

Bağımsız Arka Tahrikli Elektrikli Taşıtlar için Dinamik Yük Tabanlı Elektronik Diferansiyel Sistemi ve Alan Yönlendirmeli Kontrol Analizi

Berk Topçuoğlu^{1*}, Burak Akın²

¹Elektrik Mühendisliği / Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, Türkiye

²Elektrik Mühendisliği / Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, Türkiye

*(berktopcuoglu@gmail.com)

(Received: 11 February 2026, Accepted: 15 February 2026)

(7th International Conference on Engineering, Natural and Social Sciences ICENSOS 2026, February 06-07, 2026)

ATIF/REFERENCE: Topçuoğlu, B. & Akın, B. (2026). Bağımsız Arka Tahrikli Elektrikli Taşıtlar için Dinamik Yük Tabanlı Elektronik Diferansiyel Sistemi ve Alan Yönlendirmeli Kontrol Analizi, *International Journal of Advanced Natural Sciences and Engineering Researches*, 10(2), 124-133.

Özet – Elektrikli taşıtlarda tahrik sistemi, farklı mimarilerle tekerleklere entegre edilebilmektedir. Bu mimarilerin bazıları; tekerlek başına bir motor, bir motor ile mekanik diferansiyel veya aynı aks üzerinde iki bağımsız motor gibi farklı yöntemler içermektedir. Geleneksel mekanik diferansiyellerin ağırlık ve sürtünme dezavantajlarını ortadan kaldıran bağımsız tekerlek tahrikli sistemler, özellikle araç dinamiği kontrolünde büyük avantaj sağlamaktadır. Bu çalışmada, arka aksında iki bağımsız sürekli mıknatıslı senkron motor (PMSM) bulunan arkadan itişli bir elektrikli taşıt için Elektronik Diferansiyel Sisteminin (EDS) modellenmesi ve benzetimi sunulmaktadır.

EDS için gerekli olan dönüş manevrası sırasında iç ve dış arka tekerleklerin referans açılma hızları, taşıt hızı ve direksiyon açısı girdilerinden Ackermann–Jeantand kinematiği kullanılarak elde edilmiştir. Motorların yük torku ise 3 serbestlik dereceli (3-DOF) boylamsal, yanal ve savrulma hareketlerini kapsayan taşıt dinamiği üzerinden; yuvarlanma direnci, aerodinamik sürüklenme, ivmelenme direnci ve manevra sırasında oluşan dinamik yük transferinin tekerlek kuvvet kapasitesine etkisi dikkate alınarak hesaplanmıştır.

Her bir PMSM, uzay vektör darbe genişlik modülasyonu (SVPWM) tabanlı alan yönlendirmeli kontrol (FOC) tekniği ile sürülmüştür. Böylece, sağ ve sol motorların hız–tork gereksinimlerine karşılık oluşan elektromanyetik tork ve tork üretimi için gerekli i_d ve i_q akım bileşenlerinin talepleri ayrıntılı olarak incelenmiştir.

MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilen benzetimlerde, aynı taşıt hızında farklı dümenleme açıları için dönüş senaryosu uygulanmıştır. Manevra şiddeti arttıkça sağ-sol teker hız gereksinimi ile birlikte sağ-sol motor yük torklarının belirgin biçimde ayrıştığı gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler – Elektronik Diferansiyel Sistemi (EDS), Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor (PMSM), Alan Yönlendirmeli Kontrol (FOC), Uzay Vektör Darbe Genişlikli Modülasyon (SVPWM), Elektrikli Taşıtlarda Tahrik Sistemleri

I. GİRİŞ

Geleneksel tahrik sistemlerinde kullanılan mekanik diferansiyel, içerisinde bulunan dişli mekanizması aracılığıyla tahrik torkunu aks millerine iletmektedir. Aynı zamanda tekerleklerin birbirinden bağımsız

açışal hızlarda dönmesine olanak sağlamaktadır. Taşıtın viraj alma manevrası sırasında, geometrik gereksinimlerden kaynaklanan yörünge farkları nedeniyle iç tekerleğin daha düşük, dış tekerleğin ise daha yüksek açışal hızda dönmesi zorunludur. Standart açık diferansiyel, ideal koşullarda torku tekerlekler arasında benzer oranlarda paylaştırmaktadır. İletilebilecek tork yol tutuşu en düşük olan tekerleğin tutunma kapasitesi ile sınırlıdır. Düşük sürtünmeli (buzlu/kaygan) zemin koşullarında bir tekerleğin tutunmayı kaybetmesi durumunda, diferansiyel mekanizmasının torku bu tekerleğe yönlendirmesi toplam çekiş kuvvetinin azalmasına ve taşıt hareket kabiliyetinin düşmesine neden olabilir. Buna ek olarak, mekanik diferansiyel sistemi dişli grupları, şaftlar ve benzeri alt bileşenler nedeniyle kütle, hacim ve mekanik kayıplar oluşturur [1].

Elektrikli taşıtlarda elektronik diferansiyel (EDS) yaklaşımı ile tekerleklerin hız ve/veya torkları yazılımsal olarak ayrı ayrı kontrol edilebilir. Bu yaklaşımın temel gereksinimi, viraj manevralarında iç ve dış tekerleklerin farklı yol kat etmesi nedeniyle oluşan hız farkının doğru biçimde tahrik motorlarına uygulanması ile gerçekleşir. Ayrıca bu hız farkına karşılık motorların maruz kaldığı yük torku talebinin gerçekçi şekilde modellenmelidir [2], [3], [4], [5], [6], [7].

Aynı aks üzerinde bağımsız motorlarla tahrik edilen bir taşıtta, sağ-sol tekerlekler arasında tork farkı oluşturularak ek bir sapma (yaw) momenti üretmek mümkündür. Bu prensip, tork vektörleme (torque vectoring) literatüründe taşıtın yanal dinamiğini (yaw hızı ve yana kayma eğilimi gibi) iyileştirmeye yönelik temel mekanizmalardan biri olarak ele alınmaktadır [8], [9], [10]. Modern yaklaşımlarda referans hız ile tork üretimi, toplam çekiş ihtiyacı ve istenen yaw momentinin hesaplanması ile tekerlek bazında tork dağıtımını birlikte değerlendirilmektedir. Bu çalışmada doğrudan bir yaw kontrolcüsü tasarlamak hedeflenmemiştir. Dönüş manevrası sırasında sağ-sol motorların hız ve tork gereksinimlerinin simülasyonu test edilmesi amaçlanmıştır. Hız ve tork gereksinimi, elektronik diferansiyel yapısının, motor ve motor sürücü performansının değerlendirilmesi açısından kritik bir öneme sahiptir.

Elektrikli taşıtlarda kullanılan tahrik sistemlerinden birisi de sürekli mıknatıslı senkron motorlardır. Yüksek güç yoğunluğu ve yüksek verim nedeniyle elektrikli taşıt uygulamalarında yaygın biçimde tercih edilmektedir. PMSM sürücülerinde uygulanan alan yönlendirmeli kontrol (FOC) tekniği, stator akımlarını akı bileşeni i_d ve tork bileşeni i_q olarak ayırarak tork üretiminin hızlı ve hassas biçimde kontrol edilebilmesini sağlar. Buna ek olarak uzay vektör darbe genişlik modülasyonu (SVPWM) ile evirici DC bara gerilimi daha etkin kullanılmaktadır. SVPWM, anahtarlama harmoniklerini azaltarak daha iyi bir motor kontrolü sağlamaktadır [11], [12], [13], [14].

Bu çalışma kapsamında, dönüş manevrası boyunca sağ ve sol motorlara uygulanacak hız referansları, taşıt hızı ve direksiyon açısı girdilerinden Ackermann-Jeantand kinematiği kullanılarak türetilmiştir. Motorların bu referansları takip etmesi sırasında karşılaştığı yük torkları, taşıtın 3 serbestlik dereceli (3-DOF) boylamsal, yanal ve sapma hareketlerini kapsayan dinamik modeli üzerinden hesaplanmıştır. Yük torku hesabında yuvarlanma direnci, aerodinamik sürüklenme ve ivmelenme gereksiniminin yanı sıra manevra sırasında oluşan dinamik yük transferi nedeniyle normal kuvvetlerin değişimi ve bunun tekerlek kuvvet kapasitesi üzerindeki etkisi dikkate alınmıştır. Elde edilen yük torkları, SVPWM tabanlı FOC ile sürülen PMSM'lerin hız izleme performansı ile birlikte i_d ve i_q akım talepleri ve elektromanyetik tork tepkileri analiz edilmiştir.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada arkadan itişli, arka aks üzerinde iki bağımsız PMSM ile tahrik edilen bir elektrikli taşıt ele alınmıştır. Sağ ve sol arka tekerlekler, mekanik diferansiyel olmaksızın ayrı motor-sürücü yapılarıyla kontrol edilmektedir. Çalışmanın kapsamı, dönüş manevrası boyunca sağ-sol motor hız referanslarının elektronik diferansiyel yaklaşımıyla üretilmesi ve manevraya bağlı yük torklarının dinamik bir model üzerinden hesaplanarak motor sürücülerine uygulanmasıdır.

A. Elektronik Diferansiyel: Referans Açısal Hız Üretimi

Bu çalışmada, taşıt hızı $V(t)$ ve direksiyon açısı $\delta(t)$ girdilerinden Ackermann–Jeantand kinematığı ile dönüş yarıçapı $R(t)$ hesaplanmış ve arka tekerlek hızları türetilmiştir. Ortalama direksiyon açısı ile dönüş yarıçapı ilişkisi:

$$R(t) = \frac{L}{\tan(\delta(t))}$$

Arka dış ve arka iç tekerleklerin referans açısal hızları:

$$\omega_{arka,dış}(t) = \frac{V(t)}{r_w} \left(1 + \frac{w_d \tan(\delta(t))}{2L} \right)$$

$$\omega_{arka,iç}(t) = \frac{V(t)}{r_w} \left(1 - \frac{w_d \tan(\delta(t))}{2L} \right)$$

Burada L dingil mesafesi, w_d iz genişliği ve r_w tekerlek yarı çapıdır.

Sistemde redüktör (dişli oranı) kullanılarak motorda üretilen hız ve tork tekerleğe aktarılmaktadır.

$$\omega_{m,ref}(t) = i \omega_{arka,ref}(t)$$

Burada kullanılan i redüksiyon oranıdır.

B. Taşıt Dinamiği

Taşıtın yanal ve yaw hareketi 3-DOF (boylamsal–yanal–yaw) “bisiklet modeli” ile temsil edilmiştir. Yanal hareket denklemi:

$$\dot{V}_y = \frac{F_{y,ön} \cos(\delta) + F_{y,arka}}{m} - \dot{\gamma} V_x$$

Bu denklemde γ taşıtın savrulma açısını (yaw) temsil etmektedir.

Yaw dinamiği denklemi:

$$L_z \ddot{\gamma} = L_{ön} F_{y,ön} \cos(\delta) - L_{arka} F_{y,arka} + M_z^{TV}$$

Aracın ağırlık merkezinin ön aksa olan uzaklığı $L_{ön}$ ve arka aksa olan uzaklığı L_{arka} ile ifade eder.

Bu çalışmada, tork farkından doğan moment yalnızca analiz amaçlı kullanılmıştır.

$$M_z^{TV} = \frac{w_d}{2} (F_{x,sağ} - F_{x,sol})$$

Boylamsal ve Yanal ivme:

$$a_x = \dot{V}_x - \dot{\gamma} V_y$$

$$a_y = \dot{V}_y + \dot{\gamma} V_x$$

Statik ön ve arka aks yükleri:

$$F_{z,ön}^{statik} = mg \frac{L_{arka}}{L_{ön} + L_{arka}}$$

$$F_{z,arka}^{statik} = mg \frac{L_{ön}}{L_{ön} + L_{arka}}$$

Boylamsal yük değişimi:

$$\Delta F_{z,x} = \frac{m a_x h_{cg}}{L_{ön} + L_{arka}}$$

Ağırlık merkezi h_{cg} ile temsil edilir.

Ön aks ve arka aks boylamsal yük transferi:

$$F_{z,ön} = F_{z,ön}^{statik} - \Delta F_{z,x}$$

$$F_{z,arka} = F_{z,arka}^{statik} + \Delta F_{z,x}$$

Yanal yük transferi:

$$\Delta F_{z,arka}^{yanal} = \lambda_{arka} \frac{m a_y h_{cg}}{w_d}$$

Arka sağ tekerlek normal kuvveti:

$$F_{z,sağ} = \frac{F_{z,arka}}{2} + \frac{\Delta F_{z,arka}^{yanal}}{2}$$

Arka sol tekerlek normal kuvveti:

$$F_{z,sol} = \frac{F_{z,arka}}{2} - \frac{\Delta F_{z,arka}^{yanal}}{2}$$

C. Boylamsal Dirençler ve İtiş Talebi

Boylamsal yönde toplam itiş talebi: yuvarlanma direnci, aerodinamik sürüklenme ve ivmelenme gereksinimi ile ifade edilmiştir.

Yuvarlanma direnci:

$$F_{yuvarlanma\ direnci} = C_{rr}(F_{z,ön} + F_{z,arka})$$

Aerodinamik Sürüklenme Direnci:

$$F_{aerodinamik} = 0.5\rho A_{ön} C_d V^2$$

Taşıtın ivmelenerek hareket edebilmesi için gereken toplam itiş talebi:

$$F_{x,arka}^{gerekten} = m \cdot a_x + F_{yuvarlanma\ direnci} + F_{aerodinamik}$$

D. Lastik Kayma Açıları

Bisiklet modelinde lastik kayma açıları [11].

$$\alpha_{ön} = \delta - \tan^{-1} \left(\frac{V_y + L_{ön}\dot{\gamma}}{V_x} \right)$$

$$\alpha_{arka} = - \tan^{-1} \left(\frac{V_y - L_{arka}\dot{\gamma}}{V_x} \right)$$

Fiziksel sınırlar içinde kalması için aks sınırları:

$$F_{y,ön} = \text{sat}(C_{ön}\alpha_{ön}, \pm\mu F_{z,ön})$$

$$F_{y,arka} = \text{sat}(C_{arka}\alpha_{arka}, \pm\mu F_{z,arka})$$

Lastiklerin kayma açılarına bağlı doğrusal model kullanılarak yanal kuvvetler hesaplanmıştır.

E. Boylamsal Kuvvet Sınırı

Virajda lastikler eş zamanlı yanal ve boylamsal kuvvet üretir. Bu nedenle her tekerlek için boylamsal kuvvet kapasitesi, sürtünme çemberi/elipsi yaklaşımı ile sınırlandırılmıştır.

Arka aks yanal kuvveti tekerlek normal yüklerine göre paylaşılır:

$$F_{y,sağ} = F_{y,arka} \frac{F_{z,sağ}}{F_{z,arka}}$$

$$F_{y,sol} = F_{y,arka} \frac{F_{z,sol}}{F_{z,arka}}$$

Tekerlek boylamsal kuvvetleri, kapasiteye göre paylaşılıp saturasyon ile fiziksel sınırdan tutulur:

$$F_{x,maks.,sağ} = \sqrt{\max((\mu F_{z,sağ})^2 - (F_{y,sağ})^2, 0)}$$

$$F_{x,maks.,sol} = \sqrt{\max((\mu F_{z,sol})^2 - (F_{y,sol})^2, 0)}$$

Tekerleklerde üretilen boylamsal kuvvetler, lastik ve yol arasındaki maksimum tutunma kapasitesine göre sınırlandırılmaktadır. Viraj manevrası sırasında lastik üzerinde yanal kuvvetler oluştuğunda, boylamsal yönde kullanılabilir mevcut tutunma kapasitesi azalır.

F. Motor Yük Torku

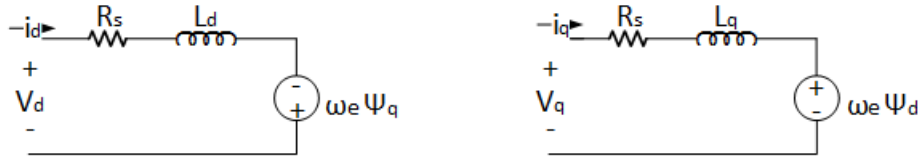
Tekerlek boylamsal kuvvetinden motor için gereken yük torku:

$$T_{L,sağ\ motor} = F_{x,sağ} \frac{r_w}{i}$$

$$T_{L,sol\ motor} = F_{x,sol} \frac{r_w}{i}$$

G. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor

Bu çalışmada arka aks üzerinde bulunan iki bağımsız sürekli mıknatıslı senkron motor (PMSM), uzay vektör darbe genişlik modülasyonu (SVPWM) tabanlı alan yönlendirmeli kontrol (FOC) yöntemi ile sürülmüştür. FOC yaklaşımında amaç, üç fazlı stator akımlarını rotor akısı ile senkron dönen dq referans düzlemine taşımaktır. Akı bileşeni i_d ve tork bileşeni i_q birbirinden bağımsız kontrol edilebilmektedir. Böylece PMSM, tork üretimi açısından DC motor benzeri bir yapıda yüksek bant genişliği ile kontrol edilebilir. Şekil 1 dönel referans çerçevesine aktarılan, üç fazlı sinüzoidal dağıtılmış statorun eşdeğer devresi gösterilmiştir.



Şekil 1 Dönel referans çerçevesine aktarılan, üç fazlı sinüzoidal dağıtılmış statorun eşdeğer devresi

PMSM, dq gerilim denklemleri:

$$v_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e \Psi_q$$

$$v_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e \Psi_d$$

$$\Psi_d = L_d i_d + \Psi_f$$

$$\Psi_q = L_q i_q$$

Burada kalıcı mıknatıs tarafından oluşturulan akı Ψ_f ile ifade edilir.

Sürekli mıknatıslı senkron motor tarafından oluşturulan elektromanyetik tork denklemi:

$$T_e = \frac{3}{2} p (\Psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q)$$

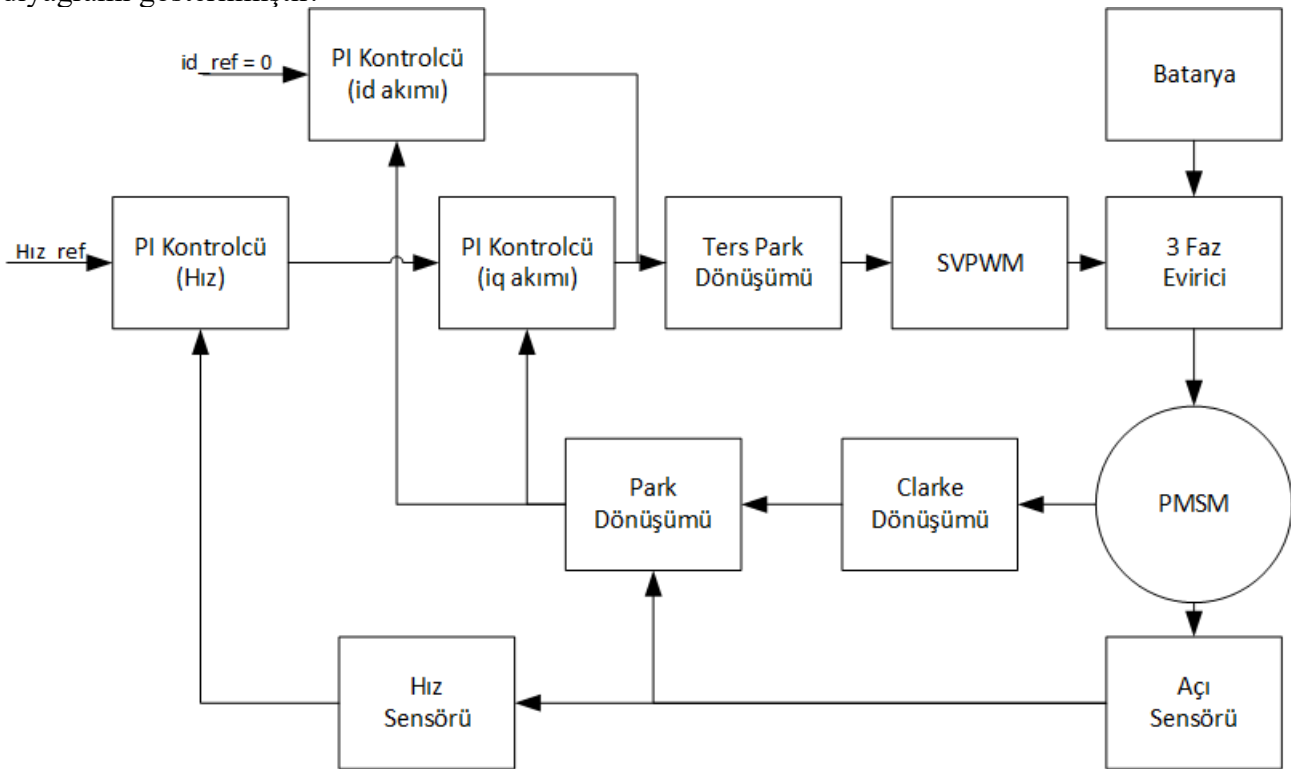
Kutup çifti sayısı p ile ifade edilir.

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_L - B \omega_m$$

Burada J eylemsizlik momentini, B sürtünme katsayısını, ω_m motor milinin devrini ifade etmektedir.

H. Alan Yönlendirmeli Kontrol

Alan yönlendirmeli kontrol (FOC), üç faz akımları i_a, i_b, i_c önce Clarke dönüşümü ile durağan $\alpha\beta$ düzlemine, ardından Park dönüşümü ile rotor elektriksel açısı θ_e kullanılarak döner dq düzlemine dönüştürür. Referans hız ile motor rotorunun hızları karşılaştırılarak PI kontrolcünün girişine bağlanır. Bu kontrolcü hız kontrolcüsü olarak adlandırılmaktadır. Hız kontrolcüsünden çıkan sinyal i_{q_ref} sinyalidir. i_{q_ref} sinyali, Park dönüşümü ile karşılaştırılarak PI kontrolcüsünün girişine bağlanır. Bu kontrolcü motorun torkunu üreten bileşeni üretmektedir. $i_d = 0$ sinyali, i_{q_ref} sinyali ile karşılaştırılarak PI kontrolcüsünün girişine bağlanmaktadır. Akım PI kontrolcülerinden elde edilen sinyaller V_d ve V_q gerilim referansları ters Park dönüşümü ile $\alpha\beta$ düzlemine taşınır. Son aşamada, gerilim vektörünün evirici üzerinde üretilmesi için PWM stratejisi kullanılır. Uzak vektör PWM (SVPWM) yöntemi, iki aktif ve bir sıfır vektörün uygun sürelerde uygulanmasıyla anahtarlama periyodu içinde istenen gerilim vektörünü sentezler; böylece DC bara gerilimi daha verimli kullanılır ve harmonikler azaltılarak akım dalgalanması ile tork dalgalanması düşürülür. Şekil 2 uzak vektör darbe genişlikli modülasyon (SVPWM) ile alan yönlendirmeli kontrolün (FOC) yöntemiyle sürekli mıknatıslı senkron motora (PMSM) kontrol edilmesinin blok diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 2 Uzak vektör darbe genişlikli modülasyon (SVPWM) ile alan yönlendirmeli kontrolün (FOC) yöntemiyle sürekli mıknatıslı senkron motora (PMSM) kontrol edilmesi

i. Taşıt ve Motor Parametreleri

Elektronik diferansiyel sisteminin benzetiminin gerçekleştirileceği taşıta ait geometrik ve kütleli parametreler

Tablo 1’de sunulmuştur. Bu parametreler; Ackermann–Jeantand kinematığı ile tekerlek referans hızlarının belirlenmesi, boyuna/yanal dinamik denklemlerin kurulması ve yük transferi gibi hesaplamalarda girdi olarak kullanılmıştır.

Tablo 1 Taşıt ölçüleri

Parametre	Büyükük	Birim
Dingil Mesafesi	600	mm
İz Genişliği	400	mm
Tekerlek Yarıçapı	100	mm
Ağırlık Merkezi Yüksekliği	200	mm
Kütle	15	kg
Ağırlık Dağılımı	50	%
Redüksiyon Oranı	5	

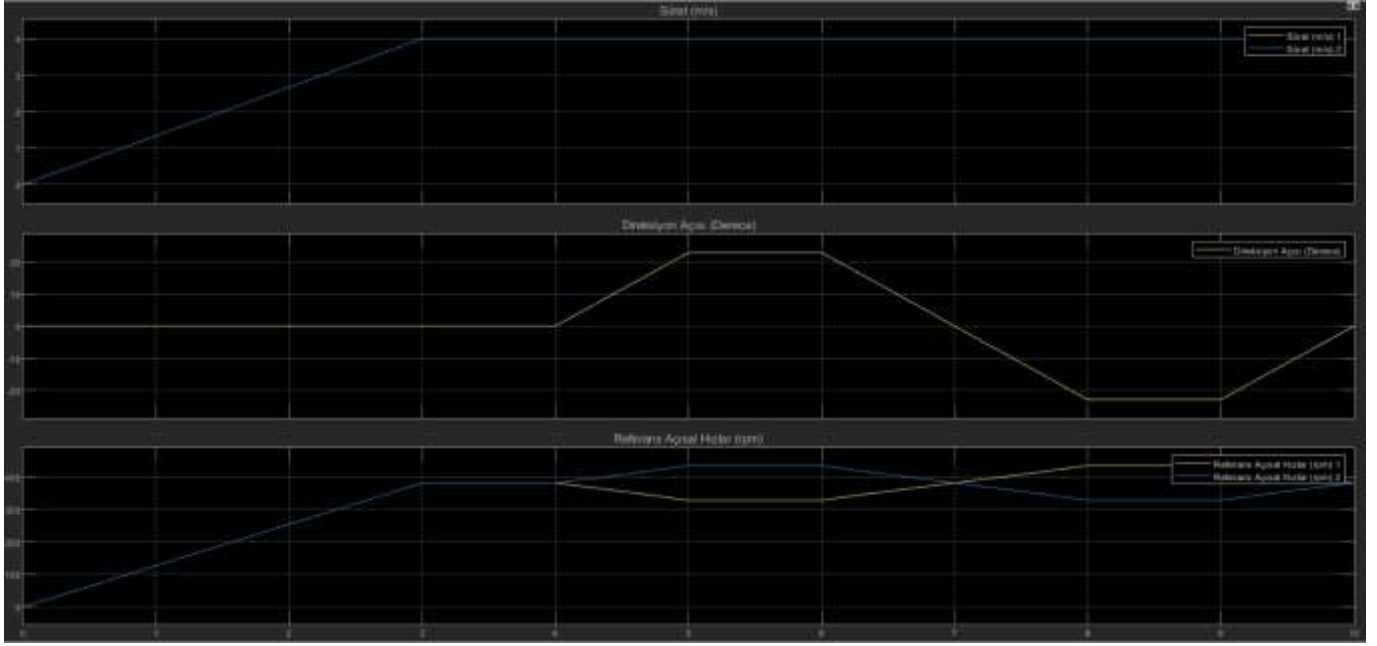
Elektronik diferansiyel uygulamasında tahrik elemanı olarak Teknic firmasına ait M-2310P serisi sürekli mıknatıslı senkron motorun parametreleri referans alınmıştır [15]. Bu motorlara ait parametreleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2 Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Parametreleri

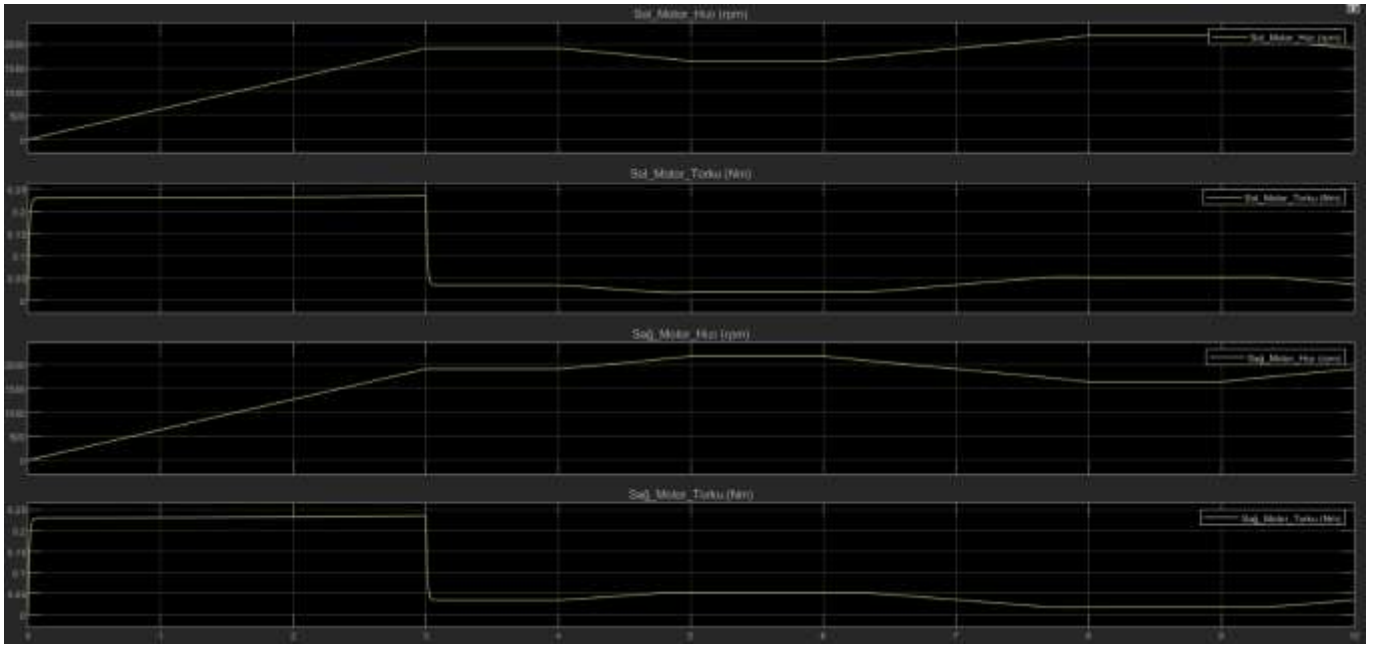
Parametre	Büyükük	Birim
Batarya Gerilimi	24	V
Stator Direnci	0.36	Ω
Kutup Çifti	4	
Ld Stator Endüktansı	0.0002	H
Lq Stator Endüktansı	0.0002	H
Akı Bağı	0.00639	Wb
Rotor Eylemsizlik Momenti	$7.0615 * 10^{-6}$	$kg * m^2$
Anahtarlama Frekansı	20	kHz

III. BULGULAR

Yapılan benzetim çalışmaları sonucunda, simülasyonu gerçekleştirilen elektronik diferansiyel 0 m/s referans hızından 4 m/s’ye hıza 3 saniyede ulaşmaktadır. Taşıt referans hızını 4 m/s ulaştığı anda her iki motorun da açısal hızları 1910 rpm ve motor torkları 0.2348 N.m’dir. Taşıt referans hızını korumakta olup 4. saniyede sol tarafa doğru dönüş manevrası yapmaktadır. Sola dönüş manevrası sırasında direksiyon açısı $+22.9^\circ$ olduğu ve simülasyon 5. saniyede iken: sol motora ait açısal hız değeri 1641 rpm ile tork değeri 0.01756 N.m ve sağ motora ait açısal değeri 2179 rpm ile tork değeri 0.05166 N.m’dir. Aynı hıza sahip taşıt direksiyon açısını $+22.9^\circ$ ’den 0° ’ye 7. saniyede geri dönmektedir. Daha sonra -22.9° ’ye sağa doğru manevra yapmaktadır. -22.9° ’ye ulaştığı ve simülasyon 8. saniyede iken; sol motora ait açısal hız değeri 2179 rpm ile tork değeri 0.05221 N.m ve sağ motora ait açısal hız değeri 1641 rpm ile tork değeri 0.01815 N.m değerlerindedir. Şekil 3 taşıt referans hızı, direksiyon açısı ve dönüş manevrası sırasında teker referans hızları ve Şekil 4 motorların açısal hızları ve torkları gösterilmektedir.

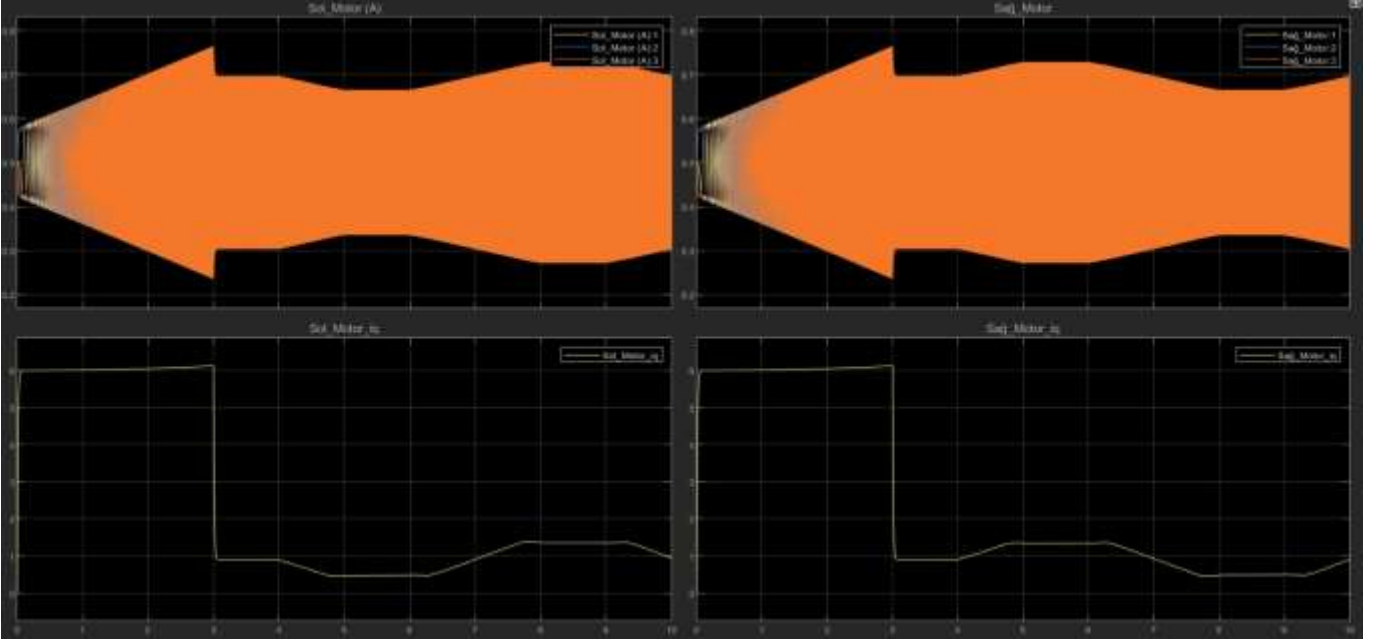


Şekil 3 Taşıt referans hızı, direksiyon açısı ve dönüş manevrası sırasında teker referans hızları

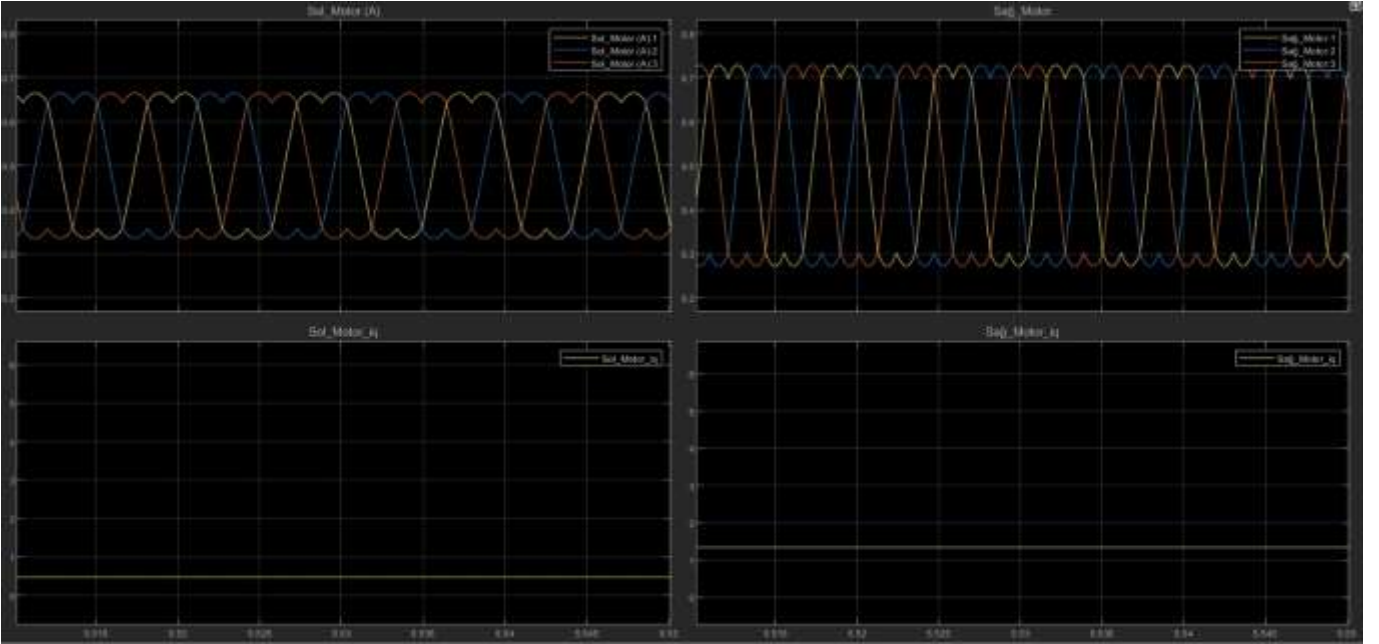


Şekil 4 Motorların açısal hızları ve torkları

Taşıtın 0 m/s hızdan 4 m/s hıza ulaşması için sol ve sağ motorların uyguladıkları i_q akım değeri 3. saniyede 6.120 amperdir. Taşıtın ivmelenmesi sırasında gerekli olan bu akım değeri araç sabit hızda gidiyorken 0.8947 amper seviyesine düşmektedir. Direksiyon açısı $+22.9^\circ$ 'de ve simülasyon 5. saniyede iken: sol motor i_q değeri 0.4569 amper ve sağ motor i_q değeri 1.347 amper seviyesindedir. Direksiyon açısı -22.9° 'de ve simülasyon 8. saniyede iken: sol motor i_q değeri 1.361 amper ve sağ motor i_q değeri 0.4725 amper seviyesindedir. Şekil 5 motorlara uygulanan modüle edilmiş faz gerilimleri ve i_q akımları ve bu şeklin yakınlaştırılmış hali olan Şekil 6 simülasyon süresinin 5.515 ile 5.545 saniye aralığında motor uygulanan modüle edilmiş faz gerilimleri ve i_q akımlarını gösterilmektedir.



Şekil 5 Motorlara uygulanan modüle edilmiş faz gerilimleri ve iq akımları



Şekil 6 Simülasyon süresinin 5.515 ile 5.545 saniye aralığında motor uygulanan modüle edilmiş faz gerilimleri ve iq akımları

IV. TARTIŞMA

Bu çalışmada, bağımsız motorlu elektrikli araçlar için geliştirilen elektronik diferansiyel sistemi; türetilen taşıt kinematiği ve dinamiği modelleri kullanılarak, PMSM motorların alan yönlendirmeli kontrol (FOC) yöntemiyle değerlendirilmiştir.

Analiz edilen ilk parametre olan açısal hız değişimleri incelendiğinde; taşıtın 4 m/s referans hızında sola dönüş manevrası 22.9° direksiyon açısı sırasında sol tekerleğin 1641 rpm'e düştüğü, sağ tekerleğin ise 2179 rpm'e yükseldiği görülmüştür. Bu durum, Ackermann prensibine uygun olarak, viraj içinde daha kısa mesafe kat eden tekerleğin yavaşlaması ve dış tekerleğin hızlanması gerektiğini doğrulayan kinematik denklemlerin kontrolcü tarafından başarıyla işlendiğini göstermektedir.

Çalışmanın en dikkat çekici bulgusu, dönüş manevraları sırasında sadece açılmal hızların değil, motorlara etkileyen yük torklarının da asimetrik olarak değiştiğinin gözlemlenmesidir. Literatürdeki birçok basit elektronik diferansiyel çalışması genellikle sadece hız farklarına odaklanırken, bu çalışmada dinamik denklemlerinde hesaba katılmasıyla tork dağılımındaki değişimler ortaya konmuştur. Simülasyon verilerine göre, dönüş sırasında dışta kalan motorun tork ihtiyacı 0.05166 N.m, içteki motorun tork ihtiyacından 0.01756 N.m yaklaşık 3 kat daha fazladır. Bunun temel nedeni, dış tekerleğin hem daha fazla yol alması hem de dinamik yük transferi sonucu üzerine binen kuvvetlerinin artmasıdır. Bu bulgu, PMSM motorların sadece hız referanslı değil, aynı zamanda tork kontrollü sürülmesinin, viraj kararlılığı açısından önemi kanıtlamaktadır.

V. SONUÇLAR

Gerçekleştirilen simülasyon çalışmaları sonucunda, prototip bir aracın 0 m/s'den 4 m/s referans hızına kararlı bir şekilde ulaştığı gözlemlenmiştir. İvmelenme esnasında motorların ürettiği 0.2348 N.m'lik tork değeri, sistemin ataletini yenmek için yeterli olmuştur.

22.9°'lik direksiyon açısı ile yapılan manevralarda, sistemin sağ ve sol tekerlekler için gereken açılmal hızları 1641 rpm ve 2179 rpm hatasız bir şekilde ürettiği tespit edilmiştir. Bu hız farkı, aracın virajı mekanik bir zorlanma olmadan, ideal yörüngesinde dönmesini sağlamıştır.

Çalışmanın en önemli çıktısı, elektronik diferansiyelin sadece hız farklarını değil, aynı zamanda yük torklarının da önemini göstermektedir. Dönüş sırasında dış tekerleğin tork talebinin 0.05166 N.m, iç tekerlekten 0.01756 N.m yüksek olması gerektiği dinamik denklemlerle saptanmıştır. SVPWM ile FOC algoritması bu torku başarıyla sağlamıştır. Bu durum, aracın yol tutuşunun artmasına ve savrulma riskinin azalmasına doğrudan katkı sağlamaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] TÜBİTAK. "Elektrikli Araçlarda Diferansiyel." TÜBİTAK.gov.tr. "https://tubitak.gov.tr/sites/default/files/ek_elektrikli_araçlarda_diferansiyel.pdf" (Erişim: 5 Şubat 2026).
- [2] Yee-Pien Yang, Member, IEEE, Xian-Yee Xing, "Design of Electric Differential System for an Electric Vehicle with Dual Wheel Motors", Proceedings of the 47th IEEE Conference on Decision and Control Cancun, Mexico, Dec. 9-11, 2008
- [3] Ozkop, Emre & Okumuş, Halil & Altas, İsmail. "Çift Tekerlekten Tahrikli Elektrikli Araçlar İçin Bulanık Mantık Denetimli Elektronik Diferansiyel Sistemi" (2008)
- [4] Kahveci, H. "Doğrudan Sürürlü Elektrikli Araçlar İçin Bulanık Mantık Tabanlı Elektronik Diferansiyel Sisteminin Gerçeklenmesi." Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 169s, Trabzon (2013).
- [5] Y. Zhou, Shengjin Li, Xunqi Zhou and Zongde Fang, "The control strategy of electronic differential for EV with four in-wheel motors," 2010 Chinese Control and Decision Conference, Xuzhou, China, 2010, pp. 4190-4195, doi: 10.1109/CCDC.2010.5498381.
- [6] W. Khan-Ngern, W. Keyoonwong, N. Chatsiriwech, P. Sangnopparat, P. Mattayaboon and P. Worawalai, "High Performance BLDC Motor Control for Electric Vehicle," 2018 International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology (ICEAST), Phuket, Thailand, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICEAST.2018.8434499.
- [7] Yıldırım. M. "Elektrikli araçlarda güvenlik önlemleri / Safety precautions in electric vehicles" Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 176s, (2022).
- [8] B. Lenzo, M. Zanchetta, A. Sorniotti, P. Gruber and W. De Nijs, "Yaw Rate and Sideslip Angle Control Through Single Input Single Output Direct Yaw Moment Control," in *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 29, no. 1, pp. 124-139, Jan. 2021, doi: 10.1109/TCST.2019.2949539.
- [9] H. V. Nikhade, O. R. Rohokale, A. R. Kalyankar, A. A. Deodikar, S. U. Deoghare and H. H. Kadam, "Electronic Differential Using the Concept of Torque Vectoring," 2022 6th International Conference On Computing, Communication, Control And Automation (ICCUBEA, Pune, India, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICCUBEA54992.2022.10010760.
- [10] S. Ding, L. Liu and W. X. Zheng, "Sliding Mode Direct Yaw-Moment Control Design for In-Wheel Electric Vehicles," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 8, pp. 6752-6762, Aug. 2017, doi: 10.1109/TIE.2017.2682024.
- [11] Nam, K. "Application of Novel Lateral Tire Force Sensors to Vehicle Parameter Estimation of Electric Vehicles. Sensors" https://doi.org/10.3390/s151128385 (2015)
- [12] Erdal, H. "Sürekli Miknatıslı Senkron Motorun Vektör Kontrolü" Yüksek Lisans Tezi, (2022)
- [13] Özçınra. Selin, "Sürekli Miknatıslı Senkron Motorun Doğrudan Moment Kontrolünün Dsp Tabanlı Yeni Bir Algoritma Geliştirilerek Gerçekleştirilmesi" Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, (2013)
- [14] Demir, Tuğser, E. "Elektrikli Arabalarda Kullanılan Sürekli Miknatıslı Senkron Motorun Alan Yönlendirmeli Kontrolü" Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Tezi, (2022)
- [15] Tecnic "https://www.tecnico.com/files/product_info/N23_Industrial_Grade_Motors_v6.3.pdf", (Erişim: 5 Şubat 2026).