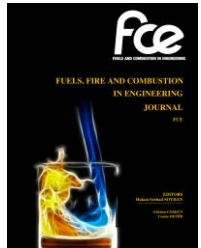


	MÜHENDİSLİKTE YAKITLAR, YANGIN VE YANMA DERGİSİ <i>FUELS, FIRE AND COMBUSTION IN ENGINEERING JOURNAL</i>		
	eISSN: 2564-6435 Dergi sayfası: http://dergipark.gov.tr/fce		
	<u>Geliş/Received</u> 14.09.2025 <u>Kabul/Accepted</u> 23.12.2025	<u>Doi:</u> 10.52702/fce.1783678	

LİTYUM İYON PİL ÜRETİM TESİSLERİNDE PROSES ADIMLARI YANGIN TEHLİKELERİ VE YANGIN RİSKLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Kayhan KARAİSMAİL^{1*}, Hakan Serhad SOYHAN²

ÖZ

Fosil yakıtlardan yenilenebilir temiz ve yeşil enerjiye geçiş, pillere ve akümülatörlere olan talebi arttırmaktadır. Bu talebi karşılamak için kullanılan pil yapılarından başlıcası olan lityum iyon piller (Li-iyon pil) artan küresel talebi karşılamak için endüstriyel tesislerde üretilmektedir. Pillerin üretim süreci, yeni enerji araçlarının ve elektrokimyasal enerji depolamanın ilerlemesi için son derece önemlidir. Lityum iyon piller çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanıldığından, tutarlı üretim kalitesinin sağlanması kritik hale gelmektedir. Lityum iyon pil hücrelerinin üretimi; elektrot üretimi, hücre birleştirilmesi ve hücre bitirilmesi olmak üzere toplam üç temel basamaktan meydana gelmektedir. Bu çalışmada lityum iyon pil hücreleri üreten fakat özellikle bir tesise özgül olmayan örnek bir lityum iyon pil üretim tesisine ait proses adımlarının genel özellikleri incelenerek yangın riskleri değerlendirilmesi yapılacaktır. Li-iyon pil üretim tesislerinde proses adımlarında risklerin belirlenerek değerlendirilebilmesi için TS EN ISO 19353:2019 standardına dayandırılarak oluşturulan metodolojiden ve literatürden faydalanılmıştır. Kullanılan bu yöntemde üretim tesislerindeki 17 proses adımının kendi içinde yangın tehlikeleri incelenerek yapılan risk değerlendirmesi sonucunda muhtemel risk seviyeleri belirlenmiştir. Örnek lityum iyon pil üretim tesisi için beklenen risk seviyelerinin; 2 proses adımında çok yüksek, 4 proses adımında yüksek, 4 proses adımında orta, 5 proses adımında düşük ve 2 proses adımında çok düşük olduğu sonucuna varılmıştır. Beklenen risk seviyelerine göre yangın senaryoları oluşturulabilecek, yangın önleme ve söndürme çözümleri tercihleri uluslararası standartlar referans alınarak uygulanabilecek bu kapsamda tesis için maliyet etkin politikası sağlanmış olacaktır.

Anahtar Kelimeler: Lityum İyon Pil, Lityum İyon Pil Üretim Prosesi, Risk Değerlendirme

* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

^{1*}Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yangın ve Yangın Güvenliği Ana Bilim Dalı
kayhan.karaismail1@ogr.sakarya.edu.tr  0009-0009-4682-3807

²Sakarya Üniversitesi, Yangın Uygulama ve Araştırma Merkezi, hsoyhan@sakarya.edu.tr  0000-0003-3723-9640

ASSESSMENT OF FIRE HAZARDS AND FIRE RISKS IN PROCESS STEPS IN LITHIUM-ION BATTERY PRODUCTION FACILITIES

ABSTRACT

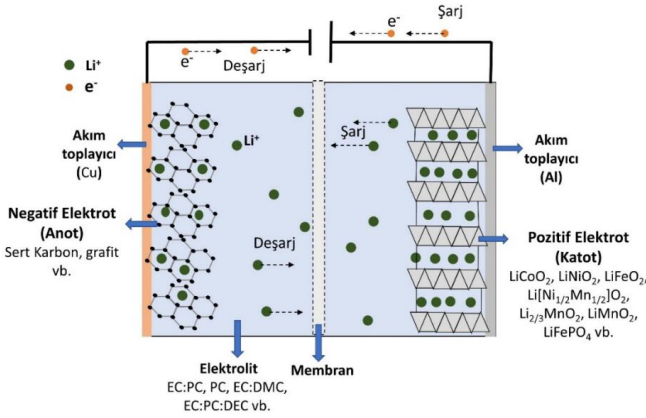
The transition from fossil fuels to renewable, clean, and green energy is increasing the demand for batteries and accumulators. Lithium-ion batteries (LIB), the primary battery structures used to meet this demand, are manufactured in industrial facilities to meet the growing global demand. The battery manufacturing process is crucial for the advancement of new energy vehicles and electrochemical energy storage. Because lithium-ion batteries are widely used in various fields, ensuring consistent production quality is critical. The production of lithium-ion battery cells consists of three primary steps: electrode production, cell assembly, and cell finishing. This study will assess fire risks by examining the general characteristics of the process steps of a representative LIB production facility that produces LIB cells but is not specific to a specific

facility. A methodology based on the TS EN ISO 19353:2019 standard and literature review were utilized to identify and assess risks across process steps in LIB production facilities. This methodology examined the fire hazards within 17 process steps in LIB production facilities and determined potential risk levels based on the risk assessment. The expected risk levels for the sample Lithium-ion battery production facility were determined to be very high in two process steps, high in four process steps, medium in four process steps, low in five process steps, and very low in two process steps. Fire scenarios can be created based on the expected risk levels, fire prevention and suppression solutions can be implemented by referencing international standards, and a cost-effective policy for the facility will be established within this scope.

Keywords: Lithium-Ion Battery, Lithium-Ion Battery Manufacturing Process, Risk Assessment

1. GİRİŞ

Dünyada ve ülkemizde küresel ısınmayı önlemek adına pek çok faaliyet sürdürülmektedir. Bu faaliyetlerden en önemlisi ise şüphesiz fosil yakıtların kullanımının sınırlandırılması ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımıdır [1]. S&P Global Commodity Insights, enerji ve emtia bilgisi sağlayıcısı tarafından 2023 yılında yayımlanan araştırma yazısı raporuna göre lityum iyon pil üretim kapasitesinin 2030'a kadar istikrarlı bir şekilde büyüyeceği tahmin edilmektedir [2]. Hücre tipine bakılmaksızın, herhangi bir lityum iyon pil hücresinin en küçük birimi, iki elektrot ve elektrotları birbirinden ayıran bir ayırıcıdan oluşmaktadır. İyonik olarak iletken olan elektrolit, elektrotların gözeneklerini ve hücre içinde kalan boşluğu doldurmaktadır. Şekil 1'de lityum iyon pil hücre yapısı gösterilmiştir.



Şekil 1. Li-iyon pil temel bileşenler ve çalışma sistemi [3]

Lityum-iyon bataryaların diğer batarya teknolojilerine göre avantajları vardır. Lityum iyon piller yüksek enerji yoğunlukları, yüksek kapasiteleri, kendi kendine deşarj oranları düşük olması ve yüksek kulombik verimlilikleri nedeniyle büyük ilgi görmektedir [4]. Kullanım alanları, kapasitelerine, güvenlik gereksinimlerine ve kimyasal yapılarına göre çeşitlilik gösterir. Lityum iyon piller, taşınabilir cihazlarda en yaygın kullanılan enerji kaynaklarıdır. Elektrikli araçlarda ve hibrit araçlarda lityum iyon piller uzun menzil ve yüksek döngüye ulaşabilmeleri nedeniyle çok önemli avantaj sağlamışlardır. Güneş ve rüzgâr gibi yenilenebilir enerji kaynaklarıyla birlikte lityum iyon piller, enerji depolamada önemli bir rol oynamaktadır. Li-iyon piller tıbbi cihazlar, havacılık uzay ve savunma sanayi, küçük ev aletleri ve denizcilik gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Lityum iyon pillerin diğer ikincil pillerle (gümüş-çinko, nikel-çinko, nikel-hidrojen)

karşılaştırıldıklarında sergiledikleri avantaj ve dezavantajlar Tablo 1'de sıralanmıştır [5].

Tablo 1. Li-iyon pillerin ve ikincil pillerin avantaj ve dezavantajları [5]

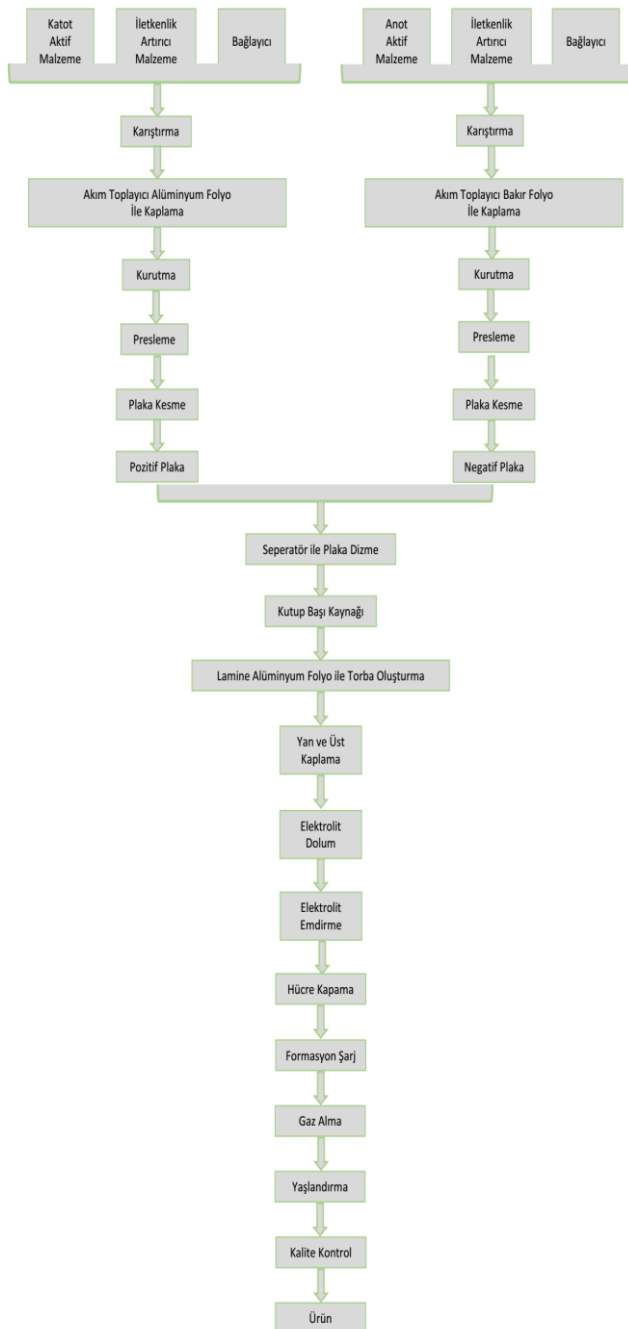
Li-iyon Pil Avantajlar	Li-iyon Pil Dezavantajlar	İkincil Piller Avantajlar (Kurşun-Asit, NiMH, NiCd vb.)	İkincil Piller Dezavantajlar (Kurşun-Asit, NiMH, NiCd vb.)
Kapalı hücre olması ve bakım gerektirmemesi	Fiyatı	Düşük maliyet (Kurşun-asit)	Düşük enerji yoğunluğu
Uzun ömürlü	Yüksek sıcaklıklarda bozunması	Geniş sıcaklık aralığında çalışma (NiCd)	Kadmiyum toksisitesi (NiCd)
Geniş çalışma sıcaklık aralığı	Koruyucu devre ihtiyacının oluşu	Güvenli kimya ve çevre dostu oluşu (NiMH)	Yüksek kendi kendine deşarj (NiMH)
Uzun raf ömrü	Aşırı şarj sonucunda kapasite kaybı veya termal bozunma	Olgun ve yaygın teknoloji	Ağır yapı (Kurşun-asit)
Çabuk şarj olabilmeye kabiliyeti		Bakım kolaylığı	Kısa çevrim ömrü
Yüksek güçlü deşarj kapasitesi			
Yüksek enerji verimi			
Yüksek spesifik enerji ve enerji yoğunluğu			
Hafıza etkisinin olmayışı			

2. LİTYUM İYON PİL ÜRETİM SÜRECİ

2030 yılına kadar lityum iyon pillere yönelik küresel talebin 9.300 GWh'ye ulaşacağı tahmin edilmektedir [6]. Bu artış, lityum iyon pil üreticilerinin mevcut üretim kapasitelerini artırmalarını veya yeni üretim tesislerini devreye almalarını zorunlu kılmaktadır. Lityum iyon pil üretimi, birçok işlem adımını içeren karmaşık bir süreçtir ve büyük üreticiler halihazırda kapsamlı bir üretim ve imalat altyapısı oluşturmuş durumdadır [7].

2.1. Proses Adımları ve Yangın Riskleri

Günümüzde lityum iyon pil üretiminin proses adımları genel itibariyle bulamaç karıştırma, kaplama, kurutma, takvimlendirme, kesme, vakumlu kurutma, jöle rulosu üretimi (torba hücreleri için istifleme ve silindirik ve prizmatik hücreler için sarma), kaynak, paketleme, elektrolit doldurma, formasyon ve yaşlandırma gibi süreçlerden oluşmaktadır [8]. Lityum iyon pil üretimine ilişkin proses akış şeması Şekil 2’de gösterildiği gibi süreçten geçmektedir. Elektrot üretim hattının ikiz paralel bir hat ile gerçekleştiği görülmektedir. Bir tarafta pozitif elektrot üretilirken diğer tarafta negatif elektrot üretilir.



Şekil 2. Li-iyon pil üretim süreci akış şeması [9]

2.1.1. Karıştırma

Bu birimde eksenel dönme hareketi yapan bir makine yardımı ile aktif malzeme çamur bileşenini oluşturmak için Tablo 2’de verilen hammaddeler karıştırılacaktır. Çamur üretim süreci sadece aktif malzemeleri değil, aynı zamanda iletken katkı maddeleri, çözücüler ve bağlayıcıları da gerektirmektedir. Prosesin ilk aşamasında kullanılan kimyasal malzemelerin malzeme güvenlik formları incelendiğinde katot elektrot üretimi için çözücü olarak kullanılan N-Metil-2-Pirrolidon (NMP)’un yanıcılık özellikler içerdiği ayrıca anot temel bileşeni grafit tozlarının ve bulamaç malzemesi karbon siyahının patlayıcı ortam oluşturabileceği görülmektedir.

Tablo 2. Katot ve anot için ortak bulamaç bileşenleri [10]

Çamur Bileşenleri	Katot	Anot	Karışım Miktarı (Ağırlıkça)
Aktif Materyal	Çeşitli Katot Aktif Malzemeler Örneğin NCM, LFP, LMO gibi	Grafit	%90
İletkenlik Katkı Maddesi	Nano mikroskobik Karbon	Nano mikroskobik Karbon	%5
Bağlayıcı	PVDF	Toz CMC ve Sıvı SBR	%5
Çözücü	N-Methyl-2-Pyrrolidone (NMP)	Saf Su	-

2.1.2. Kaplama

Kaplama, aktif malzeme karışımının (slurry) akım toplayıcı üzerine homojen bir şekilde uygulanması işlemidir. Anot tarafında bakır folyo üzerine grafit, silisyum veya kompozit bazlı aktif malzeme kaplanır. Katot tarafında alüminyum folyo üzerine NMC, LFP, NCA gibi aktif malzeme kaplanır. Karıştırma prosesinde hazırlanan bulamacın yanıcılık durumu kaplama prosesinde geçerli olmaya devam etmektedir. Fakat bu proste bulamaç karışım haline getirilmiş olması sebebiyle açık bir yangın riski veya tehlikesi bulunmamaktadır.

2.1.3. Kurutma

Kaplama prosesinde uygulanan aktif malzeme, kurutma prosesine alınarak sürekli bir işlemle kurutulacaktır. Kurutma prosesinde çamur eldesinde kullanılan çözücü, ısı kaynağı ile

malzemeden uzaklaştırılacaktır. Bu proses adımında kolay tutuşabilen maddelerle ilgili herhangi bir risk bulunmadığı değerlendirilmekte olup, bununla birlikte ısıtıcılar devreye girdiğinden dolayı hem termal bir girdi hem de buharlaşan çözücüler mevcuttur.

2.1.4. Takvimlendirme

Takvimlendirme, elektrodun fiziksel özelliklerini tanımlamak ve elektrot ile akım toplayıcı arasındaki bağ mukavemetini artırmak için proseste yapılan işlemdir. Takvimlendirme prosesinde kullanılan silindirlerin ısınması sonucunda sıcaklık artışı oluşabilir. Silindirlerin aşırı ısınmaya karşı korumaları mevcut olup ancak teknik bir arıza durumunda yangın riski oluşabilir.

2.1.5. Dilimleme

Dilimleme prosesi elektrot kesme işlemi olarak da adlandırılmaktadır. Geniş sarılmış bir elektrot rulosunun birkaç küçük elektrot rulosuna bölündüğü bir ayırma işlemidir. Ana rulolardan elektrot kesilme işlemi esnasında yanıcı tozlar oluşur. Bu tozlar genellikle mekanik olarak fırça veya bir vakum yolu ile emdirilerek prostesten uzaklaştırılır. Bu nedenle yangın riski düşük olarak değerlendirilmektedir. Tutuşma gerçekleşecekse muhtemel yaşanabilecek teknik bir arıza ile meydana gelebilir.

2.1.6. Vakumlu Kurutma

Dilimleme prosesinde oluşturulan yavru ruloların fırınlarda kurutulması işlemidir. Kurutma süresi yaklaşık olarak 12 saatten 30 saate kadar olabilir. Bu proseste vakum altında elektrotlardan kalıntı, nem ve çözeltiler uzaklaştırılacaktır. Bu proses için rulolar üzerinde mekanik veya elektriksel bir etki yoktur. Vakum oluşturulurken vakum pompaları yangın riskine yol açabilir. Ancak bu risk oldukça düşük olarak değerlendirilmiştir.

2.1.7. Ayırma

Katot, anot ve ayırıcı tabakaların rulo malzemesinden ayrılması kese tipi lityum iyon pil hücreleri için yapılması gereken bir işlemdir. Bu işlem adımı sırasında yanıcı tozlar ve buharlar oluşabilir. Bu tozlar veya muhtemel yanıcı buharlar prostesten vakum yolu ile emdirilerek uzaklaştırılır. Bu nedenle yangın riski düşüktür. Tutuşma teknik bir arıza sonucunda meydana gelebilir.

2.1.8. İstifleme ve Sarma

İstifleme işlemi sırasında, ayrılmış elektrot tabakaları anot, ayırıcı (seperatör), katot şeklinde tekrar eden bir döngüde lamine edilmek suretiyle istiflenir. Genellikle, sarım sürecinde elektrostatik yüklenmeden kaçınılması gerekir. Proseste mevcut tozların tutuşma riski göz ardı edilemez. Ayrıca diğer risk olarak ruloların aşırı ısınması söylenebilir.

2.1.9. Hücre Kapama

Bu süreçte yapılan kaynak işlemleri nedeniyle çeşitli enerji girdileri mevcuttur. Bu nedenle yangın riski tamamen göz ardı edilemez. Bu süreç aşamasında sonraki süreçlerde yangın risklerine neden olabilecek veya bu riskleri artırabilecek muhtemel montaj hataları yangın riski açısından çok önemlidir.

2.1.10. Elektrolit Doldurma

Lityum iyonlarının taşınmasını sağlayan elektrolit çözeltisi genellikle organik bir çözücü içinde çözünmüş lityum tuzlarından oluşan sıvı bir elektrolittir. Bu sıvı elektrolit çözeltileri genellikle oldukça yanıcı ve parlayıcıdır bu nedenle yangın tehlikesi oluşturabilir. Hücre henüz şarj edilmediği için ilave bir elektrokimyasal risk söz konusu değildir.

2.1.11. Presleme

Hücre presleme işleminin amacı, elektrolitin önceden tanımlanmış basınç altında optimum dağılımını ve emilimini sağlamaktadır. Basınçlandırma ile elektrokimyasal olarak aktif olmayan alanların oluşmasının önüne geçilebilmektedir. Proseste başlıca yangın riskleri presleme için kullanılan sıcak silindirler, sıcak servo motorlardır. Ayrıca yanıcı parlayıcı elektrolit varlığıdır. Bu proses adımında hücreler elektrokimyasal olarak aktif olmadığından yangın riskleri orta düzeydedir.

2.1.12. Formasyon

Formasyon, bataryanın ilk şarj ve deşarj işleminin yapıldığı oluşum olarak tabir edilen proses adıdır. Formasyon için hücreler özel taşıyıcılar ile özel raflara taşınacak ve elektrot uçları özel olarak tasarlanan yaylı temas uçları ile birleştirilecektir. İlk şarj döngüsünün başlamasıyla birlikte önceki işlem adımlarındaki yapılan muhtemel üretim hataları bu proseste etkilerini

gösterebilir. Aynı anda çok sayıda hücre şarj ve deşarj edildiğinden dolayı yangın riski de artmıştır.

2.1.13. Gaz Giderme

Oluşum sırasında, anot ve katotla elektrolit indirgeme reaksiyonları sonucu gazlar üretilir. Bu gazlar pil hücresinden uzaklaştırılmalıdır [11]. Sızdırmazlık işlemi için uygulanan ısıtma işlemi yangın riski oluşturabilir. Ayrıca sızdırmazlık işlemi ısıtma işlemi ile yapılmasa dahi malzeme kusurları nedeniyle şarjlı bir hücrede yangın riski oluşacaktır.

2.1.14. Yaşlandırma

Yaşlandırma işlemi sırasında, hücrenin açık devre voltajı üç haftalık bir süreye kadar düzenli olarak ölçülerek hücre özellikleri ve hücre performansı izlenir. Hücreler yaşlandırma raflarına veya kulelerine alınarak yüksek sıcaklık ve oda sıcaklığında yaşlandırma işlemi yapılır. Bu proste çok fazla miktarda hücrenin bir arada bulunması nedeniyle yangın riski yüksektir.

2.1.15. Hat Sonu Testleri ve Derecelendirme

Burada lityum iyon pil hücrelerinin performans, güvenlik, ömür ve mekanik özelliklerine göre derecelendirme yapılır. Oluşum veya yaşlandırma sürecindekinden daha düşük yangın riski mevcuttur. Kusurlu hücreler önceki işlem adımlarında fark edilmiş olacağından dolayı yangın riski düşük olacaktır.

2.1.16. Paketleme

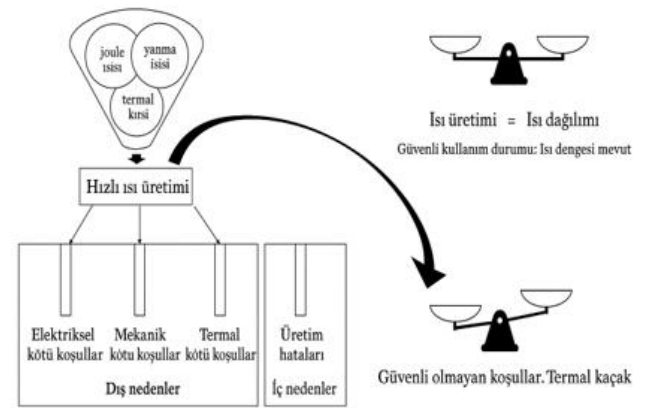
Li-iyon pil hücreleri bu aşamada %30 şarjlı olarak bantlarda hareket etmektedir. İhtiyaca göre oluşturulan batarya paketleri nihai depolama için alınmadan önce geçici olarak paketleme hattı sonunda bekletilirler. Bu aşamada hücreler şarjlı olarak bulunduğu modül ve paket oluşturulması aşamasında ısıtma kaçak oluşabileceğinden dolayı yangın riski vardır.

2.1.17. Depolama

Li-iyon pil modül ve paketleri sevkiyat öncesinde depolarda muhafaza edilir. Depolarda fazla miktarda lityum iyon pil hücresi raflarda bir arada bulunduğundan dolayı yangın riski vardır. Depolarda standartlara uygun olmayan depolama yöntemleri yangın riskini arttırabilir.

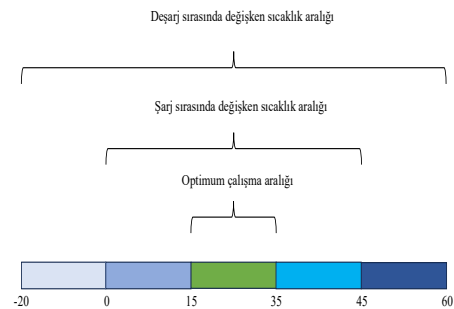
2.2. Lityum İyon Pillerde Isıl Kaçak

Isıl kaçak başka bir deyişle termal kaçak en basit şekilde tarif edilecek olursa, lityum iyon pil hücresi içinde meydana gelen ve sıcaklıkta hızlı bir artışa yol açan, en sonunda yangına veya patlamaya neden olan bir zincirleme reaksiyondur. Bir kere başladığında durdurulması çok zordur. Termal kaçak, ekzotermik reaksiyonların oranı arttığında ve ısı üretiminin pilin ısı dağıtma kapasitesini aşmasına neden olduğunda meydana gelir [12]. Şekil 3'de gösterildiği gibi aşırı şarj, fiziksel hasar, dahili kısa devreler, aşırı dahili/harici ısı veya hızlı deşarj gibi çeşitli faktörler bu süreci başlatabilir.



Şekil 3. Lityum-iyon pillerde oluşan termal kaçak [13]

Genel olarak, için kabul edilebilir sıcaklık bölgesi Şekil 4.'de gösterildiği üzere -20 °C ile 60 °C arasındadır. Pesaran ve arkadaşlarının yaptığı çalışmalarda lityum iyon piller için optimum sıcaklık aralığının 15 °C ile 35 °C arasında olduğu gösterilmiştir [14]. Hücrenin kimyasal yapısına göre bu değerler değişebilmektedir. Sıcaklık bu güvenli bölgelerin dışına çıktığında, hücrede yaşanan bozulma aşamaları neticesinde lityum iyon pillerde yangın ve patlama gibi güvenlik sorunlarıyla karşılaşma riski artacaktır.



Şekil 4. Li-iyon pil optimum çalışma, şarj ve deşarj değişken sıcaklık aralıkları [14]

2.3. Lityum İyon Pil Yangın Tehlikeleri

Lityum iyon pillerde yaşanan termal kaçak sırasında hücrelerden toksik ve yanıcı gazlar çıkacaktır. Bu gazlar ortamda zehirleyici ve patlayıcı ortamlar oluşturabilir [15]. Üretilen yangın gazları içerisinde farklı hidrokarbonlar bulunabilir. Bu hidrokarbonlardan başlıcaları CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 , C_3H_6 ve C_3H_8 dir [16]. Hidrokarbonların dışında lityum iyon pil yangınlarından kaynaklanan literatürde raporlanan toksik gaz bileşenleri CO, HF, HCl, HCN, NO_x ve SO_2 gazlarıdır [17]. Li-iyon pil ısı kaçak gazlarından H_2 , CO ve uçucu organik bileşikler önemli bir yanma ve patlama riski oluşturur. Hidrojen gazı, aktif lityum ve Poliviniliden diflorür (PVDF) bağlayıcı malzemeler arasındaki reaksiyondan oluşan son derece tehlikeli ve yanıcı bir gazdır.

Tablo 3. Hidrojen florür (HF) mesleki maruziyet sınır değerleri [18]

Madde Miktarı Birimi	Sınır Değer Uzun Süre TWA (8 Saat)	Sınır Değer Kısa Süre STEL (15 Dak.)
HF (mg/m ³)	1,5	2,5
HF (ppm)	1,8	3

Kimyasal maddelerle çalışmalarda sağlık ve güvenlik önlemleri hakkında yönetmeliğinin mesleki maruziyet sınır değerleri tablosuna göre hidrojen florür sınır değerleri Tablo 3’de verilmiştir [18]. TWA, 8 saatlik çalışma süresi boyunca çalışanın maruz kalabileceği zaman ağırlıklı ortalama kimyasal konsantrasyon sınırını; STEL ise 15 dakikalık kısa süreli maruziyet için belirlenmiş en yüksek kabul edilebilir kimyasal konsantrasyon değerini ifade eder.

Lityum iyon pil termal kaçak yangın tehlikelerinden bir diğeri ise oluşan ekzotermik reaksiyonlar sonucunda yayılan ısıdır. Lityum iyon pil yangın tehlikesi ile ilgili önemli bir terimde termal kararlılık terimidir. Termal kararlılık seviyesi yüksek olan yangın açısından daha güvenlidir sonucuna varılmıştır. Termal kararlılıkları açısından farklı lityum iyon pil katot kimyaları değerlendirildiğinde literatürde LFP>LMO>NMC>NCA>LCO sıralamasının yapıldığı ve LFP katot yapısına sahip lityum iyon pillerin daha yüksek termal kararlılığa sahip oldukları görülmektedir [15].

Lityum iyon pil termal kaçak sürecinde önemli bir tehlike yanıcı gazların ve sıcak kıvılcımların püskürtülmesi ile oluşan jet alevleridir. Jet alevlerin meydana gelme olasılığına etki eden önemli faktör lityum iyon pil şarj durumudur. Bataryadaki yüksek şarj seviyesi jet alevlerinin oluşumuna katkı sağlamaktadır [19].

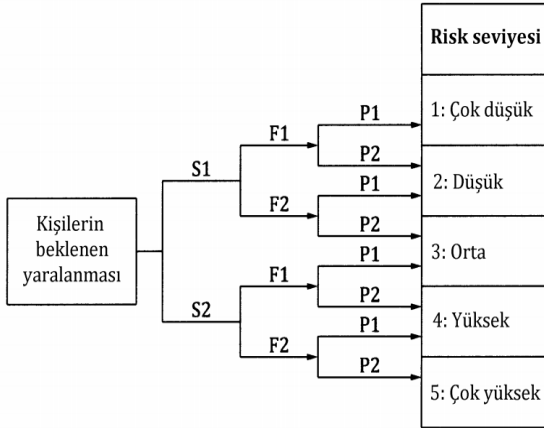
3. MATERYAL VE YÖNTEM

Lityum iyon pil üretim tesislerinde yangın güvenlik önlemlerinin oluşturabilmesi için oluşabilecek muhtemel yangınlara karşı yangın ve tehlike algılama, önleme, azaltma, bastırma ve söndürme sistemlerinin kurulması gerekmektedir. Bu önlem ve söndürme sistemlerinin kurulabilmesi için tesiste yangın risk analizi ve değerlendirmesinin yapılmasına ihtiyaç duyulacaktır. Literatürde lityum iyon pil üretim tesislerinde yapılacak yangın risk analizleri ve değerlendirmeleri için farklı metodolojiler uygulanabileceği görülmektedir. Ayrıca yapılan analizler ve değerlendirmeler ilgili lityum iyon pil üretim tesisinde üretilen hücrenin kimyasına, tipine, kapasitesine, şarj durumuna üretim tesisi proseslerinde kullanılan makinelerin fiziki durumuna, proseslerde insan iş gücünün ne kadar dahil edildiğine ve tesislerde ayrıca yangın yükü oluşturabilecek donanımlara bağlı olarak değişim gösterecektir.

Li-iyon pil teknolojisi enerji, kimya, elektrokimya, malzeme, mühendislik ve makine alanlarında çok sayıda uygulamaya sahip disiplinler arası bir teknoloji olduğundan, lityum iyon pil üretim tesisleri risk analizi ve değerlendirmesi açısından nispeten karmaşık ve zorludur [4]. Lityum iyon pil hücrelerinin potansiyel tehlikesi monte edildiği, şarj ve deşarj edilerek etkinleştirildiği ve bir süre depolandığı tesislerde termal kaçak yaparak yangınlara ve patlamalara neden olabilmesidir. Literatür taraması yapıldığında lityum iyon pil üretim tesisleriyle ilgili çok az risk analizi çalışması bulunduğu görülmektedir.

Bu çalışmada lityum iyon pil üretim tesislerinde proses adımlarındaki yangın risklerinin belirlenip değerlendirilmesi için TS EN ISO 19353:2019 standardına dayanan bir metodoloji kullanılmıştır. Standartta göre yangın risk seviyesinin belirlenmesi; zararın ciddiyeti (S1–S2), tehlikeye maruz kalma sıklığı veya süresi (F1–F2) ve tehlikeden kaçınma veya zararı sınırlama olasılığı (P1–P2) parametrelerinin birlikte değerlendirilmesine dayanmaktadır. Standartta

verilen Şekil 5'teki risk grafiği, bu parametrelerin kombinasyonları üzerinden risk seviyesinin sistematik olarak belirlenmesine yönelik bir yaklaşım sunmaktadır. Bu metodoloji, lityum iyon pil üretim süreçlerinde ortaya çıkabilecek yangın tehlikelerinin analiz edilmesi ve her proses adımı için TS EN ISO 19353:2019 kapsamında tanımlanan parametreler esas alınarak risk seviyelerinin belirlenerek değerlendirilmesi amacıyla kullanılmıştır. Şekil 5'de verilen risk grafiği ile eşdeğer metodoloji kullanılmıştır.



Şekil 5. TS EN ISO19353:2019'da kullanılan risk grafiği

Lityum iyon pil üretim tesisinde risk değerlendirilmesi yapılabilmesi için aşağıda belirtilen hususlar üzerinden değerlendirme yapılmıştır.

✓ Yanıcı maddelerin ve / veya patlayıcı / zehirli ürünlerin varlığı

✓ Üretim süreçlerinde ve / veya elektrokimyasal reaksiyonlarda yeterli ateşleme enerjisi nedeniyle tutuşma olasılığı

✓ Bir yangın / patlama / zehirli gaz salınımı meydana gelirse, fabrikanın kontrol edilebilir bir bölümüyle sınırlı kalır veya diğer parçalara / hücrelere ısı kaçak ile yayılması

Lityum iyon pil hücrelerinin üretimi ile ilgili olarak Şekil 5'de gösterilen S, F ve P parametrelerine aktarılan anlamlar aşağıda sıralanmıştır.

✓ S: Yanıcı Maddeler (hasarın boyutunun bir ölçüsü)

✓ S1: Düşük miktarda yanıcı / patlayıcı / toksik madde bulunması veya hiç bulunmaması nedeniyle düşük hasar boyutu.

✓ S2: Çok miktarda yanıcı / patlayıcı / toksik malzeme bulunması veya kullanılan malzemelerin elektrokimyasal olarak aktif olması nedeniyle yüksek derecede hasar.

✓ F: Üretim süreci / Ateşleme (olasılık için bir ölçüt olarak)

✓ F1: Bir ateşlemenin üretim süreçlerinden (makinelerin / ekipmanın aşırı ısınması veya arızalanması nedeniyle) ve / veya elektrokimyasal reaksiyonlardan kaynaklanması çok düşük bir ihtimaldir veya imkansızdır.

✓ F2: Üretim süreçleri (yani, aşırı ısınma veya makinelerin / ekipmanın arızalanması nedeniyle) ve / veya elektrokimyasal reaksiyonlar (dahili / harici kısa devre, harici ısı girişi veya mekanik hasarlar nedeniyle) nedeniyle yüksek bir tutuşma olasılığı / sıklığı vardır.

✓ P: Kontrol Edilebilirlik / Yayılım

✓ P1: Yangın / patlama / zehirli gaz salınımı meydana gelirse, üretim hattının diğer bölümlerine yayılmadan kontrol edilebilir bir parça ile sınırlıdır.

✓ P2: Yangın / patlama / zehirli gaz salınımı meydana gelirse, üretim hattının diğer parçalarına / hücrelerine hızlı bir şekilde yayılan kontrol edilebilir bir parça ile sınırlı değildir ısı kaçak başlamıştır.

Risk değerlendirmesi sonucunda beklenen risk seviyelerine göre lityum iyon pil üretim tesisi proses adımlarında uygun yangın önleme ve koruma teçhizatları seçilirken, Tablo 4'deki çözümler kullanılabilir.

Tablo 4. TS EN ISO19353:2019’da beklenen risk seviyelerine göre yangın önleme ve söndürme sistemleri çözümleri

Risk Seviyeleri	Otomatik Yangın Öncesi Tespit	Otomatik Yangın Tespiti	Sabit Manuel Boşaltmalı Söndürme Sistemi	Otomatik Boşaltmalı Söndürme Sistemi
1: Çok Düşük	İsteğe Bağlı	İsteğe Bağlı	İsteğe Bağlı	İsteğe Bağlı
2: Düşük	İsteğe Bağlı	İsteğe Bağlı	Gerekli	İsteğe Bağlı
3: Orta	İsteğe Bağlı	Gerekli	İsteğe Bağlı	Gerekli
4: Yüksek	İsteğe Bağlı	Gerekli	İsteğe Bağlı	Gerekli
5: Çok Yüksek	Gerekli	Gerekli	İsteğe Bağlı	Gerekli

Proses adımlarında bir yangın sonucu risk seviyesi 1 bekleneyecekse, Tablo 4’de verilen bütün yangın tespit ve yangın söndürme çözümleri sadece isteğe bağlı olarak sağlanmalıdır. Risk seviyesi 2 bekleneyecekse, minimum olarak sabit bir manuel boşaltmalı söndürme sistemi sağlanmalıdır. Risk seviyesinin 3 veya 4 olarak değerlendirildiği durumlarda sabit bir otomatik boşaltmalı söndürme sistemi ile otomatik bir yangın algılama sisteminin birlikte uygulanması gerekmektedir. Risk seviyesinin 5’e yükselmesi hâlinde ise, bu gerekliliklere ek olarak otomatik yangın öncesi tespit sisteminin de sağlanması gerekli hale gelmektedir. Li-iyon pil üretim tesislerinde üretim alanları ile büro veya idari birimlerin aynı yapı içerisinde bulunması durumunda, yapı Binaların Yangından Korunması Hakkındaki Yönetmelik (BYKHY) Madde 18 kapsamında “karışık kullanım amaçlı bina” olarak değerlendirilebilir. Yönetmelik gereğince, daha yüksek tehlike sınıfına giren üretim bölümlerinin gerektirdiği yangın güvenliği tedbirlerinin bütün bina için uygulanması esastır. Bu nedenle, Tablo 4’te gösterilen risk seviyelerine ilişkin yangın önleme ve söndürme sistemi gereklilikleri, yapı içindeki tüm hacimler için bağlayıcı hâle gelmektedir. Ancak üretim alanları, büro veya idari hacimlerden yangına dayanıklı bir yangın bölmesi ile ayrılabiliriyorsa, bu durumda büro alanlarında kendi kullanım sınıflarına uygun korunma

tedbirlerinin uygulanması mümkün olmaktadır [20].

4. BULGULAR

Lityum iyon pil fabrikalarındaki yangın riskleri pil hammaddelerinin depolanması, üretim proses adımları ve ürünlerin depolanması süreçlerini kapsar [21]. Tablo 5’te verilen bulgular, TS EN ISO 19353:2019 kapsamında yangına neden olabilecek tehlike kaynaklarının sistematik olarak belirlenmesi ve bu tehlikelere karşı uygulanması gereken risk seviyesine bağlı önleyici ve sınırlandırıcı tedbirlerin değerlendirilmesiyle oluşturulmuştur. Değerlendirmede hammadde özellikleri, proses sıcaklıkları, kullanılan solventler, ekipman yapısı ve yanıcı ortam oluşum potansiyeli dikkate alınmıştır. Bu yöntemle, lityum iyon batarya üretim tesislerinde uygulanması gereken yangın güvenliği tedbirlerinin risk seviyesi temelli bir yaklaşımla belirlenmesi sağlanmıştır.

Tablo 5. Lityum iyon pil üretim proses adımları risk değerlendirmesi

Proses	Yanıcı Maddeler (S)	Üretim Süreci/Tutuşma (F)	Kontrol Edilebilirlik/Yayılma (P)	Risk Seviyesi
Karıştırma	-Katot Çözücüsü (NMP) LEL%1,3 UEL%9,5 Parlama Noktası:90°C -Karbon siyahı yanıcıdır, fakat kolay tutuşmaz. Tutuşma sıcaklığı≥500°C Toz Patlama LEL:50g/m ³ -S2-	Normal şartlar altında üretim sürecinden kaynaklanan tutuşma kaynağı yoktur. Proseste harici oluşan kıvılcım ile tutuşma gerçekleşebilir. -F1- -S2-	Yangın / patlama / zehirli gaz salınımı meydana gelirse, üretim hattının diğer bölümlerine yayılmadan kontrol edilebilir bir parça ile sınırlıdır. -P1-	ORTA
Kaplama	Karıştırma prosesinde hazırlanan bulamaç yanıcıdır. -S2-	Normal şartlar altında üretim sürecinden kaynaklanan tutuşma kaynağı yoktur. Proseste harici oluşan kıvılcım ile tutuşma gerçekleşebilir. -F1-	Yangın / patlama / zehirli gaz salınımı meydana gelirse, üretim hattının diğer bölümlerine yayılmadan kontrol edilebilir bir parça ile sınırlıdır. -P1-	ORTA
Kurutma	Çözücü buharlaştırılmaktadır, düşük miktarda yanıcı madde bulunur. Kaplanan folyoların tutuşması zordur. -S1-	Proseste ısıtıcılar ile termal girdi mevcut olup potansiyel tutuşma kaynağı vardır. -F2-	Yangın / patlama / zehirli gaz salınımı meydana gelirse, üretim hattının diğer bölümlerine yayılmadan kontrol edilebilir bir parça ile sınırlıdır. -P1-	DÜŞÜK
Takvimlendirme	Folyolar kaplanmış ve kurutulmuştur. Yanıcı çözücü yoktur. -S1-	Silindirler sıcaklık artışına neden olabilir. Yüksek tutuşma potansiyeli vardır. -F2-	Yangın / patlama / zehirli gaz salınımı meydana gelirse, üretim hattının diğer bölümlerine yayılmadan kontrol edilebilir bir parça ile sınırlıdır. -P1-	DÜŞÜK
Dilimleme	Elektrot kesilmesi esnasında yanıcı tozlar oluşur fakat aynı anda emdirilir. Düşük miktarlarda bulunabilir. -S1-	Normal şartlar altında üretim sürecinden kaynaklanan tutuşma kaynağı yoktur. Proseste toz emiş arızası oluşabilir. -F2-	Yangın / patlama / zehirli gaz salınımı meydana gelirse, üretim hattının diğer bölümlerine yayılmadan kontrol edilebilir bir parça ile sınırlıdır. -P1-	DÜŞÜK
Vakumlu Kurutma	Yanıcı madde çok düşük miktarda mevcuttur. -S1-	Mekanik ve elektriksel bir etki yoktur. Isıtıcı bulunmadığından termal girdi mevcut değildir. -F1-	Yangın / patlama / zehirli gaz salınımı meydana gelirse, üretim hattının diğer bölümlerine yayılmadan kontrol edilebilir bir parça ile sınırlıdır. -P1-	ÇOK DÜŞÜK

Tablo 5. Lityum iyon pil üretim proses adımları risk değerlendirmesi

Proses	Yanıcı Maddeler (S)	Üretim Süreci/Tutuşma (F)	Kontrol Edilebilirlik/Yayıma (P)	Risk Seviyesi
Ayırma	Yanıcı tozlar ve buharlar oluşabilir fakat vakum yolu ile emdirilir. Düşük miktarda yanıcı olabilir. -S1-	Normal şartlar altında üretim sürecinden kaynaklanan tutuşma kaynağı yoktur. Vakumlama arızası oluşabilir. -F2-	Yangın / patlama / zehirli gaz salınımı meydana gelirse, üretim hattının diğer bölümlerine yayılmadan kontrol edilebilir bir parça ile sınırlıdır. -P1-	DÜŞÜK
İstifleme veya sarma	Düşük miktarda yanıcı madde mevcuttur. -S1-	Normal şartlar altında üretim sürecinden kaynaklanan tutuşma kaynağı yoktur. -F1-	Yangın / patlama / zehirli gaz salınımı meydana gelirse, üretim hattının diğer bölümlerine yayılmadan kontrol edilebilir bir parça ile sınırlıdır. -P1-	ÇOK DÜŞÜK
Hücre Kapama	Yanıcı miktarı düşüktür. -S1-	Kaynak işlemleri nedeniyle enerji girdileri mevcuttur üretim süreci nedeniyle tutuşma potansiyeli yüksektir. -F2-	Yangın / patlama / zehirli gaz salınımı meydana gelirse, üretim hattının diğer bölümlerine yayılmadan kontrol edilebilir bir parça ile sınırlıdır. -P1-	DÜŞÜK
Elektrolit Dolumu	Elektrolit mevcuttur elektrolit; karbonat bazlı organik elektrolit çözücüler ve LIBF6 içerir yanıcıdır. Parlama Noktası:29°C -S2-	Elektrolit doldurma işleminin sonunda yapılan kaynak nedeniyle üretim sürecinde potansiyel tutuşma kaynağı vardır. -F2-	Yangın / patlama / zehirli gaz salınımı meydana gelirse, üretim hattının diğer bölümlerine yayılmadan kontrol edilebilir bir parça ile sınırlıdır. -P1-	YÜKSEK
Hadde ile Presleme	Elektrolit mevcuttur yanıcıdır. Parlama Noktası:29°C -S2-	Normal şartlar altında üretim sürecinden kaynaklanan tutuşma kaynağı yoktur. -F1-	Yangın / patlama / zehirli gaz salınımı meydana gelirse, üretim hattının diğer bölümlerine yayılmadan kontrol edilebilir bir parça ile sınırlıdır. -P1-	ORTA
Formasyon	Elektrolit mevcuttur yanıcıdır. Parlama Noktası:29°C İlk şarj döngüsü başlamıştır. Çok sayıda hücre şarj ve deşarj edilir. -S2-	Üretim sürecinde elektrokimyasal reaksiyonlar nedeniyle tutuşma kaynağı mevcuttur. -F2-	Şarj işlemleri nedeniyle, yangın / patlama / zehirli gaz salınımı meydana gelirse, üretim hattının diğer parçalarına / hücrelerine hızlı bir şekilde yayılabilir ve termal kaçağa yol açabilir. -P2-	ÇOK YÜKSEK

Tablo 5. Lityum iyon pil üretim proses adımları risk değerlendirmesi

Proses	Yanıcı Maddeler (S)	Üretim Süreci/Tutuşma (F)	Kontrol EdilebilirlikYayımla (P)	Risk Seviyesi
Gaz Giderme	Elektrolit mevcuttur yanıcıdır. Parlama Noktası:29°C kullanılan malzemeler elektrokimyasal olarak aktif olabilir. -S2-	Kaynak işlemleri nedeniyle ısı işlem uygulanır. Üretim sürecinde potansiyel tutuşma kaynağı ve olasılığı vardır. -F2-	Hücre boşta bulunmaktadır. Yangın / patlama / zehirli gaz salınımı meydana gelirse, üretim hattının diğer bölümlerine yayılmadan kontrol edilebilir bir parça ile sınırlıdır. -P1-	YÜKSEK
Yaşlandırma	Elektrolit mevcuttur yanıcıdır. Parlama Noktası:29°C Kullanılan malzemeler elektrokimyasal olarak aktif olabilir. -S2-	Proses çalışma sıcaklığı 45°C Üretim sürecinde çok sayıda hücre ve elektrokimyasal reaksiyonlar sonucunda potansiyel tutuşma olasılığı -F2-	Bu proste Yangın / patlama / zehirli gaz salınımı meydana gelirse üretim hattının diğer parçalarına / hücrelerine hızlı bir şekilde yayılabilir ve termal kaçağa yol açabilir -P2-	ÇOK YÜKSEK
Hat Sonu Testleri ve Derecelendirme	Elektrolit mevcuttur yanıcıdır. Parlama Noktası:29°C Kullanılan malzemeler elektrokimyasal olarak aktif olabilir. -S2-	Arızalı hücreler bu proses adımından önce tespit edilmişlerdir. Üretim sürecinde elektrokimyasal reaksiyonlar nedeniyle tutuşma olasılığı düşük olacaktır. -F1-	Yangın / patlama / zehirli gaz salınımı meydana gelirse, üretim hattının diğer bölümlerine yayılmadan kontrol edilebilir bir parça ile sınırlıdır. -P1-	ORTA
Paketleme	Elektrolit mevcuttur. Parlama Noktası:29°C İlk şarj döngüsü başlamıştır. Çok sayıda hücre şarj ve deşarj edilir. -S2-	Üretim sürecinde elektrokimyasal reaksiyonlar nedeniyle tutuşma olasılığı düşüktür. -F1-	Bu proste Yangın / patlama / zehirli gaz salınımı meydana gelirse üretim hattının diğer parçalarına / hücrelerine hızlı bir şekilde yayılabilir ve termal kaçağa yol açabilir -P2-	YÜKSEK
Depolama	Elektrolit mevcuttur yanıcıdır. Parlama Noktası:29°C Çok fazla miktarda Li-iyon pil paketleri Kullanılan malzemeler elektrokimyasal olarak aktif olabilir. -S2-	Üretim sürecinde elektrokimyasal reaksiyonlar nedeniyle tutuşma olasılığı düşüktür. Hatalı depolama yapılırsa risk oluşabilir. -F1-	Bu proste Yangın / patlama / zehirli gaz salınımı meydana gelirse üretim hattının diğer parçalarına / hücrelerine hızlı bir şekilde yayılabilir ve termal kaçağa yol açabilir -P2-	YÜKSEK

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında lityum iyon pil üretim tesislerinde proses adımlarına ilişkin yangın tehlikeleri TS EN ISO 19353:2019 standardı temel alınarak sistematik olarak değerlendirilmiş ve her bir adım için risk seviyeleri ortaya konmuştur. Giriş ve gelişme bölümlerinde vurgulanan amaç doğrultusunda, lityum iyon pil üretim süreçlerinde yangına neden olabilecek başlıca tehlike kaynakları belirlenmiş; bulgular bölümünde bu tehlikeler risk seviyelerine göre sınıflandırılmıştır. Elde edilen bulgular, lityum iyon pil üretim tesislerinde yangın güvenliği tasarımının yalnızca yapısal önlemlerle değil, proses temelli bir yaklaşımla ele alınması gerektiğini açık şekilde göstermektedir.

Yapılan değerlendirme sonucunda elektrolit dolumu, formasyon, gaz giderme, yaşlandırma, paketleme ve depolama adımlarının yüksek veya çok yüksek risk seviyelerine sahip olduğu görülmüştür. Bu nedenle söz konusu proseslerde temel yangın güvenliği gerekliliklerine ek olarak pasif ve aktif yangından korunma önlemlerinin uygulanması zorunludur. Tablo 4'te belirtilen risk seviyelerine göre yangın önleme ve söndürme çözümleri, ekipman bazlı proses güvenliği ile bina yangın güvenliği tedbirlerinin birlikte değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu durum aynı zamanda BYKHY Madde 18 kapsamında ele alınan karışık kullanım amaçlı binaların yüksek tehlike sınıfı kriterleriyle de uyumludur.

Li-iyon pil üretim tesislerinde yangın güvenliği yalnızca proses adımlarındaki risklerin kontrolü ile sınırlı olmayıp, yapısal, teknik ve organizasyonel yangından korunma önlemlerinin bütünsel bir yaklaşımla uygulanmasını gerektirir. Bu kapsamda tehlikeli alan sınıflandırmalarının TS EN 60079-10-1 ve TS EN 60079-10-2 standartlarına göre yapılması, ekipman seçimi ve işletme güvenliğinin sağlanması amacıyla patlamadan korunma dokümanının (PKD) hazırlanması gerekmektedir. Ayrıca lityum iyon pil depolama alanları için ulusal düzenlemelerin yanı sıra FM Global 7-112 veri sayfaları, NFPA 855, UL 9540A ve benzeri uluslararası teknik dokümanların birlikte değerlendirilmesi, kapsamlı bir yangın güvenliği yaklaşımı oluşturulmasına katkı sağlayacaktır.

Yangın güvenliği literatürü ve endüstriyel uygulamalar, lityum iyon pil üretim tesislerinde proses tabanlı yangın risk analizlerinin kritik

öneme sahip olduğunu ve özellikle depolama alanlarında daha sıkı yangın güvenliği tedbirlerinin uygulanması gerektiğini göstermektedir. Bu çalışmanın bulguları da bu yaklaşımı desteklemekte olup üretim ve depolama süreçlerinde bütünsel bir risk yönetimi yaklaşımının zorunlu olduğunu ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak lityum iyon pil üretim tesislerinin kesintisiz ve güvenli şekilde faaliyet gösterebilmesi için, proses adımlarına özgü yangın tehlikelerinin doğru şekilde belirlenmesi, risk seviyelerinin standarda uygun biçimde değerlendirilmesi ve elde edilen bulgular doğrultusunda hem bina yangın güvenliği hem de proses yangın güvenliği tedbirlerinin koordineli olarak uygulanması gerekmektedir. Risklerin belirlenmesi, değerlendirilmesi ve iyileştirici önlemlerin hayata geçirilmesi lityum iyon pil üretim tesislerinde can güvenliğinin sağlanması, işletme devamlılığının korunması ve potansiyel kayıpların minimize edilmesi açısından kritik öneme sahiptir.

KAYNAKLAR

- [1] A. Özdemir, "Türkiye'de Li-ion pil üretimi yatırımları," *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 10, no. 19, pp. 79-86, 2023.
- [2] A. Marjolin, "Lithium-ion battery capacity to grow steadily to 2030," *S&P Global Market Intelligence*, 2023. [Çevrimiçi]. Available: <https://www.spglobal.com/market-intelligence/en/news-insights/research/lithium-ion-battery-capacity-to-grow-steadily-to-2030>. [Erişim: 27 Haziran 2025].
- [3] H. Pehlivan, E. Öz, and M. Yıldırım, "Lityum iyon pillerin tarihten bugüne gelişimi ve son teknolojiye geline nokta," *Journal of Anatolian Physics and Astronomy*, vol. 3, no. 2, pp. 83-94.
- [4] T. Kim, "Research on Risk Assessment of Lithium-ion Battery Manufacturing Process Considering Cell Materials," *Journal of the Korean Society of Safety*, vol. 37, no. 2, pp. 76-87, 2022.
- [5] Polat, B. D., & Keleş, Ö. (2012). Lityum iyon pil teknolojisi. *Metalürji Dergisi*, 162, 42-48.

- [6] Beck & Pollitzer, "Battery manufacturers supply chain," *Beck & Pollitzer*, 2025. [Çevrimiçi]. Available: <https://beck-pollitzer.com/battery-manufacturers-supply-chain>. [Erişim: 5 Eylül 2025].
- [7] . Chen, X. Lai, F. Chen, Y. Wang, X. Han, and Y. Zheng, "Empowering lithium-ion battery manufacturing with big data: Current status, challenges, and future," *Journal of Power Sources*, vol. 623, p. 235400, 2024.
- [8] Y. Liu, R. Zhang, J. Wang, and Y. Wang, "Current and future lithium-ion battery manufacturing," *iScience*, vol. 24, no. 4, 2021.
- [9] L. Ronken, "Production of Lithium-Ion Batteries," *Property Matters*, no. 2, p. 4, 2024.
- [10] PEM of RWTH Aachen University and VDMA Battery Production, *Lithium-Ion Battery Cell Production Process*, 3rd ed. Frankfurt am Main, Germany: PEM RWTH Aachen & VDMA, 2018, p. 4.
- [11] A. Kampker, H. Heimes, C. Offermanns, S. Wennemar, T. Robben, and N. Lackner, "Hücre bitirme sürecinin optimize edilmesi: Adımlara, teknolojilere ve trendlere genel bakış," *Dünya Elektrikli Araç Dergisi*, vol. 14, no. 4, p. 96, 2023.
- [12] Y. Dai and A. Panahi, "Thermal runaway process in lithium-ion batteries: A review," *Next Energy*, vol. 6, p. 100186, 2025.
- [13] L. B. Diaz, X. He, Z. Hu, F. Restuccia, M. Marinescu, J. V. Barreras, and G. Rein, "Meta-review of fire safety of lithium-ion batteries: Industry challenges and research contributions," *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 167, no. 9, p. 090559, 2020.
- [14] A. A. Pesaran, S. Santhanagopalan, and G. H. Kim, *Addressing the impact of temperature extremes on large format Li-ion batteries for vehicle applications*. Golden, CO, USA: National Renewable Energy Laboratory, 2013.
- [15] S. Meehan, *Fire risk and hazard analysis of lithium-ion battery technologies in underground facilities: A literature review*, 2022.
- [16] P. J. Bugryniec, E. G. Resendiz, S. M. Nwophoke, S. Khanna, C. James, and S. F. Brown, "Review of gas emissions from lithium-ion battery thermal runaway failure—Considering toxic and flammable compounds," *Journal of Energy Storage*, vol. 87, p. 111288, 2024.
- [17] O. Willstrand, M. Pushp, P. Andersson, and D. Brandell, "Farklı Li-ion hücre test koşullarının termal kaçak karakteristikleri ve gaz salınım ölçümleri üzerindeki etkisi," *Enerji Depolama Dergisi*, vol. 68, p. 107785, 2023.
- [18] T.C. Resmî Gazete, "Kimyasal maddelerle çalışmalarda sağlık ve güvenlik önlemleri hakkında yönetmelik," 12 Ağustos 2013, Sayı: 28733. [Çevrimiçi]. Available: <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2013/08/20130812.htm>. [Erişim: 20 Haziran 2025].
- [19] B. Mao, Y. Ma, K. Zhang, X. Li, J. Lu, Y. Zhang, and J. X. Wen, "Termal kaçak sırasında büyük boyutlu LiFePO₄ hücresiyle ilişkili kendiliğinden tutuşma, jet alevi ve termal radyasyon tehlikeleri," *Güç Kaynakları Dergisi*, vol. 622, p. 235361, 2024.
- [20] T.C. İçişleri Bakanlığı, "Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik," *Resmî Gazete*, no. 26735, Dec. 19, 2007, Madde 18.
- [21] H. C. Niu and Z. Li, "Application of RAC method in fire risk assessment of lithium-ion battery factories," *Procedia Engineering*, vol. 211, pp. 1115-1119, 2018