

Orijinal Makale/Research Article

Eşit güçteki iki farklı motorun yapay zeka tabanlı skaler kontrol ile performans analizi: elektrikli araçlar için bir çalışma

Özcan Otkun¹, Faruk Demir²

¹Nokta Akademi, Elektrik-Elektronik Mühendisi, Trabzon, Türkiye

²Anadolu Lojistik, Bilgisayar Bilimleri Mühendisi, Bahkesir, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Elektrikli araçlar
Yapay zeka
Yapay sinir ağları
ASM
SMSM
Kontrol

Makale geçmişi:

Geliş Tarihi: 05.06.2021

Kabul Tarihi: 03.12.2021

Öz: Otomobil üreticilerinin; yakıt tasarrufu, hava kirliliği, karbon emisyonu gibi pek çok problemin giderilmesi adına elektrikli araçlara yöneldiğini görmekteyiz. Ancak elektrikli araçların petrol yakıtlı araçlara göre menzil ve hız problemleri bulunmaktadır. Bu bakımdan kullanımı ve üretimi giderek artan bu araçların performansının artırılması büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmada Asenkron Motor (ASM) ve Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun (SMSM) farklı kontrol yöntemleriyle performansı incelenmiş ve böylece bir elektrikli araçların trafikteki performansının artırılması hedeflenmiştir. Bu bağlamda elektrikli araçların seyir halinde yolun durumuna bağlı olarak hız denetiminin sağlanması ve daha az güç harcayan motorun seçilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla çalışmada eşit güce sahip iki farklı motorun aynı kontrol yöntemleriyle performansı incelenerek değerlendirilmiştir. Elektrik motorlarının kontrolünde Skaler Kontrol (SK) temel alınmıştır. SK ile yapılan benzetim testlerinden elde edilen sonuçlara göre PI ve Yapay Zekâ (YZ) kontrol çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Burada SK ve PI kontrol yöntemleri karşılaştırma amaçlı olarak verilmiştir. Çalışmada motorlar; SK, PI + SK, YZ + SK yöntemleriyle test edilmiş ve elde edilen grafikler yardımıyla farklı yol koşullarında en iyi performansı gösteren motor, "hız, tork ve güç" parametrelerine göre belirlenmiştir.

Atıf için/To Cite:

Otkun Ö. Demir F. Eşit Güce Sahip İki Farklı Motorun Yapay Zekâ ile Performans Analizi: Elektrikli Araçlar için bir Çalışma. Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 13(3), 90-102, 2021.

Performance analysis of two different motors with equal power with artificial intelligence: a study for electric vehicles

Keywords

Electric vehicles
Artificial intelligence
Artificial neural networks
ASM
PMSM
Control

Article history:

Received: 05.06.2021

Accepted: 03.12.2021

Abstract: Automobile manufacturers; We see that it is turning to electric vehicles in order to eliminate many problems such as fuel saving, air pollution and carbon emission. However, electric vehicles have range and speed problems compared to petroleum fuel vehicles. In this regard, it is of great importance to increase the performance of these vehicles, which are increasingly used and produced. In this study, the performance of the Asynchronous Motor (ASM) and the Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) with different control methods were investigated, thereby increasing the performance of an electric vehicle in traffic. In this context, it is aimed to provide speed control of electric vehicles depending on the condition of the road while driving and to select the motor that uses less power. For this purpose, in the study, the performance of two different engines with equal power was examined by evaluating them with the same control methods. Scalar Control (SC) is based on the control of electric motors. According to the results obtained from simulation tests with SC, PI and Artificial Intelligence (AI) control studies were carried out. Here, SC and PI control methods are given for comparison purposes. Engines in the study; The engine, which has been tested with SC, PI + SC, AI + SC methods and with the help of the graphics obtained, has been determined according to the parameters of "speed, torque and power", which perform best in different road conditions.

1. Giriş

Petrol kaynaklı yakıtların kullanılması sonucunda meydana gelen emisyon ve sera gazlarının çevre üzerinde zararlı etkilerinin olduğu bilinmektedir [1], [2]. Araştırmacıların, artan araç sayısı, yakıt tüketimi ve hava kirliliği durumunu göz önünde bulundurarak çalışmalarını Elektrikli Araçlar (EA) üzerine arttırdıkları görülmektedir [3], [4] Diğer yandan, enerjiye olan talebi azaltma ve çevrenin korunmasına yönelik çalışmalar, EA'larla ilgili çalışmaların artmasına ve bu araçlarla ilgili gelişimin hızlanmasına sebep olmuştur [5]. Yapılan çalışmaları dünyada pek çok araştırmacının yanı sıra; üniversitelerin, özel sektörün ve/veya hükümetlerin desteklediği görülmekte, petrol kökenli motorlu taşıtlar yerine alternatif sistemler üzerine çalıştıkları anlaşılmaktadır [6].

Yapılan çalışmalarda EA'ların yaygın olarak kullanılmama sebepleri arasında menzillerinin düşük olmasını, batarya maliyetlerinin yüksek olmasını ve batarya kapasitelerinin düşük olması gösterilmektedir. Bu problemlerin EA'ların seri üretime geçmesi ve batarya teknolojisindeki teknolojik gelişmelere bağlı olarak aşılabileceği öngörülmektedir. Böylece yüksek maliyetler düşecek, menzil problemleri aşılmış olacak, bataryaların frenleme enerjisine bağlı olarak şarj kabiliyetleri geliştirilmiş olacaktır [7], [8].

Literatür çalışmalarına bakıldığında pek çok benzetim çalışmasında Matlab/Simulink programının kullanıldığı görülmektedir [9]. Matlab/Simulink programı içerisinde hazır modeller bulunmakta ve araştırmacılar yeni model üretme zorunluluğu olmadan benzetim, optimizasyon, yapay sinir ağları gibi uygulamaları kullanarak çalışmaktadırlar. Matlab programı kullanmak isteyenler kod yazma durumunda kalabilirler ancak Simulink, Matlab içerisinde çalışan kod yazmadan kullanılabilen programdır. Yapılan çalışmalara bakıldığında; elektrik motorlarının matematiksel modeli, transfer fonksiyonu ve uzay durum modeli gibi denklemlerle Matlab/Simulink programında benzetim gerçekleştirilmiştir [10], [11], [12] Yine farklı yüklerde çalışan PID denetleyici kullanılarak normal sürme devresi ve rejeneratif frenleme devresi benzetimi yapılmıştır [13]. Darbe genişlik modülasyonu ile kullanılan elektrik motor modellemesi ve denetimi yine Matlab/Simulink kullanılarak yapılmıştır [14]. Bu bakımdan EA'ların tahrik sistemi içerisinde bulunan elektrik motorları ve denetim sistemleri hakkında yapılacak tüm çalışmaların literatüre katkı sağlayacağı muhakkaktır [15]. Şimdiye kadar yapılmış olan çalışmalar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

Piyasada seri üretimde olan ve elektrik motoru kullanan hibrit ya da EA'ların hemen hemen hepsinde

gömülü SMSM kullanılmaktadır. Bunun nedenleri arasında bu motorun verimliliği ve güç yoğunluğunun diğer türlerine daha iyi olması ve çalışma aralığının geniş olması gösterilebilir [16], [17], [18]. EA teknolojileri çalışmalarında araç dinamiği ve ASM parametreleri incelenmiştir. Araç dinamiğinin üzerine yapılan çalışmalardan, binek tipi bir araç için motora ait performans gereklilikleri hesaplanmaktadır [19]. Asenkron motor performans karakteristiği ve tasarım parametreleri ele alınarak değerlendirilmiştir. Yapılan piyasa araştırması sonuçlarında, elektrik motoru kullanan seri üretimdeki EA'larda; 25 aracın %80'inde SMSM, %16'sında ASM ve %4'ünde ise bilezikli senkron motor kullanıldığı tespit edilmiştir [20].

Kaynak [21]'da Chan ve Lo, EA'ların hareket sistemleri üzerine yaptıkları çalışmada; sistemde ASM, PWM invertör, değiştirilebilir dişli kutusu ve denetim birimlerinden oluşan kısımları kullanmışlardır. Bu çalışmanın temel amacı EA'nın performansını en iyi hale getirmek için sürücü sistemi tartışılmıştır. Çalışma sonucunda sürücünün, EA'nın performansının artırılması için batarya enerjisi kullanımını iyileştirdiği tespit edilmiştir.

EA'larda kullanılan motorlardan ASM'nin patenti 1888 yılına aittir. Ancak 1891 yılında farklı elektrik motorları üzerine çalışmalar başlamıştır. ASM üzerine yapılan en kapsamlı çalışmalar Kalman Kando tarafından Budapeşte'de Ganz Fabrikasında yapılmıştır. Deneysel çalışmalar ise Kobanya, Fayton Fabrikası yakınlarında kurulan 800 metre uzunluğunda 1 metre çapında bir deneme pistinde başlamıştır. Bu pistte iki akslı bir aracı 9 kW, 500 V, 42 Hz'lik iki fazlı bir ASM tarafından sürülmüştür [22].

Yapılan farklı bir çalışmada tekerlek içi elektrik motoru kullanılmıştır. Bu çalışmada elektrikli araç yanında insan destekli benzetimi gerçekleştirilmiştir. Böylece araç parametreleri ile yapılan aracın tork kontrolü sayesinde aracın rotada kalması sağlanmıştır [23]. EA'larda kullanılan tekerlek içi elektrik motorunun PID, sinirsel PID, Bulanık Mantık, Bulanık Mantık PID, olasılık bulanık sinir ağı gibi denetleme sistemleri ile kontrol işlemi gerçekleştirilmiştir [24], [25], [26].

Başka bir çalışmada Chang, mevcut EA'larda kullanılan elektrik motorlarını karşılaştırmıştır. Elektrik motorlarının teknik verileri ile verimini, güç yoğunluğunu, moment dalgalanmasını, aşırı yüklenme kapasitesini, boyutlarını, maliyet ve maksimum hızlarını incelemiştir. Çalışma sonunda ASM'lerin, yukarıda belirtilen özellikler bakımından en pozitif sonuçları ürettiği görülmüştür [27].

Kaynak [28]'de Goss vd., Toyota Prius EA'da kullanılan 50kW güce sahip SMSM ile kendi tasarımları olan aynı

özelliklerdeki ASM'yi enerji ve performans bakımından karşılaştırmış ve SMSM'nin ASM'ye göre daha verimli olduğunu vurgulamışlardır. Ayrıca Gwoździewicz ve Antal ASM ve SMSM'nin özellikleri üzerine yaptıkları araştırmada SMSM'nin verim ve performans bakımından daha güçlü olduğunu belirtmişlerdir [29]. Yine literatürde benzer çalışmalara rastlamak mümkündür [30], [31].

EA'larda kullanılan elektrik motor türü aracın verimli çalışması bakımından çok önemlidir. Yapılan çalışmalarda kullanılan denetim yöntemlerine en hızlı tepki veren motorun belirlenmeye çalışıldığı ya da farklı yapıda motor seçenekleri düşünülerek en verimli olanının tespit edilmeye çalışıldığı görülmektedir [31], [32].

Bu çalışmanın amacı EA'larda kullanılan elektrik motorlarının önerilen YZ denetimle modellenmesi ve performanslarının araştırılmasıdır. EA'ların tahrik sistemi basamaklarından denetim sistemi ve kullanılan farklı iki tipte motor (SMSM ve ASM) performans açısından karşılaştırılacaktır. Aynı güce sahip her iki motorun kontrolü SK yöntemiyle gerçekleştirilecek olup, motorların hızlanma ve yavaşlama bakımından durumu frekansın artırılıp azaltılmasıyla gerçekleştirilecektir. Sürücünün frekansının değiştirilmesi motorun hızının değiştirilmesi demektir. Matlab/Simulink programı kullanılarak her iki motorun performans açısından yeterlilikleri analiz edilecektir. Motorların denetimi PI+SK ve YSA+SK yöntemleriyle gerçekleştirilecek ve motorlardan alınan hız, tork, çıkış gücü gibi değerler karşılaştırılacaktır.

2. Materyal ve Metot

Çalışmanın benzetimi Matlab/Simulink programında gerçekleştirilmiştir. Yapılan tüm benzetim çalışmalarında kullanılan hız bilgileri 30-90 km/saat, yolun durumu (tork) bilgileri 1- 4 Nm olarak alınmıştır. Burada her iki motor için (ASM ve SMSM) elde edilen grafiklerin benzetim şeması 60 km/saat hız ve 0-2.5 Nm yol durumuna göre verilmiştir. Dolayısıyla tüm motor ve kontrol yöntemleri için motorların aynı değerler bakımından performansının izlenmesi amaçlanmıştır.

EA'nın 60 km/s sabit hızda gidebilmesi için yolun durumu ne olursa olsun elektrik motorundan beklenen devir hızı 530.5 devir/dk. (rpm)'dir. Çalışma üç ayrı aşamada gerçekleşecektir: SK ile Motorların Performansı, PI+SK ile Motorların Performansı, YZ+SK ile Motorların Performansı.

Çalışmada kullanılan referans araç hızı ve yol durumu grafiği Şekil 1'de verilmiştir. Ayrıca benzetimde kullanılan motorların parametreleri Şekil 2'de verilmiştir. Kullanılan ASM ve SMSM 1.5kW güçte ve maksimum 4 Nm yük ile kullanılabilir. Şekil 1 b'deki grafik referans alınan yol durumunu göstermektedir. Bu bağlamda yolun eğim durumunu ifade etmektedir.

2.1. Motorların Benzetimi

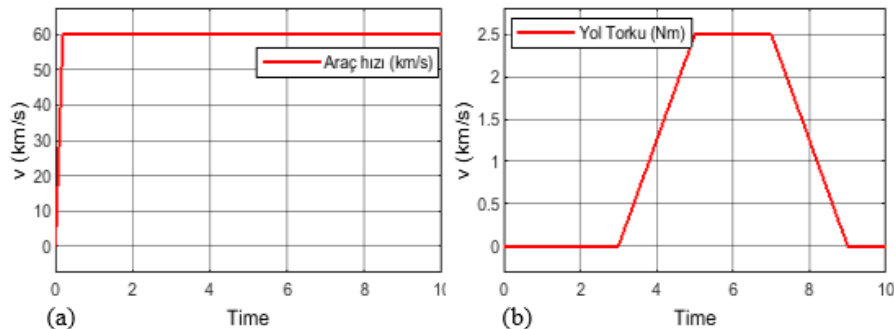
Motorların matematiksel modelleri oluşturulurken yüksek performanslı sürücülerin geliştirilebilmesi için faz düzlemleri arasında dönüşümler gerçekleştirilmektedir [33]. Diğer yandan literatür incelendiğinde motorların (ASM ve SMSM) benzer pek çok matematiksel ifadelerine rastlanmaktadır. Çalışmamızda bu denklemler yardımıyla benzetim çalışmaları yapılmıştır [34], [35].

2.2. Denetim Yöntemlerinin Benzetimi

SK benzetimi: SK yönteminin benzetiminde V/f oranının sabit tutulma işlemi göz önünde bulundurularak kullanılan sinüs üretici denklemi aşağıda verilmiştir [36].

$$\begin{aligned}v_a &= \sqrt{2}v_{etkin} \sin(\theta) \\v_b &= \sqrt{2}v_{etkin} \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\v_c &= \sqrt{2}v_{etkin} \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)\end{aligned}\quad (1)$$

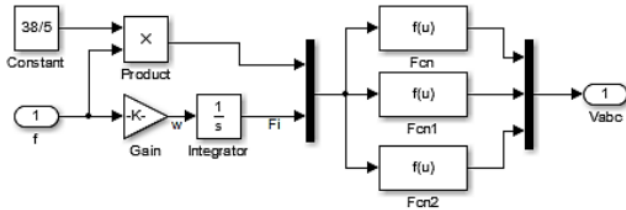
Bu denklem yardımıyla gerçekleştirilen benzetim şeması Şekil 3'de gösterilmiştir.



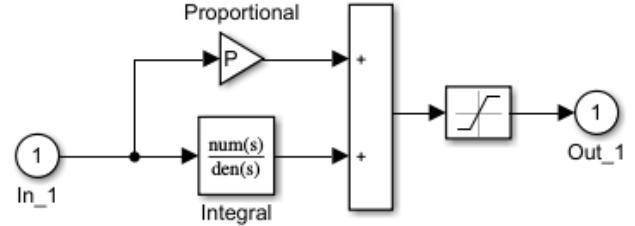
Şekil 1. Referans alınan grafikler (a) Hız grafiği, (b) Yol durumu grafiği

ASM (1.5 kW) (mask)	PMSM (1.5 kW) (mask)
Parameters	Parameters
Stator Resistance Rs [ohms] :	Stator Resistance R (ohm)
4.85	1.4
Stator Inductance Ls [Henry] :	Inductance Ld (H)
0.274	0.0066
Rotor Resistance Rr [ohms] :	Inductance Lq (H)
3.81	0.0058
Rotor Inductance Lr [Henry] :	PM Flux Mf (V/rad/s)
0.274	0.15
Mutual Inductance Lm [Henry] :	Moment of inertia J (kgm2)
0.258	0.00176
Rotor Inertia J [Kg-m2] :	Friction B (Nm/ rad/s)
0.031	0.0038
Number of Poles p :	Number of Poles P
6	6
Friction B (Nm/ rad/s)	
0.0038	

Şekil 2. Kullanılan motorların parametreleri



Şekil 3. SK benzetim şeması



Şekil 4. PI kontrolör benzetimi

PI benzetimi: Çalışmada karşılaştırma amaçlı olarak PI denetim kullanılmıştır. PI kontrolörün amacı oransal oranı bileşeninin etkisiyle sistemin başlangıcında, hızla referans değere yaklaşmak ve integral bileşeninin etkisiyle de kalıcı hal hatasını sıfırlamaktır. PI kontrolöre ait matematiksel denklem aşağıda verilmiştir [37].

PI kontrolörün katsayıları benzetim testlerinde deneme yöntemiyle bulunabildiği gibi literatürde kullanılan farklı yöntemlerle de elde edilebilir [37].

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) dt \quad (2)$$

Şekil 4'de PI kontrolörün benzetim şeması verilmiştir.

YZ benzetimi: Çalışmada YZ'nin alt dalı olan YSA kullanılmıştır. Çalışmalara başlamadan önce SK yöntemiyle ASM ve SMSM'nin benzetim testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testlerde Tablo 1 ve Tablo 2'de verilen eğitim verileri tespit edilmiştir.

YSA çalışmaları Matlab/Simulink programının "nntool" penceresi kullanılarak gerçekleştirilmiştir [38]. Bu pencereye "Giriş" ve "Çıkış" verileri normalize edilerek girilmiştir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde; YSA kullandığı aktivasyon fonksiyonları nedeniyle ürettiği sonuçları 0, 1 ya da -1, +1 aralığında ürettiğinden girişlerinde bu aralıklarda olması daha iyi sonuçlar ürettiği görülmektedir. Normalizasyon denklemi olarak sıklıkla mühendislik çalışmalarında kullanılan "D_Min_Max" kullanılmıştır. Bu denklem aşağıdaki gibidir [39]:

$$x' = 0.8 \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} + 0.1 \quad (3)$$

Lineer olmayan problemlerin çözümünde çoğunlukla Sigmoid (Logsig) ve Tanjant Hiperbolik (Tansig) aktivasyon denklemlerinin sıklıkla kullanılmaktadır. Çalışmamızda her iki aktivasyon denklemini eğitim sırasında kullanılmış ve Tansig fonksiyonunun en iyi sonuçları ürettiği gözlenmiştir.

Bu testlerde motorlar farklı hız ve tork değerlerinde çalıştırılmış ve bu değerlerden elde edilen değerler ile

motordan beklenen değerlerin durumu karşılaştırılmıştır. Benzetim testlerinde motorlardan tork değerlerine karşılık elde edilen hız bilgileri ve hataları tespit edilmiştir. Motordan elde edilen hız hatası YSA eğitiminde kullanılan en temel esas olarak belirlenmiştir.

Tablo 1 ve 2'deki veriler YSA eğitim verisi olarak kullanılmıştır. Bu verilerin dışında daha pek çok veri bulunmaktadır. Tabloda yeşil renkte gösterilen satır veriler YSA'nın test verileri olarak kullanılmıştır. Rastgele belirlenmiştir. Tabloda kırmızı renkte gönderilen sütun veriler YSA'da kullanılan Normalizasyon verileridir.

Tablo 1. ASM'nin YZ+SK denetiminde kullanılan eğitim verileri

	Hız (km/s)	M. Hızı (rpm)	Hız Norm.	Yol tork (Nm)	Tork Norm.	YSA çıkış (rpm)	YSA Norm.
1	30.0000	265.3000	0.1000	0.0000	0.1000	265.3000	0.1000
2	30.0000	265.3000	0.1000	0.5000	0.2000	269.8000	0.1064
3	30.0000	265.3000	0.1000	1.0000	0.3000	274.4000	0.1130
4	30.0000	265.3000	0.1000	1.5000	0.4000	279.1000	0.1198
5	30.0000	265.3000	0.1000	2.0000	0.5000	284.1000	0.1269
6	30.0000	265.3000	0.1000	2.5000	0.6000	289.3000	0.1344
7	30.0000	265.3000	0.1000	3.0000	0.7000	294.6000	0.1420
8	30.0000	265.3000	0.1000	3.5000	0.8000	300.3000	0.1501
9	30.0000	265.3000	0.1000	4.0000	0.9000	306.0000	0.1583
10	40.0000	353.7000	0.2333	0.0000	0.1000	353.7000	0.2266
11	40.0000	353.7000	0.2333	0.5000	0.2000	357.5000	0.2321
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
60	90.0000	795.8000	0.9000	2.5000	0.6000	812.8000	0.8842
61	90.0000	795.8000	0.9000	3.0000	0.7000	816.4000	0.8894
62	90.0000	795.8000	0.9000	3.5000	0.8000	820.1000	0.8947
63	90.0000	795.8000	0.9000	4.0000	0.9000	823.8000	0.9000

Tablo 2. SMSM'nin YZ+SK denetiminde kullanılan eğitim verileri

	M. Hızı (rpm)	Çıkış Hızı (rpm)	YSA Çıkışı (rpm)	M. Hızı Norm.	Çıkış Hızı Norm.	YSA Çıkışı Norm.
1	265.30000	264.30000	266.30000	0.10000	0.10000	0.10300
2	265.30000	265.30000	265.30000	0.10000	0.10150	0.10150
3	265.30000	266.30000	264.30000	0.10000	0.10300	0.10000
4	309.50000	308.50000	310.50000	0.16665	0.16640	0.16941
5	309.50000	309.50000	309.50000	0.16665	0.16791	0.16791
6	309.50000	310.50000	308.50000	0.16665	0.16941	0.16640
7	353.70000	352.70000	354.70000	0.23331	0.23281	0.23581
8	353.70000	353.70000	353.70000	0.23331	0.23431	0.23431
9	353.70000	354.70000	352.70000	0.23331	0.23581	0.23281
10	397.90000	396.90000	398.90000	0.29996	0.29921	0.30222
11	397.90000	397.90000	397.90000	0.29996	0.30071	0.30071
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
35	751.60000	751.60000	751.60000	0.83335	0.83209	0.83209
36	751.60000	752.60000	750.60000	0.83335	0.83360	0.83059
37	795.80000	794.80000	796.80000	0.90000	0.89700	0.90000
38	795.80000	795.80000	795.80000	0.90000	0.89850	0.89850
39	795.80000	796.80000	794.80000	0.90000	0.90000	0.89700

YSA eğitiminde iki farklı yöntem kullanılmıştır:

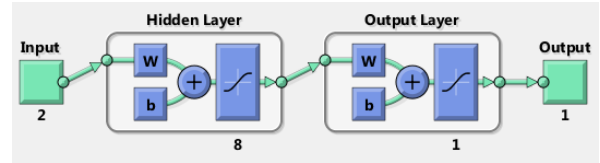
- Birincisi; YSA girişine “İstenen Referans Hız” ve “Elde Edilen Hız” bilgileri girilmiş ve YSA çıkışında olması gereken frekans değeri için gereken hız bilgisinin değeri hesaplanmıştır.
- İkincisi: YSA girişine “İstenen Referans Hız” ve “Elde Edilen Yol Torku” bilgileri girilmiş ve YSA çıkışında olması gereken frekans değeri için gereken hız bilgisinin değeri hesaplanmıştır.

Bu iki farklı yol içerisinde ASM için YSA'nın en iyi eğitim verileri “İkinci” yöntem ile SMSM'nin en iyi YSA eğitim verileri “Birinci” yöntem ile elde edilmiştir. Bu sebeple sonuçlar kısmında bu yöntemlerde en iyi verilerin elde edildiği grafikler analiz için sunulmuştur. Çalışmada ağ yapısı oluşturulurken Tablo 3'deki parametreler kullanılmıştır. Bu parametreler ağı eğitimi sırasında en iyi sonuçları verdiği için tercih edilmiştir.

Tablo 3. Ağ yapısı parametreleri

Network Units	Methods
Network Type	Feed-forward backprop
Training Function	TRAINLM
Adaption learning Function	LEARNGDM
Performance Function	MSE
Number of Layers	2
Number of Neurons	8
Transfer Function	TANSIG

Çalışmadan elde edilen YSA yapısı Şekil 5'de verilmiştir. Bu ağ yapısı her iki motor için aynı şekilde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5. YSA yapısı

Burada bulunan 2 katmanlı YSA'yı örnek alacak olursak, bu durumda geri yayılım formülleri [40];

Çıkış katmanı;

$$O_k = f(net_k)$$

$$net_k = \sum_j w_{kj} O_j + \theta_k \quad (4)$$

Gizli Katman;

$$O_j = f(net_j)$$

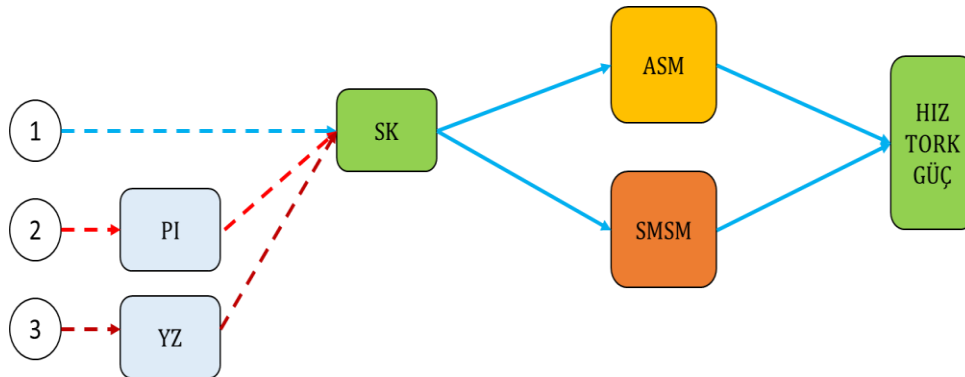
$$net_j = \sum_i w_{ji} O_i + \theta_j \quad (5)$$

YSA'da kullanılan aktivasyon fonksiyonunun Tansig olduğunu kabul ettiğimizde, bu fonksiyonun geri yayılımdaki türev ifadesi;

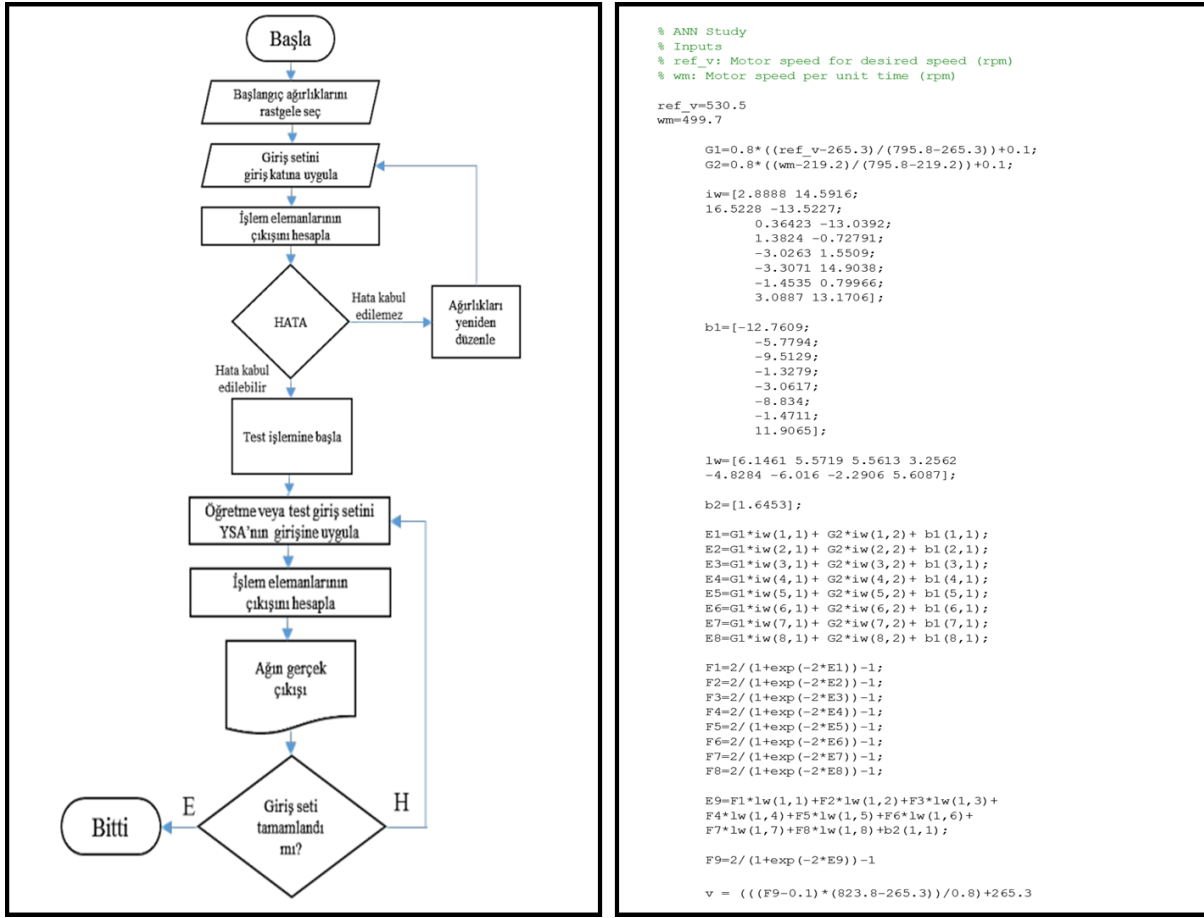
$$f'(net) = 2 / (1 + \exp(-2 * net)) - 1 \quad (6)$$

Çalışmanın blok şeması Şekil 6 da verilmiştir. Burada 1, 2 ve 3 girişleri yapılan çalışmaları göstermektedir.

Çalışmada YSA çıkışının hesaplandığı program ve algoritma Şekil 7 de verilmiştir.



Şekil 6. Çalışmanın blok şeması



Şekil 7. YSA'ya ait algoritma ve program

3. Bulgular

Yapılan çalışma sonucunda elde edilen veriler grafiksel olarak ve her üç kontrol yöntemi için ayrı ayrı gösterilmiştir. Gösterilen grafiklerde yine ASM ve SMSM sonuçları yine ayrı ayrı verilmiştir.

Yapılan tüm benzetim çalışmalarının temelini SK yöntemi oluşturmaktadır. Diğer uygulanan yöntemlerin performansı bu yöntem baz alınarak gerçekleştirilmiştir.

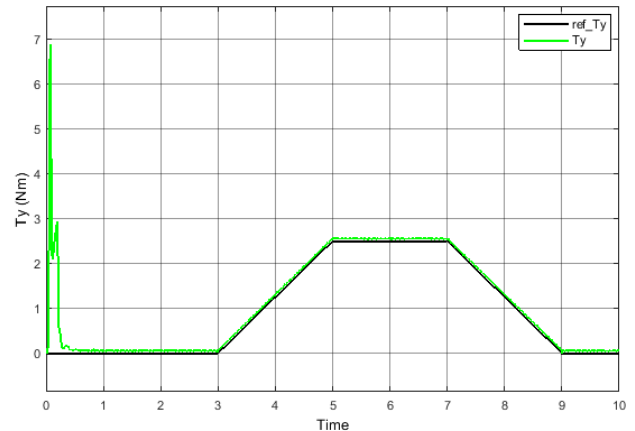
3.1. PI Kontrol

Bu bölümde PI+SK+ASM ve PI+SK+SMSM benzetiminden elde edilen akım, tork, hız ve harcanan güç grafikleri sırasıyla verilmiştir.

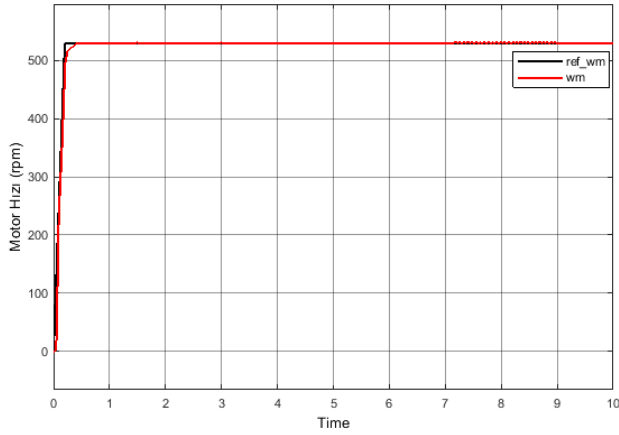
PI+SK+ASM benzetim testinden elde edilen sonuçlar Şekil 8'de gösterilmiştir. Şekil 8, (a) Yol tork grafiğini, (b) Motordan elde edilen hızı, (c) Motordan elde edilen çıkış gücünü ya da harcanan gücü göstermektedir.

Şekil 8 (a) incelendiğinde, motorun kalkış sırasında ürettiği torkun 7 Nm'ye yaklaştığı görülmektedir.

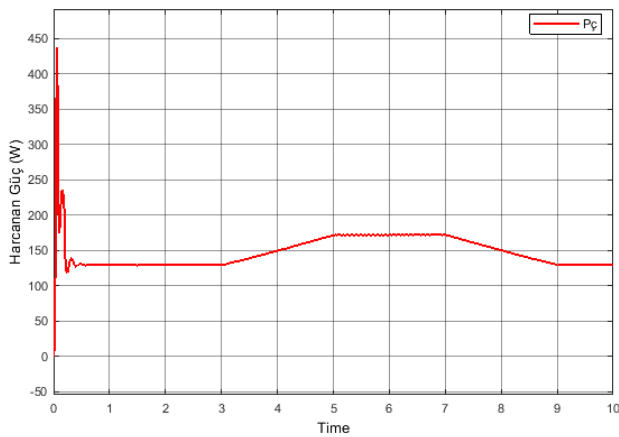
Ayrıca motora yolun durumuna göre uygulanan yol torku verileriyle motordan elde edilen tork verilerinin benzerlik gösterdiği görülmektedir. Şekil 8 (b) incelendiğinde, motorun kalkış sırasında az da olsa (ihmal edilebilir düzeyde) hız hatası yaptığı görülmektedir. Normal koşullarda ve değişen yol koşullarında beklenen hıza ulaştığı görülmektedir. Bu grafikte sadece zaman eksenindeki 7-9 aralığında hız kararlılığının az da olsa (ihmal edilebilir düzeyde) bozulduğu görülmektedir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 8. PI+SK+ASM'den elde edilen sonuçlar

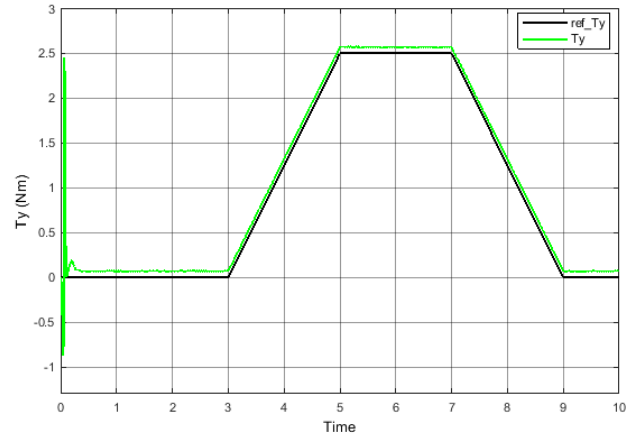
Şekil 8 (c) incelendiğinde, motorun kalkış sırasında sarf ettiği güç miktarının 450 W'a yaklaştığı tespit edilmiştir. Normal koşullarda çalışırken çıkış gücü yaklaşık 130 W'tır. Yol koşullarına göre güç sarfiyatının arttığı, referans alınan yol koşullarına göre maksimum çıkış gücünün yaklaşık 160 W olduğu görülmektedir.

PI+SK+SMSM benzetim testinden elde edilen sonuçlar 9'da gösterilmiştir. Şekil 9, (a) Yol tork grafiğini, (b) Motordan elde edilen hızı, (c) Motordan elde edilen çıkış gücünü ya da harcanan gücü göstermektedir.

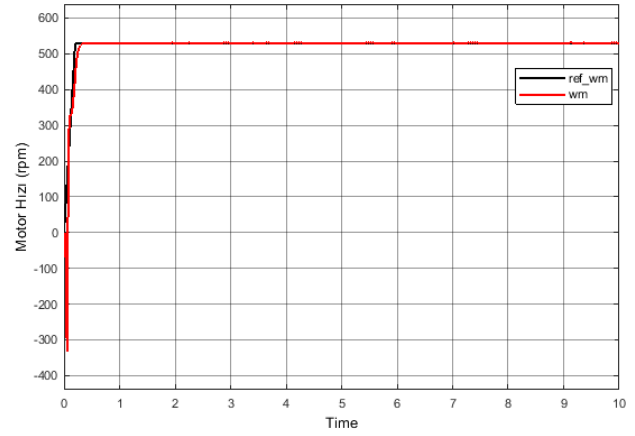
Şekil 9 (a) incelendiğinde, motorun kalkış sırasında ürettiği torkun 2.5 Nm'ye yaklaştığı görülmektedir. Ayrıca motora yolun durumuna göre uygulanan yol torku verileriyle motordan elde edilen tork verilerinin benzerlik gösterdiği hatta referans torka göre az da olsa üzerinde tork ürettiği görülmektedir.

Şekil 9 (b) incelendiğinde, motorun kalkış sırasında az da olsa (ihmal edilebilir düzeyde) hız hatası yaptığı görülmektedir. Normal koşullarda ve değişen yol koşullarına karşılık beklenen hıza ulaştığı görülmektedir.

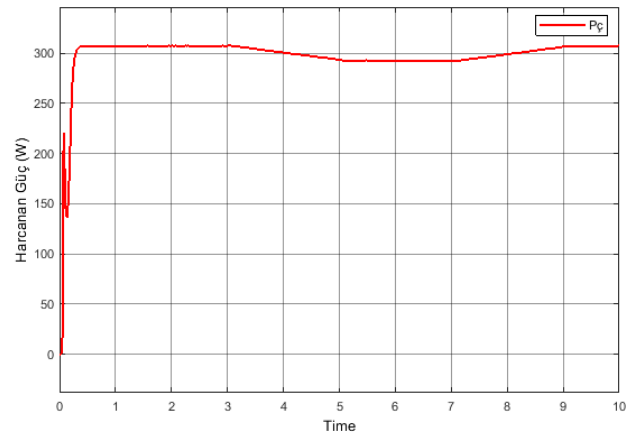
Şekil 9 (c) incelendiğinde, motorun kalkış sırasında sarf ettiği güç miktarı 310 W olarak tespit edilmiştir. Bu güç normal koşullarda aynı düzeyde kalırken yol koşullarına göre güç sarfiyatının azaldığı görülmektedir.



(a)



(b)



(c)

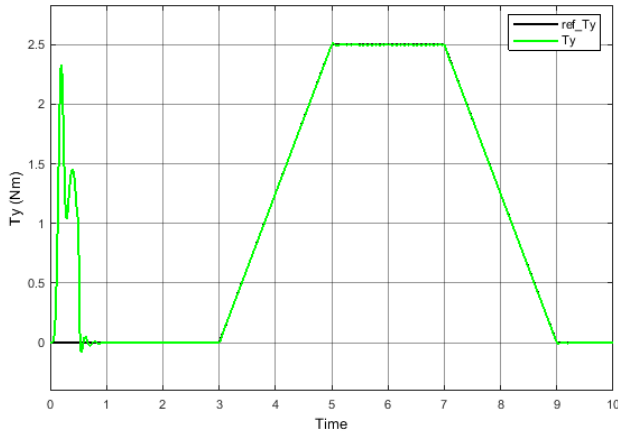
Şekil 9. PI+SK+SMSM'den elde edilen sonuçları

3.2. YZ Kontrol

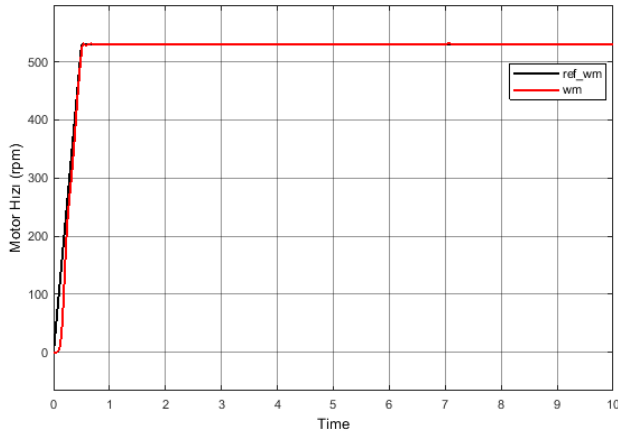
Bu bölümde YZ+SK+ASM ve YZ+SK+SMSM benzetiminden elde edilen akım, tork, hız ve harcanan güç grafikleri sırasıyla verilmiştir.

YZ+SK+ASM benzetim testinden elde edilen sonuçlar Şekil 10 da gösterilmiştir. Şekil 10 (a) Yol tork grafiğini, (b) Motordan elde edilen hızı, (c) Motordan elde edilen çıkış gücünü ya da harcanan gücü göstermektedir.

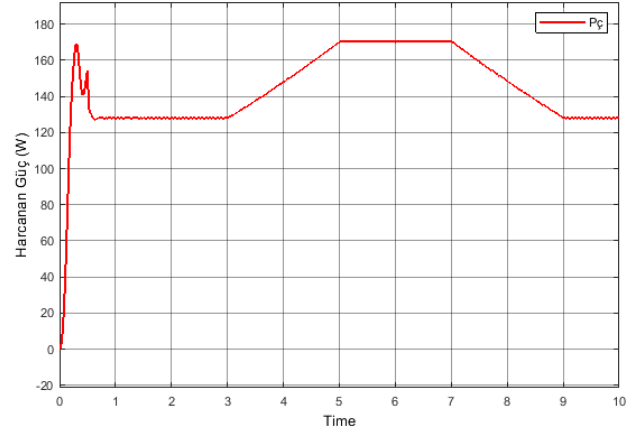
Şekil 10 (a) incelendiğinde, motorun kalkış sırasında ürettiği torkun 2.5 Nm'ye yaklaştığı görülmektedir. Ayrıca motora yolun durumuna göre uygulanan yol torku verileriyle motordan elde edilen tork verilerinin benzerlik gösterdiği görülmektedir. Şekil 10 (b) incelendiğinde, motorun kalkış sırasında az da olsa (ihmal edilebilir düzeyde) hız hatası yaptığı görülmektedir. Normal koşullarda ve değişen yol koşullarında beklenen hıza ulaştığı görülmektedir. Şekil 10 (c) incelendiğinde, motorun kalkış sırasında sarf ettiği güç miktarının 170 W'a yaklaştığı tespit edilmiştir. Normal koşullarda çalışırken çıkış gücü yaklaşık 130 W'tır. Yol koşullarına göre güç sarfiyatının arttığı, referans alınan yol koşullarına göre maksimum çıkış gücünün yaklaşık 170 W olduğu görülmektedir.



(a)



(b)



(c)

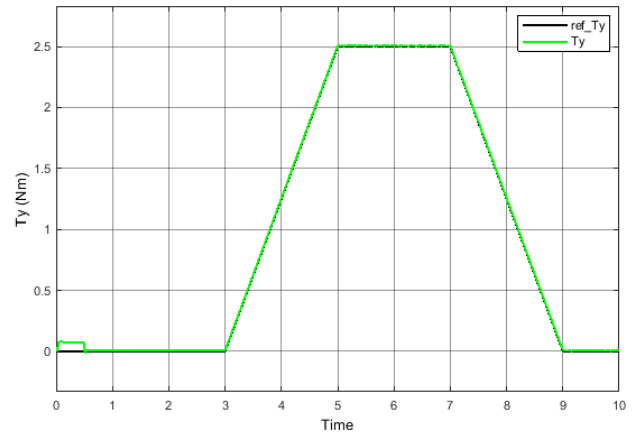
Şekil 10. YZ+SK+ASM'den elde edilen sonuçlar

YZ+SK+SMSM benzetim testinden elde edilen sonuçlar Şekil 11 de gösterilmiştir. Şekil 11 (a) Yol tork grafiğini, (b) Motordan elde edilen hızı, (c) Motordan elde edilen çıkış gücünü ya da harcanan gücü göstermektedir.

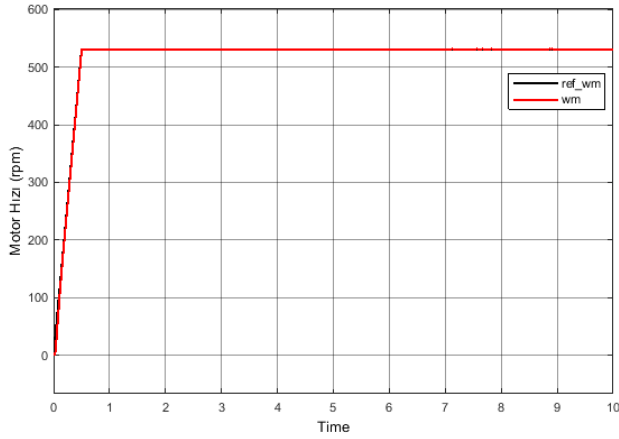
Şekil 11 (a) incelendiğinde, motorun kalkış sırasında ürettiği torkun 0.1 Nm olduğu görülmektedir. Ayrıca motora yolun durumuna göre uygulanan yol torku verileriyle motordan elde edilen tork verilerinin benzerlik gösterdiği görülmektedir.

Şekil 11 (b) incelendiğinde, motorun kalkış sırasında, normal koşullarda ve değişen yol koşullarında beklenen hız değerine ulaştığı görülmektedir.

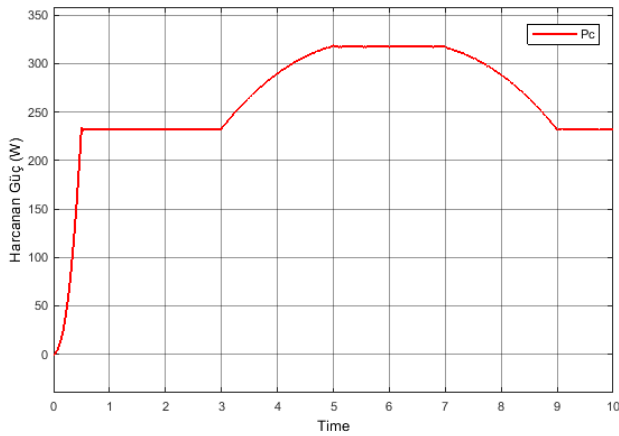
Şekil 11 (c) incelendiğinde, motorun kalkış sırasında sarf ettiği güç miktarı yaklaşık 230 W olarak tespit edilmiştir. Bu güç normal koşullarda aynı düzeyde kalırken yol koşullarına göre güç sarfiyatının arttığı, çalışmada referans alınan en yüksek tork verisine göre yaklaşık 320 W olduğu görülmektedir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 11. YZ+SK+SMSM'den elde edilen sonuçlar

4. Değerlendirme

Bu çalışmada, EA'larda kullanılan ASM ve SMSM'ler performans yönüyle değerlendirilmiştir. Performans değerlendirmesi için üç yöntem ayrı ayrı motorlara uygulanmıştır. Bu yöntemler sırasıyla; SK ile kontrol, PI+SK ile kontrol, YZ+SK ile kontroldür.

Kullanılan kontrol yöntemlerinde SK ve SK'den elde edilen veriler referans alınarak diğer yöntemlerde performans değerlendirmesi yapmak için kullanılmıştır. Değerlendirmede her iki motor için üç kistas esas alınarak analiz gerçekleştirilmiştir. Bu kistaslar;

- Tork performans sonuçları (Yol durumu)
- Hız performans sonuçları
- Harcanan güç performans sonuçları

Belirtilen durumlara göre motorlardan elde edilen performans sonuçları aşağıda açıklanmıştır.

4.1. Tork Performans Sonuçları (Yol Durumu)

- SK ile kalkış sırasında ASM'den yaklaşık 6 Nm, SMSM'den yaklaşık 0.5 Nm elde edilmiştir.
- PI+SK ile kalkış sırasında ASM'den yaklaşık 7 Nm, SMSM'den yaklaşık 2.5 Nm elde edilmiştir.
- YZ+SK ile kalkış sırasında ASM'den yaklaşık 2.5 Nm, SMSM'den yaklaşık 0.1 Nm elde edilmiştir.

EA'larda kullanılan motorlarda kalkış sırasında yüksek tork özelliğinin bulunması gerektiği hatırlandığında [30], yaptığımız çalışmada kalkış sırasında en iyi performansı PI+SK ile ASM göstermiştir. Normal koşullar ve yol koşullarına göre motorlardan anlık torku karşılayabilme yetenekleri beklendiğinden [30], [31] yapılan çalışmada her iki motorun tüm kontrol yöntemleriyle beklenen değerleri ürettiği görülmüştür.

4.2. Hız Performans Sonuçları

- SK ile kalkış sırasında hem ASM hem de SMSM'nin ihmal edilebilecek düzeyde hatalı hız verileri üretmektedir. Normal koşullar altında her iki motor türünün beklenen hız verilerine ulaştığı görülmüştür. Yol koşullarındaki değişimlere ASM'nin cevap veremediği, SMSM'nin ise beklenen hız verilerine ulaştığı görülmüştür.
- PI+SK ile kalkış sırasında yine her iki motorun ihmal edilebilir hatalarının olduğu, normal koşullarda ve yol koşul değişimlerine ise en iyi sonuçları SMSM'nin ürettiği anlaşılmıştır.
- YZ+SK ile kalkış sırasında ASM, ihmal edilebilir düzeyde hatalı sonuçlar ürettiği, SMSM'nin ise beklenen değerlere ulaştığı, normal koşullarda ve yol koşullarındaki değişimlere ise her iki motorun beklenen değerlere ulaştığı görülmüştür.

EA'larda kullanılan motorların her koşulda beklenen hıza ulaşması gerektiğinden [41], yapılan çalışmada en iyi sonucu YZ+SK ile SMSM'nin gösterdiği anlaşılmaktadır. Bunun yanı sıra YZ+SK ile ASM'de ihmal edilebilir hata düzeyinde en iyi sonuçları ürettiği anlaşılmıştır.

4.3. Harcanan Güç Performans Sonuçları

- SK ile ilk kalkış sırasında ASM'den yaklaşık 300 W, SMSM'den yaklaşık 310 W elde edilmiştir. Motor normal koşullarda çalışırken ASM yaklaşık 130 W, SMSM yaklaşık 310 W güç harcamaktadır. Yol koşullarının değişiminde; ASM'de yol torkunun arttığı durumlarda harcanan gücün arttığı, yol torkunun azaldığı durumlarda harcanan gücün azaldığı görülmüştür (Normal koşullara göre değerlendirilmiştir). Maksimum referans torka göre ASM yaklaşık 170 W güç harcamaktadır.

SMSM'den ise yol torkunun arttığı durumlarda harcanan gücün azaldığı, yol torkunun azaldığı durumlarda harcanan gücün arttığı görülmüştür (Normal koşullara göre değerlendirilmiştir). Maksimum referans torka göre SMSM yaklaşık 285 W güç harcamaktadır.

- PI+SK ile kalkış sırasında ASM'den yaklaşık 450 W, SMSM'den yaklaşık 310 W elde edilmiştir. Motor normal koşullarda çalışırken ASM yaklaşık 130 W, SMSM yaklaşık 310 W güç harcamaktadır. Yol koşullarının değişiminde; ASM'de yol torkunun arttığı durumlarda harcanan gücün arttığı, yol torkunun azaldığı durumlarda harcanan gücün azaldığı görülmüştür (Normal koşullara göre değerlendirilmiştir). Maksimum referans torka göre ASM yaklaşık 160 W güç harcamaktadır. SMSM'de ise yol torkunun arttığı durumlarda harcanan gücün azaldığı, yol torkunun azaldığı durumlarda harcanan gücün arttığı görülmüştür (Normal koşullara göre değerlendirilmiştir). Maksimum referans torka göre SMSM yaklaşık 285 W güç harcamaktadır.
- YZ+SK ile kalkış sırasında ASM'den yaklaşık 170 W, SMSM'den yaklaşık 280 W elde edilmiştir. Motor normal koşullarda çalışırken ASM yaklaşık 130 W, SMSM yaklaşık 280 W güç harcamaktadır. Yol koşullarının değişiminde; ASM'de yol torkunun arttığı durumlarda harcanan gücün arttığı, yol torkunun azaldığı durumlarda harcanan gücün azaldığı görülmüştür (Normal koşullara göre değerlendirilmiştir). Maksimum referans torka göre ASM yaklaşık 170 W güç harcamaktadır. SMSM'den ise yol torkunun arttığı durumlarda harcanan gücün arttığı, yol torkunun azaldığı durumlarda harcanan gücün azaldığı görülmüştür (Normal koşullara göre değerlendirilmiştir). Maksimum referans torka göre SMSM yaklaşık 320 W güç harcamaktadır.

Bu sonuçlar kalkış sırasındaki durum açısından değerlendirildiğinde belirlenen referans durumlara göre en iyi sonucu YZ+SK ile ASM'nin ürettiği anlaşılmaktadır.

5. Sonuçlar

Çalışmada motorlar; PI + SK, YZ + SK yöntemleriyle test edilmiş ve elde edilen grafikler yardımıyla farklı yol koşullarında en iyi performansı gösteren motor, "hız, tork ve güç" parametrelerine göre belirlenmiştir. Normal koşullarda tüm kontrol yöntemlerine göre yine en iyi sonucu ASM'nin ürettiği görülmüştür. Yol koşullarının değişiminde de yine tüm kontrol yöntemlerine göre en iyi sonucu ASM'nin ürettiği anlaşılmaktadır. Burada harcanan gücün azalması

motorun enerji kaynağından çektiği akımın azalması demektir. Bu bağlamda daha az güç harcanan motor kullanımı daha az batarya kullanımını ortaya çıkarmaktadır. Yapılan çalışmada harcanan güç performansında en iyi sonuçları ASM üretmiştir.

Yapılan çalışma genel olarak değerlendirildiğinde EA'larda kullanılan motorlarda YZ ile yapılan SK çalışmalarının olumlu sonuçlar ürettiği anlaşılmaktadır. Bu alandaki teknolojik gelişmeler düşünüldüğünde yapılan çalışmanın da literatüre katkı sağlayacağı muhakkaktır.

Yapılan çalışmaya Verimlilik, Kontrol edilebilirlik ve Maliyet açısından aşağıdaki önerilerde bulunulabilir.

- Verimlilik: Harcanan güç açısından bakıldığında ASM en iyi performansı gösterdiğinden, gücün önemli olduğu kullanım alanlarında YZ+SK+ASM modeli önerilebilir. Hız açısından bakıldığında en iyi performansı SMSM gösterdiğinden, hızın önemli olduğu kullanım alanlarında YZ+SK+SMSM modeli önerilebilir. Tork açısından değerlendirildiğinde ASM en iyi performansı gösterdiğinden, torkun önemli olduğu uygulamalarda YZ+SK+ASM modeli önerilebilir.
- Kontrol Edilebilirlik: Tüm çalışmaya hız kontrolü açısından bakıldığında SMSM en iyi sonucu gösterdiğinden, benzer kullanım alanlarında YZ+SK+SMSM modeli önerilebilir.
- Maliyet: Teknolojideki gelişmeler SMSM'de kullanılan mıknatısların maliyetini giderek düşürmektedir. Ancak bu tür motorlarda kullanılan her türlü aparat maliyeti arttırdığından ASM'nin maliyet bakımından en uygun motor türü olacağı söylenebilir.

Kaynaklar

- [1] Yoichi H, "Future Vehicle driven by Electricity and Control-Research on Four Wheel Motored "UOT Electric March II", " *IEEE transactions on industrial electronics*, vol. 51, pp. 954-962, 2004.
- [2] Rietmann N, Lieven T, "A comparison of policy measures promoting electric vehicles in 20 countries," in *The Governance of Smart Transportation Systems*, ed: Springer, 2019, pp. 125-145.
- [3] Sun X, Shi Z, Lei G, Guo Y, ve Zhu J, "Analysis and design optimization of a permanent magnet synchronous motor for a campus patrol electric vehicle," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, pp. 10535-10544, 2019.
- [4] Ohashi T, Saruwatari Y, ve Ozawa H, "Electric vehicle," ed: Google Patents, 2019.
- [5] Onat NC, Kucukvar M, ve Afshar S, "Eco-efficiency of electric vehicles in the United States: A life cycle

- assessment based principal component analysis," *Journal of Cleaner Production*, vol. 212, pp. 515-526, 2019.
- [6] Demirci Y, "Hibrit araçlarda elektrik motoru denetimi," Master Yüksek Lisans, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale, 2010.
- [7] Affanni A, Bellini A, Franceschini G, Guglielmi P, ve Tassoni C, "Battery choice and management for new-generation electric vehicles," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 52, pp. 1343-1349, 2005.
- [8] Harding G, "Electric vehicles in the next millennium," *Journal of power sources*, vol. 78, pp. 193-198, 1999.
- [9] Kaloko BS, Soebagio M, ve Purnomo MH, "Design and development of small electric vehicle using MATLAB/Simulink," *International Journal of Computer Applications*, vol. 24, pp. 19-23, 2011.
- [10] Gencer C, Gedikpinar M, "Modeling and simulation of bldcm using matlab/simulink," *Journal of Applied sciences*, vol. 6, pp. 688-691, 2006.
- [11] Patel VKS, Pandey A, "Modeling and performance analysis of PID controlled BLDC motor and different schemes of PWM controlled BLDC motor," *International Journal of Scientific and Research Publications*, vol. 3, pp. 1-14, 2013.
- [12] Otkun O, Dogan RÖ, ve Akpinar AS, "Neural Network Based Scalar Speed Control of Linear Permanent Magnet Synchronous Motor," *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, vol. 30, pp. 395-404, 2015.
- [13] Rao APC, Y. Obulesh, Babu CS, "Mathematical modeling of BLDC motor with closed loop speed control using PID controller under various loading conditions," *arnp journal of engineering and applied sciences*, vol. 7, pp. 1321-1328, 2012.
- [14] Patel VKS, "Modeling and simulation of brushless DC motor using PWM control technique," 2013.
- [15] Koca GÖ, ve Akpolat ZH, "Bulanık Mantık ve Erişim Kuralı Yaklaşımını Kullanarak Bir Elektrikli Aracın Dayanıklı Hız Denetimi," *Politeknik Dergisi*, vol. 9, pp. 93-103, 2006.
- [16] Mun J-M, Park G-J, Seo S, Kim Y-J, ve Jung S-Y, "Design characteristics of IPMSM with wide constant power speed range for EV traction," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 53, pp. 1-4, 2017.
- [17] Yang Y, Castano SM, Yang R, Kasprzak M, Bilgin B, Sathyan A, et al., "Design and comparison of interior permanent magnet motor topologies for traction applications," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 3, pp. 86-97, 2017.
- [18] Jiang JW, Bilgin B, Sathyan A, Dadkhah H, ve Emadi A, "Noise and vibration reduction for IPMSM by using rotor circumferential slits," in *2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)*, 2017, pp. 1-8.
- [19] Demir U ve Aküner MC, "Elektrikli bir araç için tekerlek içi asenkron motorun tasarım ve optimizasyonu," *Journal of the Faculty of Engineering & Architecture of Gazi University*, 2018.
- [20] Sezenoğlu C, Aydoğan F, Kurnaz Araz H, Akgül L, ve Erçin ME, "Elektrikli ve Hibrit Elektrikli Araçlar için Makinası ve Sürücüsü," *Cadem A.Ş.*, 2017.
- [21] Chan C, ve Lo W, "Control strategy of PWM inverter drive system for electric vehicles," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, pp. 447-456, 1987.
- [22] De Santiago J, Bernhoff H, Ekergård B, Eriksson S, Ferhatovic S, Waters R, et al., "Electrical motor drivelines in commercial all-electric vehicles: A review," *IEEE Transactions on vehicular technology*, vol. 61, pp. 475-484, 2012.
- [23] Ko S-Y, Ko J-K, Lee S-M, Cheon J-S, ve H.-S. Kim H-S, "A study on in-wheel motor control to improve vehicle stability using human-in-the-loop simulation," *Journal of Power Electronics*, vol. 13, pp. 536-545, 2013.
- [24] Lin F-J, Hung Y-C, J.-C. Hwang J-C, Chang I-P, ve M.-T. Tsai, "Digital signal processor-based probabilistic fuzzy neural network control of in-wheel motor drive for light electric vehicle," *IET Electric Power Applications*, vol. 6, pp. 47-61, 2012.
- [25] Pei J, Zhao L-M, Wang DJ, ve Chu L, "Fuzzy PID control of traction system for vehicles," in *2005 International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, 2005, pp. 773-777.
- [26] Omatu S, Yoshioka M, Kosaka T, Yanagimoto H, ve Dargham JA, "Neuro-PID Control of Speed and Torque of Electric Vehicle," 2010.
- [27] Chang L, "Comparison of AC drives for electric vehicles-a report on experts' opinion survey," *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 9, pp. 7-11, 1994.
- [28] Goss J, Popescu M, ve Staton D, "A comparison of an interior permanent magnet and copper rotor induction motor in a hybrid electric vehicle application," in *2013 International Electric Machines & Drives Conference*, 2013, pp. 220-225.
- [29] Gwozdziwicz M, ve Antal L, "Investigation of line start permanent magnet synchronous motor and induction motor properties," *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej*, pp. 13-20, 2010.
- [30] Zeraoulia M, Benbouzid MEH, ve Diallo D, "Electric motor drive selection issues for HEV propulsion systems: A comparative study," *IEEE Transactions on Vehicular technology*, vol. 55, pp. 1756-1764, 2006.
- [31] Xue X, Cheng K, ve Cheung N, "Selection of electric motor drives for electric vehicles," in *2008*

- Australasian Universities Power Engineering Conference*, 2008, pp. 1-6.
- [32] Grunditz E, ve Jansson E, *Modelling and Simulation of a Hybrid Electric Vehicle for Shell Eco-marathon and an Electric Go-kart*. Sweden: Chalmers University of Technology, 2009.
- [33] Instruments T, "Clarke & Park Transforms on the TMS320C2xx," *Application Report Literature Number: BPRA048*, 1996.
- [34] Başer E, "Elektrikli Araçlarda Yol Koşullarına Uygun Motor Seçimi Algoritması Geliştirme," Master Yüksek Lisans, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce Üniversitesi, Düzce, 2016.
- [35] Abu-Rub H, Iqbal A, ve Guzinski J, *High performance control of AC drives with MATLAB/Simulink models*: John Wiley & Sons, 2012.
- [36] Kavuran G, ve Orhan A, "Open-loop speed control of permanent magnet synchronous motor fed by matrix converter," in *National Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering*, 2010, pp. 334-338.
- [37] Åström KJ, Hägglund T, ve Astrom KJ, *Advanced PID control* vol. 461: ISA-The Instrumentation, Systems, and Automation Society Research Triangle ..., 2006.
- [38] MathWorks. (2019, 25/04/2019). *Matlab*. Available: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>
- [39] Yavuz S, ve Deveci M, "İstatiksel Normalizasyon Tekniklerinin Yapay Sinir Ağına Performansına Etkisi," *Erciyes Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, pp. 167-187, 2012.
- [40] Otkun Ö, "Çift Yanlı Doğrusal Hareketli Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Tasarımı, Üretimi, ve Yapay Sinir Ağı Tabanlı Skaler Hız Denetimi " Doktor Doktora, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, 2015.
- [41] Ehsani M, Gao Y, Longo S, ve Ebrahimi K, *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles*: CRC press, 2018.