



HİBRİT ELEKTRİKLİ TAŞITLARDA BATARYA PERFORMANSLARININ SİMÜLASYONU*

Şule KUŞDOĞAN^{1**}, Büşra ÖZEN²

¹ Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, Kocaeli
ORCID No : <http://orcid.org/0000-0003-0586-4142>

² Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Bölümü, Kocaeli
ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-4100-5487>

Anahtar Kelimeler

Öz

Batarya, enerji depolama, gelişmiş taşıt simülasyonu, hibrit elektrikli taşıt

Dünyanın enerji ihtiyacı son yıllarda hızlı bir şekilde artmaktadır. Gerekli olan enerji talebinin zamanında, temiz, ekonomik ve kaliteli bir şekilde sağlanması lazımdır. 1980'li yıllardan günümüze uzanan zaman içerisinde elektrikli ve hibrit taşıtlar ile yakıt hücreleri ve hidrojen kullanımı oldukça artmıştır. Elektrikli ve hibrit taşıtlar, ulaşımda alternatif bir çözümdür. Bu çalışmada hibrit elektrikli taşıtların depolama sistemlerinde kullanılan çeşitli bataryaların taşıta uygunluğu ve değerlendirilmesi "Gelişmiş Taşıt Simülasyonu" ile gerçekleştirilmiştir. Simülasyonda farklı türde bataryalar için elde edilen veriler seri ve paralel hibrit taşıtlar için karşılaştırılmıştır.

* Bu makale, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Bölümünde tamamlanan "ADVISOR Programıyla Hibrit Elektrikli Taşıtlarda Batarya Analizi" başlıklı Yüksek Lisans tezinden üretilmiştir.

** kusdogan@kocaeli.edu.tr

doi : 10.46399/muhendismakina.1726330

SIMULATION OF BATTERY PERFORMANCES IN HYBRID ELECTRIC VEHICLE

Keywords

Battery, energy storage, advanced vehicle simulator (ADVISOR), hybrid electric vehicle

Abstract

Our worlds energy needs have been increasing rapidly in recently years. The required energy demand must be met in a timely, clean, economical and high-quility manner. Since the 1980s, the use of electric and hybrid vehicles, fuel cell and hydrogen has increased significantly. Electric and hybrid vehicles are an alternative solution for transportation. In this study, transport and evaluation of various batteries used in the storage systems of these hybrid electric vehicles were carried out with "Advanced Vehicle Simulation". In the simulation, the data obtained for different types of data are compared for series and parallel hybrid vehicles.

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi : 26.04.2024

Kabul Tarihi : 21.01.2025

Research Article

Submission Date : 26.04.2024

Accepted Date : 21.01.2025

Extended Abstract

Introduction/ Background

Today, the most important need of developed and developing countries is energy. The required energy demand must be met in a timely, clean, economical and high-quality manner. In our age, environmental pollution and the depletion of oil-dependent fuels require the search for different and new solutions for the vehicles of tomorrow. The fact that electrical energy is a constantly available form of energy has made it a suitable solution for vehicles. Electric and hybrid vehicles are an alternative solution for urban and extra-urban transportation. Energy storage systems have been developing rapidly in recent years. Storage systems provide usefulness to the system by increasing efficiency, reliability and control. Hybrid vehicles are vehicles that store their energy directly as electrical energy, can move freely without being bound to a certain route, and allow individual use. Batteries used as energy storage technology in hybrid vehicles are one of the most important elements. The batteries to be used are required to meet criteria such as efficiency, high power and energy density, long service life and economy. In this study, it was taken into consideration that electric vehicles and hybrid vehicles have an important place among the research topics in many countries today, when environmental pollution issues have gained importance, and the pollution emissions, speeds, accelerations and fuel performances of hybrid electric vehicles were evaluated with the Advanced Vehicle Simulator.

Objectives/Research Purpose

Air pollution on a global scale, both in our country and around the world, reaches levels that endanger human health. One of the biggest reasons for this is the exhaust gases and harmful particles produced by motor vehicles. Research indicates that achieving higher efficiency from petroleum-derived fuels and internal combustion engines is unlikely, leading to the exploration of alternative fuel options. Electric vehicles make a great contribution to protecting the environment and saving energy. Thus, hybrid electric vehicles reduce noise and air pollution in urban areas. Additionally, these vehicles will reduce countries dependence on oil and oil and contribute to the trade balance. The battery in a hybrid electric vehicle must be large enough to meet the required energy storage capacity, acceleration and maximum power. In this paper, battery systems of hybrid electric vehicles were simulated with Advanced Vehicle Simulator (ADVISOR) and results were evaluated. The aim of this study is to show comparatively the charge status graphs, fuel consumption and gasoline equivalents, highest acceleration and speed tests and emission values of five different batteries used in selected series and parallel hybrid electric vehicles by modeling the energy storage systems which are one of the most important parameters of hybrid electric vehicle components, in the ADVISOR program.

Methods/Methodology

U.S. Department of Energy's (DOE's) supported the Advanced Vehicle Simulator-ADVISOR program to contribute to the computerized development of vehicles and their subsystems. This simulation attempts to evaluate the research, development and applications of existing advanced technologies and provide different models for future research and

developments. Advanced Vehicle Simulator-ADVISOR vehicle simulation was developed and supported by National Renewable Energy Laboratory staff. The model was MATLAB/Simulink programming. Mainly used for system analysis optimization and adjusting set goals analysis optimization and adjusting set goals. This paper discusses the simulation of hybrid electric vehicles with different kinds of rechargeable batteries. From a transportation aspect, hybrid electric vehicles naturally fit into the intelligent transportation system development that aims to improve road utilization, transport efficiency, economy and traffic safety.

Results/Findings

Advanced batteries with high specific energy, high specific power, durability and low cost must be developed to provide hybrid electric vehicles with the range, acceleration and low life-cycle costs necessary to penetrate commercial markets. The battery, which is the energy storage unit in a hybrid electric vehicle, must be large enough to meet the acceleration and maximum power required for energy storage for the vehicle. In this study, the performances of different battery types in hybrid electric are discussed in MATLAB/Simulink program. The designed programs were analyzed for series and parallel hybrid electric vehicles. According to the simulation results, it has been observed that different battery types in these vehicles greatly affect the vehicle performance. These simulations were evaluated in the Highway Fuel Economy Test Cycle. Hybrid electric vehicle is much more efficient than that of external combustion engine vehicles.

Discussion and Conclusions

Interest in hybrid electric vehicles is constantly increasing in the world. Secondary batteries have been proved to be one of the best energy storage system in the future. Choices of systems for research and development must include an understanding of both technical potential and the development risk in order to justify their selection. Various algorithms to be created for these vehicles are analyzed with the ADVISOR program and various criteria are evaluated. This study encourages the use of the ADVISOR program for vehicle design analysis. In addition, the impact of the models to be designed on the vehicles is evaluated in this way. Hybrid electric vehicles are a transportation concept among several which could emerge in the future.

1. Giriş

Küresel iklim sıcaklığındaki artış, atmosferik emisyonlar ve konvansiyonel yakıtların tükenmeye başlaması, fosil yakıtlara bağımlı taşıtlar için büyük sorunlara neden olmaktadır (Ahmad, Khalid ve Panigrahi, 2021). Elektrikli taşıtlar, dünya-daki enerji tasarrufu ve çevre kirliliği sorunlarına çözüm olarak sunulabilmektedir (Guo, Fu, Luo ve Yang, 2022). Bunlara alternatif olarak batarya güçlü taşıtlar, hibrit elektrikli taşıtlar ve yakıt pilli temelli elektrikli taşıtlar hava kirliliğini ve yakıt tüketimi sorunlarını azaltabilir (KoteswaraRao, Srinivasulu, Rahul ve Velisala, 2024). Elektrikli taşıtlar, teknolojik gelişmeler ve sürdürülebilirlik açısından önemli bir potansiyel taşımaktadır ve bu alandaki araştırmalar hem endüstri hem de akademi için birçok fırsat sunar (Sanguesa, Torres-Sanz, Garrido, Martinez ve Marquez-Barja, 2021). Yakıt ekonomisi, sürüş konforu ve emisyonların azaltılması, elektrikli ve hibrit taşıtlara olan ilginin artmasında temel etkenler olarak öne çıkmaktadır (Ehsani, Singh, Bansal ve Mehrjardi, 2021). Son yıllarda dünyada elektrikli ve hibrit elektrikli taşıtların pazar payı, gelişmiş teknoloji, devlet destekleri ve çevresel etkiler gibi faktörlerden dolayı istikrarlı bir şekilde artmıştır (Ali, Calasan, Gandoman, Jurado ve Abdel Aleem, 2024). Enerji depolama teknolojileri, elektrikli taşıtların geleceğini şekillendirmektedir (Waseem, Lakshmi, Ahmad ve Suhaib, 2025). Hibrit elektrikli taşıtlarda kullanılan enerji depolama sistemlerinden olan bataryalar taşıtların hızlanma, ivmelenme ve yakıt tüketimi gibi pek çok faktörünü doğrudan etkilemektedir. Hibrit elektrikli taşıtlarda kullanılan pek çok batarya türleri bulunmaktadır (Bakkari ve Mounir, 2024). Batarya teknolojilerinin geliştirilmesi ve optimizasyonu, elektrikli taşıtların enerji verimliliği ve çevresel faydalarını artırmak açısından kritik bir role sahiptir (Jiang, Yuan, Hu, Xie, Zhang, Li, Hu, Wang ve Wang, 2024). Bununla birlikte batarya şarj teknolojisinin elektrikli araçlar için kritik bir öneme sahip olduğu vurgulanmaktadır. Bu nedenle, batarya performansının iyileştirilmesi ve şarj altyapısının geliştirilmesi, elektrikli araçların yaygınlaşması için önemli adımlar olarak görülmektedir (Bilgiç E, Bilgiç H ve Kantaroğlu, 2024).

Tablo 1. Taşıtlarda Kullanılan Farklı Bataryaların Performansı

Parametreler	Pb	NiCd	NaS	Li-ion	NiMH
Güç yoğunluğu(W/kg)	75-300	15-300	150-230	150-315	250-1000
Enerji yoğunluğu (Wh/kg)	30-50	5-75	150-240	75-200	50-70
Maliyet (\$/kWh)	120-150	300-350	250-500	150-1300	150-200
Verim	65-80	75-85	75-90	70-85	50-80
Çevrim ömrü	2000-4500	2000-3000	2500-4500	1500-4500	500-3000
Yaşam süresi (Yıl)	3-15	5-10	10-15	5-15	3-5

Tablo 1’de farklı bataryalar için performans değerleri verilmiştir (Ahmad, Khalid ve Panigrahi, 2021). Tablo 1’den anlaşılabileceği gibi kurşun asit bataryalar düşük maliyetli ve geri dönüştürülebilir olmalarıyla öne çıkarken, düşük enerjili ve kısa ömürlüdürler. Nikel kadmiyum bataryalar yüksek enerji yoğunluğu ve çevrim sayısı sunar fakat kadmiyumun toksik olması çevresel açıdan dezavantaj yaratmaktadır. Sodyum sülfür bataryalar yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir ve uzun ömürlüdür. Lityum-iyon bataryalar yüksek enerji ve güç yoğunluğu ile uzun ömür sunar, bu nedenle elektrikli araçlar için en popüler seçeneklerden biridir. Nikel metal hidrür bataryalar yüksek güç yoğunluğu ve güvenlik sunar ancak enerji yoğunlukları düşüktür. Advanced Vehicle Simulator (ADVISOR)-Gelişmiş Taşıt Simülasyonu, ilk olarak Amerika Enerji Bakanlığı’nın Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı’nda Kasım ayında 1994 yılında geliştirilmiştir (Markel, Brooker, Hendricks, Johnson, Kelly, Kramer, O’Keefe, Sprik ve Wipke, 2002). Bu program taşıt sistemi analizlerini ve taşıt optimizasyonlarını değerlendirmek için kullanılmaktadır.

Hibrit taşıtların analizleri ile literatürde az sayıda yayın mevcuttur. Türkmen, Solmaz ve Çelik otomobillerde yakıt pillerinde iki farklı güç için Gelişmiş Taşıt Simülasyonu ile değerlendirme yapmışlardır (2017). Hu, Zhang, Tang ve Lin, hibrit elektrikli taşıtlarda yakıt tüketimi ve emisyon oranlarını Gelişmiş Taşıt Simülasyonu ile değerlendirmişlerdir (2020). Kunt 75 kW AC asenkron motor ve nikel metal hidrür bataryaya sahip bir elektrikli taşıtı Gelişmiş Taşıt Simülasyonu ile farklı yol koşullarında değerlendirilmiştir (2020). Kuşdoğan ve Özen, farklı bataryalar için şehir içi sürüş çevriminde hibrit elektrikli taşıtların performansı değerlendirmiştir (2021). Silva ve diğerleri, taşıt konfigürasyonunu ADVISOR ve farklı optimizasyon yaklaşımları ile inceleyerek, yakıt tüketimi ve emisyon değerlerinin farklı sürüş çevrimleri için analiz etmişlerdir (2021). Ahmadzadeh ve diğerleri, yüksek hızlarda sürüşü simüle etmek için EPA (Environmental Protection Agency - Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı)’nın standart profillerinden HWFET (highway fuel economy test) sürüş çevrimi kullanılmıştır. Bu sürüş döngüsü hız, ivmelenme gibi çeşitli faktörleri kapsar ve taşıtların performansını ve verimliliğini değerlendirmek için kullanılır. HWFET döngüsü normal otoyol sürüş koşullarını simüle etmektedir (2025).

KoteswaraRao, Srinivasulu, Rahul ve Velisala, NEDC-New European Driving Cycle sürüşünde Toyota-Mirai için yakıt pili ve batarya kombinasyonundan oluşan bir taşıtı Gelişmiş Taşıt Simülasyonu ile değerlendirmiş ve yakıt pili batarya hibritleştirme oranı hakkında öneri sunmuşlardır (2024). Naseri ve Barbu, lityum iyon ve nikel mangan kobalt olarak seçilen iki batarya türü için iki farklı sürüş çevriminde, batarya güç gereksinimlerini ADVISOR simülasyonu ile optimize etmişlerdir (2022). Sahwal, Sengupta ve Dinh, hibrit elektrikli taşıtlar için yakıt pili ve yakıt pili-batarya hibrit şeklini kullanarak şehirlerarası sürüş çevriminde

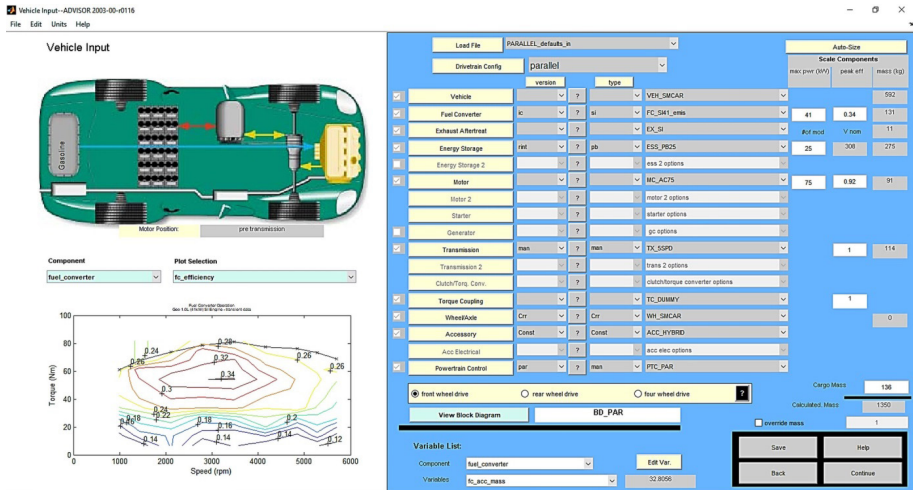
eşdeğer yakıt tüketimini ve gelişmiş yakıt tüketimi stratejisini karşılaştırmışlardır (2024).

Bu çalışmada ise, hibrit elektrikli taşıtlarda enerji depolama sistemleri içinde yer alan bataryalar, Advanced Vehicle Simulator (ADVISOR) programı kullanılarak modellenmiş ve yapılan modeller karşılaştırılarak analiz edilmiştir. Çalışmanın temel katkısı, hibrit elektrikli taşıtlarda bu algoritmaların bataryalarda zamana bağlı şarjlarının değerlendirilmesi, hızlanma, yakıt tüketimi ve ivme performanslarının ve emisyonlarının karşılaştırılmasıdır. Enerji depolama sistemlerinden hangisinin taşıt sisteminde yer alacağına karar verilirken önce sisteme uyumluluğunun belirlenmesi, maliyet ve güvenlik bakımından çok önemlidir. Çalışmada farklı batarya modellerinin elde edilen sonuçları farklı faktörler için değerlendirilmiştir.

2. Materyal ve Metot

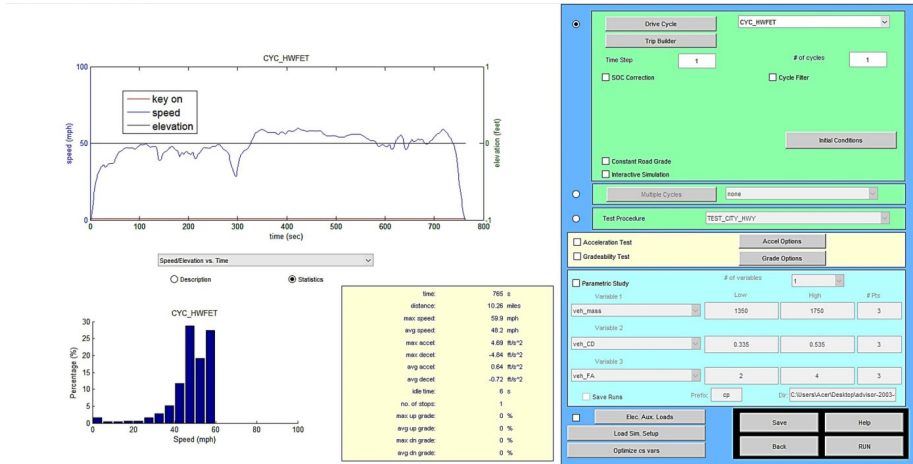
2.1. ADVISOR Yazılımı

Amerika Enerji Bakanlığı, taşıt alt sistemlerinin gelişimi için, var olan gelişmiş teknolojilerin uygulamalarını değerlendirmek ve gelecek vaat eden araştırmalar için programlar geliştirmeye destek verdi. Taşıt simülasyon modeli Advanced Vehicle Simulator (ADVISOR), National Renewable Energy Laboratory personeli tarafından geliştirilmiş ve desteklenmiştir. ADVISOR programı sistem analizleri, optimizasyon ve ayarlama amacıyla kullanılmaktadır. Wipke ve Markel'e göre, model MATLAB/Simulink programlamayı kullanır ve kullanımı kolay bir grafik ara yüze sahiptir (2002). Şekil 1'de ADVISOR programının giriş görünümü verilmiştir.



Şekil 1. ADVISOR Giriş Görünümü

Şekil 1'de resmin sol tarafında, benzin deposu, motor ve şanzıman sistemi gibi çeşitli bileşenlerin yerleşimini gösteren bir araç diyagramı bulunmaktadır. Araç diyagramının altında, bileşen ve grafik türünü seçmek için açılır menüler vardır. Resmin sol alt köşesinde olan grafik yakıt dönüştürücünün verimliliğini göstermektedir. Resmin sağ tarafında, araç simülasyonunu kurmak için çeşitli seçeneklerin bulunduğu bir konfigürasyon paneli bulunmaktadır. Bu panelde, tahrik sistemi konfigürasyonu (paralel, seri vb.), araç türü, yakıt dönüştürücü türü, enerji depolama, motor, şanzıman ve diğer bileşenler seçilebilmektedir.



Şekil 2. ADVISOR Test Parametreleri Ekranı

Şekil 2, ADVISOR (Advanced Vehicle Simulator) yazılımında kullanılan bir test parametreleri ekranını göstermektedir. Ekran, taşıt simülasyonu için gerekli giriş parametrelerini ayarlama ve simülasyon sonuçlarını gözlemlene arayüzüdür. Şekil 2'de sol üstte yer alan grafik, simülasyonun uygulandığı sürüş çevriminde (CYC_HWFET) aracın hız ve yükseklik profilini detaylı bir şekilde göstermektedir. Sol alttaki hız dağılım grafiği sürüş çevrimi boyunca aracın hangi hızlarda ne kadar zaman geçirdiğini görselleştirir. Sürüş çevrimi, sağ üst bölümde yer alan simülasyon parametre ayarlarından seçilerek belirlenir. Sabit yol eğim ayarları ve diğer seçenekler de yine bu ekrandaki seçeneklerden seçilir. Görseldeki tablo ise simülasyonun sonunda hesaplanan performans verilerini özetler.

Seri ve paralel hibrit elektrikli taşıtlara ait ortak parametreler ve özellikler Tablo 2'de belirtilmiştir.

Tablo 2. Seçilen Hibrit Elektrikli Taşıtlarda Kullanılan Parametreler (Özen, 2021)

Veri Dosyası	Matlab kodu	Değişken	Değer	Birim	Açıklama
Taşıt	VEH_SMCAR.m	veh_CD	0,335		Hava direnç katsayısı
		veh_FA	2		Taşıt kesit alanı
		veh_1st_rrc	0,009	m	Birincil yuvarlanma direnç katsayısı
		veh_cg_height	0,5	m	Taşıt ağırlık merkezinin yerden yüksekliği
		veh_wheel-base	2,6	kg	Akslar arası mesafe
		veh_glider_mass	592	kg	Taşıt ağırlığı (aktarma organları dâhil değil)
		veh_car-go_mass	136	kg	Yolcuların ağırlığı
İçten Yanmalı Motor	F C _ S I 4 1 _ emis.m (Geo 1.0L (41kW) SI Engine)	fc_description	1	l	İçten yanmalı motor hacmi
		fc_fuel_den	749	g/l	Yakıt yoğunluğu
		fc_fuel_lhv	42600	J/g	Yakıt alt ısı değer
		fc_tstat	96	C	Termostat açılma sıcaklığı
		fc_cp	500	J/kgK	Motor malzemesi özgül ısı
Egzoz Sistemi	EX_SI.m	ex_cat_mon_cp	1070	J/kgK	Seramik özgül ısı
		ex_cat_int_cp	460	J/kgK	İç kabuk özgül ısı
		ex_cat_pipe_cp	460	J/kgK	Giriş-çıkış borusu özgül ısı
		ex_cat_ext_cp	460	J/kgK	Dış kabuk özgül ısı
		ex_manif_cp	460	J/kgK	Manifold özgül ısı
		ex_gas_cp	1089	J/kgK	Egzoz gazı özgül ısı
Ek donanımlar	ACC_HYBRID.m	acc_elec_pwr	700	W	Ek donanımlara harcanan güç
Tekerlek-Aks	WH_SMCAR.m	wh_radius	0,282	m	Tekerlek yarıçapı
Elektrik Motoru	MC_AC75.m	max pwr	75	kW	Maksimum güç

2.2. Kullanılan Yöntem ve Metot

Bu çalışmanın amacı, seri ve paralel hibrit elektrikli taşıtta bataryaların performansını değerlendirmektir. Burada kullanılan ADVISOR kullanıcı dostu grafik arayüz içermektedir. Yazılım üç farklı ana ekrandan oluşmaktadır. Çalışma sırasında öncelikli olarak taşıt bileşenleri belirlendikten sonra taşıtın kullanılacağı yol şehirler arası otoban sürüş çevrimi olarak seçilmiş ve şekil 2’de gösterilmiştir. Analiz sonuçları ekranı şekil 3’de gösterilmektedir. Çalışmada elde edilen sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

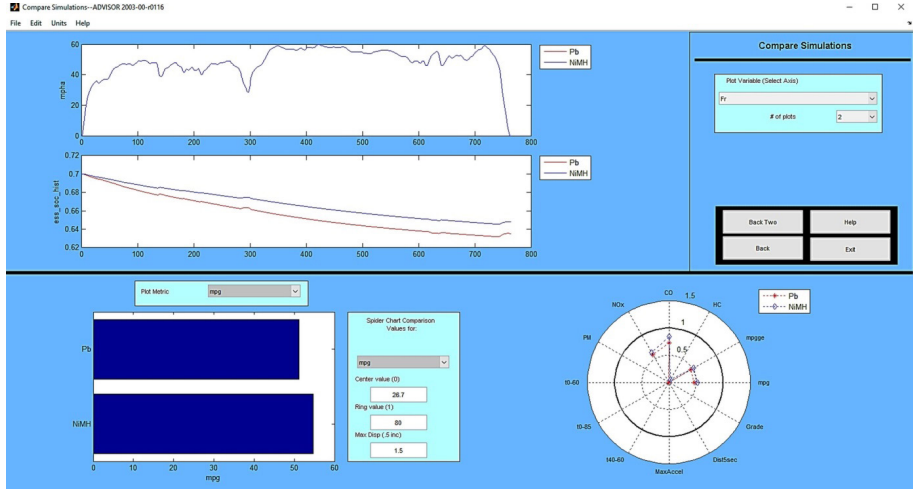
Analiz çalışmalarında kullanılan elektrik motoru 75 kW gücünde AC indüksiyon motorudur. Karşılaştırmalar sırasında farklı bataryalar kullanılmış ve performansları değerlendirilmiştir. Çalışmadaki batarya çeşitleri, günümüzde otomotiv sektöründe seri olarak üretimi yapılan taşıtlarda tercih edilen batarya türlerine göre belirlenmiştir. Beş farklı bataryanın teknik özellikleri ve MATLAB kodları Tablo 3’te sunulmuştur. Hem seri hem de paralel hibrit taşıt tipleri için bu bataryalar üzerinden analiz gerçekleştirilecektir.

Tablo 3. Tercih Edilen Bataryaların Özellikleri (Özen, 2021)

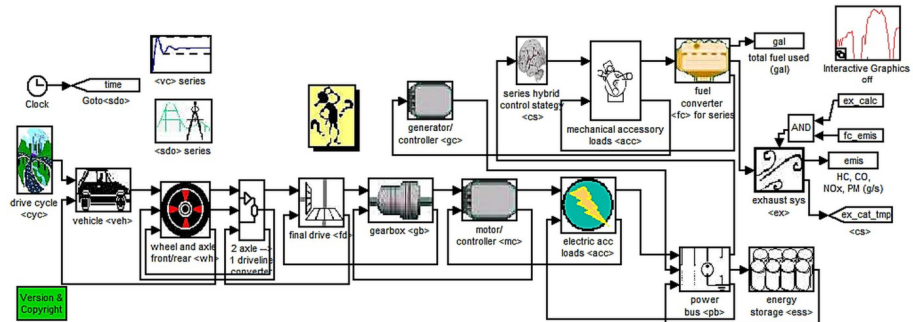
	Özellikleri	Matlab kodu	Kapasite (Ah)	Modül sayısı	Modül Ağırlığı (kg)	Nominal Gerilim (V)
Pb	Hawker Genesis VRLA battery	ESS_PB25.m	26	3	11	12
Li	Saft Lithium Ion battery	ESS_LI7_temp.m	6	3	1,13	9
NiMH	Ovonic NiMH battery	ESS_AnnexVII _SerHyb_NIMH28 _OVONIC.m	28	3	3,6	6,2
NiCad	Saft STM battery	ESS_NICAD102.m	102	3	14	6
NiZn	Evercel NiZn battery	ESS_NIZN22_temp.m	22	7	6,34	10,6

Sürüş çevrimlerinden ise ortalama hızın şehiriçi sürüş çevrimlerine oranla daha yüksek olduğu şehirler arası otoban sürüş çevrimi (HWFET- Highway Fuel Economy Test) seçilmiştir. Bu sürüş dışında farklı sürüş planları için analizler yapılabilir. Analiz yapılan taşıtlar seri hibrit elektrikli taşıt (SHET) ve paralel hibrit elekt-

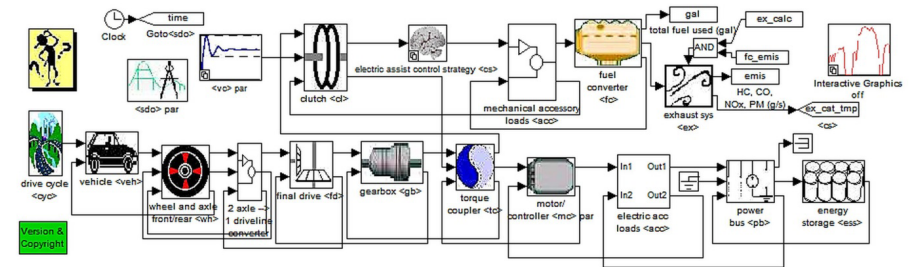
rikli taşıt (PHET) olarak iki tür taşıt incelenmiş ve bunların Simulink diyagramları sırasıyla Şekil 4 ve Şekil 5'te gösterilmiştir. Bu taşıtlar binek tip sedan bir taşıttır. Seri ve paralel hibrit taşıt ile ilgili performans değerlendirmeleri yapılmıştır.



Şekil 3. ADVISOR Sonuç Ekranı

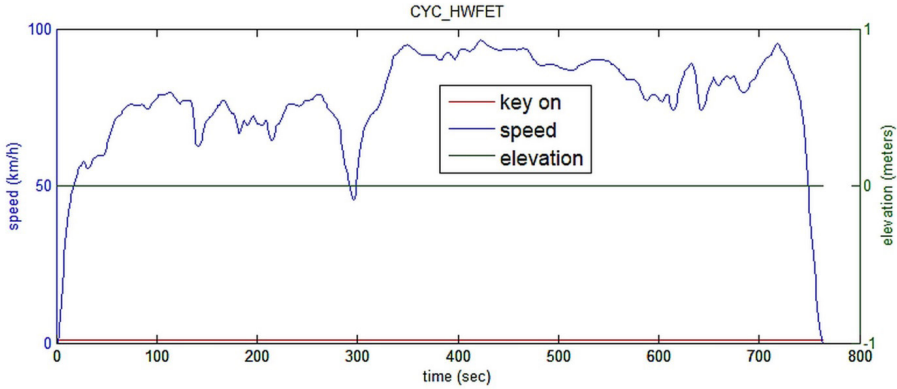


Şekil 4. SHET (seri hibrit elektrikli taşıt) Simulink Diyagramı

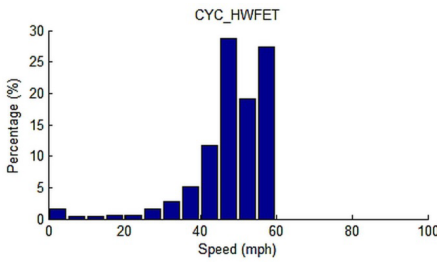


Şekil 5. PHET (paralel hibrit elektrikli taşıt) Simulink Diyagramı

Belirlenen taşıtlarda HWFET (Highway Fuel Economy Test- şehirler arası otoban sürüş çevrimi) sürüşüne ait çevrim, şekil 6'da gösterilmiştir. HWFET (Highway Fuel Economy Test- şehirler arası otoban sürüş çevrimi) sürüşü için araç test koşulları ayrıca şekil 7'de verilmiştir. Sürüş çevriminin değerleri ise tablo 4'te sunulmuştur.



Şekil 6. HWFET (Highway Fuel Economy Test- şehirler arası otoban sürüş çevrimi) Sürüşü İçin Zamana Bağlı Hız Değişimi



time:	765 s
distance:	10.26 miles
max speed:	59.9 mph
avg speed:	48.2 mph
max accel:	4.69 ft/s ²
max decel:	-4.84 ft/s ²
avg accel:	0.64 ft/s ²
avg decel:	-0.72 ft/s ²
idle time:	6 s
no. of stops:	1
max up grade:	0 %
avg up grade:	0 %
max dn grade:	0 %
avg dn grade:	0 %

Şekil 7. HWFET (Highway Fuel Economy Test- şehirler arası otoban sürüş çevrimi) sürüşü için araç test koşulları

Advisor analizi için belirlenen iki taşıt türü için “VEH_SMCAR (Hypothetical small car)” değerleri alınarak, 765 sn'lık bu sürüş döngüsünde değerlendirilmiştir. Batarya performansı değerlendirileceği için diğer veriler değiştirilmemiştir. Bu çalışmadaki batarya çeşitleri HET'larda kullanılan kurşun asit (Pb), lityum iyon (Li-ion), nikel kadmiyum (NiCad), nikel metal hidrür (NiMH) ve nikel çinko (NiZn) bataryalardır. Taşıtlarda kullanılan bataryalarla ilgili gerilim değerleri, enerji kapasiteleri ve ağırlıkları Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 4. HWFET(Highway Fuel Economy Test- şehirler arası otoban sürüş çevrimi) Sürüş Çevrimi için Değerler

Veriler	Değerler	Birimler
Süre	765	s
Mesafe	16,51	km
Max. hız	96,4	km/h
Ortalama hız	77,58	km/h
Max. ivme	1,43	
Max. yavaşlama ivmesi	-1,48	
Boşta çalışma süresi	6	s
Duraklama sayısı	1	-

Tablo 5. Taşıtlarda Kullanılan Bataryaların Değerleri

Batarya Türü	Nominal Gerilim (V)	Düşük Gerilim (V)	Yüksek Gerilim (V)	Enerji Kapasitesi (Ah)	Ağırlık (kg)
Pb	12	9	16.5	26	11
Li-ion	9	6	11.7	6	1.13
NiCd	6	5.9	6.9	110	14
NiMH	6.2	4.56	7.83	28	3.6
NiZn	10.6	6.65	14.7	22	6.34



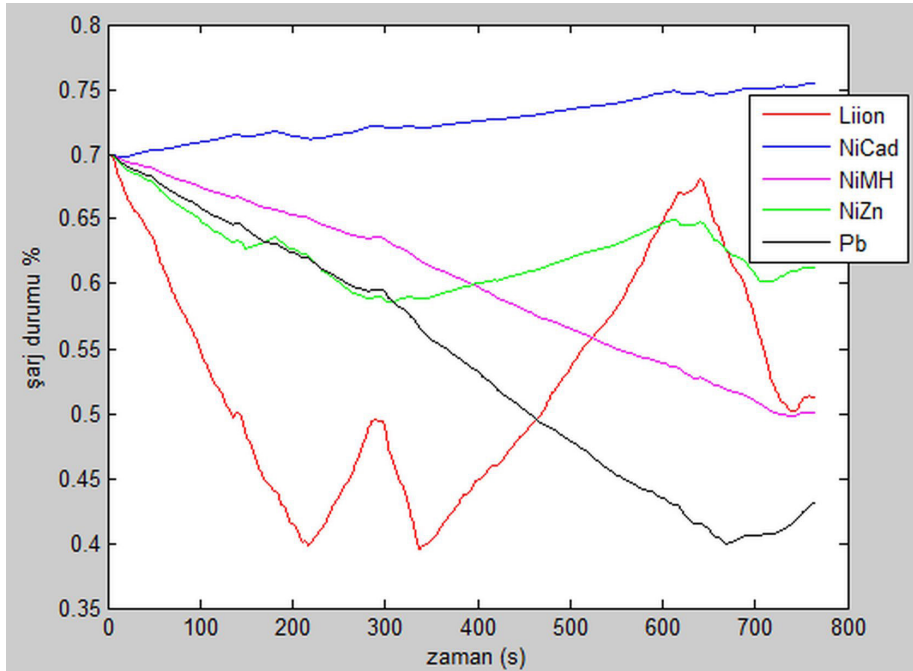
Şekil 8. ADVISOR Simülasyon Yaklaşımı

Şekil 8'de görüldüğü gibi belirli bir hız ve yol koşulları için simülasyon başlar. Hedeflenen araç hızı belirlenir. Araç hızı tekerlek ve aks düzeyinde hesaplanır. Hız ihtiyacı şanzıman ve son aktarma birimlerine iletilir. Hız ihtiyacı şanzımandan geçerek motor gereksinimini belirler. Elektrikli motorun ihtiyaç duyduğu güç hesaplanır. Güç, hibrit güç kaynaklarına geri iletilir. Bataryadan gerekli enerji çekilir. Hibrit sistem enerji akışını optimize eder. Gerektiğinde içten yanmalı motor devreye girer ve güç sağlar. İçten yanmalı motor çalışmasının sonucu olarak egzoz emisyonu oluşur.

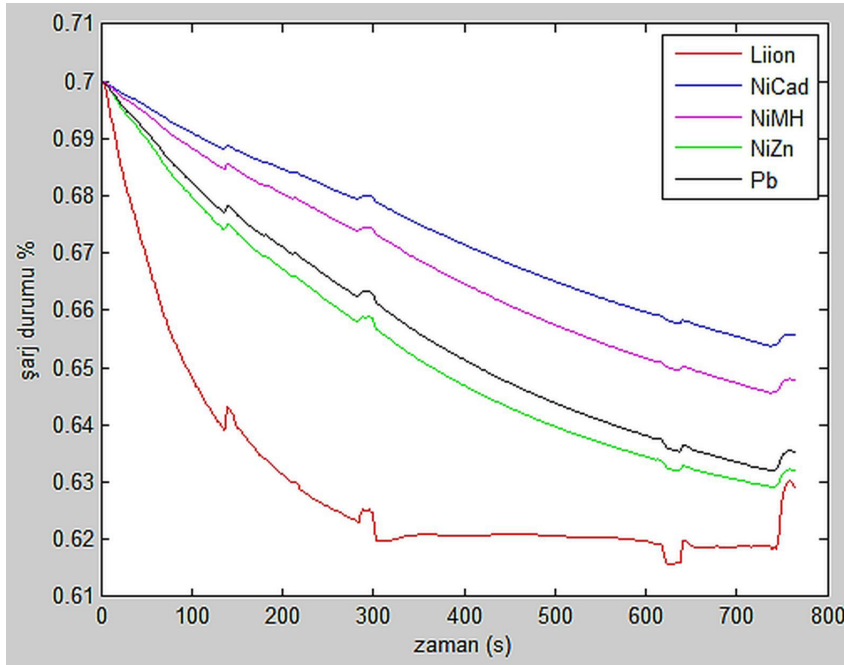
3.Sonuç ve Tartışma

3.1 Bataryaların Zamana Bağlı Şarjlarının Değerlendirilmesi

Programda, seçilen taşıtların analizi şehirlerarası otoban sürüş çevrimi boyunca gerçekleştirilmiştir. Simülasyon, güzergâh tamamlanana ve maksimum hıza ulaşılanaya kadar sürdürülmüştür. Bataryalar için hibrit taşıtlarda şarj durumu zaman değişimi şekil 9 ve şekil 10'da gösterilmiştir.



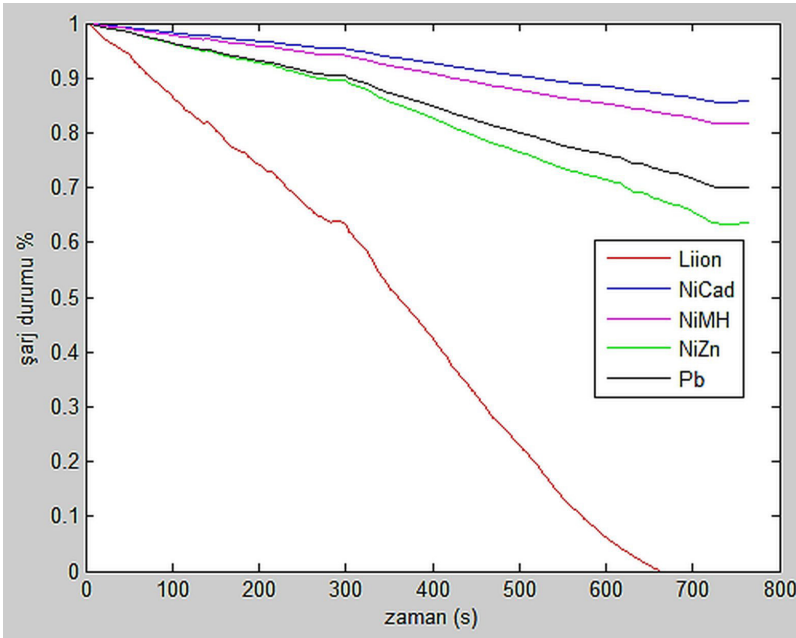
Şekil 9. Şehirler Arası Otoban Sürüş Çevriminde SHET (seri hibrit elektrikli taşıt) için zamana bağlı şarj değişimi



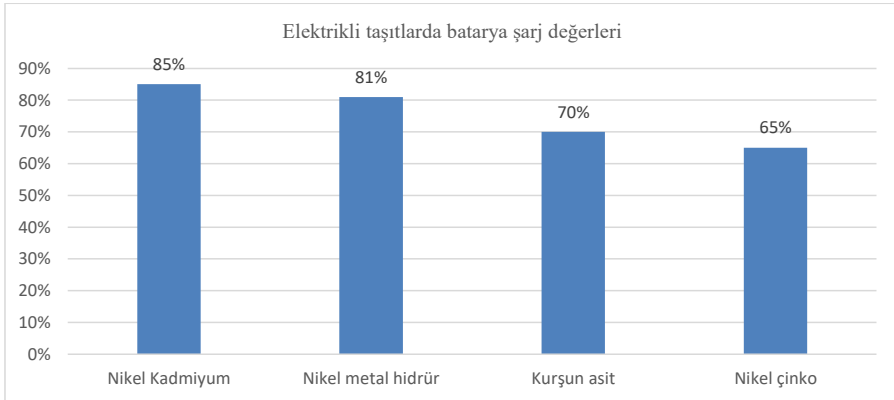
Şekil 10. Şehirler Arası Otoban Sürüş Çevriminde PHET (paralel hibrit elektrikli taşıt) için Zamana Bağlı Şarj Değişimi

Seri hibrit taşıtlarda aracın hareketi yalnızca elektrik motoru tarafından sağlanır. Bu durum, yüksek güç gerektiren anlarda bataryadan daha fazla enerji çekilmesine yol açar. Buna karşın, paralel hibrit taşıtlarda hem elektrik motoru hem de içten yanmalı motor birlikte çalışır ve genellikle yüksek güç ihtiyaçlarında içten yanmalı motor devreye girer. Bu sayede, elektrik motorunun güç talebi paralel hibrit taşıtlarda seri hibrit taşıtlara kıyasla daha düşüktür. Şekil 9 ve Şekil 10'daki grafikler incelendiğinde, tüm batarya türlerinin seri hibrit taşıtlarda daha fazla enerji tükettiği ve şarj seviyelerinin daha düşük değerlere indiği açıkça görülmektedir. Bu durum seri hibrit elektrikli taşıtlarda zamanla bataryanın daha fazla tükenmesine yol açabilmektedir.

Şekil 11'de şehirler arası otoban sürüş çevriminde tam elektrikli taşıtta farklı batarya türleri için şarj durumları verilmektedir. Şekil 11'de görüldüğü gibi lityum iyon batarya tam elektrikli taşıtlarda sürekli yüksek enerji çekimi altında şarj seviyelerini daha hızlı kaybettikleri görülmektedir. Kurşun-asit bataryaları ise enerji kapasitesi düşük olmasına rağmen şarj seviyelerini daha kararlı bir şekilde koruyabilmektedir. Diğer batarya türleri ise performans açısından bu iki uç değer arasında bir yer almaktadır. Diğer bataryaların şarj değerleri değişim yüzdeleri Şekil 12'de verilmiştir.

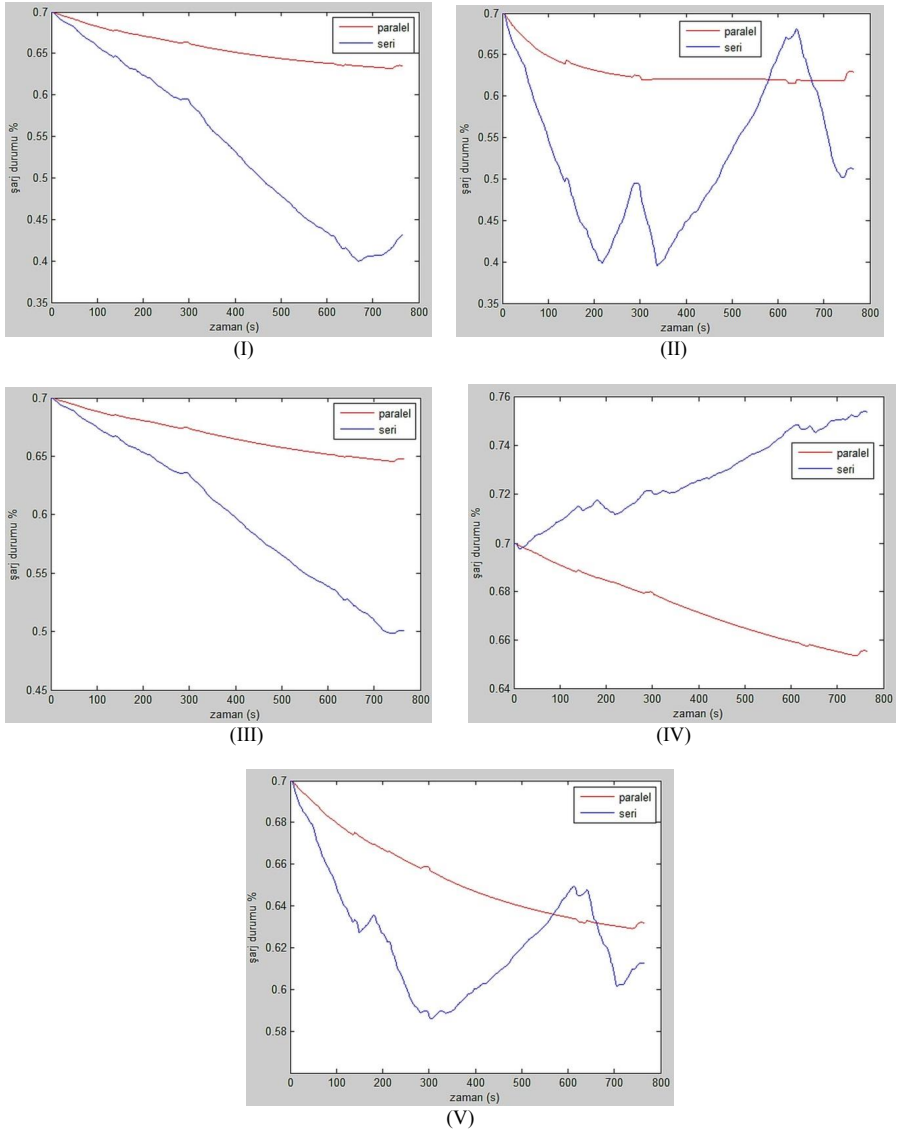


Şekil 11. HWFET Sürüşü Tam Elektrikli Taşıtta için Zamana Bağlı Şarj Değişimi



Şekil 12. Elektrikli Taşıtta Farklı Bataryaların Şarj Değerleri Yüzdesi

Şekil 12'deki grafikte, elektrikli taşıtlarda kullanılan farklı batarya türlerinin şarj değerlerinin yüzdesel dağılımı gösterilmektedir. Grafikteki veriler, nikel kadmiyum ve nikel metal hidrür bataryalarının elektrikli taşıtlarda daha verimli bir seçenek olduğunu göstermektedir.



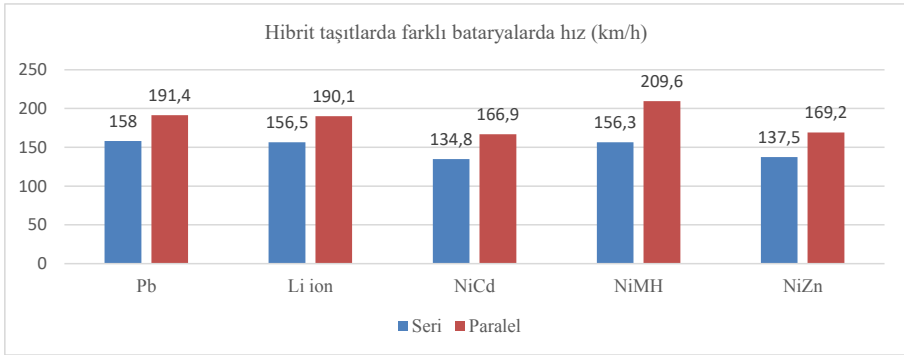
Şekil 13. Hibrit Taşıtlarda Şehirler Arası Otoban Sürüş Çevrimi İçin Bataryaların Zamana Bağlı Şarj Değişimi I) Pb, II) Li-ion, III) NiMH, IV) NiCad, V) NiZn

Şekil 13'teki grafikler, hibrit elektrikli taşıtlarda şehirlerarası otoban sürüş çevrimi sırasında farklı batarya türlerinin (Pb, Li-ion, NiMH, NiCad, NiZn) şarj seviyelerinin zamana bağlı değişimini göstermektedir. Her grafikte, seri hibrit ve paralel hibrit taşıtlardaki batarya şarj durumları ayrı ayrı çizilmiştir. Seri hibrit

elektrikli taşıtlarda kurşun-asit bataryalarının daha yüksek enerji talebi nedeniyle hızlı tükendiği, paralel hibrit elektrikli taşıtlarda ise içten yanmalı motor desteği sayesinde daha az enerji tüketiminin olduğu görülmektedir. Li-ion bataryalarının seri hibrit elektrikli taşıtlarda batarya şarj durumu zamanla önemli ölçüde azalırken; rejeneratif frenleme gibi yöntemlerle enerji geri kazanımı konusundaki etkinliği, paralel hibrit elektrikli taşıtlarda avantaj sağlamıştır. NiMH bataryalar paralel hibrit elektrikli taşıtlarda seri hibritlere oranla şarj seviyesi daha stabil bir şekilde düşmekte iken, enerji tüketimi ise seri hibrit elektrikli taşıtlara göre daha az olmaktadır. NiCad bataryaların paralel hibrit elektrikli taşıtlarda şarj seviyesi oldukça stabil kalmakta ve hatta rejeneratif frenleme ile şarj kazanımı artışı gözlemlenmektedir. Seri hibrit elektrikli taşıtlarda ise düzenli bir şekilde batarya şarj durumu azalmaktadır. Aynı zamanda NiCad bataryalarının paralel hibritlerde enerji geri kazanımı ve dayanıklılık açısından avantaj sağladığı görülmektedir. Nikel-Çinko bataryalarda paralel hibrit elektrikli taşıtlarda şarj seviyesi zamanla azalma göstermekte, ancak rejeneratif frenleme ile geri kazanımlar da görülmektedir. Seri hibritlerde ise bataryanın hızlı bir şekilde şarj kaybına uğradığı gözlemlenmektedir. NiZn bataryaları, paralel hibritlerde seri hibritlere kıyasla daha verimli bir performans sergilemektedir. Sonuç olarak Şekil 13'teki grafiklere baktığımızda seri hibrit elektrikli taşıtlarda batarya tüketiminin paralel hibritlere göre daha hızlı olduğunu net bir şekilde görmekteyiz. Bunun nedeni, seri hibrit taşıtlarda tüm tahrik gücünün bataryadan sağlanmasıdır. Paralel hibritlerde ise içten yanmalı motor devreye girerek elektrik motorunun yükünü azaltır ve rejeneratif frenleme gibi enerji geri kazanım sistemleri daha etkin bir şekilde kullanılır. Batarya türüne bağlı olarak paralel hibritlerde enerji tüketimi daha verimli bir şekilde yönetilmektedir.

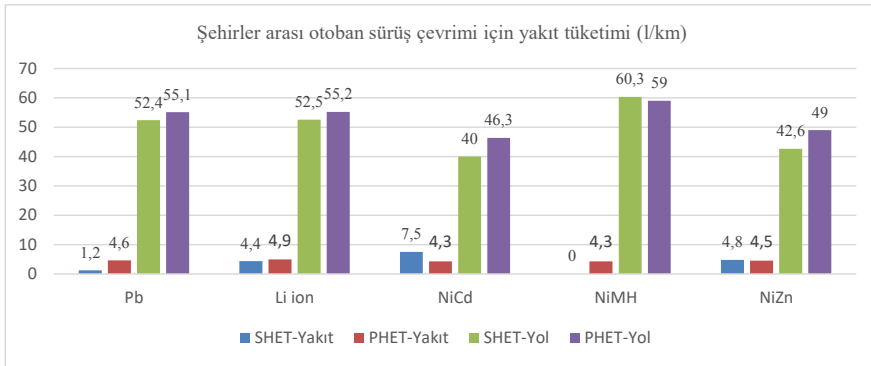
3.2 SHET ve PHET İçin Hızlanma, Yakıt Tüketimi ve İvme Performansı

Kullanılan şehirler arası otoban sürüş çevriminde hibrit taşıtların ulaştığı maksimum hız değeri paralel hibrit taşıt kullanıldığında ve nikel metal hidrür batarya seçildiğinde 209,6 km/h olarak görülmüştür. Hibrit taşıtlara farklı batarya tipleri uygulandığında ise taşıtların ulaşabileceği hız değerleri incelenmiştir. Her iki taşıt için bu değerler Şekil 14'te verilmiştir. Hibrit elektrikli taşıtlardaki ivmelenme değeri bütün batarya türlerinde 5 m/s² değerindedir. Şekil 14'te belirtildiği gibi seri hibrit elektrikli taşıt için lityum iyon bataryada maksimum hız nikel çinko bataryaya kıyasla %13,81 artmıştır ve kurşun asit bataryaya kıyasla %0,95 düşmüştür. Hızlanma değeri ise 134,8 km/h değerinde nikel kadmiyum bataryada ortaya çıkmıştır.



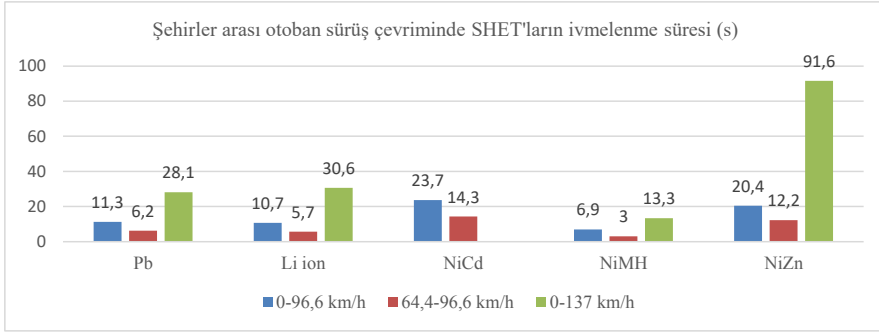
Şekil 14. Hibrit Taşıtlarda Hız Değerleri Karşılaştırması

Paralel hibrit elektrikli taşıtta şekil 14'te belirtildiği gibi lityum iyon bataryanın maksimum hızı nikel kadmiyum bataryaya kıyasla %13,9, nikel çinko bataryaya kıyasla %12,35 artış göstermiş ve nikel metal hidrür bataryadan ise %10,25 oranında azalmıştır. Paralel hibrit elektrikli taşıtta en yüksek hız değerini sağlayan batarya nikel metal hidrür bataryasıdır.

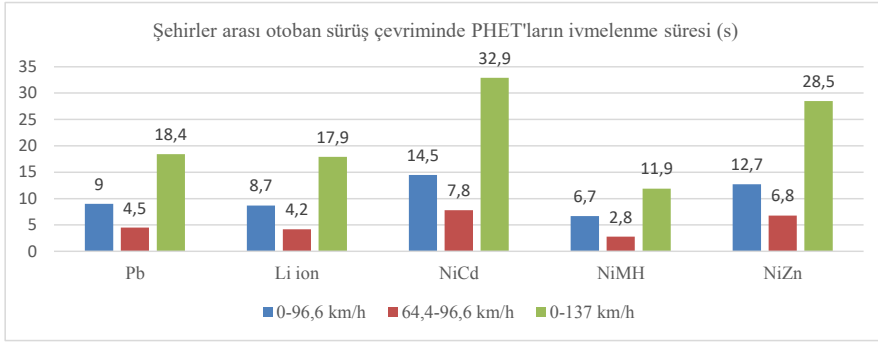


Şekil 15. SHET ve PHET için Yakıt Tüketimi

Şekil 15'te şehirler arası otoban sürüş çevrimi için yakıt tüketim değerleri her iki taşıt türü için verilmiş ve yol kısmında ise taşıtların 5 saniyede aldığı yollar metre cinsinden farklı bataryalar için gösterilmiştir. SHET için seçilen sürüşte nikel metal hidrür bataryada ET gibi davranarak yakıt tüketimini sıfır olarak vermiştir. SHET için en fazla yakıt tüketimi nikel kadmiyum bataryada olmuştur. PHET için değerler incelendiğinde en fazla yakıt tüketimi lityum iyonda görülmüştür.



Şekil 16. Seri Hibrit Taşıtlarda İvme Performansı



Şekil 17. Paralel Hibrit Taşıtlarda İvme Performansı

Şekil 16'da SHET için ve şekil 17'de PHET için ivmelenme süreleri gösterilmiştir. Taşıttaki değişken hız aralıklarında SHET'larda en kısa zamanda performans gösteren nikel metal hidrür batarya olmuştur. 0-96,6 km/h hız bölgesinde taşıtın ivmelenme zamanı kurşun asit bataryalarda 11,3 saniyedir. Bu ivmelenme zamanı seri hibrit elektrikli taşıtlarda kurşun asit bataryaya oranla lityum iyon bataryalarda %5,30, nikel metal hidrür bataryalarda %38,93 azalmış, nikel çinko bataryalarda %80,53 ve nikel kadmiyum bataryalarda ise %109,73 artmıştır.

3.3 SHET ve PHET İçin Emisyonların Karşılaştırılması

Otomotiv sektöründe çevre kirliliği yönünden çevreye yayılan zararlı gazların azalması önemli faktörlerden biridir. Egzoz emisyonu elektrikli hibrit taşıtların avantajlarından bir tanesidir. Yapılan çalışmada simülasyon sonuçları seri ve paralel hibrit elektrikli taşıtlar için şehirler arası sürüş durumunda meydana gelen hidrokarbonlar, karbonmonoksit, azot oksit gazları ve partikül madde miktarları Tablo 6'da verilmektedir.

Tablo 6. Şehirler Arası Otoban Sürüş Çevrimi İçin Emisyonlar

Emisyon değerleri (g/km)	SHET (seri hibrit elektrikli taşıt)					PHET (paralel hibrit elektrikli taşıt)				
	Kurşun asit	Lityum iyon	Nikel kadmiyum	Nikel metal hidrür	Nikel çinko	Kurşun asit	Lityum iyon	Nikel kadmiyum	Nikel metal hidrür	Nikel çinko
Hidrokarbon	0,267	1,319	0,366	0	0,33	0,251	0,256	0,249	0,242	0,246
Karbonmonoksit	1,365	1,551	1,708	0	1,831	1,176	1,17	1,13	1,124	1,14
Azot oksit	0,297	0,442	0,537	0	0,454	0,205	0,255	0,196	0,188	0,197
Partikül madde	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tablo 6'daki sonuçlara göre hava kirlenme emisyon değerleri seri ve paralel hibrit elektrikli taşıtta farklı batarya türlerinde bile düşük değerlerde ortaya çıkmıştır. Seri ve paralel hibrit elektrikli taşıtlarda partikül miktarı sıfırdır. Nikel metal hidrür bataryanın emisyon değerinin sıfır olmasının nedeni ise şehirler arası sürüş çevriminde seri hibrit elektrikli taşıtın tamamıyla elektrikli taşıtta olduğu gibi performans vermesidir. Seri hibrit elektrikli taşıtlarda hidrokarbon değerleri nikel kadmiyum bataryada kilometre başına 0,366 gram olurken, nikel çinko bataryada %9,83, lityum iyon bataryada ise %12,84, kurşun asit bataryada ise %27,04 azalmıştır. Nikel kadmiyum bataryaya göre lityum iyon bataryadaki karbonmonoksit değeri %9,19 değerinde azalmış, nikel çinko bataryada ise %7,20 değerinde artış göstermiştir. Azot oksit değerleri ise lityum iyon bataryada nikel çinko bataryaya göre %7,04 değeri kadar düşüktür, nikel kadmiyum bataryada ise %18,28 kadar daha fazladır. Nikel metal hidrür bataryaların emisyon değerinin sıfır olmasının nedeni ise şehirler arası sürüş çevriminde tümü elektrikli taşıtlardaki gibi performans vermesidir.

Paralel hibrit elektrikli taşıtlarda en az emisyon değeri nikel metal hidrür bataryalarda ortaya çıkmaktadır. Şehirler arası sürüş çevriminde partikül madde değerlerinde nikel metal hidrür bataryalara göre nikel kadmiyum %0,63, nikel çinko %1,26, kurşun asit %1,89 ve lityum iyon bataryalarda %5,67'lik yükseliş oluşmuştur. Karbonmonoksit, azot oksit değerlerinde yükselmeler oluşmuştur. Seri ve paralel hibrit elektrikli taşıtlardaki bataryalarda partikül madde değeri sıfırdır.

Tablo 6'dan anlaşılabacağı gibi paralel hibrit elektrikli taşıtlar çevresel açıdan daha

temizdir ve daha az emisyon üretir. Ancak batarya türleri arasında performans farklılıkları bulunmaktadır. Nikel metal hidrür ve lityum iyon bataryalar, azot oksit emisyonları açısından daha çevreci görünmektedir.

Bu çalışmada, hibrit elektrikli taşıtlarda enerji depolama teknolojileri olarak kullanılan batarya çeşitleri birbirleri ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Farklı batarya türleri için seri ve paralel hibrit elektrikli taşıtlardaki performanslar simülasyon yapılarak değerlendirilmiştir. Taşıtlar için yapılan simülasyonlar ile tasarlanan taşıtların değerleri incelenmiştir. ADVISOR simülasyonu ile belirlenen parametreler ve bunların sonuçları detaylı olarak gösterilmiştir. Elde edilen tüm grafikler detaylı olarak değerlendirilmiş ve batarya performansına etki eden değerler tablolar halinde verilmiştir. Simülasyon değerlendirme sonuçlarına göre şehirler arası otoban sürüş çevrimi diye adlandırılan HWFET sürüşünde bataryaların durumu yorumlanmıştır. Bu makalede değerlendirilen taşıtların her ikisi için de nikel kadmiyum batarya diğer batarya çeşitlerine göre şarj durumunu çok iyi durumda koruyan batarya olarak öne çıkmaktadır. Seri ve paralel hibrit taşıtlarda, diğer batarya türlerine kıyasla en fazla akımı çektiği belirlenmiştir. Bu bataryalar, uzun süreli ve yoğun kullanımlarda yüksek performans göstermiştir. Geriye kalan bataryalar ise şehirler arası otoban sürüş çevrimini yaklaşık olarak aynı şarj seviyelerinde tamamlamışlardır. Ancak, şarj durumunu koruma açısından nikel kadmiyum kadar iyi performans gösterememişlerdir. Batarya akımları yönünden yapılan değerlendirmelerde ise seri hibrit ve paralel hibrit taşıtlar için en fazla akımı nikel kadmiyumun çektiği belirlenmiştir. Seri ve paralel hibrit taşıtlardaki bataryalar şehirler arası otoban sürüş çevriminde karşılaştırıldığında, seri hibrit elektrikli taşıtlardaki depolanan enerjinin daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Seri hibrit elektrikli taşıtlarda enerji kullanım verimliliği paralel hibrit elektrikli taşıtlara göre daha yüksek bulunmuştur. Öte yandan paralel hibrit elektrikli taşıtlarda emisyonlar açısından daha düşük değerlere sahiptir. Enerji depolama kapasitesi seri hibrit taşıtlardan daha düşük olmasına rağmen, verimlilik belirli kullanım senaryolarında yeterli seviyede kalmıştır. Turan, Mengi ve Adatepe'ye göre, seri hibrit araçların enerji verimliliği açısından avantajlı olduğu, ancak paralel hibrit araçların emisyon değerlerinin daha düşük olduğu ifade edilmiştir (2020). Yapılan bu çalışma ile taşıtlardaki enerji depolama teknolojilerinin seçiminin optimum şekilde yapılması ile taşıt performansının önemli ölçüde farklılık gösterdiği belirlenmiştir. Optimum batarya seçimi hem enerji tasarrufu hem de taşıt performansı açısından kritik bir rol oynamaktadır. Bu sonuçlar, hibrit elektrikli taşıt tasarımı ve enerji depolama teknolojilerinin gelecekteki geliştirmelerinde yol gösterici olabilir.

Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynakça

- Ahmad F, Khalid M., & Panigrahi B.K. (2021). Development in energy storage system for electric transportation: A comprehensive review. *Journal of Energy Storage*, 1-22 (103153). <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103153>
- Ahmadzadeh A., Rodriguez R., Getz J., Panneerselvam S., & Soudbakhsh D. (2025). The impact of lightweighting and battery technologies on the sustainability of electric vehicles: A comprehensive life cycle assessment, *Environmental Impact Assessment Review*, 1-13 (107668). <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2024.107668>
- Ali Z.M., Calasan M., Gandoman F.H., Jurado F., & Abdel Aleelm S.H.E. (2024). Review of batteries reliability in electric vehicle and e-mobility applications. *Ain Shams Engineering Journal* 15, 1-25. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102442>
- Bakkari F., & Mounir H. (2024). Compatible alternative energy storage systems for electric vehicles: Review of relevant technology derived from conventional systems. *Energy*, 288 (129775), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129775>
- Ehsani M., Sing K.V., Bansal H.O., & Mehrjardi R.T. (2021). State of the Art and Trends in Electric and Hybrid Electric Vehicles. *Proceedings of the IEEE*, 109 (6), 967-984. <https://www.ieee.org/publications/rights/index.html>
- Guo C., Fu C., Luo R., & Yang G. (2022). Energy-oriented car-following control for a front-and rear-independent-drive electric vehicle platoon. *Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124732>
- Hu X., Zhang X., Tang X., & Lin X. (2020). Model predictive control of hybrid electric vehicles for fuel economy emission reductions, and inter-vehicle safety in car-following. *Energy* 196 117101. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117101>
- Jiang F., Yuan X., Hu L., Xie G., Zhang Z., Li X., Hu J., Wang C., & Wang H. (2024). A comprehensive review of energy storage technology development and application for pure electric vehicles. *Journal of Energy Storage* 86 (2024) 111159, <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111159>

- KoteswaraRao K.V., Srinivasulu G.N., Rahul J.R., & Velisala V. (2024). Optimal component sizing and performance of Fuel Cell – Battery powered vehicle over world harmonized and new european driving cycles. *Energy Conversion and Management*, 1-16.
- Kunt, M. (2020). Advisor Based Modelling of Regenerative Braking Performance of Electric Vehicles at Different Road Slopes. *International Journal of Automotive Science and Technology*, 4 (2), 98-104. <https://doi.org/10.30939/ijastech..717097>
- Kuşdoğan Ş., & Özen B. (2021). Advisor Programıyla Hibrit Elektrikli Taşıtlarda Batarya Analizi. *Mühendis ve Makina*, 62 (705), 637-653. <https://doi.org/10.46399/muhendismakina.924027>
- Markel T, Brooker A., Hendricks T., Johnson V., Kelly K., Kramer B., O'Keefe M., Sprik S., & Wipke K. (2002). ADVISOR: a systems analysis tool for advanced vehicle modeling. *Journal of Power Sources*, 255-266. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(02\)00189-1](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(02)00189-1)
- Naseri F, Barbu C., & Sarikurt T. (2022). Optimal sizing of hybrid high-energy/high-power battery energy storage systems to improve battery cycle life and charging power in electric vehicle applications. *Journal of Energy Storage*, 55 (105768), 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105768>
- Özen B., (2021). Advisor Programıyla Hibrit Elektrikli Taşıtlarda Batarya Analizi. Kocaeli Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi,Kocaeli.
- Sahwal C.P, Sengupta S., & Dinh T.Q. (2024). Advanced Equivalent Consumption Minimization Strategy for Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles. *Journal and Cleaner Production*, 437 (40366), 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140366>
- Sanguesa J.A., Torres-Sanz V., Garrido P., Martinez F.J., & Marquez-Barja J.M. (2021). A Review on Electric Vehicles: Technologies and Challenges. *Smart Cities*, 2021,4, 372-404. <https://doi.org/10.3390/smartcities4010022>
- Silva S.F, Eckert J. J., Silva F.L., Silva L.C. A., & Dedini F.G. (2021). Multi-objective optimization design and control of plug-in electric vehicle powertrain for minimization of energy consumption, exhaust emissions and battery degradation. *Energy Conversion and Management* 234, 234 (113909), 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.113909>
- Turan S., Mengi O.Ö., & Adatepe H. (2020). Seri ve Paralel Elektrikli Hibrit Araçların Sayısal Simülasyon ile Karşılaştırılması. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 10 (2), 302-314 <https://doi.org/10.31466/kfbd.737921>

- Türkmen A., Salim S., & Çelik C. (2017). Analysis of fuel cell vehicles with advisor software. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 70, 1066-1071. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.011>
- Waseem M., Lakshmi G.S., Ahmad M., & Suhaib M. (2025). Energy storage technology and its impact in electric vehicle: Current progress and future outlook. *Next Energy* 6, (2025) 100202. <https://doi.org/10.1016/j.nxe-ner.2024.100202>
- Wipke K., & Markel T. (2002). Hydrogen, Fuel Cells and Infrastructure Technologies Program. Annual Progress Report. January 2024 tarihinde alındı