

LİTYUM İYON PİLLERDE TERMAL KAÇAK VE GÜVENLİK ÖNLEMLERİ: BİR İNCELEME

THERMAL RUNAWAY AND SAFETY MEASURES IN LITHIUM-ION BATTERIES: A REVIEW

Doğan KAZAK

ASELSAN A.Ş. İtfaiye Birimi, dogankazak@outlook.com.tr

Ankara / Türkiye

ORCID: 0009-0007-2508-991X

ÖZET

Makalede Li-ion pilleri ve bunların termal kaçaklarıyla ilgili detaylı bilgiler bulunmaktadır. Li-ion piller, özellikle şarj edilebilir piller arasında yaygın olarak tercih edilen bir pil türüdür. Ancak, aşırı şarj, aşırı ısınma veya üretim hataları gibi durumlarda termal kaçaklar meydana gelebilir. Bu durum, içsel kısa devreler veya elektrolitlerin kimyasal tepkimeye girmesiyle pilin patlamasına veya alev almasına neden olabilir.

Bu nedenle, Li-ion pillerin güvenliği için yangın söndürücüler önemlidir. Su bazlı, köpüklü, kuru kimyasal tozlu, CO₂ ve HFC-227ea gibi farklı söndürme maddeleri kullanılabilir. Her bir söndürücünün avantajları ve dezavantajları vardır. Örneğin, su bazlı söndürücülerin yangını soğutma özelliği vardır ancak elektrikle temas halinde tehlikeli olabilirler. Köpüklü söndürücüler, Sınıf A ve B yangınlarında etkilidir ancak Li-ion piller için tam kapsama sağlamak zor olabilir. CO₂, elektrikli yangınlar için güvenli olsa da, Li-ion piller için ideal bir çözüm değildir çünkü soğutma kapasitesi düşüktür.

Son olarak, sulu vermikülit dağılımı (SVD) yangın söndürücüsü, Li-ion pil yangınlarını etkili bir şekilde söndürmek için önerilmektedir. Bu söndürme maddesi, Sınıf A ve D yangınlarında etkilidir, çevre dostudur ve vermikülit minerali içerir. SVD, Li-ion pil yangınlarını başarıyla söndürebilir ve çevre için güvenli bir çözüm sunar.

Anahtar Kelime: Lityum, Lityum İyon, Pil Yangını, Söndürücü

ABSTRACT

The article provides detailed information about Li-ion batteries and their thermal runaways. Li-ion batteries are a widely preferred type of rechargeable batteries. However, thermal runaways can occur in cases such as overcharging, overheating, or manufacturing defects. This situation can lead to the battery exploding or catching fire due to internal short circuits or chemical reactions of electrolytes.

Therefore, fire extinguishers are important for the safety of Li-ion batteries. Different extinguishing agents such as water-based, foam-based, dry chemical powder, CO₂, and HFC-227ea can be used. Each extinguisher has its advantages and disadvantages. For example, water-based extinguishers have the ability to cool down the fire but can be dangerous when in contact with electricity.

Foam-based extinguishers are effective in Class A and B fires, but providing full coverage for Li-ion batteries can be challenging. CO₂, while safe for electrical fires, is not an ideal solution for Li-ion batteries as its cooling capacity is low.

Finally, the water-based vermiculite dispersion (SVD) fire extinguisher is recommended for effectively extinguishing Li-ion battery fires. This extinguishing agent is effective in Class A and D fires, environmentally friendly, and contains the mineral vermiculite. SVD can successfully extinguish Li-ion battery fires and provides a safe solution for the environment.

Keywords: Lithium, Lithium-ion, Battery Fire, Extinguisher

1. GİRİŞ

Lityum İyon (Li-ion) piller, nispeten basit bir yapıya ve işleyişe sahip olmalarına rağmen, ömürlerinin ve performanslarının optimize edilmesiyle birlikte güvenlik kriterlerini sağlamak için özel bir tasarıma sahiptir ve içlerinde özel elektrik devreleri bulunmaktadır. Günümüzde neredeyse her alanda kullanılan Li-ion piller genellikle bu sisteme sahip şarj edilebilen pillerdir. Pil üreticileri bu pilleri alır, özel bir tasarıma sahip akıllı devrelerle birleştirir ve son kullanıma sunar. Dünyada pil tipleri incelendiğinde şarj edilebilen ve şarj edilemeyen piller olarak iki ye ayrılır. Tekrardan dolumu mümkün olmayan pillere şarj edilemeyen, tekrardan dolumu mümkün olan pillere şarj edilebilen piller denilmektedir. Ayrıcı piller şekil itibariyle silindir, düğme ve prizmatik tipte üretilmektedir (TAP, 2024). Piller atom, yakıt, güneş, kuru, sıvı ve gazlı olarak farklı çeşitte özelliklere sahiptirler (MEB, 2012). Tablo 1’de şarj edilebilen ve edilemeyen pil çeşitleri yer almaktadır.

Tablo 1: Şarj Edilebilen ve Edilemeyen Pil Çeşitleri

Şarj Edilebilen Piller	Şarj Edilemeyen Piller
➤ Lityum İyon (Li-ion)	➤ Çinko-Karbon (ZnC)
➤ Lityum Polimer (Li-Po)	➤ Alkali-Manganez (Al-Mn)
➤ Nikel-Kadmiyum (Ni-Cd)	➤ Lityum-Manganezdioksit (LiMn)
➤ Nikel-Metal Hidrat (Ni-MH)	

Kaynak: (GEMAŞ, 2022)

Li-ion piller, son yıllarda şarj edilebilir piller arasında en yaygın tercih edilen pil türüdür (Armand & Tarascon, 2008). Li-ion pilleri, şarj edilebilir piller arasında yer alan kurşun asit pillere kıyasla yüksek spesifik kapasiteye, enerji ve güç yoğunluğuna sahiptirler. Bu avantajlar, Li-ion pillerin cep telefonlarında, bilgisayarlarda ve elektrikli otomobiller gibi teknolojik ürünlerde uzun süreli çalışmaya ve yüksek akıma sahip olmaları sağlamaktadır (Kong, Li, Jiang, & Pecht, 2018). Pillerin cinsine göre farklı çalışma sıcaklıkları vardır. Pilin güvenli ve doğru çalışabilmesi için doğru sıcaklık aralığında olması gerekmektedir. Tablo 2’de pillerin çalışma sıcaklık aralıkları yer almaktadır.

Tablo 2: Farklı Pil Çeşitlerinin Çalışma Sıcaklık Aralıkları

Pil Çeşitleri	Çalışma Sıcaklığı (°C)
➤ Kurşun Asit (Pb-Asit)	➤ -15 ila +50
➤ Nikel-Kadmiyum (Ni-Cd)	➤ -20 ila +50
➤ Nikel Metal Hidrit (Ni-MH)	➤ -20 ila +60
➤ ZEBRA	➤ +245 ila +350
➤ Lityum-İyon (Li-İyon)	➤ -20 ila +60
➤ Lityum-Demir Fosfat (LiFePO ₄) (LFP)	➤ -20 ila +70
➤ Lityum-Kobalt-Oksit (LiCoO ₂) (LCO)	➤ -25 ila +55
➤ Lityum-Manganez-Oksit (LiMn ₂ O ₄) (LMO)	➤ 0 ila +50
➤ Çinko-Hava (Zn-Air)	➤ -10 ila +55
➤ Lityum-Kükürt (Li-S)	➤ -60 ila +60
➤ Lityum-Hava (Li-Air)	➤ -10 ila +70

Kaynak: (Özcan, Karadağ, Altuğ, & Özgüven, 2021)

Her pilin ömrü aynı değildir. Yapısına göre değişiklik göstermektedirler. Avrupa'da pil ve bataryaların ömürlerinin hesaplanması üzerine birçok çalışma gerçekleştirilmiş ve MÖBIUS tarafından yürütülen çalışma, 5 farklı ülkeden (Romanya, İspanya, Almanya, Belçika ve Hollanda) toplam 150.000 adet çeşitli türdeki pil numunesiyle yapılmıştır. Bu çalışma, pillerin ömür süresinin (LIFESPAN) hesaplanması amacıyla yapılmıştır ve Tablo 3'de görülen sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 3: Li-ion Pillerin Diğer Piller İle Karşılaştırılması

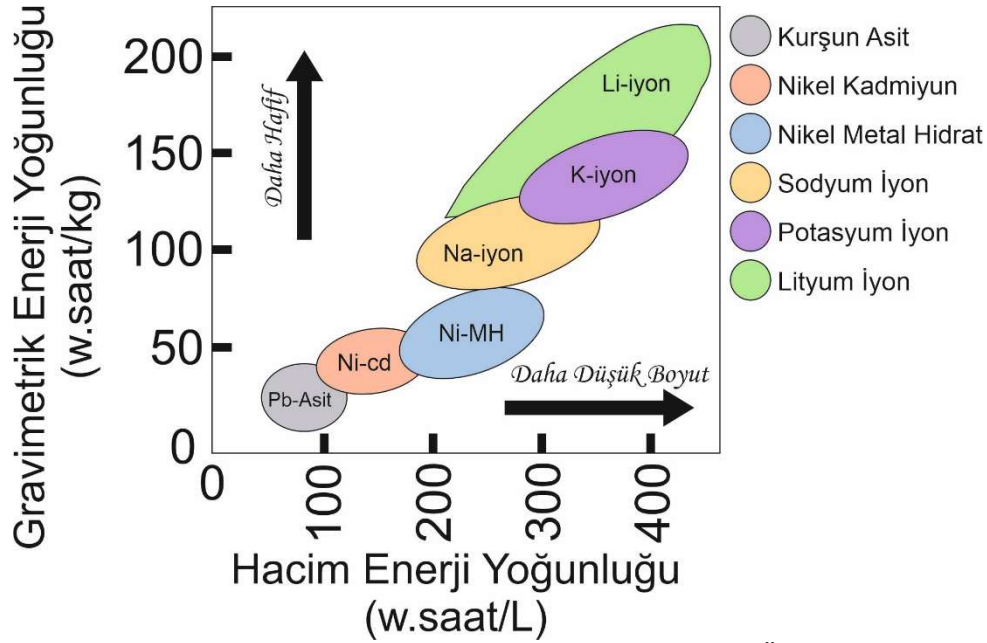
Pil Çeşitleri	Ortalama Ömür Süresi (Yıl)
➤ Çinko Karbon	➤ 4,2
➤ Alkali Mangan	➤ 4,2
➤ Şarj Edilebilir Lityum Piller	➤ 6,4
➤ Nikel Kadmiyum	➤ 12,5
➤ Nikel Metal Hidrat	➤ 7,3
➤ Şarj Edilemeyen Lityum	➤ 6,1
➤ Kurşun Asit Akümülatörler	➤ 9,0

Kaynak: (Pil Sitesi, 2020)

Pil ömrünü kısaltan en önemli faktörlerden biri sıcaklıktır. Pil içindeki gerilim ve sıcaklık farklılıkları, kimyasal reaksiyonları etkileyen temel unsurlardır. Sıcaklık arttıkça kimyasal reaksiyonların hızı da artar. Bu nedenle, sıcaklık artışı pil performansını artırabilir gibi görünse de istenmeyen reaksiyonların artmasıyla pil ömründe kayıplar meydana gelebilir. Ayrıca, pillerin raf ömrü ve şarjlarını koruma yetenekleri, bu yan reaksiyonların seviyesine önemli ölçüde bağlıdır. Bu tür reaksiyonlar, elektrotların pasifleşmesine, korozyona ve gaz çıkışının artmasına neden olabilir. Genel olarak, pil sıcaklığının her 100°C artması, pillerdeki kimyasal reaksiyon hızının iki katına çıkmasına neden olur. Bu nedenle, örneğin, 300°C sıcaklıkta bir saatlik görev süresine sahip olan bir pil, 150°C sıcaklıkta iki saatlik bir hizmet süresine sahip olacaktır. Sıcaklık etkisini göstermek için, nikel-metal hidrat (Ni-MH) pilleri örnek olarak verilebilir. Bu tür piller, depolama sırasında sıcaklık artışından olumsuz etkilenirler. Yapılan testlerde, Ni-MH pillerinin 450°C sıcaklıkta sürekli depolanması sonucunda kapasitelerinin %60'ını kaybettiği gözlemlenmiştir.

Her 100°C'lik sıcaklık artışının, pillerdeki kendiliğinden şarj kaybı hızını iki katına çıkardığı gerçeği, tüm pil türleri için geçerlidir. Yukarıdaki açıklamalardan da görüldüğü gibi, sıcaklık artışı pillerin en büyük düşmanıdır (Pil Sitesi, 2020).

Piller kıyaslanırken enerji yoğunluklarına göre tercih edilmektedir. Şekil 1'de şarj edilebilen pillerin enerji yoğunlukları bilgisi verilmiştir.



Şekil 1: Şarj Edilebilen Pillerin Enerji Yoğunlukları (Özsin, 2021)

Tablo 4, farklı pil sistemlerini (Ni-Cd, Ni-MH, Li-ion ve Kurşun-Asit) karşılaştıran bir tabloyu açıklamaktadır. Her pil sistemi belirli özelliklere sahiptir ve bu özelliklerin mukayesesi yapılmıştır.

Tablo 4: Pil Özellikleri

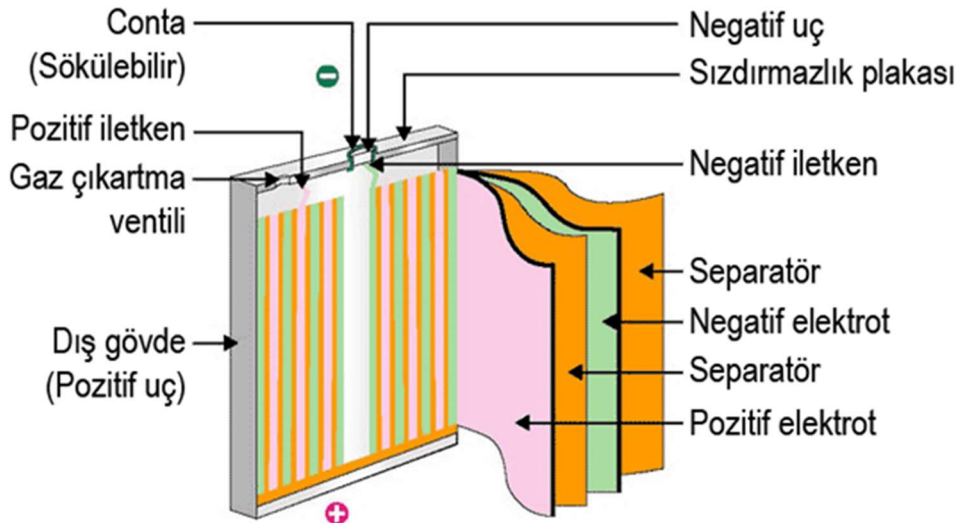
Özellikler	Pil Çeşitleri			
	Ni-Cd	Ni-MH	Li-ion	Kurşun-Asit
➤ Enerji Yoğunluğu / (hacim)	-	+	++	-
➤ Enerji Yoğunluğu / (ağırlık)	-	+	++	--
➤ Tekrar Kullanılabilirlik Performansı	++	++	++	-
➤ Kendi Kendine Deşarj	+	+	++	+
➤ Hızlı Şarj Edilebilirlik	++	+	+	-
➤ Yüksek Akım ile Deşarj Edilebilirlik	++	+	+	-
➤ Güvenirlik	+	+	-*	++
➤ Fiyat	+	-	--	++
➤ Gerilim Uyumluluğu	++	++	--	-
➤ Deşarjda Gerilim Stabilitesi	++	+	+	-

++: Mükemmel, +: İyi, -: Uygulamaların Çoğu için Yeterli, --: Dezavantajlı, *: Kontrol Devreleri Gerekli

Kaynak: (MEB, 2012)

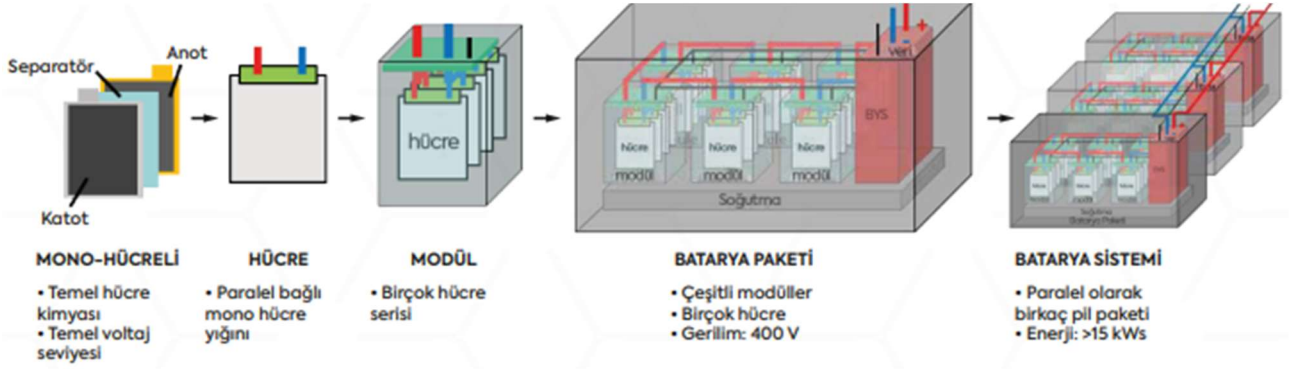
- Enerji yoğunluğu/(hacim): Li-ion pil sistemi hacim açısından en yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir, diğerleri ise artan sırayla enerji yoğunluğunda azalma gösterir.
 - Enerji yoğunluğu/(ağırlık): Ni-MH ve Li-ion piller, ağırlık açısından daha yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir.
 - Tekrar kullanılabilirlik performansı: Tüm piller, tekrar kullanılabilirlik performansı açısından iyi sonuçlar gösterir.
 - Kendi kendine deşarj: Tüm piller, kendi kendine deşarj açısından uygun performans gösterir.
 - Hızlı şarj edilebilme: Ni-Cd, Ni-MH ve Li-ion piller hızlı şarj edilebilirken, Kurşun-Asit piller bu özelliği göstermez.
 - Yüksek akım ile deşarj edilebilme: Tüm piller, yüksek akım ile deşarj edilebilir.
 - Güvenilirlik: Ni-Cd ve Ni-MH piller güvenilirlik açısından iyidir, Li-ion piller ise kontrol devreleri gerektirebilir.
 - Fiyat: Kurşun-Asit piller daha ucuzken, diğerleri genellikle daha pahalıdır.
 - Gerilim uyumluluğu: Tüm piller, genel olarak gerilim uyumluluğuna sahiptir.
 - Deşarjda gerilim stabilitesi: Tüm piller, deşarjda gerilim stabilitesine sahiptir (MEB, 2012).
- Li-ion piller diğer pillere benzer temel bileşenlere sahiptir. Aşağıda Li-ion pillerin temel bileşenleri verilmiştir:

- Katot (pozitif elektrot), metal oksitten yapılmıştır,
 - Anot (negatif elektrot), karbondan yapılmıştır,
 - Separatör (Ayırıcı), katot ve anotun kısa devre yapmasını önlemektedir,
 - Elektrot çubuğu, indirgenme ve yükseltgenmenin olabilmesi için elektrolit (çözelti) içine batırılan ve elektron akımını sağlayan ve pilin çalışma performansını ve kullanım ömrünü etkilemektedir,
 - Akım toplayıcı adı verilen bir metal parça, anot ve katot ile elektrotları ayırma işlemi yapmaktadır,
 - Elektrolit, katot ve anotun daha rahat hareket etmelerini sağlayarak iletkenliği artırma görevini yapmaktadır ve elektronları iletmemektedir (Vikipedi, 2023; Bifiki, 2020).
- Şekil 2’de Li-ion pilin temel bileşenlerinin gösterildiği şema yer almaktadır.



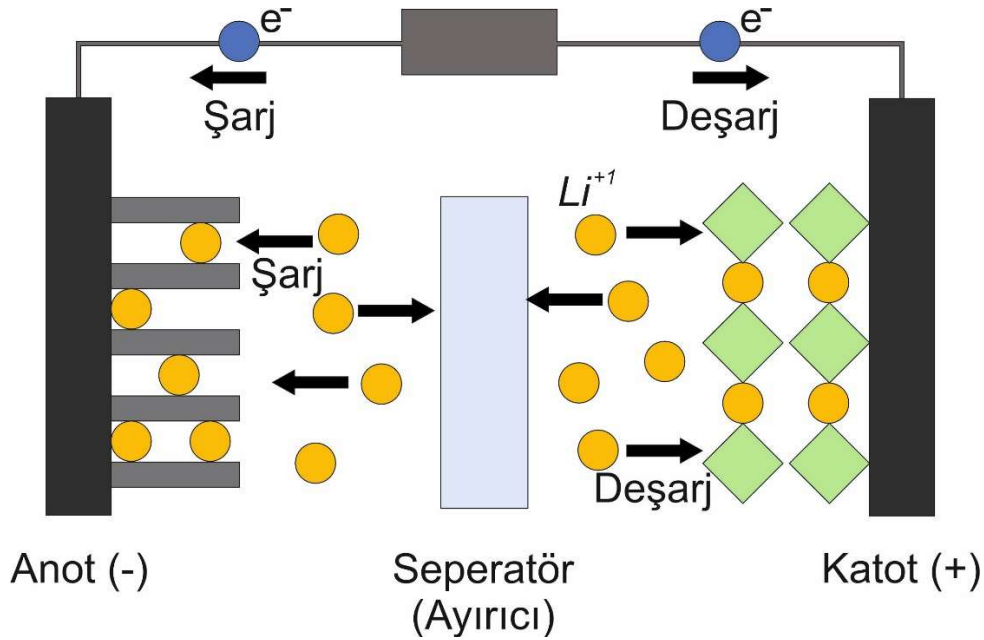
Şekil 2: Li-ion Pil Temel Bileşenleri (TAP, 2024)

Bir batarya sistemi tarafından istenilen güç ve enerjiyi sağlamak için, piller kapasiteyi artırmak için paralel olarak veya voltajı artırmak için seri olarak bağlanır. Bir batarya sistemi genellikle birden çok batarya paketinden oluşur, bu da birden çok batarya modülü içerir, her biri Şekil 3’te gösterildiği gibi seri ve/veya paralel konfigürasyona sahip bir dizi pil içerir.



Şekil 3: Batarya Sisteminin Yapısı (T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2022)

Li-ion pillerinin işleyiş prensibi oldukça basittir. Bu prensip, Li-ion pillerin anot ve katot arasında hareket etmesine dayanır. Kullanım veya deşarj sırasında, Li-ion anottan ayrılır ve katota doğru hareket eder. Şarj işlemi sırasında ise bu süreç tam tersine döner ve Li-ion katottan ayrılarak anota geri dönerler (Vıçıl, 2011). Şekil 4’te Li-ion pilin çalışma prensibi yer almaktadır.



Şekil 4: Li-ion Pilin Çalışma Prensibi (Pamuk, 2023)

Tablo 5'te, bu farklı piller arasında yapılan karşılaştırmalar neticesinde, Li-ion pillerin diğerlerine göre hangi yönlerde üstünlük gösterdiği ve hangi yönlerde dezavantajlarının olduğu açıklanmıştır. Bu bilgiler, Li-ion pillerin genel performansını ve kullanım alanlarını değerlendirmek için önemlidir.

Tablo 5: Li-ion Pillerin Diğer Piller İle Karşılaştırılması

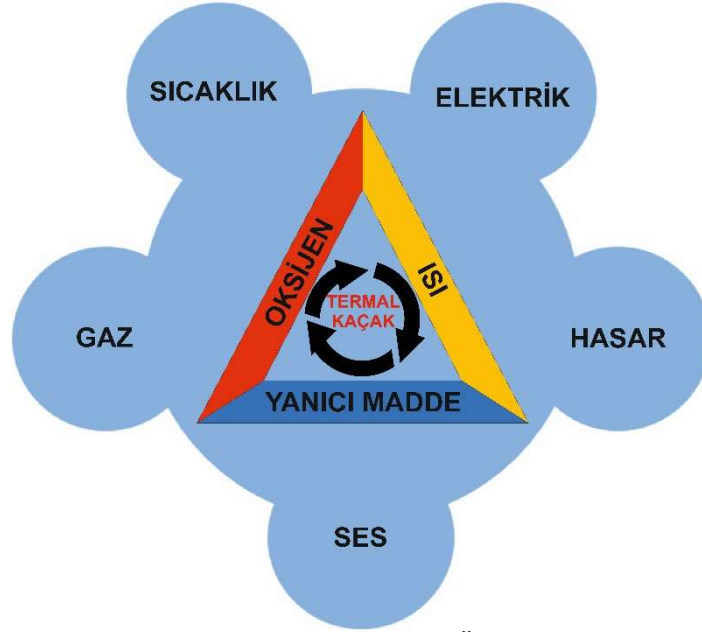
Artı	Eksi
<ul style="list-style-type: none">➤ Bakım gerektirmemesi➤ Dayanıklı➤ Geniş kullanım sıcaklık aralığı➤ Uzun süreli depolama ömrü➤ Hızlı şarj olabilme yeteneği➤ Yüksek güçlü deşarj kapasitesi➤ Yüksek enerji verimliliği➤ Yüksek spesifik enerji ve enerji yoğunluğu➤ Hafıza etkisinin olmaması	<ul style="list-style-type: none">➤ Maliyeti➤ Yüksek sıcaklıklarda parçalanma➤ Koruyucu devre gereksinimi➤ Aşırı şarj sonucunda kapasite kaybı veya termal kaçak meydana gelme ihtimali

Kaynak: (Polat & Keleş, 2012)

2. TERMAL KAÇAK

Li-ion piller, aşırı şarj olduğunda, aşırı ısındığında veya üretim hataları nedeniyle içsel kısa devre oluştuğunda risk oluşturabilir. Bu durumlarda, içindeki elektrolitler elektrotlarla kimyasal tepkimeye girerek pilin patlamasına ve içindeki elektrolitin havayla temas ederek alev almasına neden olabilir (Vıçıl, 2011). Li-ion pil yangınları alışılmış yangınlardan çok daha farklıdır. Pillerin termal kaçak olayı yaşaması sonucunda yangın ve patlamaların meydana gelme olasılığı oldukça fazladır. Termal kaçak devam ettiği süre boyunca tekrar alevlenmeler görülebilmektedir (Kazak, Şebeke Enerji Depolama için Kullanılan Lityum İyon Batarya İle İlgili Yangın Güvenliği, 2024). Dünyada çok sayıda Li-ion pil yangınları ve patlamaları görülmektedir. Amerika Birleşik Devletleri (ABD) Federal Havacılık İdaresi (FAA) tarafından 23 Ocak 2006 ile 1 Haziran 2022 tarihleri arasında kargo ve bagaj olarak taşınan piller sonrası gerçekleşen 373 olay kaydedilmiştir (Federal Aviation Administration, 2022).Yapılan araştırmalar neticesinde, 2022 yılında 100 bin satış başına düşen yangın sayısı elektrikli otomobillerde 25, hibrit otomobillerde 3.745, geleneksel araçlarda 1.530 olarak verilmiştir (Cabacı, 2023). Temmuz 2023 tarihinde Almanya'dan Mısır'a götürülen 3.700 otomobil taşıyan gemi Hollanda açıklarından yanmıştır. Gemide 500 adet elektrikli otomobil olduğu bilinmekte, yangının ise elektrikli otomobillerden birinden çıktığı düşünülmektedir (Sarı, 2023). Ekim 2023 tarihinde Türkiye İstanbul Tuzla'da 6 adet elektrikli otomobil taşıyan tırda bir adet elektrikli otomobil bilinmeyen sebeple patlamıştır. Patlayan otomobil diğer otomobillerin alev alarak yanmalarına neden olmuştur. İtfaiyeciler tarafından söndürülen otomobiller tekrardan alev almıştır. Tekrar alev alan otomobiller itfaiyeciler tarafında su ile 2 saat soğutma işlemi yapılmıştır (DHA, 2023). ABD'de 19 Ağustos 2006 tarihinde satışı yapılan Samsung Note 7 cep telefonlarında pillerin aşırı ısındığına ilişkin 92 şikâyet, bunların 26'sında yanık vakası, 55 yangın olayı görülmüştür. Şirket bu olaylardan dolayı satışı yapılan telefonları toplamıştır (Frankel & Tsukayama, 2016). New York itfaiye teşkilatları 2022 tarihinde 200'den fazla elektrikli scooter ve bisiklet yangınına müdahale ettikleri raporlanmıştır. Elektrikli scooterlerde kullanılan Li-ion piller cep telefonlarına kıyasla 50 kat daha büyük pillere sahiptir. Bu doğrultuda yangın yükünde çok fazla olduğu anlaşılmıştır. Tüketicilerin elektrikli scooter ve bisiklet alımlarında UL standartlarına sahip ve güvenilir satıcılardan satın almaları önerilmektedir (Öztürk, 2023). Li-ion pillerin kullanıldığı bir diğer alan elektronik sigaralardır. Ağustos 2009 ile Nisan 2017 arasında 243 elektronik sigara patlamıştır. 158 kişi yaralanma bildirmiş, 85 kişi ise herhangi bir yaralanma bildirmemiştir. Kore'de Enerji Depolama Sisteminde tek pilde termal kaçığın oluşması nedeniyle 3.500 Li-ion pil alev almıştır (Wang, Mao, Stolarov, & Sun, 2019). Fakat Li-ion piller güvenlik tehlikeler taşımaktadır. Pillerin kısa devre veya aşırı ısınması nedeniyle termal kaçaklara sebep vererek patlamalara ve yangınlara yol açmaktadır. (Kong, Li, Jiang, & Pecht, 2018).

Şekil 5'te gösterildiği gibi, tek bir pilin termal kaçak olayının tehlike özellikleri genellikle ses, sıcaklık, hasar, elektrik, gaz vb. içerir. Pil termal kaçak özelliklerinin kapsamlı bir anlayışı, termal kaçak uyarılarının ve yangınla mücadelenin daha iyi gerçekleştirilmesine rehberlik edebilir.



Şekil 5: Termal Kaçak Olayı Yaşayan Pilin Tehlike Özellikleri (Wang, ve diğerleri, 2023)

Li-ion pillerin yanmasının veya patlamasının nedenleri;

- Kısa devre,
- Mekanik kötü kullanım (Delinme, darbe vb.),
- Çalışma sıcaklığı arasında olmaması,
- Pilin aşırı şarj edilmesi,
- Pilin deşarj olması,
- Tasarım ve üretim hatalarının hepsi pillerin yanmasına veya patlamasına neden olmaktadır (Saxena, Kong, & Pecht, 2018).

Termal kaçak süreci; pilin voltajını, sıcaklığını ve basıncını etki etmektedir. Pilin voltajı, elektrot katmanlarının ayrılmasından dolayı termal kaçıktan önce düşmektedir. Isı üretim hızı, ısı dağıtım hızını aşması sonucunda pilin sıcaklığı artmaya başlamaktadır (Kong, Li, Jiang, & Pecht, 2018). Pilin ısınmasıyla termal kaçak meydana gelmektedir. Termal kaçak sırasında görülen jet alev ve gaz saçan kıvılcıklar sonucunda ortama yüksek miktarda zehirli, patlayıcı ve yanıcı duman oluşmasını sağlamaktadır. Ortama ısı ve gaz salınımı yapmaktadır (Şenyürek, Soykan, & Çelik, 2022). Yanıcı, parlayıcı, patlayıcı, zehirli ve boğucu gaz salınımı yapmaktadır. Hidrojen (H₂), hidrojen florür (HF), karbonmonoksit (CO), karbondioksit (CO₂), etilen (C₂H₄), fosforil florür (POF₃), fosfor pentaflorür (PF₅), kükürt dioksit (SO₂) gibi gazlardır (Kazak, Su Sisi, CO₂ ve HFC-227ea Söndürme Maddelerinin , Lityum İyon Batarya (LIB) Üzerinde Deneysel Çalışma, 2023). Termal kaçak sırasında aşağıdaki durumlar görülmektedir:

- Isınma meydana gelir ve sıcaklık artmaya başlar,
- Pilin koruyucu bölümleri erimeye başlar,
- Elektrolitlerin ısınması sonucunda elektrolitler yanabilir ve ortama gaz salınımı yapabilir,
- Ayırıcı eriyerek kısa devre yaşanmasına neden olabilir,
- Katot yapısı bozulması sonucunda ortama oksijen (O) gaz salınımı yapabilir (Kılınç, 2022).

Yanıcı gazlar, açık ateş, kıvılcım, elektrik arkları ve kendiliğinden tutuşma ile yanabilirler. Katot ve anot elektrotun ve elektrolit malzemenin arızalanması pilin yanmasına veya patlamasına neden olmaktadır (Şenyürek, Soykan, & Çelik, 2022). Tablo 6’da pillerin kötü kullanım durumları ve nedenleri yer almaktadır.

Tablo 6: Pillerin Kötü Kullanım Durumları ve Nedenleri

Durum	Doğrudan Neden
a. Termal	Aşırı Isınma Aşırı Soğuk Yangın Termal Şok
b. Mekanik	Darbe Düşme Delinme Ezilme Titreşim
c. Kısa Devre	Dahili Harici
d. Elektrik Arızası	Aşırı Şarj Aşırı Deşarj

Kaynak: (Şenyürek, Soykan, & Çelik, 2022)

a. Termal Arıza: Pillerde sıcaklık 90 °C ile 120 °C aralığında ayrışma başlayabilir, elektrolit arayüz katmanı ekzotermik olaya sebep verebilir. Hidrokarbon elektrolitler 200 °C’nin üzerinde ayrışabilir ve sıcaklığı artırabilir.

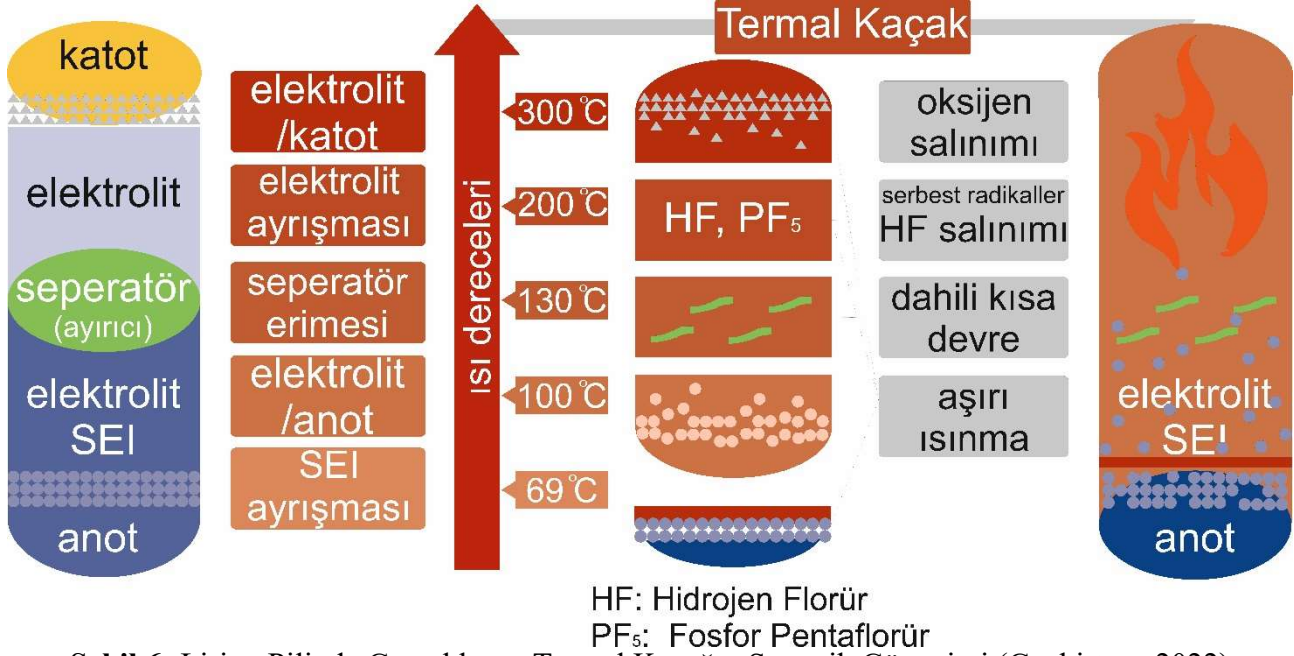
b. Mekanik Hasar: Herhangi bir mekanik nedenlerden dolayı harici bir kazadan kaynaklanabilecek hasarlar; trafik kazaları gibi doğrudan ve dolaylı oluşabilecek kazalar, pilin yapımı aşamasında veya pilin yere düşürülmesi gibi durumlar nedeniyle kısa devre oluşabilir.

c. Kısa Devreler: Ayırıcının (katot ve anodu ayıran parça) görevini yapamaması durumunda elektrolit maddeden katoda ve anota temas etmesini sağlayabilir. Üretim hatasından veya arızadan dolayı kaynaklanabilir. Bunun neticesinde kısa devre olur ve pil eriyebilir.

d. Elektrik Arızası: Aşırı şarj ve deşarj durumunda katot ve anot elektrotlarda boğulmalar gözlemlenebilir. Aşırı şarj, anot karbon levhanın bütünlüğünün bozulmasına neden olur; aşırı deşarj, katot karbon levhanın bütünlüğünün bozulmasına neden olabilir. Buda pillerin ısınması sonucunda yanmasına veya patlamasına neden olabilir (Şenyürek, Soykan, & Çelik, 2022).

Yukarıda yer alan kötü kullanım sebeplerinden herhangi biri, pilin iç sıcaklığının artmasına neden olabilir, bu da SEI (Anot yüzeyindeki lityum atomlarından oluşan bir ağa, stabil elektrolit arayüzü) parçalanması gibi ekzotermik reaksiyonların başlatılmasına yol açabilir. Bu, anotun korumasının kaybına neden olabilir, böylece anot içindeki florürleştirilmiş bağlayıcı, litiye edilmiş karbonla ekzotermik reaksiyon gösterebilir, aralıklı lityum ve elektrolit arasındaki ekzotermik reaksiyonlar veya oksijen salgılayarak yanmayı sağlayan katot parçaları sonucunda yanma meydana gelebilmektedir. Serbest bırakılan ısı, pilin sıcaklığını artırır ve ekstra ısı üreten ek reaksiyonları başlatır, böylece bir ısı-sıcaklık reaksiyon döngüsü oluşturur. Bu döngü, yüksek iç sıcaklıklar ve basınçlarla sonuçlanır, bu da pil şişmesine, pil patlamasına, gaz boşalmasına (bazen şiddetli) ve olası yangına yol açabilir. Normal çalışma aralığının üzerindeki sıcaklıklarda, birçok elektrokimyasal reaksiyon süreci, çoğu aynı anda gerçekleşen oldukça karmaşık hale gelir. Şekil 6’da Li-ion termal kaçak süreçleri yer almaktadır.

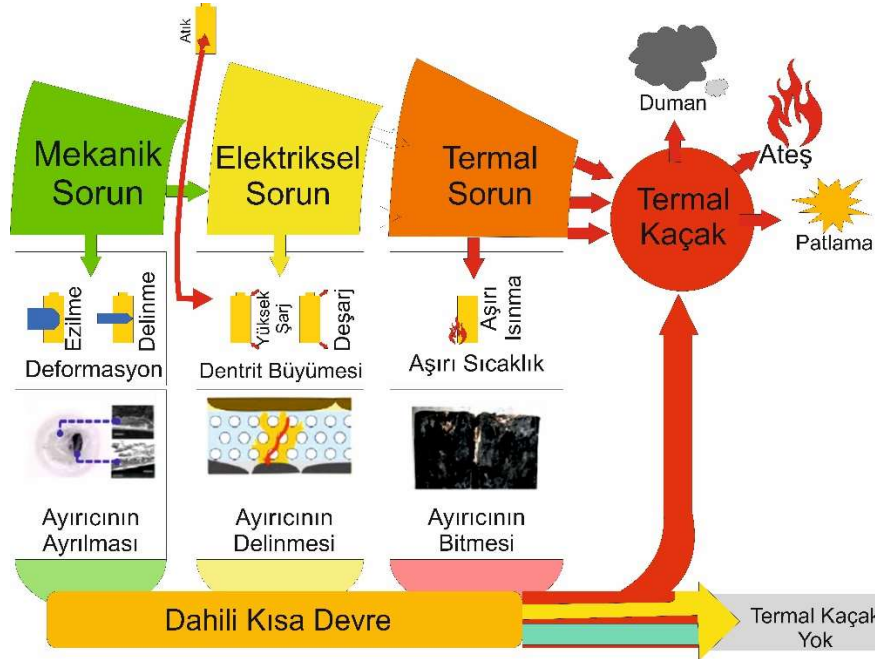
69°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda, SEI'nin parçalanmaya başlar ve ardından anot ile elektrolit arasında, anot malzemeleriyle bağlayıcı arasında ekzotermik reaksiyonlar, ayırıcı erimesi, elektrolit parçalanması ve katot malzemesi ile elektrolit arasında reaksiyonlar gerçekleşir. (Ghiji, ve diğerleri, 2020).



Şekil 6: Li-ion Pilde Gerçekleşen Termal Kaçağın Şematik Gösterimi (Gezhi-test, 2022)

1999'da 4 arkadaşın yaptığı deneyde, pillerin üzerinde termal kaçağın gerçekleştiği ve ayırıcı erirken keskin voltaj düşüşü görülmüştür. Termal kaçağın başlangıcını 104°C, 109°C ve 144°C'de ölçtüler; buradaki farklılıklar çeşitli pil açık devre voltajı ile bağlantılı olduğu görülmüştür. Termal kaçağın başlangıç sıcaklığı yalnızca pil açık devre voltajından değil aynı zamanda pil katot malzemesinin türüne de etkilenebilir (Hallarj, Maleki, Hong, & Selman, 1999). Ticari olarak kullanılan katot malzemelerinin oksidasyon yetenekleri LiCoO₂ (Lityum-kobalt-oksit) > LiMn₂O₄ (Lityum-manganez-oksit) > LiFePO₄ (Lityum-demir-fosfat) şeklindedir (Weihe, Hong, Xuejie, & Liqian, 2005).

Termal kaçağın ciddi yangın güvenliği sonuçları doğurur, özellikle de yolcu araçları, uçaklar ve denizaltılar gibi sınırlı alanlarda. Geçmiş on yılda Li-ion piller ile ilişkilendirilen yangın risklerinin olasılığı ve ciddiyeti, 40 ölümlü sonuçlanan 300'den fazla yangın veya yangınla ilgili olayın rapor edilmesiyle sunulmuştur (Un & Aydın, 2021). Li-ion pil yangın olayları, mobil telefonlardan elektrikli araçlara (EA) ve uçaklara kadar yaygındır. Li-ion pil kazalarının potansiyel nedenleri ve ayırıcı yırtılmasına, delinmesine ve çökmesine yol açan mekanizmalar, sonrasında iç kısa devre ve muhtemel termal kaçış, Şekil 7'de sunulmuştur. Birçok kaza, Li-ion pil teknolojisine ciddi bir güvenlik endişesi olduğunu göstermiştir, bu da hükümetleri bu cihazların taşınması ve depolanması için yeni düzenlemeler ve yangın koruma teknolojileri uygulamaya zorlamıştır (Ghiji, ve diğerleri, 2020).



Şekil 7: Ayırıcı Arızasına Neden Olan Çeşitli Kötüye Kullanım Koşulları, Ardından Dahili Kısa Devre ve Muhtemelen Termal Kaçış Ve Yangına Yol Açabilir (Un & Aydın, 2021)

2.1 Li-ion Pil Yangınlarını Söndürmede Kullanılan Söndürücüler

2.1.1 Su bazlı söndürücüler

Su bazlı söndürücüler, yangınla mücadele etmede kullanılan en ucuz söndürme maddesidir. Su, yüksek ısı kapasitesi ve buharlaşma latent ısısı nedeniyle mükemmel bir soğutma sağlar ve termal kaçışın çevredeki pillere yayılmasını azaltır veya durdurur. Ancak suyun, lityum heksaflorofosfat (LiPF₆) ile reaksiyona girebileceği ve toksik ve zararlı HF oluşturabileceği unutulmamalıdır. Bu, lityum tarafından kimyasal olarak indirgenebilir ve yanıcı hidrojen üretebilir, akımı iletebilir ve pilde dış kısa devrelere neden olabilir, bu da Li-ion pilde termal kaçak olayına neden olabilir (Wang, Mao, Stolarov, & Sun, 2019; Larsson, 2017).

Aşağıda 3 su bazlı söndürme maddeleri verilmiştir.

- Su jeti: Su jeti bastırıcıları, yanmakta olan malzemelere doğrudan bir su akışı uygulayarak soğutma sağlar ve yeniden tutuşmayı engeller. Elektrikli ekipmanlar üzerinde canlı olarak kullanılmamalıdır çünkü elektrik çarpması riski vardır.
- Su spreyi veya sprinkler: Su spreyi veya sprinkler bastırıcıları, ince su damlacıkları püskürterek çalışır; her bir damlacık hava ile çevrilidir ve iletken değildir. Püskürtme, damlacıkların yangın dumanına nüfuz etmesi ve yüzeyleri soğutması için yeterli bir momentuma sahiptir, ayrıca bazı enerjiyi buharlaşma yoluyla havayı soğutmak için harcar (Ghiji, ve diğerleri, 2020).
- Su sisi: Su sisi, 1000 µm'den daha küçük bir damlacık boyutu aralığından oluşur, bu damlacıklar, bir sprinklerden gelen damlacıklardan çok daha küçüktür. Daha ince damlacıklar, aynı su hacmi için sıcak havadan daha fazla ısı enerjisi emilmesine neden olan daha büyük bir yüzey alanı hacim oranına sahiptir, aynı zamanda damla boyutu dağılımı içindeki daha büyük damlalar yangın dumanına nüfuz edebilir ve yanıcı malzemeyi soğutabilir (Kazak, Su Sisi, CO₂ ve HFC-227ea Söndürme Maddelerinin , Lityum İyon Batarya (LIB) Üzerinde Deneysel Çalışma, 2023).

2.1.2 Köpüklü söndürücüler

Köpük yangın söndürücüler, Sınıf A ve Sınıf B yangınlarında kullanılabilir, bu nedenle Li-ion pil yangınlarını söndürmek için kullanılabilirler. Köpük, bir sıvının veya katının yüzeyini soğutur ve mühürler, yanıcı buhar ile sıcak yüzey/yakıt arasına bir bariyer koyar ve yanan madde ile havayı keser.

Köpüğün etkili olabilmesi için, pili tamamen kapsamaması gerekir ki bu da Li-ion pillerin çok aşamalı jet yangınları olarak kabul edilmesi nedeniyle zor bir görevdir, çünkü yüksek hızlı yanıcı gaz tahliyesi mevcuttur (Yuan, ve diğerleri, 2021).

2.1.3 Kuru Kimyevi Tozlu (KKT) söndürücüler

KKT söndürücüler, yangın tepkimelerini kimyasal olarak kesintiye uğratarak çalışır. Ancak, soğutma sağlamazlar ve yeniden yanma meydana gelebilir. Tozlar, özellikle kapalı alanlarda solunum problemlerine neden olabilir (Beitland , Stokland, Skaug, Skogstad, & Klingenberg , 2006).

2.1.4 CO₂'li söndürücüler

CO₂ söndürme maddesi, yangını bastırarak işlev görür, yanma bölgesindeki oksijeni CO₂ ile değiştirir. CO₂, Sınıf A ve B yangınlarında kullanılabilir ve elektrik kaynaklı yangınlarda güvenli olarak kullanılmaktadır. CO₂ söndürücüler herhangi bir kalıntı bırakmaz; ancak, kullanımı özellikle kapalı alanlarda solunum sorunlarına yol açabilir (Liu, ve diğerleri, 2018). CO₂, düşük soğutma kapasitesi nedeniyle Li-ion pil yangınları için ideal bir söndürme ajanı değildir (Kazak, Şebeke Enerji Depolama için Kullanılan Lityum İyon Batarya İle İlgili Yangın Güvenliği, 2024).

2.1.5 Halon bazlı söndürücüler

Halon, yanma reaksiyonlarını kimyasal olarak bozarak yangını bastırır. Halon 1211 (bir sıvı akışı söndürücü) ve Halon 1301 (bir gazlı genel söndürücü), herhangi bir kalıntı bırakmaz ve Sınıf B ve elektrik kaynaklı yangınlarda kullanılmaktadır, ancak Sınıf A yangınlarında da etkilidir (Ghiji, ve diğerleri, 2020). Halonlar, küresel ısınma etkenleridir ve ozon tabakasını azaltarak 1994 yılında Temiz Hava Yasası kapsamında üretiminin durdurulmasına neden olmuştur, ancak birçok deniz gemisi, uçak, tank ve denizaltıda yangın güvenliğinin ayrılmaz bir parçası olarak kalmaya devam etmektedir. Halon esaslı söndürücüler soğutma sağlamazlar (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2017).

2.1.6 HFC-227ea söndürücüler

HFC-227ea söndürme maddesi çeşitli yangınları kolayca söndürebilir ve geniş bir yangın sınıflarını kapsar: Sınıf A, Sınıf B ve elektrik kaynaklı yangınlar. Li-ion pil yangınlarını da etkili bir şekilde söndürebilir ancak bir dezavantajı vardır: Soğutma özelliği yoktur. Yani, yangını söndürdükten sonra, pil veya yangın bölgesinin soğutulması için ek önlemler almak gerekebilir. Bu nedenle, HFC 227-ea, Li-ion pil yangınlarını söndürmek için etkili bir çözüm olabilir ancak yangının yeniden alevlenmesini engelleme özelliği olmadığı için ek güvenlik tedbirleri alınması gerekebilir (Kazak, Su Sisi, CO₂ ve HFC-227ea Söndürme Maddelerinin , Lityum İyon Batarya (LIB) Üzerinde Deneysel Çalışma, 2023).

2.1.7 Sulu Vermikülit Dağılımı (SVD) yangın söndürücüler

AVD adlı bir söndürme maddesinin özelliklerini ve Li-ion pil yangınlarında kullanımı:

- Sınıf A ve Sınıf D Yangınlarına Etkili: SVD, Sınıf A ve Sınıf D yangınlarını etkili bir şekilde söndürebilir.
- Li-ion pil yangınlarında kanıtlanmış sonuçlar: Lit-ex firması, SVD'nin Li-ion pil yangınlarında etkili olduğunu ve bu konuda kanıtlanmış sonuçlara sahip olduğunu belirtiyor. Bu, söndürme maddesinin Li-ion pil yangınlarını başarıyla söndürebildiği anlamına gelir.
- Taşınabilir ve sabit kurulum yapıları: SVD, hem taşınabilir hem de sabit kurulum avantajı sayesinde her ortamda rahatlıkla kullanılmaktadır.
- Vermikülit: SVD'nin ana bileşeni, bir grup hidratlanmış laminar alüminyum-demir-magnezyum silikat olan vermikülit adlı mineraldir. Vermikülit, ince, düz pullar şeklinde olan mikroskopik su tabakaları içerir.

➤ Çevre Dostu: Vermikülit, doğal olarak oluşan bir mineraldir ve REACH düzenlemelerinden muaf tutulmuştur. Bu, çevre dostu bir malzeme olduğu anlamına gelir. Ayrıca, kimyasal ve fiziksel olarak inerttir ve insanlar, bitki yaşamı ve hayvanlar için toksik değildir. Sonuç olarak, metin, SVD'nin Li-ion pil yangınlarını söndürmek için etkili, çevre dostu ve güvenli bir çözüm olduğunu açıklıyor. Bu, yangın güvenliği ve koruma alanında önemli bir gelişme olarak değerlendirilmektedir (Kazak, Doğru Yangın Söndürme Cihazının Seçimi İçin Gerekli Bilgiler, 2024).

3. SONUÇ ve ÖNERİLER

Li-ion pillerin temel çalışma prensiplerini vurgulayarak güvenlik endişelerini ele alır. Li-ion pillerinin karmaşık bir yapıya sahip olmasına rağmen güvenliklerini sağlamak için özel tasarımlara ve akıllı devrelere sahip oldukları belirtilir. Li-ion pillerinin geniş kullanım alanları ve avantajları açıklanırken, özellikle cep telefonları, bilgisayarlar ve elektrikli araçlar gibi teknolojik ürünlerdeki uzun süreli çalışma ve yüksek akım kapasitesi vurgulanır.

Termal kaçakların Li-ion piller için ciddi bir güvenlik tehdidi oluşturduğu ve birçok ciddi olaya neden olduğu açıklanır. Yangın ve patlama riskinin yüksek olduğu belirtilirken, bu tür olayların çeşitli endüstrilerde, özellikle elektrikli araçlarda, elektronik sigaralarda ve enerji depolama sistemlerinde sıkça görüldüğüne dikkat çekilir.

Sonuçlar kısmında, Li-ion pil yangınlarını söndürmek için kullanılan farklı söndürücü türlerinin özellikleri ve etkinliği hakkında detaylı bilgi verilir. Su bazlı, köpüklü, kuru kimyasal tozlu, CO₂ ve HFC-227ea gibi farklı söndürme maddeleri incelenir ve her birinin avantajları ve dezavantajları belirtilir. Özellikle, sulu vermikülit dağılımının (SVD) Li-ion pil yangınlarını etkili bir şekilde söndürmek için önerildiği vurgulanır. SVD'nin çevre dostu, etkili ve güvenli bir çözüm olduğu belirtilir, bu da Li-ion pil yangınlarının kontrol altına alınması için önemli bir gelişme olarak değerlendirilir.

Kaynakça

Armand, M., & Tarascon, J.-M. (2008, Mart). Building Better Batteries. *Nature*, 451-652. doi:10.1038/451652a

Beitland, S., Stokland, O., Skaug, V., Skogstad, A., & Klingenberg, O. (2006). Inhalation of Fire Extinguisher Powder. *European Journal of Trauma*, 32, 286-291. doi:10.1007/s00068-006-6052-y

Bifiki. (2020, Şubat 8). *Elektrotlar ve Elektrokimyasal Hücreler*. bifiki.com: <https://bifikasi.com/biki/elektrotlar-ve-elektrokimyasal-hucreler/> adresinden alındı

Cabacı, B. (2023, Ağustos 21). *Elektrikli Araçta Yangın Riskini Azaltmak Mümkün*. İstanbul Ticaret Gazetesi: <https://istanbulticaretgazetesi.com/tr/elektrikli-aracta-yanigin-riskini-azaltmak-mumkun#:~:text=Ara%C5%9Ft%C4%B1rmalar%C4%B1m%C4%B1za%20g%C3%B6re%2C%202022'de%20y%C3%BCz,%2C%20fosil%20yak%C4%B1tl%C4%B1%20ara%C3%A7larda%201.5%20E2%80%9D> adresinden alındı

DHA. (2023, Ekim 06). *Sevkiyat Aşamasındaki 6 Elektrikli Otomobil Yandı*. TRT HABER: <https://www.trthaber.com/haber/turkiye/sevkiyat-asamasindaki-6-elektrikli-otomobil-yandi-801041.html> adresinden alındı

Federal Aviation Administration. (2022, Haziran 1). *Events With Smoke, Fire, Extreme Heat Or Explosion Involving Lithium Batteries*. Federal Aviation Administration: <https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/2022-06/Jun%201,%202022%20Li-Batt.%20Thermal%20Events.pdf> adresinden alındı

Frankel, T., & Tsukayama, H. (2016, Eylül 16). *Can You Trust the Lithium-ion Battery in Your Pocket?* washington post: <https://www.washingtonpost.com/news/the-switch/wp/2016/09/16/can-you-trust-the-lithium-ion-battery-in-your-pocket/> adresinden alındı

GEMAŞ. (2022, Ağustos 20). *Pil Nedir? Çeşitleri Nelerdir? Şarj Edilebilen ve Şarj Edilemeyen Piller*. Gemaş Elektro Market : <https://www.elektromarket.com.tr/blog/icerik/pil-nedir-cesitleri-nelerdir-sarj-edilebilen-ve-sarj-edilemeyen-piller> adresinden alındı

Gezhi-test. (2022). *Lityum Pil Termal Güvenlik Özellikleri Test Değerlendirilmesi*. http://www.gezhi-test.com/taihao/item_22397174_2050857.html adresinden alındı

Ghiji, M., Novozhilov, V., Moinuddin, K., Joseph, P., Burch, I., Suendermann, B., & Gamble, G. (2020). Lithium-Ion Battery Fire Suppression. *Energies*, 13. doi:10.3390/en13195117

Hallarj, S., Maleki, H., Hong, J., & Selman, J. (1999, Ekim). Thermal Modeling And Design Considerations Of Lithium-ion Batteries. *Journal of Power Sources*, 83(1-2), 1-8. doi:10.1016/S0378-7753(99)00178-0

Kazak, D. (2023, Kasım-Aralık). Su Sisi, CO2 ve HFC-227ea Söndürme Maddelerinin , Lityum İyon Batarya (LIB) Üzerinde Deneysel Çalışma. *Yangın ve Güvenlik Dergisi*(243), 38-46. <https://www.yanginguvenlik.com.tr/edergi/5/243/40/index.html#zoom=z> adresinden alındı

Kazak, D. (2024). Doğru Yangın Söndürme Cihazının Seçimi İçin Gerekli Bilgiler. *SSS Journal*, 10(1), 205-210. doi:10.5281/zenodo.10620135

Kazak, D. (2024). Şebeke Enerji Depolama için Kullanılan Lityum İyon Batarya İle İlgili Yangın Güvenliği. *Yangın ve Güvenlik Dergisi*(244), 20-24. <https://www.yanginguvenlik.com.tr/edergi/5/244/22/index.html> adresinden alındı

Kılınç, T. (2022). Elektrikli Araç ve Şarj İstasyonlarında Yangın Güvenliği. *Uluslararası Katılımlı Yangın Sempozyumu*. Niğde. <http://yanginsempozyumu.org/wp-content/uploads/2022/09/002.pdf> adresinden alındı

Kong, L., Li, C., Jiang, J., & Pecht, M. (2018). Li-Ion Battery Fire Hazards and Safety Strategies. *Energies*, 11(9). doi:10.3390/en11092191

Larsson, F. (2017). *Lithium-ion Battery Safety Assessment by Abuse Testing, Fluoride Gas*. İsveç: Chalmers University of Technology.

Liu, Y., Duan, Q., Xu, J., Chen, H., Lu, W., & Wang, Q. (2018). Experimental study on the efficiency of dodecafluoro-2-methylpentan-3-one on suppressing lithium-ion battery fires. *RDV Advances*(73). doi:10.1039/C8RA08908F

MEB. (2012). Güneş Pillerinde Üretilen Doğru Akımın Temelleri. MEB içinde, *Yenilenebilir Enerji Kaynakları*. Ankara: Milli Eğitim Bakanlığı. https://megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/G%C3%BCne%C5%9F%20Pillerinde%20%C3%9Cretilen%20Do%C4%9Fru%20Ak%C4%B1m%C4%B1n%20Temelleri.pdf adresinden alındı

Özcan, Ö., Karadağ, T., Altuğ, M., & Özgüven, Ö. (2021). Elektrikli Araçlarda Kullanılan Pil Kimyasallarının Özellikleri ve Üstün. *Gazi University Journal of Science Part A: Engineering and Innovation*, 8(2), 276-298. <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/1700591> adresinden alındı

Özsin, G. (2021). Na-iyon Pillerin Anotlarında karbon Nanoyapılarının Kullanımı Üzerine bir Derleme. *Politeknik Dergisi*, 24(3), 1151-1170. doi:10.2339/politeknik.825365

Öztürk, E. (2023, Mart 11). *Lityum-iyon Piller ABD'de Büyük Bir Yangına Sebep Oldu!* Haber 7: <https://www.haber7.com/teknoloji/haber/3308588-lityum-iyon-piller-abdde-buyuk-bir-yangina-sebep-oldu> adresinden alındı

Pamuk, M. (2023, Mart). Lityum İyon İle Katı Hal Lityum Bataryalar Hakkında Bir inceleme. *Metalurji ve Malzeme Dergisi*(4), s. 33-36. https://www.metalurji.org.tr/dergi_mm/dergi_mm04/MetalurjiveMalzemeDergisi04.pdf adresinden alındı

Pil Sitesi. (2020, Ekim 24). *Pil ve Bataryaların Ömürleri*. Pilsitesi.com: <https://www.pilsitesi.com/blog/icerik/pil-ve-bataryalarin-omurleri> adresinden alındı

Polat, B., & Keleş, Ö. (2012, Temmuz 21). Lityum İyon Pil Teknolojisi. *TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası Yayın Organı*(162), s. 42-48.
https://www.metalurji.org.tr/dergi/dergi162/d162_4248.pdf adresinden alındı

Sarı, İ. (2023, Aralık 5). *Son Dönemde Tartışmalara Konu Oldu: Elektrikli Araçlarda Yangın Riski Diğer Araçlara Göre Daha mı Yüksek? Araştırmalar ve Uzmanlar Ne Diyor?* Hürriyet: <https://www.hurriyet.com.tr/gundem/son-donemde-tartismalara-konu-oldu-elektrikli-araclarda-yangin-riski-diger-araclara-gore-daha-mi-yuksek-arastirmalar-ve-uzmanlar-ne-diyor-42369172> adresinden alındı

Saxena, S., Kong, L., & Pecht, M. (2018, Mart 30). Exploding E-Cigarettes: A Battery Safety Issue. *IEEE*, 6, 21442-21446. doi:10.1109/ACCESS.2018.2821142

Şenyürek, Ü., Soykan, H., & Çelik, C. (2022). Elektrikli Araçlarda Batarya Kaynaklı Yangınlar. *Uluslararası Yakıtlar Yanma Ve Yangın Dergisi*, 10(1), 21-27. doi:10.52702/fce.1054263

T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2017, Nisan 7). Ozon Tabakasına İncelten Maddelere İlişkin Yönetmelik. Resmî Gazete Sayısı: 30031.

T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı. (2022). Mobilite Araç ve Teknolojileri Yol Haritası. Ankara: T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı. <https://www.sanayi.gov.tr/assets/pdf/plan-program/MobiliteAraçveTeknolojileriYolHaritasi.pdf> adresinden alındı

TAP. (2024). *Atık Piller*. Taşınabilir Pil Üreticileri ve İthalatçıları Derneği: <https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2Ftap.org.tr%2Fwp-content%2Fuploads%2F2018%2F02%2FTeknik-Sunum.ppt&wdOrigin=BROWSELINK> adresinden alındı

TAP. (2024). *Pil Nedir?* Taşınabilir Pil Üreticileri ve İthalatçıları Derneği: <https://tap.org.tr/pil-atik-pil/sss/pil-nedir/> adresinden alındı

TESLA. (2021). *Model S Emergency Response Guide*. tesla.com: https://www.tesla.com/sites/default/files/downloads/2021_Model_S_Emergency_Response_Guide_en.pdf adresinden alındı

Un, Ç., & Aydın, K. (2021). Thermal Runaway and Fire Suppression Applications for Different Types of Lithium Ion Batteries. *Vehicles*, 3(3), 480-497. doi:10.3390/vehicles3030029

Vıcıl, O. (2011, Şubat). Yeni Nesil Lityum-İyon Pil Teknolojileri. *TÜBİTAK*, 4(44), 46. <https://services.tubitak.gov.tr/edergi/yazi.pdf?jsessionid=mTIHvOAbYGKyükPE16cVKO4m?dergiKodu=4&cilt=44&sayi=725&sayfa=47&yaziid=31315> adresinden alındı

Vikipedi. (2023, Aralık 23). *Lityum iyon pil*. Vikipedi, Özgür Ansiklopedi: https://tr.wikipedia.org/wiki/Lityum_ion_pil adresinden alındı

Wang, K., Ouyang, D., Qian, X., Yuan, S., Chang, C., Zhang, J., & Liu, Y. (2023). Early Warning Method and Fire Extinguishing Technology of Lithium-Ion Battery Thermal Runaway: A Review. *Energies*, 16(7), 2960. doi:10.3390/en16072960

Wang, Q., Mao, B., Stoliarov, S., & Sun, J. (2019, Temmuz). A Review Of Lithium Ion Battery Failure Mechanisms And Fire Prevention Strategies. *Progress in Energy and Combustion Science*, 73, 95-131. doi:10.1016/j.pecs.2019.03.002

Weihe, K., Hong, L., Xuejie, H., & Liquan, C. (2005, Mart). Gas Evolution Behaviors for Several Cathode Materials in Lithium-ion Batteries. *Journal of Power Sources*, 142(1-2), 285-291. doi:10.1016/j.jpowsour.2004.10.008

Yuan, Ş., Çangı, C., Yan, S., Zhou, P., Qian, X., Yuan, M., & Liu, K. (2021, Kasım). A review of fire-extinguishing agent on suppressing lithium-ion batteries fire. *Journal of Energy Chemistry*, 62, 262-280. doi:10.1016/j.jechem.2021.03.031