



ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN BATARYALAR VE TERMAL YÖNETİM SİSTEMLERİNİN İNCELENMESİ

¹Muhammet Yasin KABA , ²Orhan KALKAN , ³Ali CELEN 

Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 24002, Erzincan, TÜRKİYE

¹mykaba@yahoo.com, ²orhan.kalkan@erzincan.edu.tr, ³alicelen@erzincan.edu.tr

(Geliş/Received: 31.05.2021; Kabul/Accepted in Revised Form: 02.09.2021)

ÖZ: Günümüzde içten yanmalı motorlara sahip araçlarla karşılaştırıldıklarında çevreci ve daha yüksek verimli olmaları sebebiyle elektrikli araçlar ön plana çıkmaktadırlar. Elektrikli araçları oluşturan önemli ekipmanlardan biri olan bataryanın seçimi ve termal yönetimi önemlidir. Bu çalışmada, elektrikli araçların genel görünümü (tarihçesi, sınıflandırılması, satış sayıları, pazar payları), elektrikli araçlarda kullanılacak batarya türleri ve batarya termal yönetim sistemleri araştırılmıştır. Uygulamalarda yaygın olarak kullanılan farklı batarya çeşitleri karakteristik özelliklerine göre karşılaştırılmış olup bu bataryalar arasından elektrikli araçlarda kullanılacak/kullanılan batarya türünün yüksek özgül enerji (118-250 Wh/kg), yüksek enerji yoğunluğu (200-400 Wh/L), yüksek özgül güç (200-430 W/kg), yüksek çevrim ömrü (2000) ve ideal çalışma sıcaklığı (-20°C-60°C) özellikleri ile lityum iyon bataryalar olduğu görülmüştür. Bu bataryalardan en fazla performansın elde edilmesi için kullanılacak termal yönetim sistemleri incelenmiş olup bu yöntemlerin avantaj ve dezavantajlarından bahsedilmiştir. Düşük ısı yüküne sahip araçlarda (hibrit elektrikli araçlar vb.) hava ile soğutmanın yeterli olduğu görülmüş olup yüksek ısı yüküne sahip araçlarda (tam elektrikli araçlarda) ise sıvı akışkanlı ve hibrit soğutma yöntemlerinin kullanımının uygun olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli araçlar, Bataryalar, Batarya termal yönetim sistemleri

The Investigation of Batteries and Thermal Management Systems Used in Electric Vehicles

ABSTRACT: Nowadays, electric vehicles come to the fore more than vehicles with internal combustion engines since electric vehicles are environmentally friendly and highly more efficient. Selection and thermal management of the battery, which is one of the most important equipment that constitutes electric vehicles, is important. In this study, the general view (history, classification, sales numbers, market shares) of electric vehicles, battery types that can be used in electric vehicles and battery thermal management systems were investigated. Different types of batteries commonly used in applications are compared according to their characteristics, and among these batteries, it has been observed that the type of battery that can be used in electric vehicles is lithium-ion batteries which have high specific energy (118-250 Wh/kg), high energy density (200-400 Wh/L), high specific power (200-430 W/kg), high cycle life (2000) and ideal operating temperature (-20°C-60°C). The thermal management systems, which can be used to obtain maximum performance from these batteries, are investigated and advantages and disadvantages of these methods are investigated. While it has been seen that air cooling is sufficient in vehicles with low thermal load (hybrid electric vehicles, etc.), it is observed that the use of liquid and hybrid cooling methods is appropriate in vehicles with high thermal load (full electric vehicles).

Key Words: Electric vehicles, batteries, battery thermal management systems

GİRİŞ (INTRODUCTION)

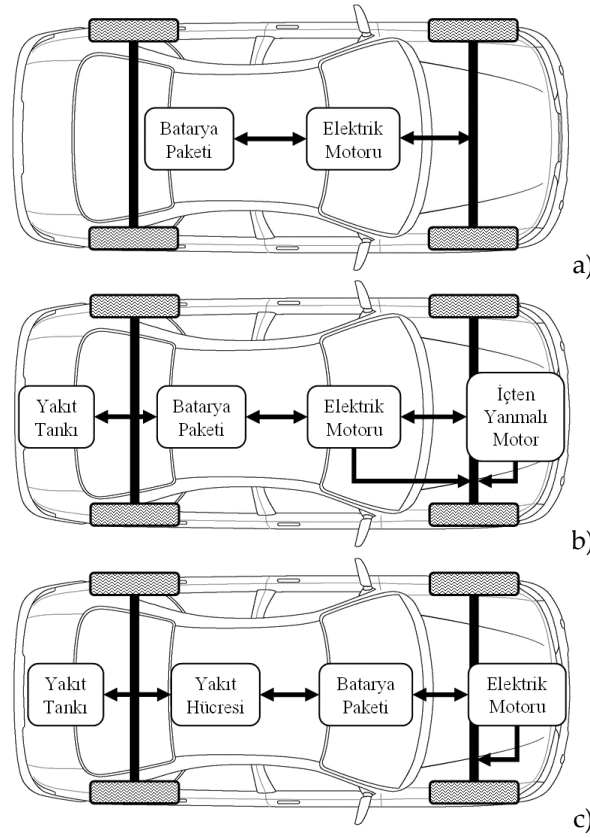
Günümüzde içten yanmalı motorlara sahip araçlarla karşılaştırıldıklarında çevreci ve daha yüksek verimli olmaları sebebiyle elektrikli araçlar ön plana çıkmaktadırlar. Elektrikli araçların tarihçesi 19. yüzyıl dönemine dayanmakta olup tarihte bilinen ilk elektrikli aracı (lokomotif) Thomas Davenport 1835 yılında Amerika'da üretmiştir. Robert Anderson aynı yıllarda (1832-1839) İskoçya'da yaptığı çalışmalar sonucunda bir elektrikli araç (otomobil) geliştirmiş olup bu araç şarj edilebilen bataryalara sahip değildi (Fessler, 2019). 19. Yüzyılın sonlarına gelindiğinde ise Belçikalı yarışçı Camille Jenatzy'nin 1899 yılında geliştirdiği 'La Jamais Contente' olarak da bilinen elektrikli aracı 106 km/h hız ile karada 100 km/h hız sınırını aşan ilk araç olmuştur. Bu yıllardan sonra elektrikli araçlara talep artmış ve lokomotif, bisiklet ve otomobil üretilmeye başlanmıştır (Larminie ve Lowry, 2012). Üretilen otomobillerin dünyadaki ilk elektrikli taksi olarak New York'ta yaygın olarak kullanıldığı bilinmektedir. Bu elektrikli araçların kullanımı ile elektrikli araçlar %38'lik bir pazar payına sahipti. Dönemin piyasasında üretilen içten yanmalı motora sahip araçlar oldukça pahalı olup zor ve gürültülü çalışmaktaydı. 1908 yılında Henry Ford tarafından ilk seri üretilen Model T adlı benzinli araç 1912 yılına gelindiğinde Amerikan araç piyasasında büyük değişikliklere yol açmıştır. Bu değişikliklerin başında seri üretildikleri için benzinli araçların fiyatlarının düşük ve menzillerinin ise daha yüksek olması gelmiştir. Bu sebeple elektrikli araçlar piyasadaki önemlerini kaybetmişlerdir. 1960'lı yılların başında Avrupa ve Amerika'daki hava kirliliğinin oluşumunda büyük bir rol oynayan yoğun üretim yapan fabrikalar, binlerce kişinin sağlık sorunları yaşamasına ve hatta hayatını kaybetmesine neden olmuştur. Yine aynı zamanlarda araç sayısının artması ve ısınmada kullanılan zararlı yakıtlar sebebi ile elektrikli araçlar tekrar gündeme gelmişlerdir (Hedef Filo, 2021). 1971 yılında ise General Motors ve Boeing tarafından NASA için LRV (Lunar Roving Vehicle) adında Ay'ın düşük yer çekimli ortamında çalışmak üzere tasarlanmış hafif, elektrikli bir araç üretilmiştir. Bu araç Ay yüzeyinde hareket etme kabiliyetine sahip olup, Apollo astronotlarının uzay dışı faaliyetlerinin kapsamını genişletmelerine izin vermiştir. Bunun yanı sıra elektrikli araçların prestijini de yükseltmeye faydada bulunmuştur (Nasa Space Science Data Coordinated Archive, 2021). Alman araç üreticisi BMW, 1972 yılında 1602 E adlı bir konsept araç tasarlayıp, bu aracı dönemin Münih Olimpiyat Oyunları'nda sergilemiş olmasına rağmen asla üretime geçememiştir. 1973 yılında çıkan OPEC Petrol Krizi sebebi ile benzin maliyetlerinin yükselmesi elektrikli araç konusunun tekrar gündeme gelmesine olanak sağlamıştır. Takip eden yıllarda Vanguard-Sebring adlı markanın üretmiş olduğu CitiCar adlı model, Washington DC'deki Elektrikli Araç Sempozyumunda sergilenmiştir. CitiCar aracın amaçlanan kullanımı şehir içi olmasına rağmen, aracın klima ve açılır pencerelere sahip olmaması kamuoyunun bu araç hakkındaki fikrini olumsuz yönde etkilemiştir. 1975'te Consumer Reports adlı kuruluş CitiCar'ı kabul edilemez olarak derecelendirinceye kadar aracın 2000 adetten fazla satışı yapılmıştır (Palinski, 2017). 1996 yılında General Motors tarafından EV1 isimli elektrikli araç Amerika'da üretilmiş ve finansal kiralama (leasing) aracılığıyla kullanıcıyla buluşturulmuştur. Daha sonra bu araç kullanıcılardan çok olumlu tepkiler almasına rağmen aracın üretimi durdurulmuş ve kiralanan araçlar firma tarafından geri çağırılmıştır (Fessler, 2019). 1998 yılına gelindiğinde ise Toyota, Prius adlı modelini tanıtmıştır. Bu model dünyada ilk kez ticari olarak pazarlanan ve seri üretilen hibrit araç olma özelliğini taşımaktadır. Üretildiği yıl yaklaşık 18 bin adet satılmış olup dünya çapında satışa sunulduğu ilk yıl ise 50 bin adet satılmıştır (Hedef Filo, 2021). 2010 yılında General Motors firması tarafından Chevrolet Volt adlı araç piyasaya sürülmüştür. Bu araç ticari olarak satılan ilk şarjlı hibrit araç olma özelliğini taşımaktadır. Yine 2010 yılının sonlarında Japon araç üreticisi Nissan, tamamen elektrikli, Nissan Leaf adlı modeli piyasaya sürmüştür. 2011 yılında Mitsubishi i-MiEV 10 binden fazla satış yapan ilk elektrikli araç olma unvanını almıştır. 2012 yılında Tesla şirketi dünyanın önde gelen otomobil gazetecileri ve tüketici teknolojisi inceleme şirketi Consumer Reports'tan hızla en yüksek puanları alan modelini (Model S) piyasaya sürmüştür. Bu araç çoğu kişi tarafından, dünyadaki her türden en iyi seri üretim arabası olarak kabul edilmiştir. 2013 yılında Nissan Leaf 50 binden fazla satış yapan ilk elektrikli araç olmuştur. Yine 2013 yılının belirli aylarında Nissan Leaf ve Tesla Model S, Norveç'te tüm araç kategorilerinde en çok satış yapan elektrikli araç olma unvanını kazanmıştır. Aynı yıl Renault ve Nissan firmaları bir çatıda birleşerek dünya çapında 100 bin şarjlı hibrit araç satışı gerçekleştirmiş ve bunu yapan ilk şirket olmuşlardır. 2014 yılında araç üreten

firmaların büyük bir çoğunluğu mevcut modellerine hibrit araçlar ekleyerek veya tam elektrikli araçlar üreterek elektrikli araç piyasasında yer kazanmışlardır (Clean Technica, 2021).

Karbondioksit, karbon monoksit, hidrokarbonlar, nitrojen oksitler gibi zararlı gazların çevreye salınımının olmadığı elektrikli motorlu araçların üretiminin ve piyasada kazandığı önemin artmasıyla birlikte, günümüzde araştırmacılar da elektrikli araçlar üzerine çalışmalarını arttırmışlardır. Yapılan çalışmalarda, içten yanmalı motorlara kıyasla daha düşük maliyetli işletme koşullarına sahip, egzoz emisyonu düşük ve sessiz bir ortam sağlayan elektrik motorlu araçların geliştirilmesi de ele alınmıştır (Tie ve Tan, 2013). Toplumdaki çevreye duyarlılığın da bu ölçütte artmasına ile birlikte küresel ısınma ve fosil yakıtların azalması gibi insan hayatını etkileyen birçok etkiden dolayı elektrikli araçlar birçok tüketicinin de tercihi olmaktadır (Şenlik, 2015).

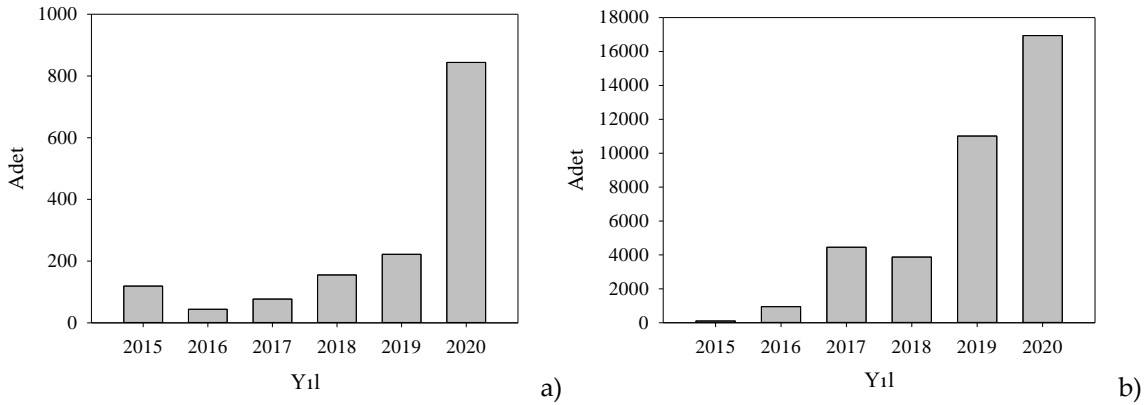
Elektrikli araçlar, tamamen elektrikli araç, hibrit araç ve yakıt hücreli araç olmak üzere üç ana sınıfa ayrılırlar (Ehsani ve diğ., 2018). Şekil 1a'dan da görülebileceği üzere, tamamen elektrikli araçlar temel olarak bünyesinde büyük hacme sahip bir batarya paketi ve elektrik motorunu barındırırlar. Bataryadan alınan enerji kullanılarak elektrik motorlar sayesinde hareket sağlanması ve rejeneratif frenleme sayesinde bataryanın şarj edilebilmesi elektrikli araçların avantajları olarak sıralanırken, hibrit araçlara kıyasla daha büyük ağırlıklara sahip bataryalar kullanılması, içten yanmalı motorlu araçlara kıyasla kısıtlı menzile sahip olmaları ve tam şarjlarının uzun süre almaları gibi dezavantajları da mevcuttur. Şekil 1b'de şematik resmi verilen hibrit araçlar ise küçük hacme sahip bir batarya paketi, elektrik motoru, içten yanmalı bir motor ve yakıt tankından oluşmaktadır. Hibrit araçlar elektrik güçlerine göre mikro (2-5 kW), küçük (10-20 kW), tam (15-100 kW) ve şarjlı hibrit (70 kW'dan büyük) olarak sınıflandırılmaktadır. Bu araçların avantajları hem elektrik motorlarına hem de içten yanmalı motorlara sahip olmaları dolayısıyla veriminin büyük ölçüde artması ve egzoz emisyonlarının önemli oranda azalması olarak ifade edilebilirken dezavantajları ise elektrikli motor kullanılarak kat edilebilecek menzilin kısıtlı olması ve araç maliyetlerinin yüksek olmasıdır (Dinçer ve diğ., 2016). Şekil 1c'de şematik resmi verilen yakıt hücreli araçlarda ise güç, havanın ve yakıtın elektrokimyasal tepkimesi sonucu elektrik üreten yakıt hücresi sistemleri aracılığıyla elde edilir. Yakıt hücreleri genellikle anot, katot ve elektrolitten oluşurlar. Bu hücrelere sahip araçlarda hücreler, elektrik motorunun ihtiyacı olan enerjiyi ürettikleri için elektrikli araç sınıfına girmektedirler. Yakıt hücreli araçlar yakıt hücresi, yakıt tankı, elektrik motoru ve bataryadan oluşmaktadır. Yüksek verimlilik, egzoz emisyonlarının önemli oranda az olması, gürültüsüz olmaları, hafif ve kompakt yapıda olmaları gibi avantajları varken, pahalı olmaları, hidrojenin üretimi, dağıtımı ve depolanmasının zorlukları gibi dezavantajları vardır (Mustafa ve diğ., 2010).

Elektrikli araçlar için günümüzün en yaygın problemlerinden birisi de şarj konusu olup çeşitli güçlerde şarj istasyonları ve çeşitli tiplerde şarj soketleri mevcuttur. Elektrikli araçlarda şarj, temaslı ve temassız olmak üzere ikiye ayrılır. Temaslı şarj elektrikli aracın bir kablo aracılığıyla şebeke ya da şarj istasyonuna bağlanması sonucu gerçekleşir. Temassız şarj ise cep telefonu gibi birçok elektronik cihazda kullanılan hem kablosuz hem de hızlı şarj teknolojisinin elektrikli araçlarda da uygulanması durumudur (Durmuş ve Kaymaz, 2020).



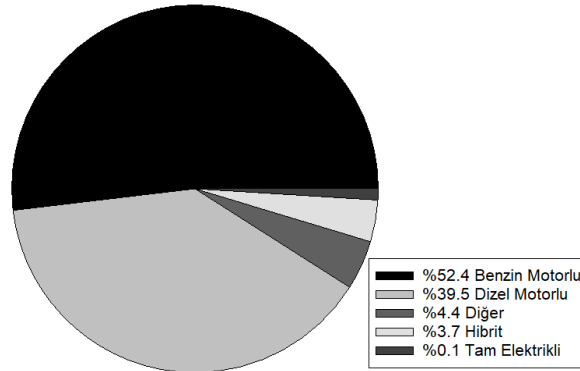
Şekil 1. Elektrikli araçların temel bileşenleri, a) %100 elektrikli araçlar, b) hibrit araçlar ve c) yakıt hücreli araçlar

Figure 1. Basic components of electric vehicles a) 100% electric vehicles, b) hybrid vehicles and c) fuel cell vehicles



Şekil 2. Türkiye’de elektrikli araç satışlarının yıllara göre değişimi a) %100 elektrikli araçlar, b) hibrit araçlar (Türkiye Elektrikli ve Hibrit Araçları Derneği, 2021)

Figure 2. Change in electric vehicle sales in Turkey by years a) 100% electric vehicles and b) hybrid vehicles (Türkiye Elektrikli ve Hibrit Araçları Derneği, 2021)

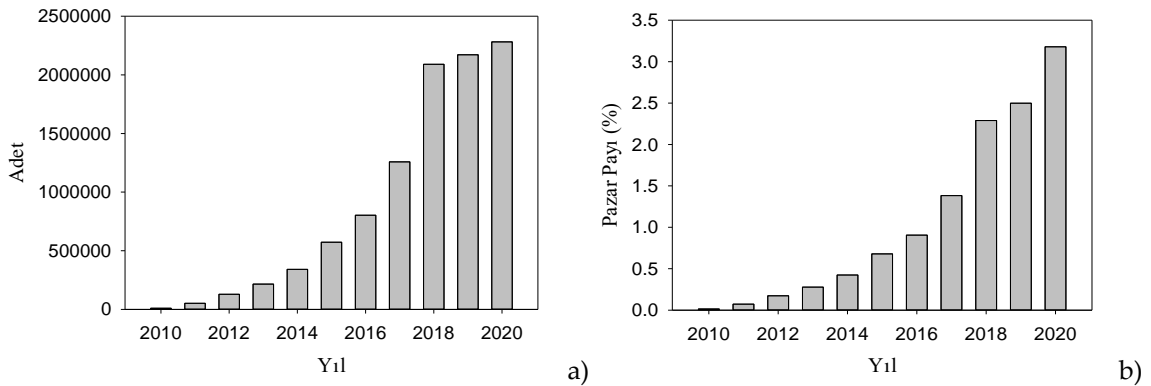


Şekil 3. 2020 yılı Türkiye otomobil pazarı (Türkiye Elektrikli ve Hibrit Araçları Derneği, 2021)

Figure 3. Turkish automobile market in 2020 (Türkiye Elektrikli ve Hibrit Araçları Derneği, 2021)

Ülkemizde önceki yıllar ile karşılaştırıldığında 2020 yılında elektrik araçlara olan talebin artmış olduğunu ve bu elektrikli araçlar arasından hibrit araçların daha çok tercih edildiği fark edilmektedir. Bu fark Şekil 2a) ve Şekil 2b)'deki elektrikli araç satışlarının yıllara göre değişimini gösteren grafikten de açıkça görülmektedir. 2020 Türkiye Otomobil Pazarına bakıldığında ise elektrikli araçlar bu pazarın %3,8'ini kapsamaktadırlar. Şekil 3'te de görüldüğü üzere bu pazarın geri kalan %52,4'ünü benzin motorlu araçlar, %39,5'ini dizel motorlu araçlar ve geriye kalan %4,4'ünü ise diğer araçlar oluşturmaktadır (Türkiye Elektrikli ve Hibrit Araçları Derneği, 2021).

Şekil 4a ve Şekil 4b'de verilen grafiklerde sırası ile 2010-2020 yılları arasında küresel çapta elektrikli araçların satış sayıları ve bu satışların otomobil piyasasındaki pazar payı görülebilmektedir (International Energy Agency, 2021). Bu grafiklerden de anlaşılacağı üzere elektrikli araçların satış adetleri 2018 yılından itibaren hızla artmış ve dünya pazarında daha fazla yer almaya başlamışlardır.



Şekil 4. 2010-2020 yılları arasında a) dünyadaki elektrikli araçların satış sayısı, b) elektrikli araçların küresel pazardaki payı (International Energy Agency, 2021)

Figure 4. Between the years 2010-2020 a) the number of sales of electric vehicles in the world and b) the share of electric vehicles in the global market (International Energy Agency, 2021)

2021 yılı için yapılan bir araştırmada dünya çapındaki birçok araç üreticisi arasından seçilmiş en iyi elektrikli ve hibrit araçların (Forbes, 2021a; Forbes, 2021b) batarya kapasitesi, beygir gücü, tork, yakıt tüketimi menzil ve fiyatlarına göre karşılaştırmalı listesi Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. 2021 yılına ait bazı elektrikli ve hibrit araçlar

Table 1. Some electric and hybrid vehicles of 2021

Araç Adı	Model Yılı	Tipi	Batarya Kapasitesi	Beygir Gücü	Tork	Karışık Yakıt Tüketimi	Menzil	Fiyat
			kWh	hp	lb-ft	MPGe		
Audi e-tron (Car and Driver, 2021a)	2021	EV	95	355	414	78	220	80195
Chevrolet Bolt (Car and Driver, 2021b)	2021	EV	60	200	266	118	259	42695
Ford Mustang Mach-E (Car and Driver, 2021c)	2021	EV	68	266	428	93	211	50800
Honda Insight (Car and Driver, 2021d)	2021	HEV	1,2	151	99	48	540	30035
Honda Accord (Car and Driver, 2021e)	2021	HEV	1,3	212	129	48	614	35805
Hyundai Ioniq (Car and Driver, 2021f)	2020	HEV	1,6	139	109	55	654	32195
Hyundai Kona (Car and Driver, 2021g)	2021	EV	64	201	291	120	258	45600
Hyundai Sonata (Car and Driver, 2021h)	2021	HEV	1,62	192	139	47	594	36305
Kia Optima (Car and Driver, 2021i)	2020	HEV	1,76	192	271	42	668	23390
Lexus ES (Car and Driver, 2021j)	2020	HEV	29,1	215	163	44	567	39900
Porsche Taycan (Car and Driver, 2021k)	2021	EV	93,4	750	774	68	190	204330
Tesla Model 3 (Car and Driver, 2021l)	2021	EV	82	506	487	315	113	51190
Tesla Model Y (Car and Driver, 2021m)	2021	EV	75	456	471	303	111	55190
Toyota Avalon (Car and Driver, 2021n)	2021	HEV	-	215	163	43	567	44395
Toyota Camry (Car and Driver, 2021o)	2021	HEV	1,6	208	163	46	580	33715
Toyota Corolla (Car and Driver, 2021p)	2020	HEV	1,3	121	105	52	700	24095
Toyota Prius (Car and Driver, 2021q)	2021	HEV	8,8	121	105	52	610	33645
Toyota RAV4 Prime (Car and Driver, 2021r)	2021	HEV	18,1	219	163	40	594	33975
Volkswagen ID.4 (Car and Driver, 2021s)	2021	EV	82	201	229	97	250	45190

ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN BATARYA TİPLERİ VE ÖZELLİKLERİ (BATTERY TYPES AND SPECIFICATIONS USED IN ELECTRIC VEHICLES)

Bir elektrikli/hibrit araç tasarımında en önemli parametrelerden birisi uygun batarya tipinin seçimidir. Uygun batarya seçimi aracın performansı ve menzilinı doğrudan etkilemektedir. Elektrikli araçlarda kullanılacak birçok batarya çeşidi bulunmaktadır. Bu batarya çeşitleri Çizelge 3'te nominal gerilim, şarj, deşarj, minimal gerilim, spesifik enerji, şarj hızı, deşarj hızı, çevrim ömrü, termal sınır ve uygulama alanlarına göre karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Batarya terminolojisinde önemli kavramlardan olan nominal gerilim, bataryanın deşarjı süresince sağladığı gerçek gerilim değeridir. Minimal gerilim, bataryanın üretici firma tarafında tavsiye ettiği deşarj kesme gerilimi olarak tanımlanabilir. Bir bataryanın spesifik enerjisi birim ağırlık başına sahip olduğu enerji miktarını temsil etmektedir. Bataryanın şarj ve deşarj hızı olarak bilinen değerler ise sırasıyla bataryaya aktarılan ve bataryadan çekilen akım miktarlarının, batarya kapasitesine oranı olarak tanımlanmıştır. Bununla birlikte bataryanın kaç adet şarj/deşarj döngüsü yapabildiği, bataryanın çevrim ömründen anlaşılmaktadır. Bataryalar için belirlenen termal sınır ise batarya sıcaklığının çıkabileceği maksimum değeri göstermektedir (Battery University Group, 2021a; Battery University Group, 2021b; Battery University Group, 2021c; Battery University Group, 2021d).

Bu bataryalar içinden genellikle lityum iyon bataryalar, yüksek özgül enerji (118-250 Wh/kg), yüksek enerji yoğunluğu (200-400 Wh/L), yüksek özgül güç (200-430 W/kg), yüksek çevrim ömrü (2000) ve ideal çalışma sıcaklığı (-20°C-60°C) gibi özellikleri nedeniyle tercih edilmektedirler (Yong ve diğ., 2015).

Lityum iyon bataryalar genelde silindirik veya prizmatik geometrik yapıya sahiptir. Lityum iyon bataryalar kendi aralarındaki elektrikselsel bağlantı konfigürasyonları değiştirilerek (seri ya da paralel) elektrikli araçlarda kullanılmak üzere gruplar, modüller ve batarya paketlerini oluşturmaktadırlar. Tek bataryalar hücre olarak adlandırılmaktadırlar. Hücrelerin birbirlerine bağlanması ile gruplar, grupların birbirlerine bağlanmasıyla modüller, modüllerin birbirlerine bağlanmasıyla ise batarya paketleri oluşmaktadır (Lelie ve diğ., 2018).

Çizelge 2. Elektrikli araçlarda batarya paketi oluşumunun şematik gösterimi (Celen ve Kaba, 2021)*Table 2. Schematic representation of battery pack formation in electric vehicles (Celen and Kaba, 2021)*

	Gerilim	Akım
Hücre (Tek Batarya)	3,75 V ↓	3,1 Ah ↓
Grup (74 adet bataryanın birbirleri ile paralel bağlanması)	3,75 V ↓	229,4 Ah ↓
Modül (6 adet grubun birbirleri ile seri bağlanması)	22,5 V ↓	229,4 Ah ↓
Paket (16 adet modülün birbirleri ile seri bağlanması)	360 V	229,4 Ah

Çizelge 2’de silindirik lityum iyon bataryaların kullanılması ile oluşturulan bir %100 elektrikli araca ait batarya paketi görülmektedir. Çizelge 2’de gösterildiği gibi, bir adet batarya (hücre) 3,75 V gerilime, 3,1 Ah akıma ve 11,625 Wh güce sahiptir. 74 adet bataryanın birbirleri ile paralel bağlanması sonucu bir adet grup oluşmaktadır. Bu grup 3,75 V gerilime, 229,4 Ah akıma ve 860,25 Wh güce sahiptir. 6 adet grubun birbirleri ile seri bağlanması sonucunda bir adet modül oluşmaktadır. Bu modül 22,5 V gerilime, 229,4 Ah akıma ve 5161,5 Wh güce sahiptir. 16 adet modülün birbirleri ile seri bağlanması sonucunda ise bir adet batarya paketi oluşmaktadır. Bu batarya paketi 360 V gerilime, 229,4 Ah akıma ve 82584 Wh güce sahiptir (Celen ve Kaba, 2021).

Lityum iyon bataryalar belirli çalışma sıcaklıkları aralığında verimli çalışmaktadır. Batarya sıcaklığının 15°C-40°C aralığının dışında ve bataryalar arası maksimum sıcaklık farkının 5°C’nin üzerinde olması durumunda, bataryaların performansının, ömrünün ve güvenliğinin olumsuz yönde etkilendiği farklı araştırmacılar tarafından ortaya koyulmuştur (Arora, 2018; Chen ve diğ., 2016; Pesaran, 2002; Ye ve diğ., 2015).

Buna ek olarak, bataryalardaki sıcaklık artışının elektrikli araçların performansını etkilemesinin yanı sıra bataryaların ömrünü de olumsuz açıdan etkilemektedir. Sıcaklık, bataryadaki katı elektrot ara yüzey katmanının oluşum hızını ve çatlak yayılma hızını doğrudan etkilediği için batarya ömrünü belirleyen önemli bir faktördür. Daha düşük sıcaklıktaki çalışma koşulları, katı elektrot ara yüzey katmanının büyümesini yavaşlatarak batarya ömrünü uzatır. Sıcaklık artışına bağlı olarak oluşan lityum iyon kayıpları nedeni ile batarya kapasitesinin de azaldığı görülür. Daha yüksek sıcaklıklar, bataryadaki çatlak büyüme oranını ve elektrot ara yüzey katmanı tabakasının büyüme oranını artırarak, çatlak yüzeylerde daha fazla elektrot tabakası ara yüzey katmanı oluşumuna neden olur. Bataryada oluşan çatlak yayılması sıcaklığın artmasıyla artar ve bu çatlakların yayılmasının kapasite ve güç kaybına sebep olur (Li ve diğ., 2018).

ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN BATARYA TERMAL YÖNETİM SİSTEMLERİ (BATTERY THERMAL MANAGEMENT SYSTEMS USED IN ELECTRIC VEHICLES)

Elektrikli araçların bataryalarındaki sıcaklık artışını önlemek ve bataryaların performansının, ömrünün ve güvenliğinin olumsuz etkilerini ortadan kaldırmak amacı ile birçok farklı termal yönetim sistemi araştırmacılar tarafından geliştirilmiştir. Batarya termal yönetim sistemleri Şekil 5’te de görüldüğü üzere enerji tüketimine göre, yöntemde kullanılan akışkanın türüne göre ve soğutma sisteminin düzenine göre sınıflandırılmaktadır (Arora, 2018).

Çizelge 3. Uygulamalarda kullanılan batarya çeşitleri (Battery University Group, 2021b; Battery University Group, 2021c; Battery University Group, 2021d)

Table 3. Battery types used in applications (Battery University Group, 2021a; Battery University Group, 2021b; Battery University Group, 2021c)

Kullanım	Termal Sınır (°C)	Çevrim Ömrü	Deşarj Hızı (C)	Şarj Hızı (C)	Spesifik Enerji (Wh/kg)	Minimal Gerilim (V)	Deşarj (V)	Şarj (V)	Nominal Gerilim	Kurşun Bazlı					Nikel Bazlı					Lityum Bazlı				
										SLI (Sulu)	Derin Döngülü (Sulu)	AGM (Kuru)	Jel (Kuru)	ALC	NiCd	NiMH	NiFe	NiZn	NiH	LCO	LMO	NMC	LFP	NCA
Otomobiller (Marş, Işık)	-	12-15	Yüksek	Yüksek	30-50	-	1,75	2,45	2	Nikel-kadmiyum	Nikel-metal hidrit	Nikel-demir	Nikel-çinko	Nikel-hidrojen	Lityum-kobalt oksit	Lityum-manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-demir fosfat	Lityum-nikel kobalt	Lityum-titanat				
Az Sayıda Döngüye İhtiyaç Duyan Araç/ Cihazlar	-	150-200	Orta	Orta veya Yüksek	20-30	-	1,75	>2,40	2	Nikel-kadmiyum	Nikel-metal hidrit	Nikel-demir	Nikel-çinko	Nikel-hidrojen	Lityum-kobalt oksit	Lityum-manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-demir fosfat	Lityum-nikel kobalt	Lityum-titanat				
Askeri, Uçak, Yanış Araçları, Nascar Araçları, Denizcilik	-	5-10 Yıl	Orta veya Yüksek	Yüksek	20-30	-	1,75	<2,40	2	Nikel-kadmiyum	Nikel-metal hidrit	Nikel-demir	Nikel-çinko	Nikel-hidrojen	Lityum-kobalt oksit	Lityum-manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-demir fosfat	Lityum-nikel kobalt	Lityum-titanat				
Otobüsler, Kamyonlar, Endüstri	-	>5-10	Yüksek	Yüksek	20-30	-	1,75	2,45	2	Nikel-kadmiyum	Nikel-metal hidrit	Nikel-demir	Nikel-çinko	Nikel-hidrojen	Lityum-kobalt oksit	Lityum-manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-demir fosfat	Lityum-nikel kobalt	Lityum-titanat				
Otomobiller, Askeri, Enerji Depolama	-	>5-10	Yüksek	Yüksek	20-30	-	1,75	2,45	2	Nikel-kadmiyum	Nikel-metal hidrit	Nikel-demir	Nikel-çinko	Nikel-hidrojen	Lityum-kobalt oksit	Lityum-manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-demir fosfat	Lityum-nikel kobalt	Lityum-titanat				
Uçaklar, Geniş Sıcaklık Aralığı Gereken Durumlar	-	1000	>1	>1	45-80	-	1,75	-	1,20	Nikel-kadmiyum	Nikel-metal hidrit	Nikel-demir	Nikel-çinko	Nikel-hidrojen	Lityum-kobalt oksit	Lityum-manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-demir fosfat	Lityum-nikel kobalt	Lityum-titanat				
Hibrit Araçlar, Tüketiciler	-	300-500	1	0,5-1	60120	-	1,75	-	1,20	Nikel-kadmiyum	Nikel-metal hidrit	Nikel-demir	Nikel-çinko	Nikel-hidrojen	Lityum-kobalt oksit	Lityum-manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-demir fosfat	Lityum-nikel kobalt	Lityum-titanat				
Bombalar, Roketler, Madencilik, Demiryolu	-	20 Yıl	Orta	-	50	-	1,75	-	1,20	Nikel-kadmiyum	Nikel-metal hidrit	Nikel-demir	Nikel-çinko	Nikel-hidrojen	Lityum-kobalt oksit	Lityum-manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-demir fosfat	Lityum-nikel kobalt	Lityum-titanat				
Ticari Pazar	-	200-300	Yüksek	Düzenli	100	-	1,75	1,9	1,65	Nikel-kadmiyum	Nikel-metal hidrit	Nikel-demir	Nikel-çinko	Nikel-hidrojen	Lityum-kobalt oksit	Lityum-manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-demir fosfat	Lityum-nikel kobalt	Lityum-titanat				
Uydular	-	>70000	-	-	40-75	-	1,75	-	1,25	Nikel-kadmiyum	Nikel-metal hidrit	Nikel-demir	Nikel-çinko	Nikel-hidrojen	Lityum-kobalt oksit	Lityum-manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-demir fosfat	Lityum-nikel kobalt	Lityum-titanat				
Cep Telefonu, Tablet, Laptop, Kamera	150	500-1000	1	-	150-200	-	3,00	4,20	3,60	Lityum-kobalt oksit	Lityum-manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-kobalt oksit	Lityum-manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-demir fosfat	Lityum-nikel kobalt	Lityum-titanat				
Elektrikli Aletler, Tıbbi Cihazlar, Aktarma Organları	250	300-700	1-10	0,7-1	100-150	-	3,00	4,20	3,60	Lityum-kobalt oksit	Lityum-manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-kobalt oksit	Lityum-manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-demir fosfat	Lityum-nikel kobalt	Lityum-titanat				
Elektrikli Bisikletler, Tıbbi Cihazlar, Elektrikli Araçlar	210	1000-2000	1-2	0,7-1	150-220	-	3,00	>4,20	3,60-3,70	Lityum-kobalt oksit	Lityum-manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-kobalt oksit	Lityum-manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-demir fosfat	Lityum-nikel kobalt	Lityum-titanat				
Yüksek Akım ve Dayanıklılık Gerektiren Durumlarda	270	1000-2000	1-25	1	90-120	-	3,00	3,65	3,20-3,30	Lityum-kobalt oksit	Lityum-manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-kobalt oksit	Lityum-manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-demir fosfat	Lityum-nikel kobalt	Lityum-titanat				
Medikal, Endüstriyel, Elektrikli Araçlar	150	500	1	1	200-260	-	3,00	4,20	3,60	Lityum-kobalt oksit	Lityum-manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-kobalt oksit	Lityum-manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-demir fosfat	Lityum-nikel kobalt	Lityum-titanat				
Elektrikli Araçlar, Güneş Enerjili Aydınlatma	Yok	3000-7000	1-10	1-5	70-80	-	3,00	2,85	2,40	Lityum-kobalt oksit	Lityum-manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-kobalt oksit	Lityum-manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-demir fosfat	Lityum-nikel kobalt	Lityum-titanat				

Akışkan Türüne Göre Batarya Termal Yönetim Sistemleri (Battery Thermal Management Systems According to Fluid Type)

Hava ile batarya termal yönetim sistemleri (Battery thermal management systems with air)

Hava ile batarya termal yönetim sistemleri doğal ve zorlanmış taşınımlı sistemler olmak üzere iki grupta incelenirler. Bu sistemlerde, bataryayı ısıtmak/soğutmak için kullanılacak hava doğrudan atmosferden ya da araç kabininden alınabilir (Sökmen ve Çavuş, 2017).

Batarya termal yönetim sistemlerinde akışkan olarak hava kullanılmasının avantajları düşük maliyet, kolay bakım, düşük ağırlık, basit tasarım ve kaçak sorununun olmaması iken dezavantajları havanın düşük ısıl performansı, bataryalar arasında oluşan yüksek sıcaklık farkı, sistemde kullanılan yüksek fan gücü ve gürültüsü olarak ifade edilebilir.

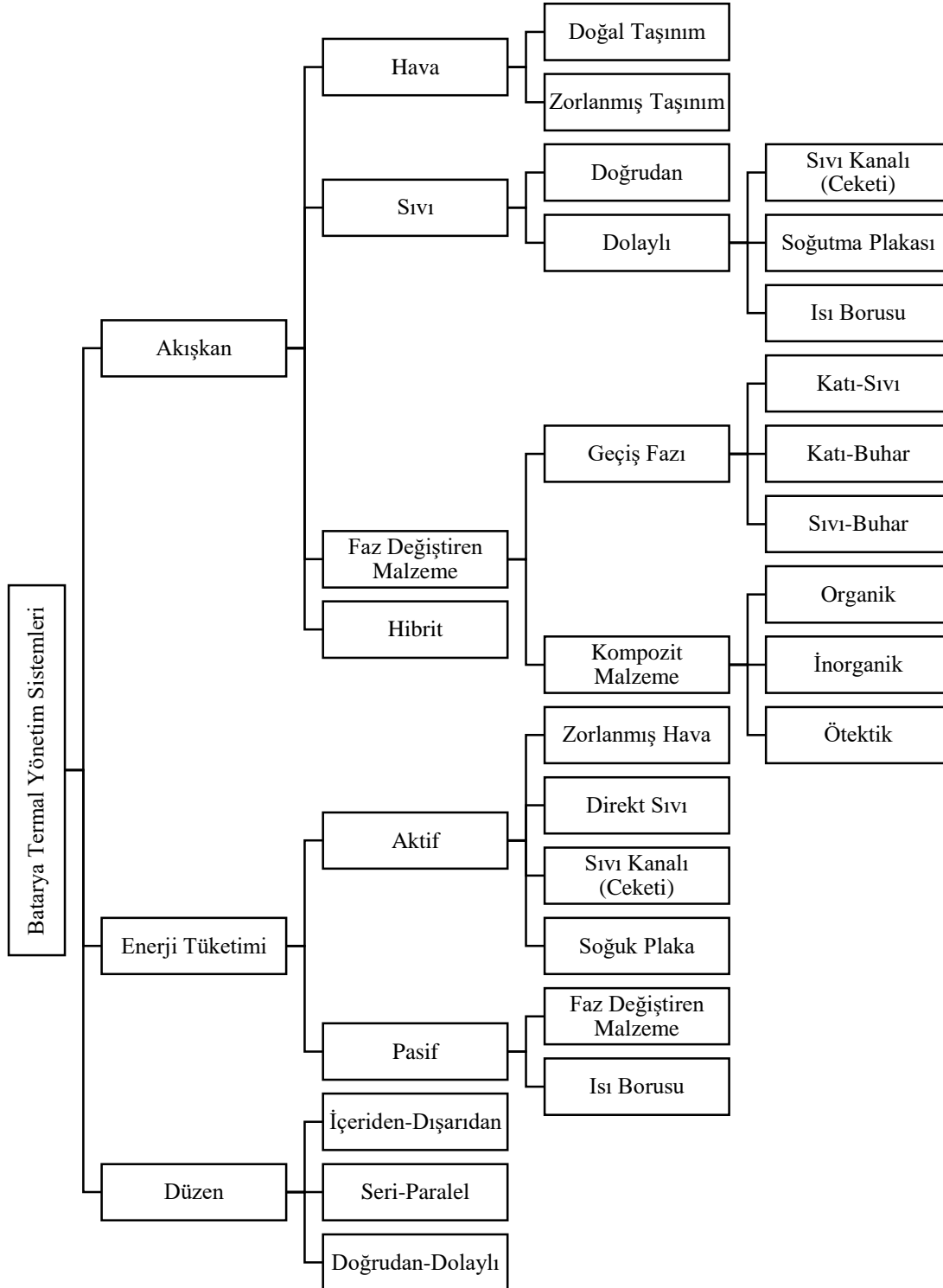
Sıvı ile batarya termal yönetim sistemleri (Battery thermal management systems with liquid)

Sıvı ile batarya termal yönetim sistemleri doğrudan ve dolaylı batarya termal yönetim sistemleri olarak iki gruba ayrılırlar.

Doğrudan batarya termal yönetim sistemlerinde bataryalar sıvı ile doğrudan temas halindedir. Bu sistemler, uygulamada yaygın olarak kullanılmasa da yüksek güce sahip batarya paketlerinin yüksek hızlardaki şarj/deşarj sırasında açığa çıkabilecek aşırı ısınmanın önüne geçebilmek için kullanılabilir. Bu sistemlerde kullanılan akışkanın düşük viskoziteye, yüksek termal iletkenliğe ve termal kapasiteye sahip dielektrik bir yapıda olması istenir. Şekil 6a'da doğrudan sıvı soğutmanın kullanıldığı bir batarya termal yönetim sistemi verilmiş olup bu sistemlerde akışkan bir ısıtıcı/soğutucu (ısı değiştiricisi) vasıtası ile şartlandırılır. Şartlandırma işleminin ardından sıvı, batarya paketine gönderilir ve batarya yüzeyine doğrudan temas ederek soğutma işlemini gerçekleştirir. Batarya paketinden ayrılan akışkan bir pompa aracılığı ile tekrar ısı değiştiricisine gönderilerek çevrimin tamamlanması sağlanır (Li ve Zhu, 2014).

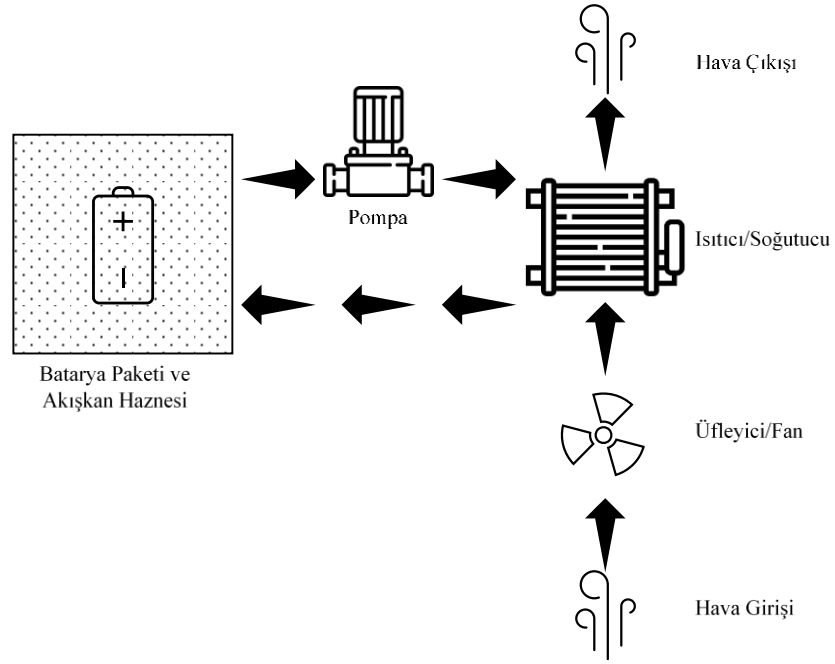
Dolaylı batarya termal yönetim sistemlerinde ise akışkan batarya yüzeyleri ile doğrudan temas etmemekte olup batarya ve akışkan arasında soğutucu plaka, sıvı kanalı (ceketi), ısı borusu vb. gibi ekipmanlar kullanılır. Akışkan olarak ise genellikle su-glikol karışımı kullanılmaktadır. Dolaylı batarya termal yönetim sistemleri, doğrudan batarya termal yönetim sistemleri ile karşılaştırıldıklarında pratikliği, güvenilirliği ve kararlılığı sebebi ile elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Bu sistemlerden biri olarak soğutucu plaka ile soğutma yöntemi Şekil 6b'de gösterilmiştir. Isı borusu, sıvı kanalı (ceketi) vb. ekipmanların kullanıldığı soğutma sistemlerindeki kullanılan araçlar da neredeyse aynıdır. Bu sistemin çalışma prensibi doğrudan batarya termal yönetim sistemi ile aynı olup tek fark sıvının batarya yüzeyine doğrudan temas etmek yerine batarya ile sıvı yüzey arasında bulunan bir katı yüzey üzerinden akmasıdır (Moghaddam ve Mazyar, 2018).

Batarya termal yönetim sistemlerinde akışkan olarak sıvı kullanılmasının avantajları soğutma sistemi kompaktlığı, yüksek ısı yüklerinde etkin soğutma performansı ve bataryalar arası homojen sıcaklığı dağılımı iken dezavantajları sıvı kaçak sorunu ve ekipmanlarda meydana gelebilecek korozyon olarak karşımıza çıkmaktadır (Kalkan ve diğ., 2021).

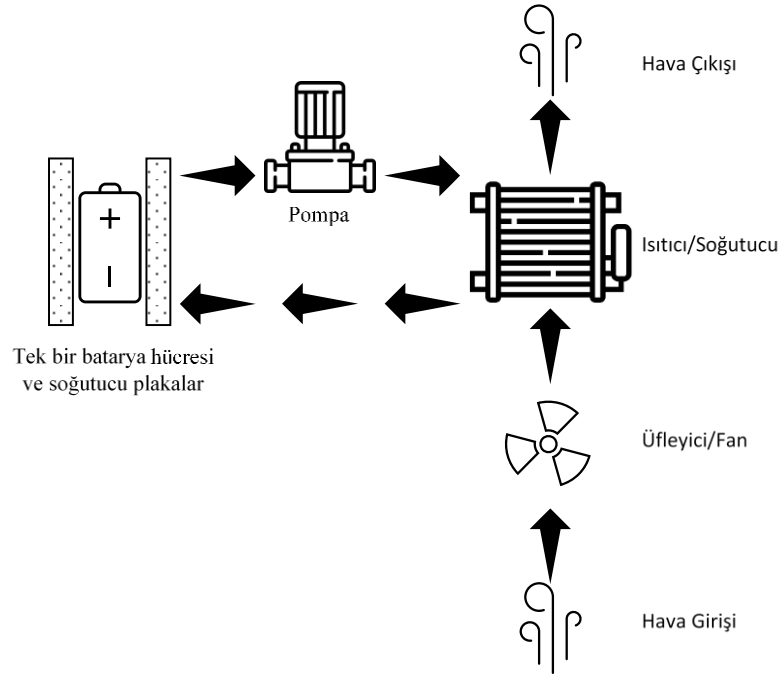


Şekil 5. Batarya termal yönetim sistemlerinin sınıflandırılması (Arora, 2018)

Figure 5. Classification of battery thermal management systems (Arora, 2018)



a)



b)

Şekil 6. Sıvı ile batarya soğutma sistemleri a) doğrudan, b) dolaylı

Figure 6. Battery thermal management systems by liquid a) direct and b) indirect

Faz değıştiren malzeme ile batarya termal yönetim sistemleri (Battery thermal management systems with phase-changing material)

Elektrikli araçların bataryalarının termal yönetiminde kullanılan faz değıştiren malzemeler, bataryadaki fazla ısıyı emerek veya serbest bırakarak faz değışimine uğrarlar. Elektrikli aracın bataryasının ürettiği fazla ısı, batarya paketine yakın faz değışim malzemeleri tarafından emilir ve

bataryanın sıcaklığı faz değişim malzemesinin erime sıcaklığına ulaşırsa, ısı gizli ısı biçiminde depolanıp batarya paketindeki sıcaklık artışı en aza indirilir. Faz değiştiren malzeme ile batarya termal yönetim sistemleri, bataryaların çalışma sıcaklığını nispeten sabit bir sıcaklık aralığında tutarlar (Talluri ve diğ., 2020). Bu yöntem, termal anlamda daha güçlü bir yönetim mekanizmasına sahiptir. Sıcaklık dağılımı bataryanın tamamında daha homojendir ve bitişik batarya hücrelerinde termal kaçak meydana gelirse, ortaya çıkabilecek kötü etkiyi sınırlayabilir. Faz değiştiren malzemenin gizli ısısı arttıkça daha yüksek sıcaklıklarda çalışan bataryalarda kullanılabilirliği artmaktadır (Bhattacharjee ve diğ., 2020).

Faz değiştiren malzeme ile batarya termal yönetim sistemleri, faz değiştiren malzemenin bileşimine göre organik, inorganik ve ötektik olmak üzere üçe, faz değiştiren malzemenin fazlarına göre katı-sıvı, katı-buhar ve sıvı-buhar olmak üzere de üçe ayrılırlar. Organik faz değiştiren malzemeler, bileşiminde parafin olan ve parafin olmayan malzemeler olarak sınıflandırılırlar. Bunlar arasında parafin olmayan bileşikler, stearik asit, polioller, uzun zincirli alkanlar ve benzerlerini içerirler. Organik faz değiştiren malzemeler, korozyon direnci, zehirsiz olmaları, iyi kimyasal dayanıklılık ve neredeyse hiç aşırı soğutma yapmama avantajlarının yanında zayıf ısıl iletkenlik ve faz değiştirme işlemi sırasında kolayca sızdırma gibi dezavantajları da vardır. İnorganik faz değiştiren malzemeler arasında genellikle su, hidratlı tuzlar, eritilmiş tuzlar ve metal bulunur, bunların arasında hidratlı tuzlar ve metal yaygın olarak kullanılır. Yüksek gizli ısı kapasitesi, yanmazlık, sızıntı yapmama ve nispeten düşük maliyet avantajlarının yanında, hidratlı tuzların aşındırıcı olması, kolay faz ayrımı ve aşırı soğutma yapması gibi dezavantajları vardır. Ötektik faz değiştiren malzemeler, genellikle organikler, inorganikler veya hem inorganik hem de organik bileşikler dahil olmak üzere düşük erime sıcaklığına sahip iki veya daha fazla maddenin birleştirilmesiyle hazırlanırlar. Bu malzemeler eş zamanlı erime ve katılaşma ile karakterize edilebilen birkaç çözünür bileşenin kristal karışımlarıdır. Erime noktaları ve donma noktaları genellikle saf maddelerinkinden daha düşüktür. Mevcut inorganik tuzların ve organiklerin bol miktarda bulunması nedeniyle, ötektik faz değişim malzemeleri, inorganik ve organik bileşiklerin kombinasyonu ile artmaktadır. Bu artış ise her sıcaklık aralığına karşılık gelen ötektik seçeneğe yol açmaktadır; bu, organik veya inorganik faz değiştiren malzemeler ile karşılaştırıldığında üstün seçim avantajıdır (Liu ve diğ. 2020).

Hibrit batarya termal yönetim sistemleri (Hybrid battery thermal management systems)

Hibrit batarya termal yönetim sistemleri, iki ya da daha fazla temel batarya termal yönetim sisteminin kombinasyonu ile oluşmaktadır. Farklı batarya termal yönetim sistemlerinin her birinin avantaj ve dezavantajları vardır. Hibrit batarya termal yönetim sistemleri bu sistemlerin avantajlarını birleştirir ve daha yüksek termal performansa ulaşır. Bunlara ek olarak, hibrit batarya termal yönetim sistemleri hacim, ağırlık ve enerji tüketimi ile ilgili bazı problemler içerebilirler. Temel hibrit batarya termal yönetim sistemleri türleri Çizelge 4'te listelenmiş olup hibritleşmede göz önüne alınması gerekenler aşağıda verilmiştir:

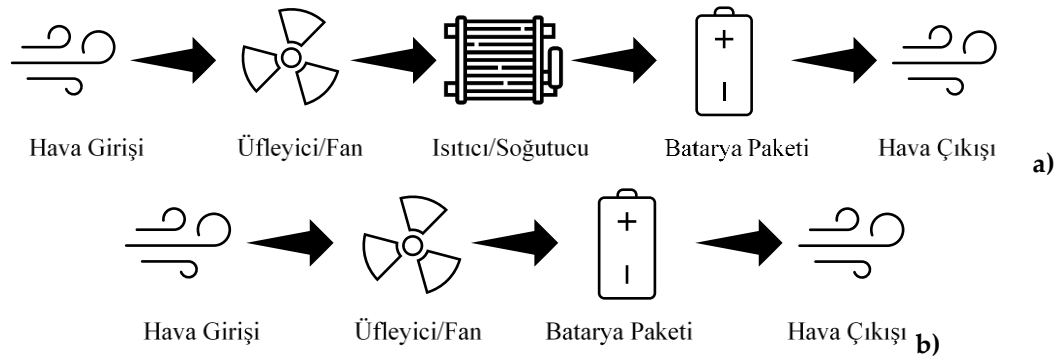
- Aktif soğutma yöntemleri, pasif soğutma yöntemleri ile kıyaslandığında ısı transferini iyileştirirler.
- Sıvı ile soğutmanın ısı transferi performansı hava ile soğutmadan daha üstündür, ancak düşük ısı yüklerinde zorlanmış hava ile soğutma genellikle yeterli olmaktadır.
- Hibrit termal yönetim sistemlerinde faz değiştiren malzemenin sisteme eklenmesi sahip oldukları önemli gizli ısıları nedeniyle termal homojenliği ve performansı artırır.
- Isı borusu ve termo-elektrik ile soğutma, yerel ısı transferini önemli ölçüde hızlı bir şekilde iyileştirir.
- Isı borusu/termo-elektrik ile soğutma ve faz değiştiren malzeme kombinasyonu daha iyi performans ve kararlılığa sahiptir. Isı borusunda, ısı emicisinin tasarımında iyileştirmeler yaparak performansı artırılabilir (Zhao ve diğ., 2020).

Çizelge 4. Hibrit batarya termal yönetim sistemi türleri (Zhao ve diğ., 2020)*Table 4. Types of hybrid battery thermal management system (Zhao et al., 2020)*

Tür		Hibrit Termal Yönetim Sistemi
1	Hava ya da sıvı ile birleştirilmiş ısı borusu ile aktif soğutma	Isı Borusu + Hava
		Isı Borusu + Sıvı
2	Isı borusu ile birleştirilmiş faz değiştiren malzeme	Faz Değiştiren Malzeme + Isı Borusu
		Faz Değiştiren Malzeme + Isı Borusu + Hava
		Faz Değiştiren Malzeme + Isı Borusu + Sıvı
3	Hava ya da sıvı ile birleştirilmiş faz değiştiren malzeme ile aktif soğutma	Faz Değiştiren Malzeme + Hava
		Faz Değiştiren Malzeme + Sıvı
4	Diğer termal yönetim sistemleri ile birleştirilmiş termoelektrik soğutma	Termoelektrik Soğutma + Hava + Sıvı
		Faz Değiştiren Malzeme + Termoelektrik Soğutma
5	Hava ile birleştirilmiş sıvı	Sıvı + Hava

Enerji Tüketim Yöntemine Göre Batarya Termal Yönetim Sistemleri (Battery Thermal Management Systems According to Energy Consumption Method)

Batarya termal yönetim sistemlerinde standart tanıma göre, soğutma/ısıtma sistemi ısı değiştiriciler, üfleyiciler/fanlar veya pompalar gibi güç tüketen herhangi bir ekipmanı içeriyorsa, bu sistem aktif bir sistem olarak kabul edilir, aksi takdirde pasif sistem olarak adlandırılır. Uygulamada aktif sistemler, soğutma hızının aktif olarak kontrol edildiği bir batarya termal yönetim sistemi olarak tanımlanır (Arora, 2018).

**Şekil 7.** Hava ile batarya termal yönetim sistemleri a) aktif ve b) pasif*Figure 7. Battery thermal management systems by air a) active and b) passive*

Elektrikli araçlarda kullanılan hava ile aktif batarya termal yönetim sistemlerinde Şekil 7a'dan da görülebileceği üzere hava, bir üfleyici/fan tarafından sisteme yönlendirilir. Ardından bir buharlaştırıcıdan ya da bir ısıtıcıdan geçerek batarya paketine gönderilir. Gerekli soğutma/ısıtma işlemi yapıldıktan sonra kullanılan hava egzoz tarafından atmosfere atılır. Hava ile pasif batarya termal yönetim sistemlerinde ise atmosferden ya da araç kabininden sisteme giren hava bir üfleyici tarafından batarya paketine gönderilir. Şekil 7b'de gösterildiği gibi batarya paketinde gerekli ısıtma/soğutma işlemi yapıldıktan kullanılan hava egzoz tarafından atmosfere atılır (Li ve Zhu., 2014).

Soğutma Sisteminin Düzenine Göre Batarya Termal Yönetim Sistemleri (Battery Thermal Management System According to the Layout of the Cooling System)

Soğutma sisteminin düzenine göre batarya termal yönetim sistemleri üç ana başlıkta incelenir. Burada soğutma sisteminin düzeni, çalışma akışkanının batarya paket içerisindeki dağıtım yöntemini ifade eder. Bu yöntemler içeriden-dışarıdan, seri-paralel ve doğrudan-dolaylı olarak adlandırılır (Arora, 2018).

BATARYA TERMAL YÖNETİM SİSTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI (COMPARISON OF BATTERY THERMAL MANAGEMENT SYSTEMS)

Elektrikli araçların bataryalarının termal yönetim sistemlerinin üç ayrı başlıkta incelendiği ve sınıflandırmanın ise sistemdeki akışkan kullanımına, enerji kullanımına ve sistemin soğutma düzenine göre yapıldığı görülmüştür.

Çizelge 5'te batarya termal yönetim sistemleri kullanım kolaylığı, montaj, enerji verimliliği, sıcaklık değişimi, soğutma seviyesi, rejenerasyon oranı, COP, bakım, yatırım maliyeti, ölçeklendirilebilirlik, teknik risk ve geliştirme durumuna göre karşılaştırılmıştır (Arora, 2018). Bu sistemlerin tercih kriterlerinden en önemlisi araçların bataryalarının gerektirdiği soğutma gücüdür. Örneğin, hibrit araçlarda kullanılan bataryalar çok güçlü olmadığından hava ile termal yönetim sistemi kullanılırken tam elektrikli araçlarda ise bataryalar çok güçlü olduğundan sıvı ile termal yönetim sistemi kullanılmaktadır (Celen ve Kalkan, 2021; Kalkan ve diğ., 2021).

Çizelge 5. Batarya termal yönetim sistemlerinin karşılaştırılması (Arora, 2018)

Table 5. Comparison of battery thermal management systems (Arora, 2018)

Kriter	Zorlanmış Hava	Sıvı			Faz Değiştiren Malzeme
		Sıvı Kanalı (Ceketi)	Soğutma Plakası	Isı Borusu	
Kullanım Kolaylığı	Basit	Zor	Orta	Orta	Basit
Montaj	Basit	Zor	Orta	Orta	Basit
Enerji Verimliliği	Düşük	Yüksek	Orta	Yüksek	Yüksek
Sıcaklık Değişimi	Yüksek	Orta	Orta	Orta	Düşük
Soğutma Seviyesi	Düşük	Yüksek	Orta	Yüksek	Yüksek
Rejenerasyon Oranı	Yüksek	Orta	Yüksek	Orta	Düşük
COP	0,4-0,7	1,8-2,1	1,5-1,9	-	-
Bakım	Zor	Basit	Orta	Orta	Zor
Yatırım Maliyeti	Düşük	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Orta
Ölçeklendirilebilirlik	Yüksek	Düşük	Düşük	Düşük	Yüksek
Teknik Risk	Düşük	Yüksek	Orta	Orta	Düşük
Geliştirme Durumu	Ticari	Prototip	Ticari	Prototip	Prototip

SONUÇ VE TARTIŞMA (RESULT AND DISCUSSION)

Bu çalışmada, elektrikli araçların tarihine, sınıflandırılmasına, Türkiye ve dünya pazarındaki satış durumuna, araçlarda kullanılan batarya tiplerine /özelliklerine, bataryaların çevrim ömrünü etkileyen termal sorunlara, elektrikli araçlarda batarya paketinin özellikleri ve elektrikli araçların batarya termal yönetim sistemlerine değinilen çalışmada şu sonuçlara ulaşılmıştır:

- Türkiye'de ve dünyada elektrikli ve hibrit araçlar satışlarının 2016-2017 yıllarından sonra büyük oranda arttığı gözlemlenmiştir.
- Farklı batarya tipleri karakteristik özelliklerine göre karşılaştırıldıklarında Lityum bazlı bataryaların ağırlık, maliyet, performans ve çevrim ömrü gibi özellikleriyle elektrikli araçlarda kullanıma en uygun batarya tipleri olduğu ifade edilebilir.

- Uygulamada %100 elektrikli araçlardaki yüksek batarya soğutma ihtiyacı sıvı soğutma ile sağlanırken hibrit araçlarda ise düşük batarya soğutma ihtiyacı hava soğutma ile sağlanabileceği görülmüştür.
- Hava, sıvı ve faz değiştiren malzemelerin kullanıldığı batarya termal yönetim sistemleri farklı kriterlere göre karşılaştırılmıştır.
- Çalışmada göz önüne alınan batarya termal yönetim sistemlerine ek olarak genellikle elektronik ekipmanların soğutulmasında kullanılan termo-elektrik, termo-akustik ve manyetik soğutma sistemlerinin etkinliklerinin geliştirilmesiyle elektrikli araçlarda kullanılabilmesi görülmüştür.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Arora, S., 2018, "Selection of thermal management system for modular battery packs of electric vehicles: A review of existing and emerging technologies", *Journal of Power Sources*, 400, 621-640.
- Battery University Group, BU-205: *Types of Lithium-ion*, <https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion>, Ziyaret tarihi: 27 Nisan 2021a.
- Battery University Group, BU-214: *Summary Table of Lead-based Batteries*, <https://batteryuniversity.com/article/bu-214-summary-table-of-lead-based-batteries>, Ziyaret tarihi: 27 Nisan 2021b.
- Battery University Group, BU-215: *Summary Table of Nickel-based Batteries*, <https://batteryuniversity.com/article/bu-215-summary-table-of-nickel-based-batteries>, Ziyaret tarihi: 27 Nisan 2021c.
- Battery University Group, BU-216: *Summary Table of Lithium-based Batteries*, <https://batteryuniversity.com/article/bu-216-summary-table-of-lithium-based-batteries>, Ziyaret tarihi: 27 Nisan 2021d.
- Bhattacharjee, A., Mohanty, R. K., and Ghosh, A., 2020, "Design of an Optimized Thermal Management System for Li-Ion Batteries under Different Discharging Conditions", *Energies*, 13(21), 5695.
- Car and Driver, 2020 Hyundai Ioniq Limited Hatchback Features And Specs, https://www.caranddriver.com/hyundai/ioniq/specs/2020/hyundai_ioniq_hyundai-ioniq-hybrid_2020/411990, Ziyaret tarihi: 27 Nisan 2021a.
- Car and Driver, 2020 Kia Optima EX Auto Features And Specs, https://www.caranddriver.com/kia/optima/specs/2020/kia_optima_kia-optima-hybrid_2020/408076, Ziyaret tarihi: 27 Nisan 2021b.
- Car and Driver, 2020 Lexus ES ES 300h FWD Features And Specs, https://www.caranddriver.com/lexus/es/specs/2020/lexus_es_lexus-es300h_2020/411185, Ziyaret tarihi: 27 Nisan 2021c.
- Car and Driver, 2020 Toyota Corolla Hybrid LE CVT (Natl) Features And Specs, https://www.caranddriver.com/toyota/corolla/specs/2020/toyota_corolla_toyota-corolla-hybrid_2020/404764, Ziyaret tarihi: 27 Nisan 2021d.
- Car and Driver, 2021 Audi E-Tron / E-Tron Sportback Prestige Quattro Features And Specs, https://www.caranddriver.com/audi/e-tron/specs/2021/audi_e-tron_audi-e-tron_2021/416244, Ziyaret tarihi: 27 Nisan 2021e.
- Car and Driver, 2021 Chevrolet Bolt EV Premier 5dr Wgn Features And Specs, https://www.caranddriver.com/chevrolet/bolt-ev-2021/specs/2021/chevrolet_bolt-ev_chevrolet-bolt-ev_2021/418205, Ziyaret tarihi: 27 Nisan 2021f.
- Car and Driver, 2021 Ford Mustang Mach-E Premium AWD Features And Specs, https://www.caranddriver.com/ford/mustang-mach-e/specs/2021/ford_mach-e_ford-mach-e_2021/415586, Ziyaret tarihi: 27 Nisan 2021g.
- Car and Driver, 2021 Honda Accord Touring Sedan Features And Specs, https://www.caranddriver.com/honda/accord/specs/2021/honda_accord_honda-accord-hybrid_2021/418420, Ziyaret tarihi: 27 Nisan 2021h.

- Car and Driver, 2021 Honda Insight Touring CVT Features And Specs, https://www.caranddriver.com/honda/insight/specs/2021/honda_insight_honda-insight_2021/413228, Ziyaret tarihi: 27 Nisan 2021i.
- Car and Driver, 2021 Hyundai Kona Electric Ultimate FWD Features And Specs, https://www.caranddriver.com/hyundai/kona-electric/specs/2021/hyundai_kona-electric_hyundai-kona-electric_2021/416046, Ziyaret tarihi: 27 Nisan 2021j.
- Car and Driver, 2021 Hyundai Sonata Limited 2.0L Features And Specs, https://www.caranddriver.com/hyundai/sonata/specs/2021/hyundai_sonata_hyundai-sonata-hybrid_2021/416760, Ziyaret tarihi: 27 Nisan 2021k.
- Car and Driver, 2021 Porsche Taycan Turbo S AWD Features And Specs, https://www.caranddriver.com/porsche/taycan/specs/2021/porsche_taycan_porsche-taycan_2021/418548, Ziyaret tarihi: 27 Nisan 2021l.
- Car and Driver, 2021 Tesla Model 3 Performance AWD Features And Specs, https://www.caranddriver.com/tesla/model-3/specs/2021/tesla_model-3_tesla-model-3_2020/412469, Ziyaret tarihi: 27 Nisan 2021m.
- Car and Driver, 2021 Tesla Model Y Performance AWD Features And Specs, https://www.caranddriver.com/tesla/model-y/specs/2021/tesla_model-y_tesla-model-y_2020/412746, Ziyaret tarihi: 27 Nisan 2021n.
- Car and Driver, 2021 Toyota Avalon Hybrid Limited FWD (Natl) Features And Specs, https://www.caranddriver.com/toyota/avalon/specs/2021/toyota_avalon_toyota-avalon-hybrid_2021/413789, Ziyaret tarihi: 27 Nisan 2021o.
- Car and Driver, 2021 Toyota Camry Hybrid XSE CVT (Natl) Features And Specs, https://www.caranddriver.com/toyota/camry/specs/2021/toyota_camry_toyota-camry-hybrid_2021/416041, Ziyaret tarihi: 27 Nisan 2021p.
- Car and Driver, 2021 Toyota Prius Limited (Natl) Features And Specs, https://www.caranddriver.com/toyota/prius/specs/2021/toyota_prius_toyota-prius_2021/413844, Ziyaret tarihi: 27 Nisan 2021q.
- Car and Driver, 2021 Toyota RAV4 Hybrid Hybrid XLE Premium AWD (Natl) Features And Specs, https://www.caranddriver.com/toyota/rav4-hybrid/specs/2021/toyota_toyota-rav4-hybrid_rav4-hybrid_2021/414763, Ziyaret tarihi: 27 Nisan 2021r.
- Car and Driver, 2021 Volkswagen ID.4 1st Edition RWD Features And Specs, https://www.caranddriver.com/volkswagen/id4/specs/2021/volkswagen_i.d.-crozz_volkswagen-i.d.-crozz_2021/418044, Ziyaret tarihi: 27 Nisan 2021s.
- Celen, A., and Kaba, M. Y., 2021, "Elektrikli Araçlarda Kullanılan Silindirik Lityum İyon Bataryaların Soğutulmasının Parametrik İncelenmesi", *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 33(1), 49-61.
- Celen, A., ve Kalkan, O., 2021, "Numerical Investigation on the Usage of Finned Surface in Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxides Batteries by Using Air Cooling Method", *Energy Storage*, e216.
- Chen, D., Jiang, J., Kim, G. H., Yang, C., and Pesaran, A., 2016, "Comparison of different cooling methods for lithium ion battery cells", *Applied Thermal Engineering*, 94, 846-854.
- Clean Technica. *Electric Car Evolution*, <https://cleantechnica.com/2015/04/26/electric-car-history/>, Ziyaret tarihi: 27 Nisan 2021.
- Dinçer, I., Hamut, H. S., and Javani, N., 2016, *Thermal management of electric vehicle battery systems*, John Wiley & Sons.
- Durmuş, F. S., and Kaymaz, H., 2020, "Elektrikli Araç Şarj Yöntemleri", *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi*, 3(2), 123-139.
- Ehsani, M., Gao, Y., Longo, S., and Ebrahimi, K. M., 2018, *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles*, CRC press.
- Fessler, D. C., 2019, *The energy disruption triangle: three sectors that will change how we generate, use, and store energy*, John Wiley & Sons.

- Forbes, *Best Electric Cars For 2021*, <https://www.forbes.com/wheels/best/electric-cars/>, Ziyaret tarihi: 27 Nisan 2021a.
- Forbes, *Best Hybrid Cars For 2021*, <https://www.forbes.com/wheels/best/best-hybrid-cars/>, Ziyaret tarihi: 27 Nisan 2021b.
- Hedef Filo, *Elektrikli Araçların Tarihçesi*, <https://ev.hedeffilo.com/elektrikli-arac-tarihcesi#:~:text=Tarihte%20bilinen%20ilk%20elektrikli%20motor,batarya%20kullanılan%20küçük%20bir%20lokomotifti>, Ziyaret tarihi: 27 Nisan 2021.
- International Energy Agency, *Global Electric Car Sales by Key Markets 2010-2020e*, <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-electric-car-sales-by-key-markets-2010-2020>, Ziyaret tarihi: 27 Nisan 2021.
- Kalkan, O., Celen, A., Bakirci, K., ve Dalkilic, A. S., 2021, "Experimental investigation of thermal performance of novel cold plate design used in a Li-ion pouch-type battery", *Applied Thermal Engineering*, 191, 116885.
- Larminie, J., and Lowry, J., 2012, *Electric vehicle technology explained*, John Wiley & Sons.
- Lelie, M., Braun, T., Knips, M., Nordmann, H., Ringbeck, F., Zappen, H., and Sauer, D. U., 2018, "Battery management system hardware concepts: an overview", *Applied Sciences*, 8(4), 534.
- Li, J., Adewuyi, K., Lotfi, N., Landers, R. G., and Park, J., 2018, "A single particle model with chemical/mechanical degradation physics for lithium ion battery State of Health (SOH) estimation", *Applied energy*, 212, 1178-1190.
- Li, J., and Zhu, Z., 2014, *Battery thermal management systems of electric vehicles*, Master's thesis, Chalmers University Of Technology, Göteborg, Sweden.
- Liu, C., Xu, D., Weng, J., Zhou, S., Li, W., Wan, Y., and Huang, Q., 2020, "Phase Change Materials Application in Battery Thermal Management System: A Review", *Materials*, 13(20), 4622.
- Moghaddam, H. and Mazzyar, S., 2018, *Designing battery thermal management systems (BTMS) for cylindrical Lithium-ion battery modules using CFD*, Master's thesis, KTH School of Industrial Engineering and Management, Stockholm, Sweden.
- Mustaffa, M. R., Atan, R., and Mohamed, W. A. N. W., "Preliminary analysis on fuel cell power plant design for racing vehicles", *International Conference on Advance in Mechanical Engineering*, Shah Alam, Malaysia, 2010.
- Nasa Space Science Data Coordinated Archive, *The Apollo Lunar Roving Vehicle*, https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/lunar/apollo_lrv.html, Ziyaret tarihi: 27 Nisan 2021.
- Palinski, M., 2017, *A comparison of electric vehicles and conventional automobiles: costs and quality perspective*, Bachelor's Thesis, Novia University of Applied Sciences, Finland.
- Pesaran, A. A., 2002, "Battery thermal models for hybrid vehicle simulations", *Journal of power sources*, 110(2), 377-382.
- Şenlik, İ., 2015, "Uyuyan Devrim: Elektrikli Araçlar", *Elektrik Mühendisliği Dergisi*, 455, 64-67.
- Sökmen, K. F., and Çavuş, M., 2017, "Review of batteries thermal problems and thermal management systems", *Journal of Innovative Science and Engineering (JISE)*, 1(1), 35-55.
- Talluri, T., Kim, T. H., and Shin, K. J., 2020, "Analysis of a battery pack with a phase change material for the extreme temperature conditions of an electrical vehicle", *Energies*, 13(3), 507.
- Tie, S. F., and Tan, C. W., 2013, "A review of energy sources and energy management system in electric vehicles", *Renewable and sustainable energy reviews*, 20, 82-102.
- Türkiye Elektrikli ve Hibrit Araçları Derneği, *2020 Yılı Elektrikli ve Hibrit Satış Rakamları Belli Oldu*, <http://tehad.org/2021/01/16/2020-yili-elektrikli-ve-hibrid-otomobil-satis-rakamlari-belli-oldu/>, Ziyaret tarihi: 27 Nisan 2021.
- Ye, Y., Saw, L. H., Shi, Y., and Tay, A. A., 2015, "Numerical analyses on optimizing a heat pipe thermal management system for lithium-ion batteries during fast charging", *Applied Thermal Engineering*, 86, 281-291.

- Yong, J. Y., Ramachandaramurthy, V. K., Tan, K. M., and Mithulananthan, N., 2015, "A review on the state-of-the-art technologies of electric vehicle, its impacts and prospects", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 365-385.
- Zhao, C., Zhang, B., Zheng, Y., Huang, S., Yan, T., and Liu, X., 2020, "Hybrid Battery Thermal Management System in Electrical Vehicles: A Review", *Energies*, 13(23), 6257.