

Hafif Elektrikli Araçlarda Yol Koşullarının Enerji Tüketimi Üzerindeki Etkisi: Modelleme, Simülasyon ve Analiz

Mustafa ESEN^{1*} , Barış BORU² 

¹ Elektrik Elektronik Mühendisliği, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Sakarya, Türkiye. mustafaesen752@gmail.com

² Mekatronik Mühendisliği, Teknoloji Fakültesi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Sakarya, Türkiye. barisb@subu.edu.tr

ÖZ

Bu çalışmada, hafif elektrikli araçların farklı yol güzergâhlarındaki enerji tüketimi, sürüş dinamiklerine bağlı olarak analiz edilmiş ve araç bataryasının tepkisi deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Çalışma kapsamında elektrikli aracın batarya paketi ve motoru için kapsamlı bir Simulink modeli geliştirilmiş ve bu model aracılığıyla farklı yol güzergâhlarındaki enerji tüketimi değişimleri incelenmiştir. Gerçekleştirilen simülasyonların deneysel veriler ile karşılaştırılması sonucunda, modelin %96-99 doğruluk oranına sahip olduğu görülmüştür. Ani hızlanmalar ve yavaşlamaların batarya verimi üzerinde belirleyici olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, sürüş profiline uygun batarya paketi seçimlerinin, toplam enerji verimliliği açısından kritik olduğu belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, hafif elektrikli araçların kullanım güzergâhlarına özel enerji yönetim stratejilerinin geliştirilmesi gerektiği önerilmektedir. Batarya ve motor seçimlerinin optimize edilmesi sayesinde, enerji tüketimi azaltılmakta ve araçların genel verimliliği artırılabilir. Böylece, elektrikli araçların daha uzun menzil sunması ve kullanımının yaygınlaşması sağlanabilecektir.

Anahtar Kelimeler: Hafif elektrikli araçlar, enerji tüketim analizi, modelleme, batarya paketleri.

*Sorumlu Yazar e-postası: mustafaesen752@gmail.com

Cite as: Esen, M. & Boru, B. (2025). Hafif Elektrikli Araçlarda Yol Koşullarının Enerji Tüketimi Üzerindeki Etkisi: Modelleme, Simülasyon ve Analiz, *Journal of Smart Systems Research*, 6(1), 11-27. <https://doi.org/10.58769/joinssr.1647818>

The Effect of Road Conditions on Energy Consumption in Light Electric Vehicles: Modeling, Simulation and Analysis

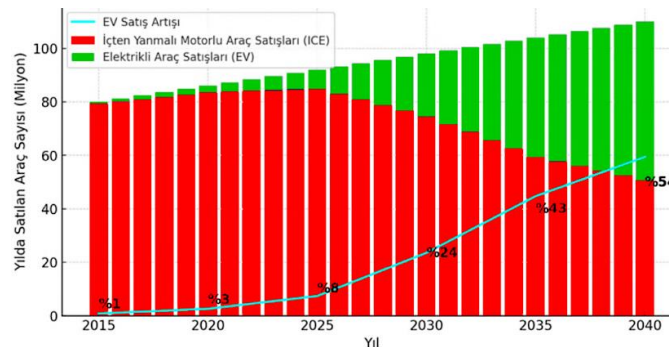
ABSTRACT

In this study, the energy consumption of light electric vehicles over various road routes was analyzed based on driving dynamics, and the response of the vehicle battery was compared with experimental results. A comprehensive Simulink model was developed for the battery pack and motor of the electric vehicle, through which energy consumption variations across different road routes were examined. When the simulations were compared to actual data, the model's accuracy rate was found to be between 96 and 99%. For overall energy efficiency, it was found that choosing a battery pack that fits the driving profile is essential. Based on the findings, it is recommended that energy management strategies specific to the operating routes of light electric vehicles be developed. Accordingly, by optimizing battery and motor selection, energy consumption can be minimized, and the overall efficiency of the vehicles can be enhanced. Thus, electric vehicles will be able to offer longer driving ranges, and their widespread use can be promoted.

Keywords: Light electric vehicles, energy consumption analysis, modeling, battery packs.

1. Giriş

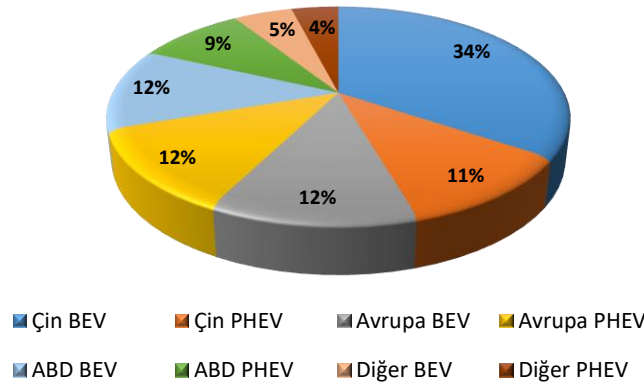
1800'lü yıllarda icat edilen elektrikli araçlar (EV), 1900-1912 yılları arasında en parlak dönemini yaşamış, ancak 1921-1960 yılları arasında içten yanmalı motorlu (İYM) araçların yaygınlaşmasıyla neredeyse tamamen ortadan kalkmıştır. 1960-1990 yılları arasında ise sınırlı sayıda da olsa yeniden ortaya çıkmıştır. Elektrikli araçlar, 1990 sonrasında yakıt tasarrufu ve çevre koruma ihtiyaçları doğrultusunda gelişen yeni batarya teknolojileriyle tekrar önem kazanmaya başlamıştır [1, 2]. Elektrikli araçların erken dönemdeki rekabet üstünlüğünü kaybetmesine neden olan eksiklikler henüz tamamen aşılamamıştır. Güç elektroniği ve mikroelektronik alanındaki önemli ilerlemeler, elektrikli araçlarda güç aktarma organlarını (elektrik motoru ve inverter) içten yanmalı motorlu araçların güç aktarma organları (aks ve diferansiyel) ile rekabet edebilmesini sağlamaktadır. Son yıllarda batarya teknolojisinde önemli bir ilerleme olmamasına rağmen, malzeme ve üretim teknolojilerinin gelişimi, gelişmiş batarya sistemi hedeflerine ulaşmak için umut vadetmektedir. Elektrikli araçların düşük güçlerde kullanılabilmesi ve bununla birlikte enerji tasarrufu sağlamaları, kullanım sırasında çevreyi kirletmemeleri ve yüksek teknolojik donanımına sahip olmaları sayesinde otomobillerin gelişim trendini belirleyen günümüzdeki en değerli ulaşım araçları haline gelmiştir [3]. Şekil 1'de elektrikli araç satışlarının içten yanmalı motorlu araç satışları ile rekabeti ve gelişimi görülmektedir.



Şekil 1. Elektrikli ve İYM Araç Satışı ve Gelecek Tahmini [4]

Elektrikli otomobillerin yaygınlaşması, 2010'lu yıllardan itibaren hız kazanmıştır ve küresel elektrikli binek araç stoğu, 2018 yılında bir önceki yıla göre %63 artarak 5 milyonun üzerine çıkmıştır. 2018 yılı itibariyle yollardaki elektrikli otomobillerin yaklaşık %45'i Çin'de bulunurken, Avrupa, küresel filonun %24'ünü, ABD ise %22'sini oluşturmaktadır. Elektrikli otomobil pazarı henüz gelişim aşamasında olsa

da 21. Yüzyılda elektrikli araçlar daha güçlü bir şekilde yeniden dikkatleri üzerine çekmiştir [4, 5]. Şekil 2’de elektrikli araç filosunun (BEV: Batarya Elektrikli Araç, PHEV: Plug-in Hibrit Elektrikli Araçlar) dünya üzerindeki dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 2. Elektrikli Araç Filosunun Dünya Üzerindeki Dağılımı [5]

2040 yılına gelindiğinde, trafikteki toplam araç sayısının %58’inin elektrikli araçlardan oluşacağı öngörülmektedir [6]. Elektrikli araçların gelişimi ve sunduğu avantajlar elektrikli araçların günümüzde birçok alanda kullanılmasının önünü açmaktadır. Özellikle de şehir içi ulaşım ve lojistik alanlarında hafif elektrikli araçların kullanımı da popüler hale gelmektedir. Literatürde, hafif elektrikli araçlar genellikle "Light Weight Electric Vehicles" (LEV) olarak adlandırılmaktadır. LEV terimi; elektrikle çalışan, şehir içine uygun düşük hızda hareket eden ve çoğunlukla elektrikli araçlardan daha hafif yapıya sahip ve daha düşük güçlerde motorlar ile çalışabilen araçları tanımlamaktadır [7]. Uluslararası araç sınıflandırmalarında L7 kategorisi altında tanımlanan, hafif elektrikli araçlar, kendi içerisinde birçok alt kategoriye ayrılmaktadır. Bu çalışmada kullanılan araç modeli de L7e-A1 sınıfına ait hafif bir elektrikli araçtır.

Araç bileşenlerinin tasarımları; araç fiziksel özellikleri, kısıtları ve hedefler doğrultusunda yapılarak deneysel araç testlerinin ardından üretim aşamasına geçirilirler. Elektrikli araçlarda önemli unsur olan enerji tüketimleri ve verim testleri laboratuvar ortamında yapılabilmektedir. Laboratuvar test sonuçlarının doğruluğu çok fazla sayıdaki parametrenin veya sistemin ölçülmesi ve deneysel verilerin doğru bir şekilde kaydedilip işlenmesine bağlıdır. Gerekli olan testler için birçok donanıma sahip, araç test stantlarına ihtiyaç duyulmaktadır [8]. Yapılan testlerin ardından, araçların laboratuvar ortamında test edilmeleri ile birlikte sistemlerin hedeflenen değerler açısından uygunluğu kontrol edilmekte ve gerekliyse tasarımları revize edilmektedir.

Elektrikli araçlarda yapılan çalışmalar, genel olarak araçların; mekanik, elektrik ve elektronik teknolojisi üzerine yoğunlaşmaktadır. Ticari amaçlı yapılan çalışmaların yanı sıra alanda yapılan akademik çalışmaların başında batarya ve şarj sistemleri gelmektedir. Mevcut literatürde birçok çalışmada şarj yöntemleri incelenmekte ve geliştirilmektedir [9, 10]. Ayrıca elektrikli araçlarda batarya paketlerinin hızlıca bitmesinin önüne geçmek ya da şarj sürelerini kısaltacak çalışmalar yaparak hızlı şarj üzerine odaklanan çalışmalar yapılmaktadır [11].

Hamid Khayyam ve Alireza BabHadiashar, Plug-in Hybrid elektrikli araçlar için akıllı enerji yönetim sistemi geliştirmektedir. Makalelerinde, yapılan bu çalışmaya benzer şekilde farklı yol koşulları için bir dizi verisi oluşturularak hata tahminine dayalı bir hibrit öğrenme algoritması oluşturmaktadır. Böylece sistem çalışma sırasında öğrenir ve uygun ayarlamalar yapabilmektedir [12].

Elektrikli araçlar eğimli yollarda kullanılırken güç talebinin fazla olması dolayısıyla pillerin şarj ve

deşarj süreçleri etkilenmektedir. Xiangrui Zeng ve Junmin Wang tarafından yapılan çalışmada engebeli yerlerde kullanılan hibrit elektrikli araçların konumunu, seyahat yönünü ve bölgenin arazi bilgilerini kullanarak stokastik model tahminine dayalı kontrol tabanlı enerji yönetim sistemi stratejisi önerilmektedir. Böylece stokastik yakıt tüketimi ve batarya SOC modellemesi geliştirerek yüksek performanslı daha iyi bir enerji tüketimi sağlanması hedeflenmektedir [13].

Haluk Altay ve Haydar Livatyalı, 2021 yılında hafif elektrikli araçlar için bir çalışma gerçekleştirerek, elektrikli araç modeli içeren bir makale yayımlamışlardır. "Elektrikli Araçlar İçin Bir Şasi Dinamometresi Tasarımı" başlıklı çalışmada, Matlab & Simulink ortamında benzer bir sistem modeli oluşturulmuş ve simülasyonu gerçekleştirilmiştir [8]. Çalışmada dikkat çeken önemli noktalardan biri, elektrikli araç dinamiklerinin benzetim yoluyla analiz edilmesidir.

Ahmad Zaid Syakir Mohd Yazsid ve arkadaşlarının 2024 yılında gerçekleştirdiği çalışmada, elektrikli scooterların menzilinı artırmak amacıyla kullanıcı giriş sinyali üzerine bir akım sınırlayıcı entegre edilerek, bataryadan motora aktarılan akımın azaltılması ve böylece enerji tüketiminin düşürülmesi hedeflenmiştir. Modelleme ve simülasyon çalışmaları MATLAB-Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir [14]. Yapılan çalışmadan yararlanılarak, model oluşturma sürecinde araç gövdesi bloğu, tekerlek bağlantıları ve batarya paketi bağlantılarının tasarlanması ve sistemin doğru bir şekilde modellenmesi aşamalarında önemli destek alınmıştır.

Elektrikli araçlarda son yıllarda gelişim gösteren rejeneratif frenleme sistemi, hibrit ve elektrikli araçların enerji verimliliğini artırmak ve fren aşınmasını azaltmak için kritik bir teknolojidir. Elektrikli araçlarda enerjinin geri kazanımı üzerine yapılan çalışmalar, genellikle frenleme sırasında kaybedilen kinetik enerjinin geri kazanılmasına yöneliktir. Yalım Özçağlayan 2024 yılında MATLAB Simulink'te rejeneratif bir fren sistemine sahip olan hibrit bir aracın simülasyonunu gerçekleştirerek, rejeneratif frenlemenin sağladığı performans ve verimlilik kazanımlarını değerlendirmiştir [15]. Enerjinin geri kazanımına yönelik yapılan çalışmalar, rejeneratif frenlemenin sürdürülebilir ulaşım ve enerji yönetimi açısından önemli katkılar sunduğunu göstermektedir. Ancak, araçların enerji tüketimi yalnızca frenleme süreçlerinden değil, aynı zamanda sürüş koşullarından da etkilenmektedir.

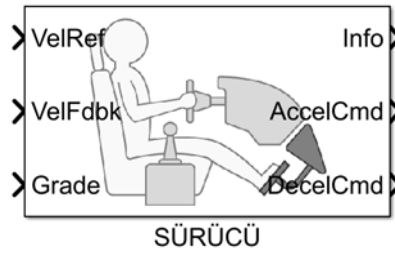
Bu çalışma ile mevcut literatüre katkı sunacak Hafif Elektrikli Araçların enerji tüketim hesaplamalarını gerçekleştiren ve motor-batarya üzerindeki anlık ve toplam etkilerini analiz etme imkânı sunan bir model geliştirilmiştir. Geliştirilen model, 3 farklı pistte gerçekleştirilen yol testlerinde ölçülen veriler ile karşılaştırılarak modelin performansı ölçülmüştür. Çalışmaların çıktısı olarak hazırlanan makalenin 2. Bölümünde; modellenen aracın özellikleri ortaya konarak, geliştirilen model detaylandırılarak kullanılan bloklar açıklanmıştır. 3. Bölümde 3 farklı pist verileri ile birlikte yapılan simülasyonlar sunulmuştur. Son Bölüm olan 4. Bölümde elde edilen sayısal sonuçlar sunulularak değerlendirilmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

Deneyisel çalışmaların modellenmesinde, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi bünyesinde faaliyet gösteren SUBÜ-TETRA kulübü tarafından enerji verimliliği yarışları için geliştirilen ve Şekil 3'te gösterilen Revolt EVO isimli elektrikli araç kullanılmıştır. Model, Revolt-EVO elektrikli aracına özgün olarak tasarlanmış olup, aracın özelliklerini taşımaktadır. Tasarlanan model Matlab & Simulink programı kullanılarak hazırlanmıştır. Model, bahsedilen aracın yarışacağı yarışma koşulları dikkate alınarak hazırlanmıştır. Belirli hız, güç ve batarya gerilimi sınırlarına dikkat edilmiştir. Modelin doğruluğu, daha önce elde edilen deneyisel verilerle karşılaştırılarak ispatlanmıştır. Daha sonra elektrikli araçlar için kullanılabilirliği gösterilmiştir. Oluşturulan modelde araç sürücüsü dahil, itki gücüne sahip tekerleklerine kadar bütün sistemler yer almaktadır. Revolt EVO aracının hem tek motorlu hem de çift fırçasız doğru akım motoru (FDAM) motorlu modelleri tasarlanmıştır. Yapılan çalışmada, araç çift

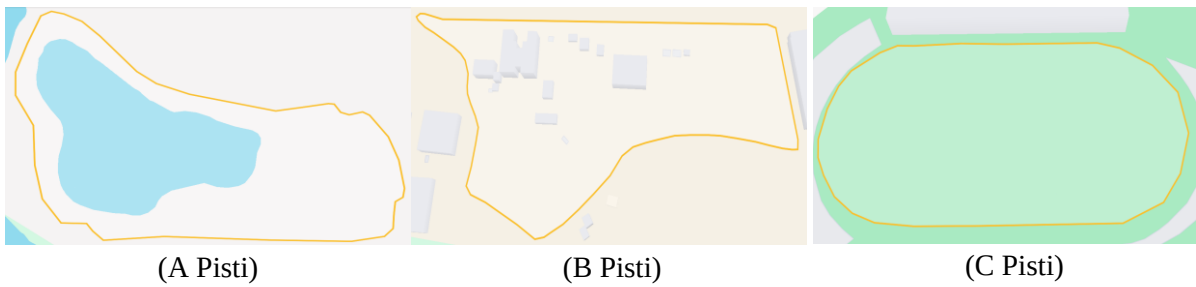
Oluşturulan modelde yer alan blokların kullanım şekilleri, aşağıdaki şekiller ve açıklamalar ile detaylandırılmaktadır.

Şekil 5’te gösterilen “Boylamsal sürücü” bloğu, araç şoförünü temsil etmektedir. Sürücü bloğunun “VelRef”, “VelFdbk” ve “Grade” olmak üzere üç adet girişi bulunmaktadır. “VelRef”, hedef hız-zaman bilgisini sağlarken, “VelFdbk” hız-zaman geri beslemesini, “Grade” ise yol eğimi bilgisini temsil etmektedir. “VelRef” sinyali ile “VelFdbk” sinyali arasındaki fark dikkate alınarak sürücünün hızlanma (AccelCmd) veya yavaşlama (DecelCmd) komutları oluşturulmaktadır [16]. Boylamsal sürücü bloğundaki referans geri bildirim verileri dikkatlice seçilmiştir; aksi takdirde hatalı sonuçlar ortaya çıkabilmektedir. Blok ayarlaması yapılırken girilen veriler, elektrikli araçlar için genellikle km/h veya m/s gibi birimlerden oluşmaktadır. Ancak farklı bir modellemede kullanıldığında birimler değişiklik gösterebilmektedir.

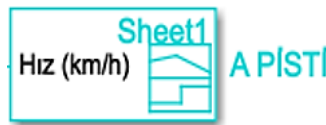


Şekil 5. Boylamsal Sürücü Bloğu

Çalışmada, üç farklı pist üzerinden modelleme çalışması gerçekleştirilmiş olup, güzergâhlar Şekil 6’da gösterilmektedir. Güzergâhlara bağlı oluşan hız-zaman bilgisini içeren grafikler Şekil 7’de gösterilen “Sinyal oluşturucu” bloğu ile elde edilmiştir. Hız-zaman grafikleri, güzergâhlarda yapılan deneme sürüşleri sonucunda elde edilmiştir. Şekil 7’de de gösterilen sinyal oluşturucu bloğu, aslında parçalı doğrusal yapıda değiştirilebilir sinyal grupları oluşturmaya yardımcı olmaktadır [17]. Ancak modelde, araç sürücüsünün kullanabileceği güzergâh ve hız bilgisi oluşturmak amacıyla kullanılmıştır. Ayrıca, “Sinyal oluşturucu” bloğu sayesinde çoklu sinyal değişimleri bir Excel tablosunda hazırlanarak sisteme entegre edilebilmektedir.

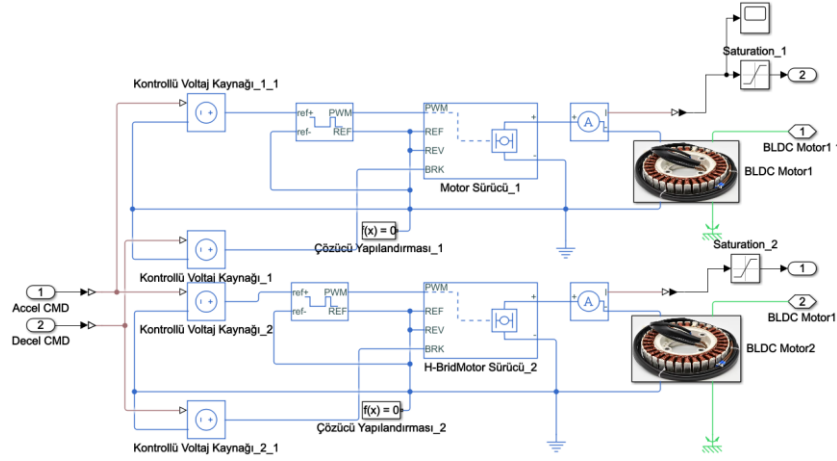


Şekil 6. Modelde Tanımlanan Pistler



Şekil 7. Sinyal Oluşturucu Bloğu

Şekil 8’de hız-zaman grafiği gösterilen A pisti, 1950 metre uzunluğunda olan ve sürekli saat yönünde dönüşlerin bulunduğu bir güzergâhtır. Revolt-EVO elektrikli aracıyla yapılan deneysel çalışmalar, A



Şekil 11. FDAM ve Motor Sürücü Devresi Bloğu İç Yapısı

Şekil 11’de gösterilen FDAM ve motor sürücü devresi bloğu iç yapısı, iki adet fırçasız doğru akım motorunun (BLDC 1 ve BLDC 2) kontrolünü gerçekleştiren iki ayrı sürücü yapısını içermektedir. Her bir motor, bağımsız olarak kontrol edilen sürücüler üzerinden beslenmektedir.

Modelde yer alan “Kontrollü Voltaj Kaynağı1” ve “Kontrollü Voltaj Kaynağı2” blokları, motor sürücülere uygulanan gerilim sinyallerini üretmektedir. Gerilim kaynakları PWM modülasyon yoluyla kontrol edilmekte ve motorların hız/tork çıktıları üzerinde etkili olmaktadır [18].

FDAM’lerin sürülmesi, dört temel sinyal ile çalışan bir sürücü bloğu aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. “Motor Sürücü” bloğu; “REF”, “REV”, “BRK” ve “PWM” olmak üzere dört farklı giriş sinyaline sahiptir. “REF” girişi, motorun dönme hızını belirleyen referans sinyalini ifade ederken; “REV” sinyali, motorun dönme yönünü tersine çevirmek amacıyla kullanılmaktadır. “BRK” girişi ise, motorun frenleme moduna geçmesini sağlayan bir komut sinyalidir. Son olarak “PWM” sinyali, motor sürücüsüne uygulanan darbe-genişlik modülasyonlu kontrol sinyali olup, motorun besleme gerilimini düzenleyerek istenen performans karakteristiğini elde etmeye yardımcı olmaktadır [19].

Modelde kullanılan “Çözücü Yapılandırması ($f(x) = 0$)” bloğu, sabit sıfır değerini üretmekte olup, hem sistem toprağına (GND) hem de motor sürücülerinin ters yön girişine (REV) bağlanmıştır. Oluşturulan yapı sayesinde motorun ters yönde çalışması yazılımsal olarak engellenmiş ve yalnızca ileri yönde çalışmasına izin verilerek, kontrol yapısı sadeleştirilmiştir.

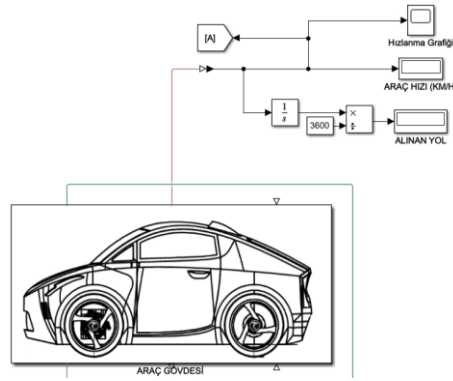
Araç fırçasız doğru akım motorlarının parametreleri “BLDC Motor 1” ve “BLDC Motor 2” bloklarına tanımlandıktan sonra motorlardan üretilen mekanik güç aks ve diferansiyel gibi güç aktarma organları olmadan doğrudan tekerleklerle iletilmiştir. Elektriksel güç bağlantısı ise batarya paketine bağlanarak sağlanmıştır.

Araç tekerleğinin yarıçapı, “Pacejka lastik modeli” blokları içerisinde yer alan geometri sekmesinde 0,28m olarak tanımlanmış ve Revolt EVO modeline uygun şekilde belirlenmiştir. Simüle edilen aracın fiziksel ölçülerini içeren “Araç Gövdesi” bloğu ise simülasyon üzerinde doğrudan etkili bir bileşen olarak yer almaktadır. Blok içerisine; aracın ağırlığı, sürtünme katsayısı, ağırlık merkezinin ön ve arka tarafa olan mesafesi, zemine olan uzaklığı ve ön yüzey alanı gibi kritik parametreler tanımlanabilmektedir.

Araç gövdesine ait değerler “Araç Gövdesi” bloğuna tanımlandıktan sonra, fırçasız doğru akım motoruna bağlı olan lityum iyon batarya paketi ve ilgili parametreler sisteme eklenmiştir. Söz konusu parametreler, aracın batarya paketine ait teknik özellikleri içermektedir. “Batarya Paketi” bloğu içerisinde; kullanılan pil türü (Lityum-İyon, Kurşun-Asit, Nikel-Metal-Hidrit, Nikel-Kadmiyum), batarya paketinin nominal gerilim ve akım değerleri ile şarj durumu tanımlanmaktadır [20]. Batarya paketlerinin hem sağlıklı hem de uzun ömürlü bir şekilde kullanılabilmesi için belirli bir gerilim seviyesinin altına düşülmemesi gerekmektedir. Modelde yer alan “Batarya Paketi” bloğu kullanılan bataryaya göre gerilim seviyesini otomatik olarak ayarlamaktadır.

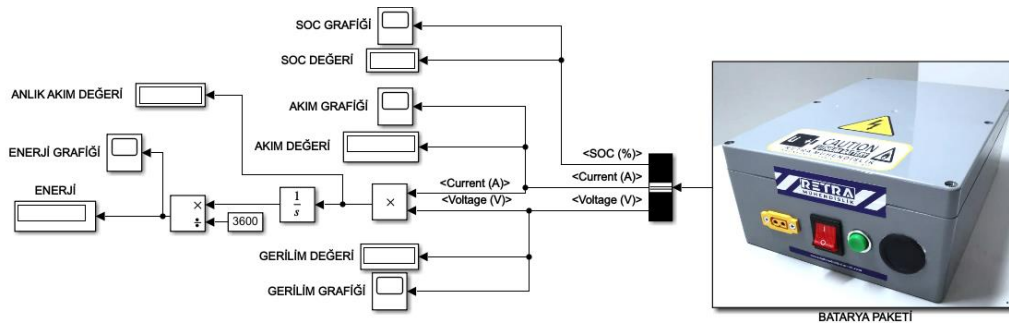
Batarya bloğunun çıkışına bataryanın, akım, gerilim ve SOC (State of Charge) durumunu izlemek amacıyla “Bus Selector” (veri yolu seçicisi) bloğu eklenmiştir. Böylece batarya paketinin çıkış verileri olan SOC, akım ve gerilim değerleri seçilerek izlenebilir hale getirilmiştir.

Modelde yer alan tüm bloklar belirlenen değerlere göre tanımlandıktan sonra, simülasyon sonuçlarını görüntülemek için blokların çıkışlarında sonuç bölümleri oluşturulmuştur. Sonuçların bölümü, Simulink programının matematiksel blokları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Araç gövdesi ve rota bloklarına bağlı olarak, modelde aracın anlık hızını hesaplayan, hızlanma grafiğini gösteren ve katedilen toplam mesafeyi belirleyen model blokları Şekil 12’de gösterilmektedir.



Şekil 12. Araç Hızını ve Alınan Yolu Hesaplayan Blok

Şekil 13’te aracın modeli simüle edilirken, anlık olarak bataryadan çekilen akım, gerilim ve SOC (State Of Charge) değerleri hesaplanarak izlenebilmektedir. Bunların yanı sıra, aracın simülasyon boyunca katettiği mesafede harcanan toplam enerji miktarı da hesaplanmaktadır.



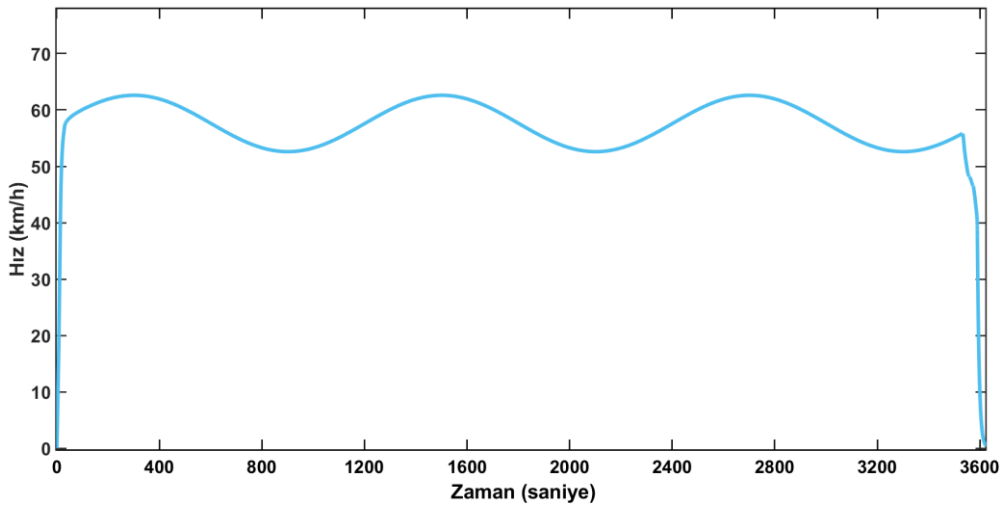
Şekil 13. Batarya Paketi Verilerini Hesaplayan Blok

Modelde yer alan bütün blokların parametreleri girilmiştir. Simülasyon sonuçları bölümünde model çıktıları değerlendirilmektedir.

3. Simülasyon Sonuçları

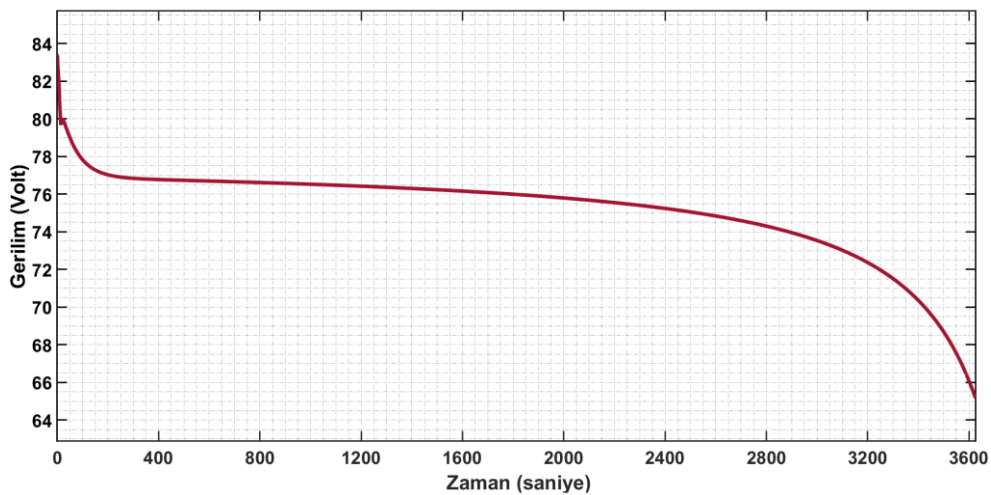
Simülasyon çalışmaları aracın değişebilecek güzergâhları üzerine gerçekleştirilmiş olup, sonuçlar güzergâhlara göre değişiklik göstermektedir.

İlk simülasyon, Revolt-EVO aracının daha önce yarıştığı A pistine ait verilere dayanarak gerçekleştirilmiştir. Yarış süresi 1 saat olacak şekilde belirlenmiş olup, zamana bağlı olarak hızlanma ve yavaşlama eğrisi oluşturulmuştur. A pistinin güzergâh yapısı dikkate alındığında, araç kalkıştan sonra tam durma noktasına gelmeden, yaklaşık 50 km/h ile 60 km/h arasında sabit bir hız aralığında ilerlemiş ve sürenin sonunda durmuştur. A pistine ait olan güzergâhın hız-zaman grafiği Şekil 7’de, verilen hız-zaman grafiğine göre yapılan simülasyon sonucunda elde edilen hızlanma eğrisi ise Şekil 14’te gösterilmiştir.



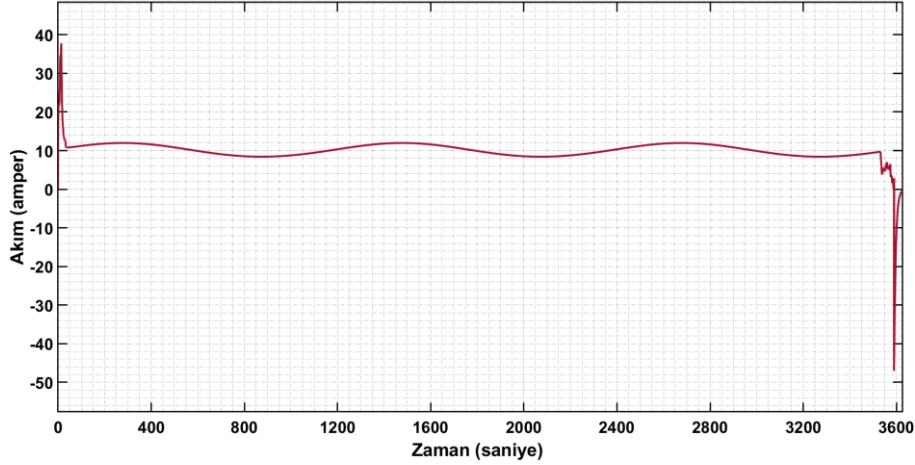
Şekil 14. A pistinin Güzergahına Ait Simülasyon Sonucu Hızlanma Grafiği

A pistine ait güzergâh üzerinde gerçekleştirilen simülasyonda araç, tanımlanan hareket senaryosuna uygun şekilde ilerleyerek toplamda 59,58 km yol katetmiştir. Aşağıda yer alan şekillerde, aracın bir saatlik sürüşü boyunca batarya gerilimi, bataryadan çekilen akım, batarya doluluk oranı (SOC) ve toplam tüketilen enerjiye ilişkin değişimler gösterilmektedir.



Şekil 15. Batarya Paketinin Anlık Gerilim Seviyesi

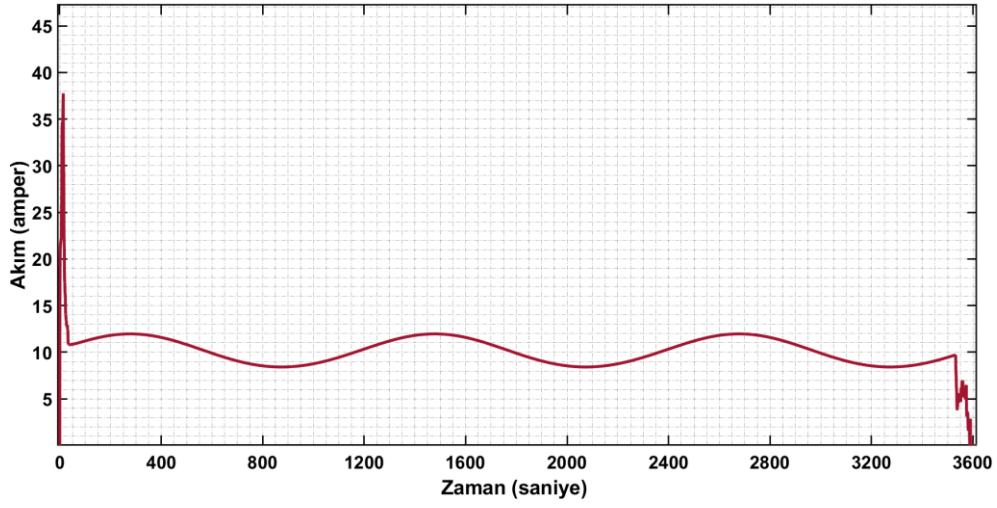
Şekil 15'te yer alan batarya paketinin anlık gerilim seviyesini gösteren grafik incelendiğinde, sürüş süresi boyunca batarya geriliminin 84 V'den 66,45 V'ye kadar gerilediği görülmektedir. Simülasyon sonucunda araç, pist üzerinde yaklaşık olarak 60 km/h hızla aynı şekilde en fazla 3,9 dakika daha ilerleyebilmektedir. Ancak, aracın ilerlemesi durumunda batarya paketi tamamen tükenmektedir. Lityum iyon tabanlı pillerin olumsuz özellikleri tam olarak burada ortaya çıkmaktadır. Lityum iyon pillerin geriliminin 2.5 V'nin altına düşmesi, kimyasal yapıları gereği ömürlerinin kısılmasına neden olmaktadır.



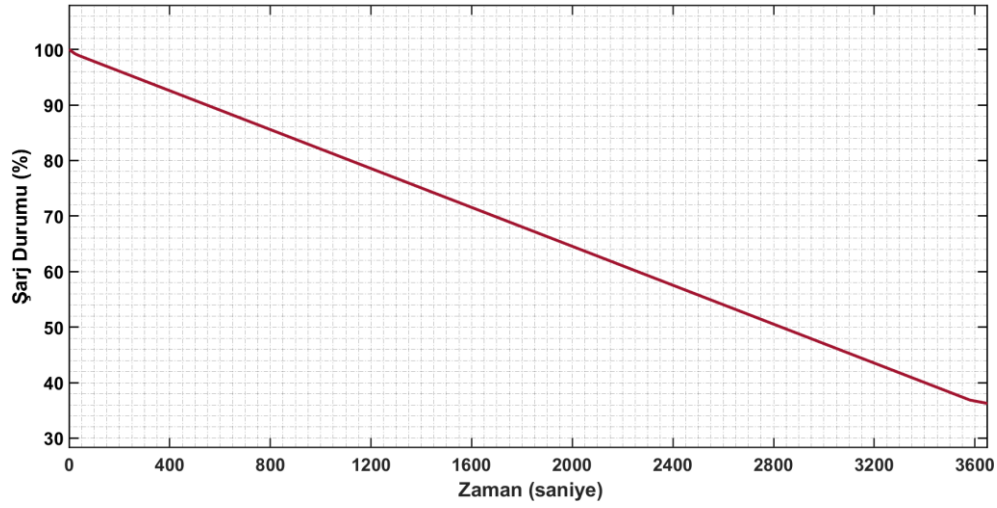
Şekil 16. Batarya Paketinden Çekilen Anlık Akım Grafiği

Şekil 16'da 1 saatlik sürüş süresi boyunca aracın bataryadan çektiği akımın zamana bağlı değişimini göstermektedir. Grafik incelendiğinde sürüş profiline uygun olarak farklı zaman aralıklarında farklı tepkiler verildiği gözlemlenmektedir. Araç başlangıçta harekete geçerken bataryadan yaklaşık 40 A seviyelerine kadar çıkan yüksek bir akım çekilmiştir. Çekilen yüksek akım, elektrikli araçlarda sıkça karşılaşılan ilk kalkış anına özgü yüksek tork ihtiyacının bir sonucudur. Başlangıçta motorun ani enerji talebi nedeniyle batarya sisteminde kısa süreli bir yüklenme meydana gelmiştir. Güzergâhın ilerleyen bölümlerinde, yaklaşık 60. saniyeden itibaren bataryadan çekilen akım değeri kararlı bir düzeye ulaşmış ve genel olarak 10–15 A aralığında seyretmektedir. 60 ile 3500 saniye arasındaki zaman dilimi, aracın sabit hızda ilerlediği veya düşük ivmelenmeye sahip sürüş koşullarında seyrettiği normal çalışma sürecini yansıtmaktadır. Akım değerlerindeki küçük genlikli salınımlar, sürüş esnasında karşılaşılan eğim değişimleri veya geçici hızlanma/frenlemelerden kaynaklanmaktadır.

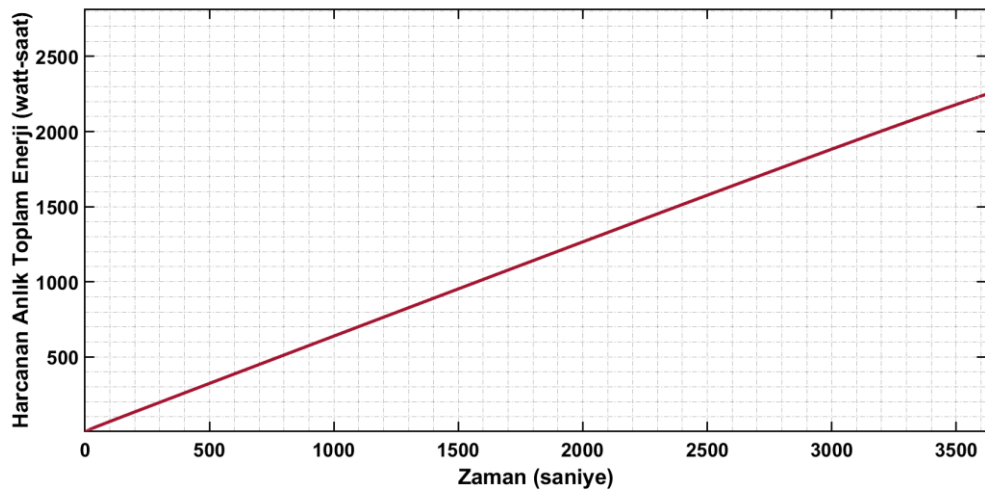
Grafikte de görüldüğü üzere, sürüşün son bölümünde akım değerinin negatif yönde değiştiği gözlemlenmektedir. Görülen negatif akım, yüzeysel olarak rejeneratif frenleme etkisi izlenimi yaratmaktadır. Ancak kullanılan motor sürücüsünün donanımsal yapısı ve kontrol algoritması göz önüne alındığında, sistemde rejeneratif enerji geri kazanımı mekanizması bulunmamaktadır. Başka bir deyişle, son bölümde gözlenen negatif akım değerleri yalnızca ölçüm sisteminin matematiksel tepkisinden veya araç yavaşlarken motorun yük karakteristiğinden kaynaklı oluşan bir yansımadır. Pratikte bataryaya enerji geri beslemesi yapılmamaktadır. Bu nedenle güzergâhın son bölümünde oluşan negatif akım değerleri yorumlanırken sistemin teknik sınırları göz önünde bulundurulmalıdır. Modelde sınırlandırma işlemi FDAM'lerin çıkışına "Saturation" bloğu eklenerek gerçekleştirilmiştir. "Saturation" bloğu sayesinde motorlardan çekilen akımın minimum seviyesi 0A olacak şekilde ayarlanmıştır. Maksimum çekilen akım ise sistemin çekeceği akımdan yüksek bir değerde ayarlanmıştır. Böylece negatif akım bileşenleri modelden çıkarılmış ve simülasyon çıktıları, deneysel koşulları daha doğru yansıtacak şekilde düzenlenmiştir. Şekil 17'de modele "Saturation" bloğu eklendikten sonra oluşan akım-zaman grafiği gösterilmektedir.



Şekil 17. Bataryadan Çekilen Anlık Akım Grafiği ("Saturation" Bloğu Eklendikten Sonra)



Şekil 18. Batarya Paketi SOC Grafiği



Şekil 19. Aracın Tükettiği Anlık Enerji Grafiği

A pistine ait güzergâh simülasyonunda araç 1 saat boyunca 2264.010 W enerji harcamıştır.

Yukarıdaki grafiklerden de görüleceği üzere, araç ilk kalkışta normal seviyeden daha fazla akım çekmektedir ve tam bu noktada bataryada ani bir gerilim düşüşü meydana gelmektedir. Sık sık durup kalkış yapmak elektrikli araçlar için en büyük olumsuzluklardan biridir. Günlük kullanımda araçlar, ani hızlanmalar ve yavaşlamaların yanı sıra sık sık durup tekrar hareket etmek zorunda kalabiliyor. Bahsedilen senaryoyu simüle edebilmek için aynı araç modeli kullanılarak B ve C pistlerinde oluşturulan güzergâhların simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, güzergâhlara ait sonuçlar karşılaştırılarak analiz edilmiştir.

İkinci simülasyon, B pistinin güzergâhında Revolt-EVO aracının, şehir içi kullanımda karşılaşılabilecek kısa süreli günlük sürüş koşullarındaki performansını değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. B pistinde hem yavaşlama hem de durma senaryoları yer almaktadır. Simülasyonun süresi 3 dakika olarak belirlenmiş ve hız, 50 km/h'yi geçmeyecek şekilde ayarlanmıştır. B pistine ait güzergâh üzerinde gerçekleştirilen simülasyon sonucunda araç senaryo kapsamında öngörülen şekilde hareket ederek, 3 dakika boyunca değişken hızlarda ilerleyerek 1.384 km mesafe katetmiştir. 3 dakikalık süre zarfında batarya paketi 84V seviyesinden 77,14 V seviyelerine gerilemiştir.

Simülasyon sonucuna göre A pistinde sabit hızda bir saat boyunca 17.58 V gerilim düşümü meydana gelmişken, B pistinde değişken hızlarda yalnızca 3 dakikada 6.86V gerilim düşümü meydana gelmiştir. Simülasyondan elde edilen sonuçlar doğrultusunda elektrikli araçların çok sık hız değişimlerinde yüksek enerji harcadığı görülmektedir. B pistine ait güzergâh simülasyonunda araç 3 dakikada 135.202 W enerji harcamıştır.

C pistine ait olan güzergâhta (üçüncü simülasyon) ise, A ve B pistlerindeki senaryoların birleşimiyle 13 dakikalık bir sürüş simülasyonu gerçekleştirilmiştir. İki pistin senaryoları birleştirilerek ani hızlanma ve yavaşlamaların daha sık tekrar ettiği, daha zorlu bir sürüş deneyimi sunan bir güzergâh tasarlanmıştır. C pistinin güzergâhında araç bu kez 13 dakika boyunca değişken hızlarda ilerleyerek 5.598 km mesafe katetmiştir. 13 dakikalık süre zarfında batarya paketi 84 V seviyesinden 71,52 V seviyelerine gerilemiştir. C pisti güzergâhı ile A pisti güzergâhının simülasyon sonuçları karşılaştırıldığında ani hızlanmaların ne kadar etkili olduğu gözükmemektedir. Araç, C pistine ait güzergâh simülasyonunda değişken hızlarla hareket ederek 13 dakikada toplam 556.418 W enerji harcamıştır. A pistinde ise yaklaşık olarak sabit hızda ilerleyerek bir saat içinde 59.58 km yol almış ve 2264.010 W enerji tüketmiştir. Simülasyonların sonuçları değerlendirildiğinde, aracın batarya ve motor sisteminin sabit hızda daha verimli çalıştığı gözlemlenmiştir.

Yapılan bütün test senaryoları pratikte daha önceden elde edilmiş olan veriler ile karşılaştırılarak yapılmıştır. Bunun sonucunda ortaya çıkan deneysel sonuçlar ile simülasyon sonuçları ve % hata değerleri Tablo 1’de verilmektedir.

Tablo 1. Deneysel Sonuçlar ve Simülasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması

Parametre	A Pisti Güzergâhı			B Pisti Güzergâhı			C Pisti Güzergâhı		
	Deneysel Sonuçlar	Simülasyon Sonuçları	% Hata	Deneysel Sonuçlar	Simülasyon Sonuçları	% Hata	Deneysel Sonuçlar	Simülasyon Sonuçları	% Hata
Katedilen Mesafe (km)	58.50	59.58	1.84	1.350	1.384	2.51	5.460	5.598	2.52
Harcanan Enerji (W)	2248	2264.010	0.71	131	135.202	3.20	538	556.418	3.42
Ort. Hız (km/s)	58.4	59.32	1.57	27.5	27.2	1.09	26.8	27.3	1.86

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi SUBÜ TETRA kulübünün TÜBİTAK Uluslararası Efficiency Challenge 2024 yarışları için tasarladığı Revolt-EVO adlı aracın elektrik motoru ve batarya paketi verileri kullanılmıştır.

Hafif elektrikli araçların farklı yol koşullarındaki enerji tüketimi analiz edilerek batarya ve motor performansları incelenmiş, elde edilen deneysel veriler simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Gerçekleştirilen analizler sonucunda oluşturulan Simulink modelinin sonuçlarının, deneysel verilerle büyük ölçüde uyumlu olduğu görülmüştür. Farklı pistler üzerinde gerçekleştirilen güzergâhlarda, sürüş profilinin enerji tüketimi üzerinde önemli etkilere sahip olduğu tespit edilmiştir. Özellikle ani hız değişimlerinin batarya verimi üzerinde belirleyici olduğu belirlenmiştir. Aynı zamanda, yapılan tüm simülasyonlarda aracın elektrik motorunun her hız değerinde yeterli olduğu ve gücünün istenilen performansı sağlayabildiği açıkça görülmüştür.

Çalışma kapsamında, elektrikli araç simülasyon testlerinde performans ve enerji tüketimini belirlemek amacıyla bir araç modeli oluşturulmuş, bu modelin içerisindeki donanımın kontrolü sağlanarak üç farklı rota için özel olarak tasarlanmış sürüş senaryoları başarıyla gerçekleştirilmiştir. Elde edilen simülasyon sonuçlarının deneysel verilerle karşılaştırılması sonucunda, simülasyon modelinin yüksek doğrulukta sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Model sonuçlarında, katedilen mesafe, harcanan enerji ve ortalama hız gibi parametrelerde simülasyon ile deneysel veriler arasındaki başarı oranı %96 ile %99 arasında değişmektedir. Model sonuçlarına göre A pisti güzergâhında; katedilen mesafe %98.16, harcanan enerji %99.29, ortalama hız ise %98.43 doğrulukla tahmin edilmiştir. Benzer şekilde, B pisti güzergâhında; katedilen mesafe %97.49, harcanan enerji %96.80 ve ortalama hız %98.91 oranlarında başarı sağlanmıştır. C pisti güzergâhında ise; katedilen mesafe %97.48, harcanan enerji %96.58 ve ortalama hız %98.14 doğrulukla elde edilmiştir. İncelemeler sonucunda, modeldeki en büyük hata payının, hız ve ivme değişkenliğinin yüksek olduğu C pistinde olduğu tespit edilmiştir. Simulink'te kullanılan sabit zaman adımlı çözümleyici, kısa süreli ve ani dur-kalk olaylarını yeterli çözünürlükte temsil edememiştir. Özellikle C pistinde yaşanan yüksek frekanslı dinamik değişimlerin etkisi model tarafından bastırılmış ve deneysel ölçümlerle model tahminleri arasındaki fark artmıştır. Genel değerlendirme sonucunda, modelin yüksek oranda doğruluğa sahip simülasyonlar sunduğunu, ayrıca elektrikli aracın performansını doğru bir şekilde yansıttığını ortaya koymaktadır.

5. BEYANNAME

1.1 Teşekkür

Yazarlar, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi kapsamında çalışmalarına devam eden SUBÜ-TETRA elektrikli araç kulübüne, araştırmacılarına ve öğrencilerine desteklerinden ve katkılarından dolayı teşekkür eder.

1.2 Rakip Çıkarlar

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

1.3 Yazarların Katkıları

Mustafa ESEN: Araştırma ve bilimsel çalışma için temel hipotezin veya fikrin oluşturulması, deneysel süreçlerin yürütülmesi, deneylerden elde edilen verilerin analiz edilmesi, bulguların mantıklı bir çerçevede değerlendirilmesi ve sunulması konularında sorumluluk üstlenmek, araştırma sürecinde ilgili

literatürün taranması, yazının tamamının veya ana bölümlerinin oluşturulması, makalenin biçimsel ve içeriksel düzenlemesinin yapılması ve yayımlanmak üzere gönderilmesi süreçlerine katkıda bulunmak.

Barış BORU: Sonuçlara ulaşmak gerekli materyallerin planlanması, verilerin mantıklı bir şekilde düzenlenmesi, makale teslim edilmeden önce yalnızca dilbilgisi ve yazım açısından değil aynı zamanda akademik içerik yönünden de kapsamlı bir gözden geçirme ve revizyon süreci yürütmek.

KAYNAKÇA

- [1] C. C. CHAN, “An Overview of Electric Vehicle Technology”, *IEEE*, 0018-9219/1993, <https://doi.org/10.1109/5.237530>.
- [2] Kocagöz, E., ve İgde, Ç. S., (2022), “Elektrikli araç satın alma niyetini hangi faktörler etkiler? Bir tüketici araştırması”, *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 19(özel sayı), 104-120. <https://doi.org/10.33437/ksusbder.1133892>.
- [3] Efendioğlu, İ., H., “Elektrikli Araç Satın Alma Niyetini Etkileyen Faktörler”, *İstanbul Gelişim Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 11 (1), Nisan 2024, ss. 106-122, <https://dx.doi.org/10.17336/igusbd.1124491>.
- [4] Gür, N. ve Furuncu, Y., (2019), “Küresel Otomobil Sektörünün Değişimi ve Yerli Otomobil Projesinin Geleceği”, *SETA Raporu*, No. 127, <https://doi.org/10.47140/kusbder.714905>
- [5] IEA (2019), Global EV Outlook 2019, <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2019>, (07.01.2025).
- [6] Altunsoy, Ü., (2021), “Kargo Taşımacılık Sisteminde Elektrikli Araçlar Kullanımı Üzerine İnceleme”, *International Anatolia Academic Online Journal / Fen Bilimleri Dergisi*, 7(2).
- [7] Clairotte, M., Zardini, A. A., & Martini, G., (2016), “Phase 1 of the Environmental Effect Study on the Euro 5 step of L-category vehicles- Stocktaking and data mining (EUR 27994 EN), European Commission”, *Joint Research Centre*, <http://dx.doi.org/10.2790/428149>.
- [8] Altay H. Ve Livatyalı H., “Elektrikli Araçlar İçin Bir Şasi Dinamometresi Tasarımı”, *MATİM*, 2022;20(1):17-28.
- [9] Durmuş, F.S. ve Kaymaz, H., “Elektrikli Araç Şarj Yöntemleri”, *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi*, 2020.
- [10] Ban, M., Zhang, Z., Li, C., Li, Z., ve Liu, Y., "Optimal scheduling for electric vehicle battery swapping-charging system based on nanogrids", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.106967>.
- [11] Tören, M., ve Mollahasanoğlu, H., “Elektrikli ve Hibrit Araçlardaki Elektrik Motorlarının İçten Yanmalı Motorlarda Oluşan [CO] _2 Emisyonunda Meydana Getireceği Değişimin Tahmini ve Verimliliğe Etkisi: Türkiye Örnekleme”, *ECJSE*, vol. 9, no. 3, pp. 1082–1097, 2022, doi: <https://10.31202/ecjse.1107454>.
- [12] Khayyam, H., Bab-Hadiashar, A., “Adaptive intelligent energy management system of plugin hybrid electric vehicle” *Energy*, vol. 69, pp. 319-335, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.03.020>.
- [13] Zeng, X., ve Wang, J., “A Parallel Hybrid Electric Vehicle Energy Management Strategy Using Stochastic Model Predictive Control with Road Grade Preview”, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 23, pp. 2416-2423, 2015, <https://doi.org/10.1109/tcst.2015.2409235>.
- [14] Ahmad Zaid Syakir Mohd Yazsid, Kumar, K., ve Zulkifli, S., (2024). Investigation of range extension of personal electric mobility by current-limiting mechanism. “ICREEM 2022” doi: https://doi.org/10.1007/978-981-99-5946-4_14

- [15] Özçağlayan, Y., “MATLAB Simulink'te Bir P2 Hibrit Elektrikli Araç Modeli Oluşturma ve Regeneratif Fren Sistemi Optimizasyonu”, *15th National Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, 79-8-3315-1803-5/24/, 2024, <https://doi.org/10.1109/ELECO64362.2024.10847079>.
- [16] MathWorks, (2025), Longitudinal Driver, MATLAB & Simulink, Inc, <https://ww2.mathworks.cn/help/autoblks/ref/longitudinaldriver.html>, (10.04.2025).
- [17] MathWorks, (2025), Signal Builder, MATLAB & Simulink, Inc, https://www.mathworks.com/help/simulink/ref_obsolete_blocks/signalbuilder.html, (10.04.2025).
- [18] MathWorks, (2025), Controlled Voltage Source, MATLAB & Simulink, Inc, <https://www.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/controlledvoltage.html>, (10.04.2025).
- [19] MathWorks, (2025), H-Bridge, MATLAB & Simulink, Inc, <https://www.mathworks.com/help/sps/ref/hbridge.html>, (10.04.2025).
- [20] MathWorks, (2025), Battery, MATLAB & Simulink, Inc, <https://www.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/battery.html>, (10.04.2025).



© 2020 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)