sargı faktörü (k_w) 0,958 ve 0,953 değerine sahiptir. Çeşitli kutup ve oluk sayısı kombinasyonlarına göre sargı faktörü hesaplama sonuçları Şekil 5'de verilmiştir. Çalışma kapsamında 22 kutup sayısı için 24 ve 21 stator oluk sayıları analiz edilmiş ve 24 stator oluk sayısına karar verilmiştir. Kutup sayısı 22 ve stator oluk sayısı 24 kombinasyonu için sargı faktörü 0.958 olarak, stator oluk sayısının her

bir faza ve kutup sayısına oranı (q) ise 0,364 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5. Oluk kutup kombinasyonlarına karşılık gelen sargı faktörü değerleri

3.3. Sarım Sayısı Ve Oluk Geometrisi

Endüklenen faz gerilimi faz başına akı, faz başına sarım sayısı, toplam iletken sayısı, oluk başına iletken sayısı ve motor faz gerilimi değerleri Denklem (15-20) ile hesaplanır [24-26].

$$E = \frac{2 \cdot \pi}{k_w \cdot W_a \cdot Fe \cdot \phi \cdot \sqrt{2}} \quad (15)$$

$$\phi = \frac{2}{\pi} \cdot (B_g \cdot \tau_p \cdot L) \quad (16)$$

$$W_a = \frac{E \cdot \sqrt{2}}{2 \cdot \pi \cdot k_w \cdot Fe \cdot \phi} \quad (17)$$

$$Z = 2 \cdot m \cdot W_a \quad (18)$$

$$Z_0 = \frac{Z}{N_s} \quad (19)$$

$$V_{RMS} = \frac{V_{DCBUS}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{2}} \quad (20)$$

Burada E endüklenen faz gerilimini, k_w sargı faktörünü, W_a faz başına sarım sayısını, Fe elektriksel frekansı, ϕ manyetik akı miktarını, Z toplam iletken sayısını, m faz sayısını, Z_0 oluk başına iletken sayısını, N_s stator oluk sayısını, V_{RMS} motor faz RMS gerilimini temsil etmektedir. V_{RMS} değeri 29,39V olarak hesaplanmıştır. Sonrasında Denklem (17) kullanılarak kutup başına akı değeri hesaplanmıştır. Bu eşitlik içerisinde hava aralığı akı yoğunluğu (B_g) 0,8 T-0,85 T arasında bir değerde olacağı ön görülmüştür. Hesaplama için akı yoğunluğu 0,85 T olarak hesaba katılmıştır. Buna göre; kutup başına manyetik akı miktarı 1,63 mWb, faz başına sarım sayısı

değeri 178,81 ve toplam iletken sayısı 1072,86 olarak bulunmuştur. Sonrasında, oluk başına iletken sayısı 44,7 olarak hesaplanmış olup, tam sayı gerekliliği nedeniyle iletken sayısı 46 olarak yuvarlanmıştır. Bu değer hem üretim kolaylığı hem de oluk doluluk oranının %60 sınırını aşmaması açısından uygundur. Ayrıca akım yoğunluğu 5 A/mm² seviyesinde tutularak kablo kesiti ısınma problemlerine karşı güvenli sınırlarda tutulmuştur. Bu durumda, her bir oluk için sarım sayısı 23 tur olarak belirlenmiştir. İletken kesit hesabı yapılırken motor verimi yaklaşık %85 olarak alındığı taktirde faz akımı RMS değeri 33,36 A olarak hesaplanır. Doğal soğutmalı sistemlerde termal güvenlik açısından akım yoğunluğunun 5 A/mm²'yi aşmaması gerektiği göz önünde bulundurulmuştur [22]. Bu sınır değer esas alınarak iletken kesit alanı ve kablo kalınlığı hesaplamaları yapılmış, motorun sürekli çalışma koşullarında aşırı ısınmasının önüne geçilmesi hedeflenmiştir. Bu durumda kablo kesit alanı 6,67 mm² olarak hesaplanmıştır. Kamaların bulunduğu oluklarda, düşük güçlü uygulamalar için %60 civarında doluluk oranı hedeflenir. Oluk alanı ise kablo kesit alanı, toplam iletken sayısı ve %60 oluk doluluk oranı göz önüne alındığında 255,76 mm² olarak hesaplanmıştır.

Stator boyutlandırmasında, oluk adımı temel bir parametredir. Bu değer Denklem (21) ile hesaplanabilir.

$$\tau_0 = \frac{D_{stator} \cdot \pi}{N_s} \quad (21)$$

Burada τ_0 stator oluk adımı değerini, D_{stator} stator çapını, N_s oluk sayısını temsil etmektedir. Buna göre Denklem (21) ile hesaplanan stator oluk adımı değeri 32,73 mm olarak elde edilmiştir. Stator dış genişliğinin (b_d) hesaplanması için oluk adımı, oluk akı yoğunluğu, stator çeliği sıkıştırma faktörü ve hava aralığı akı yoğunluğu değerleri kullanılır ve Denklem (22) ile hesaplanır.

$$b_d = \frac{\tau_0 \cdot B_g}{(k_{fe} \cdot B_s)} \quad (22)$$

Burada b_d stator dış genişliğini, k_{fe} sıkıştırma faktörünü, B_s stator manyetik akı yoğunluğunu ve B_g ise hava aralığı manyetik akı yoğunluğunu temsil etmektedir. Oluk adımı değeri 32,73 mm, stator çeliği sıkıştırma faktörü

değeri 0,98, B_s değeri M470-50A materyali için 1,8 T ve B_g değeri 0,85 T olarak hesaba katıldığında b_d değeri 15,77 mm olarak hesaplanır. Oluk üst genişliği (b_0) ise Denklem (23) yardımıyla 16,96 mm olarak belirlenmiştir.

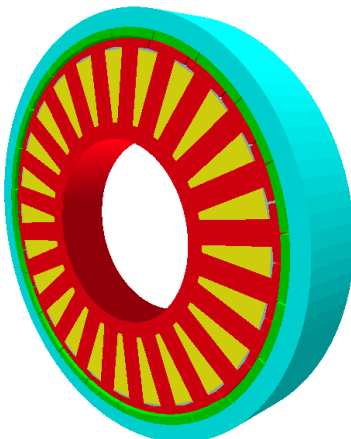
$$b_0 = \tau_0 - b_d \quad (23)$$

Gerekli oluk alanı bilindiğinden dolayı oluk uzunluğu 15,08 mm olarak hesaplanır.

4. ELEKTROMANYETİK SONLU ELEMANLAR ANALİZİ SONUÇLARI

Hesaplanan motor parametreleri, sonlu elemanlar analiz (SEA) yazılımına aktarılmıştır. Tasarlanan motorun üç boyutlu modeli Şekil 6'da sunulmuştur. Analizler, 72 V DC batarya gerilimi ve 45 A etkin faz akımı altında, motor 316,6 rpm hızla çalıştırılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4'te paylaşılmıştır.

Çizelge 4'te sunulan veriler, tasarlanan motorun hafif elektrikli araçlar için oldukça verimli ve dengeli bir performans sunduğunu göstermektedir. Motorun ortalama momenti 78,582 Nm, şafttan alınabilecek tork değeri ise 75,683 Nm olarak belirlenmiştir. Bu değerler, aracın ihtiyaç duyduğu çekiş gücünü sağlayacak seviyede olup, moment dalgalılığının %11,96 seviyesinde olması motorun kararlılığını değerlendirmek açısından önemli bir göstergedir. Dalgalanma seviyesi kabul edilebilir aralıkta olmakla birlikte, daha stabil bir tork çıkışı elde etmek için ek optimizasyon çalışmaları düşünülebilir. Özellikle düşük hız aralığında çalışan motorlar için sürüş konforu açısından önem arz eden moment dalgalılığı, motor kontrol algoritmalarında yapılacak iyileştirmelerle daha da azaltılabilir.



Şekil 6. Dış Rotorlu SMPMSM

Çizelge 4. Elektromanyetik analiz sonuçları

Değişken	Değer	Birim
Ortalama Moment	78,582	Nm
Moment Dalgalılığı	9,3118	Nm
Moment Dalgalılığı [%]	11,963	%
Sabit Tork İçin Hız Limiti	350,01	rpm
Yüksüz Hız(No Load Speed)	425,98	rpm
Giriş Gücü	2778,6	Watts
Toplam Kayıplar (On Load)	269,4	Watts
Çıkış Gücü	2509,2	Watts
Verimlilik	90,305	%
Şafttan Alınabilecek Tork	75,683	Nm
Güç Faktörü	0,79606	
Güç Faktörü Açısı	37,245	EDeg
Faz Terminal Gerilimi (rms)	28,095	Volts

Motorun hız parametreleri incelendiğinde, sabit tork için hız limiti 350,01 rpm, yüksüz hızı ise 425,98 rpm olarak hesaplanmıştır. Bu değerler, motorun belirlenen sürüş döngüsüne uygun olarak tasarlandığını ve özellikle düşük hızlarda yüksek tork üreterek hafif elektrikli araçlar için gerekli performansı sağlayabileceğini göstermektedir.

Güç analizine bakıldığında, giriş gücü 2778,6 W, çıkış gücü 2509,2 W ve toplam kayıplar 269,4 W olarak hesaplanmıştır. Bu veriler doğrultusunda, motorun verimliliği %90,3 olarak elde edilmiştir ki bu, elektrik motorları için oldukça yüksek bir değer olup enerji kayıplarının düşük seviyede olduğunu göstermektedir. Yüksek verimlilik, batarya kapasitesinin daha etkin kullanılmasını sağlayarak aracın menzilini artıracaktır.

Elektriksel parametreler açısından incelendiğinde, motorun güç faktörü 0,79606 olarak hesaplanmış ve güç faktörü açısı 37,245° olarak belirlenmiştir. Güç faktörü 1'e ne kadar yakın olursa motorun şebekeden çektiği akımın o kadar verimli kullanıldığı anlamına gelir. Bu değer, motorun oldukça iyi bir seviyede çalıştığını gösterse de, belirli kontrol algoritmaları ve sürücü optimizasyonlarıyla daha da iyileştirilebilir.

Tasarlanan motorun ulaştığı %90,3 verimlilik, literatürde benzer dış rotorlu SMPMSM yapılarında elde edilen değerlere paralellik göstermektedir ve teorik anlamda manyetik kayıpların minimize edilerek yüksek enerji dönüşüm verimliliğinin sağlandığını ortaya

koymaktadır. Moment dalgalanması değeri olan %11,96 ise hafif elektrikli araç uygulamalarında kabul edilebilir sınırlar içerisinde yer almakta olup, düşük hızda çalışan tahrik sistemlerinde karşılaşılan tipik dalgalanma oranlarıyla örtüşmektedir [27]. Elde edilen bu sonuçlar, özellikle düşük hızda yüksek tork gerektiren yarış uygulamalarında, teorik beklentilerle uyumlu şekilde motorun kararlı ve verimli bir performans gösterebileceğini ortaya koymaktadır. Tasarımın dış rotorlu yapıda ve doğrudan tekerlekle bütünleşik olması, pratikte şanzıman, diferansiyel gibi elemanlara olan ihtiyacı ortadan kaldırarak uygulama kolaylığı ve hafiflik sağlamaktadır.

Sonuç olarak, bu motor tasarımı hafif elektrikli araçlar için yüksek verimli bir çözüm sunmaktadır. Motorun düşük hızlarda yüksek tork üretme kapasitesi, yarış koşullarında ve enerji verimliliği odaklı uygulamalarda başarılı olabileceğini göstermektedir. Moment dalgalanmasının azaltılması ve güç faktörünün iyileştirilmesi, sistemin performansını daha da artırabilir. Genel olarak, motorun belirlenen tasarım gereksinimlerini büyük ölçüde karşıladığı ve hafif elektrikli araç yarışları gibi uygulamalarda etkin bir şekilde kullanılabileceği söylenebilir.

5. SONUÇ

Bu çalışma, dış rotorlu SMPMSM motor tasarımını sürüş döngüsü verilerine dayalı olarak doğrudan pist koşullarından türetilmiş hız ve tork profilleriyle optimize eden araç modeli tabanlı sistematik bir yaklaşım önermektedir. Literatürde genel geçer test döngüleri kullanılarak yapılan motor analizlerinden farklı olarak, bu çalışmada gerçek pist geometrisi ve zamansal sürüş profilleriyle bütünleşmiş bir tasarım süreci yürütülmüştür. Bu yönüyle çalışma, benzerlerinden ayrılarak özel yarış pistlerine özgü senaryolara uyarlanabilir motor tasarımı yaklaşımı sunmaktadır. Çalışmanın başlangıç aşamasında, yarış pistine ait hız ve tork gereksinimleri belirlenmiş, sürüş döngüsüne bağlı olarak aracın ihtiyaç duyduğu performans kriterleri hesaplanmıştır. Araç ivmesi, aerodinamik direnç ve mekanik parametreler dikkate alınarak, sürüş sırasında ortaya çıkan tork talepleri kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda, motorun tork ve hız gereksinimlerine uygun

olacak şekilde tasarım kriterleri oluşturulmuştur.

Tasarım sürecinde, düşük hızlarda yüksek tork üretebilen ve enerji verimliliğini maksimize edebilecek bir motor topolojisi tercih edilmiştir. Bu kapsamda, dış rotorlu, yüzey montajlı kalıcı mıknatıslı senkron motor yapısının, hafif elektrikli araç uygulamaları için optimum çözüm sunduğu değerlendirilmiştir. Motorun boyutlandırılması ve manyetik tasarımı, belirlenen performans hedefleri doğrultusunda gerçekleştirilmiş, akı yoğunluğu, oluk ve kutup yapısı optimize edilmiştir. Son aşamada, tasarlanan motor sonlu elemanlar analizi kullanılarak değerlendirilmiş ve elde edilen sonuçlar, motorun hem elektromanyetik hem de mekanik performans açısından belirlenen gereksinimleri karşıladığını ortaya koymuştur.

Bu çalışma, hafif elektrikli araçlara yönelik motor tasarımında sürüş döngüsü ve araç modeli tabanlı sistematik bir yaklaşım sunmaktadır. Elde edilen sonuçların, özellikle TEKNOFEST “Uluslararası Efficiency Challenge Elektrikli Araç Yarışları” gibi yarışmalara katılım sağlayacak ekipler ve hafif elektrikli araç teknolojileri üzerine çalışan araştırmacılar için yol gösterici olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

1. Cao, J., Chen, X., Qiu, R., Hou, S., "Electric vehicle industry sustainable development with a stakeholder engagement system", *Technology in Society*, Vol. 67, Pages 101771, 2021.
2. Pielecha, J., Skobiej, K., Kurtyka, K., "Exhaust Emissions and Energy Consumption Analysis of Conventional, Hybrid, and Electric Vehicles in Real Driving Cycles", *Energies*, Vol. 13, Issue 23, Pages 6423, Dec. 2020.
3. Kıyaklı, A. O., Solmaz, H., "Modeling of an Electric Vehicle with MATLAB/Simulink", *International Journal of Automotive Science And Technology*, Vol. 2, Issue 4, Pages 9-15, Dec. 2018.
4. Camargos, Pedro H., Ricardo E. Caetano., "A performance study of a high-torque induction motor designed for light electric vehicles applications.", *Electrical Engineering*, Vol. 104, Issue 2, Pages 797-805, 2022.

5. Polat, A.O., et al., "Light electric vehicle performance with digital twin technology: a comparison of motor types.", *Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 49, Issue 5, Pages 7209-7222, 2024.
6. Krasopoulos, C. T., Beniakar, M. E., Kladas, A. G., "Multicriteria PM Motor Design Based on ANFIS Evaluation of EV Driving Cycle Efficiency", *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, Vol. 4, Issue 2, Pages 525-535, June 2018.
7. Hu, X., Guo, H., Qian, H., Ding, X., Yang, Y., "Development of a high-power-density motor for formula SAE electric race car", *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Beijing, China, Pages 6618-6622, 2017.
8. Targosz, M., Skarka, W., Przystałka, P., "Model-Based Optimization of Velocity Strategy for Lightweight Electric Racing Cars", *Journal of Advanced Transportation*, Vol. 2018, Article ID 3614025, Pages 20, 2018.
9. International Energy Agency (IEA), "Global EV outlook 2020", <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2020>, February 10, 2025.
10. Ballo, F., Stabile, P., Gobbi, M., Mastinu, G., "A Lightweight Ultra-Efficient Electric Vehicle Multi-Physics Modeling and Driving Strategy Optimization", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 71, Issue 8, Pages 8089-8103, Aug. 2022.
11. Pusztai, Z., Körös, P., Szauter, F., Friedler, F., "Vehicle Model-Based Driving Strategy Optimization for Lightweight Vehicle", *Energies*, Vol. 15, Issue 10, Pages 3631, May 2022.
12. Bolvashenkov, I., Kammermann, J., Herzog, H.-G., "Methodology for selecting electric traction motors and its application to vehicle propulsion systems", *2016 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, Pages 1214-1219, Capri, Italy, 2016.
13. Hashemnia, N., Asaei, B., "Comparative study of using different electric motors in the electric vehicles", *2008 18th International Conference on Electrical Machines*, Pages 1-5, Vilamoura, Portugal, 2008.
14. Hadraoui, H., et al., "A multi-criteria analysis and trends of electric motors for electric vehicles.", *World Electric Vehicle Journal*, Vol. 13, Issue 4, Pages 65, 2022.
15. Yilmaz, M., "Limitations/capabilities of electric machine technologies and modeling approaches for electric motor design and analysis in plug-in electric vehicle applications", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 52, Pages 80-99, 2015.
16. Sun, Y., Li, M., Liao, C., "Analysis of wheel hub motor drive application in electric vehicles", *MATEC Web of Conferences*, Vol. 100, Pages 01004, 2017.
17. Kumar, A., Chandekar, A., Deshmukh, P. W., Ugale, R. T., "Development of electric vehicle with permanent magnet synchronous motor and its analysis with drive cycles in MATLAB/Simulink", *Materials Today: Proceedings*, Vol. 72, Issue 3, Pages 643-651, 2023.
18. TEKNOFEST, "Uluslararası Efficiency Challenge Elektrikli Araç Yarışları Şartnamesi", <https://www.teknofest.org/tr/competitions/competitions/44>, April 1, 2023.
19. Vidhya, S. D., Balaji, M., "Modelling, design and control of a light electric vehicle with hybrid energy storage system for Indian driving cycle", *Measurement and Control*, Vol. 52, Issue 9-10, Pages 1420-1433, 2019.
20. Cardoso, J. F., Chillet, C., Gerbaud, L., Belhaj, L. A., "Electrical Machine Design by optimization for E-motor Application: a Drive Cycle Approach", *2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Pages 2514-2519, Gothenburg, Sweden, 2020.
21. Canseven, H. T., Altıntaş, M., Bakbak, A., Ayaz, M., Meşe, E. and Pyrhönen, J., "Maintaining Synchronous Operation of a Damperless Dual-Port Tooth-Coil-Winding PMSG", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 60, Issue 1, Pages 112-122, 2024.
22. Rosu, M., Zhou, P., Lin, D., Popescu, M., Rallabandi, V., Staton, D., Blaabjerg, F., Ionel, D. M., "Multiphysics simulation by design for Electrical Machines, Power Electronics, and drives", *IEEE Press*, Pages 8-9, 2018.
23. Zhu, Z. Q., Jamil, M. L. M., Wu, L. J., "Influence of Slot and Pole Number Combinations on Unbalanced Magnetic Force in PM Machines With Diametrically Asymmetric Windings", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 49, Issue 1, Pages 19-30, 2013.
24. Levent, A., Lordoglu, A., Aydeniz, M., "Design and Optimization of Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Vehicle Applications", *GPECOM*, Pages 148-151, 2020.

25. Choi, G., Jahns, T. M., "Design of electric machines for electric vehicles based on driving schedules", 2013 International Electric Machines & Drives Conference, Chicago, IL, USA, Pages 54-61, 2013.
26. Bakbak, A., et al., "PMSG-Based Dual-Port Wind-Energy Conversion System With Reduced Converter Size", IEEE Access, Vol. 9, Pages 118953-118967, 2021.
27. Jang, G., Sehwan K., Gilsu C., "Design and Optimization of an Outer-Rotor PMSM for Torque Ripple Minimization.", 2024 27th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). IEEE, 2024.