



Havacılıkta Kullanılan Isıl (Termal) Pillerin Risk Analizi

Ozan ÖZTÜRK^{1*}

¹Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Dalaman Sivil Havacılık Yüksekokulu, Uçak Gövde Motor Bakım Bölümü, 48, Muğla

Tüm yazarların orcid bilgileri: 0000-0002-4959-6808

*Sorumlu yazar e-mail: ozturkozan@mu.edu.tr

Derleme

Makale Tarihiçesi:

Geliş tarihi: 19.11.2024
Kabul tarihi: 14.12.2024
Online Yayınlanma:
31.12.2024

Anahtar Kelimeler:

Isıl piller
Termal piller
Elektrolit yönetimi
Isıl pillerin havacılık uygulamaları

ÖZET

Bu çalışma, ısıl (termal) pillerin havacılık ve askeri uygulamalardaki kullanımı, yapısı, çalışma prensipleri ve risk analizi üzerine odaklanmaktadır. Amaç, ısıl pillerin yüksek enerji yoğunluğu, güvenilirlik ve dayanıklılık gibi özelliklerini inceleyerek, bu pillerin güç sistemlerinde nasıl etkin bir şekilde kullanılabileceğini ortaya koymaktır. Literatür taraması ve mevcut ısıl pil tasarımlarının analizi yoluyla gerçekleştirilen çalışmada, farklı kimyasal malzemeler ve elektrolit sistemleri performans ve güvenlik açısından değerlendirilmiştir. Bulgular, ısıl pillerin yüksek enerji yoğunluğu ve uzun ömürlü olması nedeniyle havacılık ve askeri uygulamalarda tercih edildiğini, ancak ısıl yönetim, kimyasal reaktivite ve çevresel etkiler gibi zorluklarla karşılaşıldığını göstermektedir. Sonuç olarak, ısıl pillerin güvenli ve verimli bir şekilde kullanılabilmesi için ileri malzeme teknolojileri ve optimize edilmiş tasarımlar gerektiği, çevresel sürdürülebilirlik ve maliyet etkinliğinin de önemli olduğu vurgulanmıştır.

Risk Analysis of Thermal Batteries Used in Aviation

Review

Article History:

Received: 19.11.2024
Accepted: 14.12.2024
Published online:
31.12.2024

Keywords:

Thermal batteries
Electrolyte management
Aviation applications of thermal batteries

ABSTRACT

This study focuses on the use, structure, operating principles, and risk analysis of thermal batteries in aviation and military applications. The aim is to examine the characteristics of thermal batteries, such as high energy density, reliability, and durability, to determine how they can be effectively utilized in power systems. The study was conducted through a literature review and analysis of existing thermal battery designs, evaluating different chemical materials and electrolyte systems in terms of performance and safety. The findings indicate that thermal batteries are preferred in aviation and military applications due to their high energy density and long lifespan, but challenges such as thermal management, chemical reactivity, and environmental impacts remain. In conclusion, the safe and efficient use of thermal batteries requires advanced material technologies and optimized designs, with an emphasis on environmental sustainability and cost-effectiveness in future developments.

ISSN: 2979-9198

To Cite: Öztürk, O. (2024). Havacılıkta kullanılan ısıl (termal) pillerin risk analizi. *Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2(2), 105-115.

1. GİRİŞ

Pillerin tarihi, 1800'de Alessandro Volta tarafından tanıtılan ilk gerçek pil ile başlamıştır. "Pil" terimi ise ilk olarak 1749'da Benjamin Franklin tarafından kullanılmıştır. Franklin, Leyden kavanozlar kapasitörleri ile yaptığı deneylerde birden fazla kavanozları bağlayarak güç depolama yeteneklerini artırmıştır (Srivastava ve ark., 2023). Volta, bakır ve çinko plakalardan oluşan ve sabit bir akım üreten voltaik yığını icat etmiştir (Ali, 2023). Michael Faraday, 1834'te kimyasal reaksiyonların elektrotlar üzerindeki korozyon etkilerini vurgulayarak Volta'nın tükenmez enerji kavramına meydan okumuştur (Kumar ve Sarakonsri, 2022).

Bu tarihsel gelişmeler, enerji depolama ve elektrokimyasal reaksiyonların anlaşılmasında önemli ilerlemelere yol açmıştır. Zamanla kurşun-asit, nikel-kadmiyum, nikel-metal hidrit ve lityum iyon piller gibi çeşitli pil türleri geliştirilmiştir (Itton ve ark., 2023). Özellikle lityum iyon piller, yüksek enerji yoğunluğu, güç ve uzun ömürleri ile elektrikli araç endüstrisinde devrim yaratmıştır (Dennis ve Corrigan, 2022). Pil teknolojilerindeki gelişmeler, taşınabilir elektronik cihazlar ve yenilenebilir enerji sistemleri için enerji depolama çözümleri sağlamıştır (Gaddam ve Zhao, 2023).

Bir elektrik bataryası, elektrikli cihazları çalıştırmak için bir veya daha fazla elektrokimyasal hücreden oluşur. Güç sağlarken, katot pozitif terminal, anot ise negatif terminal olarak işlev görür. Bataryalar, redoks reaksiyonları aracılığıyla enerji sağlar ve bu enerji elektrik enerjisi olarak dış devreye iletilir (Pauling, 1988; Crompton, 2000). Günümüzde, "batarya" terimi tek hücreden oluşan cihazları da kapsayacak şekilde evrim geçirmiştir (Pistoia, 2005).

Piller havacılıkta çok önemli görevlere sahip olmalarının yanında modern uçaklarda ve İHA'larda birincil ve yedek güç kaynakları olarak hizmet vermektedir (Sun, 2023). Lityum iyon piller, İHA'lar ve eVTOL araçları gibi yeni nesil uçaklarda gerekli olan yüksek enerji yoğunluğu ve güvenilirlikleri nedeniyle tercih edilmektedir (Heit ve Liscouet-Hanke, 2023). Bununla birlikte, geleneksel yakıtlara kıyasla daha düşük enerji yoğunluğu gibi zorluklar devam etmektedir ve performans ve menzil yeteneklerini artırmak için pil teknolojilerindeki ilerlemeleri gerektirir (Chen-Glasser ve ark., 2022). Özellikle lityum tipi piller için yüksek rakımlardaki düşük çalışma sıcaklıkları nedeniyle termal yönetim kritiktir. Ayrıca, havacılık topluluğu, havacılık uygulamalarında pil güvenlik standartlarının ve termal yönetimin önemini vurgulayarak emisyon azaltma hedeflerini karşılamak için hibrit elektrikli uçakları aktif olarak araştırmaktadır. Bu zorlukların ele alınması ve sıkı güvenlik standartlarının sağlanması, pillerin havacılık sistemlerine başarılı bir şekilde entegrasyonu için çok önemlidir.

Isıl (termal) piller, özellikle acil durum ve askeri sistemlerde, yüksek güvenlik ve güvenilirlik gerektiren uçak uygulamalarında çok önemlidir (Li ve ark., 2023). Yüksek enerji yoğunluğu, anlık güç ve sıcaklık değişimlerine karşı dayanıklılık sunarlar, bu da onları ticari ve askeri uçaklardaki kritik sistemler için ideal kılar (Zdunich ve ark., 2023). Isıl piller aşırı koşullarda görevlerini yerine getirebilmektedirler, kimyasal reaksiyonlar yoluyla kesintisiz enerji sağlar, elektrik kesintileri veya düşük sıcaklıklar sırasında operasyonel güvenilirlik sağlarlar (Jiandong ve Shiqiang, 2023). Yüksek sıcaklıktaki ortamlarda işlev görme yetenekleri ve uzun raf ömürleri havacılıktaki çekiciliğini daha da artırarak uçuş güvenliğinin ve operasyonel güvenilirliğin artmasına katkıda bulunur (May ve ark., 2023). Isıl piller, bu özelliklerden yararlanarak uçaklarda güvenli ve verimli bir enerji kaynağı olarak hizmet ederek havacılık operasyonlarında genel güvenliği ve güvenilirliği güçlendirir.

Isıl piller, yüksek güç yoğunluğu ve güvenilirlik sunan enerji depolama çözümleri olarak öne çıkmaktadır. Bu piller, katı halde bulunan bir elektrolitin eriyik hale gelerek iyonik iletkenlik kazanması prensibiyle çalışır (İdin, 2018). Isıl piller, askeri ve havacılık uygulamalarında kritik enerji kaynakları olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, ısı pillerin yapısını, çalışma prensiplerini ve güç sistemlerindeki rollerini detaylı bir şekilde incelemek ve risk analizi yapmaktır. Ayrıca, ısı pillerin havacılık sektöründeki kritik rolü incelenmiştir.

Bu çalışmada, termal pillerin havacılık ve askeri uygulamalardaki kullanımını, yapısını, çalışma prensiplerini ve risklerini değerlendirmek amacıyla kapsamlı bir literatür taraması ve mevcut termal pil tasarımlarının risk analizi yapılmıştır. Araştırma kapsamında, termal pillerin tarihçesi, yapısı, çalışma prensipleri ve çeşitli uygulama alanları hakkında mevcut bilimsel literatür incelenmiş ve bu tarama, termal pillerin geliştirilmesi ve kullanımı üzerine yapılan önemli çalışmaların tespit edilmesini sağlamıştır. Termal pillerin kimyasal, operasyonel ve çevresel riskleri incelenmiş ve bu risklerin azaltılması için öneriler geliştirilmiştir. Bu metodoloji, termal pillerin çeşitli uygulamalardaki etkinliğini ve güvenliğini artırmak için kapsamlı bir değerlendirme sağlamıştır. Risk analizi yapılmış ve risk matrisi oluşturulmuştur. Bu elde edilen veriler ile gelecekteki araştırmalar, termal pil teknolojisinin

geliştirilmesine ve kullanımının genişletilmesine yönelik yeni malzeme ve tasarım stratejilerini araştırmaya devam etmelidir.

2. KAVRAMSAL TEMELLER

Isıl piller, kimyasal enerji depolama işlevi gören cihazlardır ve voltaik piller ile aynı işlevi yerine getirirler. Ancak, ısıl pillerin önemli bir farkı vardır: İnaktif pozisyonda olduklarından, kendi kendilerine deşarj olmaları mümkün değildir. Bu özellik, ısıl pillere yaklaşık 30 yıl gibi uzun bir raf ömrü sağlar. Güvenilir ürünlerdir ve aktive olmaları için iç sıcaklıklarının 600 °C gibi muazzam yüksek sıcaklıklara çıkarılması gerekir. Bu sebeple isimleri ısıl pil olmuştur. Isıl pillerin ilk üretimi, İkinci Dünya Savaşı sırasında Alman bilim insanları tarafından V2 roketleri için gerçekleştirilmiştir. Günümüzde ise bu piller, akıllı ve modern mühimmatların güç gereksinimlerini karşılamak amacıyla kullanılmaktadır. Boyutları, bir kalem pil kadar küçükten 2,5 litre gazlı içecek şişesi boyutuna kadar değişiklik gösterebilir. Bir ısıl pil, bir seyir füzusunun 20 dakikalık güç ihtiyacını karşılayacak şekilde tasarlanmıştır. Diğer pillere göre en önemli avantajları birim hacimde çok yüksek enerji üretmeleridir. Diğer ayırt edici önemli özellikleri ise geniş çevresel şartlarda çalışabilmeleridir. -54 °C derecede 20 seneden fazla saklanmaları ardından kullanıma alındıklarında ilk günkü performanslarını sergilerler. Çalışma sıcaklıkları +71 °C derecelere kadar çıkar. Aktif hale gelme süreleri 500 mili saniye mertebesinde. Yani ateşlenme süresinde anında pilota cevap verir. Bu özellikleri onun güvenilirliğini %99,99 seviyesine çıkarır (TÜBİTAK SAGE, 2024). Bu bilgileri bir özetlersek aşağıdaki açık verileri elde ederiz.

Isıl Pillerin Temel Kullanım Alanları:

- Füzeler
- Güdüm kitleri
- Akustik aldatıcı/yanıltıcılar
- Tapalar
- Gülümlü topçu mühimmatları
- Uçak koltuk fırlatma sistemleri

Isıl Pillerin Avantajları:

- Uzun raf ömrü (>20 yıl)
- Bakım gerektirmeme
- Hızlı tetikleme (<500 ms)
- Alternatif tetikleme yöntemleri (Elektriksel ateşleme, mekanik ateşleme, ataletsel ateşleme)
- Kendi kendine tükenmeme
- Yüksek enerji yoğunluğu
- Eşzamanlı çoklu güç verme
- Geniş çalışma sıcaklığı aralığı (-54°C/+71°C)
- Zorlu çevresel koşullara dayanıklılık
- Yüksek güvenilirlik (>%99.95)
- Özel tasarım

2.1. Isıl Pillerin Tarihçesi ve Literatür Taraması

Isıl pillerin tarihçesi, II. Dünya Savaşı döneminde başlamıştır. İlk olarak Alman bilim adamları tarafından V2 roketlerinde kullanılmak üzere tasarlanan bu piller, roketlerin egzoz ısısı ile aktif hale getiriliyordu. Isıl piller, yüksek sıcaklıklarda elektrolit olarak erimiş tuzların kullanıldığı ve ısıyla aktif hale getirilen piller olarak tanımlanmaktadır. Bu piller, özellikle askeri uygulamalarda kullanılmak üzere geliştirilmiştir ve çeşitli mühimmat cihazları, güdümlü füzeler, proximity füzeler, bazı torpidolar ve güdümlü bombalarda güç kaynağı olarak kullanılmaktadır.

Isıl pillerin temel özellikleri arasında yüksek güvenilirlik, sağlamlık ve dayanıklılık bulunmaktadır. Bu piller, yüksek şoklardan etkilenmezler ve hava geçirmez yapıları sayesinde bozulma olmadan 25 yıl ve daha uzun süre boyunca silah sistemlerinde kullanılabilirler. Aktif hale getirildiklerinde,

elektrokimyasal enerji tükenmediği ve elektrolitlerde donma meydana gelmediği sürece çalışmaya devam ederler (Guidotti ve Masset, 2006).

Isıl pillerin geliştirilmesinde önemli adımlardan biri, Fujiwara ve ark. (2011)'nin LiCl-LiBr ve LiF-LiBr ikili sistemlerine dayanan yeni üçlü veya dördü erimiş tuz sistemlerini geliştirmeleridir. Bu çalışmalar, ısıl pillerin performansını artırmaya yönelik önemli ilerlemeler sağlamıştır. Ayrıca, Butler ve ark. (2002) yüksek güç uygulamaları için bir ısıl pil geliştirmişler ve bu pilde katot olarak CoS₂, anot olarak LiSi ve elektrolit olarak Li tuzu kullanmışlardır (Fujiwara ve ark., 2011).

1990 yılında Kauffman ve Chagnon (1992), savaş uçaklarının elektronik paketlerine acil güç sağlamak için anot olarak LiAl ve katot olarak FeS₂ kullanan bir ısıl pil tasarlamışlardır. Bu pil, 853 Wh güce sahip olup, yüksek enerji yoğunluğu ve uzun süreli kullanım için tasarlanmıştır (Kauffman ve Chagnon, 1992).

Günümüzde, ısıl piller çeşitli boyutlarda ve şekillerde üretilmekte olup, radarlar ve nükleer silahların elektronik paketleri gibi hassas askeri uygulamalarda birincil güç kaynağı olarak kullanılmaktadır (Guidotti ve Masset, 2006).

Isıl piller, özellikle yüksek enerji yoğunluğu ve kompakt yapıları nedeniyle çeşitli uygulamalarda kullanımı artan enerji depolama sistemleridir. Bu çalışmada, ısıl pillerin farklı kimyasal malzemeler kullanılarak tasarlanması ve geliştirilmesine yönelik literatürdeki çalışmalar incelenmiştir. Fujiwara ve ark. (2011), simülasyon sistemleri kullanarak, ısıl pillerde elektrolit olarak kullanılan LiCl-LiBr ve LiF-LiBr ikili sistemlerine dayanan yeni üçlü veya dördü erimiş tuz sistemlerini geliştirmişlerdir. Bu çalışma, erimiş tuz sistemlerinin yüksek sıcaklık dayanımı ve kimyasal stabilitesi üzerine yoğunlaşmıştır.

Butler ve ark. (2002), yüksek güç uygulamalarında kullanılmak üzere bir ısıl pil geliştirmişlerdir. Bu çalışmanın temel amacı, güç gereksinimini karşılamak için seri ve paralel kombinasyonlar kullanarak bir ısıl pil modülü geliştirmektir. Katot olarak CoS₂, anot olarak LiSi ve elektrolit olarak Li tuzu kullanılmıştır.

Zimmerschied ve Gahl (2010), ısıl pillerde kullanılacak olan yüksek güç test standı modülü geliştirmişlerdir. Isıl pillerin yüksek özgül enerjileriyle kompakt darbeli güç uygulamalarında kullanılmakta olduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışmada, lityum-polimer kullanılarak özgül enerji ve güç değerleri incelenmiştir.

Guidotti ve ark. (1998), 5 dakikalık çalışma ömrü ile 180 kW gücünde bir ısıl pil tasarlamışlardır. Bu pilin, 12 inç boyunda, 4 inç çapında ve 4.792 kg ağırlığında olduğu belirtilmiştir. Testler sonucunda, pilin 43 kW'lık güçle 60 saniye ve 37 kW'lık güçle 300 saniye çalışabildiği belirtilmiştir.

Yapılan literatür taraması sonucunda, farklı kimyasal malzemelerin ısıl pil tasarımlarında kullanıldığı görülmüştür. Saf veya ötektik karışımlar şeklinde kullanılan bu malzemeler, ısıl pillerin performansını artırmakta önemli rol oynamaktadır. Fujiwara ve ark. (2009)'nın çalışmalarında LiF-LiBr-LI, LiF-NaBr-LI ve LiF-LiCl-LiBr-LI gibi iyodür tabanlı erimiş tuz sistemleri incelenmiş ve bu sistemlerin termofiziksel özellikleri belirlenmiştir.

Isıl pillerin gelişimi üzerine yapılan bu çalışmalar, çeşitli endüstriyel ve askeri uygulamalarda kullanılmak üzere önemli katkılar sağlamaktadır (Kauffman ve Chagnon, 1992).

2.2. Isıl Pillerin Temel Yapısı ve Çalışma Prensibi

Isıl piller, anoda, katoda, elektrolite ve bir piroteknik ısı kaynağına sahip hücrelerden oluşur. Isı kaynağı, elektroliti eriterek pilin iç sıcaklığını artırır ve gerekli kimyasal reaksiyonları başlatır (Faget, 2023). Bu piller, yüksek enerji yoğunluğu ve uzun raf ömrü gibi avantajlara sahiptir. Farklı tipte ısıl piller mevcuttur ve her biri farklı uygulama alanlarına yönelik özel özellikler sunar (İdin, 2018).

Isıl pillerde bir dizi elektrokimyasal sistem kullanılmaktadır. Tüm ısıl piller bir alkali anodu, bir ergimiş tuz olan elektroliti ve bir metal tuzu olan katodu kullanır. Ayrıca her bir hücre arasına yerleştirilen ve pilin aktif olmasını sağlayan piroteknik malzemeler kullanılmaktadır.

2.2.1. Anot malzemeleri

Isıl pil tasarımcıları ve üreticileri, pil performansının gereksinimlerine bağlı olarak çeşitli anot malzemeleri geliştirmiştir. Bu malzemeler arasında kalsiyum (Ca), alüminyum (Al), magnezyum (Mg) ve lityum (Li) bulunmaktadır. 1980'lere kadar genellikle kalsiyum anotlar kullanılmıştır. Lityum anotlar ise 1970'lerden sonra yaygın olarak kullanılmaya başlanmış ve lityum alüminyum (LiAl) ve lityum silisyum (LiSi) alaşımları da yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu alaşımlar, yüksek sıcaklıklarda dahi dayanıklıdır ve elektrolitlerle iyi uyum sağlar (Guidotti ve Masset, 2006).

2.2.2. Katot malzemeleri

Isıl pillerde çeşitli katot malzemeleri kullanılır. Bunlar arasında kalsiyum kromat (CaCrO_4), potasyum dikromat ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$), potasyum kromat (K_2CrO_4), kurşun kromat (PbCrO_4), metal oksitler (V_2O_5 , WO_3) ve sülfürler (CuS , FeS_2 , CoS_2) bulunur. Bu malzemeler, elektrolitlerle kimyasal uyumlu olmalı ve yüksek sıcaklıklarda termal kararlılık göstermelidir. FeS_2 , 1978'den bu yana en yaygın kullanılan katot malzemelerinden biridir (Fujiwara ve ark., 2011).

2.2.3. Elektrolit malzemeleri

Isıl pillerde elektrolit olarak genellikle erimiş ötektik lityum klorür ve potasyum klorür (LiCl-KCl) karışımı kullanılır. Bu karışım, düşük erime noktası (352°C) ve yüksek iyonik iletkenlik gibi özellikleri sayesinde tercih edilir. Bromür içeren daha yeni elektrolit çeşitleri, pil ömrünü uzatmak ve iç direnci azaltarak akımı artırmak için kullanılmaktadır (Guidotti ve Masset, 2006).

2.2.4. Piroteknik ısı kaynakları

Isıl pillerde iki temel ısı kaynağı bulunur: ısıl kâğıt ve ısıl peletleri. Isıl kâğıt, zirkonyum (Zr) ve baryum kromat (BaCrO_4) tozları ile desteklenen bir bileşimdir. Isıl peletleri ise demir tozu (Fe) ve potasyum perklorat (KClO_4) karışımından oluşur. Isıl kâğıtlar, hızlı yanma hızlarına ve yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir. Isıl peletleri ise daha yavaş yanar ve daha yüksek ısıl kararlılığa sahiptir (Guidotti ve Masset, 2006).

2.2.5. Yalıtım malzemeleri

Isıl pillerde kullanılan yalıtım malzemeleri arasında seramik elyaf, cam elyaf ve yüksek sıcaklık polimerler bulunur. Bu malzemeler, pilin çevresel koşullardan etkilenmemesi ve ısıl performansının artırılması amacıyla kullanılır. Uzun ömürlü pillerde genellikle yüksek verimli ısı yalıtım malzemeleri tercih edilir (Guidotti ve Masset, 2006).

2.3. Isıl Pillerin Güç Sistemlerinde Kullanımı

Isıl piller, havacılık, uzay ve askeri uygulamalarda geniş bir kullanım alanına sahiptir. Özellikle güdümlü mühimmat, roketler ve uçak acil durum koltuk fırlatma sistemlerinde kullanılırlar (Cha ve ark., 2006; Kauffmann ve Chagnon, 1992). Isıl pillerin acil durum güç sistemlerindeki rolü, uçuş kontrol sistemlerinin kesintisiz güç ihtiyacını karşılamak açısından kritiktir. Diğer güç depolama çözümleriyle karşılaştırıldığında, Isıl pillerin yüksek enerji yoğunluğu ve hızlı aktivasyon özellikleri dikkat çeker (Faget, 2023).

Isıl piller, özellikle askeri uygulamalarda ve çeşitli güç sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu piller, yüksek enerji yoğunlukları, güvenilirlikleri ve dayanıklılıkları ile bilinir. Tablo 1'de, ısıl pillerin güç sistemlerindeki kullanımına dair detaylı bilgiler verilmiştir.

**Tablo 1.** Isıl pillerin güç sistemlerindeki kullanımı

Kullanım Alanı	Açıklama
Askeri Uygulamalar	Mühimmat Cihazları: Isıl piller, mühimmat cihazlarında güç kaynağı olarak kullanılır. Bu cihazlar, yüksek şok dayanıklılığı ve uzun ömürleri nedeniyle ısıl pilleri tercih eder (Guidotti ve Masset, 2006).
	Güdümlü Füzeler: Güdümlü füze sistemlerinde, ısıl piller ani enerji ihtiyacını karşılayarak sistemin çalışmasını sağlar (Guidotti ve Masset, 2006).
	Proximity Füzeler: Bu tür füzelerde, ısıl piller, hedefe yaklaşma sırasında ihtiyaç duyulan enerjiyi sağlar (Guidotti ve Masset, 2006).
Uzay ve Havacılık	Torpedo ve Güdümlü Bombalar: Bu silah sistemlerinde ısıl piller, güvenilir güç kaynağı olarak kritik bir rol oynar (Guidotti ve Masset, 2006).
	Uzay Uçuşları: ısıl piller, uzay uçuşlarında elektronik cihazların güç kaynağı olarak kullanılır. Yüksek güvenilirlikleri ve uzun ömürleri sayesinde uzay görevlerinde tercih edilir (Guidotti ve Masset, 2006). Askeri Uçaklar: Hidrolik sistemler için acil yedek güç kaynağı olarak ısıl piller kullanılır. Bu piller, yüksek güvenilirlikleri nedeniyle kritik sistemlerde tercih edilir (Guidotti ve Masset, 2006).
Petrol ve Doğal Gaz Arama	Sondaj Takımları: Petrol ve doğal gaz arama kuyularında kullanılan sondaj takımlarına güç sağlamak için ısıl piller kullanılır. Bu piller, yüksek sıcaklık ortamlarında çalışabilir ve güvenilir güç kaynağı sağlar (Guidotti ve ark., 2008).
Elektronik Paketler	Radarlar ve Nükleer Silahlar: Isıl piller, radar sistemleri ve nükleer silahların elektronik paketleri için birincil güç kaynağı olarak kullanılır. Bu piller, uzun süreli depolama kapasitesi ve yüksek güvenilirlik sunar (Guidotti ve Masset, 2006).

2.4. Isıl Pil Tabanlı Güç Sistemlerinin Tasarımı ve Optimizasyonu

Isıl pil tabanlı güç sistemlerinin mimari tasarımı, yüksek verimlilik ve güvenilirlik sağlamak amacıyla dikkatlice planlanmalıdır. Tasarım stratejileri arasında pil performansını artırmak için termal yönetim sistemlerinin entegrasyonu ve hücre yapısının optimize edilmesi yer alır (Yıldız, 2021). Güç sistemi verimliliğini artırmak için çeşitli optimizasyon yöntemleri kullanılabilir, bu da sistemin genel performansını ve dayanıklılığını iyileştirir (Cha ve ark., 2006).

Isıl pil tabanlı güç sistemlerinin tasarımı ve optimizasyonu, yüksek enerji yoğunluğu, güvenilirlik ve dayanıklılık gerektiren çeşitli uygulamalarda önem kazanmaktadır. Aşağıda, ısıl pil tabanlı güç sistemlerinin tasarımı ve optimizasyonuna dair detaylı bilgiler verilmiştir.

2.4.1. Tasarım ve Optimizasyon

2.4.1.1. Anot ve katot seçimi:

Anot Malzemeleri: Anot seçiminde, kalsiyum (Ca), alüminyum (Al), magnezyum (Mg) ve lityum (Li) gibi metaller kullanılmaktadır. Lityum alüminyum (LiAl) ve lityum silisyum (LiSi) alaşımları, yüksek sıcaklık dayanıklılığı ve elektrolitlerle iyi uyum sağladığı için tercih edilmektedir (Guidotti ve Masset, 2006).

Katot Malzemeleri: Kalsiyum kromat (CaCrO_4), potasyum dikromat ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$), kurşun kromat (PbCrO_4) gibi metal tuzları, kobalt disülfür (CoS_2) ve demir disülfür (FeS_2) gibi sülfidler yaygın olarak kullanılır. FeS_2 , yüksek enerji yoğunluğu ve termal kararlılığı nedeniyle tercih edilmektedir (Masset ve Guidotti, 2008).

2.4.1.2. Elektrolit malzemeleri:

Termal pillerde elektrolit olarak genellikle erimiş ötektik lityum klorür ve potasyum klorür (LiCl-KCl) karışımı kullanılır. Bu karışım, düşük erime noktası (352°C) ve yüksek iyonik iletkenlik gibi özellikleri sayesinde tercih edilir (Masset ve Guidotti, 2008).

Daha düşük erime noktalarına sahip bromür içeren elektrolit çeşitleri, pil ömrünü uzatmak ve iç direnci azaltarak akımı artırmak için kullanılır (Fujiwara ve ark., 2011).

2.4.1.3. Isıtıcı ve yalıtım malzemeleri:

Isıtıcı Malzemeler: Termal pillerin aktive edilmesi için genellikle zirkonyum (Zr) ve baryum kromat ($BaCrO_4$) tozlarından oluşan ısıl kâğıt veya demir tozu (Fe) ve potasyum perklorat ($KClO_4$) karışımından oluşan ısı peletleri kullanılır (Guidotti ve Masset, 2006).

Yalıtım Malzemeleri: Seramik elyaf, cam elyaf ve yüksek sıcaklık polimerleri gibi malzemeler, pilin çevresel koşullardan etkilenmemesi ve ısıl performansının artırılması amacıyla kullanılır (Guidotti ve Masset, 2006).

2.4.1.4. Tasarım optimizasyonu:

Simülasyon ve Modelleme: PHOENICS paket programı gibi simülasyon araçları kullanılarak termal pillerin tasarımı optimize edilir. Bu simülasyonlar, farklı elektrolit, anot ve katot malzemelerinin performansını değerlendirmek için kullanılır. Bu sayede, elektrolit kalınlığı, malzeme seçimi ve pilin geometrik yapısı optimize edilebilir (de Freitas ve ark., 2008).

Nano Katkılar: Elektrolitlere yapılan nano katkıları, pilin aktif ömrünü uzatmak ve termofiziksel özelliklerini iyileştirmek için kullanılır. Örneğin, %1 SiO_2 nano parçacık katkısı, elektrolit ömrünü uzatmıştır (Masset ve Guidotti, 2008).

2.5. Uygulama Örnekleri ve Test Sonuçları

Termal pil tabanlı güç sistemlerinin gerçek dünya uygulamaları, laboratuvar ve saha testleri ile doğrulanmıştır. Bu testler, sistemlerin dayanıklılığı ve uzun vadeli performansını değerlendirmek için kritiktir. Örneğin, T-50 Golden Eagle savaş uçağında kullanılan termal piller, uçuş kontrol sistemlerinin kesintisiz çalışmasını sağlamaktadır (Cha ve ark., 2006). Laboratuvar testleri, bu pillerin yüksek sıcaklıklarda bile stabil performans gösterdiğini kanıtlamıştır (Faget, 2023).

2.6. Gelecek İçin Gelişim ve Yönlendirmeler

Termal pil teknolojisinin gelecekteki potansiyeli oldukça yüksektir. Bu pillerin performansını ve verimliliğini artırmak için yeni malzemelerin kullanımı ve daha gelişmiş termal yönetim sistemlerinin entegrasyonu önerilmektedir (Kauffmann ve Chagnon, 1992). Ayrıca, ileri araştırma alanları arasında pil ömrünün uzatılması ve enerji yoğunluğunun artırılması yer almaktadır.

Termal pil teknolojisinin gelecekteki gelişimi ve yönlendirmeleri, enerji yoğunluğu, güvenilirlik ve çevresel sürdürülebilirlik gibi kritik faktörler göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmektedir. Aşağıda, termal pil tabanlı güç sistemlerinin gelecekteki gelişimi ve yönlendirmelerine dair detaylı bilgiler verilmiştir.

2.6.1. Malzeme biliminde ilerlemeler

Gelişmiş Elektrolitler: Gelecekte, daha düşük erime noktalarına sahip ve daha yüksek iletkenlik sunan yeni elektrolit malzemelerinin geliştirilmesi üzerinde çalışılmaktadır. Özellikle bromür içeren elektrolitler, pil ömrünü uzatmak ve iç direnci azaltmak için kullanılmaktadır. Örneğin, LiBr-KBr-LiF ve LiCl-LiBr-KBr gibi karışımların kullanımı yaygınlaşmaktadır (Fujiwara ve ark., 2011).

Nano Malzemeler: Elektrolitlere yapılan nano katkıları, pilin termofiziksel özelliklerini iyileştirmekte ve aktif ömrünü uzatmaktadır. Örneğin, %1 SiO_2 nano parçacık katkısı, elektrolit ömrünü uzatmaktadır (Guidotti ve Masset, 2006).

2.6.2. Tasarım ve simülasyon teknikleri

PHOENICS Paket Programı: Termal pil modüllerinin tasarım ve optimizasyonunda PHOENICS gibi simülasyon araçları kullanılarak, farklı elektrolit, anot ve katot malzemelerinin performansı değerlendirilmektedir. Bu simülasyonlar, elektrolit kalınlığı, malzeme seçimi ve pilin geometrik yapısının optimize edilmesine yardımcı olmaktadır (de Freitas ve ark., 2008).



Yüksek Güç Uygulamaları: Yüksek güç gereksinimlerini karşılamak için seri ve paralel kombinasyonlar kullanılarak termal pil modüllerinin geliştirilmesi üzerinde çalışmalar devam etmektedir. Bu tür modüller, özellikle askeri ve uzay uygulamalarında önemlidir (Butler ve ark., 2008).

2.6.3. Uygulama alanlarının genişletilmesi

Yenilenebilir Enerji: Termal pillerin yenilenebilir enerji kaynakları ile entegre edilmesi, enerji depolama çözümleri sunarak güneş ve rüzgâr enerjisi sistemlerinde kullanımı yaygınlaşmaktadır. Bu, enerji depolama kapasitesini artırmayı ve çevresel sürdürülebilirliği desteklemeyi amaçlamaktadır (Gaddam ve Zhao, 2023).

Taşınabilir Elektronikler ve Elektrikli Araçlar: Termal piller, taşınabilir elektronik cihazlar ve elektrikli araçlar gibi ticari uygulamalarda da kullanılmaktadır. Özellikle lityum iyon pillerin yüksek enerji yoğunluğu ve uzun ömürleri, bu tür uygulamalarda termal pillerin kullanımını teşvik etmektedir (Dennis ve Corrigan, 2022).

2.6.4. Çevresel ve ekonomik faktörler

Geri Dönüşüm ve Sürdürülebilirlik: Gelecekte, termal pillerin geri dönüşümü ve çevresel etkilerinin azaltılması üzerine çalışmalar yoğunlaşacaktır. Daha çevre dostu ve sürdürülebilir malzemelerin kullanımı, bu pil teknolojisinin geniş çapta benimsenmesini destekleyecektir (Guidotti ve ark., 2008).

Maliyet Etkinliği: Termal pillerin üretim maliyetlerinin düşürülmesi, bu teknolojinin daha yaygın kullanılmasını sağlayacaktır. Gelişmiş üretim teknikleri ve malzeme bilimi, maliyet etkinliğinin artırılmasında önemli rol oynayacaktır (Kocher ve ark., 2024).

3. RİSK ANALİZİ

3.1. Termal Pillerin Risk Analizi

Termal piller, özellikle yüksek enerji yoğunluğu ve uzun ömürlülük gerektiren uygulamalarda kullanıldıkları için bazı riskler taşır. Bu riskler hem kimyasal hem de operasyonel riskleri kapsar. Aşağıda, termal pillerin risk analizi detaylı bir şekilde ele alınmıştır:

3.1.1. Kimyasal riskler

Elektrolitlerin Zehirliliği ve Reaktivitesi:

Termal pillerde kullanılan elektrolitler genellikle erimiş tuzlar gibi kimyasallar içerir. Bu maddeler, insan sağlığı için toksik olabilir ve ciltle temas ettiğinde veya solunduğunda ciddi sağlık sorunlarına yol açabilir (Guidotti ve Masset, 2006).

Elektrolitlerin yüksek reaktivitesi, özellikle hava veya nem ile temas ettiğinde yangın veya patlama riski oluşturabilir. Bu nedenle, elektrolitlerin saklanması ve taşınması özel önlemler gerektirir (Fujiwara ve ark., 2011).

Anot ve Katot Malzemeleri:

Anot ve katot malzemeleri, yüksek sıcaklıklarda stabil olmalıdır. Ancak, bazı metaller yüksek sıcaklıklarda reaktif hale gelebilir ve bu da pilin güvenliğini tehlikeye atabilir. Örneğin, lityum bazlı anotlar yüksek reaktiviteye sahiptir ve yangın riski taşır (Masset ve Guidotti, 2008).

3.1.2. Operasyonel riskler

Isıl Yönetim:

Termal pillerin çalışması için gerekli yüksek sıcaklık, termal yönetim zorluklarını beraberinde getirir. Isının düzgün bir şekilde dağıtılmaması, pilin aşırı ısınmasına ve potansiyel olarak patlamasına yol açabilir. Bu nedenle, termal yönetim sistemlerinin etkinliği kritik öneme sahiptir (de Freitas ve ark., 2008).

Aktivasyon ve Deaktivasyon Prosesleri:

- Termal piller genellikle piroteknik malzemelerle aktive edilir. Bu malzemelerin kullanımı, yangın ve patlama riski taşır ve dikkatli bir şekilde yönetilmelidir. Aynı şekilde, pilin kullanım ömrü sonunda güvenli bir şekilde devre dışı bırakılması önemlidir (Guidotti ve Masset, 2006).

3.1.3. Çevresel riskler**Atık Yönetimi:**

Termal pillerin ömrünü tamamladıktan sonra çevreye zararlı atıklar oluşturma riski vardır. Bu atıkların uygun şekilde bertaraf edilmemesi, toprak ve su kaynaklarının kirlenmesine neden olabilir. Bu nedenle, geri dönüşüm ve atık yönetimi süreçlerinin etkin bir şekilde uygulanması gereklidir (Kocher ve ark., 2024).

Üretim Süreci:

Termal pillerin üretim süreci de çevresel riskler taşır. Üretim sırasında açığa çıkan zararlı kimyasallar ve gazlar, çevresel kirliliğe neden olabilir. Bu nedenle, üretim süreçlerinin çevre dostu hale getirilmesi önemlidir (Guidotti ve ark., 2008).

3.2. Risk Matrisi**Kimyasal Riskler:**

- Elektrolitlerin zehirliliği ve reaktivitesi (Yangın ve patlama riski)
- Anot ve katot malzemelerinin reaktivitesi (Lityum bazlı anotların yangın riski)

Operasyonel Riskler:

- Isıl yönetim sorunları (Aşırı ısınma ve patlama riski)
- Aktivasyon ve deaktivasyon süreçleri (Piroteknik malzeme kullanımıyla yangın riski)

Çevresel Riskler:

- Atık yönetimi (Çevre kirliliği ve su kaynaklarının kirlenmesi)
- Üretim sürecindeki çevresel riskler (zararlı kimyasallar ve gazların açığa çıkması)

Termal pillerin risk analizini 1 ile 5 arasında puanlanarak önceki araştırmacılar tarafından oluşturulan risk matrisi sunulmuştur. Olasılık ve şiddet puanlarını çarpıp toplam risk puanlarını hesapladım. En yüksek risk puanı olan alanlar özellikle elektrolit zehirliliği, reaktivitesi ve piroteknik aktivasyon süreçleridir (Tablo 2).

Tablo 2. Risk Matrisi

Risk Kategorisi	Olasılık (Puan)	Şiddet (Puan)	Risk Puanı	Önerilen Aksiyonlar	Araştırmacılar
Elektrolitlerin Zehirliliği ve Reaktivitesi	5	5	25	Özel saklama önlemleri ve güvenlik ekipmanları kullanımı	Guidotti ve Masset (2006); Fujiwara ve ark (2011)
Anot ve Katot Malzemeleri (Yangın Riski)	4	4	16	Yüksek sıcaklıkta stabil malzemeler kullanılması	Masset ve Guidotti (2008)
Isıl Yönetim (Aşırı Isınma ve Patlama Riski)	4	4	16	Etkili ısıl yönetim sistemlerinin uygulanması	de Freitas ve ark. (2008)
Aktivasyon ve Deaktivasyon (Piroteknik Malzeme)	5	5	25	Piroteknik malzemelerin güvenli bir şekilde yönetilmesi	Guidotti ve Masset (2006)
Atık Yönetimi (Çevre Kirliliği)	2	3	6	Geri dönüşüm ve atık yönetim süreçlerinin geliştirilmesi	Kocher ve ark. (2024)
Üretim Sürecindeki Çevresel Riskler	3	3	9	Çevre dostu üretim süreçlerinin uygulanması	Guidotti ve ark. (2008)

5. SONUÇLAR

Bu çalışma, termal pillerin havacılık ve askeri uygulamalardaki kritik önemini ve bu alandaki zorlukları kapsamlı bir şekilde ele almaktadır. Termal piller, yüksek enerji yoğunluğu, güvenilirlik ve dayanıklılık özellikleri nedeniyle özellikle acil durum ve yüksek performans gerektiren sistemlerde tercih edilmektedir. Çalışmada, termal pillerin yapısı, çalışma prensipleri ve güç sistemlerindeki rollerinin detaylı bir incelemesi yapılmış, ayrıca kimyasal, operasyonel ve çevresel riskler analiz edilmiştir.

Termal pillerin güvenli ve verimli kullanımı için ileri malzeme teknolojilerinin ve optimize edilmiş tasarımların gerekliliği vurgulanmıştır. Literatürdeki çalışmalar, farklı kimyasal malzemelerin ve elektrolit sistemlerinin termal pillerin performansını nasıl etkilediğini ortaya koymuştur. Bulgular, termal pillerin havacılık ve askeri uygulamalarda, özellikle yüksek rakımlardaki düşük çalışma sıcaklıklarında termal yönetimin kritik olduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, termal pillerin başarılı bir şekilde entegre edilebilmesi için dikkatli bir tasarım ve sıkı güvenlik standartları gerekmektedir. Gelecekte, çevresel sürdürülebilirlik ve maliyet etkinliği gibi faktörler de göz önünde bulundurularak termal pil teknolojisinin daha geniş çapta benimsenmesi hedeflenmelidir. İleri araştırmalar ve yenilikçi yaklaşımlar, termal pillerin performansını ve güvenliğini artırmada önemli bir rol oynayacaktır. Bunun yanında yeni nesil ısı pil tasarımları için nano malzeme katkılarının potansiyeli üzerine daha fazla araştırma yapılmasına ihtiyaç duyulabilir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarı herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Araştırma tek yazar olan Ozan Öztürk tarafından yapılmıştır.

Kaynaklar

- Ali, S. (2023). Electrochemical devices: History of electrochemistry. doi: 10.1016/b978-0-323-96022-9.00022-0.
- Butler, P., Guidotti, R.A., Moya, L., Reinhardt, F., & Peterkin, F. (2002). High power thermal battery development. In *Power Modulator Symposium, 2002 and 2002 High-Voltage Workshop. Conference Record of the Twenty-Fifth International (pp. 1–4)*. IEEE.
- Cha, J., Choi, D., Park, S., Jung, K., & Lee, S. (2006). Advanced emergency power system using thermal battery for future aircraft. In *4th International Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit (IECEC)* (p. 4161).
- Chen-Glasser, M., & DeCaluwe, S. C. (2022). A review on the socio-environmental impacts of lithium supply for electric aircraft. *Frontiers in Aerospace Engineering, 1*, 1058940.
- Crompton, T. R. (2000). Battery Reference Book (3rd ed.). Newnes. p. Glossary 3. ISBN 978-0-08-049995-6.
- Dennis, A., & Corrigan, D.A. (2022). Electric Vehicle Batteries: Past, Present, and Future. *The Electrochemical Society Interface, 31*(3), 63.
- de Freitas, F., Peixoto, F., & Vianna Jr, A. D. S. (2008). Simulation of a thermal battery using Phoenix (R). *Journal of Power Sources, 179*(1), 424-429.
- Fujiwara, S., Inaba, M., & Tasaka, A. (2011). New molten salt systems for high temperature molten salt batteries: Ternary and quaternary molten salt systems based on LiF–LiCl, LiF–LiBr, and LiCl–LiBr. *Journal of Power Sources, 196*, 4012–4018.
- Fujiwara, S., Kato, F., Watanabe, S., Inaba, M., & Tasaka, A. (2009). New iodide-based molten salt systems for high temperature molten salt batteries. *Journal of Power Sources, 194*, 1180–1183.
- Faget, L. (2023). 1. Thermal Batteries as Power Sources for Space Applications. In *2023 13th European Space Power Conference (ESPC)* (pp. 1-3). IEEE.
- Gaddam, R., & Zhao, X. S. (2023). Handbook of Sodium-Ion Batteries Materials and Characterization, Rechargeable Ion Batteries. Singapore: Jenny Stanford Publishing.
- Guidotti, R. A., & Masset, P. (2006). Thermally activated (“thermal”) battery technology: Part I: An overview. *Journal of Power Sources, 161*(2), 1443–1449.

- Guidotti, R. A., & Masset, P. J. (2008). Thermally activated (“thermal”) battery technology: Part IV. Anode materials. *Journal of Power Sources*, 183(1), 388-398.
- Guidotti, R.A., Scharrer, G.L., Binasiwicz, E., & Reinhardt, F.W. (1998). Feasibility of an 8kW/kg, 5-minute thermal battery. *IEEE*, 0-7803-4245-5/98.
- Heit, Z., & Liscouet-Hanke, S. (2023). Estimation of Battery Pack Layout and Dimensions for the Conceptual Design of Hybrid-Electric Aircraft, In *AIAA SCITECH 2023 Forum* (p. 1362).
- Iton, Z. W. B., Kim, S. S., Patheria, E. S., Qian, M. D., Ware, S. D., & See, K. A. (2023). Battery materials. In J. Reedijk & K. R. Poeppelmeier (Eds.), *Comprehensive Inorganic Chemistry III* (3rd ed., pp. 308-363). Elsevier.
- İdin, Ş. (2018). GÜDÜMLÜ MÜHİMMATIN KALBI: ISIL PİL. *Bilim ve Teknik*, 26-29.
- Jiandong, C., & Shiqiang, Z. (2023). The battery cooling design and simulation study in multirotor eVTOL aircraft. In *Proceedings of the 79th Annual Vertical Flight Society Forum and Technology Display, FORUM 79* (pp. 934-939). Vertical Flight Society.
- Kauffman, S., & Chagnon, G. (1992). Thermal battery for aircraft emergency power. *IEEE*, 0-7803-0552-3/92.
- Kocher, J. D., Woods, J., Odukomaiya, A., & Yee, S. K. (2024). Thermal batteries cost scaling analysis minimizing the cost per kWh. *Energy & Environmental Science*, 17(2).
- Kumar, R. V., & Sarakonsri, T. (2022). Introduction to electrochemical cells. In *Rechargeable Ion Batteries* (Chapter 1).
- Masset, P.J., & Guidotti, R.A. (2008). Thermal activated (“thermal”) battery technology Part IIIa: FeS₂ cathode material. *Journal of Power Sources*, 177, 595–609.
- Pauling, L. (1988). *General Chemistry*. Dover Publications, Inc. p. 539. ISBN 978-0-486-65622-9.
- Pistoia, G. (2005). *Batteries for Portable Devices*. Elsevier. p. 1. ISBN 978-0-08-045556-3.
- Srivastava, V., Rantala, V., Mehdipour, P., Kauppinen, T., Tuomikoski, S., Heponiemi, A., Runtti, H., Tynjälä, P., Simões Dos Reis, G., & Lassi, U. (2023). A comprehensive review of the reclamation of resources from spent lithium-ion batteries. *Chemical Engineering Journal*, 474, Article 145822.
- Sun, H. (2023). Batteries on aircrafts: Challenges & Expectations. *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 32, 115-121.
- TÜBİTAK SAGE. (2024). Savunma Sanayii Araştırma ve Geliştirme Enstitüsü Pil Teknolojileri Birimi. (Erişim tarihi: 08.06.2024).
- Li, W., Zhou, Y., Zhang, H., & Tang, X. (2023). A review on battery thermal management for new energy vehicles. *Energies*, 16(13), 4845.
- Yıldız, M. (2021). Battery management system architectures for unmanned air vehicles: A strategic issue. *Journal of Anadolu Strategy*, 1, 1-12.
- Zdunich, P., Crain, A. D., Gibney, E., Hernandez, M., Recoskie, S., MacRae, N., Jang, D., Tang, J., & Naboka, O. (2023). Experimental validation of a module-level battery safety system for thermal runaway containment. In *Electrical Energy Generation, Storage, & Management I (AIAA 2023-3988)*.
- Zimmerschied, K., & Gahl, J. (2010). Modulated high power thermal battery test stand. *IEEE*, 978-1-4244-7129-4/10.