ELEKTRİKLİ ARAÇ TASARIMINDA MOTORUN BOYUTLANDIRILMASI

Levent Akgül[1], Hatice Kurnaz Araz[2], Ömer Tutucu[3], Furkan Aydoğan[4], M. Ersin Erçin[5], Ceyhun Sezenoğlu[6]

[1,2,3,4,5,6] Cadem A.Ş., Bursa, Türkiye
[2] İlgili Yazar: Hatice Kurnaz Araz, haticek@cadem.com.tr

ÖZET

Bir elektrikli araç için uygun elektrik motorunun tasarımı oldukça önemlidir. Motor tasarımına başlamadan önce ihtiyaç duyulan tork, anma devri ve azami devri belirlenmelidir. Bu değerler ise motorun kullanılacağı araç platformunun mekanik özelliklerine ve aracın performans isterlerine bağlıdır. Bu çalışmada motor tasarımında kullanılan başlangıç parametreleri aracın mekanik verileri ve performans isterleri kullanılarak elde edilmesi hedeflenmiştir. Bu doğrultuda gerekli eşitlikler ve yöntemler açıklanmıştır. Daha sonra bu eşitlik ve yöntemler kullanılarak bir örnek uygulama gerçekleştirilmiştir. Son olarak örnek uygulama sonucu elde edilen hedef araç ve motor mevcut 17 farklı elektrik araç ile kıyaslanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli araçlar, Motor, Elektrik tahrik sistemi, Motor boyutlandırması

1. GİRİŞ

Elektrikli araçların giderek yaygınlaşması ile birlikte bu araçlara yönelik bileşenleri üreten yan sanayi de genişlemektedir. Aracın mekanik bileşenlerinin yanında elektriksel bileşenler de önemli bir yer tutmaktadır. Elektrikli araçların ana elektriksel bileşeni güç aktarma sistemi ve batarya paketidir. Batarya paketinin kapasitesi menzili, gerilim ve akım seviyesi ise motor ve sürücü tasarımını etkilemektedir. Aracın performansını belirleyen ana unsur aracın güç aktarma sistemidir. Bu sistemin içinde motor, sürücü ve dişli kutusu veya diferansiyel yer almaktadır. Bir elektrikli araç için doğru motor, sürücü ve dişli kutusu seçimi oldukça önemlidir. Bunun için aracın mekanik özelliklerini iyi bilmek, performans isterlerini ise iyi belirlemek gerekir.

Elektrikli araçlar gündemde olduğundan beri literatürde elektrikli araçlarda kullanılabilecek motor tipleri farklı çalışmalarda kıyaslanmıştır [1, 2]. Elektrikli araçlar ile hibrit elektrikli araçlar için güç aktarma sistemleri incelenmiştir [3]. Elektrikli araçlar için anahtarlamalı relüktans motorun [4] ve gömülü mıknatıslı motorun [5] boyutlandırılması ile ilgili çalışmalar bulunmaktadır. Ancak bu çalışmalar daha çok makinenin tasarımına yönelik çalışmalardır. Ayrıca elektrikli araçların bileşenleri anlamında çalışmalar da literatürde mevcuttur [6]. Bunlar da daha çok güç, menzil ve maliyet odaklı çalışmalardır. Bu çalışmada daha temelde mekanik özellikleri belli ve performans isterleri verilen bir elektrikli araç mekaniği için uygun bir motor performans karakteristiğinin veya diğer bir deyişle motor tasarımı öncesinde ihtiyaç olan başlangıç parametrelerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Bu doğrultuda yapılan hesaplamalar sonucunda ihtiyaç duyulan motorun torku, nominal ve azami devri ile motor gücü elde edilmektedir. Ayrıca azami hızda gerekli tork da hesaplanarak motorun araç mekaniğine bağlı bir parametresi daha hesaplanmaktadır.

Birinci bölümde elektrikli aracın isterleri, yani aracın mekanik verileri ve performans isterleri ile olan ilişkileri açıklanmaktadır. Bu veriler doğrultusunda motor verilerinin hesaplama yöntemleri irdelenmiştir. İkinci bölümde örnek bir araç için bu hesaplamalar yapılmakta ve uygulama aracı motorunun teknik isterleri elde edilmektedir. Üçüncü bölümde piyasada bilgileri elde edilen 17 farklı elektrikli aracın değerleri ile karşılaştırma yapılmıştır.

2. ELEKTRİKLİ ARAÇ İSTERLERİ

Elektrik motoru belirlenmeden önce, motorun uygulanacağı araç platformunun mekanik özelliklerinin bilinmesi gereklidir. Mekanik özellikler arasında aracın yüklü ağırlığı, dişli oranı (diferansiyel vb.), teker çapı, aracın yüzey alanı ve sürüklenme katsayısı yeterlidir. Tırmanma açısı, azami sürat, anma torku ve azami süratte gerekli tork verileri ile de performans değerlendirmeleri yapılabilmektedir.

Tablo 1. Elektrikli aracın mekanik ve performans verileri

Mekanik Veriler	
m	Aracın yüklü ağırlığı [kg]
k_d	Dişli oranı
D	Teker çapı [m]
A_f	Aracın ön yüzey alanı [m^2]
C_d	Sürüklenme katsayısı
Performans Verileri	
G	Tırmanma açısı [derece]
v_m	Azami sürat [km/s]

Tablo 1'de görülmekte olan mekanik veriler aracın mekanik tasarımı sonucu elde edilmektedir. Genellikle bu değerler araç üreticisi tarafından tanımlanmaktadır. Aracın performans verileri iki farklı şekilde elde edilebilmektedir. Birincisi, yine araç üreticisi tarafından talep edilebilmektedir. Diğer bir yol ise piyasada mevcut bulunan bir elektrik tahrik sistemi için bu performans değerleri hesaplanabilmektedir. Bu çalışmada, motor tasarımına ışık tutması adına, performans isterlerinin de araç üreticisi tarafından verildiği varsayılmıştır.

Performans verileri; mekanik veriler ile elektrik tahrik sistemine ait veriler kullanılarak hesaplanmaktadır. Performans verilerinin verildiği durumda ise buradan elektrik tahrik sistemine ait veriler çekilebilmektedir. Performans verilerinin hesaplandığı eşitlikler aşağıda sırasıyla açıklanmaktadır.

Aracın azami tırmanma açısı, azami yükte daimî olarak tırmanabileceği rampa açısıdır ve şöyle hesaplanmaktadır.

$$G = \frac{180}{\pi} \sin^{-1}\left(\frac{2k_d T}{Dmg}\right) \tag{1}$$

Burada k_d dişli oranı, T anma torku, D tekerlek çapı, m aracın yüklü ağırlığı ve g yerçekimi ivmesini (9.8 m/s^2) ifade etmektedir. Tırmanma açısı verildiği takdirde gerekli tork bu eşitlikten kolayca hesaplanabilmektedir. Ayrıca karayollarında kullanılan yüzde değeri hesaplanmak istenirse $G_{egim} = \tan(G)100$ eşitliği ile elde edilebilir. Motorun anma torku tırmanma açısından elde edilen tork değeri olarak değerlendirilmektedir.

Aracın azami hızı şu eşitlik ile hesaplanmaktadır.

$$v_m = \frac{60\pi n_m D k_d}{100000} \tag{2}$$

Burada n_m elektrik motorunun azami dönüş hızıdır. Talep edilen hız verildiğinde de motorun azami dönüş hızı hesaplanabilmektedir. Motorun azami devir sayısı aracın istenilen azami süratine göre elde edilmektedir.

Azami araç hızında, yani son süratte, elektrik motorunun momentinin araç üzerine binen kuvvetleri karşılaması sağlanmalıdır. Bu nedenle, sınır değer olan son süratte bu kuvvetler hesaplanmalıdır. Bir aracın üzerine binen kuvvetler temelde; lastik sürtünmesi F_r, rulman sürtünmesi F_b, sürüklenme kuvveti F_w ve eğer araç yokuş çıkıyorsa yerçekimi kuvveti F_g'dir. Azami araç hızında gereken motor momenti aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$T_v = \frac{\left(F_r + F_b + F_{wm} + F_g\right)D}{2k_d} \tag{3}$$

Lastik sürtünmesi (4) eşitliği ile hesaplanmaktadır ve değeri gidilen yolun yapısına göre değişmektedir. C_{rr} katsayısı yolun tekerlek üzerinde oluşturduğu direncin katsayısıdır ve asfaltta ilerleyen bir araba için yaklaşık 0,013 iken toprak zeminde ilerleyen bir araba için 0,1 değerine çıkabilmektedir [7].

$$F_r = mgC_{rr} \tag{4}$$

F_b tekerleğin bağlı olduğu rulmanın sürtünmesinden kaynaklı oluşan kuvvettir. D_b kullanılan rulmanın çapıdır, C_b rulman sürtünme katsayısıdır, bilyeli rulmanlar için bu değer 0,0015'dir.

$$F_b = \frac{C_b 2{,}5 m g D_b}{D} \tag{5}$$

Aracın belirli bir hızdaki sürüklenme kuvveti (6) eşitliği ile hesaplanmaktadır. Burada ρ havanın yoğunluğu, C_d sürüklenme katsayısıdır. Buraya son sürat girildiğinde azami hızdaki kuvvet elde edilmektedir.

$$F_w = \frac{1}{2}\rho A_f C_d \left(\frac{v}{3.6}\right)^2 \tag{6}$$

Araç eğim çıkarken aracın ağırlığından dolayı çekiş yönünün tersine bir kuvvet oluşur. Bu kuvvet (7) eşitliğine göre hesaplanmaktadır. α değeri açı cinsinden yolun eğimidir. Türkiye karayollarında 90 km/sa hız izni verilen yollarda izin verilen anayol eğimi %4 (2,29 derece) ve yerel yol eğimi %7 (4 derece)'dir [8]. Ancak şehir içi yollarda ve katlı otopark ve benzeri yollarda bu eğim çok daha yüksektir.

$$F_g = mg\sin(\alpha) \tag{7}$$

Bu hesaplamaların sonucunda motorun azami devirde ihtiyacı olan tork elde edilmektedir. Bu parametre motor tasarımı için oldukça önemlidir. Özellikle gömülü mıknatıslı tipi motorlarda alan zayıflatma (sabit güç) bölgesinin hesabı bu ihtiyaç doğrultusunda şekillenmektedir.

Son olarak motorun anma hızı hesaplanmaktadır. Bunun hesaplanması için hedef aracın kullanım senaryosu dikkate alınmıştır. Çünkü aracın büyük ölçüde kullanılacağı hız aralığında anma torkunun sürekli olarak sağlanması önemlidir. ACEA'nın 2018 raporuna göre Avrupa'daki araçların büyük çoğunluğu yolcu aracı sınıfındadır [9]. Yolcu araçları büyük ölçüde şehir içinde kullanılmaktadır ve hız yoğunluğu incelendiğinde genellikle 50-70 km/s hızda seyrettikleri görülmektedir [10]. Bu doğrultuda 60 km/s hız referans olarak belirlenmiş ve bu hıza kadar anma torkunu vermesi için gerekli motor devri (anma devri) bu değer ile (2) eşitliği kullanılarak hesaplanmaktadır.

3. ÖRNEK UYGULAMA

Burada hedef bir aracın, mekanik verileri ve performans isterleri belirlenmiştir. Uygulama aracının verileri kullanılarak, yukarıdaki hesaplamalar ile ihtiyaç olan motorun temel parametreleri hesaplanmıştır.

Uygulama aracının yüklü ağırlığı 1900 kg, teker çapı 63,43 cm, diferansiyel oranı 8, yüzey alanı 2,26 m^2 ve sürüklenme katsayısı 0,25 olarak seçilmiştir. Performans verileri ise şöyledir: son hızı 150 km/sa, 12 derece eğimde kalkabilecek ve daha önce bahsedildiği üzere 60 km/s hıza kadar anma torkunu sağlayabilecektir. Uygulama aracına ait veriler Tablo 2'de görülmektedir.

Tablo 2. Uygulama aracı mekanik ve performans verileri

Uygulama Aracı Mekanik Veriler	
Aracın yüklü ağırlığı (m)	1900 kg
Dişli oranı (k_d)	8
Teker çapı (D)	0.6343 m
Aracın ön yüzey alanı (A_f)	2.26 m^2
Uygulama Aracı Performans Verileri	
Tırmanma açısı (G)	12 derece (%21)
Azami sürat (v_m)	150 km/s

Tırmanma açısının hesaplandığı (1) eşitliğinden ihtiyaç olan tork hesaplanmış ve 307,155 Nm elde edilmiştir. Motor hesaplamalarında kolaylık yaşamak adına bu değer 300 Nm olarak güncellenmiştir. Aracın azami süratinden yola çıkılarak motorun azami devri 10040 d/d olarak hesaplanmış ve bu değer de 10000 d/d'ya yuvarlanmıştır. Son olarak

motorun nominal devri 60 km/sa referans alınarak hesaplanmış ve 4000 d/d elde edilmiştir. Bu değerlerden motorun gücü ise 125 kW olarak hesaplanmaktadır. Ancak ülkemizdeki 4760 sayılı Özel Tüketim Vergisi Kanunu'nda yer alan vergi dilimi hususu da dikkate alındığı zaman; vergilendirmede ikinci dilimde (Motor gücü 85 kW'ı geçip 120kW'ı geçmeyenler) kalabilmek için motorun anma devri 3800 d/d olarak güncellenmiştir. Böylece motor gücü 119,4 kW olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan motor başlangıç parametreleri Tablo 3'de görülmektedir.

Tablo 3. Hedef motorun hesaplanan başlangıç parametreleri

Hedef Motor Özellikleri	
Anma Torku (T)	300 Nm
Anma Devri (k_d)	3800 d/d
Azami Devri (D)	10000 d/d
Anma Gücü (A_f)	119 kW

Bu performans verileri elde edildikten sonra motor tasarımına başlamadan önce araçta kullanılacak batarya paketinin elektriksel özelliklerini de göz önünde bulundurmak gereklidir. Batarya elektriksel değerleri de üretici tarafından sağlanmaktadır. Burada bu değerlerin ele alınmamasının sebebi, motor başlangıç parametrelerini etkilememesidir.

Ayrıca batarya gerilim ve akım seviyesi ile motor sürücüsü de boyutlandırılabilmektedir. Sürücüde kullanılan anahtarlama elemanı en kritik bileşen olduğu için bunun seçiminde bataryanın gerilim ve akımı direk sınırlayıcıdır. Batarya paketinin kapasitesi sadece menzili, dolaylı olarak da aracın ağırlığını etkilemektedir. Enerji kapasitesinin boyutlandırılması ayrı bir çalışma konusudur ve literatürde böyle çalışmalar gerçekleştirilmiştir [11]. Bu çalışma kapsamında batarya paketi verilerine değinilmemiştir.

4. ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İLE KARŞILAŞTIRMA

Piyasada mevcut üretilmiş 17 farklı elektrikli araç incelenmiş, mekanik ve elektriksel özellikleri elde edilmiştir. Araçların güncel yıllara ait bilgileri sağlanmıştır. Üretimden kalkan bazı elektrikli araçlar da listeye dahil edilmiştir. Bu mekanik ve elektriksel özellikler değerlendirilerek birbiri arasında karşılaştırılabilir hale getirmek için çeşitli hesaplamalar yapılmıştır.

Performans kriterlerini oluşturabilmek için karşılaştırmada kullanılan tüm araçların araç sınıfı, yüklü ağırlığı, son dişli oranı, azami torku, tekerlek çapı, nominal ve azami devri ile son sürati elde edilmiştir. Bu verilerin bir kısmı araç üreticileri tarafından verilmekte, bir kısmı ise araç üreticilerinin yayınladığı teknik dokümanlardan hesaplanmıştır. Bu değerlerden yola çıkılarak performans kriterleri belirlenmiştir.

Elektrikli aracın performansını belirleyen temel parametreler çıkartılırken aracın anlık olarak tekerlekten yola aktarabildiği azami kuvvet olan azami itki parametresi oluşturulmuştur. Azami itki Newton cinsindendir ve aracın yüklü ağırlığına bölündüğünde azami yükte azami ivme parametresine ulaşılır. Bu eşitlik bir aracın tüm temel mekanik performans parametrelerini içermektedir. Böylece temel parametreleri bilenen araçlar birbiri arasında kıyaslanabilir hale gelmektedir.

$$a_{ev} = \frac{200Tk_d}{Dm} \tag{1}$$

Tablo 4'de görüldüğü üzere sınıfları, ağırlıkları ve kullanılan motorların torkları birbirinden çok farklı olsa da azami ivme parametresi ile araçların performansı hakkında bilgi edinilebilmektedir. Listede en yüksek ivmeye sahip ilk dört araca bakıldığında D-F arasında lüks sınıfa ait araçların yer aldığı görülmektedir. Listenin sonlarında ise A-B sınıfı küçük araçların yer aldığı görülmektedir. Buradan yola çıkarak hedef motorun C-D sınıfı araçlar için uygun olduğu anlaşılmaktadır.

Tablo 4. Elektrikli araçların karşılaştırılması

Araç	**Sınıf**	**Ağırlık [kg]**	**Son Dişli**	**Tork [Nm]**	**Teker Çapı [cm]**	**Teker Torku [Nm]**	**İtki [N]**	**İtki/ Ağırlık [N/kg]**	**Nominal / Azami Devir**	**Son Sürat [km/s]**
Tesla Model S 90D (2017)	F	2739	9.734	658	70.31	6404	18219	6.652	5000/18000	249
Tesla Model X 90D (2018)	D	2840	9.34	660	74.43	6164	16564	5.832	6150/15000	250
Tesla Model 3 (2019)	D	2078	9	450	66.87	4050	12113	5.829	5000/15000	209
Audi e-tron (2019)	E	3130	9.205	664	76.31	6112	16019	5.118	4200/13000	200
Mercedes B-Class (2015)	C	2170	9.73	340	65.24	3308	10141	4.674	3600/14500	160
Hyundai Kona (2019)	B	2020	7.981	395	66.83	3152	9434	4.670	2400/9500	155
BMW i3 (2019)	B	1670	9.665	250	69.96	2416	6907	4.136	4775/10000	150
Nissan Leaf Tekna (2019)	C	1995	8.193	320	64.68	2621	8106	4.064	3283/9795	144
Chevrolet Bolt (2019)	C	2112	7.605	360	64.68	2737	8465	4.008	4000/9000	146
Uygulama Aracı		**1900**	**8**	**300**	**63.43**	**2400**	**7567**	**3.983**	**4000/10000**	**150**
Fiat 500 e (2019)	A	1701	9.59	200	58.45	1918	6562	3.858	3800/12000	141
Hyundai Ioniq (2019)	C	1880	7.412	295	63.19	2186	6920	3.681	2800/10000	165
Nissan Leaf 80kW (2012)	C	1927	7.937	280	63.19	2222	7033	3.650	3013/10000	151
Renault Zoe (2012)	B	1943	9.8	220	62.15	2156	6938	3.571	2500/11300	135
Chevrolet Spark	A	1861	3.87	443	58.45	1714	5866	3.152	2200/4500	145
Kia Soul EV (2015)	B	1972	6.78	285	65.24	1932	5923	3.004	2727/8000	145
Mitsubishi i-miev (2016)	A	1450	6.066	180	56.95	1091	3834	2.644	2000/8000	130
VW e-Golf (2015)	C	1960	3.61	270	63.43	974	3073	1.568	3006/12000	140

5. SONUÇ

Mekanik verileri ve performans isterleri verilen bir elektrikli araç platformu için uygun motor parametreleri elde edilmiştir. Elde edilen bu veriler ile motor tasarımında ihtiyaç duyulan başlangıç parametreleri sağlanmıştır. Bu parametreleri hesaplama için gerekli eşitlikler ve yöntemler açıklanmıştır. Ortaya konan bu eşitlik ve yöntemler kullanılarak örnek bir araç uygulaması gerçekleştirilmiştir. Mekanik ve performans özellikleri verilen bir hedef araç için hedef motor parametreleri hesaplanmıştır. Son olarak hesaplamalar ile elde edilen hedef araç ve motor mevcut elektrikli araçlar ile kıyaslanmıştır. Bu kıyaslama sonucunda hedef araç ve motorun diğer araçlar içerisinde doğru konumlandığı görülmüştür.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Tübitak 1511 Öncelikli Alanlar Araştırma Teknoloji Geliştirme ve Yenilik Projeleri Destekleme Programı tarafından desteklenmektedir.

KAYNAKLAR

[1] Zhu, Z. Q., & Howe, D. (2007). Electrical machines and drives for electric, hybrid, and fuel cell vehicles. Proceedings of the IEEE, 95(4), 746-765.

[2] Yildirim, M., Polat, M., & Kürüm, H. (2014, September). A survey on comparison of electric motor types and drives used for electric vehicles. In 2014 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition (pp. 218-223). IEEE.

[3] Rahman, Z., Ehsani, M., & Butler, K. L. (2000). An investigation of electric motor drive characteristics for EV and HEV propulsion systems. SAE transactions, 2396-2403.

[4] Ramamurthy, S. S., & Balda, J. C. (2001). Sizing a switched reluctance motor for electric vehicles. IEEE transactions on industry applications, 37(5), 1256-1264.

[5] Nishio, A., Hirano, M., Kato, Y., Irie, T., & Baba, T. (2003). Development of small size, light weight and high power IPM motor for electric vehicle. Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Technical Review, 40(5).

[6] Wu, X., Cao, B., Li, X., Xu, J., & Ren, X. (2011). Component sizing optimization of plug-in hybrid electric vehicles. Applied energy, 88(3), 799-804.

[7] Soliman, A. M. A. (2006). Effect of road roughness on the vehicle ride comfort and rolling resistance (No. 2006-01-1297). SAE Technical Paper.

[8] Yayla, N. (2002). Karayolu Mühendisliği. İstanbul.

[9] European Automobile Manufacturers Association. (2018). ACEA Report: Vehicles in Use–Europe 2018. European Automobile Manufacturers Association.

[10] URL 1: Arrivealive (2019), Science & Speed Camera Enforcement. https://www.arrivealive.co.za/Science-Speed-Camera-Enforcement, 01.02.2020.

[11] Ostadi, A., & Kazerani, M. (2014). Optimal sizing of the battery unit in a plug-in electric vehicle. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 63(7), 3077-3084.