

Elektrikli Araçlarda Kullanılan Bataryaların Fiyat/Performans Analizleri: Alternatif Olarak Na-İyon Batarya Sistemleri

Murat BULDU^{*1} , Serdar ALTIN² , Fatih BULUT² 

^{*1} İnönü Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü, MALATYA

² İnönü Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü, MALATYA

² İnönü Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü, MALATYA

(Alınış / Received: 18.07.2024, Kabul / Accepted: 24.04.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 30.04.2025)

Anahtar Kelimeler

Li iyon,
Na iyon,
Batpac,
Elektrikli araçlar

Öz: Bu çalışmada elektrikli araçlarda hali hazırda kullanılan bataryaların temel özellikleri ve kimyaları incelenmiştir. İlk olarak bataryaların çalışma prensipleri temel düzeyde ele alınarak incelenmiş ve en popüler batarya tipleri belirlenerek temel özellikleri ortaya konulmuştur. Hem ülkemizde hem de dünyada elektrikli araçlara olan yönelim ve bununla birlikte satış miktarları değerlendirilerek batarya maliyet analizleri ilk olarak var olan batarya sistemlerinde BatPac programı yardımı ile incelenmiştir. Dünyadaki Li rezervinin kısıtlı olmasından dolayı alternatif olarak görülen Na-iyon bataryaların Li-iyon bataryalara göre durumu incelenerek çalışma mekanizmaları tartışılmıştır. Çalışmanın son kısmında ise olası Na-iyon batarya katot ve anot malzemeleri için maliyet analizleri gerçekleştirilerek Li-iyon bataryalar ile kıyaslanmıştır. Sonuç olarak ise Na-iyon bataryaların yaklaşık üç kat Li-iyon bataryalara göre düşük maliyetli olduğu ortaya çıkarılmıştır. Bu durumun yakın gelecekte elektrikli araçların üretim maliyetlerinde özellikle batarya paketi açısından yaklaşık %66 değerinde maliyet azalmasına neden olabileceği öngörülmüştür.

Price/Performance Analysis of Batteries Used in Electric Vehicles: Na-ion Battery Systems as an Alternative

Keywords

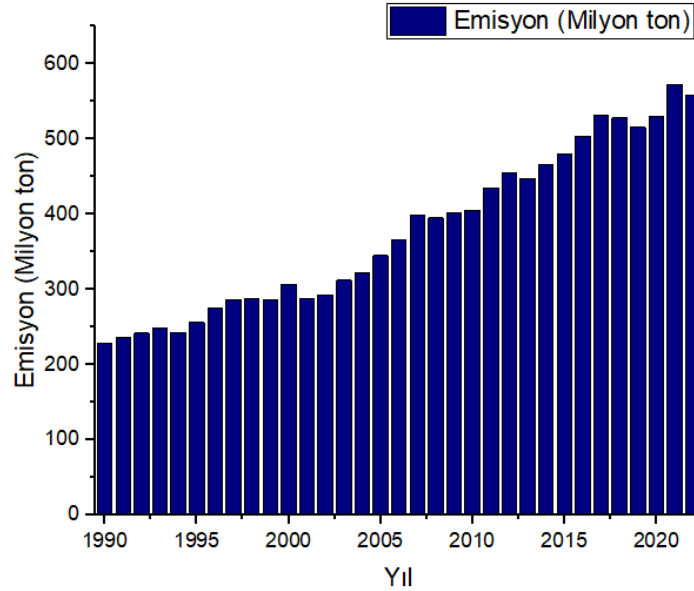
Li-ion,
Na-ion,
Batpac,
Electric Vehicles

Abstract: In this study, the basic properties and chemistry of batteries currently used in electric vehicles were investigated. Firstly, the operating principles of batteries were examined at a basic level and the most popular battery types were determined and their basic features were revealed. By evaluating the trend towards electric vehicles both in our country and in the world and their sales volumes, battery cost analyzes were first examined in existing battery systems with the help of the BatPac program. The situation of Na-ion batteries, which are seen as an alternative due to the limited Li reserves in the world, compared to Li-ion batteries, has been examined and their working mechanisms have been discussed. In the last part of the study, cost analyzes were carried out for possible Na-ion battery cathode and anode materials and compared with Li-ion batteries. As a result, it has been revealed that Na-ion batteries are approximately three times less costly than Li-ion batteries. It is predicted that this situation may cause a cost reduction of approximately 66% in the production costs of electric vehicles in the near future, especially in terms of battery packs.

*İlgili Yazar, email: muratbuldu44@gmail.com

1. Giriş

Günümüzde artan enerji ihtiyacının karşılanabilmesinde fosil yakıtlar halen en önemli aktörlerden biridir. Buna göre 2021 yılı verilerine AB-27 ülkeleri birincil enerji tüketiminin 2,6%'sı katı yakıtlardan, 34,8%'si petrol ve petrol ürünlerinden, 23%'ü'si doğalgazdan, 22,8% elektrik enerjiden, 11,8%'i yenilenebilir enerjiden ve 5,0%'sı diğer kaynaklardan karşılamıştır [1,2]. Özellikle ulaşım sektörünün sebep olduğu yüksek enerji ihtiyacı ile fosil yakıtlara olan talebin yoğun olması ve bu yoğun talebin karşılanabilmesi için alternatif çözümlere zemin oluşturan akademik çalışmaları beraberinde getirmiştir. Özellikle sera gazlarının doğaya verdiği zarar ile katı yakıtların gezegenimize verdiği zarar gün geçtikçe artmaktadır. Örnek olarak 2016 yılında Kanada'da sera gazı emisyonunda %24 oranında olduğu tespit edilmiştir [3,4]. Ülkemizdeki sera gazı envanteri sonuçlarını ele aldığımızda ise TÜİK verilerine göre 2022 yılı toplam sera gazı emisyonu bir önceki yıla göre %2,4 azalarak 558,3 milyon ton (Mt) CO₂ eşdeğeri (eşd.) olarak hesaplanmıştır [5]. Ayrıca kişi başı toplam sera gazı emisyonu 1990 yılında 4,1 ton CO₂ eşd., 2021 yılında 6,8 ton CO₂ eşd. ve 2022 yılında 6,6 ton CO₂ eşd. olarak hesaplanmıştır. Şekil 1 ülkemizdeki CO₂ emisyon oranının yıllar içerisindeki değişimi ele alınmaktadır. Bu bağlamda geline nokta ülkemizde son dönemde sera gazı emisyonunda ciddi bir artış olduğu gözlemlenmektedir.

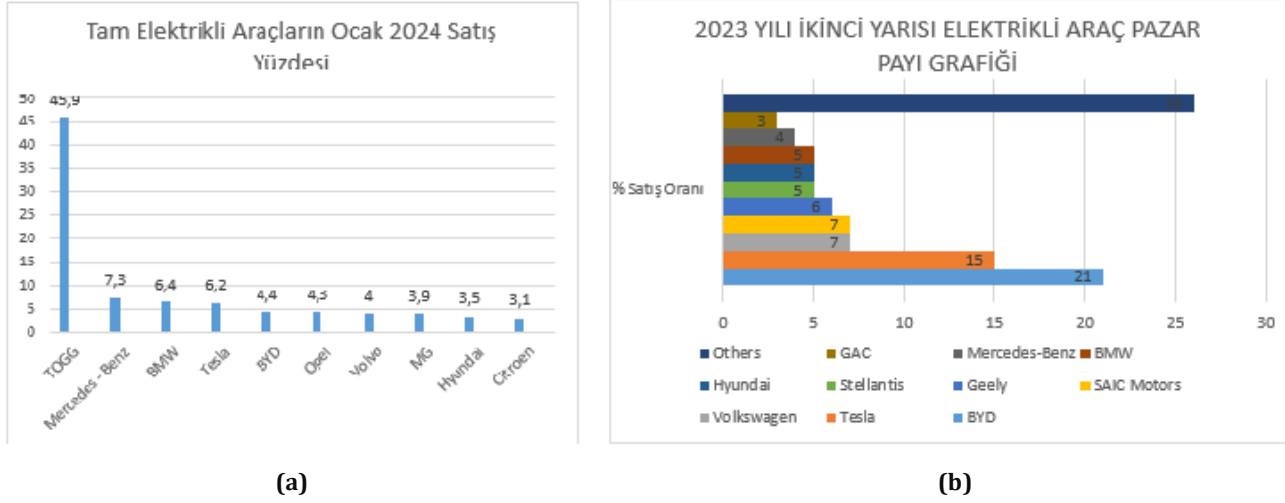


Şekil 1. Yıllara göre sera gazı emisyonunun değişimi

Ayrıca halen en temel enerji kaynaklarından olan petrolün arz talep oranındaki değişimlerden dolayı varil fiyatında yukarı doğru ivmelenmeler olmaktadır. Bu durum enerji ihtiyacının giderilmesindeki birim fiyatları dolaylı yollardan etkilemektedir [6]. Günümüz itibarıyla dünya genelinde petrolün %64,5'i ulaşım, %16,6'sı enerji dışı uygulamalar, %7,8'i sanayi, %5,4'ü konut, %5,7'si diğer amaçlarla kullanılmaktadır. Bu bağlamda fosil yakıtların ekonomik etkilerinin azaltılması ve çevresel zararın iyileştirilmesine yönelik arayışlar devam etmektedir. Bu yöndeki araştırmalarda sera gazlarının emisyon oranının düşürülmesi, karbon ayak izinin azaltılması ve yeşil enerji teknolojilerinin geliştirilmesi hedeflenerek yenilenebilir enerji kaynaklarının ArGe çalışmaları yapılmaktadır. Elektrikli araç teknolojisi bu çalışmalarda önemli bir rol üstlenmektedir [7]. Yapılan çalışmalar ulaşım sektöründeki problemleri ele alarak elektrikli araçlardaki enerji depolama sistemlerinde bataryalara ihtiyaç olduğunu öne sürmektedir. Elektrikli araç teknolojisinde Lityum-iyon (LIB) batarya paketlerinin bu araçların vazgeçilmez bir parçası olduğu görülmektedir. Bu durumun temel sebebinin çevrim sayısındaki uzun ömür, kendiliğinden deşarj olma durumunun düşük oranı, hafifliği, hızlı şarj yetenekleri ve geniş sıcaklık çalışma aralığı gibi yapısal özellikleri olarak görülmüştür [8-11]. Bu yöndeki verileri incelediğinde 2017 yılında dünyada %76 benzinli, %19 dizel araç bulunurken elektrikli araçlar yalnızca %5 oranındaydı ancak 2030 yılında elektrikli otomobillerin oranının %48 olacağı tahmin edilmektedir [12].

İstatistiksel sonuçlardan görüleceği üzere birçok otomobil üreticisi son dönemlerde elektrikli ve hibrit araç teknolojilerine geçmektedir. Ancak bu noktada önemli bir durum ortaya çıkmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımıyla ilgili yapılan araştırmalarda fosil yakıtların aksine depolama sorunları olması nedeniyle günlük kullanımdaki oranını düşürmektedir. Bu negatif durumun çözümüne dair çalışmalar batarya katot malzemesinin kompozisyonu ve paketleme şekilleri üzerinde yoğunlaşmış olup gelişim hızı umut vericidir.

Günümüz otomotiv sektöründe elektrikli araç bataryalarını incelediğimizde lityum iyon bataryalarda farklı kimyasal yapıların varlığı görülmektedir. Hem dünyada hem de Türkiye’de elektrikli araç satışları hızlı bir şekilde artmaktadır. Şekil 2.a ODDM verileri ışığında günümüzde Türkiye pazar payını gösterirken Şekil 2.b 2023 yılında dünya elektrikli araç pazar payını göstermektedir [13].



Şekil 2. (a) Türkiye Elektrikli Araç Satış Verileri, (b) 2023 Yılı İkinci Yarısı Dünya Elektrikli Araç Satış Verileri

İlk olarak ülkemizdeki elektrikli araç satışlarını incelediğimizde yerli TOGG firmasının açık olarak önde olduğu görülmektedir. Bu durum yerli elektrik araç üretiminin ülke tercihleri açısından önemini açık bir şekilde göstermektedir. Dünyadaki elektrikli araç satışları incelendiğinde ise Çin menşei BYD firmasının pazara hakim olduğu görülmektedir. İkinci sırada ise ABD menşei Tesla firması yer almaktadır. Pazar payı açısından yüksek hacme sahip elektrikli araç modellerinin batarya tipleri ve özellikleri Tablo 1 içerisinde verilmektedir.

Tablo 1. Elektrikli araçlara dair kullanılan batarya kompozisyonları ve özellikleri [14,15]

EV Modeli	Batarya tipi	Kapasite (kWh)	Mesafe (km)
BYD	LFP	49,92 veya 60,48	420
Tesla Model 3	NCA	55	629
Tesla Model S	NCA	100	600
TOGG	NMC	52,4	523
Volkswagen e-Golf	NMC	35,8	316
BMW i3	NMC	42	310
Hyundai IONIQ	NMC	40	614
Kia e-Niro	NMC	42 veya 67	460
Jaguar i-Pace	NMC	90	470
Geely Geometry C	LFP	70	460

Görüldüğü gibi elektrikli araç üreticileri üç çeşit batarya kimyası üzerine çalışan batarya sistemlerini tercih etmektedir. Burada kullanılan LFP (LiFePO_4), NCA ($\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$) ve NMC ($\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$, $x+y+z=1$) katot malzemelerine göre batarya tipleri isimlendirilmektedir.

2. Materyal ve Metot

Bu bölümde bataryaların elektrokimyasal yapısı açıklanarak bu yapıların maliyet analizleri Argonne laboratuvarlarında geliştirilen Batpac programı sayesinde ifade edilecektir

2.1. Bataryaların Elektrokimyasal Yapıları

Lityum iyon pillerin çalışma mekanizması göz önüne alındığında deşarj olma durumunda, negatif elektrottaki (anot) lityum iyonları buradan ayrılarak katota doğru hareket eder. Lityum iyonları bir ayırıcı membran karşısında hareket ettikçe elektronlar batarya dış devresine akım üretir. Şarj sırasında ise lityum iyonları katottan ayrılarak anota doğru hareket eder. Bu durum bir dış etkenle gerçekleşir ve şarj işlemine karşılık gelir. Günümüzde elektrikli araçlarda kullanılan batarya kompozisyonları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- $Li_{1.05}(Ni_{1/3}Mn_{1/3}Co_{1/3})_{0.95}O_2$ (NMC-333)
- $Li_{1.05}(Ni_{0.5}Mn_{0.2}Co_{0.3})_{0.95}O_2$ (NMC-523)
- $Li_{1.05}(Ni_{0.6}Mn_{0.2}Co_{0.2})_{0.95}O_2$ (NMC-622)
- $Li_{1.05}(Ni_{0.8}Mn_{0.1}Co_{0.1})_{0.95}O_2$ (NMC-811)
- $Li(Ni_{0.8}Co_{0.85}Al_{0.15})O_2$ (NCA)
- $LiFePO_4$ (LFP)

Bu batarya yapılarının elektrokimyasal reaksiyonları Tablo 2'de verilmektedir [16]. Burada anot olarak grafit temel alınarak reaksiyon mekanizmalar yazılmıştır.

Tablo 2.a Lityum nikel manganez kobalt oksit (NMC) yapısı için elektrokimyasal reaksiyon

Elektrot	Elektrokimyasal Reaksiyon
Anot	$Li_nC_6 \leftrightarrow Li_0C_6 + nLi^+ + ne^-$
Katot	$Li_{m-n}(Ni_xMn_yCo_z)O_2 + nLi^+ + ne^- \leftrightarrow Li_m(Ni_xMn_yCo_z)O_2$
Genel	$Li_nC_6 + Li_{m-n}(Ni_xMn_yCo_z)O_2 \leftrightarrow Li_0C_6 + Li_m(Ni_xMn_yCo_z)O_2$

Tablo 2.b Lityum nikel kobalt alüminyum oksit (NCA) yapısı için elektrokimyasal reaksiyon

Elektrot	Elektrokimyasal Reaksiyon
Anot	$Li_nC_6 \leftrightarrow Li_0C_6 + nLi^+ + ne^-$
Katot	$Li_{m-n}(Ni_xCo_yAl_z)O_2 + nLi^+ + ne^- \leftrightarrow Li_m(Ni_xCo_yAl_z)O_2$
Genel	$Li_nC_6 + Li_{m-n}(Ni_xCo_yAl_z)O_2 \leftrightarrow Li_0C_6 + Li_m(Ni_xCo_yAl_z)O_2$

Tablo 2.c Lityum demir fosfat (LFP) yapısı için elektrokimyasal reaksiyon

Elektrot	Elektrokimyasal Reaksiyon
Anot	$Li_nC_6 \leftrightarrow Li_0C_6 + nLi^+ + ne^-$
Katot	$Li_{m-n}FePO_4 + nLi^+ + ne^- \leftrightarrow Li_mFePO_4$
Genel	$Li_nC_6 + Li_{m-n}FePO_4 \leftrightarrow Li_0C_6 + Li_mFePO_4$

Benzer şekilde sodyum iyon pil kompozisyonlarını ele alacak olursak anot olarak hard karbon ve katot olarak sodyum metal oksit yapıların kullanıldığı elektrokimyasal hücrelerdir. Bu hücreler tıpkı lityum iyon bataryalarda olduğu gibi bataryanın içindeki elektrolit bataryanın iki elektrotu arasındaki kimyasal reaksiyon ortamını oluşturur.

Sodyum iyon bataryalarının olumlu özellikleriyle lityum iyon bataryalarına alternatif olmasının yanında bir takım eksiklikleri de bulunmaktadır. Yapısal olarak ele aldığımızda sodyum katyonunun atom yarıçapı, lityum muadilinden yaklaşık olarak 0,3 Å daha büyük olması, sodyumun atom ağırlığının lityumunkinden 3 kat daha büyük olduğu anlamına gelir. Bu farklılık, teknik sorunlara yol açmaktadır.

Sodyum iyon bataryaların lityum iyon bataryalara göre dezavantajları olsa da fiyat-performans yaklaşımı ile değerlendirildiğinde Li-iyon bataryalara en güçlü alternatif olarak görülmektedir. An itibari ile Na-iyon bataryaların ticari olarak üretimi ile ilgili son yıllarda kurulan firma sayısı hızla artmaktadır. Bunlara örnek olarak

çinli Contemporary Amperex Technology Co., Ltd. (CATL), İngiliz Faradion Limited, İsviçreli Northvolt ve Fransız Tiamat firmaları örnek olarak verilebilir.

Tabakalı yapıdaki bir sodyum iyon ticari hücresinde elektrokimyasal mekanizma Tablo 3’de verilmektedir. Görüldüğü üzere redoks reaksiyon mekanizması Li-iyon bataryalara çok benzemektedir.

Tablo 3. Sodyum iyon bataryaları için farklı geçiş metallerini içeren elektrokimyasal reaksiyon

Elektrot	Elektrokimyasal Reaksiyon
Anot	$Na_nC_6 \leftrightarrow Na_0C_6 + nLi^+ + ne^-$
Katot	$Na_{0,67-n}TMO_2 + nNa^+ + ne^- \leftrightarrow Na_{0,67}TMO_2$
Genel	$Na_nC_6 + Na_{0,67-n}TMO_2 \leftrightarrow Li_0C_6 + Na_{0,67}TMO_2$

2.2. Sodyum Batarya Kompozisyonları ve Kapasite Hesaplama Adımları

Bu bölümde elektrikli araçlarda kullanılan batarya gruplarıyla sodyum bataryalarının verilerini analiz edeceğiz. Yaptığımız çalışmada sodyum bataryalarına ait farklı geçiş metalleri (TM) üretilerek bataryaların performans sonuçları ortaya koyulmaktadır. Buna göre kullanmış olduğumuz geçiş metalleri aşağıdaki gibidir.

- $Na_{0,67}(Mn_{0,44}V_{0,06}Fe_{0,43}Al_{0,07})$ (NaMVA)
- $Na_{0,67}(Mn_{0,44}V_{0,06}Fe_{0,43}Ti_{0,07})$ (NaMVT)
- $Na_{0,67}(Mn_{0,44}Ni_{0,06}Fe_{0,43}Al_{0,07})$ (NaMNiA)
- $Na_{0,67}(Mn_{0,44}Ni_{0,06}Fe_{0,43}Ti_{0,07})$ (NaMNiT)
- $Na_{0,67}(Mn_{0,44}Co_{0,06}Fe_{0,43}Al_{0,07})$ (NaMCA)
- $Na_{0,67}(Mn_{0,44}Co_{0,06}Fe_{0,43}Ti_{0,07})$ (NaMCT)

Burada ilk olarak batarya performansları için en önemli özelliklerden birisi olan teorik kapasite adımını ele alacağız. Buna göre Genel olarak yukarıdaki kompozisyonların özelliklerini ele almak istersek ilk olarak bataryanın teorik kapasitesini aşağıdaki denklemler ile hesaplarız.

$$Q_{teorik} = \frac{nF}{M_w} \quad Asg^{-1} \quad (1)$$

Burada n, F ve M_w sırasıyla yük taşıyıcı sayısı, Faraday sabiti ($F=96\,485.3321 \text{ s A / mol}$) ve elektrot içinde kullanılan aktif materyalin moleküler kütesini temsil etmektedir. Denklem birimleri olan A,s ve g ise sırasıyla amper, saniye ve gram olarak tanımlanır. Denklemdaki saniye (s) birimini saate (h) dönüştürmek istersek aşağıdaki ifadeyi yazabiliriz.

$$Q_{teorik} = \frac{nF}{3600 \times M_w} \quad Ahg^{-1} \quad (2)$$

Yukarıdaki kompozisyonların BatPac programı üzerinden kapasitelerinin teorik hesaplamaları ve mevcut lityum iyon batarya kompozisyonları ile sodyum iyon batarya kompozisyonlarını kıyaslayacağımız verileri üçüncü bölümde ele alınmıştır.

3. Bulgular

Bu kısımda BatPac programından faydalanarak bir takım verileri ele alacağız. BatPac programı bataryaların yüksek miktarda üretimlerinin maliyetlerini tahmin etmekte kullanılan bir yazılımdır. Program güç, enerji, şarj süresi parametrelerinin etkileri ile maliyet hesaplamalarının analizini yapar. Ayrıca bir pil kimyasının, batarya paketinin ve paket tasarımındaki geometrinin maliyet üzerindeki etkilerini ele alabilir.

Bu bağlamda çalışma içerisinde teorik kapasite, maliyet analizi gibi program altyapısı sayesinde hesaplanan değerler incelenmiştir. Buna göre program içerisinde hazır bulunan lityum iyon pil kompozisyonlarına ait değerlerin yanında program ara yüzündeki batarya kimyası içerisine kullanmış olduğumuz sodyum batarya kompozisyonlarının yapısal özelliklerini ekleyerek bir takım sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 4 içerisinde lityum ve kullanmış sodyum kompozisyonlara ait teorik kapasite ile deneysel kapasite değerleri gösterilmiştir. Sodyum kompozisyonlara ait deneysel veriler yapmış olduğumuz çalışmada elde edilmiştir. Lityum bataryalarına ait veriler ise BatPac programı verilerinden alınan güncel değerlerdir.

Tablo 4. Batarya kompozisyonları için teorik ve deneysel kapasite değerleri

BATARYA KİMYASI	TEORİK KAPASİTE	DENEYSEL KAPASİTE
LFP	170 mAh g ⁻¹	150 mAh g ⁻¹
NMC-333	300 mAh g ⁻¹	155 mAh g ⁻¹
NMC-532	299 mAh g ⁻¹	161 mAh g ⁻¹
NMC-622	298 mAh g ⁻¹	180 mAh g ⁻¹
NMC-811	297 mAh g ⁻¹	212 mAh g ⁻¹
$Na_{0,67}(Mn_{0,44}V_{0,06}Fe_{0,43}Al_{0,07})O_2$	178,61mAh g ⁻¹	180,4 mAh g ⁻¹
$Na_{0,67}(Mn_{0,44}V_{0,06}Fe_{0,43}Ti_{0,07})O_2$	176,05 mAh g ⁻¹	150 mAh g ⁻¹
$Na_{0,67}(Mn_{0,44}Ni_{0,06}Fe_{0,43}Al_{0,07})O_2$	177,795 mAh g ⁻¹	193,6 mAh g ⁻¹
$Na_{0,67}(Mn_{0,44}Ni_{0,06}Fe_{0,43}Ti_{0,07})O_2$	175,258 mAh g ⁻¹	175,8 mAh g ⁻¹
$Na_{0,67}(Mn_{0,44}Co_{0,06}Fe_{0,43}Al_{0,07})O_2$	177,777 mAh g ⁻¹	177,8 mAh g ⁻¹
$Na_{0,67}(Mn_{0,44}Co_{0,06}Fe_{0,43}Ti_{0,07})O_2$	175,233 mAh g ⁻¹	210,6 mAh g ⁻¹

Tablo 5 içerisinde ise bu yapılara ait katot materyallerin moleküler ağırlık değerleri gösterilmektedir. Buradaki hesaplamalar yine BatPaC programı kullanılarak elde edilmiştir.

Tablo 5. Batarya kompozisyonlarının moleküler ağırlık değerleri

Moleküler Hesaplamaları	Ağırlık									
Tam Adı	Atom	Ni	Al	Mn	Co	Fe	O	Ti	Na	V
	Atomic MW	58,71	26,98	54,94	58,93	55,85	16	47,9	22,99	50,94
NaMVA	100,537		0,07	0,44		0,43	2,00		0,67	0,06
NaMVT	101,994			0,44		0,43	2,00	0,07	0,67	0,06
NaMNiA	101,016	0,06	0,07	0,44		0,43	2,00		0,67	
NaMNiT	102,467	0,06		0,44		0,43	2,00	0,07	0,67	
NaMCA	101,016		0,07	0,44	0,06	0,43	2,00		0,67	
NaMCT	102,480			0,44	0,06	0,43	2,00	0,07	0,67	

Ele almış olduğumuz batarya katot malzemelerinin mevcut verilerine dayanarak yaklaşık fiyat tahminleri yapılabilir. Bunun için kompozisyonların oluşturulmasında kullanılan bileşiklerin ortalama fiyatlarını Tablo 6 ile ortaya koymaktayız. Buna göre Tablo 6 içerisindeki veriler 2024 yılı itibariyle tedarikçilerin her 100 kilogram başına vermiş oldukları yaklaşık fiyat teklifleridir.

Katot aktif maddelerin fiyatları, Denklem 3'e göre metallerin ortalama piyasa fiyatları üzerinden tahmin edilebilir

$$C = C_0 + \frac{1}{MW} * \sum_i x_i * C_i * MW_i \quad (3)$$

Hammadde fiyatları (C_i) kısmen literatürden ve jeolojik araştırmalardan elde edilmiştir. Bununla birlikte, bazı öncü malzemeler için, bu iş için aşırı yüksek olan yalnızca bir laboratuvarından alınan fiyatlar da mevcuttur. Bununla birlikte çalışma içerisinde kullanılan kompozisyon maliyetlerini Tablo 5 ve Tablo 6 verilerini gerekli stokiometrik hesaplamalar ile kullanarak hesaplayabiliriz

Tablo 6. Katot malzemesinde kullanılan bileşiklerin 2024 yılı onaylanmış satıcı fiyatları

Bileşik	Fiyat (\$/kg)
Co_2O_3	15
Na_2CO_3	2,45
Mn_2O_3	28
V_2O_5	5
Fe_2O_3	6
Al_2O_3	5
NiO	20
TiO_2	1

Tablo 7 içerisinde gördüğümüz katot malzemelerin kilogram başına düşen maliyetleri hesaplanmaktadır. Bu malzemeler için maliyetler Denklem 4'e göre tahmin edilmiştir

$$C_i = \frac{C_M * MW_{M^n}}{MW_i} \quad (4)$$

Tablo 7. Katot aktif malzemelerinin yaklaşık olarak hesaplanan fiyat değerleri

Katot Materyal	Fiyat (\$/kg)
NaMVA	13,22
NaMVT	12,91
NaMNiA	13,66
NaMNiT	13,46
NaMCA	13,63
NaMCT	13,32
LFP	14,00
NMC-333	21,00
NMC-532	20,00
NMC-622	20,60
NMC-811	22,00

Tablo 8 içerisinde yedi farklı batarya için hedeflenen paket gücü, üretim sayısı ve fiziksel parametreler gösterilmektedir.

Tablo 8. Farklı paket güçleri için paketi oluşturan fiziksel parametreler

	Batarya 1	Batarya 2	Batarya 3	Batarya 4	Batarya 5	Batarya 6	Batarya 7
Hedeflenen Pil Paket Gücü 20% SOC, kW	180	220	260	300	120	400	360
Modül başına hücre sayısı (toplam)	12	12	12	12	14	12	18
Modüldeki paralel gruptaki hücre sayısı	1	1	1	1	1	1	2
Satırdaki modül sayısı	5	5	5	5	5	5	6
Paket başına modül sırası sayısı	4	4	4	4	2	4	4
Paralel modül sayısı	1	1	1	1	1	1	1
Yıl başına üretilen paket sayısı	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000
UDDS döngüsü için enerji gereksinimi, Wh/mile	250	250	250	250	250	250	350

Yine BatPac verilerini kullanarak yapmış olduğumuz maliyet analizleri ve bu maliyetleri oluşturan batarya özelliklerini; NMC-333, NMC-523, NMC-622, NMC-811, LFP, NaMVA, NaMVT, NaMNiA, NaMNiT, NaMCA ve NaMCT kompozisyonlarını ele aldığımızda Tablo 9 hedefleri için aşağıdaki sonuçları elde ederiz.

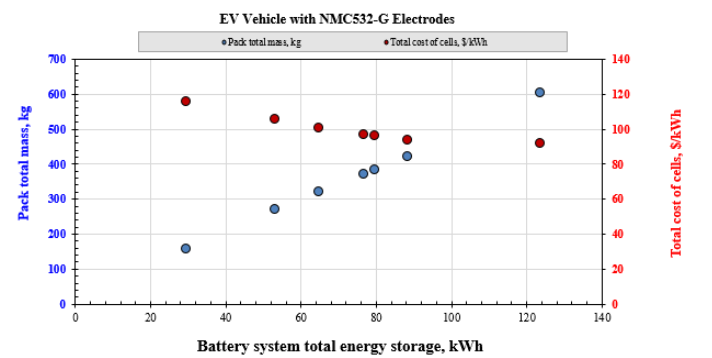
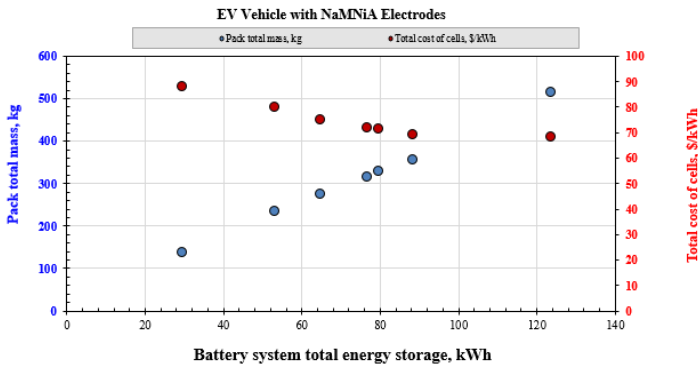
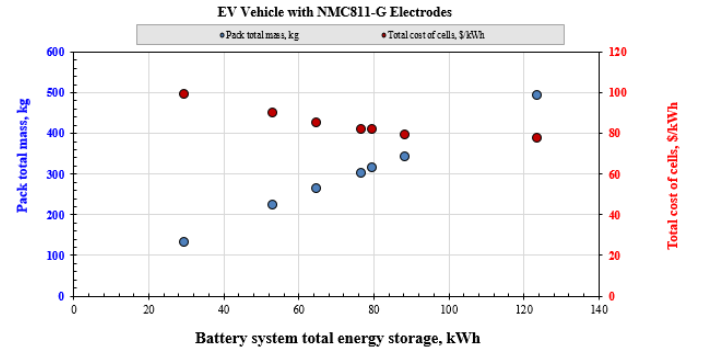
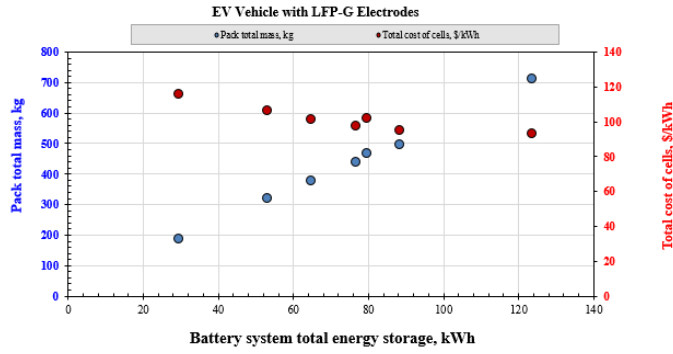
Tablo 9. Batarya kompozisyonları için bataryaların hücre başı maliyetleri

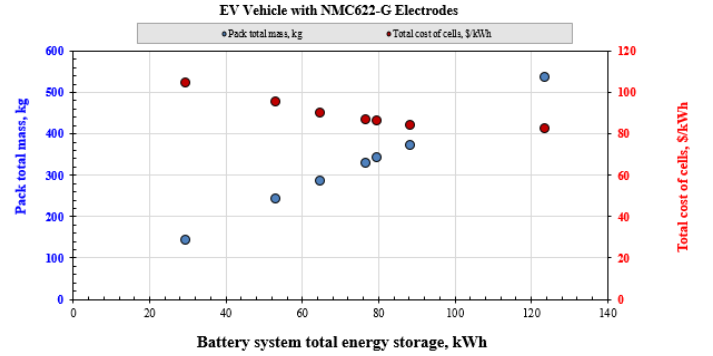
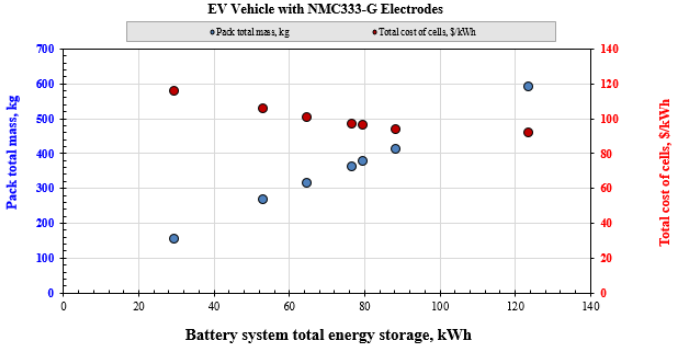
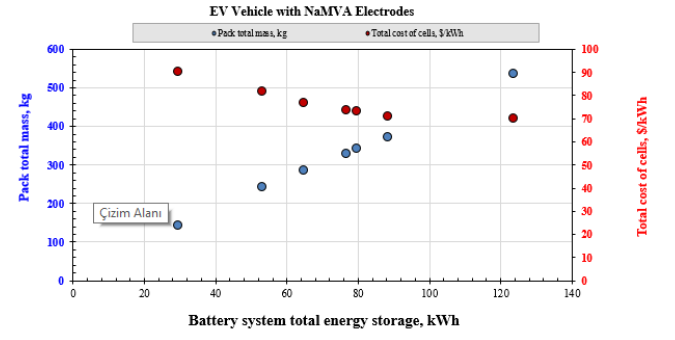
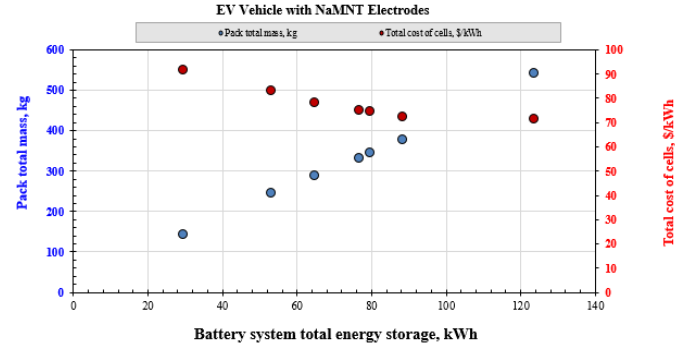
Pozitif Elektrot	Batarya 1 (\$/hücre)	Batarya 2 (\$/hücre)	Batarya 3 (\$/hücre)	Batarya 4 (\$/hücre)	Batarya 5 (\$/hücre)	Batarya 6 (\$/hücre)	Batarya 7 (\$/hücre)
------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------

LFP	8,83	8,5	8,16	7,91	8,285	8,5	5,22
NMC-333	7.865	8.857	9.879	10.837	4.994	10.168	14.480
NMC-532	7.864	8.879	9.878	10.837	4.992	10.167	14.480
NMC-622	7.296	8.175	9.086	9.935	4.661	9.350	13,249
NMC-811	7,041	7.823	8.655	9.473	4.489	8.986	12,588
NaMVA	6.83	6.41	6.16	5.91	6.42	6.08	3.89
NaMVT	7.41	7.00	6.16	6.5	7.00	6.66	4.27
NaMNT	6.91	6.58	6.25	6.08	6.57	6,25	3.94
NaMCA	6.91	6.5	6.25	6.08	6.57	6.25	3.94
NaMNiA	6.67	6.25	6.00	5.83	6.28	6.00	3.78
NaMCT	6.41	6.00	5.75	5.5	6.07	5.75	3.61

Tablo 9 içerisinde farklı katot malzemelerin belirlenen koşullardaki hücre başı maliyetleri gösterilmektedir. Bu durumda Na-iyon bataryaların Li-iyon bataryalara göre maliyetlerinin çok daha düşük olacağını ve yakın gelecekte Na-iyon bataryalar ile üretilecek elektrikli araçların da maliyetlerinin düşeceği açıktır.

Tablo 10. Lityum ve Sodyum bataryalarına ait performans verileri





4. Tartışma ve Sonuç

Günümüzde artan enerji talebi doğrultusunda popülerliği artan yenilenebilir enerji kaynaklarının depolanmasında lityum iyon batarya sistemleri ana aktör konumundadır. Lakin lityum bataryalarının güvenlik riskleri ve maliyeti batarya sistemlerinde bizi alternatif olarak sodyum iyon bataryalarına yöneltti. Sodyum bataryaların elektrokimyasal yapısının lityum bataryalara olan benzerliği malzeme üretiminde altyapısı olan bir sistemi referans almamıza neden oldu.

Yapmış olduğumuz araştırma ile lityum bataryalarına dair elektrikli araçlar baz alınarak kapasite ve menzil gibi performans verileri ele alınmıştır. Buna göre lityum ve sodyum batarya paketinde kullanılan katot materyalinin hücre başı kapasitesini ve maliyetini BatPac program verilerini kullanarak teorik olarak analiz ettik. Bu analizler ile ortaya çıkan Tablo 10 verileri ile batarya performans analizleri ortaya çıktı. Sonuçlara ile sodyum iyon bataryaların fiyat – performans ilişkisinde lityum bataryalara çok güçlü alternatif olabileceği öngörüsünü doğurdu. Ayrıca sodyumun doğada en çok bulunan elementlerden birisi olmasından dolayı maliyet avantajları ve güvenlik risklerinin lityuma bataryalarına nazaran daha az olması yine sodyum iyon pilleri adına gelecek çalışmaları adına umut vaat ettiği görülmektedir. Bu durum yakın gelecekte Na-iyon bataryalar ile çalışan elektrikli araçların da yaygınlaşacağını göstermektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma TUBİTAK-220N335 nolu proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Murat Buldu TUBİTAK-BİÇABA programına verdiği doktora bursundan dolayı teşekkür eder.

Kaynakça

- [1] <https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data/energy-balances,2022>.
- [2] WBA. Global Bioenergy Statistics. 2021 Yearbook; World Bioenergy Association: Stockholm, Sweden, 2021; p. 51
- [3] Aldhafeeri, T.; Tran, M.-K.; Vrolyk, R.; Pope, M.; Fowler, M. A Review of Methane Gas Detection Sensors: Recent Developments and Future Perspectives. *Inventions* **2020**, *5*, 28. [Google Scholar] [CrossRef]

- [4] Shamsi, H.; Tran, M.-K.; Akbarpour, S.; Maroufmashat, A.; Fowler, M. Macro-Level Optimization of Hydrogen Infrastructure and Supply Chain for Zero-emission Vehicles on a Canadian Corridor. *J. Clean. Prod.* **2020**, 125163. [Google Scholar] [CrossRef]
- [5] <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Sera-Gazi-Emisyon-Istatistikleri-1990-2022-53701>
- [6] <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-petrol>
- [7] Omar Ellabban , Haitham Abu-Rub , Frede Blaabjerg, "Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (İngilizce). **39**: 748-764.
- [8] Tran, M.-K.; Sherman, S.; Samadani, E.; Vrolyk, R.; Wong, D.; Lowery, M.; Fowler, M. Environmental and Economic Benefits of a Battery Electric Vehicle Powertrain with a Zinc-Air Range Extender in the Transition to Electric Vehicles. *Vehicles* **2020**, 2, 21. [CrossRef]
- [9] Tran, M.-K.; Bhatti, A.; Vrolyk, R.; Wong, D.; Panchal, S.; Fowler, M.; Fraser, R. A Review of Range Extenders in Battery Electric Vehicles: Current Progress and Future Perspectives. *World Electr. Veh. J.* **2021**, 12, 54. [CrossRef]
- [10] Tran, M.-K.; Akinsanya, M.; Panchal, S.; Fraser, R.; Fowler, M. Design of a Hybrid Electric Vehicle Powertrain for Performance Optimization Considering Various Powertrain Components and Configurations. *Vehicles* **2021**, 3, 2. [Google Scholar] [CrossRef]
- [11] Cunanan, C.; Tran, M.-K.; Lee, Y.; Kwok, S.; Leung, V.; Fowler, M. A Review of Heavy-Duty Vehicle Powertrain Technologies: Diesel Engine Vehicles, Battery Electric Vehicles, and Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicles. *Clean Technol.* **2021**, 3, 28 [Google Scholar] [CrossRef]
- [12] <https://www.statista.com/statistics/827460/global-car-sales-by-fuel-technology/>
- [13] <https://www.canalys.com/newsroom/global-ev-sales-h1-2023>
- [14] Pfrang, A.; Kriston, A.; Ruiz, V.; Lebedeva, N.; di Persio, F. Safety of Rechargeable Energy Storage Systems with a Focus on Li-Ion Technology; Elsevier Inc.: Amsterdam, The Netherlands, 2017. [CrossRef]
- [15] **Sivapriya Mothilal Bhagavathy , Hannah Budnitz , Tim Schwanen , Malcolm McCulloch (2021).** *Impact of Charging Rates on Electric Vehicle Battery Life*. Findings, March
- [16] **Manh-Kien Tran , Andre Da Costa , Anosh Mevawalla , Satyam Panchal and Michael Fowler (2021)** *Comparative Study of Equivalent Circuit Models Performance in Four Common Lithium-Ion Batteries: LFP, NMC, LMO, NCA*, . *Batteries* **2021**, 7, 51. <https://doi.org/10.3390/batteries7030051>.